การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส โดยหม้อแปลงไฟฟ้า

THREE PHASE TO SINGLE PHASE FOR TRANSFORMER

โดย

นาย นิพล วรรณะ

นาย พุทธพร เศวตสกุลานนท์

นาย วรากร คำไทร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2538

วัน เดือน ปี 31 ก.ค. 2540

เลขทะเบียน 037035

เลขเรียกหนังสือ T 38120 น 711 ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

037035

ปีการศึกษา 2538

การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสโดยหม้อแปลงไฟฟ้า

โดย

นาย นิพล วรรณะ

นาย พุทธพร เศวตสกุลานนท์

นาย วรากร ดำไทร

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. พิชิต ลำยอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2538

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเป็น 1 เฟสโดยหม้อแปลงไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

1. นาย นิพล วรรณะ 36013064
2. นาย พุทธพร เศวตสกุลานนท์ 36013072
3. นาย วรากร คำไทร 36013077

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ. พิชิต ลำยอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อ		I
ABSTRACT		I I
สารบัญรูป		I I I
บทที่ 1	บทนำ	1
บทที่ 2	ทฤษฎี	2
	2.1 พื้นฐานของแม่เหล็กไฟฟ้า	2
	2.2 พลังงานที่สะสมอยู่ในรูปสนามแม่เหล็ก	9
	2.3 หลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า	12
	2.4 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า	17
	2.5 หลักการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน	18
	2.6 การพันขดลวด	28
	2.7 Factor ของการพันขดลวด	33
	2.8 หลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสเป็น 1 เฟส	37
บทที่ 3	การออกแบบและการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า	
	3.1 การออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า	40
	3.2 การคำนวณแฟคเตอร์การพันขดลวด	44
	3.3 การลงขดลวดในร่องสล็อท	46
บทที่ 4	การทดลองและผลการทดลอง	
	4.1 การทดลองเพื่อหากราฟแสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า	48
	4.2 การทดลองจ่ายโหลด R,L,C	52
	4.3 การทดลองปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ	68
บทที่ 5	สรุปผลโครงงาน	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 วงจรแม่เหล็กแบบ Core Type	3
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H	4
รูปที่ 2.3 แสดงการเกี่ยวคล้องของสมการแม่เหล็กของขดลวด 2 ขด	7
รูปที่ 2.4 วงจรแม่เหล็กที่มีขดลวด 2 ขดและมีช่องอากาศ	8
รูปที่ 2.5 วงจรแม่เหล็กและวงจรไฟฟ้า	10
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง λ กับ I	10
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการพันขดลวดและแกนเหล็กแบบ Shell Type	12
รูปที่ 2.8 วิธีการหาลักษณะของกระแสกระตุ้นจากเส้นแสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกน	15
รูปที่ 2.9 แสดงการวางแกนเหล็กทำมุมกัน 120 องศา ของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส	16
รูปที่ 2.10 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า	17
รูปที่ 2.11 แสดงขั้วแม่เหล็กของเครื่องกลไฟฟ้าแบบหมุน	18
รูปที่ 2.12 แสดงขั้วแม่เหล็กของเครื่องกลไฟฟ้าแบบเชิงเส้น	19
รูปที่ 2.13 แสดง MMF ของการพันขดลวดแบบเต็มช่วง	20
รูปที่ 2.14 แสดงการกระจายของ MMF ใน 1 เฟส เมื่อพันแบบเต็มช่วง	21
รูปที่ 2.15 แสดงการกระจายของ MMF บน โรเตอร์ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	23
รูปที่ 2.16 แสดง MMF ของการพันขดลวด 1 เฟส	25
รูปที่ 2.17 แสดง การพันขดลวด 3 เฟสของสเตเตอร์	26
รูปที่ 2.18 แสดงกระแสเฟสชั่วขณะภายใต้เงื่อนไข 3 เฟส สมดุลย์	26
รูปที่ 2.19 แสดง MMF รวมที่เกิดขึ้นใน Stator ที่เวลาต่างๆ	28
รูปที่ 2.20 แสดงการพันขดลวดแบบชั้นเดียว	29
รูปที่ 2.21 แสดงการพันขดลวดแบบสองชั้น	29
รูปที่ 2.22 แสดงการวางขดลวดแบบเต็มช่วงและแบบช่วงเศษส่วน	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.23 แสดงการพันขดลวดแบบกระจายชั้นเดียว 3 เฟส	32
รูปที่ 2.24 แสดงขดลวดหลายเฟส ซึ่งฟลักซ์แม่เหล็กเคลื่อนที่ เปลี่ยนตามเวลา	32
รูปที่ 2.25 แสดงการหาค่าตัวประกอบการพันแบบกระจาย	33
รูปที่ 2.26 แสดงการหาค่าตัวประกอบพิช	35
รูปที่ 2.27 แสดงรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส	37
รูปที่ 2.28 แสดงรูปคลื่นสนามแม่เหล็ก 3 เฟส	38
รูปที่ 229 แสดงแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่	38
รูปที่ 2.30 แสดงการปรับแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ	38
รูปที่ 3.1 แสดงรูปร่างลักษณะของแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิ	41
รูปที่ 3.2 แสดงรูปร่างลักษณะของแกนเหล็กทางด้านทุติยภูมิ	42
รูปที่ 3.3 แสดงรูปร่างลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส เป็น 1 เฟส	43
รูปที่ 3.32 แสดงการพันขดลวดทางด้านปฐมภูมิ	45
รูปที่ 3.33 แสดงการพันขดลวดทางด้านทุติยภูมิ	45
รูปที่ 3.4 แสดงแกนเหล็กและการลงขดลวดด้านปฐมภูมิ	46
รูปที่ 3.5 แสดงแกนเหล็กและการลงขดลวดด้านทุติยภูมิ	47
รูปที่ 3.6 แสดงตำแหน่งการวางแกนเหล็กปฐมภูมิและทุติยภูมิ	47
รูปที่ 4.1 รูปวงจรการทดลองที่ 4.1	49
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H	51
รูปที่ 4.3 รูปวงจรการทดลองที่ 4.2	53
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสทางด้านปฐมภูมิ ขณะจ่ายโหลด R	54
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ทางด้านทุติยภูมิขณะจ่ายโหลด R	55
รูปที่ 4.6 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันทางด้านปฐมภูมิขณะไม่มีโหลด	56
รูปที่ 4.7 แสดงรูปคลื่นแรงดันทางด้านปฐมภูมิขณะไม่มีโหลด	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.8 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันทางด้านปฐมภูมิ
ขณะจ่ายโหลด R 58

รูปที่ 4.9 แสดงรูปคลื่นกระแสแรงดันทางด้านปฐมภูมิขณะจ่ายโหลด R 59

รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสทางด้านปฐมภูมิ
ขณะจ่ายโหลด L 60

รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน
ทางด้านทุติยภูมิขณะจ่ายโหลด L 61

รูปที่ 4.12 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันทางด้านปฐมภูมิ
ขณะจ่ายโหลด L 62

รูปที่ 4.13 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันทางด้านทุติยภูมิ
ขณะจ่ายโหลด L 63

รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสทางด้านปฐมภูมิ
ขณะจ่ายโหลด C 64

รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน
ทางด้านทุติยภูมิขณะจ่ายโหลด C 65

รูปที่ 4.16 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันทางด้านปฐมภูมิ
ขณะจ่ายโหลด C 66

รูปที่ 4.17 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันทางด้านทุติยภูมิ
ขณะจ่ายโหลด C 67

รูปที่ 4.18 รูปวงจรการทดลองที่ 4.3 69

รูปที่ 4.19 การปรับแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ 71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Three Phase To Single Phase For Transformer

นาย นิพล วรรณะ
นาย พุทธพร เศวตสกุลานนท์
นาย วรากร ดำไทร
อ. พิชิต ลำยอง อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2538

บทคัดย่อ

โครงงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาวิธีการนำเอาแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 50 Hz ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนำมาแปลงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 50 Hz โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบพิเศษ โดยที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสที่ได้ทางด้านทุติยภูมิ นี้สามารถปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้าได้ โดยการปรับการเลื่อนแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิ ซึ่งเป็นการควบคุม Mutual Flux นั่นเอง จากการศึกษาพบว่าการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 50 Hz เป็น แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 50 Hz นอกจากสามารถปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าแล้ว กระแสที่ได้จะสูง ซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้กับโหลด 1 เฟสที่ใช้กระแสสูงๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Three Phase To Single Phase For Transformer

Niphon Wanna
Budhapon Sawetsakulanond
Varakorn Damsai
Phicit Lamyong Advisor

ABSTRACT

This research project presented the three phase alternating of 50 Hertz transfered to single phase alternating of 50 Hertz , Which used to special design transformer. This single phase voltage on secondary side was able to adjust the voltage level by slide iron core of primary side is known as "flux controlling method". This transformer had high current on the secondary side.

So , this transformer ability to transfered the three phase alternating to single phase alternating and Its current on secondary side was high. Its other useful was able to adjust the voltage level too.

Conclusively this transformer was extremly suitable for using with single phase high current load.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

หลักการและพื้นฐานของเครื่องจักรไฟฟ้าแนวระนาบ (Linear Machine) เป็นที่รู้จักกันมานานแล้ว และเริ่มมีการวิจัยพัฒนาไปใช้ในงานอุตสาหกรรมมากขึ้น โดยส่วนมากจะเน้นทางด้านรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน จุดที่น่าสนใจของหลักการและพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแนวระนาบก็คือ การนำเอาหลักการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแนวระนาบมาออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากคุณสมบัติของมันสามารถที่จะสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสได้ ซึ่งในปัจจุบันการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป วิธีที่นำเสนอในโครงงานนี้นั้นได้แนวความคิดจากการศึกษาเรื่องเครื่องจักรไฟฟ้าในแนวระนาบจากความรู้ที่ได้นี้นำมาออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบพิเศษที่ทางด้านปฐมภูมิ ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 50 Hz แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้ทางทุติยภูมิ จะได้ 1 เฟส 50 Hz และจากการวิจัยพบว่า เราสามารถปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านทุติยภูมิ ได้โดยการปรับเลื่อนแกนทางด้านปฐมภูมิ ซึ่งเป็นการควบคุม Mutual Flux ที่ไปคล้องขดลวดทางด้านทุติยภูมิ และกระแสทางด้านทุติยภูมิ ที่ได้จะสูง

สำหรับในโครงงานนี้ได้นำเสนอหลักการทำงานและพื้นฐานของ Three Phase To Single For Transformer การออกแบบคำนวนสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า 1 เฟสและ 3 เฟส

การจัดทำโครงงานในเรื่องนี้ขึ้นมาเพื่อจุดมุ่งหมายอยากศึกษาหลักการทำงานของหม้อแปลงที่สร้างขึ้นมา และพบว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการนำไปใช้กับโหลด 1 เฟส ที่กระแสสูงๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 พื้นฐานของแม่เหล็กไฟฟ้า

2.2.1 กฎของการเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ฟาราเดย์ได้เป็นผู้ค้นพบในปี ค.ศ 1831 ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ว่าด้วยการเหนี่ยวนำของแรงเคลื่อนไฟฟ้า และต่อมาได้มีการพัฒนาโดย เลนซ์ ซึ่งพอที่จะสรุปกฎเหล่านี้ได้คือ

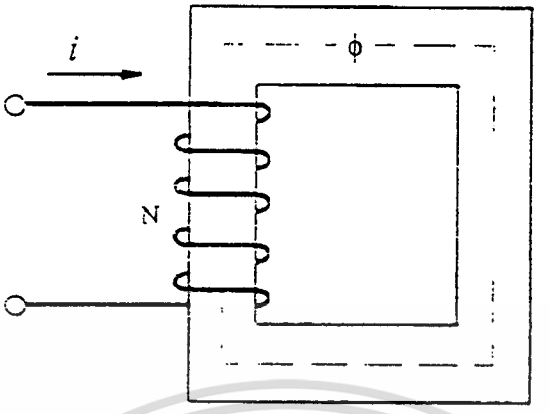
กฎข้อที่ 1 กฎของเลนซ์ (Lenz s' Law) กล่าวไว้ว่าในวงจรปิดใดๆที่มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสในวงจรย่อมทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในวงจรนั้น โดยที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรนั้นๆ

กฎข้อที่ 2 กฎของฟาราเดย์ (Faraday s' Law) กล่าวไว้ว่าการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของปลายของขดลวดหรือลูปนั้นๆหรือการเหนี่ยวนำของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างปลายของเส้นลวดตัวนำอันนั้น จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการที่ตัวนำตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็กนั้นต่อหนึ่งหน่วยเวลา

2.1.2 ความต้านทานแม่เหล็ก (RELUCTANCE)

ในเบื้องต้นของการศึกษาเกี่ยวกับความต้านทานทางแม่เหล็กจะใช้แกนเหล็กแบบ core-type ดังแสดงดังรูปที่ 1 โดยที่เรากำหนดให้ว่าแกนเหล็กทำจากสารแม่เหล็ก (ferromagnetic material) และไม่มีสนามแม่เหล็กรั่วไหล (leakage flux) ออกจากแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 วงจรแม่เหล็กแบบ core type

จากกฎของแอมแปร์ (ampare s' law) จะได้ว่า

$$Ni = \oint H.dl$$

เนื่องจากทิศทางของ H อยู่ในทิศทางเดียวกับระยะทางโดยเฉลี่ยของวงจรแม่เหล็ก ซึ่งสามารถเขียนสมการออกมาอยู่ในรูปของขนาดได้ดังนี้

$$Ni = Hl_{av} \qquad \text{---------- 2.1}$$

เมื่อกำหนดให้

H : ความเข้มของสนามไฟฟ้า (Magnetic field intensity) มีหน่วย At/m

i : กระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวด มีหน่วย แอมป์ (A)

l_{av} : ความยาวของแกนเหล็กโดยเฉลี่ย มีหน่วย เมตร (m)

N : จำนวนรอบของขดลวด มีหน่วย รอบ (turn)

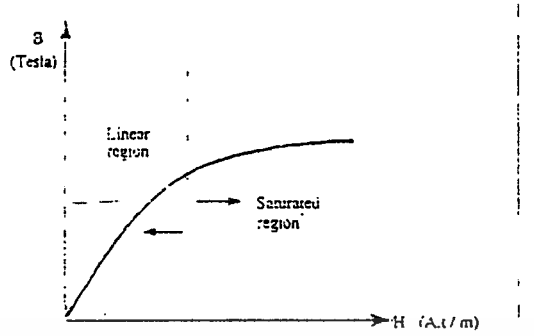
Ni หรือ mmf : แรงเคลื่อนทางแม่เหล็ก (magnetomotive force,mmf)

มีหน่วย A.T

2.1.3 ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Intensity of Magnetic Field)

ความเข้มสนามแม่เหล็กคือ ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ออกแรงกระทำหนึ่งหน่วยขั้วแม่เหล็ก สำหรับในตัวกลางอื่นๆ ความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ในแกนเหล็กที่ทำจากสารแม่เหล็กสามารถดูได้จาก B-H Curve ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ไม่เป็นแบบเชิงเส้น (Non-Linear Curve) โดยเรียกช่วงที่เหลือนี้แม้ว่าจะเพิ่มค่า H ขึ้นไปเรื่อยๆ แต่ค่า B จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยนี้ว่า **ช่วงแกนเหล็กอิ่มตัว** (Saturation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H (B-H Curve)

ถ้าความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H เป็นไปอย่างเชิงเส้น (Linear) หรือถูกใช้งานอยู่ในช่วงความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น (Linear Region) สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H โดยมีค่าคงที่ๆขึ้นอยู่กับตัวกลางของสนามแม่เหล็ก

$$B = \mu_0 . \mu_r . H$$

หรือ

$$B = \mu . H \qquad \text{---------- 2.2}$$

เมื่อกำหนดให้

B : ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) มีหน่วย Tesla หรือ Wb/m^2

μ : ความซึมซาบของตัวกลาง (Permeability) มีหน่วย H/m

μ_0 : ความซึมซาบในห้วงอวกาศ (Permeability Of Free-Space) มีหน่วย H/m

μ_r : ความซึมซาบสัมพันธ์ (Reative Permeability) ไม่มีหน่วย

โดยที่ค่า $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m และในทางด้านการคำนวนทางด้านวงจรแม่เหล็กให้คิดค่าความซึมซาบของตัวกลาง (μ) มีค่าคงที่ (ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต้องไม่เกินจุดที่อิ่มตัว) แทนค่า H จากสมการที่ 2.2 ลงในสมการที่ 2.1 จะได้ว่า

$$Ni = \frac{B}{\mu} . l_{av} \qquad \text{---------- 2.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 เส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux)

เส้นแรงแม่เหล็กคือ เส้นแรงที่เกิดจากแม่เหล็กจะส่งอำนาจความเป็นแม่เหล็กออกมารอบตัวเอง โดยมีทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กวิ่งออกจากขั้วเหนือ (N) ออกไปยังขั้วใต้ (S) ภายในแท่งแม่เหล็ก และวิ่งออกจากขั้วใต้ (S)ไปยังขั้วเหนือ (N) ถ้าค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) มีค่าสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก เราสามารถหาค่าของเส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) ได้โดยการคูณค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (A) จะได้ว่า

$$\phi = B.A \qquad \text{---------- 2.4}$$

เมื่อกำหนดให้

ϕ : จำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วย Wb

B : ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วย Wb/m^2

A : พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก มีหน่วย Wb/m^2

นำค่า B จากสมการที่ 2.4 แทนลงในสมการที่ 2.3 จะได้ว่า

$$Ni = \frac{\phi}{\mu.A} . l_{av}$$

$$Ni = \phi.R \qquad \text{---------- 2.5}$$

เมื่อกำหนดให้

$R = \frac{1}{\mu.A} . l_{av}$: เป็นความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance) มีหน่วย At/Wb

$\lambda = 1/R$: เป็นความนำแม่เหล็ก (Perance) มีหน่วย Wb/At

2.1.5 สภาพการซึมซาบ (Permeability)

สภาพการซึมซาบของแม่เหล็กคือ ตัวกลางตัวหนึ่งที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหรือเส้นแรงแม่เหล็กได้มากน้อยแตกต่างกันไปเช่น ถ้ามีขดลวดขดหนึ่งพันอยู่รอบแกนไม้ โดยมีกระแสจำนวนหนึ่งไหลผ่าน ก็จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมาจำนวนหนึ่ง ในทำนองเดียวกันถ้าใช้แกนเหล็กขนาดเดียวกันใส่เข้าไปแทนจะได้เส้นแรงแม่เหล็กมากกว่า แสดงว่าแกนเหล็กมีสภาพการซึมซาบสูงกว่าไม้

โดยในระบบ MKS

$$\mu = \mu_0 . \mu_r \qquad \text{---------- 2.6}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \qquad \text{---------- 2.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

μ_r = 1 , ในอากาศ

2.1.6 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductor)

ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะเป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องทั้งหมดในขดลวด (Flux Linkage) กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด (i) ซึ่งหน่วยของความเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะมีหน่วยเป็น เฮนรี่ (Henry) สามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$L = \frac{\lambda}{i} \qquad \text{---------- 2.8}$$

เมื่อกำหนดให้

L : ความเหนี่ยวนำ มีหน่วย H

λ : เส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องกันทั้งหมดในขดลวด มีหน่วย Wb.t

i : กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด มีหน่วย A

จุดประสงค์ของการศึกษาเกี่ยวกับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L) ในทางด้านเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้น เพื่อที่จะใช้ในการวิเคราะห์หาค่าของการเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้า (Induced Voltage) ของขดลวด และค่าพลังงานที่สะสมอยู่ในรูปสนามแม่เหล็กที่อยู่ในวงจรแม่เหล็ก ในกรณีที่มีขดลวดเพียงขดเดียวในวงจรแม่เหล็ก ค่าของความเหนี่ยวนำสามารถคำนวนได้จากจำนวนแม่เหล็กหารด้วยกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด โดยที่เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวดสามารถหาได้จาก

$$\lambda = \phi_1+\phi_2+\phi_3+.....\phi_n \qquad \text{---------- 2.9}$$

เมื่อกำหนดให้

λ : เป็นเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวด มีหน่วย Wb.t

$\phi_1+\phi_2+....\phi_n$: เป็นเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวดขดที่ 1,ขดที่ 2 จนถึงขดที่ n ตามลำดับ มีหน่วย Wb

แต่ถ้าวงจรแม่เหล็กไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage) หรือมีเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวดแต่ละขดเท่ากันคือเท่ากับ ϕ จะได้ว่า

$$\lambda = N.\phi \qquad \text{---------- 2.10}$$

ดังนั้นสามารถคำนวนหาค่าความเหนี่ยวนำ (L) ได้จาก

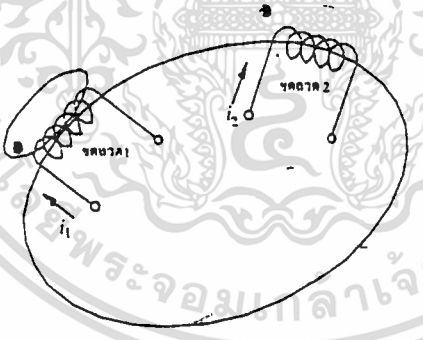
$$L = \frac{N.\phi}{i} \qquad \text{---------- 2.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L = \frac{N^2}{R} \qquad \text{---------- 2.12}$$

การหาค่าความเหนี่ยวนำถึงสมการที่ 2.12 จะสามารถหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องในขดลวด โดยมีข้อจำกัดว่าความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ต้องมีลักษณะเชิงเส้นหรือถ้าไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตลอดย่านดังเช่น B-H Curve ของแกนเหล็กการใช้งานต้องอยู่ในย่านความสัมพันธ์เชิงเส้น โดยที่ยังไม่ถึงจุดอิ่มตัวของแกนเหล็ก

ในกรณีที่มีขดลวดในวงจรแม่เหล็กมากกว่าหนึ่งขด ค่าของจำนวนแม่เหล็กที่มาเกี่ยวคล้องขดลวดจะประกอบด้วย เส้นแรงแม่เหล็กของตัวเอง (Self Flux Linkage) กับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดรอบข้าง (Mutual Flux Linkage) ดังนั้นเราจึงแบ่งค่าความเหนี่ยวนำในขดลวด เพื่อจุดประสงค์ในการที่จะหาเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องออกมาเป็น 2 ชนิดคือค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self Inductance) และค่าความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance) ซึ่งในการกำหนดค่าต่างๆหามาจากสมการที่อธิบายเกี่ยวกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้อง ดังตามรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นขดลวด 2 ขด ซึ่งมีสนามแม่เหล็ก 2 ขดเกี่ยวคล้องถึงกันตั้งชื่อว่าขดลวดที่ 1 และขดลวดที่ 2



รูปที่ 2.3 แสดงการเกี่ยวคล้องของสมการแม่เหล็กของขดลวด 2 ขด

จะสามารถหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องกับขดลวดที่ 1 (λ_1) และขดลวดที่ 2 (λ_2) ได้จาก

$$\lambda_1 = N_1(\phi_1 + K_{12}.\phi_2)$$

$$= N_1\left(\frac{N_1.i_1}{\Re_1} + K_{12}\frac{N_2.i_2}{\Re_2}\right)$$

$$= L_{11}i_1 + L_{12}i_2 \qquad \text{----------2.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\lambda_2 = N_2(\phi_2 + K_{21}.\phi_1)$$
$$= N_2\left(\frac{N_2.i_2}{\Re_2} + K_{21}\frac{N_1.i_1}{\Re_1}\right)$$
$$= L_{22}i_2 + L_{21}i_1 \qquad \text{----------2.14}$$

เมื่อกำหนดให้

$L_{11} = \frac{N_1^2}{\Re_1}$: เป็นค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวด 1 มีหน่วย H

$L_{22} = \frac{N_2^2}{\Re_2}$: เป็นค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวด 2 มีหน่วย H

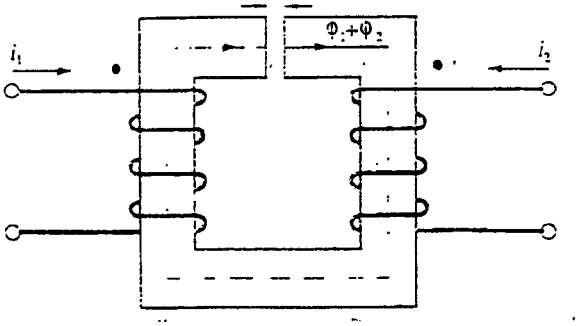
$L_{12} = K_{12}\frac{N_1N_2}{\Re_2}$: เป็นค่าความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวด 1 ที่ถูกกระทำโดยขดลวดที่ 2 มีหน่วย H

$L_{21} = K_{21}\frac{N_1N_2}{\Re_1}$: เป็นค่าความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดที่ 2 ที่ถูกกระทำโดยขดลวดที่ 1 มีหน่วย H

K_{12} : เป็นสัมประสิทธิ์ของการเหนี่ยวคล้อง (coupling coefficient) ของขดลวด 1 ที่ถูกกระทำโดยขดลวด 2

K_{21} : เป็นสัมประสิทธิ์ของการเหนี่ยวคล้อง (coupling coefficient) ของขดลวดที่ 2 ที่ถูกกระทำโดยขดลวด 1

ค่าสัมประสิทธิ์ของการเกี่ยวคล้องจะมีค่า $0 < K < 1$ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วถ้าขดลวดวางตัวตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องระหว่างกันมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือถ้าขดสองขดพันอยู่บนแกนเหล็กร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ถ้าให้วงจรแม่เหล็กมีคุณสมบัติเชิงเส้น (linear) และไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (leakge flux)



รูปที่ 2.4 วงจรแม่เหล็กที่มีขดลวด 2 ขดและมีช่องอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ สำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าค่าความซึมซาบสัมพันธ์ (reative permeability.μ) มีค่าสูงมาก ๆ ให้ค่าความต้านทานแม่เหล็ก (relutance) จะขึ้นอยู่กับระยะห่างของช่องอากาศ (air gap) และค่า $K_{12} = K_{21} = 1$ จากสมการที่ 2.13 และ 2.14 เขียนใหม่ได้ว่า

$$\lambda_1 = N_1(\phi_1 + \phi_2)$$

$$= N_1\left(\frac{N_1.i_1}{\Re_g} + \frac{N_2.i_2}{\Re_g}\right)$$

$$= L_{11}i_1 + L_{12}i_2 \quad \text{----------2.15}$$

และ

$$\lambda_2 = N_2(\phi_1 + \phi_2)$$

$$= N_2\left(\frac{N_1.i_1}{\Re_g} + \frac{N_2.i_2}{\Re_g}\right)$$

$$= L_{22}.i_2 + L_{21}.i_1 \quad \text{----------2.16}$$

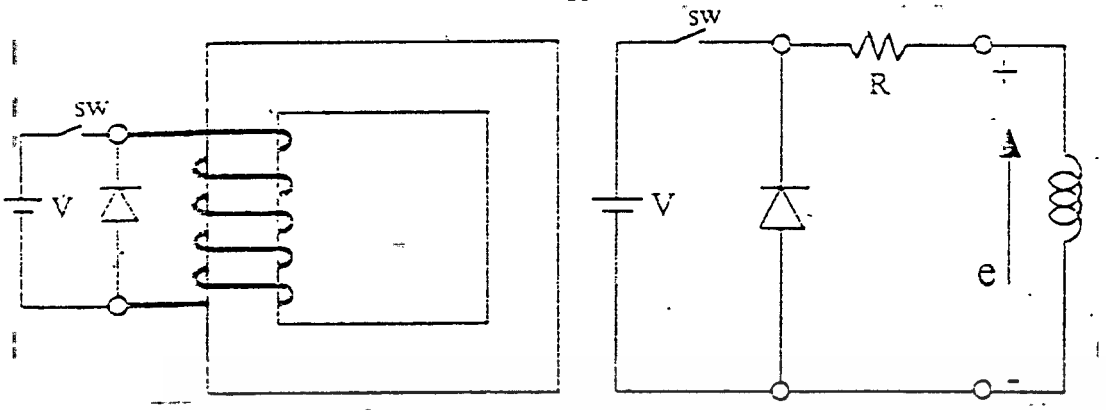
เมื่อ

$$L_{12} = L_{21} = \frac{N_1N_2}{\Re_g}$$

2.2 <u>พลังงานที่สะสมอยู่ในรูปสนามแม่เหล็ก</u>

ในวงจรแม่เหล็กที่ทำการป้อนแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กและถ้าทำการตัดสวิทช์ที่ทำการจ่ายไฟฟ้าป้อนเข้าขดลวดที่สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ซึ่งสนามแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กจะยุบตัวลงตัดขดลวดทำให้เกิดการเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อต่อเนื่องกระแส ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ของการจ่ายพลังงานที่สะสมอยู่ในวงจรแม่เหล็กออกมาภายนอก ตามแสดงในรูปที่ 2.5 จำเป็นต้องมีไดโอด (diode) มาต่อคร่อมเพื่อการต่อเนื่องกระแส ลดการสปาร์ค (spark) ที่หน้าสัมผัสของสวิทช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

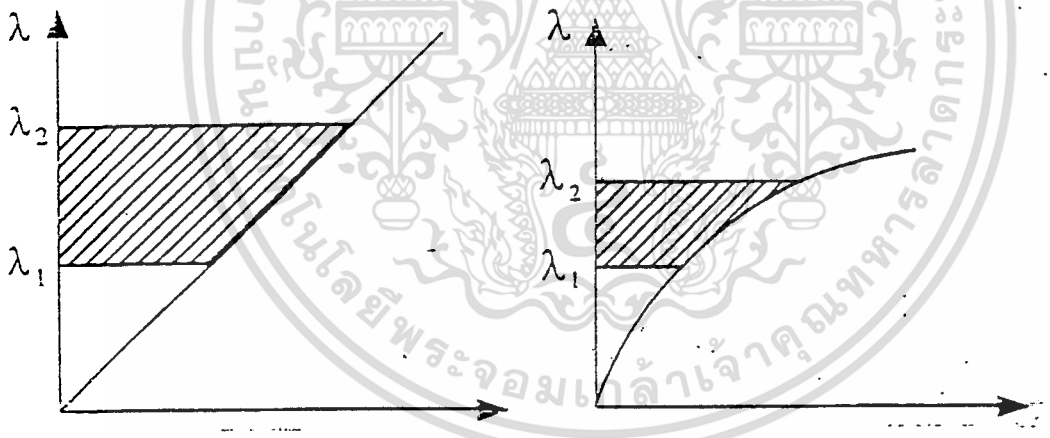


รูปที่ 2.5 วงจรแม่เหล็กและวงจรไฟฟ้า

เมื่อทำการปิดสวิทซ์เพื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าขดลวด จะมีกระแสไหลเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นจาก Faraday 's law สามารถหาศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (e) ได้จาก

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \qquad \text{----------2.17}$$

เมื่อ λ : เป็นเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวด มีหน่วย Wb.t



(ก) (ข)

รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง λ กับ i แบบเชิงเส้น (ก) และแบบไม่เชิงเส้น (ข)

ซึ่งทิศทางของกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าตกคร่อมที่สอดคล้องกับกฎของเคอร์ชอฟ(Kirchoff' s law) โดยที่ตัวเหนี่ยวนำจะต้านการเปลี่ยนแปลงของศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งสามารถหาค่ากำลังป้อนเข้าขดลวดได้จาก

$$P = i.e$$

$$= i\frac{d\lambda}{dt} \qquad \text{----------2.18}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ i : เป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด

และสามารถหาค่าพลังงานที่สะสมอยู่ในรูปสนามแม่เหล็ก (energy storage in megnetic field)

$$W_{fld} = \int p.dt$$

$$= \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} i.dt \qquad \text{----------2.19}$$

เมื่อ

W_{fld} : เป็นพลังงานที่สะสมเพิ่มขึ้น เมื่อค่าของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องเพิ่มจาก λ_1 เป็น λ_2 มีหน่วยเป็น จูล(joules)

โดยค่าของพลังงานที่สะสมเพิ่มขึ้น Wfld แสดงเป็นพื้นที่แรเงาใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง λ และ i ในวงจรแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง λ และ I มีทั้งวงจรแม่เหล็กแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในวงจรแม่เหล็กที่ไม่มีช่องอากาศ (air gap) เช่น วงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงจะมีความสัมพันธ์ระหว่าง λ กับ i เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6.ก แต่อาจนำมาใช้ในการคำนวณเป็นแบบเชิงเส้น (linear) ได้ถ้าช่วงที่ใช้งานเป็นช่วงที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้น ส่วนในวงจรแม่เหล็กที่เรียกว่าเป็นแบบเชิงเส้น โดยทั่วไปจะมีช่องอากาศ (air gap) เช่น ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุน (rotary electrical machine) ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบระนาบ (linear electrical machine) เพราะค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องอากาศจะมีค่ามากกว่าของแกนเหล็กมาก ๆ จะได้ความสัมพันธ์ λ กับ i เป็นไปอย่าง linear แต่มีช่วงใช้จำกัดการใช้งานต้องไม่ถึงจุดที่อิ่มตัวของแกนเหล็ก เพราะถ้าแกนเหล็กอิ่มตัวจะมีผลทำให้ความต้านทานของแกนเหล็กมีค่าสูงขึ้น

เมื่อวงจรแม่เหล็กมีความสัมพันธ์ระหว่าง λ กับ i เป็นไปอย่างเชิงเส้น ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์เป็น

$$\lambda = L.i$$

หรือ

$$i = \frac{\lambda}{L} \qquad \text{----------2.20}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ 2.18 และ 2.19 แทนลงในสมการที่ 2.20 จะได้

$$W_{fld} = \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} \frac{\lambda}{L} d\lambda$$

$$= \frac{1}{2L}(\lambda_2{}^2 - \lambda^2{}_1) \qquad \text{----------2.21}$$

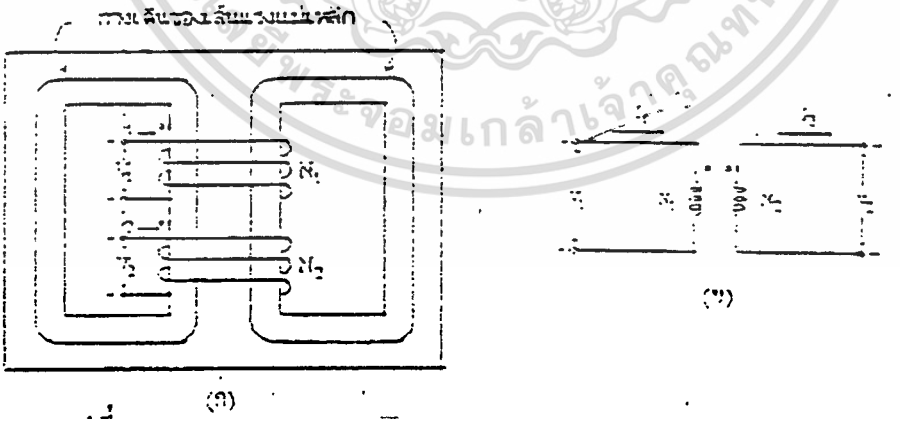
ถ้าต้องการหาพลังงานที่สะสมอยู่ในรูปสนามแม่เหล็กที่ค่า λ ใด ๆ สามารถหาค่าได้ เมื่อกำหนดให้ λ_1 เท่ากับศูนย์ และแทนค่า λ_2 ด้วย λ จะได้ว่า

$$W_{fld} = \frac{1}{2}.L.i^2 \qquad \text{----------2.22}$$

ซึ่งค่า W_{fld} เป็นพลังงานที่สะสมอยู่ในรูปสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็น จูล ที่ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง λ กับ i เป็นอย่างเชิงเส้น

2.3 หลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า

2.3.1 หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส



รูปที่ 2.7 ก. แสดงลักษณะการพันขดลวดและแกนเหล็กแบบ shell type

ข. สัญญลักษณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวด 2 ชุดที่พันอยู่บนแกนเหล็กตามรูปที่ 2.6 ชุดที่ต่อไปยังแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเรียกว่าขดปฐมภูมิ (primary winding) โดยมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ V_1 โวลต์ อีกชุดหนึ่งที่ต่อไปยังภาระทางไฟฟ้า (load) เรียกว่าขดทุติยภูมิ (secondary winding) โดยมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ Load เป็น V_2 โวลต์จำนวนรอบของขดลวดทางปฐมภูมิและทุติยภูมิ มีจำนวนรอบเป็น N_1 และ N_2 ตามลำดับ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าขดลวดปฐมภูมิ จะทำให้เกิดการสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) ขึ้นในแกนเหล็กและเส้นแรงแม่เหล็กนี้ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวดปฐมภูมิ ตามสมการที่ 2.23

$$V_1 = E_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \qquad \text{----------2.23}$$

เมื่อ

V_1 = แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า มีหน่วย โวลต์(volt)

V_2 = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีหน่วย โวลต์(volt)

ϕ = เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า มีหน่วย เวเบอร์(Wb)

N_1 = จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ มีหน่วย รอบ(turn)

f = ความถี่ของระบบไฟฟ้า มีหน่วย เฮิร์ท(Hz)

ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้านี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงตามแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

$$\phi = \phi_m \sin wt$$

$$E_1 = wN_1\phi_m \cos wt \qquad \text{----------2.24}$$

$$W = 2\pi f$$

$$E_{max} = wN_1\phi_m$$

$$\text{rms valve } E_1 = \frac{E\,max}{\sqrt{2}} = 4.44fN_1\phi_m \qquad \text{----------2.25}$$

เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (ϕ) ที่เคลื่อนที่ไปในแกนเหล็กไปตัดกับขดลวดปฐมภูมิ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (E_2) จะเป็นไปตามสมการ

$$V_2 = E_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \qquad \text{----------2.26}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \qquad \text{----------2.27}$$

ในการสร้างสนามแม่เหล็กให้เกิดขึ้นในแกน จำเป็นต้องใช้กระแสผ่านไปในขดลวด ซึ่งเรียกว่าเป็นกระแสกระตุ้น(exciting current) , i_ϕ ลักษณะของกระแสกระตุ้นจะแตกต่างไปจากลักษณะของฟลั๊กแม่เหล็ก ซึ่งอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ลักษณะของกระแสกระตุ้นที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา จะสามารถหาได้โดยตรงจากเส้นแสดงคุณสมบัติงเหล็ก (magnetization curve) ของแกน ดังที่แสดงในรูป 2.8

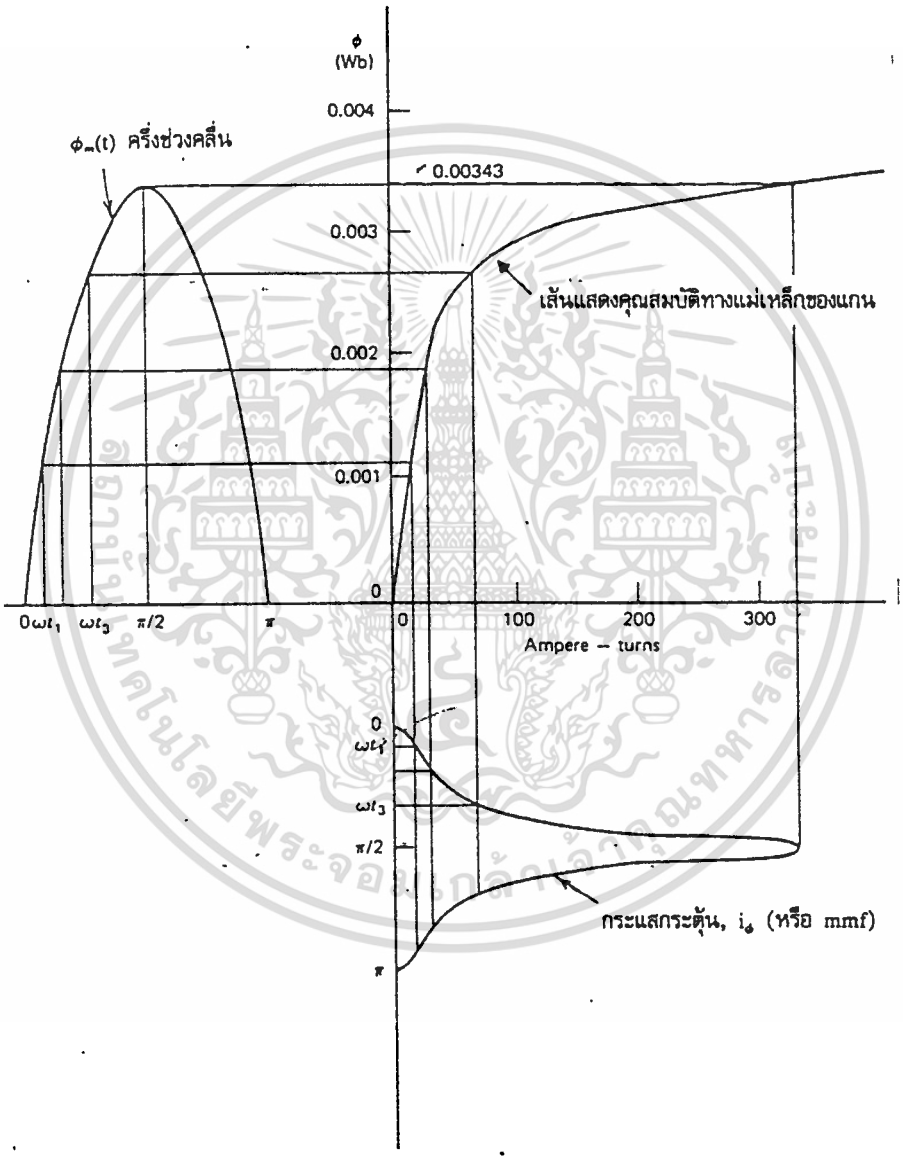
ค่า rms ของกระแสกระตุ้น หาได้ดังนี้

$$I_{\phi,rms} = \left(\frac{1}{T}\int_0^T i_\phi^{\,2}(t)dt\right)^{1/2}$$

และจากกฎของแอมแปร์

$$I_{\phi,rms} = \frac{I_e H_{rms}}{N_1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

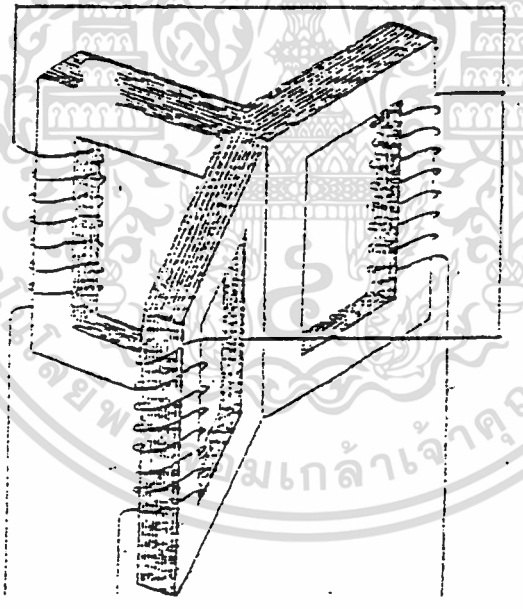


รูปที่ 2.7 วิธีการหาลักษณะของกระแสกระตุ้นจากเส้นแสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส

หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส มีหลักการทำงานเหมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส โดยเราสามารถที่จะนำเอาหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 3 ตัวมาต่อกันให้เป็น 3 เฟส 1 ตัวได้ แต่การที่นำเอาหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 3 ตัวมาต่อกันนั้นทำให้เสียพื้นที่ในการติดตั้งมาก และราคาแพงกว่าเมื่อเทียบกับขนาดพิกัดเดียวกันของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ดังนั้น การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สามารถทำได้โดยใช้แกนเหล็ก 3 ชุด นำมาวางให้ทำมุมกัน 120 องศา โดยให้ด้านที่ไม่ได้รับการพันขดลวดนั้น นำมาต่อสัมผัสกัน ในที่นี้จะแสดงให้เห็นเฉพาะขดลวดทางด้านปฐมภูมิเท่านั้น ส่วนทางด้านทุติยภูมิ ก็จะมีหลักการเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูที่ 7 ซึ่งมีการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสตาร์



รูปที่ 2.9 แสดงการวางแกนเหล็กทำมุมกัน 120 องศา ของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส

การออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้จะเปลืองแกนเหล็ก แต่ว่ามี magnetic circuit path ของแต่ละอันจะเป็นอิสระ และจะเห็นได้ว่าขาของแกนเหล็กที่นำไปสัมผัสติดกันได้นั้น จะมี magnetic path สามกันรวมกันอยู่ ดังนั้น หากว่าเราต่อหม้อแปลงไฟฟ้าต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบ open delta ถ้าหากหม้อแปลงไฟฟ้าตัวหนึ่งตัวใดเสีย หม้อแปลงไฟฟ้าอีก 2 ตัวที่เหลือยังสามารถจ่ายโหลดได้ แต่ว่าพิกัด (rating) จะลดลงไปตามส่วน

ส่วนหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ core type นั้น จะมีแกนของทั้ง 3 เฟสรวมกันอยู่โดยมีหลักการคือ เมื่อป้อนไฟ 3 เฟสเข้าทางด้านปฐมภูมิ กระแสไฟฟ้าที่รวมกันทางเวกเตอร์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ ia+ib+ic = 0 ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีขากลางของแกนเหล็ก ข้อดีของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้คือมีราคาถูกและมีขนาดเล็ก แต่มีข้อเสียคือกระแสกระตุ้นเส้นแรงแม่เหล็กจะไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส

2.4 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า

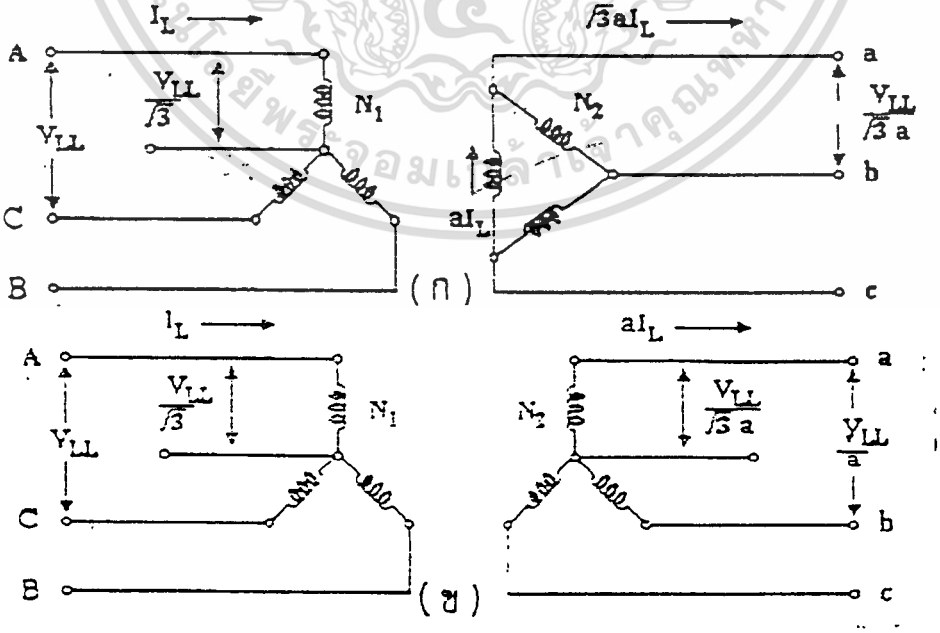
การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ที่มีอยู่ทั่วไปคือ แบบสตาร์ (star) และแบบเดลต้า (delta) ซึ่งมีความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของ line to line และ line to phase เป็นไปดังนี้

การต่อแบบสตาร์ จะได้ความสัมพันธ์

$$V_{phase} = \frac{V_{line}}{\sqrt{3}}, \quad I_{phase} = I_{line} \qquad \text{----------2.29}$$

การต่อแบบเดลต้า จะได้ความสัมพันธ์

$$V_{phase} = V_{line}, \quad I_{phase} = \frac{I_{line}}{\sqrt{3}} \qquad \text{----------2.30}$$



รูปที่ 2.10 ก. การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสแบบสตาร์-เดลต้า (star-delta)

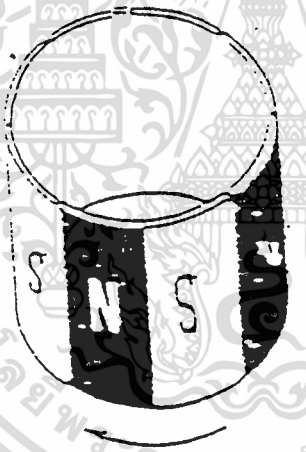
ข. การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสแบบสตาร์-สตาร์(star-star

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ [illegible] และโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 หลักของการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน

หลักการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนนี้ เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดที่พันอยู่ในเครื่องจักรไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลในแต่ละเฟสมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแปรเปลี่ยนตามไปด้วย ซึ่งทำให้คล้ายกับว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในนั้นเกิดจากการหมุนของแม่เหล็กถาวร แต่ความเนจริงแล้วมันเกิดจากตำแหน่งของแรงลัพธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กแปรเปลี่ยนไปตามค่าของกระแสที่ได้รับ ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

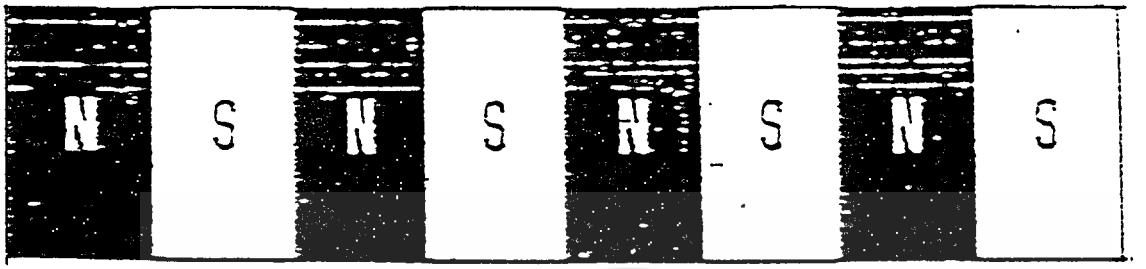
จากเครื่องจักรกลไฟฟ้านี้ จะเห็นได้ว่ามีการพันขดลวดอยู่ที่สเตเตอร์ โดยแต่ละเฟสมีมุมต่างกันอยู่ 120 องศาทางไฟฟ้า ไปตามลำดับของเฟส R,S,T ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อป้อนไฟ 3 เฟสเข้าไปที่สเตเตอร์ โดยจะต่อแบบสตาร์ (star) หรือเดลต้า (delta) ก็ได้



รูปที่2. 11 แสดงขั้วแม่เหล็กของเครื่องกลไฟฟ้าแบบหมุน

ก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้น ผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสในแต่ละเฟสที่ขดลวดของสเตเตอร์นั้น จะทำให้เกิดผลลัพธ์ของสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตำแหน่งไปสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นนี้ เมื่อนำไปวิเคราะห์จะเห็นได้ชัดว่ามีลักษณะคล้ายกับขั้วแม่เหล็กถาวรซึ่งจะหมุนไปรอบโรเตอร์ และในกรณีที่เป็นเครื่องจักรไฟฟ้าในแนวระนาบ จะเหมือนกับการผ่านมอเตอร์แล้วคลี่ออก เมื่อผ่าออกแล้วก็จะได้ขั้วแม่เหล็กเรียงกันในแนวระนาบ ดังรูปที่ 2.11 และ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงขั้วแม่เหล็กของเครื่องกลไฟฟ้าแบบเชิงเส้น

และสนามแม่เหล็กที่หมุนในมอเตอร์แบบหมุน ก็จะกลายเป็นสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ไปในแนวระนาบ (Travelling wave)

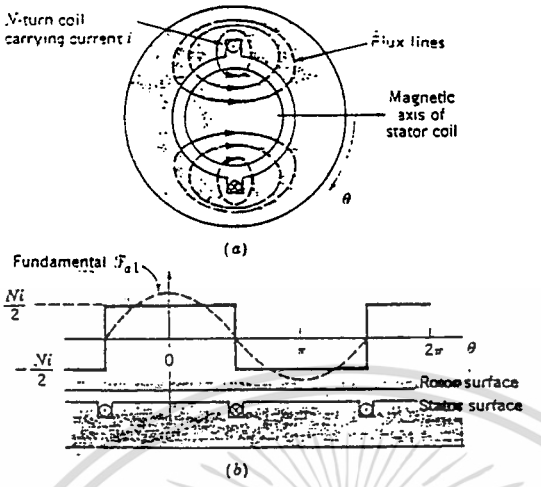
2.5.1 MMF ของ DISTRIBUTED WINDING

การศึกษาสนามแม่เหล็กของการพันแบบกระจาย สามารถศึกษาได้จากสนามแม่เหล็กของขดลวดขดเดียวที่มี N รอบ ซึ่งวางห่างกัน 180 องศาทางไฟฟ้า และถูกกำหนดเป็นแบบขดลวดแบบเต็มช่วง(full-pitch coil) ดังแสดงในรูปที่ 2.13.a

เครื่องหมายจุด และกากบาท จะแสดงให้เห็นกระแสที่พุ่งเข้าและไหลออกจากผู้มองตามลำดับ

ในรูปที่ 2.13.a โรเตอร์เป็นแบบ cylindricat rotor ซึ่งโดยธรรมชาติทั่วไปของสนามแม่เหล็กจะถูกสร้างโดยกระแสในขดลวด ที่ล้อมรอบโดยเส้นประ เมื่อค่าของ permeability ของอาร์มาเจอร์และที่สนามของส่วนที่เป็นแกนเหล็กมีค่ามากกว่าส่วนของอากาศมาก ๆ จากลักษณะของโครงสร้างโดยสมมาตรของแกนเหล็ก จะเห็นได้ชัดว่าค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ในอากาศที่มุม θ ภายใต้หนึ่งขั้วแม่เหล็ก จะมีขนาดที่เท่ากันกับที่ $\theta+\pi$ ซึ่งเป็นขั้วแม่เหล็กตรงข้ามกัน และในทิศทางที่ตรงข้ามกัน จากรูปที่ 2.13.1 จะมีค่า mmf เป็น Ni ซึ่งอยู่ในลักษณะที่เป็นเส้นทางปิดและจากรูป
จะเห็นว่าค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของด้านที่ตรงข้ามกันจะมีค่าเท่ากันแต่ทิศทางจะกลับกัน สิ่งที่ตามมาก็คือ mmf ในอากาศจะกระจายในลักษณะเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
037035



รูปที่ 2.13 แสดง mmf ของการพันแบบ full-pitch coil

ในรูปที่ 2.13.b แสดงช่องอากาศและลักษณะการวางขดลวด เมื่อเราคลี่ออกให้อยู่ในแนวระนาบ ลักษณะของการกระจายของ mmf ในช่องอากาศจะมีขนาดอยู่ในช่วงตั้งแต่+Ni/2 ถึง -Ni/2 โดยช่วงเปิดแคบ ๆ ของ slot mmf จะกระโดดอย่างทันทีทันใด โดย Ni คร่อมจาก coil side หนึ่งไปอีก coil side หนึ่ง

ในการออกแบบเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับ โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็นผลมาจากการพันขดลวดแบบ concentrate full-pitch โดย fundamental wave จะประกอบด้วย fundamental component และ harmonics ที่ สามารถใช้ Fourier series หา fundamental wave ของรูปที่ 2.13.b จะได้ว่า

$$F_{a1} = \frac{4}{\pi}.\frac{Ni}{2}\cos\theta \qquad \text{----------2.35}$$

θ คือ มุมที่วัดจาก magnetic axis ของขด stator

ซึ่ง fundamental แสดงให้เห็นเป็นรูป sine ที่เป็นเส้นประในรูปที่ 2.13.b มีขนาดเท่ากับ

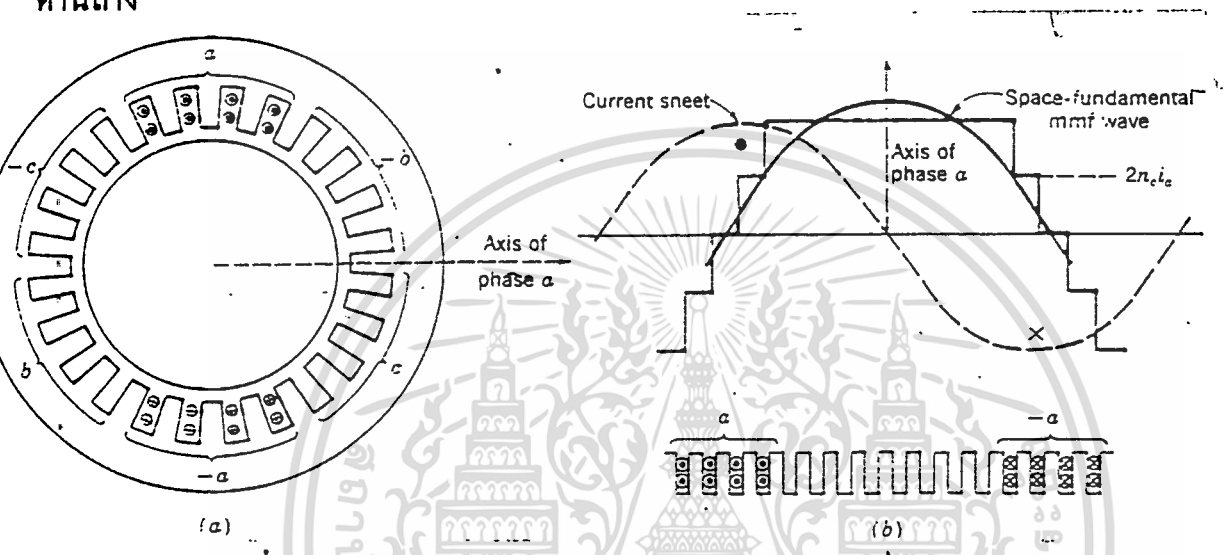
$$F_{1peak} = \frac{4}{\pi}.\frac{Ni}{2}$$

นั่นคือช่วงสูงสุดจะอยู่ที่ magnetic axis ของขดลวด

ตอนนี้มาลองพิจารณาผลสะท้อนของการพันแบบกระจายเมื่อมีจำนวนหลาย slot บ้าง จากรูป 2.14.a แสดง เฟส a ของ armature winding ขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว 3 เฟส ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับ ในส่วนของ เฟส b และ เฟส c ร่อง slot จะว่างเปล่า ซึ่งกันพันขดลวดของทั้ง 3 เฟสจะเหมือนกันทุกอย่าง แต่วางในตำแหน่งที่ต่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า ในที่นี้จะยกตัวอย่าง mmf ของ เฟส a เพียงอย่างเดียว โดยขดลวดพันแบบสองชั้น(two layers) โดยแต่ละขดของ nc จะประกอบขึ้นจากชุด slot ด้านบนและชุด slot ด้านล่าง



รูปที่ 2.14 แสดงการกระจายของ mmf ใน 1 เฟส เมื่อพันแบบ full-pitch

ในรูปที่ 2.14 แสดงถึง 1 ขั้ว ของขดลวด mmf ที่ได้จะมีลักษณะที่เป็นขั้น ต่อเนื่องกันแต่ละขั้น จะมีความสูง $2n_c i_a$ ซึ่งจะเท่ากับกระแสตัวนำในหนึ่ง slot โดยที่
i_a คือ winding current และ space-fundamental component ถูกแสดงโดยรูปคลื่น sine wave และเราเห็นได้ว่าขดลวดที่พันแบบกระจายจะสร้าง mmf wave ที่ใกล้เคียงกับรูป sine wave มากกว่า concentrate coil ซึ่งสามารถดูได้ในรูปที่ 2.13

รูปคลื่น resultant fundamental mmf ของการพันแบบกระจายจะมีค่าน้อยกว่าผลบวกของ fundamental component ของแต่ละขดเพราะว่าแกนเหล็กของแต่ละขดไม่ได้จัดวางให้สัมพันธ์ในลักษณะที่ถูกต้องกับ resultant จากสมการที่ 2.35 ถ้า P-pole มีขดลวด Nph อนุกรมกันต่อ phase จะได้ fundamental component เป็น

$$F_{a1} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N_{PH}}{P} ia.\cos\theta \qquad \text{----------2.36}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง factor $4/\pi$ เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ Fourier-series ของ sawtooth mmf wave ของ concentrate full-pitch coil และ winding foctor (K_w) เกิดจากการพันขดลวดแบบกระจาย

factor K_wN_{ph} คือ เกิดจากผลของการการต่ออนุกรมรอบขดลวดต่อ phase ของ fundamental mmf

สมการที่ 2.36 จะอธิบาย space-fundamental component ของ mmf wave ที่ถูกสร้างโดยกระแสใน เฟส a ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ mmf wave ที่สร้างโดย current sheet ที่วางอยู่ในขอบเขตของ stator ดังแสดงในรูปที่ 2.14.b ส่วนประกอบของ mmf จะมีการกระจายไปในอากาศในรูปของ function cos θ ค่าสูงสุดจะเป็นไปในลักษณะขนานไปกับความยาวของแกนแม่เหล็กของเฟส a และขนาดสูงสุดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสชั่วขณะ (i_a) ถ้าให้ $i_a = I_m$ coswt เวลาของสูงสุด จะเป็น

$$F_{max} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N_{PH}}{P} .ia.\cos\theta \qquad \text{----------2.37}$$

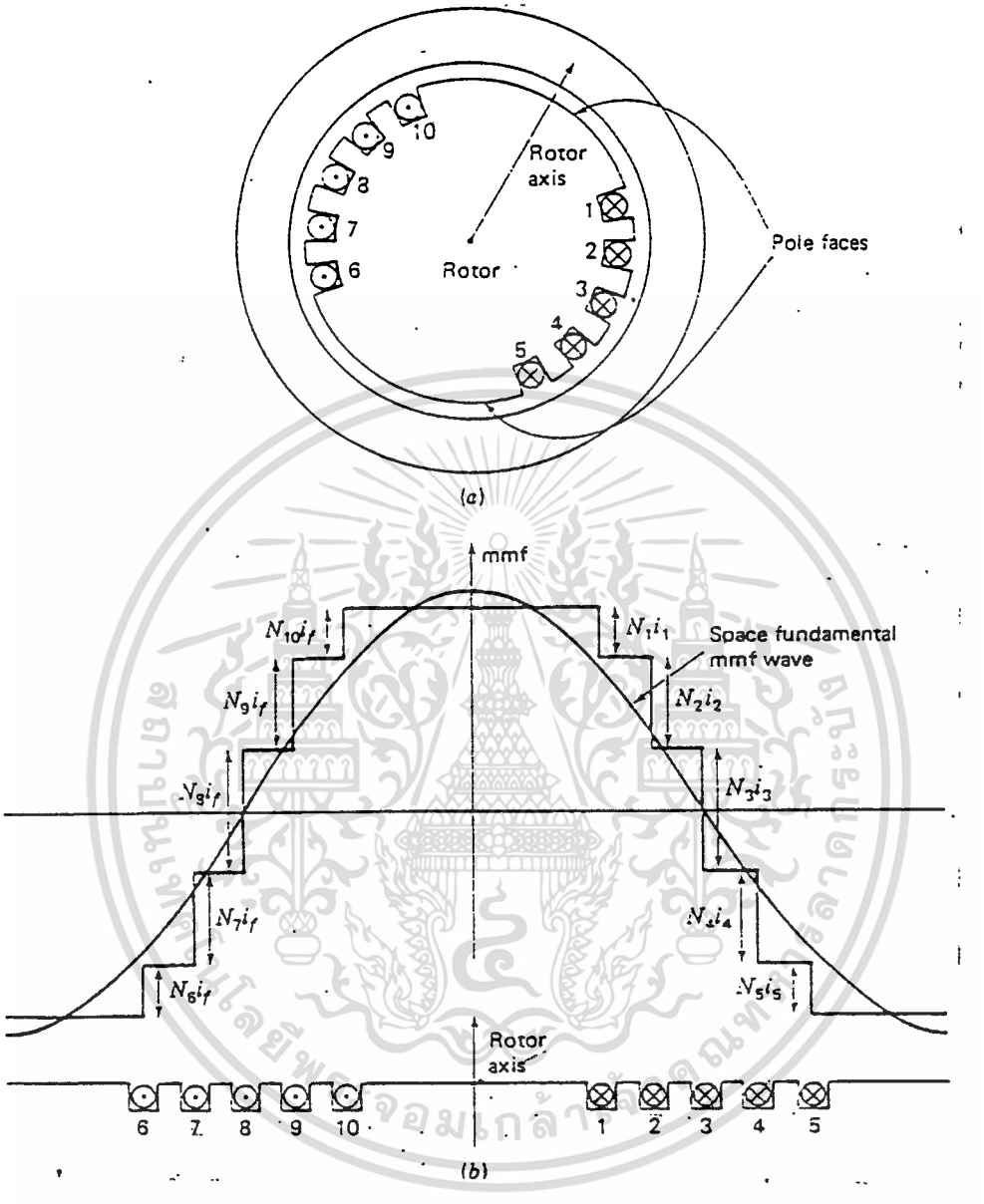
การพันขดลวดโรเตอร์บางครั้งถูกกระจายในร่อง slot เพื่อลดผลสะท้อนของ space-harmonics ดังแสดงในรูปที่ 2.15.a จากรูปโรเตอร์เป็นแบบ wound-rotor 2-pole ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถึงแม้ว่าการพันจะสมมาตรเมื่อเทียบกับแกนโรเตอร์จำนวนรอบต่อ slot สามารถควบคุมให้แปรไปตาม hamoics และรูปที่ 2.15b มีจำนวนรอบของขดลวดไม่กี่รอบในร่อง slot ที่ใกล้หน้า pole ที่สุด fundamental mmf wave ของp-pole roterwinding สามารถแสดงให้อยู่ในเทอมของ จำนวนรอบของทั้งหมด N_r winding current,I_r winding factor,K_r

$$F_{r1} = \frac{4}{\pi} k_r \frac{N_R}{P} I_R \mathrm{COS}\theta \qquad \text{----------2.38}$$

จะได้

$$F_{1,Peak} = \frac{4}{\pi} k_r \frac{N_r}{P} I_r \qquad \text{----------2.39}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15แสดงการกระจายของ mmf บน rotor ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.5.2 ROTATING MMF WAVE ของเครื่องจักรกระแสสลับ

Rotating mmf wave ของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับ ในที่นี้จะอธิบาย mmf wave ที่เกิดจากการพันขดลวด1เฟส และการพันขดลวด3เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การพันขดลวด 1 เฟส

จากรูปที่ 2.16.a แสดงการกระจายของ space-fundamental mmf ของการพันขดลวด1เฟส โดยจากสมการที่ 2.38

$$F_{a1} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_{PH}}{P} ia.\cos\theta \qquad \text{----------2.40}$$

เมื่อขดลวดนี้ถูกกระตุ้นโดยกระแส sine wave

$$i_a = I_a \cos\theta \qquad \text{----------2.41}$$

กำหนดให้การกระจายของ mmf เป็น

$$F_{a1} = (F_{max} \cos\theta)\cos\omega t \qquad \text{----------2.42}$$

สมการที่ 2.42 สามารถเขียนให้อยู่ในอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งค่าขนาดสูงสุดของการกระจาย mmf คือ

$$F_{max} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_{ph}}{P} Ia \qquad \text{----------2.43}$$

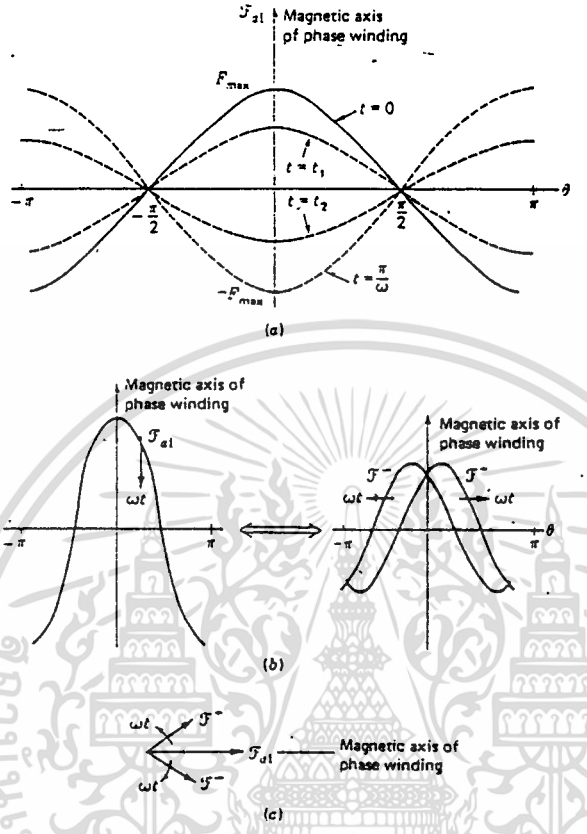
ซึ่งจะคงที่ในอากาศ แต่ขนาดจะเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณ sine wave ที่ความถี่ ω ดังแสดงในรูป 2.16.a

จากสมการที่ 2.42 สามารถนำมาเขียนโดยใช้ตรีโกณมิติจะได้

$$F_{a1} = F_{max}\left(\frac{1}{2}\cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2}\cos(\theta + \omega t)\right) \qquad \text{----------2.44}$$

ซึ่งค่า mmf ของการพันขดลวดของ1เฟส สามารถแยกออกเป็น 2 เทอม โดยแต่ละเทอมจะมีขนาดสูงสุดเป็นครึ่งหนึ่งของเทอมแรก โดยเทอมแรกจะเคลื่อนที่ในทิศทาง+θ และอีกเทอมหนึ่งจะเคลื่อนที่ในทิศทาง-θและทั้งสองเทอมมีความเร็วเชิงมุมเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แสดง mmf ของการพันขดลวด1เฟส

$$F^{+} = \frac{1}{2}F_{max}\cos(\theta - \omega t) \qquad \text{----------2.45}$$

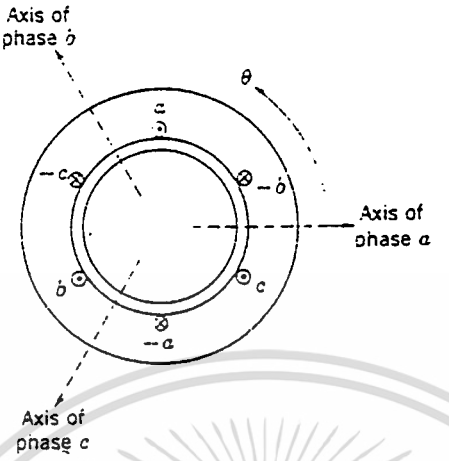
$$F^{-} = \frac{1}{2}F_{max}\cos(\theta + \omega t) \qquad \text{----------2.46}$$

ในรูปที่ 2.16.b แสดงผลรวมของ mmf ซึ่งได้จากผลรวมของสมการที่ 2.45 กับสมการที่ 2.46 ส่วนในรูปที่ 2.16.c แสดง phasor ของ

2. การพันขดลวด 3 เฟส

ในการพันขดลวด 3 เฟสของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับ การพันขดลวดในแต่ละเฟสจะห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า ดังตามลักษณะการวางขดลวด a, -a, b, -b และ c, -c ในรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



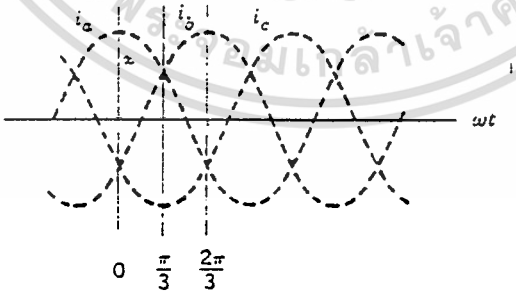
รูปที่ 2.17 แสดงขดลวด 3 เฟสของสเตเตอร์

ลักษณะของ three space-fundamental sinusoidal mmf wave จะห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้าในอากาศ และในแต่ละเฟสจะถูกกระตุ้นโดยกระแสไฟสลับ ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งการพิจารณาจะพิจารณาภายใต้เงื่อนไขของ 3-เฟส สมดุลย์จะได้กระแสชั่วขณะเป็น

$$i_a = I_m \cos\omega t \qquad \text{----------2.47}$$

$$i_b = I_m \cos(\omega t - 120) \qquad \text{----------2.48}$$

$$i_c = I_m \cos(\omega t + 120) \qquad \text{----------2.49}$$



รูปที่ 2.18 แสดงกระแสเฟสชั่วขณะ ภายใต้เงื่อนไข 3 เฟส สมดุลย์

I_m คือ ค่าสูงสุดที่เวลา t = 0 โดยเกิด I_{max} ขึ้นเมื่อกระแส เฟส a เป็นบวกสูงสุด เมื่อลักษณะการลำดับเฟสเป็น abc จากรูปที่ 18 แสดง wave form ของกระแสชั่วขณะ เครื่องหมาย จุด(dot) และกากบาท(cross) ในขดลวดจะอ้างอิงกระแสเฟส ที่เป็นบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

mmf ของ เฟส a จะเป็น

$$F_{max} = F_{a1}^{+} + F_{a1}^{-} \qquad \text{----------2.50}$$

เมื่อ

$$F_{a1}^{+} = \frac{1}{2}F_{max}\cos(\theta - \omega t) \qquad \text{----------2.51}$$

$$F_{a1}^{-} = \frac{1}{2}F_{max}\cos(\theta + \omega t) \qquad \text{----------2.52}$$

และ

$$F_{max} = \frac{4}{\pi}K_w\frac{N_{ph}}{P}I_m \qquad \text{----------2.53}$$

ในทำนองเดียวกัน เฟส b และ c ก็จะมีแกนอยู่ที่ $\theta = 120$ และ $\theta = -120$ ตามลำดับ

$$F_{b1} = F_{b1}^{+} + F_{b1}^{-} \qquad \text{----------2.54}$$

$$F_{b1} = \frac{1}{2}F_{max}\cos(\theta - \omega t) \qquad \text{----------2.55}$$

$$F_{b1} = \frac{1}{2}F_{max}\cos(\theta - \omega t + 120^{\circ}) \qquad \text{----------2.56}$$

และ

$$F_{c1} = F_{C1}^{+} + F_{C1}^{-} \qquad \text{----------2.57}$$

$$F_{c1} = \frac{1}{2}F_{max}\cos(\theta - \omega t) \qquad \text{----------2.58}$$

$$F_{c1} = \frac{1}{2}F_{max}\cos(\theta + \omega t - 120^{\circ}) \qquad \text{----------2.59}$$

total mmf คือ ผลบวกของแต่ละเฟส

$$F(\theta, t) = F_{a1} + F_{b1} + F_{C1} \qquad \text{----------2.60}$$

การบวกกันทำได้โดยแยกออกเป็นเทอมบวก และลบ ซึ่งผลบวกของเทอมลบ มีค่าเท่ากับศูนย์

$$F(\theta, t) = F_{a1} + F_{b1} + F_{c1}$$

$$= \frac{1}{2}F_{max}(\cos(\theta + \omega t) + \cos(\theta + \omega t - 120^{\circ}) + \cos(\theta + \omega t + 120^{\circ})$$

$$= 0 \qquad \text{----------2.61}$$

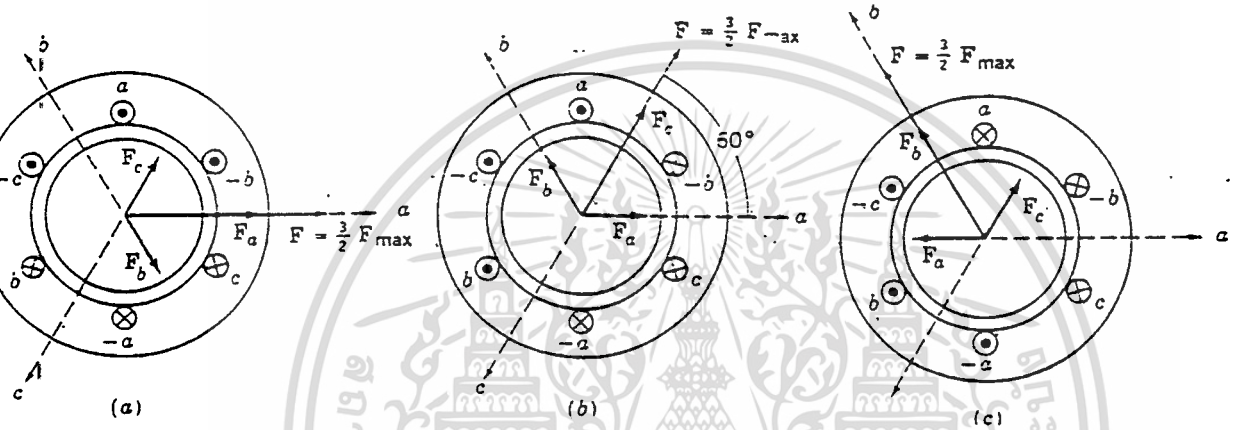
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และผลบวกของเทอม positive เท่ากับ

$$F(\theta,t) = F_{a1} + F_{b1} + F_{C1} = \frac{3}{2}F_{max}\cos(\theta-\omega t) \qquad \text{----------2.62}$$

ดังนั้น ผลรวมของทั้งสามเฟสของเทอม positive มีค่าเท่ากับ

$$F(\theta,t) = \frac{3}{2}F_{max}\cos(\theta-\omega t) \qquad \text{----------2.63}$$



รูปที่ 2.19 แสดง mmf รวมที่เกิดขึ้นใน stator ที่เวลาต่าง ๆ กัน

2.6 การพันขดลวด

ในการพันขดลวดเพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่มีทั้งขนาดและความเร็วคงที่ หรือการทำให้ generated voltage ที่ได้กำลังไฟฟ้าออกมา 3 เฟส โดยแต่ละเฟสจะห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า ต้องมีหลักการพันเพื่อให้ผลของความสมดุลย์ของระบบเฟส การลดสัญญาณฮาร์โมนิค การทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด รวมถึงการประหยัดทางด้านการลงทุน และ output voltage มีรูปร่างใกล้เคียงรูปคลื่น sine wave มากที่สุด

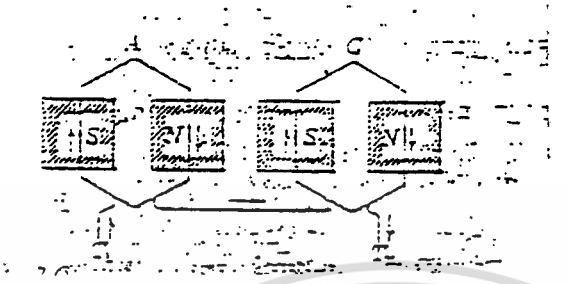
การพันอาร์เมเจอร์ 3 เฟส แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ชั้นเดียว

ในการพันขดลวดแบบชั้นเดียวนี้ ในหนึ่งร่อง slot จะมีหนึ่ง coil side เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า การพันครึ่งขด(half-coil winding) จำนวน coil-group ต่อเฟสเท่ากับครึ่งหนึ่งของขั้วแม่เหล็ก และจะกำหนดให้ความกว้างของขดลวด (coil-pitch) จะเท่ากับโพลพิช การต่อขดลวดของแต่ละกลุ่มคอยล์ เข้าด้วยกันจะต่อแบบปลายต่อต้น ดังในรูปที่ 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

coil pitch (Ys) = $\frac{S}{P}$ slot/pole



รูปที่ 2.20 แสดงการพันขดลวดแบบชั้นเดียว (single-layer)

spread of phase group = 60 องศาทางไฟฟ้า

1 POLE

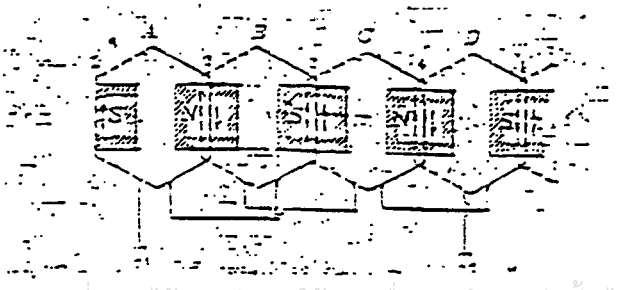
a c b a c b

2 POLE

a1 c2 b1 a1 c1 b1 a2 c1 b2 a2 c2 b2

2. แบบสองชั้น

ในการพันขดลวดแบบสองชั้นนี้ในหนึ่งร่อง slot จะมี 2 coil side เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า whole-coil winding การต่อปลายของขดลวดแบบนี้จะเห็นได้ว่าจำนวนขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมาทั้งหมดมีค่าเท่ากับจำนวนขดลวดต่อเฟส ฉะนั้นเมื่อมองตามลักษณะการพันแล้วก็คล้ายกับว่ามันต่อขนานกัน เพราะนำปลายของขดหนึ่งและสองมาต่อเข้าด้วยกัน และนำขดสองต่อกับขดสาม ทำเช่นนี้จนกว่าจะหมดเฟสแล้วจะเหลือสายออกมา 2 เส้นของแต่ละเฟส เช่นเดียวกับแบบชั้นเดียว ซึ่งดูได้ในรูปที่ 2.21



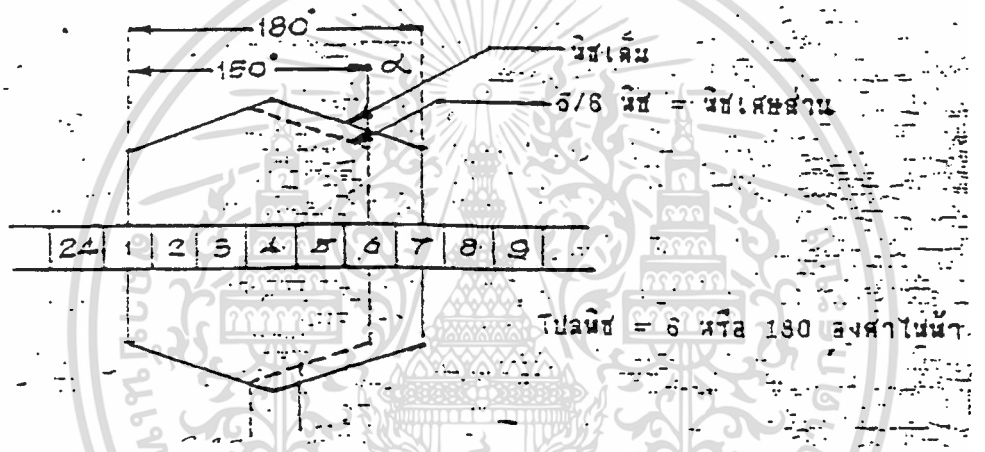
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.21 แสดงการพันขดลวดแบบ 2 ชั้น (double layer)

นอกจากนี้ การลงขดลวดยังแบ่งออกเป็น 2 แบบด้วยกันคือ แบบเต็มช่วง(full pitch) และแบบพิชเศษส่วน (fractional pitch) ซึ่งทั้งสองแบบมีความแตกต่างคือ

แบบเต็มช่วง (full pitch) คือ ระยะห่างระหว่าง coil side ทั้งสองของขดลวด (coil pitch) มีระยะห่างเท่ากับ 1 โปลพิชหรือเท่ากับ 180 องศาทางไฟฟ้า

แบบพิชเศษส่วน (fractional pitch) คือ ระยะห่างระหว่าง coil side ทั้งสองของขดลวดที่มีระยะห่างน้อยกว่า 1 โปลพิชหรือน้อยกว่า 180 องศาทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถดูความแตกต่างของแบบเต็มช่วงและแบบช่วงเศษส่วนได้จากรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงการวางขดลวดแบบเต็มช่วงและพิชเศษส่วน

ซึ่งการพันขดลวดแบบเศษส่วน (fractional pitch) นอกจากประหยัดขดลวดทองแดงกว่าแบบเต็มช่วง (full pitch) แล้ว รูปคลื่น (wave form) ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ (sine wave) มากที่สุด ลดการรบกวนจากฮาร์โมนิคลงได้เกือบหมด ซึ่งในทางปฏิบัติเราไม่สามารถผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เป็นรูปคลื่นไซน์ได้อย่างสมบูรณ์ แต่จะมีรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่อื่น ๆ เราไม่ต้องการแทรกซ้อนเข้ามาเราเรียกว่า ฮาร์โมนิค

ในวงจรหลายเฟสนั้น ที่ใช้กันมากจะเป็น 3 เฟสเท่านั้น เพราะสะดวกและประหยัดด้วย จากลักษณะที่มีหลายเฟสนั้น เราจะศึกษาเฉพาะ 3 เฟส ซึ่งสามารถดัดแปลงไปใช้กับเครื่องหลายเฟสได้

ในการพันขดลวด 3 เฟส ประกอบด้วยขดลวด 3 ชุดๆ ละเฟส ซึ่งลักษณะกายภาพจะแบ่งขดลวดออกเป็น 2π เรเดียน(ไฟฟ้า) หรือ $2/3$ ของระยะห่างของขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.13 แสดงแบบขดลวดที่มี 2 ตัวนำต่อเฟส เพื่อที่จะให้สะดวกจึงดัดแปลงขดลวดให้อยู่ในรูปที่ 4.14

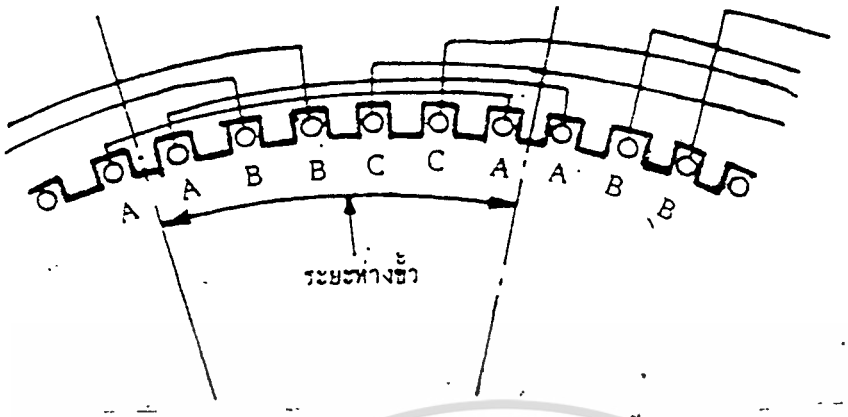
กระแสและทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก จะเกิดขึ้นเมื่อขดลวด ได้รับการกระตุ้นจากกระแส 3 เฟส ที่เท่ากัน ถ้าได้กำหนดช่วงเวลาที่แตกต่างกันในแต่ละเฟส ทำให้ลักษณะทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กร่วมเคลื่อนที่ไปโดยรอบขดลวด ดังรูปที่ 2.24 ส่วนคลื่นการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็ก (มักจะเรียกว่าสนามแม่เหล็กหมุน) จะเคลื่อนที่ไป 2 ระยะของขั้วในเวลาที่พอดีที่กระแสในแต่ละเฟสจนครบไซเคิล ลักษณะที่วิเคราะห์จะได้ว่า

(ก) เส้นแรงแม่เหล็กร่วมที่กระจายอยู่เป็นรูปไซน์ ถ้าเพียงแต่ว่าในขดลวดแต่ละเฟสมีเส้นแรงแม่เหล็กกระจายเป็นรูปไซน์และความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กกับกระแสเป็นสมการเชิงเส้นตรง

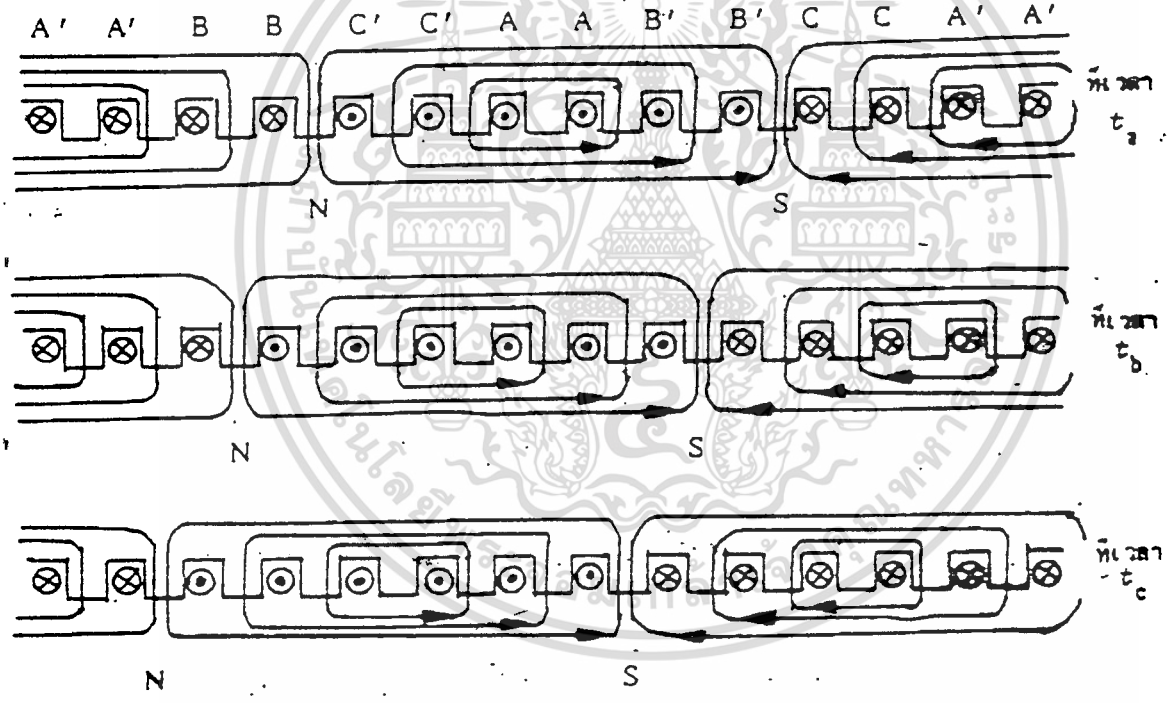
(ข) ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปโดยรอบขดลวดด้วยความเร็วคงที่เรียกว่า **ความเร็วซินโครนัส**

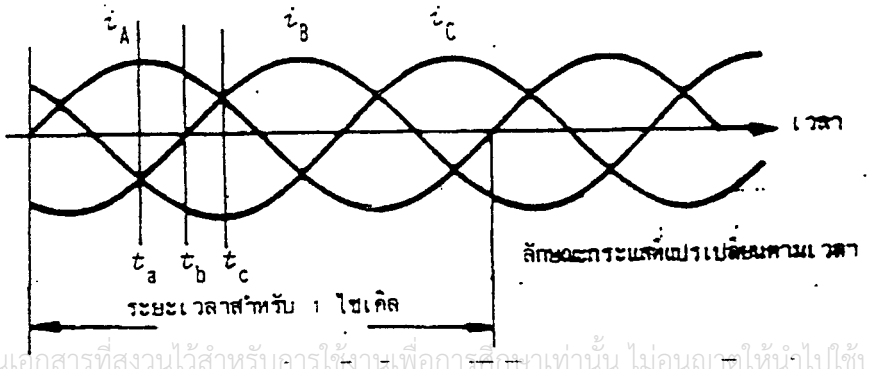
ในคลื่นที่เคลื่อนไปของเส้นแรงแม่เหล็กจะเกิดฮาร์โมนิกขึ้น ซึ่งจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่กระจายอยู่ไม่เป็นรูปไซน์ และฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่โดยรอบขดลวด บางฮาร์โมนิกก็เคลื่อนที่สวนทางกัน และจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สับ-ซินโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 แสดงการพันขดลวดแบบกระจายชั้นเดียว 3 เฟส





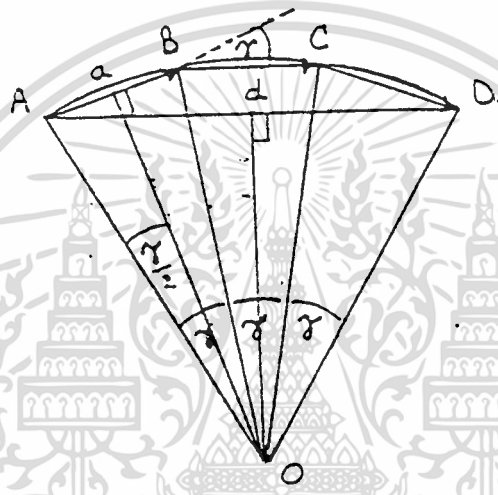
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.24 แสดงขดลวดหลายเฟส ซึ่งฟลักซ์แม่เหล็กเคลื่อนที่เปลี่ยนตามเวลา

2.7 Factor ของการพันขดลวด

2.7.1 ตัวประกอบการพันแบบกระจาย

กำหนดให้ เครื่องจักรไฟฟ้าของเรามี 3 ขดลวด เพราะฉะนั้น เราจะได้แต่ละขดลวด สร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำออกมาเท่ากัน นั่นคือแต่ละขดลวดซึ่งสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำออกมาแต่ละเวกเตอร์ เท่ากับมุม α เพราะมีจุดศูนย์กลางร่วมกันดังรูป 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงการหาค่าตัวประกอบการพันแบบกระจาย

AB คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวด a

BC คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวด b

CD คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวด c

แบ่งครึ่ง AB ที่ a ลาก oa เพราะฉะนั้น ao ตั้งฉากกับ ab

แบ่งครึ่ง AD ที่ e ลาก oe เพราะฉะนั้น oe ตั้งฉากกับ ad

$$\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{Aa}{Ao}$$

$$Ao = \frac{Aa}{\sin\frac{\alpha}{2}} \qquad \text{----------1}$$

$$\sin\frac{3\alpha}{2} = \frac{Ae}{Ao}$$

$$Ao = \frac{Ae}{\sin\frac{3\alpha}{2}} \qquad \text{----------2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ 1 = สมการที่ 2

$$\frac{Aa}{\sin\frac{\alpha}{2}} = \frac{Ae}{\sin\frac{3\alpha}{2}}$$

แต่ Aa $= \frac{1}{2}AB$

แต่ AE $= \frac{1}{2}AD$

$$AD = \frac{AB\sin(\frac{3\alpha}{2})}{\sin\frac{\alpha}{2}}$$

K_d = ผลรวมทางเวกเตอร์ / ผลรวมทางพีชคณิต

$$K_d = \frac{AD}{3\times(AB)} = \frac{SIN(\frac{3\alpha}{2})}{3\times SIN(\frac{\alpha}{2})}$$

ดังนั้น ค่าตัวประกอบการพันกระจายของขดลวด เมื่อเป็นมูลฐาน จะได้

$$K_d = \frac{SIN(\frac{\sigma}{2})}{\frac{\sigma}{\gamma}SIN\frac{\gamma}{2}} \qquad \text{----------2.64}$$

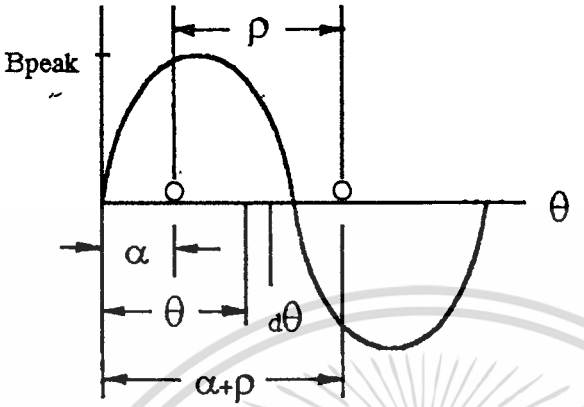
สำหรับ ฮาร์โมนิกอันดับ n

$$K_{d,n} = \frac{SIN(\frac{n\sigma}{2})}{\frac{\sigma}{\gamma}SIN(\frac{n\gamma}{2})} \qquad \text{----------2.65}$$

2.7.2 ตัวประกอบพิช(Pitch Factor)

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา เราจึงกำหนดให้ ขดลวดพันอยู่บนโรเตอร์ นั่นคือ ผลของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขดลวด เราจึงพิจารณาถึงเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลที่พันแบบเต็มช่วงและพิชเศษส่วนโดยพิจารณาจากรูปที่ 2.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 แสดงการหาค่าตัวประกอบพิช (kp)

เมื่อเรากำหนดให้

B_{peak}: เป็นค่าสูงสุดของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

l : เป็นความยาวตามขั้วแม่เหล็ก

r : เป็นรัศมีจากจุดศูนย์กลางของเครื่องจักรไฟฟ้าถึงช่องอากาศ

n : เป็นจำนวนรอบของขดลวด

λ : เป็นความกว้างของขดลวด มีค่าเท่ากับ $\frac{Y_s}{Y_p}\times\pi$

ดังนั้น $$d\lambda = N.B_{peak}SIN\theta(\frac{lrd\theta}{\frac{P}{2}})$$

ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล ที่คล้องขดลวด (λ)

$$\lambda = \int_{\alpha}^{\alpha+\rho} N.B_{peak}SIN\theta.lr\frac{2}{P}d\theta$$

$$=N.B_{peak}.lr\frac{2}{P}(COS\alpha - COS(\alpha+\rho)$$

แทนค่า α ด้วย ωt เมื่อเครื่องจักรไฟฟ้าหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω

$$\lambda = N*B_{peak}*Ir*\frac{2}{p}(\cos\omega t - \cos(\omega t+\rho))$$

จาก $\cos\omega t - \cos(\omega t+\rho) = 2\cos\frac{\pi-\rho}{2}*\cos(\omega t - \frac{\pi-\rho}{2})$

ดังนั้น $$\lambda = N*B_{peak}*Ir\frac{4}{p}\cos\frac{\pi-\rho}{2}\cos\left(\omega t - \frac{\pi-\rho}{2}\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e = \frac{d\lambda}{dt}$$

$$= -\omega * N * B_{peak} * lr * \frac{4}{p} \cos\frac{\pi-\rho}{2} \sin(\omega t - \frac{\pi-\rho}{2})$$

เมื่อ $$\phi = \int_0^{\pi} B_{peak} SIN\theta . lr \frac{2}{P} d\theta = B_{peak} . lr . \frac{4}{P}$$

$$e = -\omega * N * \phi \cos\frac{\pi-\rho}{2} \sin(\omega t - \frac{\pi-\rho}{2})$$

$$E_{rms} = \frac{\omega}{\sqrt{2}} * N * \phi \cos\frac{\pi-\rho}{2}$$

$$= 4.44.f.N.\phi.K_p$$

เมื่อ K_p : เป็นค่าตัวประกอบพิช

$$K_p = COS\frac{\pi-\rho}{2} = SIN\frac{\rho}{2} \qquad \text{----------2.66}$$

สำหรับฮาร์โมนิกของเส้นแรงแม่เหล็กอันดับที่ n

$$K_p = SIN\frac{n\rho}{2} \qquad \text{----------2.67}$$

2.7.3 ตัวประกอบการพัน

กำหนดให้ $K_w = K_d \times K_p$ ----------2.68

เมื่อ Kw : ตัวประกอบการพัน

Kd : ตัวประกอบการพันกระจาย

Kp : ตัวประกอบพิช

สัญญลักษณ์ที่ใช้ในการพันขดลวด

S : เป็นจำนวนสล็อททั้งหมด

C : เป็นจำนวนขดลวด

P : เป็นจำนวนขั้วแม่เหล็ก

r : $\frac{\pi \times p}{s}$: เป็นความกว้างของสล็อท

m : เป็นจำนวนเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

g : $\frac{s}{p}$: เป็นจำนวนสล๊อทต่อขั้ว(slot per pole)

g' : $\frac{s}{p \times m}$: เป็นจำนวนสล๊อทต่อเฟส (slot per phase)

σ : เป็นค่า spread of phase group (60 หรือ 120 องศาทางไฟฟ้า)

$\beta = \frac{2\pi}{m}$: เป็นมุมระหว่างเฟส

Yp : เป็นความกว้างของขั้วแม่เหล็ก

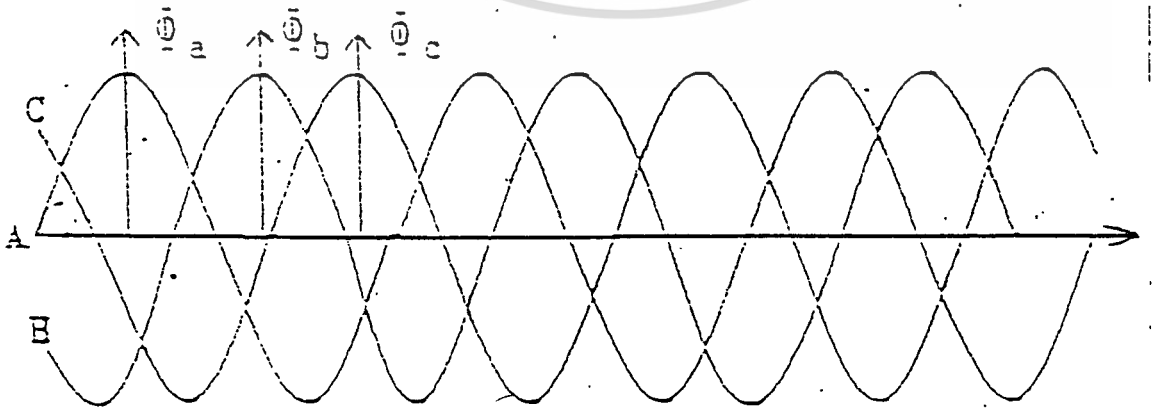
Ys : ต้องเป็นเลขจำนวนเต็ม

Ys = Yp ขดลวดเป็นแบบช่วงเต็ม

Ys < Yp ขดลวดเป็นแบบช่วงเศษส่วน

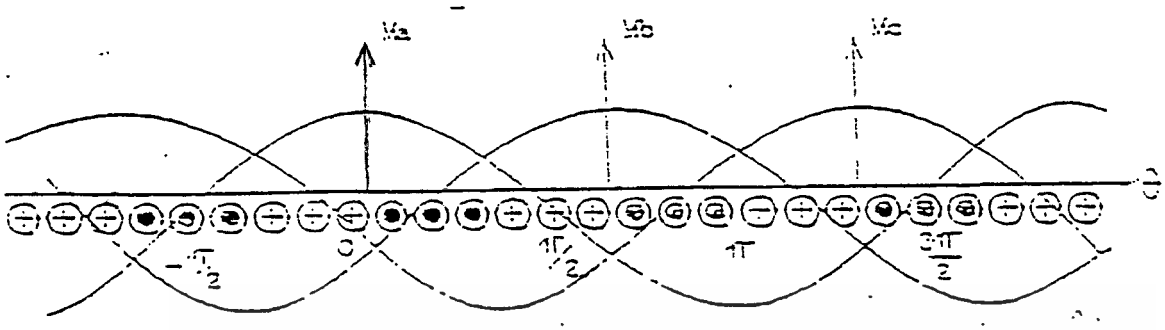
2.8 หลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ไป 1 เฟส

หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสไป 1 เฟส จะประกอบไปด้วยขดลวดทางปฐมภูมิ และขดลวดทางทุติยภูมิ โดยที่ขดลวดทางด้านปฐมภูมิ จะพันเป็นแบบ 3 เฟส (three-phase winding) และขดลวดทางด้านทุติยภูมิ จะพันเป็นแบบ 1 เฟส เมื่อเราป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเข้าไปยังขดลวดทางด้านปฐมภูมิ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ขึ้น ซึ่งสนามแม่เหล็กนี้จะมีลักษณะเหมือนกับสนามแม่เหล็กหมุนของซิงโครนัส ซึ่งสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ได้ไปคล้องกับขดลวดทางด้านทุติยภูมิ จะทำให้เกิดจากเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น ซึ่งจะได้แรงดันไฟฟ้า 1 เฟส ซึ่งเราสามารถดูได้จากรูป

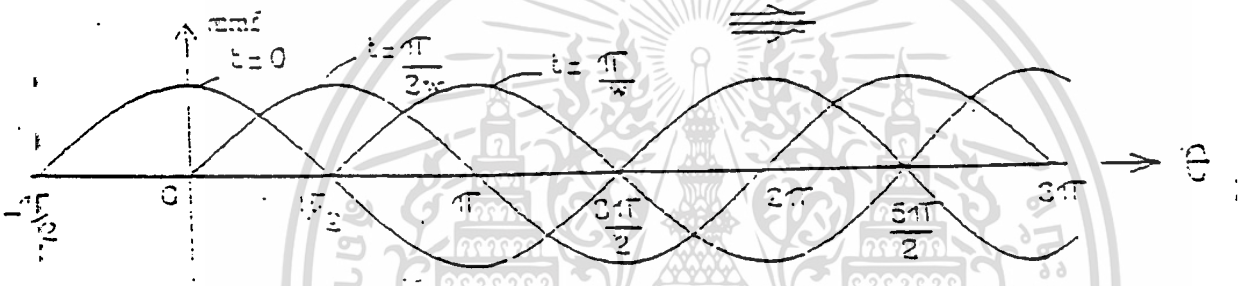


รูปที่ 2.27 แสดงรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 แสดงแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กเมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เข้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า



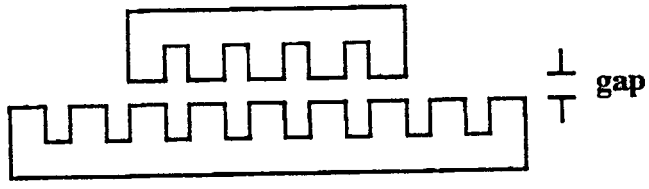
รูปที่ 2.29 แสดงแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่

ซึ่งเราสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิได้โดยปรับการเลื่อนของแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิ เพราะขดลวดถูกเส้นแรงแม่เหล็กคล้องน้อยลง ซึ่งทำให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิน้อยลงตามการปรับ ตามสมการ

$$E = 4.44 \times f \times N_{ph} \times \phi_p \times s.f \quad \text{----------2.69}$$

$$E = 4.44 \times f \times N_{ph} \times B \times A \times K_w \times s.f \quad \text{----------2.70}$$

ซึ่งสามารถดูได้จาก**รูปที่ 2.30**



รูปที่ 2.30 แสดงการปรับแรงดันไฟฟ้าทางทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.30 สาเหตุที่เพิ่มความยาวของแกนเหล็กทางด้านทุติยภูมิ เพราะถ้าความยาวของแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิ และทางด้านทุติยภูมิเท่ากันจะทำให้ปฏิกิริยาของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำระหว่างทั้ง 2 ส่วนหมดไป ซึ่งเราจะให้แกนเหล็กทางด้าน ปฐมภูมิเคลื่อนที่ ส่วนแกนเหล็กทางด้านทุติยภูมิจะอยู่กับที่ในการที่เพิ่มความยาวของแกนเหล็กขึ้นจะเกิดปรากฏการณ์บางอย่างในแกนเหล็กทางด้านทุติยภูมิ ซึ่งไม่ได้อยู่ในเขตปฏิกิริยา (Active zone) จะเกิดปรากฏการณ์ชั่วครู่ขึ้นที่ขอบของแกนเหล็กทางด้าน ปฐมภูมิซึ่งมีความยาวของแกนน้อยกว่า เรียกว่า ผลของขอบ(Edge Effect) โดยปรากฏการณ์นี้จะทำลายคุณสมบัติของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งก็คือกระแสทางด้านทุติยภูมิ จะทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานที่เกิดขึ้นบริเวณปฏิกิริยา (Active zone)

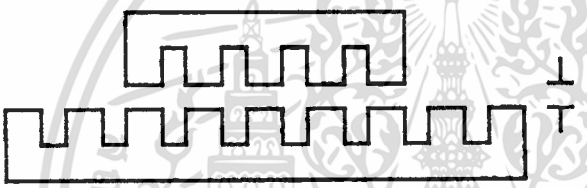
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า

3.1 การออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า

เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าที่เราออกแบบสร้างจะใช้หลักการของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส(syschronus machine) และหม้อแปลงไฟฟ้า(transformer) รวมกัน โดยทางด้านปฐมภูมิ เราจะมองเป็นเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส ส่วนทางทุติยภูมิ จะมองเป็น หม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นจากการหมุน mmf ของเครื่องจักรไฟฟ้าจะได้



$$\frac{3}{2}F_{max} = \phi \times \Re = H \times l = \frac{B}{\mu_0} \times 2g \qquad \text{----------3.1}$$

$$\frac{3}{2}N_{ph} = \frac{B}{\mu_0} \times 2g \qquad \text{----------3.2}$$

เมื่อ i = กระแสที่ไหลในขดลวด

N_{ph} = จำนวนรอบต่อเฟสมีจำนวน 90 รอบ

g = ช่องว่างในอากาศมีระยะห่างเท่ากับ 0.25 mm

B = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 0.7 เทสลา(tesla)

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$

$$i_p = \frac{4 \times g \times B}{3 \times N_{ph} \times \mu_0} \qquad \text{----------3.3}$$

$$i_p = \frac{4 \times 0.25 \times 10^{-3} \times 0.7}{3 \times 90 \times 4\pi \times 10^{-7}}$$

= 2.06 A (ใช้ลวดเบอร์ 19)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก

$$E_{ph} = 4.44 \times f \times N_{ph} \times B \times A \times K_w \times s.f$$

เมื่อ

$s.f = 0.8$

$K_w = 0.945$ (ได้มาจากการพันขดลวด)

$$\text{พื้นที่(A)} = \frac{220}{4.44 \times 50 \times 90 \times 0.7 \times 0.8 \times 0.945}$$

$$= 0.0218 \text{ m}^2$$

กำหนดการพันขดลวดเท่ากับ 3 สล๊อท ต่อขั้วต่อเฟส เมื่อจำนวนขั้ว เท่ากับ 2 ขั้ว

จำนวนร่องสลอท = 3 slot/pole/phase × 2 pole × 3 phase

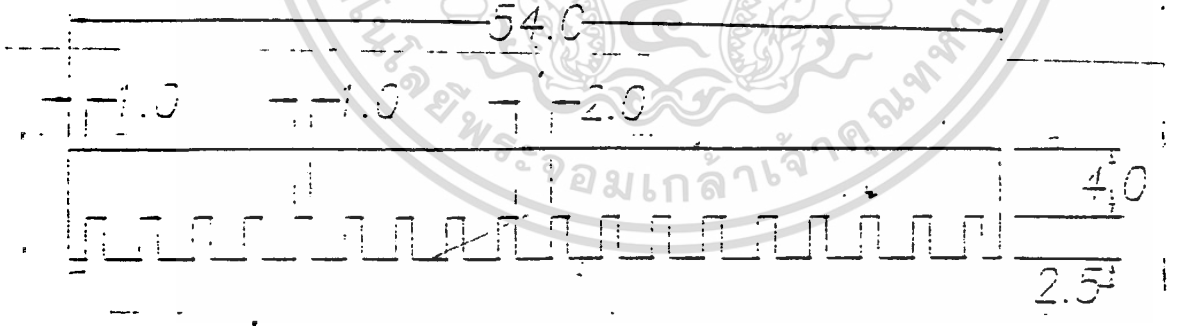
= 18 slot

กำหนดความกว้างของซี่ฟัน slot = 2 cm = 0.02 m

ความยาวขั้วแม่เหล็ก = 0.02×9 = 0.18 m (slot×phase = 3×3 = 9)

ความหนาของร่อง slot $= \frac{0.0218\text{m}^2}{0.18\text{m}} = 0.12$ m

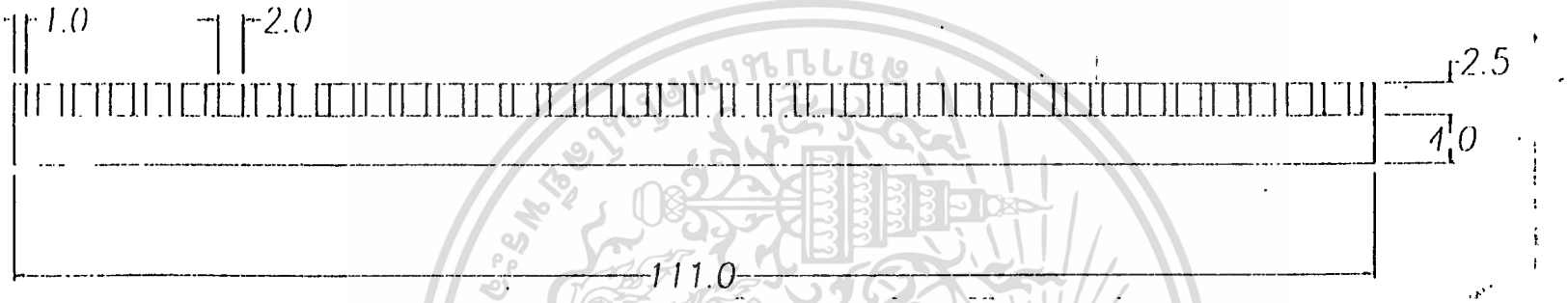
กำหนดความกว้างของร่อง slot วางห่างกัน 1 cm มีความลึก 2.5 cm ดังนั้น ลักษณะของแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิ จะได้ดังรูปที่ 3.1



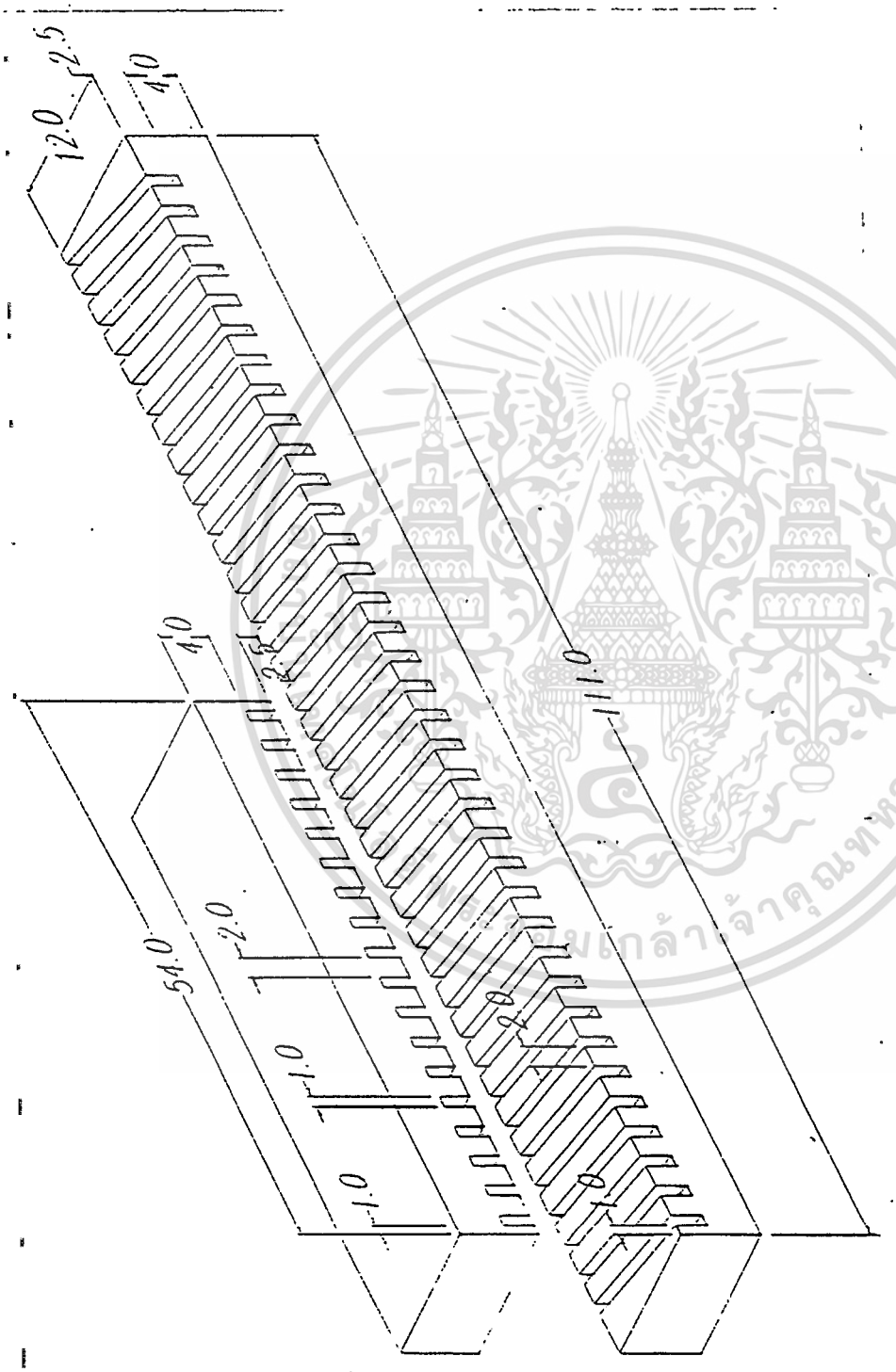
รูปที่ 3.1 แสดงรูปร่างลักษณะของแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิ

สำหรับระยะท้ายของแกนเหล็ก 4 cm ได้มาจากเมื่อ ϕ คือ ค่า ๆ เดียวกัน เพราะความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กคงที่ พื้นที่ของแกนเหล็กก็จะเท่ากัน ที่ความหนาร่อง slot เท่ากับ 12 cm สำหรับความลึกที่เพิ่มขึ้นอีก 2 cm เพิ่มเพื่อใช้ในการร้อยน็อตยึดแกนเหล็ก สำหรับรูปร่างลักษณะของแกนเหล็กทางด้านทุติยภูมินั้น จะเหมือนกับแกนเหล็กทางด้านปฐมภูมิ เพียงแต่มีความยาวของร่องสล๊อท เท่ากับ 36 สลอท ดังนั้น จึงมีลักษณะดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงรูปร่างลักษณะของแกนเหล็กทางด้านทุติยภูมิ



รูปที่ 3.3 แสดงรูปร่างลักษณะของ 3 เฟสไป 1 เฟส สำหรับหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 คำนวณแฟคเตอร์ของการพันขดลวด

ทางด้านปฐมภูมิเราจะพันขดลวดแบบช่วงเศษส่วน , 18 slot, 2 slot โดยมี coil span (ys) = 8 slot โดยมี spread of phase group = 60 องศาทางไฟฟ้า

$$g = \text{slot/pole} = \frac{18}{2} = 9 \text{ slot/pole}$$

$$g' = \text{slot/pole/phase} = \frac{18}{2\times 3} = 3 \text{ slot/pole/phase}$$

$$\gamma = \frac{180}{9} = 20 \text{ องศาทางไฟฟ้า}$$

$$\rho = 180\times\frac{Y_s}{Y_p} = 180\times\frac{8}{9} = 160 \text{ องศาทางไฟฟ้า}$$

$$K_d = \frac{SIN(\frac{\sigma}{2})}{\frac{\sigma}{\gamma}SIN(\frac{\gamma}{2})}$$

$$= \frac{SIN(\frac{60}{2})}{\frac{60}{20}SIN(\frac{20}{2})}$$

$$= 0.96$$

$$K_P = SIN\frac{\rho}{2} = SIN\frac{160}{2} = 0.985$$

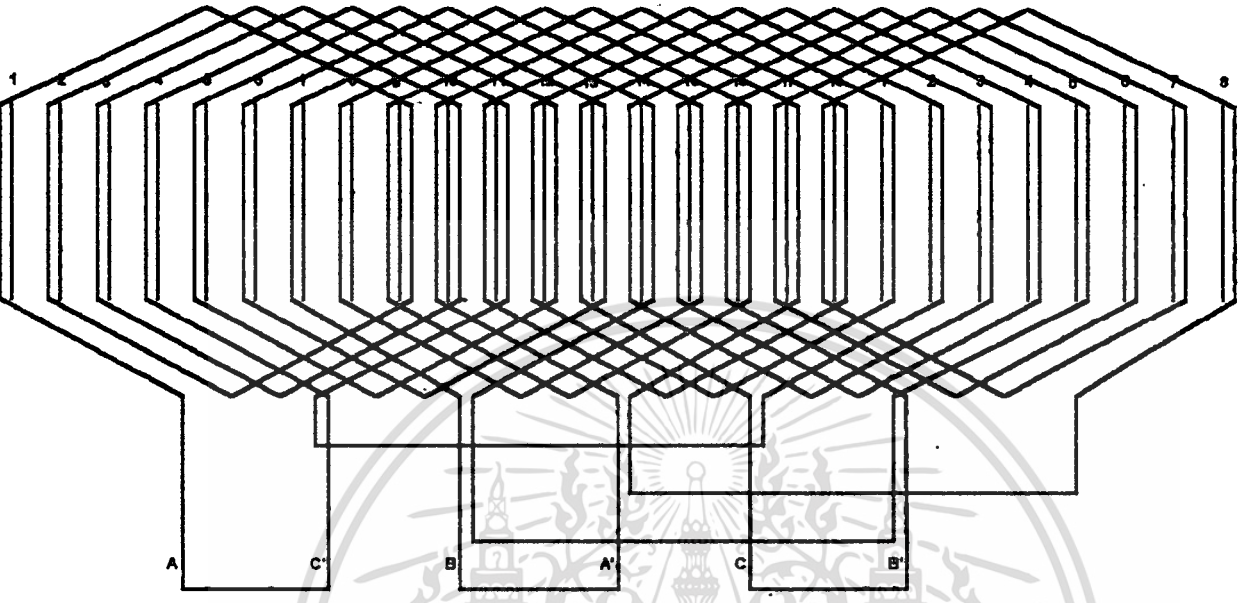
$$K_W = K_P \times K_d = 0.6\times 0.985 = 0.945$$

การพันขดลวด

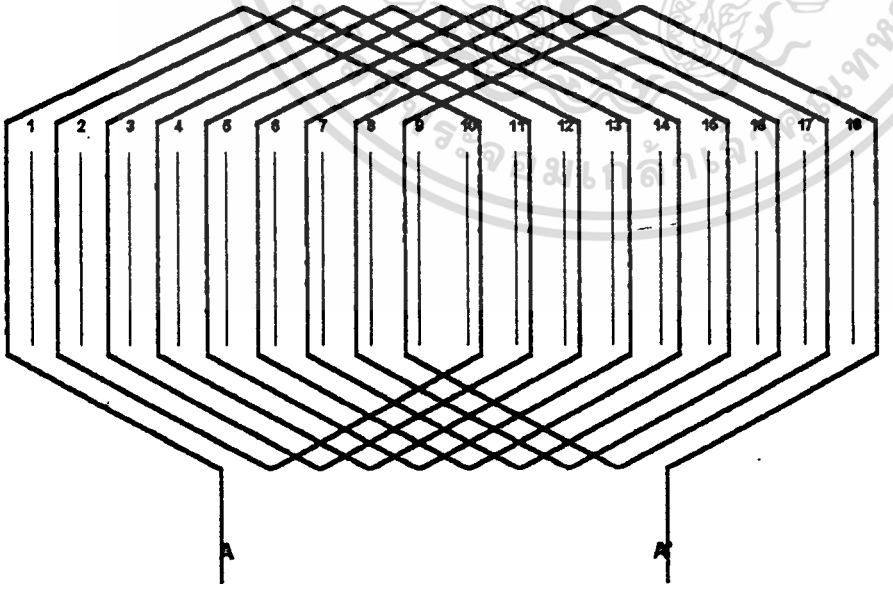
ทางด้านปฐมภูมิเราจะพันแบบ 3 เฟส โดยจะวางขดลวดแบบช่วงเศษส่วน

ส่วนด้านทุติยภูมิเราจะพันแบบ 1 เฟส ดังรูปที่ 3.4 และ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 แสดงการพันขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

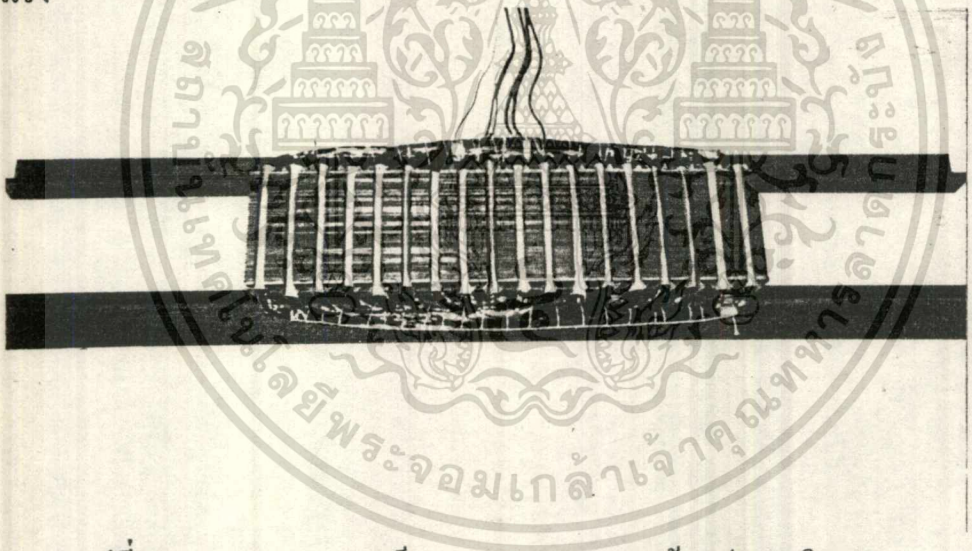


รูปที่ 3.33 แสดงการพันขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การลงขดลวดในร่องสล๊อท

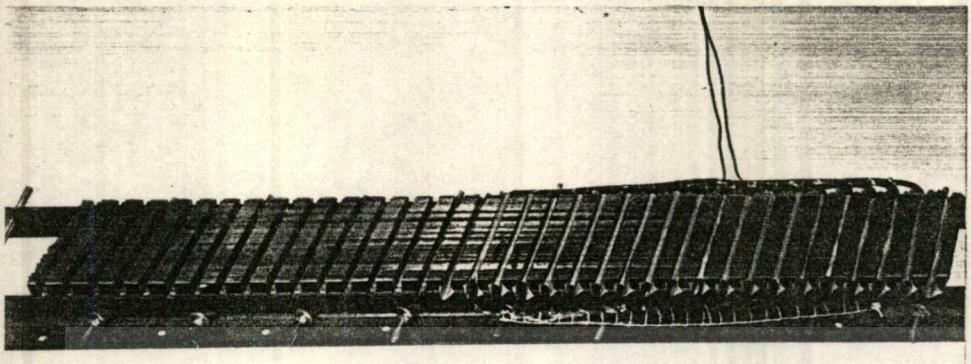
การพันขดลวดด้านปฐมภูมิ เริ่มจากการทำฟอร์มคอยล์ (FORM COIL) ให้ได้ระยะห่างและความกว้างของร่องสล๊อทที่จะลงขดลวดในแต่ละชุดให้ดูเรียบร้อยและสวยงาม จากนั้นทำการพันขดลวดให้ได้จำนวนรอบตามที่คำนวณไว้ คือ 17 รอบเสร็จแล้วนำขดลวดออกจากฟอร์มคอยล์มาบรรจุลงในร่องสลอทที่มีการรองกระดาษฉนวนเพื่อเป็นการป้องกันขดลวดสัมผัสกับแกนเหล็กซึ่งอาจทำให้ฉนวนที่เคลือบขดลวดเสียหายได้ เมื่อลงขดลวดทั้ง 3 เฟส จึงทำการต่อขั้วขดลวดซึ่งต้องคำนึงถึงทิศทางการพันขดลวดด้วย ดังในรูปแสดงการพันขดลวด ลวดตัวนำที่ยาวเกินร่องสลอทออกมาจะต้องทำการรองกระดาษฉนวนระหว่างเฟสด้วยเพื่อป้องกันการลัดวงจร จากนั้นทำการผูกเชือกให้เรียบร้อยเพื่อความสวยงามและความแข็งแรง



รูปที่ 3.4 แสดงแกนเหล็กและการลงขดลวดด้านปฐมภูมิ

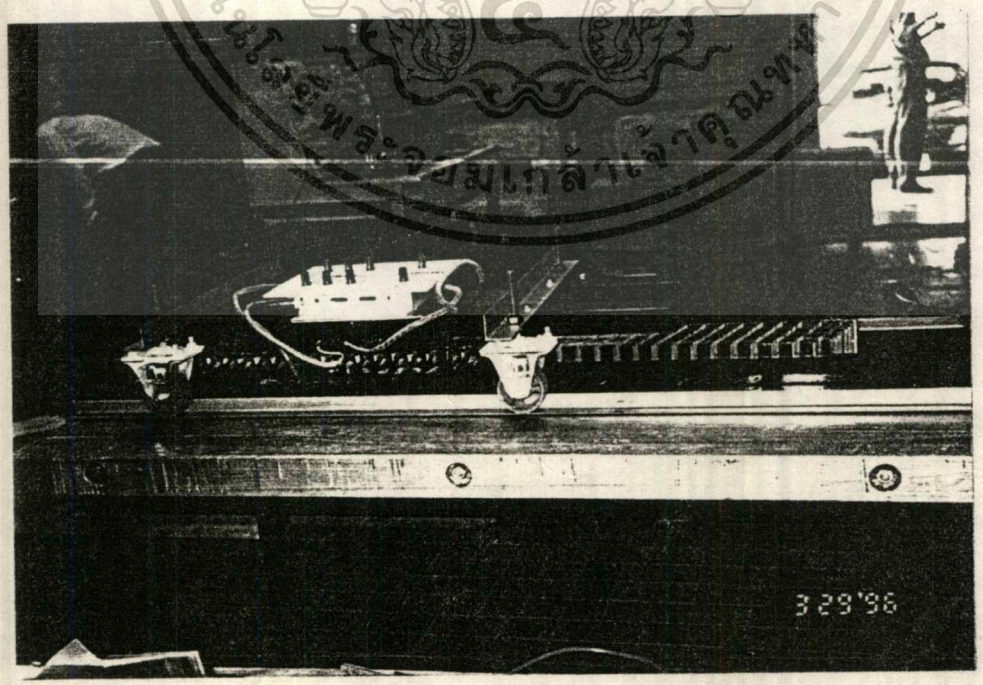
สำหรับการพันขดลวดด้านทุติยภูมิก็จะมีขั้นตอนเหมือนกับด้านปฐมภูมิจะแตกต่างกันที่ขดลวดด้านทุติยภูมิจะมีการพันขดลวดแบบ 1 เฟสเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงแกนเหล็กและการลงขดลวดด้านทุติยภูมิ

จากรูปแบบการพันขดลวดด้านทุติยภูมิเห็นได้ว่าจะลงขดลวดเพียงครึ่งเดียวของร่องสล๊อททั้งหมด (36 สล๊อท) ทั้งนี้เพื่อประโยชน์เมื่อทำการปรับแรงดันไฟออกทางด้านทุติยภูมิการเลื่อนแกนเหล็กด้านปฐมภูมิไปทางด้านขวามือก็จะทำให้แรงดันไฟออกลดลงแต่ช่องอากาศระหว่างแกนเหล็กด้านปฐมภูมิกับด้านทุติยภูมิก็จะคงที่ตลอด ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงตำแหน่งการวางแกนเหล็กปฐมภูมิและทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลองเพื่อหา กราฟแสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กหม้อแปลงไฟฟ้า

จุดประสงค์

เพื่อทดสอบหาพิกัดขอหม้อแปลงไฟฟ้า

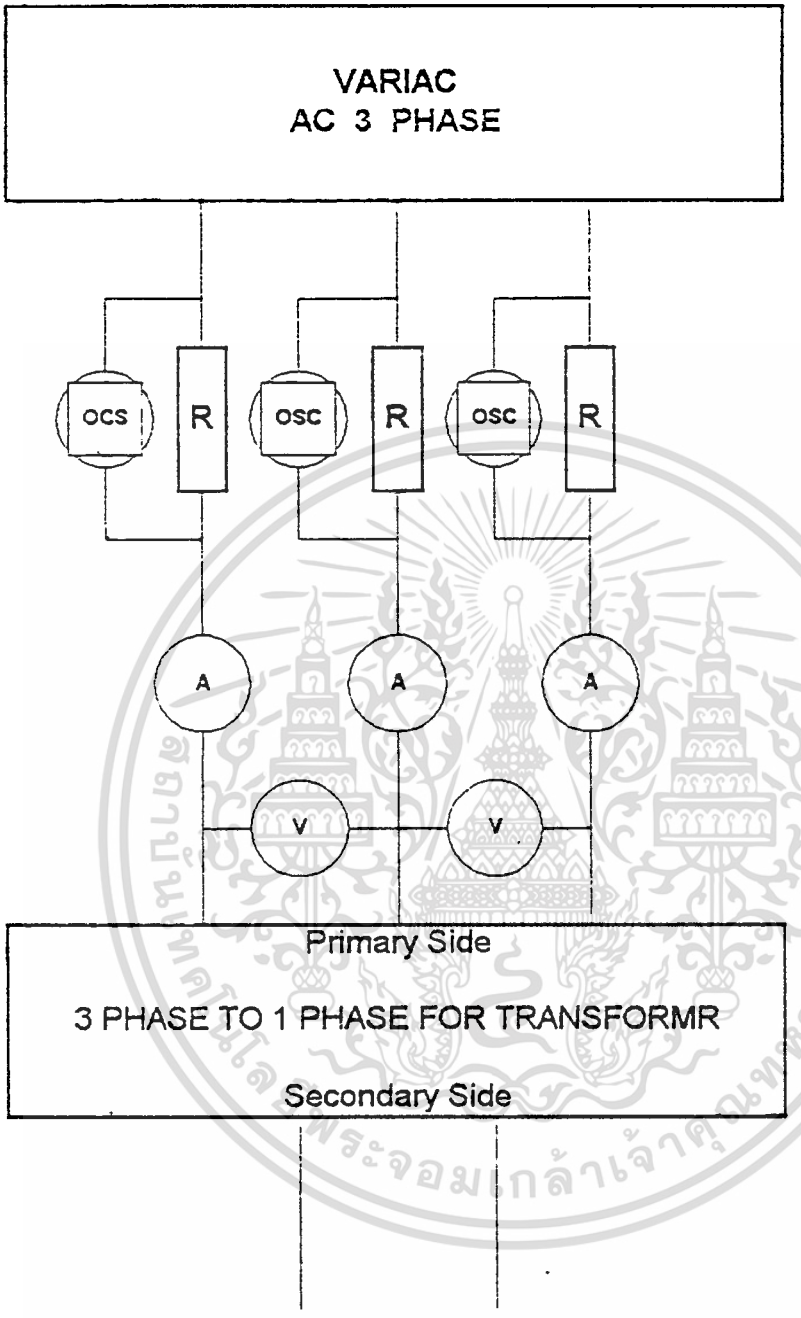
อุปกรณ์การทดลอง

1. เอ.ซี-โวลท์มิเตอร์
2. เอ.ซี แอมป์มิเตอร์
3. ออสซิลโลสโคป
4. ตัวความต้านทาน 0.05 โอห์ม , 10 วัตต์
5. วาริแอก 1 เฟส
6. จุดต่อสาย
7. สายไฟ

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการต่อวงจรตามรูป
2. ปรับแรงดันที่ วาริแอก เป็นขั้นๆละ 10 โวลต์ ทำการบันทึกค่ากระแสและแรงดัน
3. ปรับแรงดันจนสังเกตว่ากระแสเพิ่มสูงผิดปกติ
4. หลังจากที่ทำการทดลองแล้ว นำผลที่ได้ไปวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



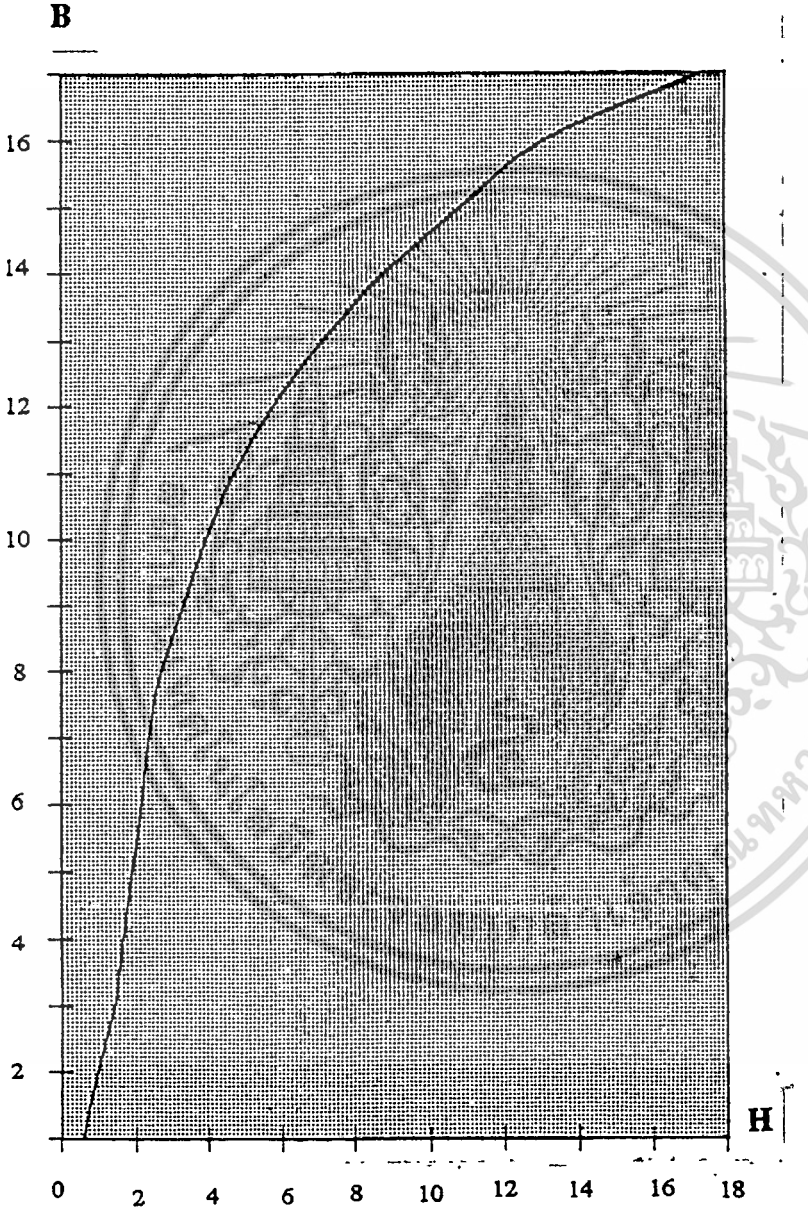
รูปวงจรการทดลองที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PRIMERY DATA			
VOLTAGE (V)	CURRENT (A)		
	A	B	C
20	0.4	0.57	0.3
40	0.8	0.95	0.62
60	1.1	1.4	0.95
80	1.35	1.65	1.15
100	1.6	1.9	1.35
120	1.85	2.15	1.55
140	2.09	2.35	1.8
160	2.3	2.7	2.1
180	2.62	3.3	2.4
200	3.05	3.9	2.8
220	3.6	4.7	3.3
240	4.25	5.75	4
260	5.3	7.1	4.8
280	6.6	8.76	5.85
300	8	10.8	7.3
320	10.2	13.1	9
340	13	17.3	10.8

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดลองจ่ายโหลด R, L, C,

จุดประสงค์

1. เพื่อทำการหาประสิทธิภาพ และ โวลท์เตจเลกกูเลชั่น (Voltage Regulation) ของหม้อแปลงไฟฟ้า
2. เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของกระแสกระตุ้น

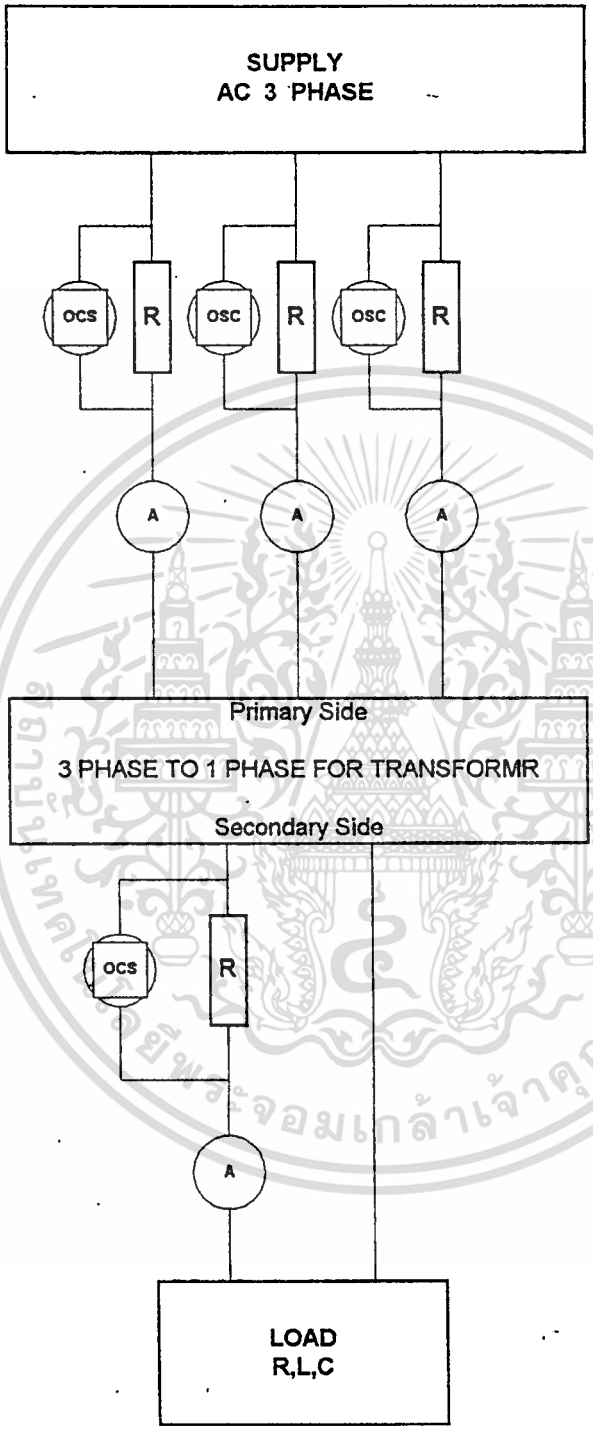
อุปกรณ์การทดลอง

1. เอ.ซี โวลท์มิเตอร์
2. เอ.ซี แอมป์มิเตอร์
3. ออสซิลโลสโคป
4. ตัวความต้านทาน 0.05 โอห์ม, 10 วัตต์
5. จุดต่อสาย
6. ภาระไฟฟ้า R,L,C
7. สายไฟ

การขั้นตอนทดลอง

1. ทำการต่อวงจรตามรูปวงจรการทดลองที่
2. ป้อนไฟฟ้า 3 เฟส ให้ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแล้วทำการจ่ายภาระไฟฟ้า (R,L,C) ทีละขั้นตามตาราง ทำการบันทึก ค่ากระแส,แรงดันไฟฟ้า,เพาเวอร์แฟคเตอร์, คำนวณหาค่าประสิทธิภาพ และ โวลท์เตจเรกกูเลชั่น
3. นำค่าที่ได้จากการทดลองไปวาดกราฟหาความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

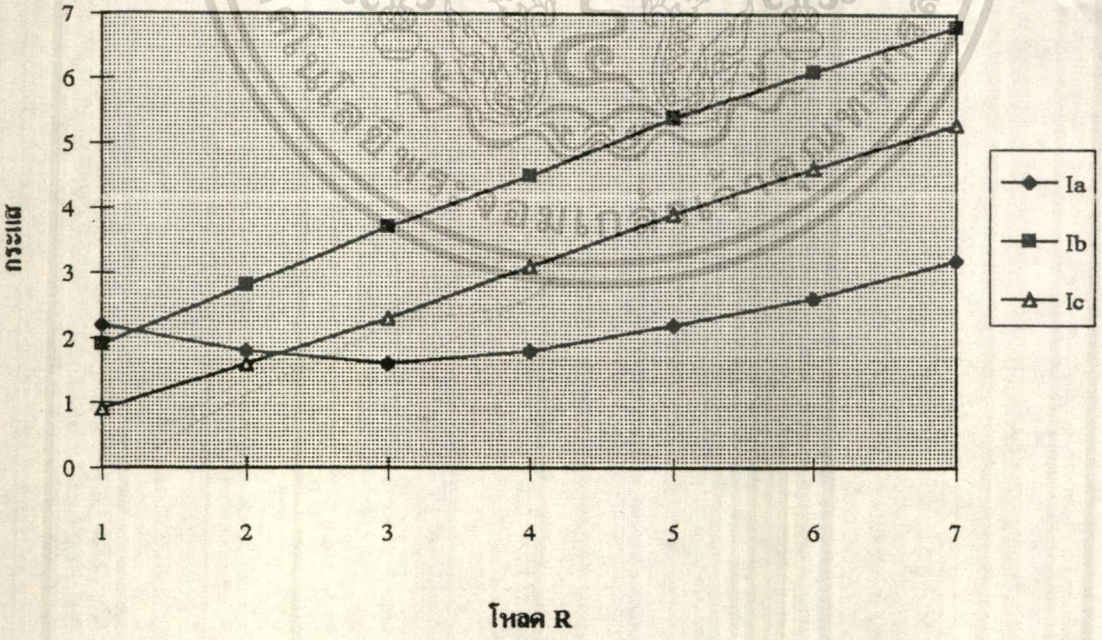


รูปวงจรการทดลองที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

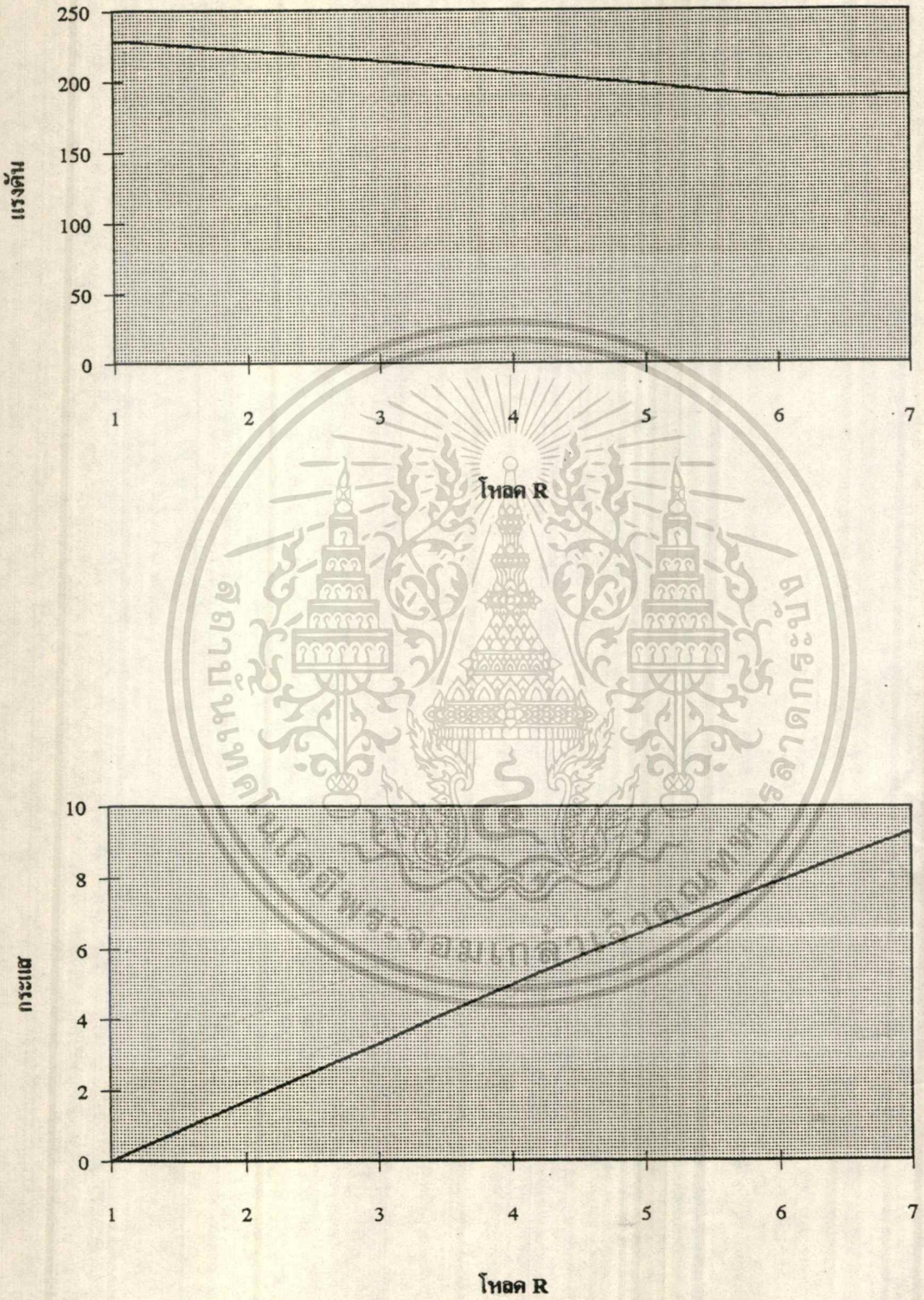
STAR CONECTED	LOAD R (W)	PRIMERY I A	PRIMERY I B	PRIMERY I C	PRIMERY P.F A	PRIMERY P.F B	PRIMERY P.F C	SECONDARY V	SECONDARY I	SECONDARY P.F	%Vreg	% η
NO-LOAD	-	2.2	1.9	0.9	0.3	0.3	0.3	299	0	-	-	-
ON-LOAD	200	1.8	2.8	1.6	0.58	0.45	0.89	222	1.7	1	3.1	46
	400	1.6	3.7	2.3	0.89	0.45	0.89	214	3.3	1	7	62.5
	600	1.8	4.5	3.1	0.95	0.45	0.89	206	5	1	11.1	72.1
	800	2.2	5.4	3.9	1	0.3	0.89	198	6.5	1	15.6	80.2
	1000	2.6	6.1	4.6	1	0.45	0.89	189	7.9	1	21.1	71.9
	1200	3.2	6.8	5.3	0.99	0.45	0.89	189	9.3	1	27.2	69.5

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.2.1



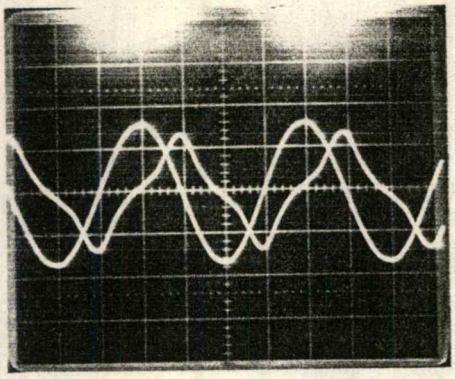
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสทางด้านปฐมภูมิ ขณะจ่ายโหลด R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ทางด้านทฤติยภูมิขณะจ่ายโหลด R

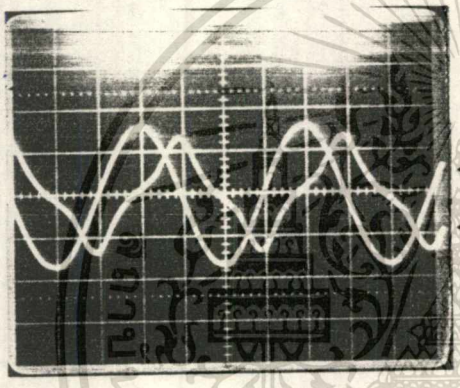
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TIME/DIV 5 mS

← แรงดัน VOLT/DIV 10 V

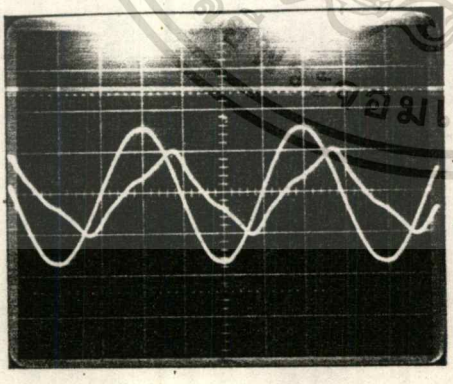
← กระแส VOLT/DIV 20 mV



TIME/DIV 5 mS

← แรงดัน VOLT/DIV 10 V

← กระแส VOLT/DIV 20 mV



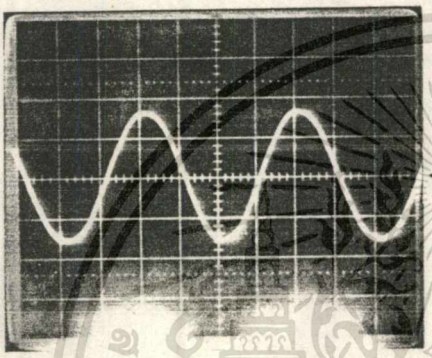
TIME/DIV 5 mS

← แรงดัน VOLT/DIV 10 V

← กระแส VOLT/DIV 20 mV

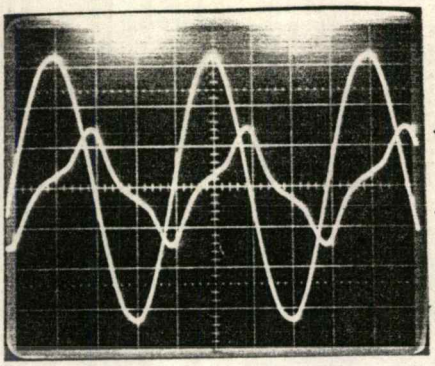
รูปที่ 4.6 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันทางด้านปฐมภูมิ ขณะไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงรูปคลื่นแรงดันทางด้านทุติยภูมิขณะไม่มีโหลด

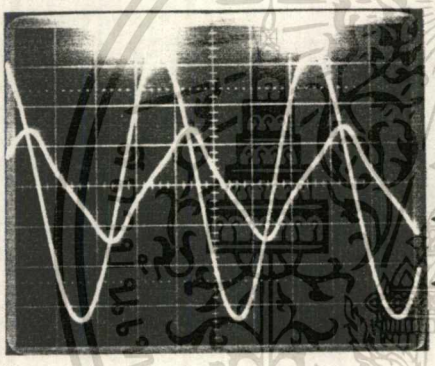
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TIME/DIV 5 mS

← กระแส VOLT/DIV 20 mV

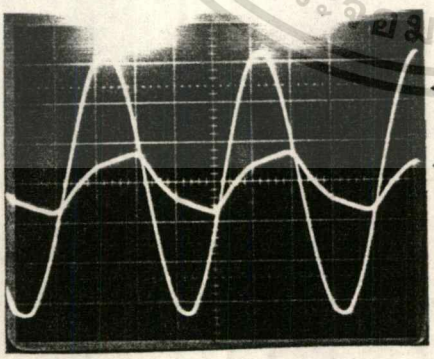
← แรงดัน VOLT/DIV 10 V



TIME/DIV 5 mS

← กระแส VOLT/DIV 20 mV

← แรงดัน VOLT/DIV 10 V



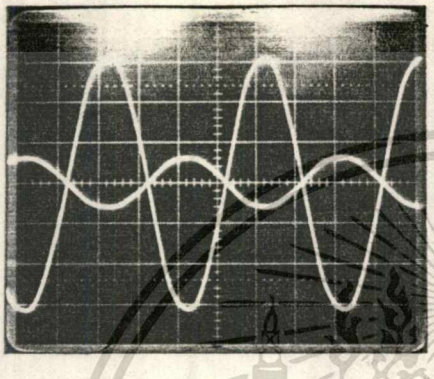
TIME/DIV 5 mS

← แรงดัน VOLT/DIV 10 V

← กระแส VOLT/DIV 20 mV

รูปที่ 4.8 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันทางด้านปฐมภูมิ ขณะจ่ายโหลด R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

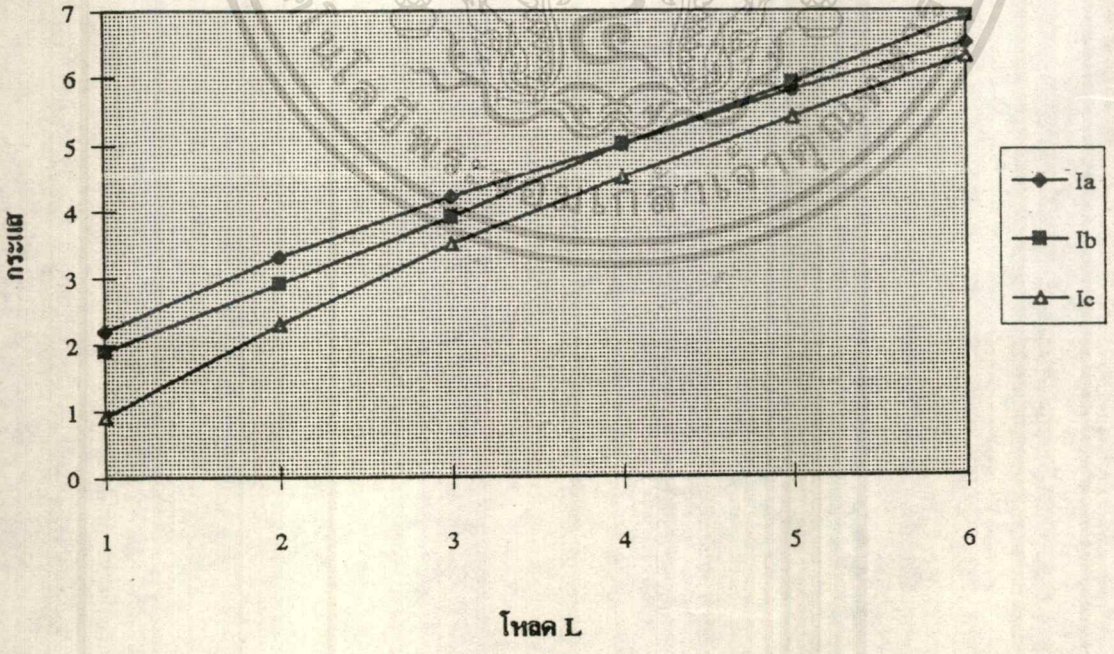


รูปที่ 4.9 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันทางด้านทุติยภูมิ ขณะจ่ายโหลด R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

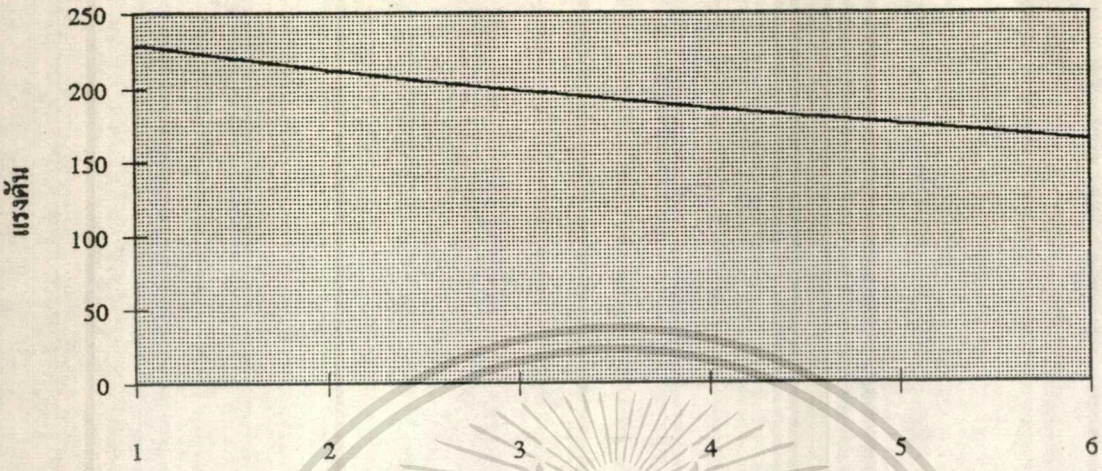
STAR CONECTED	LOAD L (STEP)	PRIMERY I A	PRIMERY I B	PRIMERY I C	PRIMERY P.F A	PRIMERY P.F B	PRIMERY P.F C	SECONDARY V	SECONDARY I	SECONDARY P.F	%Vreg	% η
NO-LOAD	0	2.2	1.9	0.9	0.3	0.3	0.3	229	0	-	-	-
ON-LOAD	1	3.3	2.9	2.3	0.58	-0.15	0.15	212	2.7	0.15	8	14.4
	2	4.2	3.9	3.5	0.707	-0.3	0.3	198	5	0.15	15.6	13
	3	5	5	4.5	0.79	-0.3	0.3	186	6.9	0.12	23.1	10.29
	4	5.8	5.9	5.4	0.8	-0.3	0.3	175	8.8	0.09	30.8	7.8
	5	6.5	6.9	6.3	0.82	-0.3	0.3	164	10.5	0.09	39.6	7.58

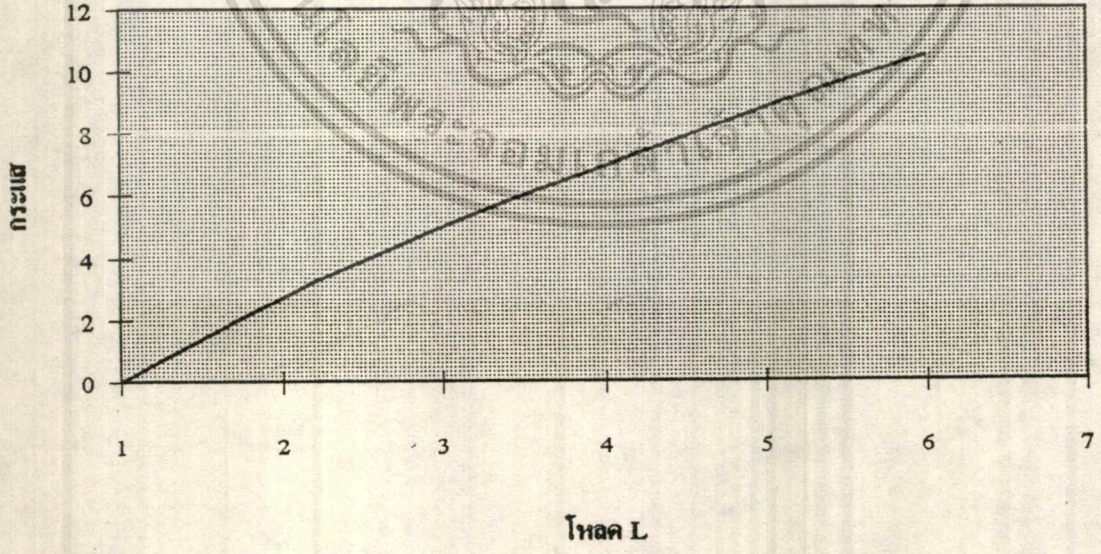
ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.2.2



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสทางด้านปฐมภูมิขณะจ่ายโหลด L

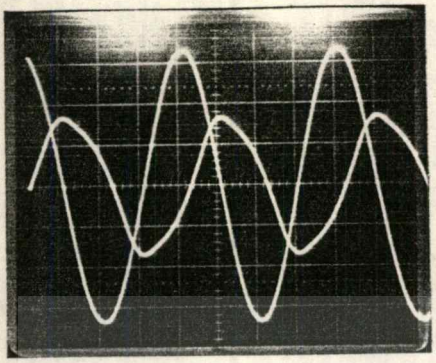
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันทางด้าน ทุติยภูมิขณะจ่ายโหลด L

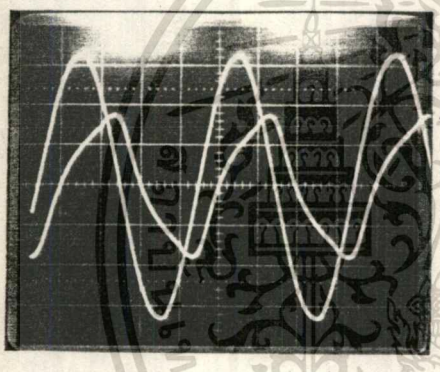
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TIME/DIV 5 mS

← กระแส VOLT/DIV 20 mV

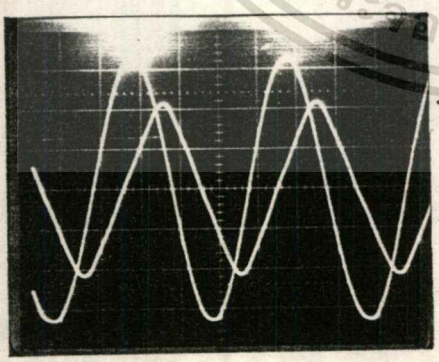
← แรงดัน VOLT/DIV 10 V



TIME/DIV 5 mS

← กระแส VOLT/DIV 20 mV

← แรงดัน VOLT/DIV 10 V



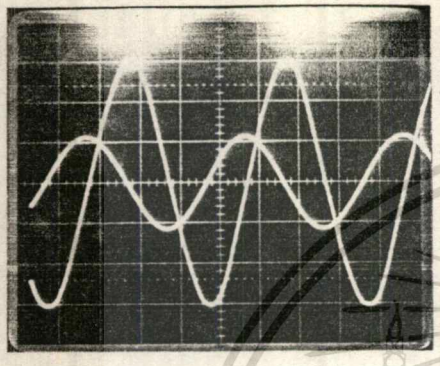
TIME/DIV 5 mS

← แรงดัน VOLT/DIV 10 V

← กระแส VOLT/DIV 20 mV

รูปที่ 4.12 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันทางด้านปฐมภูมิ ขณะจ่ายโหลด L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

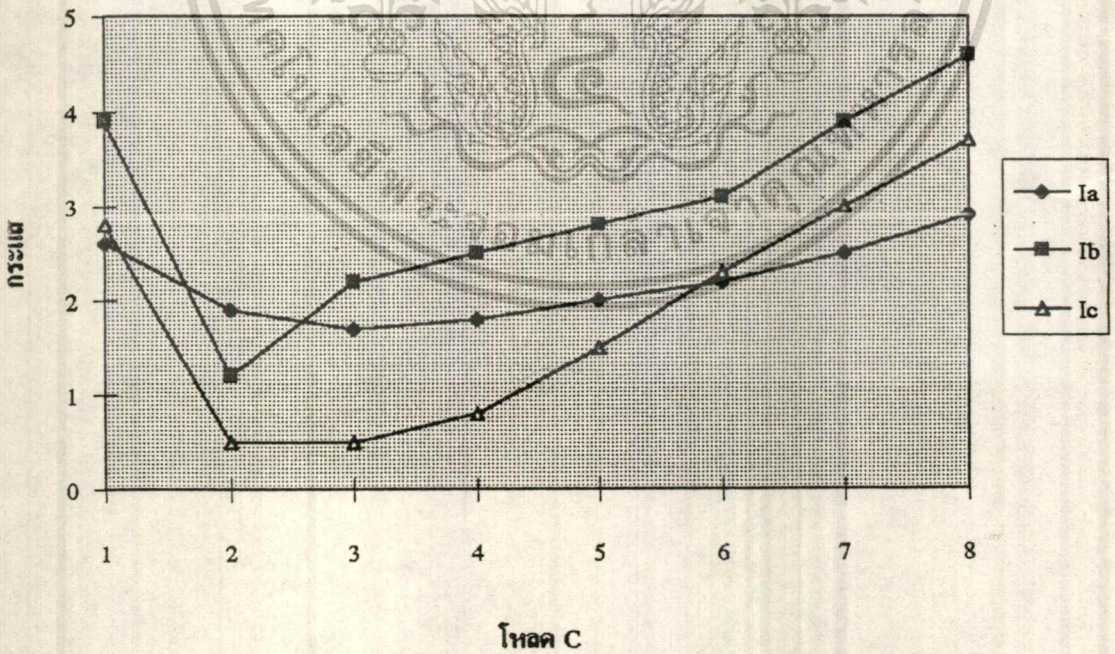


รูปที่ 4.13 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันทางด้านทุติยภูมิ ขณะจ่ายโหลด L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

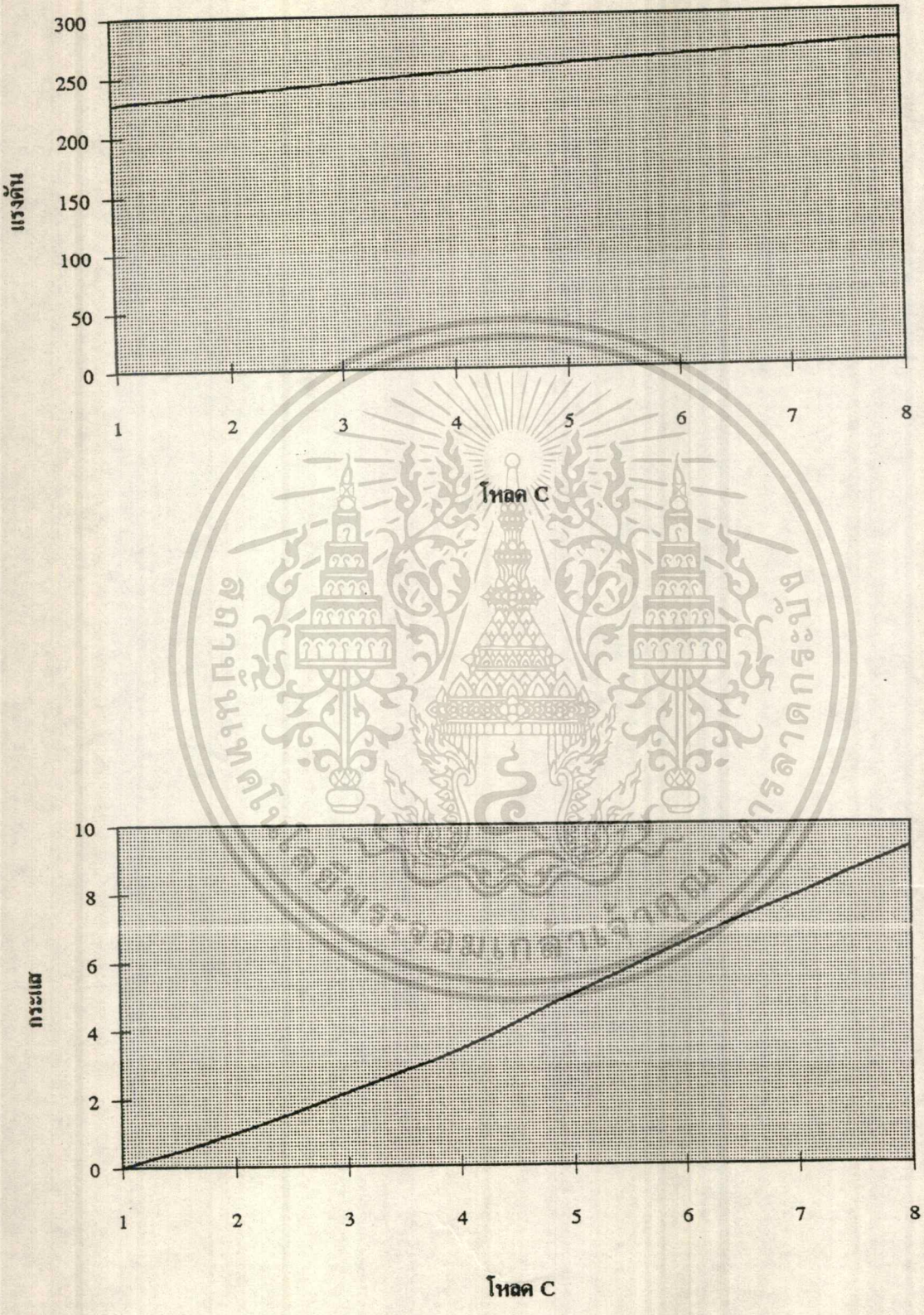
STAR CONECTED	LOAD C (STEP)	PRIMERY I A	PRIMERY I B	PRIMERY I C	PRIMERY P.F A	PRIMERY P.F B	PRIMERY P.F C	SECONDARY V	SECONDARY I	SECONDARY P.F	%Vreg	% η
NO-LOAD	0	2.6	3.9	2.8	0.45	0.3	0.3	227	0	–	–	–
ON-LOAD	1	1.9	1.2	0.5	0	0.58	0.95	236	1	0	-3.8	0
	2	1.7	2.2	0.5	0.45	0.89	0.98	244	2.2	0	-6.9	0
	3	1.8	2.5	0.8	0.707	0.89	0.89	252	3.4	-0.3	-9.9	27.7
	4	2	2.8	1.5	0.8	0.89	0.58	258	5	-0.3	-12	35.45
	5	2.2	3.1	2.3	0.89	0.89	0	264	6.5	-0.3	-14	49.6
	6	2.5	3.9	3	0.99	0.99	0	270	7.9	-0.3	-15.9	45.9
	7	2.9	4.6	3.7	0.98	1	0	276	9.3	-0.15	-17.7	23.5

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.2.3



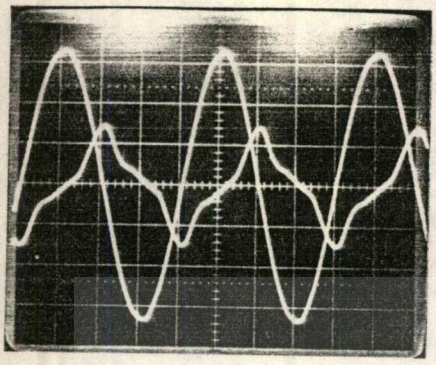
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสทางด้านปฐมภูมิ ขณะจ่ายโหลด C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ทางด้านทุติยภูมิขณะจ่ายโหลด C

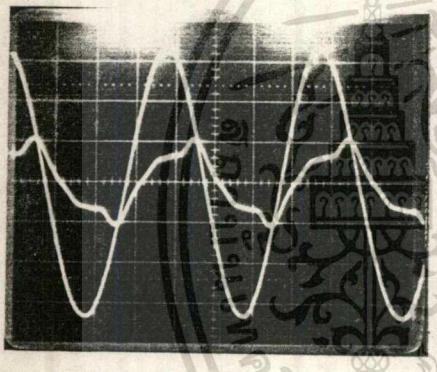
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TIME/DIV 5 mS

← กระแส VOLT/DIV 20 mV

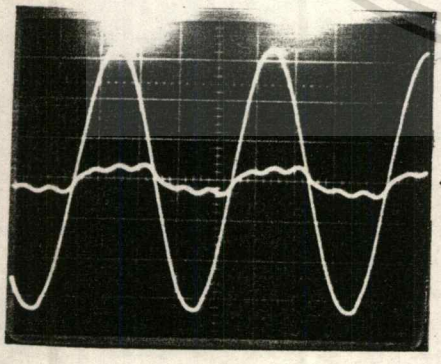
← แรงดัน VOLT/DIV 10 V



TIME/DIV 5 mS

← กระแส VOLT/DIV 20 mV

← แรงดัน VOLT/DIV 10 V



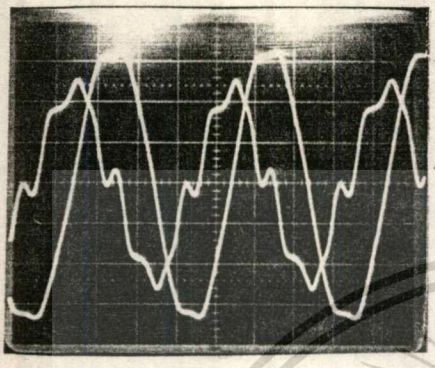
TIME/DIV 5 mS

← แรงดัน VOLT/DIV 10 V

← กระแส VOLT/DIV 20 mV

รูปที่ 4.16 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันทางด้านปฐมภูมิ ขณะจ่ายโหลด C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันทางด้านทุติยภูมิ ขณะจ่ายโหลด C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ทดลองปรับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ

จุดประสงค์

1. เพื่อดูความต่อเนื่องของการปรับแรงดันด้านทุติยภูมิ
2. เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของกระแสกระตุ้น

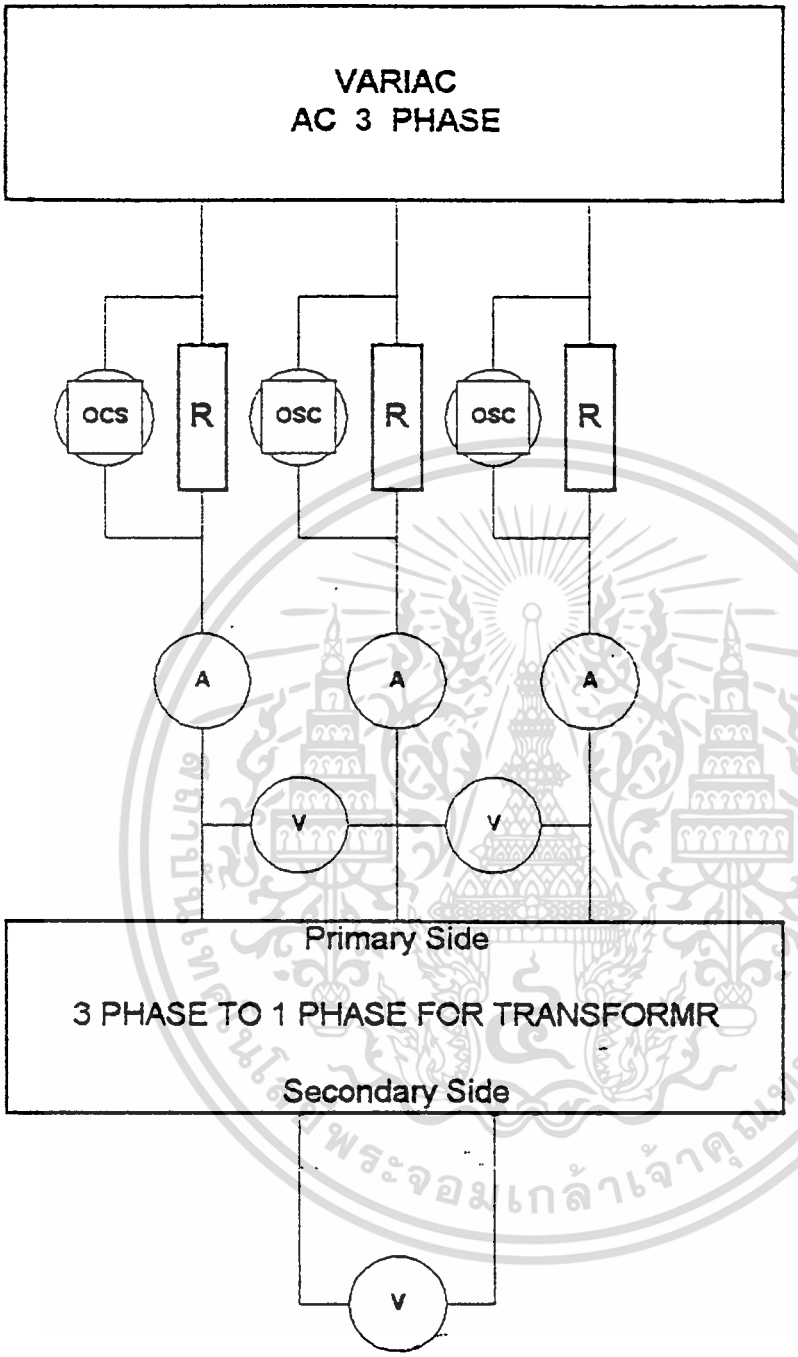
อุปกรณ์การทดลอง

1. เอ.ซี โวลท์มิเตอร์
2. เอ.ซี แอมป์มิเตอร์
3. ออสซิลโลสโคป
4. ตัวต้านทาง 0.05 โอห์ม,10 วัตต์
5. จุดต่อสาย
6. สายไฟ

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการต่อวงจรตามรูปการทดลองที่ 4.3
2. ทำการเลื่อนแกนเหล็กด้านปฐมภูมิทีละขั้นๆละ 1 สล็อท บันทึกค่า กระแส, เพาเวอร์แฟกเตอร์,และ แรงดันด้านทุติยภูมิ
3. นำค่าที่ได้ไปวาดกราฟแสดงการปรับแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



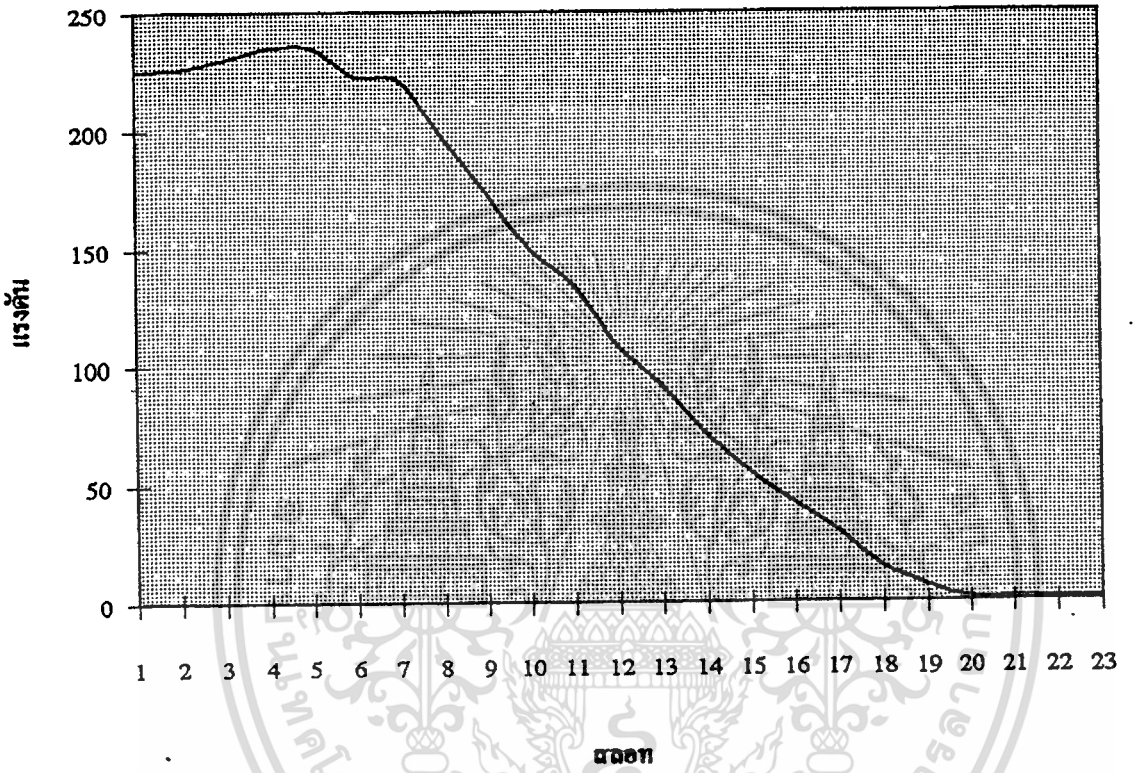
รูปวงจรการทดลองที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SLIDE (SLOT)	PRIMERY CURRENT			POWER FACTOR			SECONDARY VOLTAGE
	A	B	C	A	B	C	
0	2.1	2.2	1.4	0.3	0.45	0.3	225
1	1.9	1.9	1.3	0.3	0.45	0.3	226
2	2	1.9	1.3	0.45	0.45	0.3	230
3	1.9	1.9	1.3	0.45	0.45	0.15	235
4	2	1.9	1.3	0.45	0.45	0.15	235
5	1.8	1.7	1.2	0.45	0.45	0.15	223
6	1.8	1.7	1.2	0.45	0.45	0.15	221
7	1.8	1.7	1.2	0.45	0.58	0.15	197
8	1.7	1.5	1.1	0.45	0.58	0.15	174
9	1.7	1.5	1.1	0.45	0.58	0.15	150
10	1.8	1.6	1.2	0.45	0.58	0.15	134
11	1.9	1.7	1.2	0.45	0.58	0.15	108
12	2	1.7	1.2	0.45	0.58	0.15	92
13	1.8	1.5	1.1	0.45	0.58	0.15	71
14	2	1.7	1.3	0.45	0.58	0.15	55
15	1.8	1.6	1.2	0.45	0.58	0.15	42
16	1.8	1.5	1.1	0.45	0.58	0.15	30
17	1.8	1.6	1.2	0.45	0.58	0.15	15
18	2.2	1.9	1.4	0.45	0.58	0.15	7
19	2.1	1.8	1.3	0.45	0.45	0.15	2
20	2.6	2	1.7	0.45	0.45	0.15	1.6
21	3	2	2.3	0.45	0.45	0.15	1.4
22	3.3	2.1	2.9	0.58	0.45	0.15	1.3

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 การปรับแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลโครงงาน

จากโครงงานสามารถสรุปได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเป็น 1 เฟส ที่สร้างขึ้นมานี้ จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้านี้จะเห็นได้ว่า สามารถนำไปใช้จ่ายโหลด 1 เฟสกระแสสูง ๆ ได้ ซึ่งกระแสทางด้านปฐมภูมิทั้ง 3 เฟส มีขนาดใกล้เคียงกัน แต่การควบคุม Mutual Flux เพื่อปรับแรงดันทางด้านทุติยภูมินี้ ยังไม่สามารถปรับแรงดันไฟฟ้า 1 เฟสได้อย่างเป็นเชิงเส้น

ในอนาคตของโครงงาน ที่ทำหม้อแปลงไฟฟ้าแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเป็น 1 เฟส น่าจะมีการปรับปรุงพัฒนาโครงงานชิ้นนี้เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีตามวัตถุประสงค์ เพราะได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์พิชิต ลำยอง ที่ช่วยให้คำแนะที่เป็นประโยชน์อย่างมากแก่คณะผู้จัดทำ และ คุณบุศรา เลิศบุษศราคาม ที่ให้ยืมเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับการพิมพ์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่สโตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าก็ได้ให้ความร่วมมือในการยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ จึงทำให้คณะผู้จัดทำโครงงานดำเนินงานลุล่วงไปด้วยดี คณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณท่านอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยเหลือทำให้ปริญญานิพนธ์นี้ สำเร็จตามวัตถุประสงค์ไว้ ณ โอกาสนี้

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] A.E. Fitzgerald , Charles Kingsley, Jr. Stephen D. Umans "Electrical Machinery", Fifth edition , Mcgraw-Hill, 1992

[2] G.S. Brosan and J.I. Haydan, "Advanced Electrical Power and Machines", London Sir Isaac Pitman & Son Ltd, 1968

[3] B.L. Theraja, A.K. Theraja "Electrical Technololy" New delhi , 1988

[4] พิชิต ลำยอง " เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1,2" สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , พ.ศ. 2537

[5] ธวัชชัย อัตถวิบูลย์กุล " เครื่องกลไฟฟ้า 2" สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริม อาชีวะ, พ.ศ.2533

[6] สัมพันธ์ หาญชเล "เครื่องกลไฟฟ้า 1,2" สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี , พ.ศ. 2528

[7] ธวัชชัย ชยาวนิช , พงษ์พันธ์ วิชัย , เอกสิทธิ์ กองมาลัย "ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์" สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี , พ.ศ.2534

[8] พีรศักดิ์ วรสุนทโรสถ , ฉรงค์เดช ศรีอัศวอมร "ทฤษฎีวิเคราะห์วงจรเครื่องชุ่กรกลไฟฟ้า" โครงการตำราภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , พ.ศ. 2531

[9] โกวิท มาศรัตน์ "เครื่องจักรกลไฟฟ้า" โครงการตำราวิชาการภาควิชากรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ วิทยาลัยมหานคร , พ.ศ. 2534

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้