



ผลกระทบของการปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิหม้อแปลงไฟฟ้า

ต่อโหลดทางไฟฟ้า

EFFECT OF THE SECONDARY VOLTAGE TRANSFORMER
ADJUSTMENT ON ELECTRICAL LOADS

นายสามารถ

สวนมา

รหัส 47361720

นางสาวมยุรีย์

อุดมเลิศ

รหัส 47364005

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่รับ.....๒...../.....๑.๗...../.....๕๒.....

เลขทะเบียน.....๑.๔๓๔๕๒๒๕.....

เลขเรียกหนังสือ.....๒๕.....

มหาวิทยาลัยนเรศวร ๕๖๕๔ ๗

๒๕๕๐

ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา ๒๕๕๐



ใบรับรองโครงการวิศวกรรม

หัวข้อโครงการ ผลกระทบของการปรับแรงดันทุติยภูมิหรือแปลงไฟฟ้าต่อโหลดทาง
ไฟฟ้า

ผู้ดำเนินโครงการ นายสามารถ สอนมา รหัสสนិត 47361720
นางสาวมยุรีย์ อุดเลิศ รหัสสนិត 47364005


อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.แคทริยา สุวรรณศรี

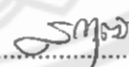
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

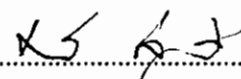
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2550

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อนุมัติให้โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรม


.....ประธานกรรมการ
(ดร.แคทริยา สุวรรณศรี)


.....กรรมการ
(อาจารย์สรวิทย์ วัฒนวงศ์พิทักษ์)


.....กรรมการ
(ดร.ชนพงศ์ สุวรรณศรี)

หัวข้อโครงการ	ผลกระทบของการปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทฤษฎีหม้อแปลงไฟฟ้าต่อ โหลดทางไฟฟ้า		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายสามารถ	สวนมา	รหัสบัณฑิต 47361720
	นางสาวมยุรี	อุคเลิศ	รหัสบัณฑิต 47364005
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. แคทรียา	สุวรรณศรี	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า		
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์		
ปีการศึกษา	2550		

บทคัดย่อ

โครงการนี้ศึกษาการประหยัดพลังงานไฟฟ้าโดยการปรับแทปแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบวาริแอกในระหว่างกรณีที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีโหลดและไม่มีโหลด จากการต่อวงจรไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบวาริแอกและได้ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า เพื่อนำมาคำนวณหากำลังไฟฟ้าที่สามารถลดลงได้เมื่อมีการปรับแทปแรงดันไฟฟ้าในขณะที่มีโหลดและไม่มีโหลด เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณจากสูตรการประหยัดพลังงานไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด (เอกสารอ้างอิง 1) ผลจากการวิเคราะห์พบว่าในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีการต่อโหลด ผลการวัดค่าการประหยัดพลังงานเมื่อมีการปรับแทปจะมีค่าน้อยกว่าค่าการประหยัดพลังงานที่ได้จากสูตรคำนวณขณะไม่มีโหลด จึงแสดงให้เห็นว่า สูตรการประหยัดพลังงานในเอกสารอ้างอิง 1 ไม่สามารถนำมาใช้คำนวณการประหยัดพลังงานไฟฟ้าเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ามีการต่อโหลด อย่างไรก็ตามผลการประหยัดพลังงานของทั้งสองกรณีสามารถแสดงให้เห็นว่ามีการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้จริงหลังจากที่ได้มีการปรับแทปแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกับพิกัดของโหลด ดังนั้นโครงการนี้สามารถเป็นประโยชน์สำหรับงานอุตสาหกรรมและโหลดที่ต้องการประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้า

Project Title Effect of the Secondary Transformer Voltage Adjustment on Electrical Loads.

Name Mr. Samart Suanma ID. 47361720
Miss Mayuree Udlerd ID. 47364005

Project Advisor Dr. Cattareeya Suwanasri

Major Electrical Engineering.

Department Electrical and Computer Engineering.

Academic Year 2007

ABSTRACT

This project aims to study electrical energy saving by adjusting tap-changing voltage of the three phase variac transformer during no-load and on-load situation. When transformer is connected to power supply, the experiment is proposed to measure voltage, current and power in order to calculate power consumption during no-load and on-load transformers. The experimental results from both cases will be compared with the energy saving formula during no-load situation as given in Reference 1. The results from both cases show that the energy consumption by adjusting tap-changing of the transformer connected with loads is the lower value than by calculating with the formula in Reference 1. However, the energy consumption can be reduced after changing the tap-setting of the transformer in order to reduce the voltage level into the appropriate voltage level because of the limitation of electrical devices on their rated voltage. This project can benefit for the industrial and commercial loads, which need to save the energy consumption.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โดยมุ่งศึกษาในเรื่องการประหยัดพลังงานไฟฟ้าโดยการปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิให้เหมาะสมของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขณะมีโหลด ซึ่งจากการศึกษาพบว่าสามารถลดพลังงานไฟฟ้าได้จริงและสามารถนำไปใช้งานได้จริงอีกด้วย

โครงการเรื่อง ผลกระทบของการปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิหม้อแปลงไฟฟ้าต่อโหลดทางไฟฟ้า นี้สำเร็จด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจาก ดร.แคทรียา สุวรรณศรี และ ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล ซึ่งท่านได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ตลอดจนให้ความสนใจใส่ใจในการตรวจแก้ไข และปรับปรุงข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยดีตลอดมา จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่เอื้อเฟื้อสถานที่ วัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการทำโครงการ

ขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ทุกท่านที่กรุณาให้กำลังใจและความช่วยเหลืออย่างดีตลอดมา ท้ายที่สุดนี้ คณะผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ผู้เป็นที่รัก ผู้ให้กำลังใจและให้โอกาส การศึกษาอันมีค่ายิ่ง และขอขอบคุณพี่ ๆ และเพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือ เกี่ยวกับการดำเนินโครงการครั้งนี้

คณะผู้ดำเนินโครงการ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบข่ายของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนของการดำเนินงาน	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.7 งบประมาณของโครงการ	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	
2.1 การประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากอุปกรณ์และเครื่องจักรกลไฟฟ้าต่าง ๆ	4
2.2 กำลังไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส	6
2.3 หม้อแปลงไฟฟ้า	12
2.4 หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส	28
2.5 มอเตอร์อินดักชัน	33
2.6 หลอดไฟฟ้า	38
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	48
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน	49
3.3 การหาการลดลงของกำลังไฟฟ้า	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 การศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด	52
4.2 การศึกษาพฤติกรรมของโหลดใช้ที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน	53
4.3 การศึกษาพฤติกรรมของโหลดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน	54
4.4 การศึกษาพฤติกรรมของโหลดฟลูออเรสเซนต์ที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน	55
4.5 การศึกษาพฤติกรรมของโหลดโซเดียมความดันสูงที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน	56
4.6 การศึกษาพฤติกรรมของปั้มน้ำที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน	59
4.7 การศึกษาพฤติกรรมของพัดลมที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน	60
4.8 การศึกษาพฤติกรรมของมอเตอร์อินดักชันที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน	61
4.9 การวิเคราะห์ผล	63
บทที่ 5 บทสรุป	
บทสรุป	66
ข้อเสนอแนะ	66
เอกสารอ้างอิง	67
ประวัติผู้เขียน โครงการงาน	68

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ประสิทธิภาพของหม้อแปลง	5
2.2 ค่าประมาณอุณหภูมิของไส้หลอด	40
4.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง	52
4.2 อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง	52
4.3 การทดสอบของหลอดไส้เมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า	53
4.4 การทดสอบของหลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า	54
4.5 การทดสอบของหลอดฟลูออเรสเซนต์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า	55
4.6 การทดสอบของหลอดโซเดียมความดันสูงเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า	56
4.7 การทดสอบของป๊มป์น้ำเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า	59
4.8 การทดสอบของพัดลมเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า	60
4.9 การทดสอบมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส เมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า	61
4.10 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองรวมหลอดหนึ่งเฟส	63
4.11 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองหลอดมอเตอร์อินดักชันสามเฟส	64
4.12 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากสมการกับผลการคำนวณที่ได้จากการทดลอง	65

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 คลื่นกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ตามคาบเวลา	7
2.2 วงจรไฟฟ้าต้องขนาน RL และแผนภาพเฟสเซอร์ที่สัมพันธ์กัน	8
2.3 แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าในเฟสกับแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าผลตามคาบเวลา	8
2.4 แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าตามหลัง แรงดันไฟฟ้าเป็นมุม 90° และกำลังไฟฟ้าผลตาม คาบเวลา	9
2.5 การพิจารณาคาปาซิเตอร์	11
2.6 วงจรหม้อแปลงไฟฟ้าพื้นฐาน	12
2.7 รูปคลื่นที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า	12
2.8 เวกเตอร์จากรูปคลื่น	13
2.9 รูปคลื่นของเส้นแรงแม่เหล็ก	14
2.10 เวกเตอร์ของกระแสขณะที่ไม่มีโหลด	16
2.11 การเกิดเส้นแรงแม่เหล็กในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีโหลด	17
2.12 เวกเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อมีโหลด	19
2.13 หม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อมีโหลด	19
2.14 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า	20
2.15 วงจรสมมูลของด้านขดทุติยภูมิที่ย้ายไปขดปฐมภูมิ	20
2.16 วงจรสมมูลของด้านขดทุติยภูมิที่ย้ายไปขดปฐมภูมิ	21
2.17 วงจรสมมูลโดยประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้า	21
2.18 วงจรสมมูลโดยประมาณ	21
2.19 วงจรสมมูลเมื่อไม่คิด I_0	22
2.20 วงจรสมมูลโดยประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้า	23
2.21 เวกเตอร์ไดอะแกรมเมื่อเพาเวอร์แฟคเตอร์ต่าง ๆ	23
2.22 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต้	26
2.23 หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบวาริแอด (ที่ใช้ในการทดลอง)	28
2.24 การวางขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส	28
2.25 เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า	29
2.26 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบสตาร์-สตาร์	30
2.27 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบเดลต้า-เดลต้า	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบสตาร์-เคลด้า	31
2.29 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบเคลด้า – สตาร์	32
2.30 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบโอเพ่นเคลด้า	33
2.31 ลักษณะของมอเตอร์อินดักชัน	34
2.32 มอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส แบบ 10 ขั้ว	34
2.33 โครงสร้างและการวางขดลวดของมอเตอร์อินดักชัน	35
2.34 การเกิดทอร์กในมอเตอร์อินดักชันที่มีโรเตอร์กรงกระรอก	36
2.35 วงแหวนลื่นของโรเตอร์แบบพันขดลวด	36
2.36 คุณสมบัติของมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส 4 ขั้ว	37
2.37 ตัวอย่างผลการทดสอบภาวะตรงตัวหมุนของมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส 4 ขั้ว	37
2.38 ส่วนประกอบของหลอดไส้	38
2.39 โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์	40
2.40 ลักษณะตัวหลอดในรูปแบบต่างๆ	41
2.41 ขั้วหลอดฟลูออเรสเซนต์	41
2.42 ขั้วอิเล็กทรอนิกส์	42
2.43 สตาร์ทเตอร์	42
2.44 โครงสร้างและส่วนประกอบของหลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์	44
2.45 หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์	45
2.46 ปรากฏไฟจากการอาร์ค เกิดขึ้นที่ขั้วบริเวณอิเล็กทรอนิกส์	46
2.47 หลอดโซเดียมความดันสูง	47
2.48 วงจรหลอดโซเดียมและขยายส่วนอิเล็กทรอนิกส์	48
3.1 วงจรใช้ทดสอบหลอดประเภทแสงสว่าง	49
3.2 การต่อวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์	49
3.3 การต่อวงจรของหลอดโซเดียมความดันสูง	50
3.4 การต่อวงจรของป้มน้ำ	50
3.5 การต่อวงจรของพัดลม	50
3.6 การต่อวงจรของมอเตอร์อินดักชัน	50

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 กำลังไฟฟ้าในการทดสอบหลอดไส้	53
4.2 กำลังไฟฟ้าในการทดสอบหลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์	54
4.3 กำลังไฟฟ้าในการทดสอบหลอดฟลูออเรสเซนต์	55
4.4 กำลังไฟฟ้าในการทดสอบหลอดโซเดียมความดันสูง	58
4.5 กำลังไฟฟ้าในการทดสอบบีมน์น้ำ	60
4.6 กำลังไฟฟ้าในการทดสอบพัดลม	61
4.7 กำลังไฟฟ้าในการทดสอบมอเตอร์อินดักชัน	62



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็นต่อมนุษย์มาก เพราะทุกสิ่งทุกอย่างที่ตอบสนองความสะดวกสบายให้แก่มนุษย์ก็ล้วนแต่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นตัวช่วยให้อุปกรณ์นั้นทำงานได้ แต่พลังงานไฟฟ้าที่เราใช้ในปัจจุบันนั้นสามารถที่จะผลิตได้ในหลายกระบวนการซึ่งแต่ละกระบวนการนั้นต่างต้องใช้ต้นทุนในการสร้างโรงไฟฟ้าและที่สำคัญคือมีส่วนกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย

เนื่องด้วยทุกวันนี้ที่ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น การผลิตกระแสไฟฟ้าก็ต้องผลิตเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน ผลที่ตามมาคือค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จึงได้มีหน่วยงานหลาย ๆ ด้าน ทั้งภาครัฐและเอกชนต่างเล็งเห็นความสำคัญในเรื่องการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าให้น้อยลง

การลดพลังงานไฟฟ้า ไม่ได้หมายถึงการไม่ใช้พลังงานไฟฟ้า แต่เป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าเกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งกระทำได้หลายวิธีทั้งตัวบุคคล เครื่องใช้ไฟฟ้า หรือเครื่องจักรกลไฟฟ้าขนาดใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น

หม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไปต้องมีการสูญเสียภายในเกิดขึ้น ซึ่งการสูญเสียนี้ทำให้ประสิทธิภาพในหม้อแปลงลดลง และจะส่งผลถึงการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยไม่ได้ประโยชน์สูงสุด ซึ่งเทคนิคการประหยัดไฟฟ้าในหม้อแปลงก็มีหลายวิธีที่ปฏิบัติกันในปัจจุบัน โดยการปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ด้วยเหมือนกัน ซึ่งสามารถแยกได้เป็นสองกรณี คือ กรณีที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีโหลด และกรณีที่หม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีโหลด ซึ่งการปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีโหลดต้องคำนึงถึงผลที่เกิดขึ้นกับโหลดด้วย เพราะว่าถ้าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดมีค่าน้อยเกินไป อาจทำให้โหลดเกิดความเสียหายได้ จึงได้ก่อให้เกิดการศึกษาและได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองกรณี เพื่อให้ผู้ที่สนใจสามารถนำไปปฏิบัติเพื่อให้เกิดประโยชน์ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงขณะไม่มีโหลด เทียบกับกำลังสูญเสียที่ลดลงขณะที่มีโหลด

1.2.2 เพื่อออกแบบการทดลองการลดกำลังไฟฟ้าโดยการปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อโหลดทางไฟฟ้า

1.2.3 เพื่อทำการทดลองการปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทฤษฎีต่อโหลดทางไฟฟ้า

1.2.4 เพื่อนำผลการทดลองที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลง

1.3 ขอบข่ายของโครงการงาน

1.3.1 ศึกษากำลังสูญเสียที่ลดลงในกรณีขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีโหลดและกรณีที่มีโหลด

1.3.2 ออกแบบการทดลอง

1.3.3 ทำการทดลอง

1.3.4 นำผลการทดลองมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อหาค่ากำลังสูญเสียที่ลดลงของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างกรณีที่ไม่มีโหลดและกรณีที่มีโหลด

1.4 ขั้นตอนของการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติ พฤติกรรมโดยทั่วไป ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส แบบวาริแอก

1.4.2 ออกแบบการทดลองเพื่อหาค่ากำลังสูญเสียของหม้อแปลงขณะที่มีโหลด โดยแยกโหลดเป็น 2 ประเภท คือ โหลดแสงสว่างและโหลดประเภทมอเตอร์

1.4.3 ทดลองการปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อโหลดทางไฟฟ้าต่าง ๆ และเก็บข้อมูล

1.4.4 นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์โดยหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงในหม้อแปลงไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่หม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดและกรณีที่มีโหลด

1.4.5 สรุปผลการทดลองและจัดทำรูปเล่มโครงการงาน

1.5 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	ปี 2551				
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติ พฤติกรรม โดยทั่วไป ภายในหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบวาริแอก		←→			
2. ออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าตั้งสูญเสียของหม้อแปลง ขณะที่มีโหลด โดยแยกโหลดเป็น 2 ประเภท คือ โหลดแสงสว่างและโหลดประเภทมอเตอร์			←→		
3. ทดลองการปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้าต่อโหลดทางไฟฟ้าต่าง ๆ และเก็บข้อมูล			←→		
4. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์โดยหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ลดลง			←→		
5. สรุปผลการทดลองและจัดทำรูปเล่ม ครงงาน				←→	

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถเข้าใจหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้าและสามารถนำพฤติกรรมที่ได้ศึกษามาประยุกต์ใช้ในการลดพลังงานไฟฟ้า

1.6.2 สามารถออกแบบการทดลองได้

1.6.3 สามารถทดลองเพื่อทดสอบการปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องและปลอดภัย

1.6.4 สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้อย่างถูกต้อง

1.6.5 สามารถนำไปใช้งานจริงเพื่อให้เกิดการลดพลังงานไฟฟ้าได้

1.7 งบประมาณของโครงการ

1.7.1 ค่าถ่ายเอกสารและค่าเช่าเล่ม ครงงาน

1.7.2 ค่าแผ่นซีดี

1.7.3 ค่าหนังสือข้อมูลเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้า

1.7.4 ค่าหมึกพิมพ์

รวมเป็นเงิน 2,000 บาท (สองพันบาทถ้วน)

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 การประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากอุปกรณ์และเครื่องจักรกลไฟฟ้าต่าง ๆ [1-2]

อุปกรณ์และเครื่องจักรกลไฟฟ้าหลัก ๆ ที่ใช้ในโรงงานไฟฟ้าอุตสาหกรรม ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้า ระบบอัดอากาศ ระบบทำความเย็น ระบบทำความร้อน และระบบแสงสว่าง เป็นต้น อุปกรณ์และเครื่องจักรไฟฟ้าเหล่านี้มีใช้ในอาคาร เช่นกัน ดังนั้นเทคนิคต่าง ๆ ในที่นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอาคารได้

2.1.1 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ใช้แปลงระดับแรงดันไฟฟ้าจากแรงดันสูงเป็นแรงดันต่ำหรือแรงดันต่ำเป็นแรงดันสูงตามความต้องการใช้งาน เพื่อให้การดำเนินการประหยัดพลังงานในหม้อแปลงไฟฟ้ามีประสิทธิภาพ ควรมีความเข้าใจถึงการสูญเสียพลังงานในหม้อแปลงก่อน ซึ่งรายละเอียดของหม้อแปลงจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

เทคนิคการประหยัดไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า

1. เลือกใช้หม้อแปลงประสิทธิภาพสูงและมีขนาดที่เหมาะสมกับโหลด
2. ปลดแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงในขณะที่ไม่มีโหลด
3. ย้ายโหลดของหม้อแปลงที่มีโหลดน้อยมารวมกัน
4. ควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

ในที่นี้จะกล่าวถึงเทคนิคการประหยัดพลังงานในหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเท่านั้น

2.1.2 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

การปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิหรือโดยทั่วไปเป็นด้านแรงต่ำให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมจะช่วยลดพลังงานสูญเสียในขณะไม่มีโหลดได้ เนื่องจากพลังงานสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า ยกกำลังสอง การควบคุมแรงดันไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการปรับ Tap ของหม้อแปลงหรือติดตั้งอุปกรณ์ปรับระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์นี้ออกจากจะทำหน้าที่ปรับระดับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมแล้ว ยังมีคุณสมบัติในการรักษาและช่วยลดกระแสไฟฟ้าสูญเสียในช่วงสตาร์ทเครื่องจักร ทำให้อายุการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้ามากขึ้น

ตัวอย่างการปรับแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม [1]

ตารางที่ 2.1 ประสิทธิภาพของหม้อแปลง

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงประสิทธิภาพสูงกับหม้อแปลงธรรมดาที่พิกัด							
ขนาด (กิโลโวลต์ แอมป์)	กิโลโวลต์/ โวลต์	ธรรมดา			ประสิทธิภาพสูง		
		สูญเสีย ขณะไม่มี โหลด(W)	สูญเสีย เนื่องจาก โหลด(W)	ประสิทธิ ภาพ (%)	สูญเสีย ขณะไม่มี โหลด(W)	สูญเสีย เนื่องจาก โหลด(W)	ประสิทธิ ภาพ (%)
315	22/400	900	3,900	98.47	700	3,900	98.53
400	22/400	980	4,600	98.60	850	4,600	98.63
500	22/400	1,150	5,500	98.67	1,000	5,500	98.70
630	22/400	1,350	6,500	98.75	1,200	6,500	98.77
800	22/400	1,600	11,000	98.43	1,300	11,000	98.46
1,000	22/400	1,900	13,500	98.46	1,600	13,500	98.49
1,250	22/400	2,300	16,400	98.50	1,800	16,400	98.54
1,500	22/400	2,800	19,800	98.50	2,100	19,800	98.54
2,000	22/400	3,250	24,000	98.63	2,700	24,000	98.67

จากการตรวจสอบการใช้พลังงาน

หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1,000 กิโลโวลต์แอมป์
แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ 411 โวลต์
แรงดันไฟฟ้าจุดใช้งานที่ไกลที่สุด 404 โวลต์

แรงดันสูงขึ้นจะทำให้พลังงานสูญเสียขณะไม่มีโหลดของหม้อแปลงและของโหลด
เหนี่ยวนำ เช่น มอเตอร์ไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมสูงขึ้น อายุการใช้งานสั้นลง ถ้าลด
แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิเหลือ 391 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าจุดใช้งานที่ไกลที่สุดเป็น 384 โวลต์ ซึ่ง
ใกล้เคียงกับพิกัด (380 โวลต์)

หม้อแปลงไฟฟ้า

พลังงานไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดลดลง = กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด

$$x [(V_1/V_2)^2 - 1] \times \text{จำนวนชั่วโมงใน 1 ปี} \quad (2.1)$$

เมื่อ V_1 คือ แรงดันไฟฟ้าทุติยภูมิก่อนปรับปรุง

V_2 คือ แรงดันไฟฟ้าทุติยภูมิหลังปรับปรุง

$$= 1.9 \times [(411/391)^2 - 1] \times 24 \times 365$$

$$= 1,746 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมง / ปี}$$

มอเตอร์ไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ 200 กิโลวัตต์

ประสิทธิภาพ 85 %

กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด = ร้อยละ 30 ของพลังไฟฟ้าสูญเสียรวม

เวลาใช้งาน = 8 ชั่วโมงต่อวัน 300 วันต่อปี

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด = $200 \times 0.15 \times 0.3$

$$= 9 \text{ กิโลวัตต์}$$

พลังงานไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดลดลง = $9 \times [(404/384)^2 - 1] \times 8 \times 300$

$$= 2,309 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมง / ปี}$$

พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวม = 4,055 กิโลวัตต์ชั่วโมง / ปี

2.2 กำลังไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส [3]

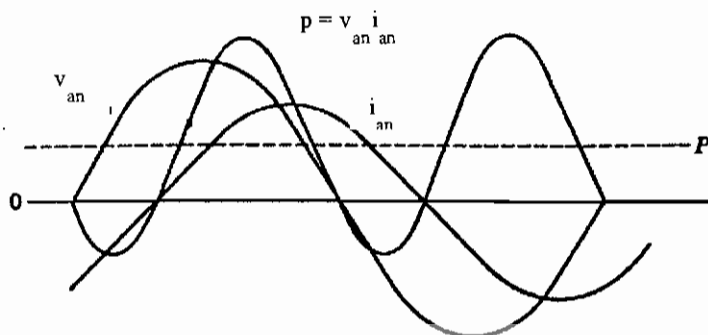
วิศวกรรมระบบไฟฟ้ากำลังต้องข้องเกี่ยวกับการบรรยายพิภักคความเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่สัมพันธ์กับแรงดันและกระแสไฟฟ้า หน่วยกำลังเรียกว่า วัตต์ กำลังวัตต์ถูกดูตกลงโดยโหลดทันที เป็นผลคุณของแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะหนึ่งที่ตกร้อมโหลดในวัตต์ และกระแสไฟฟ้าชั่วขณะหนึ่งสู่โหลดในแอมแปร์ หากชั่วโหลดแสดงเป็น a และ n ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าเป็น

$$v_{an} = V_{max} \cos \omega t$$

$$i_{an} = I_{max} \cos(\omega t - \theta)$$

กำลังไฟฟ้าชั่วขณะหนึ่งเป็น

$$p = v_{an} i_{an} = V_{max} I_{max} \cos \omega t \cos(\omega t - \theta) \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.1 คลื่นกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ตามคาบเวลา

มุม θ ในสมการเป็นบวกที่กระแสไฟฟ้าตามหลังแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้านำหน้าเป็นลบ ค่าบวก p เป็นพลังงานพิกัดที่ถูกเคลื่อนจากส่วนของระบบระหว่างจุด a และ n กำลังไฟฟ้าชั่วขณะหนึ่งเป็นบวกเมื่อ v_{an} และ i_{an} เป็นบวก และเป็นลบเมื่อ v_{an} และ i_{an} มีทิศตรงข้ามตามรูปที่ 2.1 กำลังไฟฟ้าบวกที่คำนวณเป็น $v_{an} i_{an}$ มีผลเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลตามทิศทางแรงดันไฟฟ้าตก และเป็นพิกัดการถ่ายโอนพลังงานไปยังโหลด ในทางกลับกัน $v_{an} i_{an}$ แสดงค่าลบเมื่อกระแสและแรงดันไฟฟ้าอยู่นอกเฟสเป็นมุม 90° กำลังขมomeหนึ่งจะเป็นบวกและลบเท่ากันที่ครึ่งไซเคิล และค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์

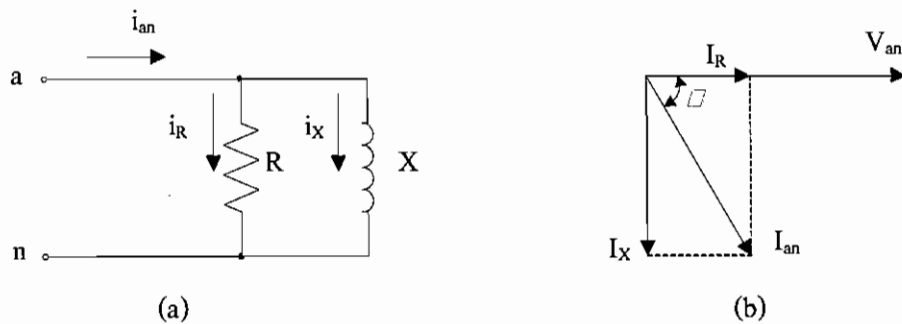
จากสมการตรีโกณมิติ ย่อสมการ (2.2) เป็น

$$p = \frac{V_{\max} I_{\max}}{2} \cos\theta(1 + \cos 2\omega t) + \frac{V_{\max} I_{\max}}{2} \sin\theta \sin 2\omega t \quad (2.3)$$

ซึ่ง $\frac{V_{\max} I_{\max}}{2}$ อาจแทนที่ด้วยผลคูณของแรงดันไฟฟ้า rms และกระแสไฟฟ้า $|V_{an}| |I_{an}|$

หรือ $|V||I|$

อีกวิธีหนึ่งที่หาค่ากำลังไฟฟ้าชั่วขณะหนึ่ง คือ พิจารณาองค์ประกอบของกระแสไฟฟ้าในเฟสกับ v_{an} และองค์ประกอบมุม 90° ในเฟสกับ v_{an} เป็น i_R และจากรูป 2.2 (b) $|I_R| = |I_{an}| \cos\theta$ ถ้าค่าสูงสุดของ i_{an} เป็น I_{\max} แล้ว ค่าสูงสุดของ i_R เป็น $I_{\max} \cos\theta$ กระแสไฟฟ้าชั่วขณะหนึ่ง i_R ต้องอยู่ในเฟสกับ v_{an}



รูปที่ 2.2 วงจรไฟฟ้าต้องขบวนการ RL และแผนภาพเฟสเซอร์ที่สัมพันธ์กัน

ส่วน $V_{an} = V_{max} \cos \omega t$

$$i_R = I_{max, i_R} \cos \theta \cos \omega t \tag{2.4}$$

องค์ประกอบของ i_{an} ตามหลัง v_{an} เป็นมุม 90°

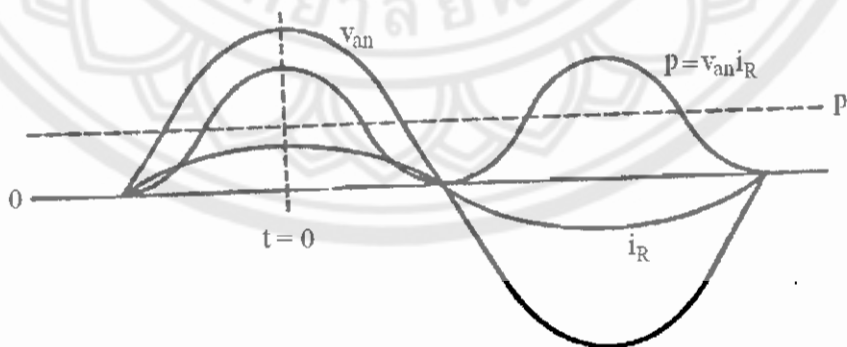
$$i_X = I_{max, i_X} \sin \theta \sin \omega t \tag{2.5}$$

แล้ว

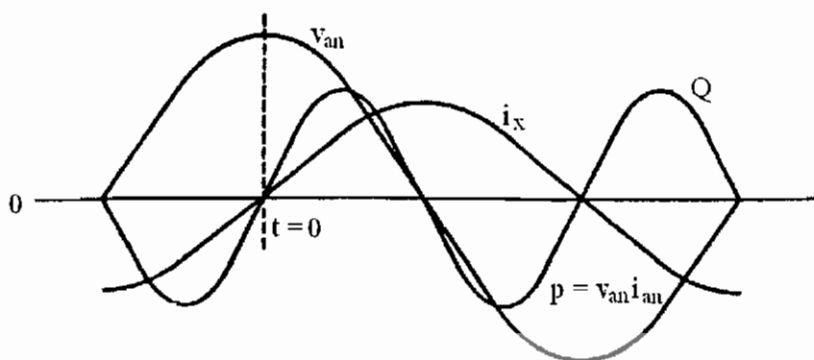
$$v_{an} i_R = V_{max} I_{max} \cos \theta \cos^2 \omega t$$

$$= \frac{V_{max} I_{max}}{2} \cos \theta (1 + \cos 2\omega t) \tag{2.6}$$

ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าในอินตักแดนซ์และเป็นเทอมที่ 2 ในสมการ (2.3) รูป 2.4 แสดง v_{an}, i_X ตาม t



รูปที่ 2.3 แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าในเฟสกับแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าผลตามคาบเวลา



รูปที่ 2.4 แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าตามหลัง แรงดันไฟฟ้าเป็นมุม 90° และกำลังไฟฟ้าผลตามคาบเวลา

จากการตรวจสอบสมการ (2.3) แสดงว่าเทอมแรกประกอบด้วย $\cos \theta$ เป็นบวกเสมอและมีค่าเฉลี่ยเป็น

$$P = \frac{V_{\max} I_{\max}}{2} \cos \theta \quad (2.7)$$

หรือเมื่อค่า rms ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าแทน

$$P = |V||I| \cos \theta \quad (2.8)$$

P เป็นปริมาณไฟฟ้า ค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้า P เรียกว่า กำลังไฟฟ้าที่ใช้จริง (Real power) มีหน่วยเป็นวัตต์ แต่วัตต์เป็นหน่วยเล็ก ๆ ที่สัมพันธ์กับปริมาณกำลังไฟฟ้าระบบซึ่ง P วัตต์เป็น กิโลวัตต์หรือเมกะวัตต์

ค่าโคซายน์ของมุมเฟส θ ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าเรียกว่า ตัวประกอบกำลัง กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Inductive current) ย่อมมีตัวประกอบกำลังไฟฟ้าตามหลังและนำหน้าจะถูกเรียกนำมาประยุกต์ใช้กับแรงดันไฟฟ้าได้หรือไม่

เทอมที่ 2 ของสมการ (2.3) ซึ่งประกอบด้วย $\sin \theta$ เป็นบวกและลบสลับกัน และมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ องค์ประกอบของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะหนึ่ง p เรียกว่า กำลังไฟฟารีแอกทีฟชั่วขณะหนึ่ง (Instantaneous reactive power) และแสดงการไหลของพลังงานที่เปลี่ยนแปลงเข้าและออกจากโหลด ค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าเดิน (pulsating power) เป็น Q เรียกว่า กำลังไฟฟารีแอกทีฟ หรือ โวลต์แอมแปร์รีแอกทีฟ (Reactive power or reactive voltamperes) ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการอธิบายการปฏิบัติงานของระบบไฟฟ้าต่อไป กำลังไฟฟารีแอกทีฟเป็น

$$Q = \frac{V_{\max} I_{\max}}{2} \sin \theta \quad (2.9)$$

หรือ

$$Q = |V| \times |I| \sin \theta \quad (2.10)$$

รากกำลังที่สองของผลรวมของกำลังสอง P และ Q เท่ากับผลคูณของ $|V|$ และ $|I|$

$$\sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(|V| \times |I| \cos \theta)^2 + (|V| \times |I| \sin \theta)^2} = |V| \cdot |I| \quad (2.11)$$

นั่นคือ P และ Q มีหน่วยมิติ (Dimensional units) เดียวกัน แต่มักให้หน่วย Q เป็นวาร์ สำหรับรีแอกทีฟโวลต์แอมแปร์ โดยทางปฏิบัติส่วนมากให้ Q เป็นกิโลวาร์หรือเมกะวาร์

วงจรไฟฟ้าอนุกรมที่ 2 เท่ากับ $R + jX$ เราสามารถแทนค่า $|I| |Z|$ ด้วย $|V|$ ในสมการ (2.8) และ (2.10) จะได้

$$P = |I|^2 |Z| \cos \theta \quad (2.12)$$

และ

$$Q = |I|^2 |Z| \sin \theta \quad (2.13)$$

$$\text{แล้ว } R = |Z| \cos \theta \text{ และ } X = |Z| \sin \theta$$

$$P = |I|^2 R \quad \text{และ} \quad Q = |I|^2 X \quad (2.11)$$

สมการ (2.8) และ (2.10) ให้วิธีการคำนวณตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอีกวิธีหนึ่งเมื่อเราพบว่า $Q/P = \tan \theta$ ดังนั้นตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็น

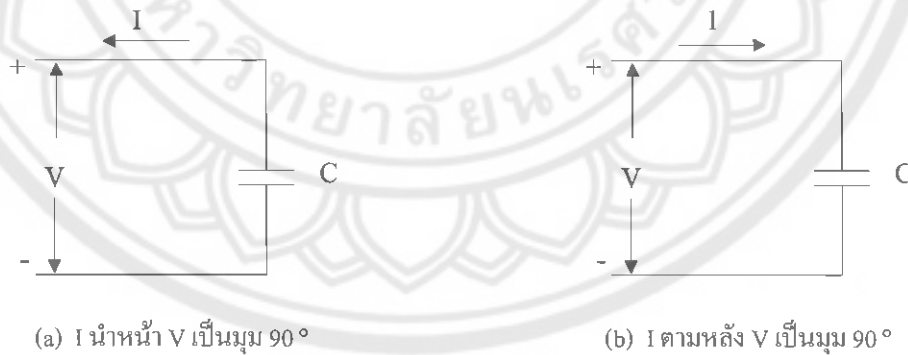
$$\cos \theta = \cos \left(\tan^{-1} \frac{Q}{P} \right)$$

หรือจากสมการ (2.8) และ (2.11)

$$\cos \theta = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

ถ้ากำลังไฟฟ้าชั่วขณะหนึ่งตามสมการ (2.3) เป็นกำลังไฟฟ้าในวงจรความจุไฟฟ้าเด่น (Predominantly capacitive circuit) กับ แรงดันไฟฟ้าอัด (Impressed voltage) เดียวกันแล้ว θ เป็นลบ ค่า $\sin \theta$ และ Q เป็นลบ ค่าความจุไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อขนาน กำลังไฟฟัรีแอกทีฟชั่วขณะหนึ่งของวงจร RL เป็นมุม 180° จากเฟสกับกำลังไฟฟัรีแอกทีฟชั่วขณะหนึ่งของวงจร RC วงจรกำลังไฟฟัรีแอกทีฟเป็นความแตกต่างระหว่าง Q วงจร RL และ Q วงจร RC ค่าโหลดเหนี่ยวนำเป็นบวก และค่าโหลดความจุไฟฟ้าเป็นลบ

วิศวกรระบบไฟฟ้ากำลังมักคิดว่า คาปาซิเตอร์เปรียบเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟัรีแอกทีฟ ค่าบวกมากกว่าโหลดที่มีกำลังไฟฟัรีแอกทีฟค่าลบ ความคิดนี้เป็นผลต่อกรออิงคาปาซิเตอร์เนกาทิฟ Q (Capacitor drawing negative Q) ที่ต่อขนานกับโหลดเหนี่ยวนำลด Q ที่ได้รับจ่ายจากระบบสู่โหลดเหนี่ยวนำ นั่นคือ การพิจารณาคาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ส่งกระแสไฟฟ้าตามหลังมากกว่าอุปกรณ์นำกระแสไฟฟ้านำหน้า ตามรูป 2.5 คาปาซิเตอร์ที่สามารถต่อขนานกับโหลดความเหนี่ยวนำไฟฟ้า สามารถปรับเพื่อให้กระแสไฟฟ้านำหน้าไหลผ่านคาปาซิเตอร์ในขนาดเท่ากัน ได้สู่อองค์ประกอบของกระแสไฟฟ้าในโหลดความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีกระแสไฟฟ้าตามหลังแรงดันไฟฟ้าเป็นมุม 90° ดังนั้น กระแสผลลัพท์อยู่ในเฟสกับแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นกำลังไฟฟัรีแอกทีฟบวก แต่วงจรกำลังไฟฟัรีแอกทีฟเป็นศูนย์ ตามเหตุผลนี้ทำให้วิศวกรระบบกำลังไฟฟ้าสะดวกต่อการพิจารณาคาปาซิเตอร์ซึ่งเป็นตัวจ่ายกำลังไฟฟัรีแอกทีฟนี้สู่โหลดความเหนี่ยวนำไฟฟ้า อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟัรีแอกทีฟจะเป็นบวกเมื่อไม่มีการกล่าวถึงค่าบวกหรือลบของมัน



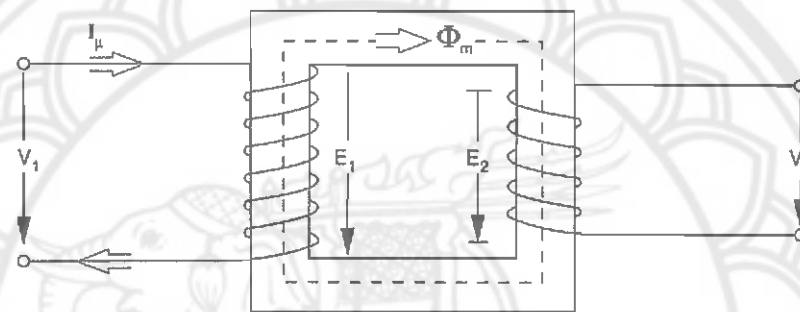
รูปที่ 2.5 การพิจารณาคาปาซิเตอร์ (a) เสมือนกระแสไฟฟ้านำหน้ารูปย่อยของวงจรแพสซีฟ และ (b) เสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าตามหลัง

2.3 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)[4]

2.3.1 หลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า

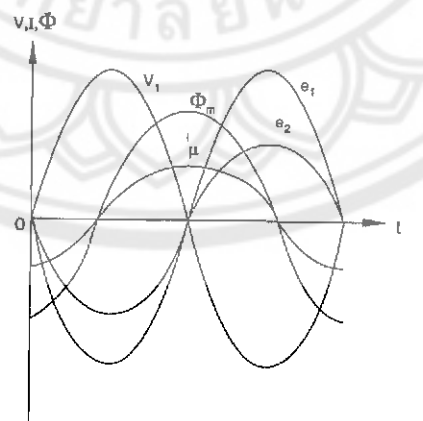
หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ไม่มีส่วนใดส่วนหนึ่งเคลื่อนที่เลย ทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายเทกำลังไฟฟ้าจากวงจรไฟฟ้าหนึ่งไปยังอีกวงจรไฟฟ้าหนึ่ง โดยที่ความถี่ของไฟฟ้าทั้งด้านไฟฟ้าเข้าและด้านไฟฟ้าออกมีค่าเท่ากัน (คงที่)

หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวด 2 ชุดพันอยู่บนแกนเหล็ก ขดลวดชุดที่ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า เรียกว่า ขดลวดปฐมภูมิ (Primary winding) ส่วนขดลวดชุดที่จ่ายไฟฟ้าให้กับโหลด เรียกว่า ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding) ซึ่งมีวงจรพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 2.6

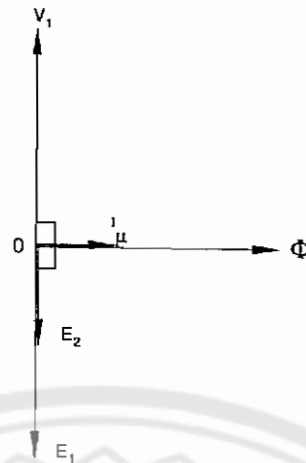


รูปที่ 2.6 วงจรหม้อแปลงไฟฟ้าพื้นฐาน

จากรูปที่ 2.6 เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแล้ว เราสามารถพิจารณารูปคลื่นที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และจากรูปคลื่นนำมาเขียนเป็นเวกเตอร์ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 รูปคลื่นที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า



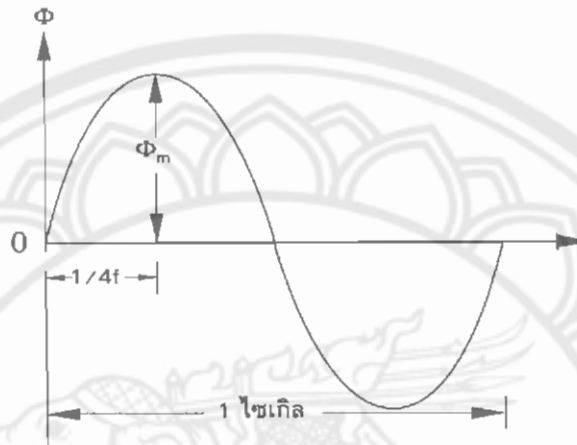
รูปที่ 2.8 เวกเตอร์จากรูปคลื่น

เมื่อ	I_{μ}	=	กระแสที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetizing current)
	Φ_m	=	เส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้งานหรือเส้นแรงแม่เหล็กที่เชื่อมโยงระหว่างขดปฐมภูมิกับขดทุติยภูมิ (Mutual flux or Linkage flux)
	V_1	=	แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้กับขดลวดปฐมภูมิ หรือทางด้านไฟเข้า (Alternative voltage input)
	E_1	=	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดของมันเอง (Self induce e.m.f.) ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับ V_1 และบางทีก็เรียกว่า แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ หรือแรงดันไฟฟ้าต่อต้าน (Back e.m.f or Counter e.m.f.) ของขดลวดขดปฐมภูมิ
	E_2	=	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดทุติยภูมิ (Mutually induce e.m.f.)
	V_2	=	แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสาย (Terminal voltage) ของขดลวดขดทุติยภูมิ (Secondary voltage)

2.3.2 สมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า (E.M.F. Equation of a transformer)

N_1	=	จำนวนรอบของขดลวดขดปฐมภูมิ (No. of turns in primary)
N_2	=	จำนวนรอบของขดลวดขดทุติยภูมิ (No. of turns in secondary)
Φ_m	=	เส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดในแกนเหล็ก (Maximum flux in core in Webber)
	=	$B_{max} \times A$

- B_{\max} = ความหนาแน่นสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็ก (Maximum flux density in Webber per square meter, Wb/m^2)
- A = พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (Area of iron core in Square meter, m^2)
- f = ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า (Frequency of Alternating current in Hertz, Hz)



รูปที่ 2.9 รูปคลื่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

ตัวนำ 1 รอบเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กที่มี $\Phi = 1$ เวเบอร์ ในเวลา 1 วินาที จะได้แรงดันไฟฟ้าออกมา 1 โวลต์ ($1 \text{ Wb} = 1 \text{ V}\cdot\text{s}$)

จากรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นจาก 0 จนถึงค่าสูงสุด (Φ_m) ในช่วง $1/4$ ของไซเคิล (cycle) หรือ $1/4f$ วินาที

$$\begin{aligned} \text{เส้นแรงแม่เหล็กเฉลี่ยที่เกิดการเปลี่ยนแปลง} &= \Phi_m / (1/4f) \\ &= 4f \Phi_m \text{ เวเบอร์/วินาที หรือ โวลต์} \end{aligned}$$

ในที่นี้จะได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กต่อรอบ หมายถึง แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งมีหน่วยเป็น โวลต์ (Induced e.m.f. in volts)

$$\text{เพราะฉะนั้นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฉลี่ย/รอบ} = 4f \Phi_m \text{ โวลต์}$$

ถ้าเส้นแรงแม่เหล็ก (Φ) เปลี่ยนแปลงตามไซน์เวฟ (Sine wave) ดังนั้นค่าของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่วัดได้จึงต้องคูณด้วยค่าฟอร์มแฟคเตอร์ (form factor)

$$\begin{aligned} \text{ฟอร์มแฟคเตอร์} &= \text{ค่าที่วัดได้/ค่าเฉลี่ย} \\ \text{หรือ Form factor} &= (\text{R.M.S. Value})/(\text{Average value}) \\ &= 0.707/0.636 \\ &= 1.11 \end{aligned}$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่วัดได้ / รอบ

$$= 1.11 \times 4 f \Phi_m \quad \text{โวลต์}$$

$$= 4.44 f \Phi_m \quad \text{โวลต์}$$

ดังนั้น ค่าที่วัดได้ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดชุดปฐมภูมิ จึงมีค่าเท่ากับผลคูณของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อรอบ กับจำนวนของขดลวดปฐมภูมิ

นั่นคือ $E_1 = 4.44 f \Phi_m N_1$ โวลต์

$$= 4.44 f B_m A N_1 \quad \text{โวลต์} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าที่วัดได้ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดชุดทุติยภูมิจึงมีค่าเท่ากับ

$$E_2 = 4.44 f \Phi_m N_2 \quad \text{โวลต์}$$

$$= 4.44 f B_m A N_2 \quad \text{โวลต์} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ในหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ(Ideal transformer) เมื่อไม่มีโหลด จะได้ว่า

$$V_1 = E_1$$

และ $V_2 = E_2$ เมื่อ V_2 เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสาย

2.3.3 อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า (Voltage transformation ratio, K)

จากสมการ $E_1 = 4.44 f \Phi_m N_1$ โวลต์

และ $E_2 = 4.44 f \Phi_m N_2$ โวลต์

จะได้ $E_2/E_1 = N_2/N_1 = K$

ถ้า $N_2 > N_1$ จะได้ $K > 1$ หม้อแปลงไฟฟ้าตัวนั้นจะเป็น หม้อแปลงไฟฟ้าขึ้น (Step - up transformer)

แต่ถ้า $N_2 < N_1$ จะได้ $K < 1$ หม้อแปลงไฟฟ้าตัวนั้นจะเป็น หม้อแปลงไฟฟ้าลง (Step - down transformer)

สำหรับในกรณีของหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคตินั้น

$$\text{ขนาด VA ทางด้านอินพุท} = \text{ขนาด VA ทางด้านเอาต์พุท}$$

ดังนั้น $V_1 I_1 = V_2 I_2$

หรือ $I_1/I_2 = V_2/V_1 = K$

หมายเหตุ B_m (มาตรฐานของแกนเหล็ก)

$$= 12000 \text{ เส้น/ตาราง ซม. (line/cm}^2\text{)}$$

$$= 50000 - 60000 \text{ เส้น/ตารางนิ้ว (line/inch}^2\text{)}$$

$$1 \text{ เส้น} = 10^{-8} \text{ Wb.}$$

2.3.4 หม้อแปลงไฟฟ้าขณะที่ไม่มีโหลด (Transformer no – load)

ในทางปฏิบัติหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานจริง (Actual transformer) จะมีการสูญเสียภายในหม้อแปลงไฟฟ้านั้นเสมอไม่มากก็น้อย เช่น ในขณะที่ไม่มีโหลดจะมีการสูญเสียในรูปของกำลังสูญเสียในแกนเหล็กและกำลังสูญเสียในขดลวดในขดลวดชุดปฐมภูมิ แต่ค่าของกำลังสูญเสียในขณะนี้จะค่าน้อยมากหรือในขณะที่มีโหลดก็จะมีกำลังสูญเสียในแกนเหล็กและกำลังสูญเสียในขดลวดทั้งในขดลวดชุดปฐมภูมิและขดลวดชุดทุติยภูมิ

เมื่อพิจารณาในขณะที่ไม่มีโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า จะพบว่ามีกระแสไหลเข้าที่ขดลวดชุดปฐมภูมิต่างกัน เป็นเหตุให้เกิดกำลังสูญเสียในแกนเหล็กในรูปของกำลังสูญเสียจากฮีสเตอร์ซิสและกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน และยังมีกำลังสูญเสียเกิดขึ้นในขดลวดชุดปฐมภูมินี้ แต่มีค่าน้อยมาก ซึ่งกระแสไฟฟ้าในขณะที่ไม่มีโหลด (No – load current, I_0) นี้ จะทำให้เกิดกำลังสูญเสีย (Power loss, W_0) ขึ้น ซึ่งมีค่า

$$W_0 = V_1 I_0 \cos \theta_0$$

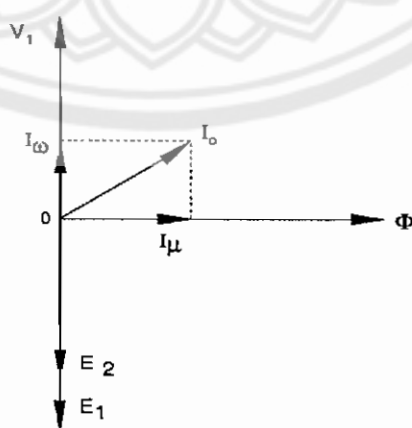
เมื่อ $\cos \theta_0 =$ เพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power factor) ของขดลวดชุดปฐมภูมิในขณะที่ไม่มีโหลด

ซึ่งกระแส I_0 นี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. เป็นกระแสที่เกิดพร้อมกัน (Inphase) กับ V_1 เรียกว่า กระแสที่ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (Iron loss component, I_ω) หรือ Active component หรือ Working component ซึ่งเป็นกำลังสูญเสียในแกนเหล็กจำนวนน้อยๆของขดลวดชุดปฐมภูมิที่คิดรวมเข้ากับกำลังสูญเสียในขดลวด ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อน และจะได้ว่า

$$I_\omega = I_0 \cos \theta_0$$

กระแส I_0 นี้สามารถนำมาเขียนเป็นเวกเตอร์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เวกเตอร์ของกระแสขณะที่ไม่มีโหลด

จากเวกเตอร์ จะเห็นได้ว่า I_0 เป็นเวกเตอร์ที่เกิดขึ้นจากการบวกกันของเวกเตอร์ I_ω กับเวกเตอร์ I_μ

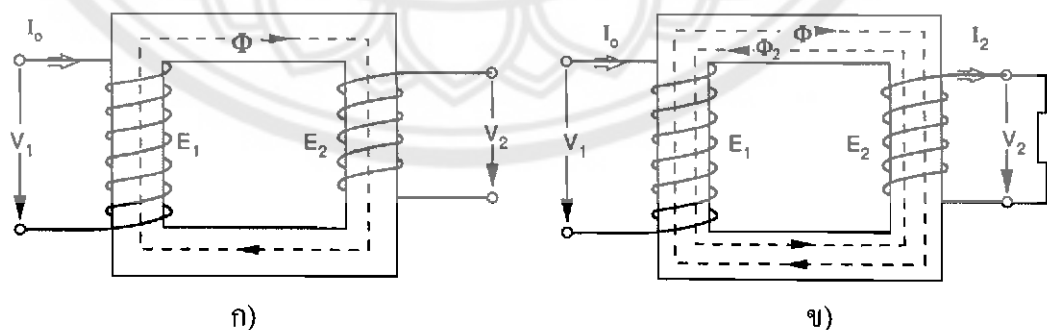
$$\text{ดังนั้น } I_0 = \sqrt{(I_\omega)^2 + (I_\mu)^2} \quad \text{A}$$

2.3.5 หม้อแปลงไฟฟ้าในขณะที่มีโหลด (Transformer On - load)

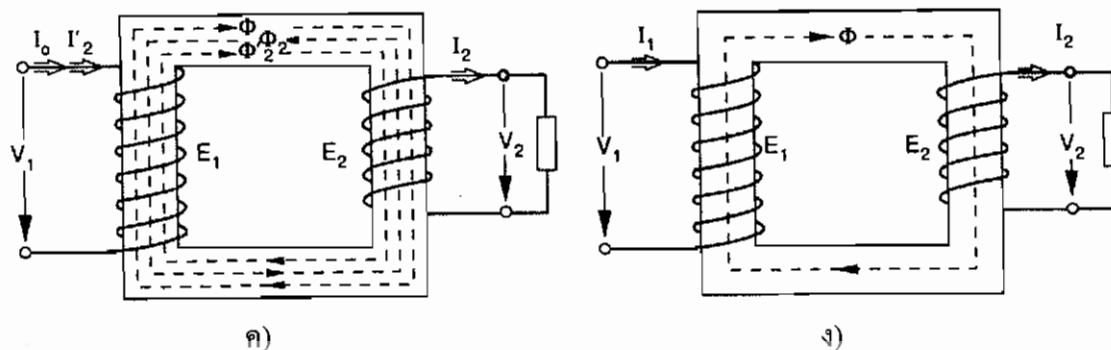
เมื่อต่อโหลดเข้ากับขดลวดชุดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า กระแสที่ไหลผ่านขดลวดชุดทุติยภูมิ (I_2) จะสูงขึ้น ซึ่งขนาด (Magnitude) และทิศทางของ I_2 นี้จะเทียบกับ V_2 โดยขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของโหลดนั้น กล่าวคือ I_2 จะเกิดพร้อมกับ V_2 ก็ต่อเมื่อ โหลดเป็นความต้านทาน (Resistive load, R) แต่ถ้า I_2 ล้าหลัง V_2 ก็ต่อเมื่อ โหลดเป็นอินดักทีฟโหลด (Inductive load, L) และถ้า I_2 นำหน้า V_2 นั้น โหลดเป็นคาปาซิทีฟโหลด (Capacitive load, C)

กระแสในขดลวดชุดทุติยภูมินี้ จะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นทางด้านเอาต์พุต (Output) (มีค่าเท่ากับ $N_2 I_2, \Phi_2$) และ Φ_2 นี้มีทิศทางตรงกันข้ามกับเส้นแรงแม่เหล็กที่ขดลวดปฐมภูมิ (Φ) ที่เกิดขึ้นเนื่องจาก I_0 ซึ่งแอมป์แปร์-เทิร์น ทางด้านขดลวดทุติยภูมิ ($N_2 I_2, \Phi_2$) นี้เรียกว่า *สนามแม่เหล็กลด* และ Φ_2 นี้ จะทำให้ Φ อ่อนกำลังลง ทำให้แรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่ขดลวดชุดปฐมภูมิ (E_1) ลดลง เป็นเหตุให้มีกระแสไหลในขดลวดชุดปฐมภูมิเพิ่มมากขึ้น

ถ้ากำหนดให้ I_2 เป็นกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในขดลวดชุดปฐมภูมิ (ซึ่งเรียกว่า Load component of primary current) กระแสไฟฟ้าอันนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับ I_0 และแอมป์แปร์-เทิร์นที่เกิดขึ้นที่ขดลวดชุดปฐมภูมิที่เพิ่มขึ้น ($N_2 I_2, \Phi_2'$) และ Φ_2' ที่เกิดขึ้นนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับ Φ ด้วย (แต่มีทิศทางเดียวกันกับ Φ) และมีค่าเท่ากับ Φ_2' ดังนั้น Φ_2' กับ Φ จึงหักล้างกันเป็นผลทำให้ผลทางแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแส I_2 นั้นกลายเป็นกลางทันที ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.11 การเกิดเส้นแรงแม่เหล็กในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีโหลด



รูปที่ 2.11 (ต่อ)

ดังนั้น สถานะที่มีโหลดต่ออยู่นั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เคลื่อนผ่านแกนเหล็กจะมีค่าประมาณเท่ากับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขณะที่ไม่มีโหลดซึ่งในกรณีที่มีโหลดต่าง ๆ กัน ค่าของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก ซึ่งถือว่ามีค่าคงที่ เพราะฉะนั้นการสูญเสียในแกนเหล็กไม่ว่าในสถานะใดก็ตาม ถือว่ามีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$\begin{aligned} \Phi'_2 &= \Phi_2 \\ N_2 I'_2 &= N_2 I_2 \\ I'_2 &= (N_2/N_1) \times I_2 \\ &= K I_2 \end{aligned}$$

ดังนั้น

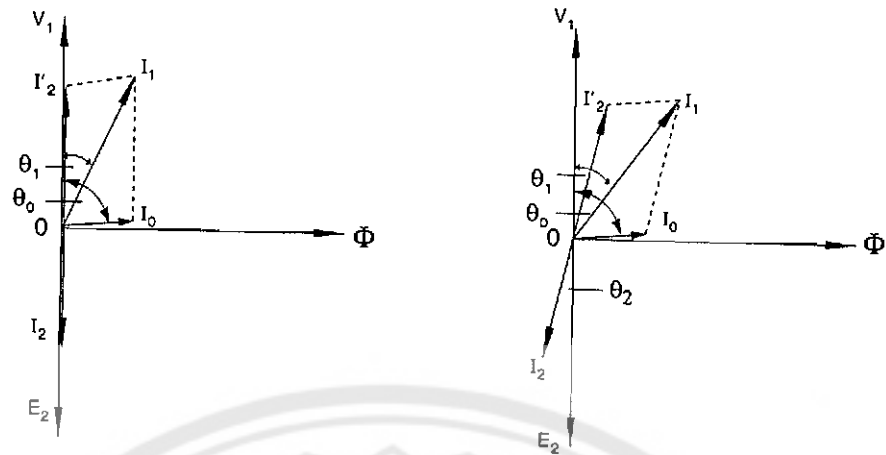
ดังนั้น ในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีโหลดนั้น ขดลวดชุดปฐมภูมิก็จะมีกระแสอยู่ 2 ค่า คือ I_0 และ I'_2 (ซึ่ง I'_2 นี้มีค่าเท่ากับ $K I_2$ และมีทิศทางตรงกันข้ามกับ I_2) ดังนั้น กระแสที่ขดลวดชุดปฐมภูมิซึ่งมีค่าเท่ากับผลบวกทางเวกเตอร์ของ I_0 กับ I'_2 ซึ่งใช้สัญลักษณ์เป็น I_1

พิจารณาหม้อแปลงไฟฟ้าในขณะที่มีโหลด

โหลดหม้อแปลงไฟฟ้า ถ้านำมาพิจารณาจะพบว่ามีโหลดอยู่ด้วยกัน 3 ประการ คือ

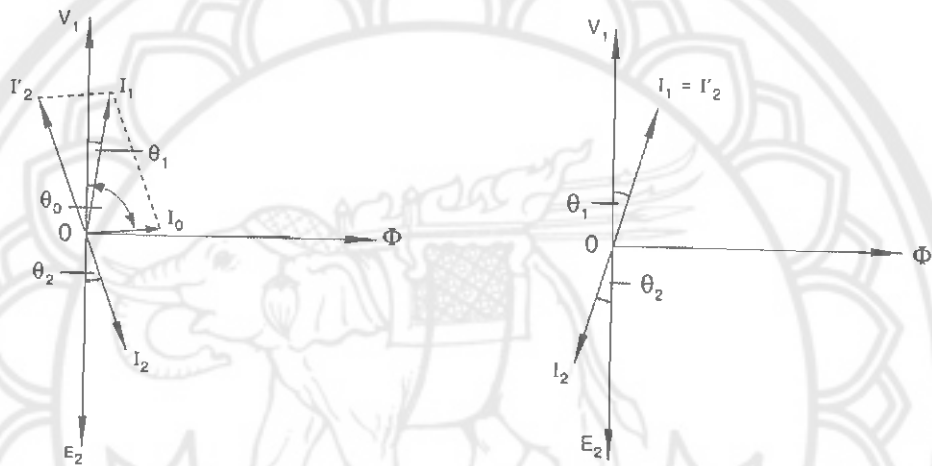
1. โหลดที่เป็นความต้านทาน (Resistive load, R)
2. โหลดที่เป็นขดลวด (Inductive load, L)
3. โหลดที่เป็นคาปาซิเตอร์ (Capacitor load, C)

และสามารถเขียนเวกเตอร์ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.12



กรณีที่เป็นรีซีทีฟโหลด

กรณีที่เป็นอินดักทีฟโหลด



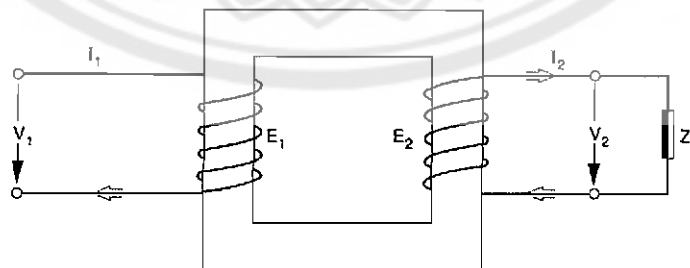
กรณีที่เป็นคาปาซิเตอร์

ถ้าไม่คิด I_0 (กรณีของอินดักทีฟโหลด)

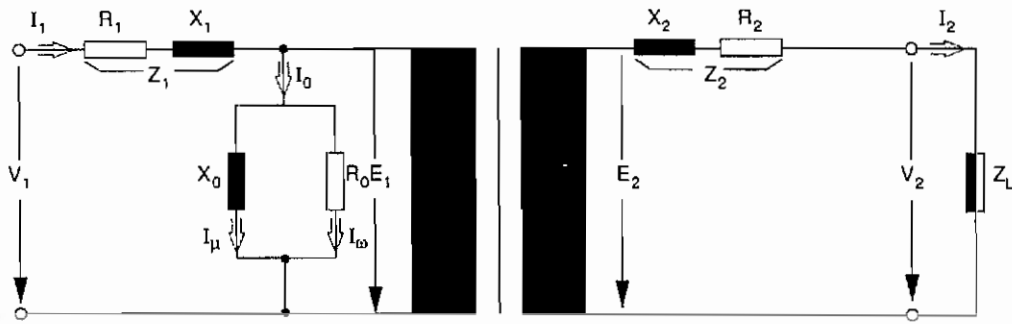
รูปที่ 2.12 เวกเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อมีโหลด

2.3.6 วงจรสมมูลหรือวงจรเทียบเคียงในหม้อแปลงไฟฟ้า (Equivalent circuit of transformer)

จากวงจรที่แสดงรูปที่ 2.13 อาจเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 หม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อมีโหลด



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

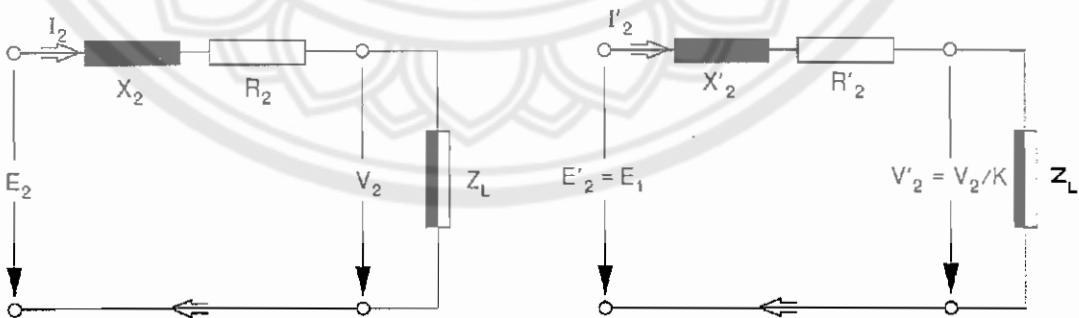
จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.14 จะได้อ่านค่าความต้านทานและค่าล็กเกจรีแอคเตนซ์นั้นแยกออกจากขดลวด และในขณะที่ไม่มีโหลดจะมีอินดักเตนซ์บริสุทธิ์ (Pure-Inductance, X_0) ต่อขนานอยู่กับความต้านทาน (Non-inductive resistance, R_0) และต่อขนานกับขดลวดชุดปฐมภูมิ ซึ่งจะมีกระแส I_0 ไหลผ่าน กระแส I_0 นี้ เรียกว่า กระแสขณะไม่มีโหลด และกระแส I_0 ที่ไหลผ่าน R_0 เป็น I_ω ส่วนกระแสในขณะที่ไม่มีโหลดที่ไหลผ่าน X_0 เป็น I_μ และ V_1 เท่ากับผลบวกทางเวกเตอร์ของ E_1 กับ $I_1 Z_1$

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.9 จะได้

$$X_0 = E_1 / I_\mu \quad \text{หรือ} \quad X_0 = E_1 / I_0 \sin \theta_0$$

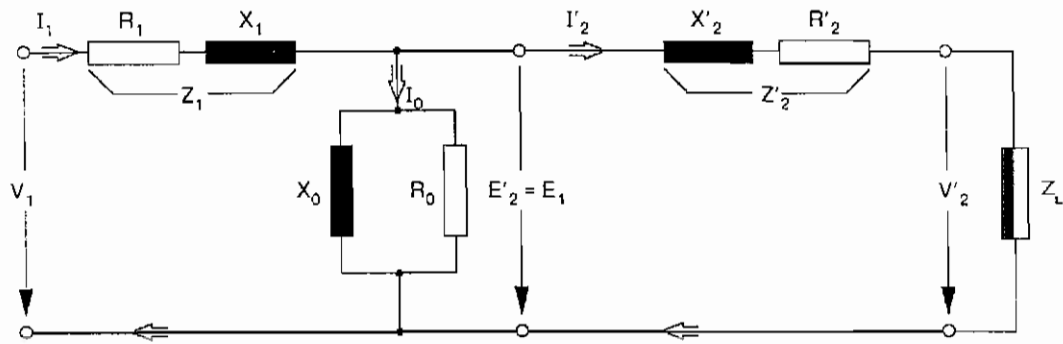
$$R_0 = E_1 / I_\omega \quad \text{หรือ} \quad R_0 = E_1 / I_0 \cos \theta_0$$

จาก $E_2 / E_1 = N_2 / N_1 = K$ นั้น เราสามารถย้ายค่าต่างๆจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้ จากวงจรสมมูลทางด้านขดทุติยภูมิในรูปที่ 2.15 ก) เมื่อย้ายไปทางด้านขดปฐมภูมิ จะได้ดังรูปที่ 2.15 ข)



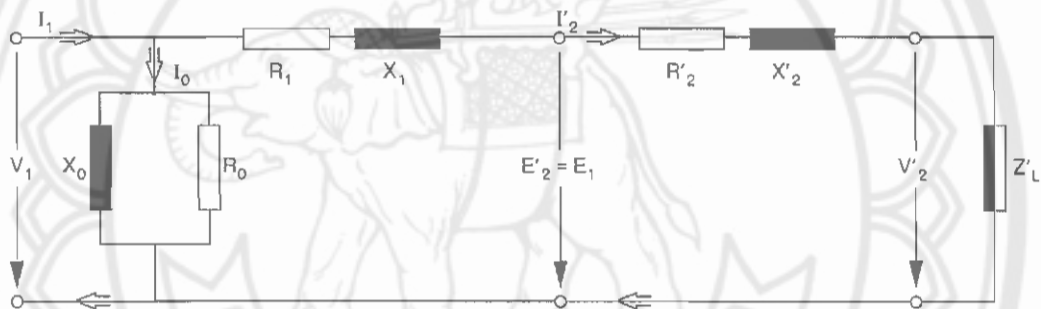
รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของด้านขดทุติยภูมิที่ย้ายไปขดปฐมภูมิ

ดังนั้น จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.15 เมื่อนำมาเขียนวงจรสมมูลที่สมบูรณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า จะได้เป็นดังแสดงในรูปที่ 2.16 ดังนี้



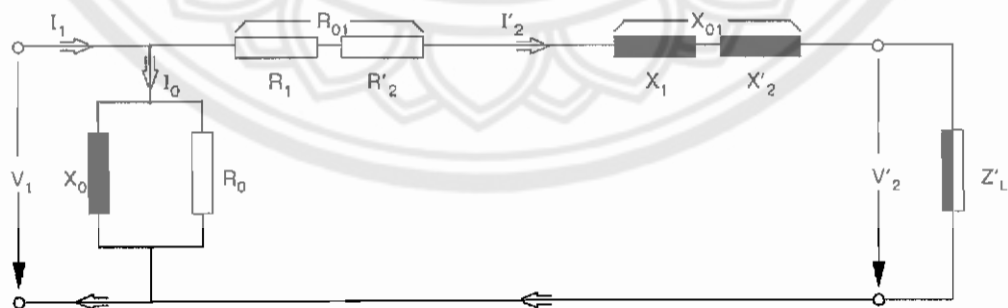
รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลของด้านขดทุติยภูมิที่ย้ายไปขดปฐมภูมิ

เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ อาจย้ายส่วนที่แทนการสูญเสียในแกนเหล็กไปไว้ทางด้านหน้า ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งการย้ายนี้จะไม่ทำให้ค่าในวงจรเปลี่ยนไปมาก ทั้งนี้เพราะว่าการสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าต่ำและคงที่

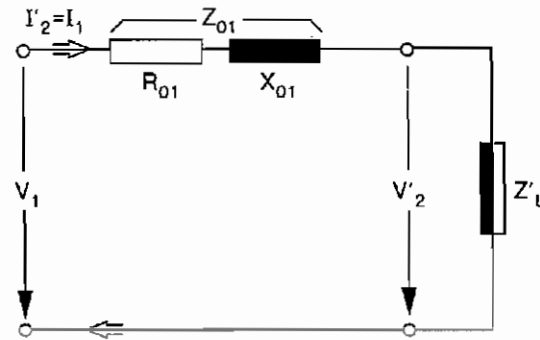


รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลโดยประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากวงจรรูปที่ 2.17 ถ้านำมาเขียนใหม่ให้สมบูรณ์จะเขียนได้ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลโดยประมาณ

รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลเมื่อไม่คิด I_0

จากวงจรสมมูลที่สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 2.16 นั้น สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ทั้งหมด ได้ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned} Z &= Z_1 + \{1/[(Z'_2 + Z'_L) + (1/Z'_m)]\} \quad \Omega \\ &= Z_1 + \{[Z'_m (Z'_2 + Z'_L)]/[Z'_m + (Z'_2 + Z'_L)]\} \end{aligned}$$

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

และ $Z'_m =$ อิมพีแดนซ์ของวงจรกระตุ้น (Exciting circuit)

จากวงจรสมมูลที่สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 2.16 จะได้

$$\begin{aligned} V_1 &= I_1 Z_1 + I_1 \{1/[(Z'_2 + Z'_L) + (1/Z'_m)]\} \\ &= I_1 Z_1 + I_1 \{[Z'_m (Z'_2 + Z'_L)]/[Z'_m + (Z'_2 + Z'_L)]\} \end{aligned}$$

2.3.7 เรกกูเลชันของหม้อแปลงไฟฟ้า (Regulation of transformer)

ถ้าแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิมีค่าคงที่ เมื่อทางด้านขดทุติยภูมิมีโหลดนั้น แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะมีค่าเท่ากับ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า (E_2) ลบด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่ค่าความต้านทานและค่าลิกเกจรีแอกแตนซ์

$$\begin{aligned} \text{ให้ } V_{02} &= \text{แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของขดทุติยภูมิในกรณีที่ไม่มีโหลด} \\ &= E_2 = KE_1 = KV_1 \\ V_2 &= \text{แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของขดทุติยภูมิในกรณีที่มีโหลดเต็มที่} \end{aligned}$$

การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของขดทุติยภูมิ จากในกรณีที่ไม่มีโหลดจนกระทั่งถึงเมื่อมีโหลดเต็มที่ $= V_{02} - V_2$

ถ้าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าหารด้วย V_{02} เรียกว่า การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟาลง (Regulation down)

ถ้าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าหารด้วย V_2 เรียกว่า การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขึ้น (Regulation up)

ดังนั้น เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าลง

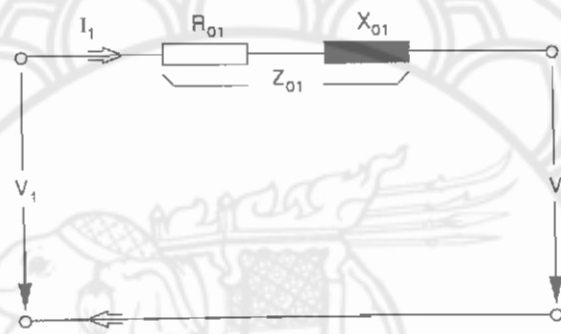
หรือ % regulation “down” $= \{(V_{02} - V_2)\} / V_{02} \times 100$

และ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าขึ้น

หรือ % regulation “up” $= \{(V_{02} - V_2)\} / V_2 \times 100$

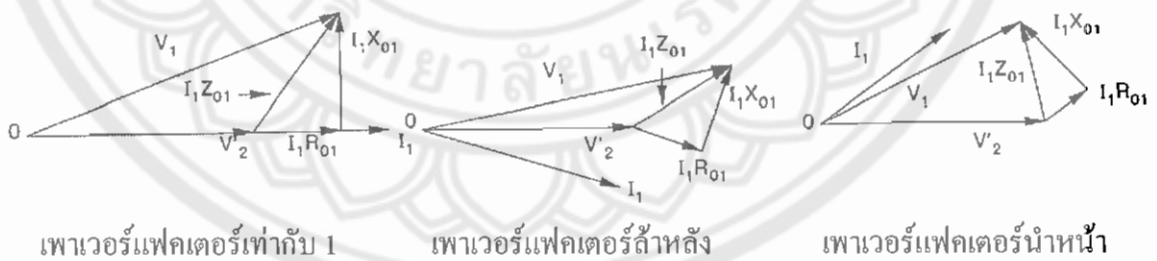
แต่โดยทั่วไปแล้ว ถ้ากล่าวถึงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงดัน ไฟฟ้านั้น ค่าที่ใช้จะเป็น เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงดัน ไฟฟ้าลง

การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า อาจจะมีค่าอยู่ในเทอมของค่าต่างๆทางขดลวดปฐมภูมิ และสามารถเขียนวงจรสมมูลโดยประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้า ได้ดังนี้



รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลโดยประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้า

และจากวงจรสมมูล โดยประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้า อาจเขียนเป็นเวกเตอร์ไดอะแกรมที่เพาเวอร์แฟกเตอร์ต่าง ๆ กัน ได้ดังนี้



รูปที่ 2.21 เวกเตอร์ไดอะแกรมเมื่อเพาเวอร์แฟกเตอร์ต่าง ๆ

แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วในขณะที่ไม่ได้มีโหลดของขดลวดทุติยภูมิที่ย้ายไปขดปฐมภูมิ (E'_2)

$$= E_2 / K = E_1 = V_1$$

และถ้าแรงดัน ไฟฟ้าที่ขั้วขณะที่มีโหลดเต็มของขดลวดทุติยภูมิ (V'_2)

$$= V_2 / K$$

ดังนั้น เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า $= \{(V_1 - V'_2) / V_1\} \times 100$

จากเวกเตอร์โวลเตจแอมจะ ได้ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า

$$= \{(I_1 R_{01} \cos \theta + I_1 X_{01} \sin \theta) / V_1\} \times 100$$

หรือ
$$= V_r \cos \theta + V_x \sin \theta$$

เมื่อ
$$V_r = (I_1 R_{01} \times 100) / V_1$$

และ
$$V_x = (I_1 X_{01} \times 100) / V_1$$

ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้ามีโหลดมาต่อ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของขดทุติยภูมิก็จะต่ำลง ดังนั้น ถ้ากำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของขดทุติยภูมิขณะที่มีโหลดมีค่าคงที่ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดปฐมภูมิก็ต้องมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของขดทุติยภูมิจากขณะไม่มีโหลดถึงเมื่อมีโหลดเต็มทีนั้น มีค่าคงที่ การกระทำเช่นนี้เป็นการปรับแรงดันไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า การปรับแรงกวลชั้น (Regulation) ของหม้อแปลงไฟฟ้านั่นเอง

เมื่อพิจารณาที่ขดลวดปฐมภูมิจะได้ว่า

$$\text{เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า} = \{(V_1 - V'_1) / V_1\} \times 100$$

$$\text{หรือ \% regulation} = \{(V_1 - V'_1) / V_1\} \times 100$$

เมื่อ V'_1 = แรงดันไฟฟ้าใหม่ของทางด้านขดปฐมภูมิ

2.3.8 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

ประสิทธิภาพ = กำลังเอาต์พุต / กำลังอินพุต

หรือประสิทธิภาพ = กำลังเอาต์พุต / (กำลังเอาต์พุต + กำลังสูญเสีย)

หรือ Eff. (η) = Power output / (Power out + Power losses)

แต่กำลังสูญเสีย = การสูญเสียที่ขดลวดทองแดง + การสูญเสียในแกนเหล็ก

หรือประสิทธิภาพ = (กำลังอินพุต - กำลังสูญเสีย) / กำลังอินพุต

การสูญเสียในแกนเหล็กนั้น หาได้จากการทดสอบแบบวงจรเปิด หรือหาได้จากในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้ายังไม่มีโหลด

การสูญเสียในขดลวดทองแดงนั้น หาได้จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในขณะลัดวงจร

2.3.9 สภาวะสำหรับประสิทธิภาพสูงสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า (Condition for maximum efficiency of transformer)

การสูญเสียในขดลวดทองแดง (W_c) จะมีค่า

$$= (I_1)^2 R_{01} = (I_1)^2 R_{02}$$

การสูญเสียในแกนเหล็ก (W_i) = การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์ซิส + การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

$$\begin{aligned}
 &= W_h + W_e = W_i \\
 \text{กำลังอินพุตที่ขดลวดปฐมภูมิ} &= V_1 I_1 \cos \theta_1 \\
 \text{ประสิทธิภาพ (\eta)} &= \frac{[(V_1 I_1 \cos \theta_1 - \text{loss}) / V_1 I_1 \cos \theta_1]}{[(V_1 I_1 \cos \theta_1 - I_2^2 R_{01} - W_i) / V_1 I_1 \cos \theta_1]} \\
 \text{ดังนั้นประสิทธิภาพ (\eta)} &= 1 - (I_2^2 R_{01} / V_1 \cos \theta_1) - (W_i / V_1 I_1 \cos \theta_1)
 \end{aligned}$$

ถ้าดิฟเฟอเรนเชียลทั้งสองข้าง โดยเทียบกับ I_1 จะได้

$$\begin{aligned}
 \frac{d\eta}{dI_1} &= 0 - (R_{01} / V_1 \cos \theta_1) + (W_i / V_1 I_1^2 \cos \theta_1) \\
 \text{เมื่อประสิทธิภาพสูงสุด จะได้ } \frac{d\eta}{dI_1} &= 0 \quad \text{ดังนั้น สมการข้างบนนี้จะได้}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 0 &= 0 - (R_{01} / V_1 \cos \theta_1) + (W_i / V_1 I_1^2 \cos \theta_1) \\
 \text{หรือ} \quad R_{01} / V_1 \cos \theta_1 &= W_i / V_1 (I_1)^2 \cos \theta_1
 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad W_i = (I_1)^2 R_{01} \quad \text{หรือ} \quad (I_2)^2 R_{02}$$

หรือ การสูญเสียในขดลวด = การสูญเสียในแกนเหล็ก

$$\text{กระแสเอาต์พุต (I}_2\text{) ที่ประสิทธิภาพสูงสุดมีค่า} = \sqrt{(W_i / R_{02})}$$

หมายเหตุ

1. ถ้ากำหนดการสูญเสียในแกนเหล็กและการสูญเสียในขดลวดเมื่อมีโหลดเต็มที่ให้ จะได้โหลดที่ทำให้การสูญเสียทั้งสองเท่ากันนั้นมีค่าเท่ากับ

$$\text{KVA ที่ขณะมีโหลดเต็มที่} \times \sqrt{\text{การสูญเสียในแกนเหล็ก} / \text{การสูญเสียในขดลวดขณะมีโหลดเต็มที่}}$$

2. ประสิทธิภาพที่โหลดต่าง ๆ นั้นหาได้จาก

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{(X \times \text{KVA ขณะมีโหลดเต็มที่} \times \text{เพาเวอร์ แฟกเตอร์})}{(X \times \text{KVA ขณะมีโหลดเต็มที่} \times \text{เพาเวอร์ แฟกเตอร์}) + W_c + W_i}$$

$$\text{หรือ Eff.} = \frac{(X \times \text{F.L.KVA} \times \text{p.f.})}{(X \times \text{F.L.KVA} \times \text{p.f.}) + W_c + W_i}$$

เมื่อ X = อัตราส่วนของขนาด KVA ที่จ่ายจริง / KVA เมื่อมีโหลดเต็มที่

W_i = การสูญเสียในแกนเหล็ก (KW)

W_c = การสูญเสียในลวดทองแดง (KW)

2.3.10 ประสิทธิภาพตลอดวัน (All-day efficiency, $\eta_{all-day}$)

โดยทั่วไปประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า หาได้โดยอัตราส่วนของ กำลังเอาต์พุต (มีหน่วยเป็นวัตต์) / กำลังอินพุต (มีหน่วยเป็นวัตต์)

แต่ในความเป็นจริงแล้ว ถึงแม้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าจะไม่ได้จ่ายโหลดก็ตาม หม้อแปลงไฟฟ้าก็ยังคงต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟตลอดเวลา 24 ชั่วโมง ดังนั้น จึงยังคงมีการสูญเสียในแกนเหล็กอยู่ ส่วนการสูญเสียที่ลวดทองแดงนั้นจะเปลี่ยนแปลงตามสถานะของโหลดในวันนั้น ๆ เราจึงสามารถหาประสิทธิภาพการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละวัน (24 ชั่วโมง) ได้จากสมการดังนี้

ประสิทธิภาพตลอดวัน ($\eta_{all-day}$) = เอาต์พุตเป็นวัตต์ชั่วโมง/อินพุต เป็นวัตต์ชั่วโมง

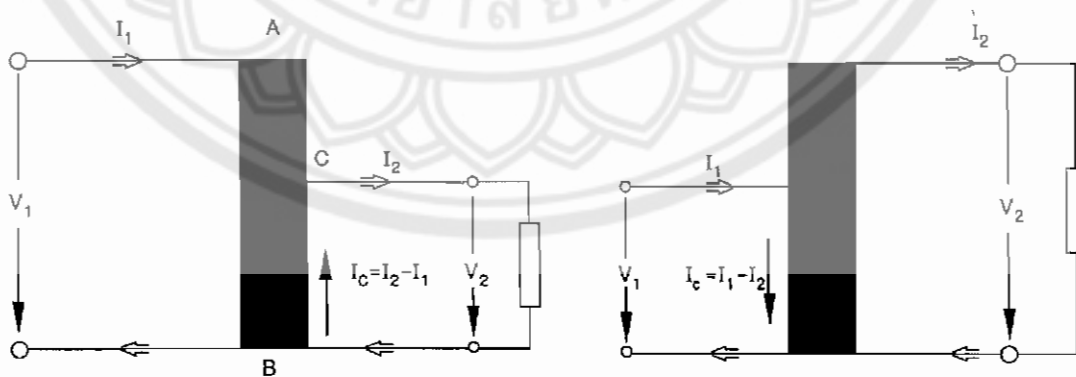
หรือ $\eta_{all-day}$ = Output in Wh. / Input in Wh.

ประสิทธิภาพตลอดวัน ($\eta_{all-day}$) = เอาต์พุตเป็นกิโลวัตต์ชั่วโมง/อินพุตเป็นกิโลวัตต์ ชั่วโมง

หรือ $\eta_{all-day}$ = Output in KWh. / Input in KWh.

2.3.11 หม้อแปลงไฟฟ้าร่วมขดลวด (Auto - transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้าร่วมขดลวดนี้ในบางครั้งเรียกว่า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบบอโต้ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้เป็นแบบที่มีขดลวดเพียงชุดเดียว ที่ทำหน้าที่เป็นทั้งขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ ดังนั้น จึงทำให้ประหยัดขดลวดและมีราคาถูกกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 2 ขดลวด ส่วนการทำงานก็มีหลักการเช่นเดียวกันกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 2 ขดลวด หม้อแปลงไฟฟ้าร่วมขดลวดหรือหม้อแปลงไฟฟ้าแบบบอโต้ นี้ มักจะนำไปใช้กับงานเกี่ยวกับการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า (K) ที่ผิดแปลกไปจากหนึ่งเพียงเล็กน้อย



ก) หม้อแปลงไฟฟ้าร่วมขดลวดแบบแปลงไฟฟ้าลง ข) หม้อแปลงไฟฟ้าร่วมขดลวดแบบแปลงไฟฟ้าขึ้น

รูปที่ 2.22 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบบอโต้

จาก รูปที่ 2.22 ช่วง AB มีจำนวนรอบเป็น N_1 ช่วง BC มีจำนวนรอบเป็น N_2 ถ้าไม่คิดการสูญเสียที่แกนเหล็กและ I_0 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} V_2 / V_1 &= N_2 / N_1 = K \\ &= I_1 / I_2 \end{aligned}$$

จากรูปที่ 2.22 ให้กระแสไฟฟ้าไหลในส่วน CB เท่ากับเวกเตอร์ของ I_2 ลบด้วยเวกเตอร์ของ I_1 เมื่อ $I_2 > I_1$ ดังนั้น น้ำหนักของขดลวดทองแดงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาว และพื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดงนั้น หรือกล่าวได้ว่า

น้ำหนักของลวดทองแดงในหม้อแปลง ~ จำนวนรอบ \times กระแสที่ไหลผ่านขดลวดนั้น

นั่นคือ

น้ำหนักของขดลวดทองแดงในช่วง AC $\sim (N_2 - N_1) I_1$

และน้ำหนักของลวดทองแดงในแต่ละช่วง BC $\sim N_2 (I_2 - I_1)$

ดังนั้น น้ำหนักของขดลวดทองแดงรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต้

$$= (N_2 - N_1) I_1 + N_2 (I_2 - I_1)$$

แต่น้ำหนักในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 2 ขดลวดนั้นหาได้จาก

น้ำหนักของขดลวดทองแดงในขดปฐมภูมิ $\sim N_1 I_1$

น้ำหนักของขดลวดทองแดงในขดทุติยภูมิ $\sim N_2 I_2$

ดังนั้น น้ำหนักของขดลวดทองแดงรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 2 ขดลวด

$$\sim N_1 I_1 + N_2 I_2$$

ดังนั้น (น้ำหนักขดลวดทองแดงของแบบออโต้) / (น้ำหนักขดลวดทองแดงแบบ 2 ขดลวด)

$$= [(N_2 - N_1) I_1 + N_2 (I_2 - I_1)] / [N_1 I_1 + N_2 I_2]$$

$$= 1 - \{(2N_2 / N_1) / [1 + (N_2 / N_1)(I_2 / I_1)]\}$$

เพราะว่า $N_2 / N_1 = K$

และ $I_2 / I_1 = 1 / K$

ดังนั้น น้ำหนักขดลวดทองแดงของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต้จะมีค่า

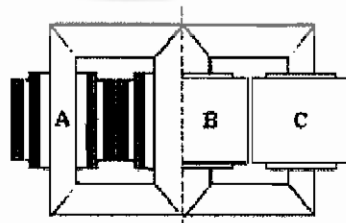
$$= (1 - K) \times (\text{น้ำหนักของขดลวดทองแดงแบบ 2 ขดลวด})$$

2.4 หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส (Three – Phase Transformer) [4]

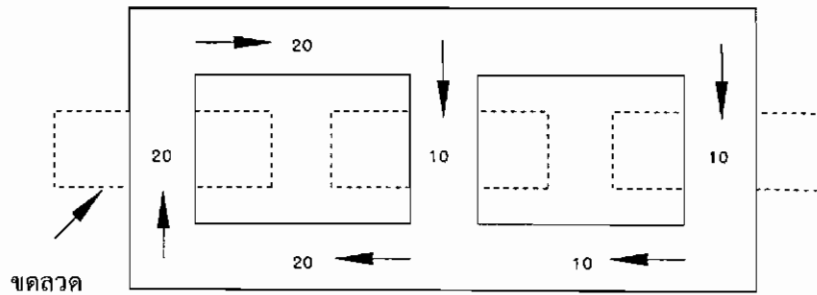


รูปที่ 2.23 หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบวาริแอก (ที่ใช้ในการทดลอง)

ระบบไฟฟ้ากำลังเป็นระบบไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งกำลังไฟฟ้าจะได้อาจมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส และส่งกำลังโดยสายส่ง 3 เฟส การเชื่อมโยงระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายส่งทำได้โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส หม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้ก็มีหลักการเช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส และเราสามารถนำเอาหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 3 ตัวมาต่อกันให้เป็น 3 เฟสหนึ่งตัวได้ แต่การทำแบบนี้ทำให้สูญเสียพื้นที่ในการติดตั้งและพื้นที่การวางหม้อแปลงไฟฟ้ามากกว่าแบบ 3 เฟสเพียงตัวเดียว นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักมากกว่า รวมทั้งค่าใช้จ่ายมากกว่าอีกด้วย การพันหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เฟส อาจทำได้หลายวิธี เช่น การใช้แกนเหล็ก 3 ชุด นำมาวางทำมุมกัน 120° โดยด้านที่ไม่ได้พันขดลวดนั้นนำมาต่อสัมผัสกัน ซึ่งแสดงให้เห็นเฉพาะขดลวดทางด้านอินพุตเท่านั้น ส่วนทางด้านเอาต์พุตก็มีหลักการเช่นเดียวกัน ขดลวดทางด้านอินพุตนั้นมีการต่อแบบสตาร์ การพันหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เฟสนั้น อาจใช้แกนเหล็กที่ไม่วางทำมุมกัน 120° ก็ได้ และเส้นแรงแม่เหล็กที่แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.24 การวางขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส



รูปที่ 2.25 เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.24 จะเห็นได้ว่าการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 ขาของแกนเหล็ก ซึ่งขดลวดในแต่ละขานั้นจะเป็นขดลวดแต่ละเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้า และขดลวดนี้จะถูกนำมาต่อเข้าด้วยกันซึ่งเหมือนกับการนำหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส จำนวน 3 ตัวมาต่อเข้าด้วยกันนั่นเอง

2.4.1 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส

สามารถต่อได้ดังนี้

1) การต่อแบบสตาร์-สตาร์ (Star-Star Connection)

การต่อแบบสตาร์-สตาร์ หรือในบางครั้งเรียกว่า การต่อแบบวาย-วาย (Wye-Wye Connection) ใช้สัญลักษณ์ Y-Y แสดงการต่อได้ดังรูปที่ 2.26 ซึ่งเป็นการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบ 3 เฟสในแบบสตาร์ทั้งขดลวดทางด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้มีข้อดีที่ว่า ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าในการใช้งานสูงกว่าพิกัดของแรงดันไฟฟ้าของขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชุด (คือ แรงดันที่ขดลวดแต่ละชุดเท่ากับ $1/\sqrt{3}$ ของแรงดันไฟฟ้าที่สาย) จากรูปที่ 6.4 เป็นการจ่ายไฟให้กับโหลดในลักษณะสมดุลจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายนิวทรัล (Neutral) เป็นศูนย์ (0) แต่ถ้าโหลดเกิดเป็นสถานะไม่สมดุล จะทำให้จุดนิวทรัลเสมือนกับเคลื่อนที่ไป (Shift) ทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดทางด้านขดทุติยภูมิมีค่าไม่เท่ากัน

ในการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสตาร์-สตาร์นี้ จะทำให้ได้แรงดันและกระแสไฟฟ้าดังนี้

ทางด้านขดปฐมภูมิ

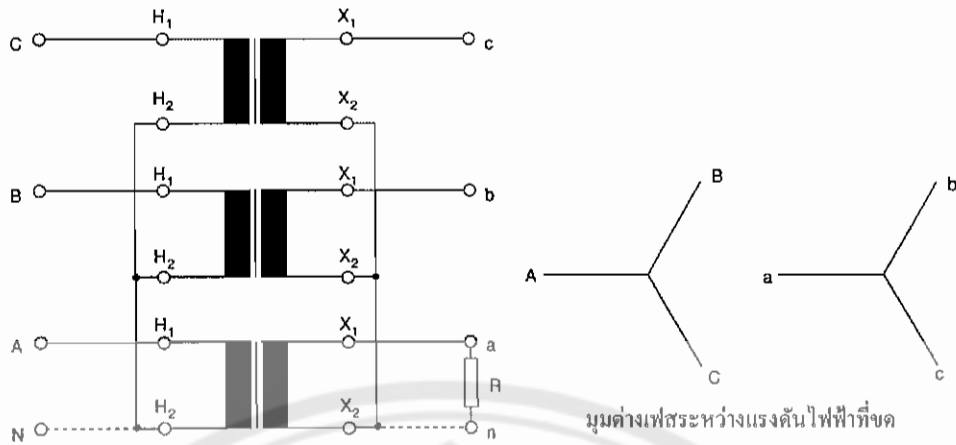
$$V_L = \sqrt{3}V_P$$

$$I_L = I_P$$

ทางด้านขดทุติยภูมิ

$$V_L = \sqrt{3}V_P$$

$$I_L = I_P$$



รูปที่ 2.26 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบสตาร์-สตาร์

2) การต่อแบบเดลต้า-เดลต้า (Delta-Delta Connection)

การต่อแบบเดลต้า-เดลต้า ใช้สัญลักษณ์ $\Delta - \Delta$ แสดงการต่อได้ดังรูปที่ 2.27 ซึ่งเป็นการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส ในแบบเดลต้าทั้งขดลวดทางด้านปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้ทำให้แรงดันไฟฟ้าในการใช้งานมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดแต่ละขด (คือ แรงดันที่ขดลวดแต่ละขดเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่สาย) ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดแต่ละขด จะมีค่าเป็น $1/\sqrt{3}$ ของกระแสไฟฟ้าที่สาย และการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้สามารถที่จะต่อให้เป็นแบบโอเพ่นเดลต้าได้ เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าตัวใดตัวหนึ่งที่ต้องเป็นแบบเดลต้าเกิดการชำรุด แต่จะสามารถจ่ายโหลดได้เพียง 58 % ของการต่อในแบบเดลต้าเท่านั้น

ในการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเดลต้า-เดลต้านี้ จะทำให้ได้แรงดันและกระแสไฟฟ้า ดังนี้

ทางด้านขดปฐมภูมิ

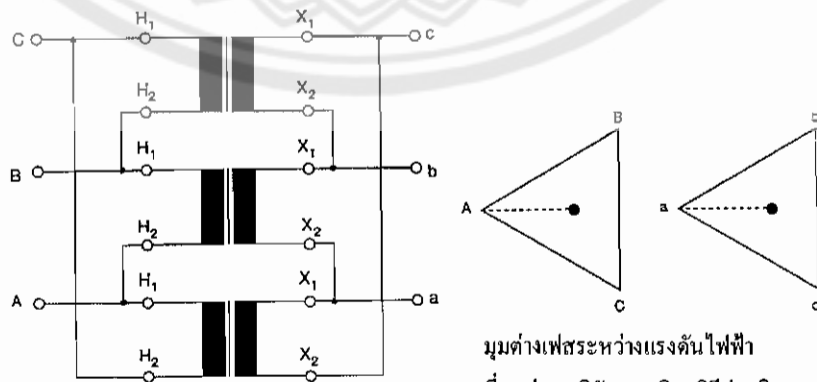
$$V_L = V_P$$

$$I_L = \sqrt{3}I_P$$

ทางด้านขดทุติยภูมิ

$$V_L = V_P$$

$$I_L = \sqrt{3}I_P$$

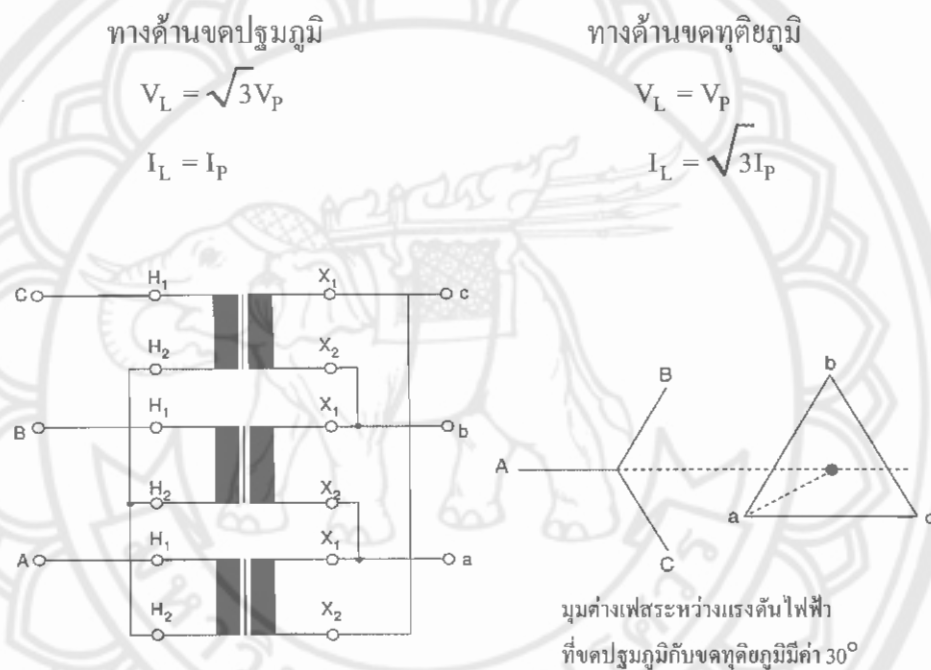


มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขดปฐมภูมิกับขดทุติยภูมิมีค่า 0°

รูปที่ 2.27 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบเดลต้า-เดลต้า

3.) การต่อแบบสตาร์- เดลต้า (Star – Delta Connection)

การต่อแบบสตาร์- เดลต้า หรือในบางครั้งเรียกว่า การต่อแบบวาย – เดลต้า (Wye – Delta Connection) ใช้สัญลักษณ์ $Y-\Delta$ แสดงการต่อได้ดังรูปที่ 2.28 ซึ่งเป็นการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส โคนขดปฐมภูมิต่อเป็นแบบสตาร์หรือวาย ส่วนขดทุติยภูมิต่อเป็นแบบเดลต้า การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่สายทางด้านขดทุติยภูมิกับแรงดันไฟฟ้าที่สายทางด้านขดปฐมภูมิกับแรงดันไฟฟ้าที่สายทางด้านขดปฐมภูมิ จะมีค่าเท่ากับ $1/\sqrt{3}$ เท่าของค่า K ของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละตัว แรงดันไฟฟ้าที่สายของทางด้านขดปฐมภูมิกับทางด้านทุติยภูมิ จะเกิดเคลื่อนไปที่ 30° ในการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสตาร์ – เดลตานั้น จะทำให้ได้แรงดันและกระแสไฟฟ้า ดังนี้



รูปที่ 2.28 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบสตาร์- เดลต้า

4.) การต่อแบบเดลต้า – สตาร์ (Delta – Star Connection)

การต่อแบบเดลต้า – สตาร์ หรือในบางครั้งเรียกว่า การต่อแบบเดลต้า – ยาย (Delta – Wye Connection) ใช้สัญลักษณ์ $\Delta-Y$ แสดงการต่อได้ดังรูปที่ 2.29 ซึ่งเป็นการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส โดยขดปฐมภูมิต่อเป็นแบบเดลต้า ส่วนขดลวดทุติยภูมิต่อเป็นแบบสตาร์ การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้ อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่สายทางด้านขดทุติยภูมิกับแรงดันไฟฟ้าที่สายทางด้านขดปฐมภูมิ จะมีค่าเท่ากับ $\sqrt{3}$ เท่าของค่า K ของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละตัว และแรงดันไฟฟ้าที่สายของทางด้านขดปฐมภูมิกับทางด้านทุติยภูมิ จะเกิดเคลื่อนที่ไป 30° การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้นิยมใช้แปลงแรงดันไฟฟ้าจากสายส่งแรงสูงในระบบ 3 เฟส 3 สาย เพื่อไปใช้งานในระบบ 3 เฟส 4 สาย

ในการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเดลต้า – สตาร์นี้ จะทำให้แรงดันและกระแสไฟฟ้า ดังนี้

ทางด้านขดปฐมภูมิ

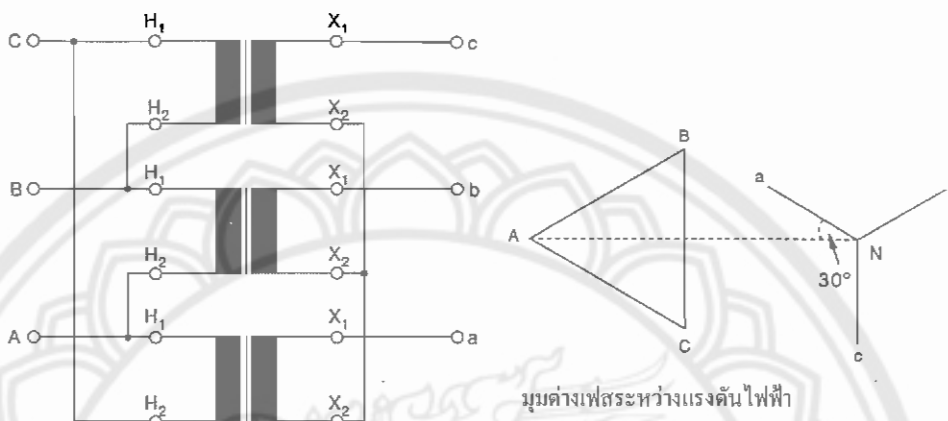
$$V_L = V_p$$

$$I_L = \sqrt{3}I_p$$

ทางด้านขดทุติยภูมิ

$$V_L = \sqrt{3}V_p$$

$$I_L = I_p$$



รูปที่ 2.29 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบเดลต้า – สตาร์

5.) การต่อแบบโอเพ่นเดลต้า (Open delta Connection)

การต่อแบบโอเพ่นเดลต้า หรือในบางครั้งเรียกว่า การต่อแบบวี-วี (V-V Connection) ใช้สัญลักษณ์ V-V แสดงการต่อได้ดังรูปที่ 2.30 ซึ่งเป็นการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้าตัวใดตัวหนึ่งของการต่อในแบบเดลต้า – เดลต้า ต้องถูกนำออกไปซ่อมเนื่องจากเกิดการชำรุด ดังนั้นเพื่อให้หม้อแปลงไฟฟ้าที่เหลืออีกสองตัวนั้นยังคงจ่ายโหลดได้ต่อไปในระบบ 3 เฟส และแรงดันไฟฟ้าที่ได้ยังคงเท่ากับการต่อในแบบเดลต้า ทั้งนี้จะต่อเป็นแบบ โอเพ่นเดลต้าเมื่อ

- (1.) โหลดในระบบ 3 เฟส มีจำนวนไม่มากนัก
- (2.) หม้อแปลงไฟฟ้าตัวใดตัวหนึ่งของการต่อในแบบเดลต้า – เดลต้า เกิดการชำรุดต้องนำไปซ่อม เพื่อให้สามารถจ่ายโหลดได้ เพียงแต่จะจ่ายโหลดได้ลดลง
- (3.) มีการเพิ่มโหลดขึ้นอีกก็สามารถต่อเป็นแบบเดลต้า – เดลต้าได้ โดยการเพิ่มหม้อแปลงไฟฟ้าเข้าไปอีกหนึ่งตัว

ข้อสำคัญของการต่อแบบโอเพ่นเดลตานั้น ถึงแม้ว่าจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้า 2 ตัว แต่ก็ไม่สามารถจ่ายโหลด 2/3 ของการต่อแบบเดลต้า แต่จะสามารถจ่ายโหลดได้เพียง 57.7 % ของการต่อในแบบเดลต้า คือ ลดลงไปประมาณ 15 % จากความสามารถของปกติ (Normal rating) ตัวอย่างเช่น เมื่อต่อเป็นแบบเดลต้า – เดลต้า และหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละตัวมีขนาด 10 KVA ผลรวมขนาด KVA ที่จ่ายได้เท่ากับ 30 KVA เมื่อต่อเป็นแบบโอเพ่นเดลต้า ผลรวมของ KVA ที่จ่ายได้จะไม่กับขนาด KVA ทั้งหมดแต่ละตัวรวมกัน คือ 20 KVA แต่จะมีค่าเพียง 0.866 ของผลรวม KVA แต่ละตัว คือ มี

ค่าเท่ากับ $20 \times 0.866 = 17.32$ KVA (หรือ $30 \times 0.577 = 17.3$ KVA) นั่นคือความสามารถที่จ่ายโหลดได้เท่ากับ $1/\sqrt{3} = 0.577$ ของการต่อแบบเดลต้า (หรือมีค่าประมาณ 58 %) แทนที่จะมีค่า 66.67% ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังนี้

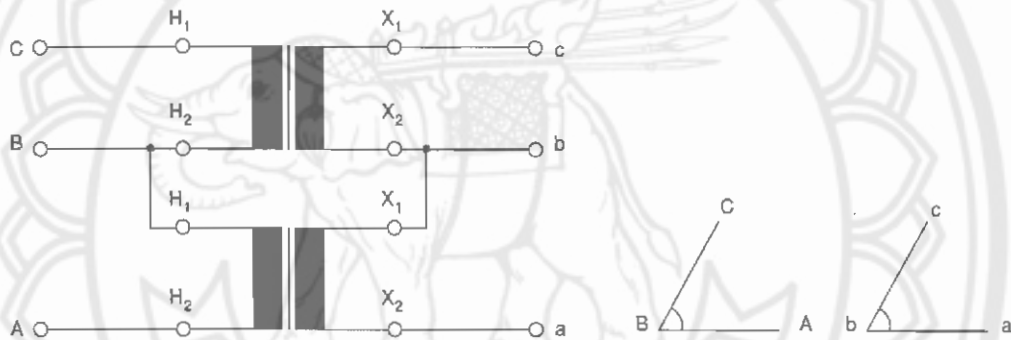
เมื่อต่อเป็นแบบเดลต้าจะได้

$$\text{KVA เอาท์พุท} = \sqrt{3}V_L I_L = 3V_L I_P$$

เมื่อเป็นแบบโอเพ่นเดลต้าจะได้

$$\text{KVA เอาท์พุท} = \sqrt{3}V_P I_P$$

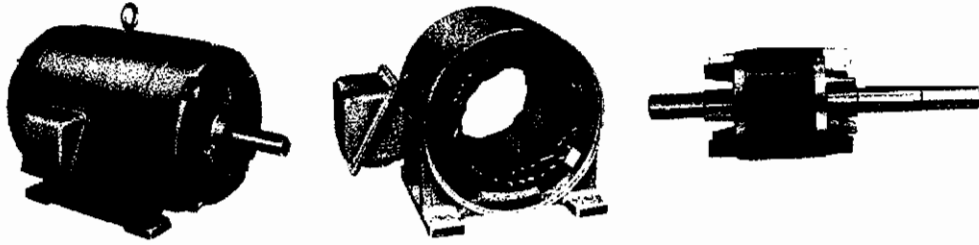
$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น (KVA แบบโอเพ่นเดลต้า)/(KVA แบบเดลต้า)} &= (\sqrt{3}V_P I_P) / (3V_L I_P) \\ &= 1/\sqrt{3} \\ &= 57.77 \% \text{ หรือ } 58 \% \end{aligned}$$



รูปที่ 2.30 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบโอเพ่นเดลต้า

2.5 มอเตอร์อินดักชั่น (Induction motor) [5]

มอเตอร์ชนิดนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมและตามบ้านเรือนที่อยู่อาศัยโดยแทบจะกล่าวได้ว่ามีมากที่สุด เนื่องจากมีขั้นตอนในการรับกระแสไฟฟ้าไม่ยุ่งยากนัก กล่าวคือ ระบบป้อนกำลังไฟฟ้าจัดให้มีเพียงไฟฟ้ากระแสสลับก็เพียงพอแล้ว ซึ่งไม่เหมือนกับมอเตอร์ซึ่งโครนัสที่จะต้องมีทั้งไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า และจะต้องมีไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับขดลวดกระตุ้นอีกด้วย โดยมีลักษณะมอเตอร์ตามรูปที่ 2.31

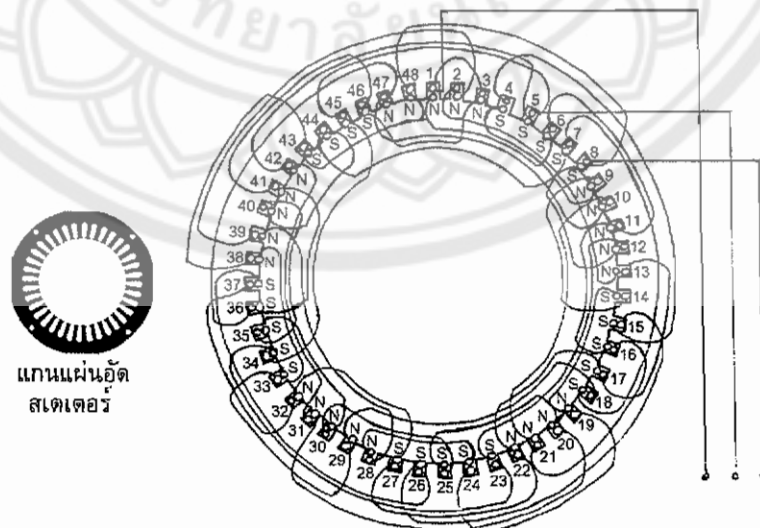


รูปที่ 2.31 ลักษณะของมอเตอร์อินดักชัน

มอเตอร์อินดักชันมีโครงสร้างที่แยกออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

(1.) สเตเตอร์ (Stator)

โครงสเตเตอร์ของมอเตอร์อินดักชันทำจาก Cast iron หรือ Steel โครงสเตเตอร์จะประกอบด้วยแกนแผ่นอัด (Laminated core) ที่ทำจากแผ่นเหล็กไฟฟ้า (Electrical sheet steel) ที่มีค่าของความซึมซาบได้ (Permeability) สูง ซึ่งมีความสูญเสียจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss) ต่ำ และมีความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy - current loss) ต่ำอีกด้วยเช่นกัน นอกจากนี้แล้วขดลวดสเตเตอร์จะถูกจัดไว้เป็นหลายเฟส สำหรับเปลี่ยนความเร็วรอบได้อีกด้วย ฟลักซ์ที่เกิดจากสเตเตอร์จะข้ามจากแกนสเตเตอร์ผ่านช่องว่างอากาศไปยังแกนโรเตอร์ได้ ตัวอย่างการวางขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์อินดักชันแบบ 10 ขั้ว 3 เฟส ที่มีร่องขดลวด 48 ช่อง แต่ละช่องมีขดลวดตัวนำวางไว้ 2 เส้น ตามรูปที่ 2.32 ซึ่งจากภาพตัวอย่าง เมื่อพิจารณาทิศทางของการพันขดลวดแล้ว จะเห็นได้ว่าเกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็น 10 ขั้ว ซึ่งเป็นขั้วแม่เหล็กหมุนตามสภาวะไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 2.32 มอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส แบบ 10 ขั้ว

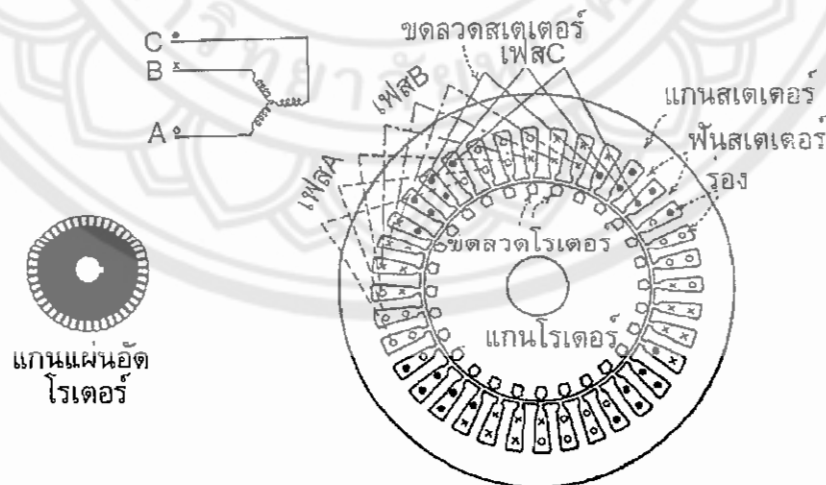
(2.) โรเตอร์ (Rotor)

โรเตอร์ของมอเตอร์อินดักชันประกอบด้วยแกนแผ่นอัดติดตั้งอยู่บนเพลา (Shaft) ซึ่งขดลวดโรเตอร์จะวางอยู่ในช่องของแกนโรเตอร์ โดยมีการต่อแบบลัดวงจรไว้ (Short circuit) หรืออาจจะต่อเข้ากับความต้านทานที่อยู่ภายนอกก็ได้ กระแสไฟฟ้าในขดลวดโรเตอร์ในทิศทางที่ตรงข้ามกัน

มอเตอร์อินดักชันซึ่งเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับนั้นแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ มอเตอร์อินดักชันตัวหมุนกรงกระรอก (Squirrel cage rotor), มอเตอร์อินดักชันตัวหมุนพันด้วยขดลวด (Wound rotor) และมอเตอร์อินดักชันตัวหมุนแบบเหล็กตัน (Solid rotor) ซึ่งมอเตอร์อินดักชันตัวหมุนกรงกระรอกแยกได้เป็น 2 แบบ คือ มอเตอร์ตัวหมุนกรงกระรอกแบบความเร็วเดียว (Single speed) และตัวหมุนกรงกระรอกแบบหลายความเร็ว (Multi speed) ซึ่งมอเตอร์ตัวหมุนแบบกรงกระรอกแบบหลายความเร็วนี้ แยกการพันของขดลวดได้เป็นชนิดขดลวดเดียว (Single winding) และชนิดขดลวดหลายขดลวด (Multi winding) ส่วนมอเตอร์อินดักชันตัวหมุนพันด้วยขดลวดก็แยกออกได้ 2 แบบ คือ ส่วนมอเตอร์อินดักชันตัวหมุนพันด้วยขดลวดแบบความเร็วเดียว และส่วนมอเตอร์อินดักชันตัวหมุนพันด้วยขดลวดแบบหลายความเร็วเช่นกัน

มอเตอร์อินดักชันตัวหมุนกรงกระรอกแบบหลายความเร็ว แยกการทำงานและควบคุมได้ 3 ชนิด คือ ชนิดทอร์กคงที่ (Constant torque), ชนิดทอร์กแปรเปลี่ยนได้ (Variable torque) และชนิดแรงม้าคงที่ (Constant horse power)

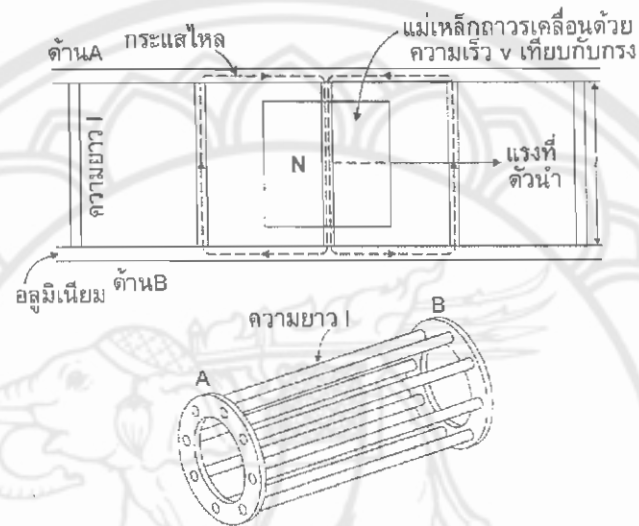
เราสามารถสังเกตลักษณะ โครงสร้างของการวางขดลวดของมอเตอร์อินดักชัน ทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์อย่างง่าย ๆ ได้ตามรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 โครงสร้างและการวางขดลวดของมอเตอร์อินดักชัน

การเหนี่ยวนำที่ทำให้เกิดทอร์กขึ้น จากการที่สนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ตัดกับลวดตัวนำของมอเตอร์อินดักชันที่มีโรเตอร์กรงกระรอกแสดงไว้ ตามรูปที่ 2.34

โรเตอร์กรงกระรอกของมอเตอร์อินดักชันตามที่กล่าวมาแล้วว่ามีการลัดวงจรไว้ด้วยวงแหวนนั้น ในบางครั้งอาจจะมีชุดขดลวดของโรเตอร์ซ้อนกัน 2 ชุดก็ได้ ซึ่งชุดขดลวดด้านนอก จะมีรีแอกแตนซ์สืบเนื่อง (Linkage reactance) น้อยกว่าชุดขดลวดด้านใน โดยที่ชุดขดลวดด้านในจะมีค่ารีแอกแตนซ์รั่ว (Leakage reactance) เกิดขึ้น



รูปที่ 2.34 การเกิดทอร์กในมอเตอร์อินดักชันที่มีโรเตอร์กรงกระรอก

ส่วนโรเตอร์ของมอเตอร์อินดักชันแบบพันขดลวด (Wound rotor) จะมีกระแสไฟฟ้าสตาร์ทต่ำ และสตาร์ทได้ที่โหลดสูงๆ โดยชุดขดลวดโรเตอร์วางในร่องที่ปลายขดลวดกับวงแหวนลื่น (Slip ring) จำนวน 3 ชุด (กรณี 3 เฟส) ตามรูปที่ 2.35

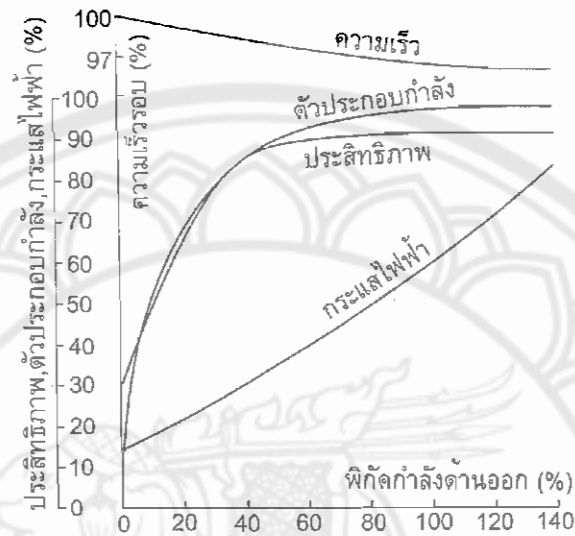


รูปที่ 2.35 วงแหวนลื่นของโรเตอร์แบบพันขดลวด

เมื่อทำการทดสอบมอเตอร์อินดักชันแบบ 3 เฟส 4 ขั้ว หากโรเตอร์สามารถปรับค่าความต้านทานได้ ในขั้นแรกให้ตั้งค่าความต้านทานของโรเตอร์ไว้สูงที่สุด แล้วป้อนแรงดันไฟฟ้า

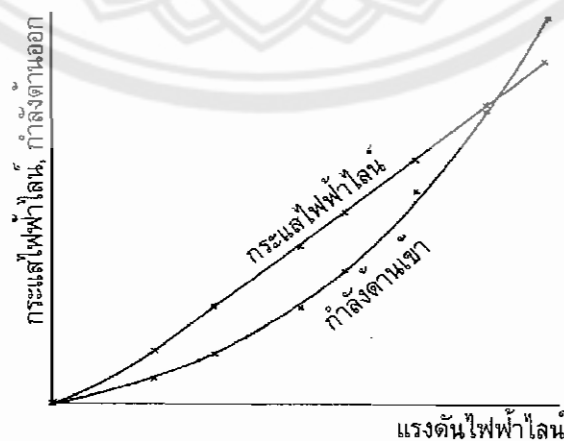
กระแสสลับเข้าจนมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่คงที่แล้ว จึงค่อยๆลดความเร็วลงจนเป็นศูนย์ (ลัดวงจร) หลังจากนั้น จึงทำการเปลี่ยนโพลไปที่ค่าต่างๆจะได้ผลตามภาพตัวอย่างในรูปที่ 2.36

จะเห็นได้ว่าเมื่อ โพลไปที่มอเตอร์อินดักชันมากขึ้นจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้า, ค่าตัวประกอบกำลังและค่าประสิทธิภาพมีค่าสูงขึ้น แต่ความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลง



รูปที่ 2.36 คุณสมบัติของมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส 4 ขั้ว

เมื่อทำการทดสอบมอเตอร์อินดักชันแบบ 3 เฟส 4 ขั้ว ในภาวะที่ตรงตัวหมุนนั้น ให้ทำการตั้งหรือยึดโรเตอร์ให้อยู่กับที่หรือไม่ให้มีการหมุน แล้วจึงป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปในมอเตอร์ หลังจากนั้นจึงทำการวัดค่าของกระแสไฟฟ้าและค่าของกำลังไฟฟ้า เมื่อได้ผลแล้วนำมาแสดงเป็นความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าได้ตามตัวอย่างในรูปที่ 2.37 การทดสอบในขั้นตอนนี้จะต้องระวังไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลเกินพิกัด โดยจะต้องค่อย ๆ เพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นทีละน้อย



รูปที่ 2.37 ตัวอย่างผลการทดสอบภาวะตรงตัวหมุนของมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส 4 ขั้ว

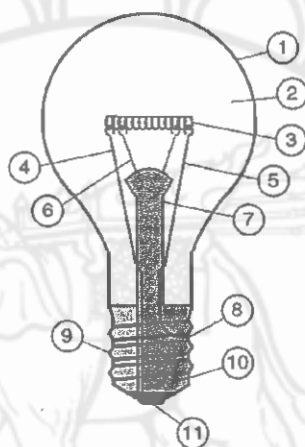
2.6 หลอดไฟฟ้า (Lamp) [6-12]

2.6.1 หลอดไส้ (Incandescent Lamp) [6-7]

1. หลอดไส้ (Incandescent Lamps) เป็นหลอดที่ให้แสงออกมาได้โดยผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าที่หลอดไส้ ซึ่งทำให้มันร้อนและให้แสงออกมา หลอดไส้ ยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

- หลอดไส้แบบธรรมดา (Normal Incandescent Lamp)
- หลอดทังสเตนฮาโลเจน(Tungsten Halogen Lamp) เป็นหลอดที่ไม่ค่อยนิยมใช้กันในบ้าน โดยทั่วไปจึงไม่ขอกล่าวถึง

ส่วนประกอบของหลอดไส้



รูปที่ 2.38 ส่วนประกอบของหลอดไส้

1. Glass bulb คือ ตัวหลอดแก้ว มีรูปร่างต่างๆกันไป โดยทั่วไปทำด้วยแก้วอ่อน ถ้าใช้ในที่อุณหภูมิสูง เช่น หลอดไฟฉายกำลังวัตต์สูง หรือหลอดไฟกลางแจ้ง จะทำด้วยแก้วแข็ง ในการที่จะลดการเคืองตาและให้แสงกระจายสม่ำเสมอ จะใช้วิธีเคลือบด้วยซิลิกาภายในหลอด เพื่อให้เกิดฝ้าขาว แต่ไม่ทำให้แสงสว่างลดลง ถ้าเคลือบด้วยสีอื่น เช่น น้ำเงิน เหลือง แดง จะทำให้แสงลดลงประมาณ 1/3 เปอร์เซนต์

2. Low pressure input gas ภายในหลอดแก้ว บรรจุก๊าซในโครเจน และอาร์กอน เพื่อให้ไส้หลอดระเหยช้าลง โดยเฉพาะหลอดไฟขนาด 40 กำลังเทียนขึ้นไป

3. Tungsten filament คือ ไส้หลอดทำด้วยทังสเตน เป็นเส้นลวดหรือขดเกลียว ที่ใช้ทังสเตนเพราะมีจุดหลอมตัวสูง อัตราการระเหยตัวต่ำ (ถ้าระเหยเร็วก็จะทำให้ไส้หลอดขาดเร็วขึ้น) เส้นผ่านศูนย์กลางของไส้หลอดจะโตขึ้นตามส่วนของกำลังเทียนที่เพิ่มขึ้น เช่น หลอด 50 วัตต์ จะเท่ากับ 1,250 ลูเมน หรือ หลอด 100 วัตต์ จะเท่ากับ 1,750 ลูเมน เป็นต้น

4. และ 8. Contact wire (goes out of stem) ทำด้วยทองแดงจากโคนถึง Stem เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าไปสู่ไส้

5. Contact wire (goes in of stem) ทำด้วยทองแดงจากโคนถึง Stem เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าไปสู่ไส้หลอด

6. Support wires เป็นลวด Molibdement (โลหะเงินสีขาวทนความร้อน) เป็นตัวพยุงไส้หลอดไว้

7. Stem (Glass mount) ทำด้วยแก้วเพื่อหุ้ม Contact wire ป้องกันไม่ให้อากาศเข้าสู่ภายในหลอด

9. Cap (Sleeve) คือ ส่วนที่เป็นปลอกหุ้มขั้วของหลอด ทำด้วยทองเหลือง

10. Insulation (Vitrite) ส่วนที่เป็นฉนวนบริเวณที่ขั้ว

11. Electrical contact เป็นบริเวณที่อยู่ปลายขั้วหลอดตรงบัดกรีด้วยตะกั่ว เพื่อให้สัมผัสและกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ดีขึ้น

การทำงานของหลอดไส้

การทำงานของไส้หลอด เป็นการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแสงสว่าง ความสว่างจากหลอดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของไส้หลอด ซึ่งเป็นสัดส่วนกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านได้

การทำงานของหลอดไฟฟ้า จะเป็นไปตามกฎของโอห์ม คือ กำลังไฟฟ้าของไส้หลอดเท่ากับแรงเคลื่อนที่ขั้วหลอด คูณกระแสที่ผ่านไส้หลอด หรือ $P = V \times I$ หรือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไส้หลอดจะเท่ากับแรงดันไฟฟ้าหารด้วยความต้านทานของไส้ หรือ $I = V/R$ ซึ่งความต้านทานนี้ ขึ้นอยู่กับความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไส้ ถ้าหลอดมีกำลังไฟฟ้าสูง ให้แสงสว่างมาก กระแสไฟฟ้าก็สูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไส้หลอดก็โตตามด้วย แต่ถ้าหลอดมีกำลังส่องสว่างน้อย กระแสไฟฟ้าที่ใช้ก็ลดต่ำลง เส้นผ่านศูนย์กลางก็เล็กลง

ตารางที่ 2.2 ค่าประมาณอุณหภูมิของไส้หลอด

กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	อุณหภูมิ(°c)
40	2,475
60	2,500
100	2,575
200	2,620
300	2,665
500	2,670
1,000	2,720
1,500	2,765

2.5.2 หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent Lamp) [8-9]

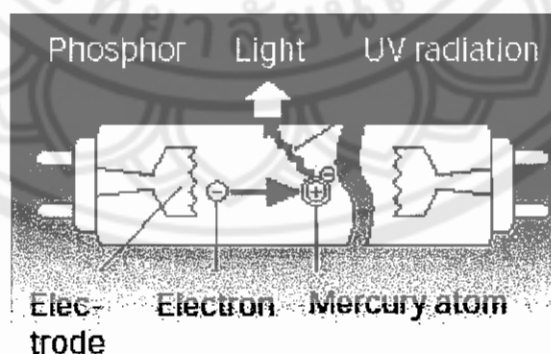
เป็นหลอดที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันเนื่องจากให้แสงสว่างสูง อายุการใช้งานยาวนาน แสงสีที่นุ่มนวลและความร้อน ที่ตัวหลอดน้อยกว่า เมื่อเทียบกับหลอดมีไส้ คุณสมบัติดังกล่าวจึงเหมาะกับการนำไปใช้ให้แสงสว่างทั่วไปในอาคาร และนอกอาคารเป็นบางแห่ง

ประเภทของหลอดฟลูออเรสเซนต์

1. Preheat
2. Rapid start
3. Instant start

นอกจากนี้ยังมีหลอดที่ให้แสงสว่างสูงพิเศษจำพวก High output และ Very high output อีกด้วย โดยหลอดชนิด Preheat เป็นแบบที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางทั่วไปสังเกตง่าย ๆ คือประกอบด้วยตัวหลอด, บัลลาสต์และสตาร์ทเตอร์ ส่วนแบบ Rapid start ไม่ต้องอาศัยสตาร์ทเตอร์เนื่องจากใช้บัลลาสต์แบบพิเศษ ที่จ่ายไฟเลี้ยงไส้หลอดให้อุ่นตลอดเวลา ทำให้จุดติดง่ายกว่า และหลอดก็ต่างจากแบบ Preheat ไม่สามารถใช้ร่วมกันได้ เหมาะกับสถานที่ที่มีอุณหภูมิต่ำ และยังสามารถใช้ร่วมกับเครื่องรีไฟได้ด้วย ส่วนแบบ Instant start จะใช้การจ่ายแรงดันสูงประมาณ 400 - 1000 V เข้าที่ตัวหลอดโดยผ่านบัลลาสต์ เพื่อกระตุ้นให้อิเล็กตรอนหลุดออกจาก Cathode หลอดชนิดนี้ไม่ต้องอาศัยสตาร์ทเตอร์ เช่นกัน ลักษณะขั้วหลอดโดยทั่วไป เป็นแบบ Single pin แต่อาจมีแบบ Bipin ในบางรุ่นเพื่อให้สามารถใช้ร่วมกับ ขั้วหลอดทั่วไปได้ หลอด Instant start เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าหลอด Slimline

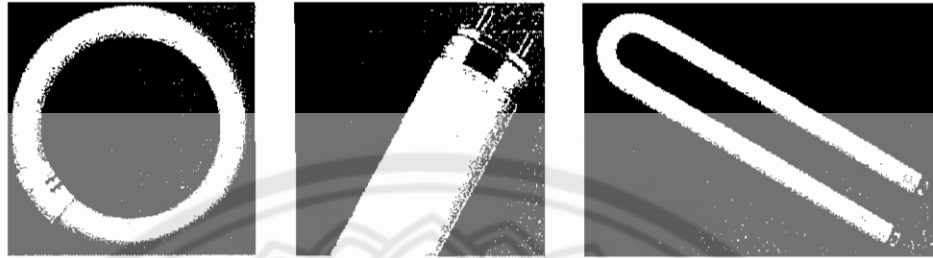
โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์ [9]



รูปที่ 2.39 โครงสร้างของหลอดฟลูออเรสเซนต์

ตัวหลอดหรือกระเปาะแก้ว

เป็นหลอดแก้วใสหนาประมาณ 0.8 - 1.0 มม. ลักษณะโดยทั่วไปเป็นหลอดแก้วยาวตรง , วงกลมหรือรูปตัวยู ดังรูป

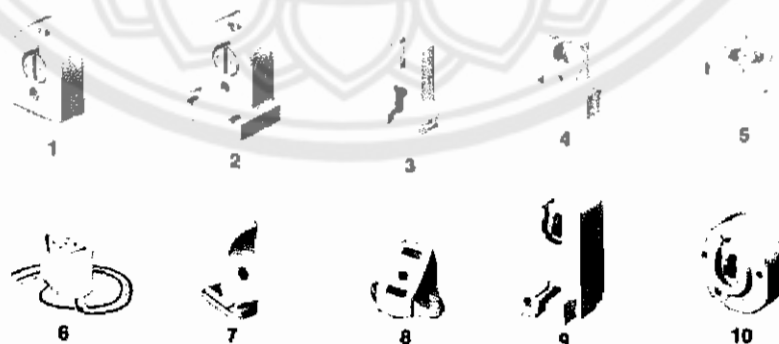


รูปที่ 2.40 ลักษณะตัวหลอดในรูปแบบต่างๆ

การกำหนดขนาดของกระเปาะจะใช้ตัว T แล้วตามด้วยตัวเลขที่ระบุเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น หุน เช่นหลอด T12 หมายถึงหลอดที่มี เส้นผ่าศูนย์กลาง 12 หุน หรือ 12/8 นิ้ว เป็นต้น บริเวณขั้ว หลอดด้านใดด้านหนึ่งจะแสดงรายละเอียดของหลอด เช่น จำนวนวัตต์ ปริมาณแสงและชนิดของ หลอด เป็นต้น สำหรับหลอดชนิด Preheat ที่นิยมใช้กันทั่วไปได้แก่ Daylight, Cool white, Warm white แต่ละแบบจะให้แสงสีที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับสารเคลือบเรืองแสงที่ฉาบไว้ภายใน สำหรับบ้านพัก อาศัยทั่วไปจะใช้แบบ Daylight ที่มีสีโทนขาว-ฟ้า ส่วน Warm white จะมีสีโทนขาว - ส้มคล้ายสี หลอดไส้ เป็นต้น

ขั้วหลอดฟลูออเรสเซนต์

แตกต่างกันไปตามชนิดของหลอด สำหรับหลอดชนิด Hot cathode จะมีจุดต่อวงจรอยู่ 4 จุด ขั้วหลอดจึงมีด้านละ 2 เขี้ยว เรียกว่า Bipin ส่วนชนิด Cold cathode จะเป็นแบบ Single pin คือ มีเขี้ยวยื่นออกมาข้างละเขี้ยวเท่านั้น แต่ละแบบใช้ร่วมกับขั้วหลอดต่างกันออกไป



รูปที่ 2.41 ขั้วหลอดฟลูออเรสเซนต์

สารเคลือบเรืองแสง (Phosphor)

ใช้ฉาบไว้ที่ผนังด้านในของหลอดแก้วเพื่อเปลี่ยนรังสีอัลตราไวโอเล็ตให้เป็นแสงที่มองเห็นได้ ซึ่งสีที่เปล่งออกมาจะขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติทางเคมีของสารเรืองแสงนั้น ในภาวะปกติที่หลอดยังไม่ทำงานจะยังคงมองเห็นหลอดเป็นสีขาว ต่อเมื่อหลอด ทำงานแล้ว จึงมองเห็นแสงสีแตกต่างกัน (ยกเว้นหลอดบางแบบที่ฉาบเมือสีไว้ภายใน ก็จะเห็น หลอดเป็นสีนั้น ๆ ทั้งขณะที่หลอด ทำงานและไม่ทำงาน)

อิเล็กโทรด (Electrode)



รูปที่ 2.42 ขั้วอิเล็กโทรด

มีลักษณะเป็น ไข่หลอดขนาดเล็กที่ปลายหลอดทั้ง 2 ข้างทำด้วยทังสเตน เคลือบด้วยสาร Alkaline earth oxide เพื่อช่วยให้ Cathode ปล่อยอิเล็กตรอนออกมาได้เป็นจำนวนมากอาจใช้ แบเรียม, สตรอนเทียม, แคลเซียมออกไซด์ ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับขนาด, รูปร่างอิเล็กโทรดของหลอดอาจแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของหลอดบางชนิดอาจมีวงแหวน โลหะครอบไว้เพื่อป้องกัน ขั้วหลอดดำ

บัลลาสต์ (Ballast)

ทำหน้าที่สำคัญ 2 ประการ คือ สร้างแรงดันไฟฟ้าให้สูงพอสำหรับการจุดหลอดให้ติดสว่าง และควบคุมกระแสที่ไหลผ่านวงจรขณะเริ่มทำงาน และทำงานให้มีค่าเหมาะสม มีทั้งบัลลาสต์แกนเหล็กและบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

สตาร์ทเตอร์ (Starter)



รูปที่ 2.43 สตาร์ทเตอร์

ใช้ในวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบ Preheat โดยทำหน้าที่ช่วยจุดหลอดให้ติดสว่างในตอนแรก ที่มีขั้วทั่วไปสามารถใช้ร่วมกับหลอดได้หลายขนาด เช่น ยี่ห้อฟิลิปส์รุ่น S10 ใช้กับหลอดขนาดตั้งแต่ 4 - 65 วัตต์ หากใช้สตาร์ทเตอร์ที่มีขนาดวัตต์ไม่เหมาะสมกับ ขนาดวัตต์ของหลอดจะมีผลต่อการจุดหลอดอาจติดยาก หรือไม่สามารถจุดติดได้

อายุของหลอด

สำหรับหลอดแบบ Preheat จะมีอายุประมาณ 8,000 - 10,000 ชั่วโมง โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการคือ เปิดหลอดให้ติดสว่าง 2 ชั่วโมง 50 นาที แล้วปิด 10 นาที สลับกันไปจนกระทั่งหลอดดับไปครึ่งหนึ่งของจำนวนที่ทดสอบ ก็จะเป็นอายุโดยเฉลี่ยของหลอดฟลูออเรสเซนต์ แต่การนำมาใช้งานจริงอาจแตกต่างกันไปจากค่าที่ระบุ เนื่องจากขึ้นอยู่กับ สภาพแวดล้อมขณะใช้งานเช่น แรงดัน, อุณหภูมิ, ความถี่ในการเปิด - ปิดหลอด เป็นต้น

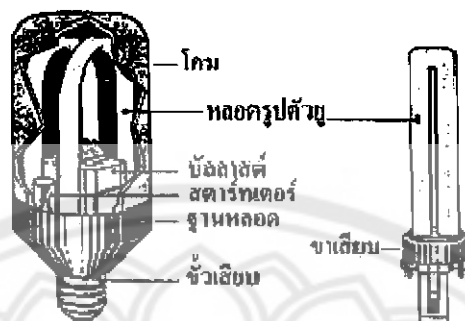
ข้อแนะนำในการใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์

1. หลอดแบบ Preheat ไม่เหมาะสำหรับใช้กับห้องที่มีเพดานสูงเกินกว่า 5 - 7 เมตร เพราะต้องใช้หลอดจำนวนมาก การที่อายุหลอดไม่มากนัก ทำให้ต้องเปลี่ยนหลอดบ่อย เปลืองค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา
2. ถ้าจำเป็นต้องใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ในพื้นที่ที่มีความสูงเกินกว่า 7 เมตร ให้ใช้หลอดแบบ Rapid start จะเหมาะกว่า เพราะมีอายุการใช้งานนานถึง 20,000 ชั่วโมงและไม่มีปัญหาเรื่อง Starter
3. ควรเลือกสีของหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้เหมาะสมกับงานเช่น Daylight, Warm white, Cool white เป็นต้น
4. งานที่ต้องการความส่องสว่างสูงกว่า 500 ลักซ์ควรใช้หลอด Daylight
5. งานที่ต้องการความส่องสว่าง 300 - 500 ลักซ์ควรใช้หลอด Cool white
6. งานที่ต้องการความส่องสว่างต่ำกว่า 300 ลักซ์ควรใช้หลอด Warm white
7. การเลือกใช้สีของหลอดอาจพิจารณาพื้นที่ใช้สอยประกอบกัน โดยพื้นที่ที่อยู่ติดกันควรใช้หลอดที่มีโทนสีใกล้เคียงกัน
8. เป็นหลอดที่มีฮาร์โมนิก ซึ่งมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการใช้บัลลาสต์

2.5.3 หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ (Compact Fluorescent Lamp) [10]

หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ เป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาดเล็กที่ได้มีการพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงานและเพื่อใช้แทนหลอดไส้ที่ใช้กันมาแต่ดั้งเดิม มีขนาด กระทัดรัด และมีกำลังส่องสว่างสูง หลอดชนิดนี้เหมาะสมในการให้แสงสว่างทั่วไปที่ต้องการความสวยงาม มีอายุการใช้งานนานกว่าหลอดไส้ประมาณ 8 เท่า หรือ 8,000 ชั่วโมง และการใช้พลังงานของ

หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์จะน้อยกว่าหลอดไส้ประมาณ 4 เท่า ปัจจุบันหลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์มี 2 ชนิด คือ



รูปที่ 2.44 โครงสร้างและส่วนประกอบของหลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์

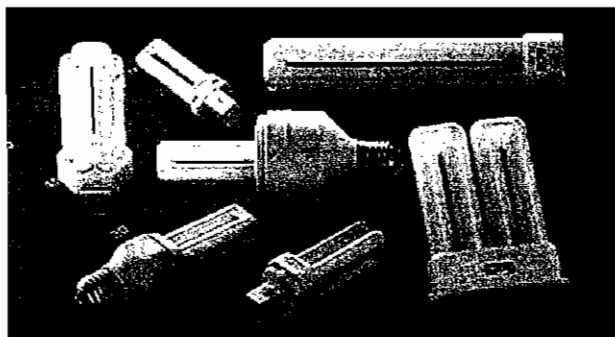
1. หลอดคอมแพคบัลลาสต์ภายใน

1.1 หลอดคอมแพคบัลลาสต์ภายในชนิดแกนเหล็ก คือ หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ได้รวมเอาบัลลาสต์และสตาร์ทเตอร์อยู่ภายใน ผลิตขึ้นมาแทนหลอดไส้ สามารถนำไปสวมกับขั้วหลอดไส้ชนิดเกลียวได้ทุกดวงได้ทันที ลักษณะของหลอดภายในเป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาดเล็กเป็นแท่งแก้วโค้งเป็นรูปตัวยูมีเปลือกเป็นโคมทรงกระบอก มีขูดบัลลาสต์และสตาร์ทเตอร์ปิดผนึกรวมกันอยู่ในชั้นเดียวกับกับตัวหลอด

1.2 หลอดคอมแพคบัลลาสต์ภายในชนิดอิเล็กทรอนิกส์ มีลักษณะเหมือนหลอดฟลูออเรสเซนต์ บัลลาสต์ ภายในชนิดแกนเหล็ก จะต่างกันที่เป็นหลอดประหยัดไฟขนาดเล็กที่ไม่มีโคมกระบอก ผลิตด้วยเทคโนโลยีล่าสุด ในการทำบัลลาสต์และสตาร์ทเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งพัฒนารูปแบบของหลอดให้ประหยัดและมีขนาด กระทัดรัดขึ้นกว่าเดิม ตัวหลอดเป็นแท่งแก้วโค้งเป็นรูปตัวยูหลายชุดและใช้เทคนิคพิเศษเชื่อมต่อกัน หลอด ชนิดนี้จะติดทันทีโดยไม่กระพริบ

2. หลอดคอมแพคบัลลาสต์ภายนอก

ใช้หลักการเช่นเดียวกับหลอดคอมแพคบัลลาสต์ภายใน แตกต่างกันที่หลอดคอมแพคบัลลาสต์ภายนอกสามารถเปลี่ยนเฉพาะตัวหลอดได้ ในการติดตั้งใช้งานจะต้องมีขดลวดเพื่อใช้กับบัลลาสต์ที่แยกออก หรือขดลวดที่มีขูดบัลลาสต์รวมอยู่ด้วย



รูปที่ 2.45 หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์

ข้อดีของหลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์

1. หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์กินไฟเฉลี่ยเพียง 25 % หรือกินไฟน้อยกว่า 4 เท่า เมื่อเทียบกับหลอดไส้ที่ให้แสงสว่างเท่ากัน
2. มีอายุการใช้งานนานกว่าหลอดไส้ถึง 8 เท่า หรือ 8,000 ชั่วโมง
3. ขณะนี้ใช้งานจะมีความร้อนน้อยกว่าหลอดไส้มาก จึงช่วยลดภาระการทำความร้อนของเครื่องทำความเย็น หรือเครื่องปรับอากาศได้มาก
4. สามารถนำหลอดคอมแพคบัลลาสต์ภายในไปใช้ติดตั้งแทนหลอดไส้ที่มีอยู่เดิมได้ทันที
5. ลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและเปลี่ยนหลอด เนื่องจากมีอายุการใช้งานนานกว่าหลอดไส้

ข้อเสียของหลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์

1. มีราคาแพงกว่าหลอดไส้ (แต่ถ้าพิจารณาถึงอายุการใช้งานที่เท่ากันแล้วหลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์จะประหยัดหลอดและกระแสไฟฟ้าได้มากกว่า)
2. หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์บัลลาสต์ภายในชนิดมีบัลลาสต์และสตาร์ทเตอร์ฝังผนึกเป็นชุดเดียวกัน ถ้าเกิดการชำรุดต้องเปลี่ยนทั้งหมด

ประโยชน์ของหลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์

1. สามารถนำไปติดตั้งแทนหลอดไส้ได้ทันที ในกรณีที่ท่านจำเป็นต้องใช้หลอดไส้ประกอบกับโคมไฟ เพื่อตกแต่งบ้านติดตั้งโคมไฟรอบอาคารและมีชั่วโมงการใช้งานนานตั้งแต่ 5 ชั่วโมงขึ้นไป
2. ช่วยประหยัดค่าไฟฟ้าได้ตั้งแต่ร้อยละ 68 - 78 เมื่อนำไปติดตั้งแทนหลอดไส้ถึงแม้หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ จะมีราคาแพงก็ตาม แต่ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจะสามารถคืนทุนได้ในเวลาไม่นาน เช่น หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์บัลลาสต์ภายใน 13 วัตต์ ใช้งาน 11 ชั่วโมง/วัน 365 วัน/ปี จะสามารถคืนทุน ได้ภายใน 9 เดือน หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์บัลลาสต์ภายนอก 9 วัตต์ ใช้งาน 5 ชั่วโมง/วัน 365 วัน/ปี จะสามารถคืนทุน ได้ภายใน 7 เดือน

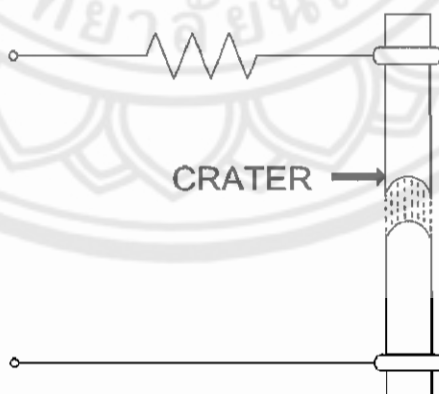
2.5.4 หลอดดิสชาร์จ (Discharge Lamp)

เป็นหลอดที่ทำงานโดยอาศัยการอาร์ค จากการปล่อยประจุก๊าซ (Gaseous Discharge) ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของหลอดไฟฟ้า มีหลักการทำงานดังนี้คือ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้วอิเล็กโทรดจะร้อน เกิดอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างของอะตอมของก๊าซที่บรรจุอยู่เพื่อที่จะไปครบวงจรยังอิเล็กโทรดอีกข้างหนึ่ง อะตอมของก๊าซจะแตกตัวและเปล่งแสงสว่างเมื่อมีอิเล็กตรอนวิ่งเข้ามาแทนที่ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอิเล็กโทรด จะเป็นตัวเร่งให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้น และเมื่อหลอดสว่างอิเล็กตรอนจะกลับไปยังตำแหน่งปกติในโครงสร้างของอะตอม ซึ่งความสว่างของหลอดนี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซที่ใช้บรรจุภายในหลอด

การเริ่มต้นดิสชาร์จนี้ จะเกิดการอาร์ค และเกิดแสงสว่างที่ขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งด้านหนึ่งคือ คาโทด (Cathode) อีกด้านหนึ่ง คือ อนอด (Anode) อิเล็กโทรดจะเปลี่ยนหน้าที่เป็นตัวจ่ายพลังงานออกจากขั้ว และจากหลักการอันนี้ ถูกนำไปใช้กับหลอดปล่อยประจุความเข้มสูง (HID) และหลอดนีออน

หลักการเบื้องต้นของหลอดอาศัยการอาร์ค

การอาร์ค (หรือการเกิดประกายไฟกระโดด) จะเริ่มขึ้น โดยนำขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากแท่งถ่าน 2 อัน มาวางไว้ใกล้กัน ที่หน้าสัมผัสของแท่งถ่านทำเป็นส่วนโค้ง เมื่อต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไป คุณสมบัติของแรงเคลื่อนและกระแสจะเคลื่อนที่จากทางขั้วลบไปยังขั้วบวก แต่เมื่อวางแท่งถ่านห่างกันเล็กน้อย การเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าจะเป็นประกายไฟ กระโดดข้ามไปยังขั้วบวก โดยมีค่าความต้านทานของบัลลาสต์ที่ใช้สำหรับไฟกระแสตรง (D.C) ต่ออนุกรมอยู่สำหรับไฟกระแสสลับก็ใช้บัลลาสต์สำหรับเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้นโดยอัตโนมัติ เพื่อช่วยให้กระแสไฟฟ้าครบวงจร ดังรูป



รูปที่ 2.46 ประกายไฟจากการอาร์ค เกิดขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรด

ความเข้มของแสงที่เกิดจากไฟกระแสตรง ทำให้เกิดการอาร์คขึ้นนี้ จะใช้กระแสปกติประมาณ 30 แอมป์ ที่แรงดันไฟฟ้า 55 โวลต์ D.C.

การเกิดประกายไฟขึ้นที่ส่วนโค้งของขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองที่แกนคาร์บอน ซึ่งผสมสารเคมีชนิดหนึ่ง คือ Flame Material เข้าไป ทำให้เกิดประสิทธิภาพรังสีของแสงขึ้น และความร้อนที่มีความเข้มสูงนี้จะวิ่งไปมาระหว่างขั้วทั้งสอง เกิดเป็นแหล่งกำเนิดแสงขึ้น เมื่อนำอิเล็กโทรดนี้ไปใส่ไว้ในหลอดแก้วและบรรจุสารเคมีชนิดต่าง ๆ เข้าไป เช่น ออกไซด์ของเซอร์เรียม (Cerium) จะให้แสงสีขาว ถ้าใช้ส่วนผสมแคลเซียม (Calcium) จะให้แสงสีเหลือง แสงสีแดงจะได้จากส่วนผสมของสตรอนเทียม (Strontium) ประสิทธิภาพของหลอดเหล่านี้จะสูงถึง 80 ลูเมน/วัตต์

การแบ่งชนิดของหลอดดิสชาร์จความเข้มสูง (HID)

หลอดดิสชาร์จความเข้มสูง (High Intensity Discharge Lamps) แบ่งออกเป็น 5 ชนิด คือ

1. หลอดไอปรอท (Mercury Vapor Lamps)
2. หลอด
 - Metal Halide
 - Super Metal Arc
 - Double Ended Metal Arc
3. หลอดผสม (Blended Lamps)
4. หลอดโซเดียมความดันสูง (High Pressure Sodium Lamps)
5. หลอดโซเดียมความดันต่ำ (Low Pressure Sodium Lamps)

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะหลอดหลอดโซเดียมความดันสูงเท่านั้น

2.5.4.1 หลอดโซเดียมความดันสูง (High Pressure Sodium Lamps) [12]



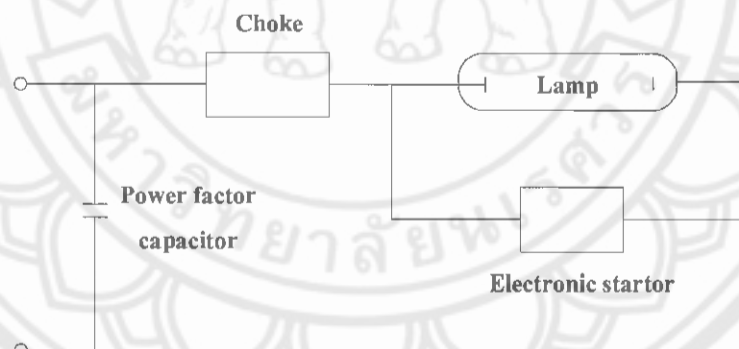
รูปที่ 2.47 หลอด โซเดียมความดันสูง

หลอดโซเดียมความดันสูงนี้ ตัวหลอดแก้วอาร์คทำด้วย Aluminium Oxide Ceramic ที่ทนปฏิกิริยาความร้อนจากอะตอมของโซเดียมได้สูงถึง $1,300^{\circ}\text{C}$ แสงที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยไฟฟ้า

จากอะตอมของ โซเดียม เป็นเหตุให้เกิดการดูดกลืนรังสีจากคลื่นแสงอื่นให้ลดลง ทำให้แสงที่ได้ ออกมารู้อีกรอบอ่อน โดยแสงจะมีสีคล้าย ๆ แสงสีทองจาง ๆ (Golden-White Light)

หลักการการทำงานของหลอดอาร์คที่เติมก๊าซโซเดียม คือ การกระจายแสงจำนวนมากของก๊าซโซเดียมออกมารวมกับธาตุอื่นที่บรรจุอยู่ภายในหลอด คือ ก๊าซซีนอน นีออน และอาร์กอน อะตอมของก๊าซเหล่านี้มาปะทะเข้ากับไอปรอท ทำให้เกิดอิเล็กตรอนจำนวนมากมาชนเข้ากับก๊าซโซเดียมทำให้เกิดแสงขึ้น แรงดันในขณะที่เกิดการอาร์คนี้ จะสูงกว่าแรงดันปกติ เนื่องจากการเหนี่ยวนำของบัลลาสต์ แต่จะเกิดขึ้นเพียงระยะเวลาสั้น ๆ เท่านั้น ปฏิกริยาของก๊าซซีนอนที่แรงดันลดลงนี้ มีความสำคัญมากในการเริ่มสตาร์ทหลอดใหม่ หลังจากหลอดเย็นตัว

ตามมาตรฐานของหลอดโซเดียมความดันสูง จะต้องมีบัลลาสต์เป็นอุปกรณ์ช่วยเริ่มการติดสว่างของหลอด แต่ก็ต้องมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อีกชุดหนึ่งเป็นตัวควบคุมความจรรออยู่ภายนอกบัลลาสต์อีกทีหนึ่ง ดังรูป ขณะที่ก๊าซภายในหลอดปล่อยประจุ เนื่องจากความร้อนที่ขั้วอิเล็กโทรด อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และบัลลาสต์ จะทำงานโดยเหนี่ยวนำให้แรงดันไฟฟ้าสูงถึง 2,300 – 4,000 โวลต์ เพื่อให้แรงเฉื่อยในการปล่อยประจุของก๊าซซีนอนเคลื่อนที่ไปตามไอปรอท และก๊าซโซเดียมที่บรรจุอยู่ในหลอดอาร์ค จะเกิดปฏิกริยานี้ประมาณ 2 นาที หลังจากนั้นจะปรากฏติดแสงเร็ว ๆ ขึ้น เพื่อให้ปฏิกริยานี้ทำงานเต็มที่อีกประมาณ 5 นาที หลังจากนั้น หลอดจะติดสว่างเต็มที่ และแรงดันจะลดลงสู่สภาพปกติ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของหลอด ซึ่งอยู่ระหว่าง -40°C ถึง $+70^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 2.48 วงจรหลอด โซเดียมและขยายส่วนอิเล็กทรอนิกส์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษาผลกระทบของการปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ส่งผลต่อโหลดทางไฟฟ้า ได้ใช้วิธีการดำเนินงานวิจัยโดยการทดลอง ลักษณะของโหลดที่นำมาทำการศึกษาดทดลอง เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ใช้กันทั่วไปในอาคารสำนักงาน โรงงานอุตสาหกรรม โดยแบ่งเป็นโหลดแสงสว่างและโหลดมอเตอร์ ซึ่งมีวัสดุอุปกรณ์ และขั้นตอนการดำเนินการทดลองดังนี้

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. Variable Voltage Transformer ยี่ห้อ Slideup Model K-410 พิกัด 6.6 kVA 10A ของบริษัท Voltac Co.,Ltd.
2. หลอดไส้ ยี่ห้อ Philips ขนาด 100 W 220 - 240 V
3. หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ยี่ห้อ Philips ขนาด 14 W 220 - 240 V
4. หลอดฟลูออเรสเซนต์ยี่ห้อ Toshiba warm white FL18W/T8/WW 67 lm/W บัลลาสต์ยี่ห้อ Octane 18/20W 220 V 0.37 A 50 Hz P.F. 0.35(0.37) สตาร์ทเตอร์ยี่ห้อ RY FS-U4-65 W
5. หลอดโซเดียมความดันสูงยี่ห้อ Philips 150 W E40 Base บัลลาสต์ยี่ห้อ GATA N150 220 V 50 Hz 150W 1.8 A P.F.0.39
6. พัดลมยี่ห้อ Accord พัดลมตั้งพื้น 24" รุ่น AC-24ขนาด 600 mm, 220 V/50 Hz 196 W วัสดุฉนวนของลวดชนิด E ค่าประสิทธิภาพการระบายลม $1.6 \text{ m}^3/\text{min}/\text{w}$
7. ปั๊มน้ำ 1/8 Hp 1 phase 220 V 50 Hz Output watts: 100 Max flow: 68 L/min
8. Pole Squirrel Cage Induction Motor 175 watts 1360 r/min380 V/50Hz0.52 A 3 Phase Lab-Volt 8221-05 พร้อมชุด Electrodynamometer Torque 0-3 N.m speed 250-5000 r/min Lab-Volt8911-15
9. โวลต์มิเตอร์
10. แอมป์มิเตอร์ Lab-Volt 8425-05
11. วัดค่ามิเตอร์ 3 เฟส Lab-Volt 8441-25
12. Amprobe Model : PF1050(50Hz)
13. เครื่องวัดความเข้มแสงแบบดิจิตอล Digital Light Meter ยี่ห้อ Digicon รุ่น LX-70
14. Photo/Contact Tachometer ยี่ห้อ KLETON K4010
15. เครื่องวัดอัตราไหลของน้ำ (Potaflow) บริษัท Micronics.Ltd

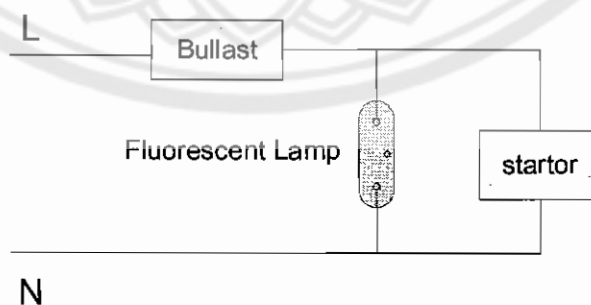
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

จัดเตรียมอุปกรณ์ที่ต้องการ เพื่อทดสอบโหลดโดยแบ่งการทดลองตามลักษณะของโหลด ออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

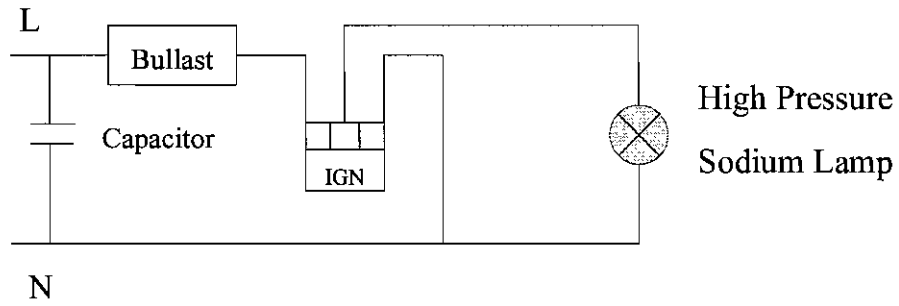
1. โหลดแสงสว่าง ได้แก่ หลอดไส้, หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ หลอดฟลูออเรสเซนต์ และหลอดโซเดียมความดันสูง นำหลอดแต่ละชนิดมาต่อวงจรเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า และเครื่องมือวัด ได้แก่ โวลต์มิเตอร์ แอมป์มิเตอร์ วัตต์มิเตอร์ และ Amprobe โดยใช้กัทช์มิเตอร์ในการวัดพลังงานแสงที่ได้จากหลอดไฟ แล้วทำการปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ให้มีค่าแรงดันไฟฟ้าตามที่ต้องการ คือ 190 – 240 V โดยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าครั้งละ 10 V จากนั้นกดสวิทช์ให้หลอดทำงาน อ่านค่าที่ได้จากเครื่องมือวัด พร้อมสังเกตพฤติกรรมของหลอดแต่ละชนิด โดยเฉพาะหลอดโซเดียมความดันสูง ที่ต้องใช้เวลาในการเปิดหลอดจนแสงสว่างเต็มที่
2. โหลดมอเตอร์ ได้แก่ มอเตอร์อินดักชัน, พัดลม และปั้มน้ำ นำมอเตอร์แต่ละชนิดมาต่อวงจรเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า และเครื่องมือวัด ได้แก่ โวลต์มิเตอร์ แอมป์มิเตอร์ วัตต์มิเตอร์ และ Amprobe สำหรับพลังงานที่ได้จากมอเตอร์แต่ละชนิดจะแตกต่างกัน โดย พัดลมวัดจากความเร็วของตัวมอเตอร์ ปั้มน้ำวัดจากอัตราการไหลของน้ำ มอเตอร์วัดจากค่าทอร์ก ซึ่งทำการปรับแรงดันไฟฟ้า สังเกตและบันทึกผลเช่นเดียวกับโหลดแสงสว่าง



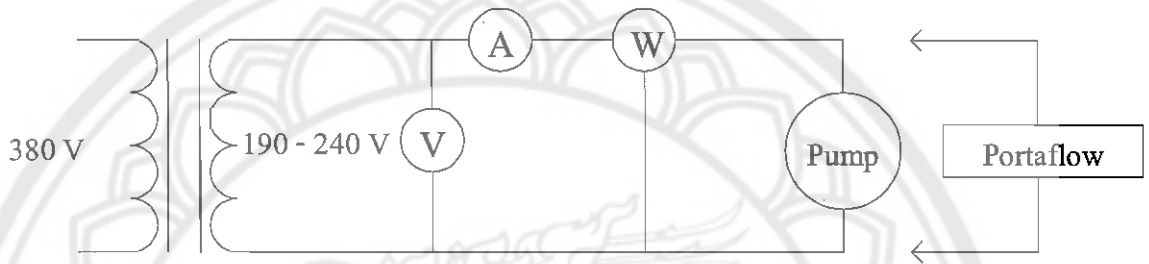
รูปที่ 3.1 วงจรใช้ทดสอบโหลดประเภทแสงสว่าง



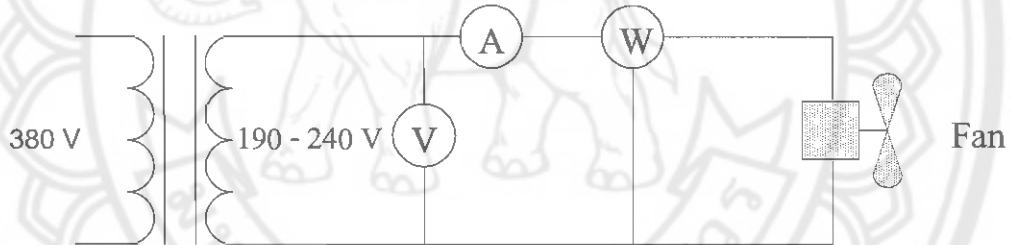
รูปที่ 3.2 การต่อวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์



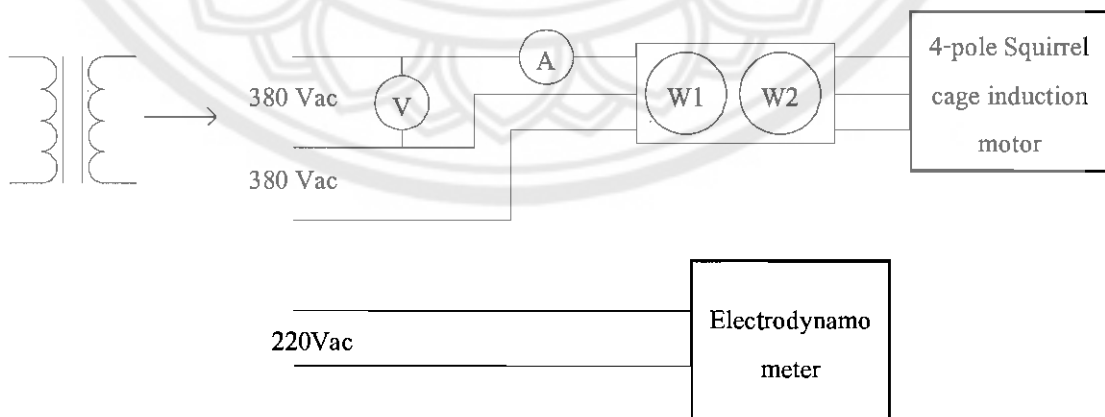
รูปที่ 3.3 การต่อวงจรของหลอดโซเดียมความดันสูง



รูปที่ 3.4 การต่อวงจรของปั้มน้ำ



รูปที่ 3.5 การต่อวงจรของพัดลม



รูปที่ 3.6 การต่อวงจรของมอเตอร์อินดัคชั่น

3.3 การหาการลดลงของกำลังไฟฟ้า

การหาการลดลงของกำลังไฟฟ้าได้ทำการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. การศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด
2. การศึกษาพฤติกรรมของโหลดใส่ที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน
3. การศึกษาพฤติกรรมของโหลดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน
4. การศึกษาพฤติกรรมของโหลดฟลูออเรสเซนต์ที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน
5. การศึกษาพฤติกรรมของโหลดโซเดียมความดันสูงที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน
6. การศึกษาพฤติกรรมของปั้มน้ำที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน
7. การศึกษาพฤติกรรมของพัดลมที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน
8. การศึกษาพฤติกรรมของมอเตอร์อินดักชันที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน

จากการศึกษาพฤติกรรมของโหลดชนิดต่าง ๆ สามารถสรุปรายละเอียดของผลการศึกษาดังผลการทดลองในบทที่ 4 และจากการศึกษาดังกล่าวนี้จะนำไปวิเคราะห์หากำลังไฟฟ้าที่ลดลงเปรียบเทียบกับสมการที่ได้อ้างอิงมาข้างต้น



บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด

ทำการทดสอบการใช้พลังงานของตัวหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านขาเข้าของหม้อแปลง ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

V_{A-B} [V]	V_{B-C} [V]	V_{C-A} [V]	I_A [A]	I_B [A]	I_C [A]
395.7	395.7	397.1	0.165	0.160	0.130

ในการทดสอบตัวหม้อแปลงไฟฟ้าปรากฏว่ามีกระแสเกิดขึ้น ซึ่งเกิดจากความสูญเสียเกิดขึ้นภายในตัวหม้อแปลงไฟฟ้า ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลง อัตราส่วนแรงดันที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

Tap	V_{in} [V]	V_{out} [V]
1.051	395.7	415.7 (240)
1.007	395.7	398.4 (230)
0.963	395.7	381.1 (220)
0.919	395.7	363.7 (210)
0.921	395.7	346.4 (200)
0.832	395.7	329.1 (190)
1.011	395.7	400
0.986	395.7	390
0.960	395.7	380
0.935	395.7	370

หมายเหตุ: 1. $X(Y)$; $X = V_{line}$, $Y = V_{phase}$

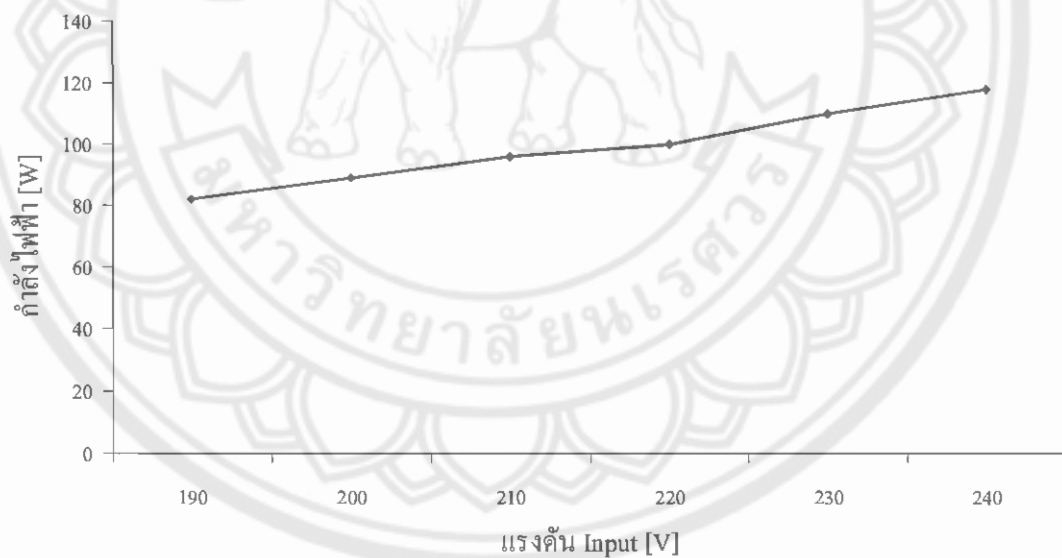
2. การทดลอง 1 เฟส ใช้แรงดันเฟส A

4.2 การศึกษาพฤติกรรมของหลอดไส้ที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน

ทำการศึกษาลักษณะของหลอดที่เป็นหลอดไส้ที่เกิดขึ้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 และเมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มาพล็อตกราฟเทียบกับแรงดันไฟฟ้า จะได้กราฟดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.3 การทดสอบของหลอดไส้เมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า

Input	Output				
แรงดัน [V]	แรงดัน [V]	กระแส [A]	Power [W]	Power factor	ความเข้มแสง [Lux]
190	158.0	0.55	82	0.649	1610
200	165.1	0.56	89	0.657	1830
210	173.6	0.58	96	0.664	2200
220	181.0	0.60	100	0.675	2620
230	188.1	0.62	110	0.660	3040
240	195.7	0.66	118	0.664	3550



รูปที่ 4.1 กำลังไฟฟ้าในการทดสอบหลอดไส้

จากการศึกษาพบว่า กำลังไฟฟ้าที่หลอดไฟใช้จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าขึ้น แต่หลอดไฟจะให้แสงสว่างที่เพิ่มขึ้นด้วย

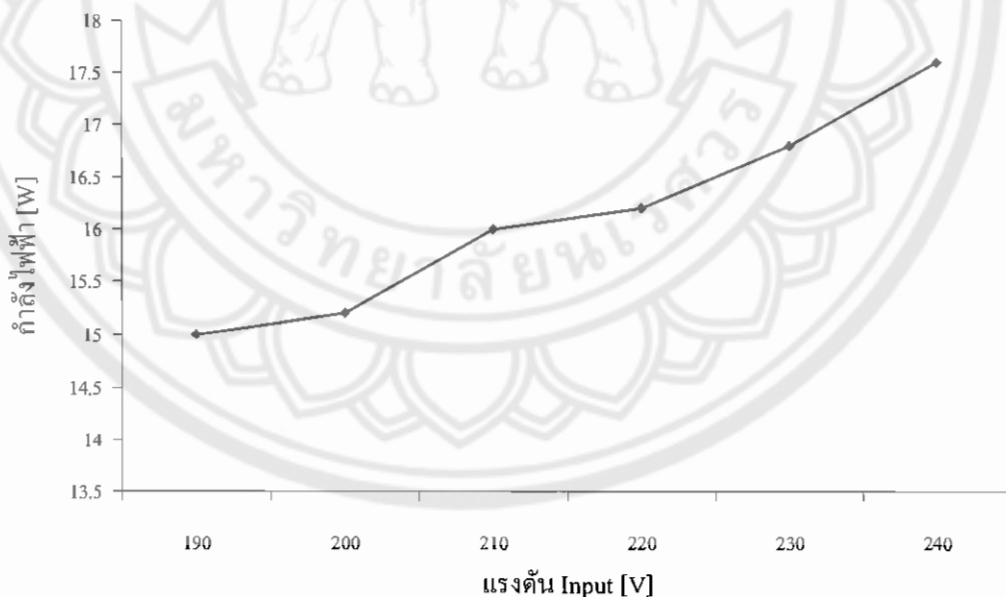
4.3 การศึกษาพฤติกรรมของหลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน

ทำการศึกษาลักษณะของหลอดแสงสว่างที่เป็นหลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4 และเมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มาพล็อตกราฟเทียบกับแรงดันไฟฟ้า จะได้กราฟดังรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.4 การทดสอบของหลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า

Input	Output				
แรงดัน [V]	แรงดัน [V]	กระแส [A]	Power [W]	Power factor	ความเข้มแสง [Lux]
190	177.0	0.125	15.0	N/A	1830
200	186.4	0.122	15.2	N/A	1850
210	195.7	0.120	16.0	N/A	1870
220	204.0	0.118	16.2	N/A	1870
230	213.5	0.119	16.8	N/A	1900
240	222.0	0.120	17.6	N/A	1950

N/A คือ เครื่องมือวัดไม่สามารถอ่านค่าได้



รูปที่ 4.2 กำลังไฟฟ้าในการทดสอบหลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์

จากการศึกษาพบว่า มีลักษณะเหมือนกับหลอดไส้ เพียงแต่มีการใช้กำลังไฟฟ้าไม่มาก จึงมีค่าความแตกต่างกันระหว่างกำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพค่อนข้างน้อย ส่วนกราฟที่ได้ควรเป็นใน

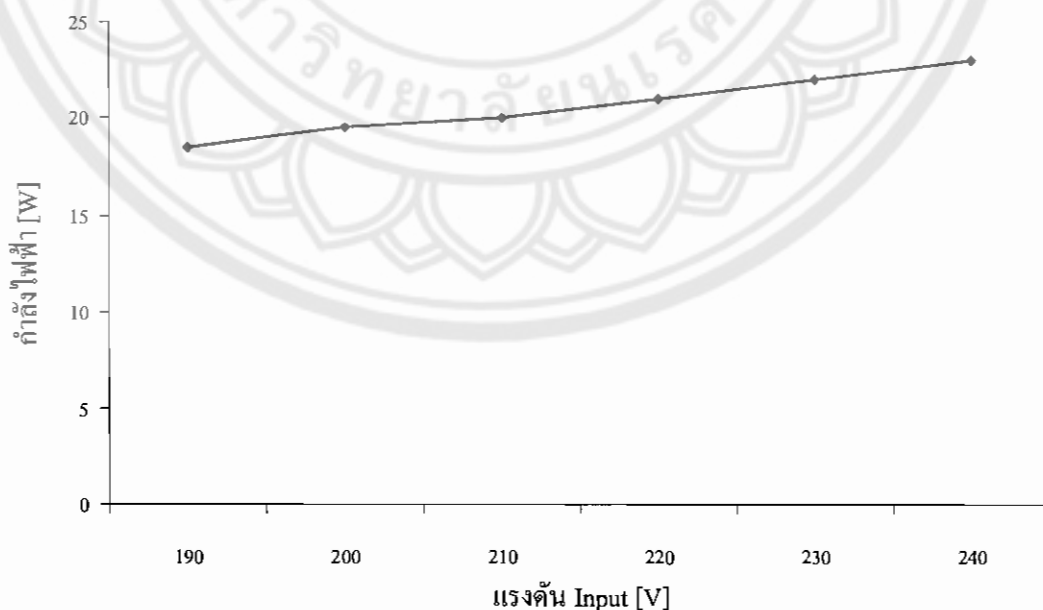
ลักษณะเชิงเส้น แต่เนื่องด้วยเครื่องมือวัดมีสเกลค่อนข้างหยาบ เมื่อพล็อตกราฟแล้วทำให้กราฟที่ได้ไม่เป็นลักษณะเชิงเส้น

4.4 การศึกษาพฤติกรรมของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน

ทำการศึกษาลักษณะของหลอดแสงสว่างที่เป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5 และเมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มาพล็อตกราฟเทียบกับแรงดันไฟฟ้า จะได้กราฟดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.5 การทดสอบของหลอดฟลูออเรสเซนต์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า

Input		Output			
แรงดัน [V]	แรงดัน [V]	กระแส [A]	Power [W]	Power factor	ความเข้มแสง [Lux]
190	163.0	0.280	18.5	0.898	1268
200	170.5	0.300	19.5	0.877	1321
210	177.2	0.300	20.0	0.887	1336
220	186.2	0.325	21.0	0.884	1394
230	193.8	0.325	22.0	0.880	1443
240	203.3	0.350	23.0	0.882	1475



รูปที่ 4.3 กำลังไฟฟ้าในการทดสอบหลอดฟลูออเรสเซนต์

ลักษณะของผลการทดลองเหมือนกับกรณีหลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ คือค่ากำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าขึ้น แต่ในการติดของหลอดพบว่า เมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำจะทำให้หลอดติดช้าลง และบัลลาสต์มีเสียงดังมากกว่าที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสูง

4.5 การศึกษาพฤติกรรมของหลอดโซเดียมความดันสูงที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน

ทำการศึกษาลักษณะของหลอดแสงสว่างที่เป็นหลอดโซเดียมความดันสูงที่เกิดขึ้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า หลอดประเภทนี้ต้องใช้เวลาในการติดหลอดพอสมควรจึงทำการตรวจวัดค่าต่าง ๆ ทุก ๆ 1 นาที เป็นเวลา 9 นาที เมื่อทดลองเสร็จจะปล่อยให้หลอดเย็นเป็นปกติก่อนจึงทำการทดลองในระดับแรงดันไฟฟ้าต่อไป ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การทดสอบของหลอดโซเดียมความดันสูงเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า

Input		Output				
แรงดัน [V]	เวลา [min]	แรงดัน [V]	กระแส [A]	Power [W]	Power factor	ความเข้มแสง [Lux]
190	0 (Start)	163.2	2.00	32	0.862	22
	1	163.1	1.50	30	0.870	147
	2	163.3	1.50	32	0.870	1631
	3	162.5	1.50	38	0.860	2050
	4	162.7	1.50	42	0.860	2510
	5	162.3	1.50	48	0.867	3090
	6	163.0	1.45	52	0.860	3760
	7	163.5	1.45	56	0.867	4420
	8	164.30	1.43	58	0.860	4940
	9	164.0	1.40	62	0.860	5480
200	0 (Start)	173.2	2.00	30	0.862	19
	1	173.9	1.60	33	0.86.	822
	2	173.6	1.60	38	0.867	1944
	3	174.4	1.60	43	0.867	2440
	4	174.4	1.58	50	0.867	3240

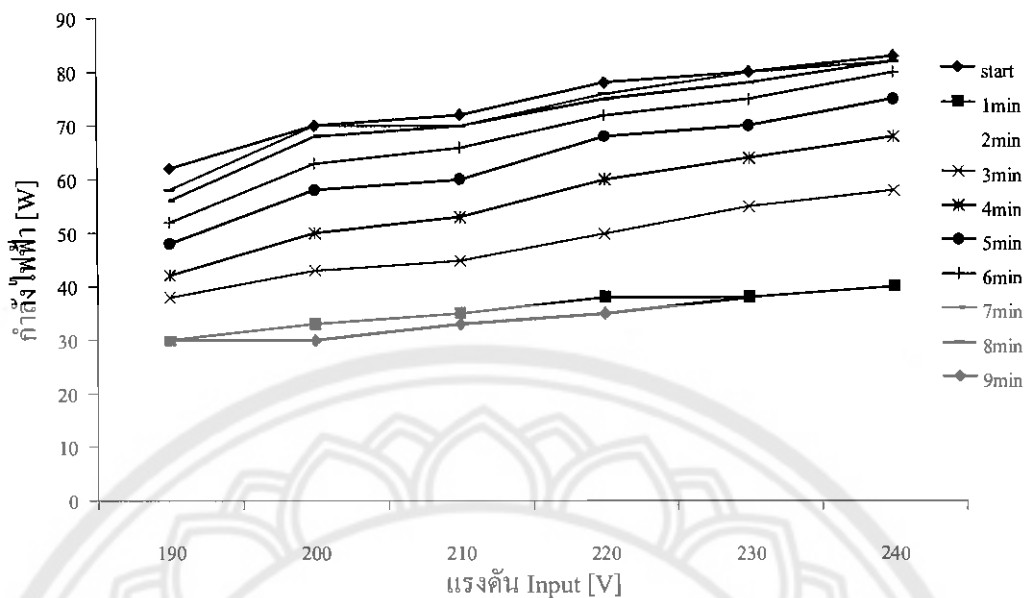
ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

Input		Output				
แรงดัน [V]	เวลา [min]	แรงดัน [V]	กระแส [A]	Power [W]	Power factor	ความเข้มแสง [Lux]
220	5	174.7	1.58	58	0.860	4220
	6	175.0	1.50	63	0.860	5660
	7	176.5	1.50	68	0.865	6600
	8	176.8	1.50	70	0.865	7050
	9	176.6	1.50	70	0.865	7510
210	0 (Start)	180.0	2.00	33	0.862	22
	1	180.4	1.65	35	0.862	759
	2	179.8	1.65	40	0.860	1988
	3	179.6	1.60	45	0.860	2590
	4	180.0	1.60	53	0.860	3580
	5	180.2	1.60	60	0.857	4790
	6	180.8	1.58	66	0.857	5990
	7	181.2	1.58	70	0.857	6980
	8	180.7	1.50	70	0.862	7530
9	181.7	1.50	72	0.857	8150	
220	0 (Start)	188.5	1.88	35	0.867	40
	1	188.0	1.75	38	0.867	1144
	2	187.5	1.70	42	0.867	2140
	3	186.5	1.70	50	0.867	3330
	4	187.6	1.65	60	0.865	4480
	5	187.8	1.60	68	0.857	5890
	6	188.6	1.60	72	0.857	7260
	7	188.5	1.60	75	0.862	8340
	8	188.4	1.58	76	0.857	9080
9	188.0	1.58	78	0.857	9450	
230	0 (Start)	192.0	2.00	38	0.867	39
	1	191.2	1.75	38	0.862	1270
	2	192.0	1.75	45	0.867	2260

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

Input		Output				
แรงดัน [V]	เวลา [min]	แรงดัน [V]	กระแส [A]	Power [W]	Power factor	ความเข้มแสง [Lux]
230	3	191.9	1.70	55	0.860	3460
	4	192.0	1.70	64	0.865	4750
	5	193.0	1.65	70	0.860	6300
	6	193.0	1.65	75	0.857	7710
	7	193.3	1.60	78	0.857	8600
	8	192.8	1.60	80	0.857	9140
	9	193.0	1.601	80	0.857	9940
240	0 (Start)	198.3	1.80	40	0.865	36
	1	198.3	1.80	40	0.867	786
	2	198.6	1.80	48	0.860	2810
	3	198.0	1.80	58	0.860	3820
	4	197.7	1.75	68	0.860	5490
	5	198.5	1.70	75	0.857	7710
	6	199.0	1.70	80	0.862	9560
	7	199.0	1.65	82	0.857	10970
	8	198.8	1.65	82	0.857	11300
	9	199.0	1.65	83	0.860	11710

จากการศึกษาพบว่า ผลการทดลองมีลักษณะเหมือนหลอดที่ได้ทดลองมาก่อนหน้านี้ และมีเรื่องการทำงานของบัลลาสต์คล้ายกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ คือมีเสียงดังที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำ และเมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้โดยนำการตรวจวัดค่าต่าง ๆ ทุก 1 นาทีตั้งแต่เปิดสวิตช์จนถึง 9 นาที พล็อตกราฟเทียบกับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจากกราฟจะได้เส้นของกำลังไฟฟ้าทั้งหมด 10 เส้น โดยแต่ละเส้นแสดงค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กำลังไฟฟ้าในการทดสอบโหลดโซเดียมความดันสูง

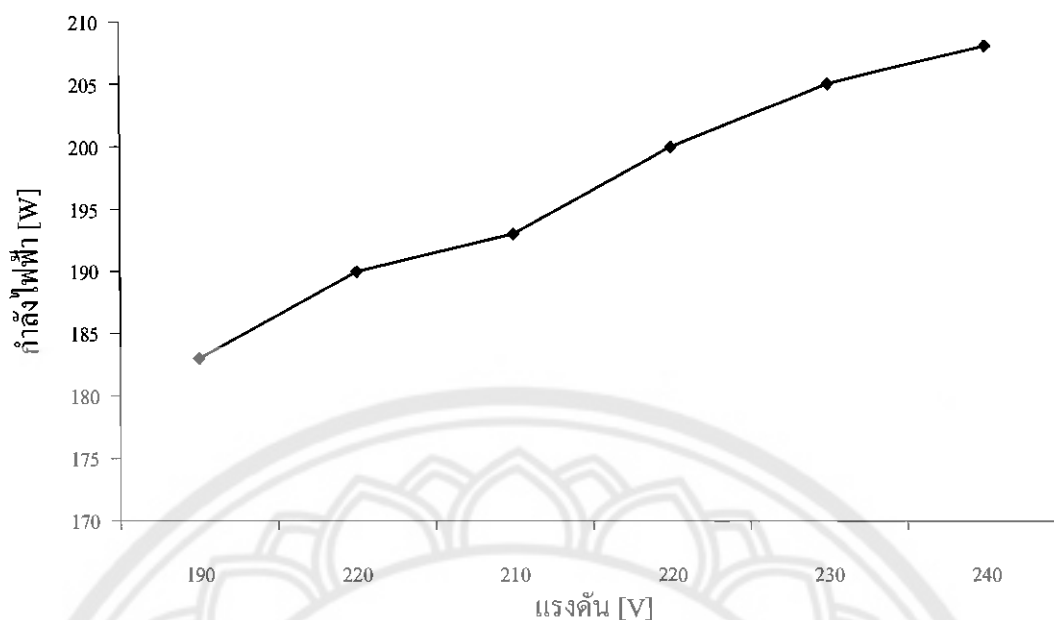
4.6 การศึกษาพฤติกรรมของปั้มน้ำที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน

ทำการทดสอบโหลดประเภทมอเตอร์ ในการทดลองนี้ใช้ปั้มน้ำ โดยใช้อัตราการไหลของน้ำเป็นผลการทดลองเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการต่อท่อทำให้ปั้มน้ำสูบน้ำขึ้น แล้วปล่อยลงที่บ่อเดิม แล้วใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำจับที่ท่อ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.7 และเมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มาพล็อตกราฟเทียบกับแรงดันไฟฟ้าจะได้กราฟดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.7 การทดสอบของปั้มน้ำเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า

Input	Output				
แรงดัน [V]	แรงดัน [V]	กระแส [A]	Power [W]	Power factor	อัตราการไหล [m/s]
190	163.1	(2.4) 1.37	183	0.527	2.84
200	169.1	(2.5) 1.37	190	0.474	2.88
210	175.6	(2.6) 1.37	193	0.447	2.92
220	179.6	(2.7) 1.37	200	0.470	2.94
230	183.4	(2.8) 1.37	205	0.470	2.97
240	186.0	(3.0) 1.38	208	0.487	2.99

หมายเหตุ: (x) y; x คือค่าในการ start, y คือ ค่าขณะคงที่



รูปที่ 4.5 กำลังไฟฟ้าในการทดสอบปั้มน้ำ

จากการศึกษาพบว่า เมื่อระดับแรงดัน ไฟฟ้าสูงมอเตอร์ปั้มน้ำจะกินกำลังไฟฟ้าสูงกว่า แต่ให้อัตราการไหลของน้ำแรงกว่าที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำ

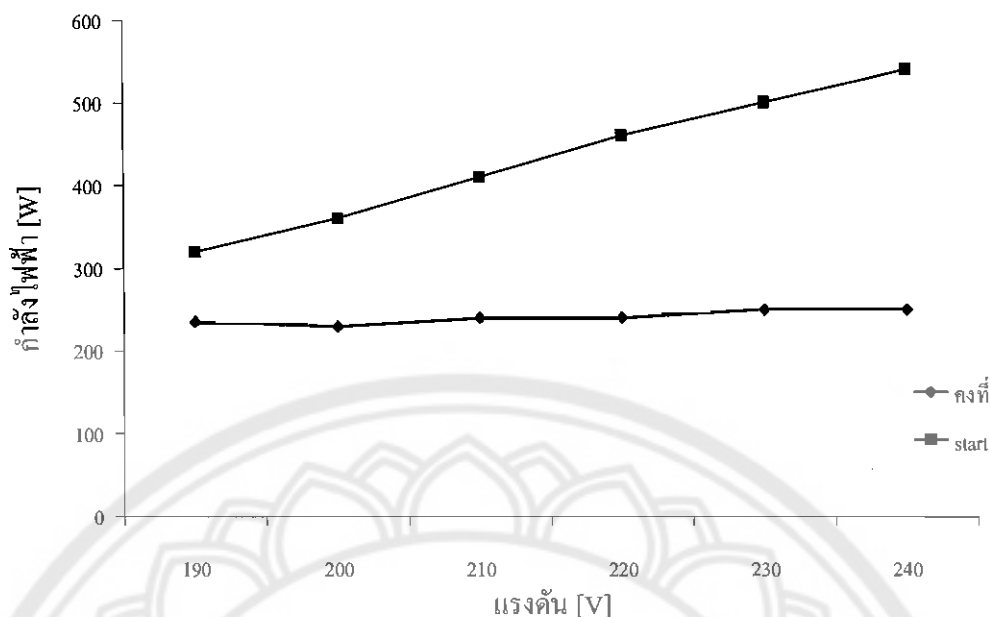
4.7 การศึกษาพฤติกรรมของพัคลมที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน

ทำการทดสอบ โหลดประเภทมอเตอร์พัคลม โดยใช้ความเร็วรอบของพัคลมเป็นผลการทดลองเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.8 และเมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มาพล็อตกราฟเทียบกับแรงดันไฟฟ้าจะได้กราฟดังรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.8 การทดสอบของพัคลมเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า

Input	Output				
	แรงดัน [V]	กระแส [A]	Power [W]	Power factor	ความเร็วรอบ [r/min]
190	(140.7) 149.7	(3.4) 2.0	(320) 235	0.722	790
200	(148.5) 160.0	(3.8) 1.9	(360) 230	0.672	860
210	(157.0) 174.1	(4.0) 1.9	(410) 240	0.530	890
220	(161.6) 181.2	(4.3) 1.9	(460) 240	0.715	910
230	(168.0) 191.5	(4.5) 1.9	(500) 250	0.626	915
240	(172.1) 197.6	(4.5) 1.9	(540) 250	0.680	925

หมายเหตุ: (x) y; x คือ ค่าในการ start, y คือ ค่าขณะคงที่



รูปที่ 4.6 กำลังไฟฟ้าในการทดสอบพัลสม

ค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 4.8 จะมีค่าของกำลังไฟฟ้า 2 ค่า คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในขณะเริ่มกดสวิตช์ให้พัลสมทำงาน และค่าของกำลังไฟฟ้าในขณะพัลสมหมุนด้วยความเร็วคงที่ ทำให้เมื่อพล็อตกราฟออกมาได้กราฟทั้งหมด 2 เส้น ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งจากการศึกษาพบว่า กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์พัลสมในช่วงสตาร์ทมีความแตกต่างกันชัดเจน และเมื่อพัลสมหมุนด้วยความเร็วคงที่แล้วจะมีการใช้กำลังไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน เมื่อมีการปรับระดับแรงดันไฟฟ้า

4.8 การศึกษาพฤติกรรมของมอเตอร์อินดักชันที่แรงดันไฟฟ้าต่างกัน

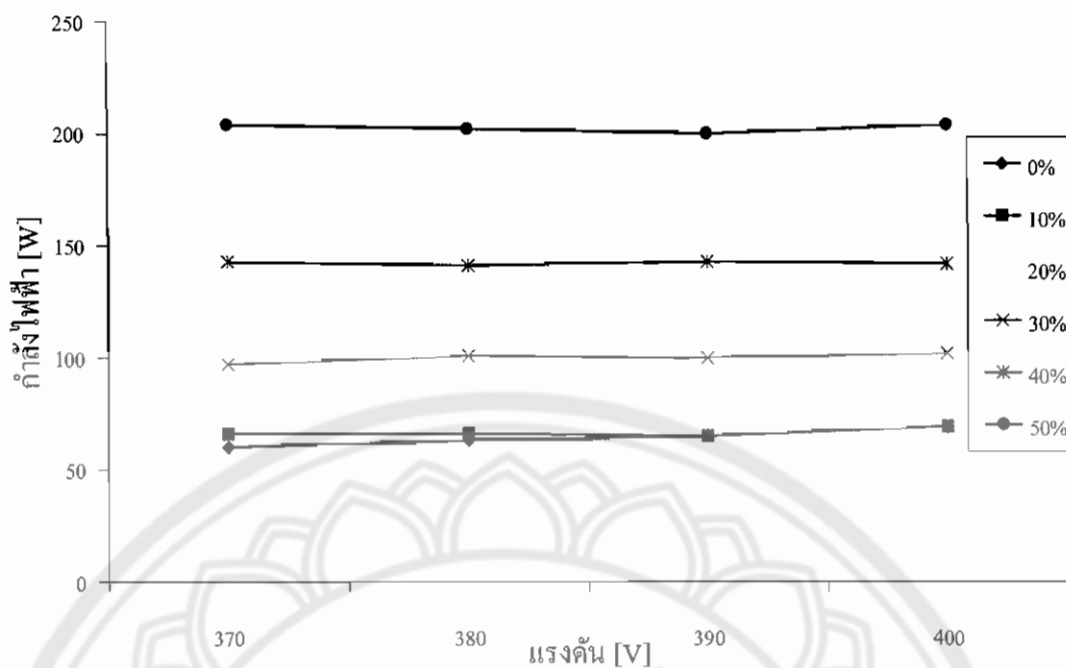
ทำการทดสอบมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟสแบบกรงกระรอก โดยใช้อุปกรณ์ช่วยในการทดลอง คือ Electrodynamometer ในชุดทดลอง Lab Volt เป็นโหลดให้กับมอเตอร์ และใช้ค่าทอร์กกับความเร็วยุบเป็นผลของการทดลอง ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.9 และเมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มาพล็อตกราฟเทียบกับแรงดันไฟฟ้าจะได้กราฟดังรูปที่ 4.7

จากการศึกษาพบว่า ที่ระดับทอร์กเดียวกันจะมีการใช้กำลังไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกันมากทุกระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งสังเกตได้อย่างชัดเจนจากกราฟในรูปที่ 4.7 ซึ่งกราฟจะมีทั้งหมด 6 เส้น โดยแต่ละเส้นจะแสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในขนาดโหลดที่แตกต่างกันตามเปอร์เซ็นต์ของทอร์กของอุปกรณ์ Electrodynamometer ซึ่งมีตั้งแต่ 0 – 50 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.9 การทดสอบมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟส เมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า

Input		Output				
แรงดัน [V]	% ทอร์ค	กระแส [A]	Power [W]	Power factor	ทอร์ค [N.m]	ความเร็วรอบ [r/min]
370	0	(2.4) 0.35	60	0.827	(0.0) 0.00	1453
	10	(2.5) 0.35	66	0.819	(0.06) 0.02	1476
	20	(2.6) 0.36	76	0.798	(0.40) 0.08	1476
	30	(2.8) 0.38	97	0.726	(1.00) 0.22	1460
	40	(2.8) 0.45	143	0.602	(2.20) 0.50	1439
	50	(3.0) 0.55	204	0.447	(>3.0) 0.82	1406
380	0	(2.4) 0.30	63	0.830	(0.00) 0.00	1446
	10	(2.5) 0.36	66	0.824	(0.06) 0.02	1468
	20	(2.6) 0.36	76	0.804	(0.40) 0.08	1443
	30	(2.8) 0.40	101	0.733	(0.90) 0.22	1450
	40	(2.9) 0.45	141	0.626	(1.90) 0.48	1436
	50	(3.0) 0.55	202	0.478	(>3.0) 0.80	1406
390	0	(2.5) 0.36	65	0.833	(0.00) 0.00	1485
	10	(2.6) 0.37	65	0.824	(0.03) 0.02	1470
	20	(2.7) 0.38	77	0.804	(0.40) 0.08	1479
	30	(2.8) 0.41	100	0.740	(0.90) 0.23	1468
	40	(3.0) 0.45	133	0.637	(1.80) 0.48	1441
	50	(3.0) 0.54	200	0.483	(>3.0) 0.79	1418
400	0	(2.4) 0.40	59	0.836	(0.00) 0.00	1486
	10	(2.6) 0.38	59	0.836	(0.07) 0.02	1483
	20	(2.8) 0.38	80	0.804	(0.30) 0.08	1479
	30	(2.9) 0.41	102	0.750	(0.90) 0.22	1470
	40	(3.0) 0.41	142	0.657	(1.60) 0.46	1446
	50	(3.2) 0.55	204	0.500	(>3.0) 0.80	1422

หมายเหตุ: (x) y; x คือ ค่าในการ start, y คือ ค่าขณะคงที่



รูปที่ 4.7 กำลังไฟฟ้าในการทดสอบมอเตอร์อินดักชัน

4.9 การวิเคราะห์ผล

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้โดยการปรับแทปของหม้อแปลงไฟฟ้าของโหลด 1 เฟส ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 200 – 240 V มาคำนวณกำลังไฟฟ้ารวมจะได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 4.10 และโดยการปรับแทปหม้อแปลงไฟฟ้าของโหลดมอเตอร์อินดักชัน 3 เฟสที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 370 – 400 V ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้แสดงในตารางที่ 4.11 ซึ่งค่าที่ได้จากตารางที่ 4.10 และ 4.11 นี้จะนำไปใช้ในการคำนวณต่อไป

ตารางที่ 4.10 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองรวมโหลดหนึ่งเฟส

โหลด / ระดับแรงดันไฟฟ้า		240 V	230 V	220 V	210 V	200 V
แสงสว่าง	หลอดไส้	118.0	110.0	100.0	96.0	89.0
	หลอดฟลูออเรสเซนต์	23.0	22.0	21.0	20.0	19.6
	หลอดคอมแพค	17.6	16.8	16.2	16.0	15.2
	หลอดโซเดียม	83.0	80.0	76.0	72.0	70.0
มอเตอร์	ปั้มน้ำ	208.0	205.0	200.0	193.0	190.0
	พัดลม	250.0	250.0	240.0	240.0	230.0
กำลังไฟฟ้ารวม [W]		699.6	683.8	653.2	637.0	613.7

ตารางที่ 4.11 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองโหลดมอเตอร์อินคักซ์สามเฟส

% ทอร์ค / แรงดัน	370 V	380 V	390 V	400 V
0 %	60	63	65	69
10 %	66	66	65	69
20 %	76	77	77	80
30 %	97	101	100	102
40 %	143	141	143	142
50 %	204	202	200	204
กำลังไฟฟ้ารวม [W]	646	649	650	666

เมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากตารางที่ 4.10 และตารางที่ 4.11 มาคำนวณตามสมการการลดลงของพลังงานไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด (สมการที่ 2.1) แล้วนำมาเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้จากการวัด มีขั้นตอนและวิธีการคำนวณดังนี้

$$\text{พลังงานไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดลดลง} = \text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด} \times [(V_1/V_2)^2 - 1] \times \text{จำนวนชั่วโมงใน 1 ปี} \quad (4.1)$$

การหาลำดับไฟฟ้าที่ลดลงได้จากการปรับแทปหม้อแปลง ซึ่งจะหมายถึงตัวแปร E ในตารางที่ 4.12 จะได้ค่าสมการที่ 4.1

$$P_{\text{ที่ลดได้}} = P_{\text{before}} - P_{\text{after}} \quad (4.2)$$

เมื่อ P_{before} คือค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ก่อนการปรับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งหมายถึงตัวแปร C ในตารางที่ 4.12

P_{after} คือค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้หลังการปรับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งหมายถึงตัวแปร D ในตารางที่ 4.12

หมายเหตุ: ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ ได้มาจากตารางที่ 4.10 และตารางที่ 4.11

สมการหาเปอร์เซ็นต์การลดลงของกำลังไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้าที่ประหยัดได้จากการคำนวณ
กรณีใช้สูตรคำนวณซึ่งจะหมายถึงตัวแปร H ในตารางที่ 4.12

$$\% \text{ การประหยัดของกำลังไฟฟ้าจากการคำนวณ} = \left[\frac{\text{ค่ากำลังไฟฟ้าที่ลดได้จากการคำนวณ}}{\text{ตัวแปร F} / P_{\text{before}}} \right] \times 100 \% \quad (4.3)$$

กรณีทำการทดลองซึ่งจะหมายถึงตัวแปร G ในตารางที่ 4.12

$$\% \text{ การลดลงของกำลังไฟฟ้าจากการทดลอง} = \frac{[\text{ค่ากำลังไฟฟ้าที่ลดได้จากการทดลอง (ตัวแปร E)}/P_{\text{before}}] \times 100 \%}{(4.4)}$$

การหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการใช้สูตรแบบไม่มีโหลด ซึ่งหมายถึง ตัวแปร I ในตารางที่ 4.12 เป็นการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ กับค่าที่ได้จากการทดลองคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ผลที่ได้จากการคำนวณทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากสมการกับผลการคำนวณที่ได้จากการทดลอง

ระดับแรงดัน [V]		ผลจากการทดลอง		กำลังไฟฟ้าที่ลดลง [W]		% การลดลงของกำลังไฟฟ้า		% ความผิดพลาดจากการใช้สูตร
Before	After	P_{before} [W]	P_{after} [W]	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	$I = \{(H-G)/H\} \times 100$
A	B	C	D	E (4.2)	F (4.1)	G (4.4)	H (4.3)	
240	230	699.6	683.8	15.80	62.16	2.258	8.885	74.58
240	220	699.6	653.2	46.40	132.98	6.632	19.008	65.11
230	220	683.8	653.2	30.60	63.58	4.475	9.298	51.87
400	390	666.0	650.0	16.00	34.59	2.402	5.194	53.74
400	380	666.0	649.0	17.00	71.95	2.553	10.803	76.37
390	380	650.0	649.0	1.00	34.66	0.154	5.332	97.11

จากตารางที่ 4.12 สังเกตได้ว่าได้ใช้ค่าบางส่วนจากตารางที่ 4.10 และตารางที่ 4.11 เนื่องจากใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ไม่ต่ำกว่าพิกัดของโหลด คือ ไม่น้อยกว่า 220 V ในระดับแรงดันไฟฟ้า 1 เฟส และไม่น้อยกว่า 380 V ในระดับแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส

ผลการเปรียบเทียบพบว่า กำลังไฟฟ้าที่ลดได้จากการคำนวณกับกำลังไฟฟ้าที่ลดได้จากการทดลอง มีค่าที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก ทั้งนี้เนื่องจากสมการที่ใช้ นั้น เป็นสมการที่ใช้คำนวณขณะที่ไม่มีโหลด

บทที่ 5

บทสรุป

จากผลการทดลองปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบวาริแอกขณะมีโหลด แล้วนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงโดยคำนวณจากสมการ 2 สมการ คือ สมการหาพลังงานไฟฟ้าสูญเสียลดลงหรือค่าการประหยัดพลังงานขณะไม่มีโหลดดังในสมการ 4.1 และสมการหาค่าพลังงานสูญเสียหรือค่าการประหยัดพลังงานขณะมีโหลดดังในสมการ 4.2 พบว่า ผลการทดลองทั้งสองสมการมีค่าความแตกต่างกันมาก เนื่องจากมีผลของกำลังไฟฟ้าจากโหลดเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ทำให้ผลของกำลังสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นมีความคลาดเคลื่อน เพราะฉะนั้นสมการ 4.1 จึงสามารถใช้ได้เฉพาะกรณีที่มีการปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดเท่านั้น ค่าของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงได้จากสมการนี้จะสามารถนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติจริง

นอกจากนี้การปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองกรณี คือ ขณะที่มีหม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีโหลดและขณะที่มีโหลด สามารถที่จะลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้จริงทั้งสองกรณี แต่จะแตกต่างกันที่หลักการวิเคราะห์หาค่าพลังงานไฟฟ้าหรือค่าการประหยัดพลังงาน อย่างไรก็ตามการปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าต้องคำนึงถึงแรงดันไฟฟ้าด้านปลายสายไม่ให้มีค่าต่ำกว่าที่พิกัดของ โหลดจะรับได้ เพราะจะทำให้โหลดเกิดความเสียหายหรือประสิทธิภาพอายุการใช้งานเสื่อมลงได้

ข้อเสนอแนะ

1. ควรเลือกใช้เครื่องมือที่ได้คุณภาพ และเป็นมาตรฐานเดียวกัน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง และเป็นไปในทิศทางเดียวกัน
2. ในการทดลองสอบ ควรทำการทดสอบหลาย ๆ ครั้งที่การใช้งานเดียวกัน แล้วนำข้อมูลโดยเฉลี่ยมาใช้วิเคราะห์
3. ควรค่อย ๆ ปรับลดระดับแรงดันไฟฟ้าลงทีละน้อย เพื่อไม่ให้มีผลกับพฤติกรรมการใช้งานของโหลดมากนัก
4. ควรเลือกหม้อแปลงที่มีประสิทธิภาพสูง และมีขนาดที่เหมาะสม เพื่อลดการสูญเสียพลังงานของหม้อแปลง
5. หากต้องการนำมาตรการนี้ไปใช้งาน ควรมีการศึกษาและตรวจสอบระบบไฟฟ้าในส่วนที่ต้องการใช้ และเลือกระดับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิชระ มั่งวิติกุล. กระบวนการและเทคนิคการลดค่าใช้จ่ายพลังงานสำหรับอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม. ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : บริษัท เรียบ ยู พาวเวอร์ จำกัด. 2550.
- [2] กลุ่มงานวิจัยเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน (En Con Lab) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. มาตรการปรับลดแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า. [Online]. จาก : <http://www.enconlab.com/ve/measure/volt.doc>. 2551
- [3] ชนิดา รอดอินทร์และเนตรทราย สุสัมฤทธิ์. ระบบกำลังไฟฟ้า. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : พิสิกส์เซนเตอร์. 2526.
- [4] ไชยชาญ หินเกิด. เครื่องกลไฟฟ้า 2. ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2542.
- [5] ผ.ศ. ถาวร อมตกิตติ์. การส่งกำลังและการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ. ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : บริษัทเอ็มแอนต้อ จำกัด. 2549.
- [6] สำนักส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (สสอ). กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. หลอดไฟ. โครงการการศึกษาสถานภาพการใช้พลังงานและแนวทางการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานในบ้านที่อยู่อาศัย. [Online]. จาก : <http://www.dede.go.th/dede/h-homesafe/webban/book/lamp.htm>. 2551
- [7] **Incandescent lamp**. [Online]. จาก : http://en.wikipedia.org/wiki/Incandescent_lamp. 2551
- [8] สударัตน์ ณีภูมิมิบุญ. หลอดฟลูออเรสเซนต์. [Online]. จาก : http://www.thaigoodview.com/library/teachershow/bangkok/sudarat_n-ok/sec04p03.html. 2551
- [9] **Fluorescent lamp**. [Online]. จาก : http://en.wikipedia.org/wiki/Fluorescent_light_bulb. 2551
- [10] หลอดไฟชนิดใหม่ช่วยประหยัดพลังงาน. [Online]. จาก : http://www.teenet.chala.ac.th/estuff/c_lamp.htm. 2551
- [11] วงจรไฟฟ้าแสงสว่าง. [Online]. จาก : <http://www.chontech.ac.th/~electric/elearn/unit17/unit17.htm>. 2551
- [12] วัฒนา ถาวร. การส่องสว่าง. ครั้งที่ 14. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2549.