



ปีการศึกษา 2532

ปรากฏการณ์ของหม้อแปลง

โดย

นาย เมธี ทับทิมทอง

นาย วิบูล พัฒนาการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย

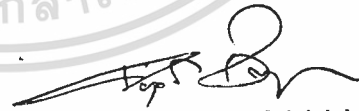
ปริญญาโทศึกษาศาสตร์ 2532

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง ปราบกฏการไขข้อข้องหรือเปลี่ยนแปลง

ผู้จัดทำ

1. นาย เมธี ทัฬหิมทอง (29.1163)
2. นาย วิบูล พัฒนพานิช (29.1200)



(อ. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

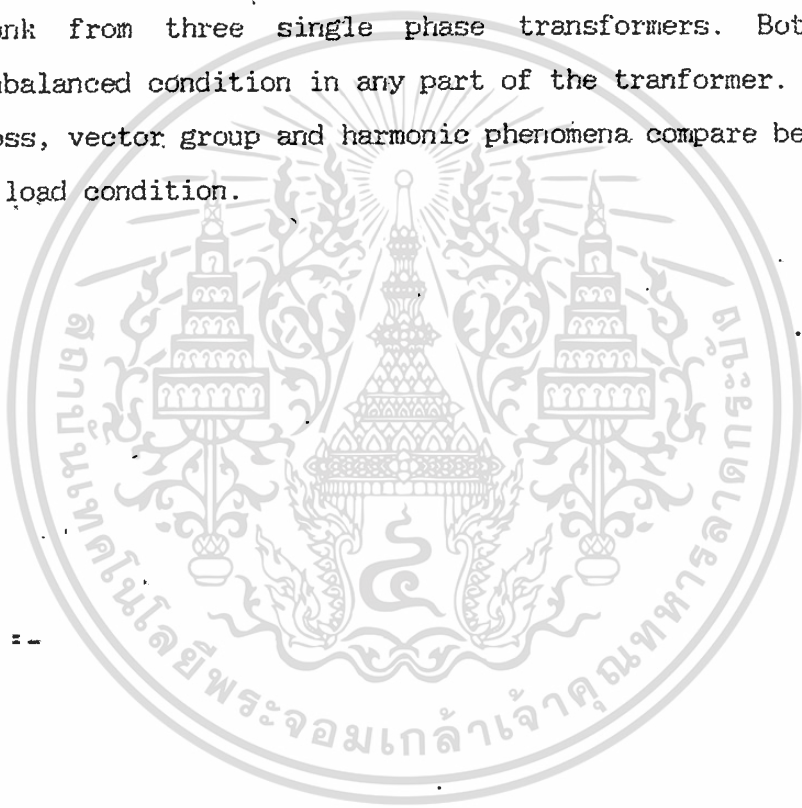
026966
22.พ.ย. ๒๕๖๖

บทคัดย่อ

อันเนื่องจากความสำคัญของหม้อแปลงในระบบไฟฟ้ากำลัง ผู้ใช้จึงควรศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของหม้อแปลงอย่างรอบคอบ เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัย โครงการนี้ได้แสดงสภาพที่เกิดขึ้นเมื่อมีการต่อใช้งานหม้อแปลง 3 เฟส จากหม้อแปลง 1 เฟส โดยศึกษาและทำการทดลองในเรื่องต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ การทดสอบหม้อแปลง การต่อวงจร 3 เฟส การสูญเสียในแกนเหล็ก เวคเตอร์กรุป การป้องกันหม้อแปลง ปრაกฏการณ์ฮาร์โมนิกเมื่อต่อวงจรประเภทต่าง ๆ เปรียบเทียบระหว่างขณะไร้ภาระ กับขณะมีภาระไฟฟ้า รวมทั้งเมื่อตัวภาระเองมีฮาร์โมนิก และยังรวมถึงสภาวะไม่สมดุลในการใช้งานหม้อแปลง 3 เฟสในหลายลักษณะ เช่นความไม่สมดุลอันเนื่องมาจากภาระไฟฟ้า และความไม่สมดุลอันเนื่องมาจากตัวหม้อแปลงเอง

abstract

Owing to the importance of the transformers in electrical power system. The users should study the properties of transformer thoroughly. This project show the connection of three phase transformer bank from three single phase transformers. Both the balanced and unbalanced condition in any part of the tranformer. Study about core loss, vector group and harmonic phenomena compare between noload and on load condition.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

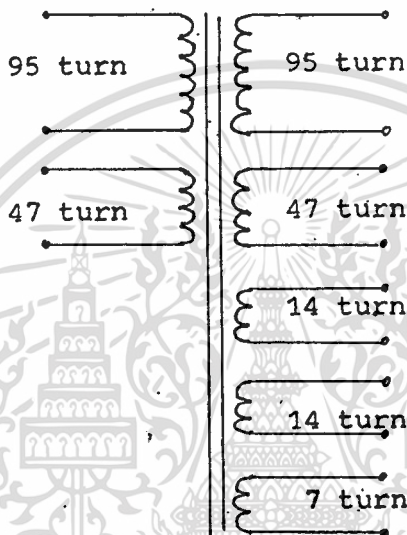
บทที่	เรื่อง	หน้า
1	บทนำ	1
2	การทดสอบหม้อแปลง	2
3	การต่อหม้อแปลง 3 เฟส	8
4	การสูญเสียในแกนเหล็ก	33
5	เวกเตอร์กรุป	48
6	ปรากฏการณ์อาร์โมติกในวงจร 3 เฟส	55
7	สภาวะไม่สมดุลในหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสแบบ 1 เฟสต่อร่วมกัน	93
8	การป้องกันหม้อแปลง	135
9	การระบายความร้อนและการทำโหลดเกินของหม้อแปลง	144
	ภาคผนวกที่ 1	150
	ภาคผนวกที่ 2	154
	ภาคผนวกที่ 3	157
	ภาคผนวกที่ 4	159

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

หม้อแปลงที่ใช้ในการทดลอง ตลอดโครงงานนี้เป็นหม้อแปลงเฟสเดียวแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ 3 ชุด นำมาต่อกันเป็นวงจร 3 เฟส เพื่อศึกษาลักษณะที่เกิดขึ้น พิกัดต่าง ๆ จากการออกแบบมีดังต่อไปนี้

- ขดลวด มีทั้งหมด 7 ชุด ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 หม้อแปลงที่ใช้ในการทดลอง

และมีพิกัดโวลท์เตจ ดังนี้

ขด 95	รอบ	มีพิกัดโวลท์เตจ	155 V
ขด 47	รอบ	" "	76 V
ขด 14	รอบ	" "	23 V
ขด 7	รอบ	" "	11 V

- ขนาดพิกัดกระแส

ขดลวดทุกชุดใช้ลวดขนาดเดียวกันคือ SWG 14 ทนกระแสได้ 8 Ampere

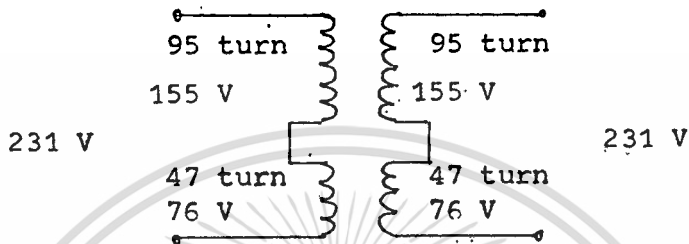
ในการทดลองเกือบทั้งหมดของโครงงานนี้ หม้อแปลงแต่ละลูก ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์อื่นใด
มีจำนวนรอบเท่ากันคือ ขด 95 รอบ ต่อเข้ากับขด 47 รอบ เป็นหนึ่งด้านและกำหนดให้ใช้พิกัด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลต์เตจเป็น 220/220V ส่วนขด 14 รอบ 2 ขด กับขด 7 รอบ 1 ขด ที่เหลือ จะนำมาใช้
ในบางกรณีเท่านั้น

- พิกัด VA สูงสุด เมื่อดังรูปที่ 1.2 ซึ่งใช้ทดลองจริง คือ

$$VA \cdot rating = 220 \times 8 / 1000 = 1,760$$



รูปที่ 1.2 หม้อแปลงที่ต่อขดลวด สำหรับทดลอง

ในการทดลองทุกการทดลองต่อจากนี้ จะกำหนดให้หม้อแปลงแต่ละตัวเป็นเฟส A,B
และ C ตามลำดับ. และ ไม่มีการสลับขั้วกันตลอดทุกการทดลอง

บทที่ 2

การทดสอบหม้อแปลง

2. การทดสอบหม้อแปลง

แนวทางการทดลอง

ในบทนี้จะทำการทดสอบหม้อแปลงทั้ง 3 ลูก โดยการทำการ open circuit test และ short circuit test และคำนวณค่า R_c , X_m , R_{oc} , X_{oc} ของหม้อแปลงทั้ง 3 ลูก เพื่อนำไปสร้างวงจรสมมุติของหม้อแปลงแต่ละลูก ส่วนข้อมูลอื่น ๆ ที่อาจคำนวณได้จากวงจรสมมุติ เช่น Regulation ประสิทธิภาพ จะไม่มีการคำนวณไว้ในที่นี้ เพราะมิใช่จุดประสงค์ของโครงการ

วัตถุประสงค์

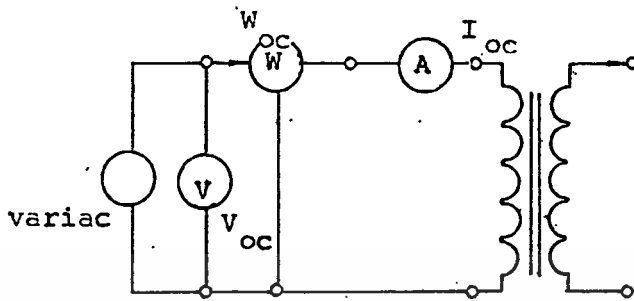
- เพื่อหาวงจรสมมุติของหม้อแปลงทั้งสามลูก (A, B, C)

Open Circuit Test

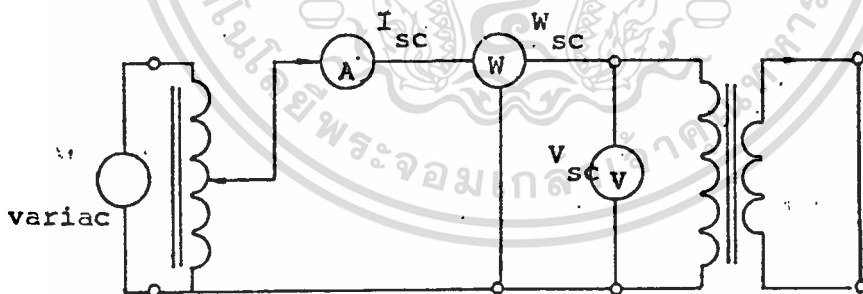
- ขั้นตอน
1. ต่อดวงจรมตามรูปที่ 2.1
 2. ป้อน $V_{oc} = 220 \text{ V}$ ทางด้านปฐมภูมิ (95 + 45 รอบ)
 3. บันทึกค่า I_{oc} , W_{oc}

Short Circuit Test

- ขั้นตอน
1. ต่อดวงจรมตามรูปที่ 2.2 (ลัดวงจรด้านทุติยภูมิ)
 2. ปรับ V_{sc} จนได้ $I_{sc} = 8 \text{ A}$
 3. บันทึกค่า I_{sc} , W_{sc}



รูปที่ 2.1 วงจรสำหรับทำ Open Circuit Test



ลัดวงจร

รูปที่ 2.2 วงจรสำหรับทำ short circuit test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

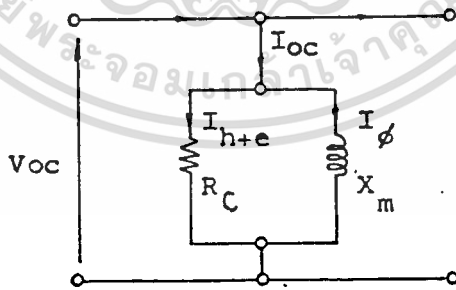
ตารางที่ 2-1 ผลการทดสอบ

TR.	Open circuit test			short circuit test		
	V_{oc}	I_{oc}	W_{oc}	V_{sc}	I_{sc}	W_{sc}
A	220	0.245	24.20	6.76	8	43.75
B	220	0.228	25.25	7.40	8	38.75
C	220	0.225	24.85	6.81	8	45.00

คำนวณ

1) Open Circuit Test

วงจรสมมุติในส่วนี้เป็นดังรูปที่ 2.3 แสดงถึงพลังงานที่หม้อแปลงต้องไ้ไปเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก และอีกส่วนหนึ่งสูญเสียไปเนื่องจากเกิดกระแสไหลวน และฮีสเตอร์รีซิสชัน



รูปที่ 2.3 วงจรสมมุติที่ได้จาก open circuit test

ขั้นตอนการคำนวณโดยสรุป มีดังนี้

$$W_{oc} = I_{oc} V_{oc} \cos \theta$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{h+e} = I_{oc} \cos \theta$$

$$I_o = I_{ex} \sin \theta$$

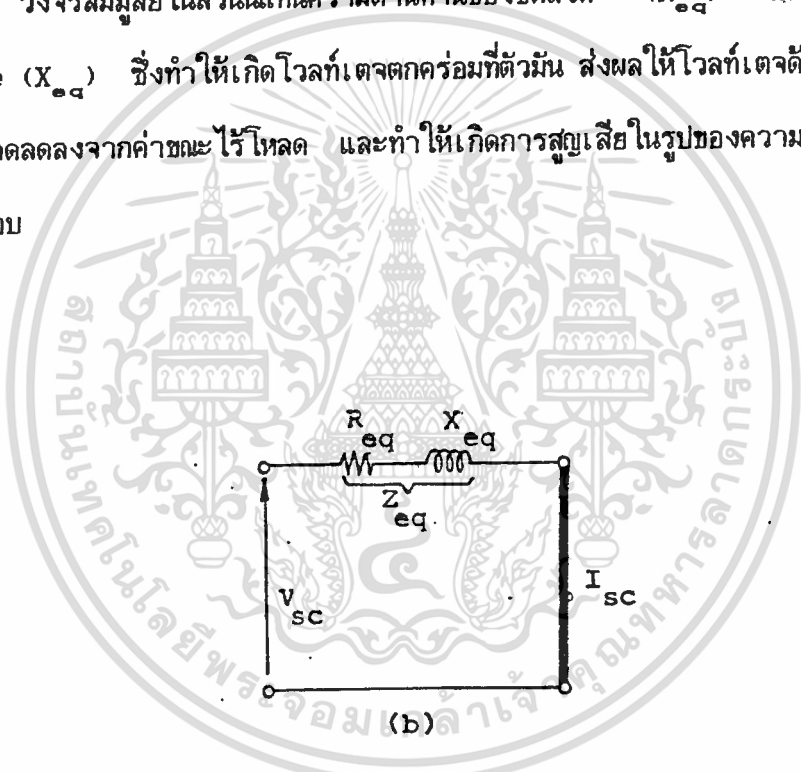
$$R_c = V_{oc} / I_{h+e}$$

$$X_m = V_{oc} / I_o$$

2) Short circuit test

วงจรสมมุติในส่วนนี้แทนความต้านทานของขดลวด (R_{eq}) และ leakage reactance (X_{eq}) ซึ่งทำให้เกิดโวลต์เตจตกคร่อมที่ตัวมัน ส่งผลให้โวลต์เตจด้านทุติยภูมิ เมื่อมีกระแสไหลลดลงจากค่าขณะไว้โหลด และทำให้เกิดการสูญเสียในรูปของความร้อนด้วย ดูรูปที่

2.4 ประกอบ



รูปที่ 2.4 วงจรสมมุติที่ได้จาก short circuit test

ขั้นตอนการคำนวณ โดยสรุป มีดังนี้

$$Z_{eq} = V_{sc} / I_{sc}$$

$$R_{eq} = W_{sc} / I_{sc}^2$$

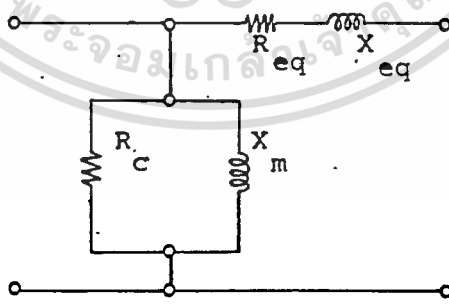
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณได้ค่า R_c , X_m , R_{eq} , X_{eq} ดังตารางที่ 2.2

TR	R_c	X_m	R_{eq}	X_{eq}
A	2,000	1,005	0.684	0.497
B	1,917	1,117	0.605	0.523
C	1,948	1,130	0.703	0.480

ตารางที่ 2.2

ซึ่งจะได้วงจรสมมูลยรวมดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลยของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การต่อหม้อแปลง 3 เฟส

การต่อแบบ 3 เฟส การพิจารณาทั่วไป

พลังงานไฟฟ้าเกือบทั้งหมดที่มันขึ้นมาและส่งออกป้อนอยู่ในรูป 3 เฟส ซึ่งจะมีการเพิ่มระดับแรงดัน และลดระดับแรงดันหลายครั้ง ระหว่างแหล่งกำเนิดกับโหลด หม้อแปลงที่ใช้ในระบบจะได้จากหม้อแปลง 1 เฟสที่นำมาต่อกัน หรือได้จากหม้อแปลง 3 เฟส ซึ่งมีวงจรแม่เหล็กร่วมกัน .

ซึ่งแม้ว่าพลังงานไฟฟ้าเกือบทั้งหมดส่งในรูปของ 3 เฟส แต่ให้ที่สุดแล้วเกือบจะครึ่งหนึ่งของพลังงานใช้กับโหลด 1 เฟส โหลด 1 เฟสเหล่านี้รับไฟจากด้านแรงต่ำทางด้าน secondary ของ distribution transformer ซึ่งด้าน primary ต่อกับระบบสายส่ง 3 เฟส การศึกษารายละเอียดของการต่อหม้อแปลงแบบ 3 เฟส จะให้คำตอบเหล่านี้เช่น ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสในหม้อแปลง ในวงจร 3 เฟส เหล่านี้ พิกัดของหม้อแปลงควรมีขนาดเท่าไรเมื่อจ่ายให้โหลด สามารถที่จะจ่ายโหลด 1 เฟสและ 3 เฟสพร้อมกันได้ไหม ความไม่เท่ากันของ equivalent impedance กระแส excite, หรือ อัตราส่วนรอบจะมีผลอย่างไร ผลของ harmonics ในกระแส excite, equivalent impedance มีผลอย่างไร ต่อแรงดันของระบบที่สภาพปกติ อิมพีแดนซ์ของการต่อหม้อแปลงและวิธีการต่อกราวด์จะมีผลต่อแรงดันและกระแสของระบบขณะเกิด fault อย่างไร

คำถามเหล่านี้สามารถตอบได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของหม้อแปลง 3 เฟส กับ ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันในวงจร 3 เฟส เพื่อให้การวิเคราะห์สมบูรณ์ยิ่งขึ้นในทางทฤษฎีต้องคิดผลของ leakage impedance, กระแส excite, magnetic nonlinearity และบางครั้งต้องคิด distribute capacitance ของการพันด้วย เป็นโชคดีที่มีความจำเป็นน้อยมากที่ factor เหล่านี้ต้องพิจารณาพร้อมกัน ลักษณะที่สำคัญ ๆ หลาย ๆ อย่างของการต่อสามารถวิเคราะห์ได้จากหม้อแปลงซึ่งคิดว่าเป็นอุดมคติ

ในหม้อแปลง 3 เฟส จะมีการต่อหลายแบบ การต่อบางแบบก็สมมาตรและบาง



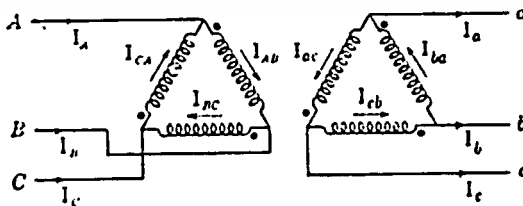
แบบที่ไม่สมมาตร ถ้าการต่อสมมาตร แต่ละเฟสทางด้าน primary จะให้โดยรอบ 2 เฟส ที่เหลือ และแต่ละเฟสทางด้าน secondary จะเหมือน 2 เฟส ที่เหลือ เช่น ถ้าหม้อแปลง 3 ตัวต่อกันแบบ Δ หรือแบบ Y ในด้าน primary และต่อแบบ Δ หรือ Y ในด้าน secondary การต่อเหล่านี้ก็จะสมมาตร มีการต่อที่สมมาตร 4 แบบคือ

- 1) $\Delta - \Delta$
- 2) Y - Y
- 3) $\Delta - Y$
- 4) Y - Δ

ตัวอย่างการต่อแบบไม่สมมาตรที่สำคัญคือการต่อแบบ open-delta หรือ การต่อแบบ V ซึ่งจะใช้หม้อแปลงเพียง 2 ตัว การต่อแบบสมมาตรวิเคราะห์ง่ายกว่า และพบใช้บ่อย จึงพิจารณาเป็นอันดับแรก

1. การต่อแบบ $\Delta - \Delta$

การต่อแบบนี้ใช้ได้เมื่อทั้งด้าน primary และ secondary ไม่ต้องการต่อ neutral การต่อแบบ y มีการนำไปใช้มากในระดับแรงดันต่ำ และระดับแรงดันขนาดกลาง หรือเมื่อกระแสมีค่ามาก ๆ การต่อแบบนี้ ของ primary และ secondary ของหม้อแปลงเดียวกันขนานซึ่งกันและกัน การต่อแบบนี้เป็นดังรูปที่ 3-1

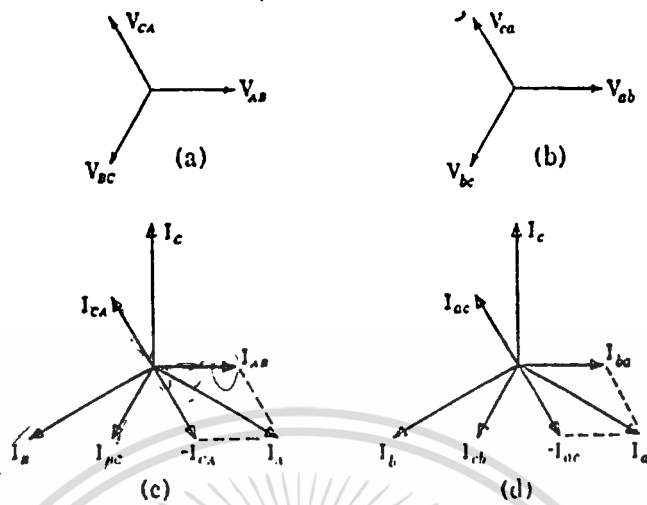


รูปที่ 3-1 การต่อแบบ $\Delta - \Delta$

ในการใช้งานการต่อแบบ $\Delta - \Delta$ ให้ได้ผลดีนั้น หม้อแปลงควรมี turn ratios เท่ากันไม่เช่นนั้นจะเกิดกระแสไหลวนในหม้อแปลง ถึงแม้ว่าจะไม่ได้ต่อโหลดก็ตาม และหม้อแปลงควรมี equivalent impedance เท่ากัน ถ้าไม่เท่ากัน ตัวที่มี equivalent impedance น้อยที่สุด การต่อแบบ $\Delta - \Delta$ คล้ายเป็นการต่อขนานแต่ละคู่ของ line terminal ดังนั้นกระแสที่แบ่งไหลในวงจรนี้ ถูกกำหนดโดย impedance ของแต่ละตัว ดังนั้น ถ้าต่อหม้อแปลง 3 ลูก ที่มีพิกัดเดียวกัน แต่มี equivalent impedance ต่างกัน จ่ายกำลังให้กับ load ที่สมดุลย์ การจ่ายที่พิกัด volt-amp (full load ต้อง over load หม้อแปลงตัวที่มี equipvalent impedance น้อยที่สุด)

1a ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันในวงจร Δ ที่สมดุลย์

เมื่อหม้อแปลงทั้ง 3 ตัว identical กันและ load ถูกทำให้สมดุลย์ จะไม่มีความแตกต่างระหว่างเฟสใด ๆ เลย นอกจากเฟส displacement ทั้งของแรงดันและกระแสของเฟสหนึ่งกับเฟสที่เหลืออยู่ แรงดันและกระแสสามารถกำหนดได้จากการวิเคราะห์เฟสไดเฟสเดียวได้เลย หม้อแปลงแต่ละตัวก็จะจ่ายโหลดได้ $1/3$ ของโหลดทั้ง 3 เฟส แรงดันทั้ง 2 ด้านสอดคล้องกัน ถ้าไม่คิด voltage drop เนื่องจาก leakage impedance อัตราส่วนของแรงดันไลน์ด้าน primary กับ แรงดันไลน์ด้าน secondary เท่ากับ turn ratio ของหม้อแปลง เมื่อลำดับของเฟสเป็น ABC ความสัมพันธ์ทางเวกเตอร์แสดงดังรูป 3-2a,b ซึ่งสมมติให้แรงดันแปรเปลี่ยนอย่างช้าๆ และเวกเตอร์แทนการลดลงของศักย์ในทิศที่บ่ง โดยลำดับของอักษรที่ห้อย เช่น V_{AB} แทน เวกเตอร์การลดลงของศักย์จากไลน์ A ไปไลน์ B อักษรตัวใหญ่แสดงเฟสทาง primary อักษรตัวเล็กแสดงเฟสทาง secondary เมื่อต่อดังรูปที่ 3-1 ทิศทางบวกของแรงดันที่ชี้กำหนดข้างต้น แรงดันที่ชี้ของทั้ง primary และ secondary เกือบจะ inphase กัน เมื่อคิดว่าผลของ leakage impedance มีค่าน้อย



รูปที่ 3-2 แสดงเวกเตอร์ของกระแสและแรงดันของการต่อแบบ $\Delta-\Delta$ ที่สภาวะสมดุลย์

ในรูป 3-2c I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} แทนกระแสด้าน primary ถ้า power factor = 1 กระแสด้าน primary จะ inphase กับกระแสด้าน secondary ดังรูป 3-2a และ 3-2c กระแสใหม่ห่อแปลงจะสัมพันธ์กันดังนี้

$$I_A = I_{AB} - I_{CA} \quad (3-1)$$

$$I_B = I_{BC} - I_{AB} \quad (3-2)$$

$$I_C = I_{CA} - I_{BC} \quad (3-3)$$

ซึ่ง I_A , I_B , I_C แทนเวกเตอร์ของกระแสไลน์ด้าน primary ทิศทางบอกแสดง ดังรูปที่ 3-2 เมื่อกระแสสมดุลย์และลำดับของเฟสเป็น ABC I_{AB} และ I_{CA} มีขนาดเท่ากัน และ I_{AB} และ I_{CA} มีขนาดเท่ากัน และ I_{AB} lag I_{CA} 120°

$$I_A = \sqrt{3} I_{AB} \angle -30^\circ \quad (3-4)$$

เมื่อกระแสสมดุลย์ และแปรเปลี่ยนอย่างซายน์ ค่า effective value ของกระแสไลน์เป็น $\sqrt{3}$ เท่าของ effective value ของกระแสในเฟสของหม้อแปลง และยังมีเฟส displacement ระหว่างกระแสไลน์และกระแสในเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อไม่คิดกระแส exciting กระแสด้าน primary และ secondary สร้าง magnetomotive force ที่มีทิศตรงข้ามกัน ดังนั้นกระแส primary และ secondary เป็นสัดส่วนกลับจำนวนรอบของขดลวดกระแสด้าน secondary แสดงในรูปเวกเตอร์ ดังรูป 3-2d ซึ่งจะ inphase กับกระแสในรูป 3-2C ความสัมพันธ์ของกระแสไลน์แสดงกระแสในเฟสด้าน secondary เป็นดังนี้

$$I_a = I_{ba} - I_{ac} \tag{3-5}$$

$$I_b = I_{cb} - I_{ba} \tag{3-6}$$

$$I_c = I_{ac} - I_{cb} \tag{3-7}$$

เมื่อ I_a, I_b, I_c แทนกระแสไลน์ และมีทิศดังรูปที่ 3-1 เมื่อกระแสสมมูลย์และลำดับของเฟสเป็น abc

$$I_a = \sqrt{3} I_{ba} \angle -30^\circ \tag{3-8}$$

จะเห็นว่าความสัมพันธ์ของกระแสด้าน secondary เหมือนกับด้าน primary

สรุปในการต่อแบบ Δ

เมื่อต่อแบบ Δ แรงดันไลน์เท่ากับแรงดันที่ขั้ว (แรงดันเฟส) ของหม้อแปลงแรงดันด้าน primary และ secondary เกือบ in phase กัน

เมื่อวงจรสมมูลย์ และหม้อแปลง identical หม้อแปลงแต่ละตัวจ่ายโหลด $1/3$ ของโหลดที่โหมด ค่า effective value ของกระแสเฟส จะเป็น $1/3$ เท่าของค่ากระแสไลน์ การต่อแบบ $\Delta-\Delta$ คล้ายเป็นการต่อของ impedance ที่ขนานกัน ดังนั้น ถ้า equivalent impedance ไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่ากระแสไลน์จะสมมูลย์ หม้อแปลงแต่ละตัวก็อาจจะรับโหลดไม่เท่ากัน

ถ้า turn ratio ของหม้อแปลงไม่เท่ากัน ก็จะเกิดกระแสไหลวนใน $\Delta-\Delta$ bank

2. การต่อแบบ Y - Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้ในวงแคบๆ เท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการฝ่าฝืนกฎหมายลิขสิทธิ์ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 0-2942-1000 หรือ 0-2942-1001

กระแส exciting อาจจะทำให้เกิดสภาพที่ไม่ต้องการ เช่น voltage ที่ terminal เกิน แต่การศึกษาคุณสมบัติที่สำคัญ ๆ บางประการจะศึกษาได้จากการต่อแบบนี้ ซึ่งจะละผลของ harmonic ในกระแส exciting ซึ่งการต่อแบบ Y - Y นี้จะมี 2 กรณี

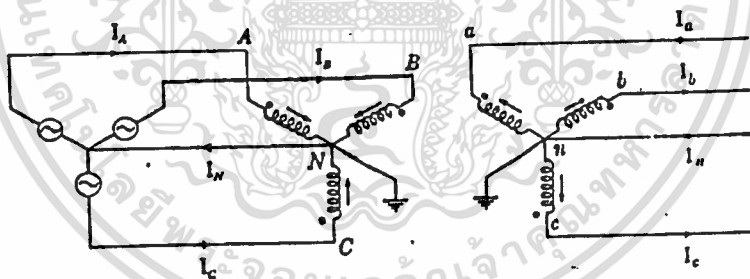
2 a การต่อ primary neutral เข้ากับ neutral ของ source

การต่อลักษณะนี้แสดงในรูปที่ 3-3 เพื่อให้การอธิบายดีขึ้น จะไม่คิด impedance ของลวดทั้ง 4 เส้น ที่สภาวะนี้ แรงดัน primary ของหม้อแปลงสอดคล้องกับแรงดัน line to neutral ของ source ความสัมพันธ์ของแรงดัน line to neutral (แรงดันเฟส) กับแรงดัน line to line (แรงดันไลน์) เป็นดังนี้

$$V_{AB} = V_{AN} + V_{NB} = V_{AN} - V_{BN} \tag{3-9}$$

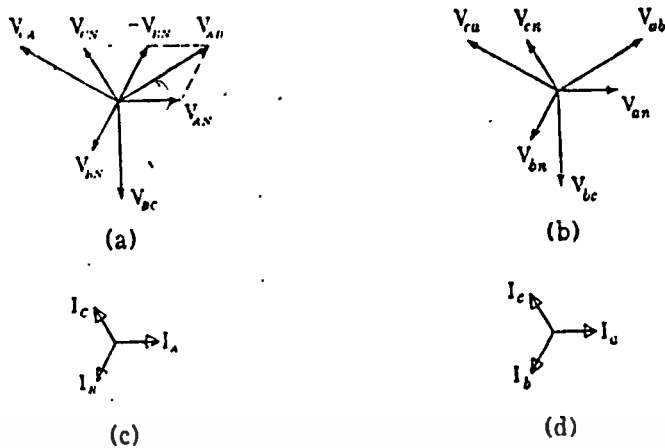
$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN} \tag{3-10}$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN} \tag{3-11}$$



รูปที่ 3-3 การต่อแบบ Y-Y ต่อนิวตรอลกับแหล่งจ่าย

ถ้าแรงดันสมมูลย์ และลำดับของเฟสคือ ABC และเวกเตอร์ของแรงดันด้าน primary เป็นดังรูป 3-4a สมการ 3-9 จะได้



รูปที่ 3-4 แสดงเวกเตอร์ของแรงดันและกระแสในการต่อแบบ y-y ที่สภาวะสมดุลย์

$$V_{AB} = \sqrt{3} V_{AN} \angle 30^\circ \quad (3-12)$$

เมื่อแรงดันเฟสสมดุลย์ แรงดันไลน์จะเป็น $\sqrt{3}$ เท่าของแรงดันเฟส และจะมีเฟส displacement เท่ากับ 30° ระหว่างแรงดันเฟสและแรงดันไลน์

ถ้าไม่คิดแรงดัน drop เนื่องจาก leakage impedance แรงดันด้าน secondary เท่ากับแรงดันด้าน primary หากด้วย อัตราส่วนจำนวนรอบของด้าน primary ต่อด้าน secondary

เมื่อการต่อเป็นดังรูปที่ 3-3 เวกเตอร์ V_{an}, V_{bn}, V_{cn} แทนแรงดันเฟสด้าน secondary ดังรูป 3-4b แรงดันไลน์ ด้าน secondary จะเป็น

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} \quad (3-13)$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \quad (3-14)$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an} \quad (3-15)$$

เมื่อแรงดัน ด้าน secondary สมดุลย์ และลำดับของเฟสเป็น abc สมการ 10 จะกลายเป็น

$$V_{ab} = \sqrt{3} V_{an} \angle 30^\circ \quad (3-16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แรงดันไลน์ทางด้าน secondary แสดงในรูป 3-4b ถ้าไม่คิดแรงดัน drop ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก leakage impedance แรงดันไลต์ด้าน primary และด้าน secondary จะ inphase กัน เมื่อการต่อเป็นดังรูปที่ 3-3

ทั้งด้าน primary และด้าน secondary กระแสไหลหรือแปลงจะเท่ากับกระแส ไลต์ ถ้าวงจรสมมุทธ์ กระแสด้าน secondary ในแต่ละเฟส จ่ายให้ไหลลดเท่ากัน และมี เฟส displacement 120° ถ้า power factor = 1 กระแสด้าน secondary จะ inphase กับแรงดันเฟส แสดงด้วยเวกเตอร์ I_a, I_b, I_c ในรูป 3-4d

ที่สภาวะสมดุล ผลรวมทางเวกเตอร์ของกระแสไลต์ด้าน secondary เป็นศูนย์ ดังนั้นไม่มีกระแส neutral ทางด้าน secondary

เมื่อไม่คิดกระแส exciting กระแสด้าน primary และด้าน secondary เป็น สัดส่วนกับอัตราส่วนรอบของ primary และ secondary และกระแสทั้งสอง inphase กัน เมื่อทิศทางขดถูกเลือกเป็นทิศของกระแสที่สร้าง magnetomotive force ที่ตรงข้ามกัน ดัง รูปที่ 3-3 กระแสในรูปเวกเตอร์แสดงในรูป 3-4c เมื่อไม่คิดกระแส exciting ผลบวก ทางเวกเตอร์ของกระแสด้าน primary ที่สมดุลย์เป็นศูนย์ ดังนั้นกระแสในสาย neutral ด้าน primary เป็น 0 แต่ไม่ควรละเลยสาย neutral เสียเลย เนื่องจากจุดต่อ neutral ด้าน primary มีผลที่สำคัญของกระแส exciting เมื่อไหลเป็นแบบไม่สมดุลย์

เมื่อ neutral ของ primary ต่อเข้ากับ neutral ของ source ดังในรูป 3-3 หม้อแปลงแต่ละตัว ก็จะรับกำลังจากเฟสใดเฟสหนึ่งของ การส่งจ่าย ดังนั้นหม้อแปลงแต่ละ ตัวจึงสามารถไหลได้อย่างอิสระจากกัน ถ้าแรงดันด้าน secondary ของหม้อแปลงเป็น 120 volt (แรงดันเฟส) ไหลแสงสว่างก็สามารถต่อได้จากเฟสใดเฟสหนึ่งจาก 3 เฟส และ ไหล 3 เฟส $120/\sqrt{3}$ หรือ 202 volt ก็ต่อได้จากแรงดันไลต์ทั้ง 3 สาย หม้อเตอร์ 3 เฟส ขนาดมาตรฐาน 220 volt ก็สามารถทำงานที่แรงดันนี้ได้ โดยไม่มีผลรุนแรงต่อลักษณะการทำงานมากนัก

ผลรวมของกระแสที่จ่ายให้ไหลลดต้องเท่ากับกระแสใน neutral ทางด้าน secondary กระแสในรูปเวกเตอร์ของ I_n ด้าน secondary เป็นดังรูป 3-3 คือ

$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad (3-17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวกเตอร์ของกระแส I_N ด้าน primary ในสาย neutral คือ

$$I_N = I_A + I_B + I_C \quad (3-18)$$

เมื่อไม่คิดแรงดัน drop ในไลน์และใน impedance ของหม้อแปลง และโหลดสมดุลง่ายการต่อ neutral ของ primary เข้ากับ neutral ของ source ทำให้แรงดันเฟสสมดุลง่าย

2b เมื่อไม่ต่อ neutral ด้าน primary

ที่สภาวะนี้ ผลรวมของกระแสด้าน primary ที่จ่ายให้กับ bank ต้องเป็น 0 หรือ

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (3-19)$$

ซึ่ง i_A, i_B, i_C เป็นค่ากระแสด้าน primary ที่เวลานั้นในรูป 3-5a กระแสที่จ่ายให้กับหม้อแปลงใด ๆ จะกลับมายัง source โดยผ่านขด primary ของ หม้อแปลงเฟสอื่น ซึ่งจะมีผลสำคัญต่อแรงดันเฟส

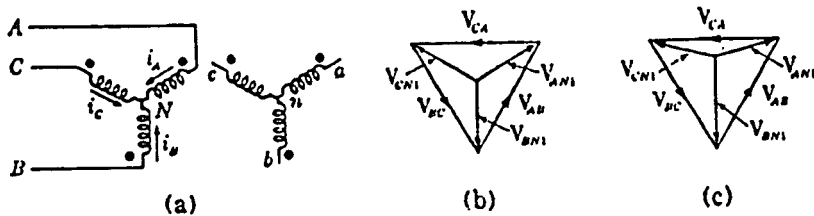
ในรูป 3-5a เมื่อด้าน secondary เปิดวงจร และไม่ต่อ neutral สภาวะนี้ กระแสด้าน primary จะเป็นกระแส excite ถ้ามองแรงดันไลน์ ที่ป้อนทางด้าน primary สมดุลง่าย ซึ่งแทนได้ด้วยเวกเตอร์ V_{AB}, V_{BC}, V_{CA} ในรูป 3-5b เป็นรูปสามเหลี่ยมที่เท่ากัน ทำให้ผลรวมของแรงดันไลน์เมื่อเขียนเป็น cyclic order จะเป็น 0 ดังนั้นแรงดัน ด้าน primary จะได้

$$V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} = 0 \quad (3-20)$$

เช่นเดียวกับด้าน primary แรงดันด้าน secondary ได้

$$V_{ab} + V_{bc} + V_{ca} = 0 \quad (3-21)$$

ถ้าแรงดันไลน์สมดุลง่าย สมการเหล่านี้สามารถแทนได้ด้วยเวกเตอร์ ซึ่งเขียนเป็นรูปสามเหลี่ยม ด้านเท่าดังรูป 3-5b



รูปที่ 3-5 เวกเตอร์ของแรงดันของหม้อแปลงเฟส 3 ลูก ต่อแบบ y-y ไม่ต่อนิวทรัล

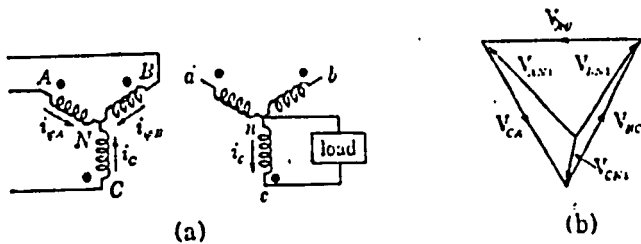
ถ้าหม้อแปลงมีลักษณะการ excite ที่ identical กัน กระแส excite และแรงดันเฟส จะสมดุลย์ถึงแม้ว่ารูปคลื่นของแรงดันเฟสอาจจะไม่เป็นไซน์ ส่วนที่เป็น fundamental ของแรงดัน แทนได้ด้วยเวกเตอร์ V_{AN1} , V_{BN1} , V_{CN1} ต่อเป็นส่วนกลางของแรงดันไลน์ ในรูปสามเหลี่ยม ดังรูป 3-5b

ถึงแม้ว่าหม้อแปลงจะออกแบบเหมือนกัน แต่ลักษณะการ excite มีน้อยกว่าที่ identical กันทีเดียว ถ้าหม้อแปลงในเฟส B มีกระแส excite น้อยกว่า หม้อแปลง 2 ตัวที่เหลือ หม้อแปลงเฟส B ต้องการกระแส excite มากกว่าปกติ เพื่อให้มีแรงดันเท่ากับหม้อแปลงทั้งสอง การต่อแบบ Y-Y นี้ แรงดันเฟสถูกกำหนดโดยกระแส excite ของแต่ละตัว ซึ่งมักจะ ไม่สมดุลย์กัน ถึงแม้ว่าแรงดันไลน์จะสมดุลกัน อันเป็นสภาวะที่ไม่ต้องการ

เมื่อ neutral ของ primary ไม่ต่อกับ neutral ของ source แรงดันเฟสด้าน secondary อาจจะไม่สมดุลย์ ไม่เพียงแต่เนื่องจากกระแส excite ในแต่ละตัวไม่เท่ากัน ยังเกิดจากการต่อโหลดที่ไม่สมดุลย์กันในแต่ละเฟส ตัวอย่างที่ชัดเจนคือ การต่อโหลดเข้ากับเฟสใดเฟสหนึ่ง (เพียงเฟสเดียว) ด้าน secondary ดังรูป 3-6a เฟสที่เหลือเปิดวงจร กระแสที่ไหลด้าน primary จะเป็น i_{m_A} , i_{m_B} เนื่องจากไม่ต่อ neutral ผลรวมของกระแสด้าน primary ต้องเท่ากับ 0

$$i_{\psi_A} + i_{\psi_B} + i_c = 0 \quad (3-22)$$

$$i_c = -i_{\psi_A} - i_{\psi_B} \quad (3-23)$$



รูปที่ 3-6 เวกเตอร์และการต่อโหลดเฟสเดียวของการต่อแบบ y-y ไม่ต่อนิวทรัล

ซึ่ง i_c เป็นค่ากระแส primary เมื่อหม้อแปลงมีโหลด ซึ่งถูกจำกัดโดยกระแส excite ของหม้อแปลงทั้งสอง กระแสโหลดในหม้อแปลง c จะมีผลต่อค่ากระแส excite ของหม้อแปลง A และ B ทำให้แรงดันเฟส A และเฟส B มากขึ้น และแรงดันของหม้อแปลงเฟส C ที่ถูกโหลดด้วยโหลด R หรือโหลด L อาจลดลงอย่างมากดังเวกเตอร์รูป 3-6b ถ้าใส่โหลด C ในเฟสใดเฟสหนึ่ง แรงดันเฟสนั้นจะกลับเฟส และแรงดันของเฟสที่ไม่ต่อโหลด มีค่ามากกว่าแรงดันไลน์

2c สรุปรูปการต่อแบบ Y

ในการต่อแบบ Y กระแสในเฟสเท่ากับกระแสในไลน์

ถ้าแรงดันไลน์ สมดุลย์และเป็น sine wave ค่าของแรงดันเฟสจะเป็น $1/\sqrt{3}$ เท่าของค่าแรงดันไลน์ และมี phase displacement 30° ระหว่างแรงดันเฟสและแรงดันไลน์

ถ้า neutral ของ primary ต่อกับ neutral source หม้อแปลงแต่ละตัวสามารถโหลดได้อย่างอิสระ

ข้อเสียของการต่อแบบนี้คือ ต้องใช้สาย 4 สาย และแรงดันของหม้อแปลงจะเหนี่ยวนำรบกวนระบบสื่อสารข้างเคียง เกิดเนื่องจากกระแสที่ไม่สมดุลย์และผลของ harmonic ที่ 3 ในกระแส excite

ถ้า neutral ของ primary ไม่ต่อกับ neutral ของ source กระแส primary ของหม้อแปลงแต่ละตัว จะกลับไปยัง source โดยผ่านหม้อแปลง 2 ตัวที่เหลือ และเมื่อต่อโหลดที่ไม่สมดุลย์ ก็ยังจะทำให้แรงดันเฟสไม่สมดุลย์ เนื่องจากการ excite

เมื่อไม่ต่อ neutral แรงดันเฟสของการต่อแบบ Y-Y จะไม่เป็นชายน้

3. เปรียบเทียบการต่อแบบ Y และ Δ

ในหลาย ๆ ด้านแล้วการต่อแบบ Y และ Δ เป็น duality ซึ่งกันและกัน ความสัมพันธ์ของกระแสในอินหนึ่งจะเหมือนกับความสัมพันธ์ของแรงดันในอีกอินหนึ่ง

การต่อแบบ Y คล้ายกับการต่ออนุกรม ขณะที่การต่อแบบ Δ มีลักษณะการต่อเหมือนวงจรขนาน แต่ละเฟสของการต่อแบบ Y ต่ออนุกรมกับสายไลน์ ขณะที่แต่ละเฟสของการแบบ y จึงเท่ากับกระแสไลน์ และแรงดันเฟสของการต่อแบบ y เท่ากับแรงดันไลน์

เมื่อแรงดันสมดุลย์ และไม่คิดผลของ harmonic แรงดันเฟสของการต่อแบบ Y จะเป็น $1/\sqrt{3}$ เท่าของแรงดันไลน์ การต่อแบบ Y จะเหมาะสำหรับแรงดันสูง ซึ่งจะมีปัญหาเรื่องฉนวน ที่แรงดันไลน์หนึ่ง ๆ แรงดันเฟสของการต่อแบบ Y จะเป็น $1/\sqrt{3}$ เท่าของการต่อแบบ Δ การต่อแบบ Δ จะทำให้การออกแบบถูกลง เมื่อกระแสมีค่ามาก ที่สภาพสมดุลย์ กระแสไลน์ของการต่อแบบ y จะเป็น $1/\sqrt{3}$ เท่าของการต่อแบบ Y ในการต่อแบบ Y-Y ถ้าไม่ต่อ neutral แรงดันของเฟสถูกกำหนดโดย exciting admittance ของหม้อแปลง ขณะที่การต่อแบบ Δ-Δ กระแสถูกกำหนดจาก equivalent impedance ถ้าไม่เท่ากัน กระแสใน Δ-Δ ก็จะไม่เท่ากัน ดังเช่นวงจรขนานที่มี impedance ในแต่ละ branch ไม่เท่ากัน การต่อแบบ Y-Y ที่ไม่มี neutral พบว่าใช้น้อยมาก เนื่องจากมีความไวเมื่อโหลดไม่สมดุลย์ และมี harmonic ปรกวน การต่อ neutral จะเป็นการกำจัด harmonics ในแรงดันเฟส

การต่อแบบ Δ-Δ กระแสในหม้อแปลงขึ้นอยู่กับ equivalent impedance ซึ่งอาจจะเป็นข้อดีหรือข้อเสียก็ได้ ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้ เช่นถ้าหม้อแปลงทั้ง 3 มีพิกัดเดียวกัน แต่ละตัวก็กระจายโหลดเท่ากัน และถ้าโหลดสมดุลย์ หม้อแปลงก็จะมี equivalent impedance เท่ากัน ก็จะแบ่งกันจ่ายโหลดได้เท่ากัน หม้อแปลงที่มีพิกัด kva ไม่เท่ากัน (แต่มีพิกัดแรงดันเดียวกัน) อาจจะใช้ได้ดีพอสมควรในการต่อแบบ Δ-Δ เนื่องจากหม้อแปลงตัวที่ใหญ่ที่สุดมักจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าในรูปแบบใด ๆ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายบริการลูกค้า โทร. 0-2910-6000 หรือ e-mail: service@scg.com

ต่อที่ไม่สมมาตรคือ นิเกด kVA 3 เฟส ของการต่อน้อยกว่าผลรวมของนิเกดของหม้อแปลงทั้ง 3 ตัว

การต่อแบบ $\Delta - Y$ และ $Y - \Delta$

ในการต่อหม้อแปลงที่ขบย่อย ๆ ด้านหนึ่งต่อแบบ Y เมื่อด้านนั้นต้องการแรงดันสูง หรือเมื่อต้องการจุด neutral ต่อลงกราวด์ เพื่อป้องกันให้กับโหลด 1 เฟส ในแรงดันสูง การต่อแบบ $\Delta - Y$ จะใช้เป็น step-up หม้อแปลงกำลังที่ปลายสุดของสายส่ง และใช้ในการ step down ที่ปลายสุดของการการรับ มักจะต่อแบบ $Y - \Delta$ neutral ของจุด Y ที่ต่อกับ แรงดันสูงมักต่อลงกราวด์ เพื่อให้แน่ใจว่าแรงดันเฟสที่จ่ายไฟสมดุลย์ และลดแรงดันระหว่าง coil กับ core บางครั้งการต่อกราวด์จะใช้ impedance ที่เหมาะสม ซึ่งจุดประสงค์เพื่อจำกัดกระแสลัดวงจรของไลน์ลงกราวด์

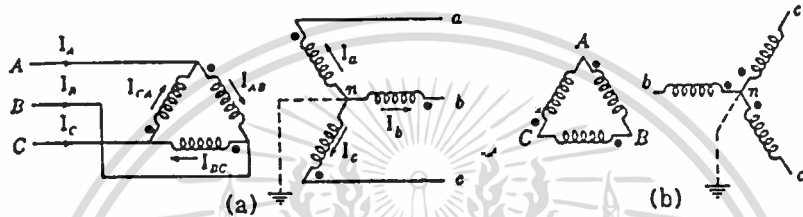
การต่อแบบ $\Delta - Y$ ใช้ใน step down เมื่อด้านแรงดันต่ำต้องการจุด neutral หม้อแปลง step down ที่ติดตั้งใน substation ที่จ่ายกับแรงดันปานกลาง มักจะมีการต่อแบบ $y - Y$

การต่อแบบ $Y - \Delta$ อาจจะใช้สำหรับ step-down ของ distribution transformer จ่ายให้กับโหลดทั้ง 3 เฟสและ 1 เฟส เมื่อแรงดันต่ำด้าน secondary ไม่ต้องการ neutral ถ้าด้าน secondary ที่ต่อแบบ Δ เป็นแบบ split winding 120/240V ก็สามารถต่อด้าน secondary เหมือนกับการต่อด้าน secondary ของการต่อแบบ $\Delta - \Delta$ ในรูป 3-10 power ก็สามารถจ่ายให้กับโหลด 3 เฟส 240 โวลต์ และก็จ่ายให้โหลด 1 เฟส ด้วย ข้อดีของการต่อแบบ A ในระบบนี้คือได้แรงดันมาตรฐาน 120 V และ 240 V โดยที่การต่อแบบ Y จะให้แรงดัน 3 เฟส ซึ่งนิยมน้อยกว่า และแรงดันขนาด 240 V ก็หาได้ สะดวกจากการต่อแบบ Δ แต่หาไม่ได้จากการต่อแบบ Y ข้อเสียของระบบการต่อแบบ Δ คือ การต่อแบบนี้ขาดความสมมาตร เมื่อเทียบกับกระแสและแรงดัน ดังนั้นในการต่อโหลด 1 เฟส ทำให้เกิดกระแสที่ไม่สมดุลย์ ขณะที่ในระบบการต่อแบบ Y กระแสพอประมาณได้ว่าสมดุลย์ ถ้าต่อโหลด เข้าในเฟสในรูปที่ 2 . แรงดันระหว่างไลน์ C และกราวด์จะเป็น 203 volt แต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์อื่นใด
แรงดันถูกจำกัดอยู่ที่ 120 volt ในการต่อแบบ Y การ shock hazard ก็เพิ่มขึ้นใน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การต่อแบบ y ซึ่งทำให้ต้องใช้สายที่แพงขึ้น

การวิเคราะห์การต่อแบบ Y - Δ และ Δ - Y ใช้พื้นฐานความสัมพันธ์เบื้องต้นของ วงจรแบบ Δ และ Y พิจารณารวมกับ ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันระหว่างด้าน primary และ secondary การต่อแบบ Δ - Y แสดงในรูปที่ 3-7a

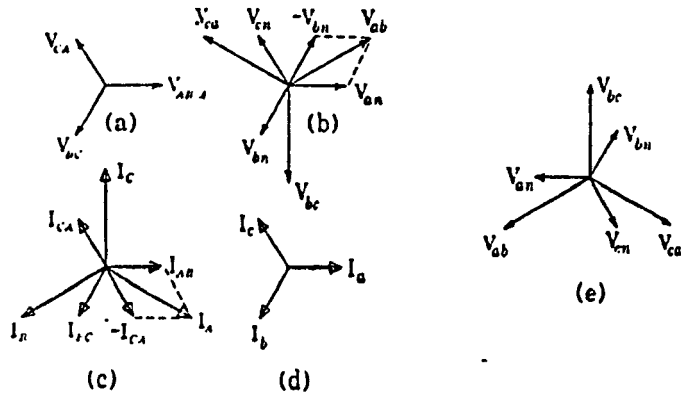


รูปที่ 3-7 การต่อแบบ Δ-y

แรงดันที่ด้าน y ของหม้อแปลง จะเท่ากับแรงดันไลน์ ที่สภาพสมดุลย์ รูปเวกเตอร์ แสดงลำดับตามเฟส ABC เป็นดังรูป 3-8a แรงดันด้าน Y ของหม้อแปลงจะเท่ากับแรงดันเฟส เวกเตอร์ของแรงดันด้าน ๆ แสดงในรูป 3-8b ซึ่งเปรียบเทียบกับรูป 3-4b หน้า ที่ สภาพสมดุลย์ เมื่อลำดับของเฟสเป็น abc แรงดันไลน์ เท่ากับ

$$V_{ab} = \sqrt{3} V_{an} \quad 30^\circ \quad (3-24)$$

ดังรูป 3-3b แรงดัน drop เนื่องจาก leakage impedance น้อย แรงดันที่เข้า ด้าน primary และ secondary ของหม้อแปลงเกือบ inphase กัน เมื่อการต่อเป็นดังรูป 3-7a แรงดันเฟสของ Y เกือบ inphase กับแรงดันไลน์ V_{AB} ด้าน Δ ดังรูป 3-8b ดังนั้น แรงดันไลน์ V_{ab} ในด้าน Y มีเฟสนำหน้าแรงดัน V_{AB} ทางด้าน Δ ประมาณ 30°



รูปที่ 3-8 แสดงเวกเตอร์ของการต่อแบบ Δ-y

การต่อแบบ Y จะเป็นดังรูป 3-7b ซึ่งทิศของ neutral จะกลับทิศกับการต่อในรูป 3-7a แรงดันของการต่อแบบ Y แสดงในรูป 3-8c ซึ่งจะมีเฟสตรงข้ามกับรูป 3-8b แรงดันไลน์ ด้าน Y V_{ab} lag แรงดันด้าน Δ V_{AB} 150° และแรงดันไลน์ V_{CA} Lag แรงดันไลน์ V_{AB} 30°

มุมเฟสระหว่างแรงดันไลน์ของด้าน primary และ secondary จะเป็น 30° ซึ่งเป็นเฟส displacement ที่น้อยที่สุด ซึ่งจะมีทั้ง lead และ lag ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของการต่อด้าน primary และ secondary เมื่อเทียบการต่อแบบ $\Delta - \Delta$ หรือ $Y - Y$ ซึ่งแรงดันไลน์ด้าน primary และ secondary เกือบ inphase กัน เมื่อต่อขั้วเหมือนกัน เนื่องจากมีความแตกต่างของเฟส การต่อแบบ $Y - \Delta$ หรือ $\Delta - Y$ ไม่ควรขนานเข้ากับ การต่อแบบ $\Delta - \Delta$ หรือ $Y - Y$

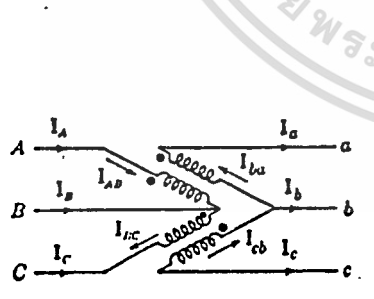
ในด้านที่ต่อแบบ Y กระแสใหม่หรือแปลงจะเท่ากับกระแสไลน์ ที่สภาวะสมดุลและ power factor = 1 รูปเวกเตอร์แสดงดังรูป 3-8d เมื่อกระแสด้าน Y สมดุลและเป็นรูป ซ้ายัน ผลรวมของกระแสทางเวกเตอร์ทุกเฟส ดังนั้น ไม่มีกระแสไหลในสาย neutral แสดงด้วยเส้นปะในรูปที่ 3-7 เวกเตอร์ของกระแสด้าน y แสดงในรูป 3-8c ถ้าไม่คิดกระแส exciting กระแสด้าน primary และ secondary จะสร้าง mmf ที่มีขนาดเท่ากันแต่ทิศ ทางตรงข้ามกัน

เมื่อหม้อแปลงทั้ง 3 เฟสมี trun ratio เท่ากัน และแรงดันไลน์ด้าน Δ สมดุลย์ แรงดันเฟสของด้าน Y ต้องสมดุลด้วย เมื่อคิดว่าแรงดัน drop เนื่องจาก leakage impedance มีค่าน้อย เทียบกับการต่อแบบ $Y - Y$ ที่ไม่ต่อ neutral ทุแรงดันเฟสขึ้นอยู่กับ

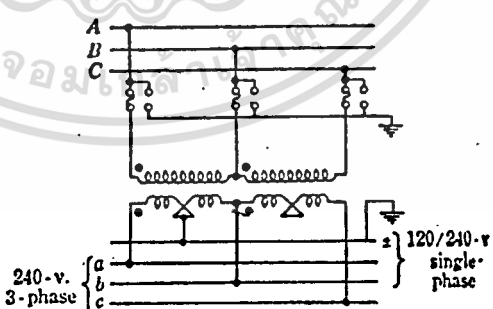
กระแส exciting ของแต่ละตัว ถ้าแรงดันไลน์ด้าน Y สมดุลย์กระแสด้าน y ก็จะสมดุลย์ด้วย กระแสด้าน Δ ที่ไม่สมดุลย์ อาจเกิดจากความแตกต่างของกระแส excite เมื่อเปรียบเทียบ การต่อแบบนี้ กับการต่อแบบ $\Delta - \Delta$ ซึ่งกระแสขึ้นอยู่กับ equivalent impedance ของหม้อ แปลง

ดังนั้นที่แรงดันไลน์และกระแสไลน์สมดุลย์ การต่อแบบ Δ ทำให้แรงดันเฟสของ Y สมดุลย์ ขณะที่การต่อแบบ Y ทำให้กระแสใน Δ สมดุลย์สิ่งเหล่านี้เป็นข้อดีของการต่อแบบ $\Delta - Y$ และ Y- Δ เนื่องจากหม้อแปลงทั้ง 3 ตัว ที่มีพิกัดแรงดันและกระแสเดียวกัน จะแบ่งกันรับโหลด เท่าๆ กัน ถึงแม้ว่า equivalent impedance และกระแส excite จะไม่เท่ากันบ้าง

การต่อแบบ V หรือ open delth หม้อแปลงที่ identical กัน เมื่อนำมาต่อแบบ y ก็จะให้ลักษณะการต่อที่สม มาตรา ซึ่งการต่อส่วนใหญ่จะเป็นแบบนี้ ถึงแม้ว่าการต่อแบบ V หรือ open delth เป็นแบบ ไม่สมมาตร ซึ่งใช้หม้อแปลงเพียง 2 ตัว รูปการต่อแบบ open delth แสดงในรูป 3-9 และรูปแสดงการติดตั้ง เพื่อให้จ่ายไฟแก่โหลด 240 V 3 เฟส และ 120/240 V เป็นดังรูป 3-10



รูปที่ 3-9 การต่อแบบวี



รูปที่ 3-10 การต่อแบบวีจากระบบให้ได้

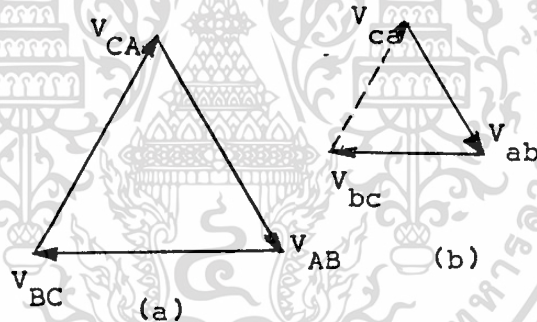
O/P 120/240 โวลท์

การต่อแบบ open delta ก็คือการต่อแบบ $\Delta - \Delta$ ที่เอาหม้อแปลงออก 1 ตัว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ยังสามารถ จ่ายโหลด 3 เฟสได้อยู่ ถึงแม้ว่าความสามารถในการจ่ายโหลดจะลดลงไปบ้าง

การออกแบบนี้ ไม่เพียงแต่ใช้ในยามฉุกเฉินเมื่อหม้อแปลงตัวใดตัวหนึ่งเสียไปเท่านั้น แต่ยังคงติดตั้งในพื้นที่ที่คาดว่าโหลดจะเพิ่มขึ้น เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นเกินความสามารถที่จะจ่ายได้ หม้อแปลงตัวที่ 3 ก็จะได้ใส่เข้าไป เปลี่ยนการต่อแบบ open delta เป็นการต่อแบบ $\Delta-\Delta$

ถึงแม้ว่าหม้อแปลงที่ต่อร่วมเฟส CA ในการต่อแบบ $\Delta-\Delta$ จะไม่มีการต่อแบบ open delta แรงดันไลน์ด้าน secondary ก็สมดุลย์ ถ้าแรงดันไลน์ด้าน primary สมดุลย์ ในระบบ 3 เฟสใด ๆ ผลรวมทางเวกเตอร์ของแรงดันไลน์เมื่อเป็น cyclic order ต้องเป็น 0 ดังนั้นเวกเตอร์ที่แทนแรงดันไลน์ สามารถเขียนเป็นรูปสามเหลี่ยม ถ้าแรงดันด้าน primary สมดุลย์ ถ้าแรงดันด้าน primary แทนด้วยเวกเตอร์เป็นรูปสามเหลี่ยม ดังรูป 3-11a แรงดันไลน์ด้าน secondary V_{ab} และ V_{bc} ได้จากด้าน secondary ของหม้อแปลงทั้งสองตัว



รูปที่ 3-11 เวกเตอร์ของแรงดันของการต่อแบบวี

ที่ no-load แรงดันด้าน secondary inphase และมีขนาดเท่ากับแรงดันด้าน primaryหารด้วย ratio a แรงดันด้าน secondary เหล่านี้แสดงด้วยเส้นทึบ ในรูป 3-11b แรงดันไลน์ด้าน secondary V_{ca} เป็นด้านปิดของสามเหลี่ยม แสดงด้วยเส้นปะ ในรูป 3-11b

จากความเหมือนกันของแรงดันด้าน primary และ secondary ในรูปสามเหลี่ยม เมื่อ no-load แรงดันไลน์ด้าน primary สมดุลย์ แรงดันไลน์ด้าน secondary ก็สมดุลย์ เนื่องจากการต่อที่ไม่สมมาตรกัน เมื่อเทียบกับแรงดันไลน์ ทั้ง 3 แรงดันที่ drop เนื่องจาก equivalent impedances ในหม้อแปลง จะทำให้แรงดันด้าน secondary ไม่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เมื่อรับโหลด แต่มีผลเล็กน้อยมาก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูป 11 แสดงกระแสด้าน primary ในหม้อแปลงเท่ากับกระแสในไลน์ A และ C และกระแสด้าน secondary เท่ากับกระแสไลน์ A และ C ดังนั้นถ้า V_2 และ I_2 เป็นพิกัดแรงดันและกระแสทางด้าน secondary ของหม้อแปลงแต่ละตัว ในการต่อแบบ open delta ซึ่งเป็นค่าเต็มพิกัดของแรงดันไลน์ และกระแสไลน์เมื่อโหลดสมดุล ดังนั้นพิกัดของการต่อแบบ 3 เฟส คือ $\sqrt{3}V_2 I_2$ Volt-ampere

พิกัดของหม้อแปลง 2 ตัว ที่นำมาต่อกันจะเป็น $V_2 I_2$ ดังนั้นพิกัดของการต่อ 3 เฟส จะเป็น $\sqrt{3} V_2 I_2$ ซึ่งน้อยกว่าพิกัดการต่อของ 1 เฟส 2-ตัว ด้วยอัตราส่วน

$$\frac{\text{พิกัด KVA ของการต่อ 3 เฟส}}{\text{ผลรวมของพิกัด KVA ของหน่วยที่ติดตั้งเข้าไป}} \quad (3-25)$$

อัตราส่วนนี้เรียกว่า apparatus economy หรือ utilization factor ของการต่อ ดังนั้น สำหรับการต่อแบบ open delta ของหม้อแปลงที่ identical กัน จ่ายให้กับโหลดที่สมดุลย์ 3 เฟสได้

$$\text{Apparatus economy} = \frac{\sqrt{3} V_2 I_2}{2 V_2 I_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.866 \quad (3-26)$$

นั่นคือ การต่อแบบ open delta ของหม้อแปลงที่ identical กัน ที่โหลดเต็มที่เมื่อจ่ายให้กับโหลดที่สมดุลย์ 3 เฟส จะจ่ายได้ 86.6% ของพิกัด KVA ทั้งหมดของหม้อแปลงที่ติดตั้งเข้าไป ดังนั้นในการต่อแบบ V จึงมีความจำเป็นต้องติดตั้งหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อเทียบกับการต่อแบบ $\Delta - \Delta$ ที่พิกัดโหลดเดียวกัน ข้อนี้เป็นข้อเสียของการต่อแบบ open delta เมื่อเทียบกับการต่อที่สมมาตรแบบอื่น ๆ

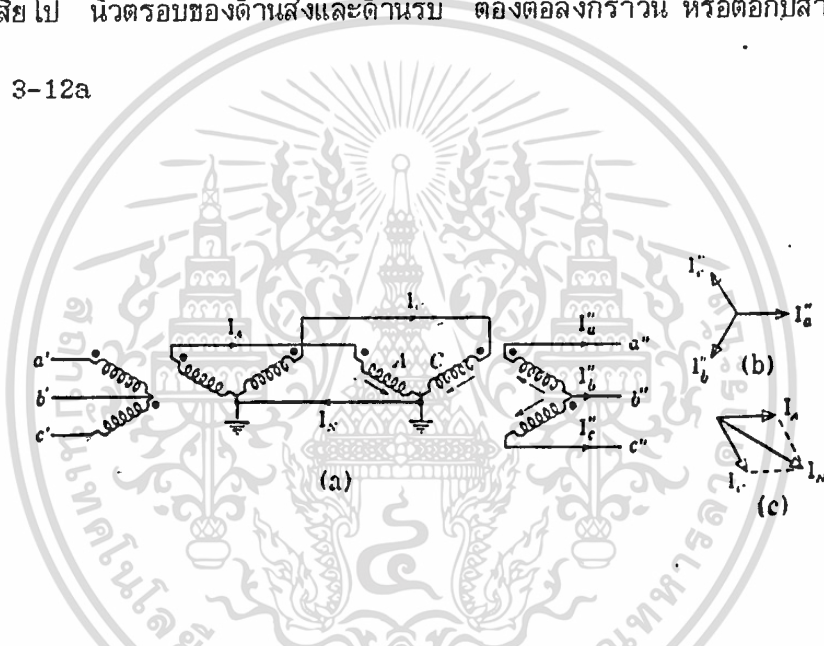
เนื่องจาก apparatus economy ของการต่อแบบ V น้อยกว่าการต่อแบบ $\Delta - \Delta$ การนำหม้อแปลงที่เสียออกไปจากการต่อแบบ $\Delta - \Delta$ จะลดความสามารถในการจ่ายโหลดลงมากกว่าพิกัด KVA ของหม้อแปลงที่นำออกไป ในการต่อแบบ $\Delta - \Delta$ เมื่อโหลดสมดุลย์ effective value ของกระแสในหม้อแปลงจะเท่ากับ $\sqrt{3}$ เท่าของ effective value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ในประโยชน์อื่นโดยเด็ดขาด ของกระแสในหม้อแปลง ขณะที่การต่อแบบ open delta กระแสไลน์เท่ากับกระแสในหม้อแปลง ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการต่อหม้อแปลง 2 ตัวแบบ open delta มีพิกัด KVA ของ 3 เฟส เป็น $1/\sqrt{3}$ หรือ 0.577 ของพิกัดการต่อแบบ $\Delta - \Delta$ ของหม้อแปลง 3 ตัว ที่ identical กัน

6. การต่อแบบ $\Delta - Y$ และ $Y - \Delta$ ใช้ในเวลาฉุกเฉิน

ในสายส่งเมื่อต้องการ step up ที่ปลายสุดของด้านส่ง จะต่อแบบ $\Delta - Y$ และเมื่อต้องการ step down ที่ปลายด้านรับ จะต่อแบบ $Y - \Delta$ ก็ยังสามารถทำงานได้ ถ้าเฟสใดเฟสหนึ่งเสียไป นิวตรอนของด้านส่งและด้านรับ ต้องต่อลงกราวด์ หรือต่อกับสายนิวตอลก็จะยิ่งดี ดังรูป 3-12a



รูปที่ 3-12 a) แสดงการต่อแบบ $\Delta - y$ และ $y - \Delta$ ในกรณีฉุกเฉิน
 b) เวกเตอร์ของกระแสด้าน secondary
 c) เวกเตอร์ของกระแสด้านแรงสูง

ระบบไม่สมมาตร ดังนั้น impedance drop ไม่สมดุล แต่ผลของ impedance drop มักจะน้อย แรงดันที่ด้าน secondary ของการต่อแบบ step down อาจไม่สมดุล รุนแรงมาก แต่กระแสในสายส่งไม่สมดุล ถ้ากระแสที่สมดุล ส่งให้กับโหลดด้าน secondary ของการต่อแบบ step down รูปเวกเตอร์ของกระแส secondary แสดงในรูป 3-12b เมื่อไม่คิดผลของกระแส excite กระแสใน primary และ secondary สร้าง mmf ที่มีขนาดเท่ากันแต่มีทิศตรงข้ามกัน ดังนั้นสำหรับทิศของกระแส แสดงในรูป 3-12a กระแสด้าน

primary I_A ของ หม้อแปลง A inphase กับกระแสด้าน secondary I_2'' และกระแสด้าน primary I_C ของหม้อแปลง C มีเฟสตรงข้ามกับกระแสด้าน secondary I_4'' ดังรูป 3-12c กระแสนิวตรอล ซึ่งเป็นทางกลับของกระแสไปยังด้านส่ง เป็นผลรวมของกระแสไลน์ด้าน primary ดังรูป 14c เมื่อกระแสด้าน secondary สมดุลย์ effective value ของกระแส neutral จะเป็น $\sqrt{3}$ เท่าของ effective value ของกระแสเฟสในสายส่ง กระแสที่ไม่สมดุลย์ในสายส่งเหล่านี้ อาจจะสร้างแรงดันเหนี่ยวนำรบกวนระบบสื่อสารได้



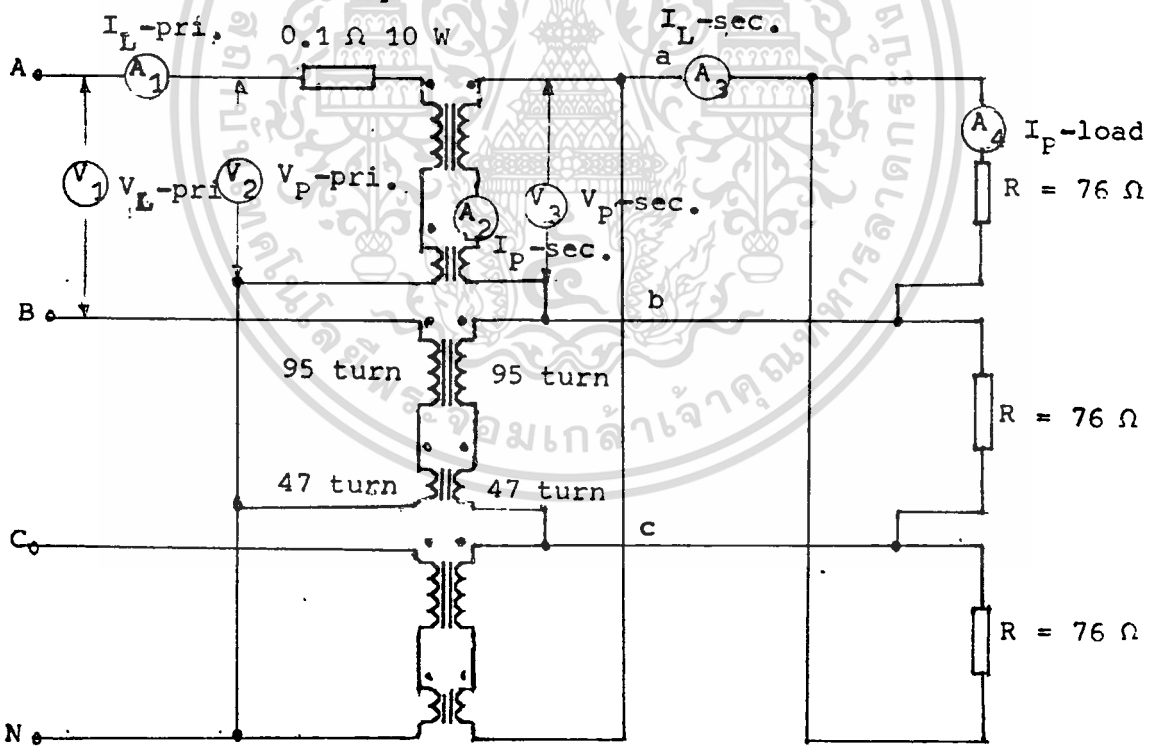
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองหาความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันในการต่อหม้อแปลงแบบต่าง ๆ จะนำเสนอเฉพาะวงจรหลัก ๆ เช่น วงจร $\Delta - \Delta$, วงจร $Y - Y$ ต่อนิวตรอลกับ source และวงจร $Y - \Delta$

จากที่ทราบมาแล้วว่าขดลวดของหม้อแปลงที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะดังนี้คือ ขดลวด มี 7 ขด ขดละ 95 รอบซึ่งรับไฟได้ 155 โวลท์มี 2 ขด ขดละ 47 รอบ ซึ่งรับไฟได้ 76 โวลท์ มี 2 ขด ขดละ 14 รอบมี 2 ขด ขดละ 7 รอบมี 1 ขด เมื่อทำ polarity test (ดูบทที่ 5) หาต้นขดลวด (dot) และปลายขดลวด (bank) ได้แล้ว ถ้านำขด 95 รอบอนุกรมกับขด 47 รอบ จะสามารถรับไฟได้ 220 โวลท์ ซึ่งขด 14 รอบ และขด 7 รอบ คิดเป็น 10% และ 5% ตามลำดับ

ในการต่อวงจรและติดตั้งเครื่องมือวัด เมื่อวัดขนาดและ waveform จะสำคัญ

จากวงจร $Y - \Delta$ มีลักษณะดังรูป 4-1



รูปที่ 4-1 วงจร $Y - \Delta$

ในการวัดขนาดของกระแสในไลน์และในเฟส สามารถทำได้ตามรูป 4-1 ในส่วนของกระแสเฟส นำแอมป์มิเตอร์ อนุกรมระหว่างขด 95 รอบและ ขด 47 รอบ

ส่วนการวัด waveform ของกระแส นำ R ขนาด 0.1 Ω 10 W อนุกรมเข้าไป

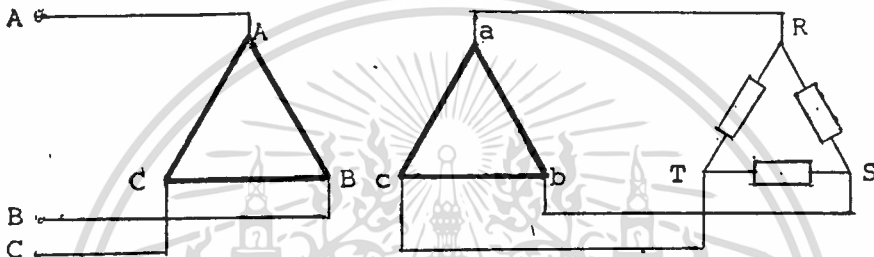
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นไปใช้ข่มขืนผิดในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับส่วนที่ต้องการวัด waveform R ที่ใช้ต้องมีขนาดเล็ก เล็กเท่าไรก็ยิ่งดี เพื่อป้องกัน R ไปมีผลต่อส่วนอื่น ๆ ของวงจร ในรูป 4-1 เป็นการวัด waveform ของกระแสไลน์ A ทางด้าน primary

โหลดที่ใช้ในการทดลองทุกวงจร ใช้โหลด R ขนาด 76 โอห์ม ซึ่งสมมูลยั้ง 3 เฟส

ผลการทดลอง

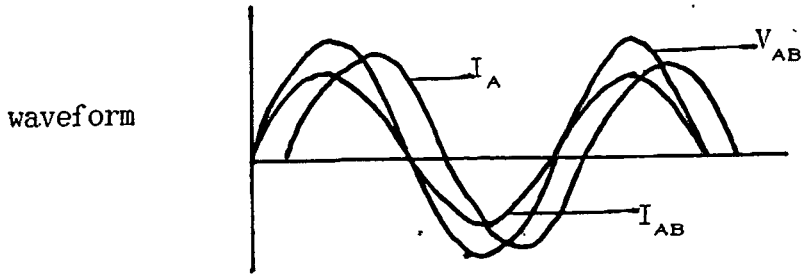
1. วงจร $\Delta - \Delta$



รูปที่ 4-2

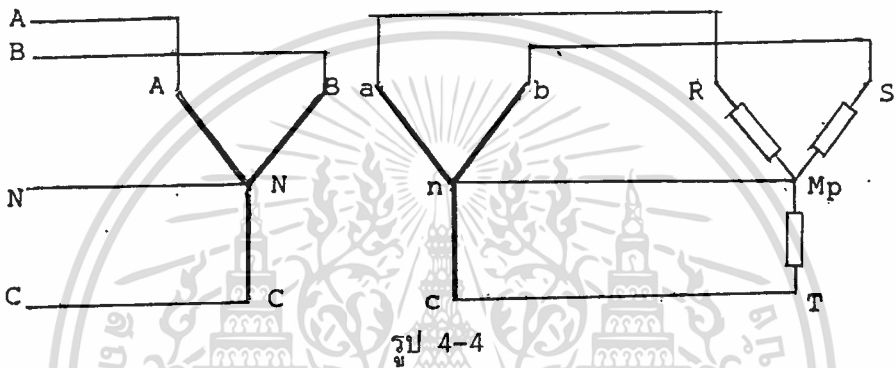
ตารางผลการทดลอง

ตาราง ที่ 4-1	V-Line			V-Phase			I-Line				I-Phase		
	AB ab RS	BC bc ST	CA ca TR	AN an RMp	BN bn SMp	CN cn TMp	A a R	B b S	C c T	N n Mp	AB ba RS	BC cb ST	CA ac TR
PRI.	219	220	213	-	-	-	4.90	4.80	4.35	-	2.80	2.7	2.65
SEC.	218	220	217	-	-	-	4.45	4.45	4.50	-	2.70	2.6	2.75
LOAD	218	220	217	-	-	-	4.45	4.45	4.50	-	2.70	2.57	2.65



จะเห็นว่า V_L , I_L ทาง primary และ secondary จะ inphase กัน และ
กระแสเฟสมีขนาดเป็น $1/\sqrt{3}$ กระแสไลน์ กระแสเฟสทั้ง 2 ด้านก็ inphase กัน

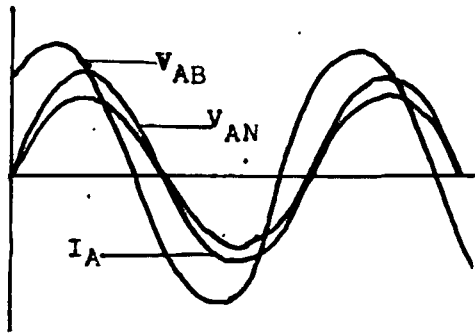
2. วงจร Y - Y ต่อเนิวตรอลกับ source



ตารางผลการทดลอง

ตาราง ที่ 4-2	V-Line			V.Phase			I-Line				I-Phase		
	AB ab RS	BC bc ST	CA ca TR	AN an RMp	BN bn SMp	CN cn TMp	A a R	B b S	C c T	N n Mp	AB ba RS	BC cb ST	CA ac TR
PRI.	385	387	378	220	220	220	2.85	2.75	2.75	0.03	-	-	-
SEC.	385	387	378	220	220	220	2.78	2.65	2.65	0.10	-	-	-
LOAD	385	387	378	220	220	220	2.78	2.65	2.68	0.10	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-5

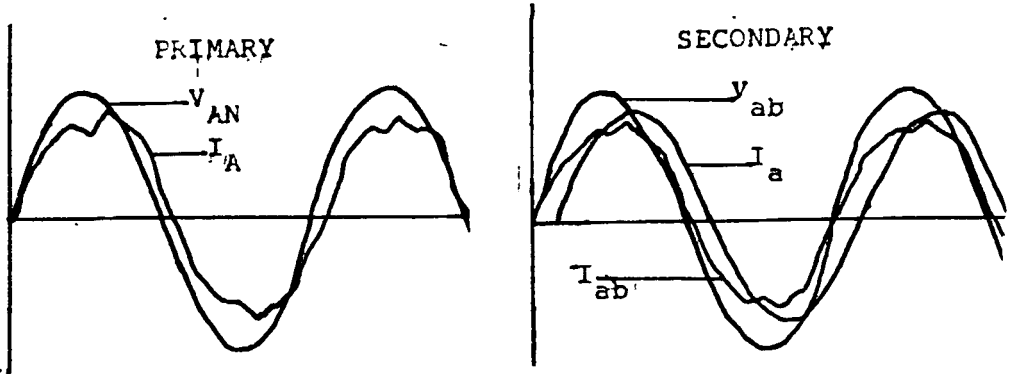
ในการต่อแบบ Y - Y ต่อนิวตรอลกับ source กระแสในเฟสเท่ากับกระแสในไลน์
 กระแสในไลน์ A ด้าน pri. inphase กับกระแสในไลน์ a ด้าน secondary ขนาดของแรง
 ดัน V_L (V_{AB}, V_{BC}, V_{CA}) เป็น $\sqrt{3}$ เท่า V_P (V_{AN}, V_{BN}, V_{CN})

3. วงจร Y - Δ

ซึ่งลักษณะการต่อเช่นเดียวกับแบบที่สาริตในรูป 4-1

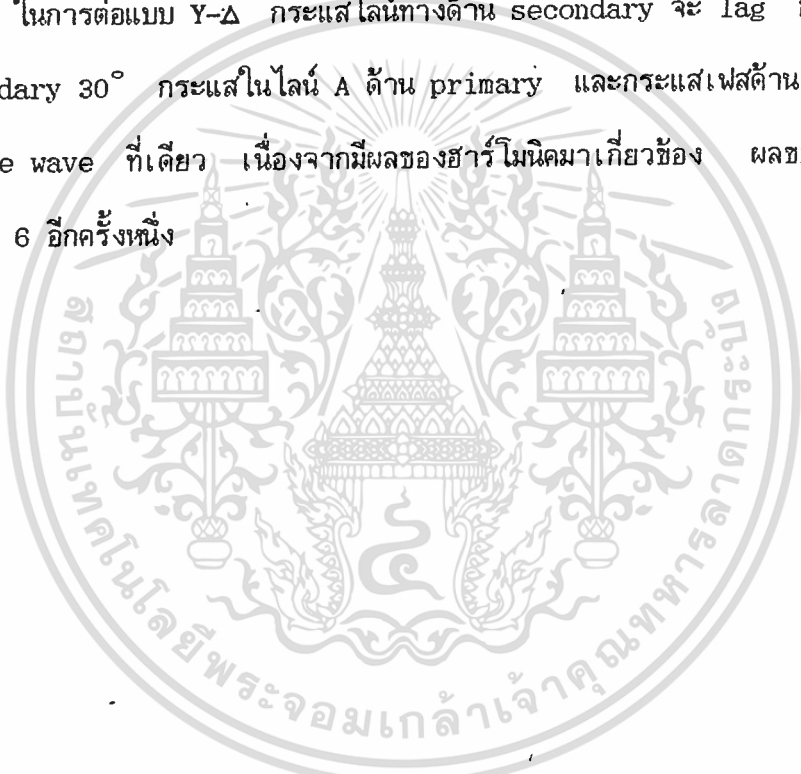
ตารางการทดลอง

ตาราง ที่ 4-3	V-Line			V.Phase			I-Line				I-Phase		
	AB ab RS	BC bc ST	CA ca TR	AN an Rmp	BN bn Smp	CN cn Tmp	A a R	B b S	C c T	N n Mp	AB ba RS	BC cb ST	CA ac TR
PRI.	380	380	370	220	225	222	3.02	2.72	2.67	0.74	-	-	-
SEC.	218	220	213	-	-	-	4.8	4.6	4.62	-	2.90	2.65	2.90
LOAD	-	-	-	-	-	-	4.8	4.6	4.62	-	2.70	2.60	2.67



รูปที่ 4-6

ในการต่อแบบ Y- Δ กระแสในทางด้าน secondary จะ lag กระแสเฟสทางด้าน secondary 30° กระแสในไลน์ A ด้าน primary และกระแสเฟสด้าน secondary ไม่เป็น sine wave ที่เดียว เนื่องจากมีผลของฮาร์โมนิคมาเกี่ยวข้อง ผลของฮาร์โมนิคจะกล่าวในบทที่ 6 อีกครั้งหนึ่ง



บทที่ 4

การสูญเสียในแกนเหล็ก

กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงซึ่งไม่มีภาระไฟฟ้า ก็คือกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ส่วนคือ กำลังไฟสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) กำลังไฟสูญเสียที่ความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิ และ dielectric loss ในฉนวน

เนื่องจากในขณะที่ใช้ภาระไฟฟ้านั้น กระแสที่ไหลทางด้านปฐมภูมิมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับกระแสฟลักซ์และค่าความต้านทานของขดลวดก็มีค่าต่ำ การสูญเสียในส่วนนี้จึงน้อยมาก ส่วนการสูญเสียเนื่องจาก dielectric loss นี้จะต้องคำนึงถึงเมื่อหม้อแปลงเป็นแบบไฟฟ้าแรงสูงเท่านั้น

เฉพาะการสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงเองนั้นแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ การสูญเสียเนื่องจาก hysteresis และการสูญเสียเนื่องจาก eddy current การสูญเสียเนื่องจาก hysteresis นี้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่และกำลัง 1.6 ของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดของหม้อแปลงนั้น ดังสมการ

$$P_h = K_h f B_m^{1.6} \tag{4-1}$$

ส่วนการสูญเสียเนื่องจาก eddy current นั้น เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลัง 2 ของความถี่และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด

$$P_e = K_e f^2 B_m^2 \tag{4-2}$$

เมื่อ P_h = กำลังสูญเสียเนื่องจาก hysteresis ของหม้อแปลง

P_e = กำลังสูญเสียเนื่องจาก eddy current ที่แกนเหล็ก

k_h = ค่าคงที่อันเนื่องมาจาก P_h

k_e = ค่าคงที่อันเนื่องมาจาก P_e

f = ความถี่ไฟที่ป้อนให้หม้อแปลง

B_m = ความหนาแน่นสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็กในหม้อแปลง

$$E = 4.44 N \phi_m f \tag{4-3}$$

เมื่อ E = แรงเคลื่อนไฟที่เหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวด

N = จำนวนรอบของขดลวดนั้น ๆ

ϕ_m = เส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดที่คล้องขดลวดนั้น ๆ

f = ความถี่ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าหม้อแปลง

จากสมการ (3-3) เมื่อให้ f มีค่าคงที่ จะได้

$$E \propto \phi_m$$

โดยที่ $B_m = \phi_m / A$ เมื่อ A เป็นค่าคงที่

$$E \propto B_m$$

$$\tag{4-4}$$

ในกรณีที่ทางทุติยภูมิของหม้อแปลงเปิดวงจรนั้น จะได้ค่าแรงเคลื่อนไฟที่เหนี่ยวนำขึ้นทางปฐมภูมิ ซึ่งเป็นแรงเคลื่อนสวน (counter electromotive force) มีค่าใกล้เคียงกับแรงเคลื่อนไฟที่ใส่เข้าไป ทั้งนี้เพราะ impedance drop ที่เกิดขึ้นขณะไม่มี load มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับไฟที่ใส่เข้าไป

การหาค่ากราฟของการสูญเสียที่แกนเหล็ก กับแรงเคลื่อนไฟที่ใส่เข้าไป เมื่อความถี่คงที่นั้น ทำได้โดยการวัดกำลังไฟที่ใส่ให้กับหม้อแปลง และวัดแรงเคลื่อนไฟที่หม้อแปลงได้รับทางปฐมภูมิ รวมทั้งกระแสด้วย ในขณะที่ทางทุติยภูมิเปิดวงจรส่วนทางปฐมภูมินั้น จะปรับค่าแรงเคลื่อนไฟหลาย ๆ ค่า เช่นอาจจะเริ่มตั้งแต่ 0 ไปจนถึง 150% ของแรงเคลื่อนตามพิกัดของด้านนั้น ๆ ทั้งนี้ต้องให้ความถี่คงที่ โดยทั่ว ๆ ไป เครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้วัดนี้ควรต่อทางด้านไฟแรงต่ำเพื่อความปลอดภัยและทำให้ได้กระแสผ่านวัตต์มิเตอร์มากยิ่งขึ้น ในขณะที่เดียวกันวัตต์มิเตอร์ที่ใช้ก็ควรเป็นแบบ low power factor ทั้งนี้เพื่อให้อ่านค่าได้ละเอียดขึ้น ปกติแล้วถ้าใช้วัตต์มิเตอร์แบบธรรมดาจะอ่านค่าวัตต์ได้ต่ำและไม่ละเอียด

การแยกการสูญเสียกำลังที่แกนเหล็ก

วิธีการแยกการสูญเสียที่แกนเหล็กออกเป็น hysteresis และ eddy current loss นั้น ทำได้โดยการปรับความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีความเร็วต่าง ๆ กันไป ซึ่งจะทำให้ได้ความถี่และแรงเคลื่อนแตกต่างกันไปโดยที่สนามกระตุ้นยังคงที่

จากสมการ (3-1) และ (3-2) จะได้

$$P_h + P_e = P_{h+e} = k_h f B_m^{1.6} + k_e f^2 B_m^2 \quad (4-5)$$

เมื่อ $B_m = KE/f \quad (4-6)$

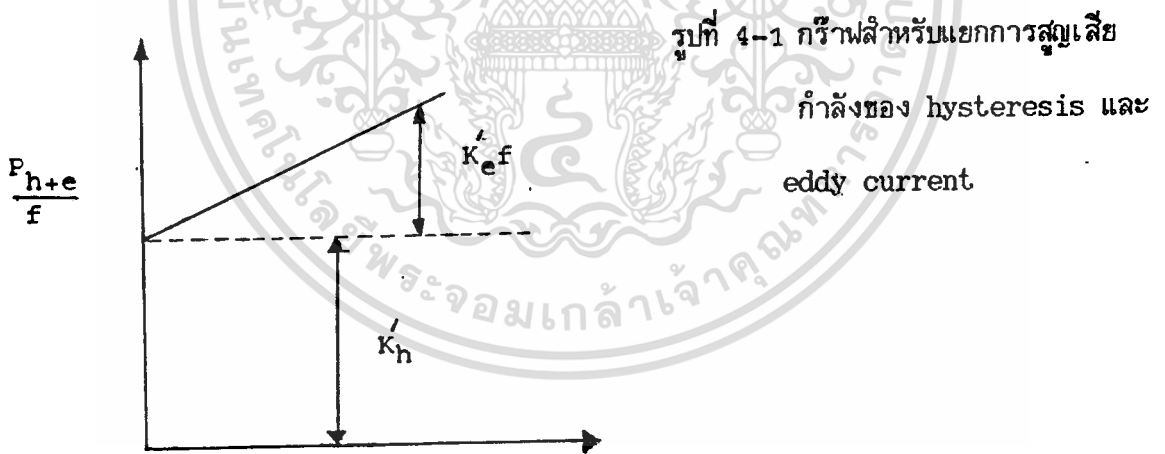
$$k = 1/4.44 NA$$

ให้ B_m คงที่

$$P_{h+e} = K'_h f + K'_e f^2 \quad (4-7)$$

$$P_{h+e}/f = k'_h + k'_e f \quad (4-8)$$

จากสมการ (3-8) จะได้กราฟดังรูปที่ 4-1



จากรูปที่ 4-1 นี้ ทำให้หาค่าการสูญเสียกำลังที่แยกกันและที่รวมกันได้ ความถี่ต่าง ๆ ตามที่ต้องการได้ดังนี้

การสูญเสียกำลังเนื่องจาก hysteresis ที่ความถี่ $f = k'_h/f$

การสูญเสียกำลังเนื่องจาก eddy current ที่ความถี่ $f = k'_e/f^2$

การสูญเสียกำลังเนื่องจาก hysteresis กับ eddy current = $(P_{h+e}/f) \cdot f$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยที่ k'_h , k'_e และ P_{h+e}/f หาได้โดยการวัดจากรูป ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4-6) B_m จะคงที่เมื่ออัตราส่วนของ E/f คงที่

การหาด้วยกำลังของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุดจากสมการ hysteresis จะหาได้จากเส้นกราฟระหว่างกำลังที่สูญเสียไปในแกนเหล็กกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงที่ความถี่คงที่ตามปกติ และจากค่าของการสูญเสียกำลังของ eddy current ที่เกิดของแรงเคลื่อนและความถี่ (จากการแยกของการสูญเสียไปในแกนเหล็ก)

ถ้ารู้ค่าการสูญเสียกำลังของ eddy current ที่ค่าแรงเคลื่อนและความถี่กำหนดไว้ค่าหนึ่ง ก็ย่อมจะหาการสูญเสียกำลังของ eddy current ที่ค่าแรงเคลื่อนใดก็ได้ที่ความถี่เดียวกันดังสมการ (4-9)

$$P_{e1}/P_{e2} = B_{m1}^2/B_{m2}^2 = E_1^2/E_2^2 = V_1^2/V_2^2 \quad (4-9)$$

เมื่อ P_{e1} เป็นการสูญเสียของ eddy current ที่ความถี่และแรงเคลื่อนที่เกิด V_1
และ P_{e2} " " " " " " " V_2
(V_2 นี้ ไม่ได้หมายถึง terminal voltage ทางทุติยภูมิ)

การสูญเสียกำลังนี้หาได้จากความสัมพันธ์ตามสมการ (4-9) ที่ค่าแรงเคลื่อนเท่าใดก็ได้ ที่ได้จากเส้นกราฟของการสูญเสียในแกนเหล็ก ส่วนการสูญเสียกำลังของ hysteresis ที่ค่าแรงเคลื่อนต่าง ๆ หาได้จาก

$$P_h = P_{h+e} + P_e \quad (4-10)$$

$$= k_h f B_m \quad (\text{Watt}) \quad (4-11)$$

จากสมการ (4-6) เมื่อให้ f คงที่

$$B_m \propto E \quad \text{หรือ} \quad B_m = k' E$$

$$P_h = k''_h E^x \quad (4-12)$$

$$\log P_h = \log k''_h + x \log E \quad (4-13)$$

เมื่อนำสมการที่ (4-13) ไปพล็อตในกระดาษที่เป็น log scale จะสามารถหา

x ได้ โดยที่ x เป็น slope ของเส้นตรง $\log E$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงวันวิสาขบูชาหรือการแข่งขึ้นเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวทางการทดลอง

การทดลองในบทนี้เป็นการศึกษาถึง core loss ของหม้อแปลงซึ่งเกี่ยวข้องกับ ความถี่และโวลต์เตจของไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลง จากสมการที่ (4-3), (4-4), (4-5) แสดงให้เห็นว่า Core loss นี้ขึ้นอยู่กับ B_m , f และ E

การทดลองอาจแบ่งออกเป็น 3 การทดลองดังนี้

การทดลองที่ 1 เป็นการทำให้ Core loss test

วัตถุประสงค์ 1. เพื่อหาค่า K_h , K_e ในสมการที่ (4-5) ซึ่งทำให้สามารถแยก core loss ออกเป็น hysteresis loss กับ eddy current loss ได้

การทดลองที่ 2 Core loss เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า f โดยให้ E คงที่

วัตถุประสงค์ - เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้น เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่แรงเคลื่อนไฟฟ้า คงที่ เช่นผลต่อ core loss, วงจรสมมุติ

การทดลองที่ 3 Core loss เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า E โดยให้ f คงที่

วัตถุประสงค์ - เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นเมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง ในขณะที่ความถี่คงที่

หมายเหตุ

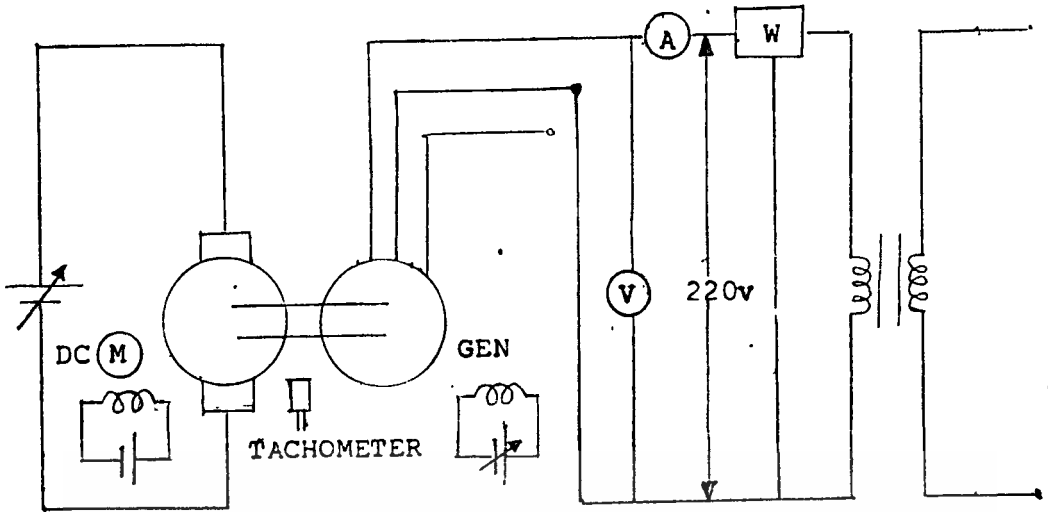
1. ในการทดลองนี้จะทำกับหม้อแปลง 1 เฟส เท่านั้น
2. ขดลวดที่ใช้ทดลองเป็นด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงคือขด 95 รอบ

การทดลองที่ 1 Core loss test

อุปกรณ์การทดลอง

1. ชุด dc shunt motor และ synchronous generator
2. Low power factor wattmeter
3. AC Ammeter
4. AC Voltmeter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-2 วงจรที่ใช้ทดลอง

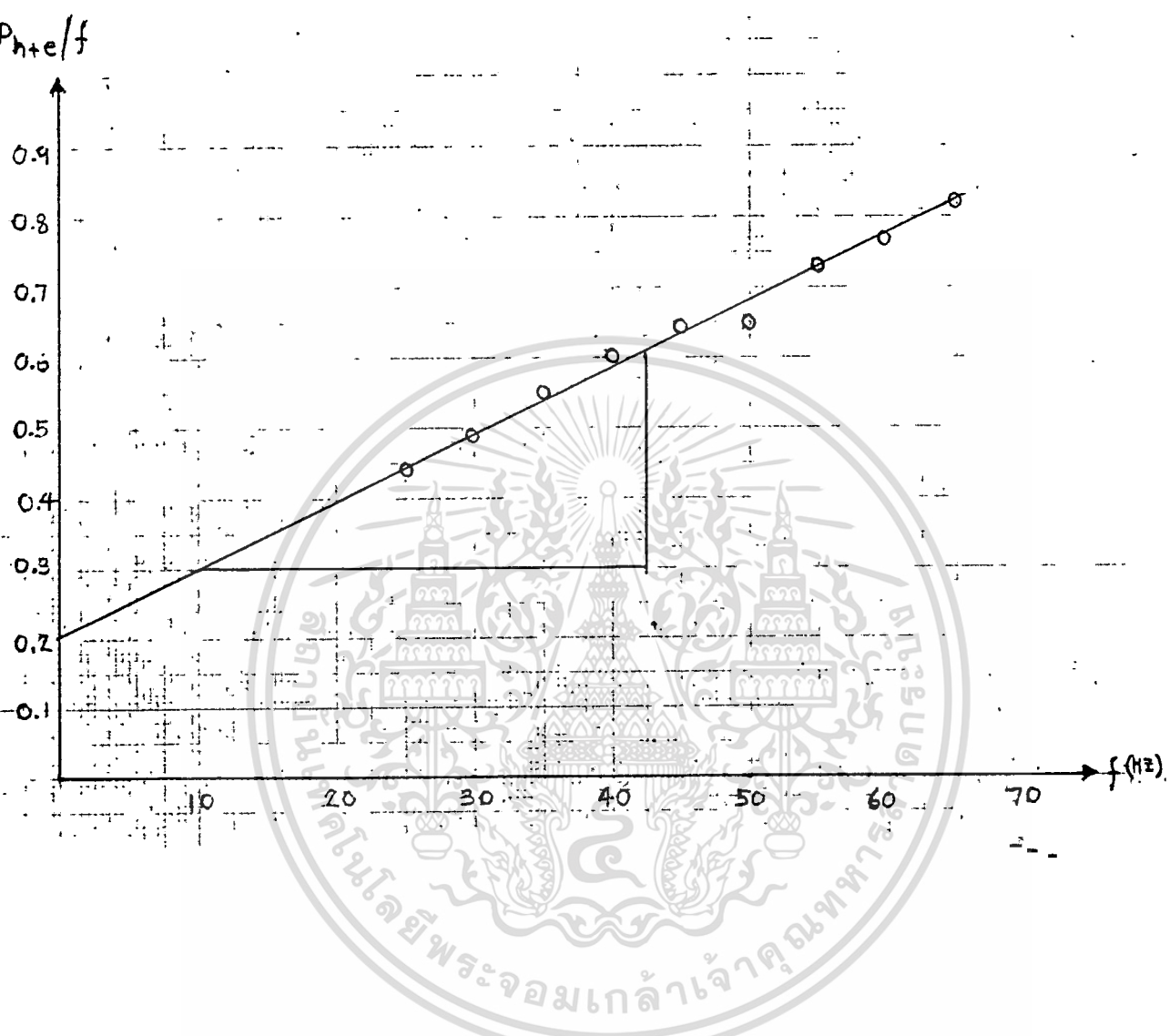
ขั้นตอนการทดลอง

1. Run ชด dc shunt motor และ synchronous generator ปรับความถี่ไฟและโวลต์เตจที่ได้จาก alternator ให้เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ ของค่าพิกัด ซึ่งในที่นี้อยู่ในช่วง 50 - 130 %
2. นำ output voltage ที่ได้จากข้อ 1 ป้อนให้กับด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง
3. บันทึกค่า V_{oc} , I_{oc} , W_{oc}
4. คำนวณหาค่า P_{h+e}/f
5. เขียนกราฟระหว่าง P_{h+e}/f กับ f

ตารางที่ 4-1

% rated	f (Hz)	V _{oc} (V)	I _{oc} (A)	P _{h+e} (W)	P _{h+e} /f
50	25	77.5	0.505	11.1	0.444
60	30	93.0	0.525	14.8	0.493
70	35	108.5	0.550	19.2	0.548
80	40	124.0	0.570	24.0	0.600
90	45	139.5	0.595	28.8	0.640
100	50	155.0	0.615	32.4	0.648
110	55	170.5	0.635	40.02	0.728
120	60	186.0	0.650	46.6	0.777
130	65	201.5	0.720	53.0	0.815

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-3 กราฟระหว่าง P_{h+e}/f กับ f

ของกราฟในรูปที่ 4-3 นั้นเอง ซึ่งพบว่า

$$K'_h = 0.205$$

$$K'_e = 0.61 - 0.3 / 42.5 - 10 = 9.538 \times 10^{-3}$$

แต่จากสมการที่ (4-8) นั้น K'_h และ K'_e เป็นค่าคงที่ที่รวม B_m เข้าไปด้วย

จึงต้องหา K_h, K_e ในสมการที่ (4-5) อีก เอกสารนี้คือเอกสารที่ส่งไปในสมการที่ (4-5) อีก ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก $B_m = E/4.44 NfA \text{ sf.}$

แทนค่า

$E = 155 \text{ V}$

$N = 95 \text{ รอบ}$

$f = 50 \text{ Hz}$

$A = 3" \times 4" \times 2.54^2 \times 10^{-4}$

$\text{s.f.} = 0.95$

ได้ $B_m = 0.9993 \text{ Wb/m}^2$

โดยที่

$K_h' = K_h B_m^{1.6}$

$0.205 = K_h (0.9993)^{1.6}$

$K_h = 0.2052$

และ

$K_o' = K_o B_m^2$

$9.538 \times 10^{-3} = K_o (0.9993)^2$

$K_o = 9.5514 \times 10^{-3}$

ดังนั้นขณะนี้สมการที่ (4-5) เป็นสมการที่สมบูรณ์แล้ว

การทดลองที่ 2 Core loss เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลง แต่แรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่

อุปกรณ์

1. ชุด dc shunt motor และ synchronous generator
2. low power factor wattmeter
3. AC Ammeter
4. AC Voltmeter

รูปแสดงการต่อวงจรคือรูปที่ 4-2

ขั้นตอนการทดลอง

1. Run ชุด dc shunt motor และ synchronous generator ปรับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้วงมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไฟฟ้า output ตามตารางที่ 4-2 โดยที่ค่าของค่าความถี่ไฟ โทนแรงดันคงที่เป็น 155 Volt ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำ Output Voltage จากข้อ 1 ป้อนให้กับด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง
3. บันทึกค่า I_{oc} , W_{oc}
4. คำนวณค่า R_c , X_m ของวงจรสมมูลย์ที่ได้ในแต่ละค่าความถี่
5. เขียนกราฟระหว่าง f กับ I_{oc} , W_{oc} , R_c , X_m

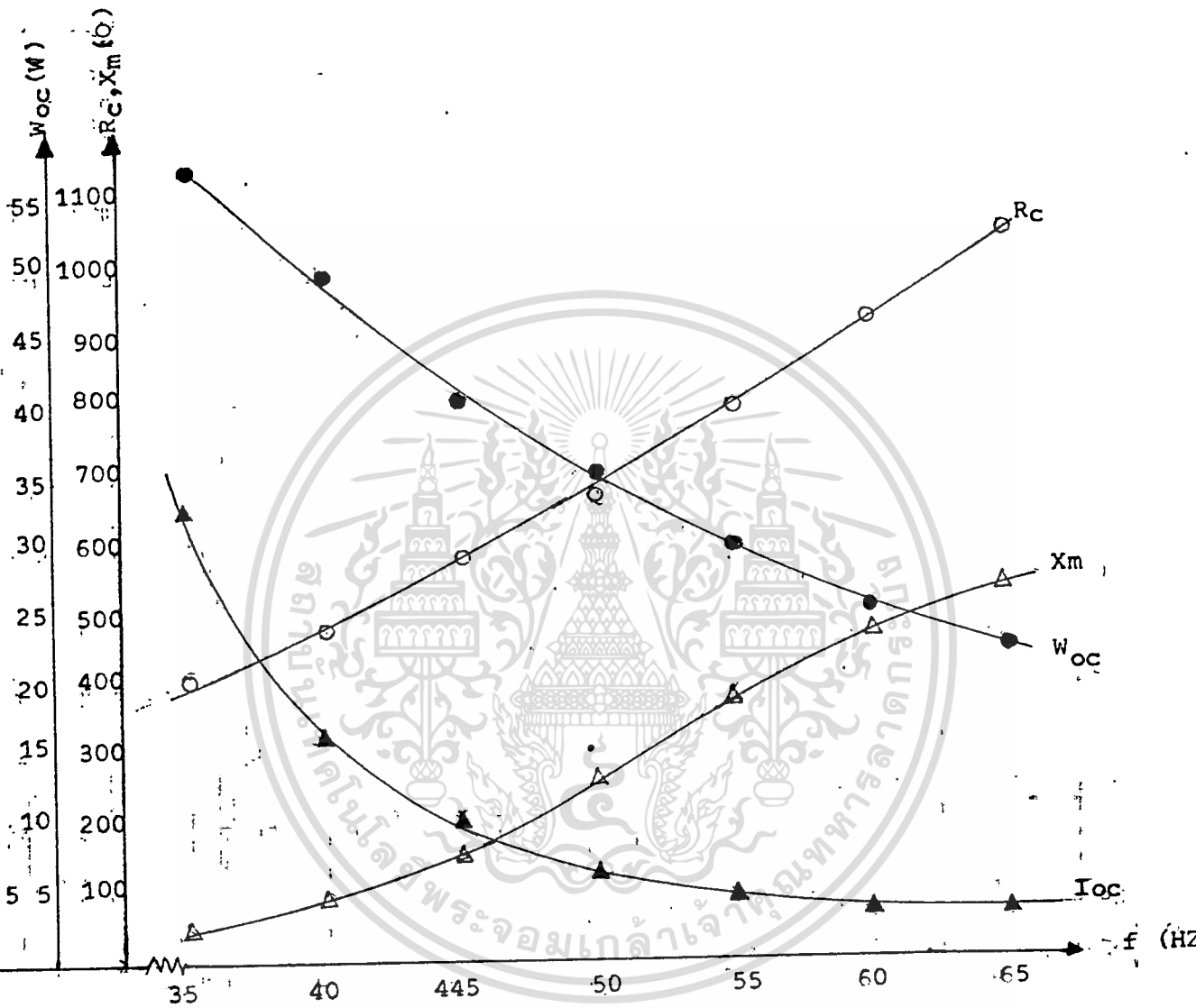
ตารางที่ 4-2 ผลการทดลอง เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความถี่

f (Hz)	V_{oc} (V)	I_{oc} (W)	W_{oc} (W)	R_c (Ω)	X_m (Ω)
35	155	3.300	57.5	417.83	47.27
40	155	1.675	50.0	480.50	94.30
45	155	1.060	41	585.98	151.00
50	155	0.637	34	706.62	259.18
55	155	0.450	30	800.83	381.54
60	155	0.365	25.8	931.20	477.16
65	155	0.325	22.8	1053.73	534.84

กราฟระหว่าง f กับ I_{oc} , W_{oc} , R_c , X_m เมื่อให้ E คงที่ เป็นดังรูปที่ 4-4

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากกราฟจะเห็นได้ว่าในกรณีที่ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้า E คงที่ และเปลี่ยนแปลงค่าความถี่เห็น Core loss จะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะถึงแม้ว่าในสมการ (4-6) ความถี่จะมีผลโดยตรงต่อ Core loss แต่ก็มีผลทางอ้อมคือทำให้ B_m ลดลงในส่วนที่สูงกว่า



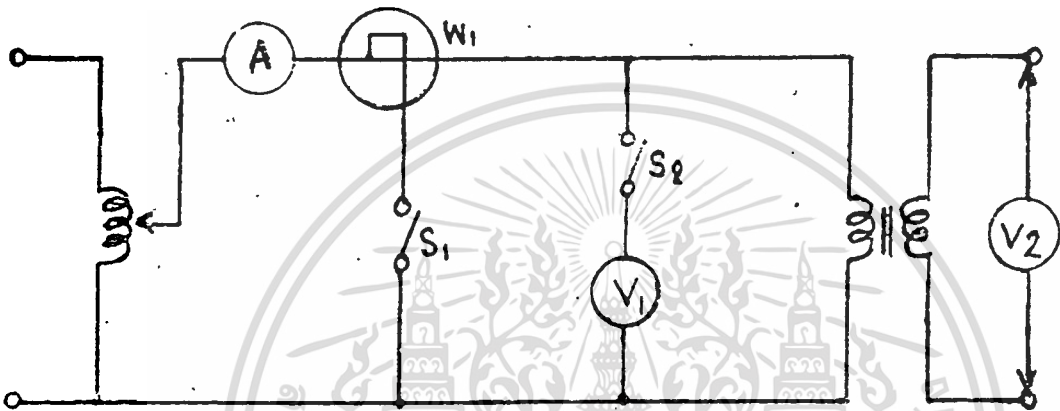
รูปที่ 4-4 กราฟระหว่าง f กับ I_{oc} , W_{oc} , R_c , X_m เมื่อให้ E คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 3 Core loss เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง แต่ความถี่คงที่

อุปกรณ์

1. Variac
2. low power factor wattmeter
3. AC Ammeter
4. AC Voltmeter



รูปที่ 4-5 วงจรที่ใช้ทดลอง

ขั้นตอนการทดลอง

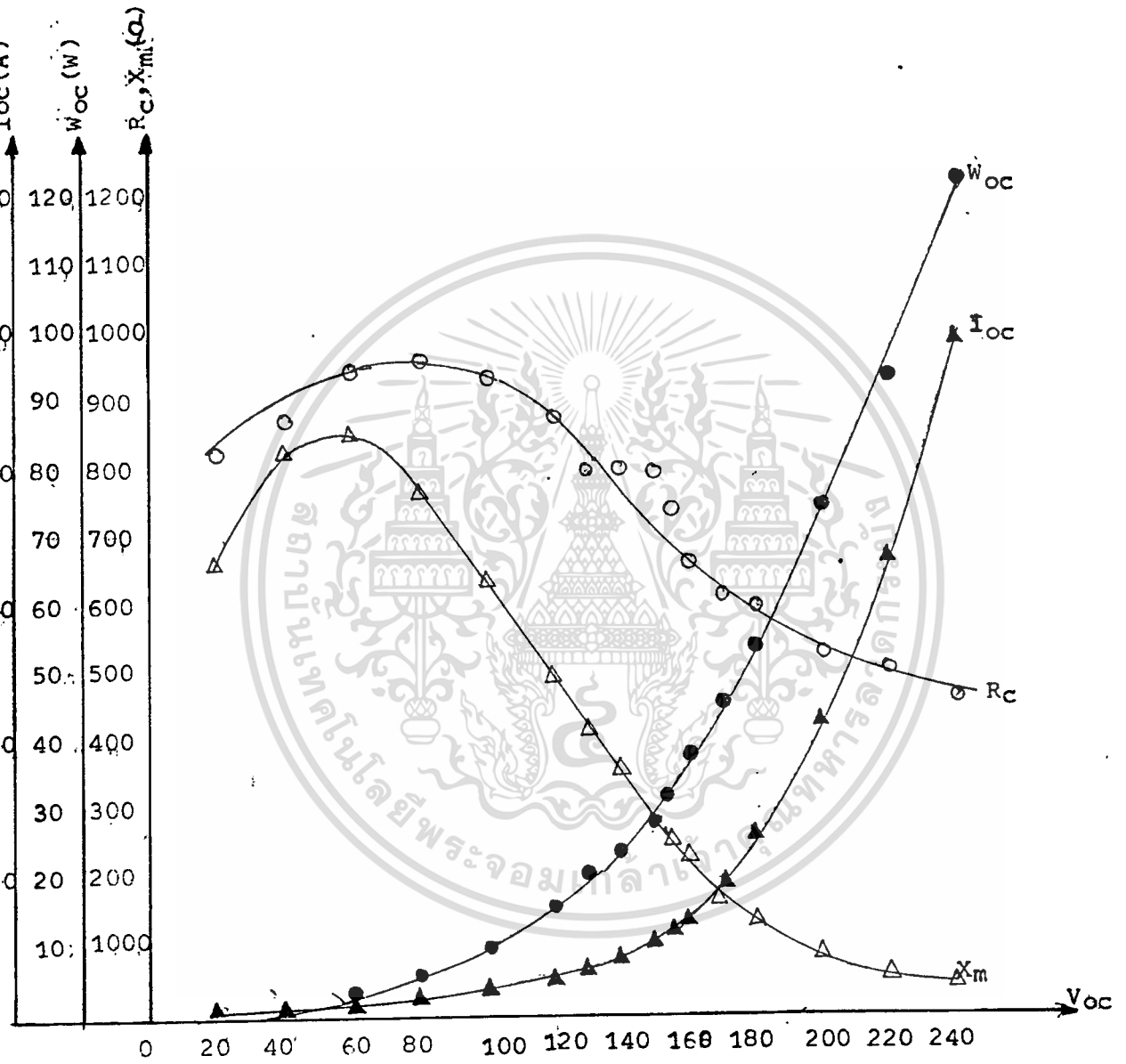
1. ปรับ variac ป้อน V_{oc} ตามตารางที่ 4-3
2. บันทึกค่า I_{oc} , W_{oc}
3. คำนวณ R_c , X_m ของวงจรสมมูลย์ที่ได้ในแต่ละค่า V_{oc}
4. เขียนกราฟระหว่าง V_{oc} กับ I_{oc} , W_{oc} , R_c , X_m

ตารางที่ 4-3 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า

V_{oc} (V)	I_{oc} (A)	W_{oc} (W)	R_c (Ω)	X_m (Ω)
20	0.038	0.5	833	679
40	0.066	1.8	889	828
60	0.094	3.8	957	856
80	0.132	6.6	970	776
100	0.189	10.6	943	639
120	0.276	16.3	883	499
130	0.350	21.0	805	419
140	0.420	24.2	810	366
150	0.540	28.3	796	296
155	0.625	32.3	745	263
160	0.715	38.0	674	237
170	0.980	46.6	620	180
180	1.320	54.0	600	140
200	2.170	75.0	533	94
220	3.350	94.0	515	66
240	5.000	123.0	468	48

หมายเหตุ ความถี่ = 50 Hz คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-6 กราฟระหว่าง E กับ I_{oc} , W_{oc} , R_c , X_m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากกราฟพบว่าเมื่อเพิ่ม V_{oc} ขึ้นไปเรื่อย ๆ I_{oc} และ W_{oc} จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็ก เมื่อมองในเชิงวงจรสมมูลย์จึงเปรียบได้กับการที่ R_c ซึ่งเป็นความต้านทานเสมือนที่ใช้แทนการสูญเสียในแกนเหล็กอื่นเนื่องมาจาก hysteresis และ eddy current มีค่าลดลง นอกจากนี้จะเห็นได้ว่ายังแกนเหล็กอิ่มตัวมากเท่าใด power factor ขณะ No load ยิ่งมีค่าต่ำลงเท่านั้น เพราะ X_m ลดลงในสัดส่วนที่มากกว่า R_c



บทที่ 5

Vector Group

เมื่อความต้องการ electrical Power สูงขึ้น จำเป็นต้องเพิ่ม Rating ของหม้อแปลง อาจทำได้โดยการเอา unit เก่าออก แล้วนำ unit ใหม่ซึ่งมีพิกัดมากกว่าใส่เข้าไป หรือนำชุดใหม่ขนานเข้าไปกับตัวเดิม ในการขนานหม้อแปลงต้องมีคุณสมบัติสำคัญ ๆ ดังนี้

1. มี polarity ชนิดเดียวกัน
2. มี % impedance เท่ากัน
3. มี Voltage ratio เท่ากัน
4. มี Vector group อยู่ในหม้อที่จะขนานกันได้

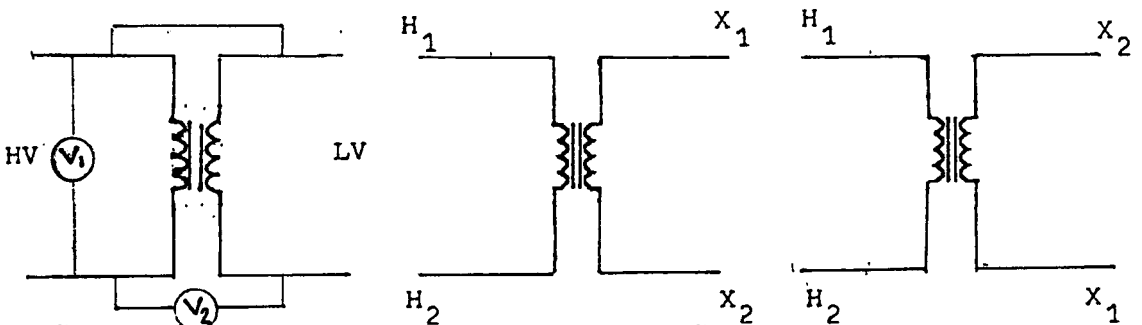
1. มี Polarity ชนิดเดียวกัน

ก่อนที่จะนำหม้อแปลงมาขนานกันหรืออนุกรมกัน ต้องรู้ polarity ของ terminal แต่ละอันของหม้อแปลง หรือรู้จักทางการไหลของกระแสในขดลวดแต่ละชุดของหม้อแปลง สัญลักษณ์ที่ใช้แทน terminal ของหม้อแปลง คือ

H_1, H_2 แทน terminal ทางด้าน HV

X_1, X_2 แทน terminal ทางด้าน LV

การหา Polarity สามารถหาได้โดยต่อ terminal หนึ่งของด้าน H.V เข้ากับ terminal หนึ่งของด้าน LV ดังรูป 5-1 ก.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปตีประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5-1
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเป็นได้ 2 กรณีคือ

กรณี $V_1 > V_2$ ซึ่งเรียกว่า Subtractive ถ้ากำหนดขั้วของ HV เป็น H_1 และ H_2 ตามรูป ข. ก็จะได้ขั้วของ LV คือ X_1 กับ X_2 ดังรูป 5-1 ข.

กรณี $V_1 < V_2$ ซึ่งเรียกว่า additive ถ้ากำหนดขั้ว HV เป็น H_1 และ H_2 ตามรูป ก. ก็จะได้ขั้วของ LV คือ X_1 คือ X_2 ดังรูป 5-1 ค.

2. มี % อิมพีแดนซ์เท่ากัน ผลของอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากันดูหัวข้อ unequal ratio ในบทที่ 7

3. มี Voltage ratio เท่ากัน Voltage ratio ไม่เท่ากัน ก็คือ turn ratio ไม่เท่ากัน ดูหัวข้อ unbalanced turn ratio ในบทที่ 7

4. มี vector group อยู่ในหมุ่ที่จะขนานกันได้

มาตรฐานที่ใช้กำหนด terminal ต่าง ๆ ของการต่อหม้อแปลง 3 เฟส ทั้งด้าน HV และ LV จากมาตรฐานของ B.S. 171 ปี 1936 กำหนดให้ขั้วต่าง ๆ ของ HV นั้นใช้อักษรตัวใหญ่ ของแต่ละเฟสเป็น ABC ตามลำดับอยู่ด้านหนึ่งของหม้อแปลง ส่วนอีกด้านหนึ่งใช้อักษรตัวเล็ก abc ซึ่งเฟสจะคล้องจองกับด้าน HV ด้วย สำหรับ terminal ของนิวทรัลให้อยู่ในตำแหน่งก่อนหน้าที่จะถึงตำแหน่ง terminal ต่าง ๆ ของ line terminal เนื่องจากขดลวดมี 2 ปลาย จึงใช้อักษร 1 และ 2 แทนต้นและปลายขด ถ้าขดลวดมี tap ก็กำหนดให้อักษรเรียงตามลำดับ เช่น ขดหนึ่งมี 4 tap จะใช้อักษรเป็น A_1, A_2, \dots, A_6 โดยที่ A_1 และ A_6 เป็นต้นและปลายที่รวมกันเป็นเฟสของเฟส A

ถ้าแรงเคลื่อนที่เหนี่ยวนำในขณะใดขณะหนึ่งทางด้าน HV เป็น A_1, A_2 และมีทิศจาก A_1 ไปยัง A_2 ถ้าทำให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดทางด้าน LV ที่ขณะนั้น มีทิศจาก a_1 ไปยัง a_2 ด้วย

การแบ่ง group ของการต่อหม้อแปลง 3 เฟส แบ่งออกได้เป็น 4 group คือ group ที่ 1 ความแตกต่างเฟสของแรงดันรับไฟและจ่ายไฟเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
Zero phase displacement การต่อแบบนี้ได้แก่ YY_0, Dy_0, Dz_0, Zd_0
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการต่อเป็นดังรูป 5-2

group ที่ 2 ความแตกต่างเฟสของแรงดันด้านรับไฟและจ่ายไฟเป็น 180° นั่นคือ out of phase การต่อแบบนี้เช่น YY_0 , Dd_0 , Bb_0 ลักษณะการต่อเป็นดังรูป 5-3

group ที่ 3 เฟสทางด้านจ่ายไฟมาทีหลัง เฟสทางด้านรับไป 30° (30° lag phase displacement) การต่อแบบนี้ได้แก่ Dy_{11} , Yd_{11} , Yz_{11} ลักษณะการส่งเป็นดังรูป 5-4

group ที่ 4 เฟสทางด้านรับไฟมาก่อนเฟสทางด้านรับไฟ 30° (30° lead phase displacement) การต่อแบบนี้ได้แก่ Dy_{11} , Yd_{11} , Yz_{11} , Zy_{11} ลักษณะการต่อเป็นดังรูป 5-5



PHASOR SYMBOLS	MARKING OF LINE TERMINALS AND PHASOR DIAGRAM OF INDUCED VOLTAGES		WINDING CONNECTIONS
	H.V. WINDING	L.V. WINDING	
YyO			
DdO			
DzO			
ZzO			

รูปที่ 5-2 GROUP NO.1 : Phase Displacement=0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHASOR SYMBOLS	MARKING OF LINE TERMINALS AND PHASOR DIAGRAM INDUCED VOLTAGES		WINDING CONNECTIONS
	H.V. WINDING	L.V. WINDING	
Yy6			
Dd6			
Dz6			
Zd6			

รูปที่ 5-3 GROUP NO.1 : Phase Displacement = 180°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHASOR SYMBOLS	MARKING OF LINE TERMINALS AND PHASOR DIAGRAM OF INDUCED VOLTAGES		WINDING CONNECTIONS
	H.V. WINDING	L.V. WINDING	
Dy1			
Yd1			
Yz1			
Zy1			

รูปที่ 5-4 GROUP NO.1 : Phase Displacement --30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHASOR SYMBOLS	MARKING OF LINE TERMINALS AND PHASOR DIAGRAM OF INDUCED VOLTAGES		WINDING CONNECTIONS
	H.V. WINDING	L.V. WINDING	
Dy11			
Yd11			
Yz11			
Zy11			

รูปที่ 5-5 GROUP NO.1 : Phase Displacement = 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ปรากฏการณ์ฮาร์โมนิกในวงจร 3 เฟส

เนื่องจากฮาร์โมนิกในกระแสกระตุ้นนี้มีขนาดเล็ก เราจึงมักจะ ไม่คิดถึงผลของมัน แต่ลักษณะพิเศษของฮาร์โมนิกในระบบสามเฟสนี้ ในบางครั้งก็อาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบได้ โดยเฉพาะในการเกิดการต่อแบบ $\gamma - \gamma$ ของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว 3 ชุด กระแสฮาร์โมนิกขนาดเล็ก ๆ ของการต่อร่วมกันลักษณะนี้ อาจรบกวนการทำงานของระบบโทรคมนาคมที่อยู่ใกล้ ๆ ได้อย่างรุนแรง รายละเอียดของปรากฏการณ์ฮาร์โมนิก จะกล่าวต่อไปนี้

1. เมื่อต้านปฐมภูมิต่อแบบ Δ

พิจารณาเมื่อใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว 3 ชุด ที่ต้านปฐมภูมิต่อแบบ Δ ส่วนทุติยภูมิตั้ง แต่ละชุด ไม่ต่อกัน และไม่มีภาระไฟฟ้า ถ้าหม้อแปลงทั้งสาม เหมือนกันทุกประการ และ โวลต์ที่เตจสมดุล รูปคลื่นของกระแสกระตุ้นจะเหมือนกัน แต่ต่างเฟสกัน 120 องศา ถ้า โวลต์ที่เตจเปลี่ยนแปลงแบบสัญญาณไซน์ กระแสกระตุ้น $i_{\phi CA}$ และ $i_{\phi AB}$ จะเป็นดังรูป 6-1



Waveforms of the exciting currents in two phases of the Δ and in one of the lines supplying a group of Δ -connected primaries.

รูปที่ 6-1

กระแสกระตุ้นในไลน์ A คือ

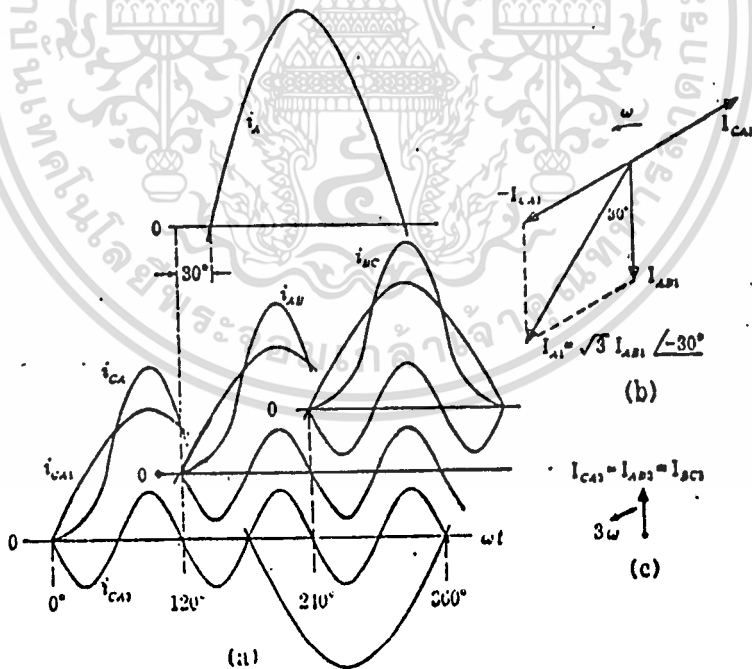
$$i_{\phi A} = i_{\phi AB} - i_{\phi CA} \quad (6-1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเป็นแบบสองยอด (double-topped wave) ดังรูปจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นของกระแสกระตุ้น
ในไลน์ต่างกับ กระแสกระตุ้นในวงจร Δ อย่างมาก เกิดจากสาเหตุสองประการดังต่อไปนี้

1a. ฮาร์โมนิกที่ 3

ในรูป 7-2a แสดงกระแส i_{CA} , i_{AB} , i_{BC} ซึ่งมีรูปคลื่นเหมือนกันแต่ต่างเฟสกัน 120 องศา มีองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ที่ทำให้เกิดรูปคลื่นคล้ายกับรูปคลื่นของกระแสกระตุ้น เนื่องจาก i_{AB} ล้าหลัง i_{CA} ไปหนึ่งในสามลูกคลื่น ดังนั้นองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ของ i_{AB} จึง ล้าหลังองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ของ i_{CA} ไปสามในสามหรือทั้งหมดของลูกคลื่นฮาร์โมนิกที่ 3 ดังในรูป 6-2a องค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ของกระแสทั้งสามจึงมีเฟสตรงกัน ดังแสดงด้วย เวกเตอร์ไดอะแกรมในรูป 6-2c ถ้า i_{AB} และ i_{CA} เป็นกระแสในเฟส AB และ CA ของวงจร Δ กระแสไลน์ I_A จะเป็นผลต่างของกระแสทั้งสอง ผลต่างระหว่างองค์ประกอบหลัก แสดงเป็นเวกเตอร์ได้ดังรูป 6-2b แต่ผลต่างระหว่างองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 เป็นศูนย์



Balanced Δ currents with third-harmonic components, showing (a) waveforms, (b) fundamental vector diagram, and (c) third-harmonic vector diagram.

รูปที่ 6-2

ดังนั้นจะ ไม่มีกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ในไลน์ เมื่อหม้อแปลงทั้ง 3 เหมือนกันทุกประการ

และ โวลต์ เตจ สมดุล
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ถึงกระนั้น ถ้าหากว่าไลน์โวลต์เตจเปลี่ยนแปลงแบบไซน์ ก็ต้องมีองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ในกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงที่ต่อแบบ Δ เนื่องจากคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นของแกนเหล็ก องค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 นี้มีขนาดเท่ากันเฟสตรงกันและมีทิศทางเดียวกันในลูป Δ มันจึงไหลวนอยู่ในลูป แต่ไม่ออกไปในไลน์ โดยเหตุผลเดียวกันนี้ สามารถแสดงได้ว่าฮาร์โมนิกที่เป็นค่าทวีคูณของฮาร์โมนิกที่ 3 เช่น ฮาร์โมนิกที่ 6,9 ในวงจร 3 เฟส ก็จะมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับฮาร์โมนิกที่ 3

สรุปคือกระแสฮาร์โมนิกที่ 3,6,9 จะไหลวนในลูป Δ แต่ไม่สามารถไหลในไลน์ที่จ่ายไปให้วงจรได้ ถ้าหากว่าวงจรสมดุลงอย่างสมบูรณ์

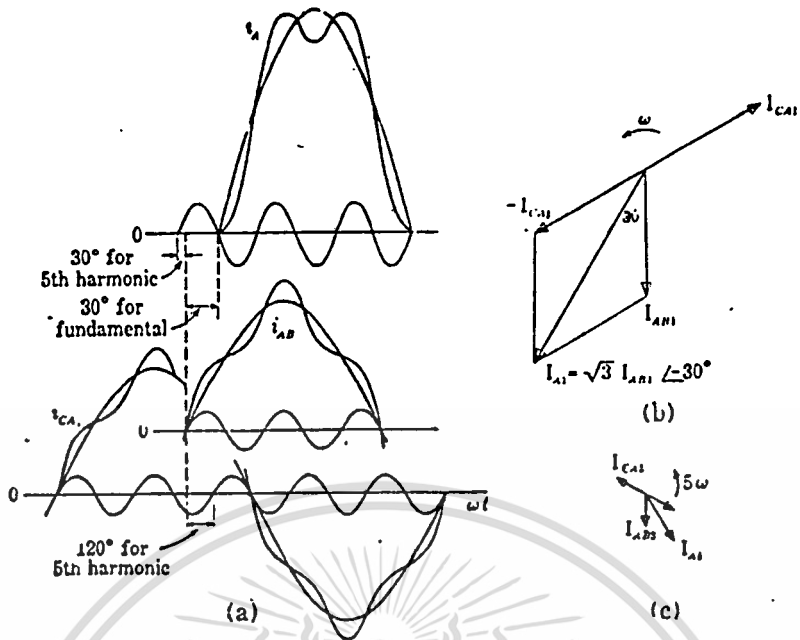
อย่างไรก็ดีในการสร้างหม้อแปลงให้เหมือนกันทุกประการเป็นเรื่องที่เป็นไปไม่ได้ ดังนั้นก็จะมีกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ไหลในไลน์บ้างเล็กน้อยและมีเฉพาะฮาร์โมนิกอันดับคี่เท่านั้น

1b ฮาร์โมนิกที่ 5

อีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้รูปคลื่นของกระแสใน Δ ต่างจากในไลน์ ก็คือฮาร์โมนิกที่ 5 ซึ่งมีค่ายังผลประมาณ 10% ของค่ายังผลของกระแสกระตุ้น และเสริมค่ายอดของกระแสกระตุ้นรูป 6-3a แสดงกระแส i_{CA} และ i_{AB} ซึ่งเหมือนกันและมีองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 5 เนื่องจาก i_{AB} ล้าหลัง i_{CA} ไปหนึ่งในสามของลูกคลื่น ดังนั้นองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 5 ของ i_{AB} จึงล้าหลังองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 5 ของ i_{CA} ไป 5 ใน 3 ของลูกคลื่นฮาร์โมนิกที่ 5 ดังรูป 6-3a ซึ่งก็เท่ากับล้าหลังไป 2 ใน 3 หรือนำหน้าไป 1 ใน 3 ของลูกคลื่นฮาร์โมนิกที่ 5

จะเห็นได้ว่าลำดับเฟสของฮาร์โมนิกที่ 5 จะกลับกันกับลำดับเฟสขององค์ประกอบหลัก นั่นคือในขณะที่องค์ประกอบหลัก i_{AB1} ล้าหลังองค์ประกอบหลัก i_{CA1} ไป 1 ใน 3 ของลูกคลื่นองค์ประกอบหลัก แต่องค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 5 i_{AB5} นำหน้าองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 5 i_{CA5} ไป 1 ใน 3 ของลูกคลื่นฮาร์โมนิกที่ 5 ความสัมพันธ์ของเฟสนี้แสดงในรูปของเวกเตอร์ได้ดังรูป 6-3b และ 6-3c.

ถ้ากระแส i_{AB} และ i_{CA} เป็นองค์ประกอบหลักและฮาร์โมนิกที่ 5 ของกระแส



Line currents and Δ currents with fifth-harmonic components, showing (a) waveforms, (b) fundamental vector diagram, and (c) fifth-harmonic vector diagram.

รูปที่ 6-3

(6-1) จากเวกเตอร์ไดอะแกรม องค์ประกอบหลักของกระแสไลน์ i_A เป็น 3 เท่าของ องค์ประกอบหลักของกระแส Δ และถ้าหลังองค์ประกอบหลักของ i_{AB} ไป 30° องศาหรือ 1 ใน 12 ของลูกคลื่น ในขณะที่องค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 5 ของ i_A เป็น 3 เท่าขององค์ประกอบ ฮาร์โมนิกที่ 5 ของกระแส Δ แต่นำหน้าองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 5 ของ i_{AB} ไป 30° องศา ฮาร์โมนิกที่ 5 หรือ 1 ใน 12 ของลูกคลื่นฮาร์โมนิกที่ 5 ดังนั้นความสัมพันธ์ของเฟสระหว่าง องค์ประกอบหลักและฮาร์โมนิกที่ 5 ของกระแสไลน์ จึงต่างจากความสัมพันธ์ของเฟส ระหว่าง องค์ประกอบเหล่านี้ในกระแส Δ แม้ว่าทั้งกระแสไลน์และ Δ จะมีองค์ประกอบหลักและฮาร์โมนิก ที่ 5 อยู่ในสัดส่วนเดียวกัน แต่การเลื่อนเฟสทำให้รูปคลื่นต่างกัน โดยใน Δ เป็น peaked wave ส่วนในไลน์เป็น double top wave ดังรูป 6-1 และ 6-3a

1c สรุปความสัมพันธ์เฟสของฮาร์โมนิก

ลำดับเฟสของฮาร์โมนิกที่ 1 (องค์ประกอบหลัก) , 4, 7... ในวงจร 3 เฟส จะ

เหมือนกัน ส่วนลำดับเฟสของฮาร์โมนิกที่ 2, 5, 8, 11, ... จะกลับกันกับลำดับของเฟสขององค์ เหมือนกัน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบหลักในขณะที่ฮาร์โมนิกที่ 3, 6, 9... จะ inphase ถ้าให้ลำดับขององค์ประกอบหลัก เป็น ABC จะสรุปความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังตารางต่อไปนี้ ซึ่งใช้ได้ทั้งฮาร์โมนิกในคลื่นของ กระแสและฮาร์โมนิกในคลื่นของโวลต์เตจ โดยทั่วไปจะมีปรากฏเฉพาะฮาร์โมนิกลำดับคี่เท่านั้น ตารางที่ 6-1

PHASE RELATIONS AMONG THE HARMONICS IN THREE-PHASE CIRCUIT

Harmonic	Phase Order
1, 4, 7, 10, 13 etc.	ABC (positive sequence)
2, 5, 8, 11, 14 etc.	CBA (negative sequence)
3, 6, 9, 12, 15, etc.	in phase (Zero Sequence)

1d ค่ายังผลของ Phase และ Line Current

เนื่องจากองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ไม่มีในกระแสไลน์ ค่ายังผลของกระแสไลน์ขณะไร้การะจึงไม่ใช่ 3 เท่าของค่ายังผลของกระแสกระตุ้นในวงจร Δ แต่จะน้อยกว่าค่านี้ ถ้าให้ $I_{\varphi 1}, I_{\varphi 3}, \dots$ เป็นค่ายังผลขององค์ประกอบฮาร์โมนิกในหม้อแปลง 3 ชุด ที่เหมือนกันทุกประการ ค่ายังผล $I_{\varphi \Delta}$ ของกระแสกระตุ้นในหม้อแปลง คือ

$$I_{\varphi \Delta} = \sqrt{I_{\varphi 1}^2 + I_{\varphi 3}^2 + I_{\varphi 5}^2 + \dots} \quad (6-2)$$

เมื่อค่ายังผลขององค์ประกอบฮาร์โมนิกในกระแสไลน์เป็น 3 เท่าของค่ายังผลขององค์ประกอบฮาร์โมนิกเหล่านี้ในกระแส y แต่ฮาร์โมนิกอันดับ 3 และอันดับที่เป็นทวีคูณ

ไม่ปรากฏใน กระแสไลน์ ค่ายังผล $I_{\varphi \text{ line}}$ ของกระแสไลน์ คือ

$$I_{\varphi \text{ line}} = \sqrt{3} \sqrt{I_{\varphi 1}^2 + 0 + I_{\varphi 5}^2 + \dots} \quad (6-3)$$

ถ้าละทิ้งฮาร์โมนิกอันดับที่เป็นทวีคูณของฮาร์โมนิกที่ 3 จะได้

$$I_{\varphi \text{ line}} = \sqrt{3} \sqrt{I_{\varphi \Delta}^2 - I_{\varphi 3}^2} \quad (6-4)$$

เนื่องจากฮาร์โมนิกที่ 3 มีค่าประมาณ 41.5% ของกระแสกระตุ้นของหม้อแปลง

ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น หากท่านใดต้องการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{\varphi \text{ line}} = \sqrt{3} \sqrt{I_{\varphi \Delta}^2 - (0.415 I_{\varphi \Delta})^2}$$

$$\begin{aligned}
&= I_{\varphi\Delta} \sqrt{3} \sqrt{1-0.415^2} \\
&= 0.91\sqrt{3} I_{\varphi\Delta} \qquad (6-5)
\end{aligned}$$

นั่นคือ เมื่อกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ซึ่งมีใน Δ แต่ไม่มีในไลน์ อัตราส่วนของกระแสไลน์ ต่อ Δ Phase current จึงน้อยกว่า $\sqrt{3}$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้ในกรณี sine wave แม้ว่าผลของกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 นี้จะไม่สำคัญนักและมักจะถูกละทิ้ง แต่มันก็สามารถอธิบายปรากฏการณ์บางอย่างได้ เช่นเมื่อต่อหม้อแปลง 3 ลูกที่เหมือนกันเป็นวงจร Δ เข้ากับระบบไฟ 3 เฟสที่สมดุล วัตกระแสไลน์และไลน์โวลท์เตจ ค่าโวลท์-แอมป์ 3 เฟสที่ได้คือ $\sqrt{3} V_{line} I_{line}$ จะน้อยกว่า 3 เท่าของโวลท์-แอมป์ ที่ใช้กระตุ้นวงจรแม่เหล็กของหม้อแปลง 1 ตัว ที่วัดโดยการป้อนแรงดันเฟสเดียวที่ค่าเท่ากัน, พลังงานรวม 3 เฟสที่ป้อนให้คือผลรวมของความสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงทั้ง 3 ดังนั้น power factor 3 เฟส ขณะไร้อะการะของกลุ่มหม้อแปลง 3 เฟส จะสูงกว่า power factor ของ หม้อแปลงเพียง 1 ลูก ขณะไร้อะการะ 2-3 เปอร์เซนต์

1e การต่อแบบ Δ Y และ Δ - Δ

องค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ของกระแสกระตุ้นทางด้านปฐมภูมิที่ต่อแบบ Δ จะทำให้โวลท์เตจที่ตกคร่อม leakage impedance ในหม้อแปลงแต่ละลูกมีฮาร์โมนิกที่ 3 โดยที่แรงดัน sine wave ที่จ่ายให้หม้อแปลงเท่ากับแรงดันตกเนื่องจาก leakage impedance ทางปฐมภูมิ รวมกับ counter emf ที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กร่วม emf นี้ก็ต้องมีองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 มีขนาดเท่ากับฮาร์โมนิกที่ 3 ของแรงดันตกคร่อม leakage impedance ทางปฐมภูมิ แต่มีทิศทางตรงกันข้าม เส้นแรงแม่เหล็กร่วมนี้ก็ต้องปรับตัวเองเพื่อสร้างโวลท์เตจฮาร์โมนิกที่ 3 ขนาดเล็ก ๆ มีค่าประมาณ 0.1% ของโวลท์เตจที่พิกัด ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮาร์โมนิกที่ 3 ก็จะถูกสร้างขึ้นทางทุติยภูมิด้วย ในเมื่อรูปคลื่นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สร้างขึ้นในหม้อแปลง 3 ลูกที่เหมือนทุกประการมีขนาดเท่ากัน แต่ต่างเฟสกัน 1 ใน 3 ของลูกคลื่น องค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าทางทุติยภูมิก็จะเหมือนกันแต่ต่างเฟสกัน 3 ใน 3 ของลูกคลื่นฮาร์โมนิกที่ 3 ซึ่งก็คือเฟสทับกันนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หากท่านต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 0-2254-3000

จำกัดอยู่เฉพาะทางด้านปฐมภูมิ Δ แรงดันตกเนื่องจาก leakage impedance ทางปฐมภูมิ จะมีผลเล็กน้อยต่อเฟสโวลต์เตจทางทุติยภูมิ แต่ฮาร์โมนิกที่ 3 นี้จะไม่ปรากฏที่ line to line voltage

อย่างไรก็ดี ถ้าทางทุติยภูมิต่อเป็น Δ องค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ของโวลต์เตจทุติยภูมิ จะมีเฟสตรงกันและทิศทางเดียวกันรอบ Δ ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ไหลวนในรูป Δ ด้านทุติยภูมิ กระแสกระตุ้นฮาร์โมนิกที่ 3 จึงมีปรากฏทั้งทางปฐมภูมิและทุติยภูมิ แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) ฮาร์โมนิกที่ 3 จึงถูกสร้างขึ้นจากกระแสทั้ง 2 ส่วนนี้ กระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ทางปฐมภูมิและทุติยภูมิของ Δ นี้ เป็นสัดส่วนผกผันต่อ leakage impedance ของด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ที่ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 3

2. ด้านปฐมภูมิต่อแบบ Y

เนื่องจากคุณสมบัติของการต่อแบบ Y นั้นมีส่วนเกี่ยวข้องกับอย่างมากกับการแยกหรือต่อจุดนิวทรัลของปฐมภูมิ ดังนั้นเนื้อหาต่อไปนี้จะได้แบ่งออกเป็นกรณีต่าง ๆ คือ จุดนิวทรัลของปฐมภูมิต่อหรือแยกกับจุดนิวทรัลของแหล่งจ่าย และทางทุติยภูมิต่อแบบ Y หรือ Δ

ในบางกรณีกระแสในสายส่งกำลัง 3 เฟส อาจเหนี่ยวนำให้เกิดโวลต์เตจรบกวนขึ้นในระบบโทรคมนาคม ซึ่งจะได้กล่าวพอเป็นสังเขปในรายละเอียดต่อไป

2a. การต่อแบบ Y - Y และจุดนิวทรัลของปฐมภูมิต่อกับจุดนิวทรัลของแหล่งจ่าย

ในลำดับแรก พิจารณาตัวอย่างง่าย ๆ ของการต่อแบบ Y-Y ของหม้อแปลง 1 เฟส 3 ตัวที่เหมือนกันทุกประการ ซึ่งเปิดวงจรทุติยภูมิ จุดนิวทรัลของปฐมภูมิต่อกับจุดนิวทรัลของแหล่งจ่ายโวลต์เตจ sine wave ที่สมดุล ดังรูป 6-4a

รูป 6-4b แสดง osilogram ของโวลต์เตจ v_{AN} ที่จ่ายให้กับหม้อแปลงตัวหนึ่ง ซึ่งมีกระแสกระตุ้น $i_{\phi A}$ และแสดงกระแส i_N ในสายนิวทรัล โวลต์เตจที่จ่ายให้เป็น sine wave ดังนั้นกระแสกระตุ้นก็จะมีเฉพาะองค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ซึ่งมีขนาดใหญ่ที่สุด ถ้าหากว่าหม้อแปลงทั้ง 3 ลูก เหมือนกันทุกประการและโวลต์เตจสมดุล กระแสกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้เฉพาะเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้นของไฟฟ้ะ 120 องศา
 $i_{\phi A}, i_{\phi B}, i_{\phi C}$ ก็จะมีเหมือนกันทุกประการ ยกเว้นความสัมพันธ์ของเฟสที่ต่างกัน 120° องศา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

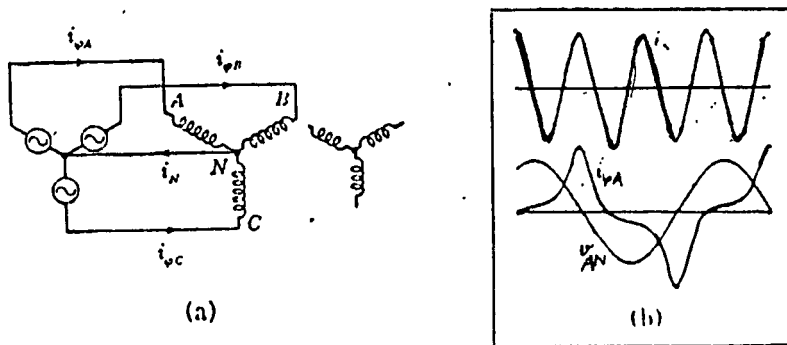


FIG. 4. Y-Y bank of transformers; (a) connections, and (b) oscillograms of the primary voltage to neutral v_{AN} , the exciting current $i_{\phi A}$, and the current i_N in the primary neutral wire.

รูปที่ 6-4

กระแสในสายนิวทรัล N เป็นผลรวมของกระแส $i_{\phi A}$, $i_{\phi B}$ และ $i_{\phi C}$ เมื่อหม้อแปลงเหมือนกันและ โวลต์เตจสมดุล องค์ประกอบหลักของกระแสกระตุ้นทั้งสามจะเป็น sine wave ที่มีขนาดเท่ากันแต่ต่างเฟสกัน 120 องศา ผลรวมจึงเป็นศูนย์ นั่นคือ ไม่มีกระแสองค์ประกอบหลักในสายนิวทรัล แต่เนื่องจากองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 มีเฟสตรงกัน ดังนั้นองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ของกระแสในนิวทรัลจึงเท่ากับ 3 เท่าขององค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ของกระแสกระตุ้นในหม้อแปลง

จากตารางที่ 6-1 แสดงให้เห็นว่าเฉพาะฮาร์โมนิกที่ 3 และฮาร์โมนิกลำดับที่คูณของ 3 เท่านั้นจะมีเฟสตรงกัน ฮาร์โมนิกลำดับอื่น ๆ ของกระแสกระตุ้นต่างก็มีเฟสต่างกัน 120 องศา

นั่นคือ เมื่อหม้อแปลงทั้งสามเหมือนกันและ โวลต์เตจสมดุล กระแสในนิวทรัลจะมีเฉพาะฮาร์โมนิกลำดับที่ที่เป็นค่าทวีคูณของฮาร์โมนิกที่ 3, ฮาร์โมนิกที่ 9 และลำดับที่สูงกว่านี้มีขนาดเล็กมาก จึงประมาณว่ากระแสในนิวทรัลเป็น sine wave ที่มีความถี่เป็น 3 เท่าของแหล่งจ่าย และค่ายังผลเป็น 3 เท่าของค่ายังผลขององค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ของกระแสกระตุ้นในหม้อแปลง

ข้อเท็จจริงนี้แสดงให้เห็นได้ดังรูป 6-4b องค์ประกอบความถี่พื้นฐาน (fundamental frequency component) ค่าน้อย ๆ ของกระแสในนิวทรัล i_N เกิดจากคุณสมบัติที่แตกต่างกัน

ในการกระตุ้นสามแม่เหล็กของหม้อแปลงทั้งสาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

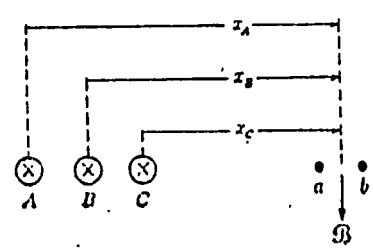
องค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ของกระแสกระตุ้น ทำให้เกิดองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ของโวลต์เตจตกคร่อมที่ leakage impedance ของหม้อแปลง เมื่อเฟสโวลต์เตจที่จ่ายให้ทางปฐมภูมิเปลี่ยนแปลงแบบไซน์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำโดยเส้นแรงแม่เหล็ก รวมทั้งจะมีองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ขนาดเล็กอยู่ ซึ่งจะปรากฏออกมาทางเฟสโวลต์เตจของทุติยภูมิ แต่ไม่ปรากฏในไลน์โวลต์เตจ

พิจารณาในเชิงปริมาณ กระแสกระตุ้นของหม้อแปลงในระบบไฟฟ้ากำลังมีประมาณ 5% ของกระแสฟลักซ์ องค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 มีประมาณ 40% ของกระแสกระตุ้น หรือประมาณ 0.4×5 หรือ 2% ของกระแสฟลักซ์ กระแสนี้ถูกรอลเป็น 3 เท่าของกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 หรือประมาณ 6% ของกระแสฟลักซ์ ซึ่งถือว่าน้อยมาก

แม้ว่าคุณสมบัติของการต่อแบบ Y-Y จะน่าพอใจ เมื่อต่อนิวทรัลของปฐมภูมิเข้ากับนิวทรัลของแหล่งจ่าย แต่กระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ในไลน์ ซึ่งเกิดจากการต่อแบบนี้จะเข้าไปเหนี่ยวนำและรบกวนระบบสื่อสารที่ขนานไปกับสายส่งได้ ซึ่งจะกล่าวต่อไป

2b. การรบกวนแบบเหนี่ยวนำที่เกิดจากกระแสกระตุ้นฮาร์โมนิกที่ 3

แม้ว่าค่าขั้วผลของกระแสกระตุ้นฮาร์โมนิกที่ 3 จะมีเพียง 2% ของกระแสฟลักซ์ในไลน์ แต่ผลจากการเหนี่ยวนำของกระแสกระตุ้นในวงจรสื่อสารที่ขนานกันไปกับวงจรกำลังอาจจะรุนแรงกว่าผลที่เกิดจากกระแส full load 3 เฟสที่สมดุล ตัวอย่างดังรูปที่ 6-5 ซึ่งแสดงสายส่งกำลัง 3 เฟส A, B, C ซึ่งขนานและอยู่ในระนาบเดียวกับสายโทรศัพท์



Parallel power and communication circuits.

รูปที่ 6-5

กำหนดให้ทิศทางบวกของกระแสในสายส่งกำลังพุ่งออกจากผู้สังเกต แทนด้วยเครื่องหมายกากบาท ซึ่งหมายถึงทางลูกศรที่พุ่งไปยังทิศทางบวกนี้ กระแสในสายส่งกำลังสร้างสนามแม่เหล็กค้ำองวงจรรสื่อสาร แสดงให้เห็นด้วย space vector β ซึ่งหมายถึงความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กค้ำอง เป็นผลรวมของส่วนประกอบที่เกิดจากกระแสในแต่ละสาย จาก Biot - Savart law องค์ประกอบของความเข้มสนามแม่เหล็กแปรตามค่าขณะใดขณะหนึ่งของ i_A, i_B, i_C และแปรผกผันกับระยะทาง x_A, x_B, x_C ดังนี้

$$\beta = \mu_0 \left(\frac{2i_A}{x_A} + \frac{2i_B}{x_B} + \frac{2i_C}{x_C} \right) \quad (6-6)$$

เมื่อ μ_0 คือความซึมซาบแม่เหล็กของ free space เส้นแรงแม่เหล็กค้ำองวงจรรสื่อสาร ก็คือ อินทิกรัลของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B เหนือพื้นที่ที่ปิดล้อมโดยสายสื่อสารทั้งสอง

ถ้ากระแสในสายส่งกำลังสมดุล เป็น sine wave ซึ่งต่างเฟสกัน 120 องศา (ซึ่งก็คือองค์ประกอบฮาร์โมนิคลำดับที่ 1, 5, 7 ฯลฯ ของกระแส 3 เฟส สมดุล)ผลรวมขณะใดขณะหนึ่งจะเป็นศูนย์ และถ้าระยะ x_A, x_B, x_C จากสายส่ง 3 เฟส ถึงวงจรรสื่อสารมีค่าเท่ากันแล้ว ผลรวมขององค์ประกอบความหนาแน่นฟลักซ์ก็จะเป็นศูนย์ด้วย นั่นคือองค์ประกอบของความหนาแน่นฟลักซ์ที่เกิดขึ้นจะหักล้างกันเอง ความหนาแน่นฟลักซ์ล้นขึ้นอยู่กับผลต่างระหว่าง x_A, x_B และ x_C ความหนาแน่นฟลักซ์ล้นที่เกิดขึ้นจากองค์ประกอบฮาร์โมนิคที่ 1, 5, 7 ฯลฯ ที่สมดุลในแต่ละเฟส จึงมีค่าน้อยเมื่อระยะ x_A, x_B และ x_C มีขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับช่องว่างระหว่างตัวนำสายส่งกำลัง

อย่างไรก็ตาม ถ้าสายส่งกำลังที่จ่ายพลังงานกระตุ้นให้กับกลุ่มหม้อแปลงที่ต่อแบบ Y-Y และต่อนิวทรัลของปฐมภูมิ เข้ากับนิวทรัลของแหล่งจ่าย จะทำให้กระแสในสายกำลังมีองค์ประกอบฮาร์โมนิคที่ 3 เพื่อให้่ายต่อการพิจารณา สมมุติว่าจุดนิวทรัลถูกต่อลงกราวด์

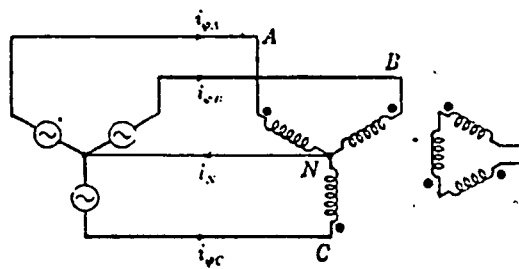
การรบกวนแบบเหนี่ยวนำของกระแสกราวด์ฮาร์โมนิคที่ 3 จึงละทิ้งได้ อันเนื่องมาจากความสูงของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวนวโละสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้ำองจรรเหนือพื้นดิน องค์ประกอบฮาร์โมนิคที่ 3 ของ กระแสไลน์ทั้ง 3 มีเฟสกันันี้ ดังนั้นค่าขณะ

โดยขณะหนึ่งขององค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ของความหนาแน่นฟลักซ์จึงเสริมกัน ด้วยเหตุผลนี้เอง องค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ขนาดเล็ก ๆ ของกระแส 3 เฟส ก็อาจจะก่อให้เกิดฟลักซ์คลื่นวงจร สื่อสารได้มากกว่าที่เกิดจาก องค์ประกอบหลักขนาดใหญ่ของกระแสที่สมดุลกัน ยิ่งกว่านั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของฟลักซ์คลื่นฮาร์โมนิกที่ 3 เป็น 3 เท่าของอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์คลื่นที่เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้น โวลเตจที่มีความถี่เป็น 3 เท่าที่เหนี่ยวนำขึ้นในวงจรสื่อสารโดยฟลักซ์ฮาร์โมนิกที่ 3 จึงเป็น 3 เท่าของขนาดโวลเตจความถี่พื้นฐาน ซึ่งถูกเหนี่ยวนำโดยฟลักซ์พื้นฐานที่มีขนาดเท่ากัน การตอบสนองของผู้รับโทรศัพท์และหูต่อสัญญาณที่มีความถี่เป็น 3 เท่าของความถี่ในระบบกำลังธรรมดาจึงรุนแรงกว่าการตอบสนองต่อสัญญาณความถี่พื้นฐานที่กำลังส่งเท่ากัน ปัจจัยเหล่านี้ทำให้การรบกวนแบบเหนี่ยวนำที่เกิดจากกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ขนาดเล็ก ๆ ในสายส่งกำลังรุนแรงกว่าการรบกวนที่เกิดจากกระแสพื้นฐานที่สมดุลกัน ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ามาก

ในกรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงผลจากการรบกวนของสายส่งกำลังได้ อาจลดการรบกวนได้โดยสลัดที่กันระหว่างสายสื่อสาร นอกจากนี้ก็ควรใช้การต่อระบบหม้อแปลงกำลังที่ไม่สร้างกระแสกระตุ้นฮาร์โมนิกที่ 3 ในวงจรกำลัง ซึ่งในลักษณะนี้การต่อแบบ Y ทางปฐมภูมิ โดยต่อจุดนิวทรัลของ Y เข้ากับจุดนิวทรัลของแหล่งจ่ายก็อาจจะไม่เหมาะสม

2c การต่อแบบ Y-Δ

พิจารณาการต่อหม้อแปลงที่เหมือนกันทุกประการโดยทางปฐมภูมิต่อแบบ Y ส่วนทางทุติยภูมิต่ออนุกรมกัน ใช้รวมที่จะต่อให้เป็น Δ ดังรูปที่ 6-6 ซึ่งมุมหนึ่งของ Δ เปิดวงจร



Y-Δ bank of transformers with one corner of the Δ open.

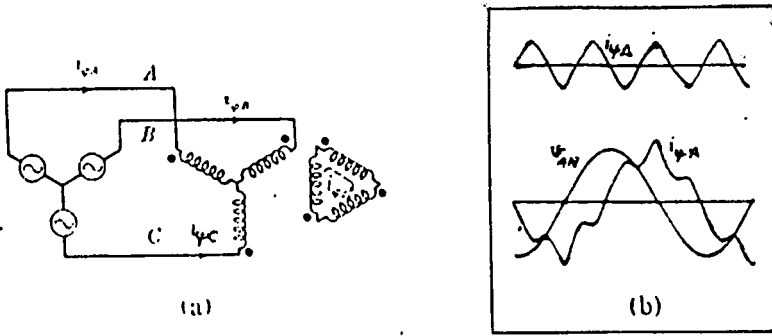
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 6-6
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดนิวทอรอลของประจุมุมต่อกับจุดนิวทอรอลของแหล่งจ่ายโวลท์เตจ sine wave ที่สม-
 ดุล ทางประจุมุมของวงจรจะมีคุณสมบัติเหมือนกับที่ได้กล่าวถึงในข้อ 2a นั่นคือโวลท์เตจประจุมุม
 เปลี่ยนแปลงแบบ sinusoid หม้อแปลงแต่ละลูกได้รับกระแสกระตุ้นจากไลน์ประจุมุม ส่วน
 องค์ประกอบฮาร์โมนิคของกระแสกระตุ้นกลับสู่แหล่งจ่ายผ่านทางสายนิวทอรอล ดังแสดงด้วย
 oscillogram ในรูป 6-4b

องค์ประกอบฮาร์โมนิคที่ 3 ของกระแสกระตุ้นทำให้เกิดโวลท์เตจฮาร์โมนิคที่ 3
 ขนาดเล็กตกรวมที่ leakage impedance ทางประจุมุมของหม้อแปลง ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่
 ถูกเหนี่ยวนำโดยฟลักซ์ร่วมก็จะมีองค์ประกอบฮาร์โมนิคที่ 3 ขนาดเล็กน้อยอยู่ ซึ่งจะปรากฏ
 ออกมาเป็นองค์ประกอบขนาดเล็กของโวลท์เตจทุติยภูมิของหม้อแปลงเนื่องจากแรงคลื่นไฟฟ้าฮาร์-
 มอนิคที่ 3 ในหม้อแปลงทั้ง 3 มีเฟสตรงกัน โวลท์เตจที่จุดเปิดของทุติยภูมิซึ่งต่อแบบ Δ จึงมี
 องค์ประกอบที่ฮาร์โมนิคที่ 3 เป็น 3 เท่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮาร์โมนิคที่ 3 ที่เกิดขึ้นในแต่ละ
 ทุติยภูมิ ส่วนฮาร์โมนิคที่ 1, 5, 7 ฯลฯ ของขดทุติยภูมิทั้ง 3 มีขนาดเท่ากันแต่ละเฟสกัน 120
 องศา ผลรวมจึงเป็นศูนย์และไม่มีโวลท์เตจไปตกรวมที่จุดเปิดของ Δ ถ้าไม่คิดฮาร์โมนิคอันดับ
 สูงกว่า 7 โวลท์เตจที่ปรากฏที่จุดเปิดของ Δ จะเป็น 3 เท่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮาร์โมนิคที่ 3
 ที่เกิดขึ้นในขดทุติยภูมิแต่ละขด โดยที่หม้อแปลงทั้ง 3 เหมือนกันทุกประการและโวลท์เตจที่จ่ายให้
 สมดุล แม้ว่าโวลท์เตจฮาร์โมนิคที่ 3 มักมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับโวลท์เตจทุติยภูมิที่ขั้วของ
 หม้อแปลง แต่ก็มีผลกระทบที่สำคัญต่อปรากฏการณ์การกระตุ้นสนามแม่เหล็กเมื่อปิดวงจร ซึ่ง
 จะได้กล่าวต่อไป

ถ้าปิดวงจร Δ แรงเคลื่อนไฟฟ้าฮาร์โมนิคที่ 3 ทางทุติยภูมิ จะทำให้เกิดกระแส
 ทุติยภูมิฮาร์โมนิคที่ 3 ไหลวนในวงจรทุติยภูมิ Δ แรงเคลื่อนแม่เหล็กฮาร์โมนิคที่ 3 ซึ่งจำเป็น
 ต้องมีเพื่อให้ การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กในหม้อแปลง 3 เฟส เป็นคลื่นรูปไซน์ จะถูก
 สร้างจากกระแสกระตุ้นฮาร์โมนิคที่ 3 ทั้งประจุมุมและทุติยภูมิ เหมือนในกรณี $\Delta - \Delta$ ซึ่งได้
 กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 1C ดังนั้นองค์ประกอบฮาร์โมนิคที่ 3 ของกระแสประจุมุมก็จะลดลงเมื่อปิด
 วงจร Δ ทุติยภูมิ

ถ้าปิดวงจร Δ ทุติยภูมิและไม่ต่อจุดนิวทอรอล ดังรูปที่ 6-7a รูปคลื่นของโวลท์เตจ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Y-Δ bank with isolated neutral; (a) connections, and (b) oscillograms of the voltage to neutral v_{AN} , the exciting current $i_{\phi A}$, and the exciting current $i_{\phi \Delta}$ in the secondary Δ.

รูปที่ 6-7

เทียบกับจุดนิวทรัล v_{AN} , ของกระแสกระตุ้น $i_{\phi A}$ ที่ขดหนึ่งของปฐมภูมิ และของกระแสกระตุ้น $i_{\phi \Delta}$ ในขดทุติยภูมิ แสดงเป็น Oscillogram ได้ดังรูป 6-7b ในกรณีเช่นนี้จะไม่มีองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ของกระแสปฐมภูมิเพราะทางกลับคือสายนิวทรัลถูกเปิดวงจร ดังนั้นรูปคลื่นของกระแสกระตุ้นในรูป 6-7b จึงต่างจากรูปคลื่น $i_{\phi A}$ ในรูป 6-4b สาเหตุของความแตกต่างก็คือการแยกจุดนิวทรัลของ Y ทำให้ไม่มีองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 การปิดวงจร Δ ของทุติยภูมิทำให้เกิดทางเดินของกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 และองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กถูกสร้างโดยกระแสกระตุ้นฮาร์โมนิกที่ 3 $i_{\phi \Delta}$ ในขดทุติยภูมิ Δ นี้เอง ในเมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮาร์โมนิกที่ 3 เป็นตัวสร้าง กระแส Δ ฮาร์โมนิกที่ 3 พลักซ์รวมก็จะปรับตัวเองให้มีองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 เพื่อใช้สร้างฮาร์โมนิกที่สามขนาดเล็ก ๆ ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าทุติยภูมิ พลักซ์รวมนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ขึ้นในโวลต์เตจเทียบกับนิวทรัลทางด้านปฐมภูมิ แต่มักจะมีขนาดเล็กมาก รูปคลื่นของโวลต์เตจปฐมภูมิเทียบกับนิวทรัลจึงยังคงเป็น sinusoid ดัง oscillogram v_{AN} ในรูป 6-7b

จากที่ได้กล่าวมานี้ รวมถึงในหัวข้อ 1e ทำให้เห็นถึงผลของการต่อขดลวดแบบ Δ ที่มีต่อปรากฏการณ์การกระตุ้นสนามแม่เหล็ก

กระแสกระตุ้นฮาร์โมนิกที่ 3 จะไหลอยู่ในขดลวดที่ต่อเป็น Δ ของ Δ - Δ, Δ - Y หรือ Y - Δ (ในกรณีที่หม้อแปลงเหมือนกันทุกประการ). แต่ไม่สามารถปรากฏในไลน์ 3 เฟสที่ต่อกับหม้อแปลง เมื่อไม่ต่อจุดนิวทรัลของขดลวดที่ต่อแบบ Y เข้ากับนิวทรัลของระบบอื่น

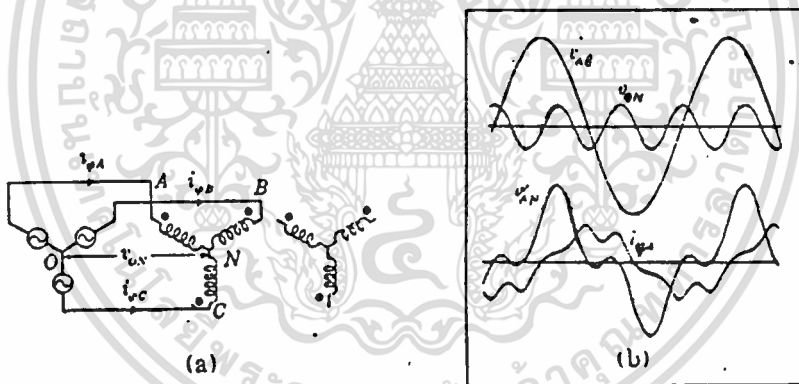
หรืออีกนัยหนึ่ง กระแสกระตุ้นฮาร์โมนิกที่ 3 จะปรากฏในไลน์ปฐมภูมิที่จ่ายไฟให้

หม้อแปลงซึ่งต่อแบบ Y-Y และต่อนิวทรัลของปฐมภูมิ เข้ากับนิวทรัลของแหล่งจ่าย อาจก่อให้เกิดปัญหาหาการรบกวนแบบเหนี่ยวนำ แต่ถ้ากำจัดกระแสกระตุ้นฮาร์โมนิกที่ 3 โดยการแยกจุดนิวทรัลของหม้อแปลง Y-Y โวลต์เตจเทียบกับนิวทรัล อาจมีปัญหามาก ดังจะกล่าวต่อไปนี้

2d. การต่อแบบ Y - Y โดยแยกจุดนิวทรัล

ในการต่อแบบ Y - Y ของหม้อแปลง 1 เฟส ควรศึกษาเงื่อนไขในการใช้งานอย่างระมัดระวัง เพราะการต่อแบบนี้บางครั้งอาจทำให้เกิดสภาวะที่ไม่ต้องการหรืออาจเป็นอันตรายก็ได้

พิจารณาหม้อแปลง 1 คู่ ซึ่งต่อแบบ Y-Y โดยแยกจุดนิวทรัล ได้รับไฟจากแหล่งจ่าย 3 เฟส ที่สมดุล และ โวลต์เตจจะมีรูปคลื่นเป็น sinusoid สมมติว่าหม้อแปลงกลุ่มนี้ไม่ได้จ่ายโหลด ลักษณะของวงจรแสดงในรูปที่ 8



Y-Y bank of single-phase transformers; (a) connections, and (b) oscillograms of the line-to-line voltage v_{AB} , the voltage to neutral v_{AN} , the exciting current i_{eA} , and the voltage v_{ON} between the neutral O of the source and the primary neutral N .

รูปที่ 6-8

เมื่อนิวทรัลของปฐมภูมิไม่ต่อกับนิวทรัลของแหล่งจ่าย ผลรวมขณะใดขณะหนึ่งของกระแสกระตุ้นที่จ่ายให้กับกลุ่มหม้อแปลงต้องเป็นศูนย์ นั่นคือกระแสกระตุ้นที่จ่ายให้กับหม้อแปลงตัวใดตัวหนึ่งจะไหลกลับสู่แหล่งจ่ายผ่านทางปฐมภูมิของหม้อแปลงตัวอื่น จะทำให้เกิดความเกี่ยวข้องกับของกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงแต่ละตัว ผลก็คือ โวลต์เตจที่เกิดที่หม้อแปลงจะหาได้จากคุณสมบัติการกระตุ้นสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงเหล่านี้ เป็นที่ยากมากที่หม้อแปลงทั้ง 3 จะมีคุณสมบัติ

การกระตุ้นสนามแม่เหล็กเหมือนกันทุกประการแม้ว่าจะออกแบบมาเหมือนกันก็ตาม โวลต์เตจเอกสารถือเป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบกับนิวัตกรอลจึงมักจะ ไม่สมดุลกัน แม้ว่า line to line voltage จะสมดุล ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่พึงประสงค์

การแยกจุดนิวัตกรอลยังมีผลที่สำคัญต่อฮาร์โมนิกในกระแสกระตุ้น ในเรื่องนี้สมมติว่าหม้อแปลงมีคุณสมบัติการกระตุ้นสนามแม่เหล็กเหมือนกัน ดังนั้นกระแสกระตุ้นที่จ่ายให้กับหม้อแปลงแต่ละตัวจะมีขนาดเท่ากันแต่ต่างเฟสกัน 1 ใน 3 ของลูกคลื่น ซึ่งถ้าหากว่ามีองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ในกระแสกระตุ้นมันจะมีเฟสตรงกันและผลรวมของมันต้องไม่เป็นศูนย์

แต่ในเมื่อผลรวมขณะใดขณะหนึ่งของกระแสกระตุ้นต้องเป็นศูนย์ เนื่องจากการแยกจุดนิวัตกรอล จึงไม่สามารถจะมีองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 หรือลำดับอื่น ๆ ที่เป็นค่าที่ถูกต้องของ 3 ในกระแสกระตุ้นได้เลย

Oscillogram ของ $i_{\phi A}$ ในรูป 6-8b เป็นตัวอย่างหนึ่งของรูปคลื่นกระแสกระตุ้นของการต่อแบบ Y - Y โดยแยกจุดนิวัตกรอล จะเห็นว่า $i_{\phi A}$ มีลักษณะเป็น double topped ซึ่งก็เป็นผลมาจากองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 5

เฉพาะฮาร์โมนิกที่ 3 และฮาร์โมนิกลำดับที่เป็นทวีคูณของ 3 เท่านั้นที่ถูกกำจัดโดยการแยกนิวัตกรอล ส่วนฮาร์โมนิกลำดับอื่น ๆ ของกระแสกระตุ้นทั้ง 3 ยังสามารถไหลได้ เนื่องจากมันต่างเฟสกัน 120 องศา และผลรวมเป็นศูนย์

โดยที่องค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ในกระแสกระตุ้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงแบบ sinusoid เมื่อไม่มีกระแสกระตุ้นฮาร์โมนิกที่ 3 จะทำให้การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กไม่เป็น sinusoid และเกิดองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ในเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก ซึ่งจะเห็นยวนำให้เกิดองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ขึ้นในโวลต์เตจทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิในหม้อแปลงแต่ละลูก ที่ความหนาแน่นระดับขรรดาของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก โวลต์เตจฮาร์โมนิกที่ 3 มักจะมีค่าอยู่ในช่วง 30 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบหลักของโวลต์เตจเทียบกับนิวัตกรอล ดังนั้นแม้ว่าโวลต์เตจที่จ่ายให้หม้อแปลงทางขั้วไลน์ จะเปลี่ยนแปลงแบบ sinusoid แต่รูปคลื่นของโวลต์เตจเทียบกับนิวัตกรอลกลับไม่เป็น sinusoid เมื่อจุดนิวัตกรอลของกลุ่มหม้อแปลงไม่ต่อเข้ากับจุดนิวัตกรอลของแหล่งจ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารความลับพิเศษของค่าขณะใดขณะหนึ่งระหว่าง line to line voltage และ line to ground voltage. ไม่ควรเปิดเผยให้ผู้อื่นรู้ หากจำเป็นต้องเปิดเผยเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

to neutral voltage คือ

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN} \tag{6-7}$$

$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN} \tag{6-8}$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN} \tag{6-9}$$

โดยที่องค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 และที่เป็นค่าทวีคูณของ 3 ของโวลต์เตจเทียบกับนิวทรอลทั้ง 3 เฟส มีเฟสตรงกันและมีขนาดเท่ากัน ผลต่างระหว่างองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ของโวลต์เตจเทียบกับนิวทรอล 2 ค่าใด ๆ ทางด้านขวาของสมการ 6-7, 6-8 และ 6-9 จึงมีค่าเป็นศูนย์ ภายใต้เงื่อนไขของความสมดุล

ดังนั้นถ้าจะมีองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 และที่เป็นค่าทวีคูณของ 3 ในโวลต์เตจเทียบกับนิวทรอลได้โดยไม่ปรากฏองค์ประกอบเหล่านี้เลยใน line to line voltage

องค์ประกอบฮาร์โมนิกอื่น ๆ ไม่มีปรากฏใน line to neutral voltage เว้นแต่ว่าจะมีองค์ประกอบเหล่านี้อยู่แล้วใน line to line voltage ดังนั้นถ้า line to line voltage สมดุลและเปลี่ยนแปลงแบบ sinusoid องค์ประกอบหลักของ line to neutral voltage ก็จะมีค่าเท่ากับ $1/\sqrt{3}$ หรือ 0.577 ของค่ายังผลของ line to line voltage ส่วนองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 และที่เป็นค่าทวีคูณของ 3 ของ line to neutral voltage จะหาค่ายังผลได้จากคุณสมบัติทางแม่เหล็กซึ่งไม่เป็นเชิงเส้นของแกนเหล็ก

ถ้าไม่คิดฮาร์โมนิกตั้งแต่อันดับที่ 9 ขึ้นไป และสมมติว่า line to line voltage เป็นคลื่นรูป sine ค่ายังผล V_Y ของโวลต์เตจเทียบกับนิวทรอล คือ

$$V_Y = \sqrt{V_{Y1}^2 + V_{Y3}^2} \tag{6-10}$$

เมื่อ V_{Y1} คือ ค่ายังผลขององค์ประกอบหลัก และ V_{Y3} คือค่ายังผลขององค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 องค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 อยู่ในช่วง 30-70% ขององค์ประกอบหลัก ถ้ากำหนดให้

$$V_{Y3} = 0.50 V_{Y1} \tag{6-11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$V_Y = V_{Y1} \sqrt{1+0.25} = 1.12 V_{Y1} \tag{6-12}$$

$$= 1.12 \frac{V_{line}}{\sqrt{3}} \tag{6-13}$$

เมื่อ V_{line} คือค่ายังผล ของ line to line voltage ที่สมดุลและเปลี่ยนแปลงตามแบบ sinusoid และถือว่าหม้อแปลงมีคุณสมบัติการกระตุ้นสนามแม่เหล็กเหมือนกัน ดังนั้นค่ายังผลของโวลต์เตจเทียบกับนิวทรอลจึงไม่เท่ากับ $V_{line}/\sqrt{3}$ ซึ่งเป็นค่าที่โวลต์เตจเทียบกับนิวทรอลที่เปลี่ยนแปลงแบบ sinusoid แต่จะมากกว่าค่านี้

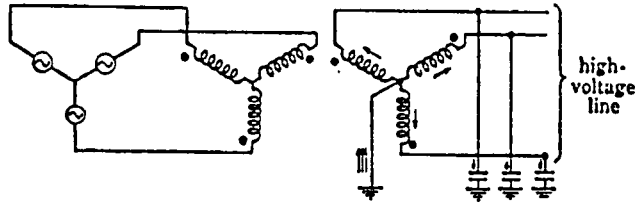
ยิ่งกว่านี้ค่าสูงสุดขององค์ประกอบหลักและฮาร์โมนิคที่ 3 ของโวลต์เตจเทียบกับนิวทรอลเกิดขึ้นที่เวลาเดียวกันโดยประมาณในรอบคลื่น ดังนั้นรูปคลื่นของโวลต์เตจเทียบกับนิวทรอลจึงมียอดแหลมมากดัง oscillogram ของ V_{AN} ในรูป 6-8b ค่ายอด (peak value) ของโวลต์เตจคร่อมหม้อแปลงแต่ละลูกมีค่ามากกว่าค่ายอดขององค์ประกอบหลักประมาณ 30-70% ซึ่งอาจใกล้เคียงกับค่ายอดของ line to line voltage ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ความเครียดจากโวลต์เตจที่เกิดขึ้นที่ฉนวนเพิ่มสูงขึ้น เป็นสภาพที่ไม่ต้องการให้เกิด

เมื่อโวลต์เตจของแหล่งจ่ายแบบ Y สมดุลและเปลี่ยนแปลงแบบ sinusoid และหม้อแปลงมีคุณสมบัติการกระตุ้นสนามแม่เหล็กเหมือนกัน องค์ประกอบฮาร์โมนิคที่ 3 ของโวลต์เตจคร่อมหม้อแปลงจะปรากฏเป็นโวลต์เตจที่มีความถี่เป็น 3 เท่า อยู่ระหว่างนิวทรอลของแหล่งจ่ายและนิวทรอลปฐมภูมิของหม้อแปลง ดัง oscillogram v_{ON} ในรูป 6-8b ถ้าต่อนิวทรอลของแหล่งจ่ายลงดิน โวลต์เตจที่มีความถี่เป็น 3 เท่า ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 30-70% ของโวลต์เตจเทียบกับนิวทรอล จะปรากฏระหว่างจุดนิวทรอลของขดลวดปฐมภูมิกับกราวด์ ถ้าทั้งนิวทรอลของแหล่งจ่ายและนิวทรอลของด้านปฐมภูมิไม่ต่อลงกราวด์ โวลต์เตจระหว่างไลน์กับกราวด์ และระหว่างจุดนิวทรอลของปฐมภูมิกับกราวด์จะหาได้จาก capacitance ของไลน์เทียบกับกราวด์ และขดลวดหม้อแปลงเทียบกับกราวด์

ในบางกรณีโวลต์เตจฮาร์โมนิคที่ 3 อาจจะมีสูงชันอย่างมาก โดยปรากฏการณ์

เอกสารวีซีแอลแซ็ค สารสนเทศอันตรายนี้อาจเกิดขึ้นเมื่อกลุ่มต่อหม้อแปลงต่อเข้ากับสายส่งหรือเคเบิลยาว ๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อต่อจุดนิวทรัลของขดลวดหม้อแปลงดินดังรูปที่ 6-9



Paths of third-harmonic currents produced when a Y-Y bank with grounded neutral is connected to a long transmission line. This connection should be avoided, since excessive third-harmonic voltages may be developed by resonance.

รูปที่ 6-9

ในการต่อแบบนี้ นิวทรัลของกลุ่มหม้อแปลงมีศักย์ไฟฟ้าที่กราวด์ ดังนั้นแม้ว่าโวลต์-เตจฮาร์โมนิกที่ 3 ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นในหม้อแปลงแต่ละลูกจะไม่ปรากฏใน line to line voltage แต่มันจะปรากฏเป็นองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ของโวลต์เตจระหว่างสายไลน์กับกราวด์ โวลต์เตจฮาร์โมนิกที่ 3 นี้ ทำให้เกิดกระแสกระตุ้นฮาร์โมนิกที่ 3 ในวงจรอนุกรมซึ่งประกอบด้วย capacitance ของสายไลน์เทียบกับกราวด์และขดลวดซึ่งต่อลงกราวด์ของหม้อแปลง ดังรูปที่ 6-9 ถ้า capacitive reactance ที่ความถี่เป็น 3 เท่าของสายไลน์เทียบกับกราวด์ มีค่าเท่ากับ magnetizing reactance ที่ความถี่ 3 เท่าของหม้อแปลงโดยประมาณ จะเกิดเงื่อนไขที่เข้าใกล้การรีโซแนนซ์แบบอนุกรม โวลต์เตจฮาร์โมนิกที่ 3 ของไลน์เทียบกับนิวทรัลจะสูงขึ้นอย่างน่ากลัว อาจสูงถึง 3 เท่าของโวลต์เตจที่ไลน์เทียบกับนิวทรัลค่าปกติ

3. การทำให้โวลต์เตจที่นิวทรัลของการต่อแบบ Y - Y เท่ากัน

แม้ว่าจะมีปัญหาในการใช้การต่อ Y - Y แต่บางครั้งก็จำเป็นต้องใช้ โดยเฉพาะกรณีการต่อ Y - Y แบบแยกนิวทรัลซึ่งโวลต์เตจเทียบกับนิวทรัลไม่สมดุล และรูปคลื่นไม่เป็น sinusoid อาจจะทำให้โวลต์เตจเทียบกับนิวทรัลเท่ากันและกำจัดโวลต์เตจฮาร์โมนิกที่ 3 โดยการต่อนิวทรัลของปฐมภูมิกับนิวทรัลของแหล่งจ่าย แต่ก็มีปัญหาที่เกิดการรบกวนแบบเหนี่ยวนำขึ้น ถ้าไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติที่จะต่อนิวทรัลของปฐมภูมิกับนิวทรัลของแหล่งจ่าย ก็

ยังวิธีอื่น ๆ อีกที่ให้ผลอย่างเดียวกัน เช่น การต่อแบบ Y - Y - Δ (Y - Y - Δ) ถ้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Connection)

ฮาร์โมนิกที่ 3 ของโวลต์เตจเทียบกับนิเวทรอลของหม้อแปลง 1φ ที่ต่อแบบ Y - Y จะลดลงได้มาก neutral voltage จะเท่ากัน ถ้าหม้อแปลงแต่ละลูกมีขดลวดขดที่ 3 หรือขด tertiary และขดเหล่านี้ต่อกันเป็น Δ ดังรูปที่ 6-10 การต่อวงจรแบบนี้กระแสกระตุ้นฮาร์โมนิกที่ 3 ที่จำเป็นต้องมีเพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงแบบ sinusoid สามารถไหลได้ในรูป Δ เหมือนกับวงจร Y - Δ ในหัวข้อ 2c ข้อดีของการต่อแบบนี้คือ กระแสกระตุ้นฮาร์โมนิกที่ 3 ไม่จำเป็นต้องไหลในไลน์ ซึ่งอาจเป็นต้นเหตุของการรบกวนวงจรโทรศัพท์ ถ้าคุณสมบัติการกระตุ้นสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงแต่ละลูกไม่เหมือนกัน วงจร tertiary Δ ก็จะเป็นวงจรให้กระแสกระตุ้นเฟสเดียว หรือกระแสกระตุ้นลำดับศูนย์ (zero sequence) ไหลเพื่อชดเชยความแตกต่างของคุณสมบัติการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก และป้องกันการไม่สมดุลของโวลต์เตจเทียบกับนิเวทรอลที่อาจเกิดขึ้นในวงจร Y - Y ที่แยกจุดนิเวทรอล

การออกแบบขดลวด tertiary ขึ้นอยู่กับระบบที่ต่อและสภาพการใช้งานของขด tertiary เช่น ถ้านิเวทรอลของทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิไม่ต่อกับระบบอื่น และขด tertiary Δ ไม่มีโหลด กระแสที่ไหลในขด tertiary ก็จะมีเพียงกระแสกระตุ้นฮาร์โมนิกที่ 3 และที่เป็นลำดับศูนย์ เท่านั้น ดังนั้นก็สามารถใช้ขดลวดขนาดเล็กได้ อย่างไรก็ตาม นิเวทรอลของ Y ด้านแรงสูงมักต่อลงกราวด์ ดังรูปที่ 6-10 และบางครั้งจุดนิเวทรอลทั้งคู่อาจต่อลงกราวด์ ภายใต้งี๋เอ็นโซนี้ อาจเกิดการเหนี่ยวนำกระแสขนาดใหม่ขึ้นในขด tertiary เนื่องจากเกิด line to ground fault ของระบบแรงสูง ดังนั้นขด tertiary จะต้องทนต่อความร้อนและแรงทางกลที่เกิดขึ้นจาก fault นอกจากนี้ยังมักใช้ขด tertiary Δ จ่ายโหลด เช่น วงจรช่วยในสถานีย่อย static หรือ synchronous condensers สำหรับการควบคุมตัวประกอบกำลังและโวลต์เตจ ลักษณะนี้ขด tertiary ต้องสามารถทนผลจากการลัดวงจรที่ชั่วของมันเองได้ด้วย

4. สรุป

จุดสำคัญของเนื้อหาที่ได้กล่าวถึงในเรื่องปรากฏการณ์ฮาร์โมนิกในวงจรสามเฟสสม-
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ควรสรุปดังต่อไปนี้ องค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ของกระแสและโวลต์เตจในวงจรสามเฟสสมดุล

มีขนาดเท่ากันและเฟสตรงกัน ส่วนลำดับเฟสขององค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 5 ตรงกันข้ามกับลำดับเฟสขององค์ประกอบหลัก

เนื่องจากการมีเฟสตรงกัน กระแสฮาร์โมนิกที่ 3 จึงไม่สามารถไหลในไลน์ในระบบสามเฟสสมดุลได้ ยกเว้นเมื่อมีทางไหลกลับโดยต่อนิวทรอล อย่างไรก็ตามกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 สามารถไหลในวงจร Δ โดยไม่ปรากฏในไลน์ที่ต่อกับ Δ

กระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ในไลน์ของระบบ 3 เฟส อาจเป็นสาเหตุของการรบกวนแบบเหนี่ยวนำ ในวงจรสื่อสารที่ขนานไปกับสายส่งกำลัง ทั้งนี้เป็นเพราะผลของการเหนี่ยวนำมีลักษณะที่เสริมกัน

จากการที่ผลรวมขณะใดขณะหนึ่งของ line to line voltage ของระบบ 3 เฟส ต้องเป็นศูนย์ องค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 จึงไม่สามารถปรากฏใน line to line voltage ของระบบ 3 เฟส สมดุล เพราะองค์ประกอบเหล่านี้มีเฟสตรงกัน ผลรวมไม่เป็นศูนย์ แต่ก็อาจจะมียังองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ในโวลต์เตจเทียบกับนิวทรอลโดยไม่ปรากฏใน line to line voltage เลย

คุณสมบัติทางแม่เหล็กของเหล็กที่ตัดวงจรกระแสกระตุ้นที่มีองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 เพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบ sinusoid องค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 นี้มีขนาดประมาณ 40% ขององค์ประกอบหลักของกระแสกระตุ้น

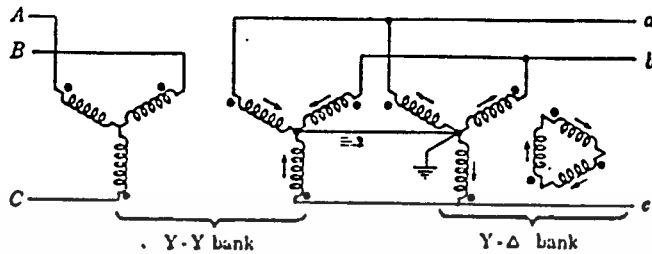
การประยุกต์หลักการต่อวงจร 3 เฟส ของหม้อแปลง 1 เฟส สรุปลงได้ดังต่อไปนี้
ถ้าต้องการให้โวลต์เตจของหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงแบบ sinusoid ก็ต้องยอมให้มีกระแสกระตุ้นฮาร์โมนิกที่ 3 ไหลทั้งในขดลวดที่ต่อแบบ Δ หรือผ่านทางจุดนิวทรอล

แม้ว่าคุณสมบัติของการต่อแบบ Y - Y ที่มีสายนิวทรอล จะมีความเหมาะสมอยู่พอสมควร แต่การที่ต้องมีสายที่ 4 ก็เป็นข้อด้อย และยังก่อให้เกิดกระแสกระตุ้นฮาร์โมนิกที่ 3 ในไลน์ 3 เฟส ซึ่งปัญหาที่ตามมาคือ การรบกวนแบบเหนี่ยวนำ

การกำจัดกระแสกระตุ้นฮาร์โมนิกที่ 3 เช่นในการต่อแบบ Y - Y โดยแยกนิวทรอลโวลต์เตจเทียบกับนิวทรอลอาจจะไม่สมดุล และอาจจะมียังองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ขนาดใหญ่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รวบรวมไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษานำไปประกอบความรู้ไม่ใช่ว่าการคัดลอกไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ขึ้น ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม โวลต์เตจเทียบกับนิวทรอลที่เป็นฮาร์โมนิกที่ 3 นี้ อาจทำให้เกิด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเสียหายเนื่องจากปรากฏการณ์รีโซแนนซ์ ดังนั้นการต่อหม้อแปลง 1 เฟส แบบ Y - Y จึง
ต้องใช้ด้วยความระมัดระวัง



Use of a Y-Δ bank of grounding transformers to equalize the neutral voltages and eliminate third-harmonic voltages in a Y-Y bank. The arrows show the circuits for the third-harmonic exciting currents of the Y-Y bank.

รูปที่ 6-10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวการทดลอง

การทดลองในบทที่แบ่งเป็น 4 หัวข้อ เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฮาร์โมนิกในแง่มุมต่าง ๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

การทดลองที่ 1 ศึกษาฮาร์โมนิกของหม้อแปลงขณะหม้อแปลง ไม่มีโหลด เพื่อให้เห็นสภาพฮาร์โมนิกของกระแสกระตุ้น เมื่อต่อวงจรหม้อแปลงแบบต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน

การทดลองที่ 2 จากทฤษฎีเราได้ทราบว่า เราสามารถใช้ชุดลวดชุดที่ 3 (tertiary winding) มาต่อกันเป็นวงจรเตลต้าเพื่อลดฮาร์โมนิกที่สามของกระแสและโวลต์เตจในชุดลวดหลักได้ การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อให้เห็นจริง ถึงสภาพดังกล่าว

การทดลองที่ 3 จะศึกษาว่าฮาร์โมนิกที่เกิดจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กหม้อแปลงนั้น มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร เมื่อหม้อแปลงนั้นมีโหลด ซึ่งเป็นสภาพใช้งานตามปกติ โหลดในทันที โหลดความต้านทาน ซึ่งตรวจสอบแล้วว่าไม่ก่อให้เกิดฮาร์โมนิก ดังนั้นถ้ากระแส หรือ โวลต์เตจเกิดมีฮาร์โมนิก ก็ย่อมเป็นฮาร์โมนิกของหม้อแปลง

การทดลองที่ 4 ใน 3 การทดลองแรกนั้นเราสนใจเฉพาะฮาร์โมนิกของหม้อแปลงเอง แต่ในการทดลองนี้เราจะศึกษาว่าถ้าหากโหลดมีฮาร์โมนิก ฮาร์โมนิกของโหลดนั้นจะถูกส่งผ่านสนามแม่เหล็กจากด้านทุติยภูมิ มายังด้านปฐมภูมิได้หรือไม่ และจะมีผลต่อสภาพกระแสและโวลต์เตจของหม้อแปลงอย่างไร

การทดลองที่ 1

ฮาร์โมนิคของกระแสกระตุ้น ขณะไม่มีโหลด

วงจรหม้อแปลงที่ทดลองในการทดลองนี้มี 8 วงจร

1. หม้อแปลง 1 เฟส 8. V connection
2. $\Delta - \Delta$
3. $\Delta - Y$
4. Y - Y Primary neutral connected to source neutral
5. Y - Y with isolated neutral primary - source
6. Y - Δ Primary neutral connected to source neutral
7. Y - Δ with isolated neutral primary - source

ซึ่งจะได้นำเสนอข้อมูลจากการทดลองทั้ง 8 วงจร ตามลำดับ

เนื่องจากการทดลองนี้ เราสนใจรูปคลื่นของกระแสกระตุ้น และโวลต์เตจ ซึ่งรูปคลื่นในกลุ่มเดียวกันก็จะเหมือนกัน ต่างกันเพียงมีเฟสขยับเท่านั้น เช่น กระแสไลน์ I_A, I_B, I_C ของวงจร $\Delta - \Delta$ เป็นต้น ดังนั้นเราจึงนำผลการทดลองมาเสนอไว้เพียง 1 เฟสเท่านั้น และหากอยู่ต่างกลุ่มกัน เช่น line voltage ด้านปฐมภูมิ และ line voltage ทุติภูมิ แต่มีรูปคลื่นเหมือนกัน ก็จะใช้เป็นกราฟเดียวกันด้วย

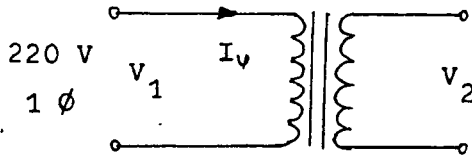
ค่า rms ที่ปรากฏในกราฟ นำมาลงไว้เพื่อให้เห็นภาพได้ชัดเจนขึ้นเท่านั้น ทั้งนี้ เพราะกระแสหรือโวลต์เตจที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน แม้จะไม่เท่ากันแต่ก็ใกล้เคียงกันมาก และหากต้องการเปรียบเทียบเชิงปริมาณระหว่างข้อมูล 2 ส่วน เช่น I-LINE กับ I-Neutral จะต้องพิจารณาค่า rms เป็นหลัก จะพิจารณาจากขนาดของกราฟไม่ได้เพราะใช้สเกลไม่เท่ากัน

การวัดรูปคลื่นของกระแส ทำได้โดยใช้ความต้านทานค่าน้อย ๆ ซึ่งที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 0.1 โอห์ม 10 Watt ต่ออนุกรมเข้าไปในส่วนที่ต้องการวัดแล้วใช้ Oscilloscope จับรูปคลื่นของโวลต์เตจที่ปรากฏคร่อมความต้านทานนั้น ซึ่งถือได้ว่ามีรูปคลื่นเหมือนรูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่าน

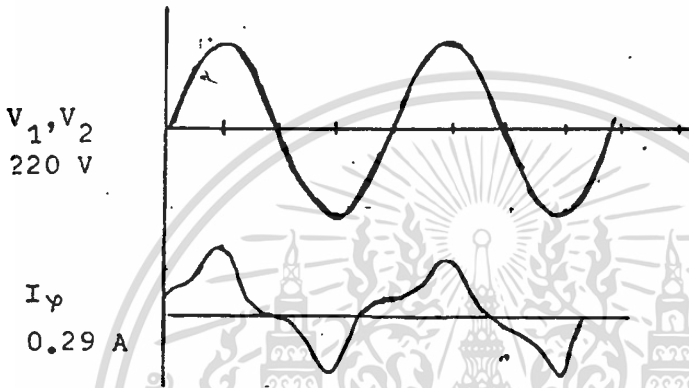
ผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) หม้อแปลง 1 เฟส

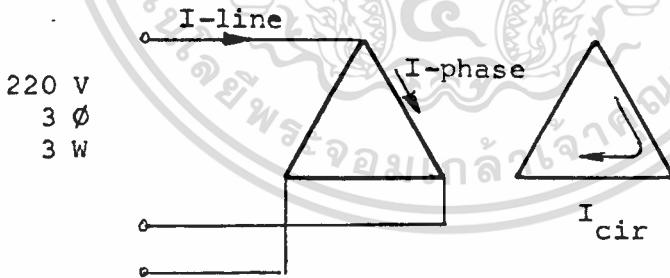


รูปที่ 6-11 วงจรทดลองฮาร์โมนิคในหม้อแปลง 1 เฟส

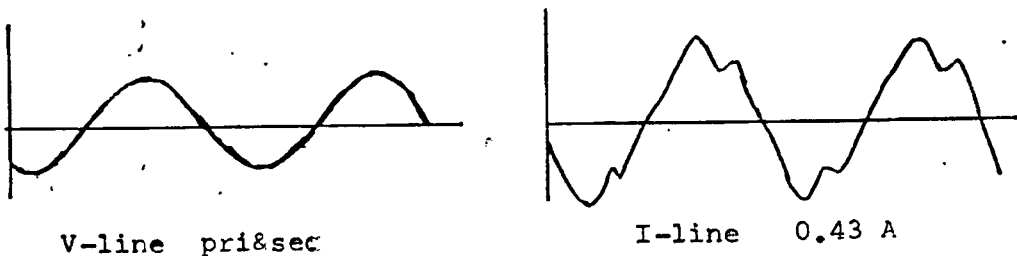


รูปที่ 6-12 รูปคลื่นฮาร์โมนิคในหม้อแปลง 1 เฟส

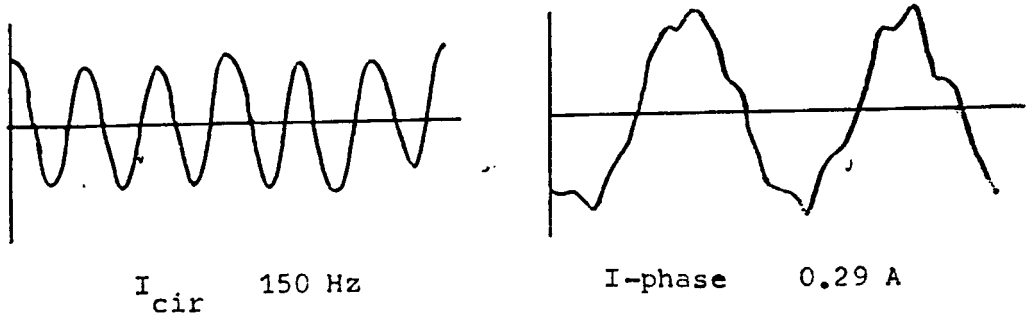
2) Δ - Δ connection



รูปที่ 6-13 วงจรทดลองฮาร์โมนิคใน Δ - Δ

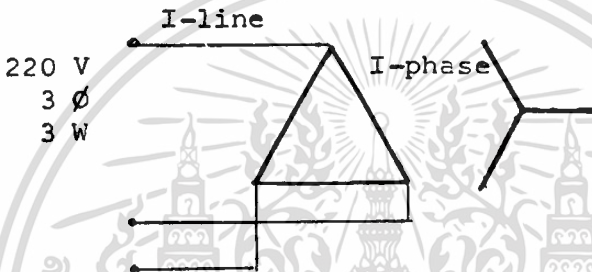


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



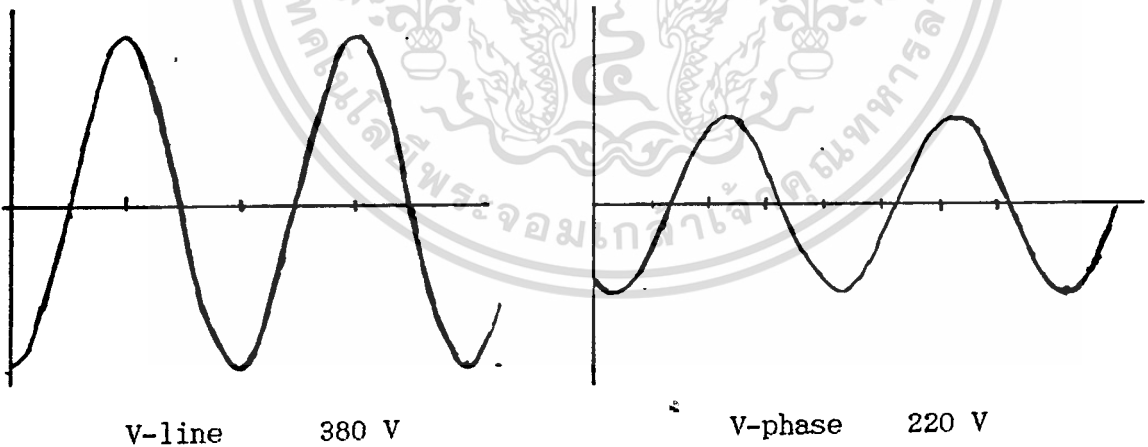
รูปที่ 6-14 ฮาร์โมนิคของ $\Delta - \Delta$

3) $\Delta - Y$



รูปที่ 6-15 วงจรทดลองฮาร์โมนิคใน $\Delta - Y$

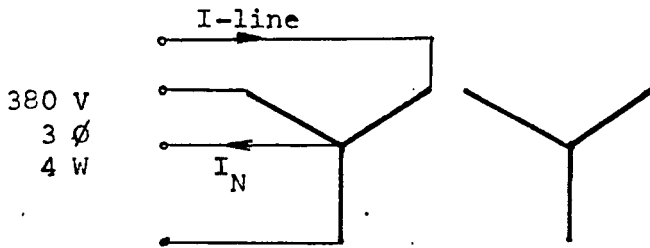
- ด้านปฐมภูมิ เหมือนกับกรณี $\Delta - \Delta$ ส่วนด้านทุติยภูมิ เป็นดังรูป 6-16



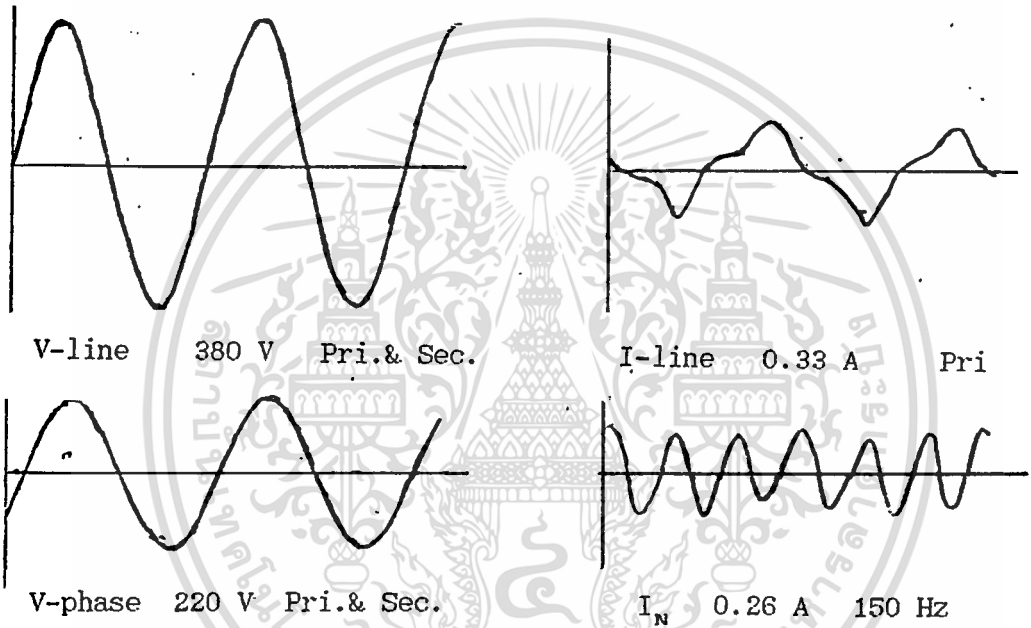
รูปที่ 6-16 ฮาร์โมนิคของ $\Delta - Y$

4) Y - Y Primary neutral connected to source neutral

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

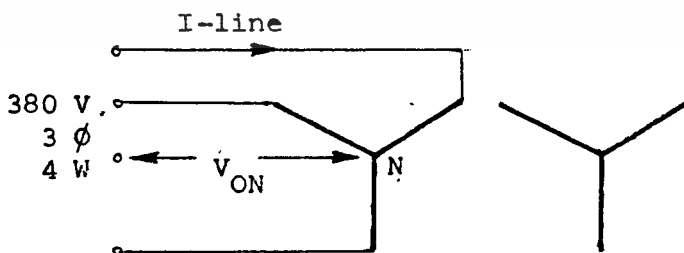


รูปที่ 6-17 วงจรทดลองฮาร์โมนิคใน Y - Y Connected neutral Pri.-Source



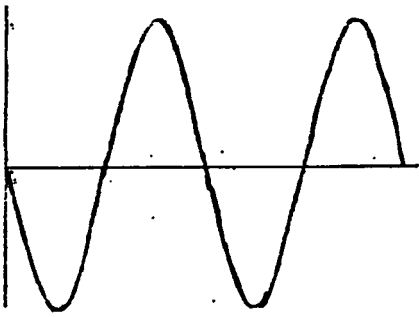
รูปที่ 6-18 ฮาร์โมนิคของ Y - Y Connected neutral Pri-Source

5) Y - Y with isolated neutral primary-source

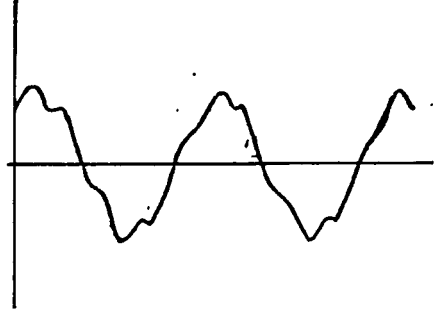


รูปที่ 19 วงจรทดลองฮาร์โมนิคใน Y - Y isolated neutral pri-source

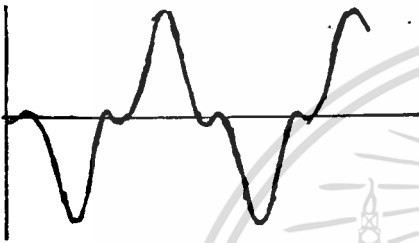
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



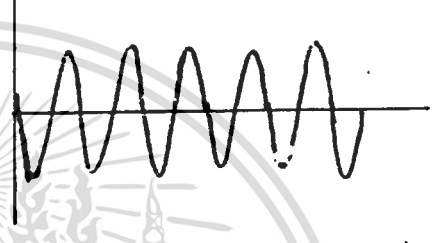
V-line Pri&Sec. 400 V



I-line 0.25 A



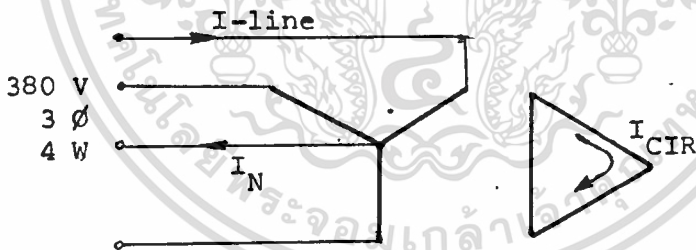
V-phase Pri. & Sec. 240 V



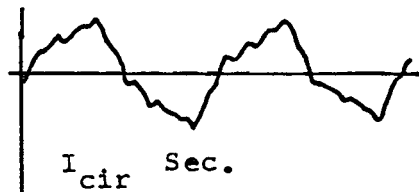
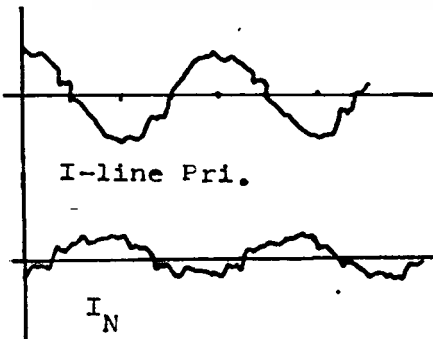
V_{ON} 90.2 V

รูปที่ 6-20 ฮาร์โมนิคของ Y - Y isolated neutral Pri-Source

6) Y - Δ primary neutral connected to source neutral



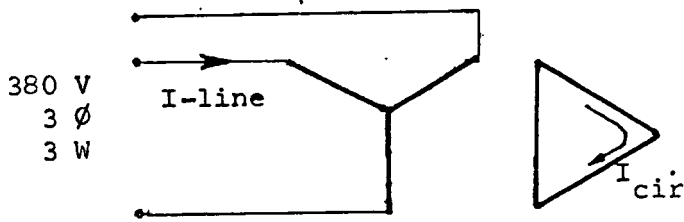
รูปที่ 6-21 วงจรทดลองฮาร์โมนิคใน Y- Δ connected neutral Pri-Source



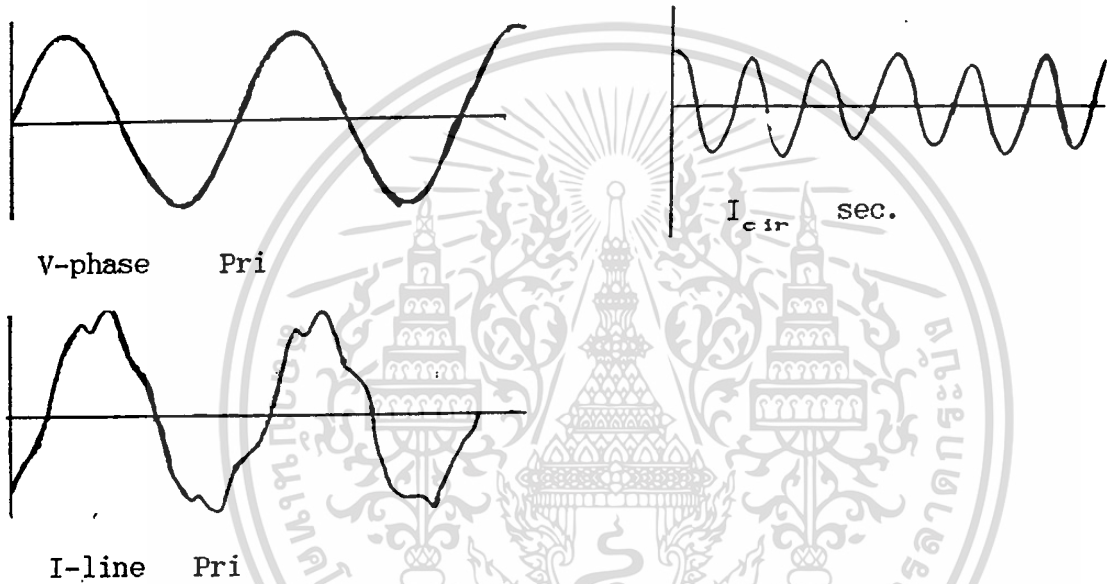
รูปที่ 6-22 ฮาร์โมนิคของ Y- Δ connected neutral Pri-Source

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) Y - Δ with isolated neutral primary-source

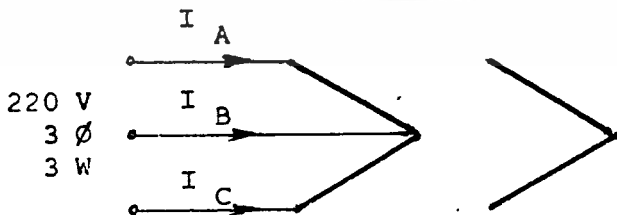


รูปที่ 6-23 วงจรทดลองฮาร์โมนิคใน Y - Δ isolated neutral Pri-Source



รูปที่ 6-24 ฮาร์โมนิคของ Y - Δ isolated neutral Pri-Source

8) V - V

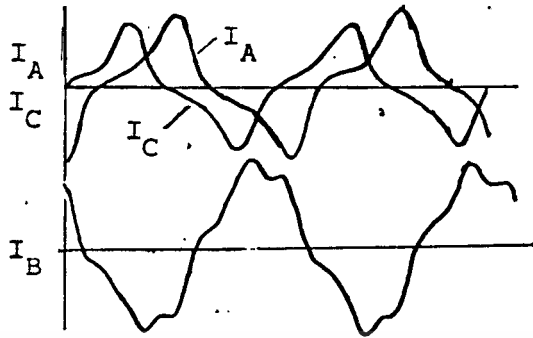


รูปที่ 6-25 วงจรทดลองฮาร์โมนิคใน V connection

- รูปคลื่นของโวลต์เตจทุกส่วนเป็น sine wave ส่วนกระแส I_A , I_B , I_C เป็นดังรูป

ที่ 6-26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



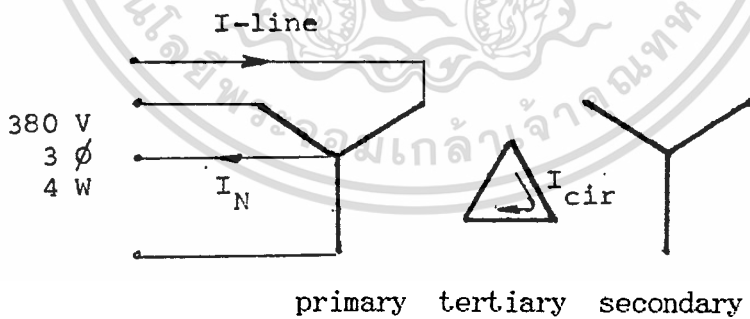
รูปที่ 6-26 ฮาร์โมนิคของ V-connection

การทดลองที่ 2 ผลของ tertiary winding ในการลดฮาร์โมนิค

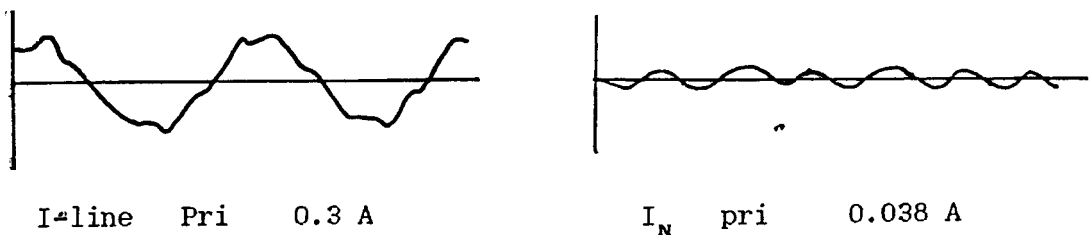
ในการทดลองนี้จะใช้ขด 14 รอบ มาต่อกันเป็นวงจรเตลต้าเพิ่มเข้าไปในวงจร Y - Y connected neutral และ Y-Y isolated neutral

ข้อมูลที่น่าสนใจจะยกเฉพาะส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากที่ได้ทดลองไปแล้วในการทดลองที่ 1 เท่านั้น ส่วนที่ไม่กล่าวถึง หมายถึง ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

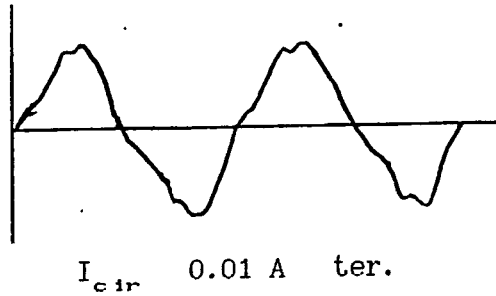
1) Y-Y connected neutral primary- source



รูปที่ 6-27 วงจรทดลอง tertiary winding, Y - Y connected neutral

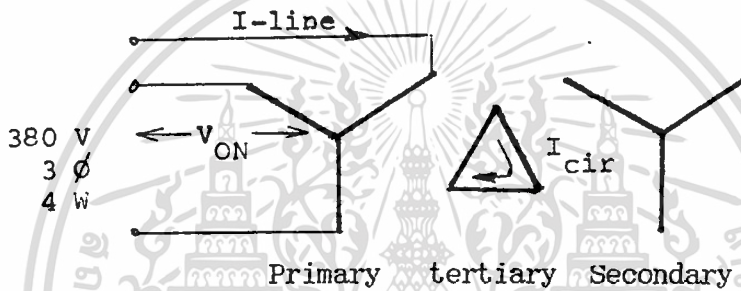


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

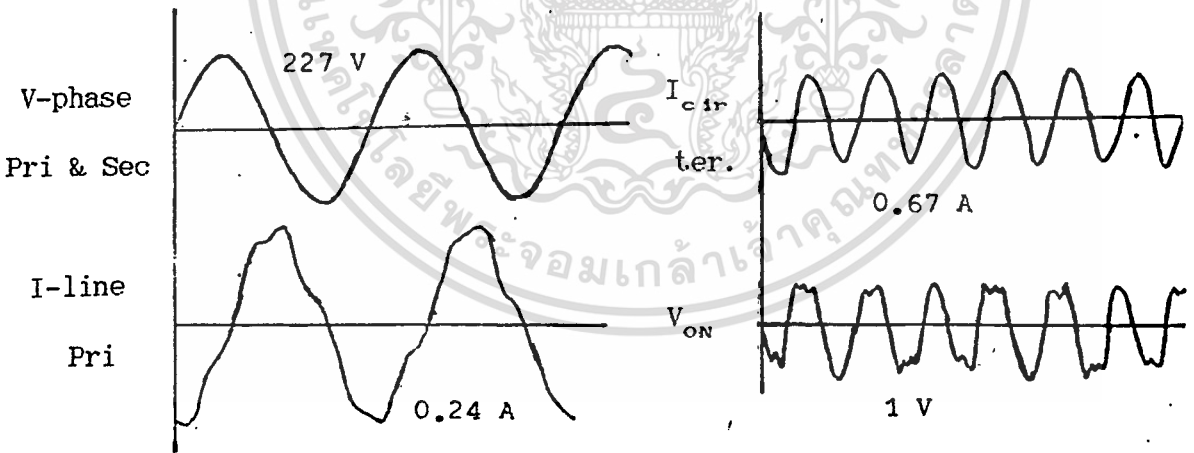


รูปที่ 6-28 ฮาร์โมนิคของ Y-Y connected neutral เมื่อใช้ tertiary winding

2) Y-Y isolated neutral pri-source



รูปที่ 6-29 วงจรทดลอง tertiary winding, Y - Y isolated neutral



รูปที่ 6-30 ฮาร์โมนิคของ Y - Y isolated neutral เมื่อใช้ tertiary winding

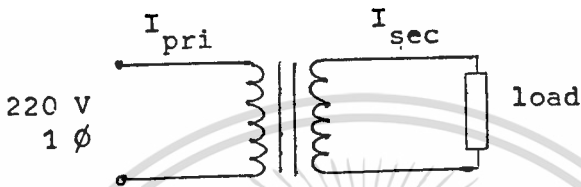
การทดลองที่ 3 ฮาร์โมนิคของหม้อแปลงขณะมีโหลด.

โหลดความต้านทานที่ใช้ในการทดลองนี้มีขนาดประมาณ 40 โอห์มต่อเฟส ซึ่งถ้าต่อวงจรแบบ Y จะทำให้เกิดกระแสไลน์ประมาณ 5.5 A และถ้าต่อวงจรแบบ y จะได้กระแสไลน์ 9.5 A กระแสเฟส 5.5 A ผลการทดลองของวงจรทั้ง 8 วงจร เป็นไปในทำนองเดียวกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

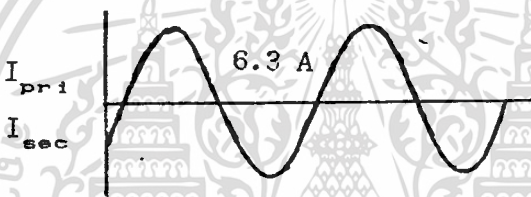
ส่วนใหญ่จะไม่เห็นฮาร์โมนิคในรูปคลื่นของกระแสและโวลท์เตจ ทั้งนี้เพราะฮาร์โมนิคในกระแสมีสัดส่วนน้อยมากเมื่อเทียบกับกระแสไหล

สำหรับผลการทดลองบางกรณี เป็นดังต่อไปนี้

1) 1 เฟส

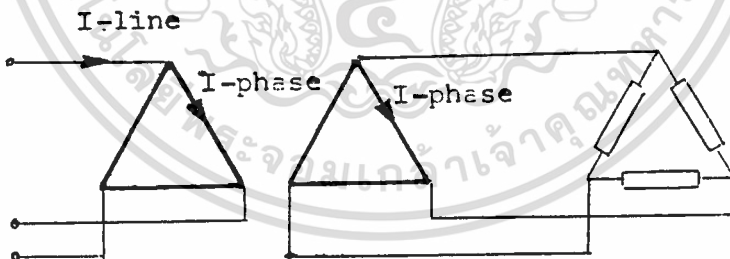


รูปที่ 6-31 วงจรทดลองฮาร์โมนิคขณะมีโหลดของหม้อแปลง 1 เฟส

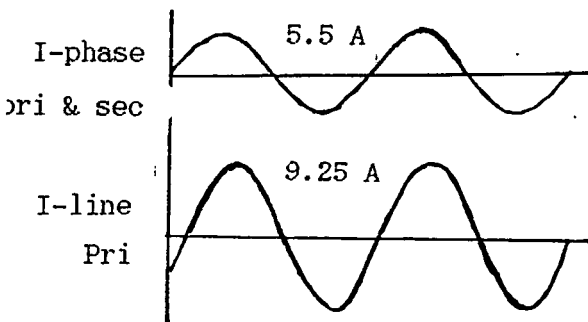


รูปที่ 6-32 รูปคลื่นของกระแสในหม้อแปลง 1 เฟส

2) $\Delta - \Delta$



รูปที่ 6-33 วงจรทดลองฮาร์โมนิคขณะมีโหลด, $\Delta - \Delta$

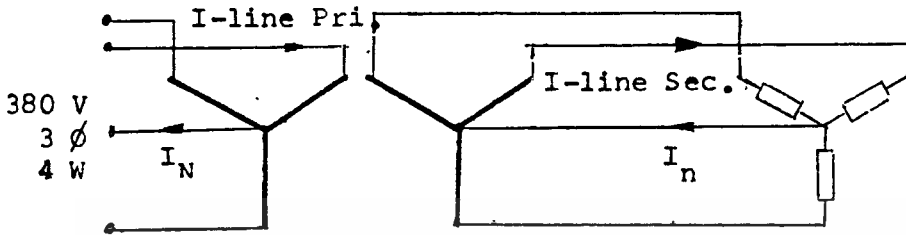


รูปที่ 6-34 รูปคลื่นของกระแสของ $\Delta - \Delta$ ขณะมีโหลด

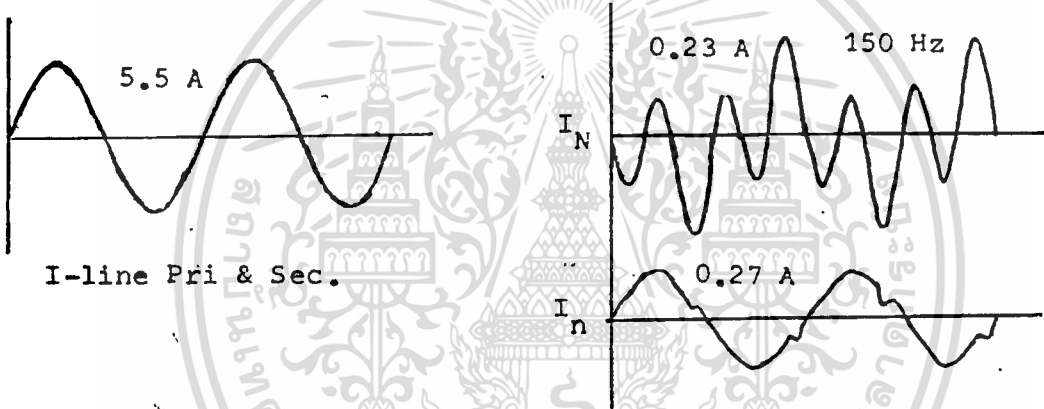
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) Y - Y Connected neutral Pri-Source

Connected neutral Sec-Load

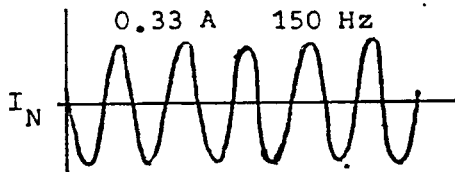


รูปที่ 6-35 วงจรทดลองยาร์โมนิคและมีโหลด Y - Y connected neutral Pri-Source, Connected neutral Sec.-load



รูปที่ 6-36 รูปคลื่นของกระแสของ Y - Y connected neutral Pri-Source, Connected neutral Sec-load

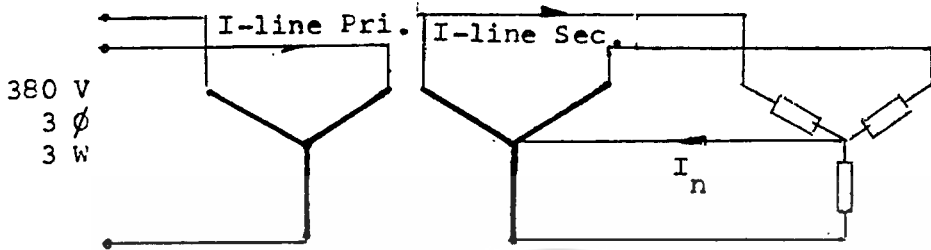
4) จากข้อ 3 เมื่อแยกสายนิวตรอลระหว่าง Sec-Load ออก กระแสไลน์มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่รูปคลื่นยังคงเป็น sine wave ส่วน I_N เป็นดังรูป 6-37



รูปที่ 6-37 รูปคลื่นกระแสนิวตรอลของ Y - Y Connected neutral Pri-Source, isolated neutral Sec.-Load

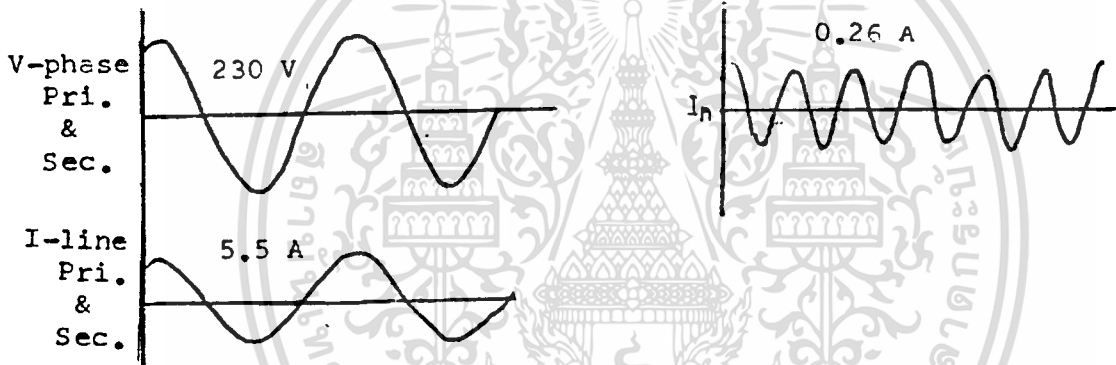
5) Y - Y isolated neutral Pri-Source

connected neutral Sec.-Load



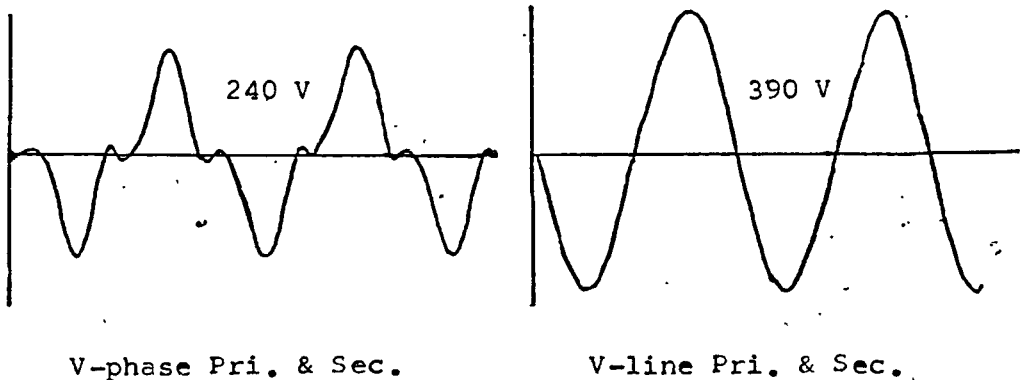
รูปที่ 6-38 วงจรทดลองฮาร์โมนิคขณะมีโหลด Y-Y isolated neutral Pri-Source,

Connected neutral. Sec.-Loa

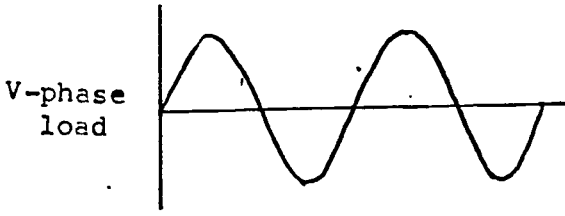


รูปที่ 6-39 รูปคลื่นของ Y - Y isolated neutral Pri-Source, Connected neutral sec.-Load

6) จากข้อ 5 เมื่อแยกสายนิวทรัลระหว่าง Sec.-Load ออก phase voltage ของหม้อแปลงทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิจะเป็นดังรูปที่ 6-40



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

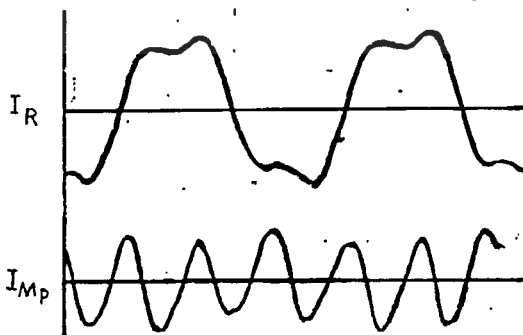
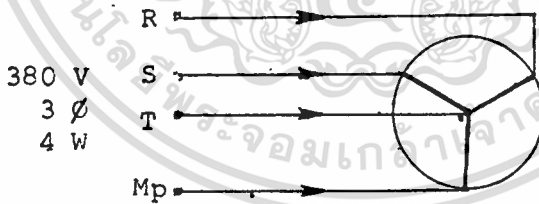


รูปที่ 6-40 รูปคลื่นของ Y - Y isolated neutral Pri-Source,
isolated neutral Sec-Load

การทดลองที่ 4 ผลจากฮาร์โมนิกของโหลดที่มีต่อหม้อแปลง

โหลดที่มีฮาร์โมนิก ที่ใช้ในการทดลองนี้คือ induction motor 3 เฟส แบบ wound type ที่ลัดวงจรขั้วโรเตอร์ จากการทดลองเพื่อตรวจสอบสภาพฮาร์โมนิกในกระแสของมอเตอร์ พบว่าเป็นฮาร์โมนิกที่ 3 จึงต้องต่อขดลวดสเตเตอร์ให้เป็นแบบสตาร์ที่มีสายนิวทรัลเพื่อให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ในไลน์ ถ้าต่อแบบเดลต้า กระแสฮาร์โมนิกที่ 3 จะไหลอยู่ในลูปเดลต้าเท่านั้น ไม่ปรากฏในไลน์ หรือถ้าต่อแบบ Y ที่ไม่มีนิวทรัล ก็จะไม่มีการฮาร์โมนิกที่ 3 เช่นกัน

รูปที่ 6-41 แสดงวงจรทดสอบโหลด และฮาร์โมนิกในกระแสของโหลด



$$I_R = 5.55 \text{ A} \qquad I_S = 5.2 \text{ A}$$

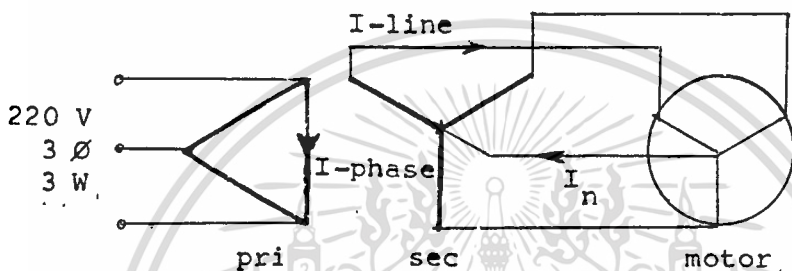
$$I_T = 5.6 \text{ A} \qquad I_{Mp} = 3.6 \text{ A}$$

รูปที่ 6-41

วงจรหม้อแปลงที่ทดลองมี 3 วงจรคือ

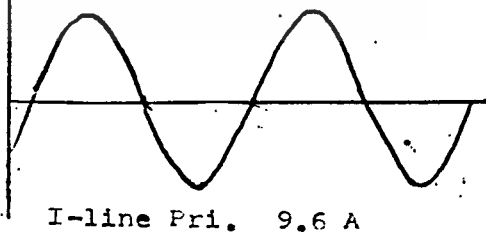
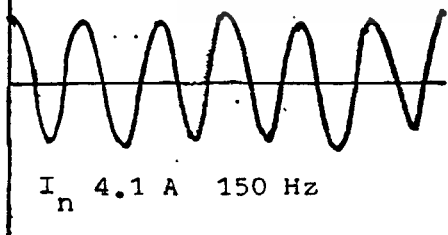
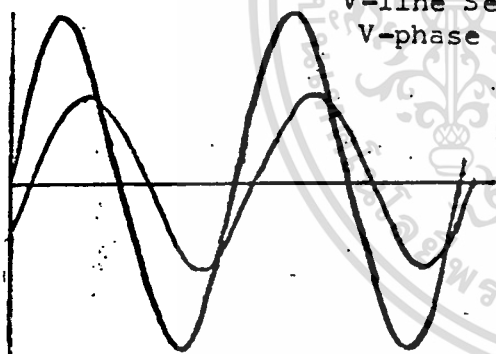
1. $\Delta - Y$
2. Y - Y connected neutral Primary - Source
3. Y - Y isolated neutral Primary - Source

1) $\Delta - Y$



รูปที่ 6-42 วงจรทดลอง $\Delta - Y$ เมื่อโหลดมีอาร์โมติก

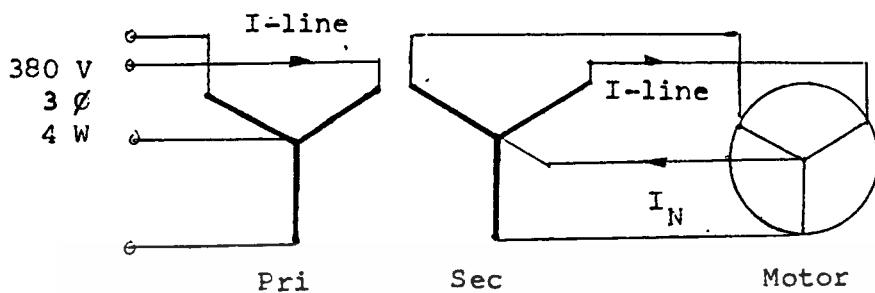
V-line Sec. 380 V
V-phase Sec. 220 V



รูปที่ 6-43 รูปคลื่นเมื่อต่อหม้อแปลงแบบ $\Delta - Y$, โหลดมีอาร์โมติก

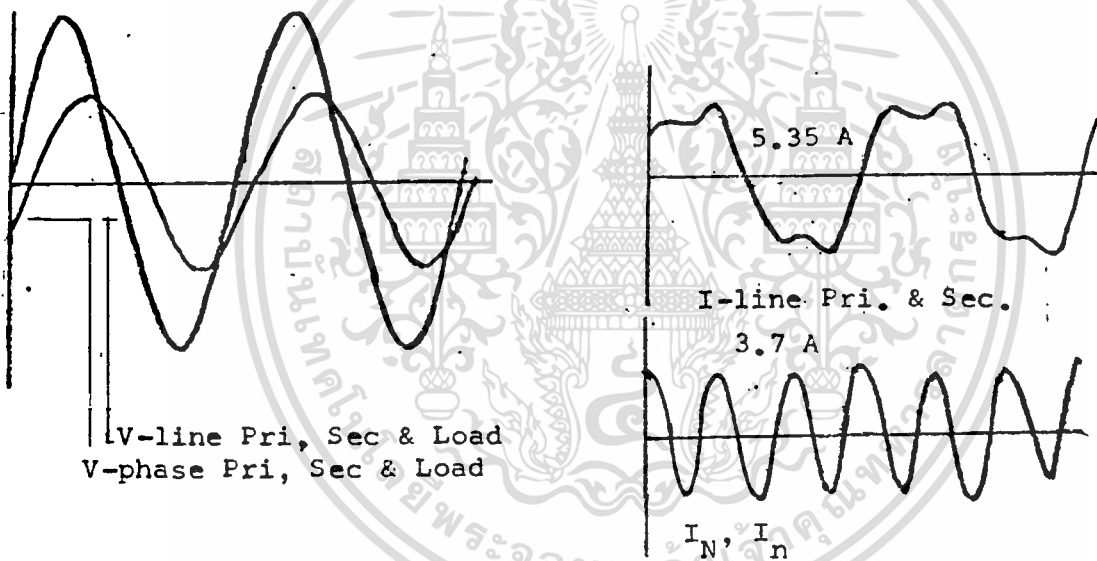
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) Y - Y connected neutral Primary - Source



รูปที่ 6-44 วงจรทดลอง Y - Y connected neutral pri-source

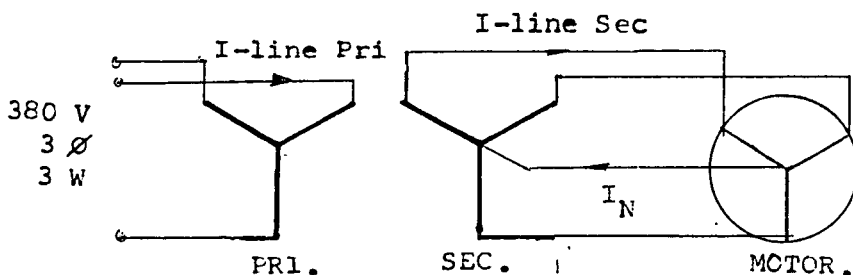
เมื่อโหลดมีขั้วรีโมติก



รูปที่ 6-45 รูปคลื่นเมื่อต่อหม้อแปลงแบบ Y - Y connected neutral pri-source

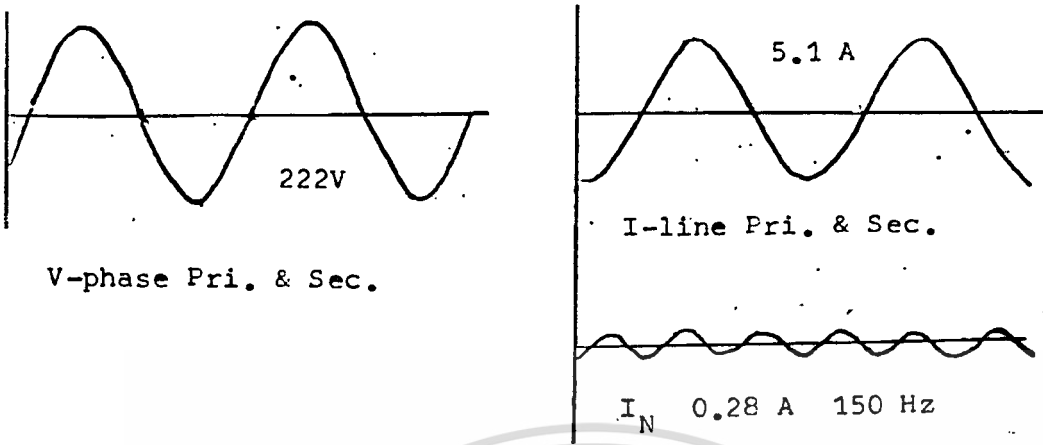
เมื่อโหลดขั้วรีโมติก

3) Y - Y isolated neutral primary - source



รูปที่ 6-46 วงจรทดลอง Y - Y isolated neutral Pri-Source เมื่อโหลดขั้วรีโมติก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-47 รูปคลื่นเมื่อต่อหม้อแปลงแบบ Y - Y isolated neutral Pri-Source
เมื่อโหลดมีฮาร์โมนิค



สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองที่ 1 นั้นฮาร์โมนิกในกระแสกระตุ้น ของแต่ละวงจรส่วนใหญ่จะเป็นไปตามทฤษฎี ซึ่งสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย ยกเว้นในกรณีของวงจร Y - y connected neutral ซึ่งกระแสกระตุ้นฮาร์โมนิกค่อนข้างน้อย และไม่สามารถบอกได้ว่า เป็นฮาร์โมนิกลำดับที่เท่าใด แต่เมื่อแยกนิวตรอลออกปรากฏว่า สภาพฮาร์โมนิกเปลี่ยนโดยเห็นได้ชัดเจนว่าเป็นฮาร์โมนิกที่ 5 ส่วนกระแสไหลวนในลูปเดลต้าเป็นกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 มีความถี่ 150 Hz

การใช้ tertiary winding ต่อเป็นวงจรเดลต้า เพื่อช่วยลดฮาร์โมนิกและเพิ่มเสถียรภาพให้กับวงจรนั้น เห็นได้ชัดเจนว่าช่วยให้กระแสกระตุ้นฮาร์โมนิกที่ 3 ทั้งใน line และในนิวตรอลของวงจร Y - Y connected neutral ลดลงมาก

เมื่อต่อ โหลดให้หม้อแปลง จะเห็นว่าโหลดไม่ได้รับผลกระทบจากฮาร์โมนิกในหม้อแปลงแต่อย่างใด แม้ในวงจร Y - Y isolated neutral ซึ่งปกติแล้ว phase voltage จะมีฮาร์โมนิกที่ 3 สูงมาก แต่เมื่อต่อโหลดแบบ Y โดยต่อนิวตรอลของโหลดเข้ากับนิวตรอลทางด้านทุติยภูมิ ปรากฏว่าฮาร์โมนิกที่ 3 ใน phase voltage ของหม้อแปลงหายไปทั้งนี้อาจเป็นเพราะการต่อนิวตรอลของโหลด ทำให้เกิดทางเดินกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ขึ้น ซึ่งจากคุณสมบัติการกระตุ้นสนามแม่เหล็กของแกนเหล็ก ถ้ามีกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 เส้นแรงแม่เหล็กจะเป็น sine wave ทำให้ phase voltage เป็น sine wave ด้วย ในกรณีที่ไม่ต่อนิวตรอล เมื่อวัด phase voltage และ line voltage ที่โหลดปรากฏว่าไม่มีฮาร์โมนิกอยู่ แสดงว่าถึงแม้ phase voltage ของหม้อแปลงจะมีฮาร์โมนิกที่ 3 แต่ก็ไม่ส่งผลต่อโหลดเลย

ถ้าโหลดมีฮาร์โมนิก ฮาร์โมนิกนั้นจะถูกส่งผ่านไปทางด้านปฐมภูมิได้ แต่จะถูกส่งไปถึงแหล่งจ่ายหรือไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะของฮาร์โมนิก และการต่อวงจรหม้อแปลง เช่นในกรณีที่โหลดมีฮาร์โมนิกที่ 3 นี้ ถ้าต่อวงจรด้านปฐมภูมิเป็นเดลต้า ฮาร์โมนิกที่ 3 จะถูกกักไว้ที่ลูปเดลต้าของด้านปฐมภูมินั่นเอง

บทที่ 7

สภาวะไม่สมดุลในหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบ 1 เฟสต่อร่วมกัน

ในทางปฏิบัติแล้วการใช้งานหม้อแปลง 3 เฟส จะอยู่ในสภาวะที่ไม่สมดุล ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความไม่สมดุลใน bank โหลดไม่สมดุลหรือมีเฟสเดียว หรือเกิดลัดวงจรขึ้น ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

เมื่อความสะดวกในการอ้างอิง จะขอสรุปความสัมพันธ์ของกระแสและโวลต์เตจทั้งวงจร 1 เฟส และ 3 เฟส ดังนี้

สมการของหม้อแปลง

โดยทั่วไปจะละทิ้งกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก และถือว่ากระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่มีขนาดเท่ากัน แต่มีทิศตรงข้าม ความสัมพันธ์แบบเวกเตอร์ระหว่างกระแสปฐมภูมิ I_1 และ กระแสทุติยภูมิ I_L คือ

$$I_L = aI_1 \dots\dots (7-1)$$

เมื่อ a คืออัตราส่วนรอบ N_1/N_2

ความสัมพันธ์แบบเวกเตอร์ระหว่างโวลต์เตจที่ขั้วปฐมภูมิและทุติยภูมิคือ

$$V_1/a = V_2 + I_L Z_{\text{eq}2} \dots\dots (7-2)$$

เมื่อ $Z_{\text{eq}2}$ คืออิมพีแดนซ์สมมูลทางด้านทุติยภูมิ ในทางกลับกันสมการโวลต์เตจทางปฐมภูมิคือ

$$V_1 = aV_2 + I_1 Z_{\text{eq}1} \dots\dots (7-3)$$

เมื่อ $Z_{\text{eq}1}$ คืออิมพีแดนซ์สมมูลทางด้านปฐมภูมิ

คุณสมบัติของหม้อแปลงเป็นไปตามสมการ 7-1 และ 7-2 หรือ 7-3 นี้

สมการ Line-Voltage

ผลรวมทางเวกเตอร์ของ line to line voltage ตามลำดับ (cyclic order) เป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} = 0 \quad \dots (7-4)$$

$$V_{ab} + V_{bc} + V_{ca} = 0 \quad \dots (7-5)$$

เมื่อ A,B,C หมายถึงด้านปฐมภูมิ และ a,b,c หมายถึงด้านทุติยภูมิ

สมการโวลต์เตจของ Y ความสัมพันธ์ทางเวกเตอร์ระหว่าง line to line voltage และ line to neutral voltage คือ

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN} \quad \dots (7-6)$$

$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN} \quad \dots (7-7)$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN} \quad \dots (7-8)$$

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} \quad \dots (7-9)$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \quad \dots (7-10)$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an} \quad \dots (7-11)$$

โปรดสังเกตว่ามีเพียง 3 ใน 4 ของสมการ 7-4,7-6,7-7 และ 7-8 (หรือสมการ 7-5,7-9,7-10 และ 7-11) ที่เป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นแต่ละสมการสามารถสร้างได้จากสมการที่เหลืออีก 3 สมการได้

สมการ Line - Current : สำหรับวงจรที่ต่อแบบ Y และมีสาย neutral สมการกระแสปฐมภูมิคือ

$$I_A + I_B + I_C = I_N \quad \dots (7-12)$$

เมื่อ I_A, I_B, I_C คือ เวกเตอร์กระแส line ไหลเข้าสู่ปฐมภูมิ และ I_N คือ เวกเตอร์กระแสเนิวตรอล ไหลกลับแหล่งจ่าย ส่วนกระแสทุติยภูมิ

$$I_a + I_b + I_c = I_n \quad \dots (7-13)$$

เมื่อ I_a, I_b, I_c คือ เวกเตอร์ของกระแส line ทางทุติยภูมิ ไหลไปยังโหลดและ I_n คือ เวกเตอร์ของกระแสเนิวตรอล ไหลกลับจากโหลด

สำหรับวงจรเดลต้า หรือสตาร์ที่ไม่ต่อนิวตรอล

$$I_A + I_B + I_C = 0 \quad \dots (7-14)$$

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad \dots (7-15)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส Line และ Δ : ความสัมพันธ์ทางเวกเตอร์ระหว่างกระแส line และกระแส phase Δ คือ

$$I_A = I_{AB} - I_{CA} \quad \dots (7-16)$$

$$I_B = I_{BC} - I_{AB} \quad \dots (7-17)$$

$$I_C = I_{CA} - I_{BC} \quad \dots (7-18)$$

$$I_a = I_{ba} - I_{ac} \quad \dots (7-19)$$

$$I_b = I_{cb} - I_{ba} \quad \dots (7-20)$$

$$I_c = I_{ac} - I_{cb} \quad \dots (7-21)$$

โปรดสังเกตว่ามีเพียง 3 ใน 4 ของสมการ 7-14, 7-16, 7-17 และ 7-18 (หรือสมการ 7-15, 7-19, 7-20 และ 7-21) เท่านั้นที่เป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นแต่ละสมการสามารถสร้างได้จากสมการที่เหลืออีก 3 สมการได้

1. สภาวะไม่สมดุลของการต่อแบบ Δ - Δ

เนื่องจากการต่อแบบ Δ - Δ ทำให้เกิดทางเดินของกระแส 2 ส่วนขนานกันระหว่างแต่ละคู่ของขั้ว line ทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ กระแสในหม้อแปลงจึงไม่ขึ้นอยู่กับกระแสไหลแต่เพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของหม้อแปลง มีปัญหาหลายอย่างที่เกี่ยวกับการทำงานของ Δ-Δ Bank ภายใต้อสภาวะไม่สมดุล อันเนื่องจากโหลดไม่สมดุล หรือความไม่สมมาตรใน Bank ที่เกิดจากอัตราส่วนการแปลงไม่เท่ากัน หรืออิมพีแดนซ์สมมูลย์ ไม่เท่ากัน ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

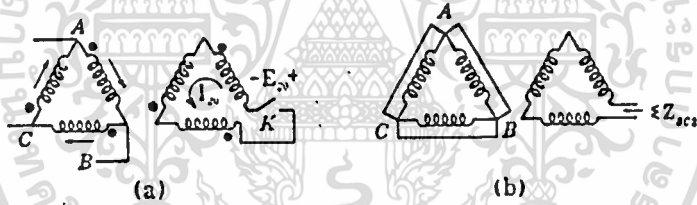
1a. กระแสไหลวนใน Δ - Δ Bank เนื่องจากอัตราส่วนรอบไม่เท่ากัน

การไม่เท่ากันในอัตราส่วนของการแปลงเป็นสาเหตุของกระแสไหลวนใน Δ - Δ Bank กระแสนี้สามารถคำนวณได้โดยใช้ Thevenin 's Theorem

พิจารณากลุ่มหม้อแปลงในรูป 7-1a ซึ่งด้านปฐมภูมิต่อเป็น Δ และด้านทุติยภูมิต่ออนุกรมพร้อมที่จะต่อเป็น Δ อย่างสมบูรณ์เมื่อสวิตช์ K ปิดวงจร

ถ้าอัตราส่วนการแปลงของหม้อแปลงทั้ง 3 เท่ากัน จะไม่มีโวลต์เตจปรากฏพร้อมสวิตช์ K ซึ่งเปิดวงจรอยู่ (ไม่คิดองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ขนาดเล็ก) ทั้งนี้ก็จะไม่มีกระแส (ยกเว้นกระแสกระตุ้นฮาร์โมนิกที่ 3 ขนาดเล็ก) เกิดขึ้นเมื่อสวิตช์ K ปิดวงจร อย่างไรก็ตามถ้าอัตราส่วนการแปลงไม่เท่ากัน จะปรากฏโวลต์เตจ E_{20} ขึ้นที่สวิตช์ K ซึ่งเปิดวงจร โวลต์เตจนี้เท่ากับผลรวมทางเวกเตอร์ของโวลต์เตจทุติยภูมิขณะเปิดวงจร นั่นคือ

$$E_{20} = V_{AB}/a_{AB} + V_{BC}/a_{BC} + V_{CA}/a_{CA} \dots (7-22)$$



รูปที่ 7-1 กระแสไหลวนของ Δ - Δ bank

โดยที่ a_{AB} , a_{BC} , a_{CA} คืออัตราส่วนการแปลง N_1/N_2 ของหม้อแปลงทั้งสาม และใกล้เคียงกับอัตราส่วนของโวลต์เตจขณะเปิดวงจร

เมื่อสวิตช์ K ปิดวงจรลง จะเกิดกระแสทุติยภูมิขึ้น โดย Thevenin Theorem กระแสทุติยภูมินี้เท่ากับโวลต์เตจเปิดวงจร E_{20} หารด้วยอิมพีแดนซ์ วัดที่มุมเปิดของ Δ เมื่อโวลต์เตจที่จ่ายให้คือ V_{AB} , V_{BC} , V_{CA} ถูกตัดวงจร จากรูป 7-1b เห็นได้ชัดว่าอิมพีแดนซ์เท่ากับผลรวมทางเวกเตอร์ของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของหม้อแปลง Z_{sc2} วัดที่ขั้วทุติยภูมิในขณะที่ขั้วปฐมภูมิลัดวงจร ดังนั้นกระแสไหลวน I_{20} ใน Δ ทุติยภูมิ คือ

$$I_{20} = \frac{E_{20}}{\Sigma Z_{SC2}} \dots (7-23)$$

กระแสด้านปฐมภูมิ Δ หาได้จากสมการที่ 7-1 ตัวอย่างเช่น

$$I_{AB} = \frac{I_{20}}{a_{AB}} \dots (7-24)$$

กระแส line ด้านปฐมภูมิ หาได้จากสมการ 7-16, 7-17 และ 7-18 ตัวอย่างเช่น

$$I_A = I_{AB} - I_{CA} = \frac{I_{20}}{a_{AB}} - \frac{I_{20}}{a_{CA}} = \frac{a_{CA} - a_{AB}}{a_{AB} a_{CA}} I_{20} \dots (7-25)$$

โปรดสังเกตว่ากระแสไหลวน I_{20} ถูกจำกัดโดยอิมพีแดนซ์ลัดวงจรซึ่งมีค่าน้อยมาก ผลก็คืออัตราส่วนการแปลงที่ไม่เท่ากันเพียงเล็กน้อย อาจทำให้เกิดกระแสไหลวนขนาดใหญ่ได้ จึงควรหลีกเลี่ยงการต่อ $\Delta - \Delta$ ของหม้อแปลงที่มีอัตราส่วนไม่เท่ากัน แต่สถานการณ์เช่นนี้ก็อาจเกิดขึ้นได้โดยบังเอิญ กับกลุ่มหม้อแปลง $\Delta - \Delta$ ที่มีอุปกรณ์เปลี่ยนแทป (Tap) ในลักษณะที่ตัวเปลี่ยนแทป ทำงานไม่พร้อมกัน

นอกจากนี้จะเห็นว่าแม้กระแสไหลวนใน bank จะมีปริมาณมาก กระแสปฐมภูมิ อาจมีเพียงเล็กน้อย ขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่าง 2 อัตราส่วนการแปลง ดังสมการ 7-25 ดังนั้นกระแสไหลวนขนาดใหญ่อาจปรากฏใน bank โดยไม่ปรากฏการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันกระแส line แต่อย่างใด

1b. สมการทั่วไปของ $\Delta - \Delta$ bank; อัตราส่วนของ การแปลงเท่ากัน

ถ้าไม่คิดกระแสกระตุ้น กระแสปฐมภูมิจะเท่ากับกระแสทุติยภูมิในหม้อแปลงตัวเดียวกัน และมีทิศทางตรงข้าม เมื่อย้ายกระแสทั้ง 2 นี้ไปไว้ที่ข้างเดียวกัน ดังนั้นถ้าหม้อแปลงทั้งสามมีอัตราส่วนเดียวกันคือ a

$$I_{ba} = aI_{AB} \dots (7-26)$$

$$I_{cb} = aI_{BC} \dots (7-27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเบื้องต้นเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{ac} = aI_{CA} \quad \dots (7-28)$$

เมื่อ I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} เป็นเวกเตอร์แทนกระแสประมุขตามทิศทางกฎมือขวา ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเป็นบวก ส่วน I_{ba} , I_{cb} และ I_{ac} เป็นเวกเตอร์แทนกระแสทฤษฎีที่มีทิศตรงข้าม

ถ้าไม่คิดกระแสกระตุ้น สมการเวกเตอร์ของโวลต์เตจคือ

$$V_{AB} = aV_{ab} + I_{AB} Z_{AB} \quad \dots (7-29)$$

$$V_{BC} = aV_{bc} + I_{BC} Z_{BC} \quad \dots (7-30)$$

$$V_{CA} = aV_{ca} + I_{CA} Z_{CA} \quad \dots (7-31)$$

โดยที่ Z_{AB} , Z_{BC} , Z_{CA} คืออิมพีแดนซ์สมมูลย์ด้านประมุขของหม้อแปลง สมการโวลต์เตจเหล่านี้อาจย้ายไปทางด้านทฤษฎีได้เช่นกัน เนื่องจากผลรวมของ line voltage เท่ากับศูนย์ (สมการที่ 7-4 และ 7-5) ผลรวมของสมการ 7-29, 7-30 และ 7-31 ก็คือ

$$I_{AB} Z_{AB} + I_{BC} Z_{BC} + I_{CA} Z_{CA} = 0 \quad \dots (7-32)$$

ถ้าย้ายค่ากระแสและอิมพีแดนซ์ไปไว้ทางทฤษฎี ความสัมพันธ์ก็จะเป็น

$$I_{ba} Z_{ab} + I_{cb} Z_{bc} + I_{ac} Z_{ca} = 0 \quad \dots (7-33)$$

เมื่ออิมพีแดนซ์สมมูล Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca} เป็นค่าทางด้านทฤษฎี

ในขณะนี้เราสามารถหาค่ากระแสและโวลต์เตจในสภาวะการทำงานต่าง ๆ ได้ เช่น กำหนดเวกเตอร์ของ line voltage ทฤษฎีให้มี 2 เฟส และ line current ทฤษฎีอีก 2 เฟส ก็จะหา line voltage ทฤษฎีเฟสที่ 3 และ line current ทฤษฎีเฟสที่ 3 ได้ เพราะผลรวมทางเวกเตอร์ของ line voltage เป็นศูนย์(สมการ 7-5) และผลรวมทางเวกเตอร์ของ line current ก็เป็นศูนย์ด้วย (สมการ 7-15) ส่วนกระแสในหม้อแปลงหาได้โดยแทนค่าสมการ 7-33 ด้วย

$$I_{ac} = I_{ba} - I_a \quad \dots (7-34)$$

$$I_{cb} = I_b + I_{ba} \quad \dots (7-35)$$

ซึ่งได้จากสมการที่ 7-19 และ 7-20 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{ba} Z_{ab} + (I_b + I_{ba}') Z_{bc} + (I_{ba} - I_a) Z_{ca} = 0 \dots (7-36)$$

หรือ

$$I_{ba} = \frac{I_a Z_{ca} - I_b Z_{bc}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}} \dots (7-37)$$

กระแสทุกขุมมีอันสามารถหาได้ในทำนองเดียวกัน และจากสมการ 7-26, 7-27, 7-28 จะหากระแสประมุขมิได้ ส่วนโวลต์เตจประมุขมิหาได้จากสมการ 7-29, 7-30 และ 7-31

สมการที่ 7-37 แสดงให้เห็นว่ากระแสในหม้อแปลงนั้นขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์สมมูลย์ด้วย ดังนั้นถ้า line current สมดุล กระแสในหม้อแปลงจะไม่สมดุล เว้นแต่ว่าจะมีอิมพีแดนซ์สมมูลย์เท่ากัน โดยทั่วไปแล้วหม้อแปลงที่มีอิมพีแดนซ์สมมูลย์น้อยที่สุดจะมีกระแสสูงสุด ลักษณะนี้เหมือนกับพฤติกรรมของอิมพีแดนซ์ที่อยู่ในวงจรขนาน

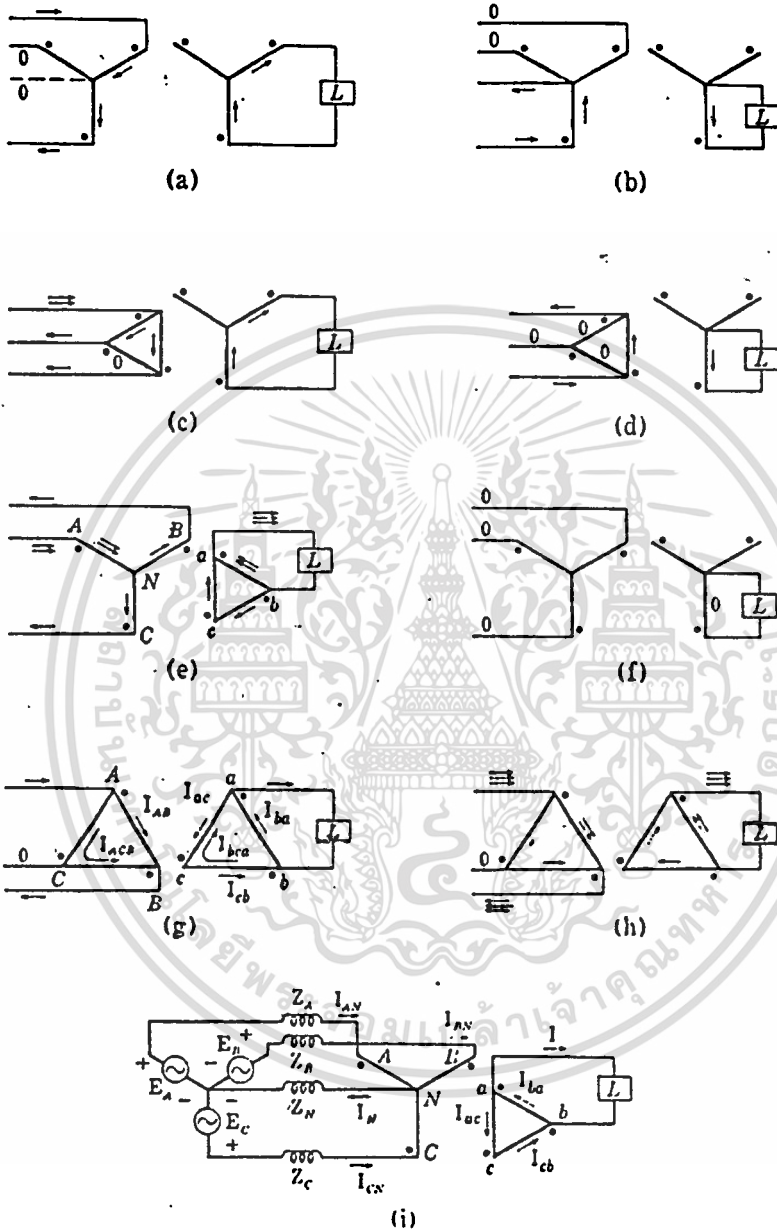
ดังนั้นถ้าหม้อแปลง 3 ลูกที่ต่อแบบ $\Delta - \Delta$ มีนิกัดเท่ากันแต่มีอิมพีแดนซ์สมมูลย์ไม่เท่ากัน จ่ายโหลดสมดุล bank จะไม่สามารถจ่ายโหลดได้เต็มพิกัด KVA โดยไม่เกิดกระแสเกินขึ้น ในหม้อแปลงลูกที่มีอิมพีแดนซ์สมมูลย์ต่ำสุด นี่จึงเป็นเหตุผลที่เราควรจะใช้หม้อแปลงที่เหมือนกันในการต่อแบบ $\Delta - \Delta$ จ่ายโหลดสมดุล

2. กระแสเฟสเดียวใน 3 Phase Bank

เนื่องจากโหลดเฟสเดียวมักจะจ่ายโดยระบบ 3 เฟส ยิ่งกว่านั้นยังอาจเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวขึ้นในระบบเหล่านี้ จึงควรศึกษา การกระจายตัวของกระแส 1 เฟส ใน transformer bank 3 เฟส ไว้บ้าง

รูปที่ 7-2 แสดงการจัดระบบ 3 เฟสของหม้อแปลง จ่ายให้กับโหลด 1 เฟส ในลักษณะต่าง ๆ ขดลวดของหม้อแปลงแสดงด้วยเส้นทึบ ขดลวดประมุขมิและขดลวดขุมมิของหม้อแปลงตัวเดียวกันจะขนานกัน เครื่องหมายจุด (dot) แสดงสภาพขั้วเหมือนกันของทั้งประมุขมิและขดลวดขุมมิ กระแสล้นท์ (ไม่คิดกระแสกระตุ้น) แสดงด้วยลูกศรโดยที่ 1 ลูกศรแทนกระแสหนึ่งหน่วย เมื่อให้

อัตราส่วนรอบเป็นหนึ่งต่อหนึ่ง ในรูป (a), (b), (c), (d) และ (e) การกระจายกระแสถูกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7-2 กระแสเฟสเดียวใน 3 PHASE BANK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำกัดโดยการต่อหม้อแปลงแต่เพียงอย่างเดียว และหาได้โดยความเป็นจริงที่ว่า ถ้ามีกระแสทางทุติยภูมิของหม้อแปลงตัวไหนก็ตาม จะต้องกระแสเกิดขึ้นทางปฐมภูมิมีขนาดเท่ากันแต่มีทิศตรงข้าม (ถือว่าหม้อตราส่วนรอง 1 ต่อ 1 และไม่คิดกระแสกระตุ้น) ในรูป (a), (b), (c) และ (d) ด้านทุติยภูมิต่อเป็น Y ดังนั้น กระแสทุติยภูมิ 1 เฟส สามารถไหลได้เฉพาะในวงจรอนุกรมเพียง 1 เส้นทาง แต่ในรูป (e) ด้านทุติยภูมิต่อเป็น Δ กระแสทุติยภูมิ 1 เฟส จึงไป 2 ทางที่ขนานกันคือทาง ba และ bca โดยที่กระแสด้านทุติยภูมิหม้อแปลง bc และ ca เท่ากัน กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงเหล่านี้ก็จะเท่ากันด้วย กระแส I_{NB} และ I_{NC} กลับสู่แหล่งจ่ายผ่านทางหม้อแปลง B และ C ดังนั้น แต่ละค่าจึงเป็นครึ่งหนึ่งของกระแส I_{AN} ในหม้อแปลง A ดังแสดงด้วยลูกศรใน (e) ดังนั้นกระแสทุติยภูมิ I_{bc} และ I_{ca} ในหม้อแปลง B และ C ต่างก็เป็นครึ่งหนึ่งของกระแส I_{ba} ในชุดทุติยภูมิของหม้อแปลง A ด้วย หม้อแปลง A จึงจ่าย 2 ใน 3 ของกระแสไหลต่อ 1 เฟส ส่วนหม้อแปลง B และ C ต่างก็จ่าย 1 ใน 3 ดังแสดงด้วยลูกศรใน (e)

ในรูป 7-2f ซึ่งแสดงหม้อแปลง 1 เฟส ต่อแบบ Y-Y โดยแยกจุดนิวตรอลปฐมภูมิเนื่องจากกระแสที่ไหลในด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงตัวหนึ่ง จะต้องไหลกลับสู่แหล่งจ่ายผ่านทางปฐมภูมิของหม้อแปลงอีก 2 ตัวที่เหลือ ดังนั้นกระแส 1 เฟส ที่จ่ายจาก line to neutral ทางด้านทุติยภูมิก็จะถูกจำกัดให้มีค่าเพียงเล็กน้อย ซึ่งหาได้จากคุณสมบัติการกระตุ้นสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงที่ไม่ได้จ่ายไหลต่ออีก 2 ตัว

ในการต่อแบบ Δ-Δ ดังรูป 7-2g มีเส้นทางขนานกันทั้งในวงจรปฐมภูมิและทุติยภูมิ การกระจายตัวของกระแส 1 เฟส ระหว่างหม้อแปลงจึงไม่ขึ้นอยู่กับ การต่อวงจรแต่เพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์สมมูล กระแสส่วนหนึ่งจะจ่ายมาจากหม้อแปลง ba อีกส่วนหนึ่งจ่ายจากทาง bca ซึ่งมีหม้อแปลง 2 ตัวคือ bc และ ca อนุกรมกัน และทั้งหมดนี้ก็ขนานกับหม้อแปลง ba กระแสใน line c ด้านทุติยภูมิเป็นศูนย์ จากรูปจะได้

$$I_{ac} = I_{cb} = -I_{bca} \dots (7-38)$$

เมื่อ I_{bca} คือกระแสจาก b ไปยัง a ผ่านทาง bca แทนค่าสมการ 7-38 ลงในสมการ 7-33 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{ba} Z_{ab} - I_{bca} (Z_{bc} + Z_{ca}) = 0 \quad \dots (7-39)$$

ดังนั้น

$$\frac{I_{ba}}{I_{bca}} = \frac{Z_{bc} + Z_{ca}}{Z_{ab}} \quad \dots (7-40)$$

นั่นคือกระแสจะเป็นสัดส่วนผกผัน (inversely proportional) กับอิมพีแดนซ์สมมูลของเส้นทางขนาน ba และ bca ถ้าหม้อแปลงเหมือนกันทุกประการ หม้อแปลง ba จะจ่ายกระแส 2 ใน 3 ของกระแสไหล อีก 1 ใน 3 จ่ายโดยหม้อแปลง bc และ ca ซึ่งอนุกรมกัน ดังรูป (h)

อีกวงจรหนึ่งที่มีเส้นทางขนานทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิคือ การต่อแบบ Y-Δ ที่ต่อจุดนิวตรอลของปฐมภูมิ เข้ากับนิวตรอลของแหล่งจ่าย ดังรูป 7-2i ในวงจรนี้การกระจายกระแสขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ไม่เฉพาะของหม้อแปลง แต่รวมถึงของแหล่งจ่ายด้วย สมการและกระแสปฐมภูมิคือ

$$I_{AN} + I_{BN} + I_{CN} = I_N \quad \dots (7-41)$$

ถ้าไม่คิดกระแสกระตุ้น ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิ ซึ่งมีทิศทาง

ข้ามกันคือ

$$I_{ba} = a I_{AN} \quad \dots (7-42)$$

$$I_{cb} = a I_{BN} \quad \dots (7-43)$$

$$I_{ac} = a I_{CN} \quad \dots (7-44)$$

เมื่อ a คืออัตราส่วนของจำนวนรอบทางปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยที่สาย C ทางทุติยภูมิเปิดวงจร

$$I_{cb} = I_{ac} \quad \dots (7-45)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I ที่จ่ายให้โหลด และกระแสทุติยภูมิในหม้อแปลงคือ

$$I = I_{ba} - I_{ac} \quad \dots (7-46)$$

ให้ E_A, E_B, E_C เป็นเวกเตอร์แรงเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งจ่าย และให้ Z_N เป็น อิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในสายนิวตรอล ขณะเดียวกันให้ Z_A, Z_B, Z_C เป็นอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในแต่ละเฟสทางปฐมภูมิอิมพีแดนซ์เหล่านี้เป็นผลรวมทางเวกเตอร์ของอิมพีแดนซ์จากแหล่งจ่าย อิมพีแดนซ์จาก line และอิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิ สมการโวลต์เตจของระบบ 3 เฟส

ก็คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_A = I_{AN} Z_A + I_N Z_N + aV_{ab} \quad \dots(7-47)$$

$$E_B = I_{BN} Z_B + I_N Z_N + aV_{bc} \quad \dots(7-48)$$

$$E_C = I_{CN} Z_C + I_N Z_N + aV_{ca} \quad \dots(7-49)$$

เมื่อ V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} เป็นเวกเตอร์โวลต์เตจที่ชั่วขณะหนึ่ง เนื่องจาก V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} เป็น line-to-line voltage ผลรวมทางเวกเตอร์ของมันจึงเป็นศูนย์ หรือ

$$V_{ab} + V_{bc} + V_{ca} = 0 \quad \dots(7-50)$$

สมการทั้งหมดตั้งแต่สมการที่ 7-41 ถึง 7-50 เป็นความสัมพันธ์ทั่ว ๆ ไป สำหรับการต่อแบบ Y-Δ ที่มีโหลด 1 เฟส เมื่ออิมพีแดนซ์ไม่เท่ากันหรือโวลต์เตจจากแหล่งจ่าย E_A, E_B และ E_C ไม่สมดุลจะสามารถหาค่าสมการทั้งสิบนี้ และเวกเตอร์กระแสกับโวลต์เตจ อีก 14 ค่า ได้ โดยวงจรต้องไม่เปลี่ยนแปลงและทราบค่าเวกเตอร์ของโวลต์เตจหรือกระแสที่เป็นอิสระต่อกัน 4 ค่า ซึ่งการแก้ปัญหาค่อนข้างจะยุ่งยาก

อย่างไรก็ดี ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสจะง่ายมาก ถ้าโวลต์เตจของแหล่งจ่าย E_A, E_B, E_C สมดุลกัน และอิมพีแดนซ์ Z_A, Z_B, Z_C เท่ากัน ถ้าโวลต์เตจของแหล่งจ่าย สมดุล ผลรวมทางเวกเตอร์จะเป็นศูนย์ (สมการ 7-50) ผลรวมของสมการ 7-47, 7-48 และ 7-49 คือ

$$0 = (I_{AN} + I_{BN} + I_{CN}) Z + 3I_N Z_N \quad \dots(7-51)$$

เมื่อ Z คือ อิมพีแดนซ์ของแต่ละเฟสปฐมภูมิ แต่ผลรวมทางเวกเตอร์ของ line current ด้านปฐมภูมิเท่ากับกระแสในนิวทรัล I_N (สมการ 7-41) ดังนั้นจากสมการ 7-51

$$0 = I_N (Z + 3Z_N) \quad \dots(7-52)$$

หรือ

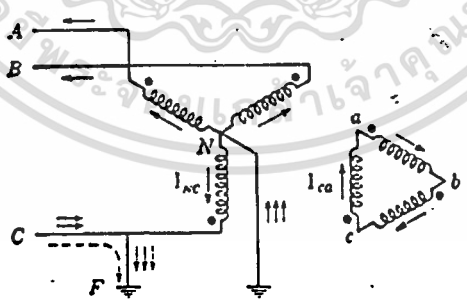
$$I_N = 0 \quad \dots(7-53)$$

นั่นคือ ถ้าโวลต์เตจของแหล่งจ่ายสมดุล และเฟสอิมพีแดนซ์ปฐมภูมิเท่ากันแล้ว จะไม่มีกระแสในสายนิวทรัล และกระแสจะกระจายตัวในลักษณะเดียวกับที่เกิดขึ้นเมื่อไม่ต่อจุดนิวทรัลของปฐมภูมิ ดังรูป 7-2e

3. Line to ground fault ทางด้านปฐมภูมิของ Y-Δ bank ที่ต่อกราวนด์นิวตรอล

อีกสถานการณ์หนึ่ง ซึ่งทำให้เกิดกระแส 1 เฟส ใน Y-Δ bank แสดงในรูปที่ 7-3 ซึ่งเป็นวงจร Y-Δ ที่ต่อกราวนด์นิวตรอลทางด้านรับไฟของสายส่ง มี Fault F เกิดขึ้นที่ตัวนำเฟส C ในการอธิบายมีสมมติฐานว่าจุดนิวตรอลของ Y เป็นเพียงจุดเดียวของระบบที่ต่อลงกราวนด์ ยกเว้น fault กระแส fault ไหลจากเฟส C ลงกราวนด์ และกลับสู่ระบบสายส่งผ่านทางจุดกราวนด์ที่นิวตรอลของ Y เนื่องจากกระแสส่วนหนึ่งไหลจากนิวตรอลของ Y ผ่านหม้อแปลง C ด้านปฐมภูมิ ดังแสดงด้วยกระแส I_{Nc} ในรูปที่ 7-3 ก็จะต้องมีกระแส I_{ca} ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามทางทุติยภูมิของหม้อแปลง C ไหลผ่านทุติยภูมิของหม้อแปลงอื่นอีก 2 ตัว ดังนั้นจึงเกิดกระแสที่ตรงข้ามขึ้นในขดปฐมภูมิของหม้อแปลง B และ C โดยที่กระแสที่ผ่านทุติยภูมิทั้ง 3 เป็นตัวเดียวกัน กระแสปฐมภูมิทั้งสามก็จะเท่ากันและ imphase กัน และต้องเป็น 1 ใน 3 ของกระแส fault การกระจายกระแสแสดงด้วยลูกศรเส้นเต็ม ในรูป 7-3 เมื่อแต่ละลูกศรแทนกระแส 1 ใน 3 ของกระแส fault

ถ้านิวตรอลของแหล่งจ่ายต่อกราวนด์ด้วย แหล่งจ่ายจะจ่ายกระแสอีกส่วนหนึ่งเพิ่ม กระแส fault ดังที่เห็นในรูปเป็นลูกศรเส้นประ ในรูปที่ 7-3



รูปที่ 7-3 line to ground fault ทางปฐมภูมิของ Y-Δ,BANK ซึ่งจุดนิวตรอลทางปฐมภูมิต่อกราวนด์

แนวทางการทดลอง

ในบทนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 การทดลอง ดังนี้

ผลการทดลองที่ 1 เพื่อศึกษาถึงสภาพที่เกิดขึ้น เมื่อหม้อแปลง 3 เฟส มีโหลดประเภทต่าง ๆ

ซึ่งแต่ละเฟสของโหลด มีขนาด VA สมดลกัน

การทดลองที่ 2 ว่าด้วยการไม่สมดุลของระบบที่เกิดจากอัตราส่วนรอบของหม้อแปลง ที่นำมาต่อกันเป็นหม้อแปลง 3 เฟสไม่เท่ากัน จะมีผลต่อระบบทั้งในขณะมีโหลดและขณะไม่มีโหลด

การทดลองที่ 3 เป็นการนำเอาหม้อแปลงที่มีอัตราส่วนรอบเท่ากัน แต่มีอิมพีแดนซ์สมดุลย์ไม่เท่ากันมาต่อกันเป็นหม้อแปลง 3 เฟส ซึ่งจากทฤษฎี เราทราบว่าจะทำให้เกิดกระแสไหลในหม้อแปลงแต่ละเฟสไม่เท่ากัน แม้ว่าโหลดจะสมดุลก็ตาม

การทดลองที่ 4 ศึกษาถึงสภาวะของหม้อแปลง 3 เฟสที่มีโหลดไม่สมดุล ซึ่งในที่นี่ได้ทำการทดลองโดยใช้ โหลด 1 เฟส ต่อเข้าไปทางทุติยภูมิของหม้อแปลง

การทดลองที่ 1 โหลดสมดุล

วงจรหม้อแปลงที่ใช้ทำการทดลองนี้มีทั้งสิ้น 8 วงจร ดังนี้

- | | |
|-----------------------------|------------------------------|
| 1. 1 \emptyset | 2. Δ - Δ |
| 3. Δ - Y | 4. Y- Δ (Connected N) |
| 5. Y- Δ (isolated N) | 6. Y Y (Connected N) |
| 7. Y-Y (Isolated N) | 8. V-V |

การ Connected หรือ Isolated N (Neutral) นั้น จะทำเฉพาะสายนิวทรัลทางปฐมภูมิกับแหล่งจ่ายเท่านั้น ทางด้านทุติยภูมิกับ Load ถ้าเป็น Y จะติดต่อกันหรือถึงกันเสมอ

ในแต่ละวงจรที่กล่าวมาจะต่อโหลด 4 แบบ คือ

- แบบที่ 1 โหลดความต้านทาน (R) ทั้ง 3 เฟส ค่า R ประมาณ 75 Ω ต่อเฟส
- แบบที่ 2 โหลดรีแอคแตนซ์ (L) ทั้ง 3 เฟส ค่า X_L ประมาณ 75 Ω ต่อเฟส
- แบบที่ 3 โหลดความต้านทาน (R) ขนานกับโหลดรีแอคแตนซ์ (L) โดยนำเอาโหลดจากแบบที่ 1 มาขนานกับแบบที่ 2
- แบบที่ 4 ให้เฟส R และ S เป็นโหลดความต้านทาน ส่วนเฟส T ให้เป็นโหลดรีแอคแตนซ์

แต่จากการทดลอง เรพบว่าในโหลดแบบที่ 1, 2 และ 3 นั้น มีความแตกต่างกันเพียงบางประการเดียว คือมุมที่กระแสล่าหลัง Voltage และในกรณีที่โหลดเป็นความต้านทาน ผู้อ่านจะสามารถศึกษาได้จากบทที่ 4 Connection of 3 Phase Transformer นอกจากนี้ในกรณีของการต่อโหลดแบบที่ 4 ถึงแม้ว่ากระแสที่ไหลในเฟสของ Load จะเกือบสมดุลกันทั้ง 3 เฟส แต่ก็ก่อให้เกิดสภาพไม่สมดุลขึ้นในวงจรหม้อแปลงได้ ซึ่งลักษณะที่เกิดขึ้นก็เป็นไปในทำนองเดียวกันไม่ว่าจะต่อวงจรหม้อแปลงแบบใดก็ตาม มีเพียงแบบ Y - Y isolated N เท่านั้นที่ให้ผลแตกต่างที่น่าสนใจ ดังนั้นเพื่อมิให้เป็นภาระยื่นเยื้อจนเกินไป จึงมิได้นำผลการทดลองในทุกกรณีมาเสนอไว้ในที่นี้

ในการบันทึกค่า rms จะบันทึกทุกค่าใน Line และใน Phase ส่วน Wave form นั้น

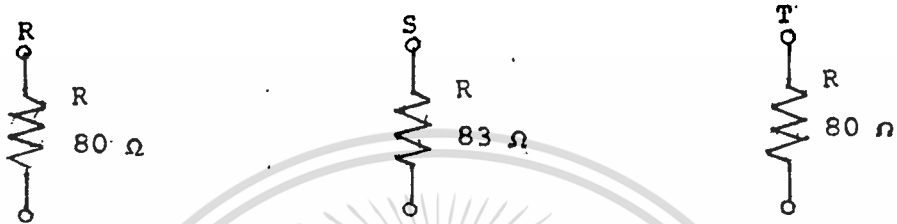
เลือกบันทึกเฉพาะส่วนที่ต้องการเปรียบเทียบเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

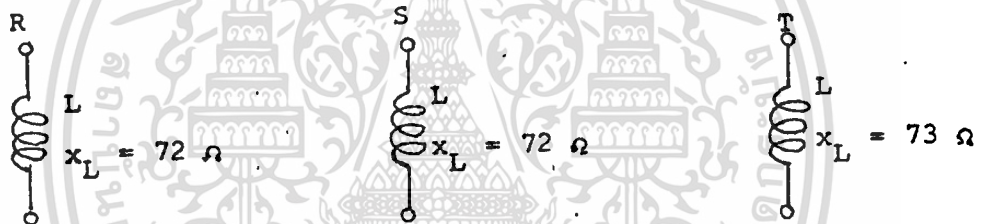
รูปที่ 7-4 แสดงลักษณะของ Load ที่ใช้ในแต่ละแบบ จะเห็นว่าการจัดโหลดในลักษณะนี้ จะทำให้ค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดแต่ละเฟสใกล้เคียงกันมาก การต่อวงจรของ โหลดนั้นจะต่อ เหมือนวงจรด้านทุติยภูมิ ยกเว้น V - Connestion ซึ่งต่อโหลดแบบเดลต้า

ผลการทดลองที่นำมาเสนอ มีดังต่อไปนี้

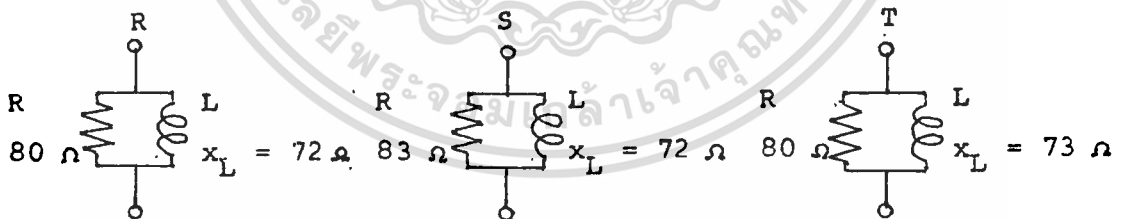
แบบที่ 1) Load Resistance. (R)



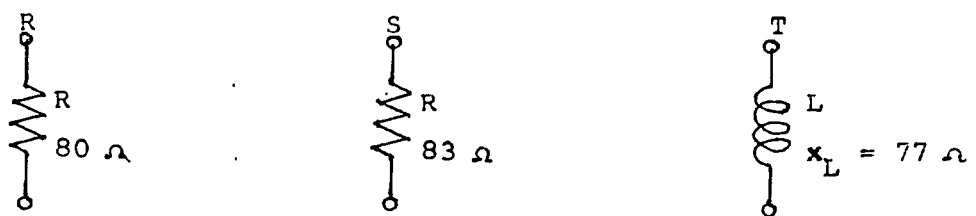
แบบที่ 2) Load Inductance (L)



แบบที่ 3) Load Resistance & Inductance in The Same Phase



แบบที่ 4) Load Unbalance by Type of Load in Each Phase

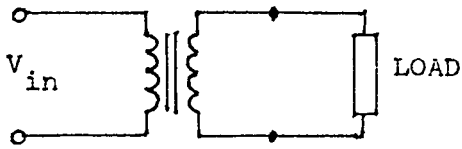


รูปที่ 7-4 โหลดแต่ละเฟสที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. วงจรหม้อแปลง 1 เฟส

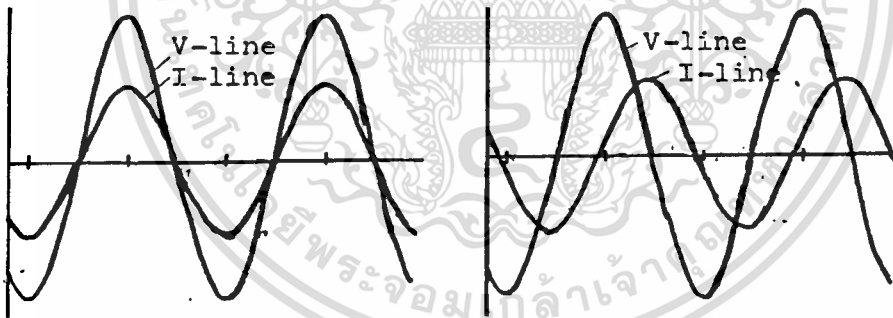


Waveform

Pri -

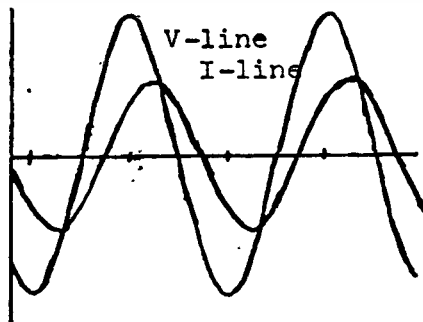
Sec V-Line, I-Line

ตารางที่ 7-1		R	L	RL
Pri	V-line	230	228	226
	I-line	3.05	3.47	4.65
Sec	V-line	227	228	224
	I-line	2.80	3.15	4.375



LOAD R

LOAD L

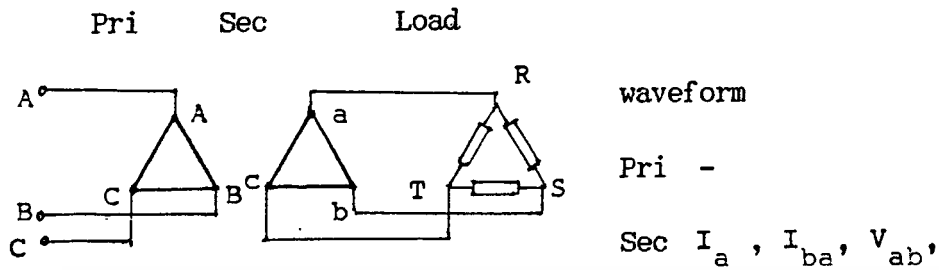


LOAD RL

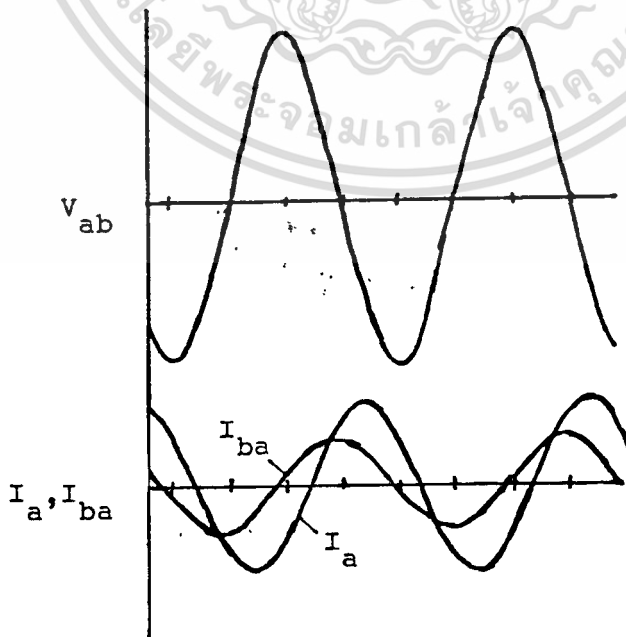
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานรูป 7-5 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) Δ-Δ

2.1) Load-L

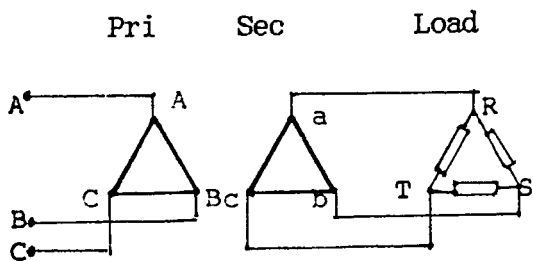


ตาราง ที่ 7-2	V-Line			V.Phase			I-Line				I-Phase		
	AB ab RS	BC bc ST	CA ca TR	AN an RMp	BN bn SMp	CN cn TMp	A a R	B b S	C c T	N n Mp	AB ba RS	BC cb ST	CA ac TR
PRI.	221	222	220	-	-	-	5.6	5.8	5.8	-	3.3	3.25	3.3
SEC.	222	224	220	-	-	-	5.1	5.2	5.25	-	3.0	3.0	3.1
LOAD	222	224	220	-	-	-	5.1	5.2	5.25	-	3.0	3.05	2.95



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา รูป 7-6 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 LOAD RL

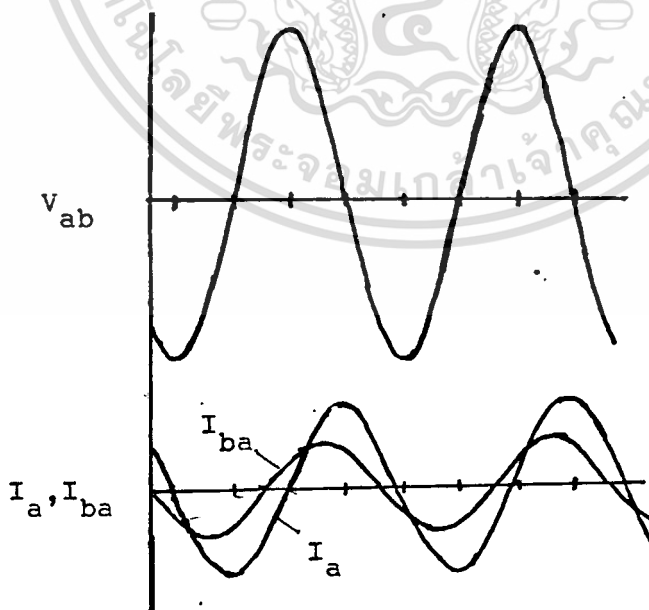


waveform

Pri -

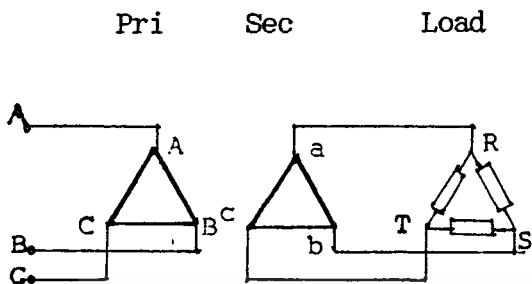
Sec I_a, I_{ba}, V_{ab}

การวัด ที่ 7-3	V-Line			V.Phase			I-Line				I-Phase		
	AB ab RS	BC bc ST	CA ca TR	AN an RMp	BN bn SMp	CN cn TMp	A a R	B b S	C c T	N n Mp	AB ba RS	BC cb ST	CA ac TR
PRI.	220	220	218	-	-	-	7.65	7.8	7.7	-	4.45	4.25	4.35
SEC.	217	218	214	-	-	-	7.10	7.2	7.2	-	4.20	4.05	4.15
LOAD	217	218	214	-	-	-	7.10	7.2	7.2	-	4.10	4.00	3.95



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

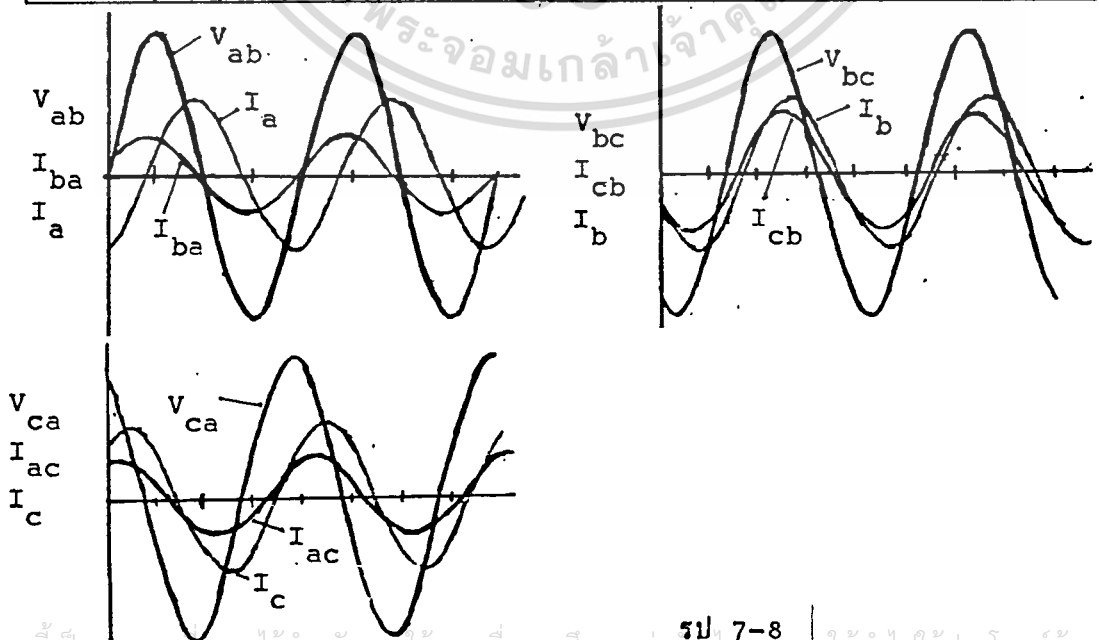
2.3 LOAD R-R-L



waveform

Pri -
 Sec V_{ab} V_{bc} V_{ca}
 I_{ba} I_{cb} I_{ac}
 I_a I_b I_c

ทฤษฎี ที่ 7-4	V-Line			V.Phase			I-Line				I-Phase		
	AB ab RS	BC bc ST	CA ca TR	AN an RMP	BN bn SMP	CN cn TMP	A a R	B b S	C c T	N n Mp	AB ba RS	BC cb ST	CA ac TR
PRI.	226	226	223	-	-	-	2.05	4.8	5.8	-	1.6	3.4	2.4
SEC.	224	222	222	-	-	-	1.65	4.6	5.37	-	1.55	3.2	2.2
LOAD	224	222	222	-	-	-	1.65	4.6	5.37	-	2.77	2.6	2.8

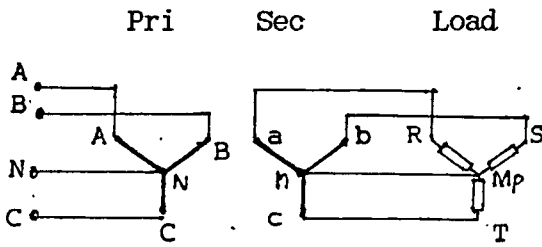


รูป 7-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) Y - Y (Connected N)

3.1 LOAD - L

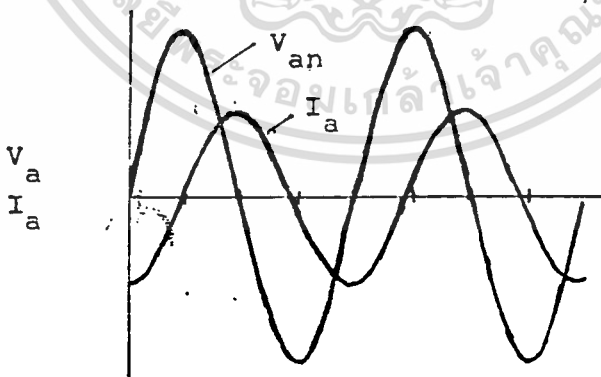


waveform

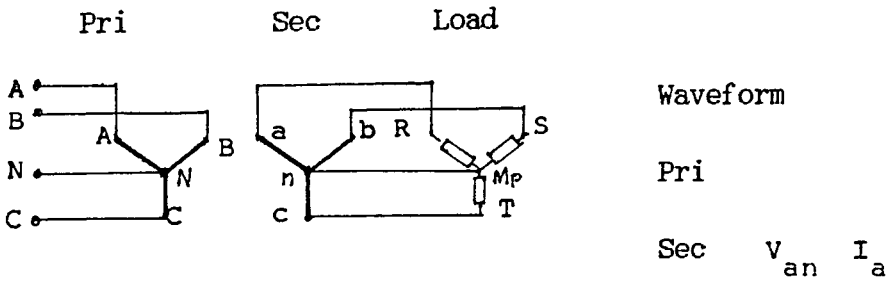
Pri -

Sec V_{an} I_a

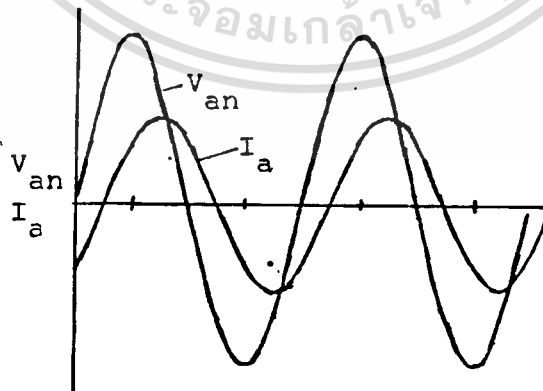
ทฤษฎี ที่ 7-5	V-Line			V.Phase			I-Line				I-Phase		
	AB ab RS	BC bc ST	CA ca TR	AN an Rm _p	BN bn Sm _p	CN cn Tm _p	A a R	B b S	C c T	N n M _p	AB ba RS	BC cb ST	CA ac TR
PRI.	390	390	380	222	228	223	3.4	3.4	2.25	0.034	-	-	-
SEC.	390	390	380	220	227	233	3.05	3.1	3.0	0.08	-	-	-
LOAD	390	390	380	220	227	233	3.05	3.1	3.0	0.08	-	-	-



3.2 LOAD RL

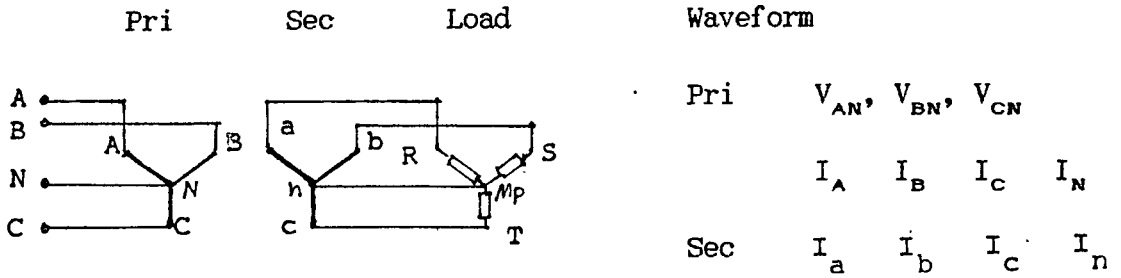


ตาราง ที่ 7-6	V-Line		V.Phase			I-Line				I-Phase			
	AB ab RS	BC bc ST	CA ca TR	AN an Rmp	BN bn Smp	CN cn Tm	A a R	B b S	C c T	N n Mp	AB ba RS	BC cb ST	CA ca TR
PRI.	385	390	380	220	227	222	4.6	4.5	4.45	0.036	-	-	-
SEC.	380	385	370	217	223	218	4.25	4.2	4.2	0.15	-	-	-
LOAD	380	385	370	217	223	218	4.25	4.2	4.2	0.15	-	-	-

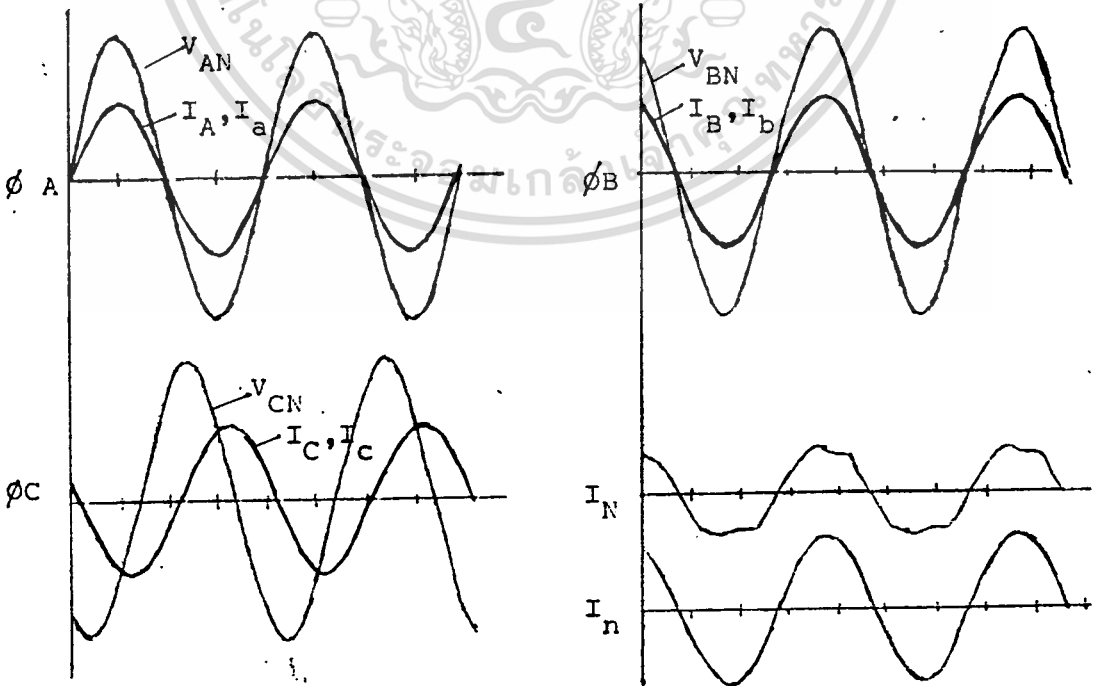


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

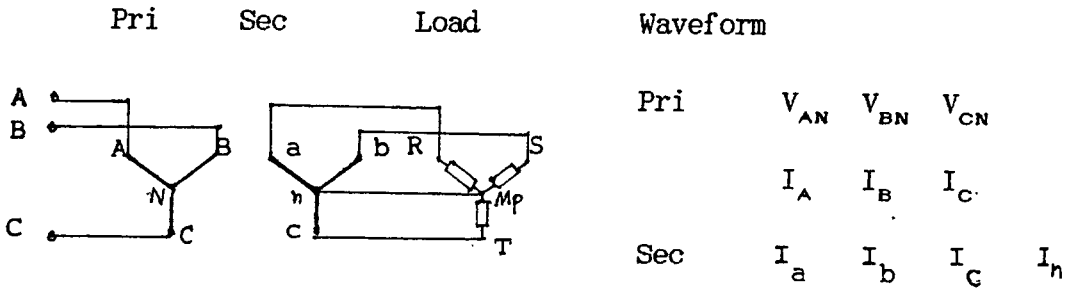
3.3 LOAD R-R-L



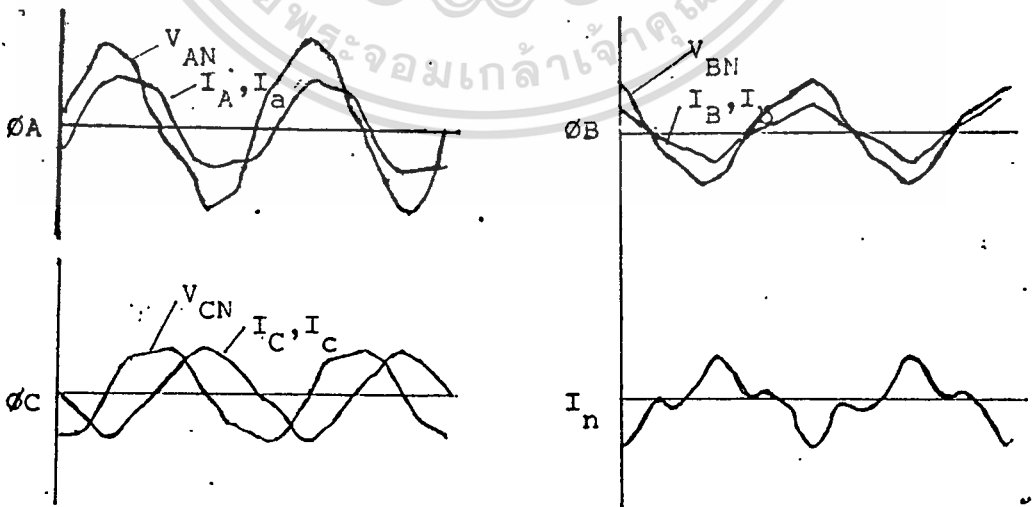
การวัด ที่ 7-7	V-Line		V.Phase			I-Line				I-Phase			
	AB ab RS	BC bc ST	CA ca TR	AN an Rmp	BN bn Smp	CN cn Tmp	A a R	B b S	C c T	n n Mp	AB ba RS	BC cb ST	CA ac TR
PRI.	390	390	382	223	227	225	2.92	2.72	3.1	3.55	-	-	-
SEC.	385	390	380	220	223	223	2.80	2.62	2.85	3.55	-	-	-
LOAD	385	390	380	220	223	223	2.80	2.62	2.85	3.55	-	-	-



4) Y-Y isolated N LOAD R-R-L



การวัด ที่ 7-8	V-Line			V.Phase			I-Line				I-Phase		
	AB ab RS	BC bc ST	CA ca TR	AN an RM	BN bn SM	CN cn TM	A a R	B b S	C c T	N n M	AB ba RS	BC cb ST	CA ac TR
PRI.	390	390	382	300	147	250	4.27	1.90	3.42	-	-	-	-
SEC.	385	390	380	295	145	250	3.82	1.85	3.07	1.4	-	-	-
LOAD	385	390	380	295	145	250	3.82	1.85	3.07	1.4	-	-	-



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. ในวงจรหม้อแปลง 1 เฟสนั้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ในกรณีที่โหลดเป็นความต้านทาน กระแสและโวลต์เตจจะมีเฟสตรงกัน ถ้าเป็นโหลดรีแอคแตนซ์ กระแสจะล้าหลัง Voltage ไปประมาณ 81° ที่ไม่เป็น 90° พอดีก็เพราะโหลด L นั้น ไม่เป็น pure inductive คือมีความต้านทานปนอยู่ด้วย แต่อย่างไรก็ดี เรายังมองเห็นสภาวะรวม ๆ ได้อย่างชัดเจน

เมื่อโหลดเป็นแบบ RL กระแสจะ lag voltage ไปประมาณ 36° waveform ที่วัดนี้วัดทางด้านทุติยภูมิ ซึ่งทางด้านปฐมภูมิก็จะให้ผลอย่างเดียวกัน เพราะ waveform ของโวลต์เตจปฐมภูมิและทุติยภูมิ ประมาณได้ว่ามีเฟสตรงกัน waveform ของกระแสก็เช่นเดียวกัน

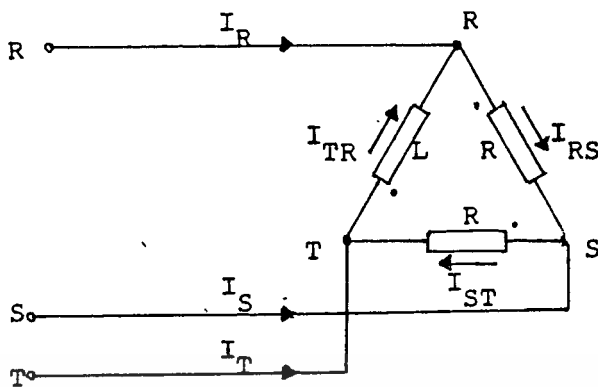
2. กรณีวงจร $\Delta - \Delta$ ถ้าต่อโหลดความต้านทานที่สมดุลกันทั้ง 3 เฟส phase current จะมีเฟสตรงกันกับ phase voltage และ line current ก็จะมีค่าล้าหลัง phase current ไป 30° และมีขนาดเป็น $\sqrt{3}$ เท่าของ phase current

ถ้าต่อโหลด inductive ที่ค่อนข้างสมดุลทั้ง 3 เฟส กระแสเฟสทางด้านทุติยภูมิ จะล้าหลัง phase-voltage ไป 81° ส่วน line current ล้าหลัง phase current ไปประมาณ 30° มีขนาดเป็น $\sqrt{3}$ เท่าของ phase current จากผลการทดลองในตารางที่ 7-2 จะเห็นว่ากระแสในแต่ละส่วน ไม่ว่าจะอยู่ใน phase หรือ line มีความสมดุลกันมาก

เมื่อเปลี่ยนเป็นโหลด RL สภาวะความสมดุลของวงจรก็ยังคงเดิม สิ่งเดียวที่แตกต่างกันก็คือ phase current ล้าหลัง phase voltage ไปประมาณ 45° แต่ line current ก็ยังคงล้าหลัง phase current ไป 30° เช่นเดิม และมีขนาดเป็น $\sqrt{3}$ เท่าของ phase current

กรณีที่น่าสนใจคือเมื่อโหลดเป็น R-R-L ลักษณะนี้มุมระหว่าง phase current และ phase voltage ในแต่ละเฟสไม่เท่ากัน นั่นคือ phase shift ของ phase current ไม่ได้ต่างกัน 120° อีกต่อไป ผลต่างทางเวกเตอร์ที่ได้เป็น line current จึงแตกต่างกันไปในแต่ละ line ในกรณีนี้ ถ้าจะคำนวณโดยใช้เวกเตอร์จะใช้สมการ $I_L = \sqrt{3} I_p \angle -30^\circ$ ไม่ได้ แม้ว่า phase current ของโหลด จะมีขนาดสมดุลกันก็ตาม

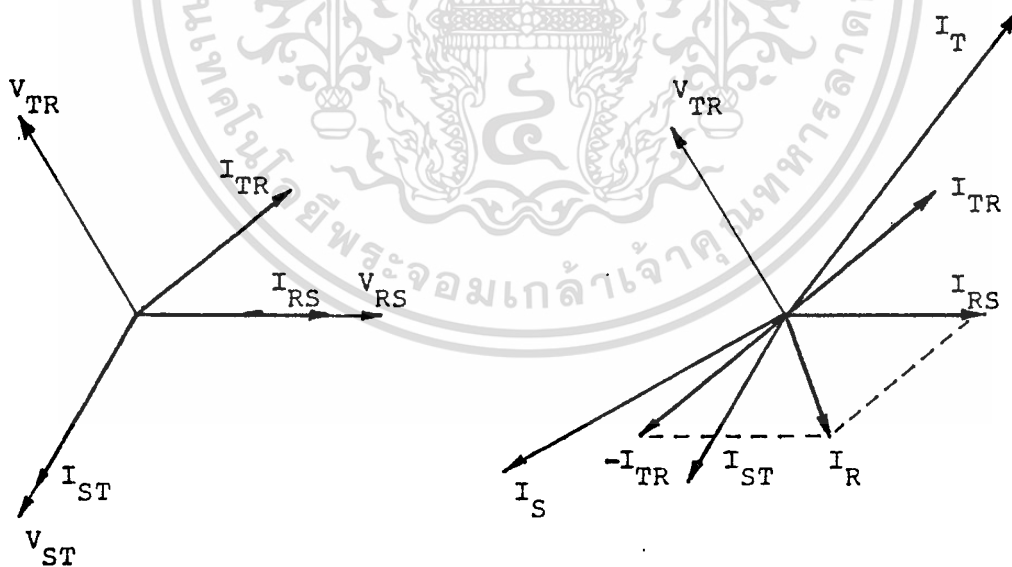
จากการทดลอง นิยามค่าในส่วนของโหลด ดังรูปที่ 7-13 Vector ของ V_{RS} , V_{ST}



รูปที่ 7-13 วงจรด้านโหลดของ $\Delta - \Delta$ กรณีโหลด R-R-L

และ V_{TR} ต่างเฟสกัน 120° และ

I_{RS} มีเฟสตรงกันกับ V_{RS} ขนาด 2.77 A
 I_{ST} " " " V_{ST} " 2.60 A
 I_{TR} ล้าหลัง V_{TR} ไป 81° " 2.80 A



รูปที่ 7-14 เวกเตอร์ของกระแสและโวลต์เตจ ของโหลด R-R-L

$I_R = I_{RS} - I_{TR}$ คำนวณจากรูป 7-14 ได้ 1.9 A lag V_{RS} 71° (วัตต์, 72°)

$I_S = I_{ST} - I_{RS}$ " " " 4.6 A lag V_{ST} 32° (วัตต์, 27°)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ "รับบริการ" ใช้งานเพื่อการ "ศึกษา" เท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายได้ หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลักษณะดังกล่าวจะเห็นว่า line current ทางด้านทุติยภูมิ อยู่ในสภาพไม่สมดุลอย่างมาก ซึ่งมีผลโดยตรงต่อ phase current ของทุติยภูมิ ดังนี้ (ค่าจากตารางและกราฟ)

$$I_{ba} \text{ ขนาด } 1.55 \text{ A นำหน้า } V_{ab} \text{ } 9^\circ$$

$$I_{cb} \text{ ขนาด } 3.20 \text{ A ล้าหลัง } V_{bc} \text{ } 18^\circ$$

$$I_{ac} \text{ ขนาด } 2.20 \text{ A ล้าหลัง } V_{ca} \text{ } 54^\circ$$

กระแสเฟสทางปฐมภูมิมีขนาดใกล้เคียงกับกระแสเฟสทุติยภูมิ เพราะเป็นไปตามอัตราส่วนรอบ

ถึงแม้ว่าผลจากการคำนวณจะผิดพลาดจากการทดลอง ไปบ้างก็ตาม แต่ก็มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน นั่นคือเราสามารถวิเคราะห์สภาวะที่เกิดขึ้นได้อย่างค่อนข้างแน่นอน ส่วนที่มีการผิดพลาดไปนั้น อาจเกิดจาก โวลต์เตจที่ไม่สมดุลกันที่เดี่ยวนัก และหม้อแปลงก็ไม่ได้ identical ตามทฤษฎี

3. กรณีวงจร Y-Y connected Neutral Pri-Source จะขอผ่านการวิเคราะห์ถึงกรณีเมื่อต่อโหลด L และ RL ไป เนื่องจากไม่มีแ่งมุมที่น่าสนใจ

เมื่อต่อโหลด R-R-L นั้น พบว่ากระแสไนตรอล มีค่าสูงมากถึง 3.55 A ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะที่โหลดในแต่ละเฟสแตกต่างกัน ทำให้กระแสมีเฟสชิวไม่เป็น 120° เมื่อรวมกันจึงไม่เท่ากับศูนย์

ถ้าพิจารณา โวลต์เตจ โดยอาศัยค่ามุมจากกราฟที่บันทึกไว้

$$I_a \text{ ขนาด } 2.80 \text{ A มีเฟสตรงกันกับ } V_{an}$$

$$I_b \text{ " } 2.62 \text{ A " " } V_{bn}$$

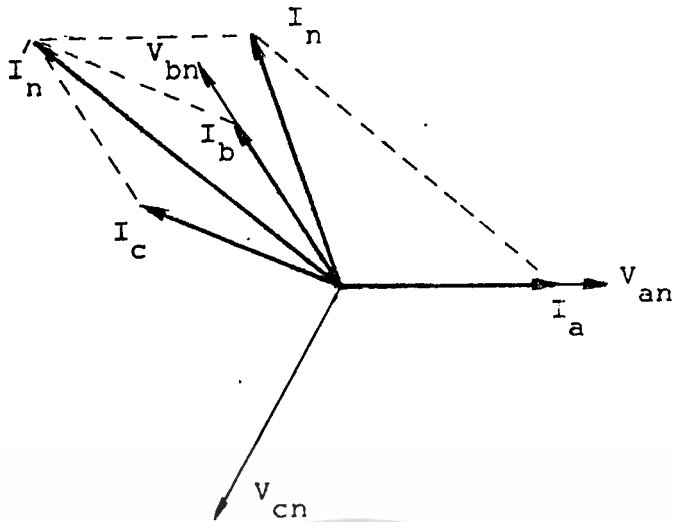
$$I_c \text{ " } 2.85 \text{ A ล้าหลัง } V_{cn} \text{ } 81^\circ$$

$$\text{คำนวณจากรูปที่ 7-15 ได้ } I_N = 5.16 \text{ A}$$

$$I_N = 3.51 \text{ A นำหน้า } V_{nn} \text{ } 109^\circ \text{ (วัดได้ } 110.7^\circ)$$

จากรูปเวกเตอร์และผลการคำนวณ แสดงถึงสภาวะไม่สมดุลได้เป็นอย่างดี และใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7-15 การรวมกระแสของ Y-Y LOAD R-R-L

- กรณีวงจร Y-Y isolated neutral Pri-Source

การต่อหม้อแปลงแบบที่ถ้า load ทั้ง 3 เฟสสมดุล ก็จะไม่มีผลอะไร แตกต่างไปจากการต่อแบบ Y-Y con (ยกเว้นฮาร์โมนิกที่ 3) เพราะกระแสทั้ง 3 เฟสจะหักล้างกันทำให้ I_N เป็นศูนย์ แต่ในกรณีที่โหลดเป็น R-R-L จากตอน Y-Y connected neutral เราได้ทราบแล้วว่าผลรวมของกระแสไม่เป็นศูนย์ แต่มีค่าถึง 3.55A และโหลดกลับแหล่งจ่ายทางนิวตรอล เมื่อแยกนิวตรอลออก กระแสส่วนนี้จะต้องไหลกลับทางเฟสทั้งสาม ซึ่งเท่ากับเป็นการไปเพิ่มกระแสกระตุ้นของหม้อแปลง ทำให้ phase voltage ของหม้อแปลง เพิ่มสูงขึ้นกว่าปกติ จากผลการทดลองจะเห็นว่า V_{AN} และ V_{CN} มีค่า 300 และ 250 V ตามลำดับแสดงว่า กระแสล้นที่ไหลกลับมากทางเฟส A และ C

การที่ V_{AN} และ V_{CN} เพิ่มขึ้นทำให้หม้อแปลงเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่ คือ V_{BN} ลดลงเหลือเพียง 147 V จึงจ่ายกระแสโหลดได้น้อยลง

กรณีนี้เสถียรภาพของระบบต่ำมาก ไม่เหมาะอย่างยิ่งในการใช้งาน ลักษณะเดียวกันนี้จะเกิดขึ้นในวงจร Y-Y isolated N เมื่อต่อโหลด 1 เฟสที่ขั้ว line กับ neutral ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

ส่วนการต่อวงจรหม้อแปลงในลักษณะอื่น ๆ เมื่อต่อโหลด R-R-L ก็จะให้ผลในทำนองเดียวกัน และสามารถคำนวณหรือทำนายผลที่จะเกิดขึ้นได้เช่นกัน

ไม่มีการแก้ไขหนังสือ อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุป

ในการต่อโหลดหม้อแปลง 3 เฟส นั้น เราจะต้องคำนึงถึง Power factor ของ โหลดในแต่ละเฟสด้วย มิฉะนั้นอาจจะเกิดสภาวะไม่สมดุลจนเป็นอันตรายต่อระบบไฟฟ้าได้ เช่น ในขณะที่โหลดรวมของหม้อแปลง ยังไม่เกินพิกัด ก็อาจจะมีหม้อแปลงเฟสใดเฟสหนึ่งเกิด over load ไปแล้ว อันเนื่องจากความไม่สมดุลของค่า power factor ดังกล่าว



การทดลองที่ 2 สภาวะไม่สมดุลจากอัตราส่วนรอบไม่เท่ากัน

ในการทดลองนี้กำหนดหม้อแปลงเฟส A เป็นเฟสที่มีอัตราส่วนรอบแตกต่างไปจากอีก 2 เฟสที่เหลือ โดยการเพิ่มขดลวด 7 รอบ เข้าไปทางด้านปฐมภูมิหรือทุติยภูมิด้านใดด้านหนึ่งแล้วแต่กรณี ถ้าเพิ่มเข้าไปทางด้านทุติยภูมิ อัตราส่วนรอบที่เคยเป็น 1 ก็จะเป็น

$$(95+47)/(95+47+7) = 0.953 \text{ ส่วนหม้อแปลงเฟส B และ C มีอัตราส่วนรอบเป็น 1 เท่ากัน}$$

เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนรอบแล้วก็นำหม้อแปลงทั้ง 3 เฟสมาต่อกันเป็นวงจรแบบต่าง ๆ ป้อนไฟเข้าทางปฐมภูมิ สังเกตสภาวะขณะไม่มีโหลด ต่อไปทดลองต่อโหลดที่สมดุลเข้าทางด้านทุติยภูมิ แล้วสังเกตสภาวะขณะมีโหลด

จากการทดลองพบว่าในวงจร $\Delta - \Delta$ นั้นไม่ว่าจะเพิ่มขดลวด 7 รอบเข้าทางปฐมภูมิหรือทางทุติยภูมิก็ให้ผลในลักษณะเดียวกัน อีกวงจรหนึ่งที่มีผลที่น่าสนใจคือ $Y - \Delta$ ทั้ง $\Delta - \Delta$ และ $Y - \Delta$ นี้จะเกิดกระแสขึ้นในหม้อแปลงอย่างมากมาย ดังจะให้เห็นจากข้อมูลที่จะนำเสนอต่อไปนี้ แต่สภาวะไม่สมดุลจากอัตราส่วนรอบไม่เท่ากันมีผลเพียงเล็กน้อยต่อวงจรอื่น ๆ คือทำให้ Voltage ในเฟสเปลี่ยนไปจากเดิมและเมื่อมีโหลดก็จะมีกระแสไหลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จึงเสนอข้อมูลเฉพาะส่วนของ $\Delta - \Delta$ และ $Y - \Delta$ เท่านั้น

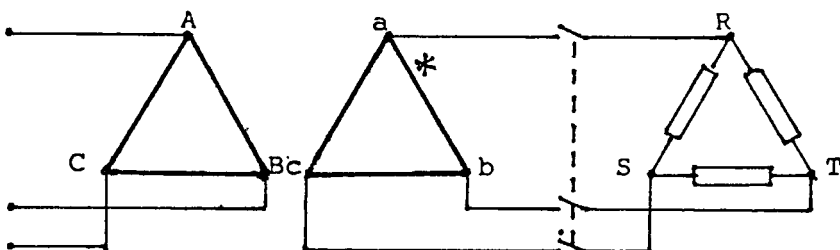
1. วงจร $\Delta - \Delta$

$$\text{หม้อแปลงเฟส A } N_p = 95 + 47 \quad N_s = 95 + 47 + 7$$

$$\text{หม้อแปลงเฟส B, C } N_p = N_s = 95 + 47$$

โหลดที่ใช้เป็นโหลด R ขนาด 75 Ω /phase

ข้อมูลของกระแสและ Voltage ทุกส่วนเป็นดังตารางที่ 7-9

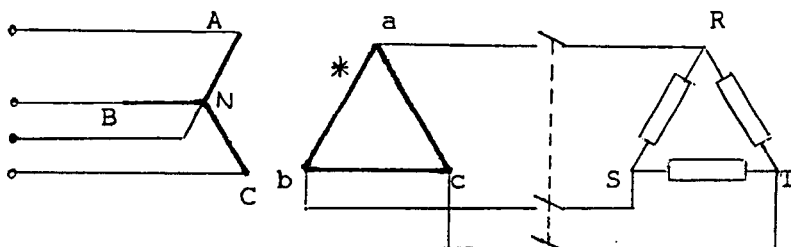


ตาราง ที่ 7-9	V-LINE			V-PHASE			I-LINE				I-PHASE		
PHASE	AB ab RS	BC bc ST	CA ca TR	AN an Rmp	BN bn SMp	CN cn TMP	A a R	B b S	C c T	N n Mp	AB ba RS	BC cb ST	CA ac TR
NO LOAD													
PRI.	225	224	220	-	-	-	0.5	0.69	0.39	-	5.0	4.45	4.8
SEC.	232	226	223	-	-	-	-	-	-	-	4.70	4.70	4.71
ON LOAD													
PRI	222	222	219	-	-	-	5.27	5.2	4.6	-	7.8	3.9	4.0
SEC	228	222	218	-	-	-	4.75	4.7	4.5	-	7.4	4.1	3.8
LOAD	228	222	218	-	-	-	4.75	4.7	4.5	-	2.8	2.52	2.62

2. วงจร Y - Δ

จำนวนรอบของหม้อแปลงแต่ละเฟสเหมือนกัน Δ - Δ

โหลดที่ใช้เป็นโหลด R ขนาด 75 Ω/phase



รูปที่ 7-17 วงจรทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองเป็นกึ่งตาราง 7-10

ตาราง ที่ 7-10	V-LINE			V-PHASE			I-LINE				I-PHASE		
	AB ab RS	BC bc ST	CA ca TR	AN an Rmp	BN bn Smp	CN cn Tmp	A a R	B b S	C c T	N n mp	AB ba RS	BC cb ST	CA ac TR
NO LOAD													
PRI.	390	380	395	220	224	220	3.5	3.3	3	9.2	-	-	-
SEC.	226	225	222	-	-	-	-	-	-	-	2.7	2.65	2.7
ON LOAD													
PRI.	387	387	380	219	222	220	6.15	2.7	3.15	9.2	5.65	2.55	2.75
SEC.	224	223	220	-	-	-	4.65	4.5	4.5	-	5.3	2.3	2.85
LOAD	224	223	220	-	-	-	4.65	4.5	4.5	-	2.8	2.55	2.8

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. กรณีวงจร $\Delta - \Delta$ นั้น ขณะไม่มี load พบว่าเกิดกระแสไหลวนขึ้นใน loop Δ ทางทุติยภูมิ ซึ่งเป็นเพราะการรวมกันของโวลต์เตจทางทุติยภูมิ ไม่เป็นศูนย์ ดังได้กล่าวแล้วในส่วนของการทฤษฎี กระแสทางด้านทุติยภูมินี้เป็นกระแสเดียวกันทั้ง 3 เฟส จึงมีเฟสตรงกันและเฟสขั้ว ไม่ขึ้นกับ phase voltage แต่ขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ รวมของวงจรและโวลต์เตจส่วนเกินของลูป เมื่อกระแสนี้ refer ไปทางปฐมภูมิ ซึ่งมีกระแสกระตุ้นอยู่ในเฟสด้วย กระแสกระตุ้นในแต่ละเฟสต่างเฟสกัน 120° ดังนั้นเมื่อรวมกับกระแสไหลวน จะเห็นว่าผลรวมไม่เท่ากัน เฟส AB กระแสเฟสมากที่สุดแสดงว่ามีการเสริมกันของรูปคลื่นมากที่สุด ส่วนเฟส BC กระแสเฟสมีค่าลดลงเพราะเกิดหักล้างกับกระแสไหลวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะโดยใดๆทั้งสิ้น ลักษณะการเสริมกันของกระแส 2 ส่วน คือกระแสไหลวน กับกระแสปกติ จะเห็น

ได้ชัดเจนเมื่อต่อ โหลดเข้ากับหม้อแปลง ผลที่ได้ก็คือหม้อแปลงของแต่ละเฟส จะมีกระแสไหลในเฟสไม่เท่ากัน ทั้งที่กระแสไหลวนเท่ากัน และโหลดที่ต่อเพิ่มก็สมดุล

อีกแห่งหนึ่งที่น่าสนใจคือกระแสไหลวนนี้ จะไม่ปรากฏทาง line ทั้งนี้เพราะ line current เป็นผลต่างทางเวกเตอร์ของ phase current เมื่อ phase current มีเฟสตรงกัน จึงหักล้างกันหมด นั่นหมายความว่าอุปกรณ์ป้องกันที่อยู่ภายนอกเช่น ฟิวส์ จะไม่สามารถป้องกันกระแสเกินในกรณีเช่นนี้ได้เลย

2. กรณีวงจร Y - Δ จากข้อมูลในตาราง 7-10 ขณะไม่มีโหลด ช่วยยืนยันได้เป็นอย่างดีว่ากระแสไหลวนนี้มีเฟสตรงกัน เห็นได้จากกระแสนิวตรอลทางปฐมภูมิมีค่าเป็น 3 เท่าของกระแสในเฟส เมื่อต่อโหลด กระแสเฟสทางทุติยภูมิและปฐมภูมิ มีค่าไม่เท่ากันในแต่ละเฟส เนื่องจากการรวมกันทางเวกเตอร์ดังได้กล่าวแล้ว แต่จะเห็นได้ว่ากระแสนิวตรอลปฐมภูมิมิมีค่าเท่าเดิม ทั้งนี้เพราะ กระแสไหลที่เพิ่มขึ้นมาขึ้น ต่างเฟสกัน 120° จึงหักล้างกันเองหมด ไม่เหลือส่วนที่จะไปรวมหรือหักล้างกับกระแสที่เกิดจากอัตราส่วนรอบไม่เท่ากัน

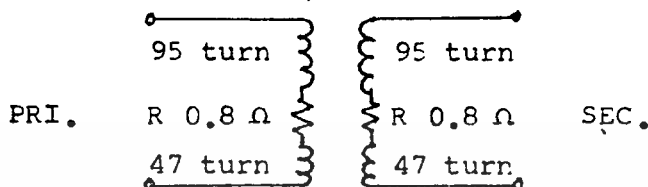
สรุป

ถึงแม้ว่าอัตราส่วนรอบจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่ก็ทำให้เกิดกระแสไหลวนขึ้นอย่างมาก จึงเป็นข้อที่ต้องคำนึงถึงในการใช้งานหม้อแปลงในลักษณะดังกล่าว ถ้าหากจำเป็นต้องใช้อย่างไร ก็ควรหลีกเลี่ยงไปต่อวงจรแบบอื่นที่จะเกิดผลเสียน้อยกว่า เช่น

Y-Y (connected N primary-source)

การทดลองที่ 3 สภาวะไม่สมดุลของระบบเนื่องจากอิมพีแดนซ์สมมูลย์ไม่เท่ากัน

ในการทดลองนี้กำหนดให้หม้อแปลงเฟสหนึ่งมีอิมพีแดนซ์สมมูลย์ต่ำกว่าอีก 2 เฟส ทำได้โดยเพิ่มอิมพีแดนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลง 2 เฟส ในที่นี้คือเฟส B และ C โดยการต่อความต้านทาน 0.8Ω 60 W เข้าไปที่ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงทั้งสอง ดังรูปที่ 7-18



รูปที่ 7-18 การเพิ่มอิมพีแดนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลง

จากการทำ open circuit test และ short circuit test พบว่าวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงเปลี่ยนไป ดังตารางที่ 7-11 และ 7-12

phase	V_{oc}	I_{oc}	W_{oc}	R_c	X_m
A	220	0.33	28.02	1727	722
B	220	0.27	21.00	2304	871
C	220	0.26	22.40	2160	920

ตารางที่ 7-11 open circuit test

จากการทดลองในการต่อวงจร 7 แบบคือ $\Delta - \Delta$, $\Delta - Y$, $Y - \Delta$ (connect N) $Y - \Delta$ (isolated N), $Y - Y$ (connect N), $Y - Y$ (isolated N) และ $V - V$ พบว่าวงจรที่ทำให้เกิดภาวะไม่สมดุลอย่างชัดเจนและน่าสนใจ คือวงจร $\Delta - \Delta$ และ $Y - \Delta$ (connectec N) ซึ่งจะได้นำเสนอข้อมูลต่อไปเป็นลำดับ

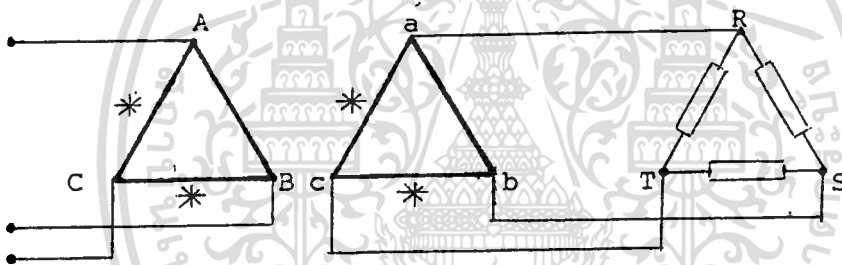
เพื่อให้เห็นสภาพไม่สมดุลอย่างชัดเจน จึงใช้โหลด R ขนาด 40 โอห์ม/เฟส สมดุล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า กั้นทั้ง 3 เฟส การต่อวงจรจะต่อเหมือนทุติยภูมิของหม้อแปลง ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

phase	V_{sc}	I_{sc}	W_{sc}	R_{eq}	X_{eq}	Z_{eq}
A	10	5	20	0.8	1.83	2.0
B	12	5	59	2.36	0.44	2.4
C	12	5	59	2.36	0.44	2.4

ตารางที่ 7-12 short circuit test

ผลการทดลอง (เฉพาะ $\Delta - \Delta$ และ $Y - \Delta$ connected N)

1. $\Delta - \Delta$ ผลการทดลอง เป็นดังตารางที่ 7-13 ส่วนวงจรเป็นดังรูปที่ 7-19



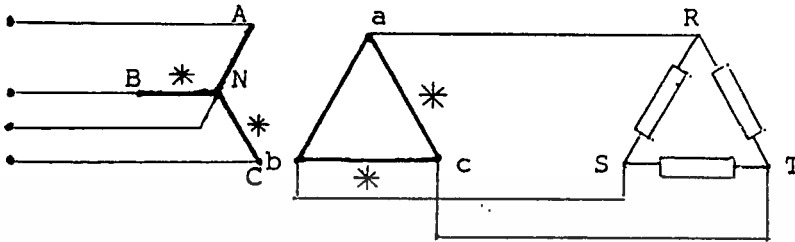
รูปที่ 7-19 วงจรทดลอง

ตาราง ที่ 7-13	V-Line			V.Phase			I-Line				I-Phase		
	AB ab RS	BC bc ST	CA ca TR	AN an TK	BN bn LM	CN cn TP	A a R	B b S	C c T	n n Mp	AB ba RS	BC cb ST	CA ac TR
PRI.	228	228	224	-	-	-	9.00	9.40	9.10	-	6.95	4.50	4.50
SEC.	222	216	212	-	-	-	9.00	9.40	9.10	-	6.85	4.50	4.60
LOAD	222	216	212	-	-	-	9.00	9.40	9.10	-	5.35	5.25	5.05

เอกสารนี้เ้ตารางที่ 7-13 ผลการทดลอง สำหรับการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Y - Δ (Connectec N Pri-Sourse)

วงจรทดลองเป็นดังรูปที่ 7-20 ส่วนผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 7-14



รูปที่ 7-20 วงจรทดลอง

ตารางที่ 7-14	V-Line			V.Phase			I-Line				I-Phase		
	AB ab RS	BC bc ST	CA ca TR	AN an Rmp	BN bn Smp	CN cn Tmp	A a R	B b S	C c T	N n Mp	AB ba RS	BC cb ST	CA ac TR
PRI.	400	403	395	227	232	228	6.5	5.05	4.9	3.4	-	-	-
SEC.	221	220	227	-	-	-	9.0	9.4	9.3	-	6.1	4.7	4.9
LOAD	221	220	227	-	-	-	9.0	9.4	9.3	-	5.3	5.35	5.10

ตารางที่ 7-14 ผลการทดลอง

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. วงจร Δ - Δ จากตารางที่ 7-13 จะเห็นว่าหม้อแปลงเฟส A ซึ่งมีอิมพีแดนซ์สมมูลย์ต่ำที่สุด มีกระแสไหลผ่านตัวมันมากที่สุด ทั้งนี้สัดส่วนของกระแสย่อมขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอิมพีแดนซ์สมมูลย์นั่นเอง ดังที่ได้ทราบแล้วว่า วงจร Δ นั้นเป็นวงจรขนาน ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เส้นทางที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำสุด ก็จะมีกระแสไหลสูงสุด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลอีกอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นก็คือที่หม้อแปลงเฟสซึ่งมีอิมพีแดนซ์สูงจะมี voltage drop มาก แต่ก็ไม่ใช่เรื่องที่ต้องกังวลเท่ากับ สภาพไม่สมดุลของกระแสเฟส นอกจากนี้สภาวะไม่สมดุลนี้ไม่ปรากฏใน line current แต่อย่างไรก็ตาม อาจทำให้หม้อแปลงที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำ ต้องทำงานในสภาวะโหลดเกินอย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้อายุการใช้งานสั้นลงมาก

2. วงจร Y - Δ Connected N Primary - Source

ผลการทดลองทางด้านทฤษฎีของหม้อแปลง เป็นไปในทำนองเดียวกับกรณี Δ - Δ ส่วนทางประจุมุม เนื่องจากทั้ง 3 เฟส มีกระแสไหลไม่เท่ากันจึงเกิดกระแสไหลในนิวทรัล

ลักษณะเช่นนี้ ถ้าต่อโหลดสมดุลเต็มขีดของหม้อแปลง ทั้ง 3 เฟส หม้อแปลงเฟส A ก็จะต้องทำงานในสภาวะโหลดเกิน เช่นเดียวกับกรณี Δ - Δ

จากการทดลอง ถ้าไม่ต่อจุดนิวทรัลของประจุมุมกับแหล่งจ่าย กระแสเฟสทั้งประจุมุม และทฤษฎีจะสมดุลกันทั้ง 3 เฟส ทั้งนี้เพราะการแยกนิวทรัล เป็นการบังคับผลรวมของกระแสเป็นศูนย์ กระแสทางทฤษฎีจะต้องไหลอย่างสมดุล จึงจะไม่เกิดกระแสในนิวทรัลขึ้น

ส่วนวงจรอื่น ๆ เช่น Y - Y (connected neutral primary-source) v-v, ไม่เกิดสภาพไม่สมดุลของกระแสแต่อย่างใด จะมีก็เพียง voltage drop เท่านั้น ซึ่งไม่เป็นปัญหามากนัก

สรุป

ปัญหาในการใช้งานหม้อแปลง อีกด้านหนึ่งก็คือการที่อิมพีแดนซ์สมดุลไม่เท่ากัน ทำให้เราไม่สามารถใช้งานหม้อแปลง 3 เฟสได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยไม่เกิดโหลดเกินขึ้น ในหม้อแปลงเฟสที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำสุด แต่ก็สามารถป้องกันได้เช่นกัน โดยการต่อวงจรในลักษณะที่ไม่ก่อให้เกิดวงจรขนานขึ้น

การทดลองที่ 4 สภาวะไม่สมดุลของระบบเนื่องจากโหลดไม่สมดุล

ในเรื่องของโหลดไม่สมดุลนี้มีได้หลายกรณี เช่น โหลด 1 เฟส 2 เฟส 3 เฟส โดยแต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากัน แต่ที่ยกมาทำการทดลองนี้เป็นกรณีโหลด 1 เฟส เพียงอย่างเดียว เพื่อให้สอดคล้องกับทฤษฎี และง่ายต่อการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลอง

โหลดที่ใช้เป็นโหลดความต้านทาน ส่วนวงจรที่ทำการทดลองนั้น มีทั้งหมด 7 วงจร คือ

1. $\Delta - \Delta$

2. $\Delta - Y$

2.1 ต่อโหลดระหว่าง line - neutral

2.2 ต่อโหลดระหว่าง line - line

3. Y - Y connected N Primary - Source

3.1 ต่อโหลดระหว่าง line - neutral

3.2 ต่อโหลดระหว่าง line - line

4. Y - Y isolated N Primary - Source

4.1 ต่อโหลดระหว่าง line - neutral

4.2 ต่อโหลดระหว่าง line - line

5. Y - Δ connected N Primary - Source

6. Y - Δ isolated N Primary - Source

7. V - V

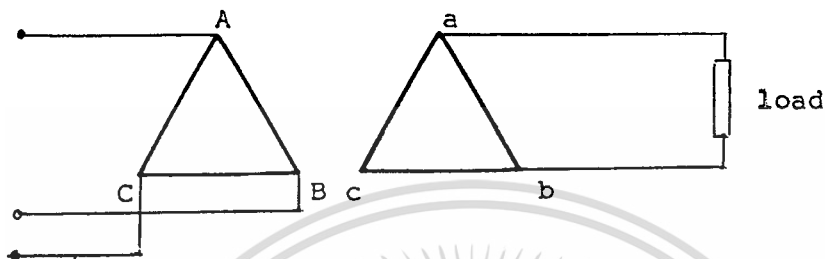
จากการทดลอง ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับทฤษฎี ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วโดยละเอียดในตอนต้นในทุกกรณีของวงจร จึงได้นำเสนอข้อมูลจากการทดลองเพียงบางลักษณะเท่านั้น ส่วนในลักษณะอื่น ๆ หากต้องการทราบข้อมูลอย่างละเอียดก็สามารถทดลองได้โดยไม่ยากนัก หรือจะใช้การวิเคราะห์ก็ได้ผลที่ค่อนข้างแม่นยำ

ผลการทดลอง

1. $\Delta - \Delta$

วงจรทดลองเป็นดังรูปที่ 7-21 ส่วนผลการทดลองอยู่ในตารางที่ 7-14.1

โหลดความต้านทาน 46 โอห์ม



รูปที่ 7-21 วงจรทดลอง $\Delta - \Delta$

ตารางที่ 7-14.1	V-Line			V.Phase			I-Line				I-Phase		
	AB ab RS	BC bc ST	CA ca TR	AN an Rmp	BN bn Smp	CN cn Tmp	A a R	B b S	C c T	N n Mp	AB ba RS	BC cb ST	CA ac TR
PRI.	224	224	222	-	-	-	4.10	4.50	0.38	-	3.1	1.6	1.10
SEC.	222	224	227	-	-	-	4.15	4.15	-	-	2.7	1.25	1.25
LOAD	222	-	-	-	-	-	4.15	4.15	-	-	-	-	-

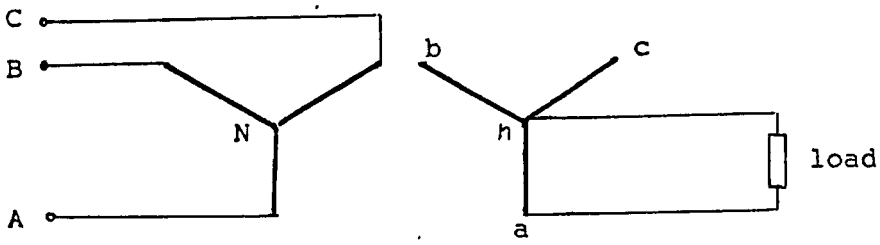
ตารางที่ 7-14.1 ผลการทดลอง $\Delta - \Delta$

2. Y - Y isolated neutral Primary - source

2.1 ต่อโหลด 1 เฟส ที่ขั้ว Line - neutral

- โหลดความต้านทานขนาด 46 Ω

- วงจรทดลองเป็นดังรูป 7-22 ส่วนผลการทดลองอยู่ในตารางที่ 7-15
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรรเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยู่ได้เห็นใบเซอร์รับชันทันการคำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

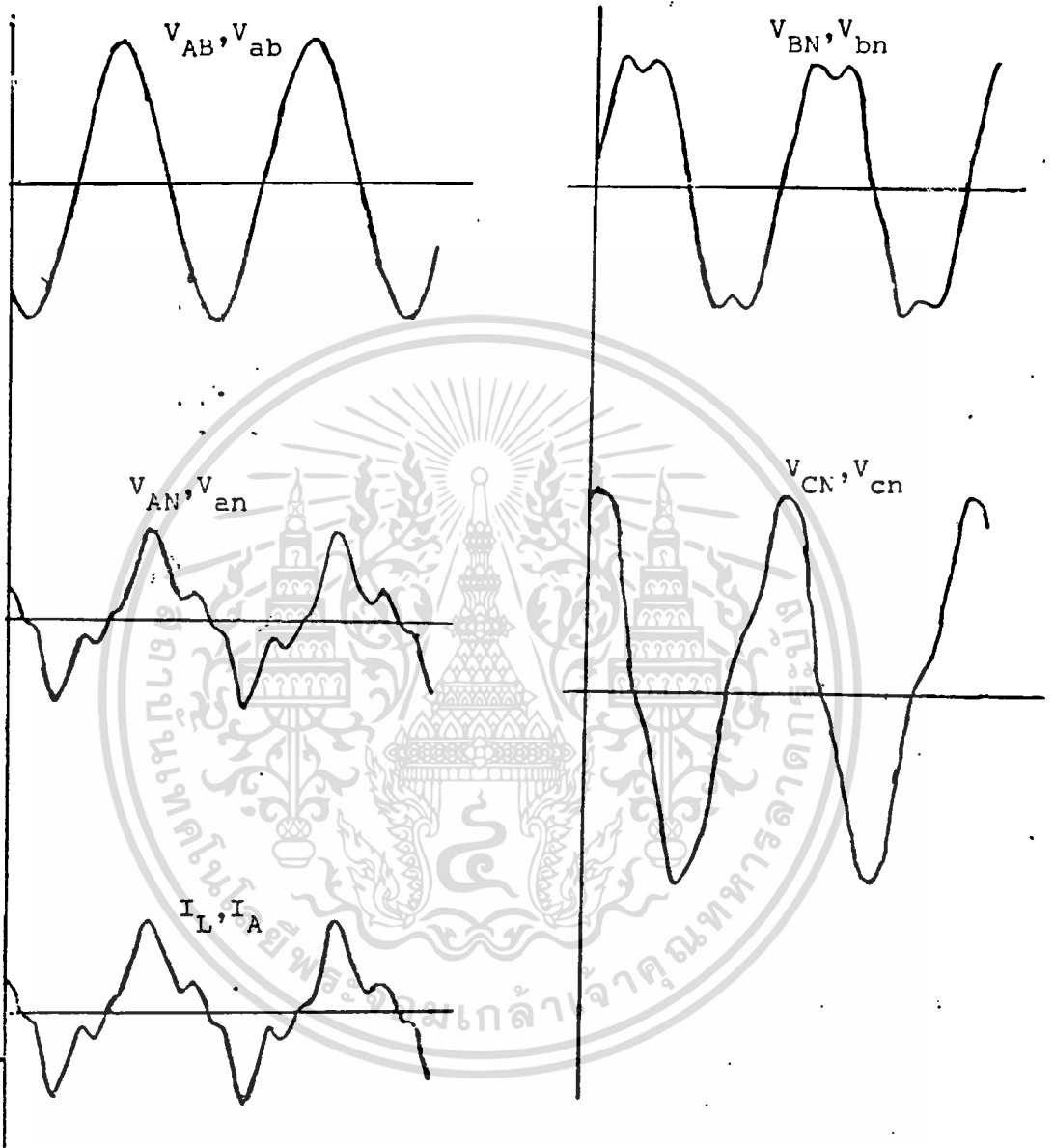


รูปที่ 7-22 วงจรทดลอง Y-Y (isolated N) Load Line-neutral

ตาราง ที่ 7-15	V-Line			V.Phase			I-Line				I-Phase		
	AB ab RS	BC bc ST	CA ca TR	AN an RMp	BN bn SMp	CN cn TMp	A a R	B b S	C c T	N n Mp	AB ba RS	BC cb ST	CA ac TR
PRI.	390	395	385	138	272	375	2.85	0.76	2.7	-	-	-	-
SEC.	390	392	382	136	270	375	2.8	-	-	2.8	-	-	-
LOAD	-	-	-	136	-	-	2.8	-	-	2.8	-	-	-

ตารางที่ 7-15 ผลการทดลอง Y-Y (isolate N) Load Line-neutral

ในการต่อวงจรแบบ Y-Y isolated N นี้เราพบว่ารูปคลื่นของแต่ละส่วนไม่เป็น sinusoid และไม่สมดุลอย่างมาก ดังต่อไปนี้



รูปที่ 7-23 รูปคลื่นของกระแสและโวลต์เตจของกรณี Y-Y isolated เมื่อต่อโหลด line-neutral

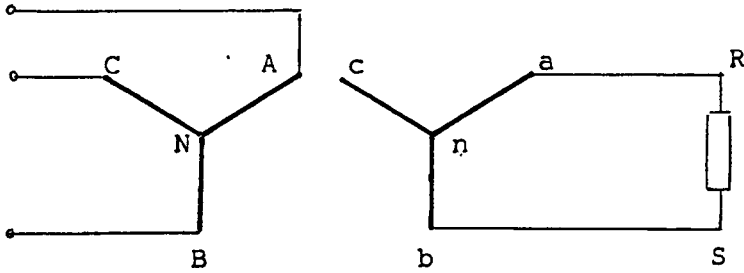
2.2 เมื่อต่อโหลด 1 เฟสที่ขั้ว line-line

- โหลดความต้านทานขนาด 92 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วงจรทดลองเป็นดังรูป 7-24 ส่วนผลการทดลองเป็นดังตารางที่

7-16



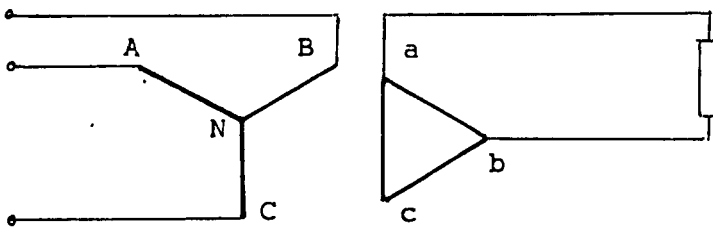
รูปที่ 7-24 วงจร Y - Y isolated N Load Line- Line

ตารางที่ 7-16	V-Line		V.Phase			I-Line				I-Phase			
	AB ab RS	BC bc ST	CA ca TR	AN an Rmp	BN bn Smp	CN cn Tmp	A a R	B b S	C c T	N n M _p	AB ba RS	BC cb ST	CA ac TR
PRI.	392	395	385	236	244	244	3.97	3.75	0.22	-	-	-	-
SEC.	387	395	385	233	241	244	3.77	3.75	-	-	-	-	-
LOAD	387	-	-	-	-	-	3.76	3.76	-	-	-	-	-

ตารางที่ 7-16 ผลการทดลอง Y-Y isolated N Load Line-Line

3. วงจร Y-Δ isolated neutral Primary - Source

- โหลดความต้านทานขนาด 46 Ω
- วงจรทดลองเป็นดังรูป 7-25 ส่วนผลการทดลองอยู่ในตารางที่ 7-17



รูปที่ 7-25 วงจร Y-Δ isolated N

ตาราง ที่ 7-17	V-Line			V.Phase			I-Line				I-Phase		
	AB ab RS	BC bc ST	CA ca TR	AN an Rmp	BN bn SMp	CN cn TMp	A a R	B b S	C c T	N n Mp	AB ba RS	BC cb ST	CA ac TR
PRI.	400	402	390	226	233	227	3.12	1.37	1.78	-	-	-	-
SEC.	223	232	226	-	-	-	4.45	4.50	-	-	3.00	1.52	1.53
LOAD	223	-	-	-	-	-	4.45	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 7-17 ผลการทดลอง Y-Δ isolated N

วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จะเห็นว่าผลการทดลอง เป็นไปตามทฤษฎี ซึ่งวิเคราะห์ได้ง่าย เช่นวงจร Δ - Δ กระแสเฟส AB มีกระแสไหลประมาณ 2 เท่าของกระแสในเฟส BC และ CA เหตุที่ไม่เท่ากับ 2 เท่าพอดี ก็เพราะหม้อแปลงไม่เหมือนกันทุกประการอย่างแท้จริง

กระแสเฟสปฐมภูมิ โดยทั่วไปจะมากกว่ากระแสเฟสทุติยภูมิ แต่สำหรับกรณีโหลด 1 เฟสนี้ กระแสไหลที่ไหลในเฟสทุกเฟส ทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิ มีเฟสตรงกันทำให้เกิดการหักล้างกับกระแสกระตุ้นในบางเฟส เราจึงเห็นว่าในกระแสเฟส CA มีค่าน้อยกว่ากระแสทางทุติยภูมิ

การต่อวงจรแบบ Y-Y isolated N ที่ต่อโหลดเข้ากับ Line และ neutral เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นกรณีที่ระบบไม่มีเสถียรภาพมากที่สุด เนื่องจากการต่อโหลดที่ชั่ว a-n นี้ ทำให้เกิดกระแสขึ้นในเฟส A ด้านปฐมภูมิ ซึ่งกระแสนี้จะต้องไหลกลับแหล่งจ่ายทางเฟส B และ C แต่กระแสที่ไหลผ่านทางเฟส B และ C นี้ไม่สามารถ refer มาตรฐานทางทุติยภูมิได้ มันจึงทำหน้าที่เป็นกระแสกระตุ้น เมื่อกระแสกระตุ้นเพิ่มขึ้น phase voltage ที่เฟส B และ C จึงเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากหม้อแปลงทั้ง 3 ไม่ identical กันอย่างแท้จริง จึงปรากฏว่ากระแสไหลในเฟส C มากกว่าเฟส B แทนที่จะไหลเท่า ๆ กัน ผลคือเฟส C มี voltage เพิ่มขึ้นไปถึง 375 โวลต์ เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็กอย่างมาก

โดยการรวมกันทางเวกเตอร์ของ phase voltage จะได้ line voltage เมื่อเฟส B และ C มี phase voltage เพิ่มขึ้น จะกดดันให้ phase voltage ของ A ลดลง เฟส A จึงจ่ายกระแสไหลได้น้อยลงโดยจ่ายได้เพียง 2.8 A แทนที่จะเป็น 220/46 ซึ่งได้ถึง 4.7 A

เมื่อพิจารณารูปคลื่นของ phase voltage ปรากฏว่าทั้ง 3 เฟสไม่เป็น sine wave เลย ทำให้กระแสไหลไม่เป็น sine wave ด้วย แต่ line voltage ทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิยังคงเป็น sine ตามปกติ

แต่เมื่อเปลี่ยนต่อไปโหลดจาก line a และ b ปรากฏว่าหม้อแปลงทั้ง 3 เฟสสมดุลและมีเสถียรภาพดี ไม่มีปัญหาในการใช้งานแต่อย่างใด

จากการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่า เราสามารถทำนายผลที่จะเกิดขึ้นจากสภาพโหลดไม่สมดุล หรือการลัดวงจรได้ การต่อโหลดที่ไม่สมดุลนั้น โดยทั่วไปแล้วไม่เป็นอันตรายต่อระบบแต่อย่างใด ยกเว้นเพียงการต่อวงจรบางลักษณะเท่านั้น

บทที่ 8

การป้องกันหม้อแปลง

หม้อแปลง เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในระบบไฟฟ้ากำลัง การป้องกันหม้อแปลง จึงเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งสามารถแบ่งการป้องกัน ได้เป็น 2 หัวข้อใหญ่ ๆ คือ

- (a) การป้องกันหม้อแปลง เนื่องจากผลของฟอลต์ที่เกิดขึ้นในส่วนอื่นของระบบ
- (b) การป้องกัน เนื่องจากฟอลต์ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง

8.1 การป้องกันฟอลต์จากภายนอก

8.1.1 การลัดวงจร

การลัดวงจรไม่ว่าจะเป็นแบบ 2 สายหรือ 3 สาย ที่เกิดขึ้น กระแสฟอลต์ที่มากมายนั้นขึ้นอยู่กับ ระบบสายป้อน, MVA ของระบบที่เกิดฟอลต์, แรงดันที่เกิดฟอลต์ และขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของวงจรจนถึงจุดฟอลต์ ระบบที่ลัดวงจรจะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความร้อนในหม้อแปลงอย่างมาก เนื่องจาก copper loss เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของกระแสฟอลต์ กระแสฟอลต์ที่มากขึ้น ทำให้เกิดแรงบิดในหม้อแปลงอย่างรุนแรง แรงบิดที่มากที่สุดเกิดใน cycle แรกของกระแสฟอลต์ การควบคุมแรงบิดขึ้นอยู่กับการออกแบบหม้อแปลง การต่อหม้อแปลงในระบบกำลังใหญ่ ๆ ขดลวดจะถูกยึดเพื่อให้ผลของแรงบิดทางกลน้อยที่สุด เมื่อเกิดการลัดวงจร

8.1.2 High Voltage disturbance

แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ

- (a) Transient surge voltage
- (b) Power frequency voltage

(a) Transient surge voltage

Surge ที่มีความถี่และแรงดันสูงที่เกิดในระบบเกิดเนื่องจาก

(i) การอาร์ตลงดิน เมื่อไม่ต่อ neutral

(ii) การสวิตชิง

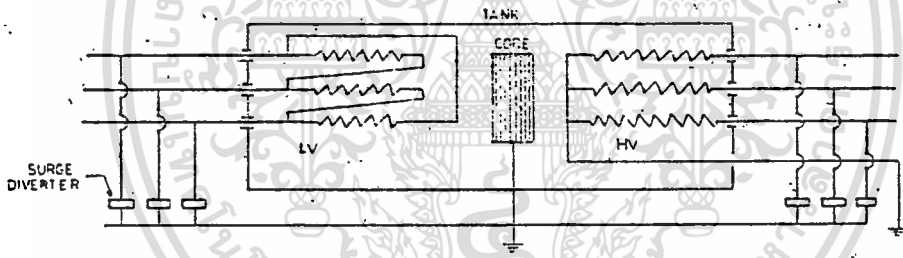
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(iii) Atmospheric disturbances

สิ่งที่มีารบกวนอยู่ในรูปของ travelling wave ซึ่งมีหน้าคลื่น และแอมพลิจูดสูงทั้ง 2 อย่างนี้ทำให้ฉนวนระหว่างรอบกับ line terminal เบรคดาวน์ เกิดกระแสลัดวงจรระหว่างรอบ และทำความเสียหายแก่ขดลวดอย่างมาก เราสามารถลดผลของแรงดันเสิร์จได้ โดยการออกแบบขดลวดให้ทนต่อแรงดันเสิร์จที่ทดสอบ

surge diverter ทุกแบบมีจุดประสงค์เดียวคือ รับเสิร์จจากไลน์ลงดินก่อนจะถึงหม้อแปลง โดยเฉพาะ surge diverter ที่เป็นแบบ valve type มี spark gap ต่ออนุกรมกับ nonlinear resistor ซึ่งจะมีความต้านทานต่ำ เมื่อมีแรงดันเสิร์จสูงแรงดันเสิร์จเหล่านี้จะถูกจ่ายลงดินผ่าน diverter เมื่อแรงดันเสิร์จตกลง ความต้านทานของ diverter จะเพิ่มขึ้นอย่างอัตโนมัติ เพื่อป้องกันกระแสไหลลงดิน



รูปที่ 8-1 แสดงการต่อ surge diverter

รูปที่ 8-1 แสดงการต่อ surge diverter ขนานกับหม้อแปลง 3 เฟส เพื่อป้องกัน bushing และ winding ของหม้อแปลง อันเนื่องจากแรงดันเสิร์จ อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จควรมีลักษณะดังนี้

1. มีความเร็วต่อ impulse over voltage
2. มีลักษณะเป็น nonlinear resistance
3. ทนความร้อนได้สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทนกระแส interrupting ได้สูง

5. มีการทำงานที่มั่นใจได้

ปัจจุบันนี้ใช้ Zine oxide arrestor ซึ่งมีการทำงานที่เชื่อถือได้ และหาได้

ในท้องตลาด

(b) Power frequency over voltage

Power frequency over voltage ทำให้เกิด stress เพิ่มขึ้นบนฉนวนและเป็นสัดส่วนกับการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์ ผลต่อมาทำให้ iron loss เพิ่มขึ้น และทำให้ magnetizing current เพิ่มขึ้นอย่างมาก จากนั้น ฟลักซ์ในชั้นของแกนจะเข้าไปในโครงสร้างที่เป็นโลหะโดยเฉพาะ ในสภาพที่มีการ over-excite นี้อัตราของแกนเหล็ก ซึ่งปกติจะมีฟลักซ์เล็กน้อยจะได้รับฟลักซ์ซึ่ง divert จากบริเวณที่อ้อมตัวของแกน

สภาวะเช่นนี้ นี้อัตราจะมีความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นอันตรายต่อฉนวนทั้งของฉนวนและขดลวด

การลดความถี่ลง ก็มีผลเช่นเดียวกับ over voltage เมื่อคำนึงถึงความหนาแน่นของฟลักซ์

การป้องกัน over fluxing ไม่จำเป็นต้องมีการทวีความถี่สูงนัก การทวีอย่างกันก็ไม่เหมาะสม เนื่องจากการทวีอาจรบกวนระบบที่ยังดำเนินได้ได้อยู่ สมการพื้นฐานของการเกิด emf ในหม้อแปลง คือ

$$\phi = k \frac{E}{f} \tag{8-1}$$

ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องตรวจอัตราส่วนของ E/f ว่าเกิน 1 หรือไม่ E และ f จะอยู่ในรูป per unit ของค่าจำกัด over fluxing relay ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของ E/f ของหม้อแปลง เพื่อให้มีการเตือนและแก้ไขได้ถูกต้อง ถ้ามีสภาวะ over fluxing เป็นเวลานาน ควรแยกหม้อแปลงออกจากระบบ เพื่อป้องกันความเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2 การป้องกัน ฟอลท์ภายในหม้อแปลง

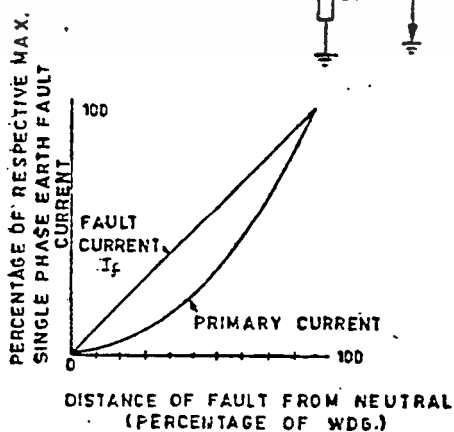
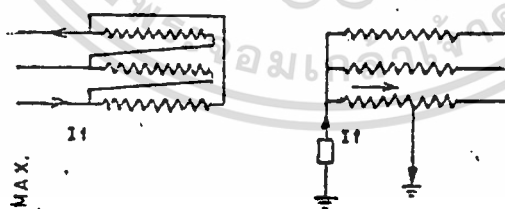
ฟอลท์ที่สำคัญ ที่เกิดในหม้อแปลงคือ

- (i) การเบรคดาวลงดินของทั้งลวด และ terminal gear.
- (ii) การฟอลท์ ระหว่างเฟส
- (iii) การฟอลท์ ภายในรอบของขดลวด
- (iv) การฟอลท์ ของ core

8.2.1 การฟอลท์ลงดิน

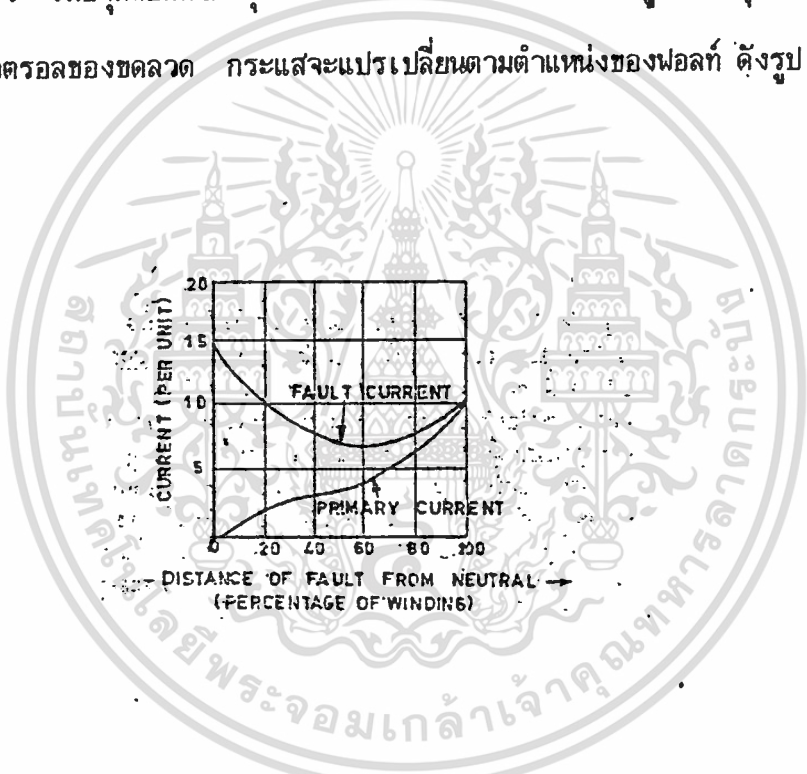
(a) การต่อแบบวายที่มีจุด นิวตรอลต่ออิมพีแดนซ์ ก่อนต่อลงดิน

กระแสฟอลท์ในกรณีนี้ขึ้นอยู่กับ อิมพีแดนซ์ที่ต่อลงดิน และเป็นสัดส่วนกับระยะห่างระหว่างจุดฟอลท์กับนิวตรอล และแรงดันที่จุดฟอลท์ก็เป็นสัดส่วนกับระยะห่างนี้ กระแสฟอลท์ในขด primary ขึ้นอยู่กับ transformation ratio และจำนวนรอบที่ลัดวงจร ซึ่งแปรเปลี่ยนตามจุดฟอลท์ ในขด จากรูป 8-2 จะเห็นว่า การฟอลท์ในขดที่ 3 (ขดว่างด้าน secondary) จะมีกระแสผ่านขด primary น้อยเมื่อเทียบกับจุดอื่น ๆ



(b) การต่อแบบวาย ที่มีจุดนิวตรอลต่อลงดิน

ในการต่อแบบนี้ กระแสฟอลต์ถูกควบคุมโดย leakage reactance ของขดลวด ซึ่งจะแปรเปลี่ยนในลักษณะเชิงซ้อนกับตำแหน่งของฟอลต์ในขดลวด ดังในกรณีแรก แรงดันที่เกิดกระแสฟอลต์ เปลี่ยนตามตำแหน่งของฟอลต์บนขดลวด พบว่าค่า reactance ลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อจุดฟอลต์ใกล้จุดนิวตรอล และกระแสฟอลต์ จะสูงมากที่สุด เมื่อจุดฟอลต์ใกล้ปลาย ขดนิวตรอลของขดลวด กระแสจะแปรเปลี่ยนตามตำแหน่งของฟอลต์ ดังรูป 8-3



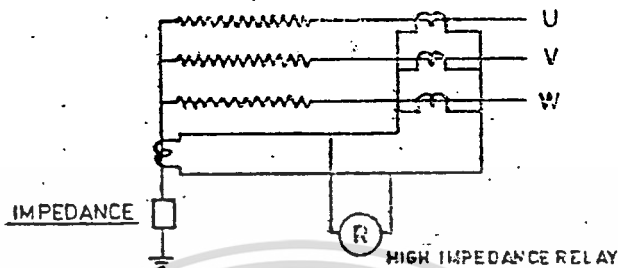
รูปที่ 8-3 กระแสฟอลต์ลงดินเมื่อไม่ต่อนิวตรอล

จากรูปที่ 8-3 จะเห็นว่า ขนาดของกระแสฟอลต์ จะสูงมากตลอดขดลวด

(c) การป้องกันฟอลต์ลงดิน

ระบบป้องกันฟอลต์ลงดิน และ over current ธรรมดา จะป้องกัน

ฟอลต์ในขด primary ที่ต่อแบบวาย ได้ไม่เต็มที่ ยิ่งถ้า neutral ต่อลงดินผ่าน อิมพีแดนซ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การป้องกันฟอลต์ที่ไว้ใจได้ แสดงดังรูป 8-4 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8-4 การป้องกันกระแสฟอลต์ลงดินของการต่อแบบ star

รูปนี้แสดงการป้องกันหม้อแปลงเมื่อหม้อแปลงต่อแบบวาย ระบบก็ยังคงมี

เสถียรภาพ สำหรับฟอลต์ที่เกิดขึ้นนอก โชนนี้ กระแสฟอลต์ทั้งหมดจะถูกวัด ระดับการป้องกันที่ดีจะ
 ได้จาก ในกรณีที่จุดนิวตรอลต่อลงดินผ่านอิมพีแดนซ์ ในกรณีที่ต่อนิวตรอลลงดินเลยกระแสฟอลต์ ยัง
 คงมีค่าสูงมาก ถึงแม้ว่าจะเป็นรอบสุดท้ายของขดลวด ดังนั้นการป้องกันที่สมบูรณ์ของฟอลต์ลงดิน
 จะได้รับการป้องกันดังรูป 8-4

8.2.2 การฟอลต์ระหว่างเฟส

การเกิดฟอลต์แบบนี้ในหม้อแปลงค่อนข้างเกิดน้อย เมื่อเกิดฟอลต์แบบนี้
 กระแสขณะทำงานของ instantaneous relay ในด้าน primary จะมาก เช่นเดียวกับ
 differential relay

8.2.3 การเกิดฟอลต์ระหว่างขดลวด

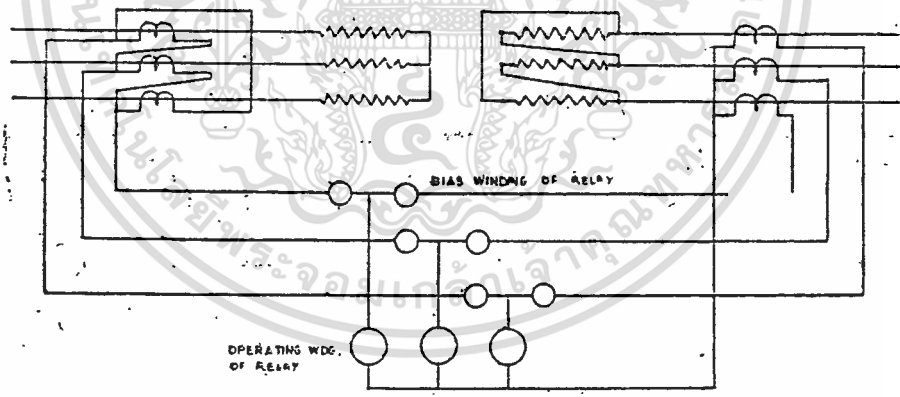
หม้อแปลงแรงดันสูงที่ต่อกับสาย overload มักได้รับ impulse
 voltage ที่มีหน้าคลื่นชันมาก แรงดันเสิร์จ ในไลต์นี้เป็นหลาย ๆ เท่าของพิกัด และมีผลต่อ
 ปลายของขดลวดมาก เนื่องจากความถี่สมมูลของหน้าคลื่นสูง หม้อแปลงที่เสียหาย เนื่องจากฟอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่มีความรับผิดชอบอีก เนื่องจากความถี่สมมูลของหน้าคลื่นสูง

ระหว่างขดลวดมีเปอร์เซ็นต์สูงมาก การเกิดฟลักซ์ชนิดนี้ เกิดเนื่องจากแรงบิดทางกลของขดลวดอันเนื่องมาจากการลัดวงจรบริเวณอื่น (นอกหม้อแปลง) แม้ว่ากระแสลัดวงจรในขดที่เกิดฟลักซ์จะสูง กระแสที่ terminal จะน้อย เนื่องจาก transformation ratio ระหว่างขดลวดทั้งหมด และจำนวนรอบที่ลัดวงจรจะมีอัตราส่วนสูง ถ้าฟลักซ์ชนิดนี้ตรวจพบเข้า อาจทำให้หาสาเหตุของฟลักซ์ที่แท้จริงไม่พบ

(a) การป้องกันแบบ differential

การป้องกันแบบนี้สามารถป้องกันหม้อแปลงได้อย่างสมบูรณ์ กระแสฟลักซ์ด้าน primary และ secondary เป็นสัดส่วนกลับกับแรงดันของแต่ละด้าน ดังนั้นหม้อแปลงกระแส ควรมีพิกัดด้าน primary สอดคล้องกับพิกัดกระแสของหม้อแปลงที่วัด เพื่อแก้การขยับไปของเฟสในการต่อหม้อแปลงแบบ วาย-เดลต้า ขด secondary ของหม้อแปลงกระแสควรจะต่อแบบ เดลต้า-วาย ดังรูป 8-5



รูปที่ 8-5 แสดงการป้องกันแบบ differential

หม้อแปลงส่วนใหญ่จะมีขด tapping เพื่อแก้การตกลงของแรงดันทำให้ turn ratio เปลี่ยนไป ดังนั้นการป้องกันแบบดิฟเฟอเรนเชียลควรจะต้องพิจารณาผลของ turn ratio ที่เปลี่ยนไปด้วย เพื่อให้การป้องกันมีประสิทธิภาพที่ through-fault condition

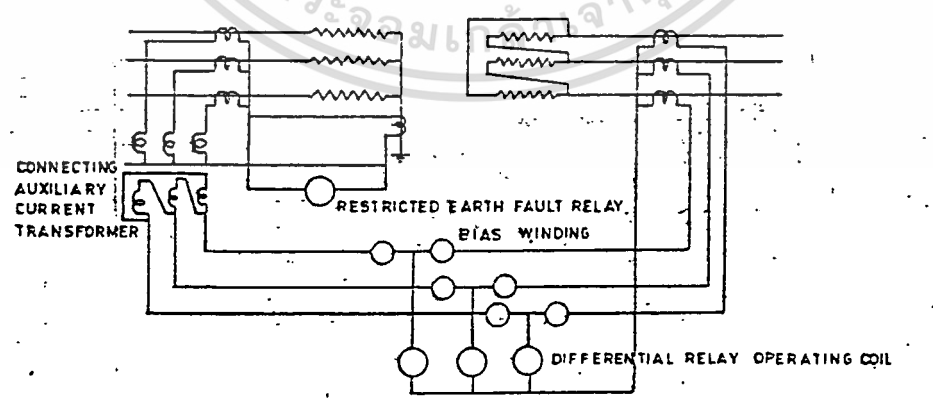
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b) ปรากฏการณ์ Magnetizing inrush current

ปรากฏการณ์ นี้ ก่อให้เกิดกระแสด้าน primary ซึ่งกระแสนี้ไม่สม-
มูลย์กับกระแสด้าน secondary กระแส magnetizing ที่ปรากฏทั้งหมดนี้ทำให้เกิดการไม่สม-
ดุลชั่วคราว ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นชั่วขณะ สามารถเข้าสู่สภาวะปกติด้วยเวลาเพียงเล็กน้อย
สามารถป้องกันได้หลายวิธี การต่อ kick fuse เข้าเป็น shunt กับ instantaneus
relay นิวส์สามารถรับ inrush current ได้โดยไม่เสียหาย สำหรับการพอล์ภายในนิวส์
จะละลายแล้วทำให้ relay ทำงาน รูปแบบการเหี่ยวนำของ relay อาจจะมีลักษณะ
เวลาที่เหมาะสม การเหี่ยวนำของหน้าสัมผัส

กรณีที่ inrush current มีความรุนแรง set time delay อาจจะไม่เพียงพอ
ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเสียหายแก่หม้อแปลงน้อยที่สุด การเคลียร์พอล์ อาจทำโดยไม่มีกรหน่วง
เวลา รูปคลื่นของ inrush current และ รูปคลื่นของกระแสบริเวณพอล์ต่างกันมาก ทำ
ให้นักความแตกต่างได้ กระแสที่แตกต่างนี้ผ่านฟิลเตอร์ กระแสฮาร์โมนิกที่ 2 จะถูกกำจัด
ออกไป ส่วนนี้จะนำไป

(c) การร่วมป้องกันแบบ differential และการป้องกันพอล์ลงดินเข้า
ด้วยกัน จำเป็นต้องมีการแก้เฟสของกระแส ในหม้อแปลงกระแส ดังรูป 8-6



รูปที่ 8-6 แสดงการป้องกันแบบ differential และกระแสลงดินที่ได้ผล

ถ้าจำนวนส่วนหนึ่งส่วนใดของแกนบกพร่อง หรือแผ่นเหล็กที่เป็นชั้น ๆ เชื่อมถึงกันเป็นตัวนำ ทำให้ eddy current ไหลได้ เกิดความร้อนเกินอย่างมาก ถ้าจำนวนของเนื้อเคลือบก็จะมี eddy current ไหลได้ ทำให้เนื้อร้อน เมื่อรวมกับผลของ core loss ทำให้ความร้อนเกินได้ แต่ก็ไม่ทำให้กระแสไหลเปลี่ยนไปมาก อย่างไรก็ตามควรมีการตรวจสอบสภาพความร้อนเกิน ก่อนที่จะทำให้เกิดฟอลต์แบบอื่น ๆ ตามมา ความร้อนจัดของ core ทำให้น้ำมันของหม้อแปลงเบรคดาวร์ เกิดก๊าซเข้าไปใน conservator

(a) ในหม้อแปลงและขดลวด ฟอลต์ที่เกิดทุกอย่าง ทำให้เกิดความร้อนในหม้อแปลง และน้ำมันหม้อแปลงเบรคดาวร์ได้ เมื่อเกิดฟอลต์และเกิดความร้อนขึ้น ก๊าซจะถูกปล่อยเข้าไปใน conservator เมื่อเกิดการอาร์คอย่างรุนแรง ก่อให้เกิดโอของก๊าซและโอของน้ำมัน เกิดความดันทำให้น้ำมันเข้าไปใน conservator Bucholz ได้พัฒนาวิธีป้องกันดังกล่าว มีลักษณะดังนี้ เป็นหน้าสัมผัส 2 แผ่น แผ่นแรกคอยเตือน อีกแผ่นคอยทริฟ เมื่อก๊าซเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ก๊าซจะถูกดักโดยรีเลย์ และเข้าแทนที่น้ำมัน เมื่อน้ำมันเคลื่อนที่ไปได้ระยะพอสมควร สัญญาณเตือน ก็จะเตือนไปยังห้องควบคุม เพื่อให้มีการตรวจสอบต่อไป

เมื่อปฏิกริยาที่เกิดรุนแรง trip contact ก็จะแยกหม้อแปลงออกจากระบบ เนื่องจากวิธีนี้ใช้ได้เฉพาะในหม้อแปลง bucholz relay จึงใช้อยู่ในวงจำกัด

(b) เมื่อเกิดการอาร์คอย่างรุนแรงภายในหม้อแปลง ถ้าความดันเกิน ก็จะถูกปล่อยผ่านอุปกรณ์ป้องกันออกไป และอุปกรณ์ก็จะ trip เบรกเกอร์ แยกหม้อแปลงออกจากระบบ

(c) เมื่อไหลหรือฟอลต์เพิ่มขึ้น ก็จะทำให้อุณหภูมิของน้ำมัน และขดลวดสูงขึ้น เมื่อเพิ่มเกินจุดปลอดภัยในการทำงาน หน้าสัมผัสก็จะทำงาน ส่งสัญญาณเตือนไปยังห้องควบคุม ให้มีการตรวจสอบต่อไป ถ้าอุณหภูมิยังเพิ่มขึ้นอีก รีเลย์ก็จะทริฟเพื่อแยกหม้อแปลงออกจากระบบ

บทที่ 9

การระบายความร้อนและการทำไหลลดเกินต่อหม้อแปลง

การสูญเสียพลังงานไฟฟ้าต่าง ๆ ที่เกิดในหม้อแปลง ทั้งในแกนเหล็ก (core loss) ในขดลวด (copper loss) และในส่วนต่าง ๆ ขณะจ่ายภาระอยู่ พลังงานสูญเสียทั้งหมด จะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิของฉนวนมีโอกาสสูงจนฉนวนเสียหายได้ซึ่งการระบายความร้อนที่ถูกรูวิธี จะช่วยเพิ่มพิกัดกำลัง (rating) ของหม้อแปลงได้

9.1 การระบายความร้อนในหม้อแปลง

อุณหภูมิของหม้อแปลงขณะจ่ายไหลลด เป็นผลบวกของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิรอบ ๆ (ambient temperature) สภาพอากาศก็มีผลแต่น้อย วิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลง ที่ใช้ขณะนั้นแบ่งได้เป็น

9.1.1 หม้อแปลงชนิดพึ่งอากาศ ระบายความร้อนโดยวิธีธรรมชาติ (self air cooled, Dry type transformer)

ส่วนใหญ่ติดตั้งในที่ร่ม มีขนาดเล็ก ความร้อนจากขดลวดจะถ่ายเทให้แก่อากาศรอบๆ และส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงอย่างช้า ๆ ทำให้ไม่สามารถขยายพิกัดกำลังให้ใหญ่ขึ้นได้ ปัจจุบัน มีการพัฒนาฉนวนชนิด H ซึ่งทนอุณหภูมิสูงมากขึ้นกว่าเดิม สามารถเพิ่มพิกัดได้ถึง 3.5 MVA ด้วยระบบแรงดันไฟฟ้าปฐมภูมิ 22 kV ข้อดีของหม้อแปลงชนิดนี้คือ ปลอดภัยจากการระเบิด ไม่มี ก๊าซพิษ และอันตรายจากสารไวไฟ จึงเหมาะสมที่จะใช้ในระบบจำหน่าย

9.1.2 หม้อแปลงชนิดพึ่งอากาศระบายความร้อนด้วยวิธีเพิ่มการเป่าลม (Air Blast Cooling Dry Type Transformer)

มีขนาดเล็ก มีช่องว่างอากาศระหว่างขดลวดและแกนเหล็ก ทุกส่วนของหม้อแปลงจะต้องเป่าลมถึง การไล่ความร้อนชนิดนี้ สามารถเพิ่มพิกัดกำลังให้แก่หม้อแปลงได้อีก 33.3% โดยที่ขนาดไม่เปลี่ยนแปลง

9.1.3 หม้อแปลงชนิดแช่น้ำมันระบายความร้อนโดยวิธีอากาศนำความร้อนออกไป
(oil-immersed, self cooling transformer)

ทั้งขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงชนิดนี้จะแช่อยู่ในน้ำมัน น้ำมันจะถ่ายเทความร้อนไปยังถังออกสู่อากาศภายนอก ลักษณะของถังมีหลายชนิด

ก. พวกผนังถังเรียบ (Plain tank wall) ความร้อนจากแกนและขดลวด จะขยายตัวลอยสูงเบียดบน น้ำมันที่เย็นจะจมลงสู่เบื้องล่าง ดังนั้น ถ้าแกนและขดลวดวางอยู่ที่กันถัง ตัวถังทั้งหมดจะร้อน ความร้อนจะถ่ายเทได้ดีกว่า นำส่วนประกอบทั้งสอง ไปติดตั้งส่วนบนของถัง

ข. พวกผนังถังที่มีครีบริบหรือแผ่นยื่นออก (Tank wall with fin or plates) เพิ่มผิวระบายความร้อนด้วยการเพิ่มครีบริบติดผนังถัง

ค. พวกผนังถังที่มีครีบริบกลวงหรือท่อติดอยู่ (Tank wall with fin or tube) เป็นหม้อแปลงขนาดกลาง อัตราการเพิ่มปริมาตรของวัสดุภายในหม้อแปลง จะมากกว่าอัตราการเพิ่มพื้นที่ผิวถังภายนอก การระบายความร้อนจึงเพิ่มครีบริบกลวง เพื่อให้ให้น้ำมันไหลได้คล่องและลดความร้อนในที่สุด

ง. พวกผนังถังที่ติดตั้งตัวแผ่รังสีความร้อนภายนอกถัง (Tank wall with external radiator) เป็นหม้อแปลงขนาดใหญ่ ตัวแผ่รังสีประกอบด้วยท่อระบายความร้อนกลวง

9.1.4 หม้อแปลงชนิดแช่น้ำมัน มีน้ำช่วยระบายความร้อน (oil immersed water cooling) ติดตั้งท่อทองแดงขดอยู่ส่วนบนของถังให้น้ำไหลผ่าน พาความร้อนจากน้ำมันออกนอกถัง ประสิทธิภาพของหม้อแปลงชนิดนี้ค่อนข้างต่ำ บำรุงรักษาลำบาก ต้องทำการทดสอบตลอดเวลา เพื่อป้องกันการรั่วซึมขณะใช้งาน

9.1.5 หม้อแปลงชนิดแช่น้ำมันที่มีการเป่าลม (oil-immersed, self cooling with air blast) ติดตั้งพัดลม พัดที่ตัวแผ่รังสี พัดลมจะทำงานเฉพาะเวลารับภาวะสูงสุด (peak load) การควบคุมอาจกระทำได้ทั้งวิธีกดสวิตช์ธรรมดาหรืออัตโนมัติ โดยมีตัวควบคุมทำหน้าที่ตรวจสอบความร้อนของน้ำมัน

9.2 ผลของการทำโหลดเกินของหม้อแปลง

ความเสียหายที่จะเกิดกับหม้อแปลงเมื่อทำการโหลดเกินจะเกิดเนื่องจากฉนวนเสื่อมสภาพ อันเป็นผลของการสะสมความร้อน ดังนั้นการต่อ โหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงย่อมทำให้ความร้อนเปลี่ยนแปลง ทำให้คาดการณ์ถึงอายุการใช้งาน (life expectancy) เปลี่ยนตามการต่อ โหลด การต่อ โหลด ความร้อน อายุใช้งานจึงมีความสัมพันธ์กัน

ในการพิจารณาถึงผลของอุณหภูมิและอายุการใช้งาน จะอธิบายในเทอมของเปอร์เซ็นต์การคาดการณ์ถึงอายุการใช้งาน ตัวอย่างที่นำมาอธิบายพิจารณาจากหม้อแปลงชนิดแห้ง คลาสเรซิน (dry type transformer cast resin in suclation) ซึ่งฉนวนจะทนต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องถึง 155°C หรือในกรณีมอเตอร์เหนียวฉนวนเป็นคลาส E จะสามารถทนต่ออุณหภูมิต่อเนื่องได้ 120°C ถ้าหม้อแปลงที่มีอุณหภูมิใช้งานต่ำกว่า 155°C อยู่ 6°C หรือมอเตอร์มีอุณหภูมิใช้งานต่ำกว่า 120°C จะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงและมอเตอร์เพิ่มขึ้น 2 เท่า ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิใช้งานสูงกว่า 155°C อยู่ 6°C หรืออุณหภูมิใช้งานสูงกว่า 120°C อยู่ 6°C ในกรณีมอเตอร์ อายุการใช้งานของหม้อแปลงและมอเตอร์จะลดลงครึ่งหนึ่ง ดูตาราง 9-1 อุณหภูมิที่ฉนวนทนได้เรียกว่า hot spot temperature

การคาดการณ์ถึงอายุการใช้งานของหม้อแปลง นอกจากจะขึ้นกับลักษณะการใช้งานแล้ว ยังขึ้นกับวัสดุที่นำมาผลิต และขบวนการผลิตของผู้ผลิตอีกด้วย

9.2.1 การต่อ โหลดอย่างต่อเนื่อง เนื่องจาก hot spot temperature (θH) เป็นผลรวมของอุณหภูมิสถานะแวดล้อม (θa) อุณหภูมิของขดลวดที่เพิ่มขึ้นเมื่อต่อ โหลด (winding temperature, θc) และ hot spot GRADIENT(θh) ในส่วนของ winding temperature และ hot spot gradient ขึ้นโดยตรงกับการต่อ โหลด ส่วนอุณหภูมิสถานะแวดล้อม ไม่ขึ้นกับการต่อ โหลด

$$\theta H = \theta a + \theta c + \theta h \quad (9-1)$$

โดยที่ $\theta c = (L_1/L_2)^{1.6} \theta_{co} \quad (9-2)$

$$\theta_h = (L_1/L_2)^{1.6} \theta_{hc} \quad (9-3)$$

θ_a = อุณหภูมิสภาพแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)

θ_H = อุณหภูมิของขดลวดที่เพิ่มขึ้น ($^{\circ}\text{C}$)

θ_n = hot spot temperature gradient ($^{\circ}\text{C}$)

L_1 = ค่า KVA หรือ kW ของโหลดที่นำมาต่อ

L_o = ค่า kVA หรือ kW ของแผ่นป้ายประจำหม้อแปลง

θ_{co} = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับจำนวนที่ได้แสดงบนแผ่นป้ายประจำเครื่อง สำหรับคลาสเรตินจะมีค่า 80°C

θ_{hsc} = คือค่าการออกแบบของ hot spot temperature gradient ($^{\circ}\text{C}$) สำหรับคลาสเรตินจะมีค่า 30°C

9.2.2 เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

ค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิเริ่มต้นจะไม่แน่นอน เพื่อความสะดวกจึงต้องพิจารณาถึง

สมมุติโหลดต่อเนื่องแทนโหลดที่นำมาต่อจริง ซึ่งค่าสมมุติโหลดต่อเนื่องหาได้จากสมการ

$$L_{rms} = \frac{L_1^2 t_1 + L_2^2 t_2 + \dots + L_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$

L_{rms} = สมมุติโหลดต่อเนื่อง

L_1 = โหลดที่นำมาต่อในช่วงเวลา t_1

t_1 = ช่วงเวลาที่ทำการต่อโหลด

θ_H (hot-spot temperature (°C))		P	θ_H		P
หม้อแปลงชนิด แห้ง	มอเตอร์จำนวน Class E	เปอร์เซ็นต์ของ การคาดการณ์ ถึงอายุการใช้ งาน	หม้อแปลง	มอเตอร์	
195	160	1	156	121	91.67
194	159	1.17	155	120	100
193	158	1.3	154	119	117
192	157	1.43	153	118	133
191	156	1.56	152	117	150
190	155	1.82	151	116	167
189	154	2.08	150	115	183
188	153	2.34	149	114	200
187	152	2.6	148	113	233
186	151	2.86	147	112	267
185	150	3.13	146	111	300
184	149	3.65	145	110	333
183	148	4.17	144	109	367
182	147	4.69	143	108	400
181	146	5.21	142	107	467
180	145	5.73	141	106	533
179	144	6.25	140	105	600
178	143	7.29	139	104	667
177	142	8.33	138	103	733
176	141	9.38	137	102	800
175	140	10.42	136	101	933
174	139	11.46	135	100	1067
173	138	12.50	134	99	1200
172	137	14.58	133	98	1333
171	136	16.67	132	97	1467
170	135	18.75	131	96	1600
169	134	20.83	130	95	1867
168	133	22.92	129	94	2123
167	132	25	128	93	2400
166	131	29.17	127	92	2667
165	130	33.33	126	91	2933
164	129	37.5	125	90	3200
163	128	41.67	124	89	3733
162	127	45.83	123	88	4267
161	126	50	122	87	4800
160	125	58.33	121	86	5333
159	124	66.67	120	85	5867
158	123	75	119	84	6400
157	122	83.33	118	83	7467
			117	82	8533
			116	81	9600
			115	80	10000

ตารางที่ 9-1 ตารางการเปรียบเทียบของ hot spot temperature กับจำนวนเปอร์เซ็นต์ของการคาดการณ์ถึงอายุการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก 1

Basic of Transformer

การทดลองที่ 1

เรื่อง V - I Curve

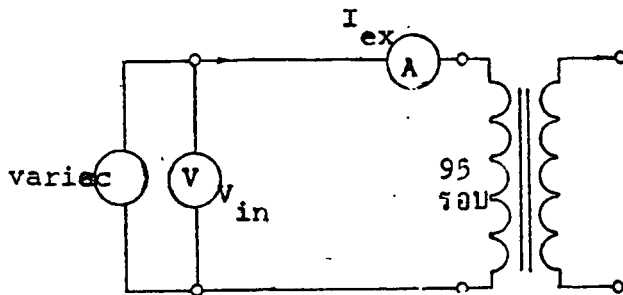
วัตถุประสงค์ - เพื่อให้เข้าใจถึงสภาพของแกนเหล็กซึ่งไม่เป็นเชิงเส้น (non linearity)

- อุปกรณ์
1. หม้อแปลง 1 เฟส
 2. AC Voltmeter
 3. AC Ammeter
 4. Variac 1 เฟส

ขั้นตอนการทดลอง

1. เลือกใช้ชุด 95 รอบ ของหม้อแปลงเพียงชุดเดียว แล้วต่อวงจรตามรูปที่ ผ1-1
2. ค่อย ๆ ปรับ Variac ให้ V_{in} เพิ่มขึ้นทีละ 10 Volt โดยเริ่มจาก 0 แล้วอ่านค่า I_{ex} (exciting current) บันทึก ทั้งนี้เมื่อ V_{in} เริ่มเกิน 200 V ให้ใช้ความระมัดระวังมากเป็นพิเศษ จนกระทั่ง I_{ex} มีค่าถึงประมาณ 5 A จึงหยุด
3. นำค่า I_{ex} และ V_{in} ไปพล็อตกราฟ โดยให้ I_{ex} เป็นแกนนอน และ V_{in} เป็นแกนตั้ง

คำถาม - จากลักษณะของ V - I Curve ดังกล่าว มีผลต่อการเลือกใช้งานหม้อแปลงที่ได้ออกแบบพิกัดโวลท์เตจไว้แล้วอย่างไรบ้าง และมีผลการออกแบบหม้อแปลงอย่างไร



รูปที่ ผ1-1 วงจรทดลอง V - I CURVE

การทดลองที่ 2

เรื่อง การทดสอบหม้อแปลง

วัตถุประสงค์ - เพื่อสร้างวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลง

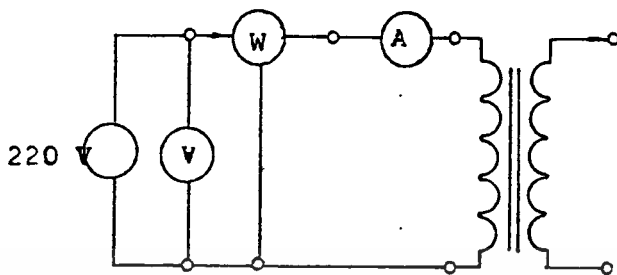
อุปกรณ์

1. หม้อแปลง 1 เฟส
2. AC Voltmeter
3. AC Ammeter
4. AC Wattmeter
5. Variac 1 เฟส

ขั้นตอนการทดลอง

1. Open Circuit Test
 - 1.1 ต่อดังรูปที่ ผ1-2
 - 1.2 ปรับ variac ป้อน $V_{oc} = 220 \text{ V}$ ให้กับหม้อแปลง
 - 1.3 บันทึกค่า I_{oc} , W_{oc}
 - 1.4 คำนวณค่า R_c , X_m (ตามวิธีการที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ1-2 วงจรทดลอง Open Circuit Test

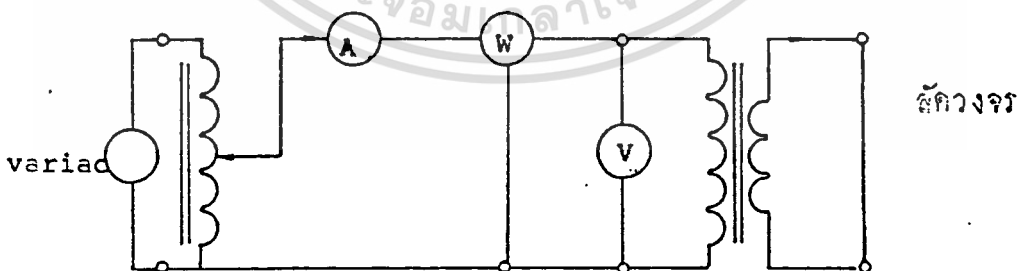
2. Short Circuit Test

2.1 ต่อวงจรดังรูปที่ ผ1-3 (ลัดวงจรด้านทุติยภูมิ)

2.2 ค่อย ๆ ปรับ variac จาก 0 V จนได้กระแส $I_{sc} = 8 A$

2.3 บันทึกค่า I_{sc} , V_{sc} , W_{sc}

2.4 คำนวณหาค่า R_{eq} , X_{eq}



รูปที่ ผ1-3 วงจรทดลอง short circuit test

2.5 จากค่า R_c , X_m และ R_{eq} , X_{eq} ที่คำนวณได้ให้เขียนวงจรสมมูลย์

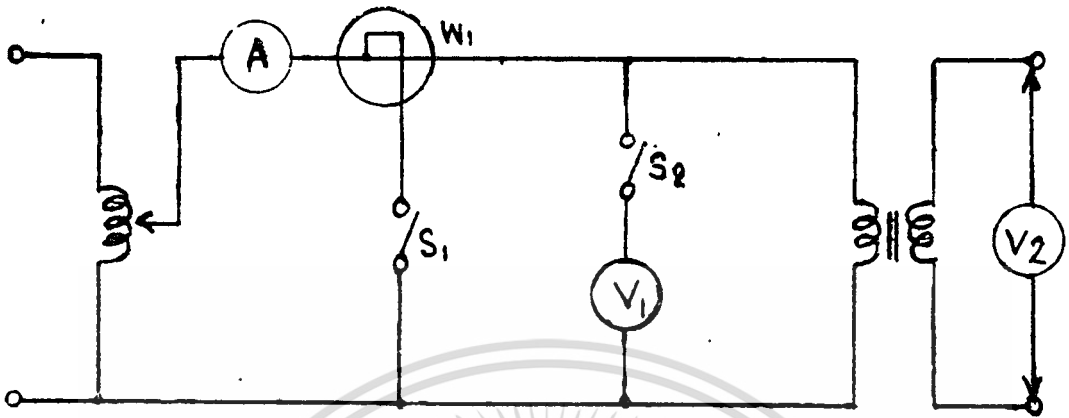
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีพิมพ์ลงนิตยสาร หรือสิ่งพิมพ์อื่นใดโดยมิได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำถาม - วิจารณ์มูลยของหม้อแปลงนี้ มีประโยชน์อย่างไร อธิบายและยกตัวอย่างรวมทั้งแสดงวิธีคำนวณด้วย (ถ้ามี)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่ทุติยภูมิเปิดวงจร



รูปที่ ผ2-1 วงจรการหาการสูญเสียกำลังในแกนเหล็ก

3. ลด variac V_1 ลงสู่ศูนย์ แล้ว off variac เอา variac ออกไป
4. start dc shunt motor โดยใส่ไฟเข้าไปที่ shunt field ก่อน แล้วค่อย ๆ ปรับ armature voltage จนความเร็วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากศูนย์จนทำให้เกิดคลื่นใน alternator ที่ต่อกันอยู่โดยตรงนั้นมีความถี่เป็น 50%, 75%, 100% และ 125% ของความถี่ปกตินั้นคือจะต้องปรับ field ของ alternator เพื่อให้ได้ voltage เป็น 50%, 75% 100% และ 125% ของแรงเคลื่อนที่พิกัดด้วย นำ output voltage ของ alternator นี้ใส่แทนที่ variac
5. บันทึกค่า A_1 , W_1 , V_2 ของแต่ละครั้งที่ทำการเปลี่ยนความถี่ของไฟที่จ่ายให้กับหม้อแปลงที่ 50%, 125% ของความถี่ปกติเช่นเดียวกับข้อ 2

1. Plot core loss curve ให้ watt loss (W_1) เป็นแกน Y และให้ voltage (V_1) เป็นแกน X เพื่อความถี่ 50 Hz
2. Plot exciting current curve โดยให้ A_1 เป็นแกน Y และ V_1 เป็นแกน X เพื่อความถี่ 50 Hz.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จงหา core loss และ exciting current จากกราฟในข้อ 1,2 ที่แรงเคลื่อนพิกัด

4. Plot P_{h+e}/f กับ f โดยให้ P_{h+e}/f อยู่ในแกน Y และ f บนแกน X โดยแยก loss ที่เกิดจาก hysteresis กับ eddy current ออกจากกัน

5. Plot hysteresis และ eddy current บนแผ่นเดียวกันกับข้อ 4. โดยให้ใช้มาตราส่วนเดียวกัน ให้ Watt loss เป็นแกน Y และความถี่เป็นแกน X โดยให้ Plot ตั้งแต่ frequency ตั้งแต่ 50%, 75%, 100% และ 125%

6. จงหา eddy current loss ที่พิกัดของแรงเคลื่อนและความถี่จากข้อ 5 และหาที่ค่าแรงเคลื่อนต่าง ๆ ตามแรงเคลื่อนในข้อ 1

7. จงหาค่าต่าง ๆ ของ hysteresis loss จากข้อ 1

8. Plot curve เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง hysteresis กับ eddy current loss โดยให้ loss ทั้งสองอยู่บนแกน Y และ V_1 อยู่บนแกน X (เพื่อความถี่ 50 Hz)

9. Plot curve ของ $\log P_h$ จาก data หรือข้อมูลที่ได้ในข้างบนเป็นแกน Y ส่วน $\log V$ ที่มีค่าใกล้เคียงกับ $\log E$ เป็นแกน X และจงหาค่า X

10. สรุปผลและวิจารณ์

ภาคผนวก 3

ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันในหม้อแปลง 3 เฟส

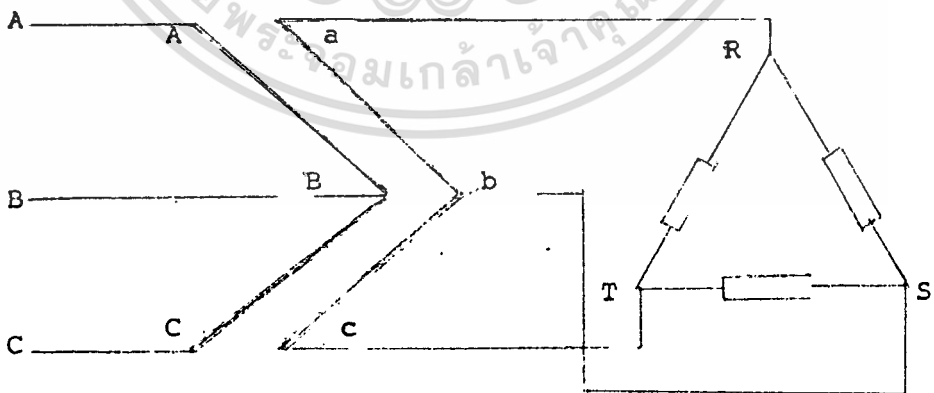
การทดลองที่ 1

วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันในหม้อแปลง 3 เฟส เมื่อเปรียบเทียบผลกับทฤษฎี

- อุปกรณ์
1. ชุดหม้อแปลง 1 เฟส 3 ลุก (เฟส A, เฟส B, เฟส C)
 2. AC voltage 500 V
 3. AC Ammeter 10 A
 4. โหลดความต้านทานขนาดเฟสละ 75 โอห์ม 3 ชุด (ใช้ตู้โหลดความต้านทานในห้องทดลองได้)
 5. Oscilloscope และ R ขนาด 0.1 โอห์ม 10 วัตต์ เพื่อใช้วัด waveform ของกระแส

ขั้นตอนการทดลอง

1. วงจรที่ควรทดลองคือ วงจรการต่อแบบวี ต่อดังรูปที่ ผ3-1 โดยใช้หม้อแปลงเฟส A และเฟส B



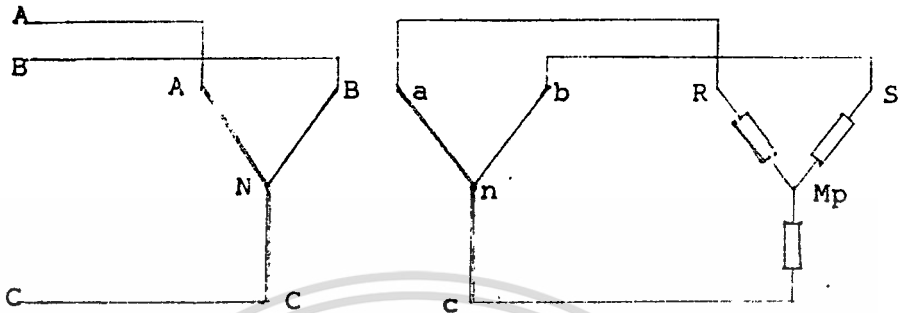
รูปที่ ผ3-1

2. วัดและบันทึกขนาดแรงดันไลน์ กระแสไลน์ กระแสเฟส ของทั้งด้าน primary, secondary และของโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใช้ Oscilloscope วัดและบันทึก waveform ของกระแสและแรงดัน โดยเปรียบเทียบเป็นคู่ๆ เช่น V_{AB} กับ V_{ba} , I_A กับ I_a และ I_{AB} กับ I_A

4. ต่อวงจร Y - Y ไม่ต่อนิวตรอลกับ source ตามรูปที่ ผ4-2



รูปที่ ผ3-2

5. วัดและบันทึกขนาดของกระแสและโวลต์เตจในทุกส่วนของวงจร

6. วัดและบันทึก waveform ในส่วนต่าง ๆ ของวงจรเปรียบเทียบกัน เช่น I_A

กับ I_{AB}

และ V_{AN} กับ V_{AB}

คำถามหลังการทดลอง

1. อธิบายปัจจัยที่มีผลทำให้ ผลการทดลองแตกต่างจากทฤษฎี

ภาคผนวก 4

Harmonic Phenomena

การทดลองที่ 1

เรื่อง ปรากฏการณ์ฮาร์โมนิก

วัตถุประสงค์ - เพื่อศึกษาลักษณะของฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง 3 เฟส รวมทั้งผลกระทบต่อการทำงานของหม้อแปลง

อุปกรณ์

1. ชุดหม้อแปลง 1 เฟส 3 ลูก
2. AC voltmeter
3. AC Ammeter
4. โหลดความต้านทาน 3 เฟส ขนาด 40 โอห์ม/เฟส
5. Oscilloscope และตัวต้านทานขนาด 0.1 โอห์ม 10 วัตต์ เพื่อใช้วัด waveform ของกระแส

แนวการทดลอง

วงจรที่จะทำการทดลองเพื่อศึกษาสภาพฮาร์โมนิก มี 3 วงจรคือ

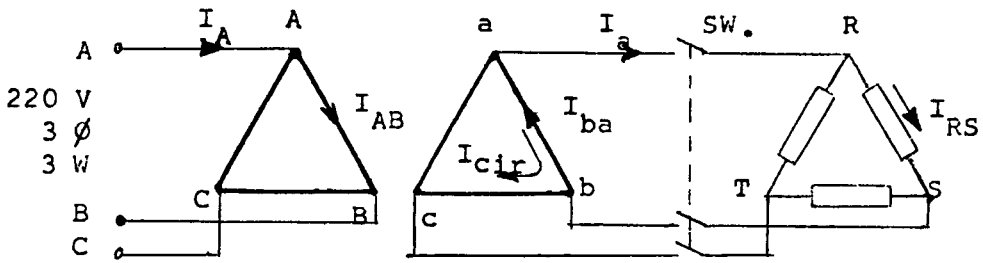
1. $\Delta - \Delta$
2. Y - Y Connected primary neutral to source neutral
3. Y - Y with isolated neutral

ในแต่ละวงจร จะศึกษาสภาพฮาร์โมนิกทั้งขณะ ไม่มีโหลดและขณะมีโหลด นอกจากนี้

ในวงจร Y-Y ทั้ง 2 กรณี จะทดลองใช้ tertiary winding ด้วย

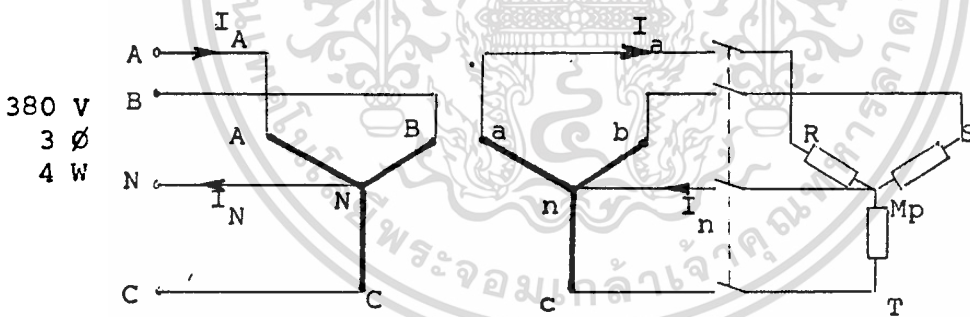
ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรหม้อแปลงเป็น $\Delta - \Delta$ และทางด้านทุติยภูมิ ต่อโหลดความต้านทาน 3 เฟส ผ่านสวิตช์ดังรูป ผ4-1



รูปที่ ๗4-1 ฮาร์โมนิคของวงจร Δ - Δ

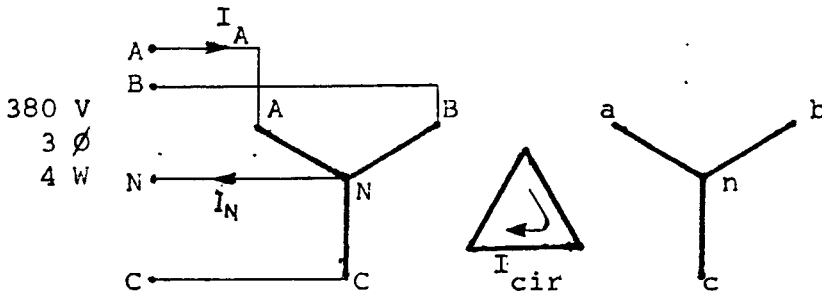
2. ขณะ No Load วัดค่า rms โดยใช้อิมิตอร์ และสังเกต waveform โดยใช้ oscilloscope วัด waveform ของ V_{AB} , I_A , I_{AB} , V_{ab} , I_{cir}
3. ต่อโหลดเข้ากับด้านทุติยภูมิ แล้ววัดค่า rms และสังเกต waveform ของ V_{AB} , I_A , I_{AB} , V_{ab} , I_{ba} , I_a , I_{RS}
4. เปลี่ยนวงจรหม้อแปลงเป็น Y - Y โดยต่อนิวตรอลของปฐมภูมิเข้ากับนิวตรอลของแหล่งจ่าย และเปลี่ยนวงจรโหลดเป็น Y ด้วยดังรูปที่ ๗4-2



รูปที่ ๗4-2 ฮาร์โมนิคของ Y-Y (connected N)

5. ขณะ No Load วัดค่า rms และสังเกต waveform ของ V_{AB} , V_{AN} , I_A , I_N , V_{ab} , V_{an}
6. ต่อโหลดเข้ากับด้านทุติยภูมิ แล้ววัด rms และสังเกต waveform ของ V_{AB} , V_{AN} , I_A , I_N , V_{ab} , V_{an} , I_a , I_n
7. แยกวงจรโหลด แล้วต่อชุด 14 รอบ ของหม้อแปลงทั้ง 3 เฟส ให้เป็น Δ ดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารลับที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ พ4-3 tertiary winding ของ Y-Y connected Neutral

8. โดยต่อโหลด ให้วัดค่า rms สังเกต waveform ของ I_A, I_N, I_{cir}
9. เปลี่ยนวงจรหม้อแปลงเป็น Y - Y isolated neutral primary-source ซึ่งจากรูปที่ พ4-2 ก็เพียงแต่เอาสายนิวตรอลทางปฐมภูมิออกเท่านั้น
10. ขณะ No Load วัดค่า rms และสังเกต waveform ของ $V_{AB}, V_{AN}, I_A, V_{ab}, V_{an}$
11. ต่อโหลดเข้ากับด้านทุติยภูมิ แล้ววัดค่า rms และสังเกต waveform ของ $V_{AB}, V_{AN}, I_A, V_{ab}, V_{an}, I_a, I_n$
12. แยกวงจรไหลดออกแล้วต่อชุด 14 รอบของหม้อแปลงทั้ง 3 เฟสให้เป็น Δ วงจรจะเหมือนรูปที่ พ4-3 ยกเว้นสายนิวตรอลทางปฐมภูมิที่ไม่มี
13. โดยไม่ต่อโหลด ให้วัดค่า rms และสังเกต waveform ของ $V_{AN}, I_A, V_{an}, I_{cir}$

คำถาม

1. จากการทดลอง ฮาร์โมนิคของหม้อแปลงมีผลต่อการจ่ายกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงหรือไม่ อย่างไร
2. การใช้ tertiary winding ต่อเป็น Δ มีผลต่อฮาร์โมนิคในขดลวดหลักอย่างไร และเพราะเหตุใด

ภาคผนวก 5

สภาวะไม่สมดุลของหม้อแปลง 3 เฟส

การทดลองที่ 1

เรื่อง สภาวะไม่สมดุลที่เกิดจาก power factor ของโหลด

วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อการทำงานของหม้อแปลง เมื่อโหลดในแต่ละเฟสมี power factor ต่างกัน

อุปกรณ์

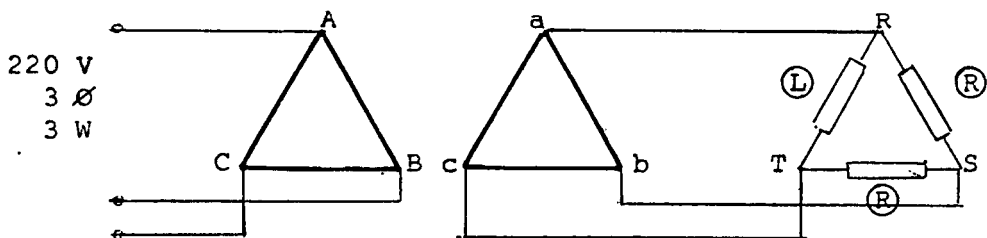
1. ชุดหม้อแปลง 1 เฟส 3 ลูก
2. AC voltmeter
3. AC Ammeter
4. โหลดความต้านทานขนาดเฟสละ = 75 Ω 2 ชุด
5. โหลด inductance ขนาด $X_L = 75 \Omega$ 1 ชุด
6. Oscilloscope และตัวต้านทานขนาด 0.1 โอห์ม 10 วัตต์ เพื่อใช้วัด waveform ของกระแสและโวลท์เตจ

หมายเหตุ

อุปกรณ์ในรายการที่ 4 และ 5 สามารถใช้ตู้โหลดที่มีอยู่ในห้องทดลองได้

ขั้นตอนการทดลอง

1. วงจรหม้อแปลงที่จะทดลองคือวงจร $\Delta - \Delta$, Y - Y connected N และ Y-Y isolated N
2. ทดลองวงจร $\Delta - \Delta$ ต่อกับวงจรดังรูปที่ ผ5-1



3. วัด line current, phase current ของด้านปฐมภูมิ ทติยภูมิ และโหลด
บันทึก
4. วัด line voltage ทุกส่วนเช่นเดียวกัน

เสนอแนะ ในการบันทึก เพื่อให้่ง่ายต่อการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ และเพื่อให้สามารถใช้ได้ใน
ทุกกรณี อาจทำตารางบันทึกผลดังรูปที่ ผ5-2

	V-Line			V-Phase			I-Line				I-Phase		
PHASE	AB ab RS	BC bc ST	CA ca TR	AN an Rmp	BN bn Smp	CN cn Tmp	A a R	B b S	C c T	N n M _p	AB ba RS	BC cb ST	CA ac TR
PRI.													
SEC.													
LOAD													

รูปที่ ผ5-2 ตารางสำหรับบันทึกผลการทดลอง

5. ใช้ oscilloscope จับ wave form ของกระแสและ voltage ต่อไปนี้โดย
จับทีละตัว แล้ววาดลงกระดาษกราฟ แล้วจึงจับตัวต่อไป ทั้งนี้ห้ามเลื่อนปุ่มจัดภาพแนวนอนโดย
เด็ดขาด เพราะจะทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบมุม lead-lag กันได้

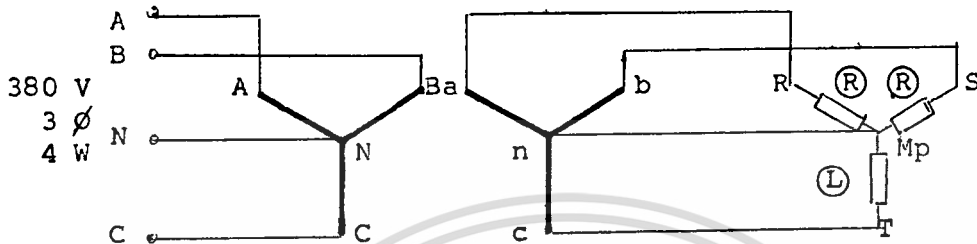
$$V_{ab}, I_{ba}, I_{RS}$$

$$V_{bc}, I_{cb}, I_{ST}$$

$$V_{ca}, I_{ac}, I_{TR}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ต่อวงจร Y - Y connected N ดังรูป ผ5-3



รูปที่ ผ5-3 วงจรทดลอง Y-Y Load R-R-L

ผ5-2

7. วัดและบันทึกกระแสและโวลต์เตจทุกส่วนของวงจร โดยบันทึกตารางในรูปที่

8. วัดและบันทึก waveform ต่อไปนี้ ศึกษากันเป็นกลุ่ม

- V_{an}, I_a
- V_{bn}, I_b
- V_{cn}, I_c, I_n

9. แยกจุดนิวตรอลของ Primary - Source แล้วย้อนกลับไปทำการทดลองในข้อ 7 และ 8 อีกครั้ง

คำถาม

1. จงอธิบายสภาวะไม่สมดุลที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณี ว่าเหตุใดการที่ power factor ในแต่ละเฟสไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดการไม่สมดุลขึ้นได้

การทดลองที่ 2

เรื่อง สภาวะไม่สมดุลที่เกิดจากอัตราส่วนรอบไม่เท่ากัน

วัตถุประสงค์ - เพื่อศึกษาผลกระทบจากการที่อัตราส่วนรวมของหม้อแปลง 1 เฟส ที่นำมาต่อกันเป็นวงจร 3 เฟส มีค่าไม่เท่ากัน

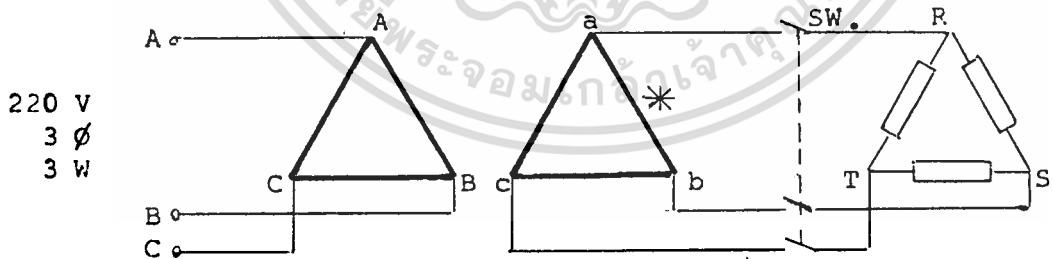
อุปกรณ์

1. ชุดหม้อแปลง 1 เฟส 3 ลูก
2. AC Voltmeter
3. AC Ammeter
4. โหลดความต้านทาน 3 เฟส ขนาด 75 Ω ต่อเฟส

วงจรที่จะทดลองคือ $\Delta - \Delta$, $\Delta - Y$, $Y - \Delta$

ขั้นตอนการทดลอง

1. เปลี่ยนอัตราส่วนรอบของหม้อแปลงเฟส A โดยเพิ่มขด 7 รอบเข้าไปทางทุติยภูมิ ส่วนเฟส B และ C ใช้ขด 95 + 47 คงเดิม
2. ต่อดังรูปที่ ผ5-4



รูปที่ ผ5-4 วงจร $\Delta - \Delta$ unequal turn ratio

3. ทดลองขณะไม่มีโหลด โดยจ่ายไฟเข้าทางปฐมภูมิของหม้อแปลงและ off สวิตซ์ CB ไว้ก่อน วัดค่ากระแสและโวลท์เตจ ทุกส่วนของวงจร

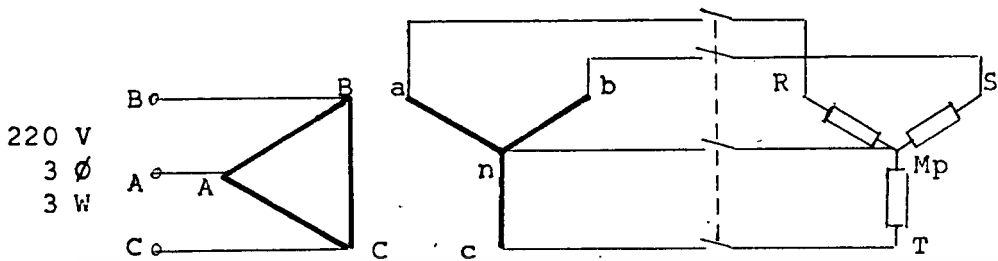
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเพื่อความสะดวกในการบันทึกและเปรียบเทียบข้อมูลเท่านั้น อาจใช้ตารางดังรูปการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ5-5 ซึ่งใช้ได้ทุกวงจรที่ทดลองในการทดลองที่ 2 นี้

PHASE	V-LINE			V-PHASE			I-LINE				I-PHASE		
	AB ab RS	BC bc ST	CA ca TR	AN an Rmp	BN bn Smp	CN cn Tmp	A a R	B b S	C c T	N n Mp	AB ba RS	BC cb ST	CA ac TR
NO LOAD													
PRI.													
SEC.													
ON LOAD													
PRI													
SEC													
LOAD													

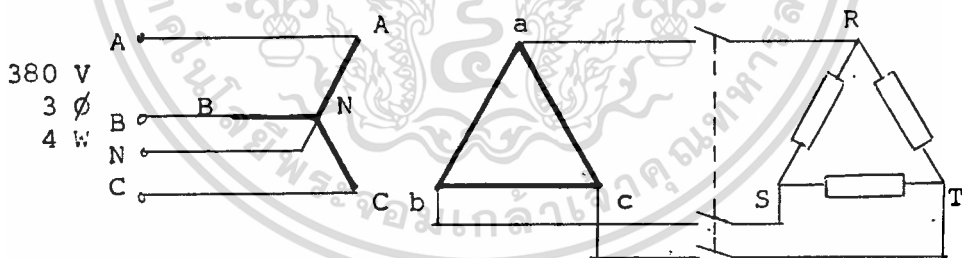
รูปที่ ผ5-5 ตารางบันทึกผลการทดลองสำหรับการทดลองที่ 2

4. ทดลองขณะมีโหลด โดยเปิดสวิตช์ CB แล้ววัดกระแส และโวลต์เตจทุกส่วนของวงจร เช่นเดียวกัน
5. เปลี่ยนวงจรหม้อแปลงเป็น $\Delta - Y$ ดังรูปที่ ผ5-6 แล้วทำการทดลองในข้อ 3 และ 4 ซ้ำ



รูปที่ พ5-6 วงจร Δ -Y Unequal turn ratio

6. เปลี่ยนวงจรหม้อแปลงเป็น Y - Δ ดังรูปที่ พ5-7 แล้วทำการทดลองในข้อ 3 และ 4 ซ้ำอีกครั้ง



รูปที่ พ5-7 วงจร Y - Δ unequal turn ratio

คำถาม

1. ทำไมการต่อวงจรทั้ง 3 แบบ จึงให้ผลของกระแสไหลวนต่างกัน
2. ถ้าจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงที่มีอัตราส่วนรอบไม่เท่ากัน ควรทำอย่างไรเพื่อให้ผลเสียหายน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 3

เรื่อง สภาวะ ไม่สมดุลที่เกิดจากอิมพีแดนซ์สมมูลย์ไม่เท่ากัน

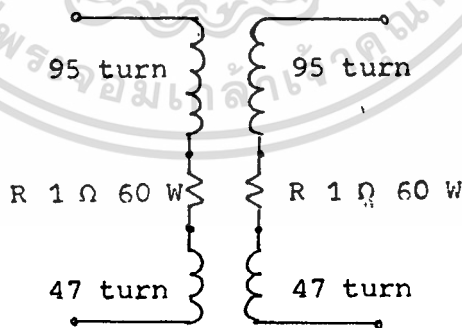
วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลกระทบจากการที่อิมพีแดนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลง 1 เฟส แต่ละตัว ที่นำมาต่อเป็นวงจร 3 เฟส มีค่าไม่เท่ากัน

- อุปกรณ์
1. ความต้านทานขนาดประมาณ 1 โอห์ม 60 วัตต์ 4 ชุด
 2. AC Voltmeter
 3. AC Ammeter
 4. ชุดหม้อแปลง 1 เฟส 3 ลูก
 5. โหลดความต้านทาน 3 เฟส ขนาด 40 โอห์มต่อเฟส

วงจรที่ทดลองคือ $\Delta - \Delta, \Delta - Y, Y - \Delta$

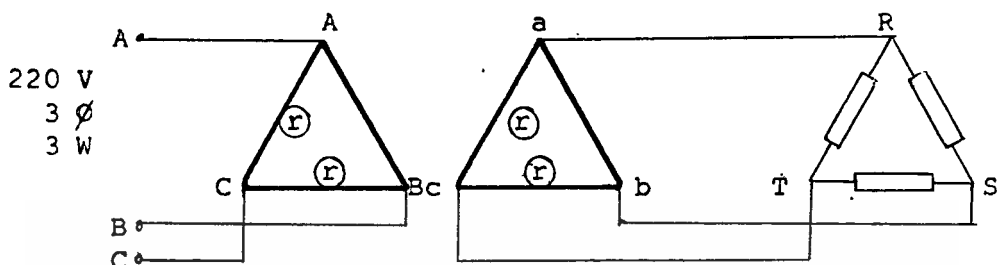
ขั้นตอนการทดลอง

1. ในที่นี้จะเพิ่มอิมพีแดนซ์สมมูลย์ให้กับหม้อแปลง 2 ตัว และให้อีก 1 ตัว มีอิมพีแดนซ์สมมูลย์เท่าเดิม ดังนั้นให้ต่อความต้านทาน 1 โอห์ม 60 วัตต์ อนุกรมเข้าไปกับขดลวด 95 รอบ และ 47 รอบ ทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของเฟส B และ C ดังรูป ผ5-8



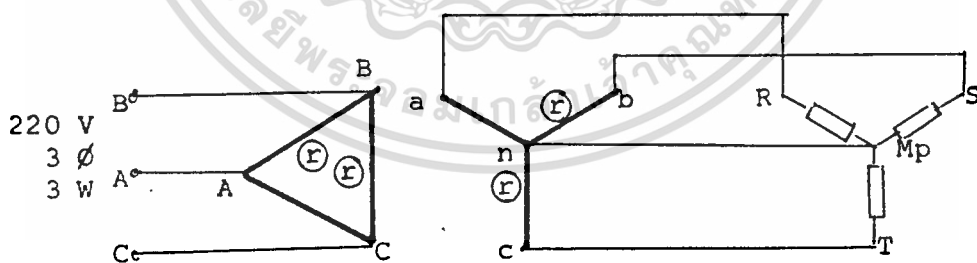
รูปที่ ผ5-8 การเพิ่มอิมพีแดนซ์สมมูลย์ให้กับหม้อแปลง

2. ต่อวงจรหม้อแปลงเป็น $\Delta - \Delta$ และต่อเข้ากับ load ดังรูปที่ ผ5-9



รูปที่ ๗5-9 วงจร $\Delta - \Delta$ unequal Z_{ϕ}

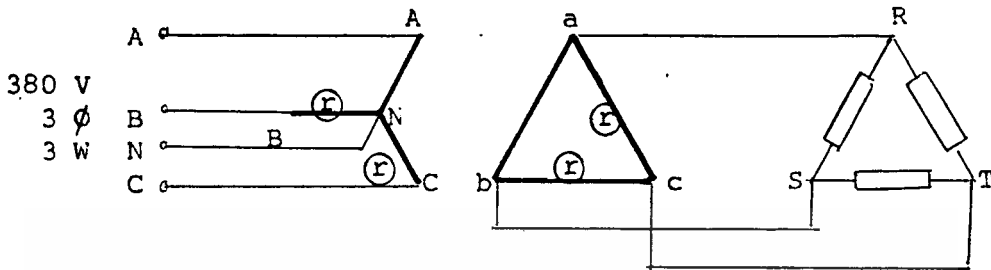
3. จ่ายไฟให้ด้านปฐมภูมิ และวัดค่ากระแสและโวลท์ตรงทุกส่วนของวงจร (ใช้ตารางในรูปที่ ๗5-2 ก็ได้)
4. ต่ วงจรหม้อแปลงเป็น $\Delta - Y$ และต่อเข้ากับโพลด ดังรูปที่ ๗5-10 แล้วทำการทดลองข้อ 3



รูปที่ ๗5-10 วงจร $\Delta - Y$ unequal Z_{ϕ}

5. ต่ วงจรหม้อแปลงเป็น Y- Δ connected neutral primary-source ดังรูปที่ ๗5-11 แล้วทำตามข้อ 3 อีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๗5-11 วงจร Y-Δ unequal Z_{eq}

คำถาม

- เหตุใด ทั้ง ๆ ที่หม้อแปลงมีความแตกต่างกันที่มีนิ้เตนซ์สมมูลย์ ในทุกวงจรที่ทำการทดลอง แต่ผลการทดลองของบางวงจรกลับไม่เป็นไปในลักษณะเดียวกัน
- หากจำเป็นต้องนำหม้อแปลง 1 เฟส 3 ตัว ที่มีนิ้เตนซ์สมมูลย์ต่างกันมาก มาต่อเป็นวงจร 3 เฟสเพื่อให้ใช้งาน จะมีวิธีหลีกเลี่ยงสภาวะไม่สมดุลได้หรือไม่อย่างไร ให้เหตุผลประกอบอย่างละเอียด

การทดลองที่ 4

เรื่อง สภาวะไม่สมดุลของระบบที่เกิดจากโหลดไม่สมดุล

วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลกระทบจากการที่วงจรหม้อแปลง 3 เฟส มีโหลดไม่สมดุล

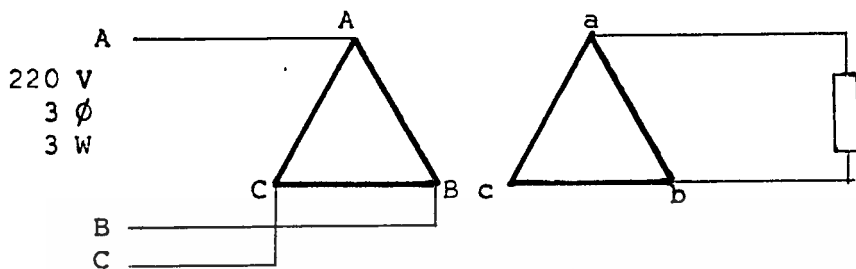
- อุปกรณ์
1. ชุดหม้อแปลง 1 เฟส 3 ลูก
 2. AC voltmeter
 3. AC Ammeter
 4. โหลดความต้านทาน 1 เฟส ขนาดประมาณ 40 โอห์ม

แนวการทดลอง

1. ตารางที่ใช้บันทึกผลเป็นดังรูปที่ ผ5-2
2. เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบ จะต่อ โหลดเข้าที่เฟส A เสมอ
3. วงจรที่จะทดลองคือ
 - $\Delta - \Delta$
 - Y - Y connected N ต่อ โหลดระหว่าง line กับ neutral
 - Y - Y connected N " " line กับ line
 - Y - Y isolated N " " line กับ neutral
 - Y - Y isolated N " " line กับ line

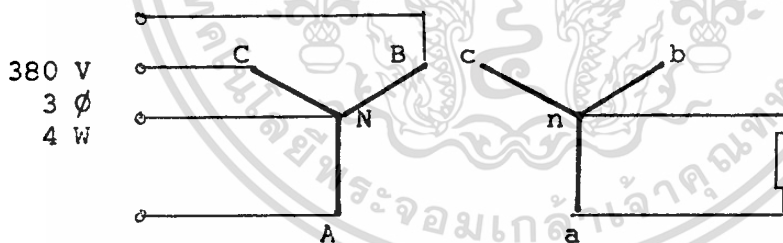
ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจร $\Delta - \Delta$ และต่อโหลด 1 เฟส ดังรูปที่ ผ5-12 จ่ายไฟเข้าทางปฐมภูมิและวัดค่ากระแสและ โวลต์ เตจของทุกส่วน



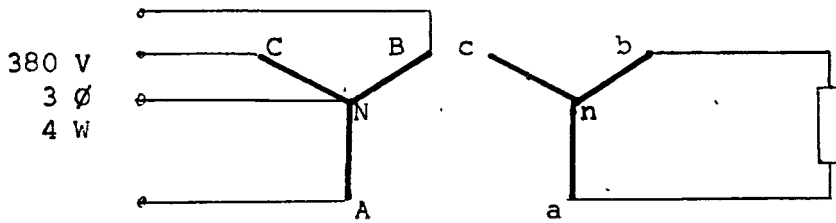
รูปที่ ผ5-12 วงจร $\Delta - \Delta$ unbalanced load

2. ต่อหม้อแปลงแบบ Y - Y connected N โดยต่อโหลดที่ขั้ว a-n ดังรูปที่ ผ5-13 จ่ายไฟเข้าทางปฐมภูมิ แล้ววัดกระแสและ voltage ทุกส่วนของวงจร



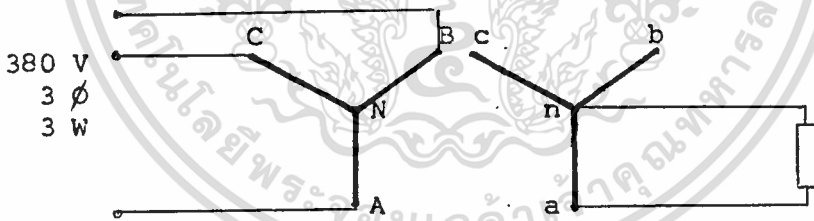
รูปที่ ผ5-13 วงจร Y - Y connected N, Load a-n

3. เปลี่ยนตำแหน่งที่ต่อ โหลดไปเป็น a-b ดังรูปที่ ผ5-14 จ่ายไฟ วัดกระแส และโวลต์เตจทุกส่วนของวงจร



รูปที่ ๕5-14 วงจร Y-Y connected N, Load a-b

4. แยกจุดนิวตรอลทางปฐมภูมิออกจากแหล่งจ่าย ดังรูป ๕5-15 ต่อโหลดที่ชั่ว a-n จ่ายไฟแล้ววัดกระแสและโวลต์เตจเช่นเดิม



รูปที่ ๕5-15 วงจร Y - Y isolated N, load a-n

5. จากข้อ 4 เปลี่ยนตำแหน่งต่อโหลดไปเป็นที่ a-b แล้วทำเช่นเดิม

คำถาม

1. จงเปรียบเทียบการไหลของกระแสจริงในเฟสและ line ต่าง ๆ กับทฤษฎี (อ่านได้จากบทที่ 7)
2. จงอธิบายถึงสภาวะที่เกิดขึ้นในกรณีวงจร Y-Y isolated N ที่ต่อไหลระหว่าง line กับ neutral ว่าทำไมจึงเป็นเช่นนั้น
3. ถ้าหากต้องต่อหม้อแปลง 1 เฟส 3 ตัว เป็นวงจร 3 เฟส เพื่อใช้กับโหลดที่ไม่สมดุลอย่างมาก ควรจะทำการอย่างไรเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพดีที่สุด



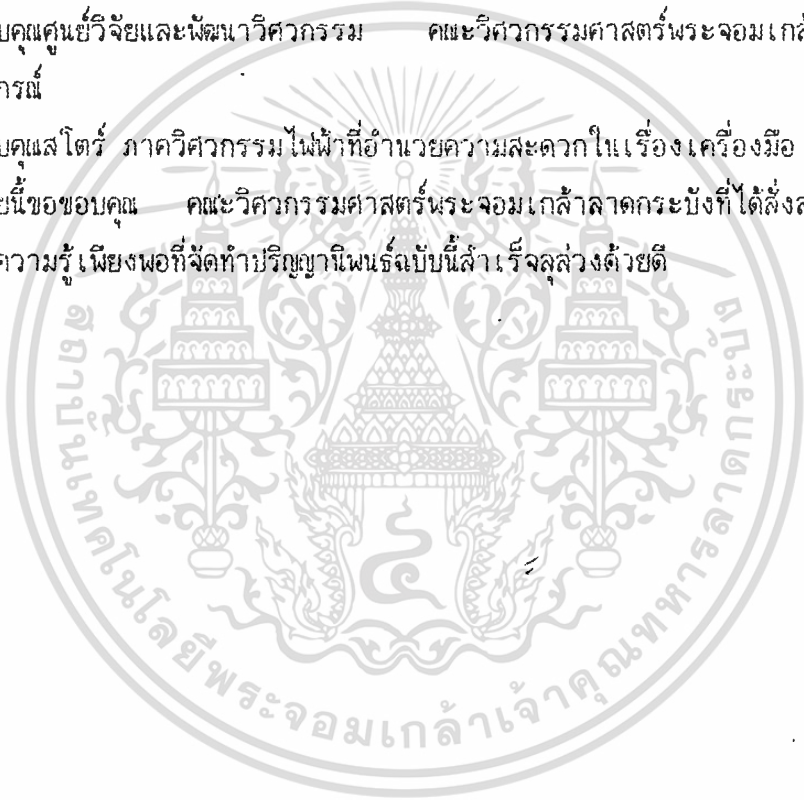
กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้จัดรู้ลึกซึ้งและขอบคุณอย่างสูงต่ออาจารย์ ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้กำลังใจ ความรู้ และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ เป็นแนวทางในการทำโครงการมาโดยตลอด จนกระทั่งปริญาเอนทร์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์พระจอมเกล้าลาดกระบังที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์

ขอขอบคุณแอสโตร ภาควิศวกรรมไฟฟ้าที่อำนวยความสะดวกในเรื่องเครื่องมือ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์พระจอมเกล้าลาดกระบังที่ได้ส่งมอบ
รมจนทำให้ผู้จัดทำมีความรู้เพียงพอที่จัดทำปริญาเอนทร์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี





เอกสารอ้างอิง

1) สัมพันธ์ หาญทะเล , " เครื่องกลไฟฟ้า 1 " , ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2528

2) ชูศักดิ์ สระบัว " ทรานส์ฟอร์มเมอร์ เทสต์ เซต " ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตร์
บัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการ
ศึกษา 2525-2526

3) ไสว ฐานิพานิชสกุล, "หม้อแปลง", หจก.พินิจ ทับบลิซซิ่ง กรุงเทพฯ, 2525

4) B.L. RAWAT, TRANSFORMER, MC GRAW-HILL COMPANY LIMITED

NEW DELHI

4) STAFF MIT , MAGNETIC CIRCUITS AND TRANSFORMER, 15 th PRINTING
MIT PRESS , MASSACHUSETTS , 1965