



กรมพัฒนาพลังงานทดแทน
และอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน



คู่มือผู้เรียน
สาขาวิชาไฟฟ้า
ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)
หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง พุทธศักราช 2557
สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา

1. วิชาเครื่องปรับอากาศอุตสาหกรรม
2. วิชาการออกแบบระบบไฟฟ้า
3. วิชาระบบควบคุมในงานอุตสาหกรรม
4. วิชาเครื่องกลไฟฟ้า 1
5. วิชาเครื่องกลไฟฟ้า 2

โครงการพัฒนาหลักสูตรการอนุรักษ์พลังงาน
และพลังงานทดแทน
สำหรับสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา

คู่มือผู้เรียน

สาขาวิชาไฟฟ้า

ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)

หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง พุทธศักราช 2557
สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา

วิชาเครื่องปรับอากาศอุตสาหกรรม	(3104-2007)
วิชาการออกแบบระบบไฟฟ้า	(3104-2002)
วิชาระบบควบคุมในงานอุตสาหกรรม	(3104-2006)
วิชาเครื่องกลไฟฟ้า 1	(3104-2003)
วิชาเครื่องกลไฟฟ้า 2	(3104-2102)

โครงการพัฒนาหลักสูตรการอนุรักษ์พลังงาน
และพลังงานทดแทน
สำหรับสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา
โดย กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
เมษายน 2558

คำนำ

โครงการพัฒนาหลักสูตรการอนุรักษ์พลังงานและพลังงานทดแทนสำหรับสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา เป็นโครงการความร่วมมือระหว่างกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (มจพ.) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ ปรับปรุง พัฒนา Simulation Program หรือ สื่อ e-learning และสื่อการสอน ชุดคู่มือผู้สอน ชุดคู่มือผู้เรียน ด้านไฟฟ้าและด้านเครื่องกลที่ใช้สำหรับประกอบการเรียนการสอนในสาขาช่างอุตสาหกรรม (ที่เกี่ยวข้องกับพลังงาน) สำหรับสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษาสำหรับใช้สอนนักเรียน นักศึกษาอาชีวศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) และระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) โดยสอดคล้องกับหลักสูตรของอาชีวศึกษาที่พัฒนาขึ้นใหม่และไม่เป็นภาระแก่ครูผู้สอน และเพื่อทดสอบหลักสูตรและสื่อที่พัฒนาขึ้นให้กับครูผู้สอนที่ได้รับการคัดเลือกจากสถาบันการอาชีวศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) และระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)

การดำเนินการโครงการมีกระบวนการในการพิจารณาคัดเลือกรายวิชาในหลักสูตรระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) พุทธศักราช 2556 ในสาขาวิชาช่างยนต์และสาขาวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง และในหลักสูตรระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) พุทธศักราช 2557 ในสาขาวิชาเทคนิคเครื่องกลและสาขาวิชาไฟฟ้า อีกทั้งมีการดำเนินการพิจารณาคัดเลือกหน่วยวิชา จัดทำและพัฒนาสื่อการเรียนการสอน คู่มือผู้สอน คู่มือผู้เรียน และคู่มือ ทดสอบและปรับปรุงจนสำเร็จเรียบร้อย

การดำเนินโครงการในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยความร่วมมือจากหลายๆ หน่วยงาน ทั้งกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (มจพ.) สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา (สอศ.) รวมทั้งผู้เชี่ยวชาญและคณาจารย์จากสถานศึกษาอาชีวศึกษา ที่ได้ร่วมกันพิจารณาและปรับปรุงจนสื่อการเรียนการสอนและคู่มือต่างๆ มีความครบถ้วนสมบูรณ์

เมษายน 2558



สารบัญ

หน้า

คำนำ

สารบัญ

i

รายวิชาที่ 1 : เครื่องปรับอากาศอุตสาหกรรม

1. จุดประสงค์สาขาวิชา	1-ก
2. แผนการจัดการเรียนรู้	1-ข
3. หน่วยการสอน	1-ค
4. เกณฑ์การประเมินผล	1-ง
5. ใบสาระการเรียนรู้	1-1
6. การแช่เยือกแข็งอาหาร	1-2
7. ห้องเย็นหรือห้องแช่แข็งอาหาร	1-8
8. เครื่องปรับอากาศขนาดใหญ่	1-10
9. เครื่องปรับอากาศแบบчилเลอร์	1-13
10. เครื่องปรับอากาศแบบчилเลอร์ชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ	1-14
11. เครื่องปรับอากาศแบบчилเลอร์ชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ	1-16
12. เครื่องปรับอากาศแบบกักเก็บน้ำแข็ง	1-17
13. สมรรถนะของเครื่องทำน้ำเย็นในระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์	1-18
14. วิธีการและแนวทางการประหยัดพลังงานของระบบทำความเย็น	1-20
15. แบบประเมินผลการเรียน	1-37

รายวิชาที่ 2 : การออกแบบระบบไฟฟ้า

1. จุดประสงค์สาขาวิชา	2-ก
2. แผนการจัดการเรียนรู้	2-ข
3. หน่วยการสอน	2-ค
4. เกณฑ์การประเมินผล	2-ง
5. ใบสาระการเรียนรู้	2-1
6. วิธีการออกแบบระบบไฟฟ้า	2-2
7. มาตรฐาน กฎและระเบียบ ในการออกแบบระบบไฟฟ้า	2-4
8. หลักเกณฑ์ในการออกแบบระบบไฟฟ้า	2-5
9. ระบบไฟฟ้าภายในอาคาร	2-6
10. วิธีการเดินสายไฟฟ้าภายในอาคาร	2-7
11. การจ่ายไฟฟ้า ขนาดเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้า และการคำนวณโหลดสำหรับอาคารชุด	2-8
12. การคำนวณโหลดเพื่อหาขนาดของสายป้อนและเครื่องป้องกันกระแสเกิน	2-13
13. การคำนวณโหลดเพื่อหาขนาดของหม้อแปลง	2-18
14. แนวทางการลดการสูญเสียในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าในอาคารชุด	2-20
15. แบบประเมินผลการเรียน	2-34



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
รายวิชาที่ 3 : ระบบควบคุมในงานอุตสาหกรรม	
1. จุดประสงค์สาขาวิชา	3-ก
2. แผนการจัดการเรียนรู้	3-ข
3. หน่วยการสอน	3-ค
4. เกณฑ์การประเมินผล	3-ง
5. ใบสาระการเรียนรู้	3-1
6. การออกแบบโปรแกรม	3-2
7. การประยุกต์ใช้งานกับงานควบคุมมอเตอร์	3-22
8. การประยุกต์ใช้งานกับงานนิวเมติกส์ไฟฟ้า	3-39
9. การประยุกต์ใช้งานกับระบบจำลองการทำงาน	3-47
10. เฉลยแบบประเมินผลการเรียน	3-64
 รายวิชาที่ 4 : เครื่องกลไฟฟ้า 1	
1. จุดประสงค์สาขาวิชา	4-ก
2. แผนการจัดการเรียนรู้	4-ข
3. หน่วยการสอน	4-ค
4. เกณฑ์การประเมินผล	4-ง
5. ใบสาระการเรียนรู้	4-1
6. แม่เหล็ก	4-2
7. แม่เหล็กไฟฟ้า	4-5
8. วงจรแม่เหล็ก	4-12
9. โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า	4-37
10. หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ	4-42
11. สมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลงไฟฟ้า	4-48
12. หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานจริง	4-53
13. ความต้านทานสมมูลย์	4-78
14. เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล	4-81
15. ความต้านทานและรีแอกแตนซ์สมมูลย์	4-82
16. วงจรสมมูลย์ในหม้อแปลงไฟฟ้า	4-94
17. โวลต์เตจเรกกูเลชั่น	4-102
18. การสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า	4-110
19. การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	4-113
20. ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า	4-121
21. ขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส	4-129



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
22. การขนานหม้อแปลงไฟฟ้า	4-131
23. หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส	4-144
24. การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส	4-145
25. ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าหลัก	4-155
26. แบบประเมินผลการเรียน	4-161
รายวิชาที่ 5 : เครื่องกลไฟฟ้า 2	
1. จุดประสงค์สาขาวิชา	5-ก
2. แผนการจัดการเรียนรู้	5-ข
3. หน่วยการสอนทฤษฎี	5-ค
4. หน่วยการสอนปฏิบัติ	5-ค
5. เกณฑ์การประเมินผล	5-ง
6. ใบสาระการเรียนรู้	5-1
7. โครงสร้างและสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์สามเฟส	5-2
8. สลิป ความถี่ และกระแสที่โรเตอร์	5-6
9. วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	5-13
10. แรงบิด	5-19
11. สมการของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ	5-30
12. แบบประเมินผลการเรียน	5-44



กรมพัฒนาพลังงานทดแทน
และอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน



โครงการพัฒนาลักสูตรการอนุรักษ์พลังงานและพลังงานทดแทน
สำหรับสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา

รายวิชาที่ 1

เครื่องปรับอากาศอุตสาหกรรม รหัส 3104 – 2007
หน่วยที่ 8 เครื่องทำความเย็นและปรับอากาศขนาดใหญ่

หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง พุทธศักราช 2557
ประเภทวิชาอุตสาหกรรม
สาขาวิชาไฟฟ้า

.....

จุดประสงค์สาขาวิชา

1. เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ความรู้และทักษะด้านการสื่อสาร ทักษะการคิดและการแก้ปัญหา และทักษะทางสังคมและการดำรงชีวิตในการพัฒนาตนเองและวิชาชีพ
2. เพื่อให้มีความเข้าใจหลักการบริหารและจัดการวิชาชีพ การใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและหลักการของงานอาชีพที่สัมพันธ์เกี่ยวข้องกับการพัฒนาวิชาชีพไฟฟ้า ให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงและความก้าวหน้าของเศรษฐกิจ สังคมและเทคโนโลยี
3. เพื่อให้มีความเข้าใจในหลักการและกระบวนการทำงานในกลุ่มงานพื้นฐานประยุกต์ใช้ความรู้ทักษะประสบการณ์และเทคโนโลยีพัฒนางานอาชีพ วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ ด้วยทฤษฎีและปฏิบัติ การออกแบบ เขียนแบบและประมาณราคา
4. เพื่อให้สามารถออกแบบ วิเคราะห์ แก้ปัญหาในงานติดตั้ง ควบคุมระบบไฟฟ้า เครื่องทำความเย็นและปรับอากาศ
5. เพื่อให้สามารถปฏิบัติงานติดตั้ง ซ่อมบำรุง ทดสอบ ควบคุมระบบไฟฟ้า เครื่องทำความเย็นและปรับอากาศ
6. เพื่อให้สามารถปฏิบัติงานด้านเทคนิคในสถานประกอบการและประกอบอาชีพอิสระ รวมทั้งการใช้ความรู้และทักษะเป็นพื้นฐานในการศึกษาต่อในระดับสูงขึ้นได้
7. เพื่อให้มีเจตคติที่ดีต่องานอาชีพ มีความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ ซื่อสัตย์สุจริต มีระเบียบวินัย เป็นผู้มีความรับผิดชอบต่อสังคม สิ่งแวดล้อม ต่อต้านความรุนแรงและสารเสพติด

แผนการจัดการเรียนรู้

รหัสวิชา 3104-2007

ชื่อรายวิชา เครื่องปรับอากาศอุตสาหกรรม 2-3-3

ระดับชั้น ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง

สาขาวิชา ไฟฟ้า

ทฤษฎีรวม 2 คาบ

ปฏิบัติรวม 3 ชั่วโมง

3 หน่วยกิต

คำอธิบายรายวิชา

ศึกษาและปฏิบัติเกี่ยวกับหลักการปรับสภาวะอากาศ จากแผนภูมิไซโครเมตริก ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน แบบระเหยสารทำความเย็นโดยตรงและแบบน้ำเย็น การคำนวณโหลดความร้อนและเลือกชนิด ขนาด เครื่องปรับอากาศที่เหมาะสม การติดตั้ง ควบคุมและบำรุงรักษาเครื่องปรับอากาศอุตสาหกรรม

จุดประสงค์รายวิชา

1. เข้าใจหลักการปรับอากาศ ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่องปรับอากาศในงานอุตสาหกรรม
2. คำนวณโหลดความร้อนและหาค่าอุณหภูมิ ความชื้น จากแผนภูมิไซโครเมตริก
3. เลือกชนิด ขนาด เครื่องปรับอากาศและหาค่าอุณหภูมิความดัน จากแผนภูมิสารทำความเย็น
4. มีกิจนิสัยในการทำงานร่วมกับผู้อื่นด้วยความประณีต รอบคอบ ปลอดภัย

สมรรถนะรายวิชา

1. แสดงความรู้เกี่ยวกับหลักการปรับอากาศ
2. แสดงความรู้เกี่ยวกับหลักการทำงานของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน
3. คำนวณโหลดความร้อนและหาค่าอุณหภูมิ ความชื้น จากแผนภูมิไซโครเมตริก
4. หาค่าอุณหภูมิความดัน จากแผนภูมิสารทำความเย็น
5. เลือกชนิด ขนาด ติดตั้ง ควบคุมและบำรุงรักษาเครื่องปรับอากาศ

หน่วยการสอน

รหัส 3104-2007 วิชา เครื่องปรับอากาศอุตสาหกรรม จำนวน 5 ชั่วโมง / สัปดาห์

หน่วยที่	ชื่อหน่วยการสอน	จำนวนชั่วโมง
1	เครื่องปรับอากาศ	10
2	การเลือกใช้อุปกรณ์ทางกลและไฟฟ้า	10
3	สารทำความเย็น	5
4	การทำสุญญากาศและการบรรจุสารทำความเย็น	5
5	การติดตั้งเครื่องปรับอากาศแบบต่างๆ	30
6	ไซโครเมตริก	5
7	การหาขนาดเครื่องปรับอากาศ	5
8	เครื่องทำความเย็นและปรับอากาศขนาดใหญ่	5
9	การติดตั้งเครื่องทำความเย็นและปรับอากาศ	10
10	สอบปลายภาค	5
รวม		90

เกณฑ์การประเมินผล
วิชา เครื่องปรับอากาศอุตสาหกรรม รหัส 3104-2007

รายการ	คะแนน	หมายเหตุ
1. คุณลักษณะที่ต้องการการบูรณาการคุณธรรม จริยธรรมและ คุณลักษณะอันพึงประสงค์	20	
2. แบบฝึกหัด	20	
3. ปฏิบัติ	30	
4. สอบปลายภาค	30	
รวม	100	

 กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน 	ใบสาระการเรียนรู้	หน่วยที่ 8
	ชื่อวิชา เครื่องปรับอากาศอุตสาหกรรม	เวลาเรียน 5 ชั่วโมง
	ชื่อหน่วย เครื่องทำความเย็นและปรับอากาศขนาดใหญ่	
ชื่อเรื่องหรือชื่องาน เครื่องทำความเย็นและปรับอากาศขนาดใหญ่		

สาระสำคัญ

เครื่องปรับอากาศในปัจจุบันมีการแข่งขันกันสูงมาก จึงมีให้เลือกใช้มากมายหลายชนิดหลายขนาด จะนับรวมถึงการปรับอากาศในรถยนต์ด้วย ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่กว้างระดับสากลเลยทีเดียว ทุกประเทศที่ผลิตรถยนต์จะต้องคำนึงถึงการปรับอากาศในรถยนต์ แต่ละบริษัทมีเทคนิคการออกแบบที่หลากหลายเพื่อแข่งขันกันโดยเน้นความพึงพอใจของลูกค้า แต่หลักการของการทำความเย็นเหมือนกันทั้งหมด โดยเหตุนี้จึงมีการเรียนการสอนเรื่องหลักการการทำความเย็นที่เหมือนกันซึ่งเป็นพื้นฐานการทำความเย็นโดยทั่ว ๆ ไป เพียงแต่ศึกษาถึงลักษณะของอุปกรณ์ที่ออกแบบให้เหมาะกับการใช้งานแต่ละประเภะนั้นเอง

เรื่องที่จะศึกษา

- ห้องเย็นแช่แข็งอาหาร
- โครงสร้างและหลักการทำงาน ห้องเย็นแช่แข็งอาหาร
- เครื่องปรับอากาศขนาดใหญ่
- เครื่องปรับอากาศแบบчилเลอร์
- เครื่องปรับอากาศแบบกักเก็บน้ำแข็ง

จุดประสงค์การเรียนรู้

- เพื่อให้ผู้เรียนเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างของห้องเย็น
- เพื่อให้ผู้เรียนเข้าใจเกี่ยวกับหลักการทำงานของห้องเย็น
- เพื่อให้ผู้เรียนเข้าใจเกี่ยวกับเครื่องปรับอากาศแบบчилเลอร์
- เพื่อให้ผู้เรียนเข้าใจเกี่ยวกับเครื่องปรับอากาศแบบกักเก็บน้ำแข็ง

หน่วยที่ 8

เครื่องทำความเย็นและปรับอากาศขนาดใหญ่

8.1 การแช่เยือกแข็งอาหาร

การแช่เยือกแข็ง เป็นวิธีถนอมอาหารซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยมีหลักการชะลอการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพและเคมี รวมถึงปฏิกิริยาการขยายพันธุ์ของจุลินทรีย์ที่จะทำให้อาหารเน่าเสีย โดยทั่วไปอาหารจะถูกแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C ขบวนการแช่เยือกแข็งจะเริ่มตั้งแต่การนำอาหารที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็งมาลดอุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิของอาหารจะลดลงตามขบวนการความร้อนสัมผัส จากนั้น อาหารจะเปลี่ยนแปลงเข้าสู่จุดเยือกแข็ง ซึ่งจะมีอุณหภูมิแตกต่างกันไปตามชนิดของอาหาร ขบวนการที่อาหารเข้าสู่จุดเยือกแข็งนี้ อาหารจะเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของแข็งตามขบวนการความร้อนแฝง ซึ่งอุณหภูมิของอาหารจะเกือบคงที่ และหากลดอุณหภูมิของอาหารต่อไป อาหารจะมีอุณหภูมิลดลงตามขบวนการความร้อนสัมผัสอีกครั้งหนึ่ง

8.1.1 วิธีการแช่แข็ง

วิธีการแช่แข็งมีหลายวิธีตามลักษณะการให้ความเย็นแก่ผลิตภัณฑ์และชนิดของเครื่องแช่แข็ง ซึ่งมีผลต่อความเร็วในการดึงความร้อนออกจากอาหารในกระบวนการแช่แข็ง ได้แก่

1) การแช่แข็งในตู้แช่แข็งที่ไม่มีลมเป่า (still air freezing)

เป็นการแช่แข็งในตู้แช่แข็งขนาดเล็กดังเช่น ตู้เย็นที่ใช้กันตามบ้านเรือน อาจทำความเย็นได้ถึง -20°C แต่พอใส่เนื้อเข้าไปอุณหภูมิอาจสูงขึ้นมาเป็น 0°C ของที่แช่แข็งจะเยือกแข็งช้ามาก เพราะเครื่องขนาดเล็กมาก

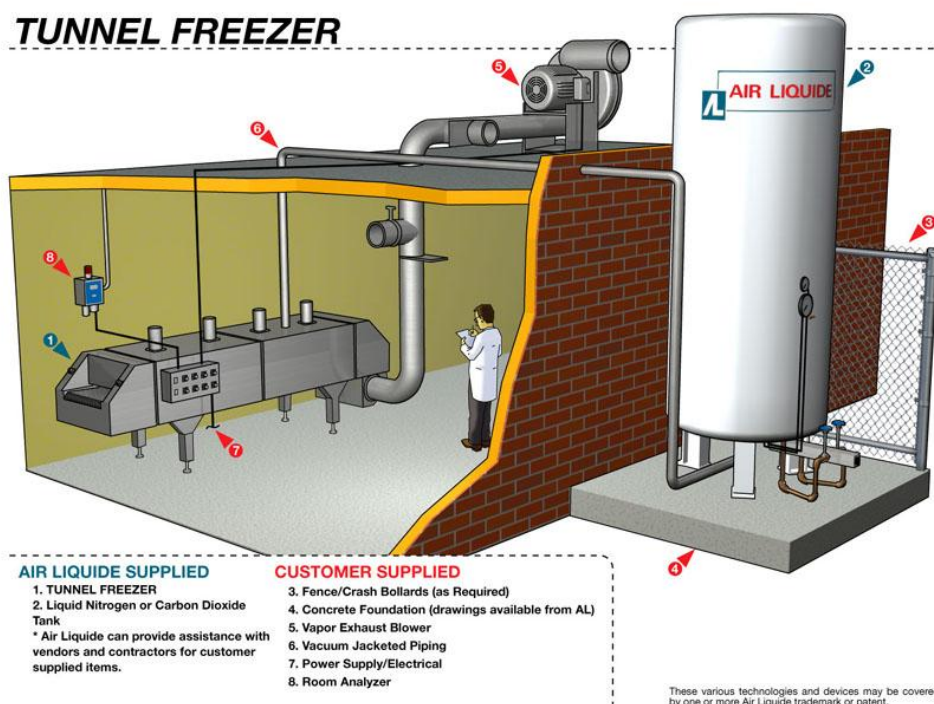


รูปที่ 8-1 การแช่แข็งในตู้แช่แข็งที่ไม่มีลมเป่า (still air freezing)

2) การแช่แข็งในตู้แช่แข็งที่มีลมเป่า (Air Blast freezing)

เป็นการแช่แข็งที่ใช้เครื่องเป่าลมเย็น ด้วยความเร็ว 1,300 – 1,500 ฟุตต่อนาที การถ่ายเทความร้อนทำได้อย่างทั่วถึงและเร็วช่วยให้อาหารแข็งตัวเร็ว แต่ต้องมีสิ่งห่อหุ้มอาหารไว้เพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ มักใช้กับห้องเย็นที่มีขนาดใหญ่ และเครื่องแช่แข็งที่ใช้แช่เป็นครั้งคราว แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ

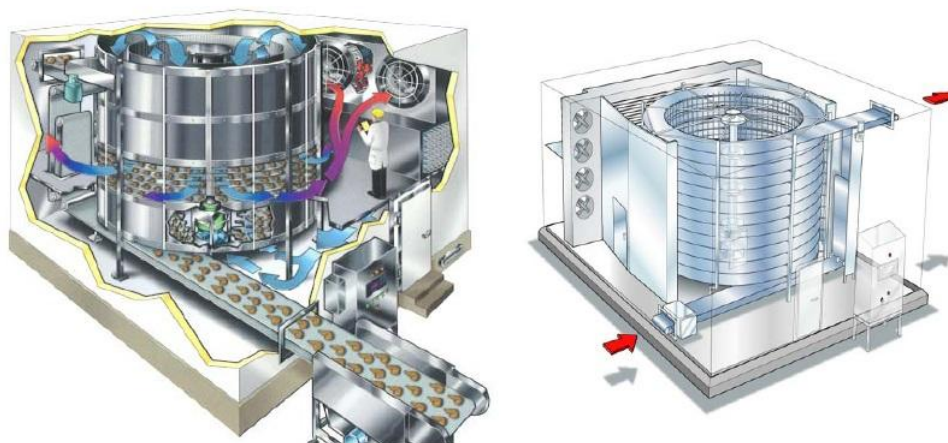
เครื่องแช่แข็งแบบอุโมงค์ (Tunnel Freezer) อาจมีขนาดใหญ่หรือเล็กก็ได้ เวลาต้องการแช่แข็งต้องเรียงผลิตภัณฑ์บนถาด และวางลงบนชั้น หรือทำเป็นรถเข็นหลาย ๆ ชั้น แต่ละชุดของชั้นวางผลิตภัณฑ์จะต้องวางไว้ให้เป็นช่องทางสำหรับลมผ่าน เมื่อต้องการแช่แข็งก็นำเข้าเป็นชุด และเมื่อต้องการจะเอาออก ก็เอาออกมาทั้งชุดเช่นกัน ในกรณีที่เป่าห้องเย็นใหญ่ เครื่องทำความเย็นอาจติดตั้งหลายชุดในระหว่างช่องสำหรับชั้นวางของก็ได้



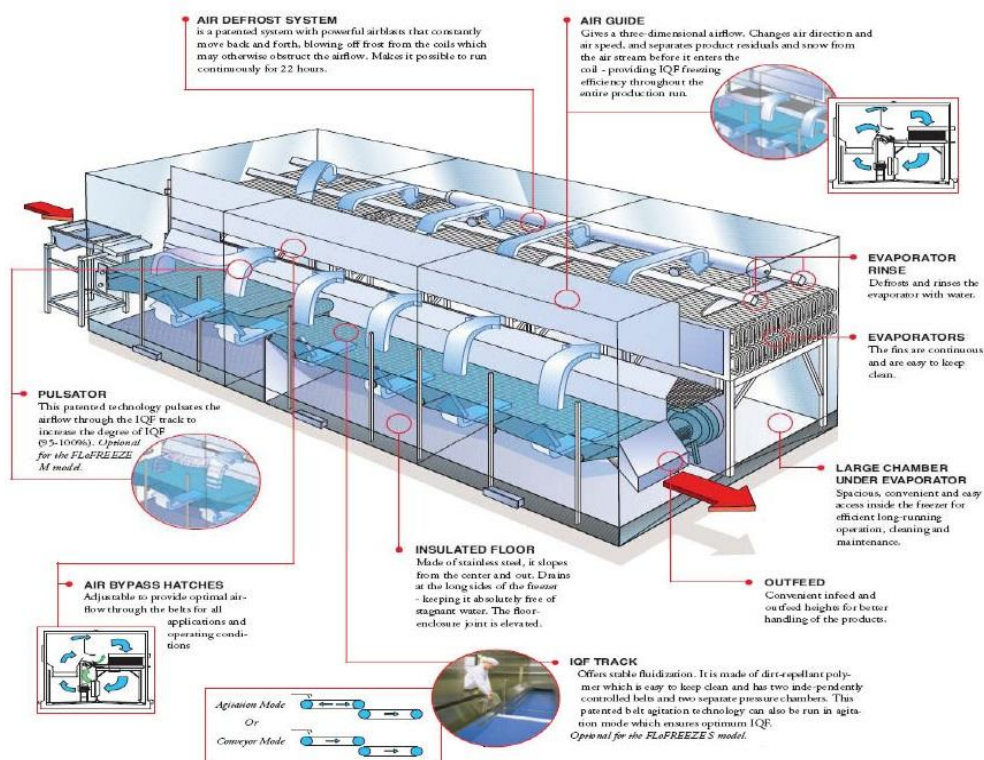
รูปที่ 8-2 เครื่องแช่แข็งแบบอุโมงค์ (Tunnel Freezer)

เครื่องแช่แข็งแบบสายพาน (Belt Freezer) เครื่องแช่แข็งแบบนี้ได้มีการดัดแปลงเพื่อความสะดวกในการขนถ่ายของโดยใช้สายพานซึ่งนิยมทำด้วยโลหะ วัตถุจะถูกลำเลียงบนสายพานและเคลื่อนที่ผ่านไอน้ำเย็นจากเครื่องทำความเย็นที่มักจะมีพัดลมเป่าให้ลมเย็นลงมาถูกอาหารตลอดเวลา ใช้อุณหภูมิประมาณ -40 องศาเซลเซียส เวลาประมาณ 20-30 นาที จนแข็งตัวและเปิดออกอีกด้านหนึ่งเพื่อทำการบรรจุหีบห่อได้เลย เครื่องทำความเย็นประเภทนี้สามารถปรับความเร็วของสายพานให้พอดีกับระยะเวลาที่ต้องการใช้ในการทำให้ผลิตภัณฑ์เยือกแข็งได้

เครื่องทำความเย็นชนิดนี้อาจต่อเข้ากับสายพานที่ส่งวัตถุดิบที่ผ่านการตัดแต่ง หรือแปรรูปจากห้องผลิตมาแล้ว ก็จะทำให้สะดวกมากขึ้น และลดการปนเปื้อนในช่วงขนถ่ายจากห้องผลิตทันทีไปยังห้องแช่เยือกแข็งได้ เครื่องแช่แข็งแบบนี้เหมาะสำหรับการแช่แข็งแบบแยกชิ้น หรือที่เรียกว่า ไอ คิว เอฟ (Individual Quick Freezing) ผลผลิตที่ได้จากการแช่แข็งแบบนี้จะเป็นชิ้น ๆ ไม่มีน้ำแข็งติดกันเป็นก้อน ปัจจุบันเป็นที่นิยมของลูกค้าต่างประเทศเพราะสามารถนำมาประกอบอาหารได้เลย ไม่ต้องนำมาละลาย



รูปที่ 8-3 เครื่องแช่แข็งแบบสายพาน (Belt Freezer)



รูปที่ 8-4 เครื่องแช่แข็งแบบเป่าลอยตัวในอากาศ (Fluidized Bed Freezer)

เครื่องแช่แข็งแบบเป่าลอยตัวในอากาศ (Fluidized Bed Freezer) เครื่องแช่แข็งแบบนี้คล้ายกับเครื่องแช่แข็งแบบสายพาน (Belt Freezer) คือมีส่วนของสายพานนำวัตถุดิบเข้าไปในเครื่องทำความเย็นและผ่านออกเมื่อผ่านการแช่แข็งแล้ว แต่ที่แตกต่างกันคือ สายพานของเครื่องแช่แข็งแบบนี้จะสั่นสะเทือนอยู่ตลอดเวลา ทำให้สิ่งของที่วางบนสายพานไม่อาจติดกับสายพานได้ จะกระดอนขึ้นด้านบนขณะที่มีไอน้ำเย็นพัดให้ตกลงมาบนสายพาน ดังนั้นสิ่งของหรือผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่แข็งแบบนี้จะต้องแช่สม่ำเสมอตลอดขึ้น วิธีนี้เหมาะกับอาหารที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา แต่มีปริมาณมาก ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่แข็งแบบนี้ถือว่าเป็น IQF

3) การแช่แข็งด้วยแผ่นโลหะให้ความเย็น (plate freezing)

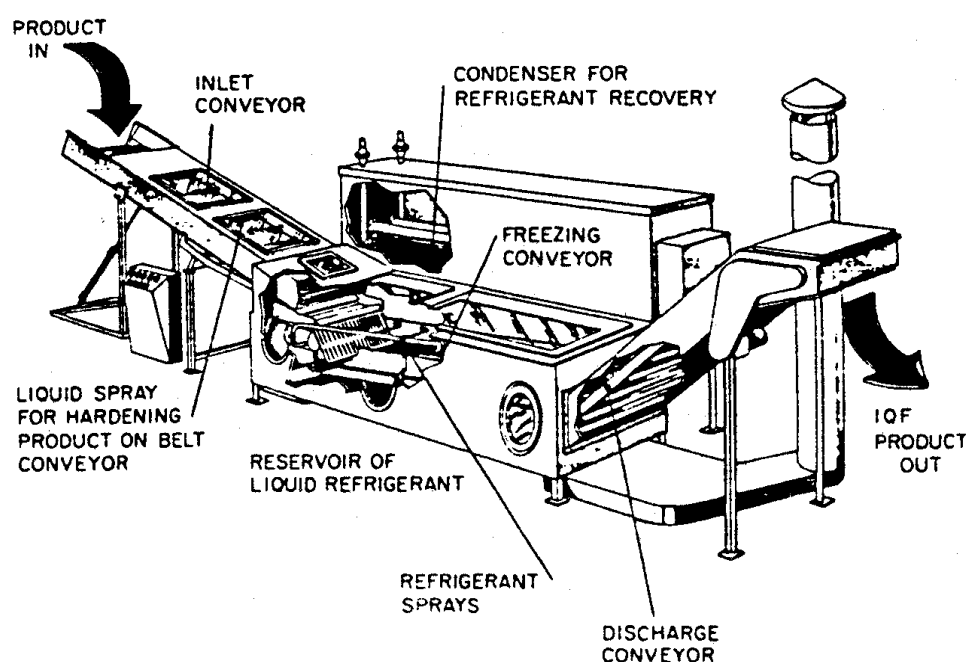
เป็นวิธีการแช่แข็งโดยนำผลิตภัณฑ์อาหารที่บรรจุกล่องแล้ววางบนแผ่นโลหะเย็น หรืออาจถูกอัดอยู่ระหว่างแผ่นโลหะเย็น 2 แผ่นโดยผลิตภัณฑ์จะถูกสัมผัสทั้ง 2 ด้าน เครื่องแช่แข็งประกอบด้วยแผ่นโลหะหลาย ๆ แผ่นจัดเรียงเป็นชั้น ๆ คล้ายชั้นวางของ ระหว่างชั้นของแผ่นโลหะจะเป็นที่วางอาหาร ช่องว่างระหว่างชั้นสามารถปรับให้มากหรือน้อยได้ เมื่อจะทำการแช่แข็งก็จะปรับแผ่นโลหะนี้ให้ผิวหน้าสัมผัสกับอาหารทั้งสองด้านเพื่อให้ถ่ายเทความร้อนได้เร็ว ภายในของแผ่นโลหะแต่ละชั้นจะมีน้ำยาของเครื่องทำความเย็นมาระเหย และเก็บความร้อนไปทิ้งได้อย่างรวดเร็ว วิธีนี้การถ่ายเทความร้อนจะเป็นไปได้ดีมาก ทำให้การแช่แข็งเป็นไปอย่างรวดเร็ว ใช้เวลาสั้น ข้อจำกัดของการเลือกใช้วิธีนี้คือผลิตภัณฑ์จะต้องมีขนาดและรูปร่างสม่ำเสมอ บรรจุอยู่ในกล่องแม่แบบขนาดเดียวกันตลอดทั้งรุ่นที่นำเข้าไปแช่เยือกแข็ง



รูปที่ 8-5 การแช่แข็งด้วยแผ่นโลหะให้ความเย็น (plate freezing)

4) การแช่แข็งโดยจุ่มลงในของเหลว (liquid freezing)

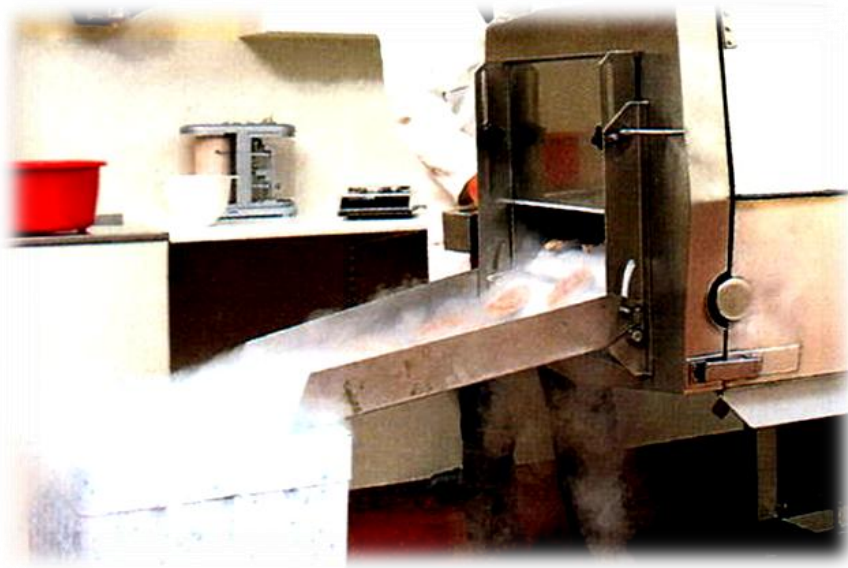
เป็นการแช่แข็งโดยนำอาหารจุ่มลงในของเหลวที่มีจุดเยือกแข็งต่ำ เช่น เมทานอล (methanol) แคลเซียมคลอไรด์ (calcium chloride) และไกลคอล (glycol) หรือน้ำเกลือ เป็นต้น สำหรับเนื้อสัตว์ควรมีการบรรจุหีบห่อก่อนการจุ่มในของเหลว เมื่อเนื้อสัตว์เยือกแข็งแล้วจึงนำไปแช่ต่อไปในตู้แช่แข็งธรรมดา การแช่ในเมทานอลจะทำความเย็นได้ถึง -20°F



รูปที่ 8-6 การแช่แข็งโดยจุ่มลงในของเหลว (liquid freezing)

5) การแช่แข็งด้วยก๊าซเหลว (freezing with liquidified gasses)

เป็นวิธีการแช่แข็งที่มีอัตราเร็วมากโดยการให้ผลิตภัณฑ์อาหารสัมผัสกับสารที่ให้ความเย็นขณะที่มีการเปลี่ยนสถานะ (cryogenic freezing) สารให้ความเย็นได้แก่ ก๊าซที่กลั่นตัว เช่น ไนโตรเจนเหลว (ที่อุณหภูมิ -195°C หรือ -319°F) ไนตรัสออกไซด์เหลว (จุดเดือด -95°C) หรือน้ำแข็งแห้ง (CO_2 , จุดระเหิด -78°C) การจุ่มผลิตภัณฑ์เนื้อลงไปในก๊าซเหลวโดยตรงทันทีอาจไม่ทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นจึงมีการออกแบบเครื่องแช่เยือกแข็งให้ผลิตภัณฑ์อาหารวางอยู่บนสายพานคล้ายกับเครื่องแช่แข็งชนิดมีสายพาน ขณะที่ทำการแช่แข็งผลิตภัณฑ์จะมีการพ่นไนโตรเจนเหลวอุณหภูมิต่ำลงมาจากแท่นที่จะใช้พัดลมเป่าไอน์ ผิวด้านนอกของผลิตภัณฑ์จึงแข็งตัวเร็วมาก บางครั้งอาจมีการแตกร้าวของผลิตภัณฑ์ได้เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผลิตภัณฑ์กับอุณหภูมิตัวกลางให้ความเย็นมีมาก อย่างไรก็ตามหากมีการปรับความเร็วของสายพานให้เหมาะสม วิธีการนี้ทำให้เกิดเกล็ดน้ำแข็งเล็กน้อย ทำให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อเยื่อน้อยมาก ความเย็นเข้าถึงภายในจุดกึ่งกลางของชิ้นเนื้อได้เร็วกว่าแบบอื่น ๆ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดี เก็บได้ทนนาน แต่ค่าใช้จ่ายสูงมาก ไม่เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนามากจนเกินไปเพราะจะเปลืองไนโตรเจน



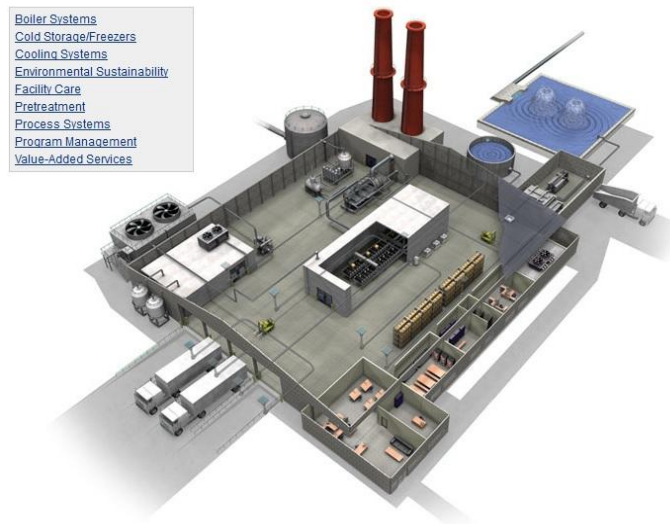
รูปที่ 8-7 การแช่แข็งด้วยก๊าซเหลว (freezing with liquidified gasses)

8.1.2 การบรรจุและการเก็บรักษา

ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่แข็งแล้วจะนำมาบรรจุลงถุงพลาสติก หรือกล่อง แล้วบรรจุลงกล่องบรรจุสินค้าสำหรับการขนส่ง แล้วติดสายรัดกล่องให้แน่น กล่องบรรจุสินค้าจะต้องมีความคงทนและเหมาะสมสำหรับการขนส่ง เพื่อป้องกันสินค้าภายในไม่ให้ถูกกระทบกระเทือนระหว่างการขนส่ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการบรรจุเรียบร้อยแล้วจะเก็บเข้าห้องเย็นเพื่อรอการจำหน่าย โดยที่อุณหภูมิของห้องเย็นจะต้องต่ำกว่า -18 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 70 ทั้งต้องมีประตูห้องปิดสนิท



รูปที่ 8-8 การบรรจุหีบห่อ



รูปที่ 8-9 แผนผัง และการจัดวางเครื่องจักรภายในโรงงานแช่แข็ง

8.2 ห้องเย็นหรือห้องแช่แข็งอาหาร

8.2.1 ห้องเย็น (Cold Storage Room)

ห้องเย็นทั่วไปที่ใช้แช่อาหารมีอุณหภูมิภายในห้องเย็นคงที่เพื่อให้เหมาะสมกับอาหารที่เก็บภายในห้องซึ่งอาจจะมีอุณหภูมิสูงกว่า 0°C เพื่อใช้ในการแช่ผักและผลไม้ และต่ำกว่า 0°C เพื่อใช้ในการแช่เนื้อและไอศกรีม โดยถนอมอาหารและบรรจุภัณฑ์ที่อยู่ภายในห้องเย็นให้เหมาะสมกับระยะเวลาการบริโภค โดยทั่วไปห้องเย็นที่มีอุณหภูมิภายในห้องมากกว่า 0°C มักนิยมใช้สารประกอบ CFC เป็นสารทำความเย็น ส่วนห้องเย็นที่มีอุณหภูมิภายในห้องต่ำกว่า -10°C นิยมใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็น ห้องเย็นประเภทนี้ เช่น ห้องแช่เนื้อห้องแช่ผัก ห้องแช่นมและไข่ ห้องแช่ปลา รวมไปถึงห้องแช่น้ำแข็งที่ผลิตแล้ว เป็นต้น ศูนย์การค้าและซูเปอร์มาร์เก็ตส่วนใหญ่จะมีห้องเย็นลักษณะนี้



รูปที่ 8-10 ห้องเย็นแบบการพาความร้อน (ห้องเย็นในห้างสรรพสินค้า)

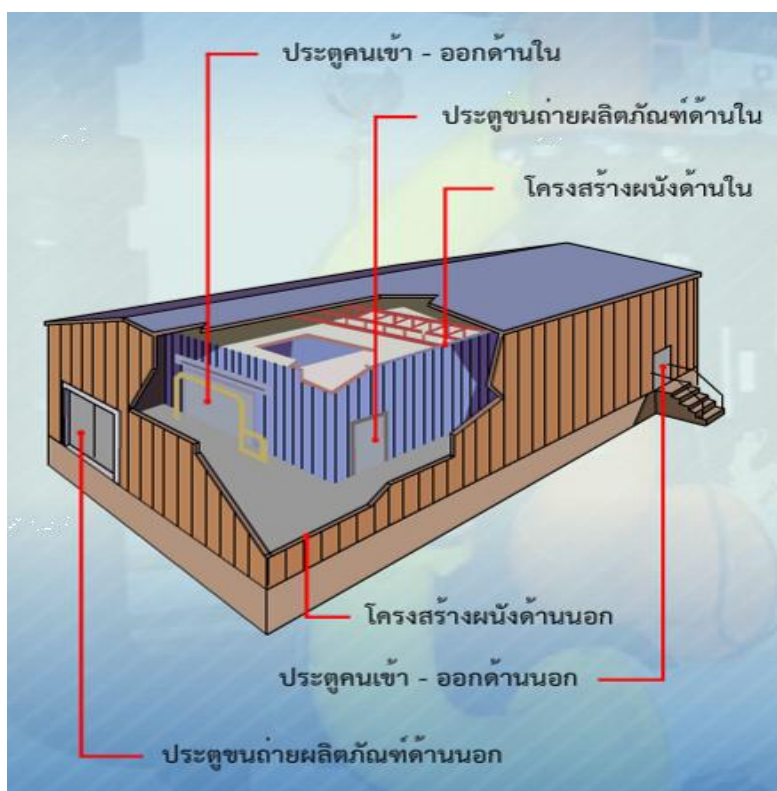
8.2.2 ห้องแช่แข็ง (Freezing room)

ห้องแช่แข็ง คือ ห้องที่ต้องการรักษาระดับอุณหภูมิภายในห้องให้อยู่ที่ในระดับต่ำกว่า 0°C



รูปที่ 8-11 ห้องแช่แข็งแบบการพาความร้อน (ห้องเย็นในโกดังเก็บสินค้า)

8.2.3 โครงสร้างของห้องเย็นหรือห้องแช่แข็งอาหาร



รูปที่ 8-12 โครงสร้างของห้องเย็นหรือห้องแช่แข็งอาหาร
(ที่มา: ผศ. น.อ. ดร.ตระการ ก้าวสิกรรม “การทำความเย็น (Refrigeration)”)

โครงสร้างอาคารภายนอกโดยปกติประกอบด้วยผนังที่ปิดรอบส่วนที่เป็นห้องเย็นและห้องแช่แข็งไว้ โดยมีช่องทางเดินภายนอก ระหว่างผนังด้านนอกของส่วนที่เป็นห้องเย็นและห้องแช่แข็งกับผนังภายในอาคาร ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในป้องกันอุณหภูมิสูงจากภายนอกเข้าห้องเย็นและห้องแช่แข็งได้น้อยที่สุด เพื่อการประหยัดพลังงาน

ไอน้ำที่ปะปนอยู่ในอากาศและที่ระเหยออกมาจากวัตถุดิบที่แช่แข็ง จะควบแน่นเป็นน้ำแล้วแข็งตัวเกาะบริเวณขดท่อของคอยล์เย็น เมื่ออากาศ (ที่มีไอน้ำอยู่) ในห้องแช่แข็งไหลผ่านคอยล์เย็น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องละลายน้ำแข็งออกไปตามช่วงเวลา ในทางปฏิบัติจึงมักจะไม้ออกแบบให้ระบบทำความเย็นทำงานต่อเนื่องตลอดเวลา

8.3 เครื่องปรับอากาศขนาดใหญ่

การติดตั้ง ระบบปรับอากาศ ในอาคาร มีความจำเป็นมากขึ้นไม่ได้มีมิติเป็นเพียงสิ่งเพิ่มความสะดวกสบายในที่พักอาศัยเท่านั้น แต่ก้าวไปเป็นอุปกรณ์ที่มีความจำเป็นในอาคารหลายประเภท ที่การควบคุมอุณหภูมิความชื้น และความสะอาด (Clean room) ในพื้นที่ เป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตสินค้า เช่น ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ , ยา ,อาหาร ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และเพื่อให้สินค้าต่าง ๆ เหล่านั้นได้คุณภาพเป็นที่ต้องการของลูกค้าและสามารถแข่งขันกับตลาดได้

ระบบปรับอากาศ เป็นงานที่มีความสำคัญและมีผลกระทบทั้งสถานประกอบการและสิ่งแวดล้อมระบบที่ดีจะต้องคำนึงถึงการเลือกใช้และการออกแบบ รวมถึงการประหยัดค่าใช้จ่ายเรื่องพลังงาน และไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมในภายหลังด้วย ดังนั้นอาคารและสถานประกอบการต่างๆ จึงจำเป็นต้องมีระบบปรับอากาศที่ดี ระบบที่ดีจึงต้องเริ่มต้นตั้งแต่การออกแบบทางวิศวกรรม การเลือกใช้วัสดุการติดตั้งและการตรวจสอบการทำงานของระบบที่ถูกต้องตามหลักสากล

ความหมายของอาคารสูง อาคารขนาดใหญ่ และอาคารขนาดใหญ่พิเศษ

- อาคารสูง คือ อาคารที่คนสามารถอยู่ หรือใช้สอยได้ และมีความสูงตั้งแต่ 23 เมตรขึ้นไปจากระดับพื้นดิน เวลาจะวัดก็วัดถึง พื้นชั้นดาดฟ้าในกรณีที่เป็น หลังคาแบน แต่ถ้าเป็น หลังคาจั่ว ให้วัดถึงยอดผนังของชั้นสูงสุด
- อาคารขนาดใหญ่ คือ อาคารที่สูงจากระดับถนน 15 เมตรขึ้นไป และ พื้นทั้งหมดทุกชั้น เกิน 1,000 ตารางเมตร หรือมีพื้นที่ชั้นใดชั้นหนึ่งเกิน 2,000 ตารางเมตร ไม่ว่าจะสูงเท่าไรก็ตาม
- อาคารขนาดใหญ่พิเศษ คือ อาคารที่มีพื้นที่รวมทุกชั้น หรือ ชั้นเดียวเกิน 10,000 ตารางเมตร อาคารขนาดใหญ่ และขนาดใหญ่พิเศษ มีสิ่งที่คล้ายกัน คือ คนต้องเข้าไปใช้สอย เป็นที่อยู่ หรือประกอบกิจการได้ ซึ่งคำว่าประกอบกิจการ ก็คือ สถานที่ที่จดทะเบียนการค้า หรือสถานที่ทำการค้าขาย หรือที่ค้าขายที่ประชาชนทั่วไปเข้าไปติดต่อได้

8.3.1 การเลือกตำแหน่ง ติดตั้งแอร์ และเครื่องปรับอากาศ

1) ตำแหน่งคอนเดนซิงยูนิต (CDU) ที่เหมาะสม

- บริเวณที่ ติดตั้งแอร์ ต้องแข็งแรงสามารถรับน้ำหนักและแรงสั่นสะเทือนจากการทำงานได้

- ในกรณีที่คอนเดนซึ่งตั้งวางบนพื้นดินต้องทำฐานรองรับเครื่องด้วยคอนกรีต
- ติดตั้งแอร์ ในบริเวณที่อากาศถ่ายเทได้สะดวกและห่างจากมุมอับ
- บริเวณที่ ติดตั้งแอร์ ต้องมีการระบายน้ำได้ดีหรือที่ที่น้ำท่วมไม่ถึง
- การวางคอนเดนซึ่งยูนิตควรมีลูกยางรองเพื่อลดแรงสั่นสะเทือนจากการทำงานของตัวเครื่อง
- ควรวาง CDU ให้ห่างจากพื้นที่ใช้สอยทั่วไปเพื่อหลีกเลี่ยงจากปัญหาเรื่องเสียงรบกวน
- อย่า ติดตั้งแอร์ ชิดกับคอนเดนซึ่งยูนิตอื่นหรือผนังเพราะทำให้ระบายความร้อนยาก
- หลีกเลี่ยงการ ติดตั้งแอร์ ในสภาพแวดล้อมที่ไม่ดี เช่น ความเป็นกรดสูง, แสงแดดแรง หรือมีน้ำหยด
- ควรวาง CDU ในบริเวณที่สามารถเข้าไปตรวจสอบภายหลังได้อย่างสะดวก

2) ตำแหน่งแฟนคอยล์ยูนิต (FCU) ที่เหมาะสม

- ตั้งในบริเวณที่สามารถระบายลมได้ทั่วทั้งห้องอย่าติดตั้งเครื่องในมุมอับ
- อย่าให้สิ่งของกีดขวางทางไหลของอากาศเพราะจะทำให้อากาศหมุนเวียนไม่สะดวก
- บริเวณที่ติดตั้งเครื่องต้องแข็งแรงสามารถรับน้ำหนักและแรงสั่นสะเทือนจากการทำงานได้
- หลีกเลี่ยงการวาง FCU ใกล้กับประตู, หน้าต่างหรือพัดลมดูดอากาศ
- ควรวาง FCU ในบริเวณที่สามารถตรวจสอบภายหลังได้อย่างสะดวก
- อย่าตั้งชิดผนังที่โดนแดดจัดเพราะจะทำให้ได้รับความร้อนจากภายนอกได้ง่าย
- พยายามติดตั้งแฟนคอยล์ยูนิตให้อยู่ใกล้กับคอนเดนซึ่งยูนิตจะทำให้ประสิทธิภาพสูงสุด

8.3.2 การติดตั้งท่อน้ำยา

ระบบท่อน้ำยานับว่าเป็นส่วนที่มีความสำคัญมากที่สุดใน การ ติดตั้งแอร์ และเครื่องปรับอากาศแบบแยก ส่วนการเลือกใช้ขนาดท่อที่มีขนาดเล็กเกินไปจะมีผลทำให้เกิดปัญหาตามมาเช่น ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องต่ำลงหรือความดันตกคร่อม (Pressure Drop) ระหว่างท่อน้ำยาเกินไป เป็นต้น ดังนั้นในการเลือก ใช้ขนาดท่อน้ำยาต้องคำนึงถึง

- PIPE DIAMETER ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อน้ำยา
- PIPE LENGTH ความยาวท่อน้ำยา
- NUMBER OF FITTINGS จำนวนของข้อต่อต่างๆ เช่น ข้องอ
- FLUID VELOCITY ความเร็วในการเคลื่อนที่ของสารทำความเย็น

การเลือกใช้ท่อน้ำยาควรเลือกตามคู่มือการ ติดตั้งแอร์ และเครื่องปรับอากาศนั้นๆ แต่ถ้าไม่ทราบก็สามารถหา ขนาดคร่าวๆได้จากแผนผังคำนวณขนาดท่อน้ำยาซึ่งโดยทั่วไปกำหนดความดันตกคร่อมด้านดูด (Suction Line Pressure Drop) 2 PSI/100 FT และความดันตกคร่อมด้านส่ง (Discharge Line Pressure Drop) 4 PSI/100 FT.

นอกจากการเลือกใช้ขนาดท่อน้ำยาที่ถูกต้องแล้ว การเดินท่อน้ำยายังต้องทำอย่างถูกหลักการอีกด้วยจึงจะทำให้เครื่องทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น ระบบท่อน้ำยาต้องทำความสะอาดให้ดีและแห้ง และในการเดินท่อน้ำยาต้องคำนึงถึงความเร็วของไอ น้ำยาให้มากพอที่จะพา น้ำมันหล่อลื่น กลับคอมเพรสเซอร์ด้วย ดังนั้นในการติดตั้งคอนเดนซึ่งและอีวaporเตอร์ในระดับที่ต่างกันจะต้องคำนึงถึง

- การติดตั้งอีวาพอเรเตอร์ต่ำกว่าคอนเดนซิ่ง จะมีผลให้น้ำมันกลับเข้าคอมเพรสเซอร์น้อย เพราะ คอมเพรสเซอร์อยู่สูงกว่า ดังนั้นการเดินท่อด้านดูดต้องคำนึงถึงความดันตกคร่อม และเรื่องน้ำมันกลับด้วย
- การติดตั้งคอนเดนซิ่งต่ำกว่าอีวาพอเรเตอร์ จะมีผลให้ความดันตกสูง เพราะ คอมเพรสเซอร์ต้อง อัดน้ำยาขึ้นที่สูง ดังนั้นการเดินท่อด้านส่งต้องคำนึงถึงความดันตกคร่อมจากความเสียดทานและการเดินท่อในแนวตั้ง

8.3.3 การเดินท่อน้ำยาด้านดูดเมื่อตำแหน่งการวางอีวาพอเรเตอร์และคอนเดนซิ่งอยู่ในลักษณะต่างๆ เป็นดังนี้

- เมื่อคอนเดนซิ่งอยู่เหนืออีวาพอเรเตอร์ให้ทำที่กักน้ำมัน (Oil Trap) เพื่อให้แน่ใจว่า น้ำมันที่อยู่ในระบบจะไหลกลับขึ้นไปยัง คอมเพรสเซอร์ การทำที่กักน้ำมันควรทำให้ใกล้อีวาพอเรเตอร์ที่สุดเท่าที่จะทำได้
- เมื่อคอนเดนซิ่งอยู่เหนืออีวาพอเรเตอร์ให้ทำที่กักน้ำมันทุกๆ ช่วงความสูง 4.5 ม. ทั้งนี้เพื่อให้เก็บกักน้ำมันเอาไว้ในขณะ ที่คอมเพรสเซอร์เริ่มทำงานอีกครั้ง น้ำมัน จากที่กักน้ำมันนี้จะถูกดูดไปหล่อลื่นคอมเพรสเซอร์ได้ทันที (ไม่ควรเดินท่อในแนวตั้งสูงเกินกว่า 15 ม.)

การเดินท่อน้ำยาต่อระบบทำความเย็นยาวเกิน 10 เมตร จะต้องเติมน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มเติมเพื่อชดเชยผลของฟิล์มน้ำมันที่ตกค้างผิวด้านในของท่อดูด ตามอัตราตารางต่อไปนี้ต่อทุกๆ ความยาว 1 เมตรที่เดิน การเติมน้ำมันให้ดูจาก OIL SIGHT GLASS (ถ้ามี) โดยให้อยู่ในช่วง 1/2 ถึง 3/4 ของ OIL SIGHT GLASS

8.3.4 ขนาดท่อ อัตราเติมน้ำมันต่อทุกความยาว 1 เมตร

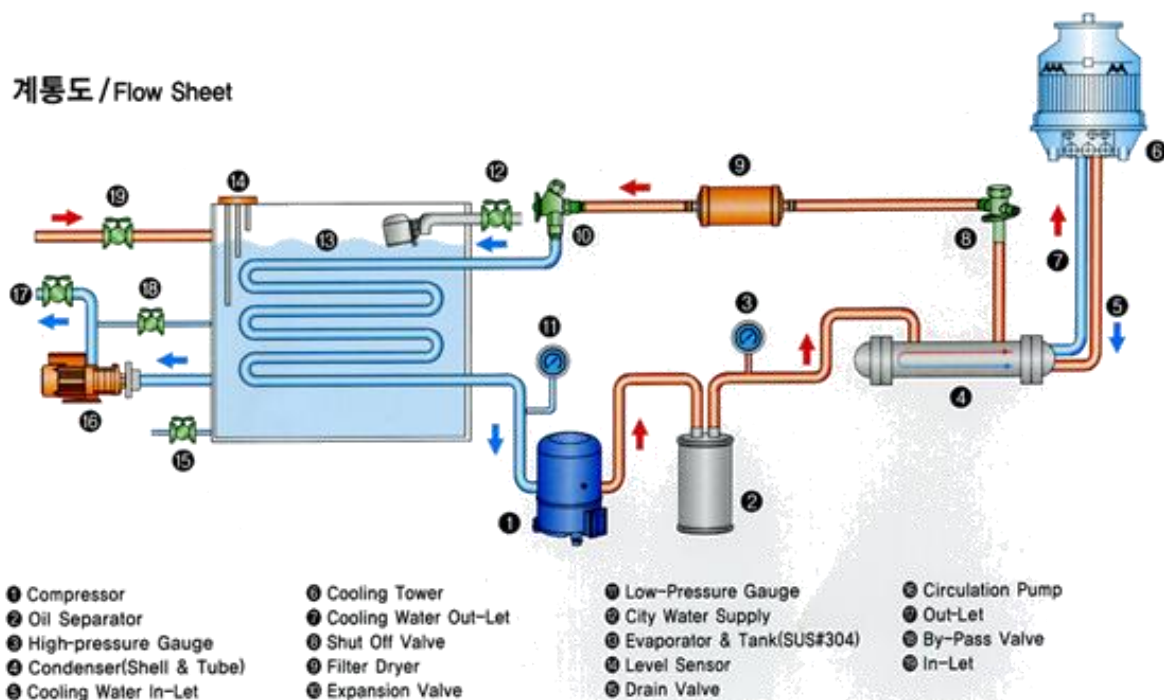
- 3/8 7.5 มิลลิเมตร (ซี.ซี)
- 1/2 10 มิลลิเมตร (ซี.ซี)
- 5/8 20 มิลลิเมตร (ซี.ซี)
- 3/4 30 มิลลิเมตร (ซี.ซี)
- 7/8 40 มิลลิเมตร (ซี.ซี)
- 1-1/8 50 มิลลิเมตร (ซี.ซี)

เมื่อเดินท่อน้ำยาผ่านผนัง, กำแพง ครอบหรือท่อด้วยฉนวน ซึ่งสามารถลดการสันสะท้อนได้ ส่วนท่อด้านดูดต้องหุ้มฉนวนตลอดความยาวของท่อ ฉนวนที่ใช้หุ้มท่อนี้ต้องมีความหนาอย่างน้อย 1/2 นิ้ว โดยปกติแล้วท่อด้านส่งไม่จำเป็นต้องหุ้มฉนวน ยกเว้นในกรณีที่เดินท่อผ่านบริเวณที่มี อุณหภูมิสูง เช่น ห้องหม้อน้ำหรือกลางแดดร้อนจัด ควรจะใช้ฉนวนยางที่มีความหนาอย่างน้อย 3/8 นิ้ว หุ้มท่อด้านส่งด้วย และต้องเพิ่มความหนาของฉนวนด้านดูดขึ้นเป็นพิเศษด้วยอย่างน้อย หนา 3/4 นิ้ว

8.4 เครื่องปรับอากาศแบบчилเลอร์

8.4.1 หลักการทำงาน

โดยทั่วไปเครื่องปรับอากาศที่ใช้ในอาคารขนาดใหญ่จะเป็นเครื่องปรับอากาศแบบรวมศูนย์ที่เรียกว่า чилเลอร์ (Chiller) ซึ่งแบ่งเป็นระบบระบายความร้อนด้วยน้ำและระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ ซึ่งчилเลอร์จะอาศัยน้ำเป็นตัวนำพาความร้อนไปยังห้องหรือจุดต่างๆ โดยน้ำเย็นจะไหลไปยังเครื่องทำลมเย็น (Air Handling Unit : AHU หรือ Fan Coil Unit : FCU) ที่ติดตั้งอยู่ในบริเวณที่จะปรับอากาศ จากนั้นน้ำที่ไหลออกจากเครื่องทำลมเย็นจะถูกปั๊มเข้าไปในเครื่องทำน้ำเย็นขนาดใหญ่ ที่ติดตั้งอยู่ในห้องเครื่องและไหลเวียนกลับไปยังเครื่องทำลมเย็นอยู่เช่นนี้ สำหรับเครื่องทำน้ำเย็นนี้จะต้องมีการนำความร้อนจากระบบออกมาระบายทิ้งที่ภายนอกอาคารด้วย ซึ่งระบบทำความเย็นแบบรวมศูนย์ส่วนใหญ่ที่ใช้มีขนาดประมาณ 100 ถึง 1,000 ตัน เป็นระบบที่ใช้เพื่อต้องการทำความเย็นอย่างรวดเร็ว การทำความเย็นอาศัยคุณสมบัติดูดซับความร้อนของสารทำความเย็นหรือน้ำยาทำความเย็น (Liquid Refrigerant) มีหลักการทำงาน คือ ปลอ่ยสารทำความเย็นที่เป็นของเหลวจากถังบรรจุไปตามท่อ เมื่อสารเหลวเหล่านี้ไหลผ่านเอ็กซ์เพนชันวาล์ว (Expansion Valve) จะถูกทำให้มีความดันสูงขึ้น ความดันจะต่ำลงเมื่อรับความร้อนและระเหยเป็นไอ (Evaporate) ที่ทำให้เกิดความเย็นขึ้นภายในพื้นที่ปรับอากาศ ดังแสดงในรูป



รูปที่ 8-13 ระบบปรับอากาศแบบчилเลอร์

8.4.2 อุปกรณ์หลักที่สำคัญในซิลเลอร์

- 1) คอยล์ร้อน หรือตัวควบแน่น (Condenser) คือ อุปกรณ์ที่ใช้ระบายความร้อนให้กับสารทำความเย็นที่ระเหยกลายเป็นก๊าซ และเพื่อให้เกิดการควบแน่นของสารทำความเย็นเป็นของเหลว คอยล์ร้อนมีทั้งชนิดที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air-Cooled) และชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water-Cooled)
- 2) คอยล์เย็น (Evaporator) คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำความเย็น โดยดึงความร้อนที่อยู่โดยรอบคอยล์เย็น เพื่อทำให้สารทำความเย็นซึ่งเป็นของเหลวระเหยกลายเป็นก๊าซ ผลที่ได้คือความเย็นเกิดขึ้น
- 3) อุปกรณ์ลดความดัน (Expansion Valve) คือ อุปกรณ์ควบคุมปริมาณสารทำความเย็นที่ไหลเข้าไปในคอยล์เย็นและช่วยลดความดันของสารทำความเย็นลง เช่น Thermal Expansion Valve และ Capillary Tube เป็นต้น ผลที่ได้คือสารทำความเย็นที่มีสภาพเป็นก๊าซ
- 4) คอมเพรสเซอร์ (Compressor) คือ อุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่ดูดสารทำความเย็นในสภาพที่เป็นก๊าซเข้ามาและอัดให้เกิดความดันสูงซึ่งทำให้ก๊าซมีความร้อนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย คอมเพรสเซอร์ที่ใช้งานทั่วไปมีทั้งชนิดที่เป็นแบบลูกสูบ (Reciprocating Compressor) แบบโรตารี (Rotary Compressor) หรืออาจเป็นแบบหอยโข่ง (Centrifugal Compressor) และแบบที่นิยมใช้ในเครื่องปรับอากาศขนาดใหญ่ ได้แก่ แบบสกรู (Screw Compressor)

8.4.3 ข้อดี

- ระบบทำความเย็นแบบรวมศูนย์นี้สามารถทำความเย็นได้อย่างรวดเร็ว
- สามารถทำความเย็นได้หลายๆจุดพร้อมกัน เนื่องจากใช้ท่อซึ่งเดินบนผนังหรือเพดานง่ายต่อการกระจายความเย็นไปยังจุดหรือห้องที่ต้องการ

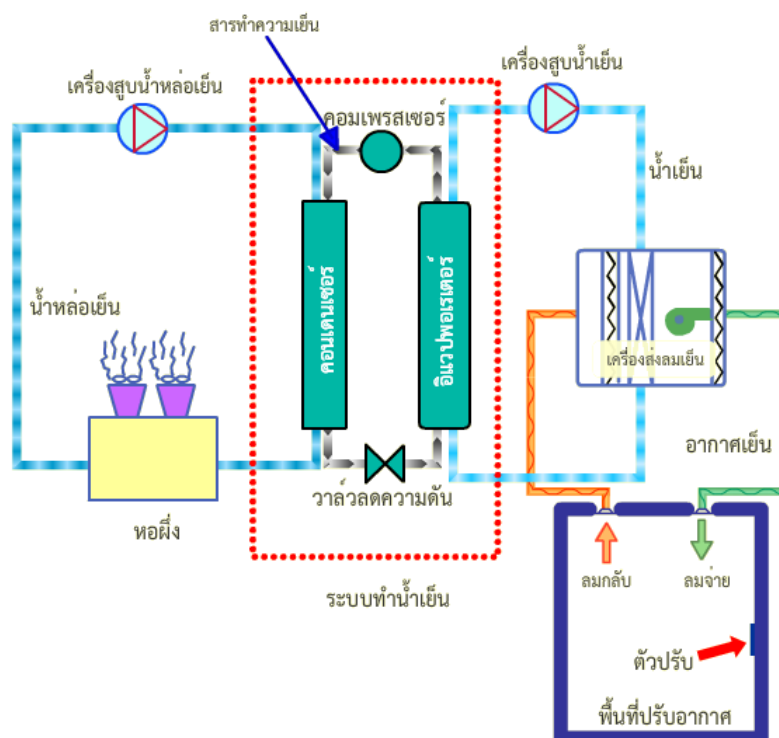
8.4.4 ข้อด้อย และข้อจำกัด

- เป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ จึงมีข้อจำกัดเรื่องของพื้นที่ที่ใช้ในการติดตั้ง และเลือกสถานที่ที่มีความเหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์แต่ละตัว
- มีความยุ่งยากในการติดตั้ง ซึ่งจะต้องจัดเตรียมโครงสร้างในการวางเครื่อง
- เคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งได้ลำบาก เนื่องจากเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน ดังนั้นจึงต้องวางแผนในการติดตั้งให้ดีกว่า
- ราคาแพง ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสูง

8.5 เครื่องปรับอากาศแบบซิลเลอร์ชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ

สำหรับเครื่องปรับอากาศแบบซิลเลอร์ (แบบรวมศูนย์) ชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water-Cooled Chiller) จะใช้น้ำเย็นในการกระจายความเย็นสู่ส่วนต่างๆ ของอาคาร แทนสารทำความเย็น น้ำเย็นจะถูกผลิตขึ้นที่ห้องเครื่องส่วนกลาง โดยเครื่องทำน้ำเย็น (Water chiller) ซึ่งเป็นระบบทำความเย็นที่ออกแบบสำหรับทำน้ำเย็น เครื่องทำน้ำเย็นอาจเป็นแบบหอยโข่ง (Centrifugal chiller) แบบลูกสูบ (Reciprocating chiller)

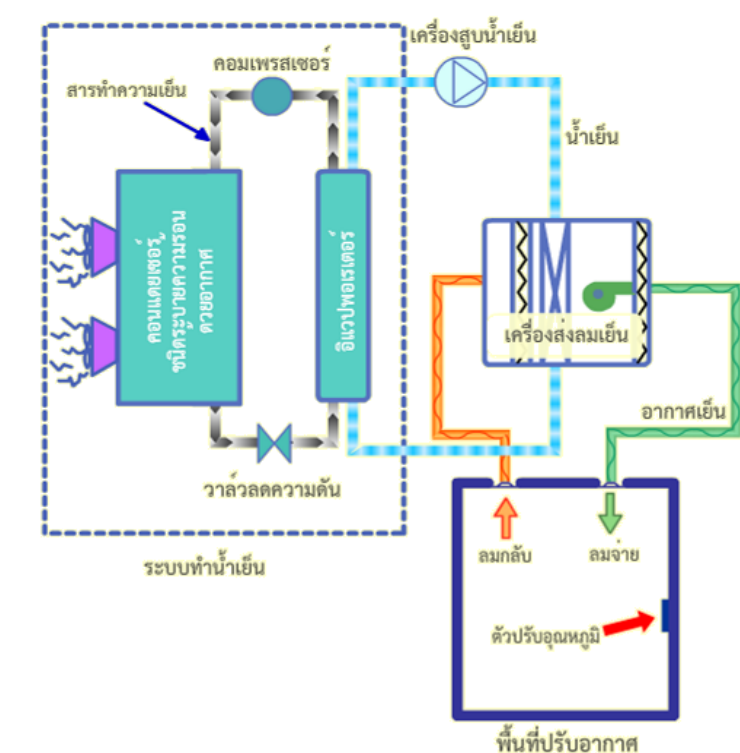
หรือแบบสกรู (Screw chiller) น้ำเย็นจะถูกส่งไปยังเครื่องส่งลมเย็น (Air Handling Unit: AHU) ที่ติดตั้งในส่วนต่างๆ ของอาคาร พัดลมจ่ายอากาศจะดูดอากาศภายในอาคารผ่านคอยล์เย็นซึ่งความร้อนจะถูกถ่ายเทให้กับน้ำเย็น จากนั้นอากาศเย็นจะถูกจ่ายไปยังพื้นที่ส่วนต่างๆ โดยระบบท่อลม เครื่องสูบน้ำเย็นจะสูบน้ำจากคอยล์เย็นของAHU ไปยัง คอยล์เย็นของ Chiller เพื่อลดอุณหภูมิเป็นน้ำเย็นอีกครั้ง เครื่องทำน้ำเย็นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ จะใช้น้ำหล่อเย็นในการถ่ายเทความร้อนออกจากคอนเดนเซอร์ (คอยล์ร้อน) ของ Chiller โดยน้ำจากคอยล์ร้อนจะถูกส่งไปยังหอผึ่งน้ำ (Cooling tower) โดยเครื่องสูบน้ำหล่อเย็น ที่หอผึ่งน้ำอากาศจะถูกเป่าผ่านน้ำหล่อเย็นที่มีอุณหภูมิสูง เพื่อถ่ายเทความร้อนออกสู่บรรยากาศภายนอก เพื่อนำกลับไปหล่อเย็นที่คอยล์ร้อนของ Chiller ต่อไป



รูปที่ 8-14 เครื่องปรับอากาศแบบчилเลอร์ชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water-Cooled Chiller)

8.6 เครื่องปรับอากาศแบบчилเลอร์ชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ

สำหรับเครื่องปรับอากาศแบบчилเลอร์ (แบบรวมศูนย์) ชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air-Cooled Chiller) มีความคล้ายคลึงกับเครื่องทำน้ำเย็นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ ซึ่งจะไม่ใช้น้ำในการหล่อเย็น (ระบายความร้อน) ให้กับคอนเดนเซอร์ (คอยล์ร้อน) ของ Chiller แต่ใช้อากาศในสิ่งแวดล้อมระบายความร้อนแทน ด้วยการใช้พัดลมดูดอากาศในสิ่งแวดล้อมรอบๆ คอยล์ร้อนเป่าไปยังท่อของสารทำความเย็น เพื่อถ่ายเทความร้อนออกจากคอยล์ร้อนออกสู่บรรยากาศ โดยคอยล์ร้อนจะมีครีป (Fins) ติดอยู่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อน แต่ถ้าเทียบประสิทธิภาพการทำความเย็นของ Air-Cooled Chiller กับ Water-Cooled Chiller ที่ความสามารถในการทำความเย็นที่เท่ากันแล้ว Air-Cooled Chiller จะมีประสิทธิภาพการทำความเย็นต่ำกว่า

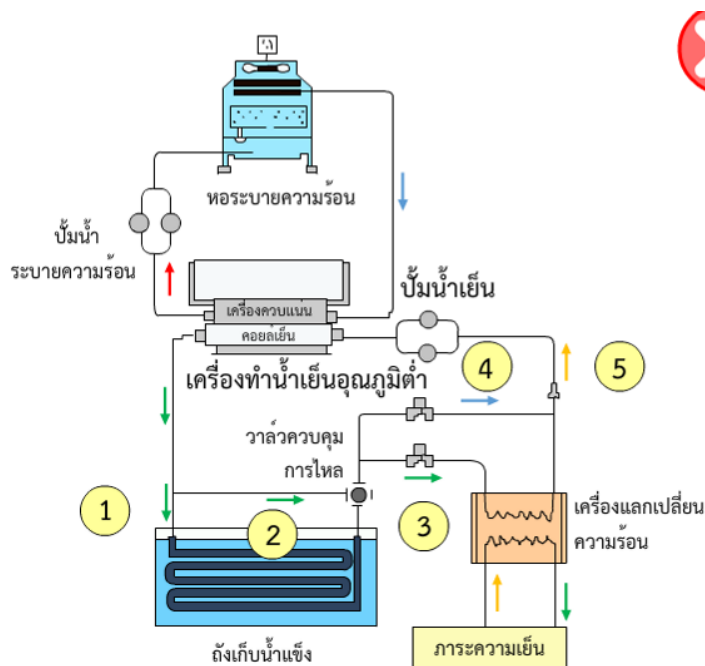
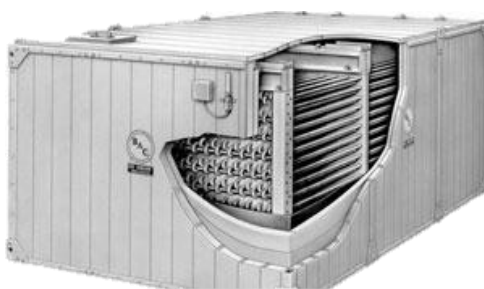


รูปที่ 8-15 เครื่องปรับอากาศแบบчилเลอร์ชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air-Cooled Chiller)

8.7 เครื่องปรับอากาศแบบกักเก็บน้ำแข็ง

ระบบกักเก็บความเย็นด้วยน้ำแข็ง คือ อุปกรณ์ที่เก็บความเย็นของน้ำแข็งที่ผลิตได้ในช่วง Off peak (ช่วงที่คิดค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดราคาถูก) ไว้ชั่วคราว และนำความเย็นของน้ำแข็งที่เก็บไว้มาใช้ในช่วง On Peak (ช่วงที่คิดค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดราคาแพง) เพื่อลดค่าไฟฟ้าและลดภาระความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งน้ำแข็งเป็นวัสดุที่มีค่าความร้อนแฝงในการละลายค่อนข้างสูง คือ 144 บีทียู/ปอนด์ ทำให้ใช้ปริมาณในการเก็บน้อยกว่าการกักเก็บในรูปแบบน้ำเย็นมากและมีต้นทุนต่ำกว่าด้วย เหมาะกับอุตสาหกรรมหรืออาคารขนาดใหญ่ที่มีภาระในการปรับอากาศมาก ซึ่งจะช่วยประหยัดค่าไฟฟ้าและยังช่วยชาติในการลดภาระความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดของประเทศได้อีกด้วย

ปัจจุบันการชำระค่าไฟฟ้ามีการจำแนกประเภทผู้ใช้ต่างๆ ตามประเภท และปริมาณการใช้ไฟฟ้า โดยคิดราคาแตกต่างกันออกไป เช่น การคิดค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า (TOD Tariff) ทำให้มีความพยายามที่จะหลีกเลี่ยงการใช้ไฟฟ้าช่วงที่ราคาสูง แต่ในระบบทำความเย็นใช้ความเย็นตลอดเวลา เช่น อุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง ก็ใช้ระบบกักเก็บความเย็นด้วยน้ำแข็งแทน โดยผลิตความเย็นนำไปเก็บไว้ในช่วงค่าไฟฟ้าถูก และผลิตให้เพียงพอเพื่อนำมาใช้ในช่วงที่ค่าไฟฟ้าแพงจะช่วยประหยัดค่าไฟลงได้



รูปที่ 8-16 ระบบกักเก็บความเย็นด้วยน้ำแข็ง

ระบบกักเก็บความเย็นด้วยน้ำแข็งแบบต่างๆ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ได้แก่

- ระบบน้ำแข็งเกาะติดท่อ (Ice On - Coil)
- ระบบถังน้ำแข็ง (Ice tank)
- ระบบน้ำแข็งในภาชนะ (Ice Container)
- ระบบเก็บน้ำแข็ง (Ice Harvester)

เหตุผลที่พัฒนาระบบกักเก็บความเย็นด้วยน้ำแข็งมาใช้ในอุตสาหกรรม และในอาคาร เนื่องมาจากความต้องการลดค่าใช้จ่ายด้านการใช้ไฟฟ้า และค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak Demand)

8.8 สมรรถนะของเครื่องทำน้ำเย็นในระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์

สมรรถนะของเครื่องทำน้ำเย็นในระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ (Chiller Performance, ChP) เป็นค่าที่แสดงประสิทธิภาพการทำความเย็น คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานที่เครื่องสามารถทำความเย็นได้ต่อพลังงานที่ต้องใช้ (พลังงานไฟฟ้า)



รูปที่ 8-17 เครื่องทำน้ำเย็นในระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์

$$\text{ChP} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเครื่องอัดไอ (kW)}}{\text{ความสามารถในการทำความเย็นของเครื่องระเหย (TR)}}$$
$$\text{ChP} = \frac{3.517 \times P}{m_w \times C_p (t_i - t_e)}$$

โดย	ChP	คือ	ค่าสมรรถนะของเครื่องทำน้ำเย็นสำหรับระบบปรับอากาศ (kW/TR)
	P	คือ	กำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเครื่องอัดไอ (kW)
	m_w	คือ	อัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านเครื่องระเหย (cu.dm/s)
	C_p	คือ	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.187 (kJ/kg-°C)
	t_i	คือ	อุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าเครื่องระเหย (°C)
	t_e	คือ	อุณหภูมิของน้ำที่ไหลออกจากเครื่องระเหย (°C)

ตัวอย่างการหาประสิทธิภาพของระบบทำความเย็น

โจทย์ตัวอย่าง โรงงาน A มีเครื่องปรับอากาศแบบรวมศูนย์ที่มีความสามารถในการทำความเย็นได้ 150 Ton ที่ใช้งานมาแล้ว 10 ปี และต้องการหาค่าประสิทธิภาพของระบบทำความเย็น ณ ปัจจุบัน เพื่อทำการตัดสินใจเปลี่ยนเครื่องปรับอากาศใหม่ ดังนั้นจึงทำการตรวจวัดค่าต่างๆ มีผลการตรวจวัดดังนี้ (ทำการตรวจวัดเป็นเวลา 7 วัน เพื่อหาค่าเฉลี่ย)

กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 71.06 kW, อัตราการไหลของน้ำเย็นเฉลี่ย 34.01 dm³/s

อุณหภูมิน้ำเย็นเข้าเฉลี่ย 11.15 °C, อุณหภูมิน้ำเย็นออกเฉลี่ย 9.70 °C

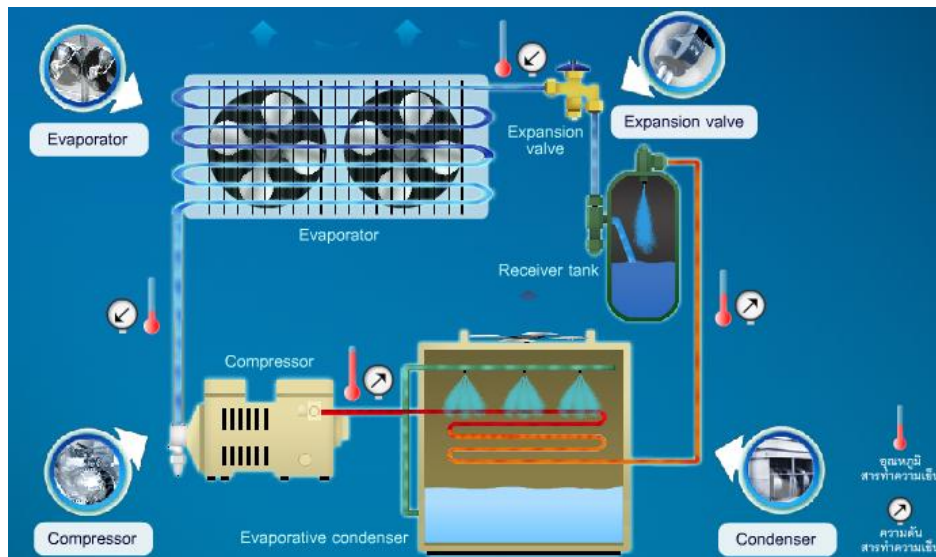
วิธีการคำนวณ จาก

$$\begin{aligned} \text{ChP} &= \frac{3.517 \times P}{m_w \times C_p (t_i - t_e)} \\ &= \frac{3.517 \times 71.06}{34.01 \times 4.187 (11.15 - 9.70)} \end{aligned}$$

$$\text{ChP} = 1.21 \text{ kW/TR} \quad \text{ตอบ}$$

8.9 วิธีการและแนวทางการประหยัดพลังงานของระบบทำความเย็น

ระบบทำความเย็นอุตสาหกรรมเป็นระบบที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในสัดส่วนที่สูงเมื่อเทียบกับระบบอื่นๆ ภายในโรงงาน การประหยัดพลังงานสามารถทำได้โดยการปรับปรุงประสิทธิภาพและการใช้งานของอุปกรณ์หลัก 4 อย่างดังนี้



รูปที่ 8-18 วัฏจักรการทำงานของระบบทำความเย็น

1) Compressor

- ขนาดและชุดควบคุมคอมเพรสเซอร์ต้องถูกต้องเหมาะสมกับภาระความเย็น
- คอมเพรสเซอร์ต้องทำงานที่อุณหภูมิควบแน่นต่ำสุดและอุณหภูมิอีวาพอเรเตอร์สูงสุด
- หมั่นบำรุงรักษาคอมเพรสเซอร์อย่างสม่ำเสมอ
- เลือกใช้มอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง

2) Evaporator

- พื้นที่ผิวของอีวาพอเรเตอร์ต้องมากพอเพื่อให้การถ่ายเทความร้อนทำได้สูงสุด
- ใช้พัดลมและมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในห้องเย็นและห้องแช่แข็ง
- อุณหภูมิของอีวาพอเรเตอร์ควรปรับให้สูงที่สุดเท่าที่ทำได้
- ละลายน้ำแข็งที่คอยล์เย็น เพราะน้ำแข็งที่เกาะคอยล์ทำให้สมรรถนะของระบบลดลง
- ควบคุมความร้อนภายนอกไม่ให้เข้ามาในห้องเย็นมากเกินไป

3) Condenser

- อุณหภูมิการควบแน่นควรต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อลดการใช้พลังงาน
- เดินพัดลมคอนเดนเซอร์และเครื่องสูบน้ำให้มากที่สุดเพื่อให้อุณหภูมิควบแน่นต่ำสุด
- ทำความสะอาดหัวฉีด (Spray nozzles) ของคอนเดนเซอร์อย่างสม่ำเสมอ
- รักษาพื้นผิวของคอนเดนเซอร์ให้สะอาดและน้ำที่ใช้ต้องผ่านการปรับสภาพแล้ว
- ไล่อากาศและก๊าซที่ไม่กลั่นตัวออกจากคอนเดนเซอร์ให้หมด

4) Expansion device

- เปลี่ยนการควบคุมแรงดันใน Evaporator ด้วยการหรีวาล์วมาเป็นการควบคุมแบบป้อนน้ำยาตามภาระความเย็น

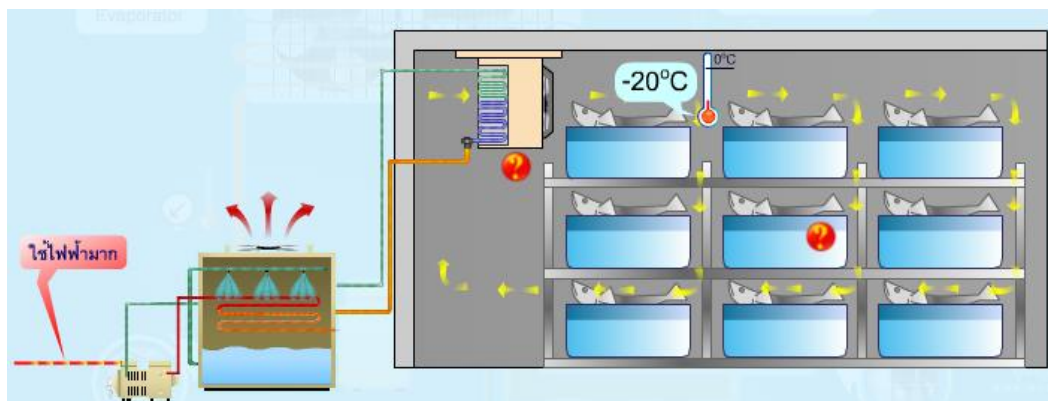
8.9.1 แนวทางการประหยัดพลังงานสำหรับระบบทำความเย็นแยกแต่ละอุปกรณ์

1) อีวาพอเรเตอร์

การทำความเย็นสำหรับห้องเย็นควรตั้งอุณหภูมิการใช้งานให้สูงสุดโดยไม่กระทบต่อผลิตภัณฑ์ จะทำให้อุณหภูมิที่อีวาพอเรเตอร์สูงขึ้นช่วยให้ประหยัดพลังงานได้

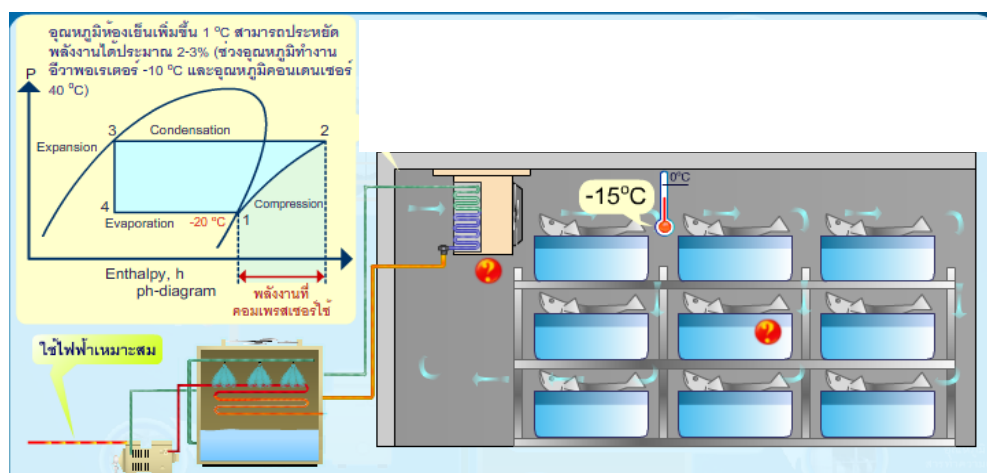
อุณหภูมิห้องเย็นต่ำเกินไป

- การตั้งอุณหภูมิห้องเย็นต่ำเกินไปจะทำให้ความดันที่อีวาพอเรเตอร์ลดต่ำลงด้วย ส่งผลให้คอมเพรสเซอร์ทำงานเพิ่มมากขึ้นไม่ประหยัดพลังงาน



รูปที่ 8-19 แนวทางการประหยัดพลังงานในอุปกรณ์อีวาพอเรเตอร์ (อุณหภูมิห้องเย็นต่ำเกินไป)

- อุณหภูมิห้องเย็นเหมาะสม การตั้งอุณหภูมิห้องเย็นอย่างเหมาะสมจะช่วยให้คอมเพรสเซอร์ทำงานในช่วงความดันแตกต่างไม่สูงเกินไปนัก รวมทั้งการวางแผนการเปิดปิดห้องเย็นที่ดี จะช่วยรักษาอุณหภูมิห้องเย็นได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 8-20 แนวทางการประหยัดพลังงานในอุปกรณ์อีวาพอเรเตอร์ (อุณหภูมิห้องเย็นเหมาะสม)

2) คอมเพรสเซอร์

คอมเพรสเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานสูงสุดในระบบทำความเย็นการควบคุมให้คอมเพรสเซอร์ทำงานที่ภาระเต็มพิกัดจะทำให้ประสิทธิภาพคอมเพรสเซอร์สูงสุด

▪ Single Compressor

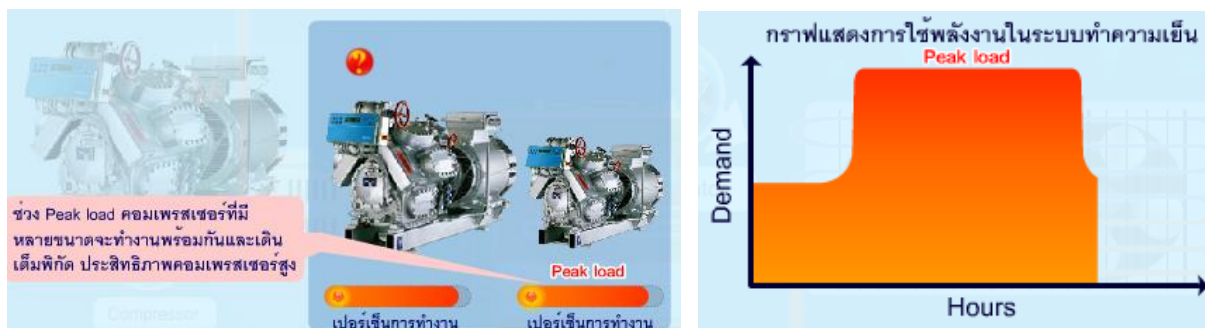
ระบบทำความเย็นที่ใช้คอมเพรสเซอร์ขนาดใหญ่ จำนวนชุดเดียวทำให้ไม่สามารถทำงานได้เต็มพิกัด ที่ภาระความเย็นต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ลดลงได้



รูปที่ 8-21 แนวทางการประหยัดพลังงานในอุปกรณ์คอมเพรสเซอร์ (Single Compressor)

▪ Multiple Compressors

ระบบทำความเย็นที่ใช้คอมเพรสเซอร์หลายขนาด ทำงานร่วมกันจะสามารถจัดการให้คอมเพรสเซอร์ทุกตัวทำงานที่ภาระทำความเย็นสูงสุด ทำให้คอมเพรสเซอร์มีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 8-20 แนวทางการประหยัดพลังงานในอุปกรณ์คอมเพรสเซอร์ (Multiple Compressor)

3) คอนเดนเซอร์

การรักษาพื้นผิวของคอนเดนเซอร์ให้สะอาดและน้ำที่ใช้ได้ผ่านการปรับสภาพรวมถึงการทำความสะอาดหัวฉีด (Nozzle) ของคอนเดนเซอร์จะทำให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น

▪ คอนเดนเซอร์ที่ไม่มีการบำรุงรักษา

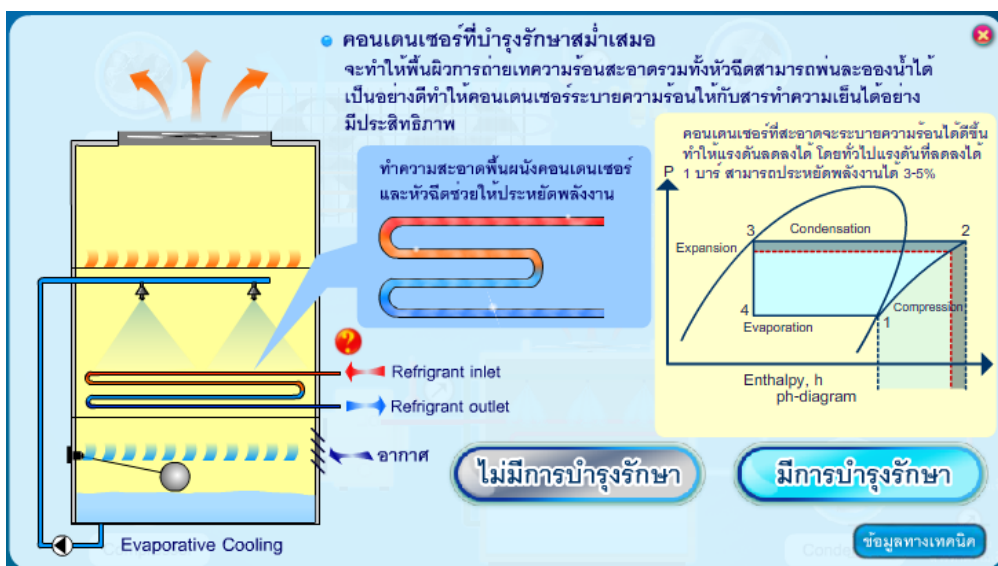
จะทำให้พื้นที่ถ่ายเทความร้อนสกปรกปรกวมทั้งหัวฉีดไม่สามารถปล่อยน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้คอนเดนเซอร์ไม่สามารถระบายความร้อนให้กับสารทำความเย็นได้



รูปที่ 8-21 อุปกรณ์คอนเดนเซอร์ที่ไม่มีการบำรุงรักษา

▪ คอนเดนเซอร์ที่บำรุงรักษาสม่ำเสมอ

จะทำให้พื้นผิวการถ่ายเทความร้อนสะอาดรวมทั้งหัวฉีดสามารถพ่นละอองน้ำได้เป็นอย่างดี ทำให้คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนให้กับสารทำความเย็นได้อย่างมีประสิทธิภาพ



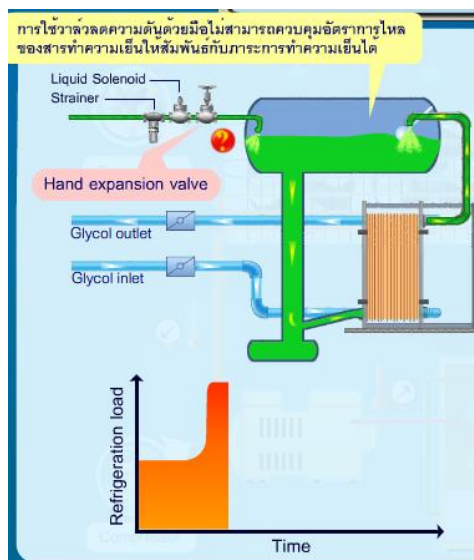
รูปที่ 8-22 อุปกรณ์คอนเดนเซอร์ที่มีการบำรุงรักษา

4) วาล์วลดความดัน

อุปกรณ์ลดความดันจะทำให้สารทำความเย็นมีความดันลดลงและปรับการไหลเวียนของสารทำความเย็นให้สอดคล้องกับปริมาณความเย็นที่ต้องการ

- วาล์วลดความดันชนิดปรับด้วยมือ (Hand expansion valve)

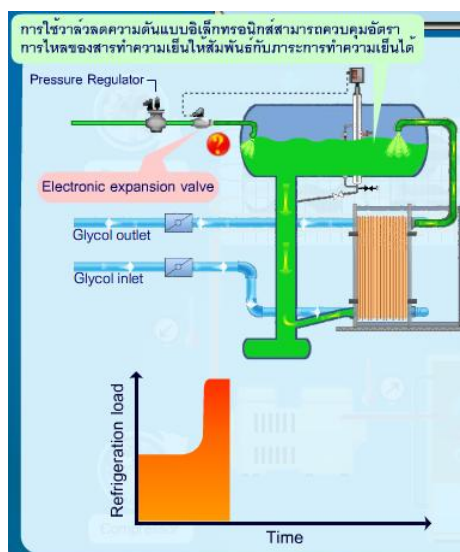
อุปกรณ์ลดความดันของสารทำความเย็นชนิดปรับด้วยมือ เหมาะสำหรับระบบทำความเย็นขนาดใหญ่ที่ปริมาณความร้อนที่อิวาพอเรเตอร์ไม่เปลี่ยนแปลงมาก และต้องมีเจ้าหน้าที่ควบคุมอยู่ตลอด ถ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงความร้อนมากจะทำให้การควบคุมไม่แม่นยำ อัตราการไหลของสารทำความเย็นจะไม่สอดคล้องกับภาระความเย็นที่ต้องการ



รูปที่ 8-23 วาล์วลดความดันชนิดปรับด้วยมือ

- วาล์วลดความดันแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic expansion valve)

อุปกรณ์ลดความดันของสารทำความเย็นแบบอิเล็กทรอนิกส์ จะใช้สัญญาณทางไฟฟ้าในการควบคุมการเปิด - ปิดวาล์ว ซึ่งการประยุกต์ใช้สัญญาณไฟฟ้าแทนสัญญาณความร้อน ทำให้การควบคุมเป็นไปอย่างแม่นยำและสามารถปรับอัตราการไหลของสารทำความเย็นได้สอดคล้องตามภาระความเย็นที่ต้องการ



รูปที่ 8-24 วาล์วลดความดันแบบอิเล็กทรอนิกส์

8.9.2 การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

ตัวอย่างการคำนวณผลประหยัดจากการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

โจทย์ตัวอย่าง โรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งทำความสะอาาระบบทำความเย็นของ Chillers ขนาด 100 Ton ทำให้ประหยัดได้ดังนี้

ก่อนทำความสะอาวัตต์กำลังไฟฟ้าได้ 113.9 kW ใช้พลังงานไฟฟ้า 2,420 kWh

หลังทำความสะอาวัตต์กำลังไฟฟ้าได้ 97.3 kW ใช้พลังงานไฟฟ้า 2,229 kWh

(ผลการตรวจวัดในเวลา 7 วัน คิดอัตราค่าไฟฟ้าแบบปกติ โดยค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า 196.26 บาท/kW และค่าพลังงานไฟฟ้า 2.7815 บาท/kWh)

วิธีการคำนวณ

ลดค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุด = $113.9 - 97.3 = 16.6$ kW

ผลการประหยัด = $16.6 \text{ (kW)} \times 196.26 \text{ (บาท/kW)} \times 12 \text{ (เดือน/ปี)} = 39,095$ บาท/ปี

ลดการใช้พลังงานไฟฟ้า = $2,420 - 2,229 = 191$ kWh

ผลการประหยัดได้ = $191 \text{ (kWh)} \times 2.7815 \text{ (บาท/kWh)} \times 52 \text{ (สัปดาห์/ปี)}$
= 27,626 บาท/ปี

รวมผลการประหยัด = $27,626 + 39,095$
= 66,721 บาท/ปี **ตอบ**

8.9.3 การปรับตั้งอุณหภูมิให้เหมาะสม

ตัวอย่างการคำนวณผลประหยัดจากการปรับตั้งอุณหภูมิให้เหมาะสม

โจทย์ตัวอย่าง โรงแรมมีการใช้งานเครื่องปรับอากาศแบบรวมศูนย์พักักัดการทำความเย็น 150 ตันความเย็น อุณหภูมิการปรับอากาศภายในอาคารมีค่า 22 -23 °C อุณหภูมิน้ำเย็นอยู่ที่ 45 °F (7.22 °C) ดังนั้นจึงทำการปรับอุณหภูมิน้ำเย็นเพิ่มขึ้นเป็น 47 °F (8.33 °C) โดยทำการตรวจวัดการใช้ไฟฟ้าก่อนและหลังปรับปรุงมีรายละเอียดดังนี้

ก่อนปรับอุณหภูมิวัตต์กำลังไฟฟ้าได้ 101.0 kW ใช้พลังงานไฟฟ้า 7,070 kWh

หลังปรับอุณหภูมิวัตต์กำลังไฟฟ้าได้ 98.4 kW ใช้พลังงานไฟฟ้า 6,888 kWh

(ผลการตรวจวัดในเวลา 7 วัน คิดอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU โดยค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า 132.93 บาท/kW และค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 3.00 บาท/kWh)

วิธีการคำนวณ

ลดค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดได้ = $101.0 - 98.4 = 2.6$ kW

ผลการประหยัด = $2.6 \times 132.93 \times 12 = 4,147.4$ บาท/ปี

ลดการใช้พลังงานไฟฟ้า = $7,070 - 6,888 = 182$ kWh/สัปดาห์

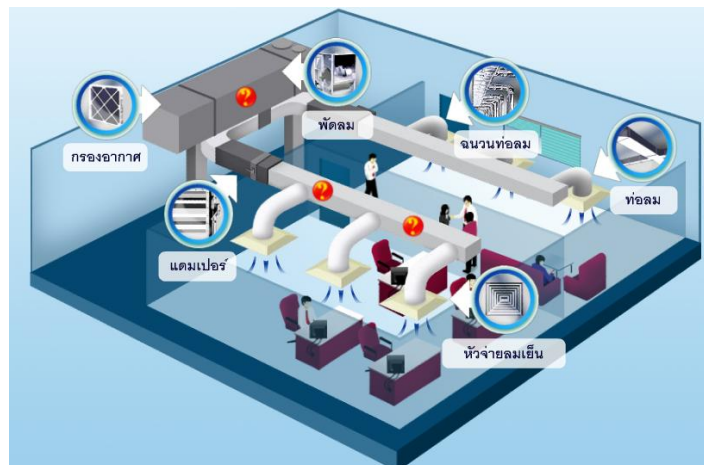
ผลการประหยัดได้ = $182 \times 3 \times 52 = 28,392$ บาท/ปี

รวมผลการประหยัด = $4,147.4 + 28,392$
= 32,539.4 บาท/ปี **ตอบ**

8.9.4 การเลือกใช้อุปกรณ์ประสิทธิภาพสูง

แนวทางการประหยัดพลังงานสำหรับระบบทำความเย็นโดยการใช้เลือกใช้อุปกรณ์ประสิทธิภาพสูง มีรายละเอียดแยกตามแต่ละอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

ระบบส่งจ่ายลมเย็นถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของระบบปรับอากาศ แนวทางการประหยัดพลังงานต่างๆ ของระบบส่งจ่ายลมเย็น จึงถือได้ว่าเป็นหลักสำคัญในการช่วยให้ระบบปรับอากาศมีประสิทธิภาพรวมด้านพลังงานที่ดีขึ้น



รูปที่ 8-25 ระบบส่งจ่ายอากาศเย็นที่มีประสิทธิภาพ

1) พัดลม

พัดลมเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนลม การเลือกใช้พัดลมจะขึ้นกับความดันลมที่ต้องการปริมาณลม การใช้พลังงานและระดับเสียง โดยเฉพาะเรื่องการใช้พลังงานและระดับเสียง เมื่อก่อนไม่ค่อยได้ให้ความสำคัญมากนัก แต่ในปัจจุบันจะเห็นว่าเริ่มมีการให้ความสำคัญเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานและความเงียบ ซึ่งได้กลายเป็นจุดขายไปแล้ว



รูปที่ 8-26 พัดลม

2) ฉนวนท่อลม

โดยปกติลมเย็นที่ไหลในท่อลมจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอากาศภายนอก ดังนั้น ความร้อนจากภายนอกท่อจึงไหลเข้าไปในท่อลมได้ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิลมเย็นสูงขึ้น เครื่องทำความเย็นจะทำงานหนักขึ้นสิ้นเปลืองพลังงาน การพิจารณาตรวจสอบและซ่อมแซมฉนวนท่อลมจะช่วยประหยัดพลังงานในระบบปรับอากาศ



รูปที่ 8-27 ฉนวนท่อลม

3) ท่อลม

โครงสร้างของท่อลมประกอบด้วยแผ่นสังกะสีพับขึ้นเป็นรูปท่อน ซึ่งมักจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมแล้วหุ้มทับภายนอกด้วยฉนวนใยแก้ว ที่มีลูมิเนียมฟอยล์เป็นเปลือกนอกอีกชั้นหนึ่ง เพื่อป้องกันไม่ให้ฉนวนใยแก้วหลุดลุ่ย ความหนาของแผ่นสังกะสี และลักษณะการพับขึ้นรูปของท่อลมจะมีมาตรฐานกำหนดให้เหมาะสมกับขนาดของท่อ



รูปที่ 8-30 ท่อลม

4) หัวจ่ายลมเย็น

ติดตั้งตรงปากท่อลมส่ง เพื่อช่วยในการกระจายลมเย็น และเพื่อความสวยงาม โดยมีคุณสมบัติในการจ่ายลม เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงสุด ควรเลือกหัวจ่ายลมเย็นที่ทำให้เกิดความดันตกคร่อม น้อยและสามารถกระจายลมได้ดี



รูปที่ 8-28 หัวจ่ายลมเย็น

5) แดมเปอร์

เป็นอุปกรณ์ประกอบในระบบท่อลม เพื่อควบคุมปริมาณลม เพื่อผลของการประหยัดพลังงานควรลดความดันตกคร่อมที่มีอยู่ในระบบโดยการหลีกเลี่ยงการติดตั้ง Air Volume Damper ที่ไม่จำเป็น



รูปที่ 8-29 แดมเปอร์

6) กรองอากาศ

แผงกรองอากาศทั่วไปใช้วัสดุทำจากใยแก้วชนิดหยาบ อลูมิเนียมหรือเส้นลวดสานจะมีประสิทธิภาพในการกรองด้ามักจะดักฝุ่นที่มีอนุภาคใหญ่ที่มองด้วยตาเปล่า ส่วนฝุ่นละอองหรือเชื้อโรคที่มีอนุภาคเล็กยังคงผ่านไปได้ ซึ่งถ้าเข้าไปมากจะไปจับที่คอยล์เย็น ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง และไปจับที่คอมไพร์ และหลอดไฟฟ้า ทำให้คุณภาพแสงลดลง ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษามากขึ้น รวมทั้งส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้อาศัยภายในอาคารด้วย ดังนั้น ควรพิจารณานำแผ่นกรองอากาศประสิทธิภาพสูงมาใช้



รูปที่ 8-30 กรองอากาศ

7) อุปกรณ์อื่นๆ เพิ่มเติม

7.1) ความยาวท่อลมที่เหมาะสม

- ความยาวของท่อลมในเกณฑ์ประมาณ 40 – 50 เมตร จัดว่าเป็นระยะที่ยาวมากแล้ว โดยทั่วไปมักจะไม่เกินเกณฑ์นี้ แต่ถ้าต้องเกินจริงวิศวกรจะต้องตรวจความดันของพัดลมให้เพียงพอ และต้องระวังในเรื่องเสียงของพัดลมมากขึ้น ประกอบกับมอเตอร์พัดลมจะต้องมีขนาดใหญ่ขึ้น

- การเดินท่อลมยาว ๆ ต้องระวังเรื่องลมรั่วด้วย เพราะลมจะรั่วจากท่อลมได้จำนวนหนึ่ง หากลมรั่วมากเกินไปก็เท่ากับเสียลมแอร์ไปโดยเปล่าประโยชน์ ความเร็วของลมในท่อลมเมนมักจะสูงถึง 1,500 – 2,000 ฟุต/นาที่ ดังนั้น โดยทั่วไปวิศวกรจะเดินท่อแยก (Branch) ออกมาจากท่อเมนก่อน แล้วขยายท่อเพื่อลดความเร็วของลมลงเหลือไม่เกิน 800 ฟุต/นาที่ จนถึงหัวจ่ายแอร์ ซึ่งจะจ่ายลมที่มีความเร็วประมาณ 400 – 500 ฟุต/นาที่

7.2) มาตรฐาน SMACNA

SMACNA (Sheet Metal and Air Conditioning Contractors National Association) คือ มาตรฐานการประกอบท่อลม จัดทำโดยสมาคม SMACNA สหรัฐอเมริกา ซึ่งกำหนดมาตรฐานการสร้างท่อลมขึ้นโดยระบุความหนาโลหะแผ่น วิธีการรัดท่อและเสริมความแข็งแรงท่อ ตลอดจนการต่อท่อลมเข้าด้วยกัน เพื่อลดการรั่วซึมของอากาศ ควรติดตั้งท่อลมให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด



รูปที่ 8-31 มาตรฐาน SMACNA

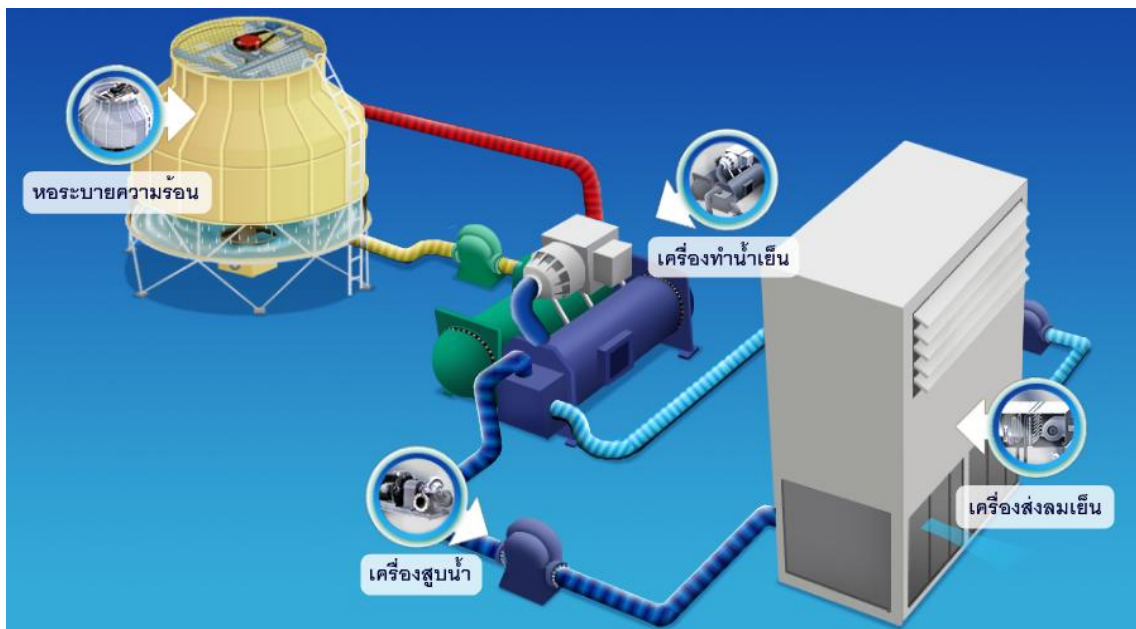
7.3) การแบ่งโซนและระบบส่งจ่ายลม

แบบปริมาตรแปรเปลี่ยน (VAV) ระบบ VAV จะช่วยให้สามารถควบคุมอุณหภูมิห้องได้อย่างแม่นยำ ตามความต้องการของแต่ละพื้นที่ โดยทั่วไปจะติดตั้งร่วมกับ Inverter Control ซึ่งจะปรับความเร็วรอบของพัดลมจ่ายอากาศให้เหมาะสม

8.9.5 การควบคุมภาระการทำงานของอุปกรณ์ในระบบทำความเย็น

แนวทางการประหยัดพลังงานสำหรับระบบทำความเย็นโดยการควบคุมภาระการทำงานของอุปกรณ์ในระบบทำความเย็น มีรายละเอียดแยกตามแต่ละอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

ระบบปรับอากาศส่วนใหญ่ออกแบบให้มีขนาดพิกัดใหญ่กว่าภาระทำความเย็นจริง เพื่อสำรองสำหรับความไม่แน่นอนของสภาพอากาศ จำนวนผู้อาศัยหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า ทำให้เกิดภาระต่อการทำความเย็น ถ้าควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้ทำงานได้เหมาะสมกับความต้องการจริงจะช่วยประหยัดพลังงาน

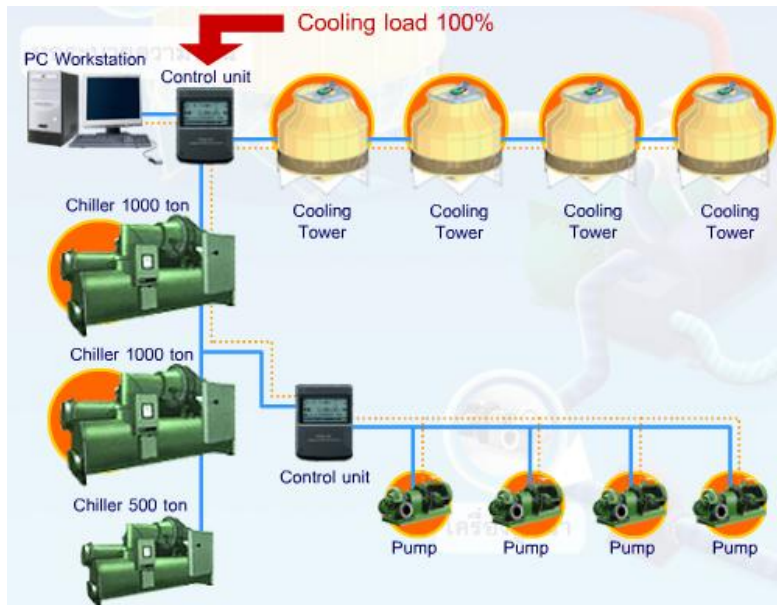


รูปที่ 8-32 การควบคุมภาระการทำงานของอุปกรณ์ในระบบทำความเย็น

1) เครื่องทำน้ำเย็น

การควบคุมระบบทำความเย็น

กรณีที่ภาระทำความเย็นมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การควบคุมระบบทำความเย็นเพื่อให้อุปกรณ์ในระบบทำงานร่วมกันได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพพลังงาน โดยการควบคุมการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น การเปิดปิดเครื่องสูบน้ำและหอระบายความร้อนโดยอัตโนมัติ

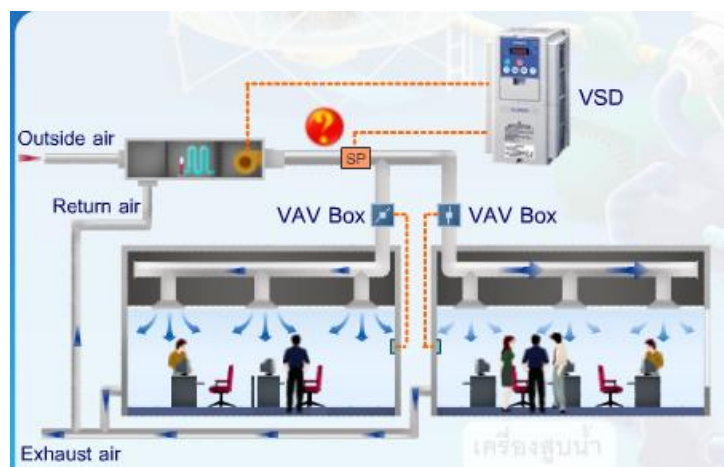


รูปที่ 8-33 การควบคุมภาระการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็น

2) เครื่องส่งลมเย็น

การควบคุมระบบส่งจ่ายลมเย็น

การควบคุมระบบส่งจ่ายลมเย็นโดยการนำระบบส่งจ่ายลมเย็นแบบปริมาตรแปรเปลี่ยน (Variable air volume; VAV) มาใช้จะช่วยให้ปริมาณลมเย็นที่จ่ายให้กับพื้นที่ปรับอากาศแปรเปลี่ยนไปตามภาระทำความเย็น ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ

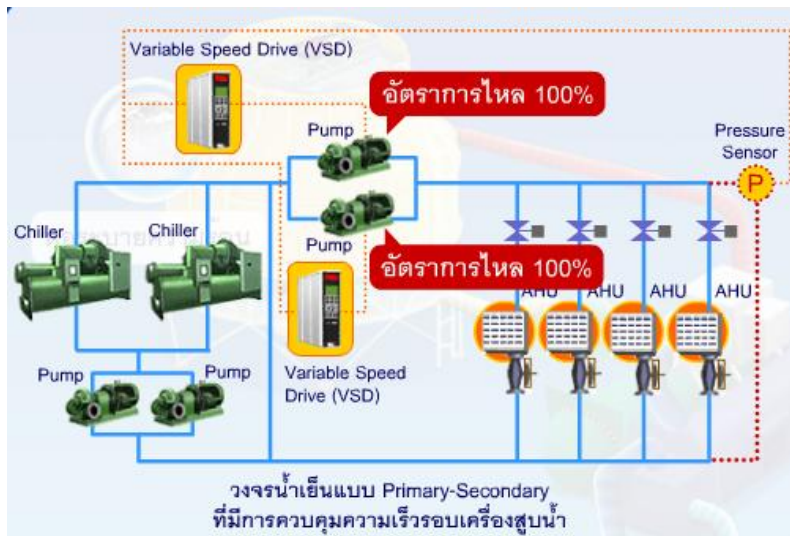


รูปที่ 8-34 การควบคุมภาระการทำงานของเครื่องส่งลมเย็น

3) เครื่องสูบน้ำ

การควบคุมความเร็วรอบเครื่องสูบน้ำเอนทิติยภูมิ

สามารถปรับปริมาณน้ำได้ตามภาระทำความเย็นโดยอาศัยความดันตกคร่อมที่เครื่องส่งลมเย็นเป็นสัญญาณในการควบคุม เมื่อภาระทำความเย็นลดลง อัตราการไหลที่เครื่องสูบน้ำลดลงด้วย ทำให้ระบบส่งจ่ายน้ำเย็นมีประสิทธิภาพพลังงานส่วนเครื่องสูบน้ำปฐมภูมิมีข้อจำกัดในการปรับปริมาณน้ำ เพราะต้องรักษาอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องทำน้ำเย็นไม่ให้ต่ำกว่าที่กำหนด มิฉะนั้นอาจเกิดความเสียหาย

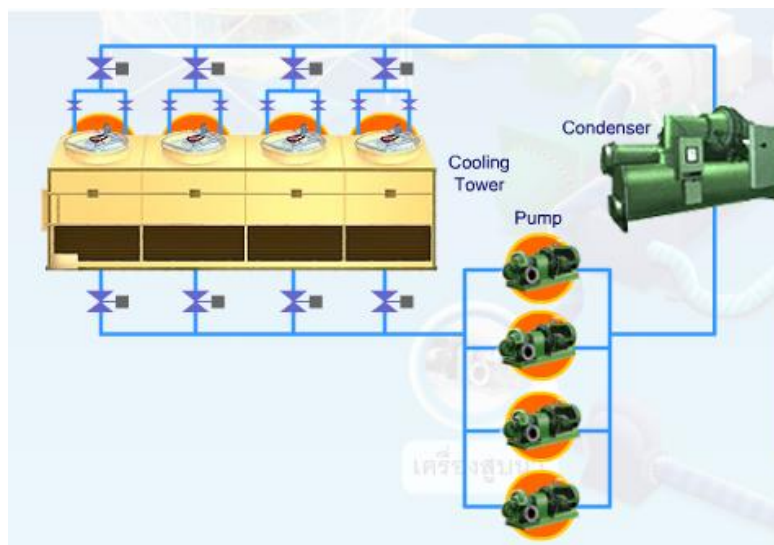


รูปที่ 8-35 การควบคุมภาระการทำงานของเครื่องสูบน้ำ

4) หอระบายความร้อน

การควบคุมการทำงานของหอระบายความร้อน

เพื่อให้หอระบายความร้อนทำงานตามภาระความเย็นอย่างเหมาะสม เพราะในบางครั้งภาระทำความเย็นลดลง สามารถหยุดการทำงานของหอระบายความร้อนและเครื่องสูบน้ำได้ ช่วยให้ระบบระบายความร้อนมีประสิทธิภาพพลังงาน



รูปที่ 8-39 การควบคุมภาระการทำงานของหอระบายความร้อน

8.9.6 การบำรุงรักษาระบบทำความเย็น

สำหรับการบำรุงรักษาระบบทำความเย็นเพื่อการประหยัดพลังงานของระบบทำความเย็นมี อยู่ 2 แนวทางหลัก คือ ปัจจัยการออกแบบระบบปรับอากาศที่ดี และการบำรุงรักษาระบบปรับอากาศดัง แสดงรายละเอียดต่อไปนี้

1) ปัจจัยการออกแบบระบบปรับอากาศที่ดี

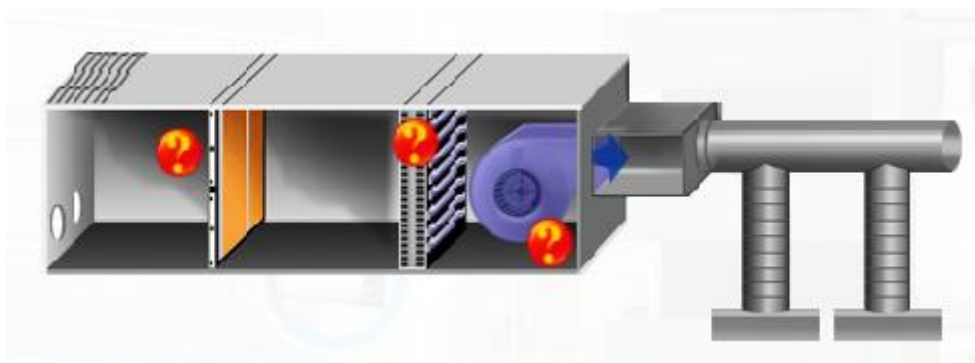
- การถ่ายเทความร้อนรวมของกรอบอาคาร การออกแบบอาคารที่ดีต้องพิจารณาค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของกรอบอาคารเพื่อประเมินความร้อนที่เข้าในอาคารที่มีการปรับอากาศ
- ประสิทธิภาพระบบปรับอากาศที่เหมาะสม เลือกประสิทธิภาพระบบปรับอากาศให้สอดคล้องกับลักษณะการใช้งาน ขนาดและพื้นที่ปรับอากาศชั่วโมงการทำงาน รวมทั้งงบประมาณและการบำรุงรักษา
- การควบคุมอย่างมีประสิทธิภาพ การควบคุมระบบปรับอากาศแบบอัตโนมัติ ทำให้ อุปกรณ์ต่าง ๆ ทำงานได้อย่างสอดคล้องกับภาระการทำความเย็นที่เกิดขึ้นจริงช่วยให้ประหยัดพลังงาน

2) การบำรุงรักษาระบบปรับอากาศ

2.1) เครื่องส่งลมเย็น

การบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่าง ๆ ในเครื่องส่งลมเย็น โดยทั่วไปมีดังนี้

- แผงกรองอากาศ
- ขดท่อทำความเย็น
- พัดลม

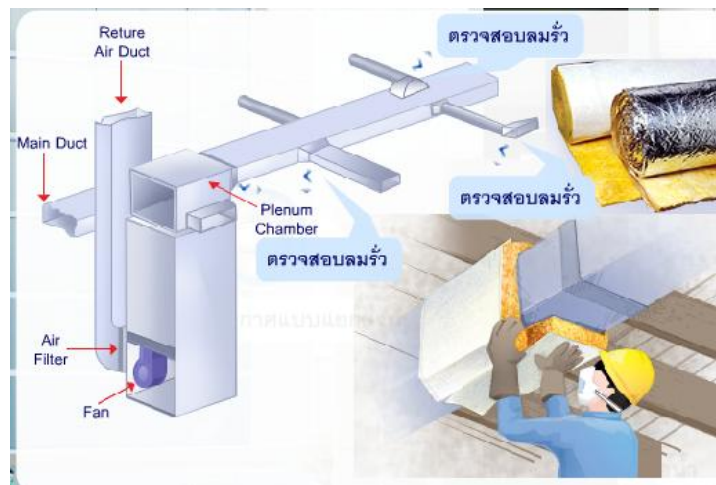


รูปที่ 8-36 การบำรุงรักษาเครื่องส่งลมเย็น

2.2) ท่อลม

การตรวจสอบลมรั่วที่ท่อลมและฉนวนหุ้มท่อลม โดยปกติลมรั่วที่ท่อลมไม่ควรจะเกิน 5% ของปริมาณลมจ่าย ถ้าหากมีลมรั่วระหว่างทางมาก ลมก็จะถึงปลายทางน้อย การตรวจสอบรอยรั่วที่ท่อลมในขั้นตอนทำได้วิธีฟังเสียงลมรั่ว หากได้ยินเสียงลมรั่วที่บริเวณใด ให้เข้าค้นหาจุดรั่วให้พบแล้วอุดด้วยซิลิโคน จุดรั่วที่พบบ่อย เช่น ช่วงรอยต่อระหว่างท่อลมกับหัวจ่าย หัวมุมของหน้าแปลนต่อท่อลม รอยต่อระหว่างท่อลมเข้ากับท่อลมอ่อน รอยต่อระหว่างกล่องลมกับหัวจ่ายแบบสล็อต เป็นต้น

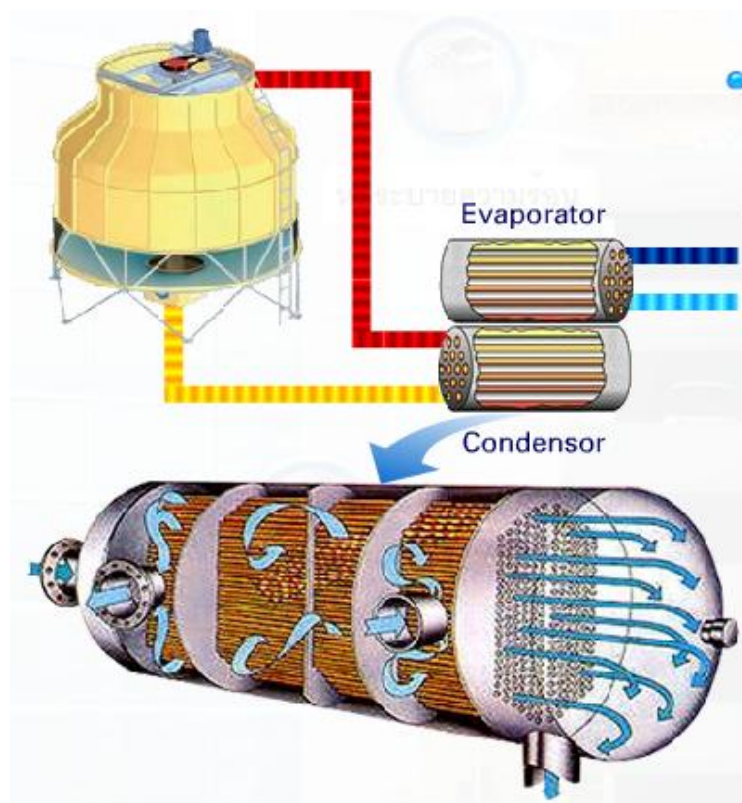
โดยปกติลมเย็นที่ไหลในท่อลมจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอากาศภายนอก ดังนั้น ความร้อนจากภายนอกที่อจึงไหลเข้าไปในท่อลมได้ การพิจารณาตรวจสอบและซ่อมแซมฉนวนท่อลมจะช่วยประหยัดพลังงานในระบบปรับอากาศ



รูปที่ 8-37 การบำรุงรักษาท่อลม

2.3) เครื่องควบแน่น

การทำความสะอาดเครื่องควบแน่นจะช่วยให้พื้นผิวการถ่ายเทความร้อนสะอาดขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบปรับอากาศ ดังนี้



รูปที่ 8-38 การบำรุงรักษาเครื่องควบแน่น

- ใช้การเติมน้ำยาเคมี เพื่อทำความสะอาดท่อคอนเดนเซอร์
- ใช้แปรงในการทำความสะอาดท่อคอนเดนเซอร์ แบบนี้จะต้องหยุดเดินเครื่อง เพื่อทำความสะอาด โดยทั่วไปจะทำความสะอาดปีละครั้ง
- การทำความสะอาดคอนเดนเซอร์อัตโนมัติ ทำให้ท่อคอนเดนเซอร์สะอาดตลอดเวลา
- การควบคุมคุณภาพน้ำอย่างเหมาะสมช่วยให้ห้ระบายความร้อนและท่อคอนเดนเซอร์สะอาด

2.4) เครื่องสูบน้ำ

ควรตรวจสอบรอยรั่ว น้ำรั่วที่ซีลและท่อน้ำ รวมถึงการหล่อลื่นเพลลาและแบร็ง ควรทำการสมดุลและปรับระยะ (Balance & Clearance) ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนชิ้นส่วนอุปกรณ์ เพื่อป้องกันความเสียหายภายหลัง



รูปที่ 8-39 การบำรุงรักษาเครื่องสูบน้ำ

2.5) ท่อน้ำ

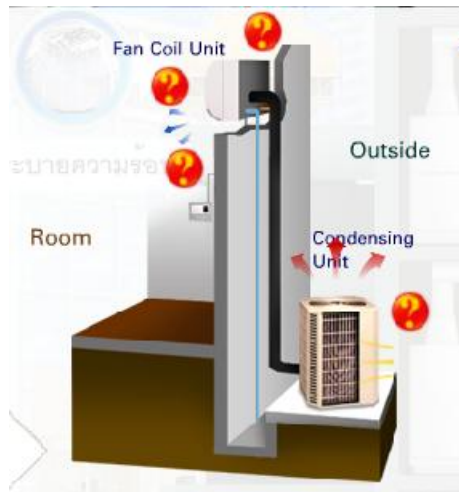
การตรวจสอบการรั่วของน้ำเย็นและฉนวนหุ้ม ควรตรวจสอบการรั่วของท่อน้ำเย็นและซ่อมแซมฉนวนท่อน้ำ รวมทั้งแก้ไขการรั่วของน้ำเย็นที่อุปกรณ์ต่าง ๆ เพราะน้ำเย็นที่รั่วจะทำให้ภาระการทำน้ำเย็นของเครื่องทำน้ำเย็นเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 8-40 การบำรุงรักษาท่อน้ำ

2.6) เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน

เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนที่ติดตั้งในอาคารจำนวนมาก จะต้องดูแลรักษาอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่สิ้นเปลืองพลังงาน



รูปที่ 8-41 การบำรุงรักษาเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน

2.7) หอระบายความร้อน

อุณหภูมิในระบบน้ำของหอระบายเหมาะกับการเกิดตะกอน ตะไคร่ และเชื้อแบคทีเรียจึงต้องมีการเติมสารเคมี เพื่อป้องกันสิ่งเหล่านี้ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบอาจลดลงได้ ควรทำความสะอาดหิวนระบายความร้อนรวมถึงหัวกระจายน้ำ และ Basin หรือจัดให้มีการบำบัดคุณภาพน้ำในระบบน้ำหล่อเย็น



รูปที่ 8-42 การบำรุงรักษาหอระบายความร้อน

แบบประเมินผลการเรียน

หน่วยที่ 8

เครื่องทำความเย็นและปรับอากาศขนาดใหญ่

คำสั่ง จงทำเครื่องหมาย X ลงข้อที่ถูกต้อง

1. ข้อใดเป็นวัตถุประสงค์ของ “การแช่เยือกแข็งอาหาร”
 - ก. เพื่อการชะลอการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพและเคมี รวมถึงปฏิกิริยาการขยายพันธุ์ของจุลินทรีย์ที่จะทำให้อาหารเน่าเสีย
 - ข. เพื่อนำอาหารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งมาเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น
 - ค. เพื่อเป็นการถนอมอาหารประเภทเนื้อสัตว์เท่านั้น
 - ง. ถูกทุกข้อ
2. ลักษณะในข้อใด “ไม่ใช่” การแช่แข็งในตู้แช่แข็งที่มีลมเป่า (Air Blast freezing)
 - ก. การแช่แข็งแบบอุโมงค์ (Tunnel Freezer)
 - ข. การแช่แข็งแบบสายพาน (Belt Freezer)
 - ค. การแช่แข็งแบบเป่าลอยตัวในอากาศ (Fluidized Bed Freezer)
 - ง. การแช่แข็งด้วยแผ่นโลหะให้ความเย็น (plate freezing)
3. อุณหภูมิในห้องเย็นหรือห้องแช่แข็งอาหาร ข้อใดที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด
 - ก. อุณหภูมิต่ำกว่า 0 °C เพื่อใช้ในการแช่ผักและผลไม้ และสูงกว่า 0 °C เพื่อใช้ในการแช่เนื้อและไอศกรีม
 - ข. อุณหภูมิสูงกว่า 0 °C เพื่อใช้ในการแช่ผักและผลไม้
 - ค. อุณหภูมิต่ำกว่า 0 °C เพื่อใช้ในการแช่เนื้อและไอศกรีม
 - ง. ถูกเฉพาะข้อ ข. และ ค.
4. ข้อใด “ไม่ใช่” โครงสร้างของห้องเย็นหรือห้องแช่แข็งอาหาร
 - ก. ผนัง และเพดานทึบ พร้อมทั้งบุฉนวนกันความร้อน
 - ข. รถขนถ่ายสินค้า
 - ค. ประตูคนเข้า-ออกด้าน ในและด้านนอก
 - ง. ประตูขนถ่ายผลิตภัณฑ์ด้านใน และด้านนอก

5. “อาคารขนาดใหญ่” ในข้อใดกล่าวถูกต้อง

- ก. อาคารที่คนสามารถอยู่ หรือใช้สอยได้ และมีความสูงตั้งแต่ 23 เมตรขึ้นไปจากระดับพื้นดิน เวลาจะวัดก็วัดถึง พื้นชั้นดาดฟ้าในกรณีที่เป็น หลังคาแบน แต่ถ้าเป็น หลังคาจั่ว ให้วัดถึงยอดผนังของชั้นสูงสุด
- ข. อาคารที่สูงจากระดับถนน 15 เมตรขึ้นไป และ พื้นทั้งหมดทุกชั้น เกิน 1,000 ตารางเมตร หรือมีพื้นที่ชั้นใดชั้นหนึ่งเกิน 2,000 ตารางเมตร ไม่ว่าจะสูงเท่าไรก็ตาม
- ค. อาคารที่มีพื้นที่รวมทุกชั้น หรือ ชั้นเดียวเกิน 10,000 ตารางเมตรอาคารขนาดใหญ่ และขนาด ใหญ่พิเศษ มีสิ่งที่คล้ายกัน คือ คนต้องเข้าไปใช้สอย เป็นที่อยู่ หรือประกอบกิจการได้ ซึ่งคำว่าประกอบกิจการ ก็คือ หรือเป็นสถานที่ที่จดทะเบียนการค้าหรือ เป็นสถานที่ ทำการค้าขาย หรือที่ค้าขายที่ประชาชนทั่วไปเข้าไปติดต่อกได้

ง. ถูกทุกข้อ

6. ข้อใด “ไม่ใช่” หลักในการเลือกใช้น้ำยาที่ถูกต้อง

- ก. PIPE DIAMETER ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อน้ำยา
- ข. PIPE LENGTH ความยาวท่อน้ำยา
- ค. GAS VELOCITY ความเร็วในการเคลื่อนที่ของก๊าซ
- ง. NUMBER OF FITTINGS จำนวนของข้อต่อต่างๆ เช่น ข้องอ

7. ข้อใดเป็นระบบระบายความร้อนของเครื่องปรับอากาศแบบчилเลอร์

- ก. ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ
- ข. ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ
- ค. ถูกต้องทั้งข้อ ก. และ ข.
- ง. ข้อ ก. ผิด และข้อ ข. ถูกต้อง

8. ข้อใดต่อไปนี้ “ไม่ใช่” อุปกรณ์หลักที่สำคัญในчилเลอร์

- ก. คอยล์ร้อน หรือตัวควบแน่น (Condenser)
- ข. คอยล์เย็น (Evaporator)
- ค. อุปกรณ์ลดความดัน (Expansion Valve)
- ง. ฉนวนกันความร้อน (Insulator)

9. ข้อใด “ไม่ใช่” ชนิดของคอมเพรสเซอร์ที่ใช้กันทั่วไป

- ก. แบบลูกสูบ (Reciprocating Compressor)
- ข. แบบก๊าซ (Gas compressor)
- ค. แบบโรตารี (Rotary Compressor)
- ง. แบบหอยโข่ง (Centrifugal Compressor)

10. ข้อใดกล่าวถูกต้องเกี่ยวกับ “ระบบกักเก็บความเย็นด้วยน้ำแข็ง”
- ก. อุปกรณ์ที่เก็บความเย็นของน้ำแข็งที่ผลิตได้ในช่วง Off peak
 - ข. อุปกรณ์ที่เก็บความเย็นของน้ำแข็งที่ผลิตได้ในช่วง On Peak
 - ค. อุปกรณ์ที่ช่วยเพิ่มค่าไฟฟ้าและเพิ่มภาระความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด
 - ง. ถูกทุกข้อ
11. ข้อใด “ไม่ใช่” ระบบกักเก็บความเย็นด้วยน้ำแข็งแบบต่างๆ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน
- ก. ระบบน้ำแข็งเกาะติดท่อ (Ice On - Coil)
 - ข. ระบบกระป๋องน้ำแข็ง (Ice Bucket)
 - ค. ระบบน้ำแข็งในภาชนะ (Ice Container)
 - ง. ระบบเก็บน้ำแข็ง (Ice Harvester)
12. ข้อใดเป็นค่าที่แสดงประสิทธิภาพการทำความเย็น
- ก. Chiller Performance, ChP
 - ข. Coefficient of Performance, COP
 - ค. Energy Efficiency Rating, EER
 - ง. ทุกข้อเป็นคำตอบที่ถูกต้อง
13. โรงงาน A มีเครื่องปรับอากาศแบบรวมศูนย์ที่มีความสามารถในการทำความเย็นได้ 150 Ton ที่ใช้งานมาแล้ว 10 ปี และจากการตรวจวัดค่าต่างๆ มีผลการตรวจวัดดังนี้ (ทำการตรวจวัดเป็นเวลา 7 วัน เพื่อหาค่าเฉลี่ย)
- กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 71.06 kW, อัตราการไหลของน้ำเย็นเฉลี่ย 34.01 dm³/s
อุณหภูมิน้ำเย็นเข้าเฉลี่ย 11.15 °C, อุณหภูมิน้ำเย็นออกเฉลี่ย 9.70 °C
- ดังนั้นจงหาค่าประสิทธิภาพของระบบทำความเย็น ณ ปัจจุบัน เพื่อทำการตัดสินใจเปลี่ยนเครื่องปรับอากาศใหม่
- ก. 1.45 kW/TR
 - ข. 1.21 kW/TR
 - ค. 1.63 kW/TR
 - ง. 1.72 kW/TR
14. ข้อใด “ไม่ใช่” แนวทางการประหยัดพลังงานสำหรับระบบทำความเย็นในอุปกรณ์ “คอนเดนเซอร์ (Condenser)”
- ก. อุณหภูมิการควบแน่นควรสูงที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อลดการใช้พลังงาน
 - ข. เดินพัดลมคอนเดนเซอร์และเครื่องสูบน้ำให้มากที่สุดเพื่อให้อุณหภูมิควบแน่นต่ำสุด
 - ค. ทำความสะอาดหัวฉีด (Spray nozzles) ของคอนเดนเซอร์อย่างสม่ำเสมอ
 - ง. รักษาพื้นที่ผิวของคอนเดนเซอร์ให้สะอาดและน้ำที่ใช้ต้องผ่านการปรับสภาพแล้ว

15. โรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งทำความสะอาดระบบทำความเย็นของ Chillers ขนาด 100 Ton ทำให้ประหยัดได้ดังนี้

ก่อนทำความสะอาดวัดกำลังไฟฟ้าได้ 113.9 kW ใช้พลังงานไฟฟ้า 2,420 kWh

หลังทำความสะอาดวัดกำลังไฟฟ้าได้ 97.3 kW ใช้พลังงานไฟฟ้า 2,229 kWh

ดังนั้นจึงหาผลประโยชน์รวมทั้งหมดที่ได้ (ผลการตรวจวัดในเวลา 7 วัน คิดอัตราค่าไฟฟ้าแบบปกติ โดยค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า 196.26 บาท/kW และค่าพลังงานไฟฟ้า 2.7815 บาท/kWh)

ก. 40,876 บาท/ปี

ข. 66,721 บาท/ปี

ค. 65,765 บาท/ปี

ง. 77,498 บาท/ปี

16. โรงแรมมีการใช้งานเครื่องปรับอากาศแบบรวมศูนย์พักักการทำความเย็น 150 ตันความเย็น อุณหภูมิการปรับอากาศภายในอาคารมีค่า 22 -23 °C อุณหภูมิน้ำเย็นอยู่ที่ 45 °F (7.22 °C) ดังนั้นจึงทำการปรับอุณหภูมิน้ำเย็นเพิ่มขึ้นเป็น 47 °F (8.33 °C) โดยทำการตรวจวัดการใช้ไฟฟ้าก่อนและหลังปรับปรุงมีรายละเอียดดังนี้

ก่อนปรับอุณหภูมิวัดกำลังไฟฟ้าได้ 101.0 kW ใช้พลังงานไฟฟ้า 7,070 kWh

หลังปรับอุณหภูมิวัดกำลังไฟฟ้าได้ 98.4 kW ใช้พลังงานไฟฟ้า 6,888 kWh

ดังนั้นจึงหาผลประโยชน์รวมทั้งหมดที่ได้ (ผลการตรวจวัดในเวลา 7 วัน คิดอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU โดยค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า 132.93 บาท/kW และค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 3.00 บาท/kWh)

ก. 38,759 บาท/ปี

ข. 35,753 บาท/ปี

ค. 32,539 บาท/ปี

ง. 26,467 บาท/ปี

17. ข้อใดต่อไปนี้เป็นความหมายของ “แดมเปอร์ (Damper)”

ก. เป็นอุปกรณ์ประกอบในท่อลม เพื่อควบคุมปริมาณลม

ข. เป็นอุปกรณ์ปรับปริมาณการไหลของน้ำเย็น

ค. เป็นอุปกรณ์กรองอากาศ และฝุ่นละออง

ง. เป็นอุปกรณ์ปรับความดันสารทำความเย็น

18. ความยาวท่อลมที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงประมาณกี่เมตร

ก. 30-40 เมตร

ข. 40-50 เมตร

ค. 50-60 เมตร

ง. มากกว่า 60 เมตรขึ้นไป

19. มาตรฐาน SMACNA คืออะไร

ก. มาตรฐานการประกอบท่อลม

ข. มาตรฐานการประกอบคอมเพรสเซอร์

ค. มาตรฐานการประกอบพัดลม

ง. มาตรฐานการประกอบหอผึ่งน้ำ

20. ข้อใดต่อไปนี้ “ไม่ใช่” การบำรุงรักษาเครื่องควบแน่น (Condenser)

ก. ใช้การเติมน้ำยาเคมีเพื่อทำความสะอาดท่อคอนเดนเซอร์

ข. ใช้แปรงในการทำความสะอาดท่อคอนเดนเซอร์

ค. การทำความสะอาดคอนเดนเซอร์อัตโนมัติ

ง. ใช้น้ำกระด้างในการทำความสะอาดคอนเดนเซอร์



กรมพัฒนาพลังงานทดแทน
และอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน



โครงการพัฒนาลักสูตรการอนุรักษ์พลังงานและพลังงานทดแทน
สำหรับสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา

รายวิชาที่ 2

การออกแบบระบบไฟฟ้า

รหัส 3104 – 2002 หน่วยที่ 10 ระบบไฟฟ้าสำหรับอาคารชุด

หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง พุทธศักราช 2557
ประเภทวิชาอุตสาหกรรม
สาขาวิชาไฟฟ้า

.....

จุดประสงค์สาขาวิชา

1. เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ความรู้และทักษะด้านการสื่อสาร ทักษะการคิดและการแก้ปัญหา และทักษะทางสังคมและการดำรงชีวิตในการพัฒนาตนเองและวิชาชีพ
2. เพื่อให้มีความเข้าใจหลักการบริหารและจัดการวิชาชีพ การใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและหลักการของงานอาชีพที่สัมพันธ์เกี่ยวข้องกับการพัฒนาวิชาชีพไฟฟ้า ให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงและความก้าวหน้าของเศรษฐกิจ สังคมและเทคโนโลยี
3. เพื่อให้มีความเข้าใจในหลักการและกระบวนการทำงานในกลุ่มงานพื้นฐานประยุกต์ใช้ความรู้ทักษะประสบการณ์และเทคโนโลยีพัฒนางานอาชีพ วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ ด้วยทฤษฎีและปฏิบัติ การออกแบบ เขียนแบบและประมาณราคา
4. เพื่อให้สามารถออกแบบ วิเคราะห์ แก้ปัญหาในงานติดตั้ง ควบคุมระบบไฟฟ้า เครื่องทำความเย็น และปรับอากาศ
5. เพื่อให้สามารถปฏิบัติงานติดตั้ง ซ่อมบำรุง ทดสอบ ควบคุมระบบไฟฟ้า เครื่องทำความเย็นและปรับอากาศ
6. เพื่อให้สามารถปฏิบัติงานด้านเทคนิคในสถานประกอบการและประกอบอาชีพอิสระ รวมทั้งการใช้ความรู้และทักษะเป็นพื้นฐานในการศึกษาต่อในระดับสูงขึ้นได้
7. เพื่อให้มีเจตคติที่ดีต่องานอาชีพ มีความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ ซื่อสัตย์สุจริต มีระเบียบวินัย เป็นผู้มีความรับผิดชอบต่อสังคม สิ่งแวดล้อม ต่อด้านความรุนแรงและสารเสพติด

แผนการจัดการเรียนรู้

รหัสวิชา 3104-2002	ชื่อรายวิชา การออกแบบระบบไฟฟ้า	2-3-3
ระดับชั้น ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชา ไฟฟ้า		
ทฤษฎีรวม 2 คาบ	ปฏิบัติรวม 3 คาบ	3 หน่วยกิต

คำอธิบายรายวิชา

ศึกษาเกี่ยวกับกฎมาตรฐานทางไฟฟ้า การคำนวณ ออกแบบ การติดตั้งระบบไฟฟ้า ระบบจ่าย กำลัง แสงสว่าง สื่อสาร ระบบป้องกัน ระบบไฟฟ้าภายในอาคาร นอกอาคาร และในโรงงาน ระบบป้องกัน ไฟฟ้า ระบบกราวด์

จุดประสงค์รายวิชา

- 1 เข้าใจหลักการมาตรฐาน การออกแบบระบบไฟฟ้า
- 2 คำนวณ กระแส แรงดัน กำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า
- 3 มีกิจนิสัยในการทำงานร่วมกับผู้อื่นด้วยความประณีตรอบคอบและปลอดภัย

สมรรถนะรายวิชา

- 1 แสดงความรู้เกี่ยวกับมาตรฐาน การออกแบบระบบไฟฟ้า
- 2 เลือกใช้ วัสดุ อุปกรณ์ ในงานติดตั้งระบบไฟฟ้า
- 3 เลือกใช้อุปกรณ์ ในงานป้องกันระบบไฟฟ้า

หน่วยการสอน

รหัส 3104-2002 วิชา การออกแบบระบบไฟฟ้า จำนวน 5 ชั่วโมง/สัปดาห์

หน่วยที่	ชื่อหน่วยการสอน	จำนวนชั่วโมง
1	ความรู้ทั่วไปก่อนการออกแบบ	5
2	สายไฟฟ้า	5
3	อุปกรณ์สำหรับงานติดตั้งระบบไฟฟ้า	5
4	อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน	5
5	วงจรย่อย,สายป้อนและระบบประธาน	10
6	การออกแบบสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้า	5
7	การคำนวณโหลด	10
8	การคำนวณกระแสลัดวงจร	10
9	การต่อลงดินและเครื่องตัดไฟรั่ว	5
10	ระบบไฟฟ้าสำหรับอาคารชุด	5
11	การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	10
12	ตัวอย่างการออกแบบระบบไฟฟ้า	10
13	ระบบป้องกันฟ้าผ่าอาคาร	5
	รวม	90

เกณฑ์การประเมินผล
วิชา การออกแบบระบบไฟฟ้า รหัส 3104-2002

รายการ	คะแนน	หมายเหตุ
1. คุณลักษณะที่ต้องการการบูรณาการคุณธรรม จริยธรรมและ คุณลักษณะอันพึงประสงค์	20	
2. ทดสอบ		
2.1 แบบทดสอบหลังเรียน	5	
2.2 สอบปลายภาค	30	
3. ภาระงาน		
3.1 แบบฝึกหัด	10	
3.2 การปฏิบัติการทดลอง	30	
3.3 รายงาน	5	
รวม	100	

  กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน 	ใบสาระการเรียนรู้	หน่วยที่ 10
	ชื่อวิชา การออกแบบระบบไฟฟ้า	เวลา
	ชื่อหน่วย ระบบไฟฟ้าสำหรับอาคารชุด	เรียน 5 ชั่วโมง
ชื่อเรื่องหรือชื่องาน ระบบไฟฟ้าสำหรับอาคารชุด		
สาระสำคัญ มาตรฐานการออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้า มีความสำคัญยิ่ง ทั้งนี้ เพื่อความปลอดภัย คงทนถาวร มีและเพื่อยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่ใช้อยู่ในระบบให้ยาวนานยิ่งขึ้น การติดตั้งระบบไฟฟ้า มาตรฐานกำหนดที่แน่นอน และมีหลายหน่วยงาน เช่น กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) การไฟฟ้านครหลวง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และหน่วยงานจากต่างประเทศที่ประเทศไทยนำมาใช้ถือ เช่น National Electric Code (NEC) American National Standard Institute (ANSI) International Electrotechnical Commission (IEC) เป็นต้น และหน่วยงานที่รับรองมาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุปกรณ์ เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ คือ สำนักผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ที่รู้จักกันในชื่อ มอก. เรื่องที่จะศึกษา 1. ระบบเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าสำหรับอาคารชุด 2. รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าสำหรับอาคารชุด 3. การคำนวณโหลด 4. เครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าของห้องชุด 5. การป้องกันกระแสเกินของเครื่องวัด 6. สายตัวนำประธานเข้าห้องชุด 7. การคำนวณโหลดเพื่อหาขนาดของสายป้อนและเครื่องป้องกันกระแสเกิน 8. การคำนวณโหลดเพื่อนำไปหาขนาดหม้อแปลง จุดประสงค์การเรียนรู้ 1. ระบบเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าสำหรับอาคารชุด 2. รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าสำหรับอาคารชุด 3. การคำนวณโหลด 4. เครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าของห้องชุด 5. การป้องกันกระแสเกินของเครื่องวัด 6. สายตัวนำประธานเข้าห้องชุด 7. การคำนวณโหลดเพื่อหาขนาดของสายป้อนและเครื่องป้องกันกระแสเกิน 8. การคำนวณโหลดเพื่อนำไปหาขนาดหม้อแปลง		

บทที่ 10

ระบบไฟฟ้าสำหรับอาคารชุด

อาคารชุด หมายถึง อาคารชุดทุกประเภทที่จดทะเบียนตามพระราชบัญญัติอาคารชุด พ.ศ. 2522 คือ เป็นอาคารที่สามารถแบ่งการถือครองกรรมสิทธิ์ในอาคารออกเป็นส่วนๆ ได้ ประกอบด้วย กรรมสิทธิ์ส่วนบุคคล (ห้องชุด) และ กรรมสิทธิ์ร่วม (ทรัพย์สินส่วนกลาง) โดยต้องจดทะเบียนเป็นอาคารชุด และมีนิติบุคคลอาคารชุด ซึ่งเป็นอาคารที่มีการอยู่อาศัยของคนเป็นจำนวนมาก เช่น ห้องพัก ร้านอาหาร เป็นต้น จำเป็นต้องมีการดูแลเรื่องความปลอดภัยเกี่ยวกับการใช้ไฟฟ้า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรากฎ และมาตรฐาน เพื่อให้ผู้ออกแบบติดตั้งและผู้ใช้ไฟฟ้า ปฏิบัติตาม เพื่อความปลอดภัยของส่วนรวม อาทิเช่น มาตรฐานเพื่อความปลอดภัยทางไฟฟ้าของการพลังงานแห่งชาติ กฎการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กฎกระทรวงมหาดไทย มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (ม.อ.ก.) มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (มาตรฐาน ว.ส.ท.) มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้า สำหรับประเทศไทย 2545 เป็นต้น

10.1 วิธีการออกแบบระบบไฟฟ้า

งานออกแบบระบบไฟฟ้าเป็นงานที่วิศวกรไฟฟ้าหรือผู้ออกแบบจะต้องศึกษาและร่วมกันกับบุคคลหลายกลุ่ม เช่น สถาปนิก วิศวกรโครงสร้าง วิศวกรระบบเครื่องกล วิศวกรระบบสุขาภิบาล และเจ้าของอาคาร นอกจากนี้ผู้ออกแบบระบบไฟฟ้าจะต้องศึกษาและทำความเข้าใจถึงรายละเอียดของมาตรฐานต่างๆ ซึ่งเป็นการกำหนดในการออกแบบซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญเป็นอย่างยิ่งในการออกแบบระบบไฟฟ้า สามารถสรุปการออกแบบระบบไฟฟ้าได้ดังนี้

- 10.1.1 ศึกษาแบบทางสถาปัตยกรรม เพื่อให้ทราบข้อมูลต่างๆ ของอาคาร การใช้งานของห้องที่สถาปนิกได้ทำการออกแบบไว้ตามความต้องการของสถาปนิกและเจ้าของอาคาร
- 10.1.2 ประเมินการใช้โหลด โดยใช้ข้อมูลจากสถาปนิกและความต้องการของเจ้าของอาคาร ชนิดและลักษณะการใช้งานของอาคารและพื้นที่ทั้งหมดของอาคาร
- 10.1.3 กำหนดตำแหน่งและแนวทางของสายประธานจากการไฟฟ้า ที่จ่ายให้แก่อาคาร ขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบ ตำแหน่งของมิเตอร์วัดไฟฟ้า ซึ่งจะต้องดูสถานที่ที่จะสร้างอาคารพร้อมทั้งขอคำแนะนำจากการไฟฟ้า หน่วยที่รับผิดชอบบริเวณที่จะทำการก่อสร้างอาคารนั้นๆ
- 10.1.4 ศึกษา ชนิดและการใช้งานของพื้นที่ในอาคาร อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการใช้และขนาดการกินกระแสของอุปกรณ์แต่ละชนิด ซึ่งข้อมูลบางส่วนจะต้องสอบถามจากสถาปนิกผู้ออกแบบหรือเจ้าของอาคาร
- 10.1.5 ศึกษาความต้องการของโหลดไฟฟ้าระบบอื่นๆ เช่น เครื่องปรับอากาศ ระบบลิฟท์ ระบบประปา และอื่นๆ
- 10.1.6 ศึกษาและกำหนดตำแหน่งติดตั้งและขนาดของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ตลอดจนความต้องการเนื้อที่ของอุปกรณ์เหล่านั้น เช่น ตำแหน่งและขนาดของห้องเครื่อง ห้องติดตั้งหม้อแปลงและแผงควบคุมไฟฟ้าหลัก (Main Distribution Board; MDB) แผงควบคุมไฟฟ้ารอง (Sub Distribution Board ; SDB) แผงควบคุมไฟฟ้าย่อย (Load Panel) แนวทางและขนาดของท่อเดินสายป้อน (Feeder Shaft) ซึ่งเป็นประโยชน์ในการออกแบบ

- 10.1.7 คำนวณและออกแบบความต้องการของแสงสว่างของแต่ละห้องตามชนิดของการใช้งานพร้อมทั้งกำหนดชนิดของดวงโคม (ชนิดดวงโคมบางครั้งอาจถูกกำหนดโดยสถาปนิกทั้งนี้เพื่อความสวยงาม) เพื่อหาโหลดของระบบแสงสว่าง
- 10.1.8 กำหนดตำแหน่งของดวงโคมและเต้ารับลงในแบบโดยทั่วไปการแสดงตำแหน่งของดวงโคมและเต้ารับจะแยกเขียนออกจากกัน และหากมีระบบไฟฟ้าสื่อสารอันได้แก่ ระบบโทรศัพท์ ระบบโทรทัศน์ ระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้อัตโนมัติ ก็มักจะเขียนแบบแยกแผ่นกันทั้งนี้เพื่อความง่ายในการอ่านแบบ
- 10.1.9 แยกวงจรย่อยโดยโยงสายลงในแบบเพื่อควบคุมดวงโคมหรือเชื่อมต่อวงจรของเต้ารับไฟฟ้า ซึ่งอยู่ในวงจรเดียวกันเข้าด้วยกัน พร้อมทั้งกำหนดหมายเลขของวงจรในแผงจ่ายไฟ การกำหนดวงจรย่อยมักจะกำหนดตามความเหมาะสมของอุปกรณ์ตัดตอน (Circuit Breaker; CB) หรือกำหนดตามพื้นที่การใช้งานควบคู่กัน
- 10.1.10 คำนวณโหลดแต่ละแผงควบคุมไฟฟ้าย่อย พร้อมทั้งชนิด,จำนวนและขนาดของสายไฟฟ้า ท่อร้อยสายไฟฟ้า และขนาด AT AF และ Pole ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (CB) ลงในตารางโหลด
- 10.1.11 นำโหลดในแต่ละแผงควบคุมไฟฟ้ารวมกันในแต่ละเฟสของระบบ แล้วคำนวณหาสายป้อน และขนาดอุปกรณ์ป้องกันตู้ควบคุมไฟฟ้าย่อย (Main Circuit Breaker) ของตู้ควบคุมไฟฟ้าย่อยนั้น
- 10.1.12 รวมโหลดทั้งหมดของแผงควบคุมไฟฟ้าย่อยทั้งอาคารเพื่อนำมาคำนวณและออกแบบหาพิคัดของอุปกรณ์ป้องกันภายในตู้ควบคุมไฟฟ้าหลัก (MDB) และอุปกรณ์ประกอบภายในตู้ รวมทั้งถึงการกำหนดขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าและสายประธานของอาคาร
- 10.1.13 คำนวณและเขียน Riser Diagram ของระบบไฟฟ้า รวมทั้ง คำนวณและเขียน Single Line Diagram ของตู้ MDB
- 10.1.14 คำนวณและออกแบบระบบอื่นๆ เช่น ระบบล่อฟ้า ระบบสื่อสารในอาคาร ระบบโทรศัพท์ ระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้อัตโนมัติ ระบบป้องกันภัย และอื่นๆ
- 10.1.15 ตรวจสอบและแก้ไขแบบให้ถูกต้องสมบูรณ์
- 10.1.16 เขียนข้อกำหนดและรายละเอียดประกอบแบบ (รายการประกอบแบบ) ซึ่งจะแสดงรายละเอียดต่างๆ ในแบบ เช่น ขนาดและชนิดรวมถึงเครื่องหมายการค้าของอุปกรณ์ที่กำหนดให้ใช้ และข้อกำหนดซึ่งผู้รับจ้างจะต้องรับผิดชอบและปฏิบัติตาม โดยทั่วไปจะถือเป็นส่วนหนึ่งของสัญญาในการรับเหมางานก่อสร้างงานติดตั้ง ระหว่างผู้รับจ้างกับผู้ว่าจ้าง(เจ้าของอาคาร) ด้วย
- 10.1.17 เมื่อวิศวกรผู้ออกแบบทำการกำหนดชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้ว ผู้ออกแบบจะต้องทำการประมาณราคา เพื่อผู้ว่าจ้างจะได้ใช้เป็นราคากลางในการคัดเลือกผู้รับเหมาทำการก่อสร้างติดตั้งต่อไป
- 10.1.18 ในบางกรณีวิศวกรผู้ออกแบบอาจต้องเป็นผู้ตรวจสอบให้คำแนะนำในการติดตั้งระบบไฟฟ้าด้วย จากขั้นตอนต่างๆ ในการออกแบบระบบไฟฟ้า จะเห็นว่ามี ความซับซ้อนและต้องเกี่ยวข้องกับบุคคลหลายฝ่าย ความยากลำบากในการออกแบบจะมีมากขึ้นเมื่อเป็นอาคารขนาดใหญ่และมีการใช้โหลดมากๆ โดยเฉพาะข้อจำกัดในด้านของการออกแบบที่ต้องการใช้เกิด ความประหยัด ความปลอดภัย และมีความเชื่อมั่นในระบบสูงๆ โดยจะต้องอาศัยความชำนาญ ประสบการณ์และการศึกษาค้นคว้าในการออกแบบเป็นอย่างมาก

10.2 มาตรฐาน กฎและระเบียบ ในการออกแบบระบบไฟฟ้า

ในการออกแบบระบบไฟฟ้าสิ่งสำคัญที่สุดที่วิศวกรไฟฟ้าหรือผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึง คือ ความปลอดภัย ทำนองเดียวกันหน่วยงานของรัฐซึ่งมีส่วนเกี่ยวข้อง ดูแลรักษาความปลอดภัยเกี่ยวกับการใช้ไฟฟ้าก็จำเป็นต้องตรากฎและมาตรฐานเพื่อให้ผู้ออกแบบติดตั้งและผู้ใช้ไฟฟ้าปฏิบัติตาม เพื่อความปลอดภัยของส่วนรวมกระทรวงมหาดไทย สำนักงานพลังงานแห่งชาติ การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) จึงได้ร่างกฎและมาตรฐาน เพื่อให้ผู้ออกแบบติดตั้งและผู้ใช้ไฟฟ้าปฏิบัติตาม ดังนั้นในการออกแบบระบบไฟฟ้า วิศวกรไฟฟ้าผู้ออกแบบจำเป็นต้องศึกษาและปฏิบัติตามกฎ และมาตรฐานต่างๆ ที่กำหนดกฎและมาตรฐานต่างๆ ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ ระบุถึงระเบียบและวิธีการในการออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า ตลอดจนระบบจำหน่ายที่จ่ายไฟฟ้าด้วย

- 10.2.1 **มาตรฐานเพื่อความปลอดภัยทางไฟฟ้าของการพลังงานแห่งชาติ** เป็นมาตรฐานความปลอดภัยหลักสำหรับงานติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า การไฟฟ้าทั้งสามแห่งได้ยึดถือมาตรฐานที่ใช้ในการกำหนดกฎและข้อบังคับของการไฟฟ้าฯ แต่ละแห่ง
- 10.2.2 **กฎการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค** ใช้ในการกำหนดมาตรฐานในการออกแบบไฟฟ้า การติดตั้งเดินสายและการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า การติดตั้งเครื่องป้องกันไฟฟ้าลัดวงจร การออกแบบและป้องกันเกี่ยวกับการเดินสายไฟฟ้าการป้องกันอุปกรณ์และเครื่องยนต์ไฟฟ้า ในเขตการรับผิดชอบของการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในการขอใช้ไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า การไฟฟ้าฯ จะให้ช่างของการไฟฟ้าฯ ทำการตรวจสอบ วิธีการเดินสายและการติดตั้ง อุปกรณ์ไฟฟ้าภายในอาคารเสียก่อน บางอาคารจะต้องมีวิศวกรไฟฟ้ารับรองการออกแบบระบบไฟฟ้า หรือรับรองการติดตั้งระบบไฟฟ้าภายในอาคารนั้น ดังนั้นก่อนการติดตั้งระบบไฟฟ้าผู้ใช้ไฟฟ้าควรแจ้งรายละเอียดเกี่ยวกับตำแหน่งของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้ง เสาไฟฟ้า แนวสายประธานไฟฟ้า ขนาดของโหลด อุปกรณ์เครื่องวัดและอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า และแนบผังการเดินสายอย่างละเอียดภายในอาคาร (Shop Drawing) เพื่อให้การไฟฟ้าฯ ตรวจสอบและแก้ไขเสียก่อน เมื่อการติดตั้งถูกต้องตามแบบและมาตรฐานของการไฟฟ้าฯ จึงอนุมัติให้จ่ายไฟฟ้าแก่อาคารได้
- 10.2.3 **กฎกระทรวงมหาดไทย** กระทรวงมหาดไทยมีหน้าที่รับผิดชอบเกี่ยวกับความปลอดภัยในการก่อสร้างอาคารได้ออกกฎกระทรวงเพื่อให้ผู้ติดตั้งและผู้ใช้ไฟฟ้าปฏิบัติตาม
- 10.2.4 **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (ม.อ.ก.)** สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่มีส่วนสำคัญเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบไฟฟ้า เช่น สายไฟฟ้า , บัลลัสต์ ฟิวส์ อุปกรณ์ตัดตอนระบบไฟฟ้า และหม้อแปลงไฟฟ้า ได้มีการกำหนดมาตรฐานต่ำสุดซึ่งผู้ผลิตจะต้องปฏิบัติตาม โดยกำหนดโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งจะครอบคลุมถึงคำอธิบายของคำจำกัดความและนิยาม วิธีการทดสอบ การกำหนดคุณภาพและมาตรฐานต่ำสุด ความปลอดภัย ขนาดและชนิดของผลิตภัณฑ์ โดยจะมีการตรวจสอบและประทับตรารับรองมาตรฐานแก่ผลิตภัณฑ์ที่มีมาตรฐานตามที่กำหนดในฐานะผู้ออกแบบและผู้กำหนดรายละเอียดของอุปกรณ์ไฟฟ้า วิศวกรผู้ออกแบบควรศึกษา และทำความเข้าใจกับมาตรฐานอุตสาหกรรมเพื่อใช้เป็นแนวทางในการคำนวณ กำหนดรายละเอียด อุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบ
- 10.2.5 **มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (มาตรฐาน ว.ส.ท.)** วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ในฐานะหน่วยงาน ซึ่งให้บริการทางด้านวิชาการ ได้ร่างมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้า เพื่อให้วิศวกรไฟฟ้าหรือผู้ออกแบบติดตั้งและ

บำรุงรักษาใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติงาน มาตรฐานฉบับนี้กำหนดหลักการทั่วไปในการออกแบบไฟฟ้า วัสดุ และวิธีการเดินสายตลอดจนการใช้งานและติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า และเครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไป ซึ่งมีรายละเอียดและหลักเกณฑ์ต่างๆ อย่างกว้าง ครอบคลุมกว้างขวางในงานด้านวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรผู้ออกแบบระบบไฟฟ้า จึงควรมีมาตรฐานฉบับนี้ เพื่อใช้เป็นคู่มือประกอบในการออกแบบ

10.2.6 มาตรฐานอื่นๆ

- **National Electrical Code (NEC)** เป็นมาตรฐานของ USA ซึ่งกำหนดหลักการเบื้องต้นสำหรับการปฏิบัติเพื่อความปลอดภัยของระบบไฟฟ้า และเป็นมาตรฐานหลักในการร่างมาตรฐานของ ว.ส.ท.
- **National Electrical Manufacturer Association Standard (NEMA)** เป็นมาตรฐานของ USA ซึ่งกำหนดและแยกประเภทของผลิตภัณฑ์ทางไฟฟ้า ตามประเภทของการใช้งาน เช่น ใช้งานทั่วไป ชนิดกันน้ำได้ ชนิดใช้งานหนัก ชนิดใช้ในโรงงาน เป็นต้น
- **Underwriter's Laboratories (UL)** เป็นสถาบันใน USA ที่กำหนดและทำการทดสอบมาตรฐานต่ำสุดของความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ทางไฟฟ้าที่จะนำไปใช้งาน หากผ่านการทดสอบก็จะได้ใบรับรองเครื่องหมายรับรองจากสถาบัน ซึ่งเป็นเครื่องหมายที่ยอมรับกันทั่วโลก ดังนั้นในการกำหนดมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ ผู้ออกแบบควรจะใช้ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับเครื่องหมายมาตรฐานจาก UL ด้วย
- **IES Lighting Handbook Illuminating Engineering Society (IES) แห่ง USA** เป็นมาตรฐานทางด้านวิศวกรรมส่องสว่าง ที่จะต้องใช้ในการออกแบบทางด้านการส่องสว่าง และการกำหนดตำแหน่งและชนิดของดวงโคม
- **มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้า สำหรับประเทศไทย 2545** เป็นมาตรฐานฉบับปรับปรุงขึ้นมาครั้งสุดท้ายเพื่อสำหรับเป็นมาตรฐานในการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทยโดยเฉพาะ โดยทุกการไฟฟ้าฯ ยอมรับเป็นมาตรฐานหลักในการออกแบบระบบไฟฟ้า และในการออกแบบเราจะต้องอ้างอิงมาตรฐานฉบับนี้เป็นสำคัญ

10.3 หลักเกณฑ์ในการออกแบบระบบไฟฟ้า

การออกแบบระบบไฟฟ้าสามารถทำการออกแบบได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับความสามารถ และประสบการณ์รวมทั้งมาตรฐานต่างๆ ที่ใช้ในการอ้างอิงของผู้ออกแบบ รวมทั้งในเรื่องของค่าใช้จ่ายของการออกแบบและติดตั้งที่จะต้องมีส่วนมาหลังจากการออกแบบเสร็จสิ้นลง ในการออกแบบที่ดี จึงต้องคำนึงถึงเงื่อนไขที่สำคัญต่างๆ ดังต่อไปนี้

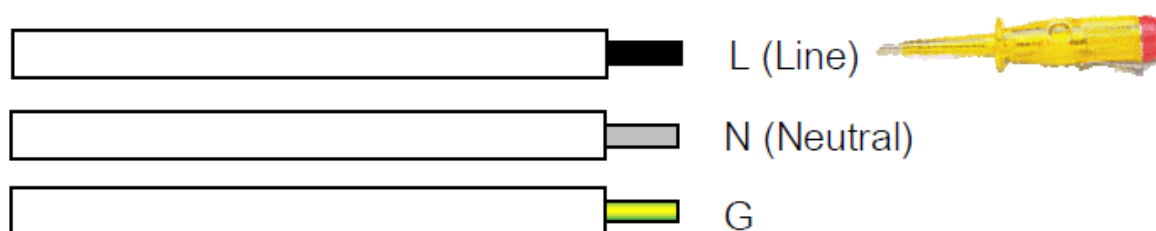
- 10.3.1 **ความปลอดภัย (Safety)** เป็นข้อควรคำนึงถึงเป็นอันดับแรกของการออกแบบที่ผู้ออกแบบจะต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง โดยต้องอ้างอิงตามหลักทางวิศวกรรมไฟฟ้าและระเบียบของกำหนดของการไฟฟ้าฯ และมาตรฐานของวิศวกรรมสถาน แห่งประเทศไทย สำหรับการติดตั้งระบบไฟฟ้าสามารถใช้เป็นหลักในการออกแบบได้อย่างดี
- 10.3.2 **ความเชื่อมั่นของระบบ (Reliability)** ระบบจะต้องมีความเชื่อมั่นสูงในการตัดตอนและป้องกันผลเสียหายอันเกิดมาจากระบบไฟฟ้าขัดข้อง ซึ่งมักจะขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีมาตรฐานรับรอง

- 10.3.3 **ความง่ายในการดัดแปลง (Flexibility)** ระบบที่ออกแบบจะต้องสามารถแก้ไขดัดแปลงได้อย่างสะดวก เพื่อที่จะจ่ายไฟฟ้า ไปตามจุดที่ต้องการและต้องออกแบบให้บริการเพิ่มโหลดในอนาคตได้ กล่าวคือเมื่อมีการเพิ่มโหลดในอนาคตจะต้องทำได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนระบบสายไฟฟ้าทั้งระบบ
- 10.3.4 **ความประหยัด (Economy)** ผู้ออกแบบที่ดีควรคำนึงถึงการออกแบบให้มีความประหยัดภายใต้เงื่อนไขของความปลอดภัย ความเชื่อมั่น ความง่ายในการดัดแปลง โดยในเรื่องของความประหยัดมักจะสวนทางกับข้อควรพิจารณาทั้งสามข้อที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยสามารถจะยืดหยุ่นได้ยกเว้นในเรื่องของ ความปลอดภัย ซึ่งจะยอมให้เรื่องของความประหยัดมีผลต่อความปลอดภัยไม่ได้ ผู้ออกแบบจะต้องศึกษาเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่างๆ ในการเลือกใช้อุปกรณ์ในการกำหนดตำแหน่งและติดตั้งอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ปัญหาทางด้านพลังงานในปัจจุบันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเลือกใช้ชนิดของหลอดไฟฟ้า การออกแบบระบบทำความเย็น การใช้เครื่องทำความร้อน และอื่นๆ ซึ่งจะมีผลในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าในแต่ละเดือน
- 10.3.5 **แรงดันตก (Voltage Drop)** ในการออกแบบระบบไฟฟ้าภายในอาคารจะต้องคำนึงถึงค่าแรงดันไฟฟ้าตก ซึ่งเกิดเนื่องจากขนาดของโหลดและความยาวของสายป้อนและสายวงจรย่อยที่เดินไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้ารวมทั้งโหลดในอนาคตที่จะเพิ่มขึ้นด้วย แรงดันตกมักสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าเป็นอย่างมาก ตามมาตรฐานของการไฟฟ้าฯ และ NEC กำหนดแรงดันตกในช่วงของสายป้อนจะต้องไม่เกิน 3% หากในส่วนของวงจรย่อยไม่เกิน 5% การพิจารณาในเรื่องแรงดันตกมักจะนำมาพิจารณาในกรณีที่สายป้อนหรือสายประธานมีระยะของการเดินสายที่ยาวๆ เท่านั้น

10.4 ระบบไฟฟ้าภายในอาคาร

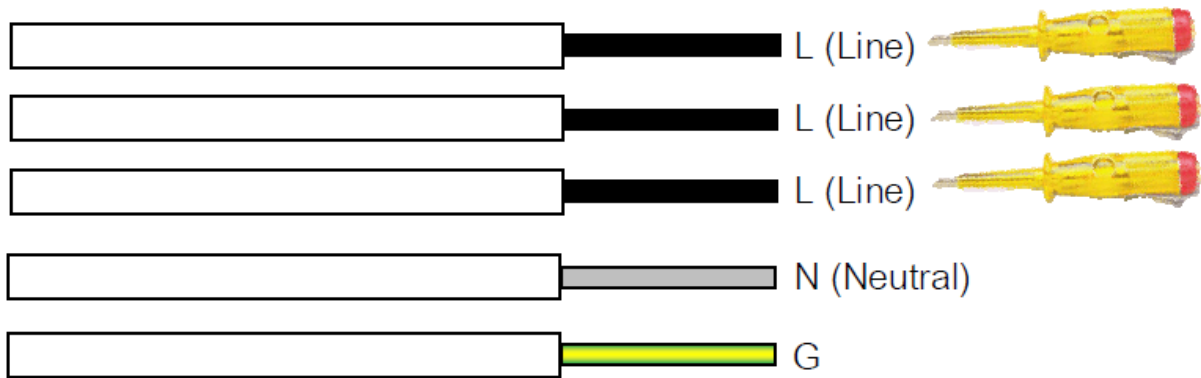
ระบบไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบ ดังนี้

- 10.4.1 **ระบบไฟฟ้า 1 เฟส 3 สาย** คือระบบไฟฟ้าที่มีสายไฟจำนวน 3 เส้นประกอบด้วย เส้นที่มีไฟเรียกว่า สายไฟหรือสายไลน์ L (Line) เส้นที่ไม่มีไฟ เรียกว่า สายนิวทรัล N (Neutral) และสายดิน G 1 เส้น เมื่อใช้ไขควงวัดไฟแตะสายไฟ หลอดไฟเรืองแสงที่อยู่ภายในไขควงจะติด แรงดันไฟฟ้าที่ใช้มีขนาด 220 โวลต์ ใช้สำหรับบ้านพักอาศัยทั่วไป



1 เฟส 3 สาย

- 10.4.2 **ระบบไฟฟ้า 3 เฟส 5 สาย** คือ ระบบที่มีสายไฟจำนวน 5 เส้นประกอบด้วยเส้นที่มีไฟ 3 เส้นสายนิวทรัล 1 เส้น และสายดิน G 1 เส้น สามารถต่อใช้งานเป็นระบบไฟฟ้า 1 เฟส ได้โดยการต่อจากเฟสใดเฟสหนึ่ง และสายนิวทรัลอีกเส้นหนึ่ง แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายเฟสเส้นใดเส้นหนึ่งกับสายนิวทรัลมีค่า 220 โวลต์ และแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายเฟสด้วยกันมีค่า 380 โวลต์



3 เฟส 5 สาย

10.5 วิธีการเดินสายไฟฟ้าภายในอาคาร

วิธีการเดินสายไฟฟ้าภายในอาคารสามารถเดินสายได้ 2 วิธี คือ

- 10.5.1 การเดินสายไฟแบบเปิด (เดินลอย)** หมายถึง การเดินสายไฟฟ้าไปตามผนังหรือเพดาน โดยใช้เข็มขัดรัดสายเป็นตัวยึดสายไฟ ระยะห่างระหว่างเข็มขัดรัดสายไฟประมาณ 15-20 เซนติเมตร ข้อดีคือสามารถตรวจสอบซ่อมแซมง่าย ราคาไม่แพง ข้อเสียคือดูไม่สวยงามและอาจเกิดการชำรุดได้ง่าย



รูปที่ 10-1 การเดินสายไฟฟ้าในอาคารแบบเปิด (เดินลอย)

10.5.2 การเดินสายแบบปิด หมายถึง การเดินสายไฟฟ้าแบบซ่อนสายภายในท่อพีวีซี หรือท่อโลหะและฝังอยู่ในผนัง ข้อดีคือสามารถจัดระเบียบแนวการเดินของสายไฟฟ้าให้ผนังบ้านดูเรียบร้อยสวยงาม ท่อสายไฟจะฝังอยู่ในผนัง ต้องเดินสายไฟพร้อมการก่อสร้างอาคาร ข้อเสียคือ หากสายไฟเกิดชำรุดเองจากการติดตั้งผิดวิธีหรือชำรุดจากอายุการใช้งาน จะทำการตรวจสอบและซ่อมแซมยาก อาจต้องใช้วิธีรื้อทุบผนังออก มีความยุ่งยาก เสียค่าใช้จ่ายมาก



การเจาะผนังเพื่อวางตำแหน่งท่อร้อยสายไฟ



รูปที่ 10-2 การเดินสายไฟแบบปิด แบบซ่อนสายในท่อ

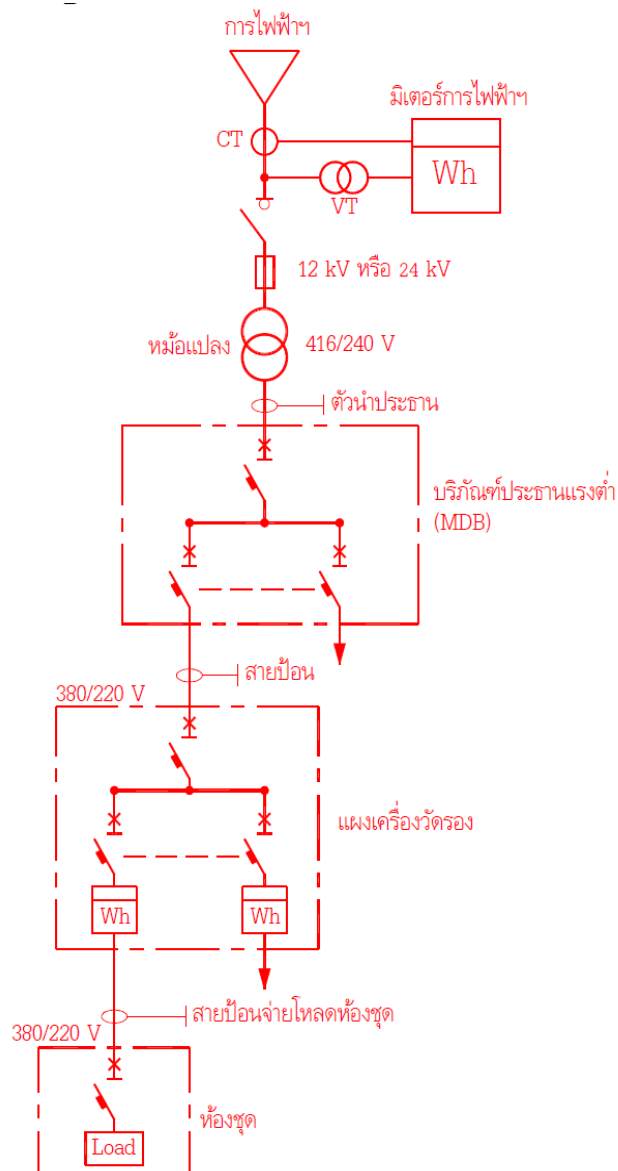
10.6 การจ่ายไฟฟ้า ขนาดเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้า และการคำนวณโหลดสำหรับอาคารชุด

รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าให้อาคารชุด (ดังรูปที่ 10-3) แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้ คือ การใช้ไฟฟ้าสำหรับใช้ส่วนกลาง และการใช้ไฟฟ้าสำหรับห้องแต่ละชุด โดยมีรายละเอียดดังนี้

10.6.1 การใช้ไฟฟ้าสำหรับใช้ส่วนกลาง

ไฟฟ้าสำหรับใช้ส่วนกลาง หมายถึง ไฟฟ้าที่ใช้สำหรับระบบไฟฟ้าส่วนกลางของอาคารทั้งหมด เช่น แสงสว่างห้องโถงหรือทางเดิน ลิฟต์ เป็นต้น ซึ่งอาจพิจารณาติดตั้งเครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้าเพียงเครื่องเดียวหรือมากกว่าก็ได้ตามความเหมาะสม ส่วนขนาดของเครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้าพิจารณาโหลดที่ต้องการใช้จริง สำหรับโหลดที่ติดตั้งจริง ยกตัวอย่างระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงได้ดังนี้

- โหลดไฟฟ้าต่ำกว่า 300 kVA จ่ายไฟฟ้าแรงดัน 380/220V 3 เฟส 4 สาย แต่ถ้าไม่เกิน 15 kVA อาจจ่ายไฟฟ้าแรงดัน 220 V 1 เฟส 2 สาย
- โหลดไฟฟ้าตั้งแต่ 300 kVA ถึง 5,000 kVA จ่ายไฟฟ้าแรงดัน 12,000 V 3 เฟส 3 สาย และสำหรับโหลดไฟฟ้าที่เกิน 5,000 kVA การไฟฟ้านครหลวงจะพิจารณาเป็นราย ๆ ไป
- โหลดไฟฟ้าตั้งแต่ 300 kVA ถึง 10,000 kVA จ่ายไฟฟ้าแรงดัน 24,000 V 3 เฟส 3 สาย และสำหรับโหลดไฟฟ้าที่เกินกว่า 10,000 kVA แต่ไม่ถึง 15,000 kVA การไฟฟ้านครหลวงจะพิจารณาเป็นราย ๆ ไป
- โหลดไฟฟ้าตั้งแต่ 15,000 kVA ขึ้นไป จ่ายไฟฟ้าแรงดัน 69,000 V หรือ 115,000 V
- สำหรับในเขตวงจรถาข่ายอาจจะจ่ายไฟฟ้าด้วยแรงดัน 380/220V 3 เฟส 4 สายทั้งสิ้นก็ได้



รูปที่ 10-3 รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าสำหรับอาคารชุด

10.6.2 การใช้ไฟฟ้าสำหรับแต่ละห้องชุด

เนื่องจากแต่ละห้องชุดในอาคารชุดนั้นมี พรบ.อาคารชุด (พ.ศ. 2522) รับรองไว้ว่าเป็นส่วนของอาคารชุดที่แยกการถือกรรมสิทธิ์ออกได้เป็นส่วนเฉพาะของแต่ละบุคคล จึงเปรียบเสมือนบ้านแต่ละห้องเพียงแต่นำมาอยู่รวมกันในอาคารเดียวกัน ดังนั้นผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละห้องจึงควรได้รับสิทธิความเป็นเอกภาคและการบริการต่างๆ โดยตรงจากการไฟฟ้าเช่นเดียวกับผู้ใช้ไฟฟ้าทั่วไป ซึ่งหมายความว่า จะมีเครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้าประจำแต่ละห้องชุดในการบริการทั่วไป ที่จะได้รับการบริการไฟฟ้าเช่น เสียค่าไฟฟ้าแต่ละประเภทในอัตราเดียวกัน ส่วนสายภายนอกจนถึงเครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้าการไฟฟ้าจะเป็นผู้ดูแลและบำรุงรักษา โดยผู้ใช้ไฟฟ้าไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเป็นพิเศษ เป็นต้น

สำหรับการกำหนดขนาดเครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้าของแต่ละห้องชุดนั้น (ดังรูปที่ 10-4) จะพิถีพิถันกว่าการจ่ายไฟฟ้าให้กับสถานที่ที่ใช้ไฟฟ้าทั่วไป นั่นมีเพียงผู้ใช้ไฟรายเดียวจึงสะดวกที่จะติดตั้งเครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้าไว้ภายนอกสถานที่ของผู้ใช้ไฟ ซึ่งทำให้ง่ายต่อการดูแลรักษา และการปรับปรุงระบบไฟฟ้าภายนอก เพื่อการเพิ่มขนาดเครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้าในภายหลัง ส่วนในอาคารชุดนั้นส่วนใหญ่ก็จะเป็นอาคารสูงๆ มีห้องชุดเป็นจำนวนมาก หากต้องเดินสายเมนทุกๆ ห้องลงมาถึงที่ติดตั้งเครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้า อย่างเช่นสถานที่ที่ใช้ไฟทั่วไป ซึ่งจะยุ่งยากไม่สวยงาม สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก และไม่มีความปลอดภัย ดังนั้นในอาคารชุดจึงได้ติดตั้งเครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้าไว้เป็นกลุ่มตามชั้นต่าง ๆ ตามความเหมาะสม ดังนั้นระบบไฟฟ้าต่าง ๆ ของการไฟฟ้าบางส่วนจึงต้องเข้าไปอยู่ในอาคารของผู้ใช้ไฟด้วย และเป็นที่ทราบกันว่าไม่ว่าจะเป็นอาคารใหญ่ใดๆ ก็ตาม และไม่ว่าจะเป็นระบบไฟฟ้าส่วนที่เป็นของการไฟฟ้าหรือของผู้ใช้ไฟเองก็ตาม หากไม่พิจารณาวางแผนวางระบบและคำนวณให้ได้อย่างเพียงพอแล้ว การปรับปรุงแก้ไขในภายหลังจะเป็นสิ่งที่ยุ่งยากและสิ้นเปลืองมาก แต่ตามสภาพของอาคารประเภทนี้แล้ว ในระยะเริ่มแรกหรือในระหว่างก่อสร้าง ซึ่งยังไม่มีผู้ใช้ไฟฟ้าระยะเริ่มต้นกับในอนาคตเมื่อทุกอย่างปรับตัวเข้าที่แล้วย่อมแตกต่างกัน ดังนั้นสิ่งที่พอจะนำมาเป็นข้อพิจารณา กำหนดขนาดเครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้าก็คือ ขนาดของพื้นที่ของแต่ละห้องชุด ซึ่งโดยปกติแล้วการใช้ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของพื้นที่ และเมื่อได้รวบรวมข้อมูลต่างๆ มาพิจารณาแล้วปรากฏว่าค่าความต้องการ kVA ต่ำสุด ที่คาดว่าจะต้องมีใช้ในห้องชุดอยู่อาศัย และพอเพียงกับความต้องการใช้ไฟอย่างน้อยในระยะ 10 ปี ข้างหน้า โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 10-4 เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (มิเตอร์ไฟฟ้า)

- เครื่องปรับอากาศ = 70 VA/m²
- แสงสว่าง = 20 VA/m²
- โหลดอื่นๆ ให้ขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ห้องชุด
 - ขนาดห้องชุดพื้นที่ไม่เกิน 55 m² = 1,500 VA
 - ขนาดห้องชุดพื้นที่ไม่เกิน 55 m² แต่ไม่เกิน 180 m² = 3,000 VA
 - ขนาดห้องชุดพื้นที่มากกว่า 180 m² = 6,000 VA

โดยปกติแล้วเครื่องใช้ไฟฟ้ากำลังมักจะไม่ได้กำหนดตามพื้นที่ จะคำนวณจากการใช้จริงอย่างในต่างประเทศ เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา แต่สำหรับบ้านเราเนื่องจากความจำเป็นทางเศรษฐกิจและอื่น ๆ อีกหลายอย่าง ทำให้เกิดความไม่แน่นอนในตอนเริ่มแรกของการเข้าไปอยู่ในห้องชุด แต่ในช่วงระยะเวลาหนึ่งไม่นานนักประมาณว่า 3 ปีขึ้นไป ความจำเป็นและสิ่งแวดล้อมจะบีบบังคับให้ผู้ใช้ไฟฟ้าต้องมีเครื่องใช้ไฟฟ้ากำลังเหล่านี้ เนื่องจากไฟฟ้าเป็นพลังงานที่สะอาด ใช้งาน สะดวก และปลอดภัยที่สุดเมื่อเทียบกับพลังงานอย่างอื่นที่สำคัญคือไม่ทำความรบกวนแก่เพื่อนบ้าน แต่เครื่องใช้ไฟฟ้ากำลังนี้จะไม่แปรผันโดยตรงกับพื้นที่ของห้องชุดเท่าใดนัก คือ จะคงที่จนถึงระดับหนึ่งแล้วจึงจะมีความต้องการใช้เพิ่มขึ้น เป็นลักษณะขั้นบันได จากข้อมูลและเหตุผลต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว เราสามารถนำมาสรุปเป็นข้อพิจารณาคำนวณโหลดการใช้ไฟฟ้าของแต่ละห้องชุดได้ดังต่อไปนี้

- ประเภทห้องชุดอยู่อาศัยที่มีบริการระบบทำความเย็นหรือปรับอากาศจากส่วนกลาง คำนวณโหลดต่ำสุดได้ดังนี้
 - ห้องชุดพื้นที่ไม่เกิน 55 m² โหลดต่ำสุด (VA) = (20Xพื้นที่ห้อง) + 1,500 V
 - ห้องชุดพื้นที่มากกว่า 55 m² แต่ไม่เกิน 180 m² โหลดต่ำสุด (VA) = (20X พื้นที่ห้อง) + 3,000 VA
 - ห้องชุดพื้นที่มากกว่า 180 m² โหลดต่ำสุด (VA) = (20X พื้นที่ห้อง) + 3,000 VA
- ประเภทห้องชุดอยู่อาศัยที่ไม่มีบริการระบบทำความเย็นหรือปรับอากาศจากส่วนกลาง คำนวณโหลดต่ำสุด ดังนี้
 - ห้องชุดพื้นที่ไม่เกิน 55 m² โหลดต่ำสุด (VA) = (90 X พื้นที่ห้อง) + 1,500 VA
 - ห้องชุดพื้นที่มากกว่า 55 m² แต่ไม่เกิน 180 m² โหลดต่ำสุด (VA) = (90 X พื้นที่ห้อง) + 3,000 VA
 - ห้องชุดพื้นที่มากกว่า 180 m² โหลดต่ำสุด (VA) = (90 X พื้นที่ห้อง) + 3,000 VA

สำหรับห้องชุดประเภทสำนักงานหรือร้านค้า ความต้องการใช้ไฟฟ้าจะแตกต่างจากประเภทที่อยู่อาศัยตรงที่จะไม่มีเครื่องใช้ไฟฟ้าประเภทเครื่องครัว หรืออาจมีแต่เพียงส่วนน้อยเมื่อเทียบกับพื้นที่แต่ภาระการใช้เครื่องปรับอากาศจะสูงกว่าด้วยจำนวนคนมากกว่า และค่าสูญเสียความเย็นเนื่องจากการเปิดประตูมีมากกว่า ดังนั้นจึงมีข้อพิจารณาสำหรับขนาดเครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้าแตกต่างกันออกไปดังนี้

- ห้องชุดประเภทสำนักงานหรือร้านค้าที่มีบริการระบบปรับอากาศจากส่วนกลาง
ใช้สูตรโหลดต่ำสุด (VA) = 85Xพื้นที่ห้อง (ไม่รวมเฉลียง) และห้ามใช้ดีมานด์แฟกเตอร์
- ห้องชุดประเภทสำนักงานหรือร้านค้าที่ไม่มีบริการระบบปรับอากาศจากส่วนกลาง
ใช้สูตรโหลดต่ำสุด (VA) = 155Xพื้นที่ห้อง (ไม่รวมเฉลียง) และห้ามใช้ดีมานด์แฟกเตอร์

สำหรับสำนักงานหรือร้านค้าที่โหลดมากเป็นพิเศษ เช่น ห้องอาหารที่มีพวกเตาไฟฟ้า หรือเครื่องทำความร้อน และตู้แช่ที่มีขนาดใหญ่มาก จะต้องพิจารณาเป็นพิเศษตามสภาพ การคำนวณขนาดเครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้าตามข้อที่ 10.6.1 ไปคิดหาขนาดเครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้าและเครื่องป้องกันกระแสเกิน หรือเพื่อความสะดวกแก่ผู้ออกแบบและการไฟฟ้า สามารถดูได้จากตารางที่ 10-1 และ 10-2 ซึ่งได้จากการคำนวณและปรับค่าเข้าหาขนาดเครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้า จากปัญหาการใช้ไฟเกินขนาดเครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้า หรือเกิดปัญหาไฟรั่ว หรือเกิดการผิดปกติในการใช้ไฟจนทำให้โหลดเกินหรือเกิดภาวะบกพร่อง ซึ่งอาจกระทบกระเทือนต่อผู้ใช้ไฟรายอื่นๆ ได้โดยง่าย ดังนั้นการไฟฟ้าจึงได้ติดตั้งเครื่องป้องกันกระแสไหลเกินประจำเครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้าสำหรับผู้ใช้อไฟแต่ละรายด้วย โดยได้กำหนดขนาดที่เหมาะสมไว้ให้ผู้ใช้อไฟได้ใช้ไฟฟ้าได้เต็มที่ขนาดเครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้าโดยไม่เดือดร้อน ซึ่งได้แสดงตัวอย่างของการไฟฟ้านครหลวงไว้ในตารางที่ 10-1 และ 10-2

ตารางที่ 10-1 ขนาดของเครื่องวัดและตัดตอนอัตโนมัติสำหรับเครื่องวัดของห้องชุดประเภทอยู่อาศัย

ขนาดมิเตอร์	โหลด (A)	ขนาดพื้นที่ห้องชุด (ม ²)						ขนาด ฟิวส์ CB สูงสุด
		พื้นที่ ≤ 55 ม ²		พื้นที่ ≥ 55 ≤ 180 ม ²		พื้นที่ >180 ม ²		
		ก	ข	ก	ข	ก	ข	
5(15) A1P	10	35	-	-	-	-	-	16 1P
15(45) A 1P	30	-	55	180	-	-	-	50 1P
30(100) A 1P	75	-	-	-	150	525	-	100 1p
50(150) A 1P	100	-	-	-	180	800	-	125 1P
15(45) A 3P	30	-	-	-	180	690	-	50 3P
30(100) A 3P	75	-	-	-	-	2,475	483	100 3P
50(150) A 3P	100	-	-	-	-	3,000	666	125 3P
200 A 3P	200	-	-	-	-	6,300	1,400	250 3P
400 A 3P	400	-	-	-	-	12,900	2,866	500 3P

หมายเหตุ 1. ก. หมายถึง ห้องชุดที่มีการติดตั้งระบบทำความเย็นจากส่วนกลาง ข. หมายถึง ห้องชุดที่ไม่มีการติดตั้งระบบทำความเย็นจากส่วนกลาง

2. 1P หมายถึง เครื่องวัดฯ ชนิด 1 เฟส 2 สาย, 3P หมายถึง เครื่องวัดฯ ชนิด 3 เฟส 4 สาย

ตารางที่ 10-2 ขนาดของเครื่องวัดและตัดตอนอัตโนมัติสำหรับเครื่องวัดในชุดประเภทสำนักงานหรือร้านค้า

ลำดับที่	ประเภท	พื้นที่ห้อง (m ²)	โหลด (A)	ขนาดเครื่องวัดฯ	ขนาดฟิวส์ CB สูงสุด
1.	ไม่มีบริการระบบทำความเย็นจากส่วนกลาง	40	30	15(45) A 1P	50 A 1P
		105	75	30(100) A 1P	100 A 1P
		140	100	50(150) A 1P	125 A 1P
		125	30	15(45) A 3P	50 A 1P
		320	75	30(100) A 3P	100 A 3P
		425	100	50(150) A 3P	125 A 3P
		850	200	200 A 3P	250 A 3P
		1700	400	400 A 3P	500 A 3P
2.	มีบริการระบบทำความเย็นจากส่วนกลาง	80	30	15(45) A 1P	50 A 1P
		190	75	30(100) A 1P	100 A 1P
		260	100	50(150) A 1P	125 A 1P
		230	30	15(45) A 3P	50 A 1P
		580	75	30(100) A 3P	100 A 3P
		770	100	50(150) A 3P	125 A 3P
		1550	200	200 A 3P	250 A 3P
		3100	400	400 A 3P	500 A 3P

หมายเหตุ พื้นที่ที่มีขนาดมากกว่าที่กำหนดไว้ในตารางนี้ จะต้องกำหนดขนาดของเครื่องวัดเป็นรายๆ ไป

สำหรับอาคารศูนย์การค้า อาคารศูนย์การค้าที่มีใช้อาคารชุดนั้นมักจะเป็นของเจ้าของเดี่ยวหรือบุคคลกลุ่มหนึ่งที่ลงทุนร่วมกัน หรือในรูปของนิติบุคคล ดังนั้นลักษณะเช่นนี้ปกติแล้วก็จะจ่ายไฟฟ้าผ่านเครื่องวัดฯ เพียงเครื่องเดียว แต่อาคารประเภทศูนย์การค้านี้โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะแบ่งเป็นห้องๆ หรือแบ่งพื้นที่ส่วน ๆ ให้เช่าเพื่อดำเนินกิจการต่าง ๆ ลักษณะเช่นนี้ก็มักจะพิจารณาจ่ายไฟให้ในแบบเดียวกับอาคารชุด นอกเสียจากว่าเจ้าของอาคารจะได้ให้คำรับรองไว้กับการไฟฟ้าว่าค่าไฟฟ้าในแต่ละห้องเช่านั้นได้รวมในค่าเช่าแล้ว แต่ถ้ามีการเรียกเก็บค่าไฟฟ้าต่างหากหรือมีการติดตั้งเครื่องวัดฯ ในแต่ละร้านค้าเอง แล้วก็จะถือว่าเป็นการนำเอาไฟฟ้าไปจำหน่ายต่อ ซึ่งทางการไฟฟ้าก็จะได้พิจารณาดำเนินการไปตามที่เห็นสมควร

10.7 การคำนวณโหลดเพื่อหาขนาดของสายป้อนและเครื่องป้องกันกระแสเกิน

ลักษณะการจ่ายไฟฟ้าและติดตั้งเครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้าตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 10.6.1 จะทำให้ระบบไฟฟ้าที่เป็นของการไฟฟ้า คือ ส่วนที่อยู่ก่อนเครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้ารวมทั้งตัวเครื่องวัดมิเตอร์ไฟฟ้าด้วยนั้นบางส่วนเข้าไปอยู่ในอาคารชุด ซึ่งตามปกติแล้วส่วนนี้การไฟฟ้าจะเป็นผู้ดำเนินการเองทั้งสิ้น แต่การที่การไฟฟ้าจะเข้าไปดำเนินการพร้อมไปกับการก่อสร้างนั้นย่อมเป็นการไม่สะดวกด้วยกันทั้ง 2 ฝ่าย และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ดังนั้นการไฟฟ้าจึงพิจารณาอนุญาตให้ผู้ขอใช้ไฟฟ้าดำเนินการเฉพาะส่วนที่อยู่ในอาคารเอง แต่ต้องอยู่

ภายใต้เงื่อนไขของการไฟฟ้า ซึ่งเงื่อนไขนั้นมีเหตุผลพื้นฐานมาจาก 3 หลักใหญ่ คือ ด้านวิชาการและความปลอดภัย ด้านการบำรุงรักษาและบริการ

10.7.1 การคำนวณโหลดเพื่อนำไปหาขนาดสายป้อนและเครื่องป้องกัน

เมื่อทราบขนาดเครื่องวัดฯ ของส่วนกลางและแต่ละห้องชุดตามวิธีการในหัวข้อที่ 10.6.1 แล้ว เมื่อจะคำนวณหาขนาดสายป้อนส่วนใดก็ให้นำกลุ่มเครื่องวัดฯ ในส่วนนั้นเรียงลำดับจากขนาดใหญ่ไปหาขนาดเล็ก แล้วคูณด้วยค่าโคอินซิเดนซ์แฟกเตอร์ (Co-incidence factor) ในตารางที่ 10-3 และตารางที่ 10-4

ตารางที่ 10-3 ค่าโคอินซิเดนซ์แฟกเตอร์ของอาคารชุดที่เป็นที่อยู่อาศัย

ลำดับเครื่องวัด	โคอินซิเดนซ์แฟกเตอร์*
1-10	0.9
11-20	0.8
21-30	0.7
31-40	0.6
41 ขึ้นไป	0.5

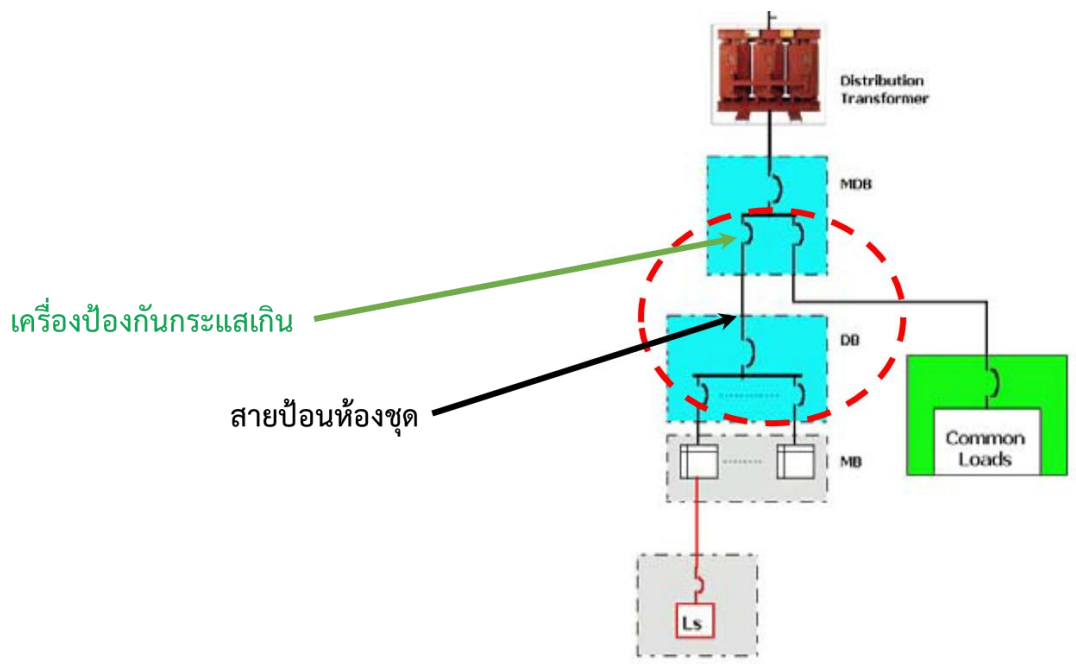
ตารางที่ 10-4 ค่าโคอินซิเดนซ์แฟกเตอร์ของอาคารชุดที่เป็นสำนักงานหรือร้านค้า

ลำดับเครื่องวัด	โคอินซิเดนซ์แฟกเตอร์*
1-10	1
11 ขึ้นไป	0.85

หมายเหตุ: สำหรับอาคารชุดที่มีทั้งประเภทที่อยู่อาศัยและสำนักงาน/ร้านค้า ให้คำนวณแยกแต่ละประเภทแล้วนำค่าที่ได้มารวมกัน

10.7.2 ขนาดของสายป้อนและเครื่องป้องกัน

ขนาดของสายป้อนและเครื่องป้องกันกระแสเกิน (หมายรวมถึงสายเมนหลักด้วย) จะต้องมีความรับกระแส (Current carrying capacity) ไม่น้อยกว่า 125 เปอร์เซ็นต์ของโหลดที่คำนวณได้ตามหัวข้อที่ 10.6.2 และแรงดันตกจะต้องไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์ และต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 6 mm² โดยเครื่องป้องกันจะต้องสามารถตัดกระแสลัดวงจร (Short circuit current หรือ Fault current) ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม แต่จะต้องไม่น้อยกว่า 10 kA หรือ 50 kA แล้วแต่กรณี เครื่องป้องกันจะต้องตั้งหรือออกแบบให้สามารถตัดกระแสเมื่อกระแสใช้งานเกินโหลดที่คำนวณได้ สำหรับขนาดของสายป้อนอาจมีขนาดเท่ากับโหลดที่คำนวณได้ ตามหัวข้อที่ 10.6.2 หากเครื่องป้องกันนั้นมีขนาดเท่ากับโหลดดังกล่าว และได้รับการรับรองได้ต่อเนื่อง 100 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้โดยถือว่าโหลดที่คำนวณได้เป็นโหลดต่อเนื่อง แสดงตัวอย่างแผนผังตำแหน่งสายป้อนและเครื่องป้องกันดังรูปที่ 10-5



ที่มา: กิตติพงษ์ วีระโพธิ์ประสิทธิ์ (การไฟฟ้านครหลวง)

รูปที่ 10-5 ตัวอย่างแผนผังแสดงตำแหน่งสายป้อนและเครื่องป้องกันของอาคารชุด

ตัวอย่างการคำนวณ (อ้างอิงจาก: การออกแบบระบบไฟฟ้า โดย ธนบูรณ์ ศศิภานุเดช)

อาคารชุดประเภทที่อยู่อาศัยแถวหนึ่งประกอบด้วยห้องชุดขนาด 35 m^2 จำนวน 27 ห้อง และขนาด 170 m^2 จำนวน 18 ห้อง ขนาดแรงดันไฟฟ้า 220 V 1 เฟส 2 สาย จงหาขนาดเครื่องวัดฯ ขนาดสายไฟ และขนาดอุปกรณ์ป้องกัน (อาคารชุดที่อยู่อาศัยประเภทนี้มีบริการระบบทำความเย็นจากส่วนกลาง)

วิธีทำ

จากตารางที่ 10-1 แต่ละห้องใช้ขนาดเครื่องวัดและขนาดตัดตอนอัตโนมัติดังนี้

1. ห้องขนาด 35 m^2

ใช้ขนาดเครื่องวัด 5(15)A 1 เฟส 2 สาย และขนาด CB 16 A 1 ขั้ว ตามมาตรฐานขนาดสายป้อนต้องไม่น้อยกว่าอัตราพิกัดของ CB และต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 6 mm^2 ใช้สายขนาด 6 mm^2 THW เดินในท่อร้อยสาย

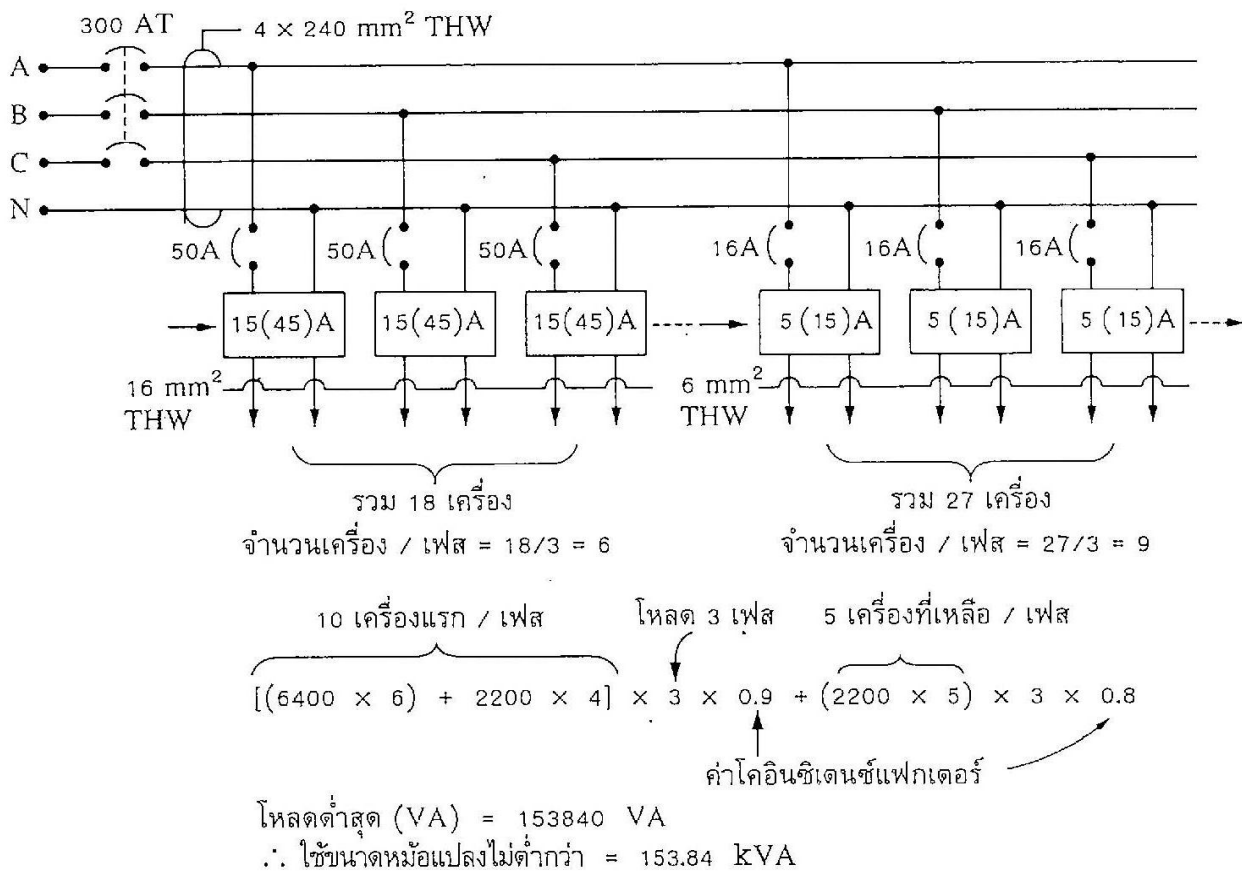
$$\text{โหลดต่ำสุด (VA)} = (20 \times 35) + 1,500 = 2,200 \text{ VA}$$

2. ห้องขนาด 170 m^2

ใช้ขนาดเครื่องวัด 15(45)A 1 เฟส 2 สาย และขนาด CB 50 A 1 ขั้ว และใช้สายขนาด 16 mm^2 (63A) THW เดินในท่อร้อยสาย

$$\text{โหลดต่ำสุด (VA)} = (20 \times 170) + 3,000 = 6,400 \text{ VA}$$

ขนาดสายป้อนและอุปกรณ์ป้องกัน การหาขนาดสายป้อนให้นำกลุ่มเครื่องวัดฯ ในส่วนนั้นเรียงจากตัวใหญ่ไปหาตัวเล็กดังรูปที่ 10-6 แล้วคูณด้วยค่าโคอินซิเดนซ์แฟกเตอร์ตามตารางที่ 10-3



รูปที่ 10-6 โหลดต่ำสุดของสายป้อนเมื่อคุณค่าโคอินซิเดนซ์แฟกเตอร์

สรุป ถ้าสายป้อนเป็นระบบ 3 P 4 W 380/220 V

ดังนั้น กระแสสายป้อน = $153,840 / (1.732 \times 380) = 233.74$ A

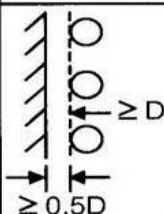
ถ้าขนาดสายป้อนต้องทนกระแสได้ไม่น้อยกว่า 125 เปอร์เซ็นต์ ของกระแสโหลด

ดังนั้นขนาดสายป้อน = $233.74 \times 1.25 = 292$ A

จากตารางที่ 10-5 ถ้าเดินสายไฟในท่อโลหะ (วิธีการเดินสายแบบ ค) จะใช้สายไฟขนาด 240 mm² (329 A) เดิน ส่วนขนาด CB ไม่เกินขนาดกระแสตัวนำจึงเลือก CB ขนาด 300 AT

ตารางที่ 10-5 พิกัดกระแสสายไฟ

ขนาดกระแสของสายไฟฟ้าทองแดงหุ้มฉนวน พีวีซี ตาม มอก. 11-2531 อุณหภูมิตัวนำ 70 องศาเซลเซียส
ขนาดแรงดัน 300 หรือ 750 โวลต์ อุณหภูมิโดยรอบ 40 องศาเซลเซียส (สำหรับวิธีการเดินสาย ก-ค) และ 30 องศาเซลเซียส (สำหรับวิธีการเดินสาย ง และ จ)

ขนาดสาย (ตร.มม.)	ขนาดกระแส (แอมแปร์)						
	วิธีการเดินสาย (หมายเหตุ 2)						
			 หรือ		 หรือ		 หรือ
	ก	ข	ค		ง		จ
ท่อโลหะ			ท่ออลูโลหะ	ท่อโลหะ	ท่ออลูโลหะ		
0.5	9	8	8	7	10	9	-
1	14	11	11	10	15	13	21
1.5	17	15	14	13	18	16	26
2.5	23	20	18	17	24	21	34
4	31	27	24	23	32	28	45
6	42	35	31	30	42	36	56
10	60	50	43	42	58	50	75
16	81	66	56	54	77	65	97
25	111	89	77	74	103	87	125
35	137	110	95	91	126	105	150
50	169	-	119	114	156	129	177
70	217	-	148	141	195	160	216
95	271	-	187	180	242	200	259
120	316	-	214	205	279	228	294
150	364	-	251	236	322	259	330
185	424	-	287	269	370	296	372
240	509	-	344	329	440	352	431
300	592	-	400	373	508	400	487
400	696	-	474	416	599	455	552
500	818	-	541	469	684	516	623

10.8 การคำนวณโหลดเพื่อหาขนาดของหม้อแปลง

หม้อแปลงไฟฟ้า (รูปที่ 10-7) ที่ติดตั้งอยู่ภายในอาคารจะต้องเป็นไปตามรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 10-7 หม้อแปลง

- จะต้องผลิตตามมาตรฐาน IEC หรือ ANSI
- ต้องเป็นชนิดคาสต์เรซิน (Cast resin) หรือเรซินเอนแคปซูเลต (Resin encapsulate) หรือเป็นฉนวนที่ไม่ติดไฟ ติดตั้งอยู่ภายในที่ล้อม (Enclosure) ที่มีระดับการป้องกันเป็นประเภท IP31
- การคำนวณหาขนาดหม้อแปลง ให้คำนวณโหลดสำหรับหม้อแปลง 10.6.1 และอนุญาตให้ใช้ค่าโคอินซิเดนซ์แฟกเตอร์ได้ และขนาดของหม้อแปลงเมื่อไม่ใช้พัดลมระบายความร้อนต้องไม่เล็กกว่า 1.25 เท่าของโหลดสำหรับหม้อแปลง ขนาดควรเป็นไปตามมาตรฐานของการไฟฟ้า เช่น ของการไฟฟ้านครหลวง คือ 300 500 750 1,000 1,500 และ 2,000 kVA ขนาดใหญ่ที่สุดไม่ควรเกิน 2,000 kVA
- โหลดตั้งแต่ 1,000 kVA ขึ้นไป จะต้องติดตั้งหม้อแปลง (ชนิดมีพัดลมระบายความร้อนด้วย) ตั้งแต่ 2 ลูกขึ้นไป เพื่อสับ-ถ่ายโหลดในขณะที่หม้อแปลงลูกใดลูกหนึ่งไม่สามารถจ่ายไฟได้และต้องมีอุปกรณ์ป้องกันการจ่ายไฟชนกัน (Interlocking device) ตัดตอนอัตโนมัติเชื่อมโยง (Tie) ด้านแรงต่ำ จะต้องเป็นชนิดที่ใส่กุญแจได้ และจะต้องมีขนาดเท่ากับขนาดของตัดตอนอัตโนมัติประธานด้วยหม้อแปลง แต่ละลูกที่สับ-ถ่ายกันได้นี้จะต้องมีขนาดเท่ากัน ในภาวะปกติหม้อแปลงแต่ละลูกจะต้องจ่ายไฟเป็นอิสระจากกัน และมีขนาดเหมาะสมกับโหลดของสายป้อนนั้น (เมื่อไม่ใช้พัดลมระบายความร้อน)
- อัตราแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงต้องเป็นขนาด 12 kV/416 V/240 V หรือ 24 kV/416 V/240 V และมี $-4 \times 2.5\%$ แทพพิกัดเต็มทางด้านไฟฟ้าเข้า
- การสูญเสียของหม้อแปลงจะต้องไม่เกิน 1.50 เปอร์เซ็นต์ที่อัตราพิกัดของหม้อแปลงและที่ 100 เปอร์เซ็นต์เพาเวอร์แฟกเตอร์

ตัวอย่างการคำนวณ

อาคารชุดที่อยู่อาศัยแห่งหนึ่งสูง 20 ชั้น มีการจัดแบ่งพื้นที่ดังนี้

- ชั้นล่างมีร้านค้า 15 ร้าน แต่ละร้านมีพื้นที่ 50 m^2
- ชั้น 2-4 เป็นที่จอดรถ
- ชั้น 5-20 เป็นห้องชุด
- แต่ละชั้นของห้องชุดมีห้องชุดแบบ A พื้นที่ 50 m^2 5 ห้อง, แบบ B พื้นที่ 30 m^2 15 ห้อง
- โหลดไฟส่วนกลางรวม 100 kVA

ให้หาขนาดหม้อแปลง

วิธีทำ

ร้านค้า

$$\begin{aligned}\text{โหลดแต่ละร้าน} &= 155 \times \text{พื้นที่} \quad \text{VA} \\ &= 155 \times 50 \\ &= 7,750 \\ &= 7.75 \text{ kVA}\end{aligned}$$

ห้องชุด

$$\text{แบบ A โหลด} = 90 \times 50 + 1,500 = 6,000 \text{ VA} = 6.0 \text{ kVA}$$

$$\text{แบบ B โหลด} = 90 \times 30 + 1,500 = 4,200 \text{ VA} = 4.2 \text{ kVA}$$

โหลดรวม

1. โหลดร้านค้า (ใช้ค่าโคอินซิเดนซ์แฟกเตอร์จากตารางที่ 10-4)

$$\text{ลำดับที่ 1-10} = 10 \times 1 \times 7.75 = 77.5 \text{ kVA}$$

$$11-15 = 5 \times 0.85 \times 7.75 = 32.9 \text{ kVA}$$

$$\text{รวม} = 110.4 \text{ kVA}$$

2. โหลดห้องชุด (ใช้ค่าโคอินซิเดนซ์แฟกเตอร์จากตารางที่ 10-3)

$$\text{แบบ A มี } 16 \times 5 = 80 \text{ ห้อง}$$

$$\text{ลำดับที่ 1-10} = 10 \times 0.9 \times 6 = 54 \text{ kVA}$$

$$11-20 = 10 \times 0.8 \times 6 = 48 \text{ kVA}$$

$$21-30 = 10 \times 0.7 \times 6 = 42 \text{ kVA}$$

$$31-40 = 10 \times 0.6 \times 6 = 36 \text{ kVA}$$

$$41 \text{ ขึ้นไป} = 40 \times 0.5 \times 6 = 120 \text{ kVA}$$

$$\text{แบบ B มี } 16 \times 15 = 240 \text{ ห้อง (คิดแบบ B อยู่ในลำดับที่ 41 ขึ้นไป)}$$

$$\text{ลำดับที่ 41 ขึ้นไป} = 240 \times 0.5 \times 4.2 = 502 \text{ kVA}$$

$$\text{รวม} = 804 \text{ kVA}$$

3. โหลดส่วนกลาง = 100 kVA

สรุป รวมโหลดทั้งหมด = $110.4 + 804 + 100 = 1,014.4 \text{ kVA}$

$$\text{ดังนั้นขนาดหม้อแปลง} = 1.25 \times 1,014.4 = 1,268 \text{ kVA}$$

จากตารางที่ 10-6 (พิกัดขนาดหม้อแปลงประสิทธิภาพสูง) เลือกใช้หม้อแปลงขนาด 1,500 kVA

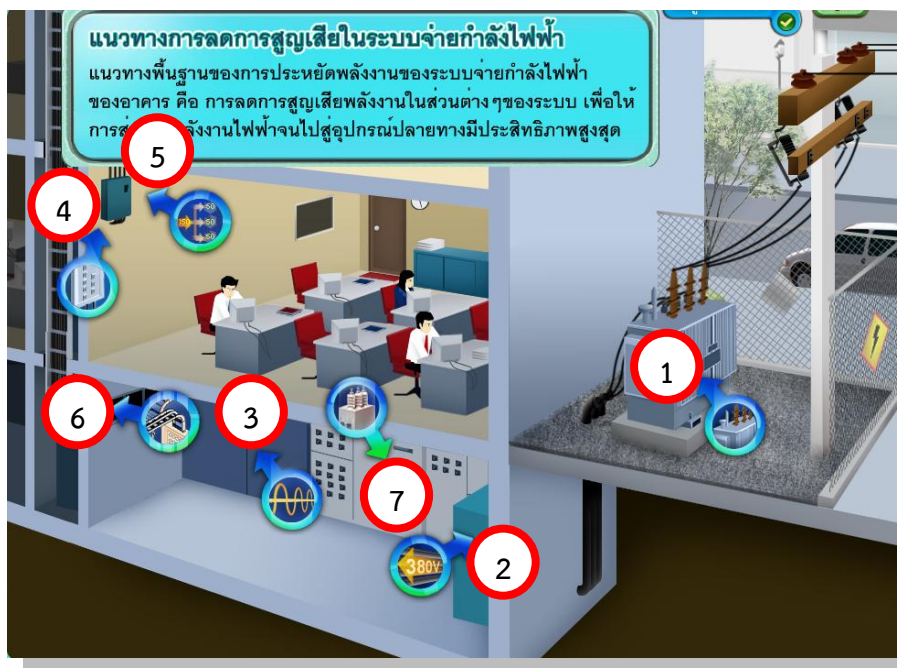
ตารางที่ 10-6 พิกัดขนาดของหม้อแปลงประสิทธิภาพสูงและประสิทธิภาพของหม้อแปลงและค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้า

kVA	Rate A Voltage (kV / V)	Loss (W)		% Loss		Eff %
		Core loss	Copper loss	Core loss	Copper loss	
50	22 / 400	210	1050	0.17	0.83	97.48
100	22 / 400	340	1750	0.16	0.84	97.91
160	22 / 400	480	2350	0.17	0.83	98.23
250	22 / 400	670	3252	0.17	0.83	98.43
315	22 / 400	900	3900	0.19	0.81	98.47
400	22 / 400	980	4600	0.18	0.82	98.60
500	22 / 400	1150	5500	0.17	0.83	98.77
630	22 / 400	1350	6500	0.17	0.83	98.75
800	22 / 400	1600	11000	0.13	1.87	98.43
1000	22 / 400	1900	13500	0.12	0.88	98.56
1250	22 / 400	2300	16400	0.12	0.88	98.50
1500	22 / 400	2800	19800	0.12	0.88	98.50
2000	22 / 400	3250	24000	0.12	0.88	98.63

ที่มา : การอนุรักษ์พลังงานในอาคาร กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

10.9 แนวทางการลดการสูญเสียในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าในอาคารชุด

แนวทางพื้นฐานของการลดการสูญเสียในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้านั้น คือ การใช้ไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงสุดทำให้เกิดการประหยัดพลังงาน ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลดลงและอาจทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านั้นยาวนานขึ้นด้วย ซึ่งในอาคารชุดมีแนวทางการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ 7 แนวทาง (ดังรูปที่ 10-8) ประกอบด้วย การใช้หม้อแปลงความสูญเสียต่ำ การปรับระดับแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงให้เหมาะสม การลดพลังงานสูญเสียจากฮาร์โมนิกส์ การลดพลังงานสูญเสียของแผงจ่ายไฟฟ้า การจัดโหลดของการใช้ไฟฟ้าแต่ละเฟสให้สมดุล การลดพลังงานสูญเสียในสายส่ง และการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 10-8 แนวทางการลดการสูญเสียในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าในอาคารชุด

10.9.1 การใช้หม้อแปลงความสูญเสียต่ำ

เมื่ออาคารชุดต้องการติดตั้งหม้อแปลงใหม่ ควรเลือกใช้หม้อแปลงชนิดความสูญเสียต่ำหรือประสิทธิภาพสูง ซึ่งมีการสูญเสียต่ำกว่าหม้อแปลงแบบทั่วไป 15 - 20 เปอร์เซ็นต์ และควรเลือกขนาดที่เหมาะสมกับโหลดเพื่อให้หม้อแปลงทำงานให้มีประสิทธิภาพสูงสุด มีแนวทางการพิจารณาดังนี้

- สามารถใช้คุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ประหยัดพลังงานประเภทไฟฟ้ากำลัง พพ. 1011-1: 2547 และ พพ. 1011-2: 2547 ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งกำหนดขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย
- สำหรับหม้อแปลงชนิดฉนวนเป็นน้ำมัน มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงสุด (W) ที่ไม่มีภาระ (No load) และที่ภาระเต็มพิกัด (Full load) แสดงดังตารางที่ 10-7 ทั้งนี้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่อุณหภูมิ 75 °C จะต้อง ไม่น้อยกว่า 98% ที่ครึ่งภาระเต็มพิกัดที่ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1 และไม่น้อยกว่า 97% ที่ภาระเต็มพิกัดที่ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1
- สำหรับหม้อแปลงชนิดแห้ง มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงสุด (W) ที่ไม่มีภาระ (No load) และที่ภาระเต็มพิกัด (Full load) แสดงดังตารางที่ 10-8 ทั้งนี้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่อุณหภูมิ 75 °C จะต้อง ไม่น้อยกว่า 98% ที่ครึ่งภาระเต็มพิกัดที่ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1 และไม่น้อยกว่า 97% ที่ภาระเต็มพิกัดที่ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1

ตารางที่ 10-7 กำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงสุดของหม้อแปลงชนิดฉนวนเป็นน้ำมัน

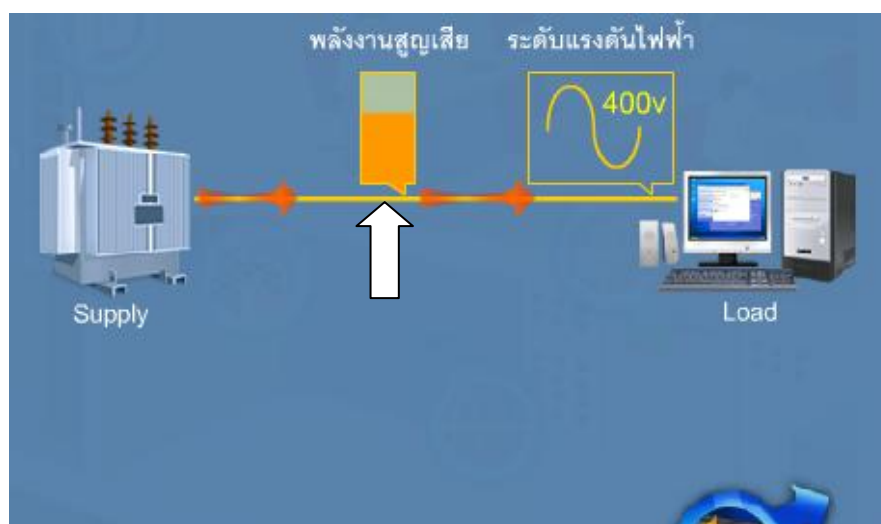
ขนาดหม้อแปลง (kVA)	ขีดกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงสุด (W) ที่ไม่มีภาระ (No load) สำหรับแรงดันระบบไม่เกิน		ขีดกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงสุด (W) ที่ภาระเต็มพิกัด (Full load) ที่อุณหภูมิ 75 °C
	22/24 kV	33 kV	
50	160	170	950
100	250	260	1,550
160	360	370	2,100
250	500	520	2,950
315	600	630	3,500
400	720	750	4,150
500	860	900	4,950
630	1,010	1,050	5,850
800	1,200	1,270	9,900
1,000	1,270	1,300	12,150
1,250	1,500	1,530	14,750
1,500	1,820	1,850	17,850
2,000	2,110	2,140	21,650
2,500	2,300	2,350	25,650
3,000	2,700	2,750	29,700

ตารางที่ 10-8 กำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงสุดของหม้อแปลงชนิดแห้ง

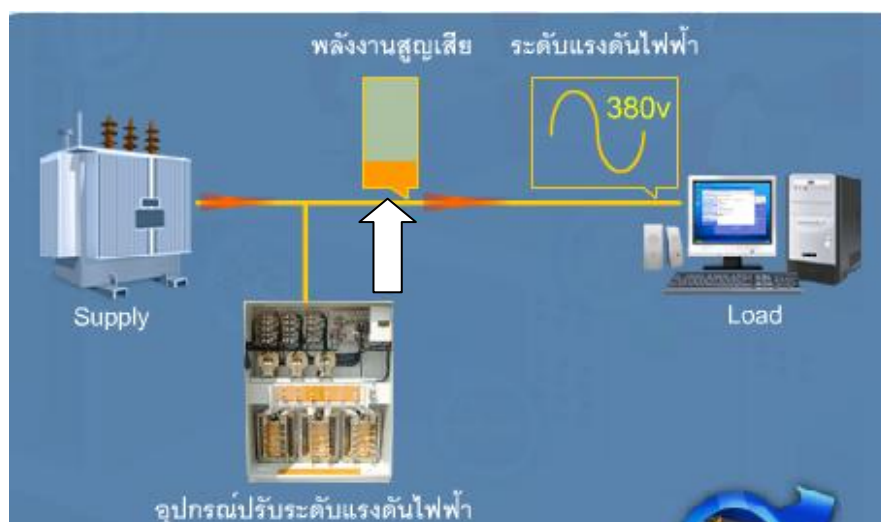
ขนาดหม้อแปลง (kVA)	ขีดกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงสุด (W) ที่ไม่มีภาระ (No load) สำหรับแรงดันระบบไม่เกิน 36 kV	ขีดกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงสุด (W) ที่ภาระเต็มพิกัด (Full load) ที่อุณหภูมิ 75 °C
250	1,020	3,650
315	1,200	4,500
400	1,400	5,300
500	1,650	6,500
630	1,960	7,800
800	2,300	9,900
1,000	2,660	12,150
1,250	3,100	14,750
1,500	3,800	17,850
2,000	5,000	21,600
2,500	5,800	25,650

10.9.2 การปรับระดับแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงให้เหมาะสม

การติดตั้งอุปกรณ์ปรับแรงดันจะช่วยปรับระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลง โดยสัมพันธ์กับระดับภาระทางไฟฟ้าของอาคาร ทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่ในระดับมาตรฐานใช้งาน (380 V) ตลอดเวลา ทำให้ลดพลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่าปกติในช่วงเวลาที่อาคารมีภาระทางไฟฟ้าต่ำ โดยสามารถให้ผลประหยัดได้ 15-20 % ของพลังงานไฟฟ้าที่อาคารใช้ แสดงการเปรียบเทียบพลังงานสูญเสียก่อนและหลังการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสม ดังรูปที่ 10-9



ก่อนปรับแรงดัน



หลังปรับแรงดัน

รูปที่ 10-9 พลังงานสูญเสียก่อนและหลังการปรับระดับแรงดันไฟฟ้า

แนวทางการลดการสูญเสียในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

การติดตั้งอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าจากหม้อแปลง

1. คุณสมบัติและหน้าที่ของอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้า

อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าจะเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าและตู้จ่ายไฟฟ้า โดยมีหน้าที่การทำงานดังนี้



- ปรับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม แรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่าระดับมาตรฐาน คือ สูงกว่า 220 โวลต์ (ระบบไฟฟ้า 1 เฟส) หรือ 380 โวลต์ (ระบบไฟฟ้า 3 เฟส) จะถูกปรับให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ
- รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้คงที่ แรงดันแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกผลิตในอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าระหว่างที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านจากด้านตัวจ่ายพลังงานไปยังด้านใช้งาน และทำให้เกิดค่าแตกต่างของแรงดันแม่เหล็กไฟฟ้า ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าเกิดความสมดุลอย่างรวดเร็ว และช่วยลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในสายดิน
- ปรับแรงดันไฟฟ้าให้สมดุลระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้ากับภาระทางไฟฟ้า โดยมีคุณสมบัติในการจับคู่ภายในของแรงดันไฟฟ้าระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้ากับวงจรไฟฟ้าใช้งานทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ
- ลดฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้น อุปกรณ์ปรับระดับแรงดันไฟฟ้าจะสร้างวงจรกระแสไฟฟ้าภายในที่สามารถดูดซับฮาร์โมนิกส์ในกระแสไฟฟ้า
- ปรับลดกระแสไฟฟ้าสูญเสียในช่วงเปิดสวิตช์อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า

2. เงื่อนไขที่เหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้า

ในการพิจารณาติดตั้งใช้งานอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้า ควรมีการตรวจสอบภาระการใช้งานทางไฟฟ้า เพื่อให้มั่นใจว่าค่าเฉลี่ยระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงไฟฟ้าสูงกว่ามาตรฐานจริง เพราะหากแรงดันไฟฟ้าไม่สูงจริงอาจเกิดผลเสียกับระบบ และในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าสูงเกินมาตรฐานเล็กน้อยก็เกิดผลประหยัคน้อยไม่คุ้มค่ากับการลงทุน

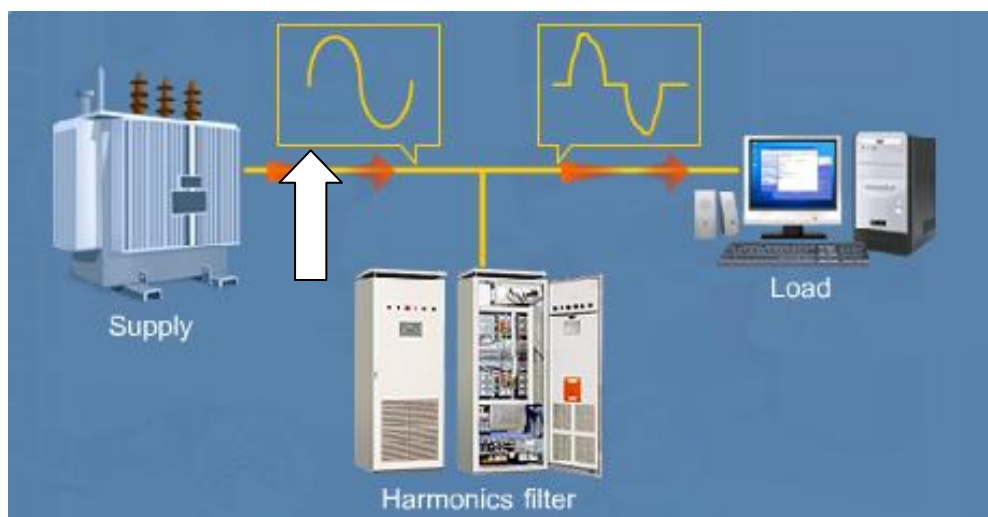
ข้อมูลจาก คู่มือผู้บริหารโรงงานและอาคาร ในการพิจารณาจัดซื้ออุปกรณ์มาตรฐาน
โดย กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน

10.9.3 การลดพลังงานสูญเสียจากฮาร์โมนิกส์

ฮาร์โมนิกส์ซึ่งเป็นคลื่นไฟฟ้ารบกวนในระบบไฟฟ้าที่เกิดจากอุปกรณ์ เช่น แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง ตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์ คอมพิวเตอร์ ทำให้เกิดพลังงานสูญเสีย และความร้อนที่หม้อแปลงไฟฟ้า สายไฟฟ้า รวมทั้งการทำงานผิดปกติของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ จึงควรมีการออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้า และติดตั้งอุปกรณ์กรองไฟฟ้าอย่างเหมาะสมเพื่อลดผลของฮาร์โมนิกส์ แสดงรูปเปรียบเทียบก่อนและหลังติดตั้งอุปกรณ์กรองไฟฟ้า ดังรูปที่ 10-10



ก่อนติดตั้ง



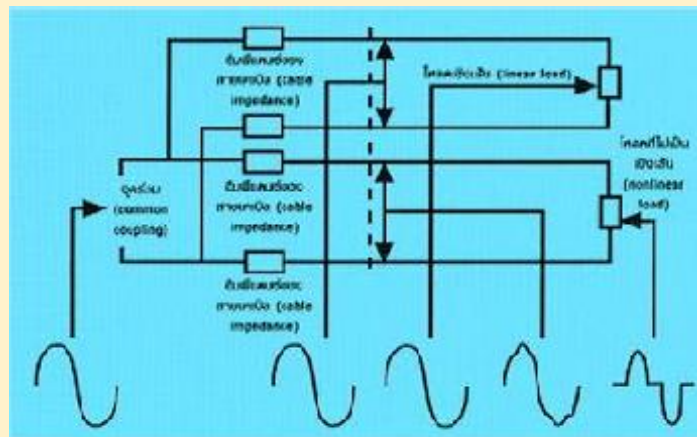
หลังติดตั้ง

รูปที่ 10-10 ผลการติดตั้งอุปกรณ์กรองไฟฟ้าเพื่อลดฮาร์โมนิกส์

แนวทางการลดการสูญเสียในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

แนวทางการแก้ปัญหาฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้า

- ออกแบบขนาดสายตัวนำนิวทรัลให้มีขนาดเหมาะสมในกรณีที่ต้องใช้งานในบริเวณที่มีฮาร์โมนิกส์มาก โดยทั่วไปสายศูนย์ (Neutral) สำหรับระบบไฟฟ้าที่มีฮาร์โมนิกส์ควรมีขนาดใหญ่เป็น 2 เท่าของขนาดสายศูนย์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าทั่วไป



- แยกวงจรสำหรับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นต้นกำเนิดของฮาร์โมนิกส์ออกจากโหลดอื่นๆ รวมถึงใช้สายไฟ แฉงจ่ายไฟ และตัวตัดวงจรที่มีพิกัดที่เหมาะสมกับการใช้งานกับการใช้งานกับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น



- ติดตั้งหม้อแปลงแยกโดด (Isolation Transformer) เพื่อป้องกันฮาร์โมนิกส์จากอุปกรณ์ย้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟ
- ในกรณีที่มีความยากลำบากในการออกแบบเดินสายใหม่ อาจจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์กรองไฟฟ้า ได้แก่ Passive filter หรือ Active filter เพื่อกำจัดฮาร์โมนิกส์ ที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์

ข้อมูลจาก เอกสารเผยแพร่ เรื่องความรู้และความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้า
โดย Copper Development Centre-South East Asia

10.9.4 การลดพลังงานสูญเสียของแผงจ่ายไฟฟ้า

การออกแบบแผงจ่ายไฟฟ้าควรมีขนาดพิกัดที่เป็นไปตามมาตรฐานการติดตั้ง เพื่อความปลอดภัยในการใช้งานและลดพลังงานสูญเสีย นอกจากนี้จุดเชื่อมต่อต่างๆ ควรใช้อุปกรณ์และติดตั้งตามมาตรฐาน เพื่อให้มีความหนาแน่นและกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้สะดวก

แนวทางการลดการสูญเสียในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

การลดพลังงานสูญเสียของแผงจ่ายไฟฟ้า



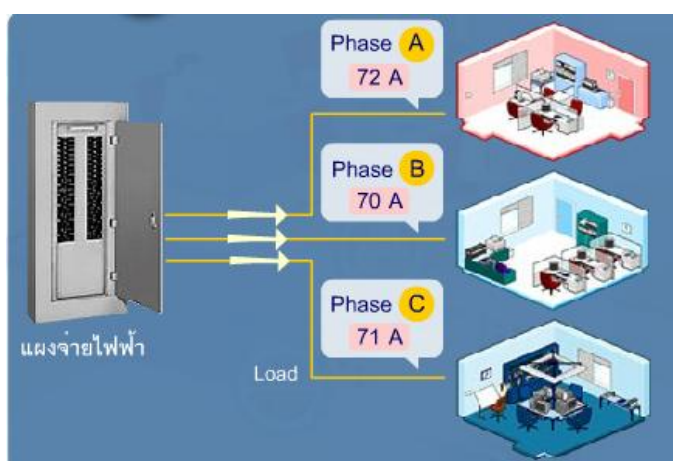
แนวทางการออกแบบติดตั้งแผงจ่ายไฟฟ้า

- แผงจ่ายไฟฟ้าหนึ่งๆ ไม่ควรมีวงจรย่อยเกิน 42 วงจร
- ระยะทางจากวงจรย่อยไปจนถึงจุดจ่ายไฟสุดท้าย ไม่ควรยาวเกิน 30 เมตร
- แผงจ่ายไฟฟ้าควรติดตั้งในบริเวณศูนย์กลางของการใช้ไฟฟ้า เพื่อให้สามารถจ่ายไฟฟ้าไปยังจุดต่างๆ โดยมีแรงดันตกน้อยที่สุด
- แผงจ่ายไฟฟ้าจะต้องติดตั้งในบริเวณที่เข้าถึงง่าย โดยติดตั้งสูงไม่เกิน 1.8 เมตร
- แผงจ่ายไฟฟ้าควรติดตั้งอยู่ในแนวของสายบ่อน เพื่อให้สายบ่อนมีระยะสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยมีการโค้งงอน้อยที่สุด
- ค่าพิกัดของแผงจ่ายไฟฟ้าจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่าพิกัดของสายบ่อน
- ในแต่ละชั้นของอาคารควรมีแผงจ่ายไฟฟ้าอย่างน้อย 1 แผง
- แผงจ่ายไฟฟ้าจะต้องมีอุปกรณ์ป้องกันหลัก

ข้อมูลจาก คู่มือการออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้าของบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด เรียบเรียงโดย ผศ.ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์

10.9.5 การจัดโหลดของการใช้ไฟฟ้าแต่ละเฟสให้สมดุล

เป็นการเฉลี่ยโหลดแต่ละเฟสให้มีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน (ดังรูปที่ 10-11) หากโหลดไม่สมดุลจะทำให้เกิดความสูญเสียพลังงาน และแรงดันตกตรงบริเวณปลายสายมาก รวมทั้งจะทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสจะไม่เท่ากัน ทำให้ความสามารถในการจ่ายโหลดของหม้อแปลงลดลง หรืออาจทำให้เกิดปัญหาในการปรับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับโหลดที่หม้อแปลงได้



รูปที่ 10-11 การสมดุลภาระทางไฟฟ้า

แนวทางการลดการสูญเสียในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

การจัดโหลดให้สมดุล

แนวทางการจัดโหลดให้สมดุล

- คำนวณโหลดของวงจรย่อยต่างๆ โดยเริ่มจากวงจรย่อยไฟฟ้าแสงสว่าง วงจรย่อยเต้ารับ วงจรย่อยโหลดเฉพาะ วงจรย่อยเครื่องปรับอากาศ และวงจรย่อยมอเตอร์
- จัดวงจรย่อยไฟฟ้าแสงสว่าง โดยใช้หมายเลข 1(A), 3(B), 5(C) ตามด้วย 2(A), 4(B), 6(C) และ 7(A), 9(B), 11(C) และต่อไปเรื่อยๆ ตามลำดับจนครบ เพื่อให้โหลดแสงสว่างเกิดความสมดุลระหว่างเฟส
- จัดวงจรย่อยเต้ารับโดยใช้หมายเลขต่อจากวงจรย่อยแสงสว่าง และพยายามจัดให้เกิดความสมดุลกันเองเท่าที่จะทำได้
- จัดวงจรย่อยของโหลดเฉพาะ จากนั้นจัดวงจรย่อยของเครื่องปรับอากาศ และวงจรย่อยของมอเตอร์ โดยพยายามให้เกิดความสมดุลกัน
- หลังจากจัดวงจรย่อยของโหลดต่างๆ จนครบแล้ว จัดวงจรย่อยสำรองและวงจรว่าง ประมาณ 20-30 % ของวงจรทั้งหมด
- ทำการรวมโหลดของแต่ละเฟสแล้วตรวจสอบว่าสมดุลหรือไม่ โดยโหลดแต่ละเฟสควรมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 20 % ถ้าโหลดยังไม่สมดุลให้ทำการจัดสลับหมายเลขวงจร เพื่อให้มีความสมดุลมากขึ้น จากนั้นก็รวมโหลดแต่ละเฟสเข้าด้วยกันเป็นโหลดที่ติดตั้งทั้งหมด
- จากโหลดที่ติดตั้งทั้งหมดที่ได้ สามารถนำไปคำนวณหาขนาดของสายป้อนและอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินต่อไป

ข้อมูลจาก คู่มือการออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้าของบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด
เรียบเรียงโดย ผศ.ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์

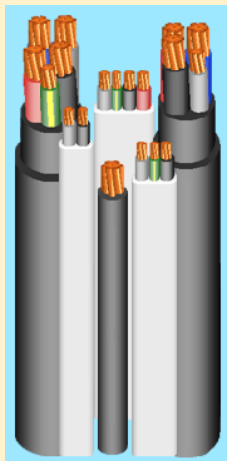
10.9.6 การลดพลังงานสูญเสียในสายส่ง

การเดินสายไฟควรมีระยะทางจากแผงจ่ายไฟถึงอุปกรณ์น้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อลดแรงดันไฟฟ้าตกและพลังงานสูญเสีย นอกจากนี้การเลือกใช้สายไฟฟ้าควรเลือกใช้ขนาดตามมาตรฐานการติดตั้ง โดยอาจเผื่อขนาดสายให้ใหญ่ขึ้นบ้าง สำหรับโหลดที่อาจเพิ่มขึ้นในอนาคต รวมทั้งช่วยลดความต้านทานไฟฟ้าและพลังงานสูญเสียในสายไฟฟ้าด้วย

แนวทางการลดการสูญเสียในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

การลดพลังงานสูญเสียในสายไฟ

แนวทางการพิจารณาออกแบบติดตั้งสายไฟฟ้าเพื่อลดพลังงานสูญเสีย

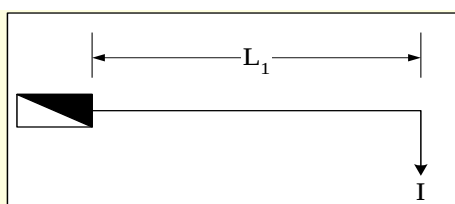


- การเลือกประเภทและขนาดของสายไฟฟ้าจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐานการติดตั้ง
- สายไฟฟ้าควรมีระยะห่างจากแผงจ่ายไฟถึงจุดต่อไฟสุดท้ายไม่เกิน 30 เมตร เพื่อควบคุมไม่ให้แรงดันไฟฟ้าตกเกิน 1-2 % ในกรณีที่ระยะทางไกลกว่านี้ควรพิจารณาเพิ่มขนาดสายไฟให้ใหญ่ขึ้น
- การกำหนดขนาดของวงจรย่อยและสายไฟ ควรมีการเผื่อโหลดสำหรับอนาคต โดยวงจรย่อยแสงสว่างและเตารีดทั่วไป ควรจะให้โหลดของวงจรย่อยไม่เกิน 60% เช่น โหลด 12 A ควรใช้ขนาดของวงจรย่อยและสายไฟอย่างน้อย 20 A โดยในกรณีโหลดต่อเนื่องควรเผื่อโหลดไว้อีก 20 %

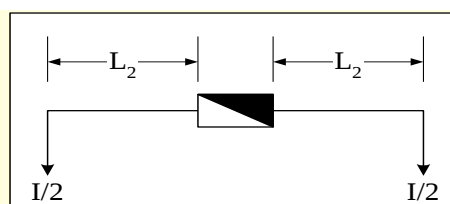
ข้อมูลจาก คู่มือการออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้าของบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิล จำกัด
เรียบเรียงโดย ผศ.ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์

เช่นการเดินสายไฟฟ้าในอาคารชุดขนาดใหญ่ต้องมีห้องรับและจ่ายไฟฟ้าหลัก เป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องออกแบบติดตั้งห้องรับและจ่ายไฟฟ้าให้เหมาะสม และช่วยในการประหยัดพลังงาน สำหรับอาคารชุดขนาดเล็ก ห้องรับและจ่ายไฟฟ้า ก็คือ ตู้จ่ายไฟฟ้าที่ติดตั้งตามจุดต่างๆ ในห้องทำงานที่ต้องใช้ไฟฟ้านั่นเอง การติดตั้งควรให้อยู่บริเวณศูนย์กลางของภาระ (Load) ซึ่งสามารถพิจารณาได้ ดังนี้ ห้องสี่เหลี่ยมผืนผ้า จากรูปที่ 10-12ก เป็นการติดตั้งตู้จ่ายไฟฟ้าให้อยู่บริเวณด้านใดด้านหนึ่งของห้อง เมื่อเปรียบเทียบกับติดตั้งบริเวณกลางห้อง ดังรูปที่ 10-12ข จะพบว่าพลังงานสูญเสียในสายลดลงเป็น 1/4 เท่า

กำหนดให้ R คือ ความต้านทาน (Resistance) ของตัวนำ 1 เส้น
I คือ กระแสโหลด (Load Current)
L คือ ความยาวของตัวนำ



$$P_1 = I^2 R$$



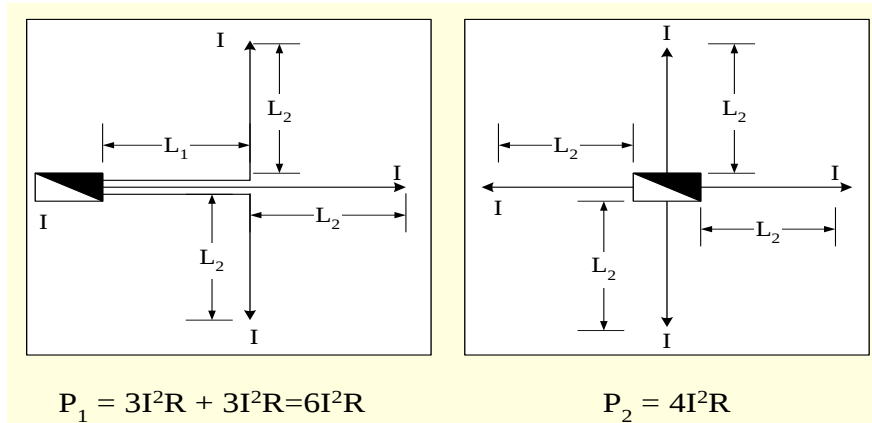
$$P_2 = (I/2)^2 (R/2) 2 = (1/4) I^2 R$$

ก. การติดตั้งทางด้านข้างของห้อง

ข. การติดตั้งบริเวณกลางห้อง

รูปที่ 10-12 การติดตั้งตู้จ่ายไฟฟ้าในห้องสี่เหลี่ยมผืนผ้า

และห้องสี่เหลี่ยมจัตุรัส จากรูปที่ 10-13ก เป็นการติดตั้งตู้จ่ายไฟฟ้าให้อยู่บริเวณด้านใดด้านหนึ่งของห้อง เมื่อเปรียบเทียบกับ การติดตั้งบริเวณกลางห้อง ดังรูปที่ 10-13ข จะพบว่าพลังงานสูญเสียในสายลดลงเป็น 2/3 เท่า



ก. การติดตั้งทางด้านข้างของห้อง ข. การติดตั้งบริเวณกลางของห้อง

รูปที่ 10-13 การติดตั้งตู้จ่ายไฟฟ้าในห้องสี่เหลี่ยมจัตุรัส

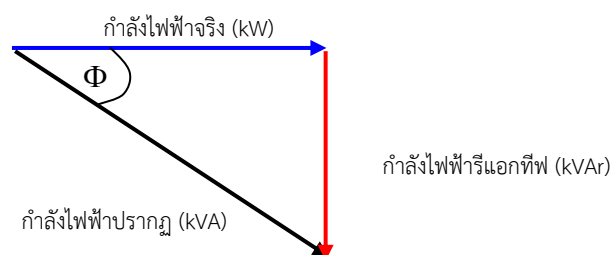
10.9.7 การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

ในระบบกระแสไฟฟ้าสลับการวัดค่ากำลังไฟฟ้าสามารถวัดแยกออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย

- กำลังไฟฟ้าจริง (P) เป็นกำลังไฟฟ้าที่ใช้งานจริงมีหน่วยวัดเป็นวัตต์หรือกิโลวัตต์
- กำลังไฟฟ้ากำลังไฟฟ้รืแอกทีฟ (Q) เป็นกำลังไฟฟ้าที่ต้องการสำหรับสร้างสนามแม่เหล็ก มีหน่วยวัดเป็นวาร์หรือกิโลวาร์

กำลังไฟฟ้าทั้งสองส่วนสามารถรวมเข้าด้วยกันทางเฟสเซอร์ เป็นกำลังไฟฟ้าปรากฏ (S) มีหน่วยเป็นโวลต์แอมป์ หรือ เควีเอ (kVA) ดังรูปที่ 10-14

$$\text{kVA} = \sqrt{(\text{kW})^2 + (\text{kVAr})^2}$$



รูปที่ 10-14 ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

ค่าจำกัดความของตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าหมายถึงอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าจริง มีหน่วยเป็นวัตต์ ต่อกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ มีหน่วยเป็นโวลต์-แอมป์ ซึ่งอยู่ในรูปของ $\cos \Phi$ เราสามารถเขียนสมการตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\text{ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าจริง}}{\text{กำลังไฟฟ้าปรากฏ}}$$

หรือ

$$\cos \Phi = \frac{\text{kW}}{\text{kVA}}$$

หรือ

$$\begin{aligned} \text{kW} &= \text{kVA} \cos \Phi \\ \text{kVAr} &= \text{kVA} \sin \Phi \quad \text{หรือ} \quad \text{kW} \tan \Phi \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

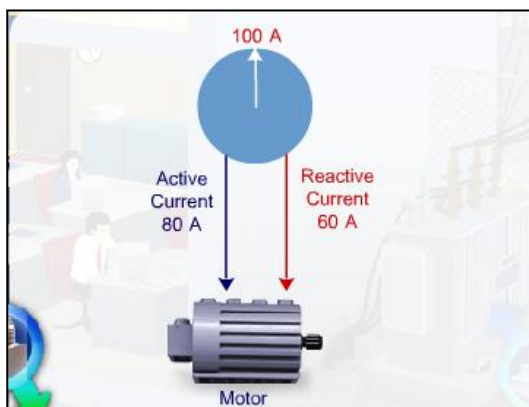
อาคารชุดแห่งหนึ่งใช้ระบบแรงดัน 3 เฟส 380 V อ่านกระแสจากมิเตอร์ได้ 1,266 A อ่านกำลังไฟฟ้าจริงจากมิเตอร์ได้ 500 kW ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอาคารชุดแห่งนี้มีค่าเท่าใด

วิธีทำ

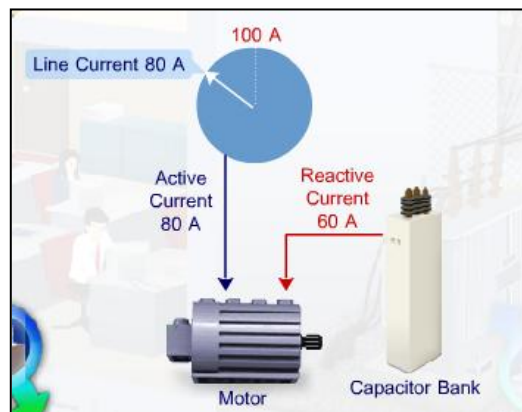
$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้าปรากฏ} &= \frac{\sqrt{3} \times 380 \times 1,266}{1,000} = 833 \text{ kVA} \\ \text{ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า} &= 500/833 \\ &= 0.60 \\ &= 60 \% \end{aligned}$$

ตอบ

การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า สามารถช่วยลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าและแรงดันตกในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าของอาคารชุดได้ โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitor bank) ในระบบไฟฟ้า เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำ เช่น มอเตอร์ หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ จะช่วยลดกระแสไฟฟ้าที่ไหลในระบบ แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 10-15



ไม่ติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้า



ติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้า

รูปที่ 10-15 การลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

ประโยชน์ของการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้น

- ประหยัดค่าไฟฟ้า คือ ถ้าผู้ใช้ไฟฟ้ามีตัวประกอบกำลังไฟฟ้าล้าหลังต่ำกว่า 0.85 และถ้าผู้ใช้ไฟฟ้ามีความต้องการกำลังไฟฟ้ร้แอกทีฟเฉลี่ยใน 15 นาทีที่สูงสุด เมื่อคิดเป็นกิโลวาร์เกินกว่า 61.97 เพอร์เซ็นต์ของความต้องการกำลังไฟฟ้ร้แอกทีฟเฉลี่ย เมื่อคิดเป็นกิโลวัตต์แล้วเฉพาะส่วนที่เกินต้องเสียค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในอัตรา กิโลวาร์ละ 56.07 บาท
- ลดค่ากำลังสูญเสียในสายไฟฟ้าเพราะกระแสลดลง
- ระบบไฟฟ้าสามารถจ่ายโหลดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากกระแสของระบบลดลงเพราะเมื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้ร้แอกทีฟให้น้อยลงก็จะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงได้มากขึ้น

$$\text{kVA(เหลือ)} = \text{kW(โหลด)} \times \left(\frac{1}{\cos \Phi_1} - \frac{1}{\cos \Phi_2} \right)$$

- ลดค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลง ลดกำลังสูญเสียในขดลวดทองแดง

$$\text{กำลังสูญเสียของหม้อแปลงที่ลดลง} = I_1^2 R - I_1^2 R \times \left(\frac{\cos \Phi_1}{\cos \Phi_2} \right)^2$$

- ระดับแรงดันไฟฟ้าดีขึ้น เมื่อตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นแรงดันตกคร่อมในสายไฟจะลดลง

แนวทางการลดการสูญเสียในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

แนวทางการพิจารณาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitor bank)

การติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับ ชนิด ขนาด และ จำนวนของโหลด ลักษณะการใช้งาน ลักษณะของวงจรไฟฟ้า ขนาดและความยาวของสายไฟฟ้าช่วงต่างๆ โดยสามารถพิจารณาเลือกตำแหน่งติดตั้งได้ดังนี้



- ติดตั้งแยกเฉพาะสำหรับอุปกรณ์แต่ละตัว เหมาะสำหรับโหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำ ที่มีขนาดค่อนข้างแน่นอนและใช้งานเป็นระยะเวลานาน เช่น หม้อแปลงย่อย มอเตอร์ขนาดใหญ่ รวมทั้งหลอดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียตั้งแต่สายส่ง สายป้อนจนถึงวงจรย่อย แต่มีข้อเสียคือ ลงทุนสูง เพราะจำนวนอุปกรณ์ที่ต้องติดตั้งมีจำนวนมาก
- ติดตั้งแบบชุดเดียวที่จุดรวมของกลุ่มโหลด เช่น แผงไฟฟ้าประธาน (MDB) หรือแผงจ่ายไฟฟ้าให้แก่กลุ่มมอเตอร์เล็กๆ ที่ทำงานพร้อมกันหลายๆ ตัว จะช่วยลดการสูญเสียพลังงานและแรงดันตกในสายป้อนแต่ไม่ลดการสูญเสียในวงจรย่อยของโหลดแต่ละตัว
- ติดตั้งที่ด้านปฐมภูมิหรือด้านแรงสูงของหม้อแปลง เป็นแบบที่มีค่าลงทุนต่ำ แต่ให้ผลดีน้อยที่สุด เหมาะสำหรับการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า เพื่อไม่ให้เกิดการไฟฟ้าคิดค่าปรับจากตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำเท่านั้น ไม่ได้ช่วยลดการสูญเสียพลังงานในระบบ

ข้อมูลจาก หนังสือการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร รหัส B11 โดย กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน

แบบประเมินผลการเรียน

หน่วยที่ 10

ระบบไฟฟ้าสำหรับอาคารชุด

คำสั่ง จงทำเครื่องหมาย X ลงในข้อที่ถูก

- การออกแบบระบบไฟฟ้าควรคำนึงถึงสิ่งใดเป็นสำคัญ
 - ความปลอดภัย (Safety)
 - ความเชื่อถือได้ (Reliability)
 - การดูแลรักษา (Maintenance)
 - ความสม่ำเสมอของแรงดัน (Voltage regulation)
- การติดตั้งแหล่งจ่ายไฟอยู่ที่ศูนย์กลางของโหนดเพราะสาเหตุใด
 - ลดการใช้สายไฟฟ้า
 - ลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในอุปกรณ์ไฟฟ้า
 - ลดกำลังสูญเสียในสายไฟฟ้า
 - ลดกระแสในหม้อแปลงไฟฟ้า
- ข้อใดเป็นการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าที่มีผลการประหยัดมากที่สุดสำหรับหม้อแปลงที่มีขนาดเท่ากัน
 - เปลี่ยนหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดประสิทธิภาพสูงและมีขนาดเหมาะสมกับโหนด
 - ปลดแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าในขณะที่ไม่มีโหนด
 - การปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิอยู่ระดับที่เหมาะสม
 - การปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ในหม้อแปลงไฟฟ้า
- ระบบจ่ายไฟฟ้าควรเลือกอุปกรณ์ตัวจลจรลักษณะอย่างไร
 - กระแสต่ำกว่าโหนด
 - กระแสเท่ากับโหนด
 - กระแสสูงกว่าโหนด
 - แรงดันสูงกว่าโหนด
- การพิจารณาการใช้ไฟฟ้าในแต่ละวันของโรงงานหรืออาคาร ต้องดูจากการแสดงค่าของเครื่องวัดใด
 - ค่าแรงดันไฟฟ้า
 - ค่ากำลังไฟฟ้า
 - ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์
 - ค่ากระแสไฟฟ้า

6. อาคารชุดแห่งหนึ่ง ระบบแรงดัน 3 เฟส 380 V อ่านกำลังไฟฟ้าจริงจากมิเตอร์ได้ 500 kW 1,000 A ตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่าใด
- ก. 65 %
ข. 75 %
ค. 85 %
ง. 90 %
7. สูตรตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับข้อใด
- ก. $\frac{\text{กำลังไฟฟ้าจริง}}{\text{กำลังไฟฟ้าปรากฏ}}$
ข. $\frac{\text{กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ}}{\text{กำลังไฟฟ้าปรากฏ}}$
ค. $\frac{\text{กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ}}{\text{กำลังไฟฟ้าจริง}}$
ง. $\frac{\text{กำลังไฟฟ้าปรากฏ}}{\text{กำลังไฟฟ้าจริง}}$

จงใช้โจทย์ต่อไปนี้ตอบคำถามข้อ 8-16

โจทย์ อาคารชุดที่อยู่อาศัยแห่งหนึ่งสูง 7 ชั้น มีการจัดแบ่งพื้นที่ดังนี้

- ชั้นล่างมีร้านค้า 5 ร้าน แต่ละร้านมีพื้นที่ 20 m^2 พื้นที่ที่เหลือเป็นที่จอดรถ
- ชั้น 2-4 เป็นห้องชุดรูปแบบ A พื้นที่ 150 m^2 ต่อห้อง 4 ห้องต่อชั้น ใช้ไฟฟ้า 1 เฟส 2 สาย
- ชั้น 5-7 เป็นห้องชุดรูปแบบ B พื้นที่ 50 m^2 ต่อห้อง 12 ห้องต่อชั้น ใช้ไฟฟ้า 1 เฟส 2 สาย
- โหลดไฟส่วนกลางรวม 50 kVA

8. ห้องชุดแบบ A ขนาด 150 m^2 ควรใช้สายไฟขนาดเท่าไรเมื่อคิดว่าใช้สาย THW เดินในท่อร้อยสาย
- ก. 16 mm^2
ข. 6 mm^2
ค. 50 mm^2
ง. 24 mm^2
9. ห้องชุดแบบ B ขนาด 50 m^2 ควรใช้สายไฟขนาดเท่าไรเมื่อคิดว่าใช้สาย THW เดินในท่อร้อยสาย
- ก. 16 mm^2
ข. 6 mm^2
ค. 50 mm^2
ง. 24 mm^2

10. ห้องชุดแบบ A ห้องขนาด 150 m^2 ควรใช้ขนาดเครื่องวัดขนาดเท่าไร
- ก. 5(15) A1P
 - ข. 15(45) A 1P
 - ค. 30(100) A 1P
 - ง. 50(150) A 1P
11. ห้องชุดแบบ B ห้องขนาด 50 m^2 ควรใช้ขนาดเครื่องวัดขนาดเท่าไร
- ก. 5(15) A1P
 - ข. 15(45) A 1P
 - ค. 30(100) A 1P
 - ง. 50(150) A 1P
12. โหลดต่ำสุดของห้องชุดแบบ A ขนาด 150 m^2 มีค่าเท่าไร
- ก. 6.5 kVA
 - ข. 12.5 kVA
 - ค. 10.5 kVA
 - ง. 16.5 kVA
13. โหลดต่ำสุดของห้องชุดแบบ B ขนาด 50 m^2 มีค่าเท่าไร
- ก. 10 kVA
 - ข. 8 kVA
 - ค. 6 kVA
 - ง. 3 kVA
14. โหลดร้านค้ารวมมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับเท่าไร (เมื่อคิดค่าโคอินซิเดนซ์แฟกเตอร์จากตารางที่ 10-4)
- ก. 8.5 kVA
 - ข. 10.5 kVA
 - ค. 12.5 kVA
 - ง. 15.5 kVA
15. โหลดห้องชุดแบบ A และ แบบ B รวม มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับเท่าไร (เมื่อคิดค่าโคอินซิเดนซ์แฟกเตอร์จากตารางที่ 10-3)
- ก. 271.2 kVA
 - ข. 241.5 kVA
 - ค. 182.5 kVA
 - ง. 155.5 kVA

16. ถ้ารวมโหลดทั้งหมดของอาคารชุดหลังนี้ได้ 336.7 kVA ควรเลือกใช้หม้อแปลงประสิทธิภาพสูงขนาดเท่าไร (ให้ใช้ตารางที่ 10-6 ในบทเรียนในการเลือก)
- ก. 630 kVA
 - ข. 400 kVA
 - ค. 315 kVA
 - ง. 500 kVA
17. ระบบสายไฟในอาคารแบบ 1 เฟส 3 สาย มีสายไฟที่มีกระแสไฟฟ้ากี่เส้น
- ก. 1 เส้น
 - ข. 2 เส้น
 - ค. 3 เส้น
 - ง. ไม่มีเส้นไหนที่มีกระแสไฟฟ้า
18. ระบบสายไฟในอาคารแบบ 3 เฟส 5 สาย มีสายไฟที่มีกระแสไฟฟ้ากี่เส้น
- ก. 1 สาย
 - ข. 2 สาย
 - ค. 3 สาย
 - ง. ไม่มีสายไฟที่มีกระแสไฟฟ้าเลย
19. ข้อใดกล่าวถูกต้องสำหรับการออกแบบสายไฟในอาคารชุดเพื่อลดการสูญเสียในสายส่ง
- ก. การเดินสายไฟควรมีระยะทางจากแผงจ่ายไฟถึงห้องชุดแต่ละห้องน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้
 - ข. สายไฟขนาดเล็กมีน้ำหนักเบาสามารถลดการสูญเสียในสายส่งได้ดีกว่าสายที่มีขนาดใหญ่กว่า
 - ค. เลือกใช้สายไฟฟ้าควรเลือกใช้สายที่มีราคาถูก
 - ง. ไม่มีข้อถูก
20. ข้อใดไม่ใช่ประโยชน์ของการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า
- ก. ประหยัดค่าไฟฟ้า
 - ข. ลดค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลง
 - ค. ลดค่ากำลังสูญเสียในสายไฟฟ้า
 - ง. ถูกทุกข้อ



กรมพัฒนาพลังงานทดแทน
และอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน



โครงการพัฒนาลักสูตรการอนุรักษ์พลังงานและพลังงานทดแทน
สำหรับสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา

รายวิชาที่ 3

ระบบควบคุมในงานอุตสาหกรรม รหัส 3104-2006

หน่วยที่ 5 การประยุกต์ใช้ PLC ร่วมกับ เซ็นเซอร์และอุปกรณ์ควบคุม

หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) พุทธศักราช 2557
ประเภทวิชาอุตสาหกรรม
สาขาวิชาไฟฟ้า

.....

จุดประสงค์สาขาวิชา

1. เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ความรู้และทักษะด้านการสื่อสาร ทักษะการคิดและการแก้ปัญหา และทักษะทางสังคมและการดำรงชีวิตในการพัฒนาตนเองและวิชาชีพ
2. เพื่อให้มีความเข้าใจหลักการบริหารและจัดการวิชาชีพ การใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและหลักการของงานอาชีพที่สัมพันธ์เกี่ยวข้องกับการพัฒนาวิชาชีพไฟฟ้า ให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงและความก้าวหน้าของเศรษฐกิจ สังคมและเทคโนโลยี
3. เพื่อให้มีความเข้าใจในหลักการและกระบวนการทำงานในกลุ่มงานพื้นฐานประยุกต์ใช้ความรู้ทักษะประสบการณ์และเทคโนโลยีพัฒนางานอาชีพ วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ ด้วยทฤษฎีและปฏิบัติ การออกแบบ เขียนแบบและประมาณราคา
4. เพื่อให้สามารถออกแบบ วิเคราะห์ แก้ปัญหาในงานติดตั้ง ควบคุมระบบไฟฟ้า เครื่องทำความเย็นและปรับอากาศ
5. เพื่อให้สามารถปฏิบัติงานติดตั้ง ซ่อมบำรุง ทดสอบ ควบคุมระบบไฟฟ้า เครื่องทำความเย็นและปรับอากาศ
6. เพื่อให้สามารถปฏิบัติงานด้านเทคนิคในสถานประกอบการและประกอบอาชีพอิสระ รวมทั้งการใช้ความรู้และทักษะเป็นพื้นฐานในการศึกษาต่อในระดับสูงขึ้นได้
7. เพื่อให้มีเจตคติที่ดีต่องานอาชีพ มีความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ ซื่อสัตย์สุจริต มีระเบียบวินัย เป็นผู้มีความรับผิดชอบต่อสังคม สิ่งแวดล้อม ต่อด้านความรุนแรงและสารเสพติด

แผนการจัดการเรียนรู้

รหัสวิชา 3104-2006

ระดับชั้น ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง

ทฤษฎีรวม 2 คาบ

ชื่อรายวิชา ระบบควบคุมในงานอุตสาหกรรม

สาขาวิชา ช่างไฟฟ้ากำลัง

ปฏิบัติรวม 3 คาบ

3 หน่วยกิต

จุดประสงค์รายวิชา

1. เข้าใจโครงสร้างส่วนประกอบ การทำงานของโปรแกรมเมเบิลคอนโทรลเลอร์คอมพิวเตอร์ เซนเซอร์ และอุปกรณ์ควบคุมแบบต่าง ๆ
2. เขียนโปรแกรมคำสั่งควบคุมการทำงานของโปรแกรมเมเบิลคอนโทรลเลอร์ร่วมกับเซนเซอร์และอุปกรณ์ควบคุมแบบต่าง ๆ
3. มีกิจนิสัยในการทำงานร่วมกับผู้อื่นด้วยความประณีต รอบคอบ ปลอดภัย

สมรรถนะรายวิชา

1. แสดงความรู้เกี่ยวกับระบบควบคุมในงานอุตสาหกรรม
2. ออกแบบวงจรควบคุม
3. ต่อยังจรทดสอบการทำงาน

คำอธิบายรายวิชา

ศึกษาและปฏิบัติเกี่ยวกับโครงสร้างของโปรแกรมเมเบิลคอนโทรลเลอร์การเขียนคำสั่งควบคุมการทำงานของโปรแกรมเมเบิลคอนโทรลเลอร์ หลักการทำงานของหน่วยอินพุต เอาท์พุต เซนเซอร์ที่ใช้วัดและตรวจจับความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ อัตราการไหล ระดับน้ำหนักรังสีแสงพร็อกซิมิตี้ สวิตช์อุปกรณ์ควบคุมตัวตั้งเวลา ตัวนับลิมิตสวิตช์ ฯลฯ การนำเอาโปรแกรมคอนโทรลเลอร์และคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับเซนเซอร์และอุปกรณ์ควบคุมแบบต่างๆ

หน่วยการสอน

รหัส 3104-2006 วิชาการระบบควบคุมในงานอุตสาหกรรม จำนวน 5 ชั่วโมง/สัปดาห์

หน่วยที่	ชื่อหน่วยการสอน	จำนวนชั่วโมง
1	ประวัติความเป็นมาของ PLC	15
2	ภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม	20
3	การเขียนคำสั่งควบคุมการทำงานของ PLC	15
-	สอบกลางภาค	5
4	อุปกรณ์ด้านอินพุตและเอาต์พุต	15
5	การประยุกต์ใช้ PLC ร่วมกับ เซ็นเซอร์และอุปกรณ์ควบคุม	15
-	สอบปลายภาค	5
	รวม	90

เกณฑ์การประเมินผล
วิชา ระบบควบคุมในงานอุตสาหกรรม รหัส 3104-2006

รายการ	คะแนน
1. คุณลักษณะที่ต้องการบูรณาการคุณธรรม จริยธรรมและคุณลักษณะอันพึงประสงค์	20
2. ทดสอบ	
2.1 แบบทดสอบหลังเรียน	5
2.2 สอบปลายภาค	30
3. ภาระงาน	
3.1 แบบฝึกหัด	10
3.2 การปฏิบัติการทดลอง	30
3.3 รายงาน	5
รวม	100

 กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน 	ใบสาระการเรียนรู้	หน่วยที่ 5
	ชื่อวิชา ระบบควบคุมในงานอุตสาหกรรม	เวลาเรียน 20 ชั่วโมง
	ชื่อหน่วย การประยุกต์ใช้ PLC ร่วมกับ เซ็นเซอร์ และอุปกรณ์ควบคุม	
ชื่อเรื่องหรือชื่องาน การประยุกต์ใช้ PLC ร่วมกับ เซ็นเซอร์และอุปกรณ์ควบคุม		
สาระสำคัญ การนำโปรแกรมเมเบิลคอนโทรลเลอร์ไปใช้ในงานควบคุมทั้งขนาดเล็กตลอดจนถึงการควบคุมการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมีใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากคุณสมบัติของโปรแกรมเมเบิลคอนโทรลเลอร์ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหน่วยเรียนที่ผ่านมา ในหน่วยเรียนนี้จะเป็นการประยุกต์การใช้งานของโปรแกรมเมเบิลคอนโทรลเลอร์ในรูปแบบต่างๆ สิ่งสำคัญในการออกแบบโปรแกรม คือ จะต้องศึกษาทำความเข้าใจระบบของงาน ขั้นตอนการทำงาน การกำหนดอินพุต/เอาต์พุต รวมถึงการประยุกต์ใช้งานกลุ่มคำสั่งต่างๆ จากหน่วยเรียนที่ผ่านมา เรื่องที่จะศึกษา 1. การออกแบบโปรแกรม 2. การประยุกต์ใช้งานกับงานควบคุมมอเตอร์ 3. การประยุกต์ใช้งานกับงานนิวแมติกส์ไฟฟ้า 4. การประยุกต์ใช้งานกับระบบจำลองการทำงาน จุดประสงค์การเรียนรู้ 1. ออกแบบคำสั่งควบคุมการทำงานของ PLC ได้ 2. ประยุกต์ใช้งาน PLC ออกแบบโปรแกรมควบคุมมอเตอร์ได้ 3. ประยุกต์ใช้งาน PLC ออกแบบโปรแกรมควบคุมนิวแมติกส์ไฟฟ้าได้ 4. ประยุกต์ใช้งาน PLC ออกแบบโปรแกรมควบคุมระบบจำลองการทำงานได้		

หน่วยที่ 5

การประยุกต์ใช้ PLC ร่วมกับ เซ็นเซอร์และอุปกรณ์ควบคุม

การนำโปรแกรมเมเบิลคอนโทรลเลอร์ไปใช้ในงานควบคุมทั้งขนาดเล็กตลอดจนถึงการควบคุมการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมีใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากคุณสมบัติของโปรแกรมเมเบิลคอนโทรลเลอร์ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหน่วยเรียนที่ผ่านมา ในหน่วยเรียนนี้จะเป็นการประยุกต์การใช้งานของโปรแกรมเมเบิลคอนโทรลเลอร์ในรูปแบบต่างๆ สิ่งสำคัญในการออกแบบโปรแกรมคือ จะต้องศึกษาทำความเข้าใจระบบของงาน ขั้นตอนการทำงาน การกำหนดอินพุต/เอาต์พุต รวมถึงการประยุกต์ใช้งานกลุ่มคำสั่งต่างๆ จากหน่วยเรียนที่ผ่านมา

5.1 การออกแบบโปรแกรม

การออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงานของ PLC จะต้องเข้าใจระบบของงาน ขั้นตอนการทำงาน การกำหนดอินพุต/เอาต์พุต รวมถึงการประยุกต์ใช้งานกลุ่มคำสั่งต่างๆ เพื่อให้ได้โปรแกรมควบคุมการทำงานของ PLC ตามที่ต้องการ ซึ่งในการออกแบบสามารถออกแบบได้ทั้งจากขั้นตอนการทำงาน และจาก Timing Diagram

1. ตัวอย่างการออกแบบโปรแกรมจากขั้นตอนการทำงาน

การออกแบบโปรแกรมจากขั้นตอนการทำงาน สามารถทำได้ดังนี้

1. ให้ศึกษาทำความเข้าใจขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม
2. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต
3. ออกแบบ Ladder Diagram ตามขั้นตอนการทำงาน

ตัวอย่างที่ 5.1 การออกแบบโปรแกรมจากขั้นตอนการทำงาน

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจากขั้นตอนการทำงานที่กำหนด

ขั้นตอนการทำงาน

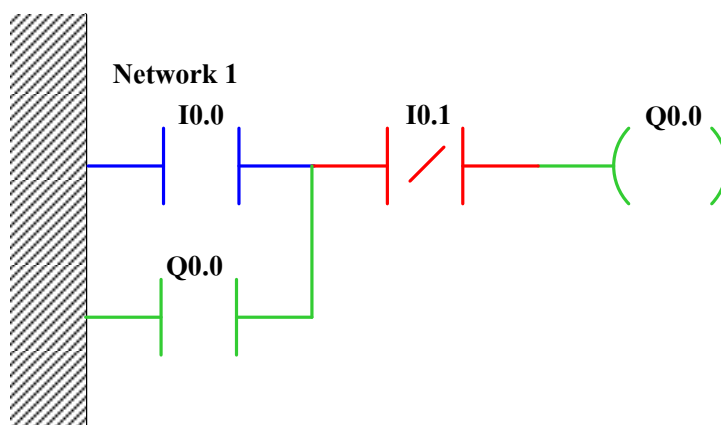
1. เมื่อ ON สวิตช์อินพุต I0.0 ส่งผลให้เอาต์พุต Q0.0 จะมีสถานะ ON
2. เมื่อ ON สวิตช์อินพุต I0.1 ส่งผลให้เอาต์พุต Q0.0 จะมีสถานะ OFF

วิธีการออกแบบโปรแกรม

1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	สวิทช์อินพุต Start
I0.1	สวิทช์อินพุต Stop
Q0.0	เอาต์พุต จุดที่ 1

2. เขียน Ladder Diagram



ตัวอย่างที่ 5.2 การออกแบบโปรแกรมจากขั้นตอนการทำงาน

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจากขั้นตอนการทำงานที่กำหนด

ขั้นตอนการทำงาน

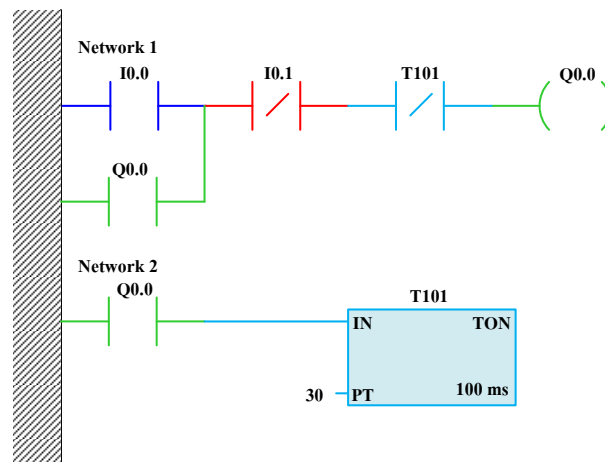
1. เมื่อ ON สวิทช์อินพุต I0.0 ให้เอาต์พุต Q0.0 มีสถานะ ON
2. เมื่อเอาต์พุต Q0.0 มีสถานะ ON จะหน่วงเวลา 3 วินาทีให้เอาต์พุต Q0.0 มีสถานะ OFF
3. เมื่อ ON สวิทช์อินพุต I0.1 ให้เอาต์พุตมีสถานะ OFF ทั้งหมด

วิธีการออกแบบโปรแกรม

1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	สวิทช์อินพุต Start
I0.1	สวิทช์อินพุต Stop
Q0.0	เอาต์พุต จุดที่ 1
T101	ตัวตั้งเวลา TON

2. เขียน Ladder Diagram



ตัวอย่างที่ 5.3 การออกแบบโปรแกรมจากขั้นตอนการทำงาน

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจากขั้นตอนการทำงานที่กำหนด

ขั้นตอนการทำงาน

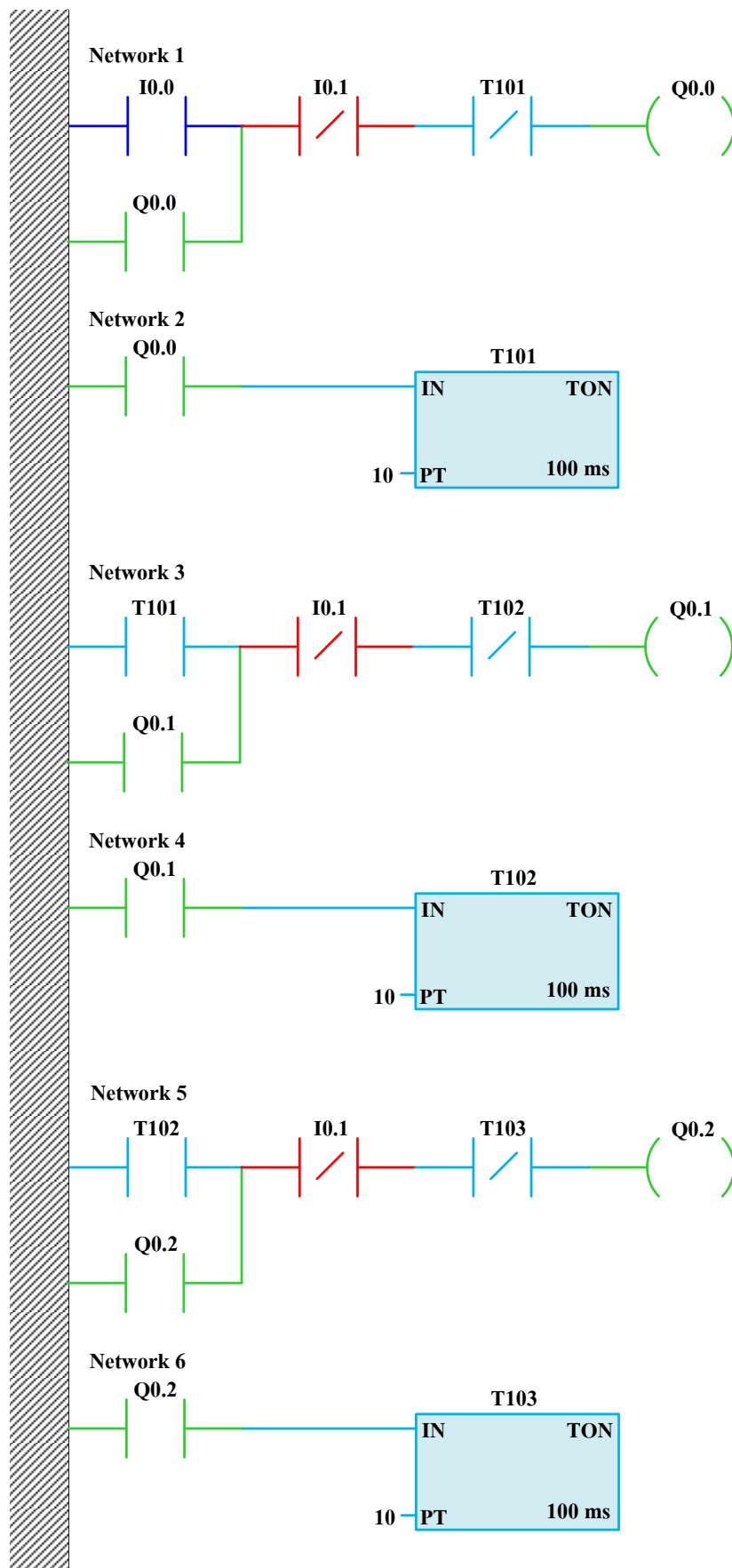
1. เมื่อ ON สวิตช์อินพุต I0.0 ให้เอาต์พุต Q0.0 มีสถานะ ON
2. เมื่อเอาต์พุต Q0.0 มีสถานะ ON จะหน่วงเวลา 1 วินาที ให้เอาต์พุต Q0.1 มีสถานะ ON และเอาต์พุต Q0.0 มีสถานะ OFF
3. เมื่อเอาต์พุต Q0.1 มีสถานะ ON จะหน่วงเวลา 1 วินาที ให้เอาต์พุต Q0.2 มีสถานะ ON และเอาต์พุต Q0.1 มีสถานะ OFF
4. เมื่อเอาต์พุต Q0.2 มีสถานะ ON จะหน่วงเวลา 1 วินาที ให้เอาต์พุต Q0.2 มีสถานะ OFF
5. เมื่อ ON สวิตช์อินพุต I0.1 ให้เอาต์พุตมีสถานะ OFF ทั้งหมด

วิธีการออกแบบโปรแกรม

1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	สวิตช์อินพุต Start
I0.1	สวิตช์อินพุต Stop
Q0.0	เอาต์พุต จุดที่ 1
Q0.2	เอาต์พุต จุดที่ 2
Q0.2	เอาต์พุต จุดที่ 2
T101	ตัวตั้งเวลา TON ตัวที่ 1
T102	ตัวตั้งเวลา TON ตัวที่ 2
T103	ตัวตั้งเวลา TON ตัวที่ 3

2. เขียน Ladder Diagram



ตัวอย่างที่ 5.4 การออกแบบโปรแกรมจากขั้นตอนการทำงาน

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจากขั้นตอนการทำงานที่กำหนด

ขั้นตอนการทำงาน

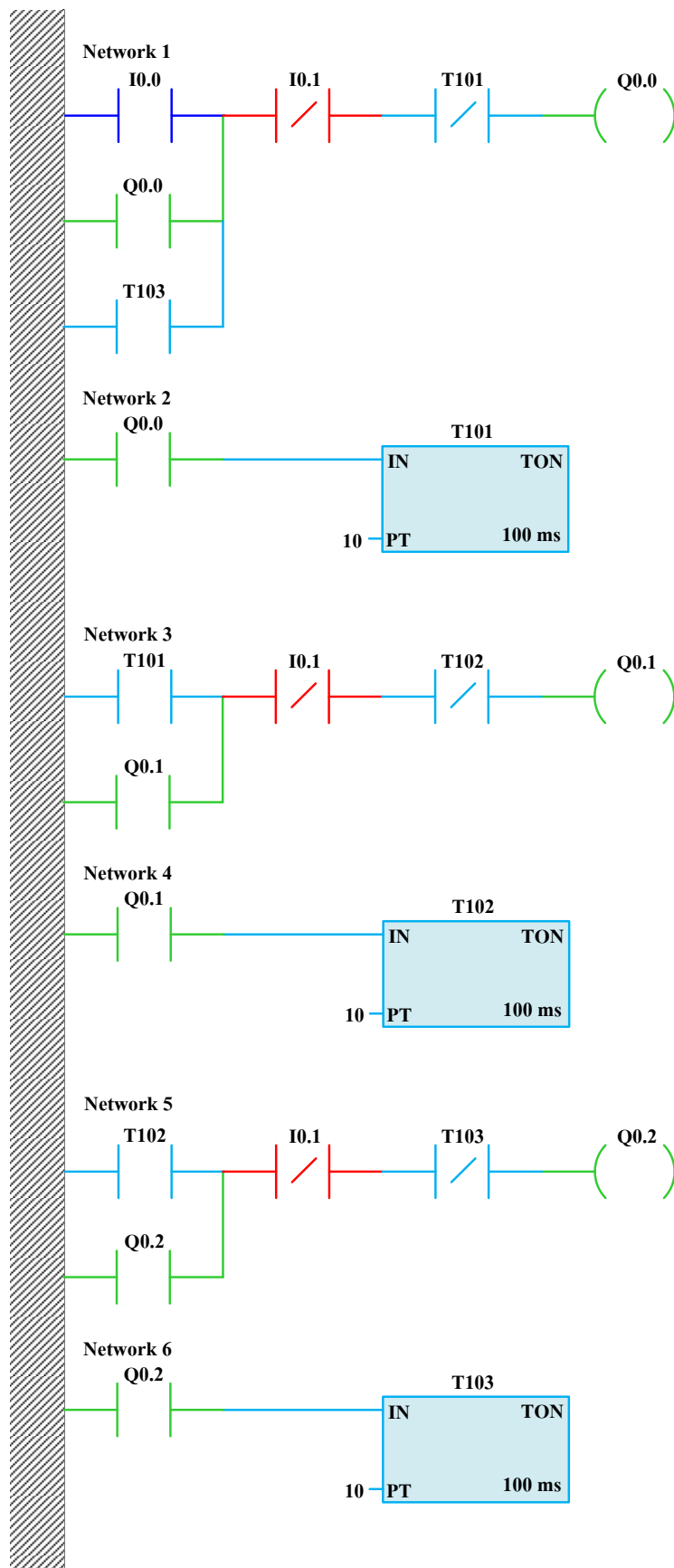
1. เมื่อ ON สวิตช์อินพุต I0.0 ให้เอาต์พุต Q0.0 มีสถานะ ON
2. เมื่อเอาต์พุต Q0.0 มีสถานะ ON จะหน่วงเวลา 1 วินาที ให้เอาต์พุต Q0.1 มีสถานะ ON และเอาต์พุต Q0.0 มีสถานะ OFF
3. เมื่อเอาต์พุต Q0.1 มีสถานะ ON จะหน่วงเวลา 1 วินาที ให้เอาต์พุต Q0.2 มีสถานะ ON และเอาต์พุต Q0.1 มีสถานะ OFF
4. เมื่อเอาต์พุต Q0.2 มีสถานะ ON จะหน่วงเวลา 1 วินาที ให้เอาต์พุต Q0.0 มีสถานะ ON และเอาต์พุต Q0.2 มีสถานะ OFF
5. ให้สลับการทำงานตามเงื่อนไขข้อ 2-4 ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะหยุดการทำงาน
6. เมื่อ ON สวิตช์อินพุต I0.1 ให้เอาต์พุตมีสถานะ OFF ทั้งหมด
7. การ ON สวิตช์อินพุต I0.0 ถ้า ON ไปแล้ววงจรกำลังทำงานตามเงื่อนไขถ้า ON สวิตช์อินพุต I0.0 ซ้ำจะต้องไม่มีผลกับวงจร

วิธีการออกแบบโปรแกรม

1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	สวิตช์อินพุต Start
I0.1	สวิตช์อินพุต Stop
Q0.0	เอาต์พุต จุดที่ 1
Q0.2	เอาต์พุต จุดที่ 2
Q0.2	เอาต์พุต จุดที่ 2
T101	ตัวตั้งเวลา TON ตัวที่ 1
T102	ตัวตั้งเวลา TON ตัวที่ 2
T103	ตัวตั้งเวลา TON ตัวที่ 3

2. เขียน Ladder Diagram



ตัวอย่างที่ 5.5 การออกแบบโปรแกรมจากขั้นตอนการทำงาน

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจากขั้นตอนการทำงานที่กำหนด
ขั้นตอนการทำงาน

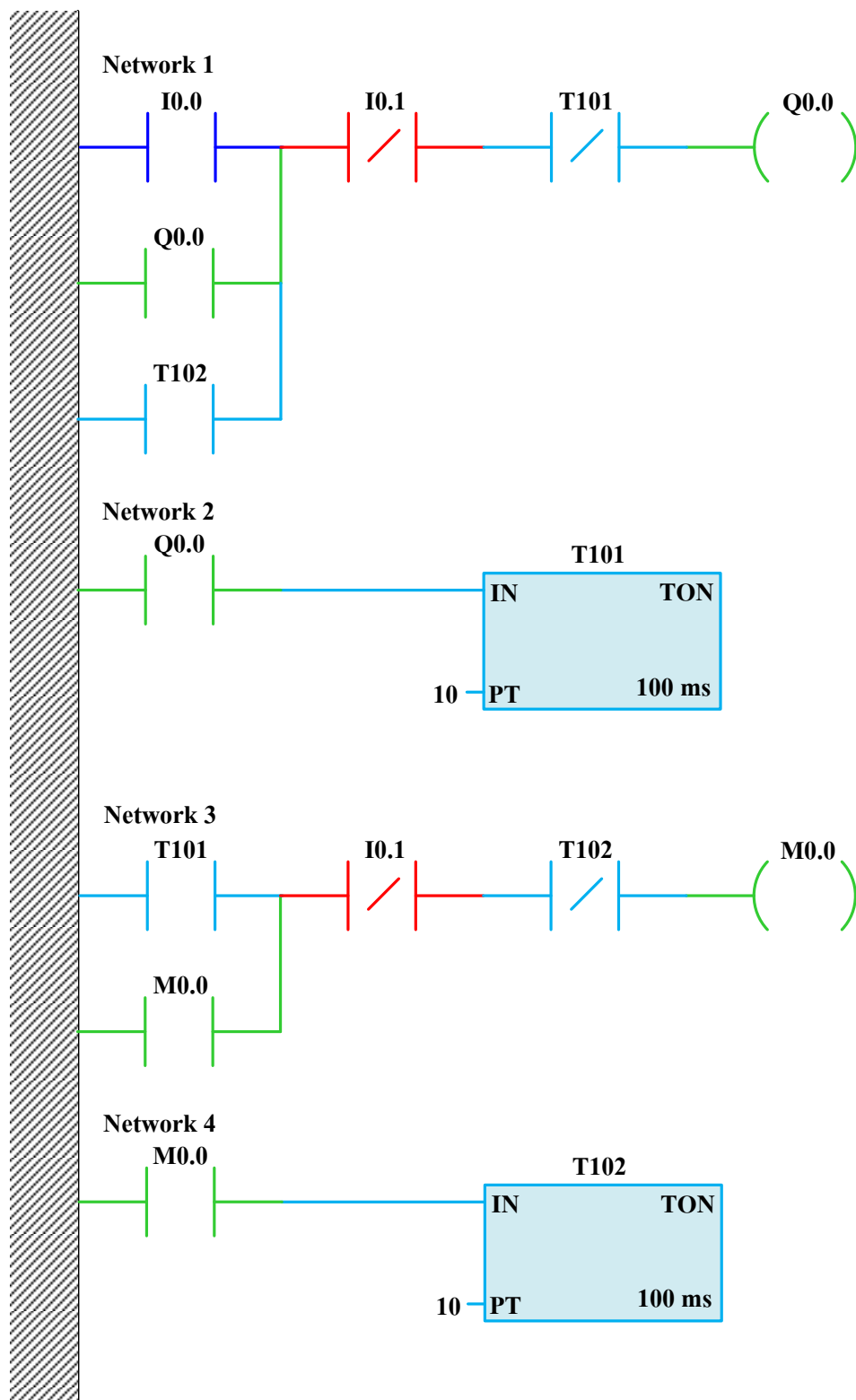
1. เมื่อ ON สวิตช์อินพุต 1
2. เมื่อ ON สวิตช์อินพุต I0.1 ให้เอาต์พุต Q0.0 มีสถานะ OFF

วิธีการออกแบบโปรแกรม

1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	สวิตช์อินพุต Start
I0.1	สวิตช์อินพุต Stop
Q0.0	เอาต์พุต จุดที่ 1
M0.0	รีเลย์ภายใน จุดที่ 1
T101	ตัวตั้งเวลา TON ตัวที่ 1
T102	ตัวตั้งเวลา TON ตัวที่ 2

2. เขียน Ladder Diagram

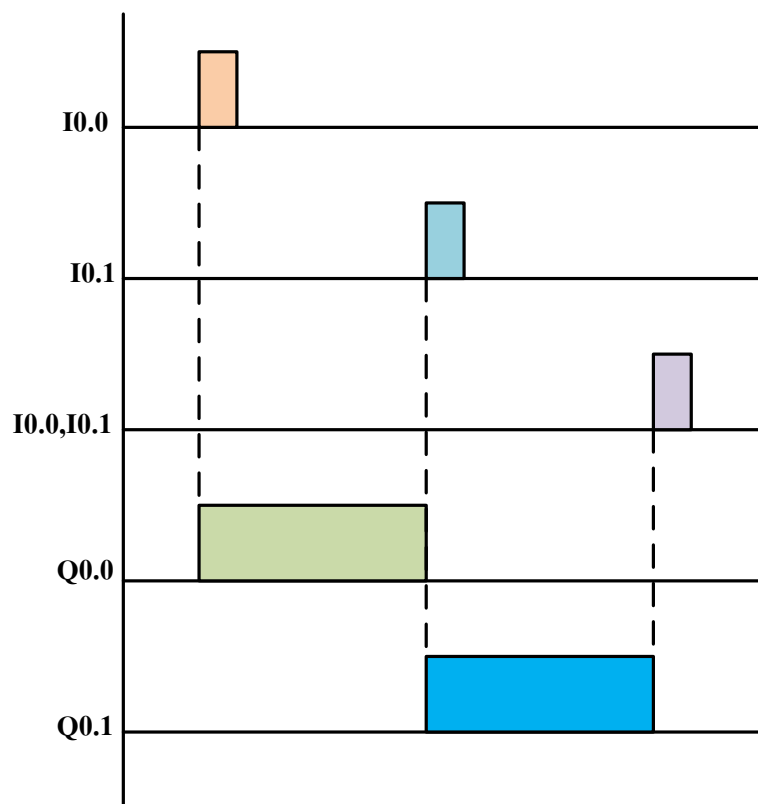


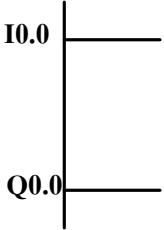
2. ตัวอย่างการออกแบบโปรแกรมจาก Timing Diagram

Timing Diagram คือ ผังแสดงการทำงานของสัญญาณต่างๆ เทียบกับคาบเวลา โดยเขียนด้วยเส้นหรือสัญลักษณ์แสดงความหมายต่างๆ แทนการอธิบายด้วยข้อความตัวอักษร ประโยชน์ที่ได้จากผังแสดงขั้นตอนการทำงานดังกล่าวคือ

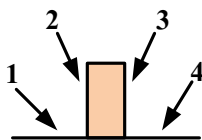
- สามารถมองเห็นสภาวะการทำงานของอินพุต/เอาต์พุต ทุกจุดในช่วงเวลาต่างๆ ของลำดับขั้นการควบคุมโดยการมองภาพรวมๆ เพียงครั้งเดียว
- แสดงให้เห็นการทำงานแบบต่อเนื่องได้ง่ายๆ ถึงสภาวะการทำงานของเอาต์พุตตัวหนึ่งไปยังเอาต์พุตอีกตัวหนึ่ง

ความหมายของสัญลักษณ์ที่ใช้ในการเขียน Timing Diagram



สัญลักษณ์	ความหมาย
	เส้นหลักแสดงถึงกรอบที่ใช้เขียน
	ชื่อตำแหน่งของอินพุต/เอาต์พุต หรือสัญญาณต่างๆ จะเขียนอยู่ข้างเส้นหลัก และมีเส้นลากในแนวนอน เป็นเส้นทางสำหรับเขียนสัญลักษณ์แสดงการทำงานของอินพุตหรือเอาต์พุต
	เส้นประลากลงมาในแนวดิ่ง เป็นเส้นบอกสถานการณ์ทำงาน ณ จุดเวลาหรือตำแหน่งนั้นๆ

สัญลักษณ์แสดงการทำงานของสัญญาณต่างๆ



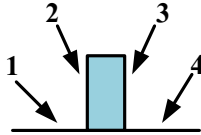
ตำแหน่ง 1 แสดงถึงสถานะไม่ทำงาน

ตำแหน่ง 2 แสดงถึงระยะที่กำลังเปลี่ยนสถานะจากไม่ทำงาน (Off) เป็นสถานะทำงาน (On)

ตำแหน่ง 3 แสดงถึงระยะที่กำลังเปลี่ยนสถานะจากทำงาน (On) เป็นสถานะไม่ทำงาน (Off)

ตำแหน่ง 4 แสดงถึงการกลับสู่สถานะเดิมคือไม่ทำงาน

หากนำสัญลักษณ์แสดงการทำงานของสัญญาณต่างๆ มาใช้แทนตำแหน่งของอินพุต (I) และเอาต์พุต (Q) จะมีลักษณะการทำงานดังนี้



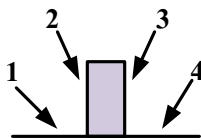
Input (I) เปรียบเทียบเหมือนการทำงานของสวิทช์ซึ่งมีลักษณะการทำงาน คือ กดและปล่อย

ตำแหน่ง 1 สภาวะเริ่มต้น ยังไม่มีการกดสวิทช์ใดๆ

ตำแหน่ง 2 กดสวิทช์

ตำแหน่ง 3 ปล่อยสวิทช์

ตำแหน่ง 4 กลับสู่สภาวะเดิม สภาวะไม่ทำงาน



Output (Q) เปรียบเทียบเหมือนการทำงานของหลอดไฟซึ่งมีลักษณะการทำงาน คือ ติดและดับ

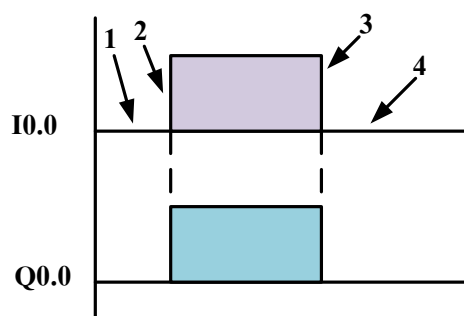
ตำแหน่ง 1 สภาวะไม่ทำงาน

ตำแหน่ง 2 หลอดไฟติด

ตำแหน่ง 3 หลอดไฟดับ

ตำแหน่ง 4 การกลับสู่สภาวะเดิม สภาวะไม่ทำงาน

เมื่อนำสัญลักษณ์แสดงการทำงานของสัญญาณต่างๆ มาเขียนให้มีความเกี่ยวเนื่องกัน จาก Timing Diagram อธิบายขั้นตอนการทำงานของอินพุตและเอาต์พุต ณ จุดเวลาหรือตำแหน่งนั้นๆ ได้ดังนี้



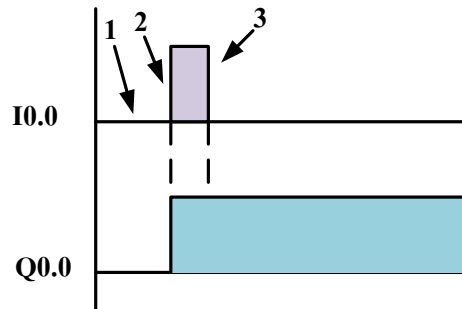
ตำแหน่ง 1 ไม่มีการทำงานใดๆ เนื่องจากอินพุต I0.0 ยังไม่ทำงานทำให้เอาต์พุต Q0.0 ไม่ทำงาน

ตำแหน่ง 2 อินพุต I0.0 ทำงาน ส่งผลให้เอาต์พุต Q0.0 ทำงาน

ตำแหน่ง 3 อินพุต I0.0 หยุดทำงาน ส่งผลให้เอาต์พุต Q0.0 หยุดทำงาน

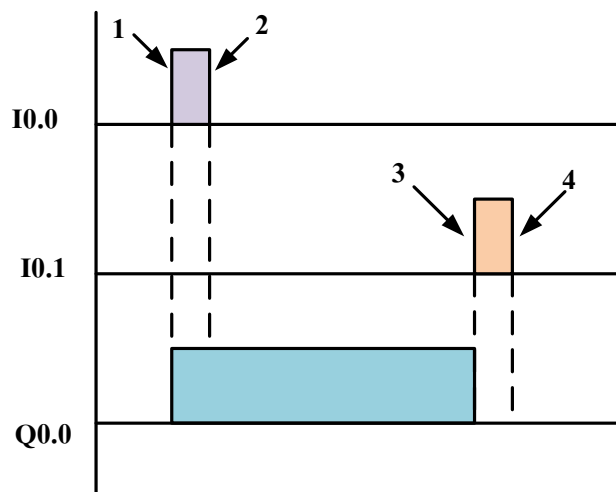
ตำแหน่ง 4 การกลับสู่สภาวะเดิม สภาวะไม่ทำงาน

จาก Timing Diagram อธิบายขั้นตอนการทำงานของอินพุตและเอาต์พุต ได้ดังนี้



ตำแหน่ง 1 ไม่มีการทำงานใดๆ เนื่องจากอินพุต I0.0 ยังไม่ทำงานทำให้เอาต์พุต Q0.0 ไม่ทำงาน
 ตำแหน่ง 2 อินพุต I0.0 ทำงาน ส่งผลให้อาต์พุต Q0.0 ทำงาน
 ตำแหน่ง 3 อินพุต I0.0 หยุดทำงาน แต่อาต์พุต Q0.0 ไม่หยุดทำงาน ยังทำงานต่อ

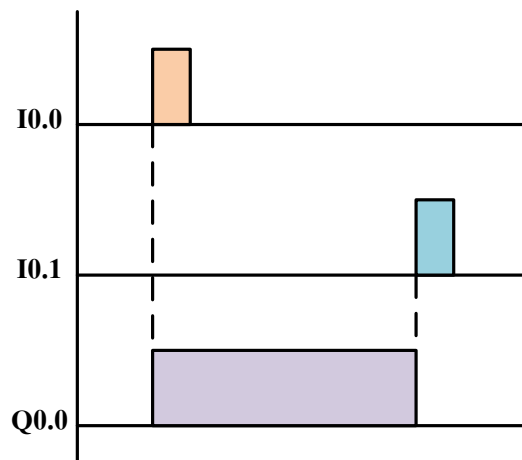
จาก Timing Diagram อธิบายขั้นตอนการทำงานของอินพุตและเอาต์พุต ได้ดังนี้



ตำแหน่ง 1 อินพุต I0.0 ทำงาน ส่งผลให้อาต์พุต Q0.0 ทำงาน
 ตำแหน่ง 2 อินพุต I0.0 หยุดทำงาน แต่อาต์พุต Q0.0 ยังคงทำงานอยู่
 ตำแหน่ง 3 อินพุต I0.1 ทำงาน ส่งผลให้อาต์พุต Q0.0 หยุดทำงาน
 ตำแหน่ง 4 อินพุต I0.1 หยุดทำงาน การกลับสู่สภาวะเดิม

ตัวอย่างที่ 5.6 การออกแบบโปรแกรมจาก Timing Diagram

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจาก Timing Diagram

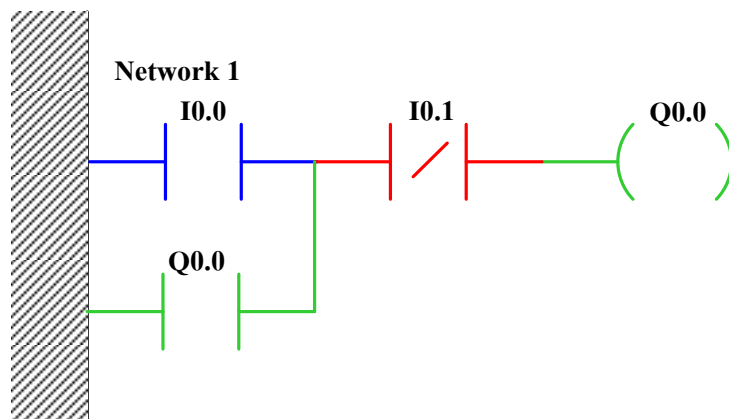


วิธีการออกแบบโปรแกรม

1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

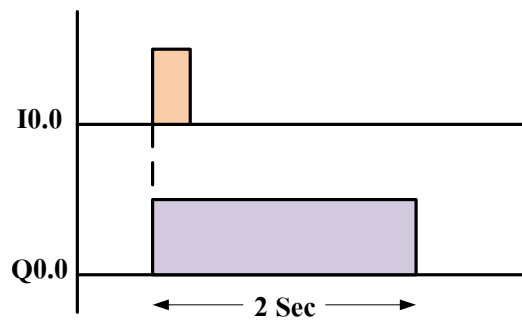
ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	สวิตช์อินพุต Start
I0.1	สวิตช์อินพุต Stop
Q0.0	เอาต์พุต จุดที่ 1

2. เขียน Ladder Diagram



ตัวอย่างที่ 5.7 การออกแบบโปรแกรมจาก Timing Diagram

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจาก Timing Diagram

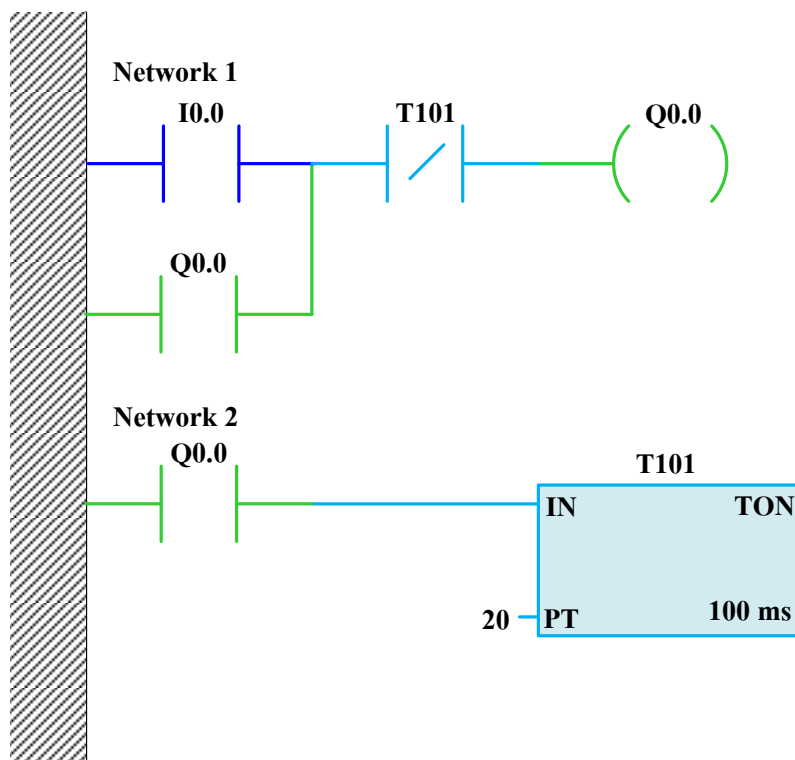


วิธีการออกแบบโปรแกรม

1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

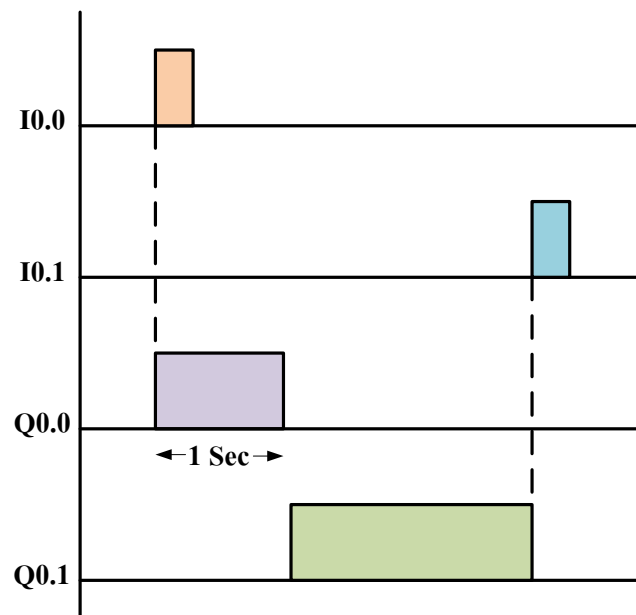
ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	สวิตช์อินพุต Start
Q0.0	เอาต์พุต จุดที่ 1
T101	ตัวตั้งเวลา TON

2. เขียน Ladder Diagram



ตัวอย่างที่ 5.8 การออกแบบโปรแกรมจาก Timing Diagram

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจาก Timing Diagram

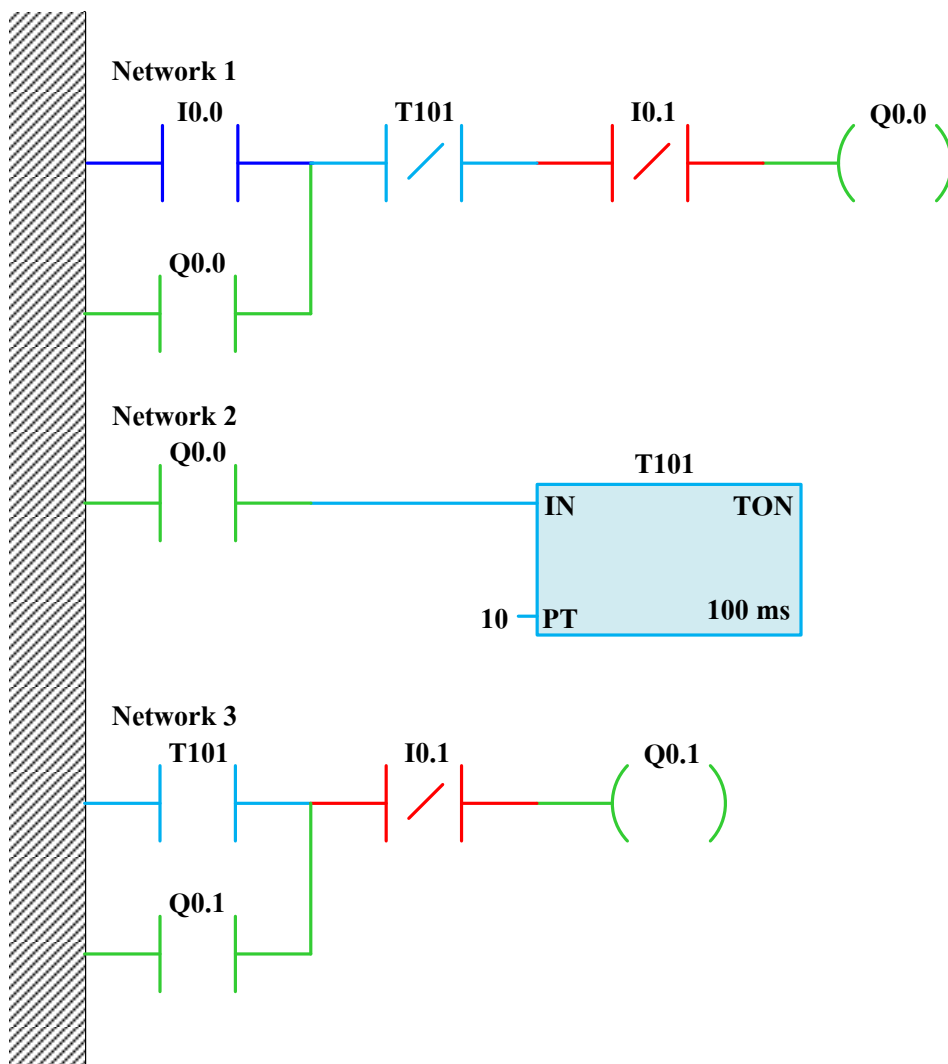


วิธีการออกแบบโปรแกรม

1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

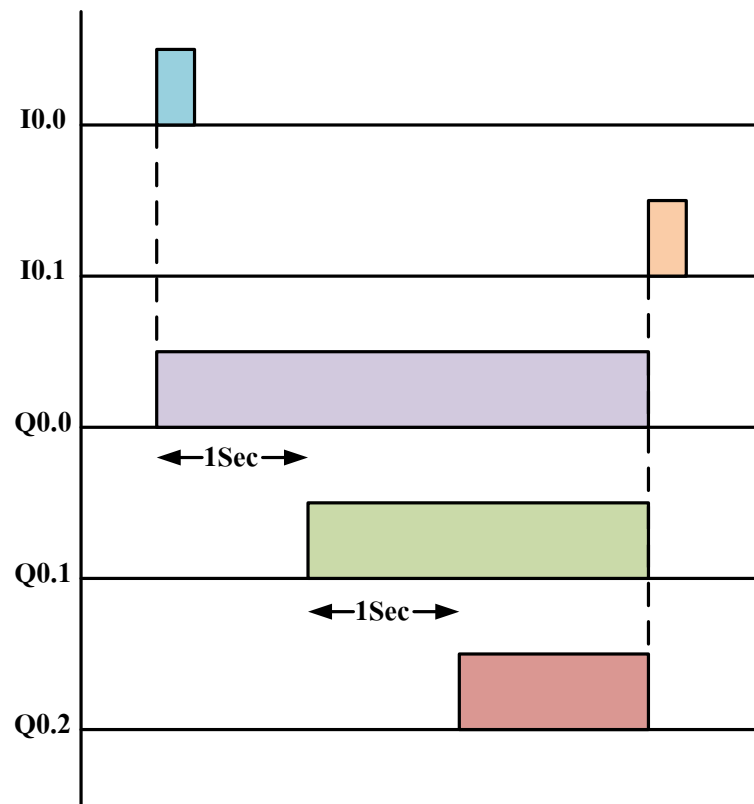
ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	สวิตช์อินพุต Start
I0.1	สวิตช์อินพุต Stop
Q0.0	เอาต์พุต จุดที่ 1
Q0.1	เอาต์พุต จุดที่ 2
T101	ตัวตั้งเวลา TON

2. เขียน Ladder Diagram



ตัวอย่างที่ 5.9 การออกแบบโปรแกรมจาก Timing Diagram

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจาก Timing Diagram

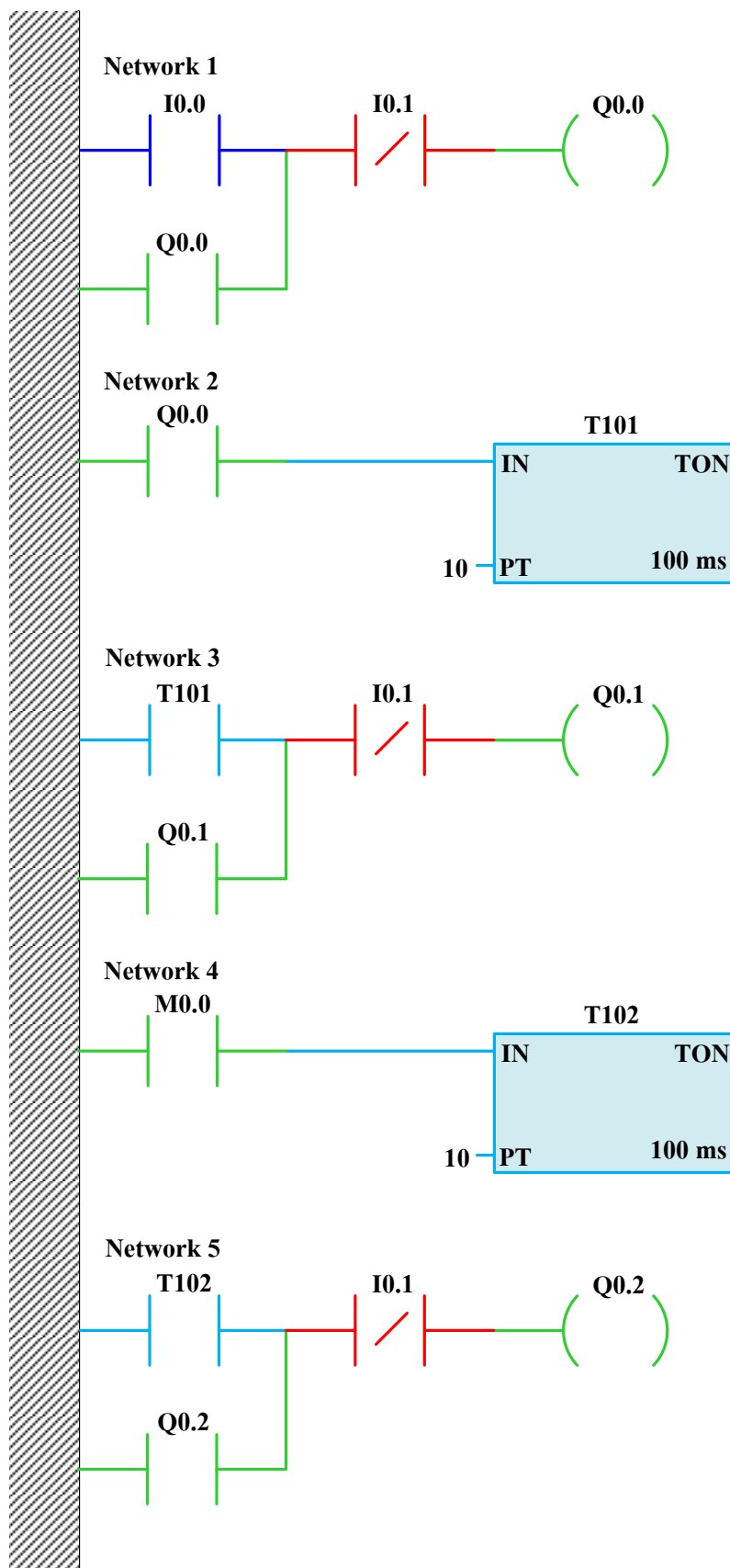


วิธีการออกแบบโปรแกรม

1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

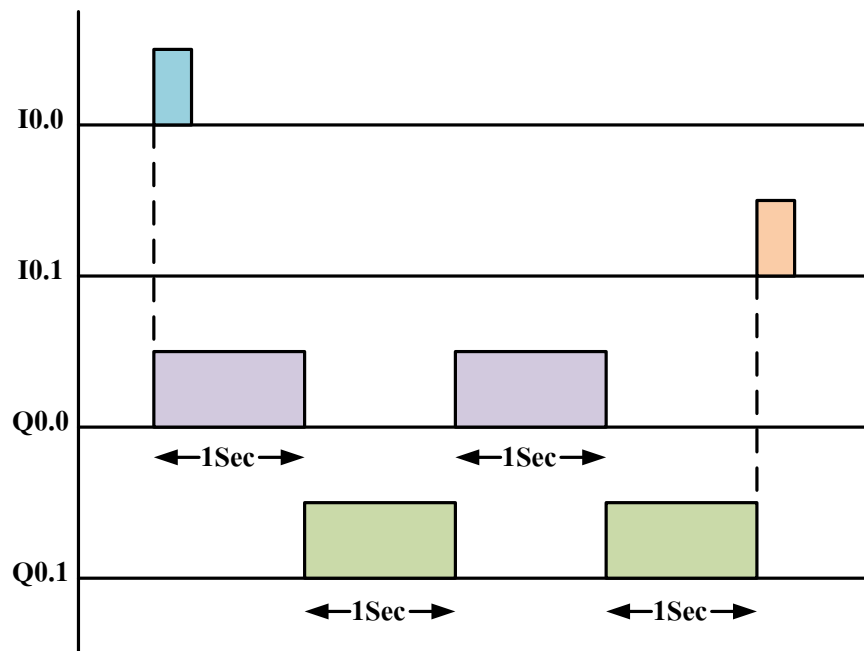
ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	สวิตช์อินพุต Start
I0.1	สวิตช์อินพุต Stop
Q0.0	เอาต์พุต จุดที่ 1
Q0.1	เอาต์พุต จุดที่ 2
Q0.2	เอาต์พุต จุดที่ 3
T101	ตัวตั้งเวลา TON ตัวที่ 1
T102	ตัวตั้งเวลา TON ตัวที่ 2

2. เขียน Ladder Diagram



ตัวอย่างที่ 5.10 การออกแบบโปรแกรมจาก Timing Diagram

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจาก Timing Diagram

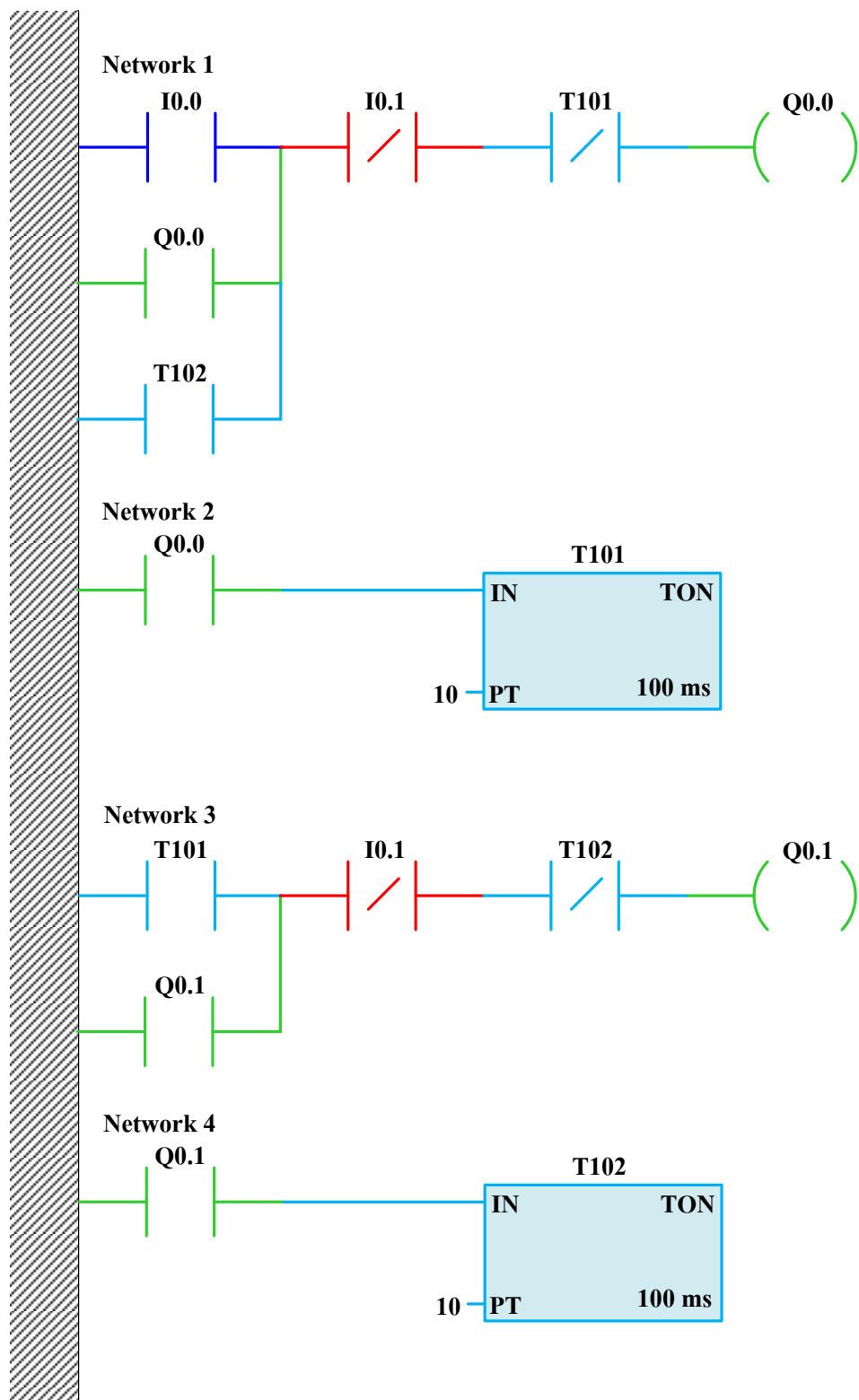


วิธีการออกแบบโปรแกรม

1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	สวิตช์อินพุต Start
I0.1	สวิตช์อินพุต Stop
Q0.0	เอาต์พุต จุดที่ 1
Q0.1	เอาต์พุต จุดที่ 2
T101	ตัวตั้งเวลา TON ตัวที่ 1
T102	ตัวตั้งเวลา TON ตัวที่ 2

2. เขียน Ladder Diagram



5.2 การประยุกต์ใช้งานกับงานควบคุมมอเตอร์

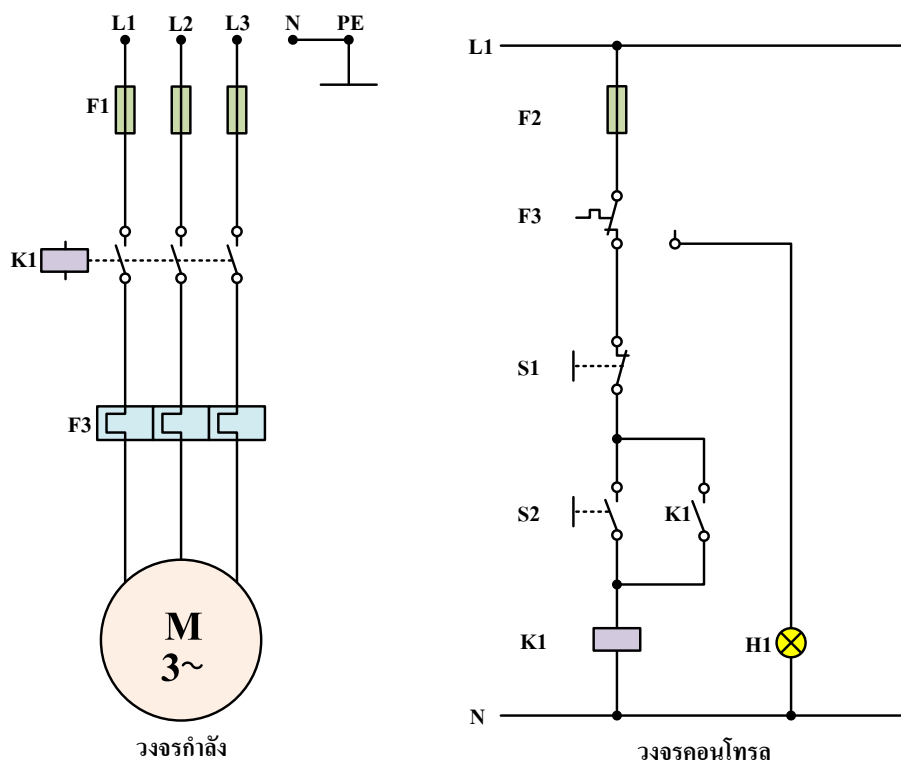
ในการออกแบบโปรแกรมจากวงจรควบคุมมอเตอร์ สามารถออกแบบโปรแกรมได้ 2 ลักษณะ คือ การออกแบบจากขั้นตอนการทำงานของวงจรควบคุมมอเตอร์ หรือ ออกแบบจากการแปลงวงจรควบคุมมอเตอร์โดยตรง ซึ่งในหน่วยเรียนนี้จะเน้นการออกแบบโปรแกรมโดยการแปลงวงจรควบคุมมอเตอร์โดยตรง มีขั้นตอนการแปลงวงจรดังนี้

ขั้นตอนในการแปลงวงจรควบคุมมอเตอร์

1. นำวงจรควบคุมมอเตอร์ที่มีอยู่มาแปลงเป็นโปรแกรม Ladder Diagram โดยการวางวงจรใหม่ จากเดิมวงจรควบคุมจะอยู่ในลักษณะแนวตั้ง ให้เปลี่ยนมาวางอยู่ในลักษณะแนวนอน
2. เปลี่ยนสัญลักษณ์ใหม่มาเป็นหน้าสัมผัสที่ใช้ในงาน PLC
3. แปลงวงจรใหม่ให้มีความง่ายในการทำความเข้าใจการทำงานของโปรแกรม
4. กำหนดอินพุต/เอาต์พุตใหม่ให้ตรงกับเครื่อง PLC ที่ใช้งาน

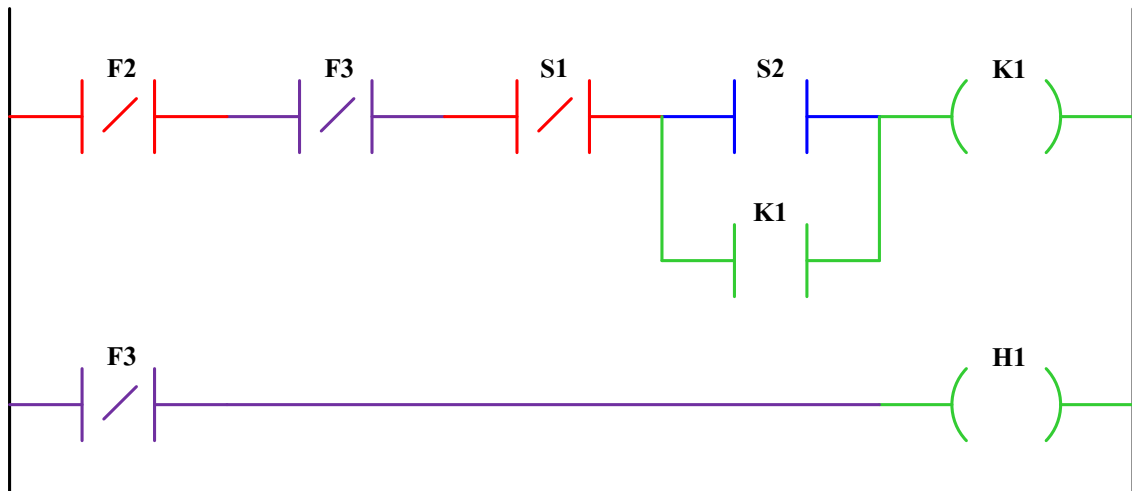
ตัวอย่างที่ 5.11 การออกแบบโปรแกรมควบคุมจากวงจรควบคุมมอเตอร์

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจากวงจรการสตาร์ทมอเตอร์โดยตรง (Direct Start)

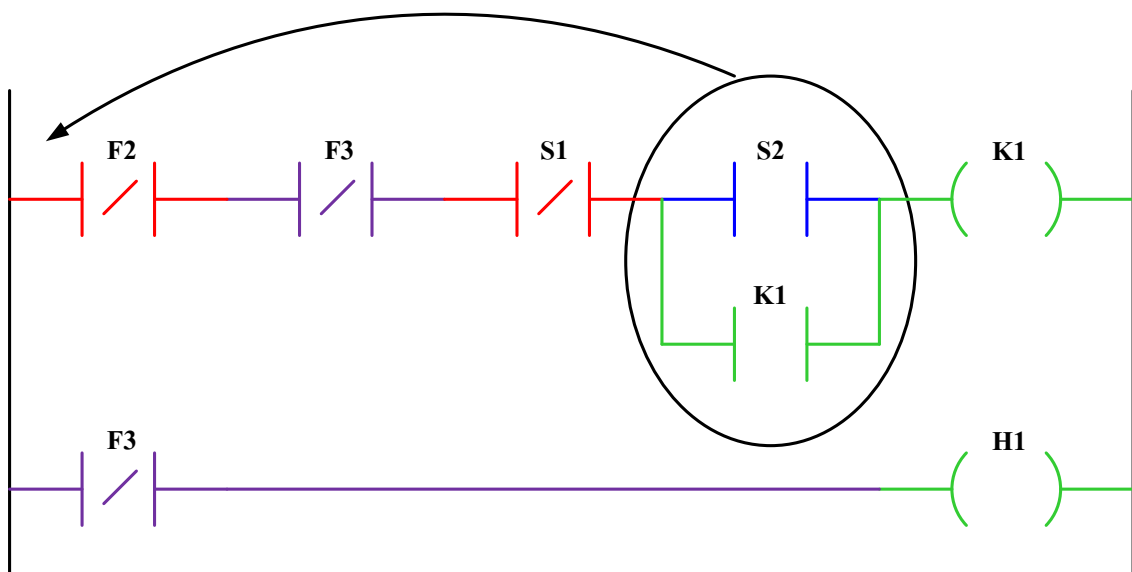


วิธีการออกแบบโปรแกรม

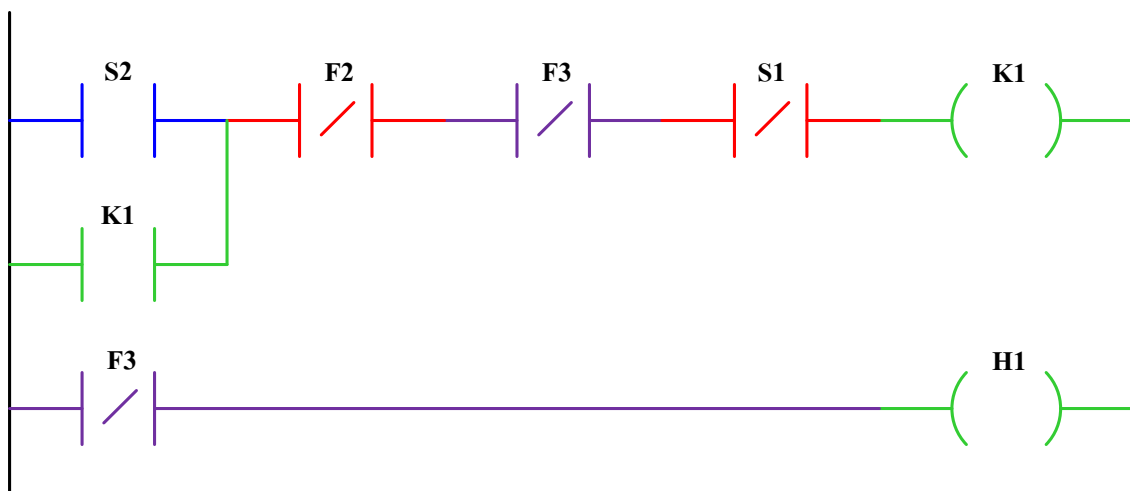
1. แปลงวงจรจากวงจรควบคุมมอเตอร์มาเป็น Ladder Diagram โดยเปลี่ยนสัญลักษณ์จากงานควบคุมมอเตอร์มาเป็นสัญลักษณ์ที่ใช้ในงาน PLC โดยที่ตัวกำกับสัญญาณยังไม่เปลี่ยน



2. แปลงวงจรใหม่ให้มีความง่ายในการทำความเข้าใจการทำงานของโปรแกรมโดยการนำส่วนที่หน้าสัมผัสขนานกันมาวางไว้ข้างหน้า



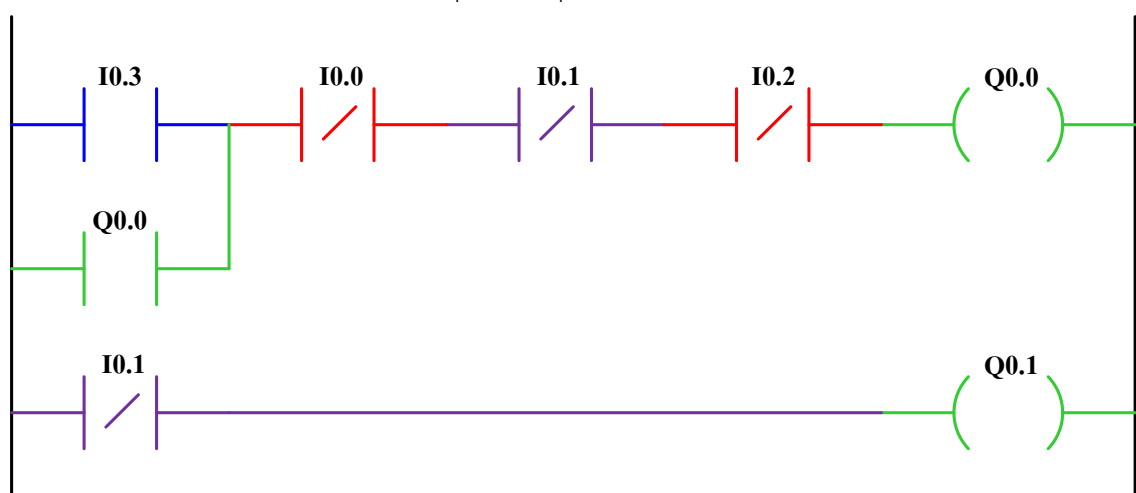
จะได้ Ladder Diagram ใหม่ขึ้นมา ดังนี้



3. กำหนดอินพุต/เอาต์พุตใหม่เพื่อให้ตรงกับ PLC ที่ใช้งาน

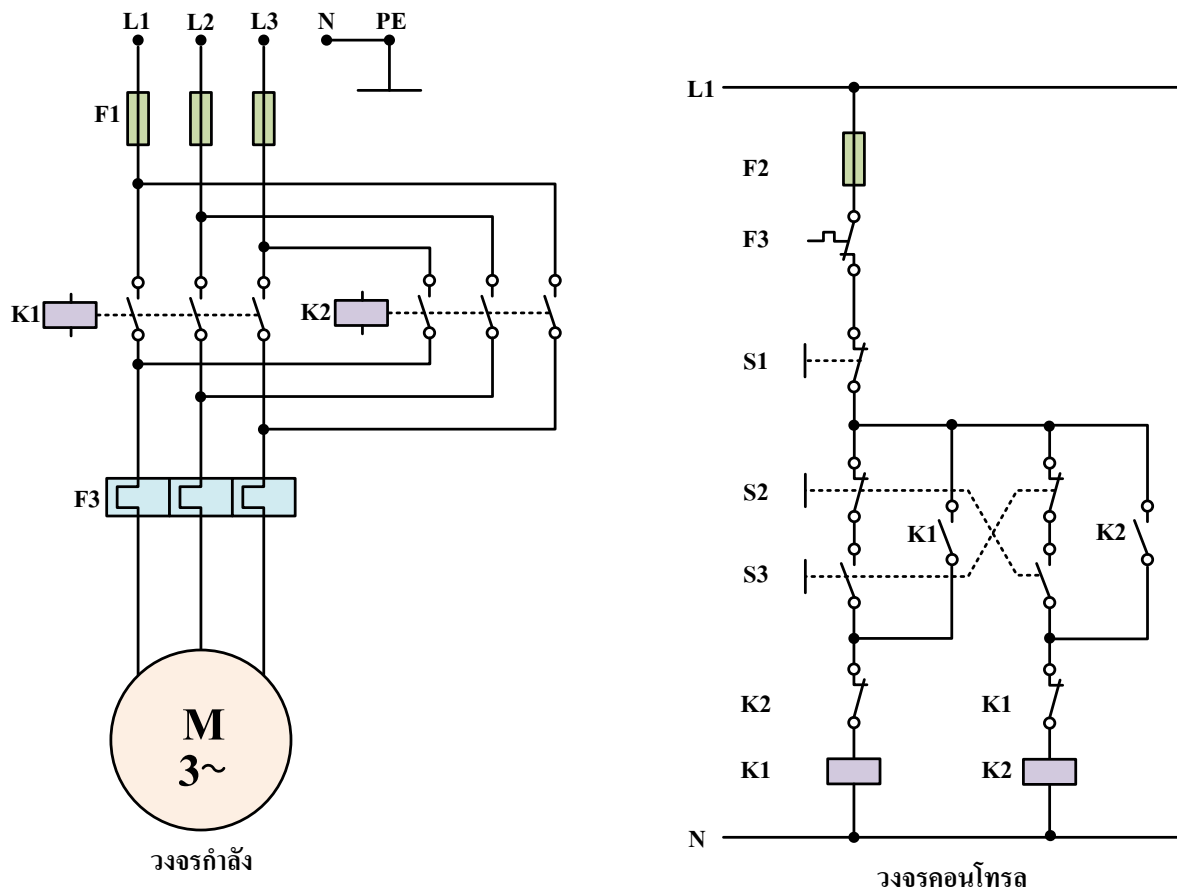
ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	ฟิวส์คอนโทรล (F2)
I0.1	โอเวอร์โหลด (F3)
I0.2	สวิตช์อินพุตหยุดการทำงาน (S1)
I0.3	สวิตช์อินพุตเริ่มต้นการทำงาน (S2)
Q0.0	เอาต์พุตมอเตอร์ (K1)
Q0.1	หลอดไฟแสดงสถานะผิดปกติ (H1)

จะได้ Ladder diagram ที่กำหนดตำแหน่งอินพุต/เอาต์พุตใหม่ดังนี้



ตัวอย่างที่ 5.12 การออกแบบโปรแกรมควบคุมจากวงจรควบคุมมอเตอร์

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจากวงจรกลับทางหมุนมอเตอร์แบบ Reversing After Stop

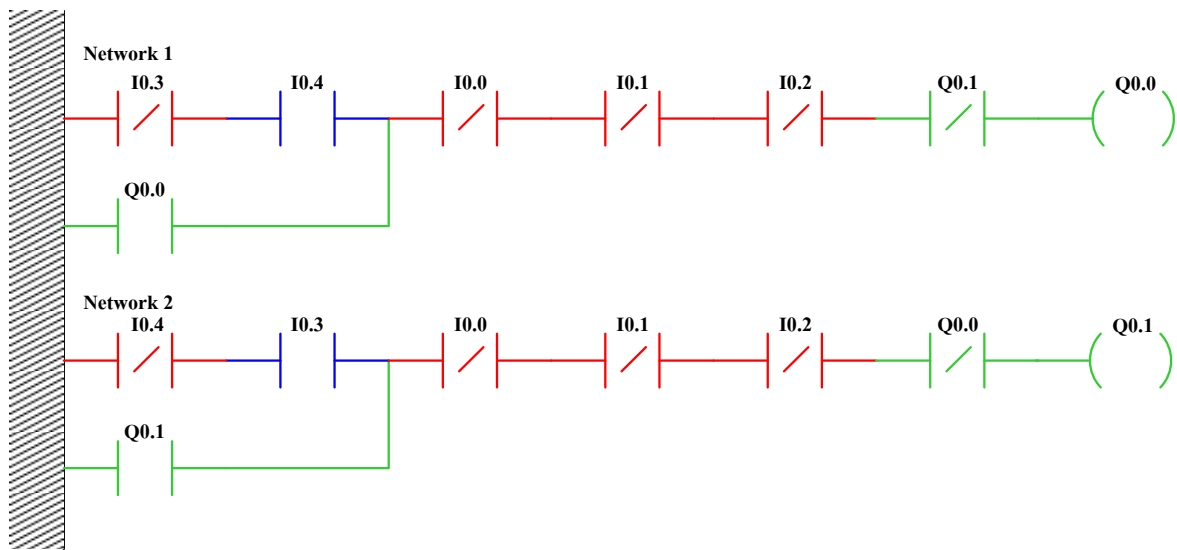


วิธีการออกแบบโปรแกรม

1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

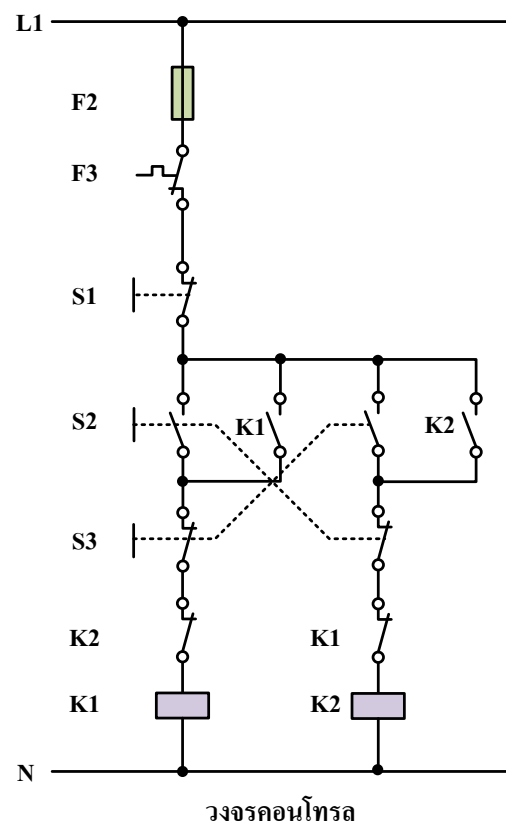
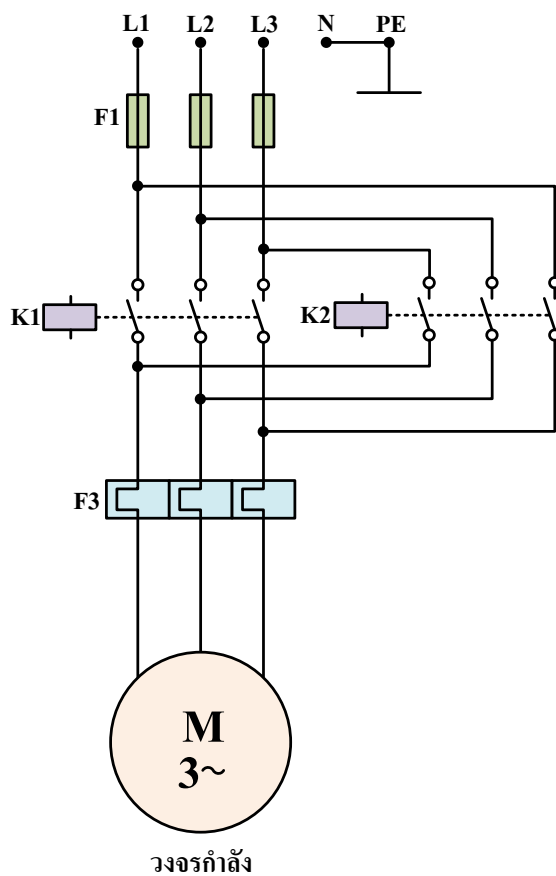
ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	ฟิวส์คอนโทรล (F2)
I0.1	โอเวอร์โหลด (F3)
I0.2	สวิตช์อินพุตหยุดการทำงาน (S1)
I0.3	สวิตช์อินพุต (S2)
I0.4	สวิตช์อินพุต (S3)
Q0.0	เอาต์พุตมอเตอร์หมุนทางขวา (K1)
Q0.1	เอาต์พุตมอเตอร์หมุนทางซ้าย (K2)

2. เขียน Ladder Diagram



ตัวอย่างที่ 5.13 การออกแบบโปรแกรมควบคุมจากวงจรควบคุมมอเตอร์

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจากวงจรกลับทางหมุนมอเตอร์แบบ Direct Reversing

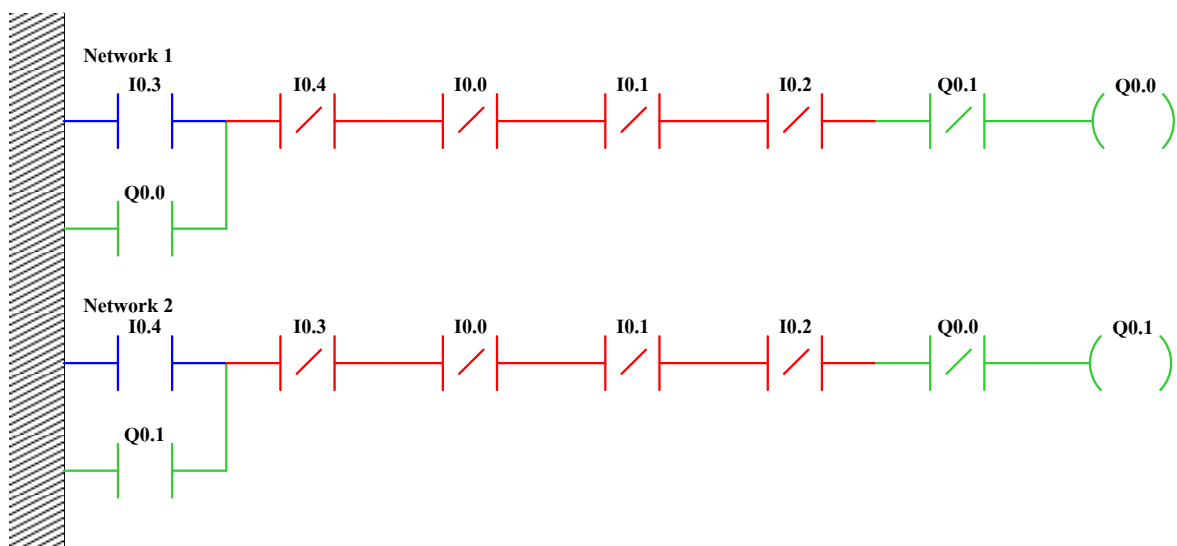


วิธีการออกแบบโปรแกรม

1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

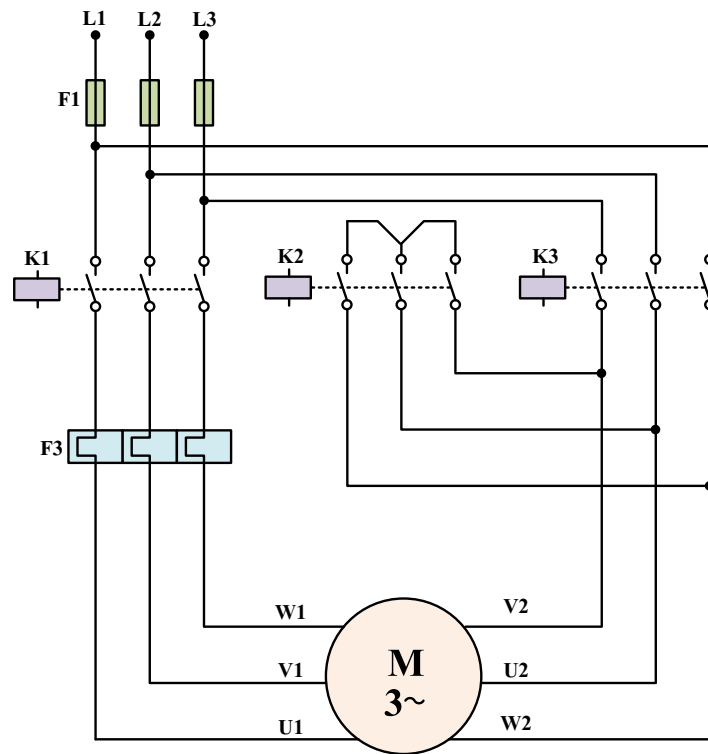
ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	ฟิวส์คอนโทรล (F2)
I0.1	โอเวอร์โหลด (F3)
I0.2	สวิตช์อินพุตหยุดการทำงาน (S1)
I0.3	สวิตช์อินพุต (S2)
I0.4	สวิตช์อินพุต (S3)
Q0.0	เอาต์พุตมอเตอร์หมุนทางขวา (K1)
Q0.1	เอาต์พุตมอเตอร์หมุนทางซ้าย (K2)

2. เขียน Ladder Diagram

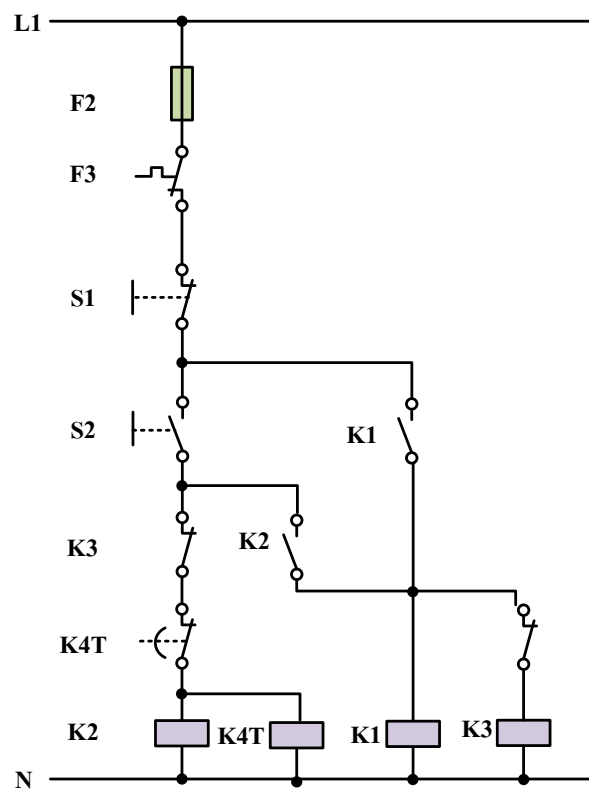


ตัวอย่างที่ 5.14 การออกแบบโปรแกรมควบคุมจากวงจรควบคุมมอเตอร์

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจากวงจรสตาร์ทมอเตอร์แบบสตาร์ – เดลต้าอัตโนมัติ



วงจรกำลัง



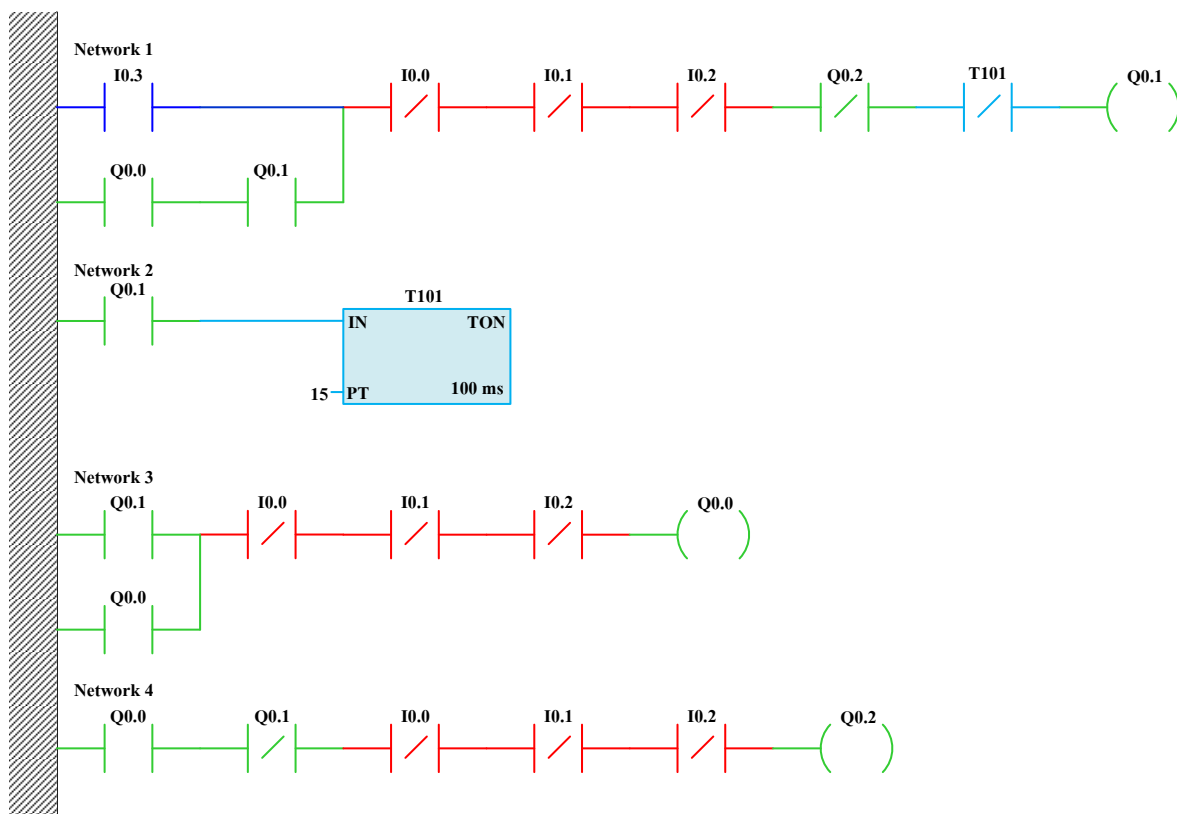
วงจรคอนโทรล

วิธีการออกแบบโปรแกรม

1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

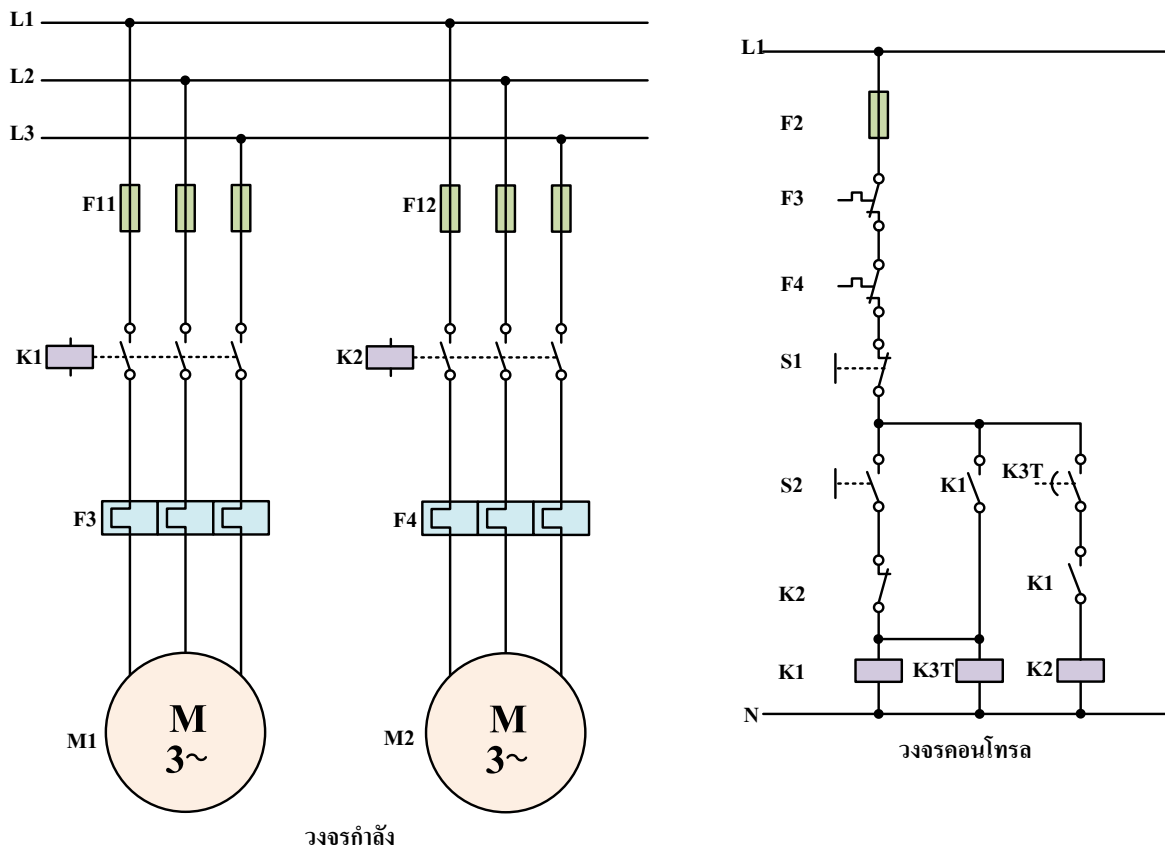
ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	ฟิวส์คอนโทรล (F2)
I0.1	โอเวอร์โหลด (F3)
I0.2	สวิตช์อินพุตหยุดการทำงาน (S1)
I0.3	สวิตช์อินพุต (S2)
Q0.0	เอาต์พุตเมนมอเตอร์ (K1)
Q0.1	เอาต์พุตมอเตอร์สตาร์ท (K2)
Q0.2	เอาต์พุตมอเตอร์เคลด้า (K3)

2. เขียน Ladder Diagram



ตัวอย่างที่ 5.15 การออกแบบโปรแกรมควบคุมจากวงจรควบคุมมอเตอร์

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจากวงจร Auto Sequence Control

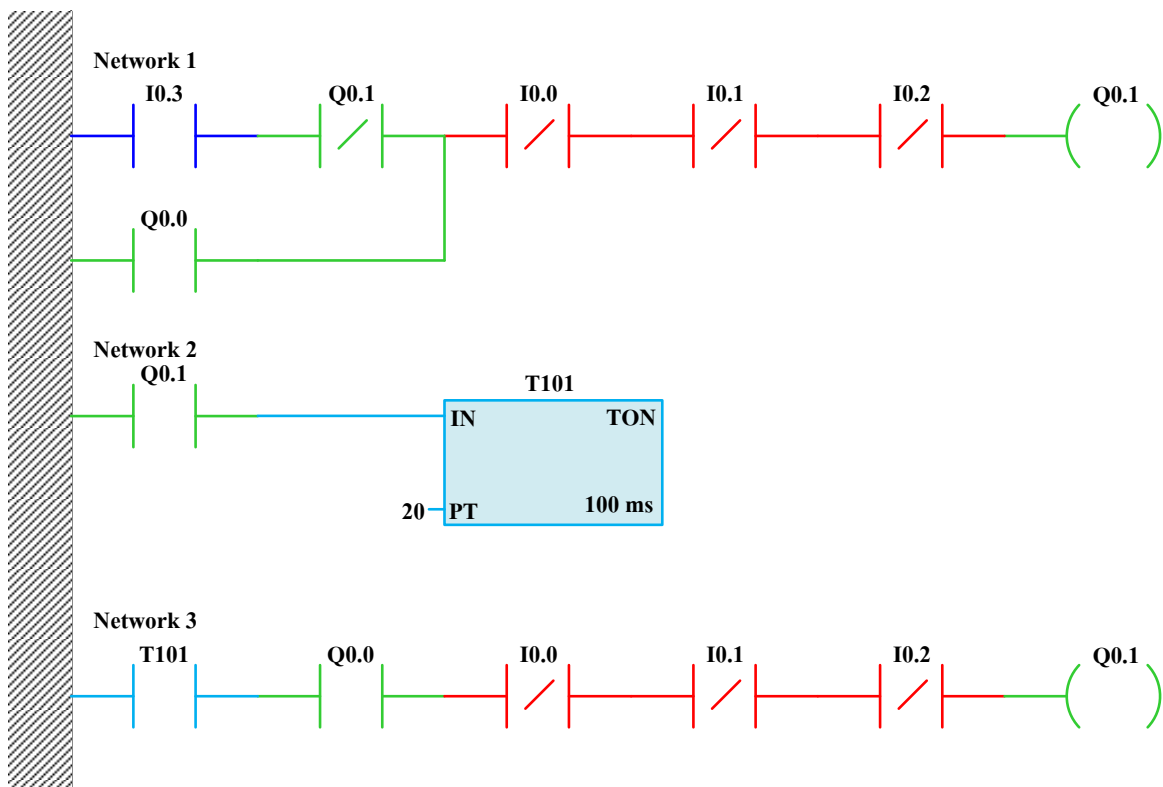


วิธีการออกแบบโปรแกรม

1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

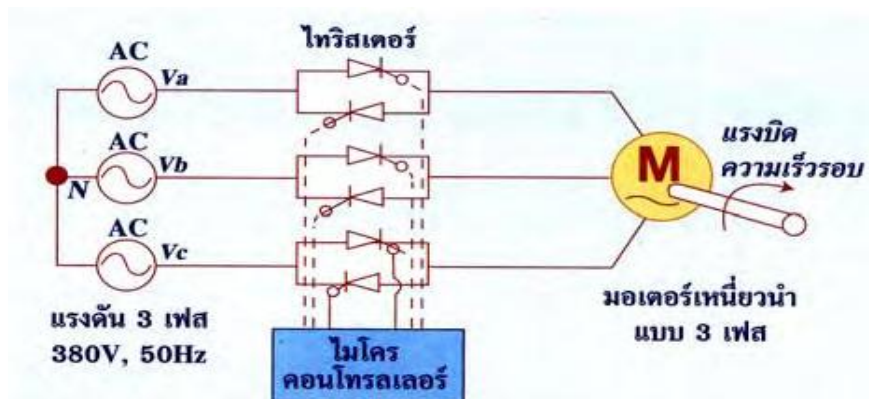
ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	ฟิวส์คอนโทรล (F2)
I0.1	โอเวอร์โหลด (F3)
I0.2	โอเวอร์โหลด (F4)
I0.3	สวิตช์อินพุตหยุดการทำงาน (S1)
I0.4	สวิตช์อินพุต (S2)
Q0.0	เอาต์พุตมอเตอร์ตัวที่ 1 (K1)
Q0.1	เอาต์พุตมอเตอร์ตัวที่ 1 (K2)

2. เขียน Ladder Diagram



5.2.1 การหยุดเดินมอเตอร์เมื่อไม่มีภาระงาน

การใช้อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ตามภาระการใช้งาน (Dynamic motor load control) จะทำหน้าที่ลดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กในขณะที่ยังคงต้องเดินมอเตอร์ไว้ จึงมีความสำคัญต่อผลการประหยัดพลังงานที่เกิดขึ้นเป็นอย่างมาก โดยปกติมอเตอร์ที่จะติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ตามภาระการใช้งาน ควรมีช่วงเวลา Unload หรือ เดินเครื่องตัวเปล่าไม่ต่ำกว่า 60 % ของระยะการใช้งานทั้งหมด จึงจะทำให้ผลการประหยัดพลังงานเป็นที่น่าสนใจ



รูปที่ 5-1 แสดงวงจรการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ตามภาระการใช้งาน

การทำงานของอุปกรณ์จะประกอบด้วยไทรสเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ในการตัดต่อวงจร เพื่อปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ อุปกรณ์จะคำนวณภาระการใช้งานจริงของมอเตอร์โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อสร้างแรงบิดตามภาระการใช้งานจริงสามารถลดลงได้โดยการลดขนาดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ทำให้กระแสไฟฟ้ารวมที่จ่ายให้มอเตอร์ลดลง ส่งผลให้การสูญเสียในมอเตอร์ลดลงด้วย

การประเมินผลประหยัดที่เกิดขึ้นประเมินจากจำนวนชั่วโมงในการหยุดเดิน และกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์นั้น ข้อสำคัญต้องสอบถามลักษณะการใช้งานกับเจ้าหน้าที่ควบคุมก่อนทำการหยุดการใช้งานมอเตอร์

ยกตัวอย่าง การทำงานของ Oil pump hydraulic จะมีการทำงานเมื่อสั่งยกลูกกลิ้งเพื่อเปลี่ยนม้วนกระดาษ แต่มีการเปิดทิ้งไว้ตลอดเวลา ทำให้เกิดความสิ้นเปลือง

การวิเคราะห์ผล : เนื่องจากเปิดการใช้งานตลอดเวลา ทำให้เกิดความสิ้นเปลืองโดยความจำเป็นซึ่งสามารถควบคุมการใช้งาน ให้สอดคล้องกับเวลาที่เหมาะสมกับการผลิต เปิดเฉพาะเวลาที่ต้องการเปลี่ยนลูกกลิ้งจะทำให้ลดการใช้พลังงานได้

วิธีการ : ทำการติดตั้งระบบควบคุมการทำงานอัตโนมัติ หรือ ควบคุมการเปิดใช้งานให้สอดคล้องกับเวลาที่เหมาะสมกับการผลิต



รูปที่ 5-2 แสดงการหยุดมอเตอร์ Hydraulic ในช่วง No load

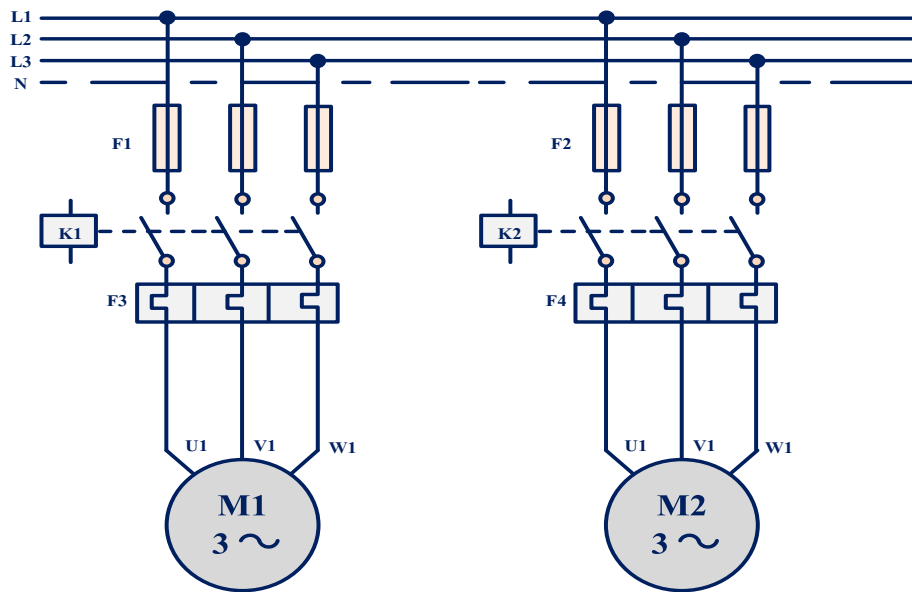
ผลการประหยัด : ประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 58,286.81 kWh/ปี คิดเป็นเงิน 233,147.23 บาท/ปี โดยไม่มีการลงทุน (ถ้าไม่ติดตั้งระบบควบคุม หรือ เซ็นเซอร์อัตโนมัติ)

5.2.2 การสตาร์ทมอเตอร์แบบเรียงลำดับเพื่อลดค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak)

ในการควบคุมมอเตอร์เรียงตามลำดับนั้นจะต้องให้มอเตอร์ตัวแรกทำงานก่อน และมอเตอร์ตัวที่สองถึงจะทำงานตามได้ เมื่อต้องการหยุดการทำงานสามารถหยุดการทำงานของมอเตอร์ทั้งสองตัวพร้อมกันได้ และเมื่อมอเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งเกิดทำงานเกินกำลังมอเตอร์จะหยุดพร้อมกันทั้งสองตัว วงจรมอเตอร์ทำงานเรียงตามลำดับนี้นิยมใช้กับงานสายพานลำเลียงหรืองานที่มีการควบคุมต่อเนื่องและหยุดพร้อมกัน

ตารางที่ 5-1 วงจรและหลักการทำงานการควบคุมมอเตอร์แบบทำงานเรียงตามลำดับโดยใช้สวิตช์ปุ่มกด (Manual Sequence Control)

สัญลักษณ์	ความหมาย
S1	สวิตช์ปุ่มกดสีแดงหยุดเดิน (Push Button Stop Motor1,2)
S2	สวิตช์ปุ่มกดสีเขียวเริ่มเดินมอเตอร์ตัวที่ 1 (Push Button Start Motor1)
S3	สวิตช์ปุ่มกดสีเหลืองเริ่มเดินมอเตอร์ตัวที่ 2 (Push Button Start Motor2)
F1	ฟิวส์ป้องกันวงจรกำลัง (Power Fuse)
F2	ฟิวส์ป้องกันวงจรควบคุม (Control Fuse)
F3	ส่วนป้องกันมอเตอร์ตัวที่1ทำงานเกินกำลัง (Over Relay 1)
F4	ส่วนป้องกันมอเตอร์ตัวที่2ทำงานเกินกำลัง (Over Relay 2)
K1	แมกเนติกคอนแทคเตอร์ของมอเตอร์ตัวที่1 (Magnetic Contactor)
K2	แมกเนติกคอนแทคเตอร์ของมอเตอร์ตัวที่2 (Magnetic Contactor)
M1	มอเตอร์ 3 เฟสตัวที่1 (3 Phase Induction Motor1)
M2	มอเตอร์ 3 เฟสตัวที่2 (3 Phase Induction Motor2)

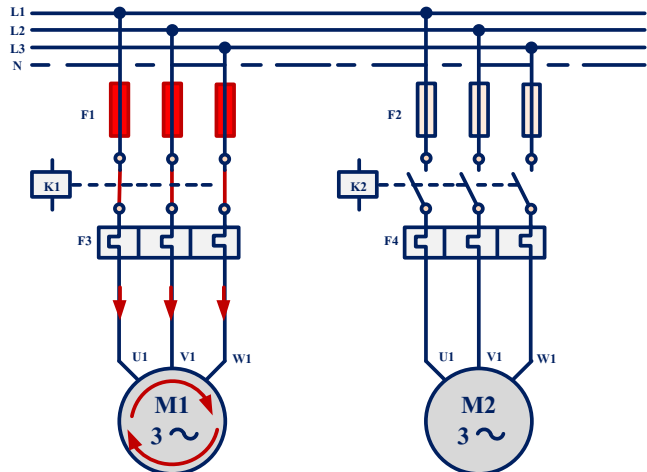
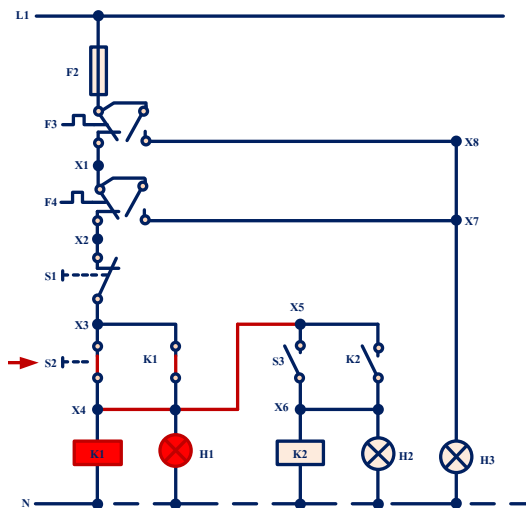


รูปที่ 5-3 วงจรกำลังการเริ่มเดินมอเตอร์แบบทำงานเรียงลำดับ

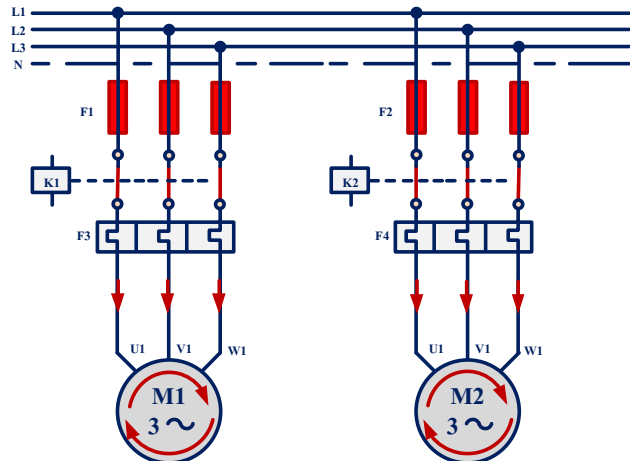
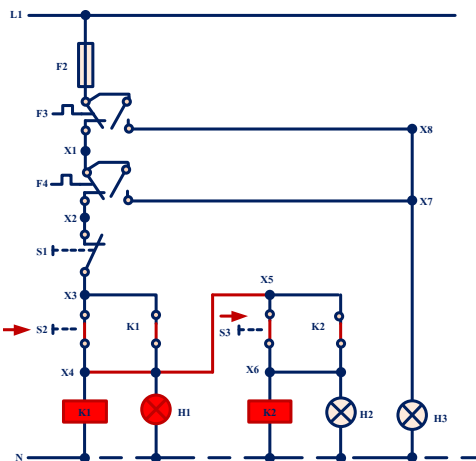
จากวงจรกำลังจะใช้คอนแทคเตอร์สองตัวในการ ให้มอเตอร์ทำงาน คอนแทคเตอร์แรก (K_1) ต่อให้กับมอเตอร์ตัวที่ 1 (M_1) ทำงานคอนแทคเตอร์ตัวที่ 2 (K_2) ต่อให้กับมอเตอร์ตัวที่ 2 (M_2) ทำงาน และมีอุปกรณ์การป้องกันสายเมนฟิวส์ 3 ตัว เมื่อเกิดการลัดวงจรจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลไปยังมอเตอร์ทั้งสองได้ และมีอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์ทั้งสองไม่ให้เกิดการเสียหายเมื่อมอเตอร์ทำงานเกินกำลัง อุปกรณ์นั้นคือโอเวอร์ โหลดรีเลย์

F_3 เป็นโอเวอร์โหลดรีเลย์ป้องกันมอเตอร์ตัวที่ 1

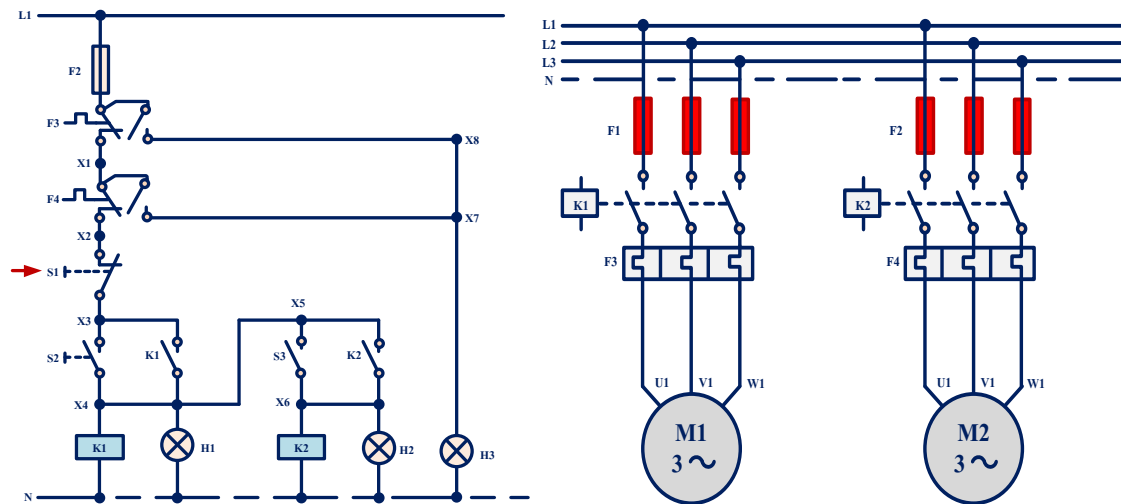
F_4 เป็นโอเวอร์โหลดรีเลย์ป้องกันมอเตอร์ตัวที่ 2



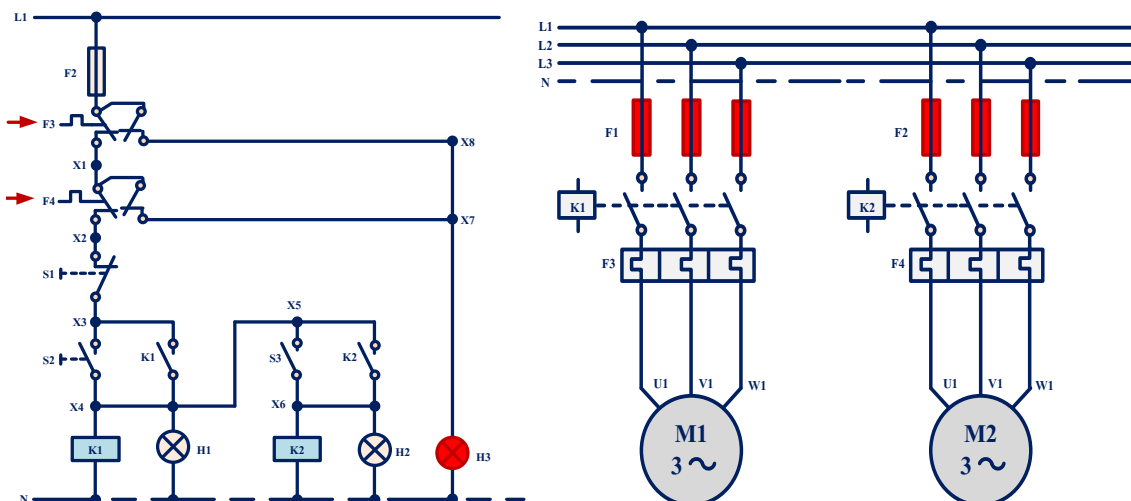
2. กดสวิตช์ S_3 จะทำให้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ K_2 ในแถวที่ 3 ทำงาน คอนแทคปกติปิดของ K_2 ในแถวที่ 1 จะแถวที่ 1 จะเปิดออกเพื่อป้องกันให้มอเตอร์ตัวที่ 2 หยุดก่อน จึงจะเริ่มสตาร์ทระบบใหม่ได้และคอนแทคปกติเปิดของ K_2 ในแถวที่ 4 จะต่อวงจรล็อกตัวเองขณะนี้มอเตอร์ตัวที่ 2 คือ M_2 จะเริ่มหมุน เป็นการ ทำงานเรียงลำดับต่อจากมอเตอร์ตัวแรก



3. เมื่อกดสวิตช์ S_1 มอเตอร์ทุกตัวจะหยุดหมุน



4. กดปุ่มทริปของโอเวอร์โวลต์ F₃, F₄ หรือสภาวะกระแสไหลเกินเกิด วงจรจะตัดการทำงานทันที



5.2.3 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ด้วยเซ็นเซอร์ตามภาระงาน

การใช้เครื่องควบคุมความเร็วรอบ เพื่อปรับเปลี่ยนความถี่และแรงดัน (Voltage/Frequency Control, V/f) สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้า เพื่อควบคุมความเร็วรอบให้สัมพันธ์กับความต้องการของระบบ (Load demand) แม้ว่าจะเกิดการสูญเสียพลังงานบางส่วน หรือเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในระบบ เมื่อใช้เครื่องควบคุมความเร็วรอบร่วมกับมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการส่งพลังงานสูงสุด ซึ่งในปัจจุบันทำได้สูงถึง 97% เพื่อเป็นการให้ความมั่นใจว่าค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นนั้น เมื่อมีการใช้เครื่องควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เข้าช่วย โดยควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับลักษณะของ

โหลตตามกระบวนการผลิตในแต่ละอุตสาหกรรมแล้ว จะทำให้ระบบสามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และประหยัดพลังงานได้สูงสุด สำหรับอุปกรณ์เครื่องปั้มน้ำ พัดลม และเครื่องอัดอากาศจะมีจุดทำงานที่เหมาะสมและให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ความเร็วรอบประมาณ 70 % ของความเร็วรอบสูงสุด

เครื่องควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ (variable Speed Drive : VSD) ได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการช่วยประหยัดพลังงาน โดยใช้หลักการเปลี่ยนความถี่ของกระแสไฟฟ้า เพื่อควบคุมความเร็วรอบการทำงานของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน

ยกตัวอย่าง

ในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานแห่งหนึ่ง มีการใช้งานเครื่องเติมอากาศ เพื่อเติมออกซิเจนให้ได้ตามค่ามาตรฐาน จากการเก็บข้อมูลค่า Dissolved Oxygen (DO) พบว่าในบางวันค่า DO ในน้ำก็ไม่เพียงพอ แต่บางวันค่า DO ก็เพียงพอต่อความต้องการ (มากกว่า 3 ppm) จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเติมอากาศเพิ่มเข้าไปอีก

การวิเคราะห์ผล : เนื่องจากค่า DO ที่ไม่คงที่ และการต้องเปิดเครื่องเติมอากาศตลอดเวลา ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น

วิธีการ : ทำการติดตั้งระบบปรับความเร็วรอบโดยใช้ DO Sensor ในการควบคุม และควบคุมความเร็วรอบให้เหมาะสมกับค่า DO และปริมาณน้ำเสีย โดยพิจารณาจากวันที่น้ำเสียมีค่า DO มากกว่า 3 ppm ให้ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 80%



รูปแสดงก่อนการปรับปรุง



รูปแสดงหลังการปรับปรุง

ผลการประหยัด : ประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 14,065.20 kWh/ปี คิดเป็นเงิน 59,495.79 บาท/ปี เงินลงทุน 84,000 บาท ระยะคืนทุน 1.41 ปี

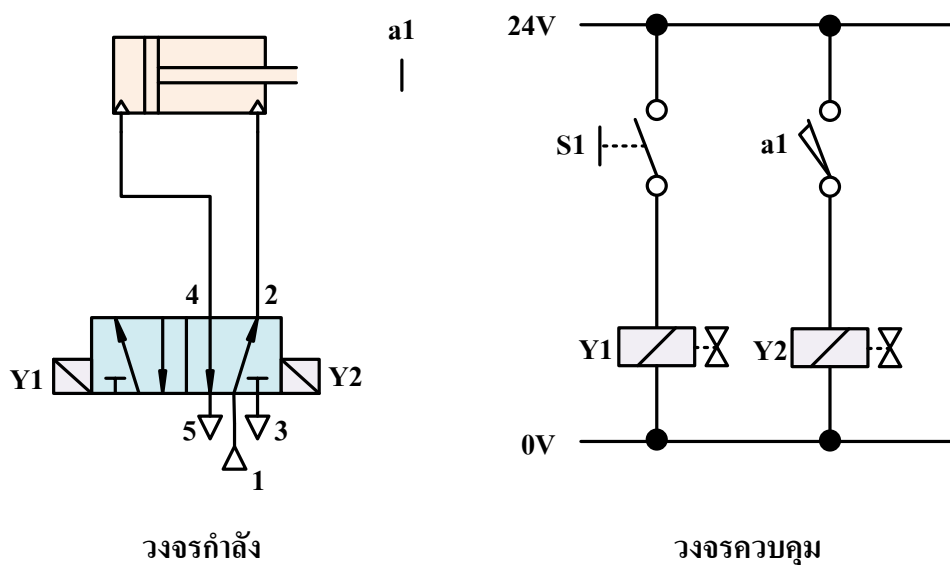
ข้อเสนอแนะ : การปรับความเร็วรอบของมอเตอร์จะทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์เพิ่มขึ้นประมาณ 10% หรือโดยเฉลี่ยความเร็วรอบลดลง 0.75 เท่าของความเร็วเดิม

5.3 การประยุกต์ใช้งานกับงานนิวแมติกไฟฟ้า

การออกแบบโปรแกรมเพื่อใช้งานร่วมกับงานนิวแมติกไฟฟ้านั้นสามารถออกแบบได้ทั้งจากขั้นตอนการทำงานของวงจรควบคุมนิวแมติก จากการแปลงวงจรควบคุมนิวแมติกโดยตรง และจาก Step Diagram ของกระบอกสูบ ซึ่งในที่นี้จะออกแบบจากการแปลงวงจรควบคุมนิวแมติกโดยตรง และจาก Step Diagram ของกระบอกสูบ โดยมีขั้นตอนในการแปลงวงจรควบคุมนิวแมติกเหมือนขั้นตอนการแปลงวงจรควบคุมมอเตอร์

ตัวอย่างที่ 5.16 การออกแบบโปรแกรมควบคุมจากวงจรควบคุมนิวแมติกส์

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจากวงจรควบคุมนิวแมติกส์โดยตรง (Direct Control)

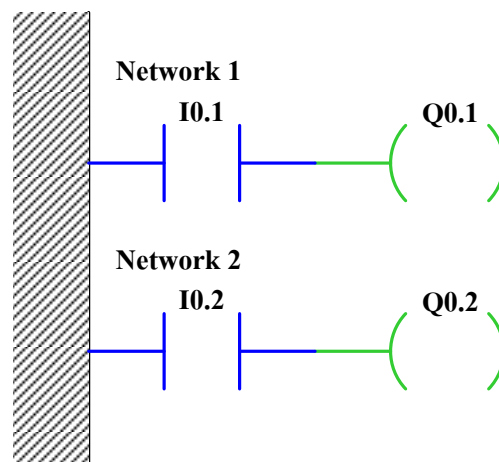


วิธีการออกแบบโปรแกรม

1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

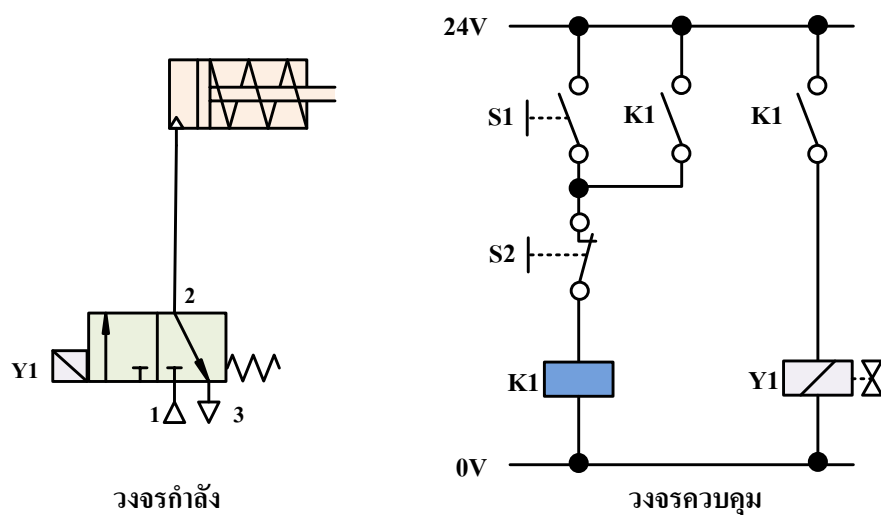
ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	สวิตช์อินพุต (S1)
I0.1	ลิมิตสวิตช์ (a1)
Q0.0	โซลินอยด์วาล์ว (Y1)
Q0.1	โซลินอยด์วาล์ว (Y2)

2. เขียน Ladder Diagram



ตัวอย่างที่ 5.17 การออกแบบโปรแกรมควบคุมจากวงจรควบคุมนิวแมติกส์

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจากวงจรควบคุมนิวแมติกส์

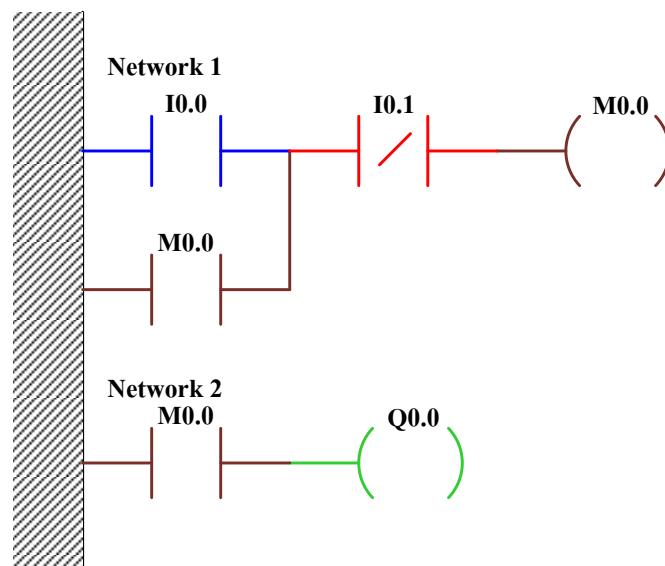


วิธีการออกแบบโปรแกรม

1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

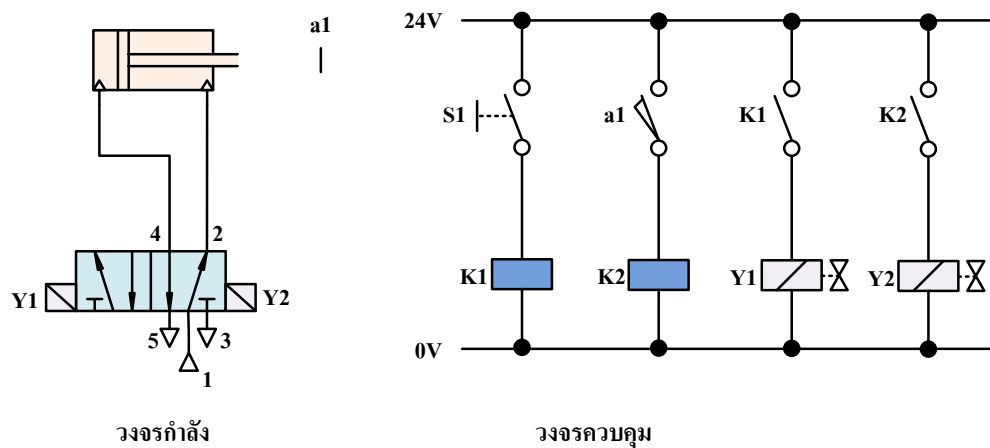
ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	สวิตช์อินพุต (S1)
I0.1	สวิตช์อินพุต (S2)
Q0.0	โซลินอยด์วาล์ว (Y1)

2. เขียน Ladder Diagram



ตัวอย่างที่ 5.18 การออกแบบโปรแกรมควบคุมจากวงจรควบคุมนิวแมติก

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจากวงจรควบคุมนิวแมติก

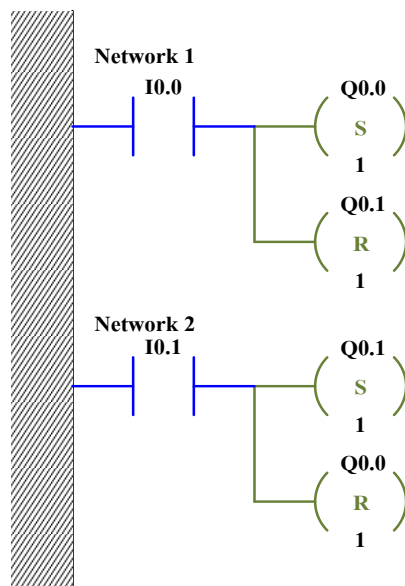


วิธีการออกแบบโปรแกรม

1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

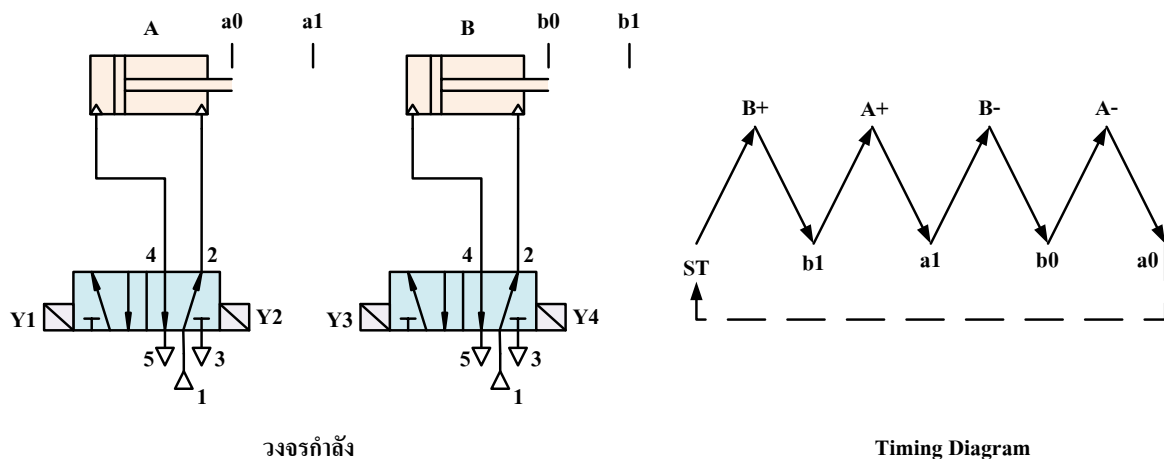
ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	สวิตช์อินพุต (S1)
I0.1	ลิมิตสวิตช์ (a1)
Q0.0	รีเลย์ (K1)
Q0.1	รีเลย์ (K2)

2. เขียน Ladder Diagram



ตัวอย่างที่ 5.19 การออกแบบโปรแกรมควบคุมจาก Step Diagram ของกระบอกลูกสูบ

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจาก Step Diagram ของกระบอกลูกสูบ



a₀, b₀

a₁, b₁

A+, A-, B+, B-

เครื่องหมาย บวก

เครื่องหมาย ลบ

เครื่องหมายลูกศร

แทนวาล์วควบคุมทิศทาง ติดตั้งที่ตำแหน่งก้านกระบอกลูกสูบเคลื่อนที่เข้าสุด

แทนวาล์วควบคุมทิศทาง ติดตั้งที่ตำแหน่งก้านกระบอกลูกสูบเคลื่อนที่ออกสุด

แทนเมนวาล์วกระบอกลูกสูบ A, B

แสดงถึงการกระบอกลูกสูบเคลื่อนที่ออก

แสดงถึงการกระบอกลูกสูบเคลื่อนที่เข้า

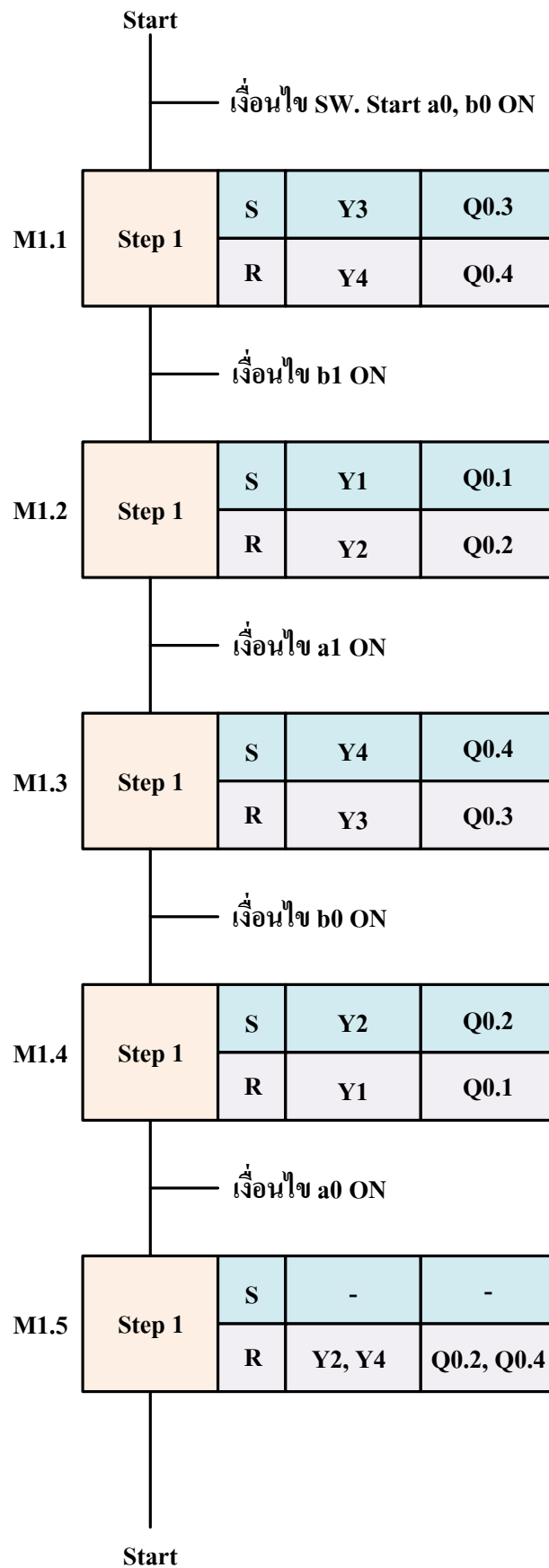
แสดงถึงการไหลของสัญญาณ หรือความสัมพันธ์ของวาล์วควบคุมทิศทาง กับตำแหน่งก้านกระบอกลูกสูบเคลื่อนที่เข้าและออกสุด

วิธีการออกแบบโปรแกรม

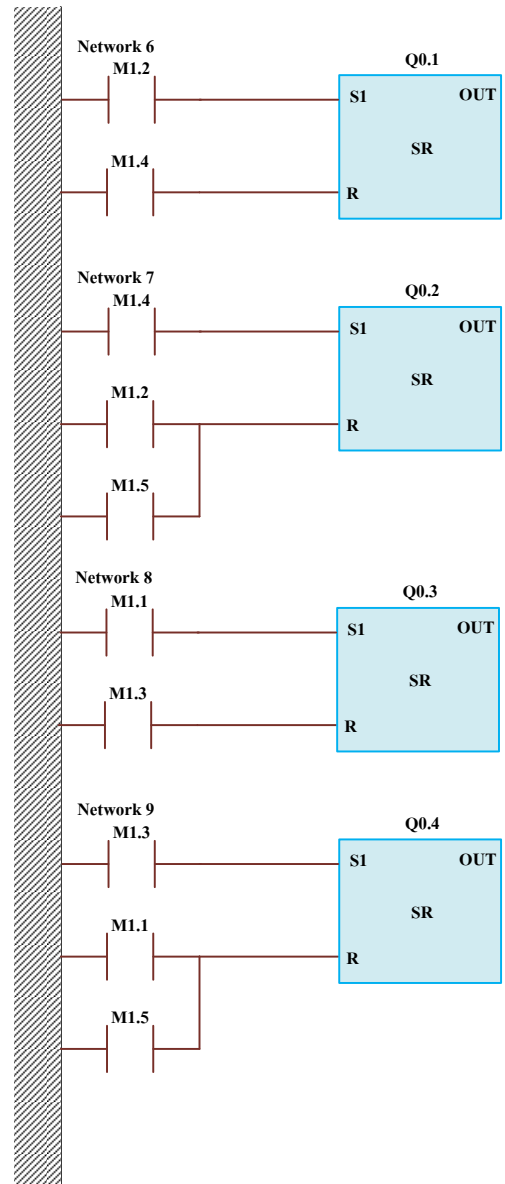
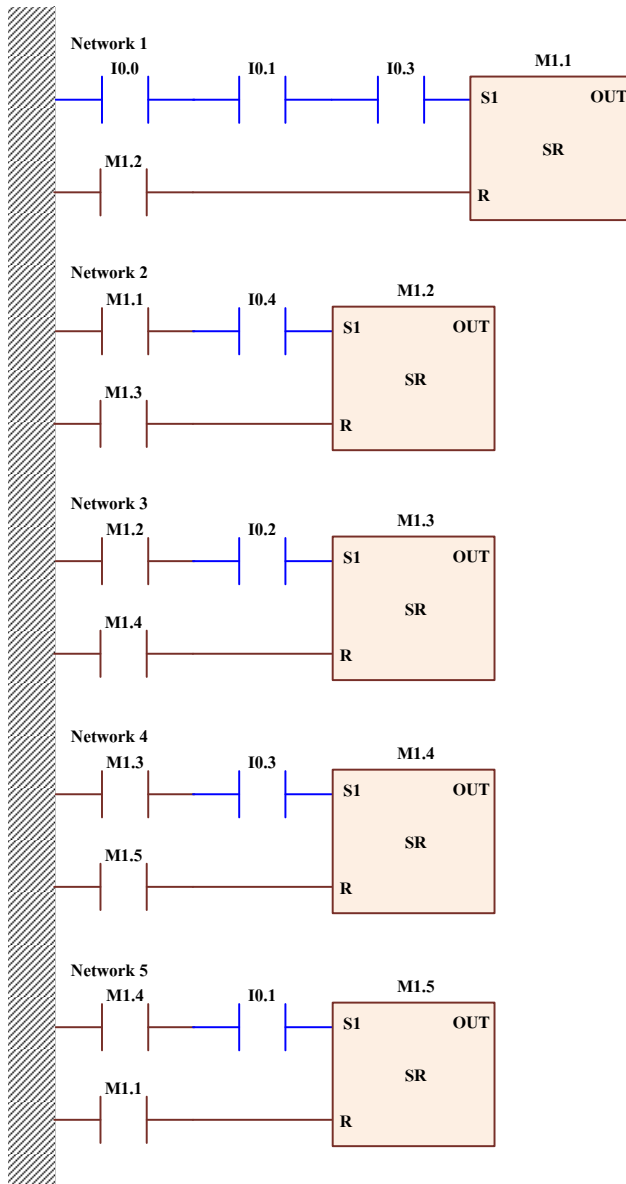
1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	สวิตช์อินพุต (S1)
I0.1	ลิมิตสวิตช์ (a0)
I0.2	ลิมิตสวิตช์ (a1)
I0.3	ลิมิตสวิตช์ (b0)
I0.4	ลิมิตสวิตช์ (b1)
Q0.1	รีเลย์ (K1)
Q0.2	รีเลย์ (K2)
Q0.3	รีเลย์ (K3)
Q0.4	รีเลย์ (K4)

2. เขียน Step เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบ



3. เขียน Ladder Diagram



5.3.1 การควบคุมการเปิด-ปิด การใช้ลมอัดที่อุปกรณ์ด้วยเซ็นเซอร์

ในการใช้อุปกรณ์ต่างๆในกระบวนการผลิตฯ ในอุตสาหกรรมส่วนมาก จะมีการใช้ลมอัดไปสูญเสียไปกับกระบวนการผลิตที่เปล่าประโยชน์ ซึ่งการควบคุมการเปิด-ปิด การใช้ลมอัดที่อุปกรณ์ด้วยเซ็นเซอร์ จะช่วยลดการสูญเสียลมอัด

ยกตัวอย่าง

โรงงานแห่งหนึ่ง ผลิตผลิตภัณฑ์กลุ่ม U.H.T. ของเครื่องบรรจุกล่อง เมื่อกล่องผลิตภัณฑ์ บรรจุผลิตภัณฑ์ และปิดผนึกเรียบร้อยแล้ว จะวิ่งตามสายพานลำเลียงเข้าสู่เครื่องยิงวันที่ เพื่อบอกวันเวลาเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต แต่เมื่อกล่องผ่านเครื่องบรรจุจะเปียกน้ำ และวิ่งผ่านไปตามสายพาน จะมีระบบเป่าน้ำให้แห้งก่อนเข้าเครื่องยิงวันที่ เพื่อป้องกันหมึกเลอะ โดยที่แต่ละสายการผลิตจะมีการใช้ลมเป่าไลน์ละ 1 จุด โดยลมอัดที่ใช้มีแรงดันที่ 7 bar และฉีดผ่านท่อทองแดง 8 มม.



รูปที่ 5-5 ระบบลำเลียงตามสายพาน

การวิเคราะห์ผล : จากกราฟแสดงการรั่วไหลผ่านรูตรง ที่แรงดัน 7.5 บาร์ และขนาดรู 8 มม. พบว่า จะมีปริมาณการรั่วไหลของอากาศอัดเท่ากับ 80 ลิตรต่อนาที จากข้อมูลพบว่าไลน์การผลิตจะเปิดการใช้งาน 16 ชั่วโมงต่อวัน และเปอร์เซ็นต์การเดินเครื่องจักรในไลน์การผลิตนี้เท่ากับ 80 % จะทำให้มีเวลาในการเปิดลม โดยสูญเสียเท่ากับ 3.2 ชั่วโมง ดังนั้น คิดเป็นลมสูญเสียในแต่ละวันเท่ากับ 15,360 ลิตรต่อวัน กำลังการผลิตของบีมลมเท่ากับ 342 ลิตรต่อนาที และมีกำลังไฟฟ้า 11.18 kW ซึ่งคิดเป็นเวลาที่สูงสูญเสียอากาศอัด

อากาศอัดที่สูงสูญเสียในแต่ละวัน	= 15,360	ลิตรต่อวัน
กำลังการผลิตของบีมลม	= 342	ลิตรต่อนาที
	= 15,360 / 342	นาที
ในแต่ละวันจะสูญเสียอากาศผลิต	= 44.9	นาที

คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียต่อวันเท่ากับ $= 11.18 \text{ kW} \times 0.75 \text{ kWh/วัน}$
 ใช้หัวฉีด 3 หัว สูญเสียเท่ากับ $= 8.38 \text{ kWh} \times 3 \text{ kWh/วัน}$
 $= 25.14 \text{ kWh/วัน}$
 คิดเป็น 1 ปี เท่ากับ $25.14 \times 300 \text{ วันต่อปี} = 7,542 \text{ kWh/ปี}$
 คิดเป็นเงินที่ประหยัดได้ $7,542 \times 2.63 = 19,835.46 \text{ บาท/ปี}$

ตารางที่ 5-2 แสดงปริมาณลมที่ปล่อยผ่าน orifice ขนาดต่างๆ (1/s)

ความ ดันลม (kPa)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Orifice (mm)									
	1	1	2	3	4	5	6	8	10	12.5
50	0.06	0.22	0.92	2.10	3.90	5.70	9.12	15.96	22.80	35.50
100	0.08	0.33	1.33	3.00	5.70	8.40	13.44	23.52	33.60	52.50
250	0.14	0.58	2.33	5.50	10.05	14.60	23.40	41.00	58.60	91.40
400	0.21	0.81	3.28	7.48	13.98	20.48	32.77	57.36	81.94	127.76
500	0.25	0.97	3.92	8.80	16.60	24.40	39.02	68.26	97.50	152.00
550	0.27	1.06	4.24	9.53	18.00	26.47	42.27	73.85	105.44	164.77
600	0.29	1.14	4.56	10.20	19.33	28.45	45.41	79.33	113.25	177.00
700	0.33	1.31	5.19	11.60	22.05	32.50	51.80	90.40	129.00	202.00

วิธีการ : ทำการติดตั้ง Sensor เพื่อตัดการเป่าลมที่สูญเสียในขณะที่ไม่มีกล่องวิ่งผ่าน โดยใช้โซลินอยด์วาล์วสั่งงานเปิด-ปิด การจ่ายลม โดยรับสัญญาณจาก Sensor เมื่อมีกล่องวิ่งผ่าน จะมีการเปิดวาล์ว และเมื่อไม่มีกล่องวิ่งผ่าน 5 วินาที จะมีการตัดลมที่เป่ากล่อง

ผลการประหยัด : ประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 7,542 kWh/ปี คิดเป็นเงิน 19,835.46 บาท/ปี
 เงินลงทุน 3,000 บาท ระยะคืนทุน 0.15 ปี

5.4 การประยุกต์ใช้งานกับระบบจำลองการทำงาน

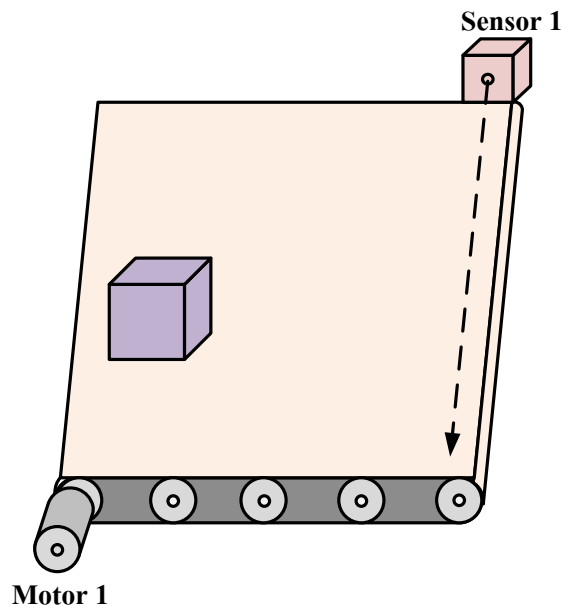
ในการออกแบบโปรแกรมจากระบบจำลองการทำงาน เป็นการนำตัวอย่างของงานในลักษณะของการควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติ และแบบอัตโนมัติที่มีใช้ตามโรงงานอุตสาหกรรม มาจำลองการทำงานเพื่อให้นักศึกษาได้ฝึกออกแบบโปรแกรมแบบต่างๆ ตามแบบจำลองการทำงานที่กำหนด

ขั้นตอนในการออกแบบโปรแกรม

1. ให้ศึกษาทำความเข้าใจขั้นตอนการทำงานของระบบจำลองการทำงาน
2. การกำหนดอินพุต/เอาต์พุต
3. ออกแบบ Ladder Diagram ตามขั้นตอนการทำงาน

ตัวอย่างที่ 5.20 การออกแบบโปรแกรมควบคุมจากการจำลองการทำงาน

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจากการจำลองการทำงานการควบคุมมอเตอร์สายพานลำเลียงแบบที่ 1
(Conveyer Belt Motor Control 1)



ขั้นตอนการทำงาน

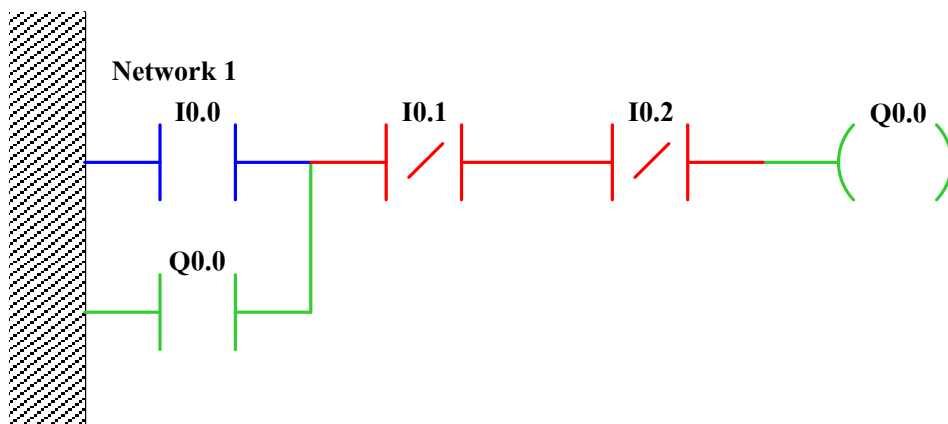
1. เมื่อ ON สวิตช์อินพุต I0.0 จะทำให้เอาต์พุต Q0.0 (มอเตอร์สายพานลำเลียง 1) มีสถานะ ON
2. เมื่อเอาต์พุต Q0.0 (มอเตอร์สายพานลำเลียง 1) มีสถานะ ON จะทำให้วัตถุหรือสิ่งของเคลื่อนที่ตามสายพานจนถึงอินพุต I0.2 (Sensor 1 ตรวจเช็คตำแหน่ง) เมื่ออินพุต I0.2 มีสถานะ ON (ตรวจเช็คพบวัตถุหรือสิ่งของ) จะสั่งให้เอาต์พุต Q0.0 (มอเตอร์สายพานลำเลียง 1) มีสถานะ OFF
3. เมื่อ ON สวิตช์อินพุต I0.1 จะทำให้เอาต์พุต Q0.0 (มอเตอร์สายพานลำเลียง 1) มีสถานะ OFF

วิธีการออกแบบโปรแกรม

1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	สวิตช์อินพุตเริ่มต้นการทำงาน (Start)
I0.1	สวิตช์อินพุตหยุดการทำงาน (Stop)
I0.2	Sensor 1 ตรวจเช็คตำแหน่งวัตถุหรือสิ่งของ
Q0.0	มอเตอร์สายพานลำเลียง

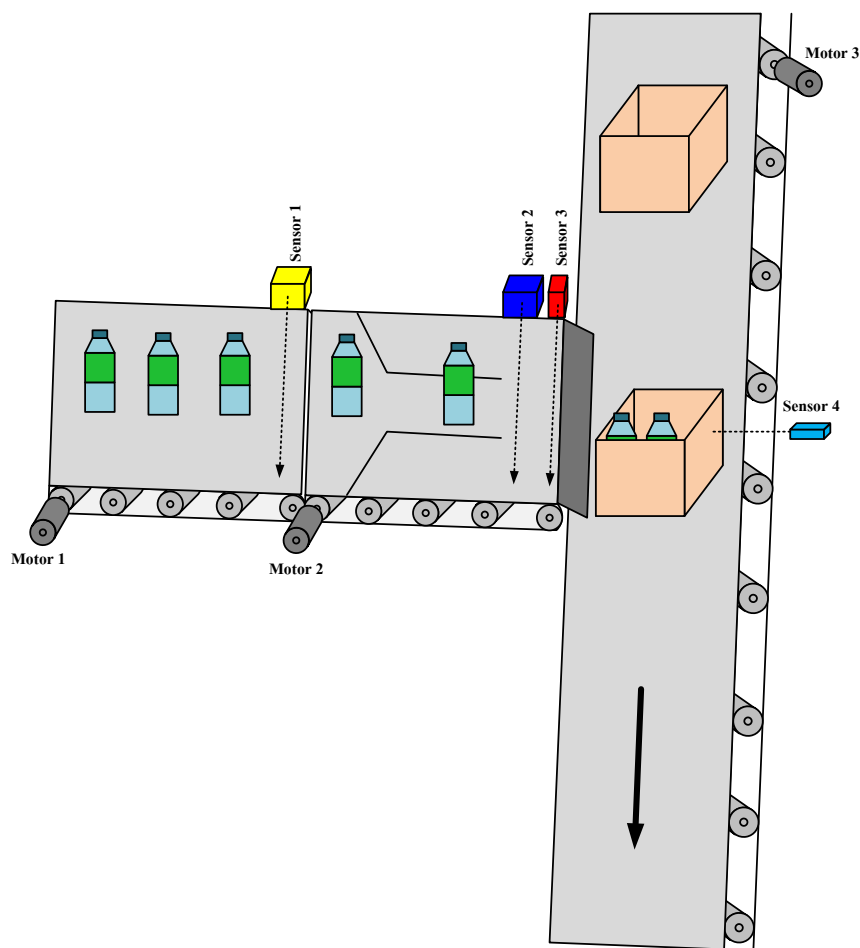
2. เขียน Ladder Diagram



ตัวอย่างที่ 5.21 การออกแบบโปรแกรมควบคุมจากการจำลองการทำงาน

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจากการจำลองการทำงานการควบคุมมอเตอร์สายพานลำเลียงแบบที่ 2

(Conveyer Belt Motor Control 2)



ขั้นตอนการทำงาน

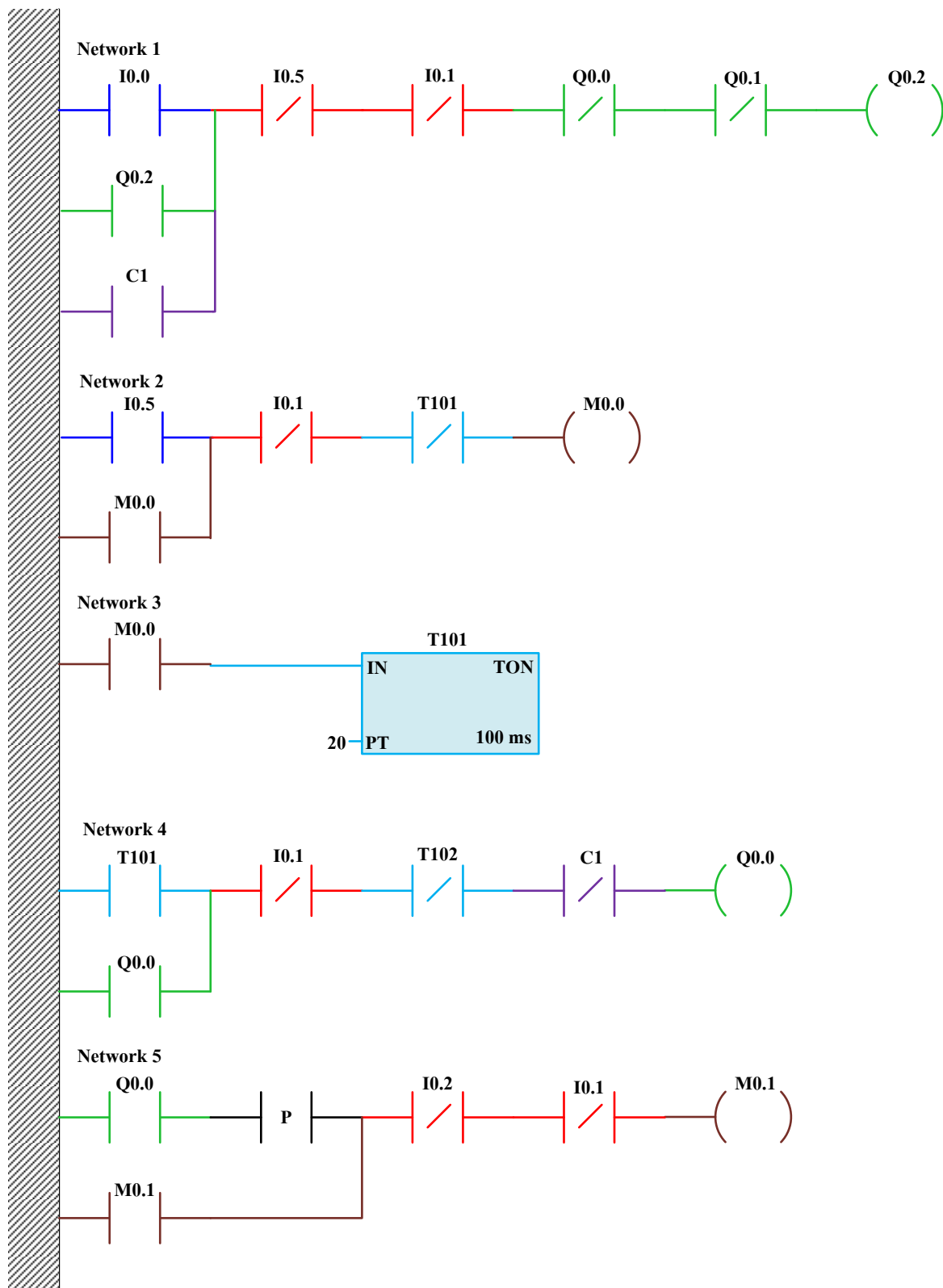
1. เมื่อ ON สวิตช์ Start ให้มอเตอร์สายพานลำเลียง 3 ทำงาน กล่องใส่ขวดจะเคลื่อนที่โดยสายพานลำเลียง 3 และสายพานลำเลียง 3 จะหยุดเมื่อกล่องใส่ขวดเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งของ Sensor 4 ตรวจเช็คกล่องใส่ขวด
2. เมื่อมอเตอร์สายพานลำเลียง 3 หยุดทำงาน ให้นับเวลา 2 วินาที มอเตอร์สายพานลำเลียง 1 จะมีทำงาน ทำให้ขวดเคลื่อนที่ไปตามสายพาน หากขวดที่เคลื่อนที่ไปตามสายพาน เคลื่อนที่ไม่ถึงตำแหน่งของ Sensor 1 ตรวจเช็คตำแหน่ง ตรวจเช็คไม่พบวัตถุหรือสิ่งของ เป็นระยะเวลาเกิน 5 วินาที ให้ มอเตอร์สายพานลำเลียง 1 หยุดทำงาน
3. แต่หาก Sensor 1 ตรวจเช็คตำแหน่ง ตรวจเช็คพบวัตถุหรือสิ่งของจะสั่งให้มอเตอร์สายพานลำเลียง 2 ทำงาน
4. เมื่อมอเตอร์สายพานลำเลียง 2 ทำงาน ทำให้ขวดเคลื่อนที่ไปตามสายพาน หากขวดเคลื่อนที่ไปตามสายพานเคลื่อนที่ไม่ถึง sensor 2 ตรวจเช็คตำแหน่ง ตรวจเช็คไม่พบวัตถุหรือสิ่งของ เป็นระยะเวลาเกิน 7 วินาที ให้มอเตอร์สายพานลำเลียง 1 และมอเตอร์สายพานลำเลียง 2 หยุดทำงาน
5. แต่หาก Sensor 2 ตรวจเช็คตำแหน่ง ตรวจเช็คพบวัตถุหรือสิ่งของ มอเตอร์สายพานลำเลียง 2 จะยังทำงานต่อไปทำให้ขวดเคลื่อนที่ผ่าน Sensor 3 ตรวจนับจำนวนขวด จนครบ 6 ขวด จะทำให้มอเตอร์สายพานลำเลียง 1 และมอเตอร์สายพานลำเลียง 2 หยุดทำงาน
6. เมื่อมอเตอร์สายพานลำเลียง 1 และมอเตอร์สายพานลำเลียง 2หยุดทำงานมอเตอร์สายพานลำเลียง 3 ทำงานกล่องใส่ขวดจะเคลื่อนที่ต่อไป และกล่องใบใหม่จะเคลื่อนที่เข้ามา เริ่มต้นการทำงานต่อไปอีกครั้ง
7. เมื่อ ON สวิตช์ Stop ให้หยุดการทำงานทั้งหมด

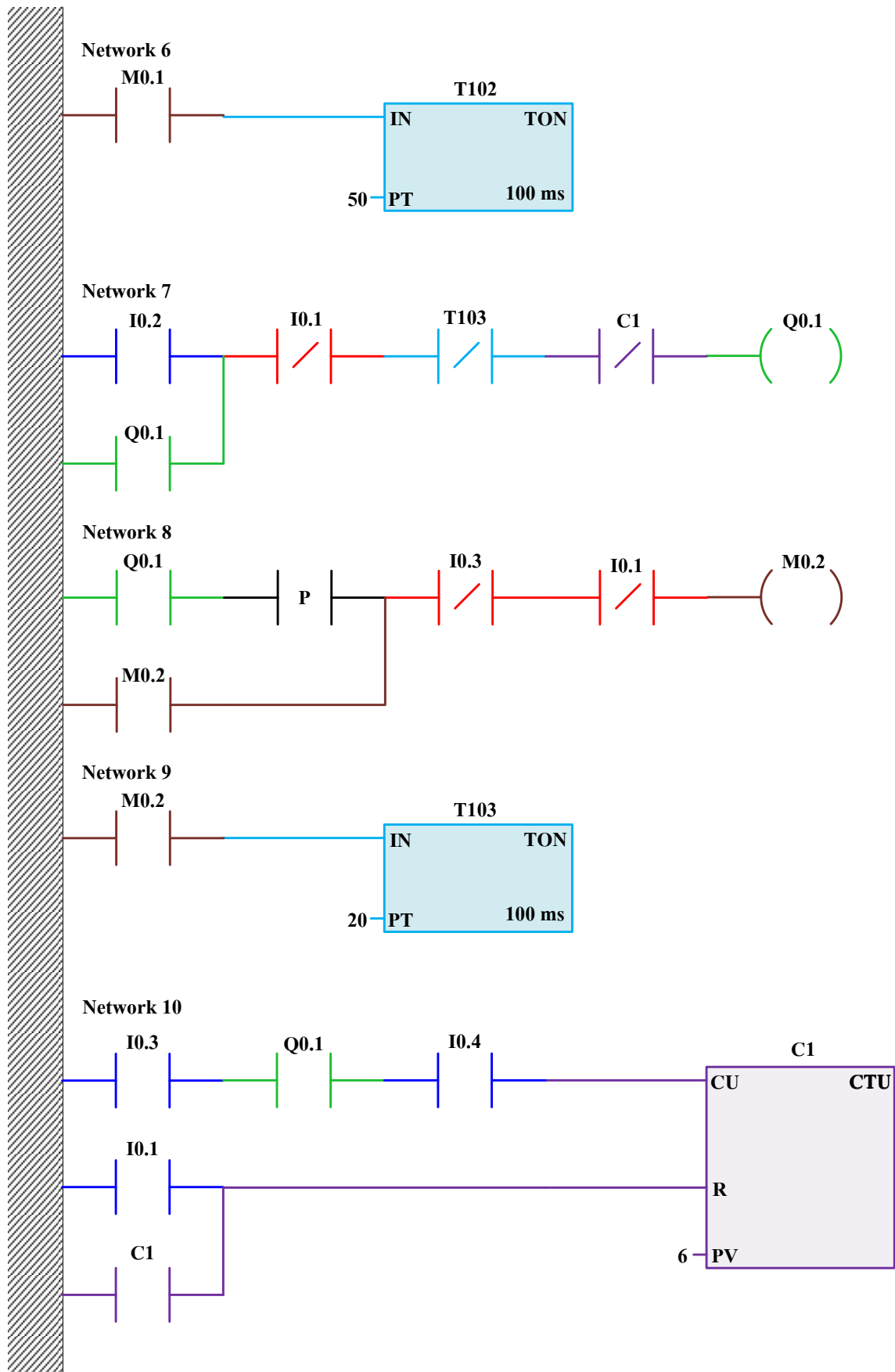
วิธีการออกแบบโปรแกรม

1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	สวิตช์อินพุตเริ่มต้นการทำงาน (Start)
I0.1	สวิตช์อินพุตหยุดการทำงาน (Stop)
I0.2	Sensor 1 ตรวจเช็คตำแหน่งวัตถุหรือสิ่งของ
I0.3	Sensor 2 ตรวจเช็คตำแหน่งวัตถุหรือสิ่งของ
I0.4	Sensor 3 ตรวจนับจำนวน
I0.5	Sensor 4 ตรวจเช็คกล่อง
Q0.0	มอเตอร์สายพานลำเลียง 1
Q0.1	มอเตอร์สายพานลำเลียง 2
Q0.2	มอเตอร์สายพานลำเลียง 3

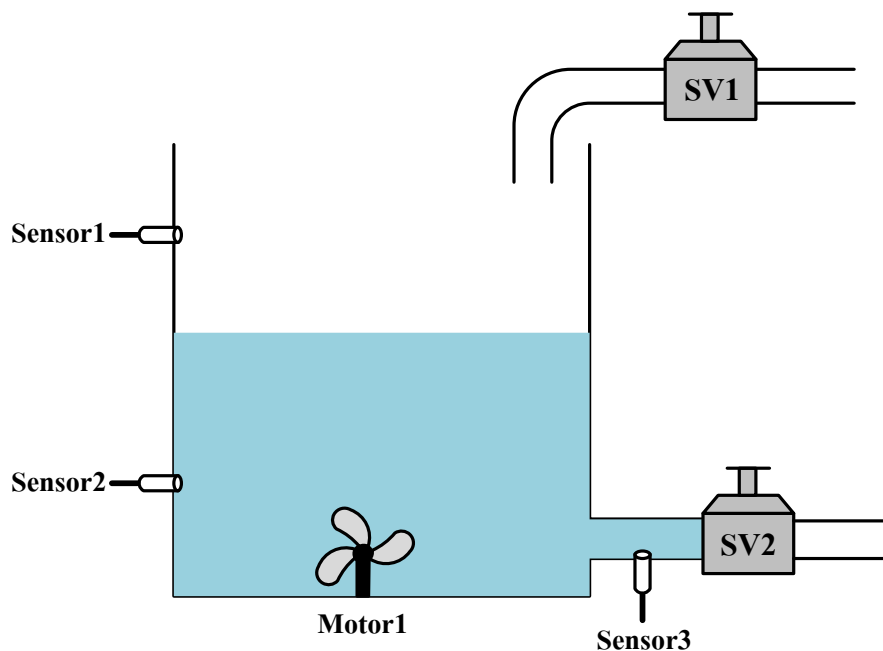
2. เขียน Ladder Diagram





ตัวอย่างที่ 5.22 การออกแบบโปรแกรมควบคุมจากการจำลองการทำงาน

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจากการจำลองการทำงานการควบคุมระดับน้ำในถังเก็บน้ำแบบอัตโนมัติ



ขั้นตอนการทำงาน

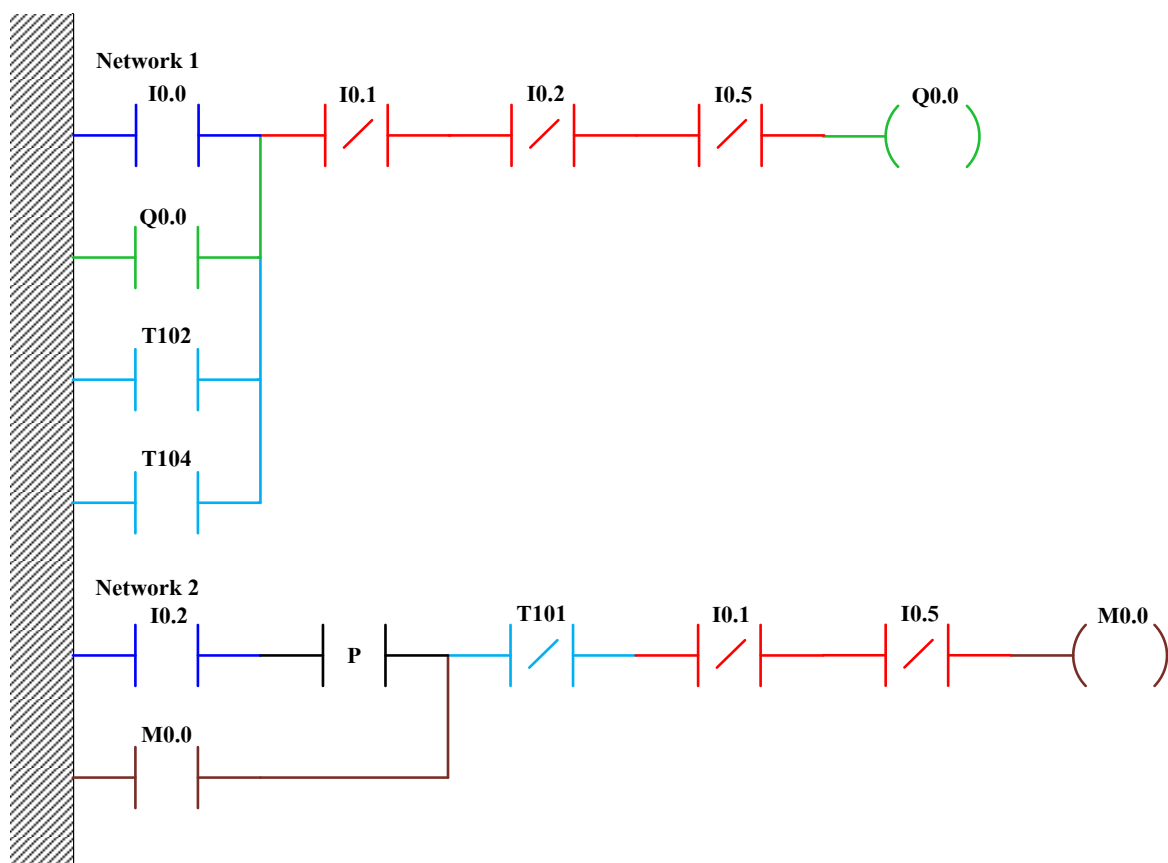
1. เมื่อ ON สวิตช์ Start ให้ วาล์ว SV1 เปิดวาล์วทำให้น้ำไหลลงในถัง เมื่อน้ำในถังสูงขึ้นผ่าน Sensor 2 จนถึง Sensor 1 แล้วจะสั่งให้ วาล์ว SV1 ปิด หลังจากนั้นช่วงเวลา 5 วินาที ให้ วาล์ว SV2 เปิดวาล์วน้ำ จะไหลออกจากถัง จนกระทั่งระดับน้ำลดลงมาถึงตำแหน่งของ Sensor 2 จะทำให้ วาล์ว SV2 ปิด และช่วงเวลา 3 วินาที ก็จะสั่งให้ วาล์ว SV1 เปิดวาล์ว เริ่มต้นการทำงานอีกครั้ง
2. เมื่อทำการกดปุ่มสวิตช์ Clean Tank ให้หยุดการทำงานชั่วคราวและทำการตรวจเช็คระดับน้ำในถัง ระดับน้ำต้องสูงกว่า Sensor 2 ถ้าระดับน้ำมีต่ำกว่า Sensor 2 มอเตอร์กวนน้ำจะไม่ทำงาน
3. หากเช็คระดับน้ำเรียบร้อยแล้วน้ำสูงกว่า Sensor 2 จะสั่งให้มอเตอร์กวนน้ำทำงาน โดยช่วงเวลา 15 วินาที เมื่อครบจะสั่งให้ วาล์ว SV 2 เปิดออกจะทำให้น้ำไหลออกจากถังจนหมด โดยเช็คน้ำที่ไหลออกจากท่อจาก Sensor 3 เมื่อไม่มีน้ำไหลออกจากท่อสั่งให้ วาล์ว SV2 ปิด หลังจากนั้นช่วงเวลา 3 วินาที ให้ เปิด วาล์ว SV1 เริ่มต้นการทำงานอีกครั้ง
4. เมื่อ ON สวิตช์ Stop จะสั่งให้หยุดการทำงานทั้งหมด

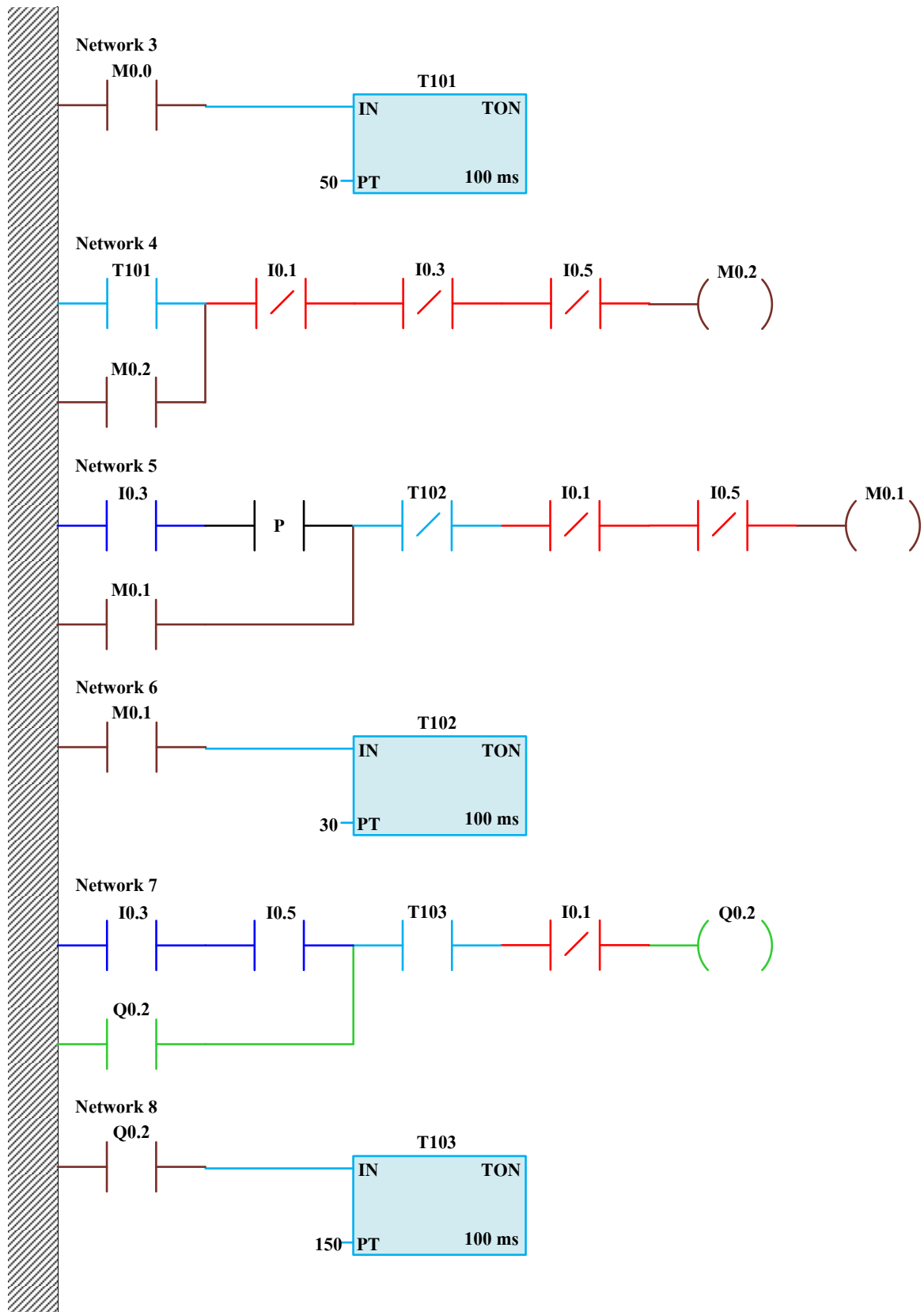
วิธีการออกแบบโปรแกรม

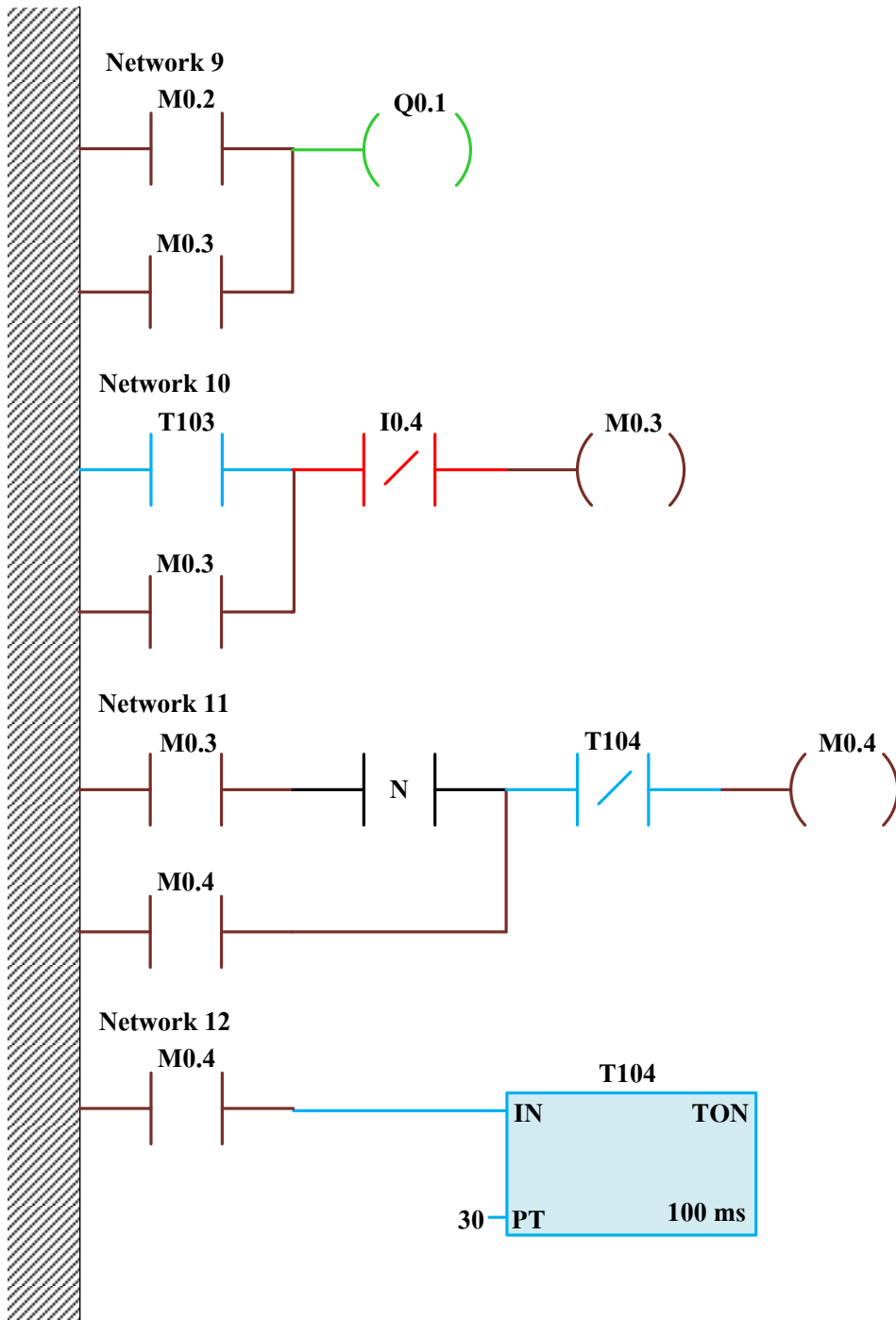
1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	สวิตช์อินพุตเริ่มต้นการทำงาน (Start)
I0.1	สวิตช์อินพุตหยุดการทำงาน (Stop)
I0.2	Sensor 1 ตรวจเช็คระดับน้ำสูง
I0.3	Sensor 2 ตรวจเช็คระดับน้ำต่ำ
I0.4	Sensor 3 ตรวจเช็คระดับน้ำในท่อออก
I0.5	สวิตช์ Clean Tank
Q0.0	วาล์วจ่ายน้ำเข้า (SV1)
Q0.1	วาล์วจ่ายระบายน้ำออก (SV2)
Q0.2	มอเตอร์กวนน้ำ (Motor 1)

2. เขียน Ladder Diagram

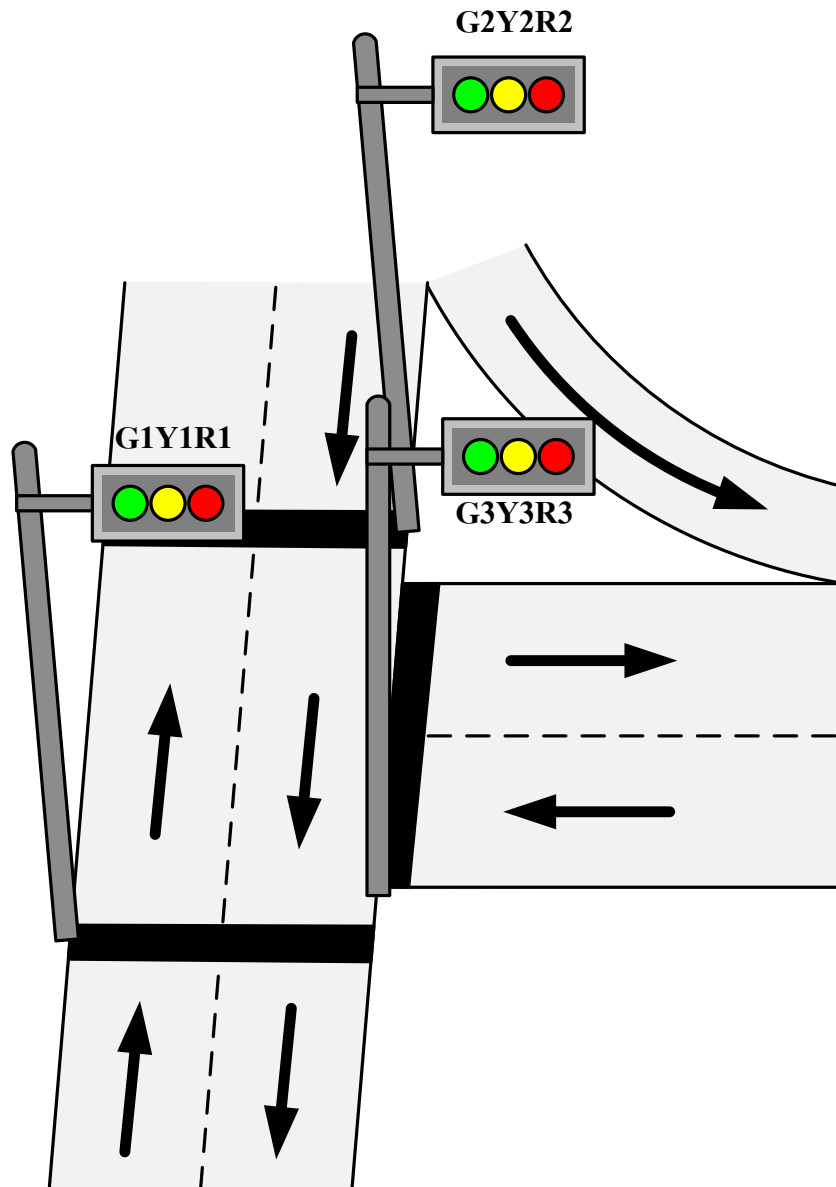






ตัวอย่างที่ 5.23 การออกแบบโปรแกรมควบคุมจากการจำลองการทำงาน

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจากการจำลองการทำงานการควบคุมไฟจราจรสามแยก



ขั้นตอนการทำงาน

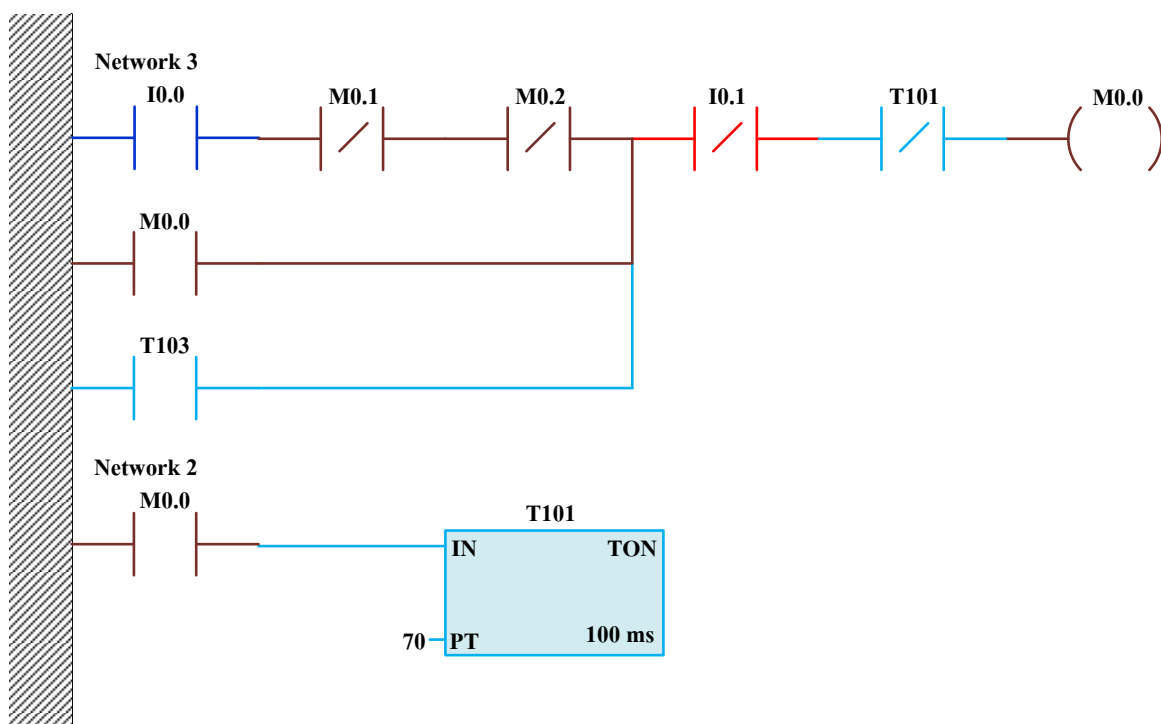
1. ให้นักศึกษาคิดขั้นตอนการทำงานเพื่อควบคุมระบบสัญญาณไฟจราจรสามแยกเอง โดยให้ออกแบบโปรแกรม ตามรายละเอียดของการกำหนดตำแหน่ง
2. เมื่อ ON สวิตช์ Start จะสั่งให้เริ่มต้นการทำงาน
3. เมื่อ ON สวิตช์ Stop จะสั่งให้หยุดการทำงานทั้งหมด

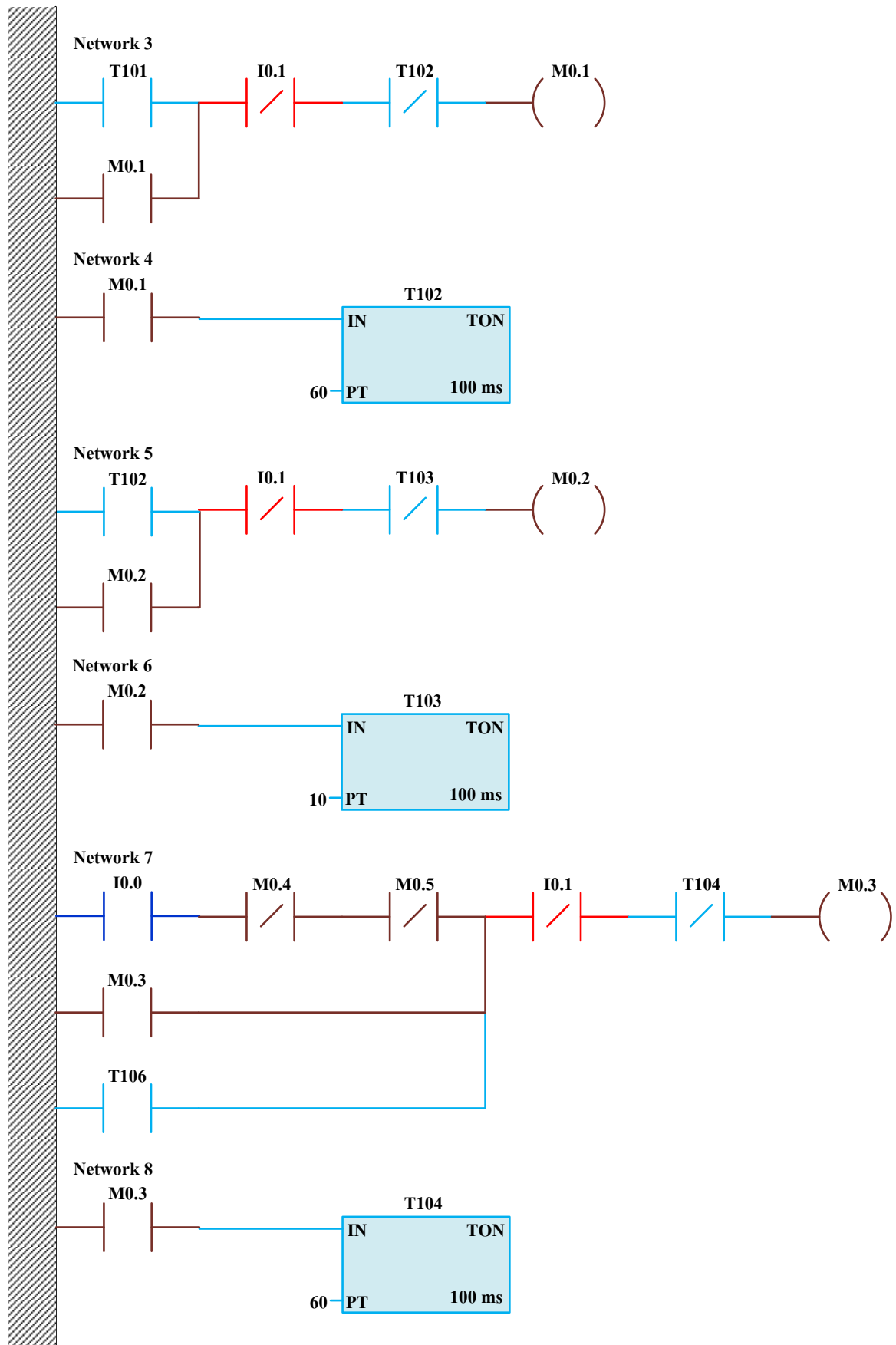
วิธีการออกแบบโปรแกรม

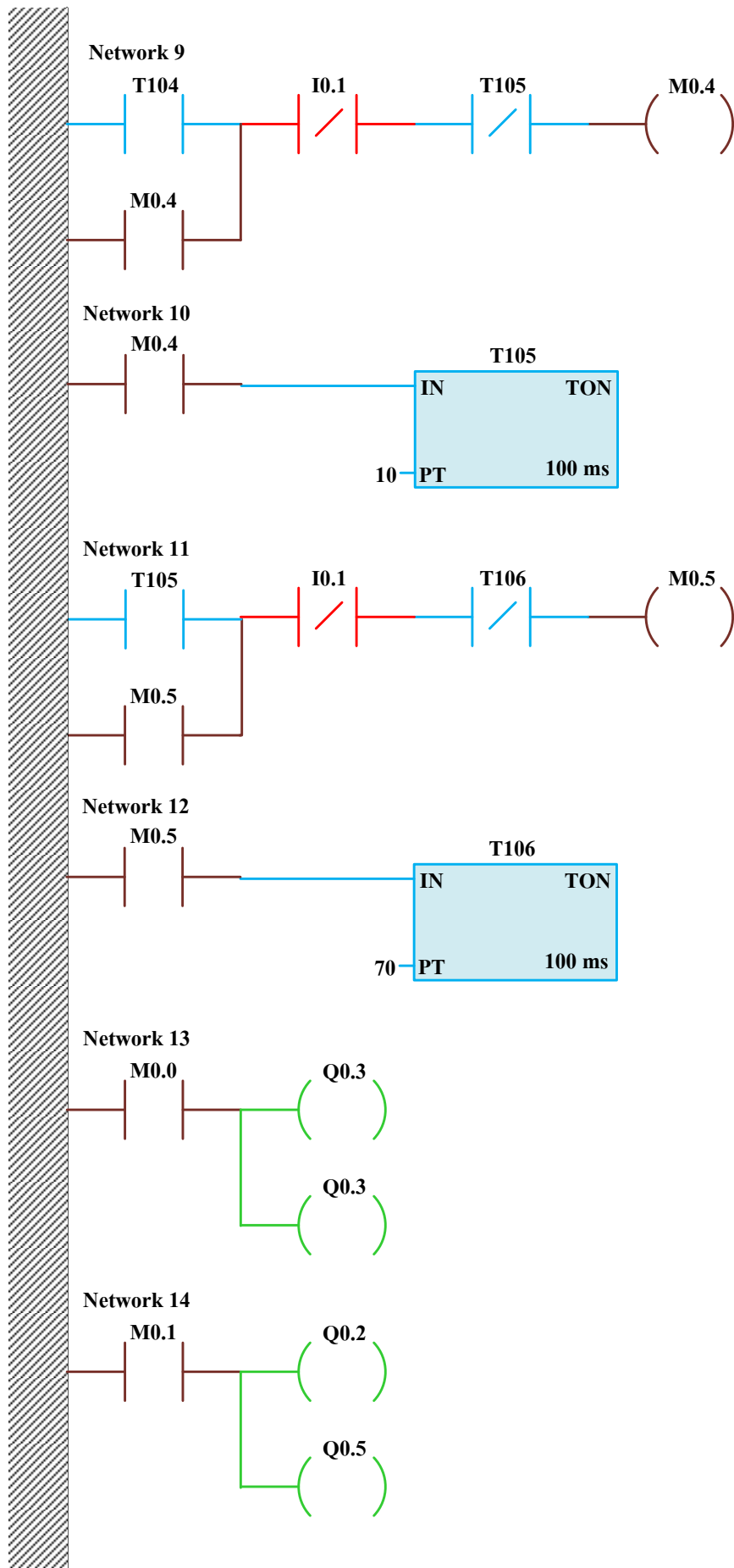
1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

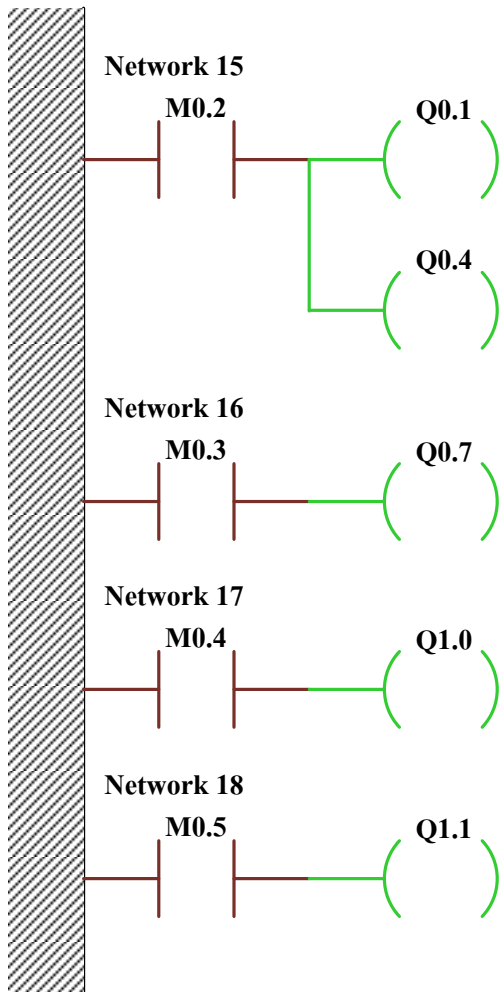
ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	สวิตช์อินพุตเริ่มต้นการทำงาน (Start)
I0.1	สวิตช์อินพุตหยุดการทำงาน (Stop)
Q0.1	สัญญาณไฟสีเขียว G1
Q0.2	สัญญาณไฟสีเหลือง Y1
Q0.3	สัญญาณไฟสีแดง R1
Q0.4	สัญญาณไฟสีเขียว G2
Q0.5	สัญญาณไฟสีเหลือง Y2
Q0.6	สัญญาณไฟสีแดง R2
Q0.7	สัญญาณไฟสีเขียว G3
Q1.0	สัญญาณไฟสีเหลือง Y3
Q1.1	สัญญาณไฟสีแดง R3

2. เขียน Ladder Diagram



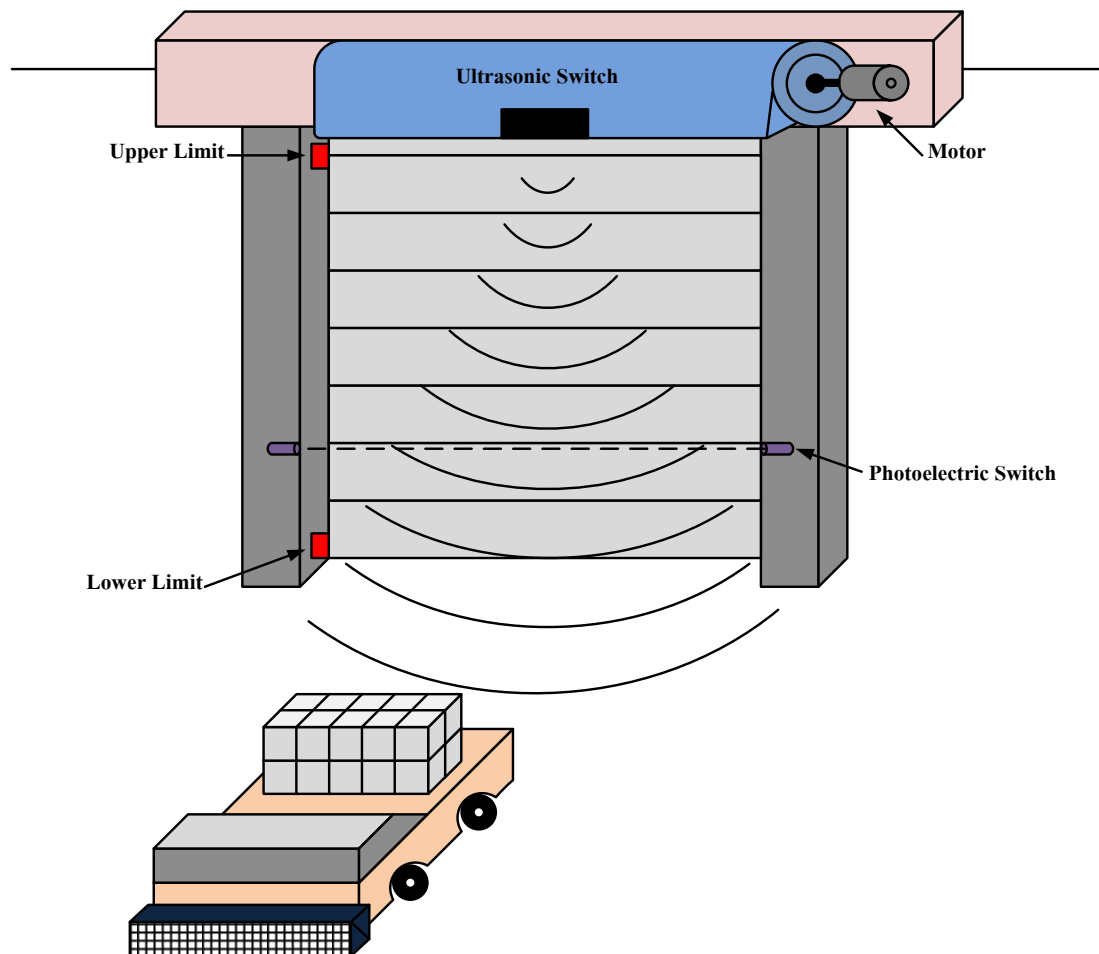






ตัวอย่างที่ 5.24 การออกแบบโปรแกรมควบคุมจากการจำลองการทำงาน

คำสั่ง จงออกแบบโปรแกรมจากการจำลองการทำงานการควบคุมประตูห้องเก็บของอัตโนมัติ



ขั้นตอนการทำงาน

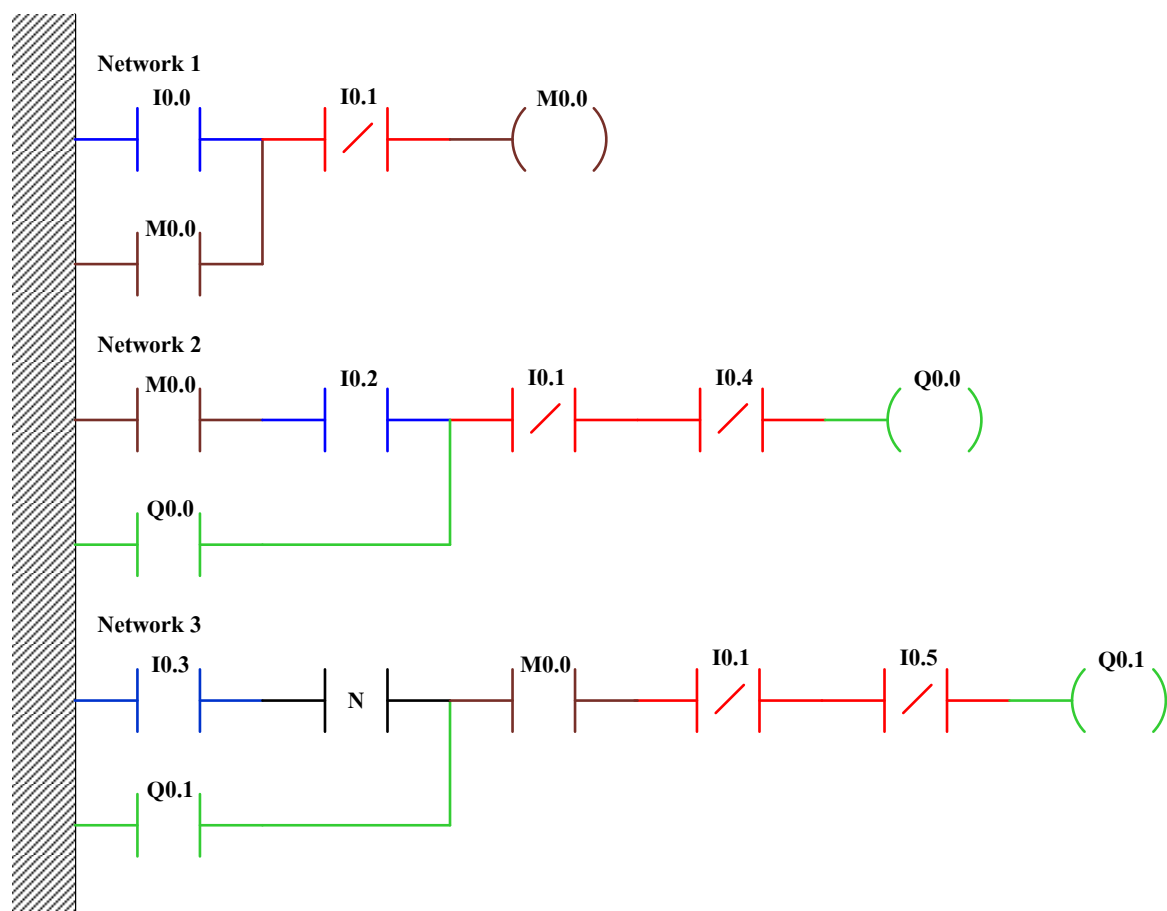
1. เมื่อ ON สวิตช์ Start จะทำให้ Ultrasonic Switch ทำการตรวจสอบว่ามีรถบรรทุกอยู่หรือไม่ หาก Ultrasonic Switch แสดงว่ามีรถบรรทุกอยู่ก็จะสั่งให้ มอเตอร์ควบคุมการเปิดประตู เปิดประตู โดยประตูจะเปิดขึ้นจนถึงตำแหน่ง Upper Limit เมื่อถึงตำแหน่ง Upper Limit ก็จะสั่งให้เอาต์พุต มอเตอร์ควบคุมการเปิดประตูหยุดการทำงาน
2. จากนั้นเป็นการทำงานของ Photoelectric Switch ตรวจจับว่ารถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปหรือไม่ หากเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปเรียบร้อยแล้วจะสั่งให้มอเตอร์ควบคุมการปิดประตู ปิดประตู โดยประตูจะปิดลงถึงตำแหน่ง Lower Limit เมื่อถึงตำแหน่ง Lower Limit ก็จะสั่งให้ มอเตอร์ควบคุมการปิดประตูหยุดการทำงาน
3. เมื่อ ON สวิตช์ Stop จะสั่งหยุดการทำงานทั้งหมด

วิธีการออกแบบโปรแกรม

1. กำหนดอินพุต/เอาต์พุต

ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	สวิตช์อินพุตเริ่มต้นการทำงาน (Start)
I0.1	สวิตช์อินพุตหยุดการทำงาน (Stop)
I0.2	Ultrasonic Switch
I0.3	Photoelectric Switch
I0.4	Upper Limit
I0.5	Lower Limit
Q0.0	สัญญาณไฟสีเขียว Y3
Q0.1	สัญญาณไฟสีแดง R3

2. เขียน Ladder Diagram



แบบประเมินผลการเรียน

หน่วยที่ 5

การประยุกต์ใช้ PLC ร่วมกับ เซ็นเซอร์และอุปกรณ์ควบคุม

คำสั่ง จงทำเครื่องหมาย X ลงข้อที่ถูกต้อง

1. พังแสดงการทำงานของสัญญาณต่างๆ เทียบกับคาบเวลาคือ

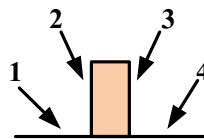
ก. Control Circuit

ข. Timing Diagram

ค. Sequence Flow Chart

ง. Mnemonic Code

จาก Timing Diagram แสดงตำแหน่งการทำงานของอินพุต (สวิทช์) จงตอบคำถามข้อ 2-5



2. จงบอกสถานะการทำงานของตำแหน่งที่ 1

ก. ยังไม่มีการกดสวิทช์ใดๆ

ข. กดสวิทช์

ค. ปลดสวิทช์

ง. การกลับสู่สภาวะเดิม

3. จงบอกสถานะการทำงานของตำแหน่งที่ 2

ก. ยังไม่มีการกดสวิทช์ใดๆ

ข. กดสวิทช์

ค. ปลดสวิทช์

ง. การกลับสู่สภาวะเดิม

4. จงบอกสถานะการทำงานของตำแหน่งที่ 3

ก. ยังไม่มีการกดสวิทช์ใดๆ

ข. กดสวิทช์

ค. ปลดสวิทช์

ง. การกลับสู่สภาวะเดิม

5. จงบอกสถานะการทำงานของตำแหน่งที่ 4

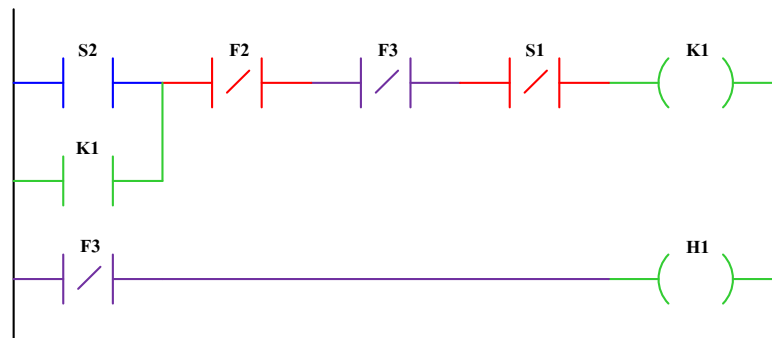
ก. ยังไม่มีการกดสวิทช์ใดๆ

ข. กดสวิทช์

ค. ปลดสวิทช์

ง. การกลับสู่สภาวะเดิม

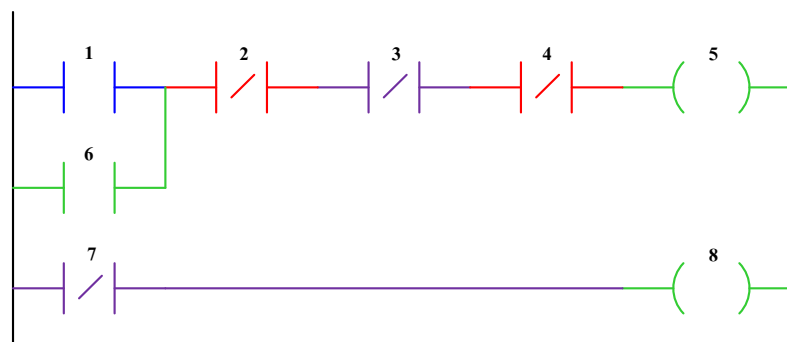
จาก Ladder Diagram จงตอบคำถามข้อ 6-10



การกำหนดตำแหน่งอินพุต/เอาต์พุต

ตำแหน่ง	ความหมาย
I0.0	พิวส์คอนโทรล (F2)
I0.1	โอเวอร์โหนด (F3)
I0.2	สวิตช์อินพุตหยุดการทำงาน (S1)
I0.3	สวิตช์อินพุตเริ่มต้นการทำงาน (S2)

จะได้ Ladder diagram ที่กำหนดตำแหน่งอินพุต/เอาต์พุตใหม่ดังนี้



6. จาก Ladder Diagram ที่กำหนดค่าตำแหน่งอินพุต/เอาต์พุตใหม่ หมายเลข 1 แทนตำแหน่งอะไร

- ก. พิวส์คอนโทรล
- ข. สวิตช์อินพุตหยุดการทำงาน
- ค. หลอดไฟแสดงสถานะผิดปกติ
- ง. สวิตช์อินพุตเริ่มต้นการทำงาน

7. จาก Ladder Diagram ที่กำหนดค่าตำแหน่งอินพุต/เอาต์พุตใหม่ หมายเลข 2 แทนตำแหน่งอะไร

- ก. พิวส์คอนโทรล
- ข. สวิตช์อินพุตหยุดการทำงาน
- ค. โอเวอร์โหนด
- ง. สวิตช์อินพุตเริ่มต้นการทำงาน

8. จาก Ladder Diagram ที่กำหนดค่าตำแหน่งอินพุต/เอาต์พุตใหม่ หมายเลข 3 แทนตำแหน่งอะไร

ก. พิวส์คอนโทรล

ข. สวิตช์อินพุตหยุดการทำงาน

ค. หลอดไฟแสดงสถานะผิดปกติ

ง. โอเวอร์โวลต์

9. จาก Ladder Diagram ที่กำหนดค่าตำแหน่งอินพุต/เอาต์พุตใหม่ หมายเลข 4 แทนตำแหน่งอะไร

ก. พิวส์คอนโทรล

ข. สวิตช์อินพุตหยุดการทำงาน

ค. หลอดไฟแสดงสถานะผิดปกติ

ง. สวิตช์อินพุตเริ่มต้นการทำงาน

10. จาก Ladder Diagram ที่กำหนดค่าตำแหน่งอินพุต/เอาต์พุตใหม่ หมายเลข 8 แทนตำแหน่งอะไร

ก. พิวส์คอนโทรล

ข. สวิตช์อินพุตหยุดการทำงาน

ค. หลอดไฟแสดงสถานะผิดปกติ

ง. สวิตช์อินพุตเริ่มต้นการทำงาน

11. การใช้อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ตามภาระการใช้งาน (Dynamic motor load control) ทำหน้าที่อย่างไรในการหยุดเดินมอเตอร์เมื่อไม่มีภาระงาน

ก. เพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก

ข. ลดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก

ค. ลัดวงจรไฟฟ้า

ง. ถูกทุกข้อ

12. โดยปกติมอเตอร์ที่จะติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ตามภาระการใช้งาน ควรมีช่วงเวลา Unload หรือเดินเครื่องตัวเปล่าไม่ต่ำกว่ากี่ % ของระยะการใช้งานทั้งหมด จึงจะทำให้ผลการประหยัดพลังงานเป็นที่น่าพอใจ

ก. 60 %

ข. 70 %

ค. 80 %

ง. ไม่มีข้อใดถูกต้อง

13. ข้อใดส่งผลทำให้การสูญเสียในมอเตอร์ลดลง

ก. การลดขนาดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์

ข. การเพิ่มขนาดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่มอเตอร์

ค. การเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กในขณะที่มอเตอร์

ง. ข้อ ข และ ค ถูก

14. การประเมินผลประหยัดที่เกิดขึ้น ต้องประเมินจากจำนวนชั่วโมงในการหยุดเดิน และกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์นั้น ข้อสำคัญที่สุดก่อนทำการหยุดเดินมอเตอร์นั้นคืออะไร

ก. จำนวนชั่วโมงหยุดเดิน

ข. กำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์

ค. ลักษณะการใช้งาน

ง. ถูกทุกข้อ

15. ข้อใดคือระบบการทำงานของเครื่องควบคุมมอเตอร์เรียงตามลำดับ

- ก. สามารถหยุดการทำงานของมอเตอร์ทั้งสองตัวพร้อมกันได้
- ข. หากเกิดทำงานเกินกำลังมอเตอร์จะหยุดพร้อมกันทั้งสองตัว
- ค. มอเตอร์ตัวแรกทำงานก่อน และมอเตอร์ตัวที่สองถึงจะทำงานตามได้
- ง. ถูกทุกข้อ

16. วงจรมอเตอร์ทำงานเรียงตามลำดับนี้นิยมใช้กับงานระบบอะไร

- ก. ระบบขับเคลื่อน
- ข. ระบบต้นกำลัง
- ค. ระบบสายพานลำเลียง
- ง. ถูกทุกข้อ

17. VSD ย่อมาจากอะไร

- ก. Volt Supply Drive
- ข. variable Speed Drive
- ค. Volt Speed Drive
- ง. variable Supply Drive

18. เครื่องควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอะไรของกระแสไฟฟ้า เพื่อควบคุมความเร็วรอบการทำงานของมอเตอร์

- ก. ความถี่
- ข. ความร้อน
- ค. ความดัน
- ง. ไม่มีข้อใดถูก

19. ติดตั้งเครื่องควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เข้ากับเครื่องอัดอากาศ จะต้องปรับความเร็วรอบเท่าไร ของความเร็วรอบสูงสุด จึงจะทำให้ระบบสามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

- ก. 50 %
- ข. 60 %
- ค. 70 %
- ง. ถูกทุกข้อ

20. ติดตั้งเครื่องควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์สำหรับอุปกรณ์ใด จึงจะมีจุดทำงานที่เหมาะสมและให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ความเร็วรอบประมาณ 70 % ของความเร็วรอบสูงสุด

- ก. เครื่องปั๊มน้ำ
- ข. พัดลม
- ค. ไม่มีข้อใดถูก
- ง. ข้อ ก และ ข ถูก



กรมพัฒนาพลังงานทดแทน
และอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน



โครงการพัฒนาหลักสูตรการอนุรักษ์พลังงานและพลังงานทดแทน
สำหรับสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา

รายวิชาที่ 4

เครื่องกลไฟฟ้า 1

รหัส 3104-2003 หน่วยที่ 1 หม้อแปลงไฟฟ้า

หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง พุทธศักราช 2557
ประเภทวิชาอุตสาหกรรม
สาขาวิชาไฟฟ้า

.....

จุดประสงค์สาขาวิชา

1. เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ความรู้และทักษะด้านการสื่อสาร ทักษะการคิดและการแก้ปัญหา และทักษะทางสังคมและการดำรงชีวิตในการพัฒนาตนเองและวิชาชีพ
2. เพื่อให้มีความเข้าใจหลักการบริหารและจัดการวิชาชีพ การใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและหลักการของงานอาชีพที่สัมพันธ์เกี่ยวข้องกับการพัฒนาวิชาชีพไฟฟ้า ให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงและความก้าวหน้าของเศรษฐกิจ สังคมและเทคโนโลยี
3. เพื่อให้มีความเข้าใจในหลักการและกระบวนการทำงานในกลุ่มงานพื้นฐานประยุกต์ใช้ความรู้ทักษะประสบการณ์และเทคโนโลยีพัฒนางานอาชีพ วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ ด้วยทฤษฎีและปฏิบัติ การออกแบบ เขียนแบบและประมาณราคา
4. เพื่อให้สามารถออกแบบ วิเคราะห์ แก้ปัญหาในงานติดตั้ง ควบคุมระบบไฟฟ้า เครื่องทำความเย็นและปรับอากาศ
5. เพื่อให้สามารถปฏิบัติงานติดตั้ง ซ่อมบำรุง ทดสอบ ควบคุมระบบไฟฟ้า เครื่องทำความเย็นและปรับอากาศ
6. เพื่อให้สามารถปฏิบัติงานด้านเทคนิคในสถานประกอบการและประกอบอาชีพอิสระ รวมทั้งการใช้ความรู้และทักษะเป็นพื้นฐานในการศึกษาต่อในระดับสูงขึ้นได้
7. เพื่อให้มีเจตคติที่ดีต่องานอาชีพ มีความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ ซื่อสัตย์สุจริต มีระเบียบวินัย เป็นผู้มีความรับผิดชอบต่อสังคม สิ่งแวดล้อม ต่อต้านความรุนแรงและสารเสพติด

แผนการจัดการเรียนรู้

รหัสวิชา 3104-2003	ชื่อรายวิชา เครื่องกลไฟฟ้า 1	2-3-3
ระดับชั้น ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	สาขาวิชา ช่างไฟฟ้ากำลัง	
ทฤษฎีรวม 2 คาบ	ปฏิบัติรวม 3 คาบ	3 หน่วยกิต

จุดประสงค์รายวิชา

1. รู้และเข้าใจลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ทดสอบและควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และหม้อแปลงไฟฟ้า
3. มีกิจนิสัยในการทำงานร่วมกับผู้อื่นด้วยความประณีต รอบคอบ ปลอดภัย

สมรรถนะ

1. แสดงความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง
2. แสดงความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างและหลักการทำงานของหม้อแปลง
3. ควบคุมมอเตอร์กระแสตรง
4. ต่อหม้อแปลงไฟฟ้า ทดสอบหาประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

คำอธิบายรายวิชา

ศึกษาและปฏิบัติลักษณะสมบัติของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบต่าง ๆ ในสภาวะไม่มีโหลด และมีโหลดลักษณะสมบัติของมอเตอร์กระแสตรงแบบต่างๆ การเริ่มหมุนและการควบคุมความเร็ว หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า วงจรสมมูลและเฟสเซอร์ไดอะแกรม การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า ประสิทธิภาพของหม้อแปลง การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าใช้งาน 1 เฟสและ 3 เฟส

หน่วยการสอน

รหัส 3104-2003 วิชา เครื่องกลไฟฟ้า 1 จำนวน 5 ชั่วโมง / สัปดาห์

หน่วยที่	ชื่อหน่วยการสอน	จำนวนชั่วโมง
-	ปฐมนิเทศ	1
1	หม้อแปลงไฟฟ้า	29
2	เครื่องกำเนิดกระแสตรง	30
3	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	25
4	สอบปลายภาค	5
	รวม	90

เกณฑ์การประเมินผล
วิชา เครื่องกลไฟฟ้า 1 รหัส 3104-2003

รายการ	คะแนน
1. คุณลักษณะที่ต้องการบูรณาการคุณธรรม จริยธรรมและคุณลักษณะอันพึงประสงค์	20
2. ทดสอบ	
2.1 แบบทดสอบหลังเรียน	5
2.2 สอบปลายภาค	30
3. ภาระงาน	
3.1 แบบฝึกหัด	5
3.2 การปฏิบัติการทดลอง	30
3.3 รายงานผลการทดลอง	10
รวม	100

  กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน 	ใบสาระการเรียนรู้	หน่วยที่ 1
	ชื่อวิชา เครื่องกลไฟฟ้า 1	เวลาเรียน 4 ชั่วโมง
	ชื่อหน่วย หม้อแปลงไฟฟ้า	
ชื่อเรื่องหรือชื่องาน แม่เหล็กและการเหนี่ยวนำ		
สาระสำคัญ วงจรแม่เหล็ก คือ เส้นทางหรือแนวที่เส้นแรงแม่เหล็กส่วนใหญ่ไหลวนผ่าน เมื่อให้กระแส ไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำที่เป็นเส้นตรงจะทำให้กำเนิดเส้นแรงแม่เหล็กล้อมรอบตัวนำในทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้าการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นภายในแกนเหล็ก เรื่องที่จะศึกษา - แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กของแท่งเหล็ก - แม่เหล็กไฟฟ้า - วงจรแม่เหล็ก จุดประสงค์การเรียนรู้ - อธิบายแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กของแท่งเหล็กได้ - อธิบายแม่เหล็กไฟฟ้าได้ - อธิบายวงจรแม่เหล็กได้ - มีพัฒนาการคุณธรรม จริยธรรม ค่านิยม และคุณลักษณะอันพึงประสงค์ ที่ผู้เรียนสามารถสังเกตเห็นได้ในด้านความมีมนุษยสัมพันธ์ ความมีวินัย ความรับผิดชอบ ความเชื่อมั่นในตนเอง ความสนใจใฝ่รู้ ความรักสามัคคี ความกตัญญูต่อเวที		

หน่วยที่ 1

เครื่องกลไฟฟ้า 1

1. แม่เหล็กและการเหนี่ยวนำ

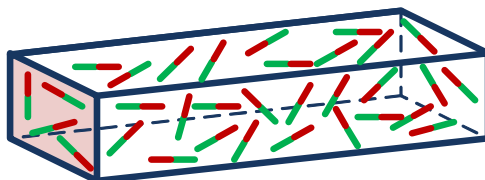
อำนาจแม่เหล็กไม่สามารถมองเห็นด้วยตาซึ่งเปรียบเทียบกับกระแสถึงแม้ว่าจะมีอนุภาคมากแต่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาอำนาจแม่เหล็กก็เช่นเดียวกันเรามองไม่เห็นแต่สามารถรู้ได้ด้วยความรู้สึกาอำนาจแม่เหล็กวิ่งออกจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่งคุณสมบัติอันหนึ่งของเส้นแรงแม่เหล็กคือเส้นแรงแม่เหล็กแต่ละเส้นจะผลักรันจะมีเส้นแรงตัดกันหรือรวมกันเป็นเส้นเดียวและไม่มีฉนวนใดในโลกที่กั้นเส้นแรงแม่เหล็กได้ เส้นแรงแม่เหล็กจะวิ่งผ่านวัตถุได้ทุกชนิดซึ่งแตกต่างกันตรงที่วัตถุบางชนิดเส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้ยากและบางชนิดเส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้ง่าย ซึ่งวัตถุที่เส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้ยากแสดงว่าวัตถุนั้นเฉื่อยเส้นแรงแม่เหล็กจะเดินในทางที่มีความต้านทานแม่เหล็กต่ำและเนื่องจากอากาศมีความต้านทานแม่เหล็กสูงกว่าเหล็กดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะเดินทางผ่านเหล็กได้ง่ายกว่าอากาศ ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กในเหล็กมีมากกว่าในอากาศ

1.1 แม่เหล็ก (Magnet)

1.1.1 แม่เหล็ก คือ แท่งเหล็กที่สามารถดูดเหล็กได้

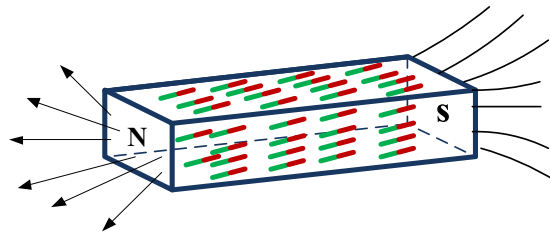
1. เหล็ก เป็นสารแม่เหล็ก (magnetic substance)

2. สารแม่เหล็กทุกชนิด มีโมเลกุลทุกโมเลกุลเป็นแม่เหล็กในตัวเองอยู่แล้วด้วยกันทั้งนั้นที่อยู่ในสภาพเป็นกลาง ไม่แสดงอำนาจแม่เหล็กออกมาให้เห็น ก็เนื่องจากโมเลกุลเหล่านี้ไม่ได้เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบเรียบร้อย แต่จะจับคู่กันเป็นกลุ่มๆ เรียกว่า “Closed magnetic chine” กล่าวคือขั้วเหนือมีได้ชี้ที่เหนือและขั้วใต้มีได้ชี้ที่ใต้



รูปที่ 1-1 โมเลกุลของสารแม่เหล็กจับคู่กันเป็นกลุ่มๆ
(ไม่ได้เรียงกันอย่างเป็นระเบียบเรียบร้อย)

3. สารแม่เหล็กจะเป็นแม่เหล็กได้ก็ต่อเมื่อทำให้โมเลกุลเหล่านี้เกิดการเรียงตัวกันขึ้น ขั้วเหนือชี้ขั้วเหนือ และขั้วใต้ชี้ขั้วใต้

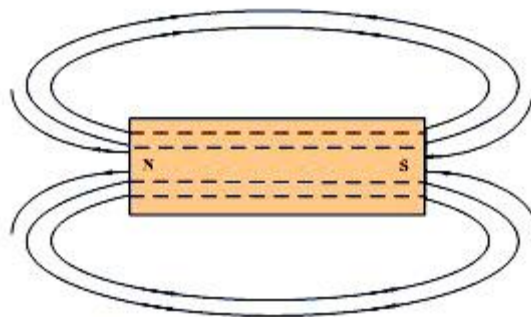


รูปที่ 1-2 สารแม่เหล็กจะเป็นแม่เหล็กก็ต่อเมื่อทำให้โมเลกุลเกิดการเรียงตัว (ขั้วเหนือชี้เหนือ และขั้วใต้ชี้ใต้)

4. การทำสารแม่เหล็กให้เป็นแม่เหล็กด้วยการให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดที่พันอยู่บนแกนเหล็ก เรียกแม่เหล็กลักษณะนี้ว่า แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnet)

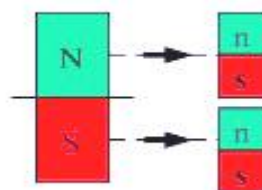
1.1.2 สนามแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็ก (magnetic field) คือ บริเวณรอบๆแท่งแม่เหล็กที่ครอบคลุมไปด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก หรือบริเวณที่มีเส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านนั่นเอง



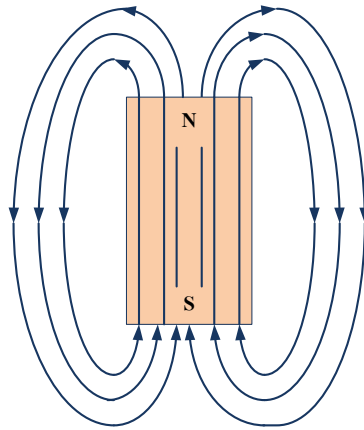
รูปที่ 1-3 สนามแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก

1. แท่งแม่เหล็ก (bar magnet) ประกอบด้วยขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว (1คู่เสมอ) คือ ขั้วเหนือ (N) และขั้วใต้ (S)



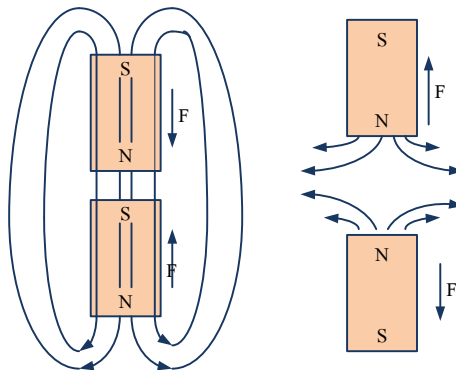
รูปที่ 1-4 แท่งแม่เหล็กประกอบด้วยขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว (1คู่ขั้ว) เสมอ

2. เมื่อตัดแบ่งแท่งแม่เหล็กออกเป็นส่วนๆ แท่งแม่เหล็กจะเป็นแท่งแม่เหล็กเล็กๆ ประกอบด้วย ขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว (1 คู่ขั้ว) เสมอเช่นเดียวกับ ดังรูปที่ 1-4
3. เส้นแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก เป็นเส้นตรงพุ่งออกจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ และจากขั้วใต้ พุ่งย้อนกลับภายในแท่งมายังขั้วเหนือ ดังรูปที่ 1-3 และ 1-5



รูปที่ 1-5 สนามแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก

4. แท่งแม่เหล็กที่ขั้วเหมือนกันจะผลักกัน และขั้วต่างกันจะดูดกัน



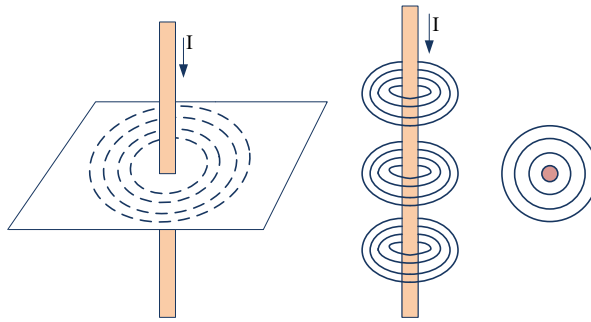
รูปที่ 1-6 แท่งแม่เหล็กที่ขั้วเหมือนกันจะผลักกัน และขั้วต่างกันจะดูดกัน

5. เส้นแรงแม่เหล็กมีคุณสมบัติเป็นเส้นตรง ดังนั้น การดูดและการผลักกันของแท่งแม่เหล็กก็คือการที่เส้นแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กเป็นเส้นตรง (เส้นที่สั้นที่สุดนั่นเอง)

1.2 แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnet)

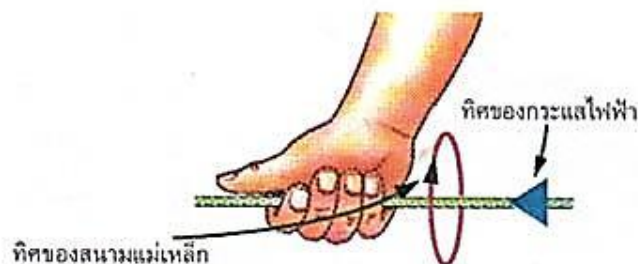
1.2.1 สนามแม่เหล็กของตัวนำเส้นตรง

เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำที่เป็นเส้นตรงจะทำให้กำเนิดสนามแม่เหล็กที่ล้อมรอบตัวนำทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้านั้น



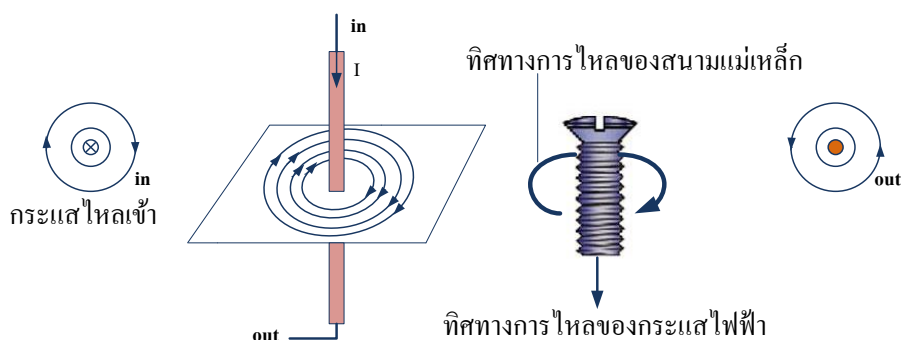
รูปที่ 1-7 สนามแม่เหล็กของตัวนำเส้นตรงที่ให้กระแสไฟไหลผ่าน

1. กฎหัดแม่มือขวา ให้กำตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านด้วยมือขวา (รูปที่ 1-8) นิ้วหัวแม่มือแทนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในตัวนำนิ้วชี้ที่เลื้อยจะเป็นทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่ล้อมรอบตัวนำนั้น



รูปที่ 1-8 สนามแม่เหล็กของตัวนำเส้นตรงที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตามกฎหัดแม่มือขวา

2. กฎมือขวาของสกรู ให้เคลื่อนที่สกรูที่มีเกลียวไปทางขวาไปข้างหน้าตามทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในตัวนำ ทิศทางการหมุนของเกลียวจะเป็นทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ล้อมรอบตัวนำนั้น



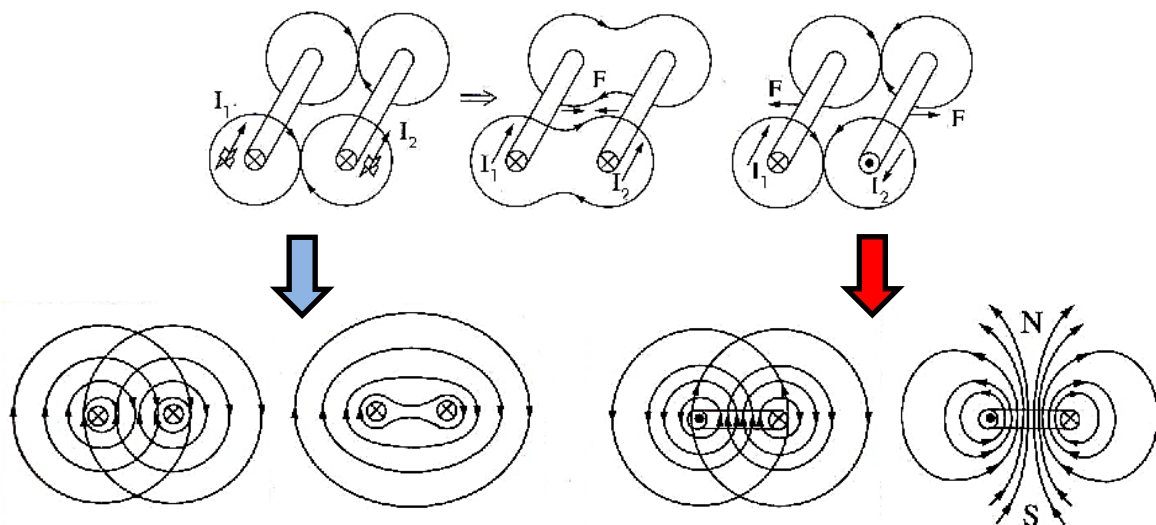
⊗ กระแสไฟฟ้าไหลเข้า (in)

⊙ กระแสไฟฟ้าไหลออก (out)

รูปที่ 1-9 สนามแม่เหล็กของตัวนำเส้นตรงที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตามกฎมือขวาของสกรู

1.2.2 สนามแม่เหล็กของตัวนำที่วางไว้ใกล้กัน

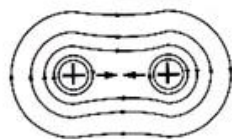
1. ตัวนำสองเส้นที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลทางเดียวกัน เส้นแรงแม่เหล็กที่ล้อมรอบตัวนำทั้งสองจะทำให้มีแรงดูดตัวนำเข้าหากัน ดังรูปที่ 1-10



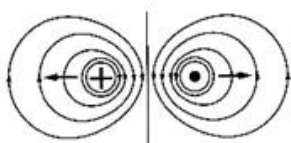
รูปที่ 1-10 ตัวนำ (เส้นตรง) สองเส้นที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เมื่อนำมาวางไว้ใกล้กันจะให้แรงดูดและแรงผลักต่อกัน

2. ตัวนำสองเส้นที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลสวนทางกัน เส้นแรงแม่เหล็กที่ล้อมรอบตัวนำทั้งสองจะทำให้มีแรงผลักตัวนำออกจากกัน ดังรูปที่ 1-10

ตัวนำ 2 เส้น (ตัวนำ) ที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เมื่อนำมาวางไว้ใกล้กันจะให้แรงดูดและแรงผลักกันดังนี้



1. กระแสไหลทางเดียวกัน จะให้แรงดูดตัวนำเข้าหากัน



2. กระแสไหลสวนทางกัน จะให้แรงผลักตัวนำออกจากกัน

1.2.3 แรงดูดและแรงผลักต่อกันระหว่างตัวนำ

แรงดูดและแรงผลักต่อกันระหว่างตัวนำทั้งสองที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

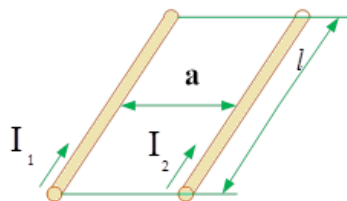
$$F = 2 \times 10^{-7} \times I_1 \times I_2 \times \frac{l}{a} \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

เมื่อ F = แรงดูดและแรงผลักต่อกันระหว่างตัวนำ (N)

I_1 และ I_2 = กระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำทั้งสอง (A)

l = ความยาวตัวนำ (m)

a = ระยะห่างระหว่างตัวนำทั้งสอง (m)

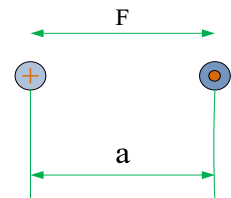


ตัวอย่างที่ 1-1 สายส่งไฟฟ้ากระแสตรง 2 สาย ยาว 500 เมตร ระยะห่างระหว่างสาย 2.5 เมตร ถ้าจ่ายสายโหลดด้วยกระแส 1,000 แอมแปร์ จะทำให้แรงดูดหรือแรงผลักต่อกันระหว่างสายเท่าใด

วิธีทำ กำหนดให้ $I_1 = I_2 = 1000(A)$

$$l = 500 \text{ (m)}$$

$$a = 2.5 \text{ (m)}$$

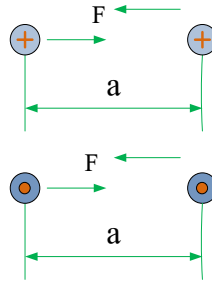


สายส่งทั้งสองจะให้แรงผลักต่อกันตามสมการ (1.1)

$$\begin{aligned} F &= 2 \times 10^{-7} \times I_1 \times I_2 \times \frac{l}{a} \\ &= 2 \times 10^{-7} \times 1000 \times 1000 \times \frac{500}{2.5} \\ &= 40 \text{ N} \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 1-2 ถ้าต้องการให้มีแรงผลักต่อกันระหว่างสายไฟทั้งสองเส้นของระบบสายส่งตามตัวอย่างที่ 1-1 จำนวน 100 นิวตัน

- (1) สามารถส่งกระแสไฟฟ้าไปจ่ายโหลดได้ที่แอมแปร์
- (2) ความยาวของระบบสายส่ง
- (3) ระยะห่างของระบบสายส่งทั้งสอง



วิธีทำ (1) กำหนดให้

$$F = 100 \quad (\text{N})$$

$$I_1 = I_2 = \quad (\text{A})$$

$$l = 500 \text{ (m)}, a = 2.5 \quad (\text{m})$$

$$\therefore F = 2 \times 10^{-7} \times I_1 \times I_2 \times \frac{l}{a}$$

$$\therefore I_1 = I_2 = \left(\frac{100 \times 2.5}{2 \times 10^{-7} \times 500} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= 1581 \text{ A}$$

$$= 1.58 \text{ kA}$$

ดังนั้น ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง 2 สาย ยาว 500 เมตร ที่จ่ายโหลดด้วยกระแสจำนวน 1.58 (kA) จะให้แรงผลักต่อระหว่างสายจำนวน 100 นิวตัน เมื่อวางสายห่างกัน 2.5 เมตร

(2) กำหนดให้

$$F = 100 \text{ (N)}, I_1 = I_2 = 1000 \text{ (A)}$$

$$a = 2.5 \text{ (m)}, l = ? \quad (\text{m})$$

$$\therefore F = 2 \times 10^{-7} \times I_1 \times I_2 \times \frac{l}{a} \quad (\text{N})$$

$$\begin{aligned}
 \therefore l &= \frac{F \times a}{2 \times 10^{-7} \times I_1 \times I_2} \\
 &= \frac{100 \times 2.5}{2 \times 10^{-7} \times 1000 \times 1000} \\
 &= 1250 \text{ m} \\
 &= 1.25 \text{ km}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น เมื่อต้องการส่งกระแสไฟฟ้า 1000 (A) ไปจ่ายโหลดในระยะทาง 1250 เมตร ด้วยระบบไฟฟ้า กระแสตรง 2 สาย ระยะห่างระหว่างสายส่ง 2.5 เมตร จะให้แรงผลักต่อกันระหว่างสายจำนวน 100 นิวตัน

(3) กำหนดให้

$$F = 100 \text{ (N)}, I_1 = I_2 = 1000 \quad (\text{A})$$

$$a = ? \text{ (m)}, l = 500 \quad (\text{m})$$

$$F = 2 \times 10^{-7} \times I_1 \times I_2 \times \frac{l}{a} \quad (\text{N})$$

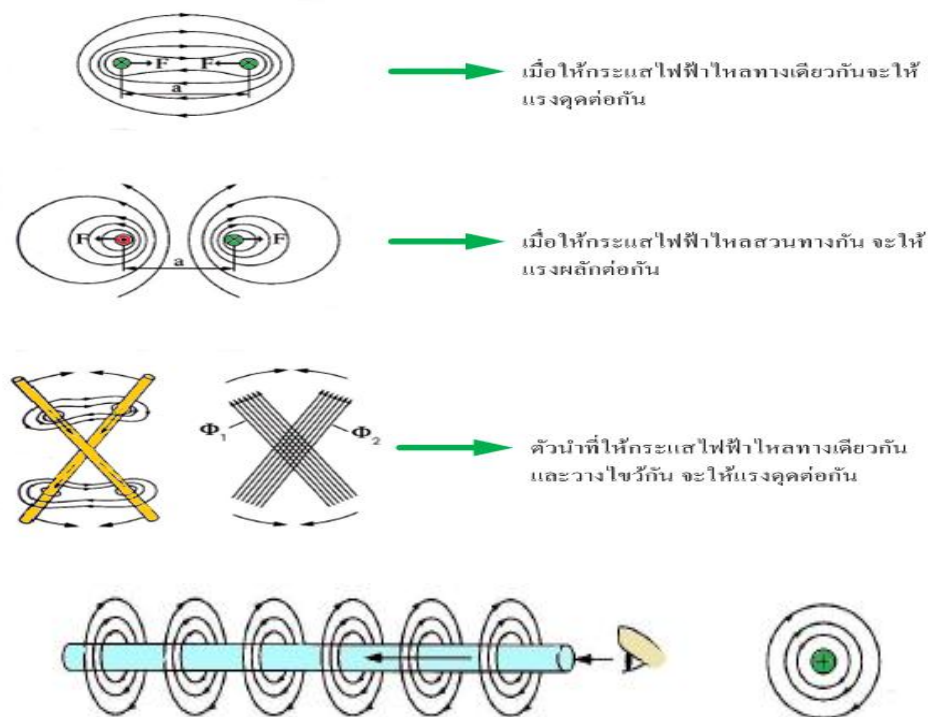
$$\begin{aligned}
 a &= 2 \times 10^{-7} \times I_1 \times I_2 \times \frac{l}{a} \\
 &= 2 \times 10^{-7} \times 1000 \times 1000 \times \frac{500}{100} \\
 &= 1.0 \text{ m.}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น เมื่อต้องการส่งกระแสไฟฟ้า 1000 (A) ไปจ่ายโหลดด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรง 2 สาย ยาว 500 เมตร ให้มีแรงผลักต่อกันระหว่างคู่สาย 100 นิวตัน ต้องวางสายทั้งสองให้ห่างกัน 1.0 เมตร

ตัวอย่างที่ 1-3 แท่งบัสบาร์ (bus bar) ที่ใช้เป็นศูนย์รวมจ่ายพลังงานไฟฟ้าในตู้สวิตช์บอร์ดตู้หนึ่ง แต่ละแท่งยาว 10 เมตร วางห่างกัน 10 เซนติเมตร ถ้ากำหนดให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านแต่ละแท่ง 1000 แอมแปร์ ในสภาวะปกติ และ 100,000 แอมแปร์ ชั่วขณะที่ ลัดวงจร จงคำนวณ:

- (1) แรงกระทำต่อกันระหว่างแท่งบัสบาร์ ขณะส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าตามปกติ (สภาวะปกติ)
- (2) แรงกระทำต่อกันระหว่างแท่งบัสบาร์ ขณะลัดวงจร

วิธีทำ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในแท่งบัสบาร์จะให้แรงดูด และแรงผลักต่อกันเช่นเดียวกับตัวนำเส้นตรง ดังนี้



รูปที่ 1-11 เส้นแรงแม่เหล็กที่ล้อมรอบตัวนำเส้นตรงเมื่อให้กระแสไหลผ่าน

(1) กำหนดให้

$$l = 10 \quad (\text{m}), \quad a = 10 \quad (\text{cm}) = 0.1 \quad (\text{m})$$

$$I_1 = I_2 = 1000 \quad (\text{A})$$

$$F = \quad (\text{N})$$

แรงดูดและแรงผลักต่อกันระหว่างตัวนำที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน คำนวณได้ตามสมการ (1.1)

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \times \frac{1}{a} \times I_1 \times I_2 = 2 \times 10^{-7} \times I_1 \times I_2 \times \frac{1}{a} \quad \dots\dots\dots(1.1)$$

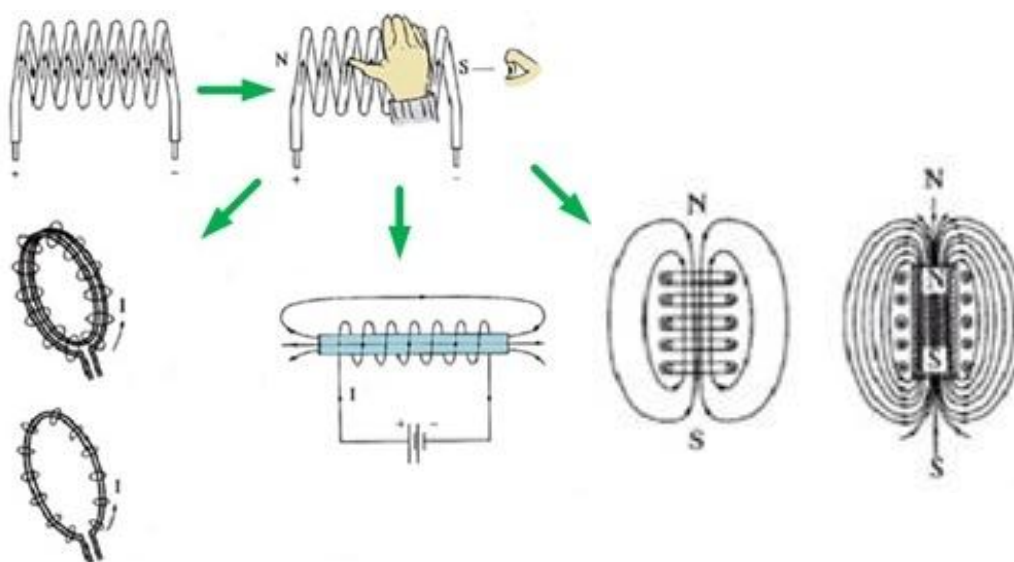
$$F = 2 \times 10^{-7} \times 1000 \times 1000 \times \frac{1}{0.1} \quad (\text{N}) = 20 \quad (\text{N})$$

(2) ขณะลัดวงจร กระแสไฟฟ้าชั่วขณะ $I_1 = I_2 = 100000 \text{ (A)}$

$$\begin{aligned}
 F &= 2 \times 10^{-7} \times I_1 \times I_2 \times \frac{l}{a} \\
 &= 2 \times 10^{-7} \times 100000 \times 100000 \times \frac{10}{0.1} \\
 &= 2 \times 10^4 \text{ N} \\
 &= 20 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

1.2.4 สนามแม่เหล็กของขดลวดโซลินอยด์

เมื่อต่อปลายทั้งสองของขดลวดโซลินอยด์ (Solenoid) : ตัวนำเส้นตรงที่นำมาพันรอบแท่งวัสดุกลมหลายๆ รอบทำให้เป็นขด เรียกว่าขดลวดโซลินอยด์หรือขดลวด เข้ากับแหล่งต้นกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ขณะที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด จะให้กำเนิดเส้นแรงแม่เหล็กล้อมรอบขดลวดในทิศทางที่เป็นไปตามกฎห้วม่มือขวา ดังรูป 1-12 ต่อไปนี้



รูปที่ 1-12 สนามแม่เหล็กที่ล้อมขดลวดโซลินอยด์

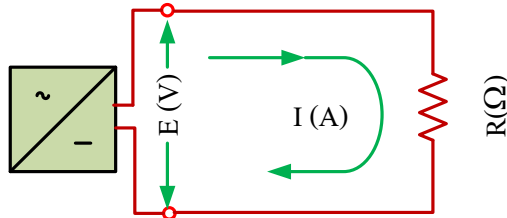
การหาทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ล้อมรอบขดลวด

ให้กำมือแทนแกนของขดลวดด้วยมือขวา กำหนดให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในทิศทางของการพันขดลวดด้วยนิ้วมือทั้งสี่ แล้วกางนิ้วหัวแม่มือตั้งฉากออก เพื่อแทนทิศทางของสนามแม่เหล็กหรือเส้นแรงแม่เหล็ก

- ขดลวดทางด้านที่เส้นแรงแม่เหล็กพุ่งออกเป็นหัวเหนือ: N
- ขดลวดทางด้านที่เส้นแรงแม่เหล็กพุ่งเข้าเป็นหัวใต้: S

1.3 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuits)

วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuits)



เมื่อต่อตัวต้านทานเข้ากับแหล่งต้นกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจะมีกระแสไหลในวงจรไฟฟ้าได้ตามกฎของโอห์ม

$$I = \frac{E}{R} \quad \text{.....(1.2)}$$

เมื่อ I = กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรไฟฟ้า (A)

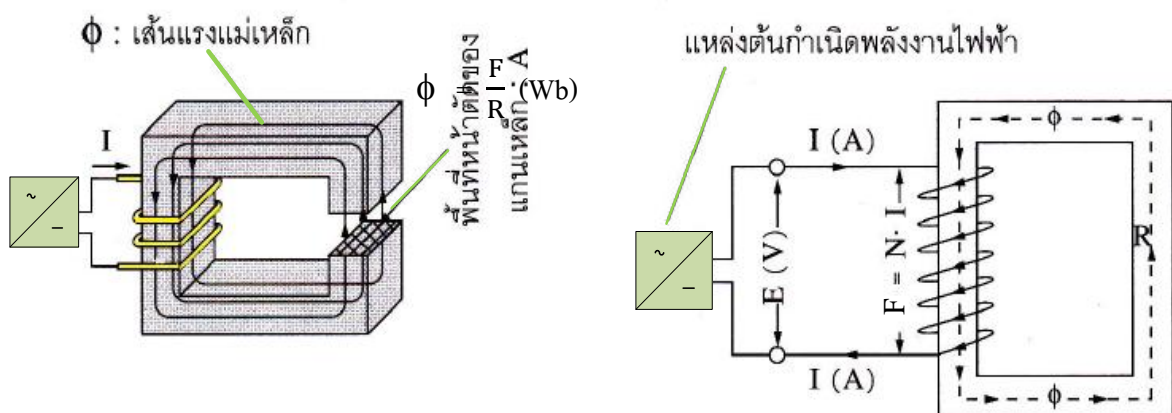
E = แรงเคลื่อนที่ (แรงดัน) ไฟฟ้าของวงจร (V)

R = ความต้านทานของวงจรไฟฟ้า (Ω)

$$E = I \times R \quad (V) \quad \text{.....(1.3)}$$

$$R = \frac{E}{I} \quad (\Omega) \quad \text{.....(1.4)}$$

วงจรแม่เหล็ก เมื่อต่อขดลวดที่พันอยู่บนแกนเหล็กเข้ากับแหล่งต้นกำเนิดพลังงานไฟฟ้า กระแสตรงที่ไหลในขดลวดจะให้กำเนิดเส้นแรงแม่เหล็กไหลในแกนเหล็กตามทิศทางที่หาได้ตามกฎห้วมมือขวาและคำนวณได้ตามกฎของโอห์มเช่นเดียวกับวงจรไฟฟ้า



รูปที่ 1-13 วงจรแม่เหล็กที่ประกอบด้วยขดลวดพันบนแกนเหล็กเมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน)

R = ความต้านทานของวงจรแม่เหล็ก (magnetic resistance : reluctance) หน่วย (Ampere turns/Weber: At/Wb = A/Vs)

$$F = \phi \times R \quad \text{.....(1.6)}$$

$$R = \frac{F}{\phi} \quad \text{.....(1.7)}$$

1.3.1 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก

แรงเคลื่อนแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กเปรียบเหมือนแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก โดยมีค่าคำนวณได้ตามสมการ (1.8) ต่อไปนี้

$$F = N \times I \quad \text{.....(1.8)}$$

เมื่อ F = เป็นค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (At, แอมป์แปร์-รอบ)
 N = จำนวนรอบของขดลวดที่พันบนแกนเหล็ก หน่วย รอบ (turns)
 I = กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด หน่วย แอมป์ (Amprers : A)

ตัวอย่างที่ 1.4 เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 2(5) A ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กจำนวน 150 (500) รอบ ที่พันอยู่บนแกนเหล็ก จะให้กำเนิดแรงดันแม่เหล็กที่เป็นตัวผลักดันให้เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านแกนเหล็ก (วงจรแม่เหล็ก) จำนวนเท่าใด

วิธีทำ	(1) กำหนดให้	N	=	150	(t)
		I	=	2	(A)
		F	=	?	(At)
	ตามสมการ (1.8)	F	=	$N \times I = 150 \times 2 = 300$	(At)
	(2) กำหนดให้	N	=	500	(รอบ)
		I	=	5	(A)
		F	=	?	(At)
	ตามสมการ (1.8)	F	=	$N \times I = 500 \times 5 = 2500$	(At)

1.3.2 ความต้านทานของวงจรแม่เหล็ก

ความต้านทานของวงจรแม่เหล็กต่อการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็ก คำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu \times A} \quad \text{..... (1.9)}$$

เมื่อ $\mathcal{R}$ = ความต้านทานของวงจรแม่เหล็ก (Reluctance) หน่วย (At/Wb)
 l = ความยาวของวงจรแม่เหล็ก (แกนเหล็ก) หน่วย เมตร (meters: m)
 μ = ความซาบซึมได้ของวงจรแม่เหล็ก (permeability) หน่วย (H/m)
 A = พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กหน่วยตารางเมตร (m²)

1.3.3 ความซาบซึมได้ (Permeability: μ)

ความซาบซึมได้ หมายถึง สมรรถนะของวัสดุแม่เหล็กใดๆ ในการเหนี่ยวนำแม่เหล็กให้เส้นแรงแม่เหล็กซึมแทรกผ่านวงจรแม่เหล็กนั้นๆ หรือความสามารถในการให้เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านแกนวัสดุแม่เหล็กนั้นๆ ได้จำนวนเท่าใดนั่นเอง หน่วย (Wb / Am) คำนวณได้ตามสมการ (1.10) และ (1.12) ต่อไปนี้

$$\mu = \frac{l}{\mathcal{R}} \times A \quad (\text{Henry / meter ; H/m}) \quad \text{.....(1.10)}$$

ให้ μ_0 (mu-nought) = permeability of free space : เป็นค่าความซาบซึมได้คงที่ของวัสดุที่ไม่ใช่วัสดุแม่เหล็ก (nonmagnetic materials) ได้แก่ อากาศ ไม้ กระจก ฯลฯ

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} = 1.257 \times 10^{-6} \quad (\text{H/m}) \quad \text{.....(1.11)}$$

μ_r = ความซาบซึมได้สัมพัทธ์ (relative permeability) ของวัสดุแม่เหล็กใดๆ หมายถึง สมรรถนะของวัสดุแม่เหล็กนั้นๆ ในการนำแม่เหล็กให้เส้นแรงแม่เหล็กซึมแทรกผ่านวงจรแม่เหล็กได้เป็นกี่เท่าของอากาศ หรือความสามารถของวัสดุแม่เหล็กใดๆ ที่ให้เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านในวงจรแม่เหล็กนั้นๆ ได้เป็นกี่เท่าของอากาศ ตัวอย่างเช่น เหล็กบริสุทธิ์ดังตารางรูปที่ 1.13 มีค่า $\mu_r = 25000 - 250000$ แสดงว่าเหล็กบริสุทธิ์นี้สามารถให้เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านได้เป็น 25000 – 250000 เท่าของอากาศนั่นเอง

ดังนั้น ค่าความซาบซึมได้ : μ จึงคำนวณได้ตามสมการไฟฟ้าต่อไปนี้

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r = 4\pi \times 10^{-7} \times \mu_r = 1.257 \times 10^{-6} \times \mu_r \quad (\text{H/m}) \quad \text{.....1.12}$$

วัสดุที่ไม่ใช่วัสดุแม่เหล็ก (non-magnetic materials) ได้แก่ ไม้ กระดาษ อากาศ ฯลฯ จะให้ค่า $\mu_r = 1$

อากาศ และสุญญากาศ : $\mu_r = 1$

ส่วนวัสดุแม่เหล็ก (magnetic materials) จะให้ค่า μ_r เริ่มต้นต่ำสุดที่ 4 ถึงสูงสุดที่ 300000 ตามตารางรูปที่ 1-14 ต่อไปนี้

วัสดุแม่เหล็ก	μ_r ค่าต่ำสุด	μ_r ค่าสูงสุด
เหล็กคาร์บอนต่ำ	250	6000
เหล็กบริสุทธิ์	25000	250000
เหล็กหล่อ	70	600
แผ่นเหล็กหม้อแปลง	500	7000
ซูเปอร์มัลลอย (Super Malloy : 79% Ni, Rest Mn)	100000	300000
เหล็กกล้า (1% C)	40	7000
อัลนิโค (Alnico : 12% Al, 20% Ni, 5% Co, 63% Fe)	4	7300

รูปที่ 1-14 ตารางแสดงความค่าความซาบซึมได้สัมพัทธ์ (μ_r) ของวัสดุแม่เหล็ก

1.3.4 สมการไฟฟ้าของความต้านทานวงจรแม่เหล็ก

ความต้านทานวงจรแม่เหล็กตามสมการ (1.9) เขียนใหม่ได้ตามสมการ (1.13) และ (1.14) ต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 \mathcal{R} &= \frac{l}{\mu \times A} = \frac{l}{\mu_0 \times \mu_r \times A} \\
 &= \frac{l}{4 \times \pi \times 10^{-7} \times \mu_r \times A} \\
 &= \frac{l}{1.257 \times 10^{-6} \times \mu_r \times A} = \frac{0.8 \times 10^6 \times l}{\mu_r \times A} \quad (\text{At/Wb}) \\
 \mathcal{R} &= \frac{0.8 \times 10^6 \times l}{\mu_r \times A} \quad (\text{At/Wb}) \dots\dots\dots(1.13)
 \end{aligned}$$

$$\text{แกนอากาศ (air core } \mu_r = 1) : \mathcal{R} = \frac{0.8 \times 10^6 \times l}{\mu_r \times A} \quad (\text{At/Wb}) \dots\dots\dots(1.14)$$

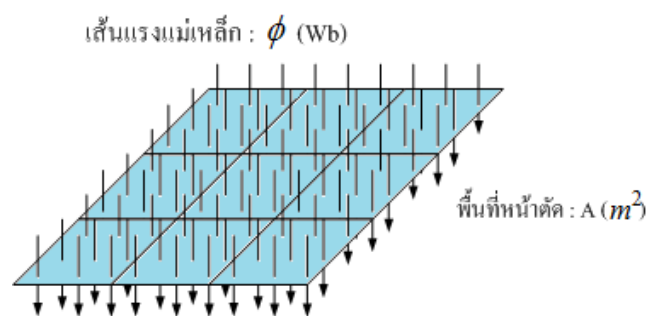
1.3.5 เส้นแรงแม่เหล็กที่ให้งำเนดในวงจรมแม่เหล็ก

คำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ตามสมการ (1.5)} \quad \phi &= \frac{F}{\mathcal{R}} & (\text{Wb}) \\
 &= \frac{\frac{N \times I}{l}}{\mu \times A} & (\text{Wb}) \\
 &= \frac{\mu \times A \times N \times I}{l} & (\text{Wb}) \\
 &= \frac{\mu_0 \times \mu_r \times A \times N \times I}{l} & (\text{Wb}) \\
 &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \times \mu_r \times A \times N \times I}{l} & (\text{Wb}) \\
 &= \frac{1.26 \times 10^{-6} \times \mu_r \times A \times N \times I}{l} & (\text{Wb}) \\
 \phi &= \frac{\mu_0 \times \mu_r \times A \times N \times I}{l} & (\text{Wb}) \dots\dots\dots (1.15) \\
 \phi &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \times \mu_r \times A \times N \times I}{l} & (\text{Wb}) \dots\dots\dots (1.16) \\
 \phi &= \frac{1.26 \times 10^{-6} \times \mu_r \times A \times N \times I}{l} & (\text{Wb}) \dots\dots\dots (1.17)
 \end{aligned}$$

1.3.6 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux Density)

ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก หมายถึง จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กในวงจรมแม่เหล็กใดๆ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัด เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ B มีหน่วยเป็น $(\text{Wb} / \text{m}^2 = \text{Wbm}^{-2} = \text{Tesla} = \text{T})$



รูปที่ 1-15 แสดงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กต่อหนึ่งพื้นที่หน้าตัด

$$\begin{aligned}
 1 \quad (\text{Wb/m}^2) &= 1(\text{T}) = 10^{-4} \quad (\text{Wb/cm}^2) \dots\dots\dots (1.18) \\
 B &= \frac{\phi}{A} \quad (\text{Wb/m}^2) \dots\dots\dots (1.19)
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 1.5 เมื่อพันขดลวดจำนวน 400 รอบ ให้เรียงกันบนแกนวงแหวนไม้ ขนาดเส้นรอบวงเฉลี่ย 400 มิลลิเมตร และพื้นที่หน้าตัดแกน 5 ตารางเซนติเมตร ถ้าให้กระแสไฟฟ้าจำนวน 6 แอมแปร์ไหลผ่านขดลวด จงคำนวณ

- (1) ความต้านทานของวงจรแม่เหล็ก
- (2) เส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้กำเนิดในวงจรแม่เหล็ก
- (3) ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็ก

วิธีทำ (1) ความต้านทานของวงจรแม่เหล็ก : $\mathcal{R}$ (AT / Wb)

$$\text{กำหนดให้} \quad l = 400 \text{ (mm)} = 400 \times 10^{-3} \text{ (m)}$$

$$A = 5 \text{ (cm}^2\text{)} = 5 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$$

$$\begin{aligned} \text{ตามสมการที่ (1.14)} \quad \mathcal{R} &= 0.8 \times 10^6 \frac{1}{A} && \text{(At/Wb)} \\ &= 0.8 \times 10^6 \frac{400 \times 10^{-3}}{5 \times 10^{-4}} && \text{(At/Wb)} \\ &= 640 \times 10^6 && \text{(At/Wb)} \end{aligned}$$

(2) เส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้กำเนิดในวงจรแม่เหล็ก : ϕ (Wb)

$$\begin{aligned} \text{กำหนดให้} \quad N &= 400 \text{ (รอบ) และ } I = 6 \text{ (A)} \\ R &= 640 \times 10^6 \text{ (A / Wb)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ตามสมการ (1.15)} \quad \phi &= \frac{F}{R} = \frac{N \times I}{R} \\ &= \frac{400 \times 6}{640 \times 10^6} \\ &= 3.75 \times 10^{-6} \text{ (Wb)} = 3.75 \text{ (}\mu\text{Wb)} \end{aligned}$$

(3) ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก : B (Wb/m² = T)

$$\text{กำหนดให้} \quad \phi = 3.75 \times 10^{-6} \text{ (Wb)}$$

$$A = 5 \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$\begin{aligned} \text{ตามสมการ (1.19)} \quad B &= \frac{\phi}{A} = \frac{3.75 \times 10^{-6}}{5 \times 10^{-4}} \\ &= 7.5 \times 10^{-3} \text{ (Wb/m}^2\text{)} \\ \therefore B &= 0.75 \times 10^{-6} \text{ (Wb/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

1. 3.7 ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Field Intensity หรือ Magnetizing Force)

ความเข้มของสนามแม่เหล็ก หมายถึง จำนวนแรงดันแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวของวงจรแม่เหล็กที่ป้อนให้กับวัสดุแม่เหล็กใดๆ เมื่อต้องการทำให้วัสดุแม่เหล็กนั้นๆ เป็นแม่เหล็ก มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ตามจำนวนที่ต้องการ

หรือในการทำวัสดุแม่เหล็กใดๆ ให้เป็นแม่เหล็กมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตามจำนวนที่ต้องการ จะต้องป้อนแรงดันแม่เหล็กให้แก่วัสดุแม่เหล็กนั้นๆ จำนวนเท่าใดต่อหนึ่งหน่วยความยาวนั่นเอง เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ H มีหน่วย (At / m)

เมื่อให้

H = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (At / m)

F = แรงดันแม่เหล็ก (At)

N = จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)

I = กระแสไฟฟ้าที่ให้ไหลผ่านขดลวด (A)

l = ความยาวของวงจรแม่เหล็ก (วัสดุแม่เหล็ก) หน่วย (m)

$l = \pi d$

d = เส้นผ่าศูนย์กลาง

$$H = \frac{F}{l} = \frac{N \times I}{l} \quad (\text{At/m}) \dots \dots \dots (1.20)$$

1.3.8 สมการไฟฟ้าของความขบขันได้

ความขบขันได้ของวงจรแม่เหล็กใดๆ จะแปรผันโดยตรงกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กและ 1 / ความเข้มของสนามแม่เหล็ก ตามสมการต่อไปนี้

$$H = \frac{F}{l} \quad \dots \dots \dots [\text{ตามสมการ (1.20)}]$$

และ

$$\mu = \frac{1}{R \times A} \quad \dots \dots \dots [\text{ตามสมการ (1.10)}]$$

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{1}{F/\phi \times A} = \frac{1 \times \phi}{F \times A} = \frac{\phi}{A} \times \frac{1}{F} \\ &= \frac{\phi}{A} \times \frac{1}{F} = \frac{\phi}{A} \div \frac{A}{F} = \frac{B}{H} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } \mu = \frac{B}{H} \quad \text{และ} \quad B = \mu \times H = \mu_0 \times \mu_r \times H$$

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (\text{Wb/Am}) \dots \dots \dots (1.21)$$

$$B = \mu \times H = \mu_0 \times \mu_r \times H \quad (\text{Wb/m}^2 : \text{T}) \dots\dots\dots(1.22)$$

$$\therefore \mu_r = \frac{B}{\mu_0 \times H} \dots\dots\dots(1.23)$$

ตัวอย่างที่ 1-6 เมื่อพันขดลวดสนามแม่เหล็กจำนวน 480 รอบ ให้เรียงกันบนแกนวงแหวนเหล็ก ขนาดพื้นที่หน้าตัด $8 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$ และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 38.2 (cm) ถ้าให้กระแสไฟฟ้าจำนวน 2 (A) ไหลผ่านขดลวด จะให้กำเนิดเส้นแรงแม่เหล็กจำนวน $80 \times 10^{-3} \text{ (Wb)}$ จงคำนวณ

- (1) ความต้านทานของแกนเหล็ก (วงจรมแม่เหล็ก)
- (2) ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก
- (3) ความเข้มของสนามแม่เหล็ก
- (4) ความซาบซึ่มได้สัมพัทธ์ของแกนเหล็ก

วิธีทำ (1) ความต้านทานของแกนเหล็ก $\mathcal{R} \text{ (At/Wb)}$

กำหนดให้	N	$=$	480	(t)
	I	$=$	2 (A) ; $d = 38.2$	(cm)
	ϕ	$=$	80×10^{-3}	(Wb)

ตามสมการ (1.17) :

$$\mathcal{R} = \frac{F}{\phi} = \frac{N \times I}{\phi}$$

$$= \frac{480 \times 2}{80 \times 10^{-3}} = 12000 \quad (\text{At/Wb})$$

(2) ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก: $B \text{ (Wb/m}^2 : \text{T)}$

กำหนดให้	ϕ	$=$	80×10^{-3}	(Wb)
	A	$=$	80×10^{-4}	(m ²)

ตามสมการ (1.19)

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{80 \times 10^{-3}}{80 \times 10^{-4}}$$

$$= 100 \quad (\text{Wb/m}^2)$$

(3) ความเข้มของสนามแม่เหล็ก : H (At/m)

$$\text{กำหนดให้ } N = 480 \quad (\text{รอบ})$$

$$I = 2 \quad (\text{A})$$

$$l = 38.2 \times 10^{-2} \times \pi \quad (\text{m})$$

$$\begin{aligned} \text{ตามสมการ (1.17): } H &= \frac{F}{l} = \frac{N \times I}{l} ; l = \pi d \\ &= \frac{480 \times 2}{38.2 \times 10^{-2} \times \pi} \\ &= 800 \quad (\text{At/m}) \end{aligned}$$

(4) ความซาบซึ่มได้ของแกนเหล็ก: μ_r (Wb / Am)

$$1. \text{ ตามสมการ (1.23): } \mu_r = \frac{B}{\mu_0 \times H} \quad (\text{Wb/Am})$$

$$\text{เมื่อกำหนดให้ } B = 100 \quad (\text{T})$$

$$\mu_0 = 1.256 \times 10^{-6} \quad (\text{Wb/Am})$$

$$H = 800 \quad (\text{At/m})$$

$$\mu_r = \frac{100}{1.256 \times 10^{-6} \times 800} = 99522 \approx 100000$$

$$2. \text{ ตามสมการ (1.13): } \mathfrak{R} = \frac{0.8 \times 10^6 \times l}{\mu_r \times A} \quad (\text{At/Wb})$$

$$\mu_r = \frac{0.8 \times 10^6 \times l}{\mathfrak{R} \times A}$$

$$\text{เมื่อ } l = 38.2 \times 10^{-2} \times \pi \quad (\text{m})$$

$$\mathfrak{R} = 12000 \quad (\text{At/Wb})$$

$$A = 8 \times 10^{-2} \quad (\text{m})$$

$$\mu_r = \frac{0.8 \times 10^6 \times 38.2 \times 10^{-2} \times \pi}{1200 \times 8 \times 10^{-4}} = 100007 \approx 100000$$

ตัวอย่างที่ 1-7 วงจรแม่เหล็กตามตัวอย่างที่ 1-5 จงคำนวณ

- (1) ความเข้มของสนามแม่เหล็ก
- (2) ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก
- (3) เส้นแรงแม่เหล็ก

วิธีทำ (1) ความเข้มของสนามแม่เหล็ก : H (At/m)

เมื่อกำหนดให้ N = จำนวนรอบขดลวด = 400 (รอบ)
 l = กระแสไฟฟ้าที่ให้ไหลผ่านขดลวด = 6 (A)
 $= 400 \text{ (mm)} = 0.4 \text{ (m)}$

$$H = \frac{F}{l} = \frac{N \times I}{l} = \frac{400 \times 6}{0.4}$$

$$= 6000 \quad (\text{At/m})$$

(2) ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก: B (T)

ตามสมการ (1.22) $B = \mu_0 \times \mu_r \times H$

เนื่องจากวงจรแม่เหล็กเป็นแกนอากาศ : $\mu_r = 1$ (Wb/Am)

$$B = \mu_0 \times H \left(\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} : \text{T} \right) \quad \dots\dots\dots(1.24)$$

$$B = 1.256 \cdot 10^{-2} \cdot 6000$$

$$= 7.5 \cdot 10^{-3}$$

(3) เส้นแรงแม่เหล็ก: ϕ (Wb)

ตามสมการ (1.19) $B = \phi / A$

$$\therefore \phi = B \times A \text{ (Wb)}$$

เมื่อ $B = 7.5 \times 10^{-3} \text{ (T)}$

และ $A = \text{พื้นที่หน้าตัดแกน} = 5 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$

ดังนั้น $\phi = 7.5 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^{-4}$
 $= 3.75 \times 10^{-6} \quad (\text{Wb})$
 $= 3.75 \quad (\mu\text{Wb})$

ตัวอย่างที่ 1-8 วงจรแม่เหล็กเอกรูปที่ประกอบด้วยแกนเหล็กอ่อน (mild steel) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 400 mm^2 ยาว 500 mm จงคำนวณ

(1) จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้กำเนิดในแกนเหล็กอ่อนเนื่องจากจำนวนแรงดันแม่เหล็ก (m.m.f.) ของวงจรแม่เหล็ก 500 (A) เมื่อแกนเหล็กมีความซาบซึมได้ สัมพัทธ์ $\mu_r = 1100$

(2) จำนวนแรงดันแม่เหล็ก (m.m.f.) ของวงจรแม่เหล็กที่ต้องการให้กำเนิดเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก 0.66 (mWb) เมื่อ $\mu_r = 330$

วิธีทำ กำหนดให้ พื้นที่หน้าตัดวงจรแม่เหล็ก $A = 400 \text{ (mm}^2\text{)}$
 และความยาวแกนเหล็ก $l = 500 \text{ (mm)}$

(1) เส้นแรงแม่เหล็ก:

$$\begin{aligned} \text{ตามสมการ (1.17)} \quad \phi &= \frac{1.26 \times 10^{-6} \times \mu_r \times N \times I \times A}{l} \\ \text{เมื่อ } N \times I &= 500 & (\text{At}) \\ \mu_r &= 1100 \\ \phi &= \frac{1.26 \times 10^{-6} \times 1100 \times 500 \times 400 \times 10^{-6}}{500 \times 10^{-3}} \\ &= 554 \quad (\mu\text{Wb}) \end{aligned}$$

(2) แรงดันแม่เหล็ก

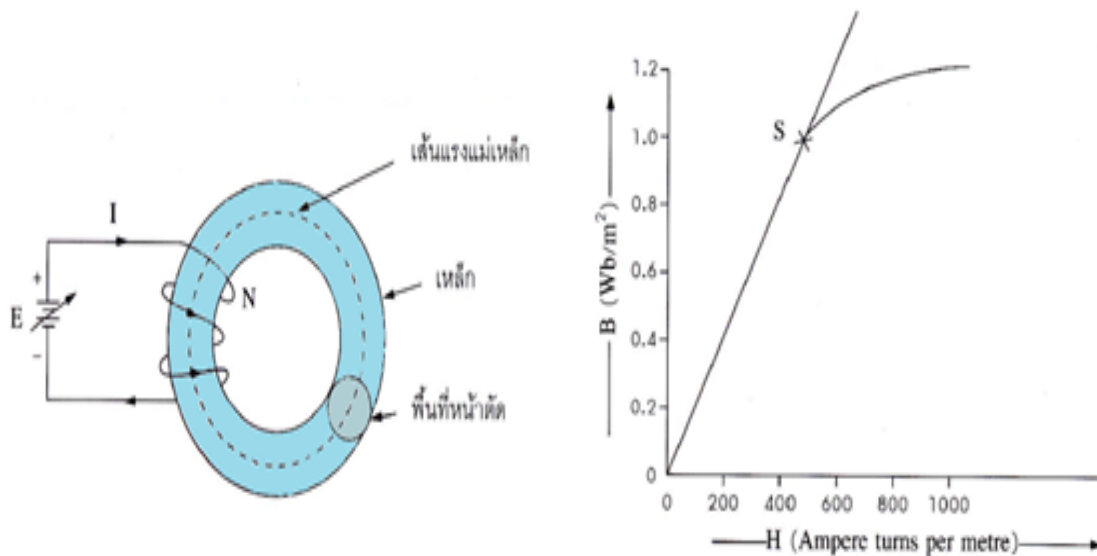
$$\begin{aligned} \text{ตามสมการ (1.17): } \phi &= \frac{1.26 \times 10^{-6} \times \mu_r \times N \times I \times A}{l} \\ N \times I &= \frac{\phi \times l}{1.26 \times 10^{-6} \times \mu_r \times A} \\ \text{เมื่อ } \mu_r &= 330, \quad \phi = 0.66 \text{ (mWb)} \\ \text{ดังนั้น } N \times I &= \frac{0.66 \times 10^{-3} \times 500 \times 10^{-3}}{1.26 \times 10^{-6} \times 300 \times 500 \times 400 \times 10^{-6}} = 1984 \quad (\text{At}) \end{aligned}$$

(2) แรงดันแม่เหล็ก

$$\begin{aligned} \text{ตามสมการ (1.17): } \phi &= \frac{1.26 \times 10^{-6} \times \mu_r \times N \times I \times A}{l} \\ N \times I &= \frac{\phi \times l}{1.26 \times 10^{-6} \times \mu_r \times A} \\ \text{เมื่อ } \mu_r &= 330, \quad \phi = 0.66 \text{ (mWb)} \\ \text{ดังนั้น } N \times I &= \frac{0.66 \times 10^{-3} \times 500 \times 10^{-3}}{1.26 \times 10^{-6} \times 300 \times 500 \times 400 \times 10^{-6}} = 1984 \quad (\text{At}) \end{aligned}$$

1.3.9 กราฟอ้อมตัวของวงจรแม่เหล็ก (Saturation หรือ Magnetization Curve: B-H Curve)

เส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้กำเนิดในวงจรแม่เหล็กจะแปรผันโดยตรงกับกระแสไฟฟ้า ที่ให้ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็ก กล่าวคือ เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า แรงดันแม่เหล็ก (m.m.f.) จะเพิ่มขึ้นส่งผลให้เส้นแรงแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กเพิ่มขึ้นด้วย ความสัมพันธ์ต่อกันระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ [ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก : B (T)] กับแรงดันแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวของวงจรแม่เหล็ก [ความเข้มของสนามแม่เหล็ก : H (A/m)] เขียนเป็นกราฟจะได้กราฟ B-H Curve ตามรูปที่ 1-16 ต่อไปนี้

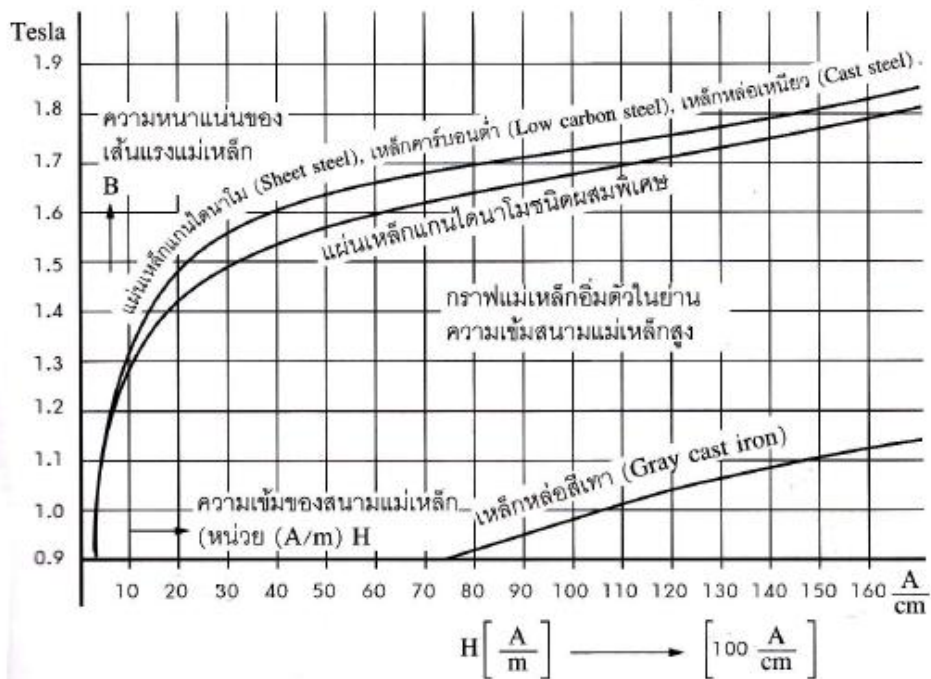
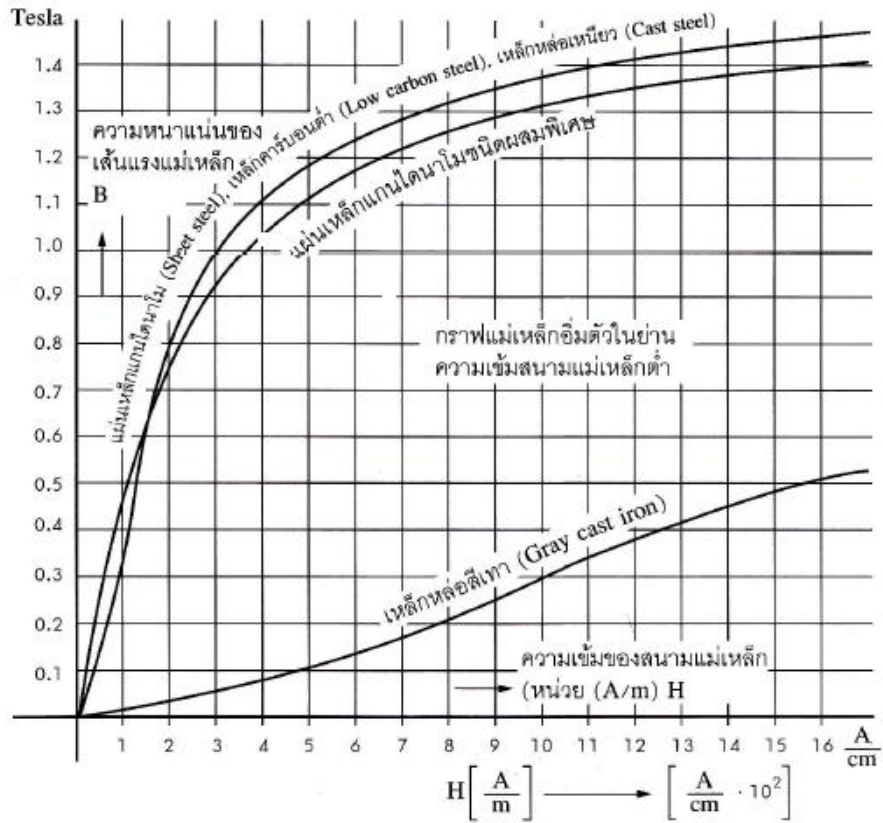


H (At/m)	200	400	500	600	800	1000
B (Wb/m ²)	0.4	0.8	1.00	1.09	1.17	1.19

รูปที่ 1-16 B-H Curve ของวงจรแม่เหล็ก หรือกราฟอ้อมตัวของวงจรแม่เหล็ก

ด้วยเหตุที่การเพิ่มขึ้นของเส้นแรงแม่เหล็ก (ในวงจรแม่เหล็ก) ตามการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้า (ในขดลวดสนามแม่เหล็ก) นั้น เป็นไปเพียงหนึ่งชั่วขณะเท่านั้น จนกระทั่งถึงจุดอ้อมตัว S แล้ว เส้นแรงแม่เหล็กจะไม่เพิ่มขึ้นอีกต่อไป (เพิ่มในอัตราที่น้อยมากๆ) ถึงแม้ว่าจะเพิ่มกระแสไฟฟ้าไปจนขดลวดไหม้ก็ตาม กราฟเริ่มต้นจะเป็นเส้นตรง ภายหลังจากจุด S แล้ว กราฟจะบิดเบน โค้งงอ หรือหักเหล็กน้อย และคงที่ตลอดไป กราฟ B-H Curve นี้ก็คือกราฟอ้อมตัว (saturation หรือ magnetization curve) ของวงจรแม่เหล็กนั่นเอง

ความสามารถในการทำวัสดุแม่เหล็กชนิดต่างๆ ของวงจรแม่เหล็กให้เป็นแม่เหล็กแสดงด้วยกราฟแม่เหล็กอ้อมตัว ดังรูป 1-17 ต่อไปนี้



รูปที่ 1-17 กราฟแม่เหล็กอิ่มตัวของวัสดุแม่เหล็กชนิดต่างๆ

$$1 \text{ At/m} = 100 \text{ At/cm}$$

ตัวอย่างที่ 1-9 ต้องการเหนี่ยวนำให้แท่งเหล็กหล่อเป็นแม่เหล็กไฟฟ้า มีขนาดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก 1.00 (T) :

(1) ต้องป้อนแรงดันแม่เหล็กให้แก่แท่งเหล็กจำนวนเท่าใดต่อหนึ่งหน่วยความยาว (ความเข้มของสนามแม่เหล็ก)

(2) ถ้าแท่งเหล็กยาว 9.5 (cm) ต้องป้อนแรงดันแม่เหล็กให้แก่วงจรแม่เหล็ก (แท่งเหล็ก) เป็นจำนวนเท่าใด

(3) ถ้าพันขดลวดสนามแม่เหล็กบนแกนเหล็ก 327 รอบ จะต้องป้อนกระแสไฟฟ้าให้ไหลในขดลวดกี่แอมแปร์

(1) ความเข้มของสนามแม่เหล็ก : H (At/m)

จาก B – H curve รูปที่ 1-17 : เหล็กหล่อ (cast iron)

$$B = 1.00 \quad (T)$$

$$H = 105 \quad (At/cm)$$

$$= 10500 \quad (At/m)$$

(2) แรงดันแม่เหล็ก : M.M.F : NI (At)

$$H = \frac{F}{l}$$

$$F = H \times l$$

เมื่อ $H = 105 \text{ (At/cm)}, \quad l = 9.5 \quad (\text{cm})$

ดังนั้น $F = H \times l = 105 \times 9.5 = 998 \quad (\text{At})$

(2) กระแสไฟฟ้าที่ให้ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็ก: I (A)

$$N \times I = 998 \quad (\text{At})$$

$$I = \frac{998}{N}$$

เมื่อ $N = 327 \quad (\text{รอบ})$

ดังนั้น $I = \frac{998}{327}$

$$= 3.05 \quad (A)$$

ตัวอย่างที่ 1-10 ต้องการเหนี่ยวนำให้วงจรแม่เหล็กที่ประกอบด้วยขดลวดสนามแม่เหล็กพันอยู่บนแกนวงแหวนเหล็กเหนียว ขนาดพื้นที่หน้าตัด $3.5 \text{ (cm}^2\text{)}$ มีเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก 0.49 (mWb) จงคำนวณ

- (1) ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็ก
- (2) ความเข้มของสนามแม่เหล็ก
- (3) แรงดันแม่เหล็กของวงจรแม่เหล็ก เมื่อแกนเหล็กยาว 20 (cm)
- (4) จำนวนรอบขดลวดสนามแม่เหล็ก เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดจำนวน 0.25 (A)

วิธีทำ กำหนดให้แกนวงแหวนเหล็กเหนียว (cast steel)

มีพื้นที่หน้าตัด : $A = 3.5 \text{ (cm}^2\text{)}$ และ

เส้นแรงแม่เหล็ก : $\phi = 0.46 \text{ (mWb)}$

- (1) ความหนาแน่นของเส้นแรงเหล็ก: $B \text{ (T)}$

$$B = \frac{\phi}{A}$$

$$= \frac{0.49 \times 10^{-3}}{3.5 \times 10^{-4}} = 1.4 \text{ (Wb/m}^2 \text{ : T)}$$

- (2) ความเข้มของสนามแม่เหล็ก: $H \text{ (AT/m)}$

จาก $B - H \text{ curve}$ รูปที่ 1-17 : $B = 1.4 \text{ (T)}$

$$H = 11 \text{ (A/cm)}$$

$$= \underline{1100 \text{ (A/m)}}$$

- (3) แรงดันแม่เหล็กของวงจรแม่เหล็ก: $F: N \times I \text{ (A)}$

ตามสมการ (1.20) : $H : F/l$

$$\therefore F = H \times l \text{ (At)}$$

เมื่อความยาวแกนเหล็ก : $l = 20 \text{ (cm)}$

$$\text{ดังนั้น } F = 11 \times 20 = 220 \text{ (At)}$$

(4) จำนวนรอบขดลวดสนามแม่เหล็ก: N (รอบ)

$$F = N \times I = 220 \quad (\text{At})$$

$$N = \frac{220}{I}$$

$$\text{เมื่อกระแสที่ให้ไหลในขดลวด : } I = 0.25 \quad (\text{A})$$

$$N = \frac{F}{I} = \frac{220}{0.25} = 880 \quad (\text{รอบ})$$

1.3.10 การเปรียบเทียบวงจรไฟฟ้า (Comparison Between Magnetic and Electric Circuits)

วงจรแม่เหล็กมีลักษณะคล้ายกับวงจรไฟฟ้า โดยมีส่วนที่เหมือนและส่วนที่แตกต่างกัน ดังนี้ ส่วนที่เหมือนกันระหว่างวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 1-1
ตารางที่ 1-1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างวงจรแม่เหล็กและวงจรไฟฟ้า

วงจรแม่เหล็ก	วงจรไฟฟ้า
1. เส้นแรงแม่เหล็ก $\Phi = \frac{\text{M.M.F.}}{\mathcal{R}}$	1. กระแสไฟฟ้า $I = \frac{\text{E.M.F.}}{\mathcal{R}}$
2. แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Ampere-Turn)	2. แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Volts)
3. เส้นแรงแม่เหล็ก Φ	3. กระแสไฟฟ้า I (Amperes)
4. ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก $B \text{ (Wb/m}^2\text{)}$	4. ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า $\left(\frac{\text{A}}{\text{m}^2}\right)$
5. ความต้านทานแม่เหล็ก $\mathcal{R} = \frac{1}{\mu \times A} = \frac{1}{\mu_0 \times \mu_r \times A}$	5. ความต้านทานไฟฟ้า $R = \frac{\rho l}{A}$
6. ความนำแม่เหล็ก $\left(= \frac{1}{\mathcal{R}}\right)$	6. ความนำไฟฟ้า $\left(\frac{1}{R}\right)$
7. ความต้านทานแม่เหล็กจำเพาะ (Reluctivity)	7. ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Resistivity)
8. ความนำแม่เหล็กจำเพาะ $\left(\frac{1}{\text{Reluctivity}}\right)$	8. ความนำไฟฟ้าจำเพาะ $\left(\frac{1}{\text{Resistivity}}\right)$

ส่วนที่แตกต่างระหว่างวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้า

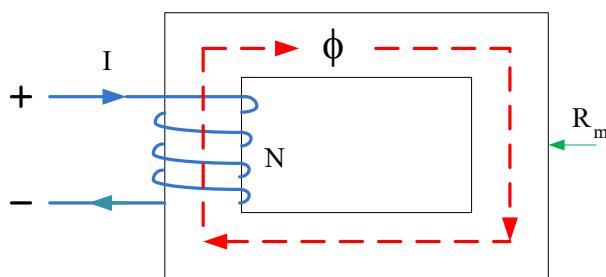
ส่วนที่แตกต่างระหว่างวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้ามีดังนี้คือ

- (1) การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กไม่เหมือนกับการไหลของกระแสไฟฟ้า
- (2) ถ้าให้อุณหภูมิตรงตัว ความต้านทานของวงจรไฟฟ้าจะคงตัว ในทางตรงข้ามความต้านทานสนามแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับเส้นแรงแม่เหล็ก
- (3) การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรที่มีผลต่อการใช้พลังงานให้หมดไป แต่ในวงจรแม่เหล็กต้องการพลังงานเพียงเพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็กในช่วงเริ่มต้นเท่านั้น

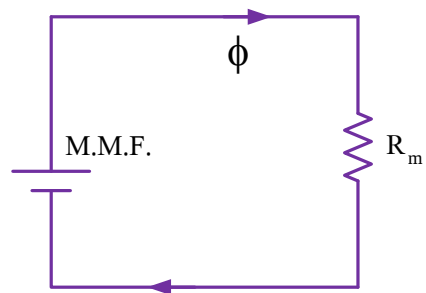
วงจรแม่เหล็กแบ่งออกเป็นดังนี้ คือ วงจรแม่เหล็กแบบอนุกรม และวงจรแม่เหล็กแบบขนาน

1.3.11 วงจรแม่เหล็กแบบอนุกรม

วงจรแม่เหล็กแบบอนุกรม หมายถึง วงจรแม่เหล็กที่มีทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่ครบวงจรเพียงเส้นทางเดียวเท่านั้น ดังแสดงในรูป 1-18 และรูปที่ 1-19



(ก) วงจรแม่เหล็ก

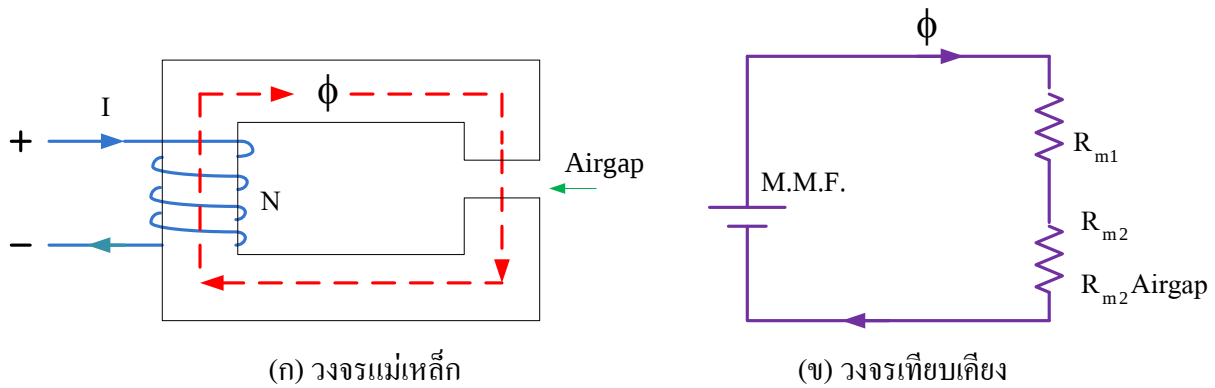


(ข) วงจรเทียบเคียง

รูปที่ 1-18 วงจรแม่เหล็กแบบไม่มีช่องว่าง

$$R_m = \frac{F}{\phi} \quad (\text{At/Wb}) \quad \dots\dots\dots(1.25)$$

$$= \frac{N \times I}{\phi} \quad (\text{At/Wb}) \quad \dots\dots\dots(1.26)$$



รูปที่ 1-19 วงจรแม่เหล็กแบบมีช่องว่าง

1. เส้นแรงแม่เหล็กในวงจรเท่ากันตลอด

$$\phi_t = \phi = \phi_1 = \phi_2 = \phi_3 \dots\dots\dots(\text{Wb})$$

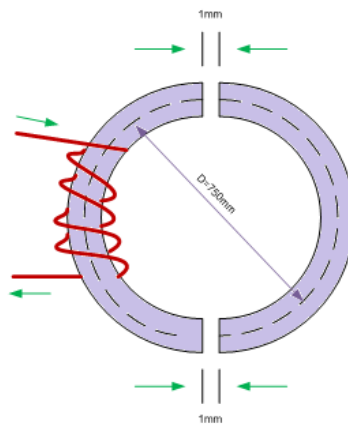
2. ความต้านทานของวงจรจะเท่ากับความต้านทาน ณ ส่วนต่างๆ ของวงจร

$$\mathfrak{R}_t = \mathfrak{R} = \mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2 + \mathfrak{R}_3 + \dots\dots\dots(\text{At/Wb})$$

3. แรงดันแม่เหล็กของวงจร (M.M.F.) จะเท่ากับผลรวมของแรงดันแม่เหล็ก ณ ส่วนต่างๆ ของวงจร

$$F_t = F = F_1 + F_2 + F_3 + \dots\dots\dots(\text{At})$$

ตัวอย่าง 1-11 จงคำนวณหา (ก) แรงเคลื่อนแม่เหล็กทุกๆจุดที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่าน (ข) แรงเคลื่อนแม่เหล็กรวม (ค) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรแม่เหล็กในแกนเหล็กเทอร์ลอยด์ซึ่งจะแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นความต้านทานจำเพาะ $\mu_r = 200$ (H/m) ส่วนที่ 2 เป็นเหล็กหล่อเหนียวมีความซึมซาบจำเพาะ $\mu_r = 1200$ (H/m) เส้นผ่าศูนย์กลางแกนเหล็กมีค่า 75 เซนติเมตร ช่องอากาศมีความกว้างช่องละ 1 มิลลิเมตร บนแกนเหล็กมีขดลวดพันอยู่ 900 รอบ ถ้า μ_0 เป็นความซึมซาบของอากาศมีค่า $4\pi \cdot 10^{-7}$ และความแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก 0.9 (Wb/m²)



วิธีทำ (ก) คำนวณหาแรงเคลื่อนแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ช่องอากาศ

$$\begin{aligned}
 F &= H l_a \\
 H &= \frac{B}{\mu_r \times \mu_0} = \frac{0.9}{1 \times 4\pi \times 10^{-7}} \\
 &= 7.16 \times 10^5 \text{ (At/M)} \\
 l_a &= 2 \times 1 \text{ (mm)} = 2 \times 10^{-3} \text{ (m)} \\
 \text{M.M.F} &= 7.16 \times 10^5 \times 2 \times 10^{-3} = 1432 \text{ (At)}
 \end{aligned}$$

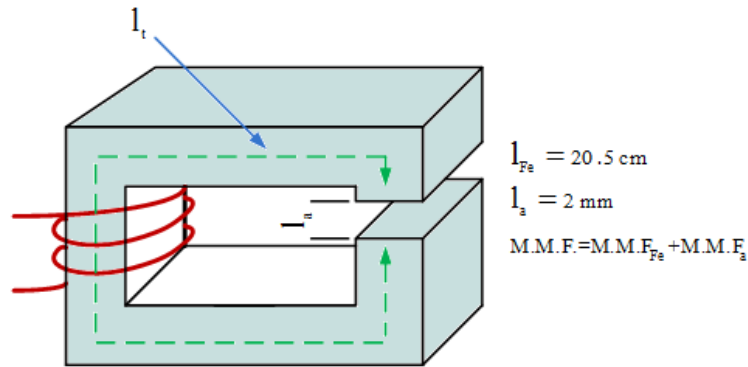
คำนวณหาแรงเคลื่อนแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่แกนเหล็กหล่อ

$$\begin{aligned}
 F &= H l \\
 H &= \frac{B}{\mu_r \times \mu_0} = \frac{0.9}{200 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 3580 \text{ (At/m)} \\
 &= 3580 \text{ (At/m)} \\
 l &= \frac{\pi D}{2} + \frac{2l_a}{2} = \frac{75 \times 10^{-2} \times \pi}{2} + 2 \times 10^{-3} = 1.17 \text{ (m)} \\
 F &= 3580 \times 1.17 = 4210.42 \text{ (At)}
 \end{aligned}$$

คำนวณหาแรงเคลื่อนแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่แกนเหล็กหล่อเหนียว

$$\begin{aligned}
 F &= H l \\
 H &= \frac{B}{\mu_r \times \mu_0} = \frac{0.9}{1200 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 597 \text{ (At/M)} \\
 l &= \frac{\pi d}{2} + \frac{2l_a}{2} = \frac{75 \times 10^{-2} \times \pi}{2} + 2 \times 10^{-3} = 1.17 \text{ (m)} \\
 F &= 597 \times 1.17 = 702.13 \text{ (At)} \\
 (1) \quad \text{ดังนั้น } F &= 1432 + 4210.42 + 702.13 = 6344.55 \text{ (At)} \\
 (2) \quad I &= \frac{F}{N} = \frac{6344.55}{900} = 7.04 \text{ (A)}
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 1-12 วงจรแม่เหล็กตามรูปประกอบด้วยช่องอากาศ (Air gap) ระหว่างแกนเหล็กยาว 2 มิลลิเมตร ถ้าแกนเหล็กยาว 20.5 เซนติเมตร พื้นที่หน้าตัด 16 ตารางเซนติเมตร และมีความยาวสัมพัทธ์ (μ) = 2000 ต้องการเหนี่ยวนำให้เส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นในแกนเหล็กจำนวน 1.1 มิลลิเวเบอร์ จะต้องให้แรงดันแม่เหล็ก (m.m.f.) แก่วงจรแม่เหล็กเท่าใด



วิธีทำ

กำหนดให้

เส้นแรงแม่เหล็ก $\phi = 1.1 \text{ (mWb)}$

ความยาวแกนเหล็ก $l_{Fe} = 20.5 \text{ (cm)}$

พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก $A = 16 \text{ (cm}^2\text{)}$

ความยาวช่องว่างอากาศ $l_a = 2 \text{ (mm)}$

ตามสมการ $F_t = F = F_1 + F_2 + F_3 + \dots$
 $F = F_{Fe} + F_a$

1. ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{1.1 \times 10^{-3}}{16 \times 10^{-4}} = 0.6875 \text{ (T)}$$

2. แรงดันแม่เหล็กในแกนเหล็ก $F_{Fe} \text{ (A)}$

ตามสมการ $B = \mu_0 \times \mu_r \times H$

$$H = \frac{B}{\mu_0 \times \mu_r} \text{ (At/m)}$$

$$H = \frac{0.6875}{4 \times \pi \times 10^{-7} \times 2000} = \frac{0.6875}{1.257 \times 10^{-6} \times 2000} = 273 \text{ (At/m)}$$

$$F_{Fe} = H \times l_{Fe} = 273 \times 20.5 \times 10^{-2} = 56 \text{ (At)}$$

3. แรงดันแม่เหล็กในช่องว่างอากาศระหว่างแกนเหล็ก F_a (A)

$$F_a = \phi \times \mathfrak{H}_a \quad (\text{At})$$

$$\mathfrak{H}_a = 0.8 \times 10^6 \times \frac{1}{A} \quad (\text{At/Wb})$$

$$F_a = 0.8 \times 10^6 \times \phi \times \frac{1}{A} \quad (\text{At})$$

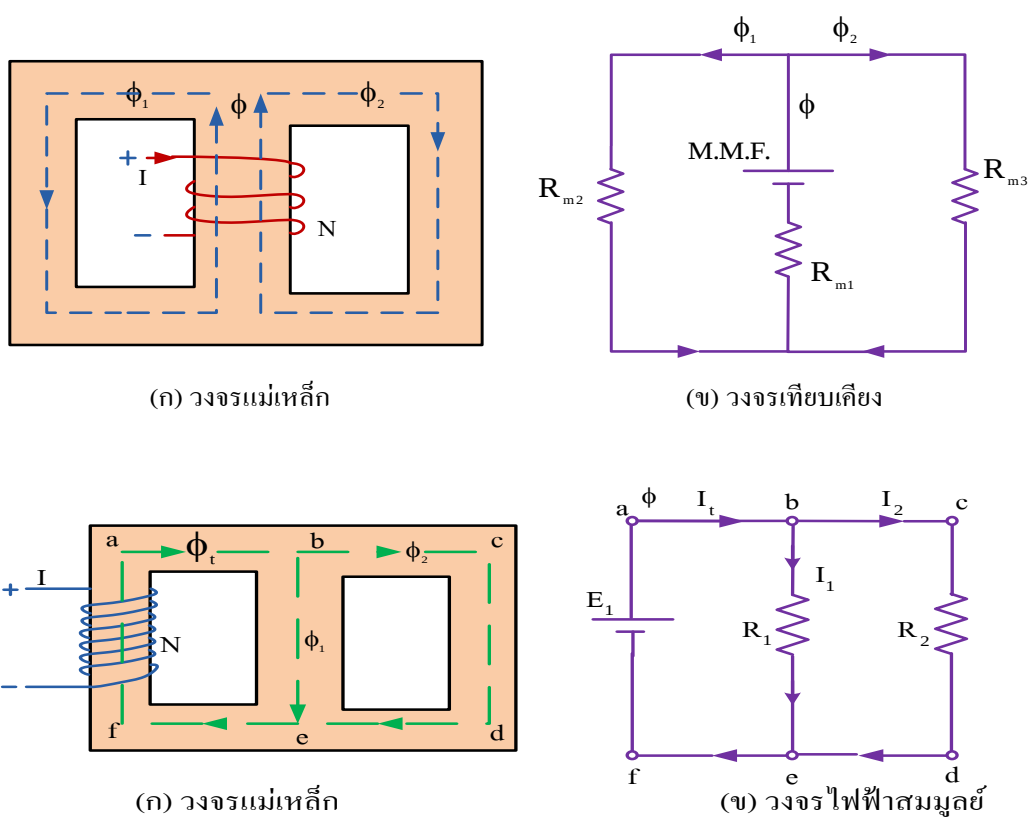
$$F_a = 0.8 \times 10^6 \times 1.1 \times 10^{-3} \times \frac{2 \times 10^{-3}}{16 \times 10^{-4}} \quad (\text{At}) = 1100 \quad (\text{At})$$

4. แรงดันแม่เหล็ก ในช่องว่างอากาศระหว่างแกนเหล็ก

$$\begin{aligned} F &= F_a + F_a \\ &= 56 + 1100 = 1156 \quad (\text{At}) \end{aligned}$$

3-12 วงจรแม่เหล็กแบบขนาน

วงจรแม่เหล็กแบบขนาน หมายถึง วงจรแม่เหล็กที่มีทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่ครบวงจรมากกว่าหนึ่งเส้นทาง ดังแสดงในรูป 1-20



รูปที่ 1-20 วงจรแม่เหล็กแบบขนาน

จากรูปที่ 1-20 จะเห็นได้ว่าขดลวดพันอยู่ที่ขากลางของแกนเหล็กซึ่งจะเป็นตัวสร้างแรงดันแม่เหล็กขึ้น และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขากลางจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนหรือสองเส้นทาง โดยเส้นทางหนึ่งจะเคลื่อนที่ไปทางซ้ายของแกนเหล็ก และอีกเส้นทางหนึ่งจะเคลื่อนที่ไปทางขวาของแกนเหล็ก สมมุติให้แกนเหล็กทั้งสองด้านนั้นมีขนาดเท่ากันและเป็นครึ่งหนึ่งของขากลาง ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เคลื่อนที่อยู่ที่ขาทั้งสองของแกนเหล็กจึงมีค่าเท่ากัน

1. เส้นแรงแม่เหล็กในวงจรจะเท่ากับผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กในวงจรย่อย

$$\phi_t = \phi = \phi_1 = \phi_2 = \phi_3 \quad (\text{Wb})$$

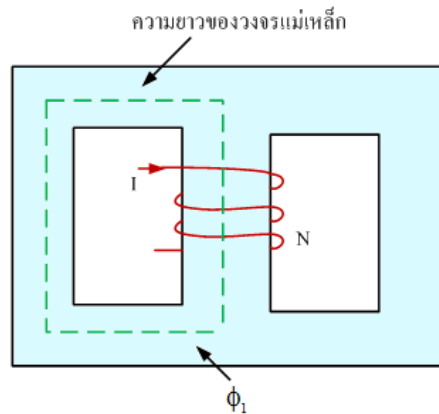
2. ความต้านทานของวงจร เท่ากับผลรวมของความต้านทานในวงจรย่อย

$$\frac{1}{\mathfrak{R}_t} = \frac{1}{\mathfrak{R}} = \frac{1}{\mathfrak{R}_1} + \frac{1}{\mathfrak{R}_2} + \frac{1}{\mathfrak{R}_3} + \dots \quad (\text{At/Wb})$$

3. แรงดันแม่เหล็กของวงจร (M.M.F.) เท่ากันโดยตลอด

$$F_t = F = F_1 + F_2 + F_3 + \dots \quad (\text{At})$$

ตัวอย่างที่ 1-13 วงจรแม่เหล็กรูป “shell type” ตามรูปที่ทำด้วยแกนเหล็กแผ่น (sheet steel) ขนาดความยาวเฉลี่ย 25 เซนติเมตร ความหนาของแกน 5 เซนติเมตร ความลึกของแกนนอก (แกนเล็ก) 3 เซนติเมตรและแกนกลาง 6 เซนติเมตร จงคำนวณหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็ก ซึ่งพันบนแกนกลางจำนวน 500 รอบ เมื่อต้องการเหนี่ยวนำให้วงจรแม่เหล็กมีเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นในวงจรจำนวน 27×10^{-4} เวเบอร์



วิธีทำ ด้วยเหตุที่วงจรแม่เหล็กประกอบด้วยวงจรย่อย 2 ส่วนมีเส้นแรงแม่เหล็กในแต่ละส่วนเท่ากันคือ

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \phi_2 = \frac{\phi}{2} \\ &= \frac{27 \times 10^{-4}}{2} \\ &= 13.5 \times 10^{-4} \text{ (Wb)}\end{aligned}$$

$$B = \frac{\phi_1}{A_1} \text{ (Wb/m}^2\text{)}$$

$$\begin{aligned}\text{เมื่อ } A_1 &= A_2 = 3 \times 5 = 15 \text{ (cm}^2\text{)} \\ &= 15 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}\end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } B = \frac{13.5 \times 10^{-4}}{15 \times 10^{-4}} = 0.9 \text{ (T)}$$

จาก B – H รูปที่ 1-17 Sheet steel

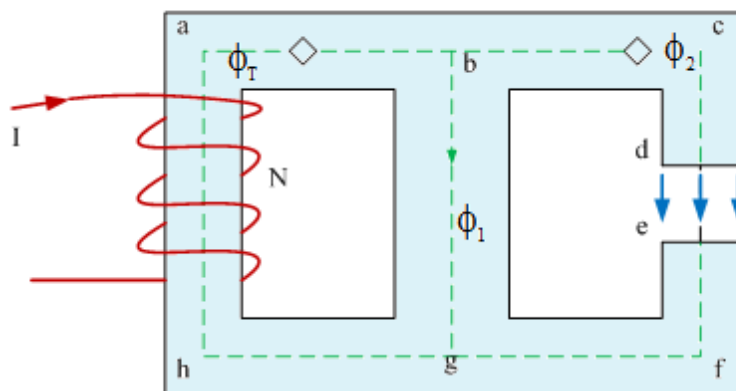
$$B = 0.9 \text{ (T)} \quad H = 300 \text{ (At/m)}$$

M.M.F ของวงจร M.M.F = HL

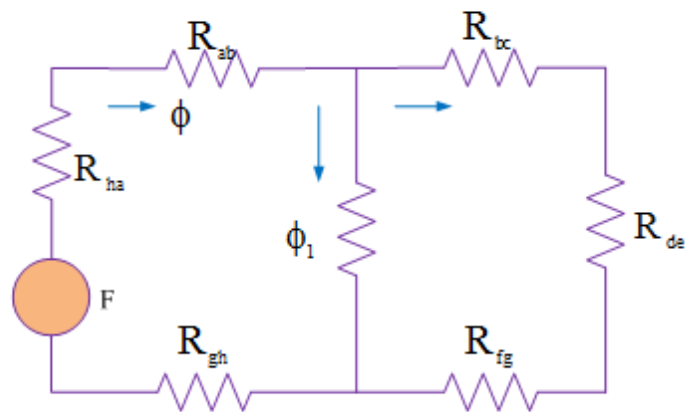
$$\text{เมื่อ } l = 25 \text{ (cm)} = 25 \times 10^{-2} \text{ m.}$$

$$\begin{aligned}
 F &= 300 \times 25 \times 10^{-2} = 75 \quad (\text{At}) \\
 NI &= 75 \quad (\text{At}) \\
 \text{เมื่อ } N &= 500 \quad (\text{N}) \\
 I &= \frac{75}{N} = 0.15 \text{ (A)} = 150 \text{ (mA)}
 \end{aligned}$$

วงจรผสม (Series – Paralell Magnetic Circuit)



(ก) วงจรแม่เหล็ก



(ข) วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าวงจรแม่เหล็ก

รูปที่ 1-21 วงจรแม่เหล็กต่อกันแบบผสม

  กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน 	ใบสาระการเรียนรู้	หน่วยที่ 1
	ชื่อวิชา เครื่องกลไฟฟ้า 1	เวลาเรียน 5 ชั่วโมง
	ชื่อหน่วย หม้อแปลงไฟฟ้า	
ชื่อเรื่องหรือชื่องาน หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว		
สาระสำคัญ หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องกลไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่ถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าจากวงจรไฟฟ้าหนึ่งไปยังวงจรไฟฟ้าหนึ่ง โดยที่ความถี่ไม่เปลี่ยนแปลง นั้นหมายความว่าหม้อแปลงไฟฟ้านั้นสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า คือ สามารถเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าได้ แต่ไม่สามารถเพิ่มหรือลดความถี่ของไฟฟ้าได้ ซึ่งหม้อแปลงจะใช้ได้กับไฟฟ้ากระแสสลับเท่านั้น เรื่องที่จะศึกษา 1. โครงสร้างและหลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า 2. หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ 3. สมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า 4. หม้อแปลงไฟฟ้าขณะที่ไม่มีโหลดและมีโหลด จุดประสงค์การเรียนรู้ 1. อธิบายโครงสร้างและหลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า 2. อธิบายหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ 3. อธิบายสมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า 4. อธิบายสภาวะหม้อแปลงไฟฟ้าขณะที่ไม่มีโหลดและมีโหลด 5. มีพัฒนาการคุณธรรม จริยธรรม ค่านิยม และคุณลักษณะอันพึงประสงค์ ที่ผู้เรียนสามารถสังเกตเห็นได้ใน ด้านความมีมนุษยสัมพันธ์ ความมีวินัย ความรับผิดชอบ ความเชื่อมั่นในตนเอง ความสนใจใฝ่รู้ ความรักสามัคคี ความกตัญญูกตเวที		

2. หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องกลไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่ถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าจากวงจรไฟฟ้าหนึ่งไปยังอีกวงจรไฟฟ้าหนึ่งโดยที่ความถี่ไม่เปลี่ยนแปลงนั่นก็หมายความว่าหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า คือ เพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าและยังสามารถเพิ่มหรือลดกระแสไฟฟ้าได้อีกด้วยแต่ไม่สามารถเพิ่มหรือลดความถี่ของไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้ได้กับไฟฟ้ากระแสสลับเท่านั้น

2.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้ามีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ

1. ขดลวด

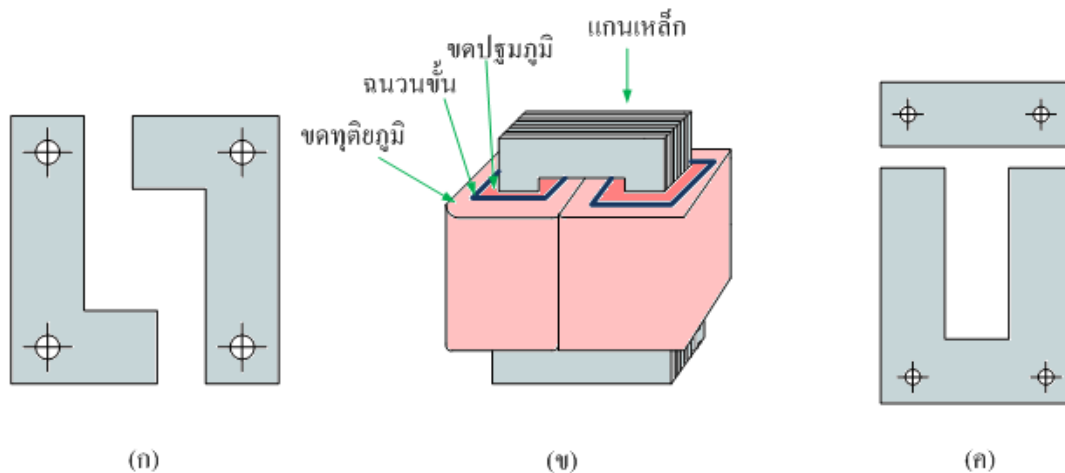
หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวดสองขด คือ ขดลวดที่ทำหน้าที่รับแรงดันไฟฟ้าเข้ามาเรียกขานว่า ขดปฐมภูมิหรือขดอินพุต ส่วนอีกขดลวดอีกขดหนึ่ง คือ ขดที่ทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าออกไปให้กับโหลด เราเรียกขานว่า ขดทุติยภูมิหรือขดเอาต์พุต

หม้อแปลงไฟฟ้าบางชนิดหรือบางตัว อาจจะมีขดลวด 3 ขด คือ มีขดลวดปฐมภูมิอยู่ 1 ขด และมีขดลวดทุติยภูมิอยู่ 2 ขด ก็ได้

2. แกนเหล็ก

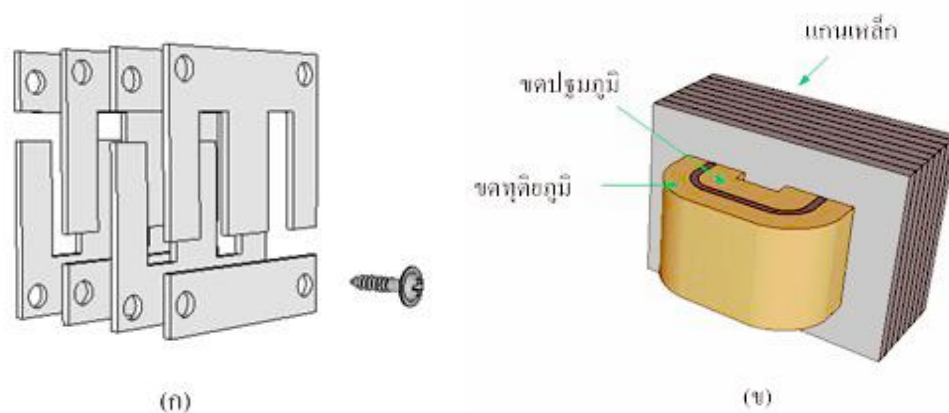
แกนเหล็กที่ใช้ทำหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ และเป็นแผ่นเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิกอน แกนเหล็กอาจจะทำเป็นแผ่นยาวรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือเป็นรูปตัว L มาเรียงเข้าด้วยกันแกนเหล็กที่เป็นแผ่นยาวสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะขดเป็นวงรอบขดลวดแกนเหล็กนี้จะมีความต้านทานแม่เหล็กต่ำแกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้าที่นิยมใช้กันทั่วไปมี 3 แบบคือ

2.1 แบบแกนหรือแบบคอรัย (Core type) แกนเหล็กแบบนี้มีลักษณะเป็นรูปตัว L สองตัวประกอบเข้าหากัน ดังแสดงในรูปที่ 2-1 (ก) และมีการพันขดลวดไว้ที่ขาของแกนเหล็กทั้งสองด้านดังรูปที่ 2-1 (ข) โดยขดลวดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิจะพันไว้แต่ละด้านของแกนเหล็ก แต่ถ้าขดลวดมีหลายขดจะต้องชั้นระหว่างขดด้วยฉนวนและพันขดลวดแรงดันไฟฟ้าไว้ชั้นในสุด นอกจากแกนเหล็กจะถูกออกแบบเป็นรูปตัว L แล้ว ยังอาจจะถูกออกแบบเป็นรูปตัว U และ I ดังแสดงรูปที่ 2-1 (ค)

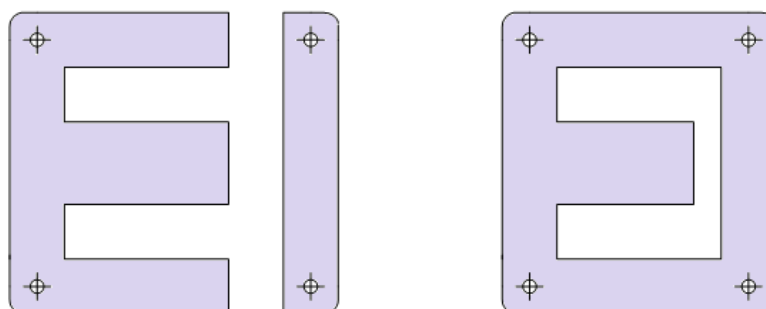


รูปที่ 2-1 แสดงลักษณะแกนเหล็กแบบแกนหรือแบบคอลล์

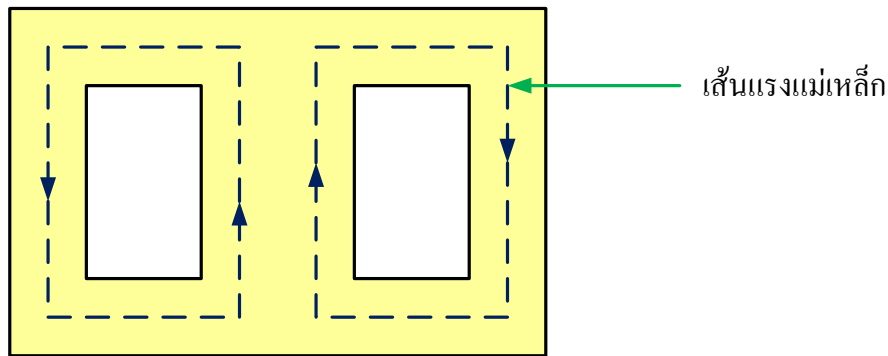
2.2 แบบเชลล์ (Shell type) แกนเหล็กแบบนี้มักมีลักษณะเป็นรูปตัว E และ I ดังนั้นจึงนิยมเรียกแกนเหล็กแบบนี้ว่าแกนเหล็กแบบ EI โดยแกนเหล็กแบบนี้จะพันขดลวดไว้ที่ขาของแกนเหล็กซึ่งขากลางของแกนเหล็กนี้จะมีขนาดเป็น 2 เท่า ของขาริมทั้ง 2 ด้าน ลักษณะแกนเหล็กและการพันขดลวดแสดงได้ดังรูปที่ 2-2 (ก) และรูปที่ 2-2 (ข) แกนเหล็กแบบนี้บางครั้งอาจถูกออกแบบเป็นรูปตัว M ดังแสดงในรูปที่ 2-3 แกนเหล็กแบบนี้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-2 แสดงลักษณะแกนเหล็กแบบเชลล์

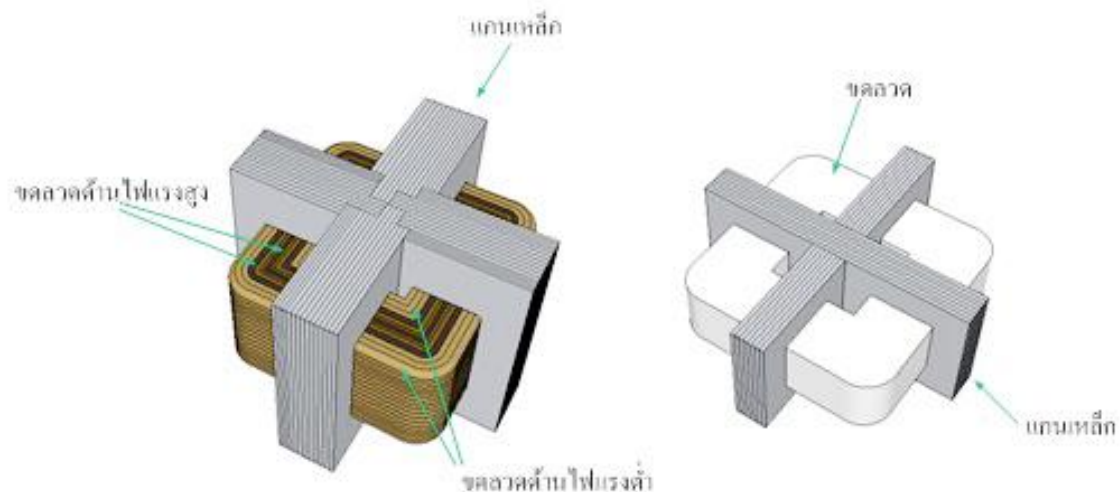


รูปที่ 2-3 แสดงลักษณะแกนเหล็กแบบเชลล์ที่ทำเป็นแบบตัว M



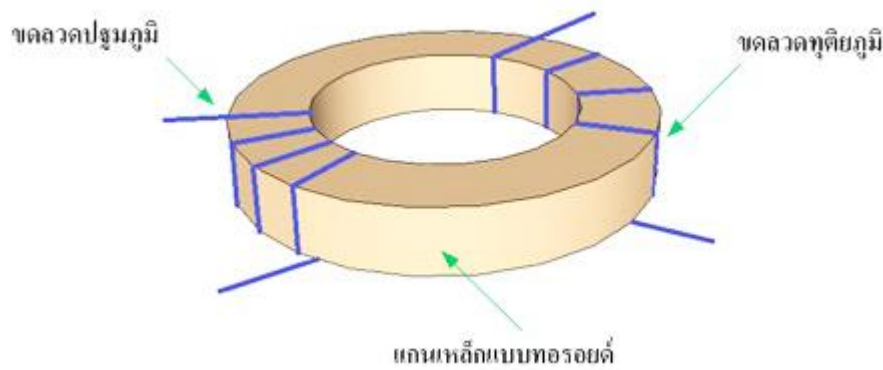
รูปที่ 2-4 แสดงลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กบนแกนเหล็ก

2.3 แบบ H แกนเหล็กแบบนี้เป็นการรวมกันระหว่างแกนเหล็กแบบคอลัมกับแบบเซลล์ หรือรวมแบบตัว L เข้ากันแบบ EI หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้แกนเหล็กแบบ H พร้อมการพันขดลวดแสดงได้ดังรูปที่ 2-5 ซึ่งเป็นรูปที่มองจากด้านบน โดยขดลวดจะจัดไว้เป็นส่วนๆ คือ ขดลวดแรงดันไฟฟ้าสูงจะถูกพันไว้ระหว่างขดลวดชุดแรงดันไฟฟ้าต่ำทั้งสองชุด และระหว่างขดลวดแต่ละชุดจะคั่นด้วยฉนวน การพันขดลวดแบบนี้จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลน้อยที่สุด ซึ่งหม้อแปลงอาจจะเป็นชนิดแปลงแรงดันไฟฟ้าขึ้น (Step-up) หรือแปลงแรงดันไฟฟ้าลง (Step-down) ก็ได้



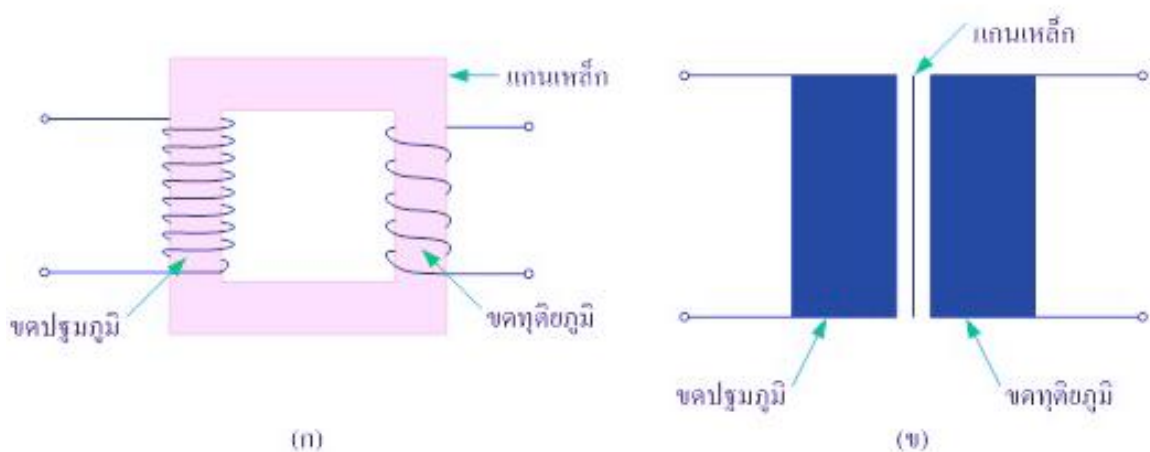
รูปที่ 2-5 แสดงลักษณะหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้แกนเหล็กแบบ H

แกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไปแล้วจะนิยมใช้แบบคอลัมและแบบเซลล์ นอกจากนี้ยังอาจใช้แกนเหล็กที่เรียกว่า ทอรอยด์ (Toroidal) ซึ่งเป็นการใช้งานพิเศษ ทอรอยด์ จะมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมากกว่าแกนเหล็กชนิดอื่น ลักษณะของแกนทอรอยด์แสดงได้ดังรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 แสดงหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้แกนแบบทอรอยด์

จากที่กล่าวมาแล้วว่าหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวด 3 ขด ซึ่งสามารถเขียนรูปพื้นฐานและสัญลักษณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2-7



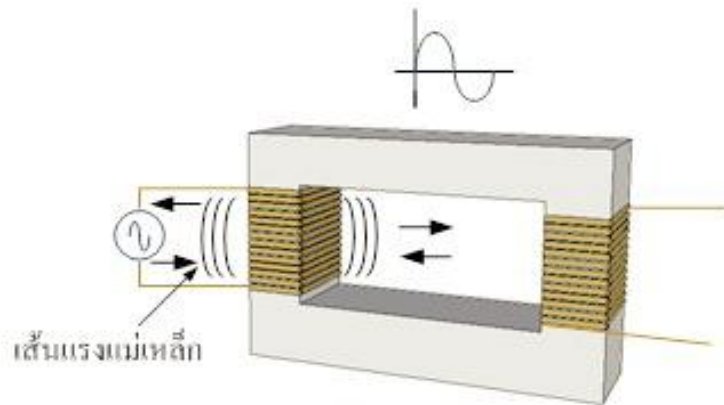
รูปที่ 2-7 แสดงรูปพื้นฐานและสัญลักษณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเบื้องต้น

เครื่องมือสิ่งหนึ่งที่มีประโยชน์มากที่สุดในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ และมีความสะดวกสบายในการที่จะเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้า โดยใช้เครื่องกลไฟฟ้าที่อยู่กับที่ เครื่องมือนั้นก็คือ หม้อแปลงไฟฟ้า เพราะหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่ไม่มีสิ่งหนึ่งสิ่งใดเคลื่อนที่เลยดังนั้นค่าบำรุงรักษาจึงต่ำและเป็นเครื่องกลไฟฟ้าชนิดเดียวที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าอาศัยหลักการพื้นฐานคือ สนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไปตัดกับตัวนำทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำนั้น

จากวงจรพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้ารูปที่ 2-8 ซึ่งประกอบด้วยขดลวด 2 ขด เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้ขดลวดปฐมภูมิ จะทำให้มีกระแสไหลในขดลวดปฐมภูมินั้น และจะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นที่ขดปฐมภูมิ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลในขดปฐมภูมิเพิ่มจากศูนย์จนกระทั่งถึงสูงสุดทางด้านบวก สนามแม่เหล็กจะแผ่กระจายรอบๆ ขดลวดเมื่อกระแสไฟฟ้าลดลงจากสูงสุดทางบวกจนกระทั่งเป็นศูนย์ สนามแม่เหล็กจะยุบตัวลง

และเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงสุดไปทางลบ สนามแม่เหล็กจะแผ่กระจายอีก แต่มีขั้วตรงข้ามกับตอนแรก สนามแม่เหล็กจะยุบตัวอีกเมื่อกระแสไฟฟ้าลดลงจากสูงสุดทางด้านลบจนกระทั่งถึงศูนย์สนามแม่เหล็กจะแผ่กระจายและยุบตัวลงจะเป็นเช่นนี้ตลอดไป และสนามแม่เหล็กที่แผ่กระจายและยุบตัวนี้จะตัดกับขดลวดปฐมภูมิทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดปฐมภูมิ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดปฐมภูมินั้น แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดปฐมภูมิเป็นการเหนี่ยวนำที่ขดลวดปฐมภูมิเอง จึงเรียกการเหนี่ยวนำนี้ว่าการเหนี่ยวนำตัวเอง (Safe induction) และแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดปฐมภูมินี้เรียกว่า แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ หรือแรงดันไฟฟ้าต่อต้าน (Counter e.m.f. or back e.m.f.) และกระแสที่ไหลในหม้อแปลงขณะไม่มีโหลดนี้ เรียกว่า กระแสกระตุ้น (Excited current) เนื่องจากขดทุติยภูมินั้นพันอยู่บนแกนเหล็กเดียวกันกับขดลวดปฐมภูมิสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดปฐมภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาจะตัดกับขดลวดทุติยภูมิดังนั้น จึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดทุติยภูมิการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดทุติยภูมินี้เรียกว่า การเหนี่ยวนำร่วม (Mutual induction) แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดทุติยภูมิจะสามารถหาได้จากอัตราส่วนของจำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิกับขดปฐมภูมิ



รูปที่ 2-8 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

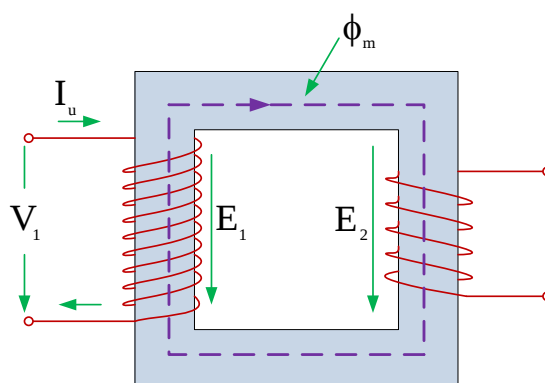
กระแสที่ไหลเข้าขดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นถูกจำกัดโดย 3 องค์ประกอบคือ

- 1.แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป
- 2.ความต้านทานของขดลวดขุดปฐมภูมิ
- 3.การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กสามารถหาได้จากอินดักทีฟแอกแตซ์ที่เกิดขึ้นที่ขดลวดปฐมภูมิเมื่อต่อเข้ากับแหล่งจ่าย

2.2 หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด เพราะว่าการสูญเสียที่น้อยที่สุดคือการสูญเสียในแกนเหล็กและในขดลวดทองแดงเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจได้ง่ายขึ้นจึงสมมติให้ หม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีการสูญเสียใดๆเลย และหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้เรียกว่า หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ หรือ หม้อแปลงในความคิด

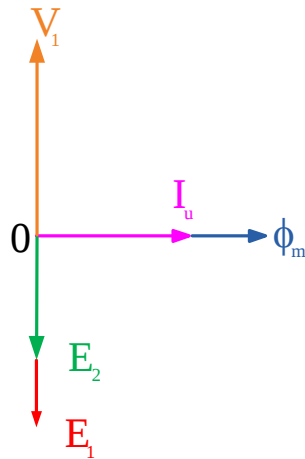
หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคตินั้นจะไม่คำนึงถึงการสูญเสียใดๆทั้งสิ้นแม้กระทั่งการสูญเสียในแกนเหล็กและเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล ดังนั้นเมื่อจ่ายไฟกระแสสลับให้กับขดลวดปฐมภูมิ จะทำให้มีกระแสไหลในขดลวดปฐมภูมิ กระแสที่ไหลนั้นเป็นเป็นกระแสที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมาเรียกกระแสนี้ว่า กระแสกระตุ้น เขียนแทนด้วย I_μ ดังแสดงในรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-9 หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ

I_μ จะล้าหลังแรงดันที่จ่ายให้กับขดปฐมภูมิอยู่ 90 องศา โดย I_μ นี้จะสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก (Φ_m) ขึ้นมา และเส้นแรงแม่เหล็กจะเชื่อมโยงระหว่างขดปฐมภูมิกับขดทุติยภูมิเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยแรงดันนี้มีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดปฐมภูมิ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นล้าหลังเส้นแรงแม่เหล็ก (Φ_m) เป็นมุม 90 องศา ซึ่งสามารถเขียนเวกเตอร์ไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2-10

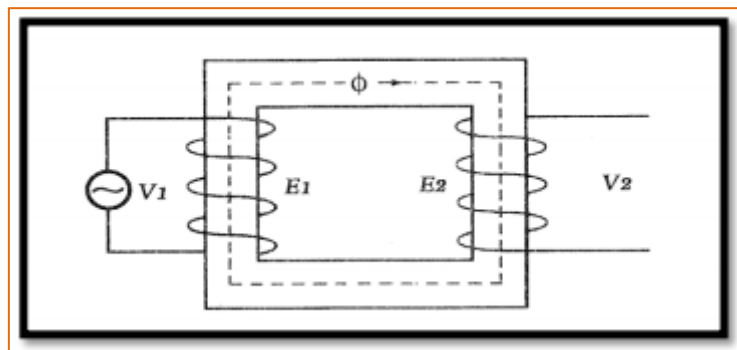
1. แรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 และ E_2 ที่มีทิศทางตรงกันข้ามในลักษณะต่อต้านกับแรงดันเมน V_1 หรือ E_1, E_2 จะ out of phase 180 องศา กับ V_1
2. กระแส I_μ ที่ซ้อนทับ Φ_m และตามหลังแรงดันเมน V_1 อยู่ 90 องศา หรือนำหน้า E_1, E_2 อยู่ 90 องศา



รูปที่ 2-10 หม้อแปลงในอุดมคติกระแสเกิดจากการสูญเสียในส่วนขดลวดแม่เหล็ก I_{μ}

V_1	=	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดปฐมภูมิ
E_1 E_2	=	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวดทั้งสอง
I_{μ}	=	กระแสที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก
ϕ_m	=	เส้นแรงแม่เหล็ก

2.2.1 การคำนวณหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติในสถานะที่ไม่มีโหลด



เมื่อ V_1 = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จ่ายเข้าทางด้านปฐมภูมิ
 V_2 = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จ่ายเข้าทางด้านทุติยภูมิ

E_1 = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดด้านปฐมภูมิ

E_2 = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดด้านทุติยภูมิ

ดังนั้นเมื่อเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติซึ่งไม่มีค่าสูญเสียใดๆ จะได้

$$V_1 = E_1$$

$$V_2 = E_2$$

อัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้า

จะได้ $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K = \text{Transformer Ratio}$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K = \text{Transformer Ratio}$$

ค่าคงที่ K เรียกว่า อัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer ratio) ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า หรืออัตราส่วนจำนวนรอบ หรืออัตราส่วนกระแสไฟฟ้า ซึ่งหมายความว่า

ถ้า $N_1 < N_2$ หรือ $K < 1$ หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้ เรียกว่า หม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มแรงดัน

ถ้า $N_1 > N_2$ หรือ $K > 1$ หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้ เรียกว่า หม้อแปลงไฟฟ้าลดแรงดัน

กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคตินั้นจะไม่มีการสูญเสียใดๆ เลย ดังนั้นกำลังขาเข้า (Input Power) จะเท่ากับ (Output Power)

หรือ

$$VA_p = VA_s$$

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

จะได้สมการเป็น $\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = K = \text{Transformer Ratio}$

จากสมการ $\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = K = \text{Transformer Ratio}$ จะได้ว่า กระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า

จะเป็นอัตราส่วนผกผันกับอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้า

ตัวอย่าง หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวขนาด 380 kVA 380/220 V, 50 Hz มีจำนวนรอบทางทุติยภูมิเท่ากับ 380 รอบ จงหา

- (1) กระแสไฟฟ้าเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดเต็มพิกัดทั้งด้านทุติยภูมิและปฐมภูมิ
- (2) จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ
- (3) ค่าสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า

วิธีทำ 1) เมื่อกระแสไฟฟ้าจ่ายโหลดเต็มพิกัดด้านปฐมภูมิ (I_1)

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{kVA \times 10^3}{V_1} \\ &= \frac{380 \times 10^3}{380} \\ &= 1,000 \text{ แอมแปร์} \end{aligned}$$

เมื่อกระแสไฟฟ้าจ่ายโหลดเต็มพิกัดด้านทุติยภูมิ (I_2)

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{kVA \times 10^3}{V_2} \\ &= \frac{380 \times 10^3}{220} \\ &= 1,727.27 \text{ แอมแปร์} \end{aligned}$$

2) จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ (N_1)

จากสมการที่ (1) จะได้

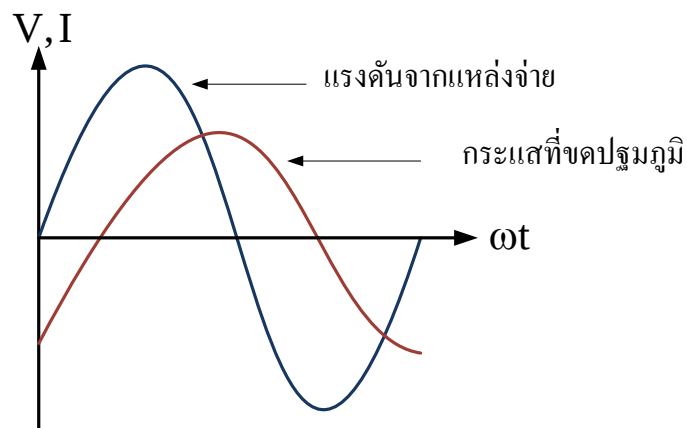
$$\begin{aligned} N_1 &= N_2 \times (V_1/V_2) \\ &= 380 \times (380/220) \\ &= 656.36 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

3) ค่าสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก (Φ_m)

$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่ } E_1 &= 4.44fN_1\Phi_m \\ \Phi_m &= E_1 / 4.44fN_1 \\ &= 380 / 4.44 \times 50 \times 656.36 \\ &= 0.0026 \text{ เวเบอร์} \end{aligned}$$

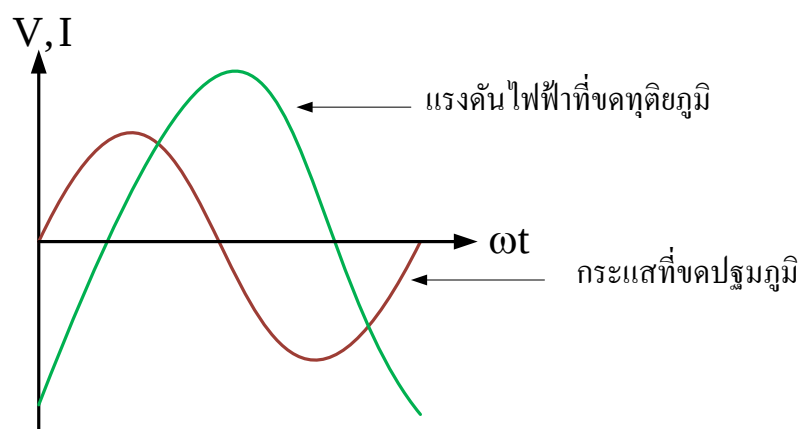
2.2.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า

เมื่อขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ทางด้านขดทุติยภูมิไม่ได้ต่อเข้ากับโหลด กระแสที่ไหลในขดปฐมภูมิจะถูกจำกัดโดยค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของขดปฐมภูมินั้น ซึ่งเป็นจุดสำคัญของขดลวดตัวนำ กระแสไฟฟ้านี้ เรียกว่า กระแสกระตุ้น โดยกระแสกระตุ้นนี้จะล่าหลัง (Lagging) แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดปฐมภูมิเป็นมุม 90 องศา ดังรูปคลื่นที่แสดงในรูปที่ 2-11



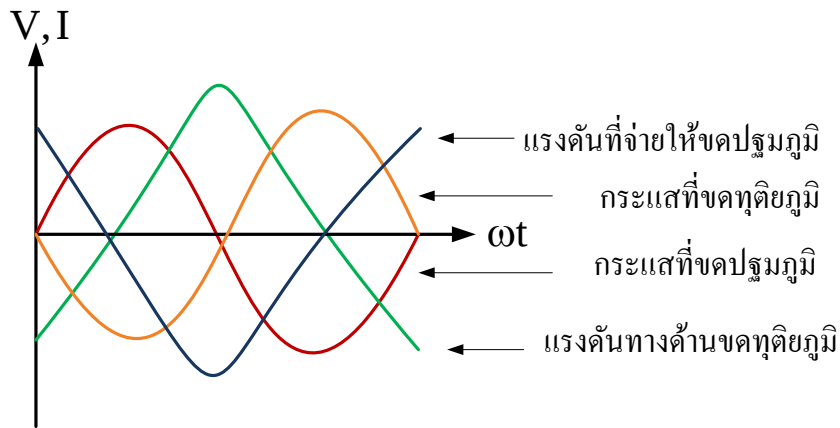
รูปที่ 2-11 แสดงรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดปฐมภูมิล่าหลังแรงดันไฟฟ้า 90 องศา
ขณะไม่มีโหลด

สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดปฐมภูมิจะไปตัดกับขดลวดทุติยภูมิ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดทุติยภูมิ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้จะล่าหลังกระแสที่ขดในขดปฐมภูมิเป็นมุม 90 องศา ดังแสดงในรูปคลื่นรูปที่ 2-12 แต่แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดปฐมภูมินำหน้ากระแสที่ไหลในขดปฐมภูมิอยู่ 90 องศา ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดทุติยภูมิจึงล่าหลังแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดปฐมภูมิเป็นมุม 180 องศา และแรงดันไฟฟ้าที่ขดทุติยภูมินี้จะเกิดพร้อม (In phase) กับแรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นในขดปฐมภูมิ



รูปที่ 2-12 แสดงรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่ขดทุติยภูมิล่าหลังกระแสที่ขดปฐมภูมิ 90 องศา

เมื่อต่อโวลต์เข้ากับทางด้านขดทุติยภูมิจะทำให้กระแสไหลในขดทุติยภูมิ เพราะว่าหม้อแปลงเป็นอินดักทีฟ กระแสที่ขดทุติยภูมิจะล่าหลังแรงดันขดทุติยภูมิ 90 องศา เมื่อแรงดันที่ขดทุติยภูมิล่าหลังกระแสที่ขดปฐมภูมิอยู่ 90 องศา กระแสที่ขดทุติยภูมิจะต่างเฟสกับกระแสที่ไหลในขดปฐมภูมิ 180 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2-13

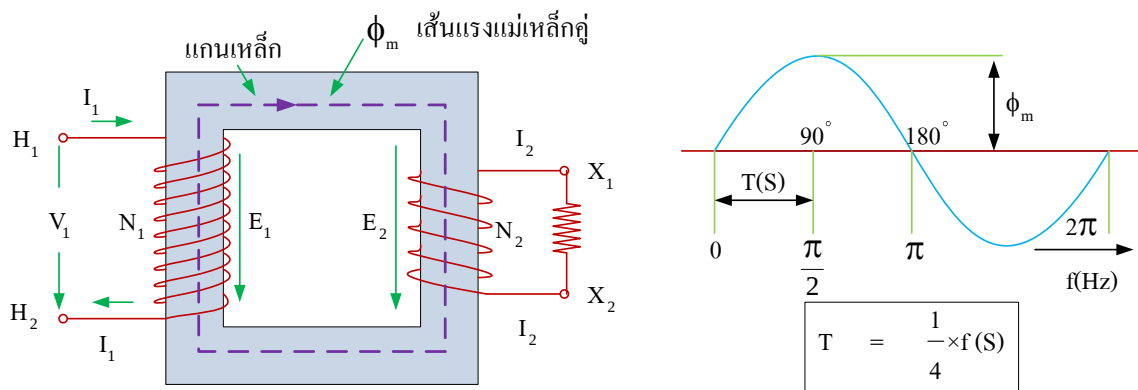


รูปที่ 2-13 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ

กระแสของขดทุติยภูมิจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าต้านกลับขึ้นในขดทุติยภูมิ แรงดันไฟฟ้าต้านกลับนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นในขดปฐมภูมิ แรงดันไฟฟ้าต้านกลับของขดลวดทุติยภูมิจะทำให้แรงดันไฟฟ้าต้านกลับของขดปฐมภูมิอ่อนกำลังลง และทำให้กระแสที่ไหลในขดปฐมภูมิมากกว่ากระแสขณะไม่มีโหลด ในขณะที่กระแสขดทุติยภูมิเพิ่มขึ้นกระแสในขดปฐมภูมิก็จะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนกัน

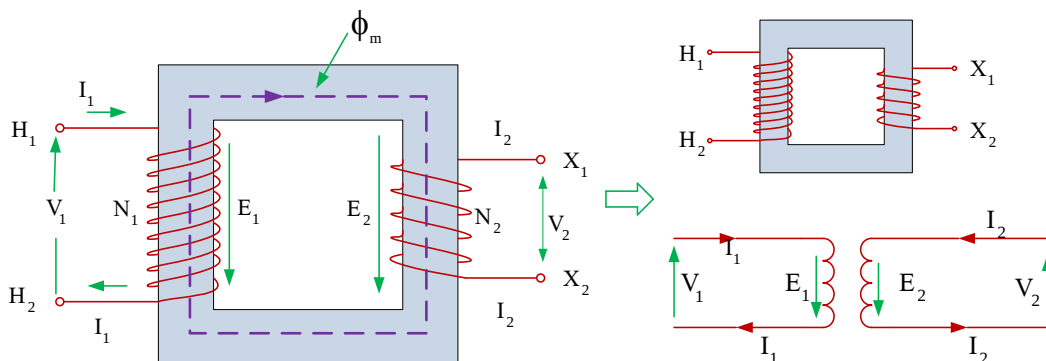
2.3 สมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลงไฟฟ้า

เมื่อต่อขดลวดปฐมภูมิเข้ากับระบบไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) แรงดันเมน V_1 กระแส I_1 จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กคู่ (mutual Flux) ϕ_m รูปคลื่นไซน์ ที่เปลี่ยนค่าไปตามความถี่ของระบบไฟด้วยเวลา T วินาที ($T = 1/4 f$ (S)) ไหลผ่านแกนเหล็กตัดขดลวดทั้งสองชุดเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 และ E_2 ขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้า ถ่ายทอดพลังงานไฟฟ้าออกจากโหลดทางด้านขดลวดทุติยภูมิด้วยขนาดแรงดันโหลด V_2 และ I_2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน แรงเคลื่อน และกระแสไฟฟ้า แสดงให้เห็นได้ดังรูป 2-14 และ 2-15



รูปที่ 2-14 หลักการเบื้องต้นของหม้อแปลงในการให้กำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 และ E_2 ที่มีทิศทางตรงกันข้ามในลักษณะต่อต้านกับแรงดัน V_1 และ V_2 ของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ

แรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 และ E_2 ที่เหนี่ยวนำให้เกิดในขดลวดทั้งปฐมภูมิและขดทุติยภูมิตามหลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กใดๆ จำนวน 1 เวเบอร์ เกิดการเปลี่ยนแปลงในเวลา 1 วินาที จะให้กำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า 1 โวลต์ขึ้นในวงจรแม่เหล็กนั้นๆ ขณะไม่ต่อโหลด (no load หรือ open circuit condition) จะเท่ากับและมีทิศทางตรงกันข้ามกับ V_1 และ V_2 ตามลำดับ สามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้



รูปที่ 2-15 ความสัมพันธ์ต่อกันระหว่างแรงดัน แรงเคลื่อน และกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลง

ขดปฐมภูมิ กระแส I_1 ไหลเข้าจากขั้ว H_1 (ขั้วบวกแทนด้วย ●) ผ่านขดลวด N_1 มายังขั้ว H_2 (ขั้วลบ)
 ดังนั้น $I_1 = I_{H_1H_2}$, $V_1 = V_{H_2H_1}$, $E_1 = E_{H_1H_2}$

ขดทุติยภูมิ กระแส I_2 ไหลจากขั้ว X_1 (ขั้วบวกแทนด้วย ●) ผ่านขดลวด N_2 มายังขั้ว X_2 (ขั้วลบ)
 ดังนั้น $I_2 = I_{X_1X_2}$, $V_2 = V_{X_2X_1}$, $E_2 = E_{H_1H_2}$

$$1 \text{ V} = 1 \text{ Wb/s} = 1 \text{ Vs/s}$$

$$\begin{aligned} E_{av} &= \frac{N \times \phi_m}{t} \\ &= \frac{N \times \phi_m}{\frac{1}{4} \times f} = 4 \times f \times N \times \phi_m \quad (\text{V}) \end{aligned}$$

E_{av} = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ย (V)

N = จำนวนรอบขดลวด (N)

ϕ_m = เส้นแรงแม่เหล็กคู่ที่ให้ค่าสูงสุดในแกนเหล็ก (Wb)

t = เวลาเป็นวินาที (s) ที่เส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนค่าจาก $0 - \pi$ เรเดียน หรือ $0 - 90^\circ$ ไฟฟ้า

$\frac{\phi_m}{T}$ = อัตราส่วนการเปลี่ยนค่าของเส้นแรงแม่เหล็ก 1 รอบขดลวด (Wb/s : Vs/s : V)

f = ความถี่ไฟฟ้าของระบบไฟ (Hz)

E = แรงเคลื่อนไฟฟ้าประสิทธิผล (E.r.m.s)

ระบบไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal) : $E = 1.11 E_{av}$

$$E = 1.11 E_{av} = 1.11 \times 4 \times f \times N \times \phi_m$$

$$= 4.44 \times f \times N \times \phi_m$$

โดยที่ $E_1 = V_1$ แรงเคลื่อนไฟฟ้า หรือแรงดันไฟฟ้าทางด้านขดลวดปฐมภูมิ

$E_2 = V_2$ แรงเคลื่อนไฟฟ้า หรือแรงดันไฟฟ้าทางด้านขดลวดทุติยภูมิ

N_1 = จำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ

N_2 = จำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิ

ดังนั้น แรงเคลื่อน แรงดัน ไฟฟ้าของหม้อแปลง ทั้งทางด้านขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิคำนวณได้ตามสมการ

$$E_1 = 4.44 \times f \times N_1 \times \phi_m$$

$$E_2 = 4.44 \times f \times N_2 \times \phi_m$$

B_m = ความหนาแน่นสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก (Wb/s² : Teslas : T)

A = พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก (m²)

$B_m = \frac{\phi_m}{A}$ (Wb/m : T)

$\phi_m = B_m \times A$ (Wb)

$E_1 = 4.44 \times f \times N_1 \times B_m \times A$ (V)

$E_2 = 4.44 \times f \times N_2 \times B_m \times A$ (V)

ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดในแกนเหล็กหม้อแปลง : $B_m = 1.2 \dots 1.8$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวดหม้อแปลง จากการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ตามสมการ อาจหาได้อีกวิธีหนึ่ง ดังนี้

$$e = \frac{-Nd\phi}{dt}$$

e = แรงเคลื่อนไฟฟ้าชั่วขณะที่มีทิศทางตรงกันข้ามในลักษณะต่อต้านกับแรงดันไฟฟ้า หรือ ตามลำดับ (V)

N = จำนวนรอบขดลวดที่พันบนแกนเหล็ก (รอบ)

ϕ = เส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลผ่านแกนเหล็ก

$$\phi = \phi_m \sin \omega t = \phi_m \sin 2\pi f t \quad (\text{Wb})$$

ϕ_m = ค่าสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก

t = เวลาเป็นวินาที (s) ที่เส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนค่าจาก 0 - 20π เรเดียน หรือ 0 - 90° องศาไฟฟ้า

$\frac{d\phi}{dt}$ = อัตราการเปลี่ยนค่าของเส้นแรงแม่เหล็กใน 1 รอบขดลวด (Wb/s: Vs/s :V)

$$e = -Nd\phi_m \sin \frac{\omega t}{dt} = -N \frac{d}{dt}(\phi_m \sin \omega t) = -N\phi_m \frac{d(\sin \omega t)}{dt}$$

$$= -N\omega\phi_m \cos \omega t$$

$$= N\omega\phi_m \sin (\omega t - 90^\circ)$$

e_1, e_2 = แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ทำให้กำเนิดในขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ

$N_1 N_2$ = จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

$$\therefore e_1 = N_1 \omega \phi_m \sin (\omega t - 90^\circ) \quad (\text{V})$$

$$e_2 = N_2 \omega \phi_m \sin (\omega t - 90^\circ) \quad (\text{V})$$

E_1, E_2 = แรงเคลื่อนไฟฟ้าประสิทธิผล (E r.m.s.)

$$= \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}}, \quad \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} \quad \text{ตามลำดับ}$$

$$E_1 = \frac{N_1 \times \omega \times \phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2 \times \pi \times f \times N_1 \times \phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 \times f \times N_1 \times \phi_m = 4.44 \times f \times N_1 \times B_m \times A$$

$$E_2 = \frac{N_2 \times \omega \times \phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2 \times \pi \times f \times N_2 \times \phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 \times f \times N_2 \times \phi_m = 4.44 \times f \times N_2 \times B_m \times A$$

3.1 อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของหม้อแปลง

อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลง ในที่นี้หมายถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าใดๆของขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิได้แก่ แรงดัน กระแสไฟฟ้า และจำนวนรอบของขดลวด ฯลฯ เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ K ดังนี้

$$K = \text{อัตราส่วนของหม้อแปลง (Transformation ration)}$$

1. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน (แรงเคลื่อนไฟฟ้า) กับจำนวนรอบของขดลวด

1. อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าตามสมการ

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44 \times f \times N_1 \times B_m \times A}{4.44 \times f \times N_2 \times B_m \times A}$$

2. แรงดันไฟฟ้า / รอบขดลวด ของหม้อแปลงต้องเท่าตามสมการ

$$\frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2}$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\therefore K = \frac{E_2}{E_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

2. ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดัน กับกระแสไฟฟ้า ตามสมการ สมรรถนะในการจ่ายโหลดของหม้อแปลง ทางด้านขาเข้า (input) เท่ากับ ทางด้านขาออก (output)

$$V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2 \quad E_1 = V_1 \quad V_2 = E_2$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

$$\therefore K = \frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

3. ความสัมพันธ์ระหว่าง จำนวนรอบขดลวดกับกระแสไฟฟ้า ด้วยเหตุที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลในแกนเหล็ก ตัดทั้งขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ดังนั้น แรงดันแม่เหล็ก (m.m.f. : magnetomotive force) จึง เท่ากันและขาออก ดังนี้

$$N_1 \times I_1 = N_2 \times I_2$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

$$\therefore K = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

4. อัตราส่วนของหม้อแปลง (Transformation Ration) ตามสมการ และจะได้อัตราส่วนของหม้อแปลง รวมกันทั้งหมดดังนี้

$$K = \frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

ตัวอย่างที่ 2-1 หม้อแปลงไฟฟ้าตัวหนึ่งขดลวดปฐมภูมิต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ 240 V ความถี่ 50 Hz และ ขดปฐมภูมิมีจำนวนรอบ 175 รอบ จงคำนวณหา เส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก

วิธีทำ กำหนดให้

$$\text{แรงดันที่จ่ายให้กับขดปฐมภูมิ (E}_1\text{)} = 240 \text{ V}$$

$$\text{ความถี่ของไฟฟ้า (f)} = 50 \text{ Hz}$$

$$\text{จำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ (N}_1\text{)} = 175 \text{ รอบ}$$

$$\text{จาก } E_1 = 4.44 f \Phi_m N_1 \text{ V}$$

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4.44 f N_1} \text{ Wb}$$

$$\text{แทนค่า } \Phi_m$$

$$= \frac{240}{4.44 \times 50 \times 175} \text{ Wb}$$

$$\Phi_m = 0.006178 \text{ Wb}$$

$$\text{ดังนั้น } \Phi_m = 6.178 \times 10^{-3} \text{ mWb}$$

$$\text{นั่นคือจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด} = 6.178 \text{ mWb}$$

2.4 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานจริง (Practical Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานจริงแตกต่างจากหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ

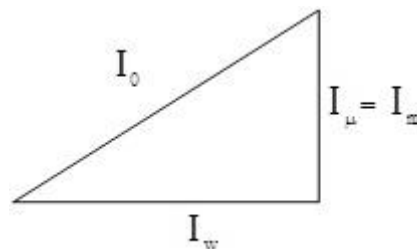
1. ในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานจริงขดลวดมีความต้านทาน ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม และเกิดความร้อนขึ้นในขดลวด ดังนั้นจึงทำให้เส้นแรงแม่เหล็กลดลงเมื่อมีโหลด
2. ในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานจริงจะมีเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นไม่เชื่อมโยงกับขดลวดทั้งสอง ทั้งหมดจะมีเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนเกิดรั่วไหล (Leakage flux)

หม้อแปลงที่ใช้งานจริงมีทั้งการสูญเสียในแกนเหล็กและที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ จะเกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งเกิดการสูญเสียในแกนเหล็กได้แก่ฮีสเตอร์รีซิสและกระแสไหลวนแต่ไม่มีการสูญเสียจากขดลวดทางด้านทุติยภูมิเพราะไม่ได้ต่อกับโหลดดังนั้นกระแสไฟฟ้า I_0 จะเกิดล้าหลัง V_1 เป็นมุมน้อยกว่า 90 องศา แผนภาพเวกเตอร์แสดงในภาพที่ 2-17 กำลังไฟฟ้าด้านอินพุต W_0 กรณีไร้ภาระมีค่า

$$W_0 = V_1 I_0 \cos \phi_0$$

โดยที่ $\cos \phi_0$ เป็นตัวประกอบกำลัง (power factor) กรณีไร้ภาระ (No Load)

กระแสไฟฟ้า I_0 ที่แสดงในภาพ 2-17 ประกอบด้วย 2 ส่วน ด้วยกันคือ ส่วนแรกได้แก่กระแสไฟฟ้าที่สูญเสียเนื่องจากแกนเหล็ก I_w โดยมีเฟสและทิศทางเดียวกับ V_1 มีขนาดเท่ากับ

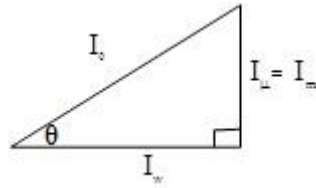


$$\cos \theta = \frac{\text{ด้านชิดมุม}}{\text{ด้านตรงข้ามมุมฉาก}}$$

$$\cos \theta = \frac{I_w}{I_0}$$

$$I_w = I_0 \cos \theta_0$$

การสูญเสียในส่วนที่ 2 เป็นการสูญเสียในส่วนของสนามแม่เหล็ก I_μ เกิดจากเส้นแรงสนามแม่เหล็กสลับเป็นกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่สามารถวัดได้ด้วยวัตต์มิเตอร์ มีขนาดเท่ากับ



$$\sin \theta = \frac{\text{ด้านตรงข้ามมุมฉาก}}{\text{ตรงข้ามมุมฉาก}}$$

$$\sin \theta = \frac{I_\mu}{I_0}$$

$$I_u = I_0 \sin \theta_0$$

เมื่อพิจารณาหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานจริงในขณะที่ไม่มีโหลด จะพบว่าในขณะที่ไม่มีโหลดนั้นที่ขดลวดปฐมภูมิจะมีกระแสไหลเข้าที่ขดลวดปฐมภูมิต่างกัน และกระแสนี้ก็จะเป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งกำลังสูญเสียในแกนเหล็กจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น และกำลังสูญเสียที่แกนเหล็กนั้นประกอบด้วย กำลังสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss) และกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy current loss) กำลังสูญเสียทั้งสองนี้เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้มีกระแสไหลในขณะที่ไม่มีโหลด (No load current) ซึ่งแทนด้วย I_0 ส่วนกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นขณะที่ไม่มีโหลดเรียกกำลังสูญเสียนี้ว่า กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก หรือกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นขณะที่ไม่มีโหลด (Iron loss or Core loss or No load loss) ซึ่งเขียนแทนได้ด้วย W_0 หรือ W_i

$$\text{โดย } W_i, W_0 = V_1 I_0 \cos \theta_0$$

$$\text{เมื่อ } \cos \theta_0 = \text{เพาเวอร์แฟกเตอร์ของหม้อแปลงในขณะที่ไม่มีโหลด}$$

และ I_0 เป็นผลรวมระหว่าง I_w กับ I_μ ในทางเวกเตอร์ คือ

$$I_0 = \sqrt{(I_w)^2 + (I_\mu)^2}$$

จากเวกเตอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.15 จะได้ว่า

$$\cos \theta_0 = \frac{I_w}{I_0}$$

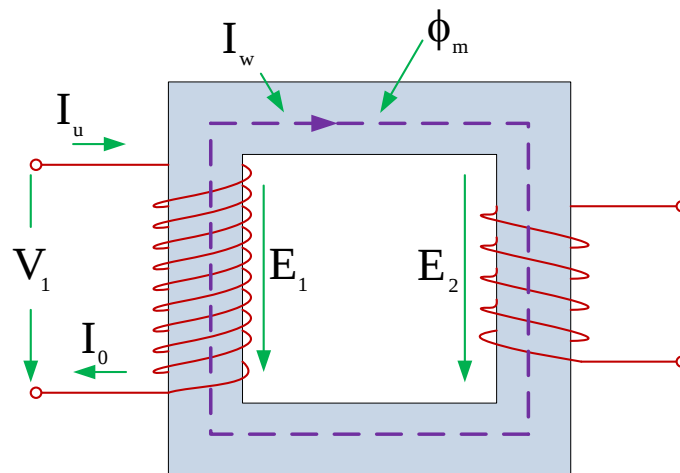
$$I_w = I_0 \cos \theta_0$$

$$I_w = \sqrt{(I_0)^2 + (I_\mu)^2}$$

$$\text{และจาก } \sin \theta_0 = \frac{I_\mu}{I_0}$$

$$I_\mu = I_0 \sin \theta_0$$

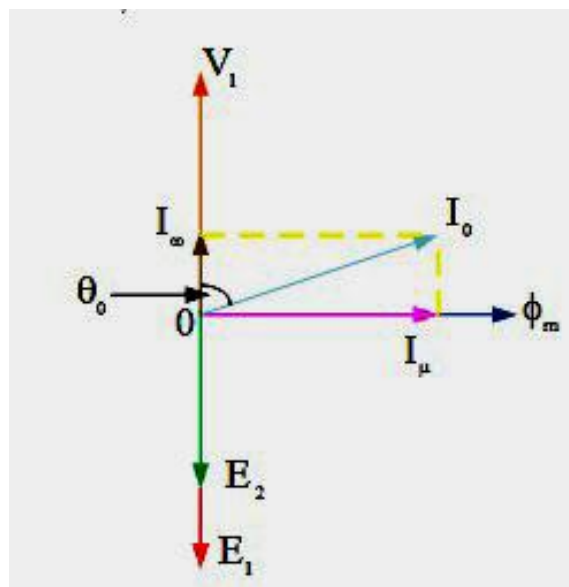
$$I_\mu = \sqrt{(I_0)^2 + (I_\mu)^2}$$



รูปที่ 2-16 หม้อแปลงที่ใช้งานจริง

ข้อสังเกต

1. แรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 และ E_2 ที่มีทิศทางตรงกันข้ามในลักษณะต่อต้านกับแรงดันเมน V_1 หรือ E_1, E_2 จะ out of phase 180 องศา กับ V_1
 2. กระแส I_μ ที่ซ้อนทับ ϕ และตามหลังแรงดันเมน V_1 อยู่ 90 องศา หรือนำหน้า E_1 , E_2 อยู่ 90 องศา
 3. กระแส I_w ที่ซ้อนทับกับ V_1 และนำหน้า I_μ อยู่ 90 องศา
- ผลรวมทางเวกเตอร์ระหว่าง I_w กับ I_μ จะได้ I_0 ทำให้ I_0 นี้ตามหลังแรงดัน V_1 อยู่เป็นมุม θ_0



รูปที่ 2-17 หม้อแปลงใช้งานจริง กระแสไฟฟ้า I_0 เกิดการสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็ก I_w และการสูญเสียในส่วนของสนามแม่เหล็ก I_μ

เมื่อ	V_1	=	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดปฐมภูมิ
	I_w	=	กระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก
	I_μ	=	กระแสที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก
	I_0	=	กระแสที่ไหลในหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด
	θ_0	=	มุมต่างเฟสระหว่าง V_1 กับ I_0
		=	มุมต่างเฟสขณะไม่มีโหลด

ตัวอย่างที่ 2-2 หม้อแปลงไฟฟ้าตัวหนึ่งต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ 240 V ในขณะไม่มีโหลดอ่านค่ากระแสที่ไหลในขดปฐมภูมิได้ 2.5 A และอ่านกำลังได้ 150 W จงคำนวณหา

- ก. กระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก (I_w)
 ข. กระแสที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก (I_μ)

วิธีทำ กำหนดให้

	V_1	=	240	V
กระแสขณะไม่มีโหลด	(I_0)	=	2.5	A
กำลังอ่านได้	(W_0)	=	150	W

ก. กระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก

จาก	I_w	=	$I_0 \cos\theta_0$	A
แต่จาก	W_0	=	$V_1 I_0 \cos\theta_0$	
แทนค่า	$\cos\theta_0$	=	$\frac{W_0}{V_1 I_0}$	
	$\cos\theta_0$	=	150	
		=	240×2.5	
จะได้	$\cos\theta_0$	=	0.25	
แทนค่า	I_w	=	2.5×0.25	A
		=	0.625	A

นั่นคือกระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก = 0.625 A ตอบ

ข. กระแสที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก

$$\text{จาก} \quad I_{\mu} = I_0 \sin \theta_0 \quad \text{A}$$

$$\text{แต่} \quad \cos \theta_0 = 0.25$$

$$\text{จะได้} \quad \theta_0 = \cos^{-1}(0.25)$$

$$\theta_0 = 75.52^\circ$$

$$\sin \theta_0 = \sin 75.52^\circ$$

$$= 0.968$$

$$\text{แทนค่า} \quad I_{\mu} = 2.5 \times 0.968 \quad \text{A}$$

$$\text{ดังนั้นจะได้} \quad I_{\mu} = 2.42 \quad \text{A}$$

$$\text{นั่นคือกระแสที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก} = 2.42 \quad \text{A} \quad \text{ตอบ}$$

$$\text{หรือจาก} \quad I_{\mu} = \sqrt{(I_0)^2 + (I_{\mu})^2}$$

$$\text{แทนค่า} \quad I_{\mu} = \sqrt{(2.5)^2 + (0.625)^2} \quad \text{A}$$

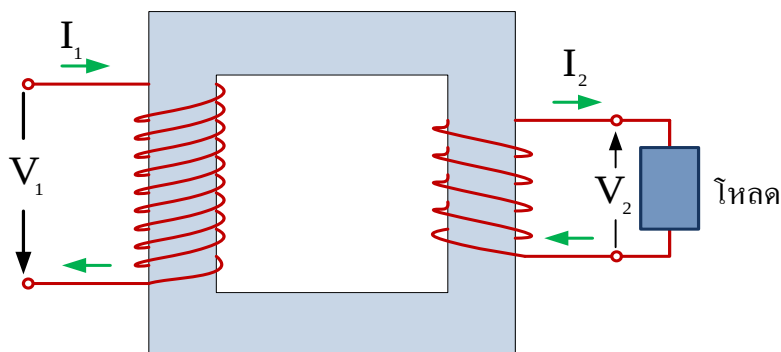
$$= \sqrt{6.25 + 0.39} \quad \text{A}$$

$$= \sqrt{5.86} \quad \text{A}$$

$$\text{ดังนั้นจะได้} = 2.42 \quad \text{A}$$

$$\text{นั่นคือกระแสที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก} = 2.42 \quad \text{A} \quad \text{ตอบ}$$

เมื่อพิจารณาหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานจริงในขณะที่มีโหลด จะพบว่ามีการเสไฟฟ้าไหลในขดทุติยภูมิ ซึ่งแทนด้วย I_2 และกระแสที่ไหลในขดปฐมภูมิก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นกว่าในกรณีที่ไม่มีโหลด กระแสที่ไหลในขดปฐมภูมิในขณะที่มีโหลดนี้แทนด้วย I_1 ดังแสดงในรูปที่ 2-18



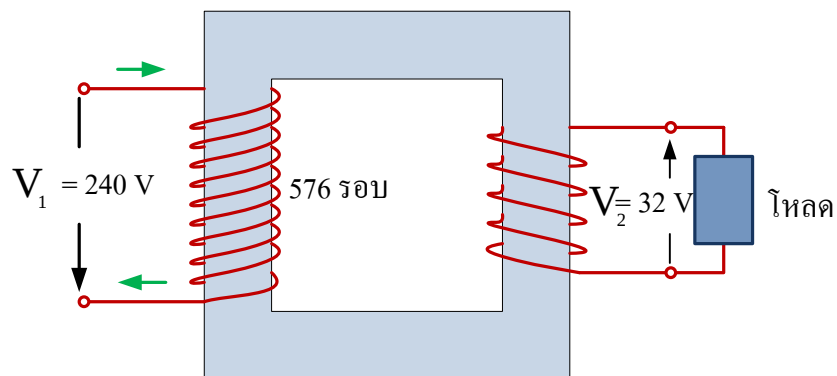
รูปที่ 2-18 แสดงวงจรหม้อแปลงไฟฟ้าขณะมีโหลด

ตัวอย่างที่ 2-3 หม้อแปลงไฟฟ้าตัวหนึ่ง ขดลวดชุดปฐมภูมิต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า 240 V และมีจำนวนรอบ 576 รอบ ถ้าขดลวดชุดทุติยภูมิจ่ายแรงดันไฟฟ้าออกมา 32 V **จงคำนวณหา** จำนวนรอบของขดลวดชุดทุติยภูมิโดยไม่คำนึงถึงการสูญเสีย

วิธีทำ กำหนดให้

แรงดันไฟฟ้าด้านขดปฐมภูมิ	(V_1)	=	240	V
จำนวนรอบขดปฐมภูมิ	(N_1)	=	576	รอบ
แรงดันไฟฟ้าด้านขดทุติยภูมิ	(V_2)	=	32	V

เราสามารถเขียนรูปประกอบการพิจารณาได้ดังนี้



$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad \frac{N_2}{N_1} &= \frac{V_2}{V_1} \\ N_2 &= \frac{V_2}{V_1} \times N_1 \end{aligned}$$

$$\text{แทนค่า} \quad N_2 = \frac{32}{240} \times 576 \text{ รอบ}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad N_2 = 76.5 \text{ รอบ}$$

นั่นคือจำนวนรอบของขดลวดชุดทุติยภูมิ = 77 รอบ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 2-4 หม้อแปลงไฟฟ้าตัวหนึ่งขดปฐมภูมิต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า 415 V มีกระแสไหล 15 A และมีจำนวนขดลวด 320 รอบ ถ้าขดทุติยภูมิมีกระแสไหล 96 A โดยไม่คำนึงถึงการสูญเสีย **จงคำนวณหา**

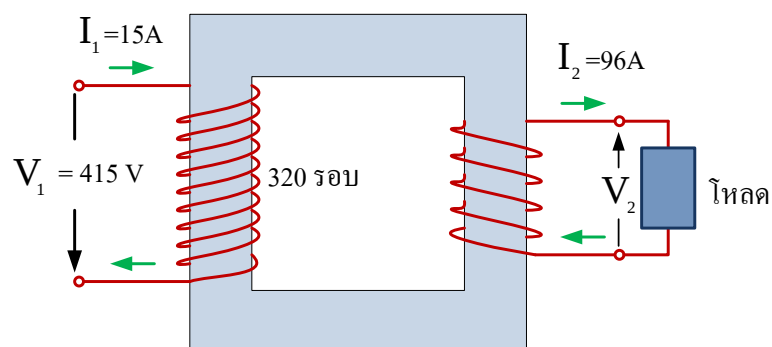
ก. จำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิ

ข. แรงดันไฟฟ้าทางด้านขดทุติยภูมิ

วิธีทำ กำหนดให้

แรงดันไฟฟ้าทางด้านขดปฐมภูมิ	(V_1)	=	415	V
กระแสทางด้านขดปฐมภูมิ	(I_1)	=	15	A
จำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ	(N_1)	=	320	รอบ
กระแสทางด้านขดทุติยภูมิ	(I_2)	=	96	A

เราสามารถเขียนรูปประกอบการพิจารณาได้ดังนี้



ก. จำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิ

$$\begin{aligned}\text{จาก } \frac{N_2}{N_1} &= \frac{I_1}{I_2} \\ N_2 &= \frac{I_1 \times N_1}{I_2} \\ N_2 &= \frac{15}{96} \times 320 \text{ รอบ} \\ N_2 &= 50 \text{ รอบ} \\ &= 50 \text{ รอบ} \quad \text{ตอบ}\end{aligned}$$

ข. แรงดันไฟฟ้าทางด้านขดทุติยภูมิ

$$\begin{aligned}\frac{V_2}{V_1} &= \frac{I_2}{I_1} \\ V_2 &= \frac{I_2 \times V_1}{I_1} \\ \text{แทนค่า } V_2 &= \frac{15 \times 415}{96} \text{ V} \\ \text{จะได้ } V_2 &= 64.84 \text{ V}\end{aligned}$$

นั่นคือแรงดันไฟฟ้าทางด้านขดทุติยภูมิ = 64.84 V ตอบ

$$\text{หรือจาก } \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} \times V_1$$

$$\text{แทนค่า } V_2 = \frac{50}{320} \times 415 \text{ V}$$

$$\text{จะได้ } V_2 = 64.84 \text{ V}$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าทางด้านขดทุติยภูมิ = 64.84 V ตอบ

ตัวอย่างที่ 2-5 หม้อแปลงไฟฟ้าตัวหนึ่งมีอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าเป็น 5 : 1 ถ้าขดทุติยภูมิมีจำนวนรอบ 50 รอบ จงคำนวณหา จำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ

วิธีทำ กำหนดให้

$$\text{อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้า (K) } = 5 : 1$$

$$\text{จำนวนรอบขดทุติยภูมิ (} N_2 \text{) } = 50 \quad \text{รอบ}$$

$$\text{อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้า } = V_1 : V_2 = \frac{V_2}{V_1}$$

$$\text{อัตราส่วนจำนวนรอบ } = N_1 : N_2 = \frac{N_2}{N_1}$$

$$\text{แต่อัตราส่วนจำนวนรอบ } = \text{อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้า}$$

$$\text{นั่นคือ } \frac{N_2}{N_1} = \frac{V_2}{V_1}$$

$$N_1 = \frac{V_2}{V_1} \times N_2$$

$$\text{แทนค่า } N_1 = 5 \times 50 \text{ รอบ}$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ } N_1 = 250 \text{ รอบ}$$

$$\text{นั่นคือจำนวนรอบของขดปฐมภูมิ } = 250 \text{ รอบ} \quad \text{ตอบ}$$

ตัวอย่างที่ 2-6 หม้อแปลงไฟฟ้าตัวหนึ่งมีอัตราส่วนจำนวนรอบ 1 : 2 ถ้าขดลวดปฐมภูมิต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า 120 V จงคำนวณหา แรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดทุติยภูมิ

วิธีทำ กำหนดให้

$$\text{อัตราส่วนจำนวนรอบ (K) } = 1 : 2$$

$$\text{แรงดันไฟฟ้าขดปฐมภูมิ (} V_1 \text{) } = 120 \text{ V}$$

$$\text{ถ้าจำนวนรอบขดปฐมภูมิ (} N_1 \text{) } = 1 \text{ รอบ}$$

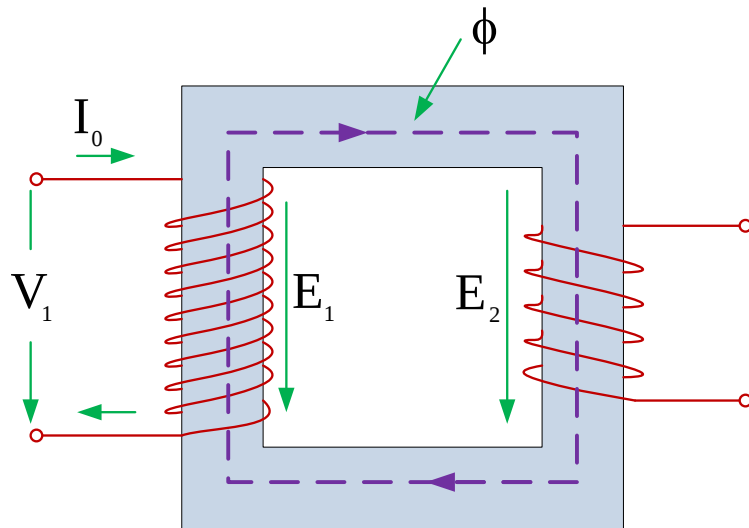
$$\begin{aligned}
&\text{จะได้จำนวนรอบขดทุติยภูมิ (N}_2\text{)} &= & 2 & \text{รอบ} \\
&\text{จากอัตราส่วนจำนวนรอบ} &= & \text{อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้า} \\
&\text{นั่นคือ} & \frac{N_2}{N_1} &= & \frac{V_2}{V_1} \\
& & V_2 &= & \frac{N_2}{N_1} \times V_1 \\
&\text{แทนค่า} & V_2 &= & 120 \times 2 & \text{รอบ} \\
&\text{ดังนั้นจะได้} & V_2 &= & 240 & \text{โวลต์} \\
&\text{แรงดันไฟฟ้าทางด้านขดทุติยภูมิ} &= & 240 & \text{โวลต์} & \text{ตอบ}
\end{aligned}$$

เมื่อหม้อแปลงมีโหลดมาต่อเข้ากับทางด้านขดทุติยภูมิโดยโหลดที่นำมาต่อเข้าไปนี้มีอยู่ 3 ชนิด คือ

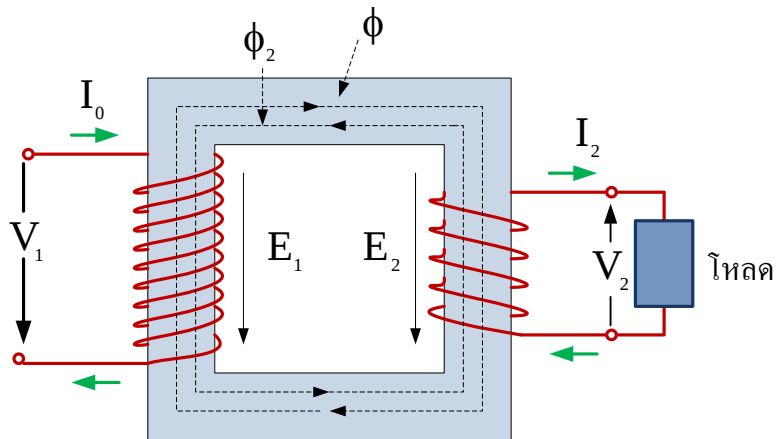
1. โหลดเป็นความต้านทาน (Resistive load) ซึ่งเป็นโหลดที่มีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เป็น 1 (Unity power factor or $\cos\theta = 1$) กระแส I_2 ที่ไหลผ่านโหลดจะเกิดขึ้นพร้อม (In phase) กับแรงดันไฟฟ้า V_2
2. โหลดเป็นอินดักทีฟ (Inductive load) ซึ่งเป็นโหลดที่มีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ล่าช้า (Lagging power factor or $\cos\theta = \text{lagging}$) กระแส I_2 ที่ไหลผ่านโหลดจะล่าช้าแรงดันไฟฟ้า V_2 เป็นมุม θ_2
3. โหลดเป็นคาปาซิทีฟ (Capacitive load) ซึ่งเป็นโหลดที่มีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์นำหน้า (Leading power factor or $\cos\theta = \text{leading}$) กระแส I_2 ที่ไหลผ่านโหลดจะนำหน้าแรงดันไฟฟ้า V_2 เป็นมุม θ_2

ในขณะที่หม้อแปลงไม่มีโหลดนั้นจะมีกระแสไหลในขดปฐมภูมิเท่านั้นคือ I_0 และ I_0 จะสร้างแรงดันแม่เหล็กหรือเส้นแรงแม่เหล็กกร่วม (Mutual flux) ซึ่งแทนด้วย ϕ ดังแสดงในรูปที่ 2-19

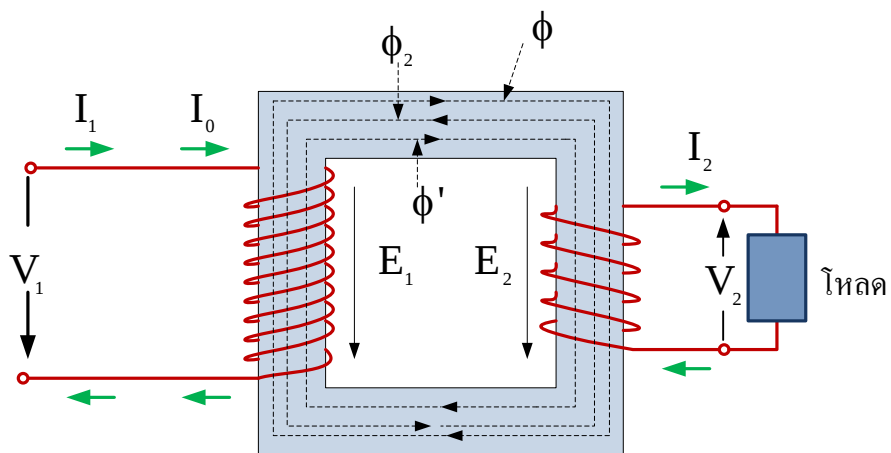
หม้อแปลงจะมีโหลดเป็นโหลดชนิดใดก็ได้จะมีผลทำให้กระแสไหลในขดทุติยภูมิ และกระแส I_2 จะทำให้เกิดแรงดันแม่เหล็กขึ้นที่ขดทุติยภูมิ ซึ่งแทนด้วย ϕ_2 และ ϕ_2 มีค่าเท่ากับ $I_2 N_2 \phi_2$ จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับเส้นแรงแม่เหล็กกร่วมดังแสดงในรูป 2-20 คือ ϕ ที่เกิดจากขดปฐมภูมิ ϕ_2 จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กกร่วม ϕ ลดลง แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับในขดปฐมภูมิก็จะลดลงด้วย จึงทำให้เกิดผลต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดปฐมภูมิ V_1 กับแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ E_1 จึงเป็นสาเหตุให้กระแสที่ไหลในขดปฐมภูมิเพิ่มขึ้นในขดปฐมภูมิ ถ้าให้กระแสที่เพิ่มขึ้นในขดปฐมภูมิแทนด้วย I'_2 กระแส I'_2 นี้มีทิศทางตรงกันข้ามกับ I_2 แต่มีทิศทางเดียวกันกับ I_0 กระแส I'_2 จะทำให้เกิดแรงดันแม่เหล็กขึ้นที่ขดปฐมภูมิ ซึ่งแทนด้วย ϕ'_2 ดังแสดงในรูปที่ 2-21 และ ϕ'_2 มีค่าเท่ากับ $I'_2 N_2$ โดย ϕ'_2 จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับ ϕ_2 โดยมีผลทำให้ ϕ'_2 มีค่าเท่ากับ ϕ_2 ดังนั้นจึงคงเหลือแต่เส้นแรงแม่เหล็กกร่วม ϕ เพียงอย่างเดียวเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2-22



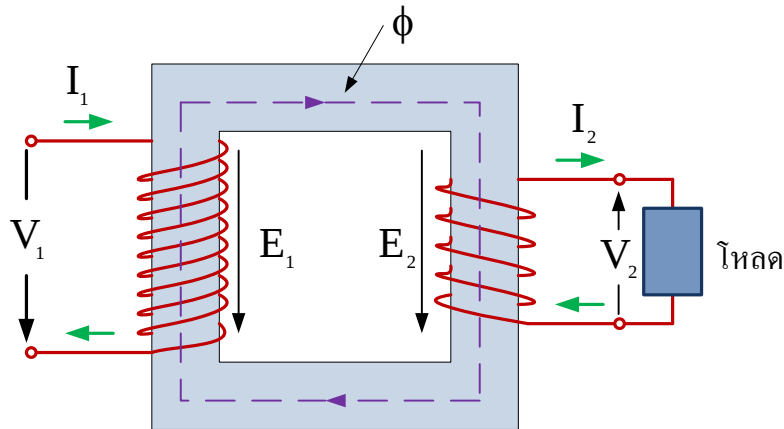
รูปที่ 2-19 แสดงกระแสและเส้นแรงแม่เหล็กของหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด



รูปที่ 2-20 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กและกระแสในขดทุติยภูมิเมื่อหม้อแปลงมีโหลด



รูปที่ 2-21 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กและกระแสในขดปฐมภูมิเมื่อหม้อแปลงไม่มีโหลด

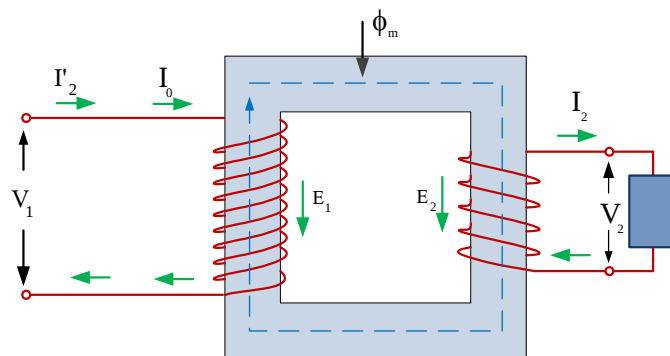


รูปที่ 2-22 แสดงผลที่ได้ของหม้อแปลงเมื่อมีโหลด

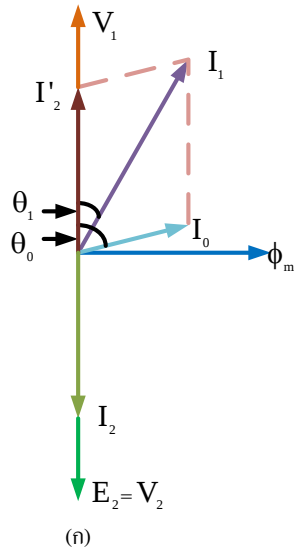
เนื่องจากกระแส I_0 และ I_2' มีทิศทางไปในทางเดียวกันดังนั้นจึงรวมเข้าด้วยกันได้แต่ต้องเป็นการรวมกันด้วยวิธีการทางเวกเตอร์ซึ่งแทนด้วย I_1 ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} I_1 &= I_0 + I_2' \text{ (เป็นผลบวกทางเวกเตอร์)} \\ \overline{I_1} &= \overline{I_0} + \overline{I_2'} \\ &= \overline{I_0} + \overline{I_2'} \\ &= I_0 \angle \theta_0 + \overline{I_2'} \angle \theta_2 \\ \overline{I_2'} &= KI_2 \frac{N_2}{N_1} \times I_2 \end{aligned}$$

เวกเตอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงขณะมีโหลด

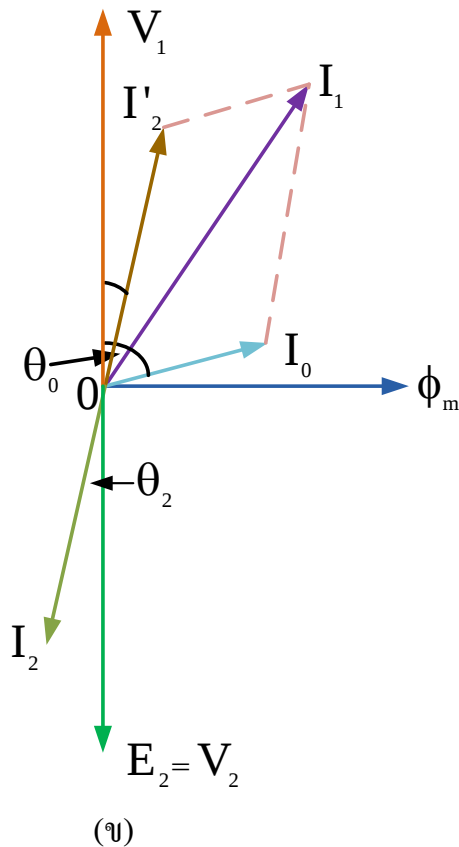


จากรูปที่ 2-23 (ก) เป็นเวกเตอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงขณะมีโหลดเป็นความต้านทาน (Load R) ซึ่งจะมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เป็น 1 และถ้าสมมุติให้ $K = 1$ ดังนั้นกระแสที่ไหลในขดทุติยภูมิคือ I_2 จะเกิดพร้อมกับ V_2 หรือ E_2 I_2 เป็นสาเหตุให้มีกระแสไหลเพิ่มขึ้นทางขดปฐมภูมิคือ I_2' โดย I_2' จะมีทิศทางตรงกับข้าม I_2 แต่มีขนาดเท่ากับ I_2 (เพราะว่า $K = 1$) ดังนั้นจะได้กระแส I_0 บวกเข้ากับ I_2' บวกกันทางเวกเตอร์จะได้เป็น I_1 โดย I_1 จะล้าหลังแรงดัน V_1 อยู่เป็นมุม θ_1



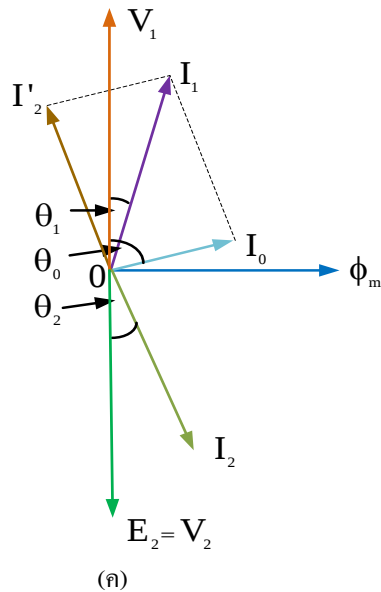
รูปที่ 2-23 (ก) แสดงเวกเตอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงกรณีเป็นรีซิสตีฟโหลด

จากรูปที่ 2-23 (ข) เป็นเวกเตอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงขณะที่โหลดเป็นอินดักทีฟ (Load L) ซึ่งมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ล่าช้า จึงทำให้กระแสที่ไหลในขดทุติยภูมิคือ I_2 ล่าช้า V_2 หรือ E_2 เป็นมุม θ_2 กระแส I_2 จะทำให้กระแสไหลในขดปฐมภูมิเพิ่มขึ้นคือ I'_2 โดย I'_2 จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับ I_2 ดังนั้นกระแส I_0 กับ I'_2 บวกเข้าด้วยกันทางเวกเตอร์จะได้เป็น I_1 โดย I_1 จะล่าช้าแรงดัน V_1 อยู่เป็นมุม θ_1



รูปที่ 2-23 (ข) แสดงเวกเตอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงกรณีเป็นอินดักทีฟโหลด

จากรูปที่ 2-23 (ค) เป็นเวกเตอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงขณะที่มีโหลดเป็นคาปาซิทีฟ (Load C) ซึ่งค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์นำหน้า จึงทำให้กระแสที่ไหลในขดทุติยภูมิคือ I_2 นำหน้า V_2 หรือ E_2 เป็นมุม θ_2 กระแส I_2 จะทำให้กระแสไหลในขดปฐมภูมิเพิ่มขึ้นคือ I'_2 โดย I'_2 จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับ I_2 ดังนั้นกระแส I_0 กับ I'_2 บวกเข้าด้วยกันทางเวกเตอร์จะได้เป็น I_1 โดย I_1 จะล้าหลังแรงดัน V_1 อยู่เป็นมุม θ_1



รูปที่ 2-23 (ค) แสดงเวกเตอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงกรณีเป็นคาปาซิทีฟโหลด

ตัวอย่างที่ 2-7 หม้อแปลงไฟฟ้าตัวหนึ่งขนาด 220/110 V ความถี่ 50 Hz ขณะไม่มีโหลดมีกระแสไหลในขดปฐมภูมิ 2 A มีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ 0.2 ล้าหลัง เมื่อมีโหลดเต็มที่มีกระแสไหลในขดทุติยภูมิ 40 A ที่เพาเวอร์แฟกเตอร์เป็น 1 จงคำนวณหาค่ากระแสที่ไหลในขดปฐมภูมิขณะที่มีโหลดเต็มที่

วิธีทำ กำหนดให้

แรงดันไฟฟ้าด้านขดปฐมภูมิ	(V_1)	=	220	V
แรงดันไฟฟ้าด้านขดทุติยภูมิ	(V_2)	=	110	V
กระแสขณะไม่มีโหลด	(I_0)	=	2	A
กระแสด้านขดทุติยภูมิขณะมีโหลด	(I_2)	=	40	A
เพาเวอร์แฟกเตอร์ขณะไม่มีโหลด	$(\cos \theta_0)$	=	0.2	ล้าหลัง
เพาเวอร์แฟกเตอร์ขณะมีโหลดเต็มที่	$(\cos \theta_2)$	=	1	
จาก	I_1	=	$I_0 + I'_2$ (เป็นผลบวกทางเวกเตอร์)	

ดังนั้น I_0 ล้าหลัง V_1	PF. $\cos \theta_0$	=	0.2	
	θ_0	=	$\cos^{-1}(0.2)$	= 78.463°
ดังนั้น I_2 ล้าหลัง V_2	PF. $\cos \theta_2$	=	1	
	θ_2	=	$\cos^{-1}(1)$	= 0°
I_0	=	$I_0 \angle \theta_0$	=	$2 \angle -78.463^\circ \text{ A}$
I_2	=	$I_2 \angle \theta_2$	=	$40 \angle 0^\circ \text{ A}$

$$I_2 = K I_2 = \frac{N_2}{N_1} \times I_2$$

$$K_2 = \frac{V_2}{V_1} = \frac{110}{220} = 0.5$$

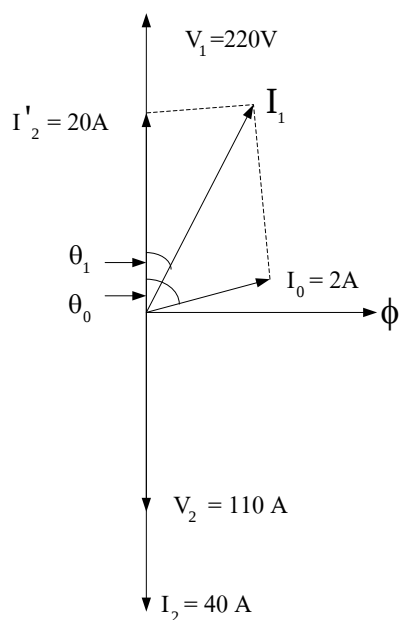
$$I_2' = 0.5 \times 40 = 20$$

$$I_2' = 20 \angle 180^\circ$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{I}_0 + \bar{I}_2' \\ &= I_0 \angle \theta_0 + I_2' \angle \theta_2 \\ &= 2 \angle -78.463^\circ + 20 \angle 180^\circ = (0.400 - j1.960) + (-20 + j0) \\ &= (0.400 + (-20)) + (-j1.960 + j0) = -19.60 - j1.960 \\ &= 19.69 \angle -174.29^\circ \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } I_1 = 19.69 \text{ A}$$

จากข้อมูลที่ได้เราสามารถเขียนเวกเตอร์ประกอบการพิจารณาได้ดังนี้



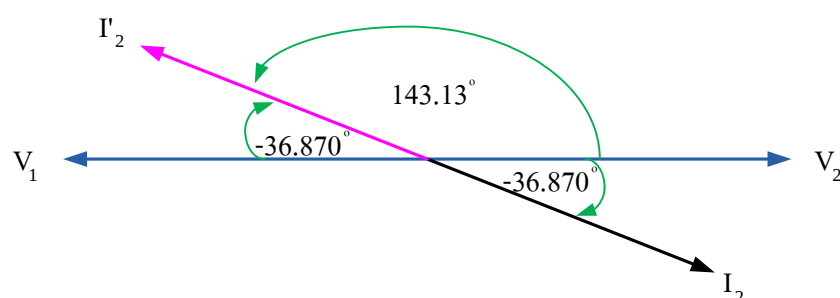
ตัวอย่างที่ 2-8 หม้อแปลงไฟฟ้าตัวหนึ่งขนาด 220/440 V ความถี่ 50 Hz มีข้อมูลดังนี้ ขณะไม่มีโหลดมีกระแสไหลในขดปฐมภูมิ 5 A ที่เพาเวอร์แฟกเตอร์ 0.3 ถ้าหลัง ขณะมีโหลดมีกระแสไหลในขดทุติยภูมิ 60 A ที่เพาเวอร์แฟกเตอร์ 0.8 ถ้าหลัง จงคำนวณหา กระแสที่ไหลในขดปฐมภูมิขณะที่มีโหลดเต็มที่

วิธีทำ กำหนดให้

แรงดันไฟฟ้าด้านขดปฐมภูมิ (V_1)	=	220	V
แรงดันไฟฟ้าด้านขดทุติยภูมิ (V_2)	=	440	V
กระแสขณะมีโหลด (I_0)	=	5	A
กระแสด้านขดทุติยภูมิขณะมีโหลด (I_2)	=	60	A
เพาเวอร์แฟกเตอร์ขณะไม่มีโหลด ($\cos \theta_0$)	=	0.3	ถ้าหลัง
เพาเวอร์แฟกเตอร์ขณะมีโหลดเต็มที่ ($\cos \theta_2$)	=	0.8	ถ้าหลัง

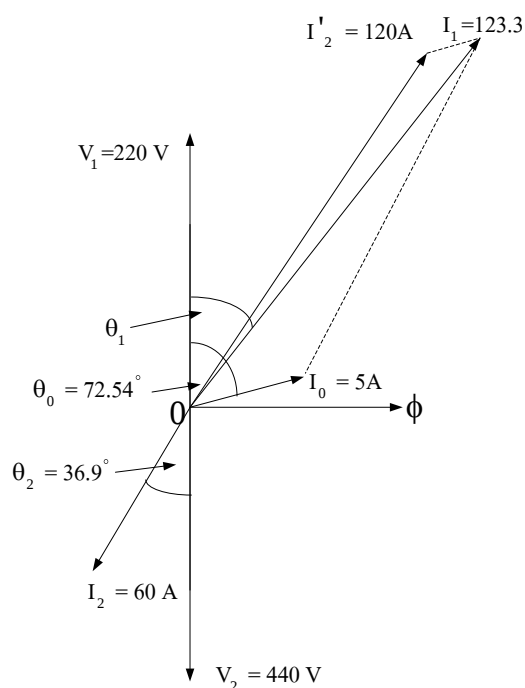
$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } I_0 \text{ ถ้าหลัง } V_1 \quad \text{PF. } \cos \theta_0 &= 0.3 \\ \theta_0 &= \cos^{-1}(0.3) = 72.54^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } I_2 \text{ ถ้าหลัง } V_2 \quad \text{PF. } \cos \theta_2 &= 0.8 \\ \theta_2 &= \cos^{-1}(0.8) = 36.86^\circ \\ I_0 &= I_0 \angle \theta_0 = 5 \angle -72.54^\circ \text{ A} \\ I_2 &= I_2 \angle \theta_2 = 60 \angle -36.86^\circ \text{ A} \\ I_2' = KI_2 &= \frac{N_2}{N_1} \times I_2 \\ K &= \frac{V_2}{V_1} = \frac{440}{220} = 2 \\ I_2' &= 2 \times 60 = 120 \\ I_2' &= 120 \angle -143.14^\circ \quad \text{องศาความต่าง } I_2 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_0 + I_2' \\
 &= I_0 \angle \theta_0 + I_2' \angle \theta_2 \\
 &= 5 \angle -72.54^\circ + 120 \angle -36.872^\circ \\
 &= (1.500 - j4.770) + (96.500 + j72.00) \\
 \text{ดังนั้น } I_1 &= 123.312 \angle -38.503^\circ = 19.69 \text{ A}
 \end{aligned}$$

จากข้อมูลที่ได้เราสามารถเขียนเวกเตอร์ประกอบการพิจารณาได้ดังนี้



ตัวอย่างที่ 2-9 หม้อแปลงไฟฟ้าตัวหนึ่งมีอัตราส่วนจำนวนรอบ 15 : 4 ถ้าขดลวดปฐมภูมิต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า 225 V และมีกระแสไหลในขณะไม่มีโหลด 3 A ที่เพาเวอร์แฟกเตอร์ 0.3 ถ้าหลังขณะที่มีโหลดเต็มที่มีกระแสไหลทางขดทุติยภูมิ 45 A ที่เพาเวอร์แฟกเตอร์ 0.866 ล้างัง จงคำนวณหา

- ก. แรงดันไฟฟ้าทางด้านขดทุติยภูมิ
- ข. กระแสที่ไหลในขดปฐมภูมิขณะที่มีโหลดเต็มที่

วิธีทำ กำหนดให้

อัตราส่วนจำนวนรอบ	=	15 : 4
แรงดันไฟฟ้าด้านขดปฐมภูมิ (V_1)	=	225
กระแสขณะมีโหลด (I_0)	=	3

กระแสต้านขดทุติยภูมิขณะมีโหลด (I_2)	=	45	
เพาเวอร์แฟกเตอร์ขณะไม่มีโหลด ($\cos\theta_0$)	=	0.3	ล้าหลัง
เพาเวอร์แฟกเตอร์ขณะมีโหลดเต็มที่ ($\cos\theta_2$)	=	0.866	ล้าหลัง

ก. แรงดันไฟฟ้าทางต้านขดทุติยภูมิ

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} \times V_1$$

ดังนั้นจะได้ว่า $N_1 = 15$

$N_2 = 4$

แทนค่า $V_2 = \frac{4}{15} \times 225$

จะได้ $V_2 = 60$

นั่นคือแรงดันไฟฟ้าทางต้านขดทุติยภูมิ = 60

ข. กระแสที่ไหลในขดปฐมภูมิขณะที่โหลดเต็มที่

ดังนั้น I_0 ล้าหลัง V_1 PF. $\cos\theta_0 = 0.3$

$$\theta_0 = \cos^{-1}(0.3) = 72.54^\circ$$

ดังนั้น I_2 เกิดพร้อม V_2 PF. $\cos\theta_2 = 0.866$

$$\theta_2 = \cos^{-1}(0.866) = 30^\circ$$

$$I_0 = I_0 \angle \theta_0 = 3 \angle 72.54^\circ \text{ A}$$

$$I_2 = I_2 \angle \theta_2 = 45 \angle 30^\circ \text{ A}$$

$$I_2 = K I_2 = \frac{N_2}{N_1} \times I_2$$

$$K = \frac{V_2}{V_1} = \frac{4}{15} = 0.26$$

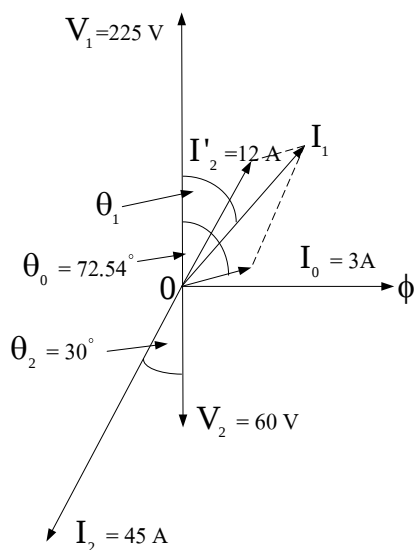
จะได้ $I_2' = 0.26 \times 45 \angle 30^\circ$

$$I_2' = 12 \angle 30^\circ \text{ มุมตรงข้าม } I_2$$

$$= 12 \angle 150^\circ$$

$$\begin{aligned}
\bar{I}_1 &= \bar{I}_0 + \bar{I}_2' \\
&= I_0 \angle \theta_0 + I_2' \angle \theta_2 \\
&= 3 \angle 72.54^\circ + 12 \angle 150^\circ \\
&= -9.492 - j78.86 \\
&= 12.98 \angle 136^\circ \\
I_1 &= 13 \text{ A}
\end{aligned}$$

จากข้อมูลที่ได้เราสามารถเขียนเวกเตอร์ประกอบการพิจารณาได้ดังนี้



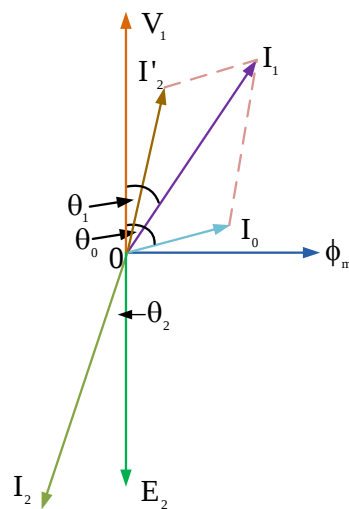
$$\begin{aligned}
\text{ถ้าให้มุมระหว่าง } I_0 \text{ กับ } I_2' &= \beta \\
\text{จะได้ } \beta &= \theta_0 - \theta_2 \\
&= 72.54^\circ - 30^\circ \\
\text{นั่นคือ } \beta &= 42.54^\circ
\end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 2-10 หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสขนาด 440 / 110 V ตัวหนึ่งกินกระแสตอนไม่มีโหลด 5 แอมป์ ที่เพาเวอร์แฟคเตอร์ 0.2 ถ้าหลัง ถ้าขาดลวดทุติยภูมิป้อนกระแสให้โหลด 120 A ที่เพาเวอร์แฟคเตอร์ 0.8 ถ้าหลัง จงคำนวณหาค่ากระแสที่ไหลในขดปฐมภูมิและเขียนเวกเตอร์ไดอะแกรม

วิธีทำ

$$\begin{aligned}
\text{จะได้ว่า } \cos \theta_2 &= 0.8 \\
\theta_2 &= \cos^{-1} 0.8 \\
\theta_2 &= 36.86^\circ \\
\text{และ } \cos \theta_2 &= 0.2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \theta_2 &= \cos^{-1} 0.2 \\
 \theta_2 &= 78.46^\circ \\
 \text{จาก } K &= \frac{V_2}{V_1} = \frac{110}{440} = \frac{1}{4} \\
 I_2 &= KI_1 \\
 &= 120 \cdot \frac{1}{4} = 30 \text{ A} \\
 I_0 &= 5 \text{ A} \\
 \text{ให้มุม } \beta &\text{ เป็นมุมระหว่าง } I_0 \text{ และ } I_2' \\
 \text{ดังนั้น } \beta &= 78.46^\circ - 36.86^\circ \\
 &= 41.6^\circ
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 \text{จาก } I_1 &= \sqrt{(I_2')^2 + (I_0)^2 + (2I_2'I_0)\cos\beta} \\
 I_1 &= \sqrt{(30)^2 + (5)^2 + (2 \times 30 \times 5)\cos 41.6^\circ} \\
 I_1 &= 33.90 \text{ A}
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 2.11 หม้อแปลงในความคิดตัวหนึ่งใช้กับไฟความถี่ 50 Hz ขดลวดชุดปฐมภูมิมี 100 รอบ และขดลวดชุดทุติยภูมิมี 200 รอบ แรงดันไฟฟ้าที่ขดปฐมภูมิมี 200 รอบ แรงดันไฟฟ้าที่ขดปฐมภูมิได้รับสูงสุด 220 V ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก 1.2 Wb/m^2 จงคำนวณหา

- จะต้องเลือกใช้แกนเหล็กที่มีหน้าตัดเท่าไร
- แรงดันทางด้านขดทุติยภูมิ
- กระแสทางด้านปฐมภูมิในรูปแบบของเลขเชิงซ้อน เทียบกับ เวกเตอร์ของทางด้านขดทุติยภูมิ เมื่อทางด้านขดทุติยภูมิจ่ายโหลด 8 A ที่เพาเวอร์แฟคเตอร์ 0.8 ล้าหลัง

$$\begin{aligned}
 \text{วิธีทำ} \quad E &= 4.4f \phi_m N_1 \quad V. \\
 \text{จาก} \quad \phi_m &= \frac{220}{4.44 \times 50 \times 100} \\
 &= 9.91 \times 10^{-3} \quad \text{Wb} \\
 \text{แต่} \quad A &= \frac{\phi_m}{B_m} \quad \text{m}^2 \\
 &= \frac{9.91 \times 10^{-3}}{1.2} \\
 &= 8.26 \times 10^{-3} \quad \text{m}^2 \\
 \text{ดังนั้น} \quad A &= 8.26 \quad \text{cm}^2 \\
 \text{เพราะว่า} \quad V_1 &= 220 \quad V \\
 V_2 &= KV_1 \\
 &= \frac{200}{100} \times 220 \\
 &= 440 \quad V
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_2 \text{ ล้าหลัง} \quad V_2 &= \theta_2 \\
 \text{แต่เพราะว่า} \quad \theta_2 &= \cos^{-1}(0.8) \\
 \text{ดังนั้นเมื่อเทียบ } I_2 \text{ กับเวกเตอร์ } V_2 \text{ จะได้} \\
 I_2 &= 8(0.8 - j0.6) \quad A \\
 &= 6.4 - j4.8 \quad A \\
 &= 8 \angle -36.86^\circ \quad A
 \end{aligned}$$

ถ้าไม่คิดค่า I_0 จะได้

กระแสที่ขดลวดปฐมภูมิ (I_2') ในรูปของเชิงซ้อน มีค่า

$$\begin{aligned}
 I_2' &= -\left(\frac{N_2}{N_1}\right)I_2 \quad A \\
 &= -2(6.4 - j4.8) \\
 &= -12.8 + j9.6 \quad A \\
 I_2' &= 16 \angle 143.13^\circ \quad A
 \end{aligned}$$

พิจารณาความต้านทานของขดลวดในหม้อแปลงไม่คิดเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล

หม้อแปลงในความคิดจะไม่มี ความต้านทาน แต่ในหม้อแปลงที่นำมาใช้งานจริง นั้น จะมีค่าความต้านทานอยู่บ้างทั้งในขดลวดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ ซึ่งค่าความต้านทานนี้ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมในหม้อแปลงบ้าง เป็นผลทำให้

1. แรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดชุดทุติยภูมิ (V_2) มีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดชุดทุติยภูมิ (E_2) นั้น

ซึ่งถ้าให้ R_2 = ค่าความต้านทานของขดลวดชุดทุติยภูมิจะได้

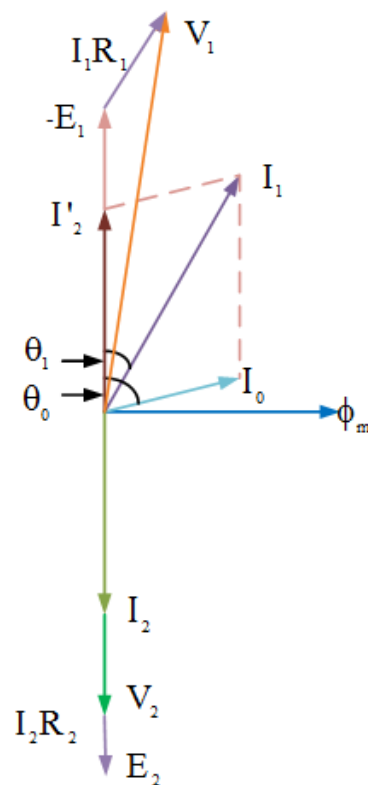
$$V_2 = E_2 - I_2 R_2 \text{ (ผลต่างทางเวกเตอร์)}$$

2. แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดชุดปฐมภูมิ จะมีค่าเท่ากับผลต่างทางเวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้า V_1 กับ $I_1 R_1$

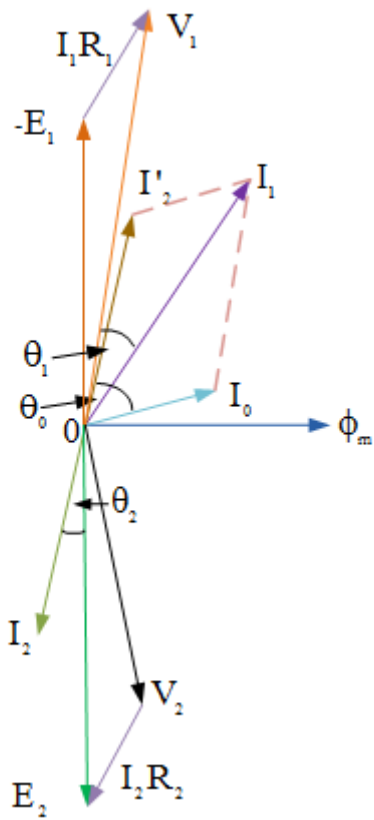
R_1 = ค่าความต้านทานของขดลวดชุดปฐมภูมิจะได้

$$V_1 = E_1 - I_1 R_1 \text{ (ผลต่างทางเวกเตอร์)}$$

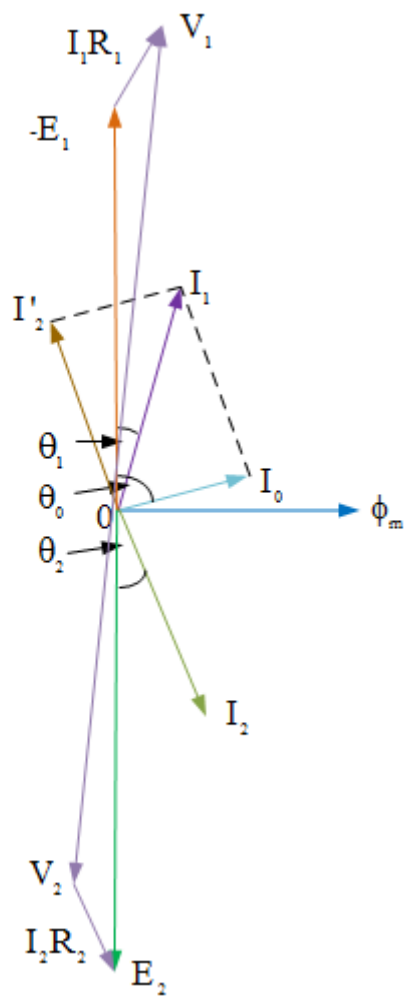
ถ้านำความต้านทานนี้มาพิจารณาในหม้อแปลงไฟฟ้าขณะที่มีโหลดจะได้เวกเตอร์ดังแสดงในรูป



แสดงเวกเตอร์ของหม้อแปลงเมื่อพิจารณาความต้านทานของขดลวด รีวิสต์ไฟโหลด



แสดงเวกเตอร์ของหม้อแปลงเมื่อพิจารณาความต้านทานของขดลวด อินдукทีฟโหลด



แสดงเวกเตอร์ของหม้อแปลงเมื่อพิจารณาความต้านทานของขดลวด คาปาซิทีฟโหลด

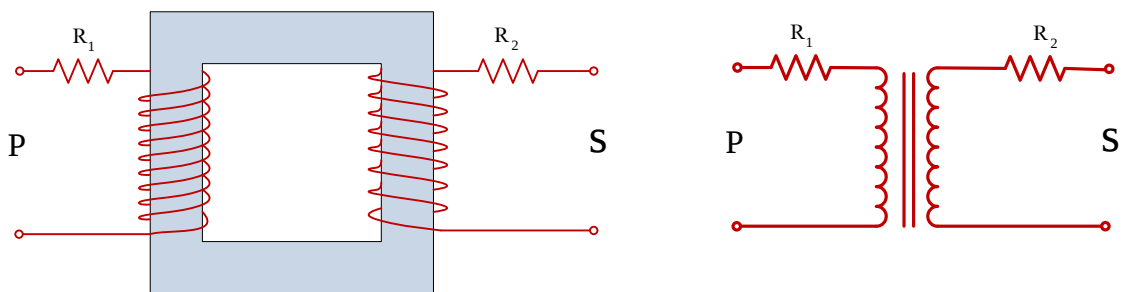
 กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน 	ใบสาระการเรียนรู้	หน่วยที่ 1
	ชื่อวิชา เครื่องกลไฟฟ้า 1	เวลาเรียน 5 ชั่วโมง
	ชื่อหน่วย หม้อแปลงฟ้า	
ชื่อเรื่องหรือชื่องาน วงจรสมมูลย์หม้อแปลงไฟฟ้า		
สาระสำคัญ ความต้านทานไฟฟ้าสมมูลเป็นความต้านทานไฟฟ้ารวมของหม้อแปลงไฟฟ้าที่พิจารณาด้านใดด้านหนึ่งของหม้อแปลงไฟฟ้า หรือหมายถึงค่าความต้านทานเทียบเท่าของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อพิจารณาด้านใดด้านหนึ่งของหม้อแปลงไฟฟ้า เรื่องที่จะศึกษา 1 ความต้านทานสมมูล 2 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล 3 ความต้านทานและรีเกจรีแอคแตนซ์สมมูลย์ 4 วงจรสมมูลย์ในหม้อแปลงไฟฟ้า จุดประสงค์การเรียนรู้ 1 อธิบายความต้านทานสมมูลย์ได้ 2 อธิบายเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลได้ 3 คำนวณรีเกจรีแอคแตนซ์สมมูลย์ได้ 4 คำนวณค่าต่างๆในวงจรสมมูลย์ในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ 5 มีพัฒนาการคุณธรรม จริยธรรม ค่านิยม และคุณลักษณะอันพึงประสงค์ ที่ผู้เรียนสามารถสังเกตเห็นได้ใน ด้านความมีมนุษยสัมพันธ์ ความมีวินัย ความรับผิดชอบ ความเชื่อมั่นในตนเอง ความสนใจใฝ่รู้ ความรักสามัคคี ความกตัญญูกตเวที		

3. วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า (Equivalent circuit of Transformer)

3.1 ความต้านทานสมมูล

ขดลวดทั่วไปจะมีค่าความต้านทานหรือที่เรียกว่า รีซิสแตนซ์ (resistance) ซึ่งจะมีค่าน้อยหรือมากขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนรอบขดลวดนั้นๆ

ดังนั้น ถ้าให้ R_1 และ R_2 เป็นความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิ เราสามารถเขียนวงจรสมมูล (Equivalent Circuit) ได้ดังนี้



รูปที่ 3-1 แสดงความต้านทานสมมูล

ค่าความต้านทานทั้งสองด้านของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถส่งถ่าย หรือย้าย (Transfer) ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของหม้อแปลงได้ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ ซึ่งจะได้ว่า

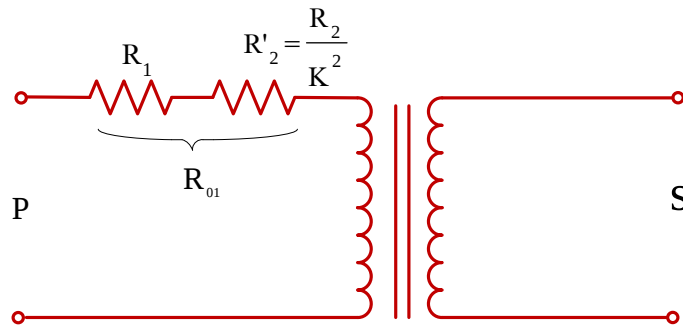
R_2 ถ้าย้ายจากขดลวดทุติยภูมิ ไปทางด้านปฐมภูมิ จะได้

$$P \text{ ก่อนย้าย} = P \text{ หลังย้าย}$$

$$I_2^2 R_2 = I_1^2 R_2'$$

$$R_2' = \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2 \cdot R_2$$

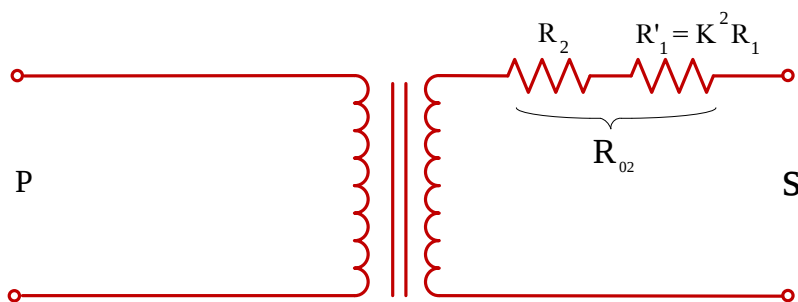
$$= \frac{R_2}{K^2}$$



รูปที่ 3-2 แสดงความต้านทานของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาเทียบกับขดลวดปฐมภูมิ

หรือ R_1 ถ้าย้ายจากด้านขดปฐมภูมิ ไปทางด้านทุติยภูมิ จะได้

$$\begin{aligned} P \text{ ก่อนย้าย} &= P \text{ หลังย้าย} \\ I_1^2 R_1 &= I_2^2 R_1' \\ R_1' &= \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \cdot R_1 \\ &= K^2 R_1 \end{aligned}$$



รูปที่ 3-3 แสดงความต้านทานของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาเทียบกับขดลวดปฐมภูมิ

R_2' เรียกว่า ความต้านทานสมมูลที่ย้ายไปทางด้านขดทุติยภูมิไปขดปฐมภูมิ

R_1' เรียกว่า ความต้านทานสมมูลที่ย้ายจากขดปฐมภูมิไปทุติยภูมิ

ค่าของ R_2' และ R_1' สามารถพิสูจน์ได้ดังนี้

$$(I)^2 R_t = (W) \text{ กำลังสูญเสีย}$$

$$\text{ถ้า } (I_1)^2 R_1 = (W) \text{ กำลังสูญเสียในขดลวดขดปฐมภูมิ}$$

$$\text{ถ้า } (I_2)^2 R_2 = (W) \text{ กำลังสูญเสียในขดลวดขดทุติยภูมิ ซึ่งการสูญเสียนี้ถ้าย้าย } R_2 \text{ ไป}$$

เป็น R_2' จะมีค่าเท่ากับกำลังสูญเสียในขดลวดที่เกิดขึ้นเนื่องจาก I_1 (ประมาณค่า $I_0 \ll I_1 \approx 0$)

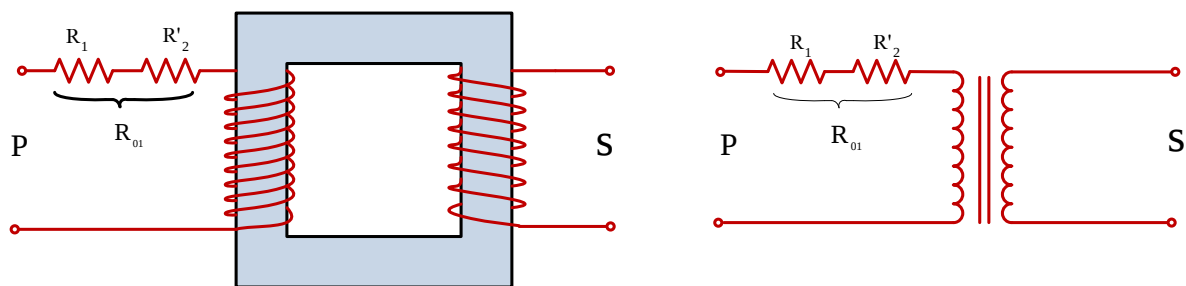
หรือ

$$\begin{aligned}
 P \text{ ก่อนย้าย} &= P \text{ หลังย้าย} \\
 (I_2)^2 R_2 &= (I_1')^2 R_2' \\
 R_2' &= \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2 \cdot R_2 \\
 \text{เพราะว่า } \frac{I_2}{I_1} &= \frac{1}{K} \\
 \text{ดังนั้น } R_2' &= \frac{R_2}{K^2}
 \end{aligned}$$

ถ้าย้ายค่าความต้านทานจากขดทุติยภูมิไปขดปฐมภูมิ จะทำให้ค่าความต้านทานขดปฐมภูมิ มีค่า

$R_1 + R_2' = R_1 + \frac{R_2}{K^2}$ ซึ่งเรียกว่าค่าความต้านทานสมมูลหรือความต้านทานที่วัดได้ของหม้อแปลงเมื่อย้ายไปด้านขดปฐมภูมิ ซึ่งให้สัญลักษณ์ R_{01}

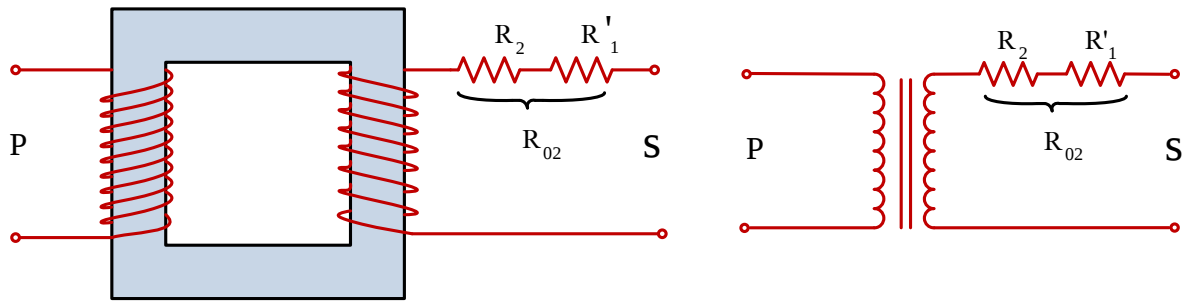
$$\begin{aligned}
 R_{01} &= R_1 + R_2' = R_1 + \frac{R_2}{K^2} \\
 R_{01} &= \text{ความต้านทานสมมูลของหม้อแปลงเมื่อย้ายไปทางด้านขดลวดปฐมภูมิ}
 \end{aligned}$$



รูปที่ 3-4 แสดงความต้านทานสมมูลที่วัดได้ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อย้ายไปขดปฐมภูมิ

ในทำนองเดียวกันความต้านทานสมมูลหรือความต้านทานที่วัดได้ของหม้อแปลงเมื่อย้ายไปทางด้านขดทุติยภูมิควรมีค่าเป็น

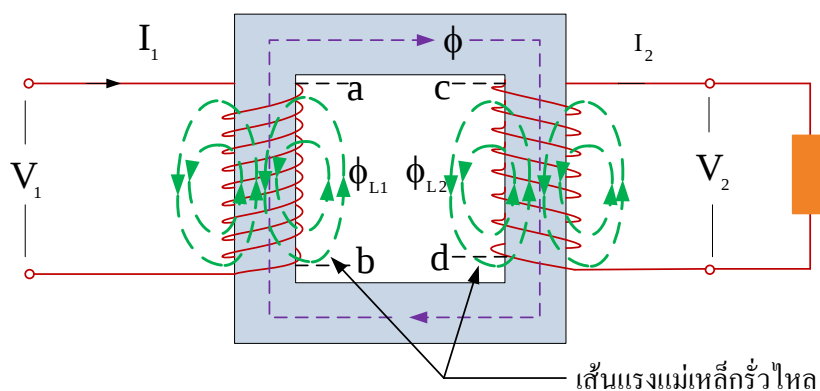
$$\begin{aligned}
 R_{02} &= R_2 + R_1' = R_2 + K^2 R_1 \\
 R_{02} &= \text{ความต้านทานสมมูลของหม้อแปลงเมื่อย้ายไปทางด้านขดลวดทุติยภูมิ}
 \end{aligned}$$



รูปที่ 3-5 แสดงความต้านทานสมมูลย์ที่วัดได้ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อย้ายไปขดทุติยภูมิ

3.2 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล

ในการพิจารณาว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วคิดว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เชื่อมโยงระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดทุติยภูมิ แต่ที่แท้จริงมีได้เป็นเช่นนั้น ซึ่งจะพบว่ามีเส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งเชื่อมโยงกับขดลวดปฐมภูมิ แต่ไม่เชื่อมโยงกับขดลวดด้านทุติยภูมิ ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะครบวงจรแม่เหล็ก (Magnetic circuit) โดยอากาศ ซึ่งในทำนองเดียวกันลักษณะเช่นนี้ก็จะเกิดทางด้านขดทุติยภูมิด้วย เส้นแรงแม่เหล็กส่วนนี้เรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage Flux) ดังในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3-6 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล

จากรูป Φ_{L1} เรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลที่กระทำระหว่างจุด a ถึงจุด b จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแอมแปร์เทอนของขดปฐมภูมิ และ Φ_{L1} นี้ จะเกิดขึ้นพร้อม I_1 ซึ่ง Φ_{L1} นี้จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นมามีค่าหนึ่งให้เท่ากับ e_{L1} ในทำนองเดียวกันแอมแปร์เทอนของขดทุติยภูมิที่กระทำระหว่างจุด c ถึง d ก็จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลขึ้นอีกส่วนหนึ่งคือ Φ_{L2} ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกับ I_2 และจะสร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นมามีค่าเท่ากับ e_{L2}

ขณะที่ไม่มีโหลด หรือมีน้อยๆนั้น แอมแปร์เทอนของขดลวดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิจะมีค่าน้อยมากดังนั้นค่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลจะไม่คิด แต่ถ้าโหลดเพิ่มขึ้นจะทำให้มีกระแสไหลในขดลวดปฐมภูมิ

และขดลวดทุติยภูมิมีค่ามากขึ้น เป็นผลทำให้แอมแปร์เทอนมีค่ามากขึ้น และมีผลทำให้เส้นแรงแม่เหล็กไหลเพิ่มขึ้นด้วย

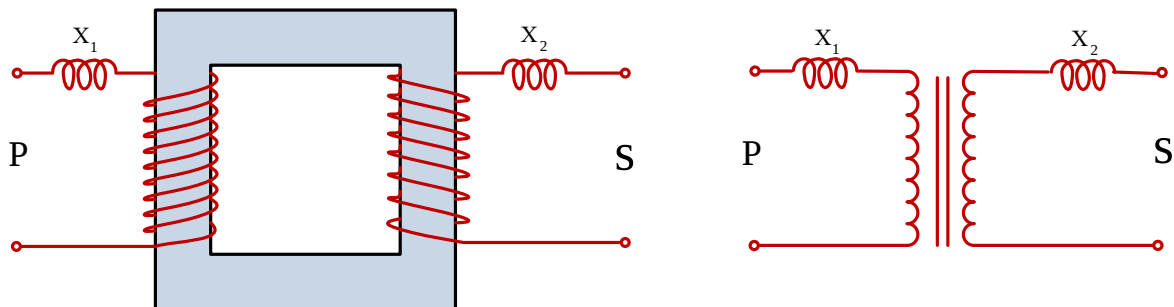
เส้นแรงแม่เหล็กไหลนี้จะเกิดขึ้นรอบๆขดลวดในแต่ละชุด และสร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดนั้น ซึ่งเราสามารถเขียนวงจรสมมูลย์เป็นอินดักทีฟคอยล์ ที่ต่ออนุกรมอยู่กับขดลวดในแต่ละชุด ดังนั้นแรงดันตกคร่อมในอินดักทีฟคอยล์จะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล

$$\text{จะได้ } X_1 = \frac{e_{L1}}{I_1}$$

$$\text{และ } X_2 = \frac{e_{L2}}{I_2}$$

เมื่อ X_1 = รีแอกแตนซ์ ของขดลวดชุดปฐมภูมิ

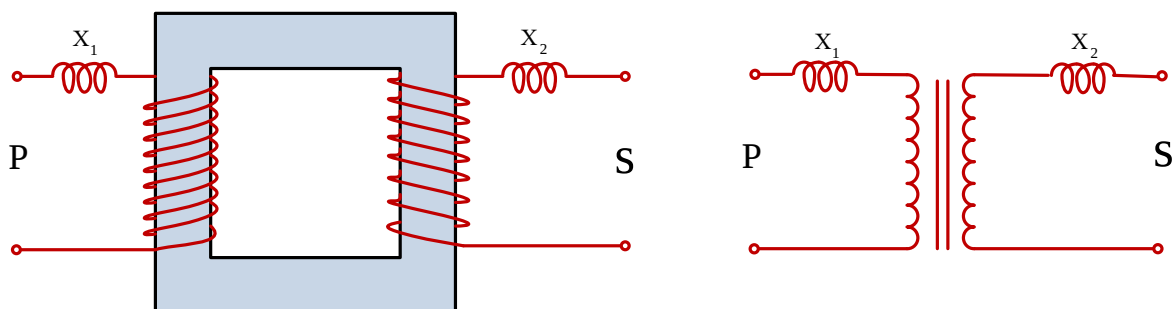
และ X_2 = รีแอกแตนซ์ ของขดลวดชุดทุติยภูมิ



รูปที่ 3-7 รีแอกแตนซ์สมมูลย์

3.3 ความต้านทานและรีแอกแตนซ์สมมูลย์

ในขดลวดแต่ละชุดจะมีค่าอินดักแตนซ์และค่ารีแอกแตนซ์อยู่เสมอ ค่าอินดักแตนซ์ของขดลวดปฐมภูมิจะมีค่า L_1 และของขดลวดทุติยภูมิจะมีค่า L_2 ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดปฐมภูมิจะมีค่า X_1 และของขดลวดทุติยภูมิจะมีค่า X_2

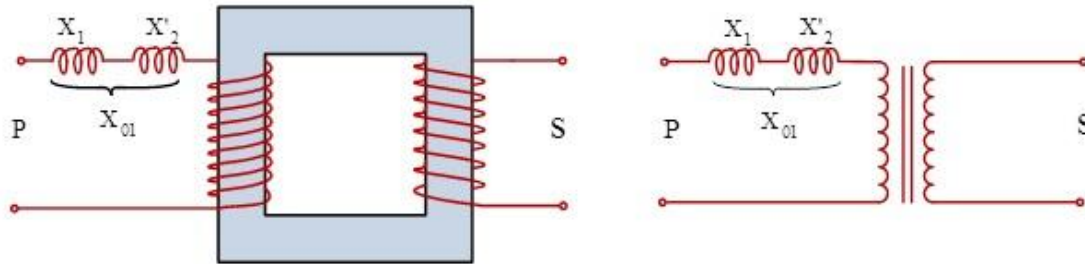


รูปที่ 3-8 รีแอกแตนซ์สมมูลย์

ดังนั้นสามารถพิสูจน์ได้ว่า รีแอกแตนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อพิจารณาเทียบกับขดลวดปฐมภูมิจะมีค่าเป็น X_{01}

$$X_{01} = X_1 + X_2' = X_1 + \frac{R_2}{K^2}$$

X_{01} = รีแอกแตนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าย้ายไปทางด้านขดลวดปฐมภูมิ

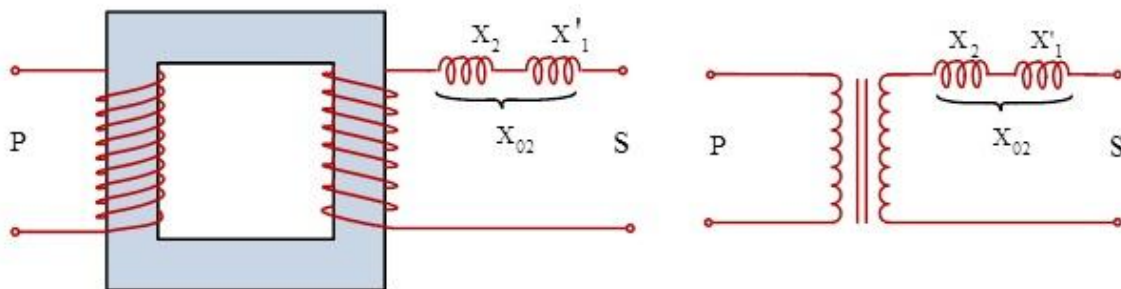


รูปที่ 3-9 แสดงค่ารีแอกแตนซ์ที่วัดได้ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อย้ายไปขดปฐมภูมิ

และรีแอกแตนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาเทียบกับขดลวดทุติยภูมิจะมีค่าเป็น X_{02}

$$X_{02} = X_2 + X_1' = X_2 + K^2 X_1$$

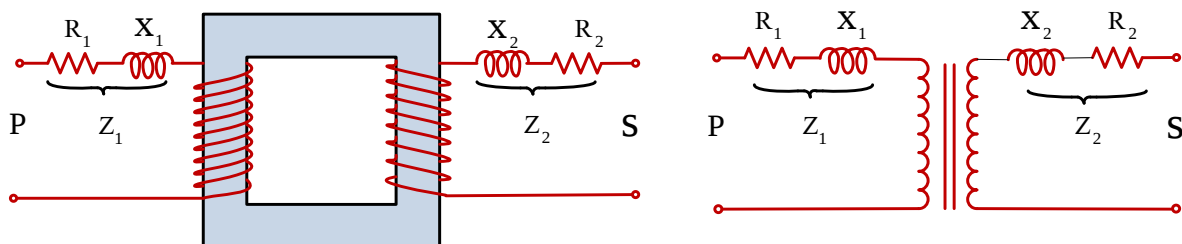
X_{02} = ความต้านทานสมมูลย์ของหม้อแปลงเมื่อย้ายไปทางด้านขดลวดทุติยภูมิ



รูปที่ 3-10 แสดงค่ารีแอกแตนซ์ที่วัดได้ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อย้ายไปขดทุติยภูมิ

3.3.1 อิมพีแดนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาความต้านทานและรีแอกแตนซ์สมมูลย์ (Transformer with resistance and leakage reactance)

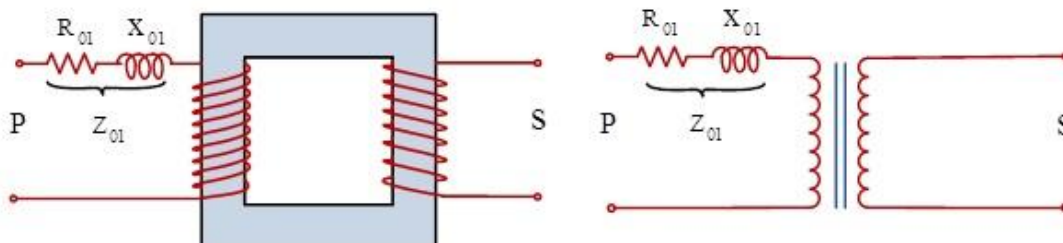
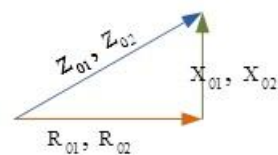


รูปที่ 3-11 แสดงวงจรสมมูลย์ที่ประกอบด้วยความต้านทานและลี้เกจรีแอกแตนซ์

จะได้ว่า

อิมพีแดนซ์ปฐมภูมิ (Primary impedance)

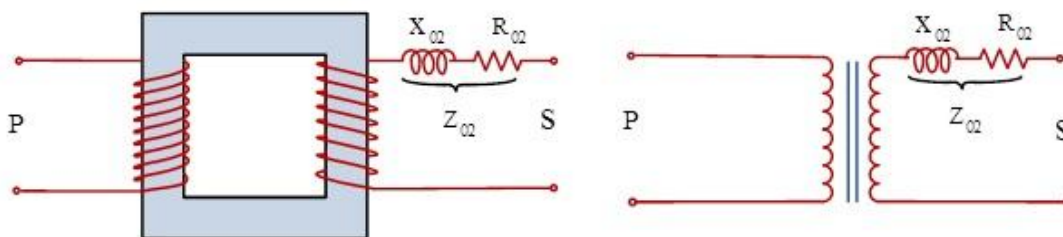
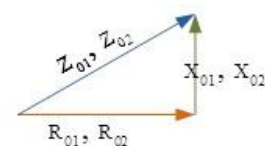
$$Z_{01} = \sqrt{(R_{01})^2 + (X_{01})^2}$$



รูปที่ 3-12 แสดงค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่วัดได้ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อย้ายไปขดปฐมภูมิ

อิมพีแดนซ์ทุติยภูมิ (Primary impedance)

$$Z_{02} = \sqrt{(R_{02})^2 + (X_{02})^2}$$



รูปที่ 3-13 แสดงค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่วัดได้ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อย้ายไปขดทุติยภูมิ

ซึ่งค่าความต้านทานและค่าลิกเกจแอกแตนชันนี้จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขึ้นดังนั้นจะได้ว่า

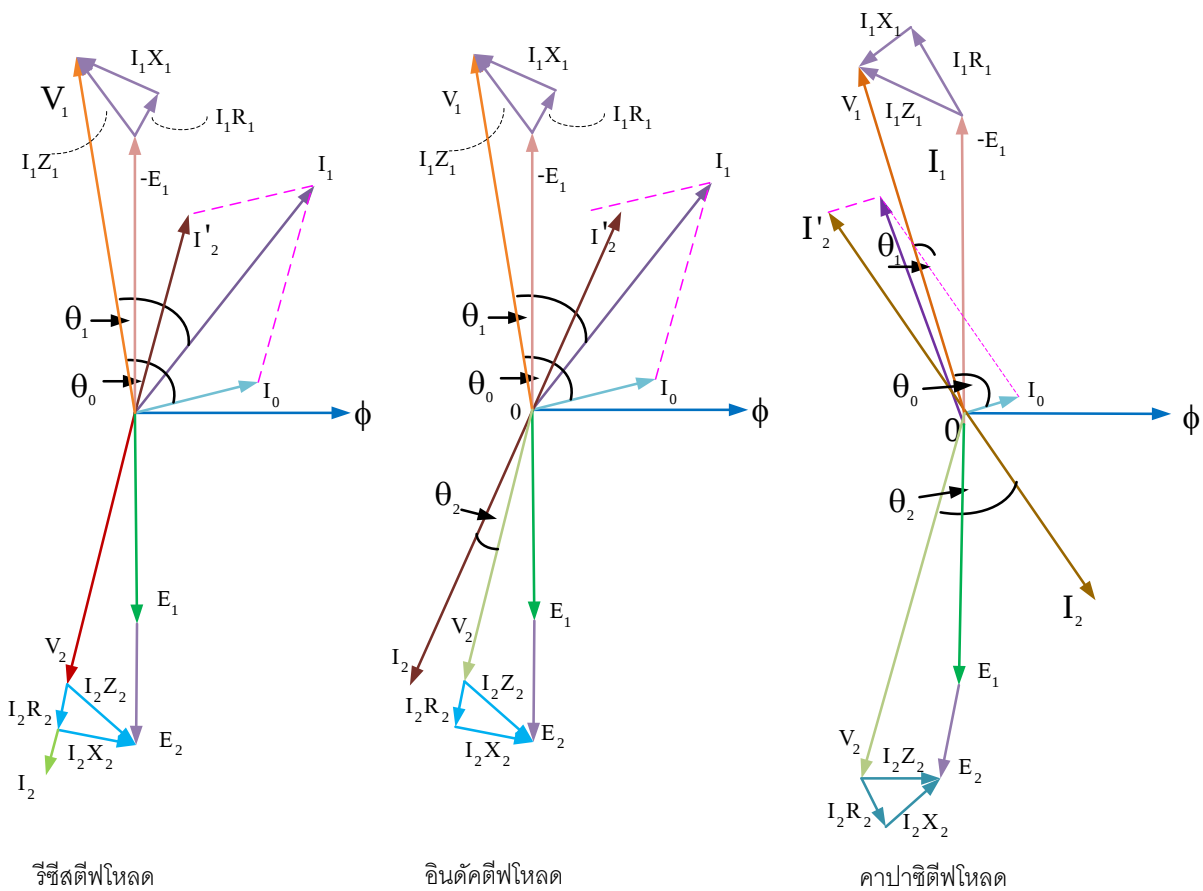
$$V_1 = E_1 + I_1(J_1 + jX_1)$$

$$= E_1 + I_1Z_1$$

และ

$$E_1 = V_2 + I_2(R_2 + jX_2)$$

จะเขียนเวกเตอร์ไดอะแกรมจะได้

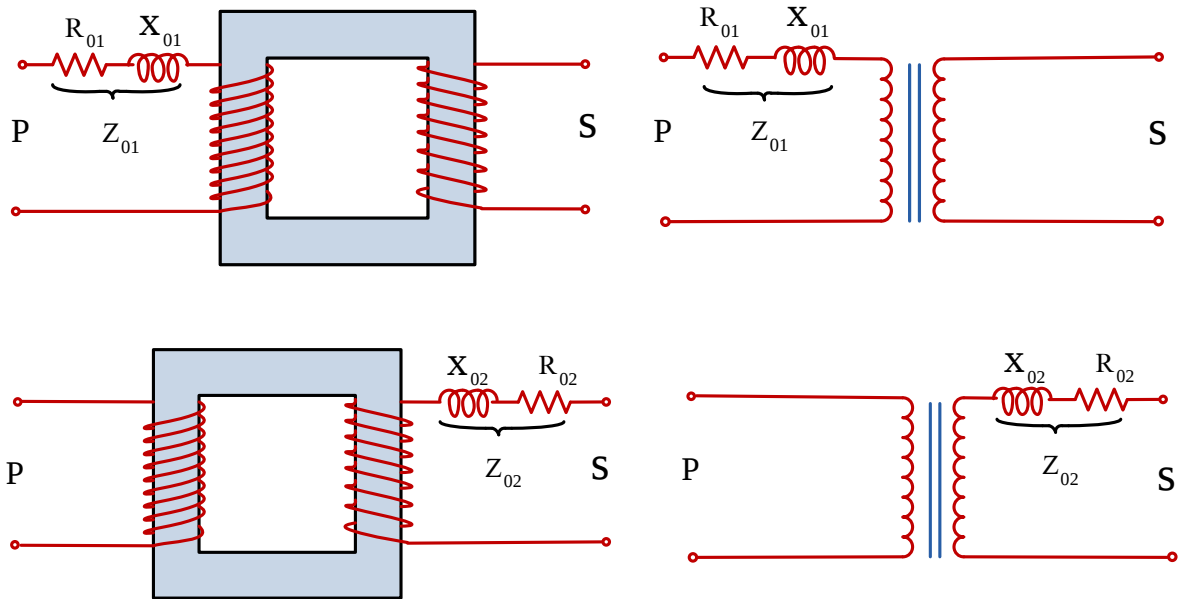


รูปที่ 3-14 แสดงเวกเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อมีโหลด

ข้อสังเกตในการเกิดรีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ X_1, X_2

แรงเคลื่อนไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย V_1 จะมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมรีแอกแตนซ์รั่วไหล I_1X_1 บวกกันทางเวกเตอร์กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทาน I_1R_1 ในทำนองเดียวกันแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิ E_2 จะมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมรีแอกแตนซ์รั่วไหล I_2X_2 บวกกันทางเวกเตอร์กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทาน I_2R_2

จากค่าความต้านทาน และค่ารีแอกแตนซ์ที่อยู่ทั้งสองด้านของหม้อแปลง อาจย้ายให้ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของหม้อแปลงไฟฟ้าก็ได้



$$\begin{aligned}
 \text{ซึ่ง } X_2' &= \frac{X_2}{K^2} \\
 \text{ก่อนย้าย P} &= P \quad \text{หลังย้าย} \\
 I_1^2 X_1 &= I_2^2 X_1' \\
 X_1' &= \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2 \cdot X_1 \\
 &= K^2 X_1 \\
 X_{01} &= X_1 + X_2' \\
 &= X_1 + \frac{X_2}{K^2} \\
 X_{02} &= X_2 + X_1' \\
 &= X_2 + K^2 X_1 \\
 Z_{01} &= \sqrt{(R_{01})^2 + (X_{01})^2} \\
 \text{หรือ } Z_{01} &= R_{01} + jX_{01} \\
 Z_{02} &= \sqrt{(R_{02})^2 + (X_{02})^2} \\
 \text{หรือ } Z_{02} &= R_{02} + jX_{02}
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 3.1 หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 kVA. 4400/220 V มีค่า $R_1 = 3.45 \, \Omega$ และ $R_2 = 0.009 \, \Omega$ และค่าของรีแอคแตนซ์ คือ $X_1 = 5.2 \, \Omega$ และ $X_2 = 0.015 \, \Omega$ จงคำนวณหา

1. ความต้านทานสมมูลที่ย้ายไปทางด้านปฐมภูมิ
2. ความต้านทานสมมูลที่ย้ายไปทางด้านทุติยภูมิ
3. รีแอคแตนซ์สมมูลที่ย้ายไปทั้งด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ
4. อิมพีแดนซ์สมมูลที่ย้ายไปทั้งทางด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ

วิธีทำ

กระแสที่ขดปฐมภูมิเมื่อมีโหลดเต็มที่

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{50000}{4400} \\ &= 11.36 \quad \text{A} \end{aligned}$$

กระแสที่ขดทุติยภูมิเมื่อมีโหลดเต็มที่

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{50000}{220} \\ &= 227.27 \quad \text{A} \end{aligned}$$

แต่

$$\begin{aligned} K &= \frac{V_2}{V_1} = \frac{220}{4400} \\ &= \frac{1}{20} = 0.05 \end{aligned}$$

ก) ความต้านทานสมมูลที่ย้ายไปทางด้านขดปฐมภูมิ

$$\begin{aligned} R_{01} &= R_1 + \frac{R_2}{K^2} \quad \Omega \\ &= 3.45 + \frac{0.009}{(0.05)^2} \quad \Omega \\ &= 3.45 + 3.6 \quad \Omega \\ R_{01} &= 7.05 \quad \Omega \end{aligned}$$

ข) ความต้านทานสมมูลที่ย้ายไปทางด้านขดทุติยภูมิ

$$\begin{aligned} R_{02} &= R_2 + K^2 R_1 \quad \Omega \\ &= 3.45 + ((0.05)^2 \times 3.45) \quad \Omega \\ &= 0.009 + 0.0086 \quad \Omega \\ R_{02} &= 0.0176 \quad \Omega \\ R_{02} &= K^2 R_{01} \quad \Omega \\ &= (0.05)^2 \times 7.05 \\ &= 0.0176 \quad \Omega \end{aligned}$$

ค) รีแอกแตนซ์สมมูลที่ย้ายไปทางด้านขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ

$$\begin{aligned} X_{01} &= X_1 + \frac{X_2}{K^2} \quad \Omega \\ &= 5.2 + \frac{0.015}{(0.05)^2} \\ X_{01} &= 11.2 \quad \Omega \\ X_{02} &= X_2 + (K^2 X_1) \quad \Omega \\ &= 0.015 + (5.2 \times (0.05)^2) \end{aligned}$$

$$X_{02} = 0.028 \quad \Omega$$

ในทำนองเดียวกันจะได้ว่า

$$X_{02} = K^2 X_{01} \quad \Omega$$

$$= (0.05)^2 \times 11.2$$

$$X_{02} = 0.028 \quad \Omega$$

ง) อิมพีแดนซ์สมมูลที่ย้ายไปทางด้านขดปฐมภูมิ และขดทุติยภูมิ

$$\begin{aligned} Z_{01} &= \sqrt{(R_{01})^2 + (X_{01})^2} \\ &= \sqrt{(7.05)^2 + (11.2)^2} \\ &= 13.25 \quad \Omega \end{aligned}$$

หรือ

$$\begin{aligned} Z_{01} &= R_{01} + jX_{01} \\ &= 7.05 + j11.2 \\ &= 13.25 \angle 57.811 \quad \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{02} &= \sqrt{(R_{02})^2 + (X_{02})^2} \\ &= \sqrt{(0.0176)^2 + (0.028)^2} \\ &= 0.0331 \quad \Omega \end{aligned}$$

หรือ

$$\begin{aligned} Z_{02} &= R_{02} + jX_{02} \\ &= 0.0176 + j0.028 \\ &= 0.0331 \angle 57.847 \quad \Omega \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกันจะได้ว่า

$$Z_{02} = 0.0331 \quad \Omega$$

$$Z_{02} = K^2 Z_{01} \quad \Omega$$

$$= (0.05)^2 \times 13.23$$

$$= 0.0331 \quad \Omega$$

ตัวอย่างที่ 3.2 ข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวหนึ่งมีดังต่อไปนี้อัตราส่วนจำนวนรอบ 19.5 : 1 $R_1 = 25 \Omega$, $X_1 = 100 \Omega$, $R_2 = 0.06 \Omega$, $X_2 = 0.25 \Omega$ กระแสไม่มีโหลด 1.25 A. นำหน้าเส้นแรงแม่เหล็ก 30 องศา เมื่อขดทุติยภูมิจ่ายโหลด 200 A ที่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว 500 V เพาเวอร์แฟคเตอร์ 0.8 ถ้าหลัง จงคำนวณหาแรงดันที่จ่ายให้กับขดปฐมภูมิ เพาเวอร์แฟคเตอร์ของขดปฐมภูมิ

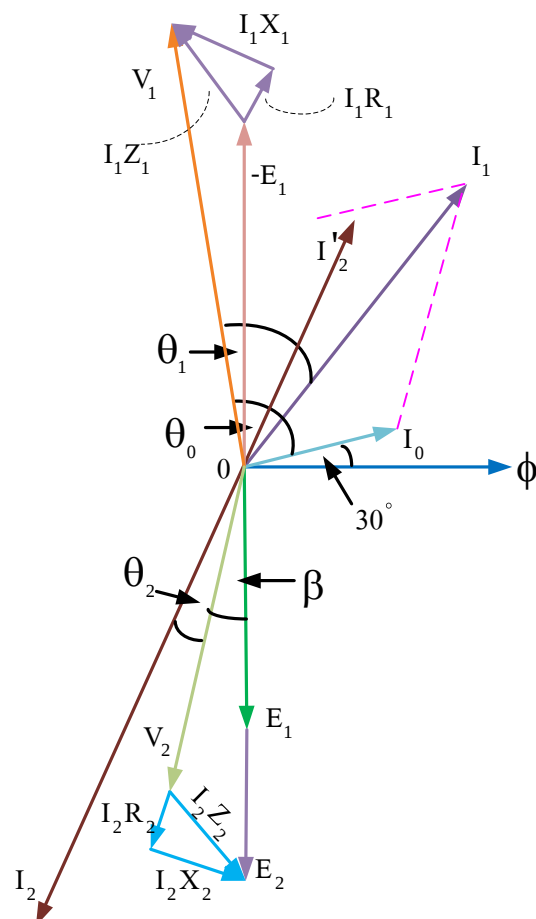
วิธีทำ เป็นเวกเตอร์อ้างอิง (Referent Vector)

$$\text{ถ้าให้ } V_2 = 500 \angle 0^\circ \quad V$$

$$= 500 + j0 \quad V$$

$$\begin{aligned}
 \cos^{-1} &= 36.87^\circ = \text{lagging} = -36.87^\circ \\
 I_2 &= 200 \angle -36.87^\circ \\
 &= 160 - j120 \quad \text{A} \\
 Z_2 &= (0.06 + j0.25) \\
 Z_2 &= 0.257 \angle 76.50^\circ \\
 E_2 &= V_2 + I_2 Z_2 \quad \text{V} \\
 &= 500 \angle 0^\circ + (200 \angle -36.87^\circ \times 0.257 \angle 76.50^\circ) \\
 &= 500 \angle 0^\circ + (51.400 \angle 39.63^\circ) \\
 &= (500 + j0) + (39.6 + j32.84) \\
 &= (539.6) + (j32.8) \text{ V} \\
 \text{จะได้} &= 540.59 \angle 3.5^\circ ; \beta = 3.5^\circ
 \end{aligned}$$

เวกเตอร์ไดอะแกรม



$$\begin{aligned}
 E_1 &= \frac{E_2}{K} \quad \text{V} \\
 &= 19.5E_2 \quad \text{V}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_1 &= 19.5 (539.6 + j 32.8) & V \\
 &= 10522.2 + j 639.6 & V \\
 \text{ดังนั้น} \quad -E_1 &= -10522.2 - j 639.6 & V \\
 &= 10541.62 \angle 176.52^\circ & V \\
 I_2' &= -K I_2 & A \\
 &= \frac{(-160 - j120)}{19.5} & A \\
 &= -8.21 + j 6.15 & A \\
 &= 10.26 \angle 143.16^\circ & A
 \end{aligned}$$

จากเวกเตอร์ จะได้ I_0 นำหน้า V_2 เป็นมุม

$$\begin{aligned}
 &= 3.5^\circ + 90^\circ + 30^\circ \\
 &= 123.5^\circ
 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad I_2 = 1.25 \angle 123.5^\circ \quad A$$

$$\begin{aligned}
 &= 1.25(\cos 123.5^\circ + j \sin 123.5^\circ) \\
 &= 1.25(-0.552 + j0.834)
 \end{aligned}$$

$$I_0 = -0.69 + j1.04 \quad A$$

เพราะว่า

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_2' + I_0 \\
 &= (-8.21 + j6.15) + (-0.69 + j1.04) \\
 &= -8.9 + j7.19
 \end{aligned}$$

$$I_1 = 11.44 \angle 141.06^\circ \quad A$$

เพราะฉะนั้นมุมระหว่าง V_1 และ I_1

$$\begin{aligned}
 V_1 &= -E_1 + I_1 Z_1 \\
 &= (-105522.2 - j639.6) + (-8.9 + j7.19) \times (25 + j100) \\
 &= -105522.2 - j639.6 - 222.5 + j179.75 - j890 - 719 \\
 &= -j890 - 719 \\
 &= -11463.7 - j1349.85
 \end{aligned}$$

$$V_1 = 11542.9 \angle -173.28^\circ \quad V$$

$$\begin{aligned}
 &= 360^\circ - 173.28^\circ - 141.06^\circ \\
 &= 45.66^\circ
 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นเพาเวอร์แฟคเตอร์ของปฏุมภูมิ = $\cos 45.66^\circ = 0.698$ (ล้าหลัง)

กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดปฏุมภูมิขณะไม่มีโหลด

$$\begin{aligned} P &= V_1 I_1 \sin 30^\circ \\ &= 11542.9 \times 1.25 \sin 30^\circ \\ \sin 30^\circ &= 0.5 \\ \theta &= \cos^{-1} 0.5 = 60^\circ \end{aligned}$$

เพราะว่า

$$\begin{aligned} &= 11542.9 \times 1.25 \times \cos 60^\circ \\ &= 7214.31 \quad \text{W} \\ R_{02} &= R_2 + K^2 R_1 \quad \Omega \\ &= 0.06 + 25(19.5)^2 \quad \Omega \\ &= 0.1257 \quad \Omega \end{aligned}$$

กำลังสูญเสียในขดลวดทั้งหมดเมื่อพิจารณาจากทางด้านขดทุติยภูมิ

$$\begin{aligned} &= (I_2)^2 R_{02} \quad \text{W} \\ &= (200)^2 \times 0.1257 \quad \text{W} \\ &= 5028 \quad \text{W} \end{aligned}$$

เพราะว่า กำลังเอาต์พุต

$$\begin{aligned} &= V_2 I_2 \cos \theta_2 \quad \text{W} \\ &= 500 \times 200 \times 0.8 \quad \text{W} \end{aligned}$$

และกำลังสูญเสียทั้งหมด

$$\begin{aligned} &= 5028 + 7214.31 \quad \text{W} \\ &= 12242.31 \quad \text{W} \end{aligned}$$

เพราะว่ากำลังอินพุต

$$\begin{aligned} &= 80000 + 12242.31 \quad \text{W} \\ &= 92242.31 \quad \text{W} \end{aligned}$$

จากประสิทธิภาพ = กำลังเอาต์พุต / กำลังอินพุต

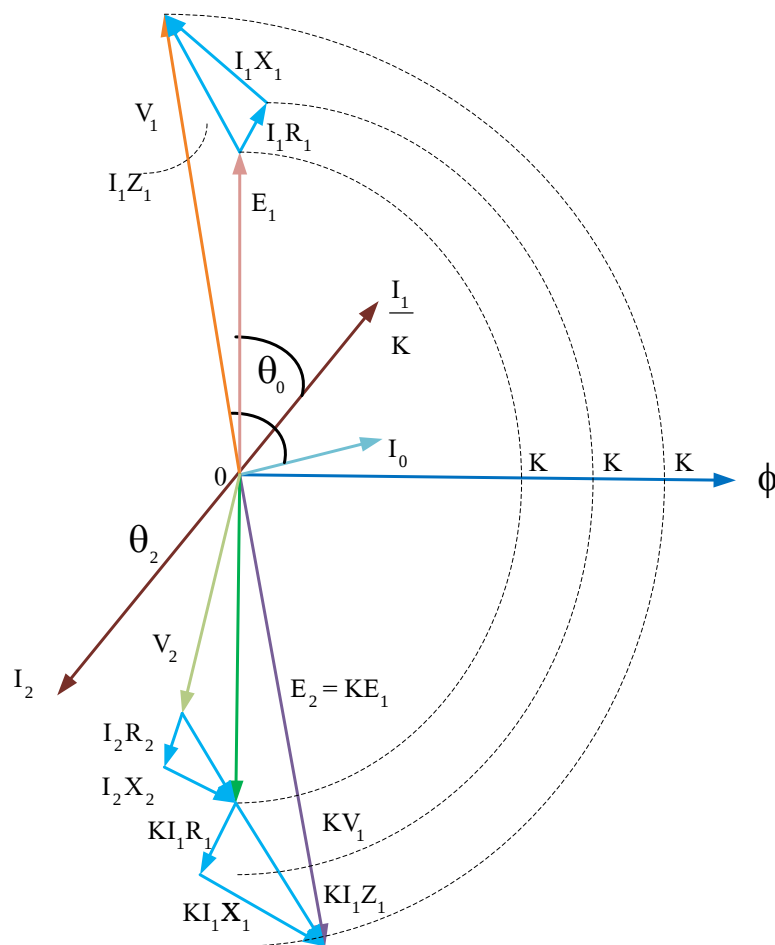
เพราะฉะนั้น ประสิทธิภาพ

$$\begin{aligned} &= \frac{80000}{92242.31} \\ &= 0.8673 \\ &= 86.73\% \end{aligned}$$

3.3.2 ไดอะแกรมอย่างง่าย (Simplified diagram)

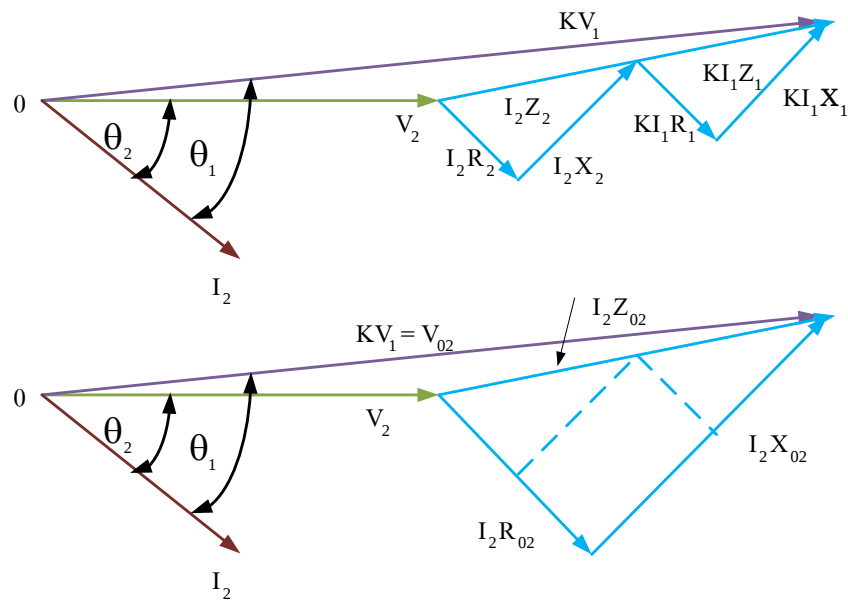
เวกเตอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงไฟฟ้าอาจเขียนเป็นไดอะแกรมอย่างง่ายได้ ถ้ากระแสในขณะไม่มีโหลด (I_0) ไม่คิด (I_0 มีค่าประมาณ 1-3 % ของกระแสเมื่อมีโหลดเต็มที่ I_1)

ถ้ารู้ V_2 , V_1 , θ_2 , I_2 เราสามารถทราบค่า E_2 ได้โดยผลบวกของเวกเตอร์ I_2R_2 และ I_2X_2 กับ V_2 ถ้าทำนองเดียวกัน V_1 มีค่าเท่ากับผลบวกทางเวกเตอร์ I_1R_1 และ I_1X_1 กับ E_1 ซึ่งจะพบว่าแรงดันไฟฟ้าทั้งหมดทางขดปฐมภูมิ สามารถย้ายไปทางด้านทุติยภูมิได้ ดังรูปที่ 3.13 ข้างล่างนี้ โดยจะเคลื่อนที่จากด้านบนลงมาด้านล่างทำมุม 180 องศา และค่าทางด้านล่างจะมีค่าเท่ากับด้านบนคูณ K



รูปที่ 3-15 แสดงการย้ายเวกเตอร์จากขดปฐมภูมิไปขดทุติยภูมิ

จากสัดส่วนด้านล่างของเวกเตอร์ในรูปที่ 3.13 อาจนำมาเขียนใหม่ได้ดังนี้



รูปที่ 3-16 แสดงเวกเตอร์จากขดปฐมภูมิไปขดทุติยภูมิ

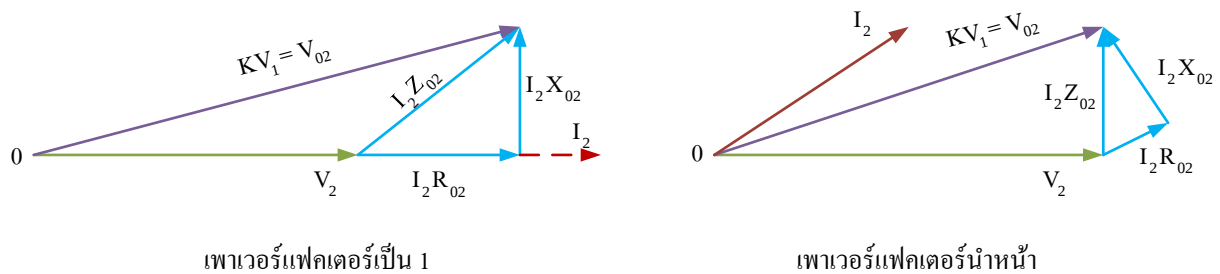
จากเวกเตอร์จะได้

$$\begin{aligned}
 V_2 &= KV_1 - I_2(R_{02} + jX_{02}) \\
 &= KV_1 - I_2Z_{02} \\
 \text{หรือ } V_1 &= \frac{(V_2 + I_2Z_{02})}{K}
 \end{aligned}$$

3.4 วงจรสมมูลในหม้อแปลงไฟฟ้า

3.4.1 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโดยประมาณในหม้อแปลงไฟฟ้า (Approximate voltage drop in a transformer)

เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในสถานะที่ไม่มีโหลดนั้น V_1 ประมาณให้ค่าเท่ากับ E_1 และ $E_2 = KE_1 = K V_1$ ถ้าให้ $V_{02} =$ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของทางด้านขดทุติยภูมิในขณะที่ไม่มีโหลด จะได้ว่า $V_{02} = KV_1$ จากรูปที่ 3-15 ข้างบนนี้เป็นลักษณะของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมในหม้อแปลง สำหรับกรณีของเพาเวอร์แฟกเตอร์ล้าหลัง



รูปที่ 3-17 แสดงเวกเตอร์เมื่อมีโหลดเพาเวอร์แฟกเตอร์เป็น 1 และ เพาเวอร์แฟกเตอร์นำหน้า

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโดยประมาณสำหรับกรณีเพาเวอร์แฟกเตอร์นำหน้า มีค่า

$$= (I_2 R_{02} \cos \theta - I_2 X_{02} \sin \theta)$$

สมการทั่วไปของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโดยประมาณสามารถเขียนได้ ดังนี้คือ

$$I_2 R_{02} \cos \theta \pm I_2 X_{02} \sin \theta$$

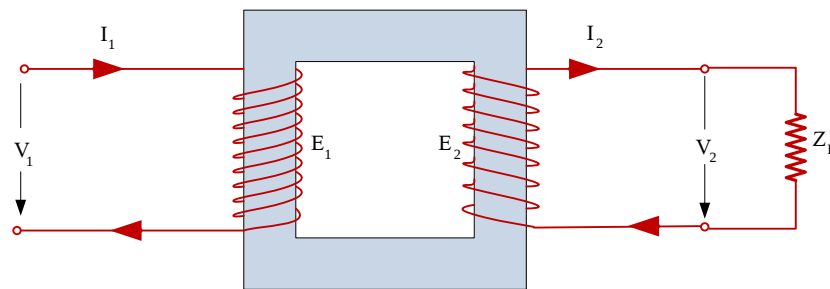
และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโดยประมาณนี้จะย้ายไปทางด้านขดลวดชุดปฐมภูมิได้และเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} &= \left[\frac{(I_2 R_{02} \cos \theta \pm I_2 X_{02} \sin \theta)}{V_{02}} \right] \times 100 \\ &= \left[\frac{(100 \times I_2 R_{02})}{V_{02}} \right] \cos \theta \pm \left[\frac{(100 \times I_2 X_{02})}{V_{02}} \right] \sin \theta \\ &= V_r \cos \theta \pm V_x \sin \theta \\ \text{เมื่อให้ } V_r &= \frac{100 I_2 R_{02}}{V_{02}} \\ &= \% \text{ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโดยประมาณในความต้านทาน} \\ &= \frac{100 I_1 R_{01}}{V_1} \end{aligned}$$

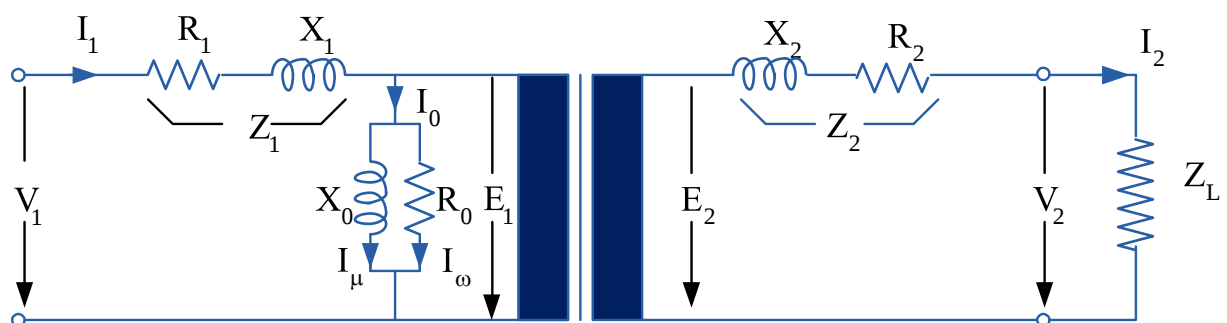
$$\begin{aligned}
 \text{และ} \quad V_x &= \frac{100I_2X_{02}}{V_{02}} \\
 &= \% \text{ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโดยประมาณในรีแอคแตนซ์} \\
 &= \frac{100I_1X_{01}}{V_1}
 \end{aligned}$$

3.4.2 วงจรสมมูลหรือวงจรเทียบเคียงในหม้อแปลงไฟฟ้า (Equivalent circuit of transformer)

จากวงจรที่แสดงในรูปที่ 3-18 อาจเขียนวงจรสมมูลได้ ดังรูปที่ 3-19



รูปที่ 3-18 แสดงหม้อแปลงเมื่อมีโหลด



รูปที่ 3-19 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลง

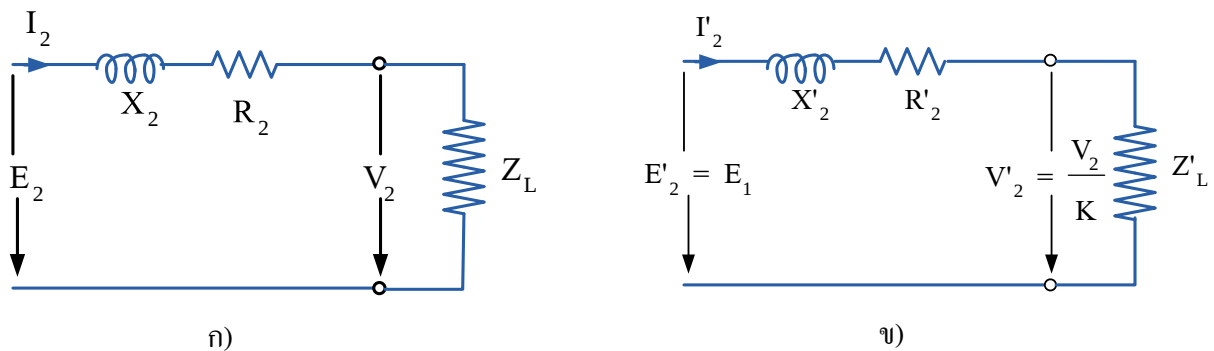
วงจรสมมูล จะได้ค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์นั้นแยกออกจากขดลวดและในกรณีที่ไม่มีโหลด จะมีอินดักแตนซ์บริสุทธิ์ (Pure – inductance X_0) ต่อขนานกับความต้านทาน (Non – inductive resistance R_0) และต่อขนานกับขดลวดปฐมภูมิ ซึ่งจะมีกระแสขณะไม่มีโหลด (I_0) และกระแส I_0 ที่ไหลผ่าน R_0 เป็น I_ω กระแสในกรณีที่ไม่มีโหลดที่ไหลผ่าน X_0 เป็น I_μ และ เท่ากับผลบวกทางเวกเตอร์ของ V_1 กับ I_1Z_1

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3-19 จะได้

$$\begin{aligned} X_0 &= \frac{E_1}{I_\mu} & X_0 &= \frac{E_1}{I_0 \sin \theta_0} \\ R_0 &= \frac{E_1}{I_\omega} & R_0 &= \frac{E_1}{I_0 \cos \theta_0} \end{aligned}$$

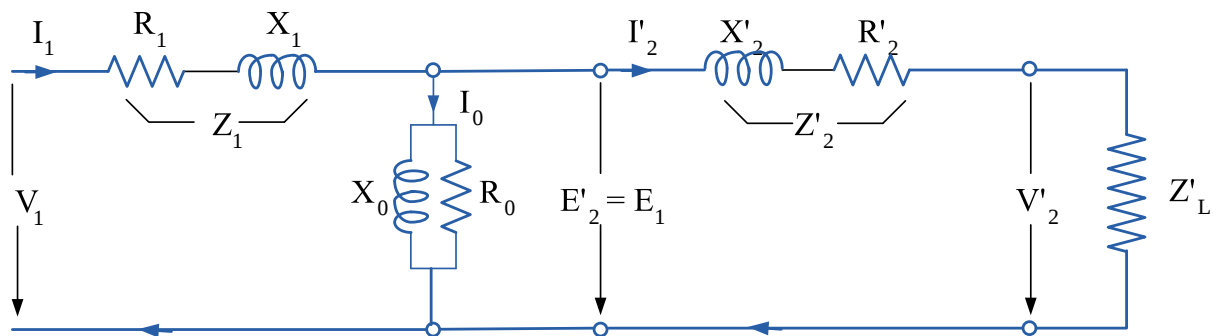
จาก $\frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1}$ K นั้นเราสามารถย้ายค่าต่างๆ จากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้

จากวงจรสมมูล ทางด้านขดทุติยภูมิในรูปที่ 3-20 ก) เมื่อย้ายไปทางขดปฐมภูมิจะได้ดังรูปที่ 2-20 ข)



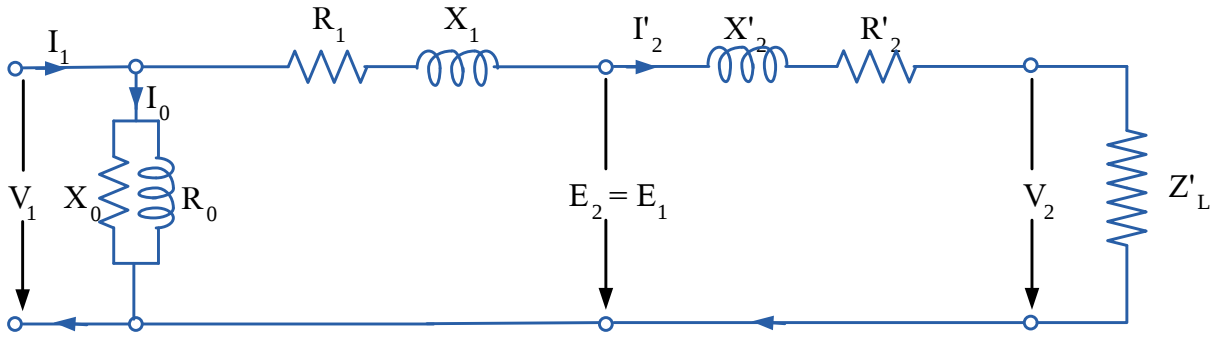
รูปที่ 3-20 แสดงวงจรสมมูลของด้านขดทุติยภูมิที่ย้ายไปขดปฐมภูมิ

ดังนั้นจากวงจรสมมูลในรูปที่ 3-20 เมื่อนำมาเขียนวงจรสมมูลที่สมบูรณ์ของหม้อแปลงจะได้เป็นดังแสดงในรูปที่ 3-21



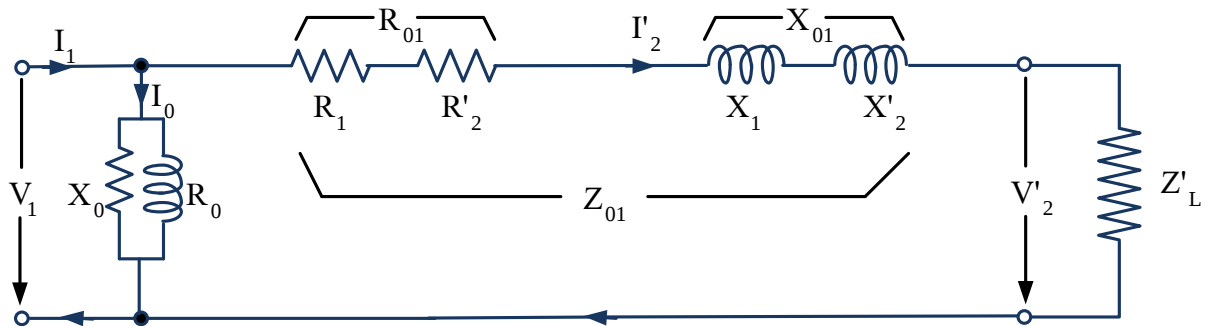
รูปที่ 3-21 แสดงวงจรสมมูลของด้านขดทุติยภูมิที่ย้ายไปขดปฐมภูมิ

เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ อาจย้ายส่วนที่แทนการสูญเสียในแกนเหล็กไปไว้ด้านหน้าดังแสดงในรูปที่ 3-22 ซึ่งการย้ายนี้จะไม่ทำให้ค่าในวงจรเปลี่ยนไปมากนักเพราะการสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงมีค่าต่ำ และคงที่



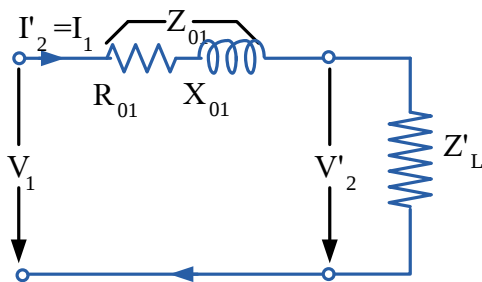
รูปที่ 3-22 แสดงวงจรสมมูลโดยประมาณของหม้อแปลง

จากวงจรที่ 3-22 แสดงวงจรสมมูลจะเขียนได้ดังแสดงในรูปที่ 3.23

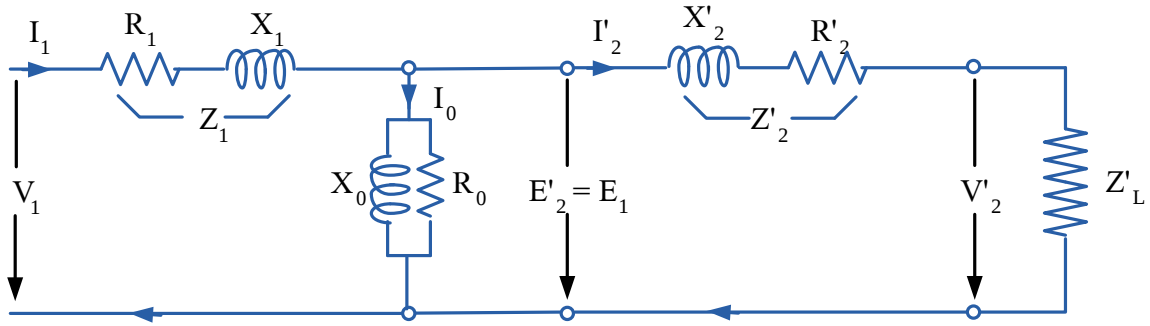


รูปที่ 3-23 แสดงวงจรสมมูลโดยประมาณ

แต่เพื่อให้สะดวกและง่ายต่อการคำนวณขึ้นไปอีก โดยการไม่คิดค่าของ I_0 ดังนั้นจะได้ว่า $I_1 = I'_2$ ดังแสดงในรูป 3-24



รูปที่ 3-24 แสดงวงจรสมมูลเมื่อไม่คิด I_0



จากวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 3-21 นั้น สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ทั้งหมดได้ดังนี้ คือ

$$Z = Z_1 + Z_m // Z'_2 + Z'_L$$

$$= Z_1 + \frac{Z_m(Z'_2 + Z'_L)}{Z_m(Z'_2 + Z'_L) + Z'_2 + Z'_L}$$

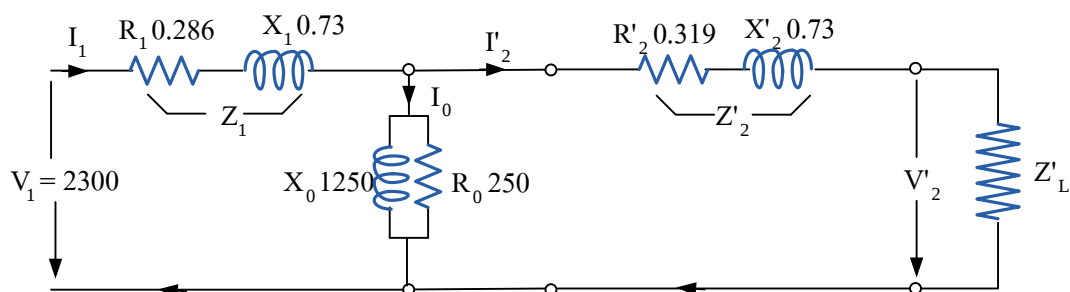
เมื่อ $Z'_2 = R'_2 + jX'_2 \quad \Omega$

และ $Z_m =$ อิมพีแดนซ์ของวงจรกระตุ้น (Exciting circuit)

จากวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 3-21 จะได้

$$V_1 = I_1 \left[Z_1 + \frac{Z_m(Z'_2 + Z'_L)}{Z_m(Z'_2 + Z'_L) + Z'_2 + Z'_L} \right]$$

ตัวอย่างที่ 3.3 ค่าต่างๆของหม้อแปลง 2300/230V,50Hz มีดังต่อไปนี้ $R_1 = 0.286 \Omega$, $R'_2 = 0.319 \Omega$, $R_0 = 250 \Omega$, $X_1 = 0.73 \Omega$, $X'_2 = 0.73 \Omega$, $X_0 = 1250 \Omega$ โหลดอิมพีแดนซ์ (Z_L) = $0.387 + j0.29 \Omega$ จงคำนวณหาค่าต่างๆในวงจรสมมูลที่สมบูรณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวนี้ เมื่อทางด้านปฐมภูมิต่อเข้ากับแรงดันไฟฟ้าปกติ



$$\begin{aligned}
 \text{จาก } K &= \frac{230}{2300} = \frac{1}{10} \\
 Z_1 &= R_1 + X_1 = 0.286 + j0.73 \\
 Z_L &= 0.387 + j0.29 \quad \Omega \\
 Z_L' &= \frac{Z_L}{K^2} \quad \Omega \\
 &= \frac{0.387 + j0.29}{\left(\frac{1}{10}\right)^2} \quad \Omega \\
 &= 38.7 + j29 \quad \Omega \\
 &= 48.4 \angle 36.9^\circ \quad \Omega \\
 Z_2' &= 0.319 + j29 \quad \Omega \\
 Z_2' &= 0.797 \angle 66.39^\circ \\
 Z_2' + Z_L' &= 0.319 + j0.73 + 38.7 + j29 \\
 &= 39.02 + j29.73 \quad \Omega \\
 &= 49.0 \angle 37.3^\circ \quad \Omega \\
 Z_m &= \frac{1}{Y_m} \\
 Y_m &= Y_1 + Y_2 \\
 Y_m &= \left(\frac{1}{R_0}\right) + \left(\frac{1}{jX_0}\right) \\
 &= \left(\frac{1}{j0 + 250}\right) + \left(\frac{1}{0 + j1250}\right) \\
 &= \left(\frac{1}{250}\right) + \left(\frac{1}{j1250}\right) \\
 &= 0.004 - j0.0008 \\
 Z_m &= \frac{1}{0.004 - j0.0008} \\
 &= 245.14 \angle 11.3^\circ \\
 &= 240.39 + j48 \\
 I_1 &= \frac{V_1}{Z_1 + \frac{Z_m(Z_2' + Z_L')}{Z_m + (Z_2' + Z_L')}} \\
 Z_m(Z_2' + Z_L') &= (240 + j48) + (39.02 + j29.73) \\
 &= 279.02 + j77.73 \\
 &= 289.02 \angle 15.6^\circ \quad \Omega \\
 Z_m(Z_2' + Z_L') &= 245.14 \angle 11.3^\circ \times 49.0 \angle 37.3^\circ \quad \Omega \\
 &= 12005 \angle 48.6^\circ \quad \Omega
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{แทนค่าจะได้ } I_1 &= \frac{V_1}{Z_1 + \frac{Z_m(Z_2' + Z_L')}{Z_m + (Z_2' + Z_L')}} \\
I_1 &= \frac{2300 \angle 0^\circ}{0.286 + j0.73 + \frac{12005 \angle 48.6^\circ}{289.64 \angle 15.6^\circ}} \\
I_1 &= 54.36 \angle -32.25^\circ \quad \text{A} \\
\text{เพาเวอร์แฟคเตอร์ที่ขดปฐมภูมิ} &= \cos 34.6^\circ \\
&= 0.823 \\
\text{กำลังที่ขดปฐมภูมิ} &= V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad \text{W} \\
\text{หรือกำลังเอาต์พุต} &= 2300 \times 54.63 \times 0.832 \quad \text{W} \\
\text{จะได้ } I_2' &= I_1 \times \frac{Z_m}{(Z_2' + Z_L') + Z_m} \\
&= 54.36 \angle -32.25^\circ \times \frac{289.64 \angle 15.6^\circ}{49.0 \angle 37.3^\circ + 289.64 \angle 15.6^\circ} \\
I_2' &= 46.16 \angle -38.9^\circ \quad \text{A} \\
I_0 &= I_1 \times \frac{(Z_2' + Z_L')}{Z_m(Z_2' + Z_L')} \\
I_0 &= 54.36 \angle -32.25^\circ \times \frac{49.0 \angle 37.3^\circ}{289.64 \angle 15.6^\circ (49.0 \angle 37.3^\circ)} \\
I_0 &= 9.23 \angle -12.9^\circ \quad \text{A} \\
&= 104.54 \quad \text{kW} \\
\text{กำลังเอาต์พุต} &= (46.16)^2 \times 38.7 \quad \text{W} \\
\text{หรือ กำลังเอาต์พุต} &= 82.46 \quad \text{kW} \\
\text{การสูญเสียในขดทุติยภูมิ} &= (46.16)^2 \times 0.319 \quad \text{W} \\
&= 679.71 \quad \text{W} \\
\text{การสูญเสียที่ขดปฐมภูมิ} &= (54.63)^2 \times 0.286 \quad \text{W} \\
&= 853.55 \quad \text{W} \\
\text{การสูญเสียในแกนเหล็ก} &= (9.23)^2 \times 240 \quad \text{W} \\
&= 20.446 \quad \text{kW}
\end{aligned}$$

 กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน 	ใบสาระการเรียนรู้	หน่วยที่ 1
	ชื่อวิชา เครื่องกลไฟฟ้า 1	เวลาเรียน 5 ชั่วโมง
	ชื่อหน่วย การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	
ชื่อเรื่องหรือชื่องาน การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า		
สาระสำคัญ การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าก็เพื่อหาค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กและกำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงซึ่งเมื่อเราทราบค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กและกำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงแล้วจะทำให้เราสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ การทดสอบหาลำดับสูญเสียนี้สามารถทดสอบได้จากการทดสอบขณะเปิดวงจรและการทดสอบขณะลัดวงจร เรื่องที่จะศึกษา 1. โวลต์เตจเรกกูเลชัน 2. การสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า 3. การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 4. ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า จุดประสงค์การเรียนรู้ 1. อธิบายโวลต์เตจเรกกูเลชันหม้อแปลงไฟฟ้าได้ 2. อธิบายความสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ 3. อธิบายการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าได้ 4. คำนวหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า 5. มีพัฒนาการคุณธรรม จริยธรรม ค่านิยม และคุณลักษณะอันพึงประสงค์ ที่ผู้เรียนสามารถสังเกตเห็นได้ใน ด้านความมีมนุษยสัมพันธ์ ความมีวินัย ความรับผิดชอบ ความเชื่อมั่นในตนเอง ความสนใจใฝ่รู้ ความรักสามัคคี ความกตัญญูกตเวที		

4. การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าก็เพื่อหาค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กซึ่งแบ่งเป็น 2 แบบคือสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์รีซิส และกระแสไหลวน และอีกการสูญเสียหนึ่ง คือ กำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงซึ่งเมื่อเราทราบค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก และกำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงแล้ว จะทำให้เราสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ การทดสอบหาลำดับกำลังสูญเสียสามารถทดสอบได้จากการทดสอบขณะเปิดวงจร และการทดสอบขณะลัดวงจร

4.1 โวลต์เตจเรกกูเลชัน

เนื่องจากแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อมีโหลดกับไม่มีโหลดนั้น จะแตกต่างกันมากบ้างน้อยบ้าง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลายสิ่งด้วยกัน เช่น ขึ้นอยู่กับแกนเหล็ก การอัดแกนเหล็กการพันขดลวด เป็นต้น นอกจากนี้การออกแบบที่ดีก็ช่วยได้มากเหมือนกัน ถ้าแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อไม่มีโหลดกับเมื่อโหลดต่างกันมาก หม้อแปลงไฟฟ้าตัวนั้นก็ไม่ได้ แต่ถ้าแรงดันเมื่อไม่มีโหลดกับเมื่อมีโหลดแตกต่างกันน้อย หรือ ออกแบบให้ไม่แตกต่างกันเลย แสดงว่าการควบคุมแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าดี

สมมุติว่า หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 KVA 4,400/220 V. แสดงว่า เอาพุทของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ฟูลโหลดมีค่า 50 KVA แรงดัน 4,400 โวลต์ เป็นแรงดันฟูลโหลดของขดลวดปฐมภูมิและแรงดัน 220 โวลต์ ก็เป็นแรงดันฟูลโหลดของขดลวดทุติยภูมิ

ถ้า ${}_0V_1$ = แรงดันที่ป้อนให้กับขดลวดปฐมภูมิตอนมีโหลด แรงดันนี้จะมีค่าเท่ากับ V_1 เมื่อไม่มีโหลดพอมีโหลดแรงดัน ${}_0V_1$ จะลดลงเป็น V_1 จึงเพิ่มแรงดันอินพุทขึ้นอีกเพื่อให้ V_1 มีค่าคงเดิม จนถึงค่าๆ หนึ่ง คือ ${}_0V$

ในลักษณะคล้ายๆ กับแรงดัน 220 โวลต์ ก็เป็นแรงดันฟูลโหลดของขดลวดทุติยภูมิแต่เมื่อไม่มีโหลดแรงดันปลายสายของขดลวดทุติยภูมิ คือ

$$\begin{aligned} {}_0V_2 &= E_2 = KE_1 && \dots\dots\dots 4.1 \\ &= KV_1 \end{aligned}$$

ทั้งนี้ก็เพราะไม่เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมในขดลวด, $I_2 = 0$

- เมื่อ E_2 = แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ขดลวดทุติยภูมิเมื่อไม่มีโหลด
- E_1 = แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ขดลวดปฐมภูมิเมื่อไม่มีโหลด
- V_1 = แรงดันฟูลโหลดของขดลวดปฐมภูมิ
- ${}_0V_2$ = แรงดันที่ป้อนให้ขดลวดปฐมภูมิเมื่อไม่มีโหลด

เมื่อมีโหลด แรงดันปลายสาย ${}_0V_2$ จะลดลงเหลือ V_2 แรงดันตกคร่อมขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าหาได้จากสมการข้างล่าง ซึ่งเป็นค่าใกล้เคียง (Approximate)

ถ้าพิจารณาที่ขดลวดทุติยภูมิ จะได้ค่า V_{d2} ดังนี้

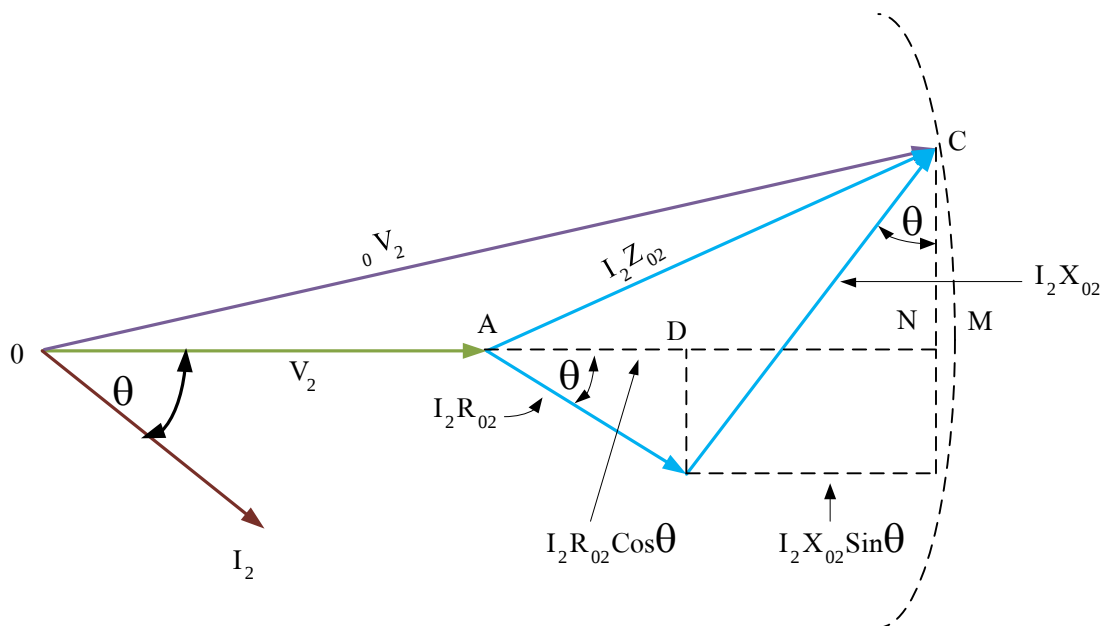
$$V_{d2} = I_2 R_{02} \cos \theta \neq I_2 X_{02} \sin \theta \dots\dots\dots 4.2$$

และถ้าพิจารณาที่ขดลวดปฐมภูมิ จะได้ค่า V_{d1} ในลักษณะเดียวกัน

$$V_{d1} = I_1 R_{01} \cos \theta \neq I_1 X_{01} \sin \theta \dots\dots\dots 4.3$$

เครื่องหมาย + หมายถึง เพาเวอร์แฟคเตอร์ ล้าหลัง (lag)

เครื่องหมาย - หมายถึง เพาเวอร์แฟคเตอร์ นำหน้า (lead)



รูปที่ 4-1 เวกเตอร์ไดอะแกรม แสดงว่า V_{d2}

จากเวกเตอร์ไดอะแกรมรูป 4.1 แรงดันไฟฟ้า V_{d2} จะมีค่า = AD + DN ดังนั้นแรงดัน ${}_0V_2$ ค่าใกล้เคียง (approximate) จะมีค่า = OA + AD + DN = ON ส่วนแรงดัน ${}_0V_2$ ค่าถูกต้อง (exact) ที่ต้องใช้การคำนวณด้วยเวกเตอร์ = OC

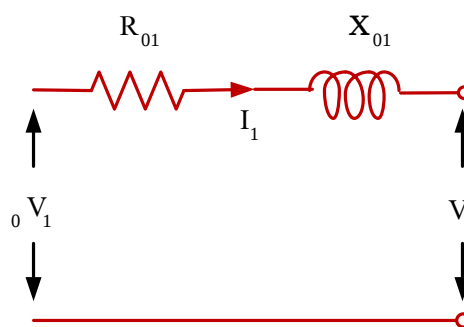
$$\begin{aligned}\therefore \quad OA &= V_2 \\ AD &= I_2 R_{02} \cos \theta \\ DN &= I_2 X_{02} \sin \theta\end{aligned}$$

ซึ่งรูป 4-1 นี้พิจารณาค่าต่างๆ ที่ขดลวดทุติยภูมิ แต่ถ้าจะพิจารณาค่าที่ขดลวดปฐมภูมิก็จะได้สมการในลักษณะเดียวกันดังในสมการ 4.3

เนื่องจากขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองขดจะพันติดกันทางแม่เหล็กอย่างเหนียวแน่น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโวลตทางทุติยภูมิ ก็จะส่งผลกลับไปทางปฐมภูมิ และถ้ามีการเปลี่ยนแปลงทางปฐมภูมิก็จะส่งผลต่างๆ ไปทางทุติยภูมิตลอดเวลา ดังนั้นการหาเปอร์เซ็นต์โวลท์เตจเรกกูเลชันโดยตรงจากขดลวดชุดหนึ่งชุดใดค่าที่ได้จะไม่ถูกต้องนัก จึงต้องหาค่าเปอร์เซ็นต์โวลท์เตจเรกกูเลชัน โดยการพิจารณาจากขดลวดด้านหนึ่งเข้าไปสู่ขดลวดอีกด้านหนึ่ง เหมือนกับการหาค่าความต้านทานสมมูลย์ ดังได้กล่าวมาแล้ว

ดังนั้นเปอร์เซ็นต์โวลท์เตจเรกกูเลชันของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อพิจารณาเทียบกับ (referred to) ขดลวดปฐมภูมิจะได้ว่า

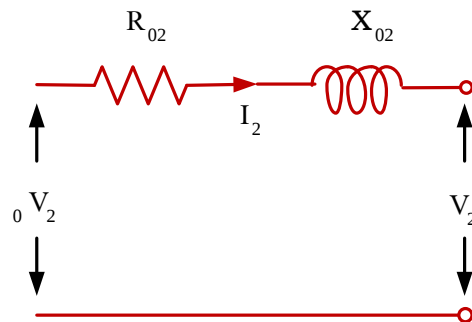
$$\text{เปอร์เซ็นต์เรกกูเลชัน} = \frac{{}_0V_1 - V_1}{V_1} \times 100 \quad \dots\dots\dots 4.4$$



เมื่อ	V_1	=	แรงดันฟูลโวลตของขดลวดปฐมภูมิ (ค่าที่ name plate)
	${}_0V_1$	=	แรงดันอินพุทของขดลวดปฐมภูมิตอนฟูลโวลต
	${}_0V_1$	=	$V_1 + V_{d1}$
	V_{d1}	=	$I_1 R_{01} \cos \theta \quad \pm \quad I_1 X_{01} \sin \theta$

ถ้าจะหาเปอร์เซ็นต์เรกกูเลชั่นของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาเทียบกับขดลวดทุติยภูมิจะได้ว่า (referred to)

$$\text{เปอร์เซ็นต์เรกกูเลชั่น} = \frac{{}_0V_2 - V_2}{V_2} \times 100 \quad \dots\dots\dots 4.5$$



เมื่อ

$$\begin{aligned}
 V_1 &= \text{แรงดันฟูลโหลดของขดลวดปฐมภูมิ (ค่าที่ name plate)} \\
 {}_0V_2 &= \text{แรงดันอินพุทของขดลวดปฐมภูมิตอนฟูลโหลด} \\
 {}_0V_2 &= V_1 + V_{d2} \\
 V_{d2} &= I_2 R_{02} \cos\theta \quad \pm \quad I_2 X_{02} \sin\theta
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 4.2 หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส มีอัตราส่วน 5 : 1 ขดลวดปฐมภูมิมีความต้านทาน = 0.4 โอห์ม และรีแอคแตนซ์ 1.2 โอห์ม ขดลวดทุติยภูมิมีความต้านทาน 0.01 โอห์ม และรีแอคแตนซ์ 0.04 โอห์ม จงหาเปอร์เซ็นต์เรกกูเลชั่น เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายกระแสให้โหลด 125 แอมป์ที่แรงดัน 600 โวลต์ และเพาเวอร์แฟคเตอร์ของโหลดมีค่า 0.8 (ล่าหลัง)

วิธีทำ

อัตราส่วนของขดลวดปฐมภูมิต่อทุติยภูมิ

$$\begin{aligned}
 &= 5 : 1 \\
 \therefore K &= 1 / 5 \\
 \therefore R_1 &= 0.4 \quad \text{โอห์ม} \\
 \text{และ } R_2 &= 0.01 \quad \text{โอห์ม} \\
 \therefore R_{02} &= R_2 + R_1 / K^2 \\
 &= 0.01 + \left[\frac{0.4 \times 1}{5} \right]^2 \quad \text{โอห์ม} \\
 &= 0.026 \quad \text{โอห์ม} \\
 \therefore X_1 &= 1.2 \quad \text{โอห์ม} \\
 \text{และ } X_2 &= 0.04 \quad \text{โอห์ม}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \therefore X_{02} &= X_2 + X_1 / K^2 \\
 &= 0.04 + 1.2 \times \left[\frac{1}{5} \right]^2 \quad \text{โอห์ม} \\
 &= 0.088 \quad \text{โอห์ม}
 \end{aligned}$$

จากสมการ 4.2 เมื่อเพาเวอร์แฟคเตอร์ล้าหลังแรงดันตกคร่อมขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาที่ขดลวดทุติยภูมิ

$$\begin{aligned}
 V_{d2} &= I_2 R_{02} \cos \theta \pm I_2 X_{02} \sin \theta \\
 I_2 R_{02} &= 125 \times 0.026 && \text{โวลต์} \\
 &= 3.25 && \text{โวลต์} \\
 I_2 X_{02} &= 125 \times 0.088 && \text{โวลต์} \\
 &= 11 && \text{โวลต์} \\
 \therefore \cos \theta &= 0.8 \\
 \theta &= 36.86^\circ \\
 \therefore \sin \theta &= 0.6 \\
 \therefore V_{d2} &= 3.25 \times 0.8 + 11 \times 0.6 && \text{โวลต์} \\
 &= 2.6 + 6.6 && \text{โวลต์} \\
 &= 9.2 && \text{โวลต์} \\
 \text{เปอร์เซ็นต์เรกกูเลชั่น} &= \frac{0V_2 - V_2}{V_2} \times 100 \\
 0V_2 - V_2 &= 9.2 && \text{โวลต์} \\
 V_2 &= 600 && \text{โวลต์} \\
 \text{เปอร์เซ็นต์เรกกูเลชั่น} &= \frac{9.2}{600} \times 100 \\
 &= 1.53 \% \quad \text{ตอบ}
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 4.3 จากตัวอย่างที่ 4.2 ถ้าเพาเวอร์แฟคเตอร์ มีค่า 0.8 นำหน้า จงหาเปอร์เซ็นต์โวลต์เตจเรกกูเลชั่น

$$\begin{aligned}
 \text{วิธีทำ} \quad V_2 &= 600 && \text{โวลต์} \\
 I_2 &= 125 && \text{แอมป์}
 \end{aligned}$$

แรงดันตกในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

$$\begin{aligned}
 V_{d2} &= I_2 R_{02} \cos \theta \pm I_2 X_{02} \sin \theta \\
 &= 3.25 \times 0.8 + 11 \times 0.6 && \text{โวลต์} \\
 &= -4 && \text{โวลต์}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{เปอร์เซ็นต์เรกกูเลชัน} &= \frac{V_1 - V_2}{V_2} \times 100 \\
 &= \frac{600 - 604}{600} \times 100 \\
 &= -0.67 \% \quad \text{ตอบ}
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 5.4 หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 20 KVA 2,200/200 V 60 Hz ถูกนำไปทดสอบเพื่อหา โวลต์เตจเรกกูเลชัน เมื่อทดสอบแบบวงจรเปิด (open-circuit test) (วัดค่าจากขดลวดแรงดันต่ำ) วัดวัตต์มิเตอร์ แอมมิเตอร์ และโวลต์มิเตอร์ อ่านค่าได้ 148 วัตต์ 4.2 แอมป์ และ 220 โวลต์ ตามลำดับ และเมื่อทดสอบแบบ วงจรลัด (short-circuit test) (วัดค่าจากขดลวดแรงดันสูง) วัดวัตต์มิเตอร์ แอมป์มิเตอร์ และโวลต์มิเตอร์ อ่านค่า ได้ 360 วัตต์ 10.5 แอมป์ และ 86 โวลต์ ตามลำดับ จงหา

1. คอรัลอส ของหม้อแปลงไฟฟ้า
2. คอปเปอร์ลอส ของหม้อแปลงไฟฟ้า
3. ความต้านทานสมมูลเมื่อพิจารณาเทียบกับขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ
4. รีแอกเตอร์สมมูลเมื่อพิจารณาเทียบกับขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ
5. เรกกูเลชัน เมื่อพิจารณาเทียบกับขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ เมื่อเพาเวอร์แฟคเตอร์ = 0.8

วิธีทำ

1. คอรัลอส ของหม้อแปลงไฟฟ้า = 148 โวลต์
 2. คอปเปอร์ลอส ของหม้อแปลงไฟฟ้า = 360 วัตต์
- ค่าสมมูลต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะหาได้จาก คอปเปอร์ลอส เท่านั้น

∴ 3. ความต้านทานสมมูลเมื่อพิจารณาเทียบกับขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ (ที่ขดลวด แรงดัน 2,200 โวลต์)

$$\begin{aligned}
 \therefore R_{01} &= \frac{W_{sc}}{I_{sc}^2} \\
 &= \frac{360}{(10.5)^2} \quad \text{โอห์ม} \\
 &= 3.26 \quad \text{โอห์ม}
 \end{aligned}$$

ถ่ายทอด R_{01} ไปสู่ขดลวดทุติยภูมิ (ขดลวดแรงดัน 220 โวลต์)

$$\begin{aligned}
 \text{จะได้ } R_{01} &= R_{02} \times K^2 \\
 \text{เมื่อ } K &= \frac{V_2}{V_1} = \frac{220}{2,200} = \frac{1}{10}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\therefore R_{02} &= 3.26 \times \frac{1^2}{10} && \text{โอห์ม} \\
&= 0.0326 && \text{โอห์ม} \\
\therefore Z_{01} &= \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \\
&= \frac{86}{10.5} && \text{โอห์ม} \\
&= 8.19 && \text{โอห์ม} \\
\therefore X_{01} &= \sqrt{(Z_{01})^2 - (R_{01})^2} \\
&= \sqrt{(8.19)^2 - (3.26)^2} && \text{โอห์ม} \\
&= 7.51 && \text{โอห์ม}
\end{aligned}$$

ถ่ายทอด X_{01} ไปสู่ขดลวดทุติยภูมิ

$$\begin{aligned}
X_{02} &= X_{01} \times K^2 \\
&= 7.51 \times \frac{1^2}{10} && \text{โอห์ม} \\
&= 0.0751 && \text{โอห์ม}
\end{aligned}$$

หาแรงกลูเลชั่น

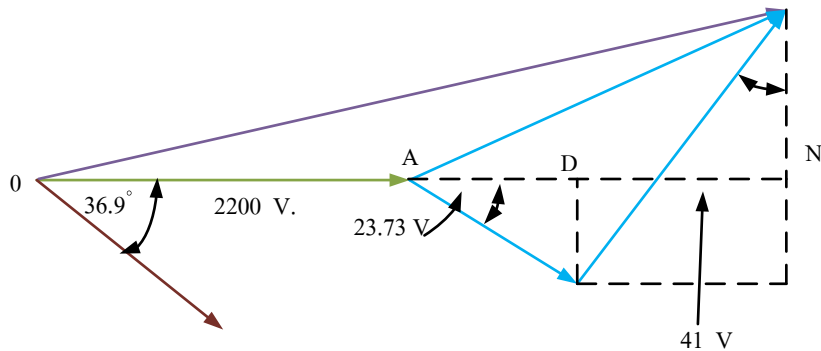
เมื่อพิจารณาที่ขดลวดปฐมภูมิ

$$\text{เปอร์เซ็นต์แรงกลูเลชั่น} = \frac{{}_0V_2 - V_2}{V_2} \times 100$$

แรงดันตกคร่อมขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อพิจารณาที่ขดลวดปฐมภูมิ

$$\begin{aligned}
V_{d1} &= I_1 R_{01} \cos \theta \pm I_1 X_{01} \sin \theta \\
I_1 &= \frac{20 \times 1,000}{2,200} && \text{แอมป์} \\
&= 9.1 && \text{แอมป์} \\
\therefore V_{d1} &= 9.1 \times 3.26 \times 0.8 \pm 9.1 \times 7.51 \times 0.6 && \text{โวลต์} \\
&= 23.73 + 41.00 && \text{โวลต์} \\
&= 64.73 && \text{โวลต์} \\
\therefore {}_0V_1 &= \text{แรงดันขดลวดปฐมภูมิ เมื่อไม่มีโหลด} \\
&= 2,200 + 64.73 && \text{โวลต์} \\
&= 2,264.73 && \text{โวลต์}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 {}_0V_1 &= \text{แรงดันเมื่อมีโหลด} \\
 &= 2,200 && \text{โวลต์} \\
 \text{เปอร์เซ็นต์เรกกูเลชั่น} &= \frac{2,264.73 - 2,200}{2,200} \times 100 \\
 &= 2.94 \quad \text{ตอบ}
 \end{aligned}$$



รูปที่ 4-2 แสดงค่า $V_{d1} = AN$

เมื่อพิจารณาที่ขดลวดทุติยภูมิ (เพื่อเปรียบเทียบกัน)

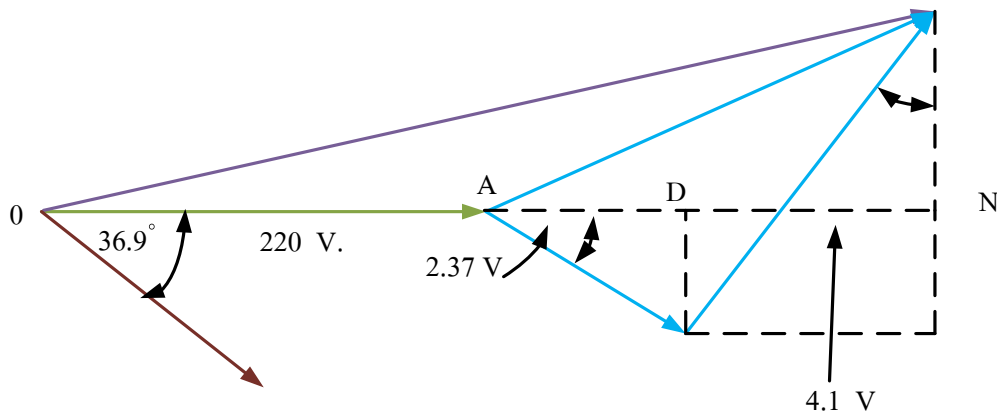
$$\text{เปอร์เซ็นต์เรกกูเลชั่น} = \frac{{}_0V_2 - V_2}{V_2} \times 100$$

แรงดันตกคร่อมขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อพิจารณาที่ขดลวดทุติยภูมิ

$$\begin{aligned}
 V_{d2} &= I_2 R_{02} \cos \theta \pm I_2 X_{02} \sin \theta \\
 I_2 &= \frac{20 \times 1,000}{220} && \text{แอมป์} \\
 &= 91 && \text{แอมป์} \\
 \therefore V_{d1} &= 91 \times 0.0326 \times 0.8 \pm 91 \times 0.0751 \times 0.6 && \text{โวลต์} \\
 &= 2.37 + 4.1 && \text{โวลต์} \\
 &= 6.47 && \text{โวลต์}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \therefore {}_0V_2 &= \text{แรงดันขดลวดทุติยภูมิ เมื่อไม่มีโหลด} \\
 &= 220 + 6.47 && \text{โวลต์} \\
 &= 226.47 && \text{โวลต์}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{เปอร์เซ็นต์เรกกูเลชัน} &= \frac{226.47 - 220}{220} \times 100 \\ &= 2.94 \quad \text{ตอบ}\end{aligned}$$



รูปที่ 4-3 แสดงค่า $V_{d_2} = AN$

4.2 การสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่ได้ ดังนั้นความสูญเสีย (losses) เกี่ยวกับความเสียดทาน (friction) และลม (wind age) จึงไม่มี ดังนั้นความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าจะอยู่ในรูปของแกนเหล็ก (Iron loss) และทองแดง (copper loss)

4.2.1 ความสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็ก (core loss หรือ iron loss)

ความสูญเสียชนิดนี้จะประกอบด้วย ความสูญเสีย เนื่องจากฮิสเตอร์เรซิส (Hysteresis loss) และความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy current loss) เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กที่แกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้าที่เรียกว่า มิวจอลฟลักซ์จะมีค่าคงที่ ไม่ว่าโพลจะเปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ตาม (ถ้าเปลี่ยนแปลงก็น้อยมาก ประมาณ 1-3% เท่านั้น) ดังนั้นจึงถือว่าความสูญเสียชนิดนี้มีค่าคงที่ด้วย

ก. ความสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์เรซิส เนื่องจากไฟฟ้ากระแสสลับจะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ตลอดเวลา เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นก็จะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางตลอดเวลาและเปลี่ยนแปลงด้วยอัตราเดียวกับกระแสไฟด้วย ดังนั้นโมเลกุล (molecule) ของเหล็กจะมีการกลับทิศทางจากเหนือเป็นใต้และจากใต้เป็นเหนือตลอดเวลา ในการกลับทิศทางจากขั้วเหนือไปขั้วใต้นั้นจะต้องใช้ต้องพลังงาน

เพื่อเอาชนะความผิดหรือความเสียหายของโมเลกุลก่อน โมเลกุลนั้นจึงจะกลับทิศทางได้ พลังงานที่ใช้จะออกมาในรูปของพลังงานความร้อน เรียกพลังงานที่สูญเสียไปในการเอาชนะความเสียหายของโมเลกุลนี้ว่า ฮิสเตอร์เรซิส เพื่อลดความสูญเสียชนิดนี้จึงใช้เหล็ก ซิลิกอน (Silicon) เครื่องกลไฟฟ้าหรือเครื่องใช้ไฟฟ้า กระแสสลับทุกชนิดจะมีความสูญเสียชนิดนี้ด้วยกันทั้งนั้น

ข. ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน ขณะที่กระแสไฟสลับมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางอยู่ตลอดเวลา นั้น เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงและตัดกับแกนเหล็กด้วย ทำให้เกิดแรงเคลื่อนที่และกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในแกนเหล็กและแกนเหล็กจะมีความต้านทานอยู่ด้วย ดังนั้นจะเกิดกำลังไฟฟ้า (I^2R) ขึ้นในแกนเหล็กและแสดงออกมาในรูปของความร้อน จะลดความสูญเสียชนิดนี้ลงได้โดยการเลือกใช้แผ่นเหล็กบางๆ แทนแท่งเหล็กตัน

ความสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กดังที่ได้กล่าวมานี้สามารถหาได้โดยการทดสอบวงจรเปิด (Open-circuit-test) ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

4.2.2 ความสูญเสียเนื่องจากทองแดง (Copper loss)

ความสูญเสียชนิดนี้จะเกิดขึ้นที่ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าเนื่องจากขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวดหลายรอบด้วยกัน ดังนั้นจำนวนความต้านทาน จึงมีค่ามากขึ้นตามจำนวนรอบของขดลวดด้วย ในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานเมื่อไม่มีโหลด (no load) จะมีกระแสไหลเฉพาะขดลวดปฐมภูมิเท่านั้น ซึ่งมีจำนวนน้อยมาก ความสูญเสียที่เกิดขึ้นจึงไม่มากนักและความสูญเสียที่เกิดขึ้นเฉพาะขดลวดปฐมภูมิเท่านั้น แต่พอมีโหลดต่อเข้ากับขดลวดทุติยภูมิจะมีกระแสไหลในขดลวดทุติยภูมิและกระแสในขดลวดปฐมภูมิก็เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นความสูญเสียจะเกิดขึ้นทั้งในขดลวดทุติยภูมิ และปฐมภูมิ ความสูญเสียที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อมีโหลดจะมีค่าสูงขึ้น และเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของโหลด และออกมาในรูปของความร้อน

ความสูญเสียชนิดนี้ สามารถหาได้โดยการทดสอบแบบวงจรลัด (Short-circuit test) ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

การสูญเสียพลังงานในหม้อแปลงไฟฟ้านั้น สามารถเกิดขึ้นได้หลากหลายสาเหตุ เช่น การไม่ปลดหม้อแปลงไฟฟ้าต้านแรงสูงเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีการต่อใช้งานกับโหลด การเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดไม่เหมาะสมกับโหลดหรือการเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าคุณภาพต่ำ ฯลฯ เป็นต้น

4.2.3 การเลือกขนาดหม้อแปลง

การเลือกขนาดหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทั่วไปนั้นจะเลือกให้มีขนาดพอดีกับโหลด โดยการเลือกขนาดของหม้อแปลงนั้น ถือว่าสำคัญมาก เพราะถ้าเลือกขนาดที่มีพิกัดน้อยกว่าโหลดก็จะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดความเสียหายและ อาจจะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าร้อนและระเบิดหรือเกิดเพลิงไหม้ได้ แต่ถ้าเลือกขนาดหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่เกินไปก็จะทำให้สูญเสียพลังงานภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ทำให้สิ้นเปลืองค่าไฟฟ้า การเลือกขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้านั้น จะพิจารณาจากค่ากระแสรวมของโหลดทั้งหมด โดยที่将有มีตารางขนาด

พิกัดของหม้อแปลงแต่ละขนาดเทียบกับค่ากระแสโหลดที่หม้อแปลงรับได้ พร้อมทั้งบอกขนาดสายต่อเข้าหม้อแปลง

ตารางตัวอย่าง เทียบกับค่ากระแสโหลดที่หม้อแปลงรับได้ พร้อมทั้งบอกขนาดสายต่อเข้าหม้อแปลง (สายแบบ VCT)

ขนาดหม้อแปลง	กระแสเต็มที	ขนาดอุปกรณ์ตัดตอนผกผัน	สายทองแดงหุ้มฉนวน				สายอลูมิเนียมหุ้มฉนวน			
			1	2	3	4	1	2	3	4
KVA	A									
1P-10	43.5	50	16	-	-	-	35	-	-	-
1P-20	87	75	25	-	-	-	50	-	-	-
1P-30	103.4	100	50	-	-	-	95	-	-	-
1P-50	217.4	200	95	-	-	-	120	-	-	-
30	43.3	50	16	-	-	-	35	-	-	-
50	72.2	100	35	-	-	-	50	-	-	-
100	144.3	200	70	2x35	-	-	95	2x50	-	-
160	230.9	250	120	2x50	-	-	185(150)	2x70	-	-
200	288.7	300	150	2x70	-	-	185	2x95	-	-
250	360.8	400	185	2x95	3x50	-	240	2x120	3x70	4x50
315	454.6	500	240	2x120	3x70	-	400	2x150	3x95	4x70
400	577.3	630	400	2x150	3x95	-	500	2x185	3x120	4x95
500	721.7	800	500	2x185	3x120	-	-	2x240	3x185(150)	4x120
630	909.3	1000	-	2x240	3x150	4x120	-	2x400	3x185(150)	4x150
800	1154.7	1250	-	2x400	3x240	4x185	-	2x500	3x400	4x240
1000	1443.4	1600	-	2x500	3x300	4x240	-	-	3x500	4x300

4.2.4 การปลดหม้อแปลงด้านแรงดันสูง ขณะไม่ต่อใช้งาน

หม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อไม่มีการต่อใช้งานหรือต่อเข้ากับโหลด ไม่ได้แปลว่าหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะไม่ทำงานแต่หม้อแปลงไฟฟ้ายังคงทำงานปกติ ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานภายในหม้อแปลงและทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งส่งผลกระทบต่ออายุและระยะเวลาในการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งในทางปฏิบัติถ้าไม่มีการต่อใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากับโหลด ควรที่จะทำการปลดโหลดหม้อแปลงไฟฟ้าด้านแรงดันสูง เพื่อเป็นการลดการสูญเสียพลังงานและยืดอายุของหม้อแปลงไฟฟ้าออกไปได้ โดยการทำงานในการปลดหม้อแปลงนั้นจะต้องกระทำโดยผู้เชี่ยวชาญ อุปกรณ์ที่ใช้ปฏิบัติงานและอุปกรณ์ป้องกันต้องได้รับมาตรฐานและควรปฏิบัติงานอย่างน้อย 2 – 3 คนขึ้นไป

4.2.5 การเลือกใช้งานหม้อแปลงสูญเสียต่ำ

หม้อแปลงไฟฟ้าความสูญเสียต่ำ เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบโดยวัสดุคุณภาพสูงทั้งในส่วนแกนเหล็กและขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า การใช้งานหม้อแปลงสูญเสียต่ำจะทำให้สามารถลดการใช้พลังงานลงได้ 15 – 20 % เมื่อเปรียบเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบทั่วไป

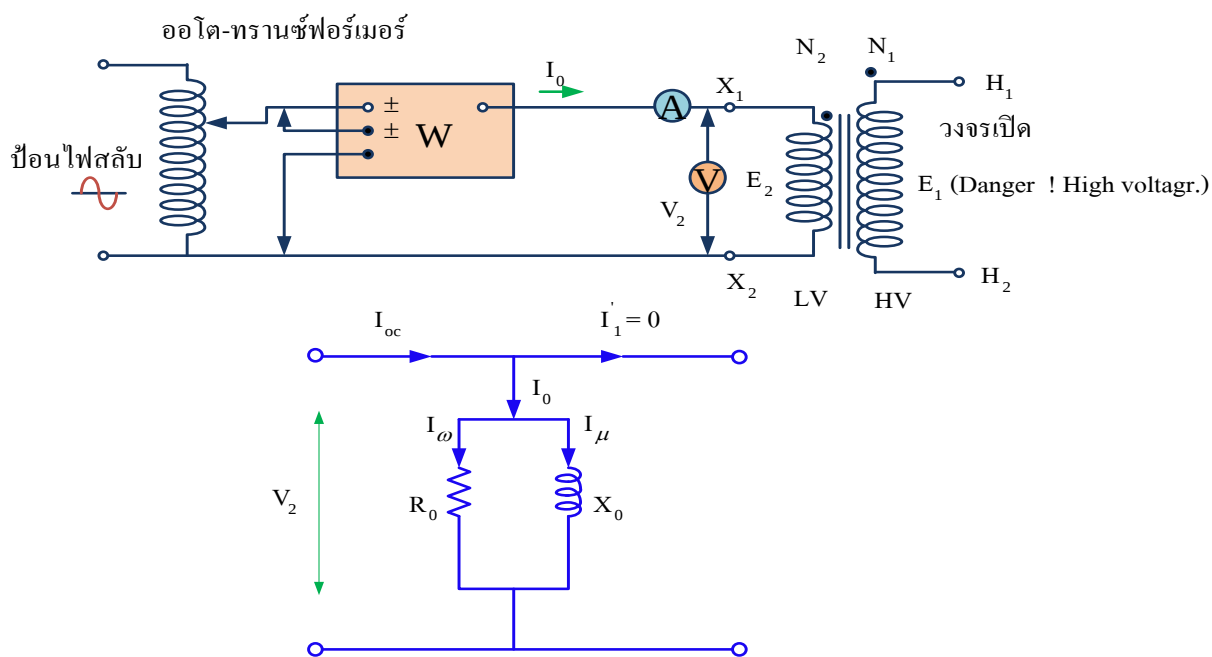
หมายเหตุ

1. กำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงแบบทั่วไปอ้างอิงจากข้อมูลผู้ผลิตหม้อแปลงในประเทศไทย
2. กำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงความสูญเสียต่ำอ้างอิงจากคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ประหยัดพลังงาน หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบน้ำมัน พพ.1011-1 : 2547 โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

4.3 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไป เพื่อที่จะได้ทราบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าตัวนั้นจะมีความสูญเสีย (losses) เกิดขึ้นเท่าใด และมีประสิทธิภาพเท่าใด การทดสอบมี 2 วิธีคือ

4.3.1 การทดสอบด้วยวงจรเปิด (Open-circuit หรือ No-load test) การทดสอบแบบนี้มีจุดมุ่งหมาย เพื่อที่จะหาค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อไม่มีโหลด (no-load loss) หรือความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss หรือ iron loss) การทดสอบกระทำดังรูปที่ 4-1 เราจะทำการทดสอบที่ขดลวดแรงดันต่ำ ส่วนขดลวดแรงดันสูงนั้นปล่อยปลายสายเปิดไว้



รูปที่ 4-4 การทดสอบเพื่อหาค่าคอร์ลอส (Core loss) ด้วยวงจรเปิด

ที่ขดลวดแรงดันต่ำจะต่อแอมมิเตอร์ โวลต์มิเตอร์และวัตต์มิเตอร์ แล้วป้อนแรงดันตามขนาดของขดลวดที่ความถี่ปกติกับขดลวดแรงดันต่ำนั้น ค่าที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์จะเป็นค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (Core loss) หรือความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อไม่มีโหลด (no-load loss) กระแสที่อ่านได้จากแอมมิเตอร์ จะเป็นกระแสของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อไม่มีโหลด (I_0) ซึ่งมีค่าต่ำมาก ประมาณ 2-10% ของ

กระแสไฟฟ้าเต็มพิกัดโหลด ความสูญเสียเนื่องจากทองแดง (Copper loss) น้อยมากจึงจะถือว่าเป็นศูนย์ ความสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็ก (Core loss) นี้จะมีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ด้วย ถึงแม้โหลดจะเปลี่ยนแปลงจนถึงเต็มพิกัดโหลดก็ตาม

$$\begin{aligned}
 W_0 &= \text{ค่าคอร์ลอสที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์} \\
 V_1 &= \text{แรงดันจากโวลท์มิเตอร์} \\
 I_0 &= \text{กระแสขณะไม่มีโหลดจากแอมป์มิเตอร์} \\
 \cos\theta &= \text{เพาเวอร์แฟคเตอร์ของขดลวด} \\
 W_0 &= V_1 I_0 \cos\theta \quad \dots\dots\dots 4.6 \\
 \cos\theta &= \frac{W_0}{V_1 I_0} \quad \dots\dots\dots 4.7 \\
 I_u &= \text{กระแสที่สร้างมิวจากฟลักซ์} \\
 &= I_0 \sin\theta_0 \quad \dots\dots\dots 4.8 \\
 I_w &= \text{กระแสที่ทำให้เกิดคอร์ลอส} \\
 &= I_0 \cos\theta_0 \quad \dots\dots\dots 4.9 \\
 X_0 &= \frac{V_0}{I_w} \\
 R_0 &= \frac{V_0}{I_u}
 \end{aligned}$$

ถ้าความถี่ที่ป้อนให้กับขดลวดเปลี่ยนไปจากที่ออกแบบไว้ จะทำให้คอร์ลอสเปลี่ยนแปลงไปด้วย คอร์ลอสมีสองส่วนด้วยกัน คือ คอร์ลอสที่เกิดจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (eddy current loss) W_E

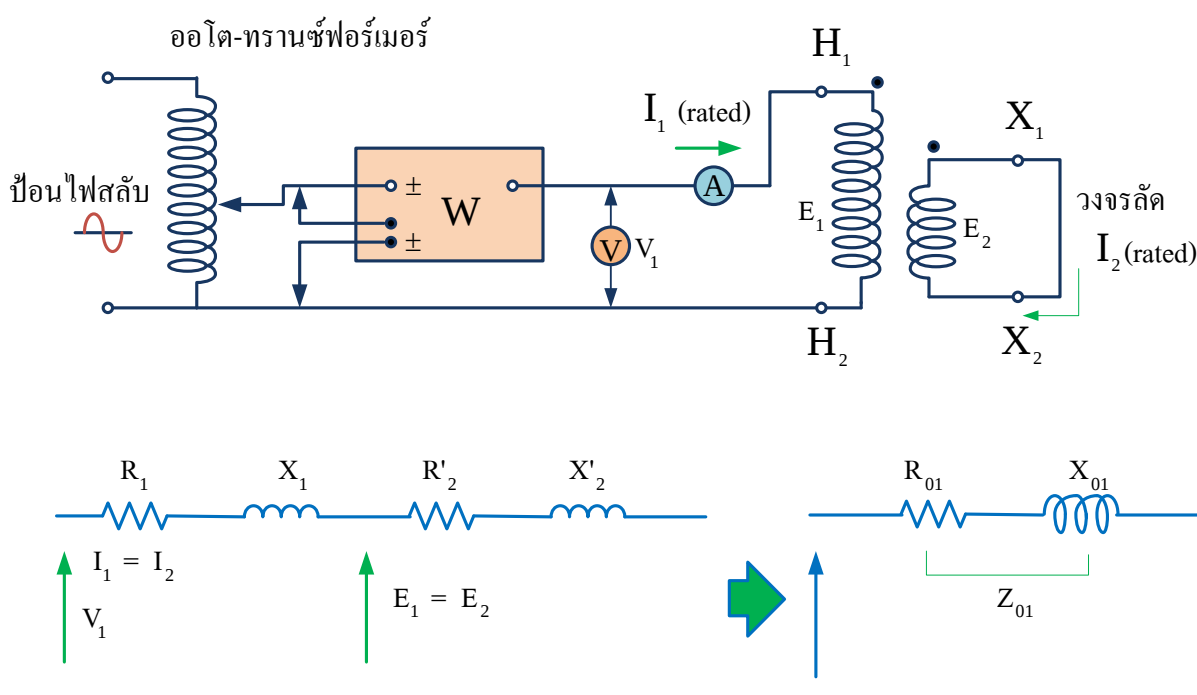
$$\begin{aligned}
 W_E &= QB_{\max}^2 f^2 \quad \dots\dots\dots 4.10 \\
 Q &= \text{ค่าคงที่} \\
 B_{\max}^2 &= \text{ความหนาแน่นสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็ก Wb/m}^2 \\
 F &= \text{ค่าคงที่ } H_2
 \end{aligned}$$

และจากกระแสที่ทำให้เกิดฮิสเตอร์เรซิส W_h

$$\begin{aligned}
 W_h &= PB_{\max}^{1.6} f \quad \dots\dots\dots 4.11 \\
 P &= \text{ค่าคงที่} \\
 W_0 &= W_E + W_h \quad \dots\dots\dots 4.12
 \end{aligned}$$

4.3.2 การทดสอบด้วยการต่อวงจรลัด (Short-circuit หรือ Copper loss test) การทดสอบแบบนี้เพื่อที่จะทราบว่า

1. หม้อแปลงไฟฟ้าตัวนั้นมีความสูญเสียเนื่องจากขดลวดทองแดง (Copper loss) ที่เต็มพิกัดโหลดหรือที่โหลดขนาดต่างๆ เท่าไร
2. หม้อแปลงไฟฟ้าความต้านทานสมมูลย์ (R_{01} , R_{02}) รีแอกแตนซ์สมมูลย์ (X_{01} , X_{02}) และอิมพีแดนซ์ (Z_{01} , Z_{02}) สมมูลย์ เท่าไร
3. เมื่อทราบอิมพีแดนซ์สมมูลย์ (Z_{01} , Z_{02}) ก็สามารถคำนวณหาแรงดันคร่อมหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ในที่สุดก็สามารถคำนวณหาค่าโวลต์เตจเรกกูเลชั่นได้



รูปที่ 4-5 การทดสอบเพื่อหา คอปเปอร์ลอสด้วยการต่อวงจรลัด

แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ขดลวดจะมีค่าประมาณ 5-10 % ของแรงดันฟูลโหลดเท่านั้น โดยความถี่ของแรงดันจะมีค่าเท่ากับค่าที่ออกแบบด้วย

ค่าที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์เป็นคอปเปอร์ลอสของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ฟูลโหลดส่วนคอร์ลอสน้อยมาก สมมติว่าขดลวดแรงดันต่ำเป็นขดลวดทุติยภูมิและต่อเป็นวงจรลัดด้วย ดังนั้นขดลวดแรงดันสูงจึงเป็นขดลวดปฐมภูมิ ในกรณีเช่นนี้ ค่าต่างๆที่คำนวณได้ เช่น ความต้านทานสมมูลย์ หรือรีแอกแตนซ์สมมูลย์ หรืออิมพีแดนซ์สมมูลย์ ดังนั้นความต้านทานสมมูลย์หรือรีแอกแตนซ์สมมูลย์หรืออิมพีแดนซ์สมมูลย์จึงเป็น R_{01} หรือ X_{01} หรือ Z_{01} โดยที่

$$Z_{01} = \frac{V_{SG}}{I_{SG}} \quad \dots\dots\dots 4.13$$

เมื่อ $V_{SG} =$ แรงดันที่ป้อนให้ขดลวด

$I_{SG} =$ กระแสอ่านจากแอมป์มิเตอร์ (Wb/m²)

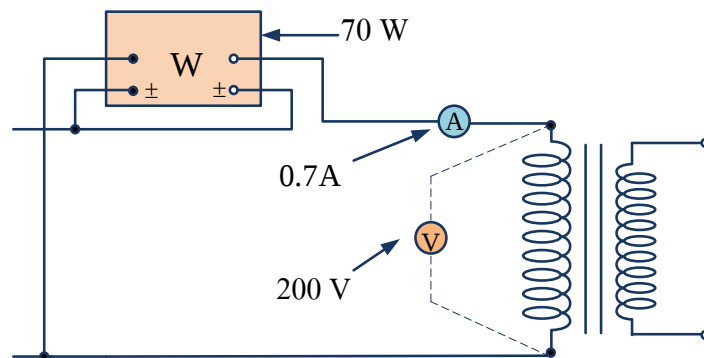
$$I_{SG}^2 R_{01} = W_{SG} \quad \dots\dots\dots 4.14$$

$$R_{01} = \frac{W_{SG}}{I_{SG}^2} \quad \dots\dots\dots 4.15$$

เมื่อ $W_{SG} =$ ค่าความสูญเสียคอปเปอร์ลออสที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์

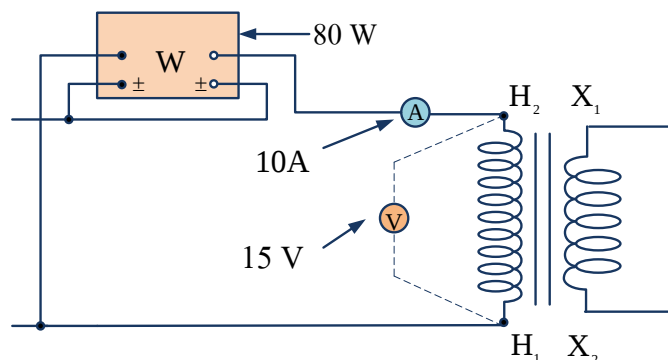
ตัวอย่างที่ 4.1 จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสตัวหนึ่ง ขนาด 200/400 V 50 Hz ได้ข้อมูลดังต่อไปนี้

1. การทดสอบด้วยวงจรเปิด วัดที่ขดลวดแรงดันต่ำ ได้ค่าแรงดัน กระแสและ กำลังไฟฟ้าเป็น 200 โวลต์ 0.7 แอมป์ และ 70 วัตต์ ตามลำดับ



รูปที่ 4-6 วงจรเปิด

2. การทดสอบด้วยการต่อวงจรลัด วัดที่ขดลวดแรงดันสูง ได้ค่าแรงดัน กระแสและกำลังไฟฟ้าเป็น 15 โวลต์ 10 แอมป์และ 80 วัตต์ ตามลำดับ



รูปที่ 4-7 วงจรปิด

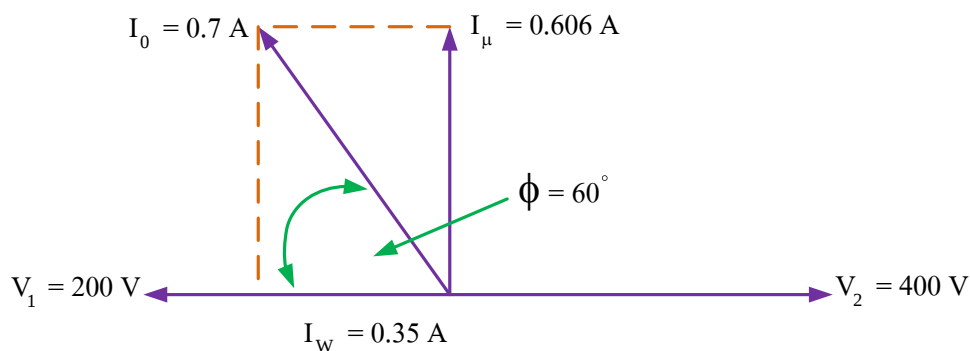
จงหาค่าต่อไปนี้ของหม้อแปลงไฟฟ้า

1. กระแสที่สร้างจากมิวจวลฟลักซ์
2. กระแสที่ทำให้เกิดเอดดี้เคอร์เร็นทอส (eddy current loss)
3. อิมพีแดนซ์สมมูลย์ เมื่อพิจารณาที่ขดลวดแรงดันสูง
4. ความต้านทานสมมูลย์ เมื่อพิจารณาที่ขดลวดแรงดันสูง
5. รีแอกแตนซ์สมมูลย์ เมื่อพิจารณาที่ขดลวดแรงดันสูง

วิธีทำ จากการทดสอบด้วยการวงจรเปิด ที่ขดลวดแรงดันต่ำ โจทย์กำหนดให้

การทดสอบวงจรปิด	การทดสอบวงจรเปิด
$I_0 = 0.7 \text{ A}$	$V_{SG} = 15 \text{ V}$
$V_1 = 200 \text{ V}$	$I_{SG} = 10 \text{ V}$
$W_0 = 70 \text{ W}$	$W_{SG} = 80 \text{ W}$

$$\begin{aligned}
 V_1 I_0 \cos \theta_0 &= W_0 \\
 200 \times 0.7 \times \cos \theta_0 &= 70 \\
 \cos \theta_0 &= \frac{70}{200 \times 0.7} \\
 &= 0.5 \\
 \theta_0 &= 60^\circ \\
 \sin \theta_0 &= \sin 60^\circ \\
 &= 0.866
 \end{aligned}$$



รูปที่ 4-8 แสดงค่า I_0 , I_μ และ I_w

$$\begin{aligned}
\text{กระแสที่สร้างมีวจลฟลักซ์ } I_{\mu} &= I_0 \sin \theta_0 & A \\
&= 0.7 \times 0.866 & A \\
&= 0.606 & A \\
\text{กระแสที่ทำให้เกิดคอร์ลอส } I_w &= I_0 \cos \theta_0 & A \\
&= 0.7 \times 0.5 & A \\
&= 0.35 & A
\end{aligned}$$

จากการทดสอบด้วยการต่อวงจรลัดและวัดค่าที่ขีดลวดแรงสูง

$$\begin{aligned}
Z_{02} &= \frac{V_{SG}}{I_{SG}} = \frac{15}{18} \quad \Omega \\
&= 1.5 \quad \Omega \\
I_{SG}^2 R_{02} &= 80 \\
R_{02} &= \frac{80}{10^2} \quad \Omega \\
&= 0.8 \quad \Omega \\
X_{02} &= \sqrt{(Z_{02})^2 - (R_{02})^2} \\
&= \sqrt{(1.5)^2 - (0.8)^2} \\
&= 1.26 \quad \Omega
\end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 4.2 หม้อแปลงหนึ่งเฟสขนาด 50 kVA 2400/240 ความสูญเสียคอร์ลอส (Core loss) เท่ากับ 240 W และจากการทดสอบแบบต่อวงจรลัด (Short circuit) ปรากฏว่า แอมมิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ และ วัตต์มิเตอร์อ่านค่าได้ 21 A 80 V และ 640 วัตต์ ตามลำดับ จงหาโวลท์เตจเรกกูเลชันของหม้อแปลงตัวนี้ เมื่อพิจารณาที่ขดลวดแรงดันสูง (เพาเวอร์แฟคเตอร์= 1)

วิธีทำ

$$\begin{aligned}
 Z_{01} &= \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \\
 &= \frac{80}{21} \quad \Omega \\
 &= 3.81 \quad \Omega \\
 R_{01} &= \frac{W_{sc}}{I_{sc}^2} \\
 &= \frac{640}{21^2} \quad \Omega \\
 &= 1.45 \quad \Omega \\
 X_{01} &= \sqrt{(Z_{01})^2 - (R_{01})^2} \\
 &= \sqrt{(3.81)^2 - (1.45)^2} \\
 &= 3.52 \quad \Omega \\
 V_{d1} &= I_1 R_{01} \cos \theta \pm I_1 X_{01} \sin \theta \\
 \text{ที่เพาเวอร์แฟคเตอร์} &= 1 \\
 \sin \theta &= 0 \\
 V_{d1} &= I_1 R_{01} \cos \theta \\
 &= 21 \times 1.45 \times 1 \\
 &= 30.45 \quad V
 \end{aligned}$$

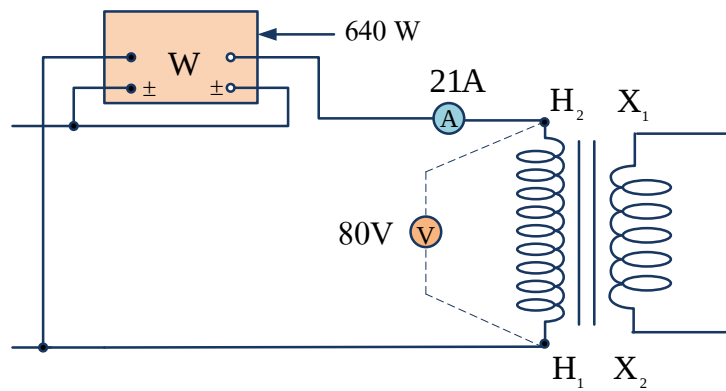
เปอร์เซ็นต์โวลต์เตจเรกกูเลชั่น

$$= \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times 100$$

$$= \frac{V_{d1}}{V_1} \times 100$$

$$= \frac{30.45}{2400} \times 100$$

$$= 1.26\%$$



รูปที่ 4-9 ทดสอบหาโวลต์เตจเรกกูเลชั่น

4.4 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าทำงานที่โหลดขนาดหนึ่ง และเพาเวอร์แฟคเตอร์ขนาดหนึ่งนั้นจะมีค่าดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{กำลังเอาต์พุต}}{\text{กำลังอินพุต}} \quad \dots\dots\dots 4.16$$

โดยกำลังเอาต์พุตและอินพุตนี้จะต้องได้มาจากการทดลองของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวเดียวกันและอาจจะมีหน่วยเป็น kVA หรือ kW หรือ W ก็ได้

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \text{kVA} &= \text{กิโลวาร์} \\ &= \frac{V \times I}{1,000} \quad \dots\dots\dots 4.17 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{kW} &= \text{กิโลวัตต์} \\ &= \frac{V \times I \times \cos\theta}{1,000} \quad \dots\dots\dots 4.18 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \text{เพาเวอร์แฟคเตอร์} \\ \text{และ } W &= \text{วัตต์} \\ &= V \times I \times \cos\theta \quad \dots\dots\dots 4.19 \end{aligned}$$

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นความสูญเสียต่างๆ ทั้งคอร์ลอส (Core loss) และคอปเปอร์ลอส (Copper loss) จึงน้อย เมื่อเป็นเช่นนี้การวัดกำลังเข้าพุทและอินพุทจึงมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก วิธีที่ดีในพิจารณาหาความสูญเสีย คือ วิธีคำนวณจากสูตรต่อไปนี้

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{กำลังเอาต์พุต}}{\text{กำลังเอาต์พุต} + \text{ค่าความสูญเสีย}} \quad \dots\dots\dots 4.20$$

$$= \frac{\text{output}}{\text{output} + \text{copper} + \text{core loss}}$$

.....4.21

$$= \frac{\text{input} - \text{total losses}}{\text{input}}$$

$$= 1 - \frac{\text{losses}}{\text{input}} \quad \dots\dots\dots 4.22$$

ข้อที่ต้องสังเกตอีกอย่างหนึ่ง คือ หน่วยของกำลังเอาต์พุตและอินพุตจะเป็นวัตต์ ไม่ใช่โวลท์แอมแปร์ (VA) และประสิทธิภาพสามารถคำนวณหาได้จากค่าคอร์ลอส และคอปเปอร์ลอสที่ได้รับจากการทดสอบแบบวงจรเปิดวงจรลัด

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดเมื่อสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็ก (Core loss) เท่ากับความสูญเสียเนื่องจากทองแดง (Copper loss) และประสิทธิภาพ เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าทำงานที่โหลดใดๆ จะมีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} &= \frac{X \times \text{F.L.kVA} \times \text{P.F.}}{(X \times \text{F.L.kVA} \times \text{P.F.}) + W_c + W_i} \quad \dots\dots\dots 4.23 \\ \text{เมื่อ } X &= \text{อัตราส่วนของ kVA ที่ใช้ / F.L. kVA} \\ W_c &= \text{Copp loss มีหน่วยเป็นวัตต์} \\ W_i &= \text{Iron loss มีหน่วยเป็นวัตต์} \end{aligned}$$

และกำลังเอาต์พุตของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อประสิทธิภาพสูงสุดในหน่วย kVA หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{Load kVA} &= \sqrt{\left(\frac{\text{Iron loss}}{\text{F.L.Copper loss}} \right)} \times \text{F.L.kVA} \quad \dots\dots\dots 4.24 \\ \text{เมื่อ Load kVA} &= \text{กำลังเอาต์พุตของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อประสิทธิภาพสูงสุด} \\ \text{F.L.kVA} \times \text{P.F.} &= \text{กำลังเอาต์พุตที่โหลดเต็มพิกัด} \end{aligned}$$

จากสมการ 4.24 อธิบายได้ว่า ปกติแล้วหม้อแปลงจะทำงานที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นความสูญเสียเนื่องจากทองแดงหรือคอปเปอร์ลอส(Copper loss) จะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของโหลดด้วย ส่วนการสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กหรือคอร์ลอส(Core loss) จะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของโหลด ดังนั้นจะมีจุดๆ หนึ่งที่คอปเปอร์ลอสเท่ากับคอร์ลอส เมื่อใดก็ตาม ถ้าคอปเปอร์ลอสเท่ากับคอร์ลอสแล้วประสิทธิภาพของหม้อจะมีค่าสูงสุด และกำลังเอาต์พุตที่หม้อแปลงจ่ายให้กับโหลดขณะที่ประสิทธิภาพสูงสุด จะหาได้จากสูตรในสมการ 4.24

ตัวอย่างที่ 4.3 หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 25 KVA 1,100 / 400 V. หนึ่งเฟส ความสูญเสียคอร์ลอส (Core loss) และคอปเปอร์ลอส(Copper loss) ที่โหลดเต็มพิกัดมีค่า 350 และ 400 วัตต์ ตามลำดับให้ จงหา

1. ประสิทธิภาพที่โหลดเต็มพิกัด เพาเวอร์แฟคเตอร์ 100 %
2. ประสิทธิภาพที่ half load เพาเวอร์แฟคเตอร์ 100 %
3. กำลังเอาต์พุตสูงสุดที่โหลดเต็มพิกัด

วิธีทำ

$$\begin{aligned}
 &\text{ที่เพาเวอร์แฟคเตอร์} &= & 10 \\
 &1. \text{ เอาร์ทพุตที่โหลดเต็มพิด} &= & \text{kVA} \times \text{P.F.} \\
 & &= & 25 \times 1 \\
 & &= & 25 \quad \text{kW} \\
 &\text{คอร์ลอส} &= & 350 \quad \text{W} \\
 &\text{คอปเปอร์ลอส} &= & 400 \quad \text{W} \\
 &\text{ประสิทธิภาพ} &= & \frac{25 \times 1000}{(25 \times 1000) + 350 + 400} \times 100 \% \\
 & &= & 97.08 \% \\
 &2. \text{ เอาร์ทพุตที่ half load} &= & \frac{25 \times 1.0}{2} \quad \text{kW} \\
 & &= & 12.5 \quad \text{kW} \\
 &\text{คอร์ลอส} &= & 350 \quad \text{W} \\
 &\text{คอปเปอร์ลอส} &= & \left(\frac{1}{2}\right)^2 \times 400 \\
 & &= & 100 \quad \text{W} \\
 &\text{ประสิทธิภาพ} &= & \frac{1.25}{1.25 \times 350 + 100} \times 100 \% \\
 & &= & 96.5 \% \\
 &3. \text{ กำลังเอาร์ทพุตสูงสุดที่โหลดเต็มพิด} & & \\
 &\text{Load kVA} &= & \sqrt{\left(\frac{\text{Iron loss}}{\text{F.L.Copper loss}}\right)} \times \text{F.L.kVA} \\
 & &= & \sqrt{\frac{350}{400} \times 25} \quad \text{kVA} \\
 & &= & 23.38 \quad \text{kVA} \quad \text{ตอบ}
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 4.4 หม้อแปลงหนึ่งเฟสขนาด 500 KVA 4,000 / 500 V. ถ้าหม้อแปลงตัวนี้ทำงานที่ฟูลโหลดมีประสิทธิภาพ 98.13 % ที่เพาเวอร์แฟคเตอร์ 0.8 จงคำนวณหาความสูญเสียคอปเปอร์ลอส (Copper loss) ถ้าความสูญเสียคอร์ลอส (Core loss) คงที่ที่ 2500 วัตต์

วิธีทำ

$$\begin{aligned}
 \text{ประสิทธิภาพ} &= \frac{\text{output}}{\text{input}} \times 100\% \\
 98.13 &= \frac{\text{out put}}{\text{out put} + \text{total loss}} \times 100\% \\
 \text{Output} + \text{total loss} &= \frac{\text{out put}}{98.13} \times 100\% \\
 500 \times 1,000 \times 0.8 + \text{core loss} + \text{Copper loss} &= \frac{500 \times 1000 \times 0.8}{98.13} \times 100\% \\
 400,000 + 2,500 + \text{Copper loss} &= \frac{400,000 \times 100}{98.13} \\
 \text{Copper loss} &= \frac{400,000 \times 100}{98.13} - 402,500 \\
 &= 407,622.54 - 402,500 \\
 \text{Copper loss} &= 5,122.54 \quad \text{W}
 \end{aligned}$$

4.4.1 ประสิทธิภาพตลอดวัน (All-day efficiency)

ปกติแล้วหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำงานตลอดวัน เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดดิสตริบิวชัน (distribution transformers) ขดลวดทุติยภูมิจะป้อนแรงดันและกระแสให้กับโหลดตลอดวัน (24 ชั่วโมง) เช่น จ่ายไฟให้กับระบบแสงสว่าง หรือเครื่องใช้ต่างๆ ของบ้านพัก หรือห้างร้านต่างๆ ติดต่อกันตลอดวัน ในขณะเดียวกัน ขดลวดปฐมภูมิก็จะรับพลังงานเข้ามาตลอดเวลาเช่นเดียวกัน ดังนั้นคอร์ลอส และคอปเปอร์ลอสจะเกิดขึ้นตลอดวัน

สำหรับคอร์ลอสจะมีค่าไม่สูงนัก และมีค่าคงที่ตลอดวันไม่ว่าโหลดจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร แต่คอปเปอร์ลอสจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามการเปลี่ยนแปลงของโหลด ถ้าโหลดมากคอปเปอร์ลอสก็มาก ถ้าโหลดน้อยคอปเปอร์ลอสก็น้อยจึงต้องมีการคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าตลอดวัน (all-day efficiency) โดยคำนวณจากพลังงานที่ถูกใช้ไปในแต่ละช่วงเวลา ในเวลา 24 ชั่วโมง ดังนั้นจึงต้องทราบก่อนว่า พลังงานในแต่ละช่วงเวลานั้นมีค่าเท่าไร

$$\text{ประสิทธิภาพตลอดวัน (all-day)} = \frac{\text{output (kWh)}}{\text{kWh (ในเวลา 24 ชม.)}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots 4.25$$

ตัวอย่างที่ 4.5 หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับระบบไฟแสงสว่าง ตัวหนึ่งขนาด 100 kVA มีความสูญเสียทั้งหมด 3 kW (คอร์ลอส + คอปเปอร์ลอส) ในหนึ่งวันหม้อแปลงไฟฟ้าทำงานฟูลโหลด 3 ชั่วโมง ทำงานครึ่งหนึ่งของฟูลโหลด (half load) 4 ชั่วโมง นอกนั้นไม่ได้จ่ายโหลด

จงหาประสิทธิภาพตลอดวัน (all-day efficiency)

วิธีทำ ระบบแสงสว่างมีเพาเวอร์แฟคเตอร์	=	1	
ความสูญเสียทั้งหมด	=	3	kW
จากโจทย์ คอร์ลอส	=	$\frac{3}{2} = 1.5$	kW
และมีค่าคงที่ทั้งวัน (24 ชั่วโมง)			
คอร์ลอส 24 ชั่วโมง	=	1.5×24	kWh
	=	36	kWh
ส่วนคอปเปอร์คอส	=	$\frac{3}{2} = 1.5$	kW
คอปเปอร์ลอสฟูลโหลด 3 ชั่วโมง	=	1.5×3	kW
	=	4.5	kW
คอปเปอร์ลอสครึ่งหนึ่งของฟูลโหลด	=	$\frac{1}{4} \times 1.5$	kW
(คอปเปอร์ลอสกระแสเป็นตัวเปลี่ยนแปลงในรูปของ I^2)			
คอปเปอร์ลอสครึ่งหนึ่งของฟูลโหลด	=	$\frac{1}{4} \times 1.5 \times 4$	kWh
	=	1.5	kWh
สูญเสียทั้งหมด	=	$36 + 4.5 + 1.5$	kWh
	=	42	kWh
เข้าพุททั้งหมด	=	$(100 \times 3) + (\frac{100}{2} \times 4)$	kWh
	=	500	kWh
all – day	=	$\frac{500}{500 + 42} \times 100\%$	
	=	92.25%	

ตัวอย่างที่ 4.6 หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 KVA มีประสิทธิภาพที่ฟูลโหลด 94 % มีคอปเปอร์ลอสเท่ากับไอออนลอส จงหาประสิทธิภาพตลอดวัน ถ้าโหลดมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้

- | | |
|------------------------|------------|
| 1. ไม่มีโหลด | 10 ชั่วโมง |
| 2. ที่ 25 % ของฟูลโหลด | 6 ชั่วโมง |
| 3. ครึ่งฟูลโหลด | 5 ชั่วโมง |
| 4. ฟูลโหลด | 3 ชั่วโมง |

วิธีทำ	สมมติว่า เพาเวอร์แฟคเตอร์	=	1	
	เอาพุท ที่ฟูลโหลด	=	$50 \times 1 =$	50 kW
	ประสิทธิภาพ	=	94%	
	อินพุทที่ฟูลโหลด	=	$\frac{50}{0.94}$	kW
		=	53.2	kW
	ความสูญเสียทั้งหมด	=	$53.2 - 50$	kW
		=	3.2	kW
	จากโจทย์ คอรัลอส	=	คอปเปอร์ลอส	
		=	$\frac{3.2}{2} =$	1.6 kW
	คอรัลอส	=	1.6	kW และคงที่ตลอดวัน
	คอรัลอส 24 ชั่วโมง	=	1.6×24	kWh
		=	38.4	kWh
	คอปเปอร์ลอส	=	1.6	kW
	คอปเปอร์ลอสที่ 25% ของฟูลโหลด	=	$\frac{1}{16} \times 1.6 =$	0.1 kW
	คอปเปอร์ลอสที่ 25% ของฟูลโหลด นาน 6 ชั่วโมง			
		=	$0.1 \times 6 =$	0.6 kWh
	คอปเปอร์ลอสที่ครึ่งฟูลโหลด 5 ชั่วโมง	=	$\frac{1}{4} \times 1.6 \times 5$	kWh
		=	2	kWh
	คอปเปอร์ลอสฟูลโหลด 3 ชั่วโมง	=	1.6×3	kWh
		=	4.8	kWh
	คอปเปอร์ลอส	=	$0.6 + 2 + 4.8$	kWh
		=	7.4	kWh
	สูญเสียทั้งหมด	=	$7.4 + 38.4$	kWh

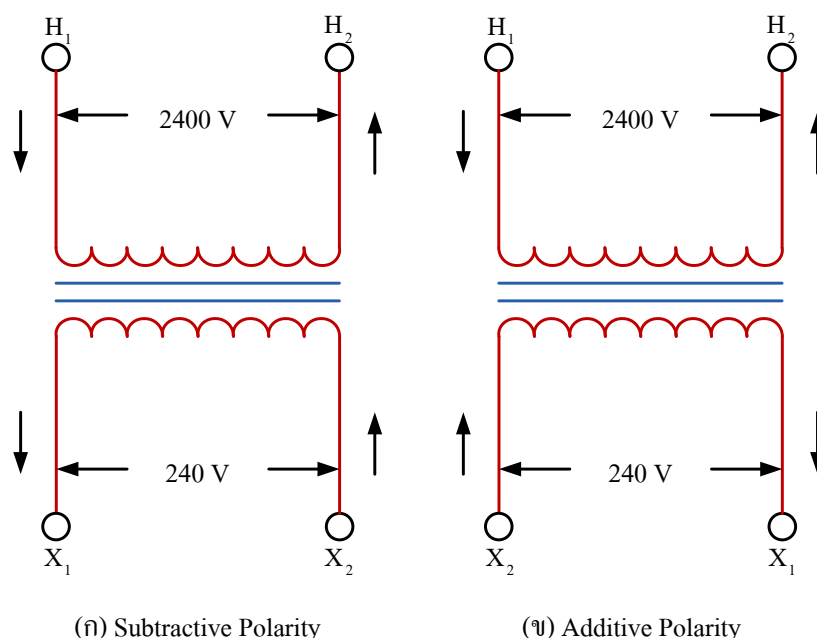
$$\begin{aligned}
 &= 45.8 \text{ kWh} \\
 \text{เข้าพุทใน 24 ชั่วโมง} &= (25\% \times 50 \times 6) + (50\% \times 50 \times 5) \\
 &\quad + (100\% \times 50 \times 3) \text{ kWh} \\
 &= 75 + 125 + 150 \text{ kWh} \\
 &= 350 \text{ kWh} \\
 \text{อินพุทใน 24 ชั่วโมง} &= 350 + 45.8 \text{ kWh} \\
 &= 395.8 \text{ kWh} \\
 \text{all - day} &= \frac{\text{out put}}{\text{in put}} \times 100\% \\
 &= \frac{350}{395.8} \times 100\% \\
 &= 88.42\% \quad \text{ตอบ}
 \end{aligned}$$

 กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน 	ใบสาระการเรียนรู้	หน่วยที่ 1
	ชื่อวิชา เครื่องกลไฟฟ้า 1	เวลาเรียน 4 ชั่วโมง
	ชื่อหน่วย หม้อแปลงฟ้า	
ชื่อเรื่องหรือชื่องาน การกำหนดขั้วและขนาดหม้อแปลง		
สาระสำคัญ บางครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องนำหม้อแปลงหลายๆ ตัวมาต่อใช้งานร่วมกัน แต่ก่อนที่จะนำหม้อแปลงมาต่อเข้าด้วยกัน จะต้องมีการกำหนดและตรวจสอบขั้วหรือปลายสายของหม้อแปลงแต่ละตัวเสียก่อนโดยกำหนดเป็นตัวอักษร X สำหรับขดลวดด้านแรงดันต่ำ และอักษร H สำหรับขดลวดด้านแรงดันไฟฟ้าสูงตามมาตรฐาน (A.S.A. : American Stard Association) การขนานหม้อแปลงจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ การเพิ่มของโหลดในระบบจำหน่ายซึ่งมากกว่ากำลังของหม้อแปลงที่มีอยู่แล้วจะจ่ายได้หรือเพื่อเป็นหม้อแปลงสำรองสำหรับงานบริการต่อเนื่อง ถ้าเกิดหม้อแปลงตัวใดตัวหนึ่งเสียหายหรือชำรุด เรื่องที่จะศึกษา 1. วิธีการกำหนดขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า 2. การขนานหม้อแปลงไฟฟ้า จุดประสงค์การเรียนรู้ 1. อธิบายการกำหนดขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ 2. อธิบายการขนานหม้อแปลงไฟฟ้าได้ 3. มีพัฒนาการคุณธรรม จริยธรรม ค่านิยม และคุณลักษณะอันพึงประสงค์ ที่ผู้เรียนสามารถสังเกตเห็นได้ใน ด้านความมีมนุษยสัมพันธ์ ความมีวินัย ความรับผิดชอบ ความเชื่อมั่นในตนเอง ความสนใจใฝ่รู้ ความรักสามัคคี ความกตัญญูกตเวที		

5 การกำหนดขั้วและขนาดหม้อแปลง

การต่อหม้อแปลงไปไฟฟ้าเพื่อใช้งานมีหลายวิธีด้วยกัน ถ้าต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงตัวเดียวเพื่อใช้งานเป็นจุดๆ มักจะไม่มีปัญหาแต่อย่างใด แต่ถ้านำหม้อแปลงไฟฟ้าหลายๆ ตัวมาต่อเพื่อให้ทำงานร่วมกันเราไม่สามารถที่จะต่ออย่างๆ ง่ายๆ ได้ แต่ต้องต่ออย่างมีหลักเกณฑ์ที่ถูกต้อง ถ้าทำไปอย่างไม่ถูกต้องจะทำให้เกิดความเสียหายอย่างมากต่อหม้อแปลงและระบบไฟฟ้าด้วย ดังนั้นก่อนที่จะกล่าวถึงวิธีการต่อหม้อแปลงแบบต่างๆ จะต้องศึกษาหลักเกณฑ์เบื้องต้นก่อนดังนี้

5.1 ขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส



รูปที่ 5-1 ตัวอักษรประจำขั้วหม้อแปลงไฟฟ้า

ในการกำหนดตัวอักษรประจำขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้านี้โดยใช้มาตรฐาน เอเอสเอ (A.S.A ย่อมาจาก American Standard Association) เป็นผู้คิดและกำหนดมาตรฐานขึ้นโดยกำหนดให้ขั้วของขดลวดแรงดันสูงเป็น H_1 และ H_2 และกำหนดให้ขั้วของขดลวดแรงดันต่ำเป็น X_1 และ X_2 ถ้าวางหม้อแปลงไฟฟ้าให้ขดลวดแรงดันสูงอยู่ห่างจากตัวเร้าที่กำลังดูอยู่ ให้กำหนดขั้วซ้ายมือเป็น H_1 และขั้วขวามือเป็น H_2 เสมอ ถ้าจะกำหนดขั้วของหม้อแปลงเป็นแบบซับแทรกตีฟโพลาริตี้ ของขั้วขดลวดแรงดันต่ำซ้ายมือจะต้องเป็น X_1 และขั้วขวามือจะต้องเป็น X_2 ดังรูปที่ 5-1 (ก) และถ้าจะกำหนดขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นแบบแอดดีตีฟโพลาริตี้ ขั้วของขดลวดแรงดันต่ำซ้ายมือจะต้องเป็น X_2 และขั้วขวามือจะต้องเป็น X_1 ดังรูปที่ 5-1 (ข)

สมมุติว่า มีหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ตัวหนึ่ง จะมีขนาดเท่าใดก็ตาม และที่ขั้วต่อสายทั้ง 4 ของขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำไม่มีตัวอักษรกำกับไว้ เราสามารถจะทดสอบเพื่อกำหนดตัวอักษรได้โดยปฏิบัติดังนี้

1.1 ต้องทดสอบให้รู้ก่อนว่าปลายของขดลวดชุดใดเป็นแรงดันสูง และปลายของขดลวดชุดใดเป็นแรงดันต่ำ โดยใช้มัลติมิเตอร์

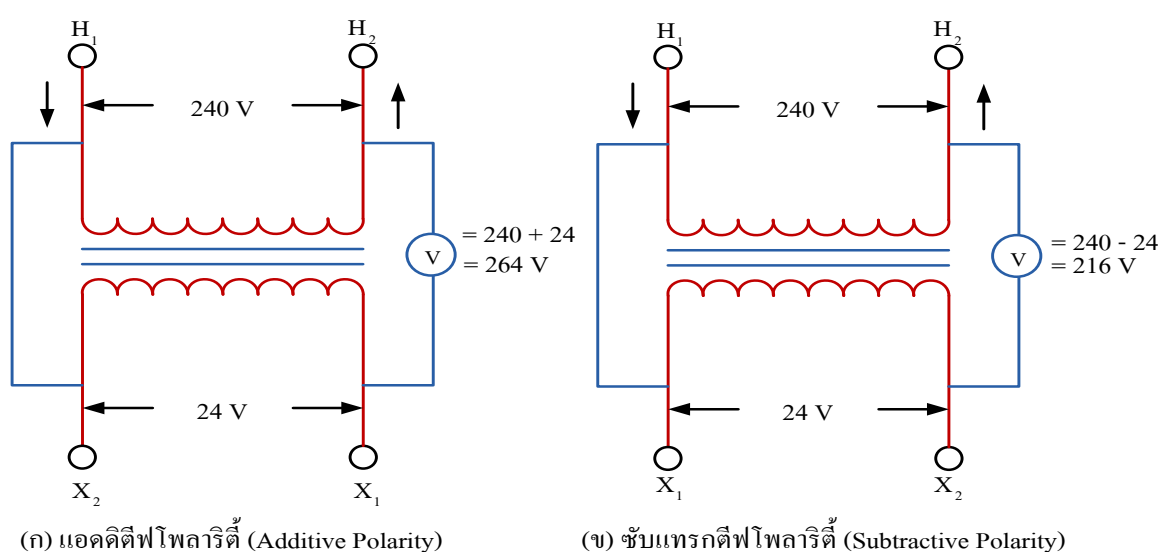
1.2 เมื่อทราบแล้ว เอาสายไฟเส้นหนึ่งต่อเข้าระหว่างปลายสายเส้นหนึ่งของขดลวดแรงดันสูงกับปลายสายเส้นหนึ่งของขดลวดแรงดันต่ำ

1.3 เอาปลายสายของขดลวดแรงดันสูงทั้งสองเส้นเสียบเข้ากับแรงดันไฟฟ้า (ตามโต๊ะปฏิบัติงาน)

1.4 เอาโวลต์มิเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ตั้งย่านวัดให้สูงเป็นสองเท่าของแรงดันที่ป้อนให้กับขดลวดแรงดันสูง (โดยประมาณ) แล้วต่อปลายสายวัดของมิเตอร์เส้นหนึ่งเข้ากับปลายสายของขดลวดแรงดันสูง เส้นที่ไม่มีสายไฟต่ออยู่ และต่อปลายสายวัดอีกเส้นหนึ่งเข้ากับปลายสายของขดลวดแรงดันต่ำที่ไม่มีสายไฟต่ออยู่ เช่นเดียวกัน

1.5 ถ้าโวลต์มิเตอร์อ่านค่าได้เท่าผลบวกของแรงดันทั้งสองข้าง หรืออ่านได้สูงกว่าแรงดันที่ป้อนให้กับขดลวดแรงดันสูง การกำหนดขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องเป็นแบบแอดดิทีฟโพลาริตี คือ ปลายสายของขดลวดแรงดันต่ำที่มีสายไฟต่ออยู่จะต้องเป็น X_2 ส่วนปลายสายของขดลวดแรงดันต่ำอีกปลายหนึ่งที่มีสายมิเตอร์ต่ออยู่จะต้องเป็น X_1 สำหรับขั้วของแรงดันไฟสูง ขั้วที่ต่ออยู่กับสายไฟจะเป็น H_1 และขั้วที่ต่ออยู่กับสายวัดของมิเตอร์ จะเป็น H_2 ดังรูปที่ 5-2 (ก)

1.6 ถ้าอ่านจากโวลต์มิเตอร์ได้น้อยกว่าแรงดันที่ป้อนให้กับขดลวดแรงดันสูงหรือเท่ากับผลต่างของแรงดันทั้งสองด้วย การกำหนดขั้วจะต้องเป็นแบบซับแทรกทีฟโพลาริตี คือ ปลายสายของขดลวดแรงดันต่ำที่มีสายไฟต่ออยู่จะต้องเป็น X_1 ส่วนปลายของขดลวดแรงดันต่ำที่มีสายวัดของมิเตอร์ต่ออยู่จะต้องเป็น X_2 สำหรับปลายสายของขดลวดแรงดันสูงจะเหมือนกับกรณีแอดดิทีฟโพลาริตีทุกประการ ดังรูปที่ 5-2 (ข)



รูปที่ 5-2 กำหนดขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า

นอกจากนี้ A.S.A และ N.E.M.A. (National Electrical Manufacturer Association) ได้กำหนดมาตรฐานข้อของหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มเติม ดังนี้

- 1) ลำดับข้อแบบแอดดิติฟ ใช้เป็นมาตรฐานสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส ตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาด 200 kVA ซึ่งมีแรงดันไม่เกิน 9,000 โวลต์
- 2) ลำดับข้อแบบซับแทรกติฟ ใช้เป็นมาตรฐานสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส ที่มีขนาดใหญ่กว่า 200 kVA โดยไม่ต้องคำนึงถึงขนาดแรงดัน
- 3) ลำดับข้อแบบซับแทรกติฟ ใช้เป็นมาตรฐานสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส ตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาด 200 kVA เมื่อแรงดันของขดลวดไฟสูงเกิน 9,000 โวลต์

5.2 การขนานหม้อแปลงไฟฟ้า

ในกรณีที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดไม่พอสำหรับจ่ายโหลด นอกจากใช้วิธีเปลี่ยนหม้อแปลงไฟฟ้าให้ใหญ่ขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับโหลดแล้วยังมีอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้คือ การนำหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าเท่ากับหม้อแปลงไฟฟ้าตัวเดิมมาต่อขนานกันเพื่อช่วยในการจ่ายโหลด

5.2.1 ข้อจำกัดในการต่อขนานหม้อแปลงไฟฟ้า

การต่อขนานหม้อแปลงไฟฟ้ามีหลักการที่ควรพิจารณา ดังนี้

1.1 อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานต้องเท่ากัน (Match Voltage Ratio) ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้ามีอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าไม่เท่ากันจะส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าหมุนวน (Circulating Current) ที่ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานกันนั้น กล่าวคือ

ถ้าเราจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้หม้อแปลงไฟฟ้าที่ต่อขนานกันและยังไม่มีโหลดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละตัวจะมีค่าไม่เท่ากันหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมากกว่า จะส่งกระแสไฟฟ้ามายังขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำน้อยกว่า ปรากฏการณ์เรียกว่า Circulating Current

Circulating Current เป็นตัวการทำให้เกิดความสูญเสียในรูปของความร้อนที่ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า Copper Loss (P_{cu}) นั่นเอง

- ถ้านำหม้อแปลงไฟฟ้าที่มี Circulating Current นี้ไปจ่ายโหลดจะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละตัวไม่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้ตามพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า

- ขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้านี้ไปจ่ายโหลดความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจาก Circulating Current ยังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนทำให้หม้อแปลงตัวใดตัวหนึ่งเกิดความเสียหาย และส่งผลให้หม้อแปลงไฟฟ้าตัวอื่นเสียหายตามไปด้วย

1.2 ขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต่อขนานกันต้องเหมือนกัน (Math Polarity) จึงจะได้ทิศทางของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าตามต้องการ

1.3 ค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าต้องเท่ากัน (Math Percent Impedance) จึงจะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าที่นำมาต่อขนานจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้แก่โหลดได้เท่าๆ กัน ถ้าค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ไม่เท่ากันจะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่มีเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ต่ำกว่าจ่ายแรงดันไฟฟ้ามากกว่า ส่วนอีกตัวหนึ่งที่มีค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์สูงกว่าจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต่อขนานกัน

1.4 มุมของอิมพีแดนซ์ (X/R) ของหม้อแปลงไฟฟ้าต้องเท่ากัน (Math Impedance Angles) จึงจะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดทุติยภูมิที่จ่ายไปยังโหลด In phase กัน แต่ถ้ามุมของอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากัน จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่โหลดไม่ In phase กัน (Out of phase) กำลังไฟฟ้าที่พิกัด ซึ่งเกิดจากผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต่อขนานกันจึงน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่ Name Plate กำหนดไว้

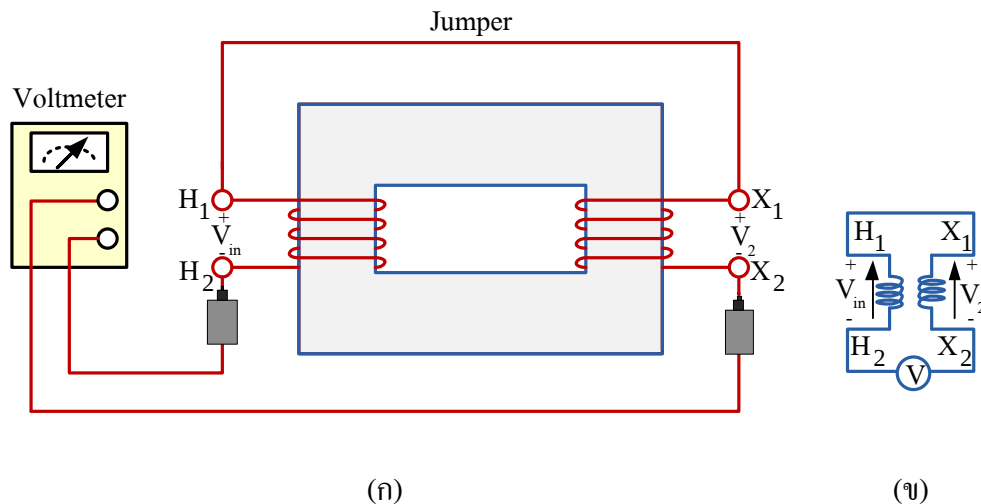
1.5 การขนานหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ต้องมีลำดับเฟสสอดคล้องกัน (Math phase Sequence) ถ้าการเรียงลำดับเฟสไม่สอดคล้องกันจะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดทุติยภูมิไม่ In phase กัน ทำให้กำลังไฟฟ้าที่พิกัดซึ่งเกิดจากผลรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต่อขนานกันจึงน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่ Name Plate กำหนดไว้

1.6 การต่อขนานหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ต้องมีแรงดันไฟฟ้าที่สายของขดลวดทุติยภูมิเท่ากัน (Math Line Voltage)

1.7 ในการต่อขนานหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส กำลังไฟฟ้าที่พิกัดของขดลวดแต่ละชุดไม่ควรเกิน 1 : 3 ของกำลังไฟฟ้าที่พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า

5.2.2 การหาขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Polarity Test)

ในกรณีที่เครื่องหมายจุดหรือ H_1 และ X_1 ซึ่งแสดงขั้วบวกของหม้อแปลงไฟฟ้าลบลบกัน ทำให้เราสงสัยว่าขั้วไหนเป็นขั้วบวก ขั้วไหนเป็นขั้วลบ เราอาจทดสอบได้โดยต่อวงจรตามรูป



รูปที่ 5-3 วงจรแสดงการหาชั่วหม้อแปลง

ถ้าต่อวงจรได้ตามรูปที่ 5-3 (ก) แล้วจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าวงจร (V_{in}) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์ (V) จะน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้วงจร (V_{in}) แสดงว่าการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าตามรูปที่ 5-3 (ก) ทำให้ทิศทางแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดทั้งสองมีลักษณะหักล้างกัน หรือสวนทางกัน (รูปที่ 5-3 (ข)) เราเรียกว่าการต่อขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้ว่า การต่อแบบ Subtractive สมการหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรนี้ คือ

$$V = V_{in} - V_2$$

เมื่อ V = แรงดันไฟฟ้าที่อ่านจากโวลต์มิเตอร์

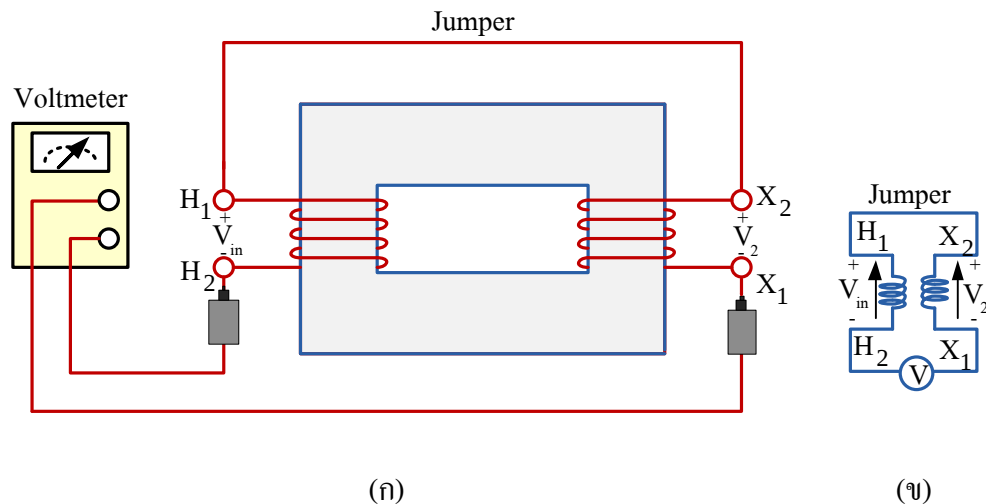
V_{in} = แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าวงจร

V_2 = แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าวงจร

จากการต่อวงจรในรูปที่ 5-3 (ก) ทำให้ทราบว่า

- ขั้วที่ต่อรวมกัน (Jumper) และอยู่ทางซ้ายมือ หรือด้านที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้า (V_{in}) จะเป็นขั้วบวกของขดลวดด้านแรงดันไฟฟ้าสูง (H_1) ส่วนขั้วที่ต่อรวมกันและอยู่ทางขวามือหรือด้านจ่ายแรงดันไฟฟ้าออก (V_2) จะเป็นขั้วบวกของขดลวดด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำ (X_1)

- ขั้วที่ต่อกับโวลต์มิเตอร์ และอยู่ทางซ้ายมือ หรือด้านที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้า (V_{in}) จะเป็นขั้วลบของขดลวดด้านแรงดันไฟฟ้าสูง (H_2) ส่วนขั้วที่ต่อกับโวลต์มิเตอร์ และอยู่ทางขวามือหรือด้านจ่ายแรงดันไฟฟ้าออก (V_2) จะเป็นขั้วลบของขดลวดด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำ (X_2)



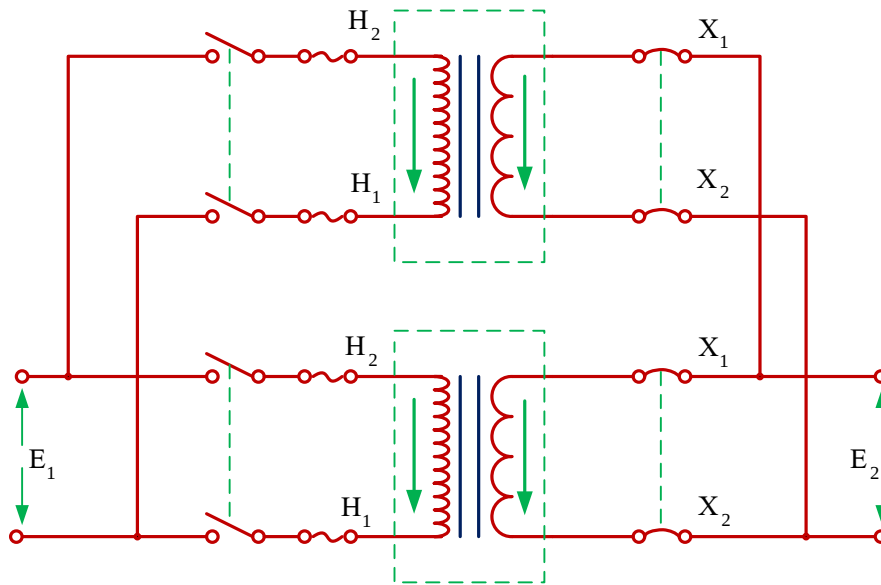
รูปที่ 5-4 การต่อขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้ว่าการต่อแบบ Additive

ถ้าต่อวงจรตามรูปที่ 5-4 (ก) แล้วจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าวงจร (V_{in}) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์ (V) จะมากกว่าแรงดันไฟฟ้าที่จะให้วงจร (V_{in}) แสดงว่าทิศทางของแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดทั้งสองมีลักษณะเสริมกันตามรูปที่ 5-4 (ข) เราเรียกการต่อขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้ว่าการต่อแบบ Additive สมการหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรนี้คือ

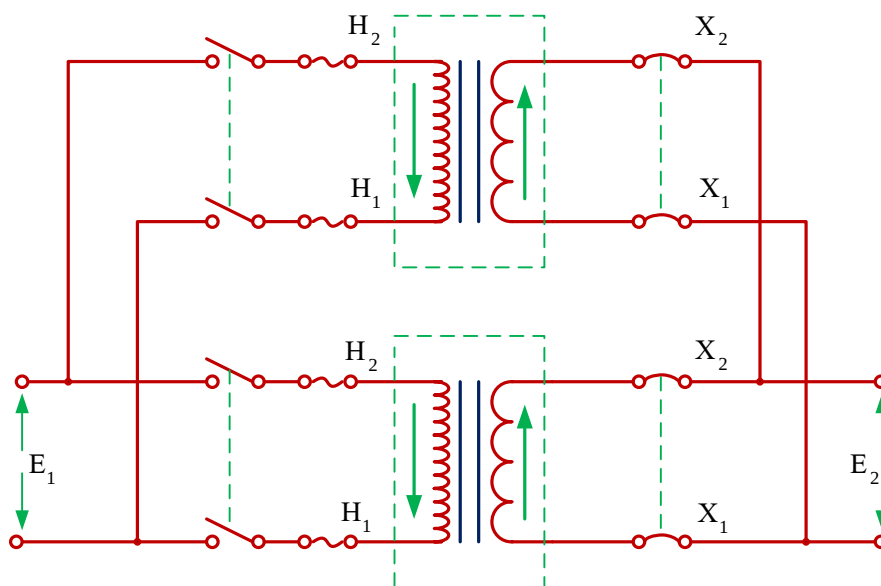
$$V = V_{in} + V_2$$

จากการต่อวงจรในรูปที่ 5-4 (ก) ทำให้ทราบว่า

- ขั้วที่ต่อร่วมกัน (Jumper) และอยู่ทางซ้ายมือหรือด้านที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้า (V_{in}) จะเป็นขั้วลบของขดลวดด้านแรงดันไฟฟ้าสูง (H_1) ส่วนขั้วที่ต่อ Jumper และอยู่ทางขวามือหรือด้านที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าออก (V_2) จะเป็นขั้วลบของขดลวดด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำ (X_2)
- ขั้วที่ต่อกับโวลต์มิเตอร์และอยู่ทางซ้ายมือหรือด้านที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้า (V_{in}) จะเป็นขั้วลบของขดลวดด้านแรงดันไฟฟ้าสูง (H_2) ขั้วที่ต่อกับโวลต์มิเตอร์ และอยู่ทางขวามือหรือด้านที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าออก (V_2) จะเป็นขั้วบวกของขดลวดด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำ (X_1)



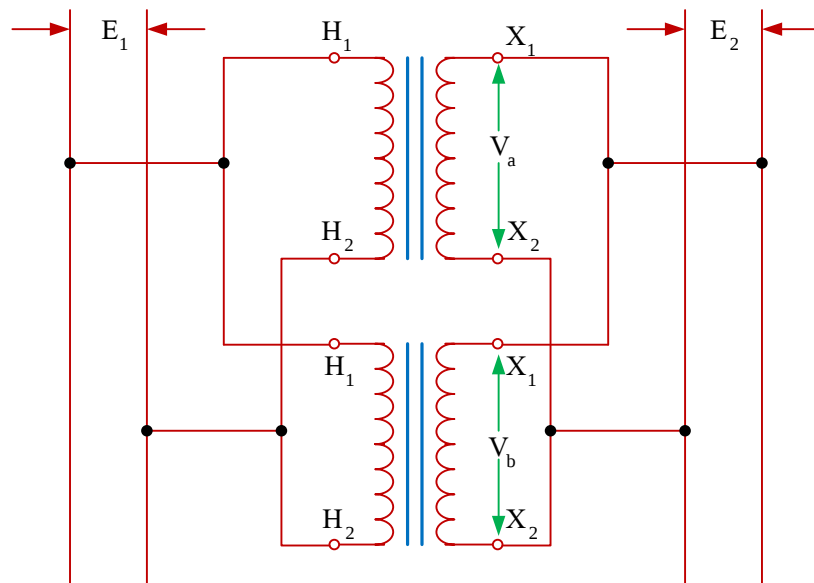
รูปที่ 5-5 แสดงการต่อขนานหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการต่อขั้วแบบ Additive



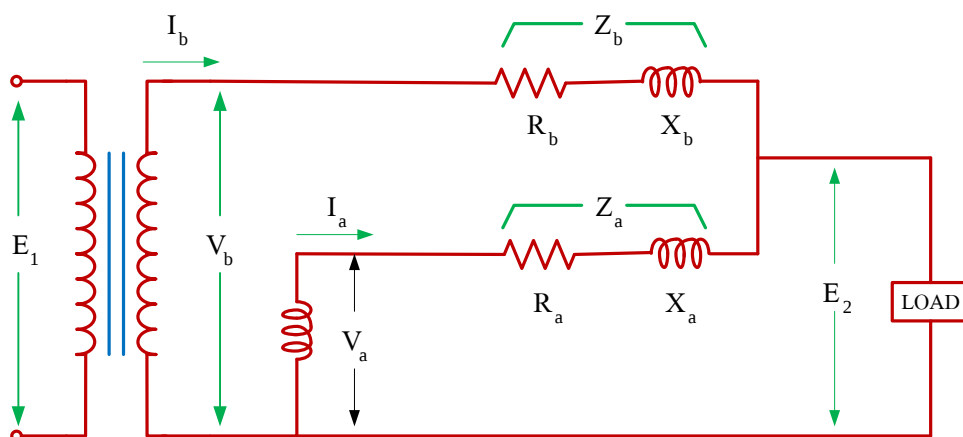
รูปที่ 5-6 แสดงการต่อขนานหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการต่อขั้วแบบ Subtractive

5.2.3 ค่าทางไฟฟ้าที่เกิดจากการขนานหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส (Parallel Operation of Single-phase Transformer)

เมื่อพิจารณาหม้อแปลงไฟฟ้า 2 ตัว (A และ B) ต่อขนานกันที่มีอัตราส่วนแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากัน (Math Voltage Ratio) ตามข้อจำกัดในการต่อขนานหม้อแปลงมีขนาดและรูปสามเหลี่ยมอิมพีแดนซ์เท่ากัน ทุกประการ ถ้า E เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านทุติยภูมิไคร้การะของหม้อแปลงแต่ละตัว V_2 เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว I_A และ I_B เป็นกระแสของหม้อแปลงแต่ละตัว และ I เป็นกระแสรวมของหม้อแปลงทั้งสอง ทำให้เราเขียนวงจรเทียบเคียงของรูปที่ 5-7 ได้เป็นรูปที่ 5-8

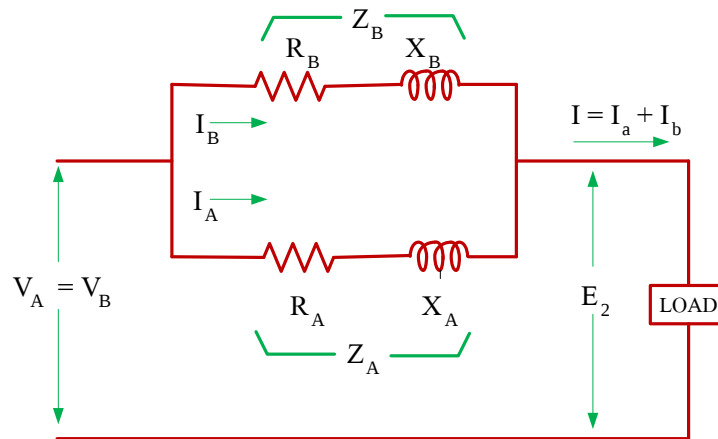


รูปที่ 5-7 วงจรการขนานหม้อแปลงไฟฟ้า 2 ตัว



รูปที่ 5-8 วงจรเทียบเคียงการขนานหม้อแปลง

ในกรณีที่เรากำลังต้องการหาค่ากำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละตัว (A หรือ B) ทำได้โดยการแยกวงจรเทียบเคียงในรูปที่ 5-8 ให้อยู่ในของวงจรเทียบเคียงของขดลวดทุติยภูมิเพียงอย่างเดียวจะได้วงจรเทียบเคียงใหม่ดังรูป 5-9



รูปที่ 5-9 วงจรเทียบเคียงใหม่

จากรูปที่ 5-8 แสดงให้เห็นค่าต่างๆ ซึ่งมีความหมายดังต่อไปนี้

I	=	กระแสไฟฟ้ารวมของหม้อแปลงไฟฟ้า A และ B
R_a	=	ความต้านทานของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า A
X_a	=	รีแอคแตนซ์ของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า A
R_b	=	ความต้านทานของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า B
X_b	=	รีแอคแตนซ์ของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า B
Z_a	=	อิมพีแดนซ์ของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า A
Z_b	=	อิมพีแดนซ์ของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า B
I_a	=	กระแสไฟฟ้าที่ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า A
I_b	=	กระแสไฟฟ้าที่ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า B
E_1	=	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้หม้อแปลงไฟฟ้า A และ B
E_2	=	แรงดันไฟฟ้าที่หม้อแปลงไฟฟ้า A และ B จ่ายให้โหลด
V_a	=	แรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า A
V_b	=	แรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า B

ดังนั้นจะได้

$$I = I_A + I_B \quad (5.1)$$

$$I_A Z_A = I_B Z_B \quad (5.2)$$

$$\frac{I_A}{Z_A} = \frac{I_B}{Z_B} \quad (5.3)$$

$$I_A = \frac{I \times Z_B}{(Z_A + Z_B)} \quad (5.4)$$

$$I_B = \frac{I \times Z_A}{(Z_A + Z_B)} \quad (5.5)$$

การขนานของหม้อแปลงที่มีอัตราแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากัน

ดังนั้น $E_A = E_B = E$ และไม่มีกระแสไฟหมนวนในขดลวดขณะรั้การะวงจรสมมูลในการขนานหม้อแปลงที่มีอัตราส่วนแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากันดังรูปที่ 5-9 พบว่ามีอิมพีแดนซ์ 2 ตัวต่อขนาน ถ่ายโอนทุกค่าไปทางด้านทุติยภูมิจะได้

$$I_A Z_A = I_B Z_B = I_{AB} Z_{AB} \quad (5.6)$$

$$\frac{1}{Z_{AB}} = \frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} \quad (5.7)$$

$$Z_{AB} = \frac{Z_A \times Z_B}{(Z_A + Z_B)} \quad (5.8)$$

$$I_A = \frac{I \times Z_{AB}}{Z_A} = \frac{I \times Z_B}{Z_A + Z_B} \quad (5.9)$$

$$I_B = \frac{I \times Z_{AB}}{Z_B} = \frac{I \times Z_A}{Z_A + Z_B} \quad (5.10)$$

$$V_2 I_A = V_2 I \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} \quad (5.11)$$

$$V_2 I_B = V_2 I \frac{Z_A}{Z_A + Z_B} \quad (5.12)$$

$$\text{ถ้า } V_2 I_A \times 10^{-3} = Q \times \text{kVA}$$

ดังนั้นจะได้

$$Q_A = Q \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} \quad (5.13)$$

ในการทำงานเดียวกัน

$$Q_A = Q \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} \quad (5.14)$$

กำหนดให้ Q = กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลดทั้งหมด (มีหน่วยเป็น kAV)

ตัวอย่างที่ 5.1 จงคำนวณหาว่าหม้อแปลงจะแบ่งจ่ายภาระ 100 กิโลวัตต์ที่ตัวประกอบกำลังล่าช้าได้อย่างไรถ้าหม้อแปลง 1 เฟส 2 ตัวต่อขนานกัน มีอิมพีแดนซ์ด้านทุติยภูมิ $0.5 + j3$ และ $0.6 + j10$ ตามลำดับ

วิธีทำ

$$Z_A = 0.5 + j3 = 3.04 \angle 80.6^\circ (\Omega)$$

$$Z_B = 0.6 + j10 = 10.02 \angle 86.6^\circ (\Omega)$$

$$Z_A + Z_B = 1.1 + j13 = 13.05 \angle 85.2^\circ (\Omega)$$

ภาระ 100 กิโลวัตต์ที่ตัวประกอบกำลัง 0.8 ล่าช้า

$$Q = 125 \angle -36.9^\circ$$

$$\begin{aligned} Q_A &= Q \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} \\ &= \frac{125 \angle -36.9^\circ \times 10.02 \angle 86.6^\circ}{13.05 \angle 85.2^\circ} = 96 \angle -35.5^\circ \end{aligned}$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าที่จ่ายโดยหม้อแปลง A} = 96 \cos 35.5^\circ = 78.2 \text{ (kW)}$$

$$\begin{aligned} Q_B &= Q \frac{Z_A}{Z_A + Z_B} \\ &= \frac{125 \angle -36.9^\circ \times 3.04 \angle 80.6^\circ}{13.05 \angle 85.2^\circ} = 29.1 \angle -41.5^\circ \end{aligned}$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าที่จ่ายโดยหม้อแปลง B} = 29.1 \cos 41.5^\circ = 21.8 \text{ (kW)}$$

$$\text{กำหนดให้ } Q = \text{กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลดทั้งหมด (มีหน่วยเป็น kVA)} \quad \text{kVA}(Q) = \frac{\text{kW}}{\text{P.F}}$$

ตัวอย่างที่ 5.2 จงหาว่าหม้อแปลง B จะจ่ายภาระเท่าใดและมีตัวประกอบกำลังเท่าใด ถ้าหม้อแปลง 1 เฟส 2 ตัว A และ B ต่อขนานกัน แต่ละตัวกำลังไฟฟ้าปรากฏเท่ากัน และมีค่าความต้านทาน 0.005 และ 0.01 ต่อหน่วย (Per Unit) มีรีแอกแตนซ์รั่วไหล 0.05 และ 0.04 ต่อหน่วย ถ้าหม้อแปลง A ทำงานเต็มภาระตัวประกอบกำลัง 0.8 ล้าหลัง

$$\text{วิธีทำ } Q_A = Q \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} \quad \dots\dots(5.13)$$

$$Q_B = Q \frac{Z_A}{Z_A + Z_B} \quad \dots\dots(5.14)$$

สมการที่ 5.13 หาด้วย 5.14

$$\frac{Q_B}{Q_A} = \frac{Z_A}{Z_B}$$

$$Z_A = 0.005 + j0.5 \quad \text{Per Unit}$$

$$\%Z_A = 0.5 + j5$$

$$Z_B = 0.01 + j0.04 \quad \text{Per Unit}$$

$$\%Z_B = 1 + j4$$

$$Q_A = Q_A \angle -36.87$$

$$Q_B = Q_A \angle -36.87^\circ \times \left(\frac{0.5 + j5}{1 + j4} \right)$$

$$= Q_A \angle -36.87^\circ \times 1.22 \angle 8.3^\circ = 1.22Q_A \angle -28.57^\circ$$

หม้อแปลงจะจ่ายกำลังเกิดภาระ 22% และมีตัวประกอบกำลังเป็น $\cos 28.57^\circ = 0.878$ ล้าหลัง

ตัวอย่างที่ 5.3 จงคำนวณหากระแสเอาต์พุตของหม้อแปลงแต่ละตัวและอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงทั้งสองโดยที่หม้อแปลง 1 เฟส 2 ตัว ต่อขนานกันภาระด้านทุติยภูมิใช้กระแส 1000 A มีตัวประกอบกำลัง 0.8 ล้าหลัง หม้อแปลงแต่ละตัวมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิเมื่อไม่ต่อภาระมีค่า 3000 V มีอิมพีแดนซ์รั่วไหลรวมที่ถ่ายโอนไปด้านทุติยภูมิ $0.1 + j0.2$ โอห์ม และ $0.05 + j0.4$ โอห์มตามลำดับ

$$\begin{aligned} \text{วิธีทำ} \quad Z_A &= 0.1 + j0.2 \, \Omega \\ Z_B &= 0.05 + j0.4 \, \Omega \\ \frac{I_A}{I_B} &= \frac{Z_B}{Z_A} = \frac{0.05 + j0.4}{0.1 + j0.2} \\ I_A &= I_B (1.7 + j0.6) \quad \text{A} \end{aligned}$$

เวกเตอร์แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วด้านทุติยภูมิ โดยใช้เวกเตอร์อ้างอิงจะได้

$$\begin{aligned} I &= 1000 (0.8 + j0.6) \quad \text{A} \\ \text{โดยที่} \quad \cos \theta &= 0.8 \sin \theta = 0.6 \\ I &= I_A + I_B = I_B (0.8 - j0.6) + I_A \\ &= I_B (2.7 - j0.6) \, \text{A} \\ I_B &= \frac{10000 (0.8 - j0.6) \text{A}}{(2.7 - j0.6)} \\ &= 362 \angle 69.4^\circ \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้นจะได้} \quad I_A = 362 \angle -29^\circ$$

$$\text{อัตราส่วนกำลัง} \quad \frac{P_A}{P_B} = \frac{564.5}{235.5} = 2.4$$

5.2.4 การขนานหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส

การขนานหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส มีข้อจำกัดเช่นเดียวกับหม้อแปลง 1 เฟสคือ

1. การเรียงลำดับเฟสต้องสอดคล้องกัน (Math Phase Sequence) นั่นคือแบบ ABC หรือ ABC อย่างใดอย่างหนึ่ง
2. ต้องมีแรงดันไฟฟ้าที่สายของขดลวดทุติยภูมิเท่ากัน (Math Line Voltage)

การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่นำมาขนานกันมีคุณสมบัติดังกล่าวหรือไม่พิจารณาได้โดยการเขียนกลุ่มเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าของขดลวดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิในหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละตัวแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน

5.2.5 การรวมโหลดหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าส่วนใหญ่แล้วจะมีกำลังการสูญเสียอยู่ประมาณ 0.04% - 1.9% ของขนาดเต็มพิกัด ขึ้นอยู่กับชนิดและประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วการสูญเสียของหม้อแปลงนั้น ส่วนมากจะให้ความสนใจ กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงเพียง 2 ส่วน คือ การสูญเสียในสภาวะไร้โหลด (No Load) และการสูญเสียขณะรับภาระ (Load loss) หรือ Copper loss กำลังการสูญเสียในส่วนนี้จะมีความแปรตรงกับภาระโหลดทั้งหมด จากการสำรวจพบว่าถ้ามีการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้า 2 ตัว ขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีการใช้งานโหลดต่ำกว่าขนาดพิกัดของหม้อแปลงทั้ง 2 โดยมีการใช้งานไม่เกิน 40% ของพิกัดขนาดติดตั้ง ซึ่งทำให้เกิดการสิ้นเปลืองในส่วนของการจ่ายด้านพลังงานและการสูญเสียพลังงานภายในหม้อแปลงเป็นจำนวนมาก ถ้าหากมีการควบรวมโหลดของหม้อแปลงทั้ง 2 ตัว เข้าด้วยกัน จะเป็นการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน และลดการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์

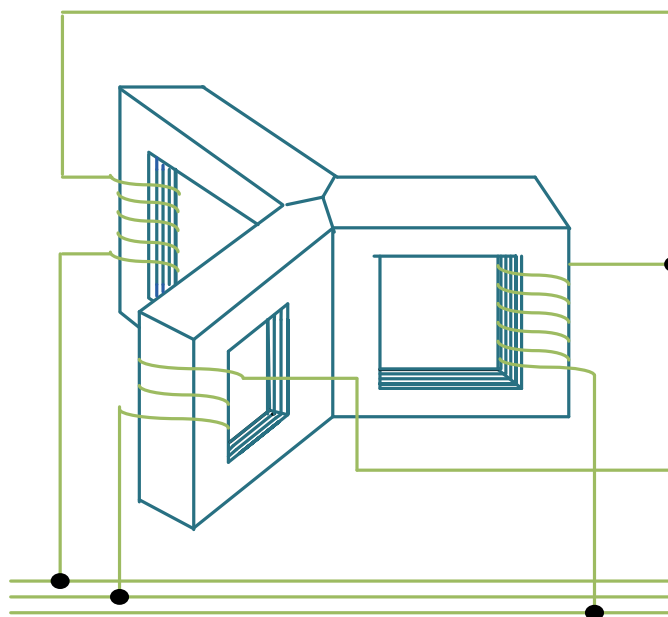
อธิบายตัวอย่างเพิ่มเติม : จากการเข้าสำรวจโรงสีข้าวแห่ง 1 ได้มีการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 2 ตัว คือตัวที่ 1 มีขนาด 500 kVA และตัวที่ 2 มีขนาด 250 kVA ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 1 ได้ทำการจ่ายโหลดให้แก่ เครื่องสีข้าว เครื่องกระเทาะเปลือก เครื่องโม่ และระบบปั๊มลม ส่วนหม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 2 ได้ทำการจ่ายโหลดให้กับบ้านพักอาศัย จำนวน 10 หลัง และระบบแสงสว่างภายในโรงสีและบ้านพักอาศัย เมื่อทำการประเมินและตรวจวัดแล้วพบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 2 ตัวนี้ มีภาระโหลดไม่ถึง 40% ของพิกัดติดตั้ง ทางทีมสำรวจจึงแนะนำให้เจ้าของโรงสีข้าวให้ทำการปลดการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 250 kVA และทำการรวมโหลดทั้งหมดภายในโรงสีข้าวเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 500 kVA เพียงตัวเดียว ซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานให้แก่โรงสีได้ประมาณ 30,000 บาท/ปี

หมายเหตุ : ในการทำการตรวจวัดนั้น ถ้าหากมีกระแสไฟฟ้าไหลในสายนิวทรัลสูงกว่าปกติ แสดงว่าเกิดการไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 4 สาย ซึ่งนับเป็นการสูญเสียในระบบจ่ายไฟฟ้าอีกรูปแบบหนึ่ง การปรับจ่ายกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสให้สมดุลนั้น เพื่อให้ค่ากระแสในสายนิวทรัลเหลือไม่เกิน 10% ของขนาดกระแสเดิม

 กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน 	ใบสาระการเรียนรู้	หน่วยที่ 1
	ชื่อวิชา เครื่องกลไฟฟ้า 1	เวลาเรียน 5 ชั่วโมง
	ชื่อหน่วย หม้อแปลงฟ้า	
ชื่อเรื่องหรือชื่องาน หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส		
สาระสำคัญ โดยปกติไฟฟ้าที่เรานำไปใช้งานนั้นได้มาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสโดยจ่ายไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าที่นำมาใช้กับเครื่องกำเนิดสามเฟสนั้นจะต้องเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสด้วย หม้อแปลงที่ใช้ในระบบไฟฟ้าสามเฟสนั้นอาจจะนำเอาหม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวจำนวน 3 ตัวมาต่อเข้าด้วยกัน หรืออาจเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสเลยก็ได้ เรื่องที่จะศึกษา 1. การต่อแบบวาย – วาย 2. การต่อแบบเดลต้า – เดลต้า 3. การต่อแบบเดลตา – วาย 4. การต่อแบบวาย – เดลต้า 5. ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าหลัก จุดประสงค์การเรียนรู้ 1. อธิบายวิธีการต่อหม้อแปลง 3 เฟส แบบต่างๆได้ 2. คำนวณหาค่ากระแสแรงดัน และกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสได้ 3. อธิบายส่วนประกอบของระบบควบคุมไฟฟ้าได้ 4. มีพัฒนาการคุณธรรม จริยธรรม ค่านิยม และคุณลักษณะอันพึงประสงค์ ที่ผู้เรียนสามารถสังเกตเห็นได้ในด้านความมีมนุษยสัมพันธ์ ความมีวินัย ความรับผิดชอบ ความเชื่อมั่นในตนเอง ความสนใจใฝ่รู้ ความรักสามัคคี ความกตัญญูกตเวที		

6 หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส

ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้กันโดยทั่วไปเป็นระบบ 3 เฟส ซึ่งได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดใหญ่กำเนิดไฟฟ้าระบบ 3 เฟส ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้า 123 กิโลโวลต์ หรือสูงกว่า ป้อนแรงเคลื่อนสู่หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแปลงขึ้น (Step up Transformer) แล้วส่งเข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้า 110, 132, 275, 400 หรือ 750 กิโลโวลต์ เหตุที่ส่งจ่ายไฟฟ้าเป็นระบบแรงสูงเพราะมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบฯ ต่ำกว่า หลังจากนั้นจะส่งผ่านเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าลงมาที่ 6,600, 4,600 และ 2,300 โวลต์ ที่ศูนย์จ่ายภาระ (Load Center) หลังจากนั้นจะแปลงเป็นไฟฟ้าระบบแรงต่ำขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้า 380, 220 โวลต์ เพื่อจ่ายให้กับใช้ไฟฟ้าโดยส่งกำลังด้วยสายส่ง 3 เฟส การเชื่อมโยงระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายส่งทำได้โดยการใช้หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งมีหลักการเช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 3 ตัวมาต่อกัน แต่หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 3 ตัวมีพื้นที่ในการติดตั้งมากกว่าแบบ 3 เฟสเพียงตัวเดียวและมีน้ำหนักกว่า รวมทั้งค่าใช้จ่ายสูงกว่า การพันหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เฟส อาจทำได้หลายวิธี เช่น การใช้แกนเหล็ก 3 ชุด นำมาวางทำมุมกัน 120 องศา โดยนำด้านที่ไม่ได้พันขดลวดมาต่อสัมผัสกัน แสดงในภาพที่ 6-1 แสดงให้เห็นเฉพาะขดลวดทางด้านอินพุต ถูกต่อแบบสตาร์



รูปที่ 6-1 หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส

6.1 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส (Three Phase Transformer Connection)

การเพิ่มและลดแรงเคลื่อนไฟฟ้า 3 เฟส โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส มีการต่อได้หลายแบบ วิธีที่นิยมใช้มีอยู่ 4 แบบ ได้แก่

- การต่อแบบ วาย-วาย (Wye-Wye Connection; Y / Y)
- การต่อแบบ เดลต้า-เดลต้า (Delta-Delta Connection; Δ / Δ)
- การต่อแบบ วาย-เดลต้า (Wye- Delta Connection; Y / Δ)
- การต่อแบบ เดลต้า-วาย (Delta -Wye Connection; Δ / Y)

6.1.1 การต่อ วาย-วาย แบบสมดุล (Balanced Y-Y Connection)

การต่อหม้อแปลงลักษณะนี้จะมีความเหมาะสมด้านเศรษฐศาสตร์มากที่สุดในหม้อแปลงแรงต่ำและสูง เพราะจำนวนรอบต่อเฟสและจำนวนฉนวนมีค่าน้อยที่สุด (เนื่องจากแรงเคลื่อนเฟสมีค่าเพียง $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ของแรงเคลื่อนสาย) พิจารณาภาพที่ 6-2 แสดงการต่อของหม้อแปลง 3 ตัวที่มีอัตราส่วนรอบเท่ากัน โดยต่อแบบ Y ที่ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ การต่อลักษณะนี้ กรณีที่มีการสมดุลจะมีกระนิวทรัล (Neutral Current) เป็นศูนย์ กรณีที่มีการไม่สมดุล จะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสายทั้ง 3 เส้นมีค่าไม่เท่ากัน การเกิดภาระไม่สมดุลในระบบ 3 เฟส ทำให้ได้โดยการติดตั้งภาระ 1 เฟสที่ไม่เท่ากันทั้งสามสาย แรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมีความสัมพันธ์กันดังนี้

ขดปฐมภูมิ

$$V_L = \sqrt{3} V_P \quad (6.1)$$

$$I_L = I_P \quad (6.2)$$

ขดทุติยภูมิ

$$V_L = \sqrt{3} V_P \quad (6.3)$$

$$I_L = I_P \quad (6.4)$$

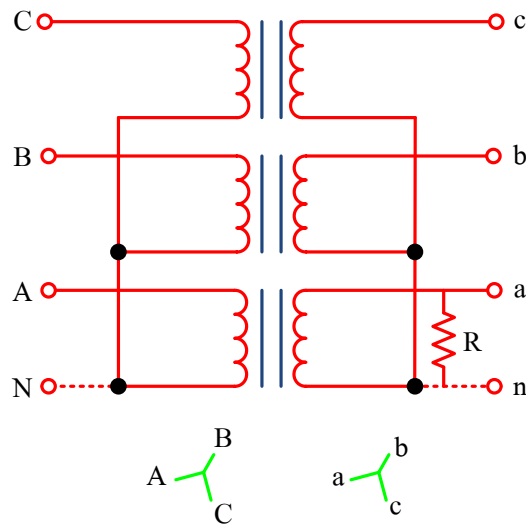
โดยที่ :

V_L แรงเคลื่อนสาย (โวลต์)

V_P แรงเคลื่อนเฟส (โวลต์)

I_L กระแสสาย (แอมป์)

I_P กระแสเฟส (แอมป์)



รูปที่ 6-2 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสแบบ Y-Y มุมต่างเฟสของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขดลวดปฐมภูมิกับทุติยภูมิมีค่า 0°

6.1.2 การต่อแบบ เดลต้า-เดลต้า (Balanced Δ - Δ Connection)

การต่อแบบเดลต้า-เดลต้า ใช้สัญลักษณ์ Δ / Δ แสดงการต่อดังภาพที่ 6-3 แรงเคลื่อนที่ขดลวดแต่ละชุด V_p เท่ากับของแรงสาย V_L ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดแต่ละชุด I_p จะมีค่าเป็น $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ของกระแสไฟฟ้าที่สาย I_L การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้ ถ้าขดลวดขดใดขดหนึ่งเกิดชำรุดที่เหลื้อสามารถจ่ายภาระได้ประมาณ 38 % ของการต่อในแบบเดลต้า การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเดลต้า-เดลต้า จะทำให้แรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้า ดังนี้

ขดปฐมภูมิ

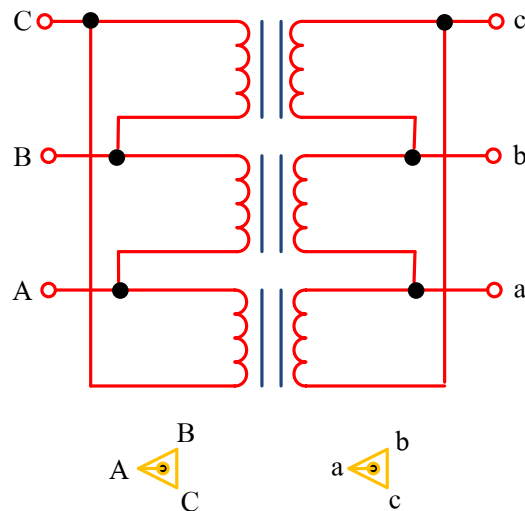
$$V_L = V_p \quad \dots\dots\dots(6.5)$$

$$I_L = \sqrt{3} I_p \quad \dots\dots\dots(6.6)$$

ขดทุติยภูมิ

$$V_L = V_p \quad \dots\dots\dots(6.7)$$

$$I_L = \sqrt{3} I_p \quad \dots\dots\dots(6.8)$$



รูปที่ 6-3 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสแบบ $\Delta - \Delta$ มุมต่างเฟสของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขดลวดปฐมภูมิกับทุติยภูมิมีค่า 0°

6.1.3 การต่อแบบ วาย-เดลต้า (Balanced Y - Δ Connection)

การต่อแบบสตาร์-เดลต้า หรือในบางครั้งเรียกว่า การต่อแบบวาย-เดลต้า (wye-delta connection) ใช้สัญลักษณ์ $Y - \Delta$ แสดงการต่อได้จากภาพที่ 6-4 ซึ่งเป็นการหม้อแปลงไฟฟ้าระบบ 3 เฟส โดยขดปฐมภูมิต่อแบบเดลต้า การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้ อัตราส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สายทางด้านขดทุติยภูมิกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สายทางด้านขดปฐมภูมิจะมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{3}}$ เท่าของค่า K ของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละตัว แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สายด้านขดปฐมภูมิกับทางด้านขดทุติยภูมิจะเกิดล้าหลังไป 30° ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนและกระแสในการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้ มีดังนี้

ขดปฐมภูมิ

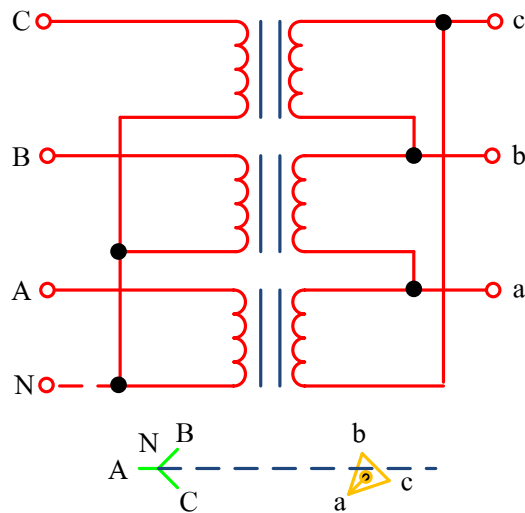
$$V_L = \sqrt{3} V_p \quad \dots\dots\dots(6.9)$$

$$I_L = I_p \quad \dots\dots\dots(6.10)$$

ขดทุติยภูมิ

$$V_L = V_p \quad \dots\dots\dots(6.11)$$

$$I_L = \sqrt{3} I_p \quad \dots\dots\dots(6.12)$$



รูปที่ 6-4 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสแบบ Y – Δ มุมต่างเฟสของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขดลวดปฐมภูมิกับทุติยภูมิมีค่า 30°

6.1.4 การต่อแบบ เดลต้า – วาย (Balanced Δ - Y Connection)

การต่อแบบ เดลต้า-สตาร์ หรือในบางครั้งเรียกว่า การต่อแบบเดลต้า-วาย (delta-wye connection) ใช้สัญลักษณ์ Δ - Y แสดงการต่อได้จากภาพที่ 6-5 ขดปฐมภูมิต่อแบบเดลต้า ส่วนขดทุติยภูมิต่อแบบสตาร์ การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้ อัตราส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สายทางด้านขดทุติยภูมิกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สายทางด้านขดปฐมภูมิจะมีค่าเท่ากับ $\sqrt{3}$ เท่าของค่า K ของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละตัว แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สายด้านขดปฐมภูมิกับทางด้านขดทุติยภูมิจะต่างเฟสกัน 30° การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้นิยมใช้แปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากสายส่งแรงสูงในระบบ 3 เฟส 3 สาย เพื่อใช้งานในระบบ 3 เฟส 4 สาย ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้า มีดังนี้

ขดปฐมภูมิ

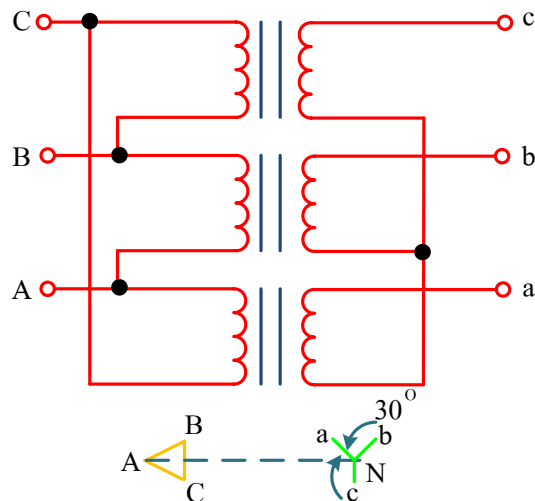
$$V_L = V_p \quad \dots\dots\dots(6.13)$$

$$I_L = \sqrt{3} I_p \quad \dots\dots\dots(6.14)$$

ขดทุติยภูมิ

$$V_L = \sqrt{3} V_p \quad \dots\dots\dots(6.15)$$

$$I_L = I_p \quad \dots\dots\dots(6.16)$$



รูปที่ 6-5 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสแบบ Δ - Y มุมต่างเฟสของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขดลวดปฐมภูมิกับทุติยภูมิมีค่า 30°

ตัวอย่างที่ 6.1 : จงคำนวณหาแรงเคลื่อนที่ไฟฟ้าที่ขดลวดปฐมภูมิในหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 5,000 kVA. 6.6/33 kW ต่อแบบ Δ - Y เมื่อมีภาระขนาด 3,200 kW หม้อแปลงมีการสูญเสียขณะที่มีภาระ 15kW และการสูญเสียเมื่อมีภาระเต็มพิกัด 50 kW และแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมที่อิมพีแดนซ์ในขณะที่มีภาระเต็มพิกัด 7% ที่ตัวประกอบกำลัง 0.8 ถ้าหลัง โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าสายทางด้านขดทุติยภูมิคงตัวที่ 33 kV

วิธีทำ : กระแสไฟฟ้าขณะที่มีภาระเต็มพิกัด ที่ขดลวดทุติยภูมิ

$$I_2 = \frac{5,000 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 33,000} = 87.5 \quad (\text{A})$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมที่อิมพีแดนซ์ในขณะที่มีภาระเต็มพิกัดในขณะที่มีภาระพิกัด 7% ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมที่อิมพีแดนซ์ต่อเฟสในขณะที่มีภาระเต็มพิกัด

$$= 7\% \text{ ของ } \frac{33}{\sqrt{3}} \text{ หรือ } 7\% \text{ ของ } 19 \text{ (kV)} = 1,330 \quad (\text{V})$$

อิมพีแดนซ์ที่พิจารณาเป็นอิมพีแดนซ์ต่อเฟส

$$\text{นั่นคือ} \quad Z_{02} = \frac{1330}{87.5} \quad (\Omega) = 15.3 \quad (\Omega)$$

การสูญเสียในขดลวดทองแดงขณะที่มีภาระเต็มพิกัด

$$\begin{aligned} &= \text{การสูญเสียขณะที่มีภาระเต็มพิกัด} - \text{การสูญเสียขณะที่มีภาระ} \\ &= 50 - 15 \quad (\text{kW}) \\ 3 I_2^2 R_{02} &= 35 \quad (\text{kW}) \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } R_{02} = \frac{\frac{35,000}{3}}{87.5^2} = 1.53 \quad (\Omega / \text{phase})$$

$$\begin{aligned} \text{นั่นคือ } X_{02} &= \sqrt{(Z_{02})^2 - (R_{02})^2} = \sqrt{(153)^2 - (1.53)^2} \\ &= 15.23 \quad (\Omega / \text{phase}) \end{aligned}$$

เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าต่อเข้ากับภาระขนาด 3,200 kW ที่ตัวประกอบกำลัง 0.8 ล้าหลัง

$$\text{ดังนั้น } I_2 = \frac{(3,200 \times 10^3)}{\sqrt{3} \times 33 \times 10^3 \times 0.8} = 70 \quad (\text{A})$$

แรงเคลื่อนตกคร่อมที่อิมพีแดนซ์ต่อเฟส

$$\begin{aligned} &= I_2 \sqrt{(R_{02} \cos \theta)^2 + (X_{02} \sin \theta)^2} \\ &= 70 \sqrt{(1.53 \times 0.8)^2 + (15.23 \times 0.6)^2} = 646.12 \quad (\text{V}) \end{aligned}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การปรับแรงเคลื่อน} = \frac{646.12}{\left(\frac{33 \times 10^3}{\sqrt{3}}\right)} \times 100$$

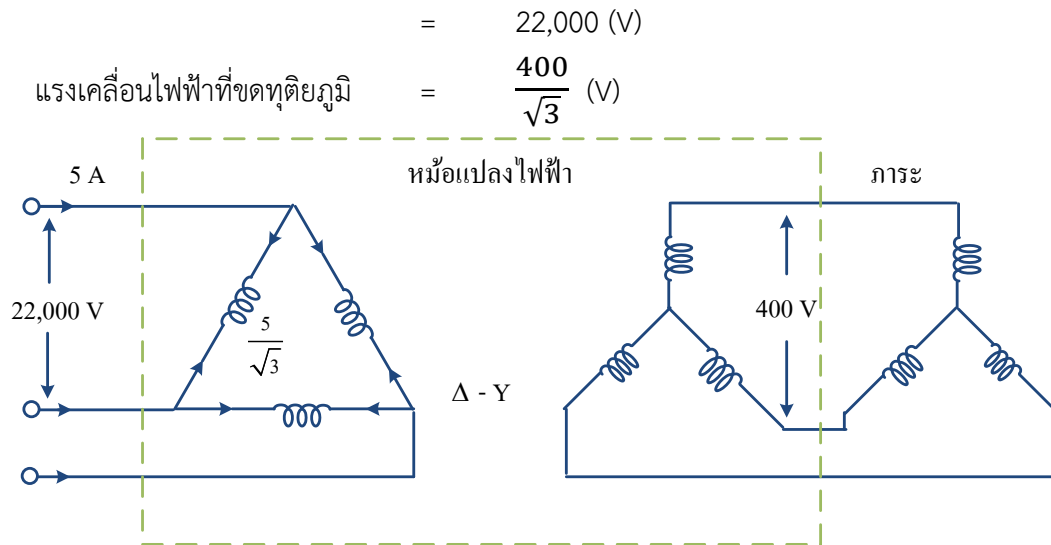
$$\text{เปอร์เซ็นต์การปรับแรงเคลื่อน} = 3 \quad \%$$

ถ้าต้องการให้แรงเคลื่อนสายของขดลวดทุติยภูมิคงตัวจะต้องจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้กับทางด้านขดปฐมภูมิเพิ่มอีก 3% ดังนั้น แรงเคลื่อนสายของทางด้านขดลวดปฐมภูมิ

$$= (6.6 \times 10^3) + \left[\left(\frac{3}{100} \right) (6.6 \times 10^3) \right] = 6,790 \quad (\text{V})$$

ตัวอย่างที่ 6.2 : จงคำนวณหากระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดปฐมภูมิ และกระแสสายของขดทุติยภูมิ พร้อมทั้งกำลังเข้าหัทพของหม้อแปลงไฟฟ้า คิดเป็นกิโลวัตต์ในหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส 50 Hz มีขดลวดปฐมภูมิต่อแบบเดลต้าและขดทุติยภูมิต่อเป็นแบบสตาร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สาย 22,000 V และ 400 V ตามลำดับ ขดทุติยภูมิมีภาระต่ออยู่เป็นแบบสมดุ มีตัวประกอบกำลัง 0.8 ถ้าหลัง กระแสไฟฟ้าที่สายของขดปฐมภูมิเท่ากับ 5 A

วิธีทำ : จากรูป 6.6 แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขดลวดของปฐมภูมิมีค่า



รูปที่ 6-6 วงจรไฟฟ้าหม้อแปลง 3 เฟส ในตัวอย่างที่ 6.2

อัตราส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส

$$= \frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{\frac{400}{\sqrt{3}}}{22,000} \right)$$

$$\text{ดังนั้น } K = \frac{400}{22,000\sqrt{3}} = \frac{1}{55\sqrt{3}}$$

$$\text{กระแสเฟสในขดปฐมภูมิ} = \frac{5}{\sqrt{3}} \quad (\text{A})$$

$$\text{กระแสเฟสในขดทุติยภูมิ} = \frac{\frac{5}{\sqrt{3}}}{K} = \frac{\frac{5}{\sqrt{3}}}{\frac{1}{55\sqrt{3}}} = 275 \quad (\text{A})$$

$$\text{กระแสสายขดทุติยภูมิ} = 275 \quad (\text{A})$$

$$\text{กำลังเข้าหัทพ} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta = \sqrt{3} \times 400 \times 275 \times 0.8$$

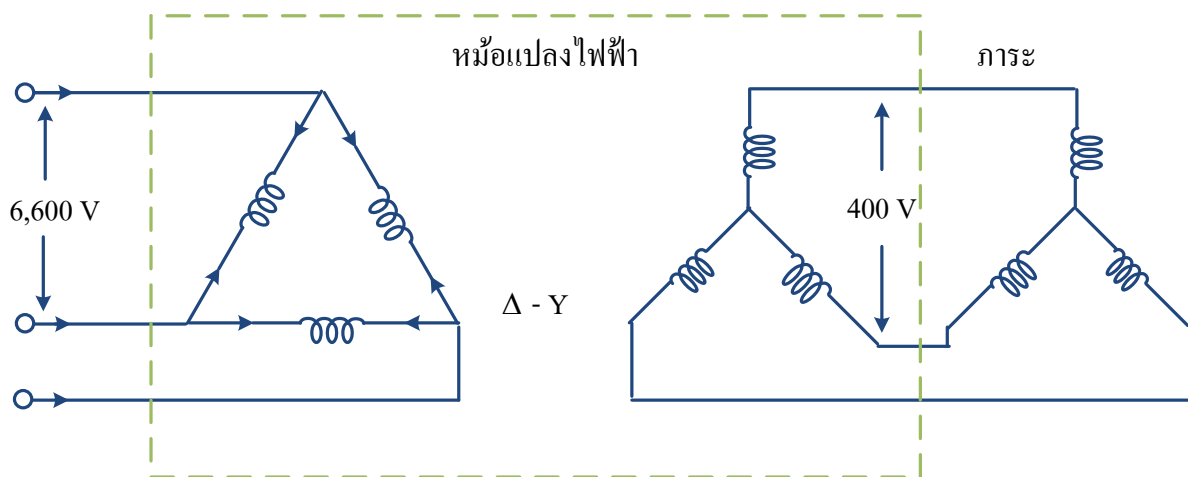
$$= 15.24 \times 10^3 \text{ (W)} = 15.24 \text{ (W)}$$

ตัวอย่างที่ 6.3 : หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 2,000 kVA. 6,600 / 400 V ด้านแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูง
ต่อเป็นแบบเดลต้า และทางด้านแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำต่อเป็นแบบสตาร์ จงคำนวณหา

1. เปอร์เซนต์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมที่มีความต้านทาน
2. เปอร์เซนต์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมที่มีรีแอคแตนซ์
3. เปอร์เซนต์การปรับแรงเคลื่อน
4. ประสิทธิภาพ

วิธีทำ : เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าทำงานเต็มที่ ที่ตัวประกอบกำลัง 0.8 นำหน้า และมีข้อมูลที่ได้จากการทดสอบดังนี้

ทดสอบแบบวงจรลัด อ่านข้อมูลได้จากด้านแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงได้ 400 V 175 A และ 17 kW
ทดสอบแบบวงจรลัด อ่านข้อมูลได้จากด้านแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงได้ 400 V 150 A และ 15 kW



รูปที่ 6-7 วงจรไฟฟ้าหม้อแปลง 3 เฟส ในตัวอย่างที่ 6.3

จากการทดสอบแบบวงจรลัด แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อเฟสที่ขดปฐมภูมิ

$$= 400 \quad (\text{V})$$

$$\text{กระแสที่ขดปฐมภูมิ / เฟส} = \frac{175}{\sqrt{3}} = 100 \quad (\text{A})$$

(ก) เปอร์เซนต์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมที่มีความต้านทาน

$$Z_{01} = \frac{400}{100} = 4 \quad (\Omega)$$

$$I^2 R_{01} = W_{sc}$$

กำลังไฟฟ้าขณะลัดวงจรต่อเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้า

$$\begin{aligned}
 &= \frac{17,000}{3} \quad (W) \\
 (100)^2 R_{01} &= \frac{17,000}{3} \\
 R_{01} &= \frac{17,000}{(3 \times 10,000)} = 0.567 \quad (\Omega) \\
 \%R &= (I_1 R_{01} / V_1) \times 100 = \frac{(100 \times 0.567)}{6,600 \times 100} = 0.86 \quad (\%)
 \end{aligned}$$

(ข) เปอร์เซนต์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมที่รีแอคแตนซ์

$$\begin{aligned}
 X_{01} &= \sqrt{(Z_{01})^2 - (R_{01})^2} = \sqrt{(4)^2 - (0.567)^2} \\
 &= 3.96 \quad \Omega \\
 \%R &= \frac{(I_1 R_{01})}{V_1} \times 100 = \frac{100 \times 0.567}{6,600} \times 100 = 0.86 \% \\
 \%X &= \frac{(I_1 X_{01})}{V_1} \times 100 = \frac{100 \times 3.96}{6,600} \times 100 = 6 \%
 \end{aligned}$$

(ค) เปอร์เซนต์ของแรงเคลื่อน

$$\begin{aligned}
 &= V_r \cos \theta - V_x \sin \theta \\
 &= ((0.86 \times 0.8) - (6 \times 0.6)) \times 100 \\
 \text{เปอร์เซ็นต์การปรับแรงเคลื่อน} &= -2.91 \quad (\%)
 \end{aligned}$$

(ง) ประสิทธิภาพ

$$\begin{aligned}
 \text{สูญเสียรวมหม้อแปลงมีภาระเต็มพิกัด} &= 17 + 15 \text{ kW} = 32 \text{ (kW)} \\
 \text{เอ้าท์พุทหม้อแปลงทำงานเต็มพิกัด} &= 2,000 \times 0.8 = 1,600 \text{ (kW)} \\
 \text{ประสิทธิภาพ} &= \frac{1,600}{1,632} \times 100 = 98 \quad (\%)
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 6.4 : จงคำนวณหาประสิทธิภาพที่กระแสฟลักซ์และครี้งฟลักซ์ ที่มีตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง และ 0.8 ในหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส 50 เฮิรตซ์ ขนาน 500 kVA มีอัตราส่วนแรงเคลื่อนสายเท่ากับ 33 / 11 kV ต่อแบบ $\Delta - Y$ ความต้านทานต่อเฟสด้านแรงเคลื่อนสูงมีค่า 35 Ω และด้านแรงเคลื่อนต่ำมีค่า 0.876 Ω การสูญเสียแกนเหล็กมีค่า 3,050 วัตต์

วิธีทำ :

$$\text{อัตราส่วนการแปลง } K = \frac{11,000}{\sqrt{3} \times 33,000} = \frac{1}{3\sqrt{3}}$$

$$\text{ความต้านทานด้านทุติยภูมิ } R_{02} = 0.876 + \left(\frac{1}{3\sqrt{3}}\right)^2 \times 35 = 2.172 \text{ } (\Omega)$$

$$\text{กระแสเฟสด้านทุติยภูมิ} = \frac{500,000}{\sqrt{3} \times 11,000} = \frac{500}{11\sqrt{3}}$$

กรณีกระแสเต็มฟลักซ์

$$\text{สูญเสียที่ขดลวด} = 3 \times (500 / 11 \sqrt{3})^2 \times 2.172 = 4,490 \text{ (W)}$$

$$\text{สูญเสียที่แกนเหล็ก} = 3,050 \text{ (W)}$$

$$\text{สูญเสียรวม} = 4,490 + 3,050 = 7,540 \text{ (W)}$$

กำลังไฟฟ้าที่ตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่งเท่ากับ 500 (kW)

$$\therefore \text{ประสิทธิภาพที่กระแสเต็มฟลักซ์} = \frac{500,000}{507,540} \times 100 = 98.2 \text{ } (\%)$$

$$\therefore \text{ประสิทธิภาพ} = \frac{400,000}{407,540} \times 100 = 98.2 \text{ } (\%)$$

กรณีกระแสครึ่งฟลักซ์

กำลังไฟฟ้าที่ตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่งเท่ากับ 500 (kW)

$$\text{สูญเสียที่ขดลวด} = \left(\frac{1}{2}\right)^2 4,490 = 1,122 \text{ (W)}$$

$$\text{สูญเสียที่แกนเหล็ก} = 3,050 \text{ (W)}$$

$$\text{สูญเสียรวม} = 1,122 + 3,050 = 4,172 \text{ (W)}$$

กำลังไฟฟ้าที่ตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่งเท่ากับ 500 (kW)

$$\therefore \text{ประสิทธิภาพที่กระแสเต็มฟลักซ์} = \frac{250,000}{254,172} \times 100 = 98.35 \text{ } (\%)$$

$$\therefore \text{ประสิทธิภาพ} = \frac{200,000}{254,172} \times 100 = 98 \text{ } (\%)$$

6.2 ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าหลัก

เป็นแผงจ่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่ นิยมใช้ในอาคารขนาดกลางจนถึงขนาดใหญ่ ไปจนถึงโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้ไฟฟ้าจำนวนมาก โดยรับไฟจากการไฟฟ้าหรือด้านแรงต่ำของหม้อแปลงจำหน่ายแล้วจ่ายโหลดไปยังแผงย่อยตามส่วนต่างๆ ของอาคาร สวิตช์บอร์ดอาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Main Distribution Board (MDB) ตู้ MDB ส่วนมากมีขนาดใหญ่ จึงมักวางบนพื้น มีหลายแบบให้เลือกใช้ขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิต ทั้งนี้ควรพิจารณาจากระดับแรงดันพิกัดกระแส และพิกัดกระแสลัดวงจรด้วย

6.2.1 ส่วนประกอบหลัก

โครงตู้ (Enclosure) ทำมาจากแผ่นโลหะประกอบเป็นโครงตู้ ซึ่งอาจเปิดได้เฉพาะด้านหน้าหรือเปิดได้ทุกด้านขึ้นอยู่กับกรออกแบบ โดยมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ

1. คุณสมบัติทางกล คือ รับแรงทางกลจากภายนอกได้เพียงพอต่อการใช้งานทั้งภาวะปกติและไม่ปกติได้
2. คุณสมบัติทางความร้อน คือ ทนความร้อนจากสภาพแวดล้อม ความผิดปกติในระบบและอาร์คจากการลัดวงจรได้
3. คุณสมบัติต่อการกัดกร่อน คือ สามารถทนการกัดกร่อนจากความชื้นและสารเคมีได้

นอกจากนี้ โครงตู้ยังทำหน้าที่ป้องกันอันตรายต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ คือ

- 3.1. ป้องกันไม่ให้ผู้อยู่ใกล้สวิตช์บอร์ดสัมผัสอุปกรณ์ที่มีไฟ
- 3.2. ป้องกันอุปกรณ์ภายในตู้จากสิ่งต่างๆ ภายนอก เช่น น้ำ วัตถุแข็ง สัตว์เลื้อยคลาน
- 3.3. ป้องกันอันตรายจากการอาร์คที่รุนแรงจนขึ้นส่วนอุปกรณ์ อาจหลุด กระเด็นออกมา

บัสบาร์ (Busbar) มีทั้งชนิดที่ตัวนำทำด้วยทองแดงและอลูมิเนียม รูปร่างของบัสบาร์ที่นิยมใช้กันทั่วไปเป็นแบบ Flat คือ มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เนื่องจากติดตั้งง่าย ระบายความร้อนดี แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

- 2.1. บัสบาร์แบบเปลือย
- 2.2. บัสบาร์แบบทาสี



(ก)



(ข)

รูปที่ 6-8 (ก) บัสบาร์เปลือย (ข) บัสบาร์ทาสี

ข้อแนะนำในการใช้บัสบาร์

- 2.2.1. บัสบาร์ควรวางในแนวดิ่งจึงจะระบายความร้อนได้ดี
- 2.2.2. บัสบาร์แบบ Flat ควรขนานไม่เกิน 4 แท่ง ถ้ามากกว่านี้จะมีปัญหาเรื่อง Skin Effect
- 2.2.3. บัสบาร์แบบทาสี สีที่ใช้ทาเคลือบบัสบาร์ควรมีสมบัติการระบายความร้อนสูงประมาณ 0.9
- 2.2.4. บัสบาร์แบบทาสีนำกระแสได้สูงกว่าบัสบาร์แบบเปลือย
- 2.2.5. กำหนดให้ใช้สีแดง เหลือง น้ำเงิน สำหรับเฟส R, Y, B ตามลำดับ
- 2.2.6. การเรียงเฟสในสวิตช์บอร์ด (R, Y, B) ให้เรียงจากด้านหน้าไปยังด้านหลังตู้ จากบนลงล่าง หรือ จากซ้ายไปขวา

2.2.7. การเรียงเฟสลักษณะอื่นอนุญาตเฉพาะการเชื่อมต่อกับระบบที่มีอยู่แล้ว แต่ต้องทำเครื่องหมายให้เห็นชัดเจน

เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) สำหรับสวิตช์บอร์ดแรงต่ำ เบรกเกอร์ที่ใช้ทั่วไปมี 2 แบบ คือ Air Circuit Breaker และ Mold Case Circuit Breaker โดย ACB. ใช้เป็นเมนเบรกเกอร์ในวงจรที่ใช้กระแสสูง ส่วน Mold Case CB (MCCB) ใช้กับวงจรย่อย หรือใช้เป็นเมนเบรกเกอร์ในตู้สวิตช์บอร์ดขนาดเล็ก ทั้งนี้ การเลือกเบรกเกอร์ควรพิจารณาขนาดความกว้าง ยาว สูง เพื่อให้ติดตั้งในตู้ได้อย่างเหมาะสมสวยงาม ค่ากระแส IC รวมถึงการจัด Co-ordination ด้วย



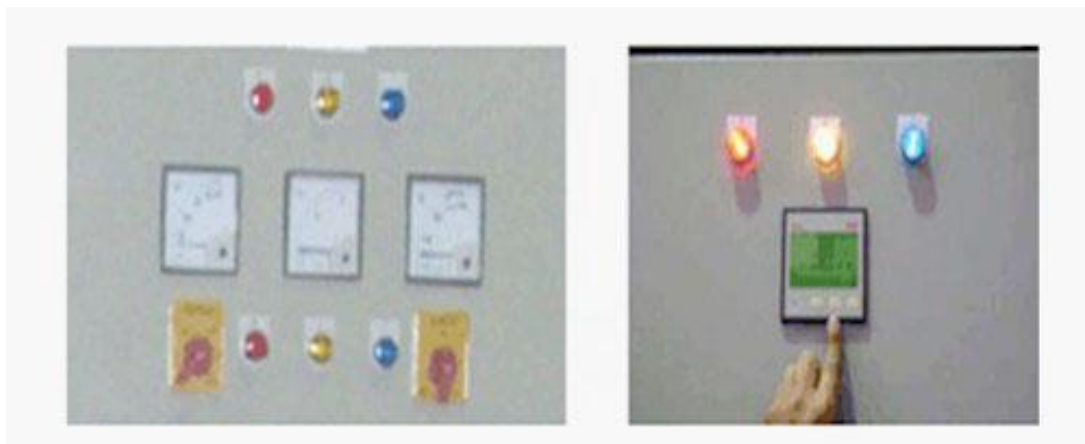
รูปที่ 6-9 Air Circuit Breaker



รูปที่ 6-10 Mold Case Circuit Breaker

เครื่องวัดไฟฟ้า (Meter) เครื่องวัดพื้นฐานที่ใช้ในตู้สวิตช์บอร์ดทั่วไปคือ โวลต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์ ซึ่งต่อใช้งานร่วมกับ Selector Switch เพื่อวัดแรงดันหรือกระแสในแต่ละเฟสพิกัด แรงดันของโวลต์มิเตอร์ คือ 0 - 500V. ส่วนพิกัดกระแสของแอมป์มิเตอร์จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Current Transformer เช่น 100/5A เป็นต้น

สำหรับตู้สวิตช์บอร์ดขนาดใหญ่อาจมี P.F Meter, Watt Meter หรือ Var Meter เพิ่มเติมขึ้นอยู่กับ
การออกแบบตู้ บางตู้ก็อาจติดตั้ง P.F. Controller เพื่อควบคุมค่า Power Factor ในวงจรด้วย



รูปที่ 6-11 เครื่องวัดไฟฟ้า

6.2.2. อุปกรณ์ประกอบ

อุปกรณ์ประกอบในตู้สวิตช์บอร์ดมีหลายตัว ได้แก่.

1. (CT) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบการวัดกระแสไฟฟ้าโดยต่อร่วมกับแอมป์มิเตอร์ CT ที่มีใช้ใน
ท้องตลาดจะมี 2 กลุ่ม คือ อัตราส่วนต่อ 1 และอัตราส่วนต่อ 5 ที่ใช้ในตู้สวิตช์บอร์ด นิยมใช้อัตราส่วนต่อ 5
เช่น 50/5, 100/5, 300/5 เป็นต้น ปกติจะเลือก CT ตามขนาดของเมนเบรกเกอร์ โดยเลือกไม่ต่ำกว่าพิกัดของ
เมนเบรกเกอร์ เช่น เมนเบรกเกอร์ที่มีขนาด 100A ก็เลือก CT ขนาด 100/5A. ข้อควรระวังในการใช้ CT
คือ ห้ามเปิดวงจรด้าน Secondary ของ CT เนื่องจากจะเกิดแรงดันสูงตกคร่อมขดลวดและทำให้ CT ไหม้ได้
หากไม่ใช้งานต้องลัดวงจรขั้วทั้งสองของ CT เสมอ



รูปที่ 6-12 Current Transformer (CT)

2. Selector Switch โดย Ammeter Selector Switch จะใช้ร่วมกับ CT และ Panel Ammeter
เพื่อวัดกระแสในตู้สวิตช์บอร์ดส่วน Voltmeter Selector Switch จะใช้ร่วมกับ Panel Voltmeter เพื่อวัด
แรงดันภายในตู้ การต่อวงจรให้ดูจากไดอะแกรมที่มาพร้อมกับอุปกรณ์ เพราะแต่ละยี่ห้ออาจมีวิธีการต่อที่
แตกต่างกัน



รูปที่ 6-13 Selector Switch

3. Pilot Lamp เป็นหลอดที่แสดงสถานการณ์ทำงาน เพื่อบอกให้รู้ว่ามีไฟจ่ายเข้ามายังตู้สวิตช์บอร์ดหรือไม่ Pilot Lamp มี 2 แบบ คือ

3.1 แบบมีหม้อแปลงแรงดัน

3.2 แบบไม่มีหม้อแปลงแรงดัน

แบบมีหม้อแปลงแรงดันจะลดแรงดันให้ต่ำลงเพื่อให้เหมาะสมกับแรงดันหลอด เช่น 220/6.3V. เป็นต้น

4. Fuse ฟิวส์เป็นอุปกรณ์ ใช้ป้องกันวงจรเครื่องวัดไฟฟ้าและหลอด Pilot Lamp

5. ฉนวนรองบัสบาร์ เป็นฉนวนรองรับบัสบาร์ โดยด้านหนึ่งยึดติดกับโครงตู้สวิตช์บอร์ด อีกด้านหนึ่งยึดบัสบาร์ได้ มีหลายชนิดให้เลือกใช้ให้เหมาะสมกับบัสบาร์แต่ละแบบ



รูปที่ 6-14 Pilot Lamp

6.2.3 การปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ด้วยคาปาซิเตอร์

การไฟฟ้าได้มีการกำหนดให้ผู้ประกอบกิจการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ให้มีค่าไม่ต่ำกว่า 0.85 (lagging) และได้กำหนดค่าปรับแก่กิจการที่ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ต่ำ ในอัตรา กิโลวาร์ (kVar) ละประมาณ 14.02 บาท ในการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์นอกจากจะลดค่าปรับแล้ว ยังช่วยลดกำลังสูญเสียใน

สายไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า และอุปกรณ์อื่นๆ โรงงานแห่งหนึ่งมีการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้าจำนวน 64 เครื่อง จากการตรวจวัดการใช้งาน พบว่ามอเตอร์มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (PF) อยู่ในช่วง 0.32 – 0.82 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก จึงได้ดำเนินการติดตั้งคาปาซิเตอร์ เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (PF) ให้มีค่าสูงขึ้น พบว่าสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า 7,203.98 บาท/ปี โดยใช้เงินลงทุน 8,880.00 บาท ระยะเวลาคืนทุน 1.54 ปี

ข้อแนะนำ : ถ้าค่า PF ต่ำกว่า 0.85 จะต้องเสียค่าปรับ 14.02 บาทต่อกิโลวาร์ โดยคิดจากกิโลวาร์ที่เกิน 61.97% ของค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดเดือนนั้น

6.2.4 การปรับกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสให้สมดุล

เป็นการเฉลี่ยโหลดแต่ละเฟสให้มีค่าเท่ากัน หรือใกล้เคียงกัน ซึ่งทำให้กระแสในแต่ละเฟสมีค่าใกล้เคียงกัน หากโหลดไม่สมดุลจะทำให้เกิดความสูญเสียและแรงดันปลายสายตกมาก รวมทั้งแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสไม่เท่ากัน และความสามารถในการจ่ายโหลดของหม้อแปลงลดลง

แบบประเมินผลการเรียน

หน่วยที่ 1

หม้อแปลงไฟฟ้า

คำสั่ง จงทำเครื่องหมาย X ลงข้อที่ถูกต้อง

1. ข้อใดคือความหมายของการเหนี่ยวนำ

ก. Inductance

ข. Reactance

ค. Resistance

ง. Capacitance

2. กฎมือขวาของลวดตัวนำกล่าวอย่างไร

ก. เมื่อกำนิ้วทั้งสี่รอบตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลจะทำให้เกิดขั้วเหนือขึ้นที่ปลายตัวนำ

ข. เมื่อกำนิ้วทั้งสี่รอบตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลจะทำให้เกิดขั้วใต้ขึ้นที่ปลายตัวนำ

ค. เมื่อกำนิ้วทั้งสี่รอบตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบๆ ตัวนำ

ง. เมื่อกำนิ้วทั้งสี่รอบตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลถ้านิ้วหัวแม่มือชี้ทิศทางกระแสไฟฟ้า นิ้วทั้งสี่จะชี้ทิศทางของสนามแม่เหล็ก

3. แกนเหล็กหม้อแปลงทำมาจากแผ่นเหล็กบางๆอัดซ้อนกันเรียกว่าอะไร

ก. แกนเหล็กหล่อเหนียว

ข. แกนเหล็กลามิเนต

ค. แกนเหล็กผสม

ง. แกนเหล็กรอยย่น

4. เพราะเหตุใดจึงนำแผ่นเหล็กมาอัดซ้อนกัน เพื่อทำเป็นแกนเหล็กหม้อแปลง

ก. เพื่อลดความต้านทานสนามแม่เหล็ก

ข. เพื่อลดน้ำหนักของหม้อแปลง

ค. เพื่อช่วยให้สนามแม่เหล็กมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

ง. เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

5. μ_r คือสัญลักษณ์เขียนแทนค่าใด

ก. ความซึมซับสัมพัทธ์

ข. ความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็ก

ค. ความซึมของสนามแม่เหล็ก

ง. แรงเคลื่อนแม่เหล็ก

6. แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบใดเป็นสำคัญ

- ก. จำนวนรอบของขดลวด
- ข. ปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด
- ค. ความถี่ของกระแสไฟฟ้า
- ง. ถูกทุกข้อ

7. ข้อใดกล่าวผิด

- ก. การทดสอบด้วยวงจรลัด เป็นการทดสอบหาความสูญเสียในแกนเหล็ก
- ข. การทดสอบด้วยวงจรลัด เป็นการทดสอบหาความสูญเสียเนื่องจากขดลวดทองแดง
- ค. การทดสอบด้วยวงจรลัด เป็นการทดสอบหาค่าความต้านทานสมมูล
- ง. การทดสอบด้วยวงจรลัด เป็นการทดสอบหาค่ารีแอกแตนซ์สมมูล

8. ข้อใดกล่าวถูกต้อง

- ก. การทดสอบด้วยวงจรเปิด เป็นการทดสอบหาความสูญเสียในแกนเหล็ก
- ข. การทดสอบด้วยวงจรเปิด เป็นการทดสอบหาความสูญเสียเนื่องจากขดลวดทองแดง
- ค. การทดสอบด้วยวงจรเปิด เป็นการทดสอบหาค่าความต้านทานสมมูล
- ง. การทดสอบด้วยวงจรเปิด เป็นการทดสอบหาค่ารีแอกแตนซ์สมมูล

9. ข้อใดเป็นสมการหาประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

- ก. $\frac{\text{power output}}{\text{power input}} \times 100$
- ข. $\frac{\text{out put}}{\text{out put} + \text{total loss}} \times 100\%$
- ค. ข้อ ก. และข้อ ข. ถูกต้อง
- ง. ไม่มีข้อใดถูกต้อง

10. การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส มีทั้งหมดกี่แบบ

- ก. 4 แบบ
- ข. 5 แบบ
- ค. 6 แบบ
- ง. 7 แบบ

11. ข้อดีในการปรับกระแสไฟฟ้าให้สมดุล

- ก. เพิ่มความสามารถในการจ่ายโหลดของหม้อแปลง
- ข. ลดการสูญเสียในวงจรในแต่ละเฟส
- ค. ลดการเกิดแรงดันตกปลายสาย
- ง. ถูกทุกข้อ

12. Power factor (PF.) หมายถึง

- | | |
|-------------------------------|--------------------------------|
| ก. ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า | ข. ค่าพิกัดสูงสุดของกำลังไฟฟ้า |
| ค. ค่าคงที่ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า | ง. ไม่มีข้อใดถูก |

13. ค่า Power factor ที่ดีที่สุดจะมีค่าเท่าไร

- | | |
|---------|--------|
| ก. 0.95 | ข. 1 |
| ค. 95 | ง. 100 |

14. ประโยชน์ของการปรับปรุงค่า Power factor

- ก. ลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในระบบสายส่งและอุปกรณ์
- ข. ลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า
- ค. ลดแรงดันไฟฟ้าตกในวงจร
- ง. ถูกทุกข้อ

15. ข้อใดไม่ใช่อุปกรณ์หลักในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าหลัก

- | | |
|------------------------|--------------------|
| ก. Busbar | ข. Circuit Breaker |
| ค. Current Transformer | ง. Meter |

16. ข้อดีของการลดหม้อแปลงด้านแรงดันสูง เมื่อใช้งาน

- | | |
|-------------------------------------|--|
| ก. ยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า | ข. ลดการสูญเสียพลังงานภายในหม้อแปลงไฟฟ้า |
| ค. ลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา | ง. ถูกทุกข้อ |

จากตารางจงเลือกคำตอบที่ถูกต้อง (ข้อ 17 – 18)

ขนาดหม้อแปลง	กระแสเต็มที่	ขนาดอุปกรณ์ ติดตั้งบนหม้อ	สายทองแดงทั้งหมดจำนวน				สายอลูมิเนียมทั้งหมดจำนวน			
			1	2	3	4	1	2	3	4
KVA	A									
1P-10	43.5	50	16	-	-	-	35	-	-	-
1P-20	87	75	25	-	-	-	50	-	-	-
1P-30	103.4	100	50	-	-	-	95	-	-	-
1P-50	217.4	200	95	-	-	-	120	-	-	-
30	43.3	50	16	-	-	-	35	-	-	-
50	72.2	100	35	-	-	-	50	-	-	-
100	144.3	200	70	2x35	-	-	95	2x50	-	-
160	230.9	250	120	2x50	-	-	185(150)	2x70	-	-
200	288.7	300	150	2x70	-	-	185	2x95	-	-
250	360.8	400	185	2x95	3x50	-	240	2x120	3x70	4x50
315	454.6	500	240	2x120	3x70	-	400	2x150	3x95	4x70
400	577.3	630	400	2x150	3x95	-	500	2x185	3x120	4x95
500	721.7	800	500	2x185	3x120	-	-	2x240	3x185(150)	4x120
630	909.3	1000	-	2x240	3x150	4x120	-	2x400	3x185(150)	4x150
800	1154.7	1250	-	2x400	3x240	4x185	-	2x500	3x400	4x240
1000	1443.4	1600	-	2x500	3x300	4x240	-	-	3x500	4x300

17. อาคารสำนักงานแห่งหนึ่ง ใช้ระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 4 สาย ค่ากระแสไฟฟ้ารวมเท่ากับ 70 A จะสามารถเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเท่าไรจึงจะเหมาะสม (PF. = 0.95)

- ဂ. 50 kVA
ဈ. 100 kVA
င. 160 kVA
ည. 200 kVA

18. จากข้อ 17 ถ้าใช้สายทองแดงหุ้มฉนวนจะใช้สายขนาดเท่าไร

- г. 35 мм²
д. 70 мм²

19. หม้อแปลงไฟฟ้าตัวหนึ่งมีอัตราส่วนจำนวนรอบ 1 : 2 ถ้าขดลวดปฐมภูมิต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า 220 V จงคำนวณหา แรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดทุติยภูมิ

- ग. 200 V
 घ. 240 V
 ङ. 400 V
 ञ. 440 V

20. หม้อแปลงไฟฟ้าตัวหนึ่งมีอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าเป็น 5 : 1 ถ้าขดทุติยภูมิมีจำนวนรอบ 100 รอบ จงคำนวณหา จำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ

- ก. 400 รอบ
ข. 500 รอบ
ค. 600 รอบ
ง. 700 รอบ



กรมพัฒนาพลังงานทดแทน
และอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน



โครงการพัฒนาหลักสูตรการอนุรักษ์พลังงานและพลังงานทดแทน
สำหรับสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา

รายวิชาที่ 5

เครื่องกลไฟฟ้า 2

รหัส 3104-2102 หน่วยที่ 4 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) พุทธศักราช 2557
ประเภทวิชาอุตสาหกรรม
สาขาวิชาไฟฟ้า

.....

จุดประสงค์สาขาวิชา

1. เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ความรู้และทักษะด้านการสื่อสาร ทักษะการคิดและการแก้ปัญหา และทักษะทางสังคมและการดำรงชีวิตในการพัฒนาตนเองและวิชาชีพ
2. เพื่อให้มีความเข้าใจหลักการบริหารและจัดการวิชาชีพ การใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและหลักการของงานอาชีพที่สัมพันธ์เกี่ยวข้องกับการพัฒนาวิชาชีพไฟฟ้า ให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงและความก้าวหน้าของเศรษฐกิจ สังคมและเทคโนโลยี
3. เพื่อให้มีความเข้าใจในหลักการและกระบวนการทำงานในกลุ่มงานพื้นฐานประยุกต์ใช้ความรู้ทักษะประสบการณ์และเทคโนโลยีพัฒนางานอาชีพ วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ ด้วยทฤษฎีและปฏิบัติ การออกแบบ เขียนแบบและประมาณราคา
4. เพื่อให้สามารถออกแบบ วิเคราะห์ แก้ปัญหาในงานติดตั้ง ควบคุมระบบไฟฟ้า เครื่องทำความเย็น และปรับอากาศ
5. เพื่อให้สามารถปฏิบัติงานติดตั้ง ซ่อมบำรุง ทดสอบ ควบคุมระบบไฟฟ้า เครื่องทำความเย็นและปรับอากาศ
6. เพื่อให้สามารถปฏิบัติงานด้านเทคนิคในสถานประกอบการและประกอบอาชีพอิสระ รวมทั้งการใช้ความรู้และทักษะเป็นพื้นฐานในการศึกษาต่อในระดับสูงขึ้นได้
7. เพื่อให้มีเจตคติที่ดีต่องานอาชีพ มีความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ ซื่อสัตย์สุจริต มีระเบียบวินัย เป็นผู้มีความรับผิดชอบต่อสังคม สิ่งแวดล้อม ต่อต้านความรุนแรงและสารเสพติด

แผนการจัดการเรียนรู้

รหัสวิชา 3104-2102

ระดับชั้น ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง

ทฤษฎีรวม 2 คาบ

ชื่อรายวิชา เครื่องกลไฟฟ้า 2

สาขาวิชา ไฟฟ้า

ปฏิบัติรวม 3 คาบ

3 หน่วยกิต

จุดประสงค์รายวิชา

1. รู้และเข้าใจลักษณะสมบัติของเครื่องกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัส และอซิงโครนัส แบบต่างๆ
2. ประลองและทดสอบลักษณะสมบัติของเครื่องกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัส และอซิงโครนัส
3. ทดสอบ หาลักษณะสมบัติของมอเตอร์

สมรรถนะรายวิชา

1. แสดงความรู้เกี่ยวกับลักษณะสมบัติของมอเตอร์
2. คำนวณหาค่าพารามิเตอร์
3. ทดสอบหาลักษณะสมบัติของมอเตอร์

คำอธิบายรายวิชา

ศึกษาและปฏิบัติลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับในสภาวะไม่มีโหลดและมีโหลด โวลต์เตจเรกูเรชันและการหาค่าซิงโครนัสอิมพีแดนซ์ การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับมอเตอร์ ซิงโครนัสวงจรสมมูลและเฟสเซอร์ไดอะแกรม การปรับแต่งค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ หลักการทำงานและ ลักษณะสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและหนึ่งเฟสแบบต่างๆ วิธีการเริ่มเดินมอเตอร์

หน่วยการสอนทฤษฎี

รหัส 3104-2102 วิชา เครื่องกลไฟฟ้า 2 จำนวน 2 ชั่วโมง / สัปดาห์

หน่วยที่	ชื่อหน่วยการสอน	จำนวนชั่วโมง
1	เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ	8
2	การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ	4
3	ซิงโครนัสมอเตอร์	4
4	มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	8
5	เซอร์เคิลไดอะแกรมและการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำ	4
6	มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว	4
	รวม	32

หน่วยการสอนปฏิบัติ

รหัส 3104-2102 วิชา เครื่องกลไฟฟ้า 2 จำนวน 3 ชั่วโมง / สัปดาห์

หน่วยที่	ชื่อหน่วยการสอน	จำนวนชั่วโมง
1	ทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ	6
2	การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ	6
3	ทดลองซิงโครนัสมอเตอร์	6
4	ทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	12
5	ทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส	18
-	วัดผล	6
	รวม	54

เกณฑ์การประเมินผล
วิชา เครื่องกลไฟฟ้า 2 รหัส 3104-2102

รายการ	คะแนน
1. คุณลักษณะที่ต้องการบูรณาการคุณธรรม จริยธรรมและคุณลักษณะอันพึงประสงค์	20
2. ทดสอบ	
2.1 แบบทดสอบหลังเรียน	5
2.2 สอบปลายภาค	30
3. ภาระงาน	
3.1 แบบฝึกหัด	5
3.2 การปฏิบัติการทดลอง	30
3.3 รายงานผลการทดลอง	10
รวม	100

  กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน 	ใบสาระการเรียนรู้	หน่วยที่ 4
	ชื่อวิชา เครื่องกลไฟฟ้า 2	เวลาเรียน 16 ชั่วโมง
	ชื่อหน่วย มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	
ชื่อเรื่องหรือชื่องาน มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส		

สาระสำคัญ

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้กันทั่วไป มีข้อดี คือไม่มีแปรงถ่านทำให้การสูญเสียเนื่องจากความฝืดมีค่าน้อยลง มีตัวประกอบกำลังสูง การบำรุงรักษาน้อย เริ่มหมุนได้ง่ายโดยเฉพาะชนิดกรงกระรอก สร้างง่าย ทนทาน ราคาถูก ไม่เสียหายง่ายและมีประสิทธิภาพสูง มีข้อเสียอยู่บ้างคือการปรับความเร็วของมอเตอร์ทำได้ยากเนื่องจากความเร็วรอบจะแปรผันตรงกับภาระแรงบิดเริ่มหมุนค่อนข้างต่ำกว่าแรงบิดเริ่มหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบซันด์ ปัจจุบันนี้มีการพัฒนามอเตอร์ชนิดนี้ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นจนเป็นที่ยอมรับกันในวงการอุตสาหกรรมทั่วไป

เรื่องที่จะศึกษา

1. โครงสร้างและสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์สามเฟส
2. สลิป ความถี่ และกระแสที่โรเตอร์
3. วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
4. แรงบิด
5. สมการของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จุดประสงค์การเรียนรู้

1. บอกส่วนประกอบของอินดักชันมอเตอร์ได้
2. อธิบายการทำงานอินดักชันมอเตอร์ได้
3. อธิบาย Slip อินดักชันมอเตอร์ได้
4. อธิบายวงจรเทียบเคียงอินดักชันมอเตอร์ได้
5. อธิบายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้าน Rotor ได้
6. อธิบาย Torque developed or gross torque ได้

หน่วยที่ 4

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

Induction motor คือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสลับที่ทำงานโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ (induction) และเป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากมีคุณสมบัติดังนี้

- บำรุงรักษาง่าย การใช้งานสะดวกไม่ยุ่งยากเหมือน Synchronous motor
- ความเร็วค่อนข้างคงที่และใกล้เคียงกับ Synchronous speed
- แรงบิดขณะขับโหลดค่อนข้างคงที่

4.1 โครงสร้างและสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์สามเฟส

4.1.1 ส่วนประกอบหลักๆของ Induction motor

1. **Stator** มีลักษณะคล้าย Stator ของ Synchronous machine และพันขดลวด Armature 3 ชุด (สำหรับ 3 เฟส) โดยแต่ละชุดวางห่างกัน 120 องศา ทางไฟฟ้า

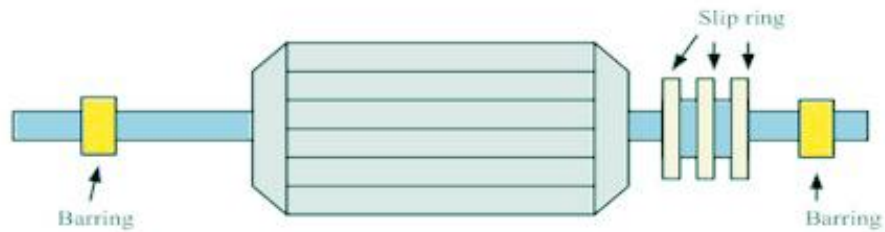


รูปที่ 4-1 แสดง stator

ขดลวด Armature ที่พันไว้ที่ Stator นี้ทำหน้าที่คล้ายกับขดลวด Primary ของ Transformer และแกนเหล็กส่วนที่เป็น Stator core ทำหน้าที่เป็นแกนเหล็กของ Transformer เช่นกัน

2. Rotor แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

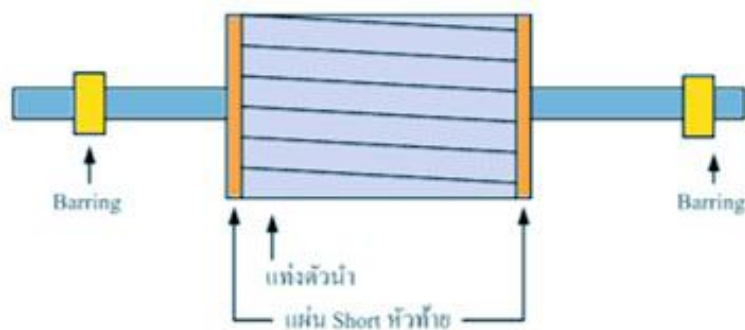
1. Wound Rotor มีลักษณะดังรูป



รูปที่ 4-2 แสดง Wound Rotor

โรเตอร์แบบนี้มีขดลวดพันแบ่งออกเป็น 3 เฟส เช่นเดียวกับ armature แต่จะต่อกันภายใน เป็นแบบ Star (Y) และต่อปลายสายที่เหลือ ออกสู่วงจรภายนอก ผ่าน Slip ring และแปรงถ่านเมื่อต่อความต้านทานภายนอกเพิ่มเข้าในวงจร Rotor ซึ่งมีผลทำให้กระแสตอน Start ของมอเตอร์ลดลงได้และนอกจากความต้านทานที่ต่อเพิ่มเข้าไปยังช่วยควบคุม speed ได้อีกด้วย

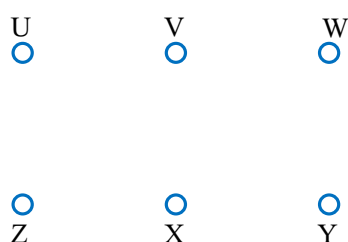
2. Squirrel cage rotor ใช้แท่งตัวนำพันตามความยาวของ Rotor หัวท้ายเข้าด้วยกันเพื่อให้ครบวงจรในตัวเองมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 4-3 แสดง Squirrel cage rotor

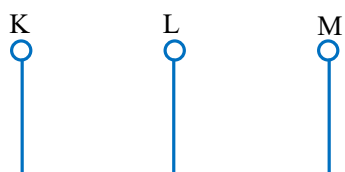
4.1.2 การใช้งานอินดักชันมอเตอร์

อินดักชันมอเตอร์นำไปใช้งานที่ไม่ต้องควบคุมความเร็วคงที่มากนักความเร็วเปลี่ยนแปลงตามสภาพของโหลด เช่น มอเตอร์จะปั้มน้ำ มอเตอร์ขับ Compressor ของ air condition etc. สำหรับการต่อวงจรของขดลวดถ้าเป็นแบบ Squirrel cage จะมีปลายสาย 6 เส้นถ้าเป็นแบบ Wound มีปลายสาย 9 เส้น และโดยปกติมีการวางตำแหน่งของขั้วต่อสายไฟดังรูป

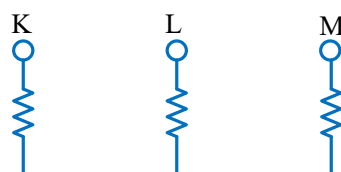


ตำแหน่งขั้วต่อสายสำหรับขดลวด Armature
ถ้าต่อแบบ Y ต่อ XYZ เข้าหากัน ป้อนไฟเข้า
U,V,W, ต่อ เดลต้า U-Z, V-X, W-Y แทน

สำหรับ Rotor แบบ Wound จะมีปลายสายของขด Wound อีกสามเส้น ปกติใช้สัญลักษณ์ เป็น K,L,M และมีการต่อวงจรใช้งานดังรูป



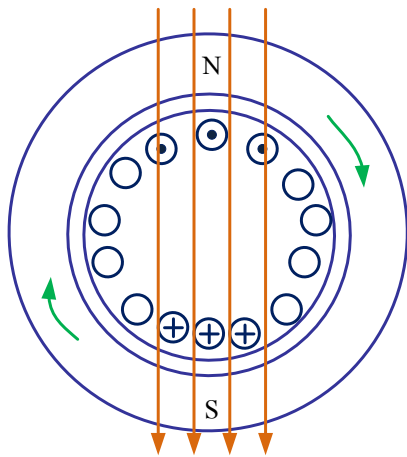
กรณีไม่ต่อ R เพิ่มในวงจร Rotor



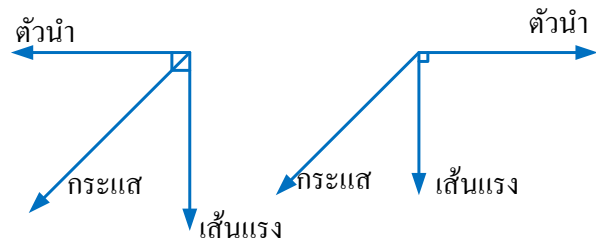
กรณีต่อ R เพิ่มในวงจร Rotor

4.1.3 การทำงาน

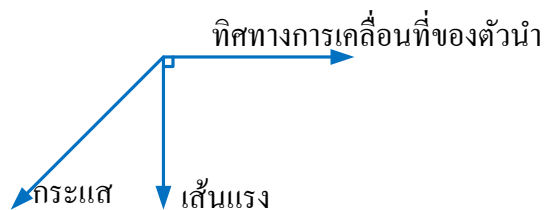
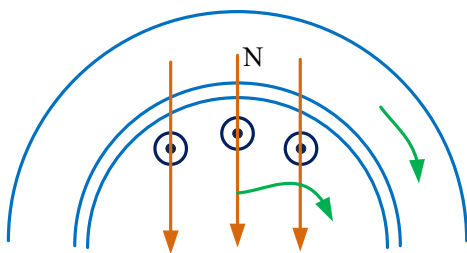
Induction motor หมุนได้โดยอาศัยการเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแสไฟฟ้า 3 เฟส ให้แก่ขดลวดอาเมเจอร์ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นและเส้นแรงของสนามแม่เหล็กหมุนนี้จะไปตัดกับตัวนำซึ่งฝังอยู่ที่ Rotor ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อครบวงจรในตัวเองและมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรทันทีและทิศทางของกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎมือขวา



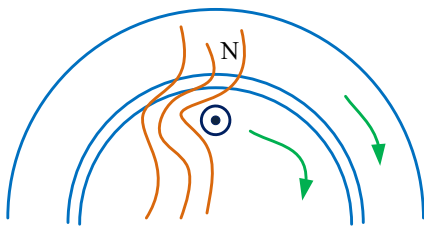
ทิศทางของกระแสไฟฟ้าในส่วนของ Rotor
ไหลออกไปตามกฎมือขวา



เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำทำให้เกิดแรงมากระทำทำให้เกิดแรงมากระทำทำให้ rotor เคลื่อนที่โดย
ทิศทางของการเคลื่อนหาได้จากกฎมือซ้าย



หรืออาจใส่ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำเพื่อดูทิศทางก็ได้ดังรูป



จากรูปเส้นแรงด้านขวามือจะถูกหักให้หมดไปและเส้นแรง
จะหนาแน่นทางด้านซ้ายมือผลทำให้ Rotor เคลื่อนที่
ไปดังรูป

และ rotor จะถูกเร่งความเร็วให้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากมีแรงบิด มากระทำอย่างต่อเนื่องจนในที่สุด
ความเร็วจะใกล้เคียงกับ Synchronous Speed แต่จะมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อยเพราะถ้าความเร่งเท่ากับ
Synchronous Speed แล้ว จะไม่มีเส้นแรงมาตัดตัวนำผลทำให้กระแสที่ไหลในวงจร rotor หมดไป ความเร็ว
ของ Rotor จึงลดลงมา โดยขณะ No-Load ความเร็วจะใกล้เคียงกับ Synchronous Speed มาก

4.2 สลิป ความถี่ และกระแสที่โรเตอร์

Slip เนื่องจากมีความแตกต่างระหว่าง Synchronous Speed กับความเร็วของ motor “Slip” เป็นตัวแปรที่จะบอกถึงความแตกต่างและเป็นหัวใจสำคัญสำหรับการคำนวณหาค่าต่างๆด้วยนิยมนำใช้ 3 รูปแบบคือ

$$\text{Slip Speed} = N_s - N_r \quad \dots\dots\dots 1$$

$$N_s = \text{Synchronous Speed}$$

$$N_r = \text{ความเร็ว motor}$$

Slip Speed มีหน่วยเป็น R.P.M คือความแตกต่างระหว่าง Synchronous Speed กับมอเตอร์ Speed

$$\text{Slip \%S} = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad \dots\dots\dots 2$$

Slip ใช้ตัวย่อ S เป็นอัตราส่วนระหว่าง Slip Speed และ Synchronous Speed

$$\% \text{Slip \%S} = S \times 100 \quad \dots\dots\dots 3$$

คือค่า Slip คิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์โดย $100 \% = \text{Synchronous Speed}$

จากสมการ $S = \frac{N_s - N_r}{N_s}$ ถ้าย้ายข้างสมการจะได้

$$N_s \times S = N_s - N_r$$

$$N_r = (1 - S) \times N_s \quad \dots\dots\dots 4$$

จากสมการถ้าทราบค่าของ Slip และความเร็ว Synchronous สามารถหาความเร็วของมอเตอร์ได้
หมายเหตุ Slip มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 โดย Slip = 0 คือ

ค่า Slip ขณะ Speed ของมอเตอร์ = Synchronous Speed ซึ่งไม่สามารถเป็นจริงได้ในทางปฏิบัติ
และ Slip = 1 คือค่า Slip ขณะที่ Rotor มีความเร็ว = คือตอนที่มอเตอร์เริ่มหมุนนั่นเอง

ตัวอย่าง จงคำนวณหา Synchronous Speed, Slip Speed Slip, %Slip ดังต่อไปนี้

ก. 4 Pole 50 Hz Speed = 1350 RPM

ข. Speed = 800 RPM no-load วัด Speed ได้เท่ากับ 950 RPM motor ใช้กับความถี่ 50 Hz

วิธีทำ

$$\begin{aligned} \text{ก.) } N_s &= \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{ RPM} \\ \text{Slip Speed} &= N_s - N_r = 1500 - 1350 = 150 \text{ RPM} \\ \text{Slip} &= \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{1500 - 1350}{1500} = 0.1 \\ \% \text{Slip} &= S \times 100 = 0.1 \times 100 = 10\% \\ N_s &= \frac{120f}{P} ; \quad f = 50 \text{ Hz } P = ? \end{aligned}$$

เนื่องจากโจทย์ไม่ได้กำหนด จำนวน Pole (P) มาให้แต่ความเร็ว Synchronous (N_s) มีค่าเป็นขั้นๆ ดังนี้

$$2 \text{ Pole } 50 \text{ Hz} ; \quad N_s = 3000 \text{ RPM}$$

$$4 \text{ Pole } 50 \text{ Hz} ; \quad N_s = 1500 \text{ RPM}$$

$$6 \text{ Pole } 50 \text{ Hz} ; \quad N_s = 1000 \text{ RPM}$$

$$8 \text{ Pole } 50 \text{ Hz} ; \quad N_s = 500 \text{ RPM}$$

จะเห็นว่า Speed ของ Motor = 800 RPM และ No-load Speed เท่ากับ 950 RPM ดังนั้น Motor มี 6 Pole คือใช้ Synchronous Speed = 1000 RPM (เพราะเป็นไปไม่ได้ที่ Speed ของมอเตอร์จะมากกว่า หรือเท่ากับ Synchronous Speed และขณะ No-load Speed ของมอเตอร์ จะน้อยกว่า N_s เล็กน้อย

$$\begin{aligned} N_s &= 1000 \text{ RPM} \\ \text{Slip Speed} &= N_s - N_r = 1000 - 800 \\ \text{Slip} &= \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{1000 - 800}{1000} = 0.2 \\ \% \text{Slip} &= S \times 100 = 0.2 \times 100 \\ &= 20\% \end{aligned}$$

ตัวอย่าง จงคำนวณหาความเร็วของมอเตอร์ต่อไปนี้

ก.) 4 Pole 50 Hz Slip = 0.01

ข.) 6 Pole 50 Hz = 12%

วิธีทำ

$$\begin{aligned}\text{ก.) } N_r &= (1 - S) N_s \\ &= (1 - 0.01) N_s \\ &= (1 - 0.01) \times \frac{120 \times 50}{4} \\ &= 0.99 \times 1500 \\ &= 1485 \text{ RPM}\end{aligned}$$

ข.) $N_r = (1 - S) N_s$ แต่ S บอกมาในรูปแบบของ %

ต้องทำ %S ให้เป็นค่า Slip ก่อนนั่นคือ

$$\%S = S \times 100$$

$$S = \frac{\%S}{100} = \frac{12}{100} = 0.12$$

$$\begin{aligned}N_r &= (1 - 0.12) \frac{120 \times 50}{6} \\ &= 880 \text{ RPM}\end{aligned}$$

Slip ที่ใช้ในสมการ $N_r = (1 - S) N_s$ ต้องเป็นค่า Slip เท่านั้นถ้าบอกเป็น % ต้องเปลี่ยนให้เป็นค่า Slip ก่อนเสมอ

4.2.1 มาตรการปรับความเร็วรอบมอเตอร์

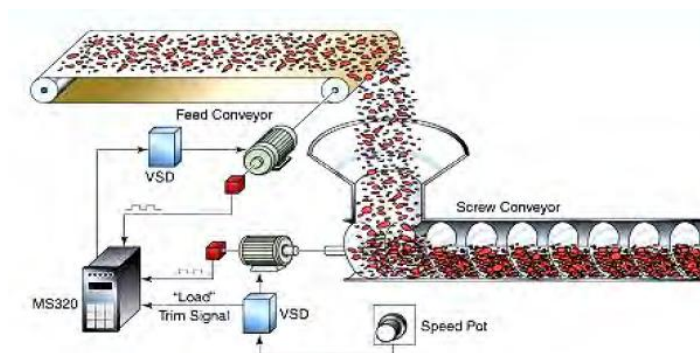


รูปที่ 4-4 อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

หลักการเครื่องควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

ใช้หลักการเปลี่ยนความถี่ของกระแสไฟฟ้า เพื่อควบคุมความเร็วรอบการทำงานของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน

อุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้เหมาะสมกับสถานะของภาระ เป็นอุปกรณ์เพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ทำให้สามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงานได้สูง



รูปที่ 4-5 ตัวอย่างการใช้งานอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

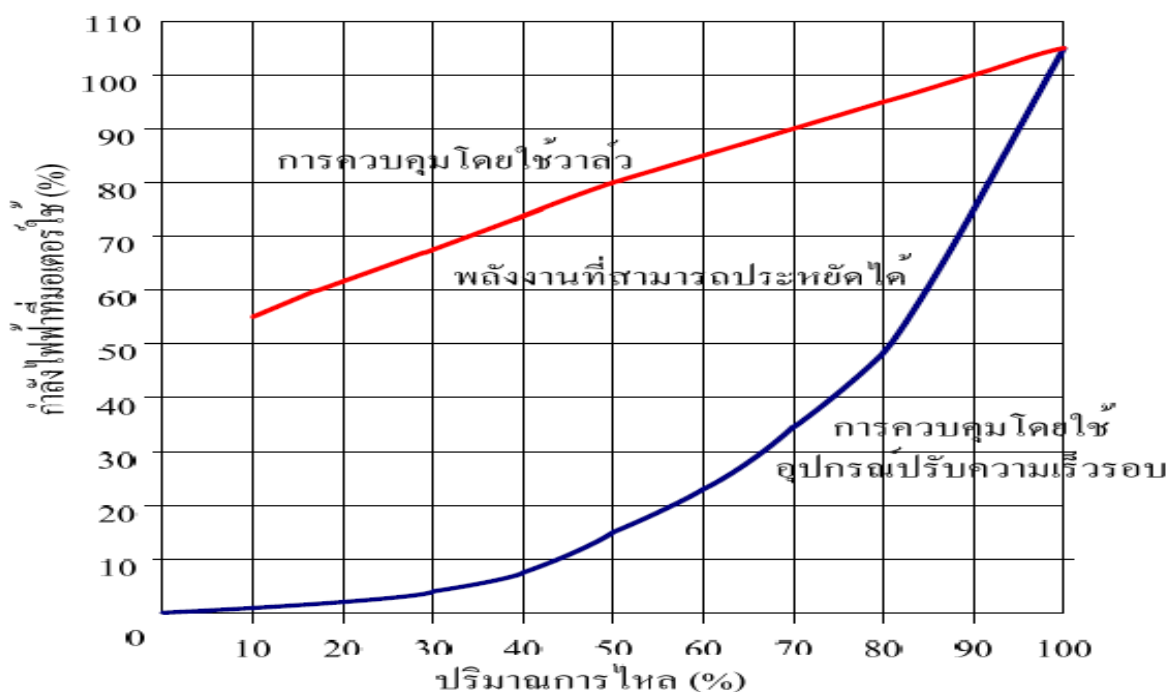
นอกจากนี้ยังสามารถใช้เครื่องควบคุมความเร็วรอบเพื่อปรับเปลี่ยนความถี่และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Voltage/frequency control: V/f) สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อควบคุมความเร็วรอบให้สัมพันธ์กับความต้องการภาระของระบบ (Load demand) ได้อีกด้วย

ข้อดีของการใช้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

- สามารถปรับความเร็วรอบมอเตอร์ได้ ทำให้เลือกใช้ความเร็วรอบที่เหมาะสมตามความต้องการของงานแต่ละประเภท
- มีการควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิด (Closed loop control) ทำให้ระบบมีการทำงานที่แม่นยำและมีเสถียรภาพอยู่ตลอดเวลา
- เป็นการเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานให้ถูกต้องตามความต้องการ เนื่องจากระบบมีความแม่นยำมากขึ้นทำให้ช่วยลดต้นทุนการผลิต
- ช่วยลดการสึกหรอของเครื่องจักร และป้องกันการสูญเสียจากการทำงานของมอเตอร์ พัดลมและปั๊มน้ำ
- ลดการกระชากไฟตอนเริ่มต้น ทำให้ลดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า (Demand) ลงได้
- ประหยัดพลังงาน โดยใช้พลังงานตามความจำเป็นของภาระ

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ตามความต้องการของภาระ

เมื่อก่อนนั้นการควบคุมปริมาณการไหลของปั๊มน้ำ พัดลมและโกล์วเวอร์ มักทำโดยให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วตามปกติแล้วควบคุมปริมาณการไหลโดยใช้วาล์ว (Valve) หรือแดมเปอร์ (Damper) วิธีนี้ใช้อุปกรณ์ราคาถูกแต่ประสิทธิภาพต่ำจึงต้องเสียค่าใช้จ่ายแพงมาก ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้เปลี่ยนมาใช้วิธีการเปลี่ยนความเร็วรอบมอเตอร์ (Variable speed drive) ในการควบคุมปริมาณการไหลเพื่อประหยัดพลังงาน ดังแสดงในรูป 4-3



รูปที่ 4-6 แสดงวิธีการควบคุมและกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้

ตารางที่ 4-1 กฎของปั้มน้ำ

Function	เปลี่ยนความเร็วรอบ	เปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลาง
อัตราการไหล	$Q_2 = Q_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)$	$Q_2 = Q_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)$
หัวน้ำ	$h_2 = h_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$	$h_2 = h_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2$
กำลังที่เพลา	$L_2 = L_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3$	$L_2 = L_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^3$

ตารางที่ 4-2 กฎของพัดลม

Function	เปลี่ยนความเร็วรอบ	เปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลาง
ความจุอากาศ	$Q_2 = Q_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)$	$Q_2 = Q_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)$
ความดันอากาศ	$P_2 = P_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$	$P_2 = P_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2$
กำลังที่เพลา	$L_2 = L_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3 \left(\frac{\eta_1}{\eta_2} \right)$	$L_2 = L_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^3$

กำลังไฟฟ้าขาเข้าของปั้มน้ำและพัดลม : $L_M = \frac{L_2}{\eta_M}$

สัญลักษณ์ตัวห้อย 1 และ 2 แทนก่อนและหลังการควบคุมความเร็วรอบและเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของใบพัดตามลำดับ

ตัวอย่างการคำนวณ

โบลเวอร์ถูกควบคุมความเร็วรอบโดยใช้อินเวอร์เตอร์ให้ลดลงเป็น 60% ของความเร็วเต็มพิกัด ถ้าปริมาณอากาศขณะเดินเต็มที่เป็น $3,000 \text{ m}^3/\text{min}$ ความดัน 100 Pa กำลังที่เพลา 50 kW (ประสิทธิภาพของโบลเวอร์เปลี่ยนจาก 80% เป็น 72%) จงคำนวณหาความจุอากาศ ความดัน และกำลังที่เพลา เมื่อลดความเร็วรอบลง และถ้าโรงงานทำงาน 16 ชั่วโมง/วัน 300 วัน/ปี จงคำนวณผลการประหยัด โดยคิดที่อัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 2.5 บาท/kWh

วิธีทำ จากสมการ

$$Q_2 = Q_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

$$L_2 = L_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3 \left(\frac{\eta_1}{\eta_2} \right)$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} Q_2 &= 3,000 \times 0.6 \\ &= 1,800 \text{ m}^3/\text{min} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_2 &= 100 \times (0.6)^2 \\ &= 36 \text{ Pa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_2 &= 50 \times (0.6)^3 \times (80/72) \\ &= 12 \text{ kW} \end{aligned}$$

ผลของการประหยัดพลังงาน $(50 - 12) \text{ kW} = 38 \text{ kW}$

ดังนั้น โรงงานประหยัดเงินได้ $= 38 \text{ kW} \times 16 \text{ ชั่วโมง/วัน} \times 300 \text{ วัน/ปี} \times 2.5 \text{ บาท/kWh}$
 $= 456,000 \text{ บาท/ปี}$

กรณีตัวอย่าง ที่ดำเนินการมาตรการแล้วประสบผลสำเร็จ

ในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานแห่งหนึ่ง มีการใช้งานเครื่องเติมอากาศ เพื่อเติมออกซิเจนให้ได้ตามค่ามาตรฐาน จากการเก็บข้อมูลค่า Dissolved Oxygen (DO) พบว่าในบางวันค่า DO ในน้ำก็ไม่เพียงพอ แต่บางวันค่า DO ก็เพียงพอต่อความต้องการ (มากกว่า 3 ppm) จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเติมอากาศเพิ่มเข้าไปอีก

การวิเคราะห์ผล : เนื่องจากค่า DO ที่ไม่คงที่ และการต้องเปิดเครื่องเติมอากาศตลอดเวลา ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น

วิธีการ : ทำการติดตั้งระบบปรับความเร็วรอบโดยใช้ DO Sensor ในการควบคุม และควบคุมความเร็วรอบให้เหมาะสมกับค่า DO และปริมาณน้ำเสีย โดยพิจารณาจากวันที่น้ำเสียมีค่า DO มากกว่า 3 ppm ให้ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 80%



รูปแสดงก่อนการปรับปรุง



รูปแสดงหลังการปรับปรุง

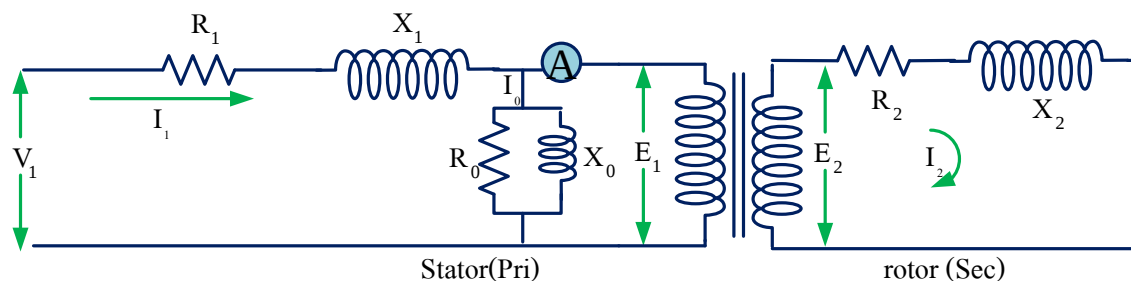
ผลการประหยัด : ประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 27,944.04 kWh/ปี คิดเป็นเงิน 118,203.30 บาท/ปี เงินลงทุน 65,000 บาท

ข้อเสนอแนะ : การปรับความเร็วรอบของมอเตอร์จะทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์เพิ่มขึ้นประมาณ 10% หรือโดยเฉลี่ยความเร็วรอบลดลง $\frac{3}{4}$ เท่าของความเร็วเดิม

4.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

Equivalent Circuit of Induction motor

Equivalent CKT ของ IM คือวงจรไฟฟ้าที่ใช้แทนส่วนประกอบต่างๆของ IM เพื่อความสะดวกในการคำนวณและวิเคราะห์คุณสมบัติแบ่งออกเป็น Equivalent ckt ที่อยู่กับที่ และ Equivalent ckt ขณะเคลื่อนที่ หมุน Stand still rotor (rotor อยู่กับที่)



จากรูปเป็น Equivalent ckt ของ induction motor ขณะที่ Rotor อยู่กับที่ มีลักษณะคล้าย Equivalent ckt ของ Transformer แต่ขดลวดด้าน Secondary ถูก Short Circuit เข้าด้วยกันอยู่แล้ว ดังนั้นเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าทางด้าน Primary จะมีกระแสไฟฟ้า I_2 ไหลในวงจรของ Rotor ทันที

จากรูป Equivalent ckt ต่อเฟส ของ Im มีตัว Parameter ต่างๆดังนี้

V_1	=	แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อเฟส ที่ป้อนให้ขดลวด armature
I_1	=	กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าขดลวด armature ต่อเฟส
R_1	=	ความต้านทานของขดลวด armature ต่อเฟส
X_1	=	Reactance ของขดลวด Armature ต่อเฟส
I_0	=	กระแสไฟฟ้าขณะ no-load ต่อเฟส
R_0	=	ความต้านทานเสมือนของแกนเหล็กส่วนที่ทำให้เกิด eddy current + hysteresis loss = Core loss ต่อเฟส
X_0	=	reactance ของแกนเหล็ก (ส่วนที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำไปทางด้าน Secondary)
E_1	=	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟสด้าน Pri (stator)
E_2	=	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟสด้าน Sec (rotor) ขณะที่ Rotor อยู่กับที่
R_2	=	ความต้านทานของขดลวดที่อยู่ในวงจร Rotor ต่อเฟส
X_2	=	reactance ในวงจร rotor ต่อเฟสขณะที่ Rotor อยู่กับที่

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้าน Rotor (E_r)

$$E_r = 4.44f_r\phi_m N \dots\dots\dots 5$$

F_r = ความถี่ของ Flux ที่คล้องตัดขดลวด rotor

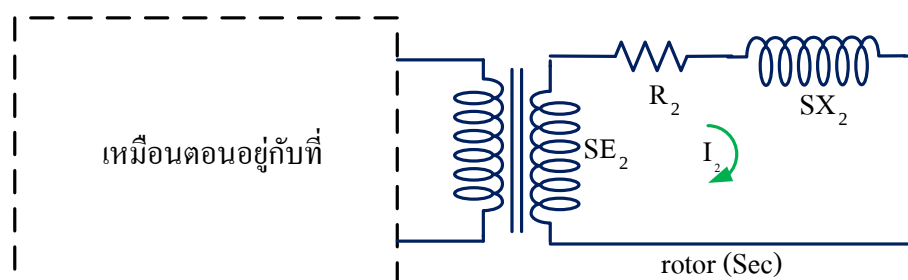
ϕ_m = ความเข้มของ Flux ทั้งหมดที่คล้องตัดขดลวด rotor

N = จำนวนรอบของตัวนำ rotor

ขณะที่โรเตอร์อยู่กับที่ $E_r = E_2$ และ $X_r = X_2$

เมื่อ X_r = Reactance ในวงจร rotor

ขณะที่โรเตอร์หมุน Equivalent ckt ด้านวงจร rotor จะเปลี่ยนไปดังรูป



แรงเคลื่อนไฟฟ้า rotor E_r จะมีค่าเปลี่ยนไปจากเดิมเป็น SE_2 และค่า Reactance เปลี่ยนไปจากเดิมเป็น SX_2 เนื่องจากขณะมี Rotor หมุนอัตราการหมุนของขอบเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องตัดตัวนำด้าน Rotor มีค่าลดลงดังนี้

$$\text{ขณะที่ Rotor อยู่กับที่ อัตราการตัด} \quad \phi_m = N_s \quad \text{RPM}$$

$$\text{ความถี่} \quad f_r = \frac{N_s - P}{120} \quad \text{Hz}$$

$$\text{ขณะที่ Rotor หมุนด้วยความเร็ว} \quad N_r$$

$$\text{อัตราการตัดของ} \quad \phi_m = N_s - N_r \quad \text{RPM}$$

$$\text{ความถี่} \quad f_r = \frac{(N_s - N_r)P}{120} \quad \text{Hz}$$

ขณะ rotor หมุนความถี่ที่เกิดขึ้นในวงจร rotor มีค่าเท่ากับ ความแตกต่างระหว่างความเร็ว Synchronous ลบด้วย ความเร็วมอเตอร์คูณด้วยจำนวนขั้วแม่เหล็กหารด้วย 120

$$f_r = \frac{(N_s - N_r)P}{120} \quad \text{Hz}$$

$$f_r = \frac{(N_s - N_r)PN_s}{120N_s} \quad \text{Hz}$$

$$\text{คูณด้วย} \quad \frac{N_s}{N_s} = \frac{(N_s - N_r)}{N_s} \times \frac{P \times N_s}{120} \quad \text{Hz}$$

$$= S \times f ; \quad \frac{(N_s - N_r)}{N_s} = S : \quad \frac{P \times N_s}{120} = f$$

$$\therefore f_r = S \times f$$

เมื่อความถี่ทางด้านโรเตอร์เปลี่ยนไปแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรโรเตอร์จะเปลี่ยนไปด้วย

$$E_r = 4.44f_r\phi_m N$$

$$= 4.44Sf\phi_m N$$

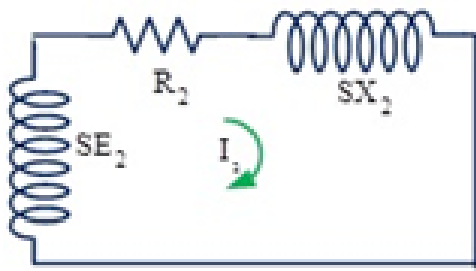
ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าขณะอยู่กับที่จะได้ว่า

$$E_r = S \times E_2$$

$$X_r = 2 \times \pi \times f \times L$$

$$= 2 \times \pi \times f \times L \quad (f_r = sf)$$

$$X_r = SX_2$$



คูณด้วย $\frac{S}{S}$ - ตลอด

จาก Equivalent ckt

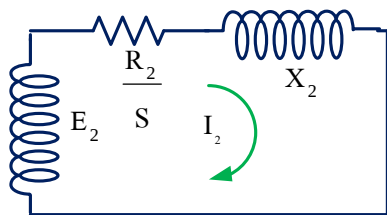
$$I_2 = \frac{SE_2}{\sqrt{R_2^2 + S^2 X_2^2}}$$

$$I_2 = \frac{\frac{SE_2}{S}}{\frac{1}{S} \sqrt{R_2^2 + S^2 X_2^2}}$$

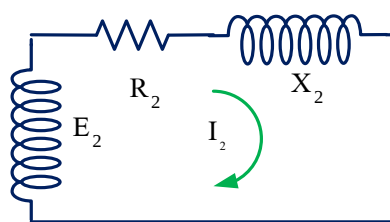
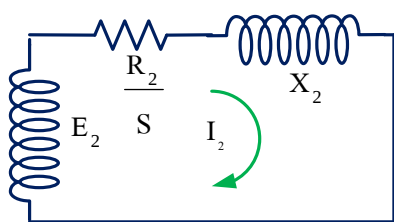
$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\frac{R_2^2}{S} + \frac{S^2}{S^2} X_2^2}}$$

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{S}\right)^2 + X_2^2}}$$

จากสมการ เขียน Equivalent ckt ของ Rotor ได้ใหม่ดังนี้



ค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนไปหลังจากโรเตอร์หมุนคือค่าความต้านทานในวงจร Rotor นั่นก็คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร Rotor (I_2) เปลี่ยนไป ดังนั้นจึงเปรียบเสมือนกับมีค่าความต้านทานต่อเพิ่มเข้ามาในวงจร Rotor อีกตัวหนึ่งโดยความต้านทานที่ต่อเพิ่มเข้ามานี้ เป็นค่าความต้านทานของโหลดทางกลที่ Equivalent มาเป็นค่าความต้านทานให้ความต้านทานนี้มีสัญลักษณ์ R_L



$$R_L = \frac{(1-S)}{S} R_2$$

ค่าความต้านทานในรูปที่ 1 และ 2 ต้องเท่ากันดังนั้น

$$\begin{aligned} R_2 + R_L &= \frac{R_2}{S} \\ R_L &= \frac{R_2}{S} - R_2 \\ &= \frac{R_2 - SR_2}{S} \\ R_L &= \frac{(1-S)}{S} \times R_2 \end{aligned}$$

เมื่อพิจารณาจาก Equivalent Ckt แล้ว Rotor จะเป็นว่ากำลังวางที่เกิดขึ้นอยู่ 3 อย่างคือ

Rotor input เป็นกำลังที่ rotor ได้รับจากการส่งถ่ายกำลังข้ามช่องว่างอากาศ (air gap) จากด้าน stator (primary) ซึ่งก็มีค่าเท่ากับกำลังงานทั้งหมดที่มีอยู่ในวงจร Rotor ประกอบด้วย rotor cu loss และ rotor out put รวมกัน สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Rotor input} = 3E_2 I_2 \cos \theta_2$$

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2 + R_L)^2 + X_2^2}}$$

$$\cos \theta_2 = \frac{R_2 + R_L}{\sqrt{(R_2 + R_L)^2 + X_2^2}}$$

$$\text{แต่ } R_2 + R_L = \frac{R_2}{S} \quad \text{ดังนั้น}$$

$$\text{Rotor input} = 3E_2 \times \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{S}\right)^2 + X_2^2}} \times \frac{\frac{R_2}{S}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{S}\right)^2 + X_2^2}}$$

$$= \frac{3E_2^2 \frac{R_2}{S}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{S}\right)^2 + X_2^2}}$$

$$= \frac{3E_2^2 R_2}{S \sqrt{\frac{R_2^2}{S^2} + X_2^2}}$$

$$\text{คูณตลอดด้วย } \frac{S}{S} = \frac{3E_2^2 R_2}{S^2 \sqrt{\frac{R_2^2}{S^2} + X_2^2}}$$

$$\text{Rotor Input}_{3\phi} = \frac{3E_2^2 S R_2}{R_2^2 + S^2 X_2^2}$$

Rotor cu loss คือกำลังที่สูญเสียในความต้านทานของขดลวดด้าน rotor ซึ่งเป็นกำลังส่วนที่ทำให้เกิดความร้อน สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Rotor Input}_{3\phi} = 3I_2^2 R_2$$

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2 + R_L)^2 + X_2^2}}$$

$$I_2^2 = \frac{E_2^2}{\sqrt{(R_2 + R_L)^2 + X_2^2}}$$

$$R_2 + R_L = \frac{R_2}{S} ; \quad = \frac{E_2^2}{\frac{R_2^2}{S^2} + X_2^2}$$

$$\text{Rotor culoss} = 3 \frac{E_2^2}{\frac{R_2^2}{S^2} + X_2^2}$$

$$\text{คูณด้วย } \frac{S}{S} = 3 \frac{E_2^2 S^2 R_2}{\frac{S^2 R_2^2}{S^2} + S^2 X_2^2}$$

$$\text{Rotor culoss} = \frac{3E_2^2 S^2 R_2}{R_2^2 + S^2 X_2^2}$$

$$\text{Rotor Out Put} = \text{Powerdeveloped} = 3I_2^2 R_2$$

$$= 3 \frac{E_2^2}{\frac{R_2^2}{S^2} + X_2^2}$$

$$= \frac{3E_2^2(1-S)}{S} \frac{R_2}{\frac{R_2^2}{S^2} + X_2^2} R_L$$

$$= \frac{3E_2^2(1-S)R_2}{S\left(\frac{R_2^2}{S^2} + X_2^2\right)} R_L$$

$$\text{คูณด้วย } \frac{S}{S} = \frac{3E_2^2(1-S)SR_2}{S^2\left(\frac{R_2^2}{S^2} + X_2^2\right)} R_L$$

$$\text{Rotor output} = \frac{3E_2^2(1-S)SR_2}{R_2^2 + S^2 X_2^2} \text{ watt}$$

จากสมการที่ทำหารสังเคราะห์ (Synthesis) มาก จะเห็นว่ามิตัวแปรซึ่งคล้ายคลึงกันอยู่เพื่อให้สะดวกในการจดจำจึงนำสมการทั้ง 3 มาหาความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\frac{\text{Rotor culoss}}{\text{Rotor input}} = \frac{3E_2^2 S^2 R_2}{R_2^2 + S^2 X_2^2} \times \frac{R_2^2 + S^2 X_2^2}{3E_2^2 S R_2}$$

$$= S$$

$$\text{Rotor culoss} = S \times \text{Rotor input}$$

$$\begin{aligned}\frac{\text{Rotor loss}}{\text{Rotor input}} &= \frac{3E_2^2(1-S)SR_2}{R_2^2 + S^2X_2^2} \times \frac{R_2^2 + S^2X_2^2}{3E_2^2SR_2} \\ &= (1 - S) \\ \text{Rotor output} &= (1-S) \text{ Rotor input}\end{aligned}$$

4.4 แรงบิด

Torque develops or gross torque

คือแรงบิดที่ Rotor สักขึ้นเพื่อเอาชนะแรงต้านทานการหมุนของโหลดและความฝืดรวมทั้งน้ำหนักของตัวมอเตอร์เองสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและ Power developed ดังนี้

$$\begin{aligned}T &= \frac{60P}{2\pi N} \\ T_d, T_m, T_g &= \frac{60P_{(\text{rotor output})}}{2\pi N_r}\end{aligned}$$

N_r = ความเร็วของ Motor และ P ที่นำมาใช้คือกำลังทางกลส่วนที่เปลี่ยนแปลงมาจากกำลังงานไฟฟ้าซึ่ง

$$T = \frac{\text{Rotor output}}{P \times \text{developed}}$$

แต่ $N_r = (1 - S) N_s$

และ $\text{Rotor output} = (1 - S) \text{ Rotor input}$

$$\begin{aligned}T_m &= \frac{60 \text{ Rotor output}}{2\pi N} \\ &= \frac{60(1 - S) \text{ Rotor output}}{2\pi(1 - S)N_s}\end{aligned}$$

$$T_m = \frac{60}{2\pi N_s} \text{ Rotor input}$$

แต่ $\frac{60}{2\pi N_s}$ เป็นค่าคงที่สำหรับ Motor ตัวเดียวกันที่มี Pole และใช้

ความถี่คงที่ ให้ $\frac{60}{2\pi N_s} = K$

สรุปสูตร $T_m = K \times \text{Rotor input}$

$$T_m = K \times \frac{3E_2^2SR_2}{R_2^2 + S^2X_2^2}$$

$$K = \frac{60}{2\pi N_s}$$

- 1) Slip Speed = $N_s - N_r$; $N_s = \frac{120f}{P}$; $f =$
 - 2) Slip = $\frac{N_s - N_r}{N_s}$; $N_r =$ Rotor speed; $P =$ Pole
 - 3) %Slip = $S \times 100$
 - 4) Rotor frequency $f_r = S \times f$
 - 5) Rotor Speed $f_r = (1 - S) N_s$
 - 6) Slip หาจาก f_r ได้ $S = \frac{f_r}{f}$
 - 7) Rotor Input_{3φ} = $\frac{3E_2^2 S R_2}{R_2^2 + S^2 X_2^2}$
 - 8) Rotor Culoss_{3φ} = $S \times$ Rotor Input_{3φ}
 - 9) Rotor Output Pm = $(1 - S) \times$ Rotor Input_{3φ}
 - 10) Torque developed Tm = $K \times$ Rotor Input_{3φ}
- หมายเหตุ $K = \frac{60}{2\pi N_s}$
- $E_2 =$ แรงเคลื่อนไฟฟ้า Rotor ต่อเฟสขณะ Rotor อยู่กับที่
- $S =$ Slip
- $R_2 =$ ความต้านทาน Rotor ต่อเฟส
- $X_2 =$ Reactance ของ Rotor ต่อเฟสขณะ Rotor อยู่กับที่

4.4.2 ทอร์กหรือแรงบิดของมอเตอร์

เป็นปัจจัยสำคัญในการที่จะทำให้เราสามารถใช้งานมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและช่วยลดค่าไฟของมอเตอร์ มีความเข้าใจในเรื่องทอร์กของมอเตอร์จำเป็นสำหรับการเลือกมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและสามารถใช้งานได้ดีที่สุดกับงานแต่ละอย่าง เพราะราคาของมอเตอร์นั้นขึ้นกับแรงบิดของมอเตอร์โดยตรง ถ้าสามารถเลือกมอเตอร์ที่มีแรงบิดเหมาะสมกับโหลด ก็จะทำให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ถ้าเลือกมอเตอร์ที่มีแรงบิดสูงๆ ไปใช้กับโหลดที่ต้องการแรงบิดต่ำแล้ว ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์จะตกลงไปเป็นอย่างมาก

4.4.3 แนวทางในการเลือกมอเตอร์ใช้งานเพื่อประหยัดพลังงาน

ในแง่ของการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายแล้ว แนวทางที่สำคัญ 2 ประการซึ่งเราควรจะต้องยึดในการเลือกซื้อมอเตอร์มาใช้งาน ก็คือ

1. เลือกมอเตอร์ให้กำลังเพียงพอกับการใช้งานเท่านั้น อย่าเลือกมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่เกินไป
2. พยายามลดการนำเอามอเตอร์มาใช้งานในสถานะที่โหลดมีค่าต่ำเป็นเวลานานๆ

ตัวอย่าง 3 เฟส Induction motor 4 Pole 50 Hz ขณะทำงานเต็มทีวัดความเร็วได้ 1400 RPM และขณะที่โรเตอร์อยู่กับที่วัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อเฟสได้ 50 Volt ความต้านทานของขดลวดด้าน rotor ต่อเฟสวัดได้ 0.01 โอห์ม rotor reactance ต่อเฟสวัดได้ 0.1 โอห์ม จงคำนวณหา Rotor input , Rotor culoss , Power developed Torque developed

Sol	Rotor Input _{3φ}	=	$\frac{3E_2^2SR_2}{R_2^2 + S^2X_2^2}$
	E ₂	=	50 volt
	S	=	$\frac{N_s - N_r}{N_s}$
	N _s	=	$\frac{120f}{P} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500$
	S	=	$\frac{1500 - 1400}{1500}$
		=	0.067
	R ₂	=	0.01 Ω
	X ₂	=	0.1 Ω
	Rotor Input _{3φ}	=	$\frac{3 \times 50^2 \times 0.067 \times 0.01}{0.01^2 + (0.067^2 \times 0.1^2)}$
		=	34.68 × 10 ³ watts
		=	3.468 × 10 ³ kW
	Rotor Culoss _{3φ}	=	S × Rotor Input _{3φ}
		=	0.067 × 34.68 × 10 ³
		=	2.324 kW
	Rotor Output	=	(1 - S) × Rotor Input _{3φ}

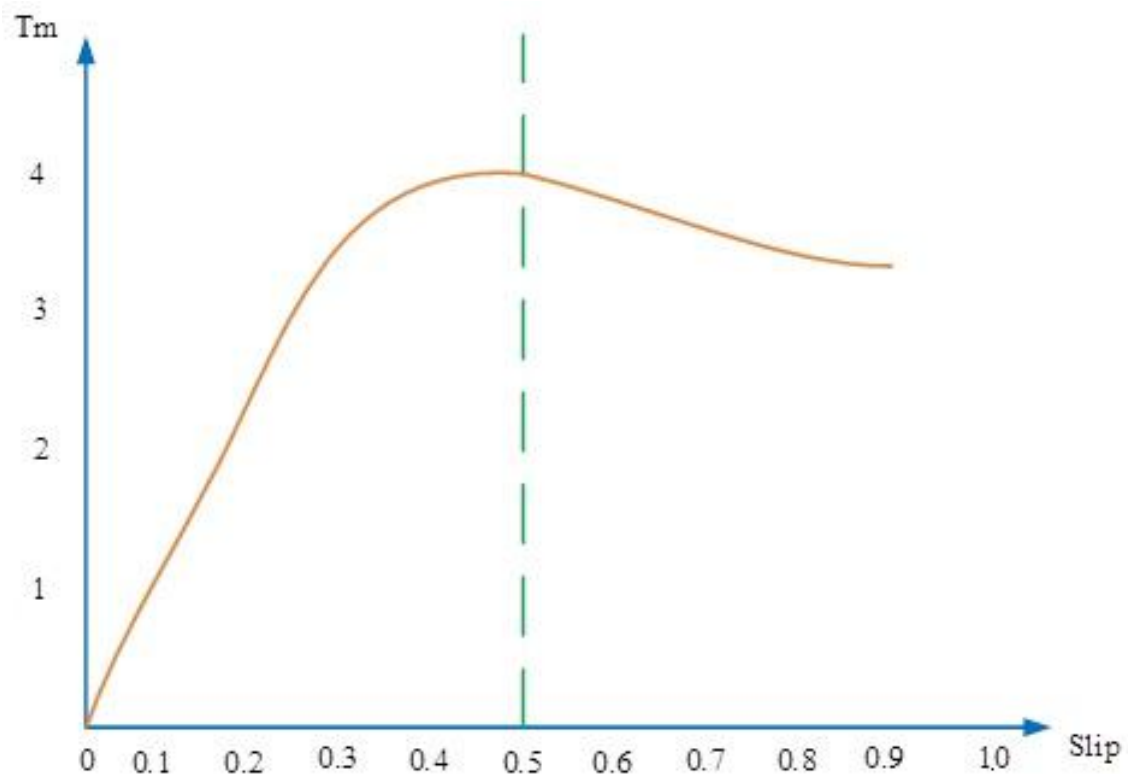
$$\begin{aligned}
 &= (1 - 0.067) \times (34.68 \times 10^3) \\
 &= 32.356 \text{ KW} \\
 \text{หรือ Rotor Output} &= \text{Rotor Input} - \text{rotor culoss} \\
 &= (34.68 \times 10^3) - 2.324 \\
 &= 32.356 \text{ KW} \\
 \text{Torque developed} &= K \times \text{Rotor Input}_{3\phi} \\
 &= \frac{60}{2\pi N_s} (34.68 \times 10^3) \\
 &= \frac{60}{2\pi 1500} (34.68 \times 10^3) \\
 &= 220.8
 \end{aligned}$$

หมายเหตุ Rotor output ก็คือ Power developed นั่นเอง

ตัวอย่าง จากสมการแรงบิด $T_m = K \text{ Rotor input}$ 3 เฟสจง plot กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง T_m กับ Slip โดยกำหนดให้ Slip = 0, 0.1, 0.2, 0.3.....1.0 และให้ $E_2 = 20 \text{ volt}$ $R_2 = 0.5$ $X_2 = 1$ $N_s = 1500 \text{ RPM}$

Sol	T_m	=	$K \times \text{Rotor input}$
	T_m	=	$\frac{60}{2\pi N_s} \times \frac{3E_2^2 S R_2}{R_2^2 + S^2 X_2^2}$
	T_m	=	$\frac{60}{2\pi 1500} \times \frac{3(20)^2 (S)(0.5)}{(0.5)^2 + S^2 1^2}$
	T_m	=	$\frac{3.8^2 (S)}{0.25 + S^2}$
	S	=	0 ; $T_m = 0 \text{ N-m}$
	S	=	0.1 ; $T_m = 1.47 \text{ N-m}$
	S	=	0.2 ; $T_m = 2.63 \text{ N-m}$
	S	=	0.3 ; $T_m = 3.37 \text{ N-m}$
	S	=	0.4 ; $T_m = 3.73 \text{ N-m}$
	S	=	0.5 ; $T_m = 3.82 \text{ N-m}$

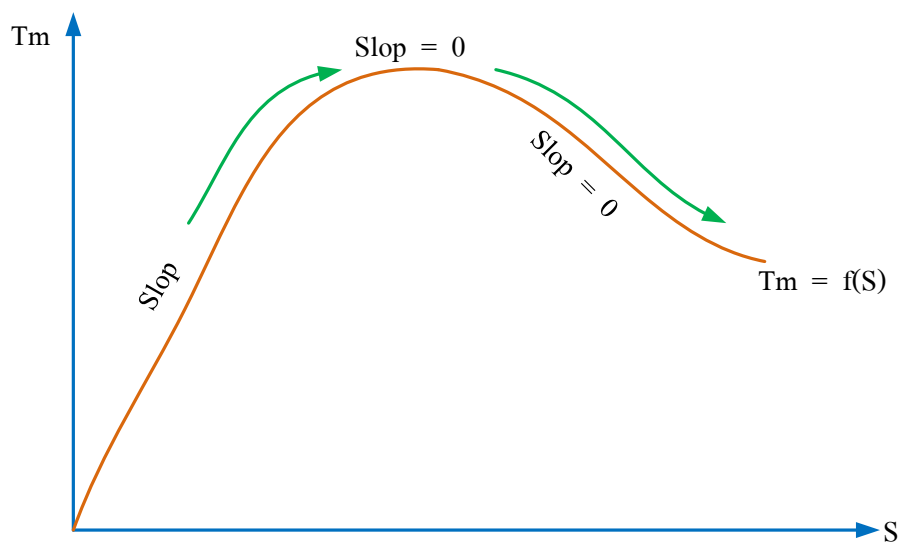
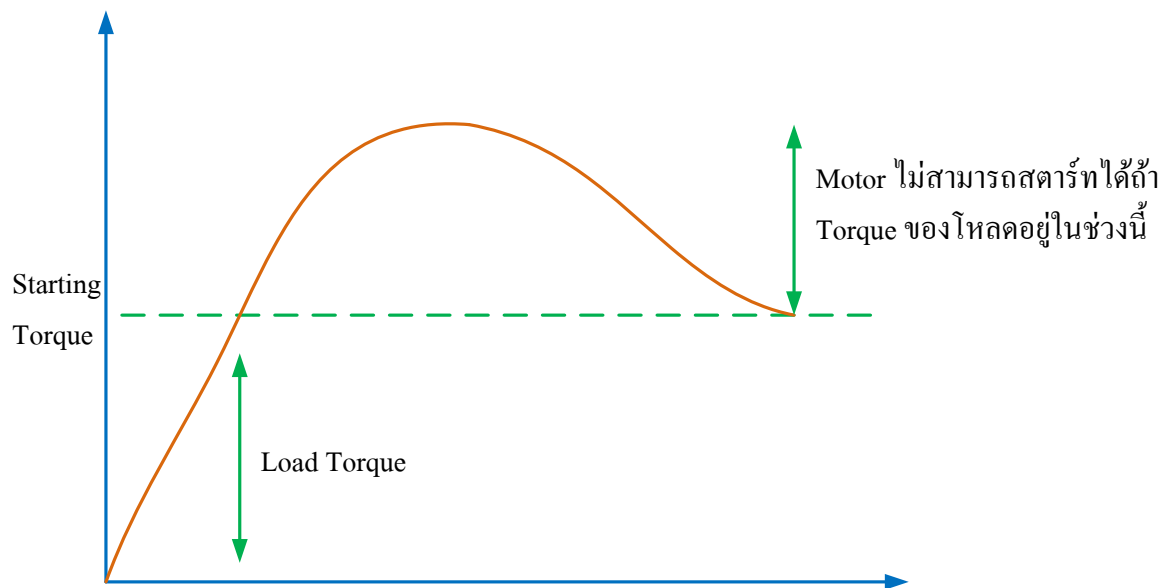
S	=	0.6	;	T_m	=	3.76 N-m
S	=	0.7	;	T_m	=	3.61 N-m
S	=	0.8	;	T_m	=	3.43 N-m
S	=	0.9	;	T_m	=	3.24 N-m
S	=	1	;	T_m	=	3.06 N-m



กราฟจะเห็นว่าจุดที่ T_m มีค่า max อยู่ที่ 3.82 N-m และเป็นจุดที่หาค่า $Slip = 0.5 = \frac{R_2}{X_2}$

ค่า T_m ที่ Slip มีค่า = 1 คือค่า Torque ที่สามารถขับโหลดให้หมุนได้ในตอนสตาร์ทซึ่งมีค่าน้อยกว่า maximum torque ดังนั้นโหลดของมอเตอร์ที่ติดอยู่ในตอนเริ่ม start ไม่ควรเกินค่า Torque ที่จุดนี้มีฉะนั้นมอเตอร์จะไม่สามารถ Start ได้ถ้าไม่มีอุปกรณ์ป้องกันความเสียหายให้กับมอเตอร์ผลจะทำให้มอเตอร์พังไปเร็วที่สุด

จากกราฟในตอนแรกมอเตอร์มีค่า Slip = 1 มี Torque ขับโหลดค่าหนึ่งและมอเตอร์จะถูกเร่งความเร็วให้สูงขึ้นโดยมีค่า Torque เพิ่มขึ้นด้วยจนถึงจุดที่มีค่า $Slip = \frac{R_2}{X_2}$ จะมีค่า Torque ขับโหลดสูงที่สุด motor มีความเร็วสูงขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่ง Torque ของมอเตอร์เท่ากับ Torque ที่โหลดต้องการมอเตอร์ถึงจะหยุดเร่งความเร็วและทำงานที่ค่า Slip ตรงจุดนั้น



จากกราฟจุดที่ Slop = 0 คือจุดสูงสุดของกราฟ (ค่า $T_m \text{ max}$)

ดังนั้น $\frac{dT_m}{ds} = 0$ คือจุดที่ $T_m \text{ maximum}$ ($\frac{dT_m}{ds} = \text{Slop}$)

$$\frac{dT_m}{ds} = 0 = \frac{d}{ds} \left(\frac{K3E_2^2 S R_2}{R_2^2 + S^2 X_2^2} \right)$$

$$\frac{dT_m}{ds} = 0 = 3KE_2^2 R_2 \frac{d}{ds} \left(\frac{S}{R_2^2 + S^2 X_2^2} \right)$$

$$= 3KE_2^2 R_2 \left(\frac{1}{R_2^2 + S^2 X_2^2} \left((R_2^2 + S^2 X_2^2) \frac{d}{ds} - S \frac{d}{ds} (R_2^2 + S^2 X_2^2) \right) \right)$$

$$= \frac{K3E_2^2 SR_2}{R_2^2 + S^2 X_2^2} (R_2^2 + S^2 X_2^2 \times 1 - S(2SX_2^2))$$

$$= \frac{K3E_2^2 SR_2}{R_2^2 + S^2 X_2^2} (R_2^2 + S^2 X_2^2 - S^2 X_2^2)$$

$$\frac{dT_m}{ds} = \frac{K3E_2^2 SR_2}{R_2^2 + S^2 X_2^2} (R_2^2 - S^2 X_2^2) = 0$$

$$\text{คูณตลอดด้วย} \quad \frac{(R_2^2 + S^2 X_2^2)}{3KE_2^2 R_2}$$

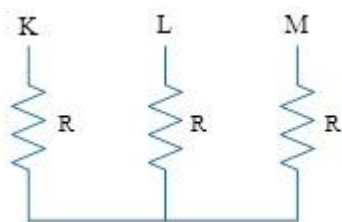
$$0 = (R_2^2 - S^2 X_2^2)$$

$$S^2 X_2^2 = R_2^2$$

$$S^2 = \frac{R_2^2}{X_2^2}$$

$$S = \frac{R_2}{X_2} \quad \text{ค่า Slip ณ จุดที่ทำให้เกิด max torque}$$

ดังนั้น จุดที่ทำให้เกิด maximum torque คือจุดที่มีค่า Slip เท่ากับความต้านทานของขดลวดด้าน Rotor ทหารด้วยค่า Reactance ด้าน Rotor ขณะ Rotor อยู่กับที่ สำหรับ Rotor แบบ Wound สามารถเลื่อนจุดที่ทำให้เกิด maximum torque มาไว้ ณ ตอนเริ่ม Start ได้โดยเพิ่มค่าความต้านทานภายนอกต่อเข้าไปกับขด Wound กับวงจร



โดยค่าความต้านทาน R สามารถคำนวณได้จาก

$$R = X_2 - R_2$$

ตัวอย่าง จากสมการ $T_m = K$ rotor input จง Plot กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง T_m และ Slip โดยใช้ค่า Slip จาก 0-1 Step ละ 0.1 ให้ $E_2 = 20$ V, $R_2 = 0.5$, $X_2 = 1$ และในค่าความต้านทานภายนอกที่ต่อเพิ่มเท่ากับ 0.5 โอห์ม ต่อเฟส มอเตอร์มี 4 Pole 50 Hz

Sol เมื่อความต้านทานเพิ่มค่า R_2 จะเท่ากับ $0.5 + 0.5$ เท่ากับ 1 โอห์ม คือเท่ากับ X_2 พอดี

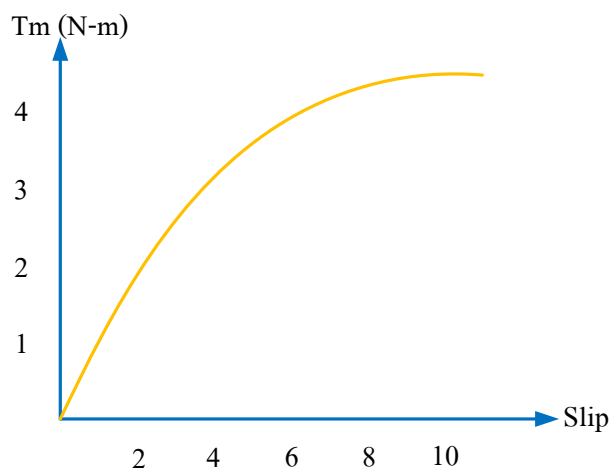
$$T_m = \frac{60}{2\pi N_s} \times \frac{3(20)^2(1)^2(S)}{(1)^2 + (S)(1)^2}$$

$$T_m = \frac{7.64(S)}{1 + (S)^2}$$

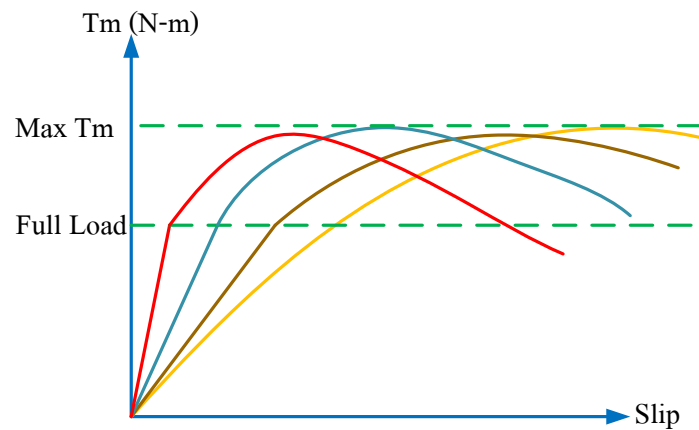
แทนค่าจากสมการได้ค่า ดังนี้

Slip	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Tim	0	0.76	1.50	2.10	2.63	3.06	3.37	3.60	3.73	3.80	3.82

จากผลของการเปลี่ยนแปลงค่า Slip ไปเรื่อยๆนำมา Plot กราฟ ได้ ดังรูป



จะเห็นว่าจุดที่เกิด max torque เลื่อนไปอยู่ที่ค่า $S=1$ คือตอน Start motor นั่นเอง ซึ่งผลทำให้ motor สามารถจุด load หนักๆ ได้ดีขึ้นแต่อย่างไรก็ตามความเร็วของ Rotor อาจจะต่ำกว่าที่ต้องการอยู่ ดังนั้นจึงต้องลดค่า R_2 ลง ลดตามความต้านทาน R ที่ต่อเพิ่มภายนอกจะทำให้เส้นกราฟเลื่อนไปทางซ้ายมือ ดังรูป



ณ load ค่าเดียวกันถ้าต้องการ Start โดยให้ได้ max torque แล้วความเร็วจะอยู่กับที่ 1 คือ Slip มีค่ามากและความเร็วต่ำถ้าลดค่า R ลงให้เส้นกราฟเลื่อนไปทางซ้ายมือผลทำให้ Slip ลดลง (จุด 2, 3, 4,) ผลคือ motor จะมีความเร็วสูงขึ้นตามต้องการ

4.4.4 Maximum torque

จากเงื่อนไขที่ว่า ค่าแรงบิดจะเกิดขึ้นสูงที่สุดเมื่อ Slip มีค่าเท่ากับ $\frac{R_2}{X_2}$ ดังนั้นสมการ T_m ณ จุดที่เกิด Max Torque จะเปลี่ยนที่ดังต่อไปนี้

$$T_m = 0 = \left(\frac{K^3 E_2^2 S R_2}{R_2^2 + S^2 X_2^2} \right)$$

$$\text{Max Torque } S = \frac{R_2}{X_2}$$

$$T_m \text{ max} = \left(\frac{K^3 E_2^2 \frac{R_2}{X_2} R_2^2}{R_2^2 + \left(\frac{R_2}{X_2} \right)^2 X_2^2} \right)$$

$$= \left(\frac{K^3 E_2^2 R_2^2}{X_2 + (R_2^2 R_2^2)} \right)$$

$$= \left(\frac{K^3 E_2^2 R_2^2}{X_2 + 2R_2^2} \right)$$

$$T_m \text{ max} = \left(\frac{K^3 E_2^2}{X_2 + R_2^2} \right) ; S = \frac{R_2}{X_2}$$

4.4.5 Starting torque

ขณะ Start มอเตอร์มีความเร็ว = 0 ค่า ดังนั้นค่า Slip = $\frac{N_s - 0}{N_s} = 1$ แทนค่า S = 1 ลง

ในสมการ T_m ถ้าจะสามารถหาค่า Starting torque ได้

$$T_m = \left(\frac{K3E_2^2 S R_2}{R_2^2 + S X_2^2} \right)$$

$$S = 1$$

$$T_{st} = \frac{K3E_2^2 1 R_2}{R_2^2 + 1^2 X_2^2}$$

$$T_{st} = \frac{K3E_2^2 R_2}{R_2^2 + X_2^2} ; S = 1$$

4.4.6 Maximum Starting torque

คือการหาค่า Torque สูงสุดตอน Star motor ว่าสามารถให้แรงบิดได้เท่าใดเพื่อป้องกันความเสียหายของมอเตอร์เนื่องจากโหลดหนักเกินไปซึ่งจะต้องทำการต่อความต้านทานเพิ่มเข้าไปในวงจร Rotor ดังที่กล่าวมา

$$T_{st} = \frac{K3E_2^2 R_2}{R_2^2 + X_2^2} ; S=1$$

$$T_{stmax} = \frac{K3E_2^2 R_2}{R_2^2 + R_2^2} ; S=1 ; S = 1 ; X_2 = R_2$$

$$= \frac{K3E_2^2 R_2}{2R_2^2}$$

$$T_{stmax} = \frac{K3E_2^2}{2R_2^2} ; S=1 ; S = 1 ; X_2 = R_2$$

$$T_{stmax} = \frac{K3E_2^2 X_2}{X_2^2 + X_2^2} ; S=1 ; X_2 = R_2$$

$$= \frac{K3E_2^2 X_2}{2X_2^2} ; S=1 ; R_2 = X_2$$

$$T_{stmax} = \frac{K3E_2^2}{2X_2^2} ; S=1 ; R_2 = X_2$$

ซึ่งค่า T_{stmax} จะเท่ากับ T_{mtmax} นั้นเอง

ตัวอย่าง จงคำนวณหาแรงบิดสูง (maximum Torque) ให้แรงบิดสูงสุดและค่าความต้านทานที่ต้องนำมาต่อเพิ่มในวงจรโรเตอร์เพื่อให้ได้ค่าแรงบิดขณะเริ่มหมุนสูงที่สุดกำหนดให้ motor มี 4 pole 50 Hz แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์ต่อเฟส เท่ากับ 15 Volts ความต้านทานในโรเตอร์ต่อเฟสกับ 0.3 โอห์ม โรเตอร์ต่อเฟสเท่ากับ 1 โอห์ม

$$\begin{aligned}
 \text{วิธีทำ} \quad T_{st \max} &= \frac{K3E_2^2}{2X_2^2} \\
 K &= \frac{60}{2\pi N_s} \\
 N_s &= \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{ RPM} \\
 K &= \frac{60}{2\pi 1500} ; \quad N_s = \frac{120f}{P} \\
 E_2 &= 15 ; \quad X_2 = 1 \\
 T_{st \max} &= \frac{60 \times 3 \times 15^2}{2\pi 1500 (2 \times 1)} \\
 &= 2.15 \quad \text{n - m} \\
 \text{แรงบิดขณะ Start } T_{st} &= \frac{K3E_2^2 R_2}{R_2^2 + X_2^2} \\
 &= \frac{60 \times 3 \times 15^2 \times 0.3}{2\pi 1500 (0.3^2 + 1)} \\
 &= 1.18 \quad \text{n - m}
 \end{aligned}$$

ความต้านทานภายนอกที่ต้องนำมาต่อเพิ่มในวงจรโรเตอร์เพื่อให้ได้แรงบิดขณะสตาร์ทสูงสุด

ขณะ Start $S = 1$ และต้องการให้เกิดแรงบิดสูงสุดค่าความต้านทานในวงจรโรเตอร์ต้องเท่ากับโรเตอร์รีแอคแตนซ์

$$\begin{aligned}
 R_2 + R &= X_2 \\
 \text{ค่าความต้านทานภายนอกที่ต้องเพิ่ม} &= R = X_2 - R_2 \\
 R &= X_2 - R_2 \\
 &= 1 - 0.3 \\
 &= 0.7 \quad \Omega/\text{Plase}
 \end{aligned}$$

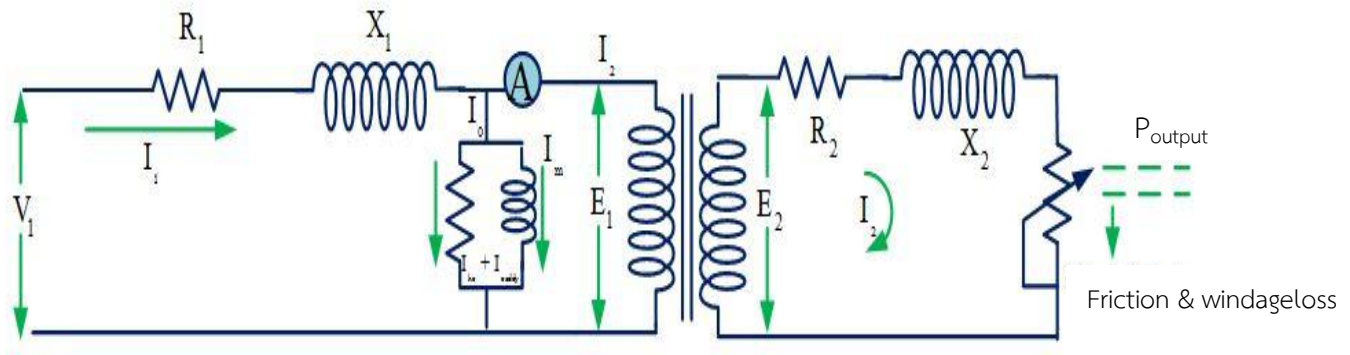
ความเร็วของ Motor ขณะเกิด MA Torque Nr

$$\begin{aligned}
 N_r &= (1-S)N_s \\
 \text{Torque } S &= \frac{R_2}{X_2} = \frac{0.3}{1} = 0.3 \\
 N_r &= (1 - 0.3)1500 \\
 &= 1050 \text{ RPM (รอบต่อนาที)}
 \end{aligned}$$

4.5 สมการของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

4.5.1 Power Stage of Induction motor

พิจารณาจาก 1 เฟส Equivalent Circuit ของ Induction motor



1. Power input สามารถคำนวณได้จาก $3V_1 I_1 \cos \theta_1$ เป็นกำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่จ่ายให้กับมอเตอร์ค่ากำลังส่วนนี้จะถูกแบ่งออกเป็นกำลังสูญเสียในสเตเตอร์และกำลังงานที่ส่งผ่านช่องว่างอากาศ (air gap)
2. Stator copper loss เป็นกำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานขดลวด สเตเตอร์ซึ่งกำลังงานส่วนนี้อยู่ในรูปของความร้อนสามารถคำนวณได้จาก $\text{Copper loss} = 3I_1 R_1$
3. Core loss เป็นกำลังสูญเสียเนื่องจาก Hysteresis และ Eddcurrent ซึ่งกำลังในส่วนนี้สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \text{core loss} &= 3(I_{hc} + I_{cddy})^2 R_0 \\ &= 3I_0 \cos \theta_0 R_0 \end{aligned}$$
4. Stator out Put คือกำลังงานส่วนที่เหลือจากหักค่าการสูญเสียใน Stator ออกแล้วแลพกำลังส่วนนี้จะถูกส่งผ่าน (Transfer) ข้ามช่องว่างอากาศไปยัง Rotor สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \text{Stator out Put} &= 3E_1 I_2 \cos \theta_2 \\ &= \text{Power input} - 3 \text{ เฟส Copper loss Core loss} \end{aligned}$$

5. Rotor output คือกำลังงานไฟฟ้าส่วนที่ส่งข้ามช่องว่างอากาศจาก stator ดังนั้นกำลังงานส่วนนี้จะมีค่าเท่ากับ Stator output และสามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \text{Rotor output} &= 3E_2 I_2 \cos \theta_2 \\ &= \frac{3E_2^2 S R_2}{R_2^2 s^2 X_2^2} \end{aligned}$$

6. Rotor copper loss คือกำลังงานที่สูญเสียในความต้านทานของขดลวด Rotor ซึ่งแปรรูปเป็นพลังงานความร้อนสามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned}\text{Rotor Copper loss}_{3\phi} &= 3I_2^2 R_2 \\ &= S \text{ Rotor Input}_{3\phi}\end{aligned}$$

7. Rotor output คือกำลังงานไฟฟ้าส่วนที่เปลี่ยนรูปเป็นกำลังงานกล ดังนั้น อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Power developed และสามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned}\text{Power input}_{3\phi} &= \text{Rotor input}_{3\phi} - \text{Rotor cu loss}_{3\phi} \\ &= (1-S) \text{ Rotor Input}_{3\phi} \\ &= \text{friction \& windage + mechanical Power output}\end{aligned}$$

8. friction & windage loss เป็นการสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงเสียดทานมีหน่วยเป็น Watt

9. Mechanical Power Out กำลังงานกลจริงๆ ที่สามารถนำไปขับโหลดได้นิยมบอกเป็นแรงม้า (H.P.)

4.5.2 ประสิทธิภาพมอเตอร์

นิยามประสิทธิภาพของมอเตอร์

ตามนิยามของ NEMA (Nation Electrical Manufacturers Association) นั้นระบุเอาไว้ว่า ประสิทธิภาพเชิงพลังงานของมอเตอร์ก็คืออัตราส่วนของกำลังเอาต์พุตที่ใช้ประโยชน์ได้กับกำลังไฟฟ้าอินพุตที่ป้อนให้มอเตอร์ โดยจะแทนค่าประสิทธิภาพเป็นเปอร์เซ็นต์

การคำนวณประสิทธิภาพของมอเตอร์

$$\eta = \frac{0.754 \times \text{hp} \times \text{Load}}{P_i}$$

โดย η = ประสิทธิภาพ (%)

hp = แรงม้าที่พิกัดที่พิกัดจากเนมเพลต

Load = กำลังเอาต์พุตในหน่วยเปอร์เซ็นต์ของกำลังที่พิกัด

4.5.3 มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรม พลังงานไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปในส่วนต่างๆ ซึ่งมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงก็คือมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้รับการออกแบบเพื่อลดการสูญเสียพลังงานในส่วนต่างๆ ทั้งการสูญเสียทางไฟฟ้า การสูญเสียจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก และการสูญเสียทางกล โดย

การปรับปรุงส่วนต่างๆ เช่น สเตเตอร์ โรเตอร์ ส่วนตลับลูกปืน และพัดลมระบายความร้อน เป็นต้น ซึ่งใช้วัสดุที่มีคุณภาพดีขึ้นทำให้สูญเสียพลังงานลดลงและประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากมอเตอร์ทั่วไปประมาณ 2- 7 %

ลักษณะของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงที่ลดการสูญเสีย

1.การสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์

- เพิ่มส่วนผสมของทองแดงและเพิ่มขนาดลวดตัวนำไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ให้ใหญ่ขึ้นกว่าปกติประมาณ 35-40% เพื่อลดค่าความต้านทานไฟฟ้า

- เพิ่มส่วนผสมของทองแดงและเพิ่มขนาดของตัวนำไฟฟ้า (Rotor Bar) และแหวนประกบ (End Ring) ของโรเตอร์เพื่อลดค่าความต้านทานไฟฟ้า

2.การสูญเสียแกนเหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์

- ลดความหนาแน่นของแผ่นเหล็กเคลือบผิวที่ทำแกนของโรเตอร์และสเตเตอร์ รวมทั้งปรับปรุงคุณภาพฉนวนระหว่างแผ่นเหล็ก

- ปรับปรุงคุณสมบัติของแกนเหล็กโดยใช้เหล็กเคลือบผิวทำจากเหล็กซิลิกอนเกรดสูงแทนการใช้เหล็กคาร์บอนต่ำเพื่อลดความต้านทานสนามแม่เหล็ก

- ขยายแกนของสเตเตอร์และโรเตอร์ให้ยาวขึ้นเพื่อชดเชยกับความกว้างของร่องสล็อตที่กว้างขึ้นตามขนาดขดลวดตัวนำที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความหนาแน่นและการสูญเสียของสนามแม่เหล็กลดลง รวมทั้งทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์สูงขึ้น

3. การสูญเสียที่เกิดจากความเสียดทาน

- ออกแบบตลับลูกปืนและปรับปรุงคุณภาพของซีลของตลับลูกปืน เพื่อลดแรงเสียดทาน

- ออกแบบพัดลมที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นและลดขนาดใบพัดเพื่อลดแรงต้านลม

4. การสูญเสียที่เกิดจากการเหนี่ยวนำในส่วนอื่นๆ

- การปรับปรุงการออกแบบร่องสล็อตของสเตเตอร์

- การลดช่องว่างอากาศระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์เพื่อลดการสูญเสียของสนามแม่เหล็กที่วิ่งระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์

แนวทางการพิจารณาเลือกซื้อมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

1.การพิจารณามอเตอร์ใดว่าเป็นมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงให้อ้างอิงเกณฑ์ประสิทธิภาพขั้นต่ำของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง ซึ่งระบุคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ประหยัดพลังงานประเภทมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง พพ.1008-1:2547 ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานหรือสถาบันที่ได้รับการยอมรับ ได้แก่

- NEMA (Nation Electrical Manufacturers Association) ของสหรัฐอเมริกา ซึ่งกำหนดเกณฑ์ขั้นต่ำ ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง ตามมาตรฐานทดสอบ IEEE 112 Test Method B โดยแบ่งเป็นระดับ Premium Efficient และ Energy Efficient และ

- IEC (International Electrotechnical Commission) ซึ่งกำหนดมาตรฐานการทดสอบ ประสิทธิภาพมอเตอร์และแบ่งเกณฑ์ขั้นต่ำค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง เป็นระดับสูงสุด Eff1

2.การพิจารณาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ จะต้องดูด้วยว่ามอเตอร์นั้นทดสอบค่าประสิทธิภาพด้วยวิธีมาตรฐานใด และต้องใช้มาตรฐานเดียวกันในการเปรียบเทียบ เช่น มอเตอร์ขนาด 5.5 kW

- เมื่อทดสอบด้วยวิธีมาตรฐาน IEC 60034-2 จะได้ค่าประสิทธิภาพ 82.3%
- เมื่อทดสอบด้วยวิธีมาตรฐาน IEEE 112 Test Method B จะได้ค่าประสิทธิภาพ 80.3%
- เมื่อทดสอบด้วยวิธีมาตรฐาน JEC 37 จะได้ค่าประสิทธิภาพ 85%

3.มอเตอร์มีหลายชนิด หลายประเภทการเลือกซื้อควรเลือกขนาดให้เหมาะสมกับการใช้งาน และควรพิจารณาลักษณะภาระโหลด (Load) ลักษณะการติดตั้ง ลักษณะสภาพแวดล้อมที่ติดตั้งใช้งานและลักษณะการป้องกันฝุ่นละอองน้ำของการห่อหุ้มมอเตอร์

4.มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงโดยทั่วไปจะมีราคาสูงกว่ามอเตอร์ทั่วไป 25 -40 % แต่สามารถให้ระยะเวลาคืนทุนของราคาที่จ่ายเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะมอเตอร์ที่มีชั่วโมงใช้งานสูงตั้งแต่ 4,000 ชั่วโมงต่อปีขึ้นไป

ตัวอย่าง การคำนวณการเปรียบเทียบการใช้พลังงานระหว่างมอเตอร์ทั่วไปและประสิทธิภาพสูงมอเตอร์ เหนียวนำ 3 เฟส 4 ขั้ว ที่ภาระทำงาน 75 % ของพิกัด

สมมติฐาน : ขนาดพิกัดของมอเตอร์ เท่ากับ 11 kW ชั่วโมงใช้งาน เท่ากับ 6,000 ชั่วโมง/ปี

มอเตอร์ทั่วไป : ข้อมูลประสิทธิภาพและราคามอเตอร์ขนาด 11 kW

ราคา = 34,674 บาท

ประสิทธิภาพ (E_{STD}) = 87.4% ที่ภาระ 75%

$$\begin{aligned}\text{ดังนั้น กำลังไฟฟ้าที่ใช้} &= \frac{1}{E_{STD}} \times \% \text{ภาระ} \times \text{ขนาดเกินพิกัด} \\ &= \frac{1}{87.4\%} \times 75\% \times 11 \text{ kW} \\ &= 9.44 \text{ kW}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} &= 9.44 \text{ kW} \times 6,000 \text{ ชั่วโมง/ปี} \\ &= 56,640 \text{ kWh/ปี}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ค่าไฟฟ้า} &= 56,640 \text{ kWh/ปี} \times 3.5 \text{ บาท/kWh} \\ &= 196,240 \text{ บาท/ปี}\end{aligned}$$

มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง : ข้อมูลประสิทธิภาพและราคามอเตอร์ขนาด 11 kW

$$\text{ราคา} = 45,076 \text{ บาท}$$

$$\text{ประสิทธิภาพ (EHEM)} = 91.4\% \text{ ที่ภาระ } 75\%$$

$$\begin{aligned}\text{ดังนั้น กำลังไฟฟ้าที่ใช้} &= \frac{1}{\text{EHEM}} \times \% \text{ภาระ} \times \text{ขนาดเกินพิกัด} \\ &= \frac{1}{91\%} \times 75\% \times 11 \text{ kW} \\ &= 9.07 \text{ kW}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} &= 9.07 \text{ kW} \times 6,000 \text{ ชั่วโมง/ปี} \\ &= 54,420 \text{ kWh/ปี}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ค่าไฟฟ้า} &= 54,420 \text{ kWh/ปี} \times 3.5 \text{ บาท/kWh} \\ &= 190,470 \text{ บาท/ปี}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ผลประหยัดได้จากมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงโดยประมาณ} &= 56,640 - 54,420 \text{ kWh/ปี} \\ &= 2,220 \text{ kWh/ปี}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ค่าไฟที่ประหยัดได้} &= 196,240 - 190,470 \text{ บาท/ปี} \\ &= 7,770 \text{ บาท/ปี}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ราคาที่ยจ่ายเพิ่มขึ้นของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง} &= 45,076 - 34,674 \text{ บาท} \\ &= 10,402 \text{ บาท}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ระยะเวลาคืนทุนของราคาที่ยจ่ายเพิ่มขึ้น} &= \frac{10,402}{7,770} \\ &= 1.34 \text{ ปี}\end{aligned}$$

ตัวอย่าง จงคำนวณหา Rotor copper loss (กำลังงานส่วนที่สูญเสียในความต้านทานโรเตอร์) Rotor input 3 เฟส Power developed Torque developed ของ 3 เฟส Induction motor 380 Volt 4 Pole 50 Hz 150 แรงม้า 1350 RPM friction & windage loss = 3500 watt

$$\text{Sol} \quad \text{Power developed} = P_{\text{out}} + \text{friction \& windage loss}$$

$$P_{\text{out put}} = 150 \times 746$$

$$= 1119000 \quad \text{watt}$$

$$\text{friction \& windage loss} = 3500 \quad \text{watt}$$

$$\text{Power developed} = \text{Rotor out put}_{3\phi}$$

$$\text{Rotor out put}_{3\phi} = (1 - S) \text{ out put}_{3\phi}$$

$$\text{Rotor InPut}_{3\phi} = \text{Rotor out put}_{3\phi} / (1 - S)$$

$$= \frac{115400}{(1 - S)}$$

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

$$N_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 50}{4}$$

$$= 1500 \quad \text{RPM}$$

$$S = \frac{1500 - 1350}{1500} = 0.1$$

$$\text{Rotor input} = 115400 / 1 - 0.1$$

$$= 128222.22 \quad \text{Watt}$$

$$\text{Torque developed} = K \text{ Rotor input}_{3\phi}$$

$$K = \frac{60}{2\pi N_s}$$

$$T_m = \frac{60}{2\pi 1500} \times 128222.22$$

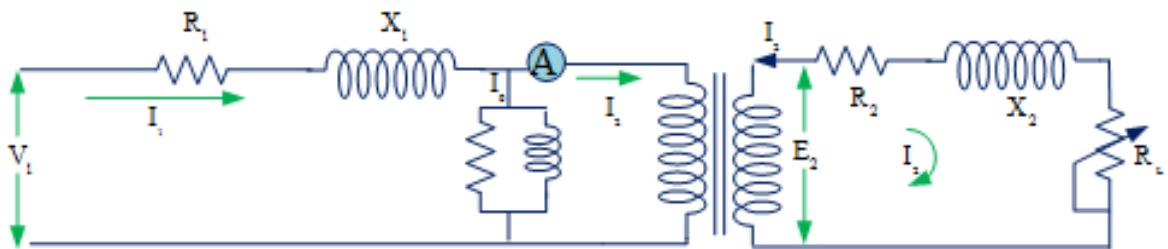
$$= 816.29 \quad \text{n - m}$$

$$\text{Rotor culoss}_{3\phi} = S (\text{Rotor input}_{3\phi})$$

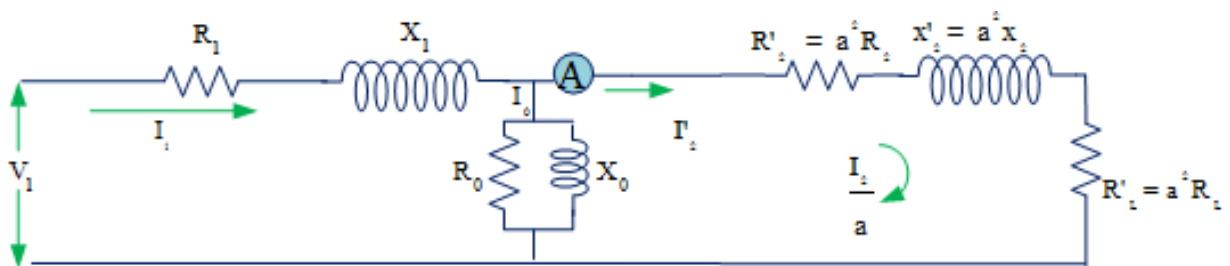
$$\begin{aligned}
 &= S \text{ (Rotor input}_{3\phi}\text{)} \\
 &= 0.1 \text{ (128222.22)} \\
 &= 12822.22 \quad \text{Watt}
 \end{aligned}$$

4.5.4 EQUIVALENT CIRCUIT REFER TO STATOR

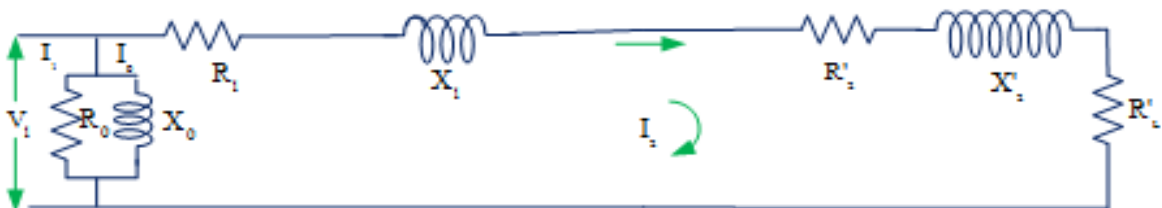
จาก EQUIVALENT CIRCUIT 1 เฟส



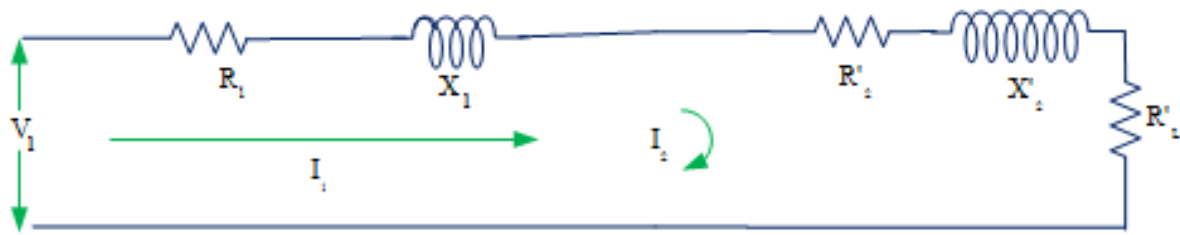
ค่าความต้านทานโรเตอร์ และค่า Rotor reactance รวมทั้งค่าความต้านทานเสมือนของ Load ทางกล สามารถย้าย (Refer) ข้ามมาทางด้าน stator ได้โดยคูณด้วย a^2 (เมื่อ $a =$ อัตราส่วนของจำนวนรอบของขดลวดทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ = Turn ratio = $\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_1}{I_2}$)



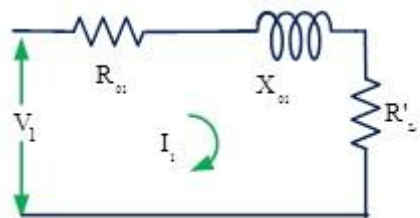
กระแสไฟฟ้า $I_1 = I_2 + I_0$ จะเห็นว่า I_0 มีค่าน้อยมากแทบไม่มีผลทำให้เกิดแรงเคลื่อนตกคล่อมในความต้านทานและ R_1 เลย ดังนั้นสามารถย้ายส่วนที่เป็น R_0 และ X_0 ดังรูป



และสำหรับ EQUIVALENT CIRCUIT ซึ่งคิดโดยประมาณและสามารถติดค่า R_0 และ X_0 ที่ทำได้
เนื่องจากมีผลน้อยมาก



จะเห็นว่ามี comment ที่คงที่อยู่ 4 ตัวคือ R_1, R'_2, X'_2, X_1 และมีการเปลี่ยนแปลงคือ R'_L ซึ่งเปลี่ยนไปตามค่า Slip ดังนั้นสามารถรวมความต้านทาน R_1 และ R'_2 รวมเรียกว่า X_{01} เข้าด้วยกัน (Reactance refertor-Stator) หรือค่ารีแอคแตนซ์ย้ายมาทางด้านสเตเตอร์



$$R_{01} = R_1 + R'_2 = R_1 + a^2 R_2$$

$$X_{01} = X_1 + X'_2 = X_1 + a^2 X_2$$

$$R'_L = \frac{(1-S)R'_2}{S} = \frac{(1-S)a^2 R'_2}{S}$$

$$V_1 = \text{แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ต่อเฟส}$$

$$I_1 = \text{กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ต่อเฟส}$$

จาก Equivalent circuit

$$I_1 / \text{Phase} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_{01} + R'_L) + X_{01}^2}} \quad \text{A}$$

$$\cos \theta = \frac{R_{01} + R'_L}{\sqrt{(R_{01} + R'_L)^2 + X_{01}^2}}$$

ขณะ Start motor มีความเร็ว = 0 $S = 1$ ดังนั้น

$$R'_L = \frac{1-1}{1} a^2 R_2 = 0 \quad \Omega$$

$$I_{1\text{Phase}}^{\text{Start}} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_{01})^2 + X_{01}^2}} \quad \text{A}$$

$$\cos\theta = \frac{R_{01}}{\sqrt{(R_{01})^2 + X_{01}^2}}$$

และมีค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ Motor จะเท่ากับ Copper loss ทั้งหมด

$$\text{Cu loss Total} = 3I_1^2 R_{01}$$

และในขณะที่มีมอเตอร์หมุน No-load $N_r = N_s S - 0$ ดังนั้น

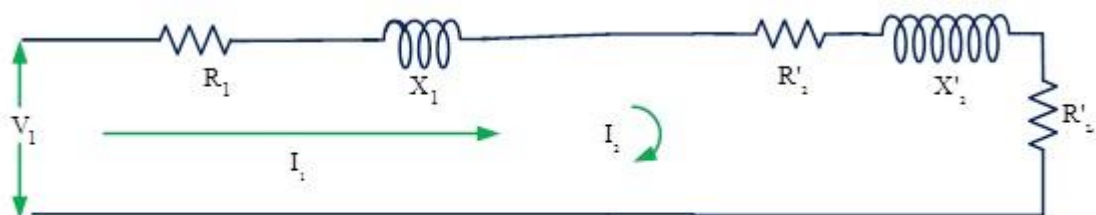
$$R_1' = \frac{1-0}{0} a^2 R_2 = \infty$$

กระแส $I_1 = 0$ กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์จึงเป็นส่วนที่นำไปสร้างเส้นแรงแม่เหล็กและทำให้เกิดความสูญเสีย $I = I_0$ ขณะ No load

สำหรับค่า Power developed สามารถคำนวณได้โดยคิดคำนวณกำลังงานที่ R_L ดังนั้นคือ

$$\begin{aligned} \text{Power developed} &= 3I_1^2 R_L' \\ &= 3I_1^2 \frac{(1-S)}{S} a^2 R_2 \end{aligned}$$

ตัวอย่าง จงคำนวณกระแสขณะสตาร์ท Power factor ขณะสตาร์ทของ 3 เฟส Induction มอเตอร์ 8 pole Stator ต่อโรเตอร์เท่ากับ 2 ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟสเท่ากับ 1 โอห์ม Stator Reactant ต่อเฟสเท่ากับ 3 โอห์ม ความต้านทานโรเตอร์ต่อเฟส = 0.6 โรเตอร์รีแอคแตนซ์ต่อเฟสเท่ากับ 1.3 โอห์มและถ้ามอเตอร์ทำงานที่ความเร็ว 650 RPM จงคำนวณหากระแส Power factor ขณะนั้น



$$R_1 = 1 \, \Omega, \quad X_1 = 3 \, \Omega, \quad V_1 = 380 \, \text{V}$$

$$R_2 = 0.6 \, \Omega, \quad X_2 = 1.3 \, \Omega, \quad a = 2$$

$$R_2' = a^2 R_2; \quad X_2' = a^2 X_2$$

$$R_2' = 2^2(0.6); \quad X_2' = 2^2(1.3)$$

$$= 2.4 \, \Omega; \quad = 5.2 \, \Omega$$

$$\begin{aligned}
 R_L' &= \frac{1-S}{S} a^2 R_2 = \frac{1-S}{S} 2.4 \\
 R_{01} &= R_1 + R_2' = 1 + 2.4 = 3.4 \, \Omega \\
 X_{01} &= X_1 + X_2' = 3 + 5.2 = 8.2 \, \Omega \\
 \text{ขณะ Start } R_L' &= 0 \text{ เพราะ } S = 1
 \end{aligned}$$

$$I_{st} / \text{Phase} = \frac{V_1}{\sqrt{R_{01}^2 + X_{01}^2}} \quad A$$

$$= \frac{380}{\sqrt{3.4^2 + 8.2^2}}$$

$$I_{st} / \text{Line} = \sqrt{3} \times 42.8$$

$$= 74.14 \, A$$

$$\text{P.f. ขณะ Start} = \frac{R_{01}}{\sqrt{(R_{01})^2 + X_{01}^2}}$$

$$= \frac{3.4}{\sqrt{(3.4)^2 + (8.2)^2}}$$

$$= 0.38 \, \text{lag}$$

$$\text{ขณะหมุนด้วยความเร็ว 650 RPM} \quad S = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad ; \quad N_r = 650$$

$$= \frac{120 \times 50}{8} \quad ; \quad S = \frac{750 - 650}{750}$$

$$= 750 \quad ; \quad = 0.133$$

$$I_{\text{full-load}} / \text{Phase} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_{01})^2 + X_{01}^2}}$$

$$R' = \frac{1-S}{S} 2.4$$

$$= \frac{1-1.3}{13} 2.4$$

$$= 15.65 \, \Omega$$

$$I_1 / \text{Phase} = \frac{380}{\sqrt{(3.4 + 15.65)^2 + 8.2^2}}$$

$$= 0.92 \, \text{lag}$$

หมายเหตุ ที่ P.F. ของ มอเตอร์ lag เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรจะล่าหลังแรงดันเสมอ

ตัวอย่าง จงคำนวณหากระแสขณะ Start Pf ขณะstart กระแสทำงาน full load Power developed ของ 3 เฟส อินдукชั่นมอเตอร์ 380 Volt ต่อแบบ Y ทำงานที่ Slip 10 % ค่าความต้านทานย้ายมาทางด้าน Stator เท่ากับ 8 โอห์ม ค่า Reactance ย้ายมาทางด้าน Stator เท่ากับ 15 โอห์ม ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ เท่ากับ 0.5 โอห์ม อัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวด (turn ration) เท่ากับ 3 และไม่คิดการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและความฟืด

Sol

$$R_{01} = 8, \quad R_2 = 0.5$$

$$S = 0.1, \quad X_{01} = 15 \quad a = 3$$

$$I_{St / Phase} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_{01}^2 + X_{01}^2)}}$$

$$V_1 = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ Volt} ; Y$$

$$I_{St / Phase} = \frac{220}{\sqrt{(8^2 + 15^2)}} \text{ A}$$

$$= \frac{220}{17} \text{ A} = 12.94 \text{ A}$$

$$P.F. \text{ start} = \frac{R_{01}}{\sqrt{R_{01}^2 + X_{01}^2}}$$

$$= \frac{8}{\sqrt{8^2 + 15^2}}$$

$$= 0.47 \text{ lag}$$

$$\text{Slip } 10\% = 0.1$$

$$R_L' = \frac{1-S}{S} a^2 R^2$$

$$R_L' = \frac{1-0.1}{0.1} \times 3^2 \times 0.5^2$$

$$= 40.5 \Omega$$

Sol

$$R_{01} = 8, \quad R_2 = 0.5$$

$$S = 0.1, \quad X_{01} = 15 \quad a = 3$$

$$I_{St / Phase} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_{01}^2 + R_L') + X_{01}^2}}$$

$$V_1 = \frac{220}{\sqrt{(8 + 40.5)^2 + X_{01}^2}} \quad A$$

$$= 4.33 \quad A$$

P.F. ขณะ Start

$$= \frac{R_{01}^2 + R_L'}{\sqrt{(R_{01}^2 + R_L')^2 + X_{01}^2}}$$

$$= \frac{8 + 40.5}{\sqrt{(8 + 40.5)^2 + 15^2}}$$

$$= 0.96 \text{ lag}$$

Power developed

$$= 3I_1^2 R_L'$$

$$= 3(4.33)^2 (40.5)$$

$$= 2.278 \text{ watt}$$

1. $N_s = \frac{120f}{P}$; $f =$ ความถี่ Hz , $P =$ จำนวน Pole

2. $S = \frac{N_s - N_r}{N_s}$; $N_r =$ ความเร็วของมอเตอร์ RPM

3. $N_r = (1 - S)N_s$

4. Rotor frequency $f_r = s.f$

5. Rotor input_{3φ} = $\frac{3E_2^2 S R_2}{R_2^2 + S^2 X_2^2}$

6. Rotor cu loss_{3φ} = $S \cdot \text{Rotor input}_{3\phi}$

7. Rotor output_{3φ} = $(1 - S) \text{ Rotor input}_{3\phi}$

8. Power developed_{3φ} = Rotor output_{3φ}

9. Mechanical Power output = Power developed – friction &

10. Torque developed = $K \text{ Rotor input}$ N – m

$$= \frac{K 3 E_2^2 S R_2}{R_2^2 + S^2 X_2^2} \quad N - m$$

11. Maximum Torque $= \frac{K3E_2^2}{2X_2^2}$
- หรือเท่ากับสมการ $T_d = \frac{K3E_2^2SR_2}{R_2^2 + S^2X_2^2} \quad S = \frac{R_2}{X_2}$
12. Starting torque $= \frac{K3E_2^2SR_2}{R_2^2 + X_2^2}$
- หรือเท่ากับสมการ $T_d = \frac{K3E_2^2SR_2}{R_2^2 + S^2X_2^2}$
13. slip s ขณะ Start มีค่าเท่ากับ 1
14. slip s ขณะเกิด Maxtorque มีค่าเท่ากับ $\frac{R_2}{X_2}$
15. ความต้านทานภายนอกที่ต่อเพิ่มเพื่อให้ได้ Max torque ขณะ Start มีค่าเท่ากับ $X_2 - R_2$
16. E_2 / phase $=$ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำโรเตอร์ต่อเฟส
- R_2 $=$ ความต้านทานภายในโรเตอร์
- X_2 $=$ โรเตอร์รีแอคแตนซ์ต่อเฟส
- Max Torque $=$ แรงบิดสูงสุด
- Starting Torque $=$ แรงบิดขณะเริ่มหมุน
- K $=$ ค่าคงที่ $\frac{60}{2\pi N_s}$
17. I_1 / phase $= \frac{V_1}{\sqrt{(R_{01}^2 + R_L')^2 + (X_{01})^2}}$
18. $\cos\theta_1$ $= \frac{R_{01} + R_L'}{\sqrt{(R_{01}^2 + R_L')^2 + (X_{01})^2}}$
19. $I_{st/ph}$ $= I_{1/ph}$ แต่แทนค่า R_L เท่ากับ 0
20. $\cos\theta_{st}$ $= \cos\theta_1$ แทนค่า R_L เท่ากับ 0
21. R_{01} $= R_1 + R_2'$
- R_2' $= a^2 R_2$
22. X_{01} $= X_1 + X_2'$
- X_2' $= a^2 X_2$
23. R_L' $= a^2 R_L$

$$= a^2 \left(\frac{1-s}{s} \right) R_2$$

24. a = อัตราส่วนจำนวนของขดลวด Start /rotor

= turn ratio

25. Power developed = $3I_1^2 R_L'$

26. ต่อ Y $V_{Line} = \sqrt{3} V_{phase}$

$I_{Line} = I_{phase}$

ต่อ Δ $V_{Line} = V_{phase}$

$I_{Line} = \sqrt{3} I_{phase}$

27. Power_{2φ} = $3V_{\phi} I_{\phi} \cos\theta$

= $\sqrt{3} V_L I_L \cos\theta$

$\cos\theta = \frac{P_{3\phi}}{3V_{\phi} I_{\phi} \cos\theta}$

= $\frac{P_{3\phi}}{\sqrt{3} V_L I_L \cos\theta}$

แบบประเมินผลการเรียน

หน่วยที่ 4

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

คำสั่ง จงทำเครื่องหมาย X ลงข้อที่ถูกต้อง

1. ข้อใดกล่าวถูกต้องเกี่ยวกับ “Induction Motor”
 - ก. การต่อวงจรของขดลวดถ้ำเป็นแบบ Squirrel cage จะมีปลายสาย 9 เส้น
 - ข. นำไปใช้งานลักษณะความเร็วมอเตอร์เปลี่ยนแปลงตามสภาพของโหลด
 - ค. การต่อวงจรของขดลวดถ้ำเป็นแบบ Wound มีปลายสาย 6 เส้น
 - ง. นำไปใช้งานลักษณะต้องควบคุมความเร็วคงที่
2. ข้อใดกล่าวไม่ถูกต้องเกี่ยวกับ “Slip”
 - ก. Slip คือตัวแปรที่จะบอกถึงความแตกต่างระหว่าง Synchronous Speed กับความเร็วของ motor
 - ข. ความเร็ว Slip มีหน่วยเป็น R.P.M
 - ค. ความเร็ว Slip คือ ความแตกต่างระหว่าง Synchronous Speed กับความเร็วของ motor
 - ง. ไม่มีข้อถูก
3. $\text{Slip Speed} = N_s - N_r$ จากสมการข้างต้น N_r หมายถึงอะไร มีหน่วยเป็นอะไร
 - ก. Motor Speed, R.P.M
 - ข. Synchronous Speed, R.P.M
 - ค. Rotor Speed, R.P.M
 - ง. Rotor Speed, m/s

ข้อความต่อไปนี้ จงตอบคำถาม ข้อ 4-5

1. ไม่สามารถลดการกระชากไฟตอนเริ่มต้น
 2. ช่วยลดการสึกหรอของเครื่องจักร และป้องกันการสูญเสียจากการทำงานของมอเตอร์
 3. เครื่องควบคุมความเร็วรอบจะเลือกใช้ความเร็วรอบที่เหมาะสมตามความต้องการของงานแต่ละประเภทได้
 4. เครื่องควบคุมความเร็วรอบจะทำปรับเปลี่ยนความถี่และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
 5. เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์จะทำการควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิด (Closed loop control)
 6. เครื่องควบคุมความเร็วรอบจะทำปรับเปลี่ยนจำนวนขดลวดภายในให้ลดลงหรือเพิ่มตามภาระโหลด
4. ข้อใดคือข้อดีของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วมอเตอร์
- ก. ข้อ 2,3
 - ข. ข้อ 1,4
 - ค. ข้อ 1,5

ง. ถูกทุกข้อ

5. ข้อใดคือหลักการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วมอเตอร์

ก. ข้อ 4

ข. ข้อ 5

ค. ข้อ 6

ง. ข้อ ก และ ข ถูก

6. โบล์วเวอร์ถูกควบคุมความเร็วรอบโดยใช้อินเวอร์เตอร์ให้ลดลงเป็น 50% ของความเร็วเต็มพิกัด ถ้าปริมาณอากาศขณะเดินเต็มที่เป็น $5,000 \text{ m}^3/\text{min}$ ความดัน 100 Pa กำลังที่เพลา 50 kW (ประสิทธิภาพของโบล์วเวอร์เปลี่ยนจาก 90% เป็น 80%) ถ้าโรงงานทำงาน 16 ชั่วโมง/วัน 300 วัน/ปี จงคำนวณผลการประหยัดประมาณเท่าไร โดยคิดที่อัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 4.23 บาท/kWh

ก. 90,2400.0 บาท /ปี

ข. 456,000.0บาท /ปี

ค. 872,437.5 บาท /ปี

ง. 902,400.0 บาท /ปี

7. การปรับความเร็วรอบของมอเตอร์จะทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์เพิ่มขึ้นประมาณกี่เปอร์เซ็นต์

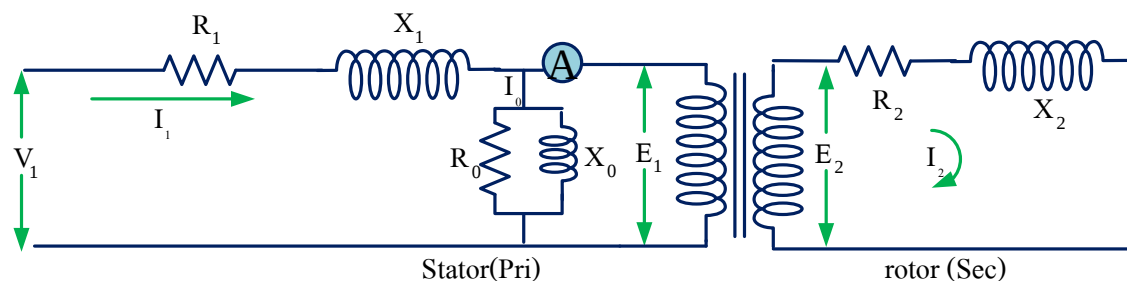
ก. 5 %

ข. 10%

ค. 15 %

ง. 20%

จากรูปวงจรเทียบเคียงของของ induction motor จงตอบคำถามข้อ 8-9



8. จากรูปวงจรเทียบเคียงที่กำหนด Parameter R_0 คืออะไร

ก. ความต้านทานของขดลวด armature ต่อเฟส

ข. ความต้านทานของขดลวดที่อยู่ในวงจร Rotor ต่อเฟส

ค. ความต้านทานเสมือนของแกนเหล็ก

ง. ความต้านทานของ Stator

9. จากรูปวงจรเทียบเคียง ขณะที่ Rotor อยู่กับที่มีลักษณะคล้าย Equivalent ckt ของ Transformer แต่ขดลวดด้าน Secondary ถูก Short Circuit เข้าด้วยกันอยู่แล้ว เมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าทางด้าน Primary จะเกิดอะไรขึ้น

ก. ไม่มีกระแสไฟฟ้า I_1 ไหลในวงจรของ rotor

ข. จะมีกระแสไฟฟ้า I_1 ไหลในวงจรของ rotor ทันที

ค. ไม่มีกระแสไฟฟ้า I_2 ไหลในวงจรของ rotor

ง. จะมีกระแสไฟฟ้า I_2 ไหลในวงจรของ rotor ทันที

10. ข้อใดกล่าวถึง Rotor Culloss ไม่ถูกต้อง

ก. เป็นกำลังที่สูญเสียในความต้านทานของขดลวดด้าน Rotor

ข. Rotor Culloss มีค่าเท่ากับ $3I_2^2 R_2$

ค. เป็นกำลังส่วนที่ทำให้เกิดความร้อน

 ง. Rotor Culloss มีค่าเท่ากับ $3E_2 I_2 \cos \theta_2$

11. ข้อใดกล่าวถึง Torque developed ได้ถูกต้อง

ก. แรงบิดที่ Rotor สักขึ้นเพื่อเอาชนะแรงต้านทานการหมุนของโหลดและความฝืดรวม

ข. เรียกอย่างหนึ่งว่า Gauss Torque

ค. คำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด และ Power dived

ง. ถูกทุกข้อ

12. ข้อใดกล่าวถูกต้องในการที่ใช้งานมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและช่วยลดค่าไฟของมอเตอร์

ก. เลือกมอเตอร์ที่มีแรงบิดสูงกว่างานที่ใช้

ข. เลือกมอเตอร์ที่มีแรงบิดเหมาะสมกับโหลด

ค. เลือกมอเตอร์ที่มีแรงบิดต่ำกว่างานที่ใช้

ง. เลือกมอเตอร์ที่มีความถี่เหมาะสมกับโหลด

13. Rotor copper loss คืออะไร

ก. กำลังงานส่วนที่เหลือจากหักค่าสูญเสียใน Stator ออกแล้ว

ข. กำลังงานไฟฟ้าส่วนที่ส่งข้ามช่องว่างอากาศจาก Stator

ค. กำลังงานไฟฟ้าส่วนที่เปลี่ยนรูปเป็นกำลังงานกล

ง. กำลังงานที่สูญเสียในความต้านทานขดลวด Rotor

14. Rotor input คืออะไร

ก. กำลังงานส่วนที่เหลือจากหักค่าสูญเสียใน Stator ออกแล้ว

ข. กำลังงานไฟฟ้าส่วนที่ส่งข้ามช่องว่างอากาศจาก Stator

ค. กำลังงานไฟฟ้าส่วนที่เปลี่ยนรูปเป็นกำลังงานกล

ง. กำลังงานที่สูญเสียในความต้านทานขดลวด Rotor

15. Power developed คืออะไร

ก. กำลังงานส่วนที่เหลือจากหักค่าสูญเสียใน Stator ออกแล้ว

ข. กำลังงานไฟฟ้าส่วนที่ส่งข้ามช่องว่างอากาศจาก Stator

ค. กำลังงานไฟฟ้าส่วนที่เปลี่ยนรูปเป็นกำลังงานกล

ง. กำลังงานที่สูญเสียในความต้านทานขดลวด Rotor

16. ประสิทธิภาพเชิงพลังงานของมอเตอร์ หาได้จากสูตรอะไร

ก. $\eta = \frac{0.754 \times hp \times Load}{P_i}$

ข. $\eta = \frac{0.754 \times Load}{P_i}$

ค. $\eta = \frac{0.754 \times RPM \times Load}{P_i}$

ง. $\eta = \frac{Load}{P_i}$

17. NEMA ย่อมาจากอะไร

ก. Nation Electrical Manufacturers Assistion

ข. Nation Electrical Manufacturers Association

ค. Natural Elector Manufacturers Assistion

ง. Natural Electrical Manufacturers Association

18. ข้อใดกล่าวได้ถูกต้องของลักษณะของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงที่ลดการสูญเสีย

ก. การลดสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์

ข. การลดสูญเสียที่เกิดจากความเสียดทาน

ค. การลดสูญเสียแกนเหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์

ง. ถูกทุกข้อ

19. เกณฑ์อ้างอิงประสิทธิภาพขั้นต่ำของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงใดสามารถนำพิจารณามอเตอร์เลือกมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

ก. พว.1008-1:2547

ข. IEEE 112 Test Method B

ค. IEC 60034-2

ง. ถูกทุกข้อ

20. มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงโดยทั่วไปจะมีราคาสูงกว่ามอเตอร์ทั่วไป 25 -40 % แต่สามารถให้ระยะเวลาคืนทุนของราคาที่จ่ายเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะมอเตอร์ที่มีชั่วโมงใช้งานสูงตั้งแต่ชั่วโมงต่อปีขึ้นไป

ก. 1,000

ข. 2,000

ค. 3,000

ง. 4,000

