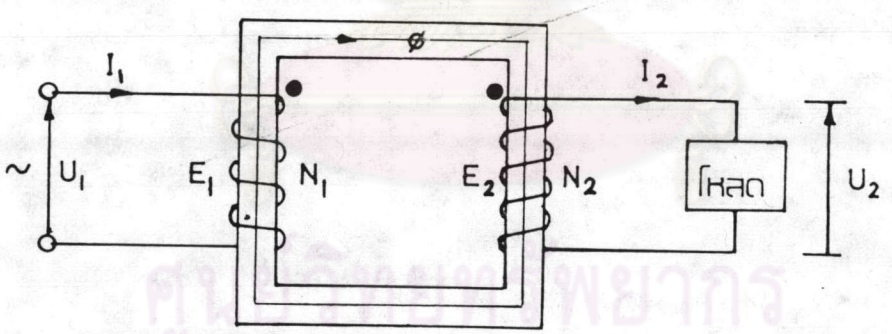
บทที่ 2

ทฤษฎีของหม้อแปลงทดสอบ

2.1 หลักการทำงานและวงจรสมมูลของหม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบ โดยทั่วไปจะเป็นเฟสเดียวและมีความถี่ต่ำ ดังนั้นหลักการทำงานและโครงสร้างต่าง ๆ จึงคล้ายคลึงกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไป แตกต่างกันตรงที่ความหนาแน่นของเส้นสนามแม่เหล็กที่ใช้มีค่าต่ำกว่า เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดฮาร์โมนิกในแรงดัน ขนาดจะเล็กห่อหุ้มมิดชิด การฉนวนทางด้านแรงดันสูงจะต้องดีมาก

หม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบด้วยขดลวดอย่างน้อย 2 ชุด พันอยู่บนแกนเหล็ก ชุดหนึ่งป้อนกำลังไฟฟ้าเข้า อีกชุดหนึ่งสำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้าออก ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า 2 ขดลวด

ø = เส้นสนามแม่เหล็ก

U_1 = แรงดันป้อนเข้า U_2 = แรงดันจ่ายออก

I_1 = กระแสป้อนเข้า I_2 = กระแสจ่ายออก

E_1 = แรงดันเหนี่ยวนำป้อนเข้า E_2 = แรงดันเหนี่ยวนำจ่ายออก

N_1 = จำนวนรอบขดลวดด้านป้อนกำลังไฟฟ้าเข้า

N_2 = จำนวนรอบขดลวดด้านจ่ายกำลังไฟฟ้าออก

เมื่อป้อนแรงดันเข้าทางด้านขดลวดป้อนกำลังเข้า ทำให้เกิดเส้นสนามแม่เหล็กมีรูปคลื่นเป็นซายน์

$$\phi = \phi_m \cos wt$$

จะได้ แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น มีค่าดังนี้ [6]

$$e_1 = -N_1 \, d\phi/dt$$

$$e_1 = N_1 w \phi_m \sin wt$$

และได้ค่าแรงดันเหนี่ยวนำยังผลเป็น

$$E_1 = 4.44 f N_1 \phi_m$$

$$= 4.44 f N_1 B_m A$$

เมื่อ $w = 2\pi f$

f เป็นความถี่ของคลื่นแรงดัน

ϕ_m เป็นค่าสูงสุดของเส้นสนามแม่เหล็ก $= B_m A$

B_m เป็นความหนาแน่นสูงสุดของเส้นสนามแม่เหล็ก

A เป็นพื้นที่ภาคตัดของแกนเหล็ก

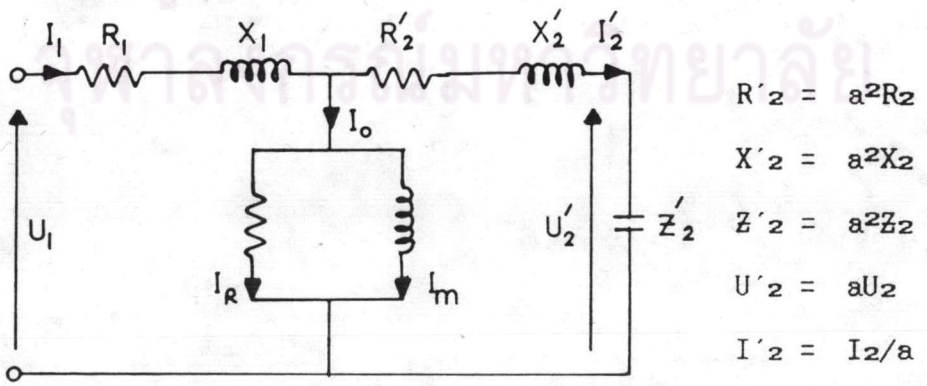
เส้นสนามแม่เหล็กอันเดียวกันนี้ เหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันในขดลวดชุดที่ 2 มีค่ายังผลดังนี้

$$E_2 = 4.44 f N_2 \phi_m$$

จะได้อัตราส่วนแรงดันเหนี่ยวนำตามอัตราส่วนของจำนวนขดลวดทั้งสองด้าน คือ

$$E_1/E_2 = N_1/N_2 = a$$

วงจรสมมูลของหม้อแปลง เมื่อคิดเทียบทางด้านป้อนเข้าจะมีวงจรดังรูปที่ 2.2



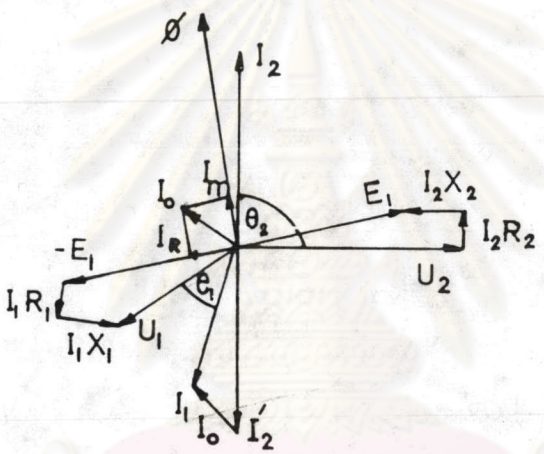
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงคิดเทียบทางด้านป้อนเข้า

I_o คือ กระแสป้อนเข้าขณะที่ไม่มีโหลด

I_m คือ กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก

I_R คือ กระแสสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็ก

โหลดของหม้อแปลงทดสอบ จะเป็นชนิดคะแปซิตีฟ ดังนั้นสามารถเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมขณะมีโหลดได้ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงทดสอบมีโหลดเป็นคะแปซิตีฟโหลด

$\cos\theta_1$ = เพาเวอร์แฟกเตอร์ของโหลดด้านป้อนกำลังไฟฟ้าเข้า

$\cos\theta_2$ = เพาเวอร์แฟกเตอร์ของโหลดด้านจ่ายกำลังไฟฟ้าออก

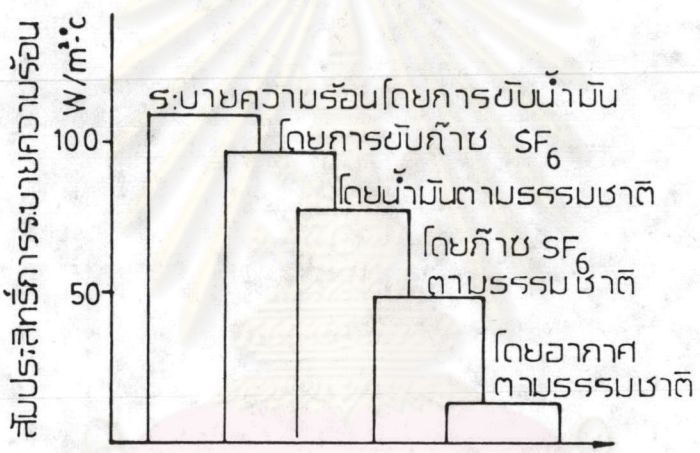
2.2 การฉนวนและโครงสร้างของหม้อแปลงทดสอบ

การฉนวนในหม้อแปลงทดสอบ ทำได้หลายวิธีด้วยกัน คือ ฉนวนแห้งใช้สารสังเคราะห์ เช่น อีพอกซี หล่อหุ้มขดลวดไว้ ใช้อากาศเป็นตัวระบายความร้อน มีความแข็งทางกลและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง ข้อเสียตรงที่ราคาแพง และการระบายความร้อนได้น้อยกว่าฉนวนก๊าซและฉนวนเหลว

- ฉนวนก๊าซ ปัจจุบันที่ใช้กันอยู่คือ ก๊าซ SF_6 ซึ่งเป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่มีพิษ ไม่ติดไฟและไม่ช่วยให้ไฟติด เป็นก๊าซเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่น เป็นก๊าซที่มีความคงทน

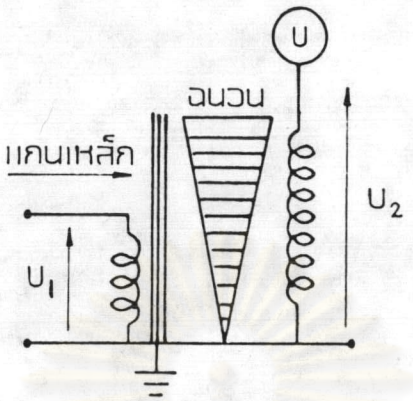
ต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูงกว่าก๊าซอื่น ๆ เช่น N_2, CO_2 ที่ความดันเท่ากัน แรงดันเบรกดาวน์มีค่าสูงกว่าอากาศ 2-3 เท่า และค่าแรงดันเบรกดาวน์จะสูงขึ้นตามความดัน มีข้อเสียตรงที่การระบายความร้อนได้น้อยกว่าฉนวนเหลว และรั่วซึมได้ง่ายกว่า

- ฉนวนเหลว ฉนวนเหลวที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด คือ น้ำมันหม้อแปลงมีคุณสมบัติระบายความร้อนได้ดี (ดูการเปรียบเทียบการระบายความร้อนของเหลวและก๊าซในรูปที่ 2.4) จุดวาบไฟสูง มีความหนืดต่ำ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง เมื่อมีการกรองให้สะอาด



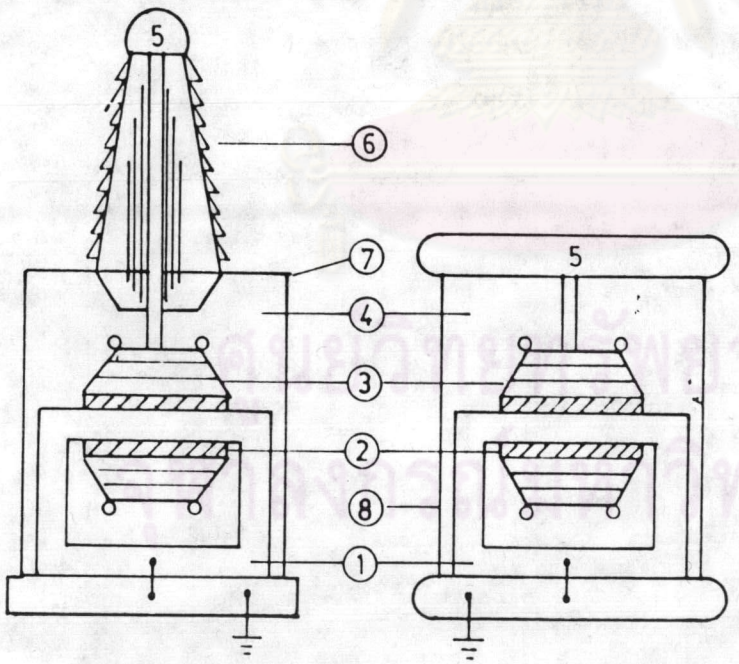
รูปที่ 2.4 สัมประสิทธิ์การระบายความร้อนของฉนวนต่าง ๆ [7]

หม้อแปลงทดสอบเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง การฉนวนถือเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง แรงดันที่ไม่เกิน 100 kV การฉนวนอาจเป็นแบบเทหุ้มขดลวดและแกนเหล็กด้วยสารสังเคราะห์ เช่น อีพอกซี ส่วนหม้อแปลงที่มีแรงดันสูงกว่านี้ การฉนวนของขดลวดจะเป็นแบบกระดาษ และใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนแทรกซึมระบายความร้อน ตามมาตรฐาน IEC [8] กำหนดให้อุณหภูมิมีค่าสูงสุดต่อเนื่องกันไม่เกิน 105 °C (class A) โดยทั่วไปแกนเหล็กจะต่อกับฝาโลหะด้านล่างของตัวถัง ฉะนั้นขดลวดแรงดันต่ำจะพันติดแกนเหล็ก ส่วนขดลวดแรงดันสูงพันทับขดลวดแรงดันต่ำ ขดลวดรอบที่มีแรงดันสูงจะอยู่ห่างจากแกนเหล็กหรือส่วนที่ต่อลงดินมากขึ้น นั่นคือการฉนวนในชั้นแรงดันสูงจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การฉนวนในหม้อแปลงทดสอบที่แกนเหล็กต่อลงดิน

โครงสร้างภายในของหม้อแปลงทดสอบได้แก่ ขดลวด แกนเหล็ก และการฉนวน จะจุ่มอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงบรรจุในถัง ซึ่งอาจเป็นถังโลหะหรือถังฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



1. แกนเหล็ก
2. ขดลวดแรงดันต่ำ
3. ขดลวดแรงดันสูง
4. น้ำมันหม้อแปลง
5. ปลายขั้วแรงดันสูง
6. ปลอกฉนวนนำสาย
7. ถังโลหะ
8. ถังฉนวน

ก. ถังโลหะ ข. ถังฉนวน

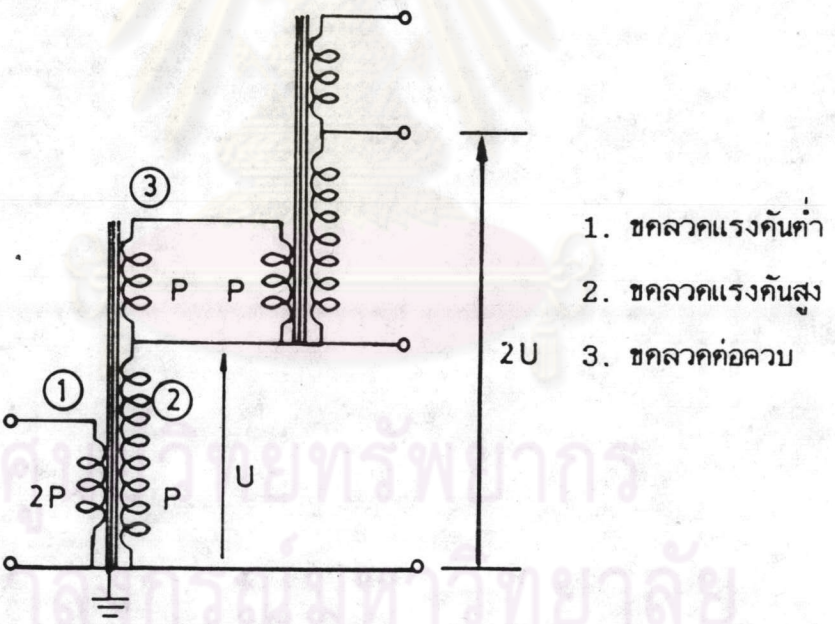
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของหม้อแปลงทดสอบแกนเหล็กต่อลงดินแบบจุ่มน้ำมัน

ขดลวดแรงดันต่ำและแรงดันสูงจะเป็นแบบทรงกระบอกแกนร่วม เพื่อลดฟลั๊กแม่เหล็กกระจาย (magnetic stray flux) เพิ่มการคัปปลิ้งระหว่างขดลวดทั้งสอง และเพิ่มค่าคะแปซิแตนซ์อนุกรมของ

ขดลวด การจัดวางลำดับชั้นของขดลวดแรงดันสูง จะลดความกว้างของชั้นลง เมื่อห่างจากแกนเหล็กมากขึ้น เพื่อให้คะแปซิแตนซ์ระหว่างชั้นมีค่าเท่ากัน จะทำให้แรงดันกระจายมีค่าคงที่ เมื่อเกิดแรงดันทรานเซี้ยนต์ [6]

2.3 การต่อชั้นบันได

กรณีที่ต้องการแรงดันสูง มักจะใช้หม้อแปลงต่อชั้นบันได แต่หม้อแปลงที่จะต่อชั้นบันไดต้องมีขดลวด 3 ชุดด้วยกัน คือ ชุดขดลวดแรงดันต่ำ ชุดขดลวดแรงดันสูงและชุดขดลวดต่อควบ ชุดขดลวดต่อควบนี้ จะทำหน้าที่ป้อนแรงดันให้กับขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงตัวถัดไป ในรูปที่ 2.7 แสดงการต่อแบบชั้นบันได 2 ชั้น ขดลวดต่อควบจะมีขนาดเท่ากับขดลวดแรงดันต่ำ



รูปที่ 2.7 การต่อหม้อแปลงแบบชั้นบันได 2 ชั้น

การต่อชั้นบันได หม้อแปลงทดสอบตัวล่างสุด จะต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงตัวถัดไปด้วย ฉะนั้นการออกแบบหม้อแปลงทดสอบต่อชั้นบันได จะต้องคำนึงถึงกำลังไฟฟ้าหม้อแปลงตัวล่างด้วย

ข้อดีของการต่อแบบชั้นบันได คือ

- การฉนวนของหม้อแปลงทดสอบแต่ละตัวจะประหยัดกว่า
- หม้อแปลงแต่ละตัว จะมีขนาดเล็กลงสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก
- ถ้ามีหม้อแปลง 3 ตัว เหมือนกันสามารถต่อแบบ 3 เฟสได้

ข้อเสียของการต่อแบบขั้นบันได คือ

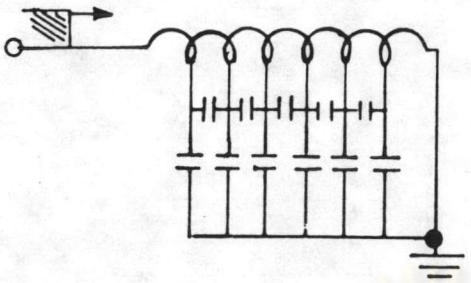
- การสูญเสียเนื่องจากฟลั๊กกระจายสูง
- ค่าแรงดันลัดวงจร ซึ่งเป็นผลรวมของแต่ละตัวจะมีค่าสูงขึ้น

2.4 พฤติกรรมของหม้อแปลงทดสอบต่อแรงดันยุบตัวและแรงดันอิมพัลส์

ในสภาวะคงตัว แรงดันกระจายบนขดลวด จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของขดลวด แต่ในสภาวะทรานเซี้ยนต์หรือแรงดันเสิร์จ แรงดันกระจายบนขดลวดจะไม่สม่ำเสมอตลอดแนวความยาวของขดลวด [9] กรณีของหม้อแปลงทดสอบปกติจะไม่มีโอกาสได้รับแรงดันอิมพัลส์จากคลื่นจรฟ้าผ่าหรือจากแรงดันเสิร์จสวิตชิง แต่อาจเกิดในกรณีทดสอบแรงดันผสมระหว่างแรงดันกระแสสลับซ้อนด้วยแรงดันอิมพัลส์ หรือการทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ ดังนั้นหม้อแปลงทดสอบ จะจัดวางขดลวดในลักษณะเป็นชั้นทรงกระบอก และมีแผ่นทองแดงชีลด์ที่ปลายขั้วทั้งสองของขดลวดแรงดันสูง เพื่อให้แรงดันกระจายตลอดความยาวขดลวดสม่ำเสมอขึ้น

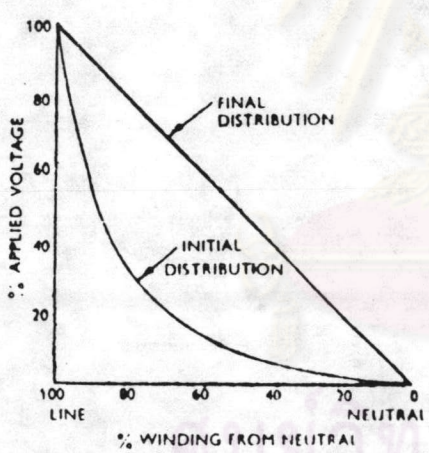
2.4.1 แรงดันกระจายในขดลวดแรงดันสูงของหม้อแปลงในสภาวะทรานเซี้ยนต์

วงจรสมมูลของหม้อแปลงสภาวะทรานเซี้ยนต์ประกอบด้วยตัวคะแปซิเตอร์และอินดักเตอร์ ดังรูปที่ 2.8 [9] ขณะที่คลื่นอิมพัลส์วิ่งเข้าสู่หม้อแปลง ส่วนที่เป็นคะแปซิเตอร์จะเป็นตัวคอบสนองต่อหน้าคลื่นเป็นอันดับแรก เรียกว่าแรงดันกระจายเริ่มต้น (initial distribution) ดังในรูปที่ 2.9 (a) การกระจายเริ่มต้นไม่สม่ำเสมอและจะมีการแกว่งของแรงดันตลอดช่วงความยาวขดลวด จนถึงภาวะสุดท้าย แรงดันกระจายจะสม่ำเสมอ เรียกว่าแรงดันกระจายสุดท้าย (final distribution) พฤติกรรมการคอบสนองของขดลวดต่อแรงดันอิมพัลส์ในช่วง



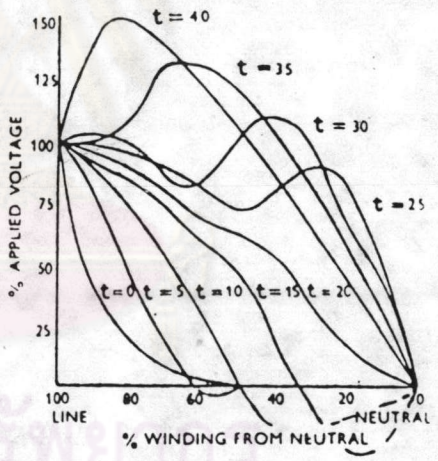
รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลของหม้อแปลง
ในสภาวะทรานเซี้ยนต์

เวลาเกิดทรานเซี้ยนต์ที่เวลาต่าง ๆ กัน แสดงให้เห็นดังในรูปที่ 2.9 (b) คอนเริ่มต้นรับแรงดันขดลวดทางด้านปลายแรงดันสูงจะมีความเครียดไฟฟ้าสูงมาก ในเวลาถัดมาความเครียดสูงจะเกิดที่บริเวณนิวตรัล ดังนั้นการฉนวนตรงปลายขดลวดจะต้องทำให้ดีเป็นพิเศษ



% ขดลวดจากนิวตรัล

a) แรงดันกระจายเริ่มต้นและสุดท้าย

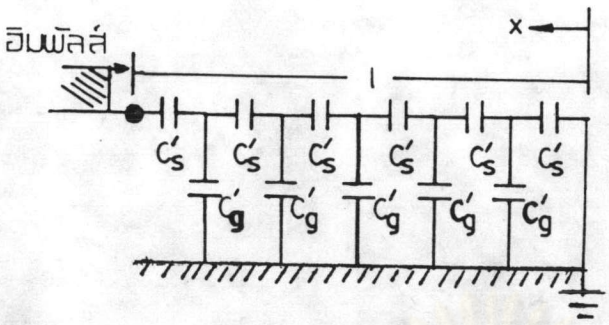


% ขดลวดจากนิวตรัล

b) แรงดันกระจายที่เวลาต่าง ๆ กัน

รูปที่ 2.9 การตอบสนองต่อแรงดันทรานเซี้ยนต์ของขดลวดหม้อแปลง [10]

การวิเคราะห์ผลของแรงดันอิมพัลส์ต่อขดลวดหม้อแปลงทดสอบพิจารณาได้ดังนี้ ให้ขดลวดที่พันมีความยาว 1 คะแปซิแตนซ์ระหว่างขดลวดกับดิน (แกนเหล็ก) ต่อหนึ่งหน่วยความยาวเท่ากับ C'_g คะแปซิแตนซ์ระหว่างขดลวดต่อหน่วยความยาวเท่ากับ C'_s ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจรคะแปซิแตนซ์สมมูลของขดลวด

ค่าคะแปซิแตนซ์ต่อลงดินจะขนานกันตลอดความยาวของขดลวด ฉะนั้นคะแปซิแตนซ์ระหว่างขดลวดกับดินมีค่าดังนี้

$$C_g = C'_g.l$$

ส่วนคะแปซิแตนซ์ระหว่างขดลวดจะต่ออนุกรมจากปลายข้างหนึ่ง ไปยังปลายอีกข้างหนึ่ง ฉะนั้นคะแปซิแตนซ์ระหว่างขดลวดมีค่า ดังนี้

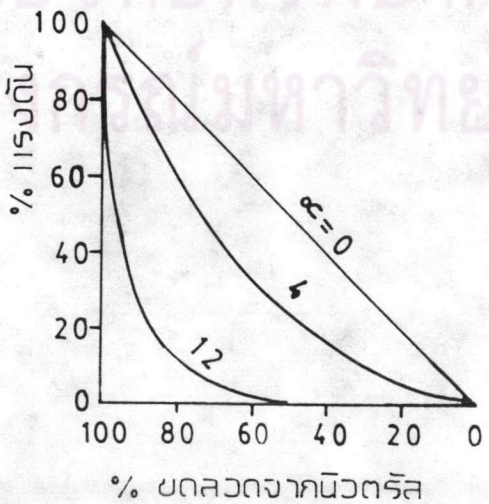
$$C_s = C'_s/l$$

ให้ $$\alpha = \sqrt{C_g/C_s}$$

แรงดันกระจายบนขดลวดต่อแรงดันรูปชั้น E(x) ซึ่งมีขนาดเท่ากับ U E(x) เป็นแรงดันที่จุดระยะ x ใด ๆ ในขดลวดเทียบกับดิน นิวตรัลต่อลงดิน จะได้สมการแรงดันดังนี้ [9]

$$E(x) = U \sinh(\alpha x/l) / \sinh\alpha$$

แรงดันกระจายบนขดลวดขึ้นอยู่กับ $\alpha = \sqrt{C_g/C_s}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แรงดันกระจายบนขดลวดขึ้นกับค่า $\alpha = \sqrt{C_g/C_s}$

กรณีที่ α มีค่าสูง เช่น $\alpha = 12$ และ $\alpha = 4$ ขดลวดช่วงปลายแรงดันสูงเพียง 10% ของความยาวจะรับแรงดันสูงถึง 70% และ 30% ตามลำดับ ดังนั้นถ้าการฉนวนตอนปลายขดลวดไม่ดีพอ จะทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้ การแก้ปัญหาการฉนวนตอนปลายขดลวดอาจทำได้โดยการออกแบบหม้อแปลงทดสอบให้ α มีค่าน้อย ๆ แรงดันกระจายบนขดลวดจะสม่ำเสมอมากขึ้น ใกล้เคียงเส้นตรงทำได้โดยการเลือกวิธีพันขดลวดและวิธีการชีลด์ การเลือกวิธีพันขดลวดขึ้นอยู่กับพิกัดกระแสและแรงดันของหม้อแปลง โดยทั่วไปขดลวดแรงดันสูง ตั้งแต่ 15 kV ขึ้นไป จะพันขดลวดแบบจานต่อเนื่อง (continuous disk) [11] มีความแข็งแรงเชิงกลตามแนวแกนสูง ราคาถูก แต่หม้อแปลงทดสอบเป็นหม้อแปลงแรงดันสูง กำลังไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นขดลวดแรงดันสูงจะมีขนาดเล็กมาก การพันแบบขดลวดจานต่อเนื่องทำได้ลำบาก จำนวนรอบที่พันก็มากด้วย วิธีการพันขดลวดแบบทรงกระบอกแกนร่วมทำได้ง่าย และสะดวกกว่า แม้ว่าจะด้อยกว่าในด้านความแข็งแรงเชิงกลทางแนวแกน ข้อดีของการพันขดลวดแบบหลังนั้น คือ คะแปซิแตนซ์อนุกรมจะมีค่าสูงกว่าคะแปซิแตนซ์ระหว่างขดลวดกับดินทำให้ α มีค่าน้อยกว่า 1

2.4.2 <u>การจัดวางขดลวดแบบเกรดดิ้ง</u> (Grading)

การพันขดลวดแบบทรงกระบอกแกนร่วมหลายชั้น ค่าคะแปซิแตนซ์ระหว่างชั้นขดลวดจะมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร [12]

$$C_n = 2\pi\epsilon\, b_n/\ln(r_{n+1}/r_n)$$

เมื่อ b_n = ความกว้างชั้นขดลวดที่ n

r_n = รัศมีของชั้นขดลวดที่ n

ϵ = เปอร์มิตติวิตี้ของตัวกลาง

ชั้นขดลวดที่อยู่ห่างจากแกนเหล็กมากกว่าจะมีค่าคะแปซิแตนซ์สูงกว่า ดังนั้นเมื่อเกิดสภาวะทรานเซี้ยนต์ แรงดันกระจายบนขดลวดจะไม่สม่ำเสมอ ปัญหานี้แก้โดยทำให้คะแปซิแตนซ์ระหว่างชั้นมีค่าเท่ากัน เมื่อความหนาระหว่างชั้นมีค่าน้อยกว่ารัศมีในแต่ละชั้นมาก ๆ สามารถประมาณสูตรการคำนวณได้ดังนี้ [4]

$$b_0 r_0 \tilde{-} b_1 r_1 \tilde{-} \ldots \tilde{-} b_n r_n$$

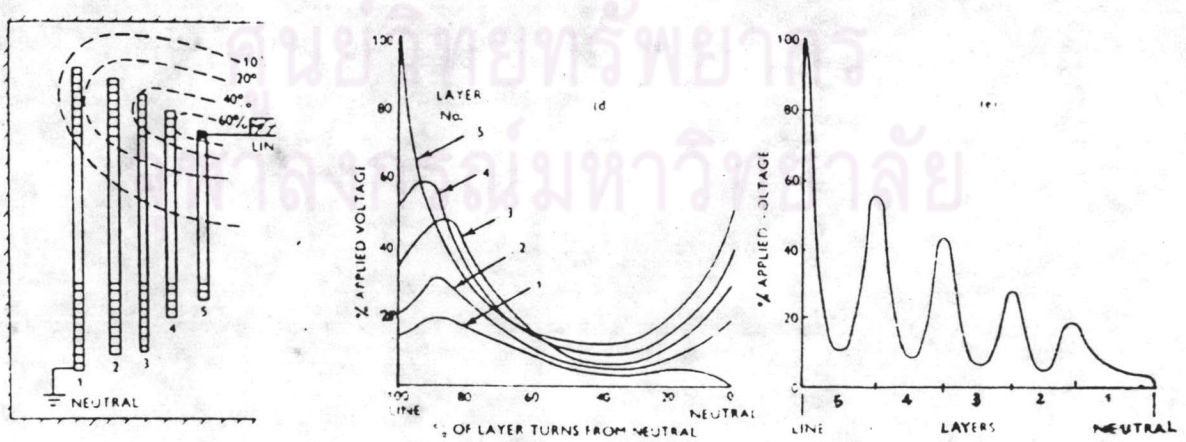
พิจารณาจากสมการ จะเห็นว่า ชั้นที่อยู่ใกล้แกนเหล็กรัศมีมีค่าน้อยกว่าชั้นที่อยู่ห่างแกนเหล็กออกไป ฉะนั้นชั้นที่อยู่ใกล้แกนเหล็กจะมีความกว้างของชั้นมากกว่าชั้นที่อยู่ห่างออกไป คือความกว้างลดลงเรื่อย ๆ เป็นลักษณะของการเกรดดิ้งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.12 (a) และ (b)

a) การจัดวางขดลวด b) การต่อขดลวดระหว่างชั้น

รูปที่ 2.12 การจัดวางและการต่อขดลวด [10]

2.4.3 <u>การชีลด์ปลายขั้วแรงดันสูง</u>

แม้จะจัดวางขดลวดแบบเกรดดิ้งแล้วก็ตาม เมื่อขดลวดแรงดันสูงได้รับแรงดันทรานเซี้ยนต์ แรงดันกระจายบนขดลวดก็ยังไม่สม่ำเสมอ แรงดันตกคร่อมปลายบนสุดจะสูงมากดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.13 (a)-(c) [10] รูปที่ 2.13 (a) แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าสถิตย์ขณะเริ่มต้นที่มีทรานเซี้ยนต์เข้าสู่ขดลวดแรงดันสูง รูปที่ 2.13 (b) แสดงการกระจายของแรงดันที่ตกคร่อมแต่ละชั้นขดลวดส่วนรูปที่ 2.13 (c) แสดงการกระจายของแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดแรงดันสูง

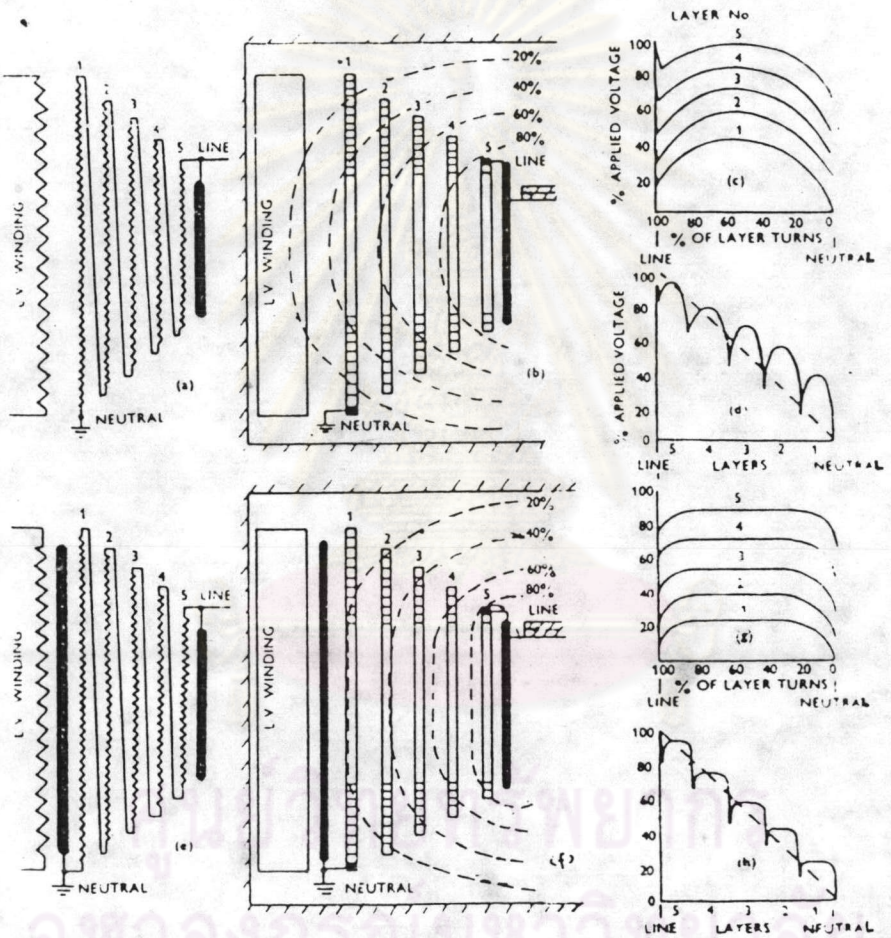


a) การกระจายเริ่มต้นของสนามไฟฟ้าสถิตย์ b) แรงดันกระจายที่ตกคร่อมขดลวดแต่ละชั้น c) แรงดันกระจายที่ตกคร่อมขดลวด

รูปที่ 2.13 แรงดันอิมพัลส์กระจายในขดลวดแบบชั้นโดยไม่มีชีลด์

016127

การใส่ชีลด์ที่ปลายขั้วแรงดันสูง เป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยให้แรงดันกระจายตลอดขดลวดมีค่าสม่ำเสมอขึ้น [10] การใส่ชีลด์ที่ขั้วนิวตรัลของขดลวดแรงดันสูง เพื่อป้องกันการส่งผ่านแรงดันเสิร์จจากขดลวดแรงดันสูง เข้าสู่ขดลวดแรงต่ำ โดยผ่านค่าคะแปซิแตนซ์ระหว่างขดลวดทั้งสอง ซึ่งเป็นอันตรายต่อขดลวดแรงดันต่ำได้ ผลจากการชีลด์แสดงไว้ในรูปที่ 2.14 (a)-(h)



(a) และ (e) การจัดวางขดลวด

(b) และ (f) การกระจายเริ่มต้นของสนามไฟฟ้าสถิตย์

(c) และ (g) แรงดันกระจายที่ตกคร่อมชั้นของขดลวด

(d) และ (h) แรงดันกระจายที่ตกคร่อมขดลวด

รูปที่ 2.14 แสดงการกระจายของแรงดันอิมพัลส์ เมื่อชีลด์ที่ขั้วแรงดันสูงแห่งเดียว (a)-(d) และชีลด์ที่ขั้วแรงดันสูงกับขั้วนิวตรัล (e)-(h) [10]

2.5 การฉนวนหม้อแปลงทดสอบด้วยน้ำมันหม้อแปลง

หม้อแปลงทดสอบที่ใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนแทรกซึม และเป็นฉนวนแวดล้อมโครงสร้างจะทำหน้าที่เป็นตัวระบายความร้อนด้วย มีคุณสมบัติทนต่อไฟฟ้าแรงดันสูงได้ดี และมีอายุการใช้งานได้นาน

ตามมาตรฐาน IEC 296 [13] ได้กำหนดคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงด้วยคุณสมบัติในทางฟิสิกส์ ทางเคมี และทางไฟฟ้าที่เหมาะแก่การเป็นฉนวนที่ดีไว้ดังนี้

2.5.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์

2.5.1.1 ความหนืดและการขยายตัว

ประสิทธิภาพของการเย็นตัวขึ้นอยู่กับค่าความหนืด ความหนืดยิ่งต่ำประสิทธิภาพการทำความเย็นจะยิ่งสูงขึ้น การระบายความร้อนจะคล่องและรวดเร็ว ธรรมชาติของน้ำมันความหนืดจะลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่ม ขณะเดียวกันปริมาตรจะขยายตัว

ความหนืดของน้ำมันตามมาตรฐาน ที่ - 15 °C < 800 cst.

20 °C < 40 cst.

สัมประสิทธิการขยายตัวของน้ำมันมีค่า = 0.0008

2.5.1.2 จุดวาบไฟ (Flash point)

จุดวาบไฟ คือ อุณหภูมิที่ซึ่งไอน้ำมันบนผิวน้ำมันติดไฟขึ้นเอง โดยธรรมชาติ น้ำมันที่มีจุดวาบไฟต่ำ หมายความว่าระเหยง่าย และขยายตัวได้มาก ความดันในหม้อแปลงจึงสูง ค่านี้มีความสำคัญมาก ในหม้อแปลงเล็ก ๆ ที่ไม่มีห้องรองรับน้ำมัน ค่าตามมาตรฐานกำหนดไว้ว่า จุดใกล้วาบไฟ ไม่ต่ำกว่า 140 °C และ จุดวาบไฟต้องไม่ต่ำกว่า 160 °C ค่านี้เป็นค่าที่ปลอดภัยสำหรับหม้อแปลงชนิดฉนวนด้วยน้ำมันแทรกซึม เนื่องจากการออกแบบจะกำหนดให้อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 105 °C

2.5.1.3 จุดไฟติด (Fire point)

จุดไฟติด คือ อุณหภูมิที่ซึ่งน้ำมันจะเผาไหม้และเผาต่อไป อุณหภูมิดังกล่าวมีค่าประมาณ 200 °C หรือ 1.25 เท่าของจุดวาบไฟ

2.5.1.4 ความหนาแน่น

ตามมาตรฐานได้กำหนดความหนาแน่นของน้ำมัน เท่ากับ 0.895 กรัม/ลบ.ซม. ที่อุณหภูมิ 20 °C จุดประสงค์ เพื่อมิให้น้ำมันกลายเป็นน้ำแข็งที่อุณหภูมิต่ำ ๆ

2.5.1.5 จุดเท (Pour point)

มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่น จุดเทเป็นจุดที่อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่น้ำมันยังไหลได้ ตามมาตรฐานกำหนดไว้ที่ -30 °C

2.5.2 <u>คุณสมบัติทางเคมี</u>

ส่วนผสมน้ำมันในหม้อแปลงทางเคมีนั้น จัดแบ่งออกเป็น 2 ชนิดในการทดสอบกล่าวคือ ชนิดของน้ำมันเอง ได้แก่ การทดสอบหาค่ามูลน้ำมัน (sludge value) และค่าจุดสะเทิน (neutralization value) หลังจากเผาไหม้กับอากาศ และชนิดที่มีสารอื่นเจือปนในน้ำมัน อันได้แก่ การทดสอบหาค่ากำมะถันกัดกร่อน และค่าที่น้ำปะปนอยู่ เป็นต้น

2.5.2.1 ค่ามูลน้ำมัน

เมื่อน้ำมันทำปฏิกิริยากับอากาศ จะเกิดสารที่มีลักษณะเป็นเมือกเรียกว่ามูลน้ำมัน มูลน้ำมันนี้เมื่อเกาะอยู่ตามผิวหรือฉนวน จะทำให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนลดลง มาตรฐานได้กำหนดมูลน้ำมัน มีค่าสูงสุดได้เพียง 0.1% โดยน้ำหนัก

2.5.2.2 ค่าความเป็นกรด

ค่าความเป็นกรดของน้ำมันหรือจุดสะเทิน ที่เกิดในขบวนการกลั่นน้ำมันเป็นคุณสมบัติเฉพาะที่ไม่สามารถลดค่าลงได้ ตามมาตรฐานกำหนดไว้ไม่เกิน 0.03 มิลิกรัมของ KOH/กรัม

2.5.2.3 กำมะถันกัดกร่อน

จะมีการทดสอบหาสารพวกกำมะถัน ว่าผสมอยู่ในน้ำมันหรือไม่ หากมีสารพวกนี้เจือปนอยู่ น้ำมันดังกล่าวนั้นใช้ไม่ได้ เพราะมันจะกัดกร่อนวัสดุในหม้อแปลง

2.5.2.4 ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในน้ำมัน

ค่าตามมาตรฐานกำหนดให้มีน้ำเจือปนได้มากที่สุด ไม่เกิน 35 ppm.

2.5.3 คุณสมบัติทาง ไฟฟ้า

หน้าที่ของน้ำมันในหม้อแปลง คือ เป็นฉนวน ดังนั้นน้ำมันจะต้องสามารถทนแรงดัน ไฟฟ้า ได้สูง น้ำมันจะต้องมีการทดสอบด้วย เครื่องมือทดสอบน้ำมันมาตรฐาน มีอิเล็กโทรด แรงดันสูง เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 13 มม. ช่องว่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด กำหนดไว้ห่าง 2.5 มม. ค่าน้อยที่สุดของความคงทนต่อแรงดัน ไฟฟ้า (Electric Strength) ตามมาตรฐาน ไม่ต่ำกว่า 30 kV.

2.5.4 ตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงของคาลเทกซ์

ความหนาแน่น ที่ 15 °C	0.895	กรัม/ลบ.ซม.
ความหนืด ที่ 0 °C	68.5	cst
ที่ 40 °C	10.2	cst
จุดเท	-60	°C
จุดวาบ ไฟ	147	°C
ความเป็นกรด	0.01	มิลลิกรัม ของ KOH/กรัม
ปริมาณน้ำเจือปน	< 30	ppm
ค่ามูลน้ำมัน	0.03	% น้ำหนัก
ความคงทนต่อแรงดัน ไฟฟ้าอย่างต่ำ	30 kV (อิเล็กโทรดแบบจาน)	
	20 kV (อิเล็กโทรดแบบ VDE)	

ตัวอย่าง การทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงยี่ห้อคาลเทกซ์ จากโรงงาน ทดสอบด้วย เครื่องทดสอบน้ำมันมาตรฐาน (Standard oil tester) ระยะแก๊ป 2.5 มม.

ครั้งที่	1	2	3	4
แรงดันเบรกดาวน์ KV	48	40	52	41

แรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ย = 45.25 kV

2.6 ชนิดขดลวดทองแดงที่ใช้กับหม้อแปลงที่ใช้ฉนวนน้ำมันเป็นฉนวนแทรกซึม

หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดใช้กระดาษฉนวนระหว่างขดลวดและใช้น้ำมันเป็นฉนวนแทรกซึม ตามมาตรฐาน IEC กำหนดให้อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 105 °C ฉนวนที่ใช้เคลือบขดลวดจะเป็นฉนวน class A ทนทานต่อน้ำมันได้ดีเยี่ยม ฉนวนที่ใช้เคลือบเป็น polyvinyl formal resin (PVF) คุณสมบัติที่ดีเด่นของขดลวด PVF มีดังนี้ [14]

- มีความเหนียว ยืดหยุ่นได้ดีเป็นพิเศษ ทนทานต่อการขูด ถู
- ทนทานต่อน้ำมันได้ดีเยี่ยม
- ทนต่อการช้อคด้วยความร้อนได้ดี
- ต้านทานความชื้นได้สูง

คุณสมบัติที่ต้องการโดยเฉพาะ คือ ทนทานต่อน้ำมันได้ดีเยี่ยม ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ขดลวดชนิดอื่นไม่มี เช่น ขดลวดชนิด PEW (Polyester-resin enameled copper wires)

EIW (Polyamide-imide enameled copper wires)

UEW (Polyurethene-resin enameled copper wires)

ความหนาของฉนวนที่เคลือบ มี 3 ระดับ ด้วยกัน คือ

ฉนวนเคลือบบาง เรียกว่า ชั้น 2 (class 2 หรือ No. 2)

ฉนวนเคลือบหนา เรียกว่า ชั้น 1 (class 1 หรือ No. 1)

ฉนวนเคลือบหนาพิเศษ เรียกว่า ชั้น 0 (class 0 หรือ No. 0)

รายละเอียดดูในภาคผนวก ก. 1

2.7 กระดาษฉนวน

กระดาษฉนวนใช้เป็นฉนวนระหว่างชั้นขดลวด ระหว่างขดลวดแรงดันต่ำกับแรงดันสูง และระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก ตัวของกระดาษเองล้วน ๆ จะมีปัญหาของรูพรุน และดูดซับความชื้นไว้ จึงต้องอบเห้งและจุ่มอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง

2.7.1 <u>กระดาษคร๊าฟท์</u> (Kraftpaper)

กระดาษคร๊าฟท์นี้ทำจาก Wood fibers มีความเนียว เป็นกระดาษที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้งานฉนวนไฟฟ้า ระหว่างชั้นขดลวด ขนาดความหนามีตั้งแต่ 0.045 มม. ถึง 0.380 มม.

ตัวอย่างข้อมูลการเบรกดาวน์ ทางไฟฟ้าของกระดาษคร๊าฟท์จากโรงงาน โดยผ่านการอบแห้ง และแช่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลง ทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบน้ำมันมาตรฐาน

ความหนา mm.	แรงดันเบรกดาวน์ kV จำนวนแผ่น				
	1	2	3	4	5
0.08	1.8	3.8	7.5	9.9	12.8
0.13	1.8	4.8	8.4	10.9	13

2.7.2 <u>กระดาษอัดแรง</u> (Press Board)

กระดาษอัดแรงเป็นกระดาษแข็ง และมีความหนามากกว่ากระดาษคร๊าฟท์ใช้เป็นฉนวนกั้นระหว่างขดลวดแรงดันต่ำกับขดลวดแรงดันสูง และระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก มีความหนาตั้งแต่ 0.8 มม. - 3.2 มม.

รายละเอียดของกระดาษคร๊าฟท์และกระดาษอัดแรง ดูในภาคผนวก ก.2

ตัวอย่างข้อมูลการเบรกดาวน์ทางไฟฟ้าของกระดาษอัดแรงจากโรงงาน โดยผ่านการอบแห้ง และแช่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลง

ความหนา mm.	แรงดันเบรกดาวน์ kV จำนวนแผ่น			
	1	2	3	4
0.8	9.3	17	24.3	30.6
1.6	20	36.6	53.4	57

2.8 ถังฉนวนหม้อแปลงทดสอบ

เนื่องจากหม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบเป็นหม้อแปลงถังฉนวน หัวข้อนี้จะกล่าวถึงวัสดุฉนวนที่ใช้ทำถังหม้อแปลง

วัสดุฉนวนที่จะทำเป็นถังหม้อแปลง เท่าที่หาได้ในเมืองไทยและมีราคาถูก คือ ท่อฉนวน PVC เป็นผลิตภัณฑ์จากพลาสติกที่มีชื่อว่า Polyvinyl chloride มีคุณสมบัติดีเด่น คือ ไม่เป็นสนิม ทนกรดทนด่างและสารเคมีได้ดี มีน้ำหนักเบา

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของท่อ PVC [20]

การดูดซึมน้ำ	มก./ตร.ซม.	0.04-0.06
กำลังดึงที่ 15 °C	กก./ตร.ซม.	500-550
กำลังบิด	กก./ตร.ซม.	860
กำลังอัด	กก./ตร.ซม.	660
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	K cal/m-h-C°	0.11-0.14
ความต้านทานจำเพาะเชิงปริมาตร	- cm	$> 10^{15}$
แฟกเตอร์ tgδ ที่ 20 °C 1 kHz		0.02
ค่าคงตัวไดอิเลกตริก		3.2
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า	กิโลโวลต์/มม.	> 40
อุณหภูมิอ่อนตัว	°C	76.3

ตัวอย่างการทดสอบการวาบไฟตามผิวท่อ PVC ด้วยแรงดันความถี่กำลัง โดยมีระยะฉนวน 59 cm.

ครั้งที่	1	2	3	4	5	6
แรงดันเบรกดาวน์ kV	250	220	234	210	210	210

คิดค่าความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิว โดยมีอิเล็กโทรดเป็นวงแหวน รัศมีความโค้งประมาณครึ่งเซนติเมตร ที่แรงดัน 210 kV เท่ากับ 210/59 = 3.56 kV/cm.

2.9 แกนเหล็ก

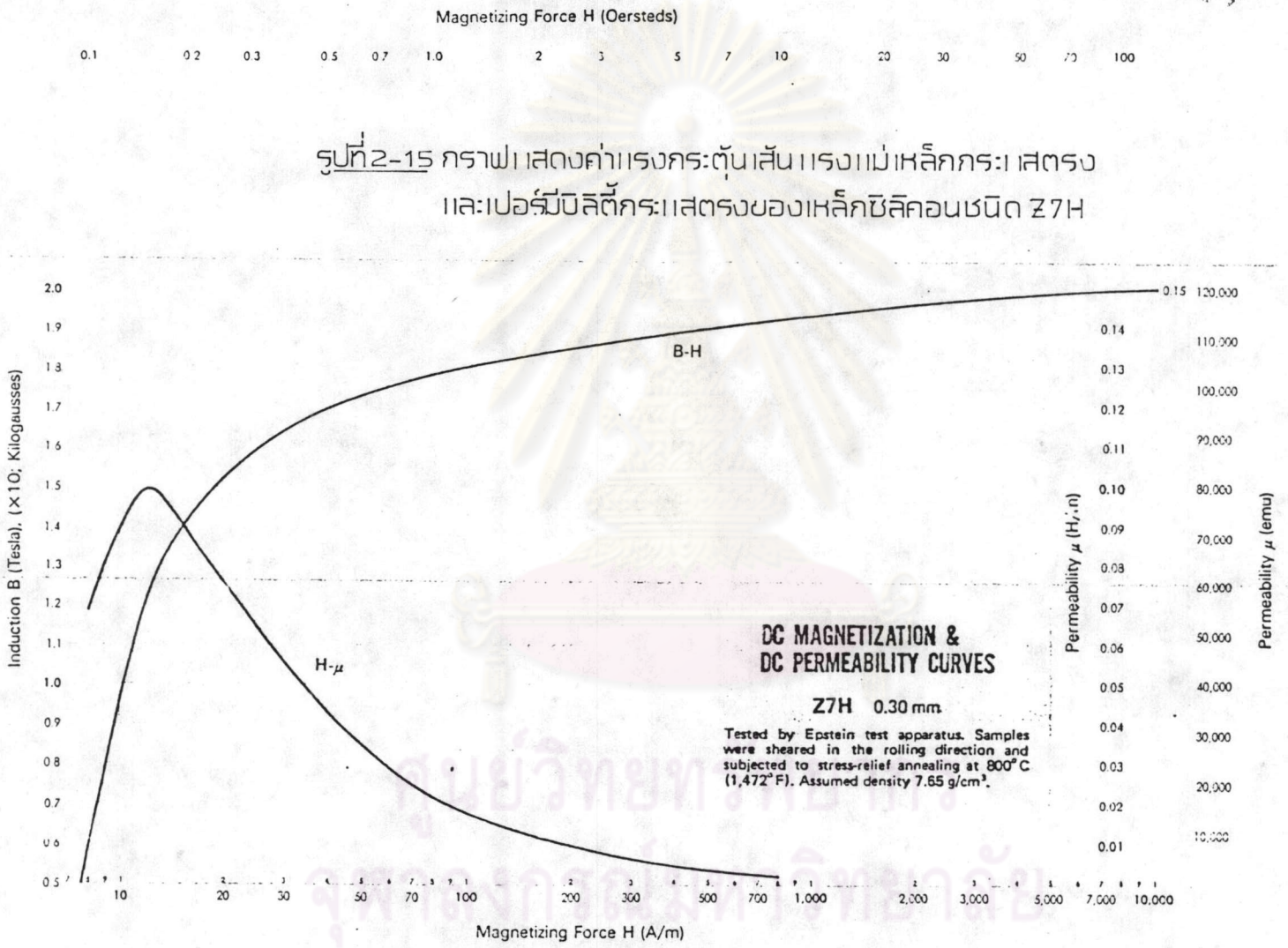
แกนเหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้า จะใช้เหล็กผสมซิลิคอน เพื่อเพิ่มค่าความต้านทานจำเพาะ ทำให้การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (eddy current) ลดลง เหล็กที่ผสมซิลิคอนสูง จะทำให้ฮิสเทอรีซีส ลูป (hysteresis loop) แคบลง การสูญเสียฮิสเทอรีซีสก็จะลดลงด้วย เหล็กซิลิคอนจะมีเปอมิวบิลิตี้สูง ทำให้ใช้กระแสกระตุ้นในวงจรแม่เหล็กลดลง เหล็กที่ใช้อาจเป็นเหล็กรีดร้อน หรือรีดเย็น เหล็กรีดร้อนจะให้ค่าความหนาแน่นฟลั๊กสูงสุด 1.45 Wb/m² ส่วนเหล็กรีดเย็นจะให้ความหนาแน่นฟลั๊กสูงมากกว่าถึง 1.8 Wb/m² [6] ปัจจุบันโรงงานหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้เหล็กรีดเย็นประกอบแกนเหล็ก แม้ว่าราคาจะแพงกว่า แต่สามารถลดน้ำหนักแกนเหล็กลงได้มาก

เหล็กซิลิคอนที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายเกรดด้วยกัน เกรดที่นิยมใช้อยู่ปัจจุบันเป็นเกรด Z7H ซึ่งเป็นกลุ่ม ORIENTCORE HI-B [15] พัฒนามาจากกลุ่ม ORIENTCORE มีคุณสมบัติเด่นเพิ่มขึ้น คือ ให้ความหนาแน่นฟลั๊กสูงถึง 1.7 Wb/m² กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่ำ ค่าเปอมิวบิลิตี้สูง ฉนวนที่ฉาบผิวทนต่อความร้อนและการกัดกร่อนได้ดี แผ่นเหล็กมีความหนาเพียง 0.3 มม. แฟคเตอร์ เนื้อแผ่นเหล็กสูงถึง 0.97 คุณสมบัติเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติเปรียบเทียบระหว่าง ORIENTCORE กับ ORIENTCORE HI-B

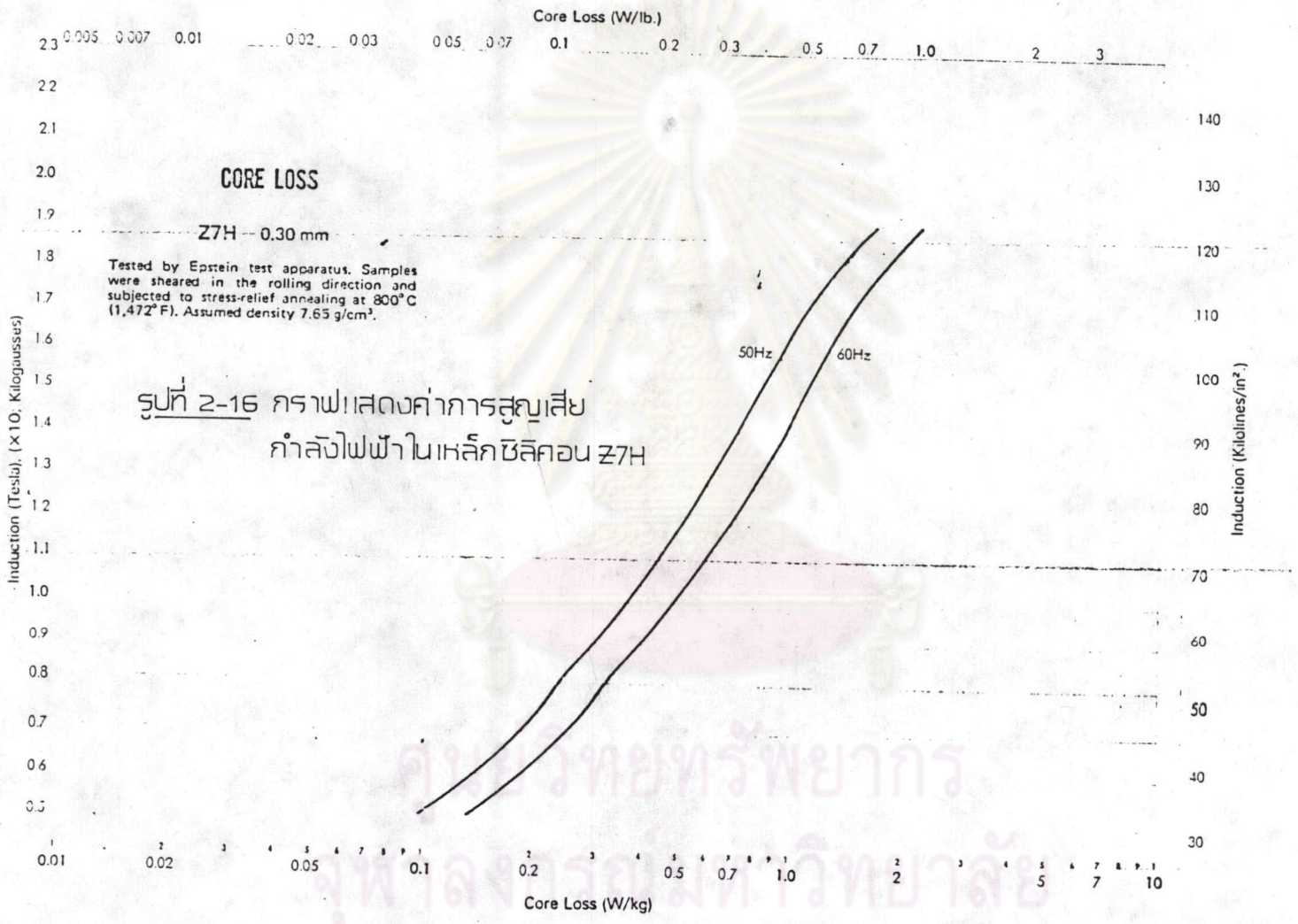
คุณสมบัติ	ORIENTCORE	ORIENTCORE HI-B
ความหนาแน่น กรัม/ลบ.ซม.	7.65	7.65
ความต้านทานจำเพาะ ไมโครโอห์ม-ซม.	48	45
สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำอิ่มตัว เทสล่า	2.03	2.03
สัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ 25 °C Cal/sec. cm °C	0.061	0.067
โมดูลัสยืดหยุ่น x 10^4 กก./ตร.ซม. - ทางยาว	1.114	1.189
- ทางขวาง	1.931	2.038

รูปที่ 2-15, 2-16 และ 2-17 เป็นกราฟแสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของเหล็ก Z7H [15]



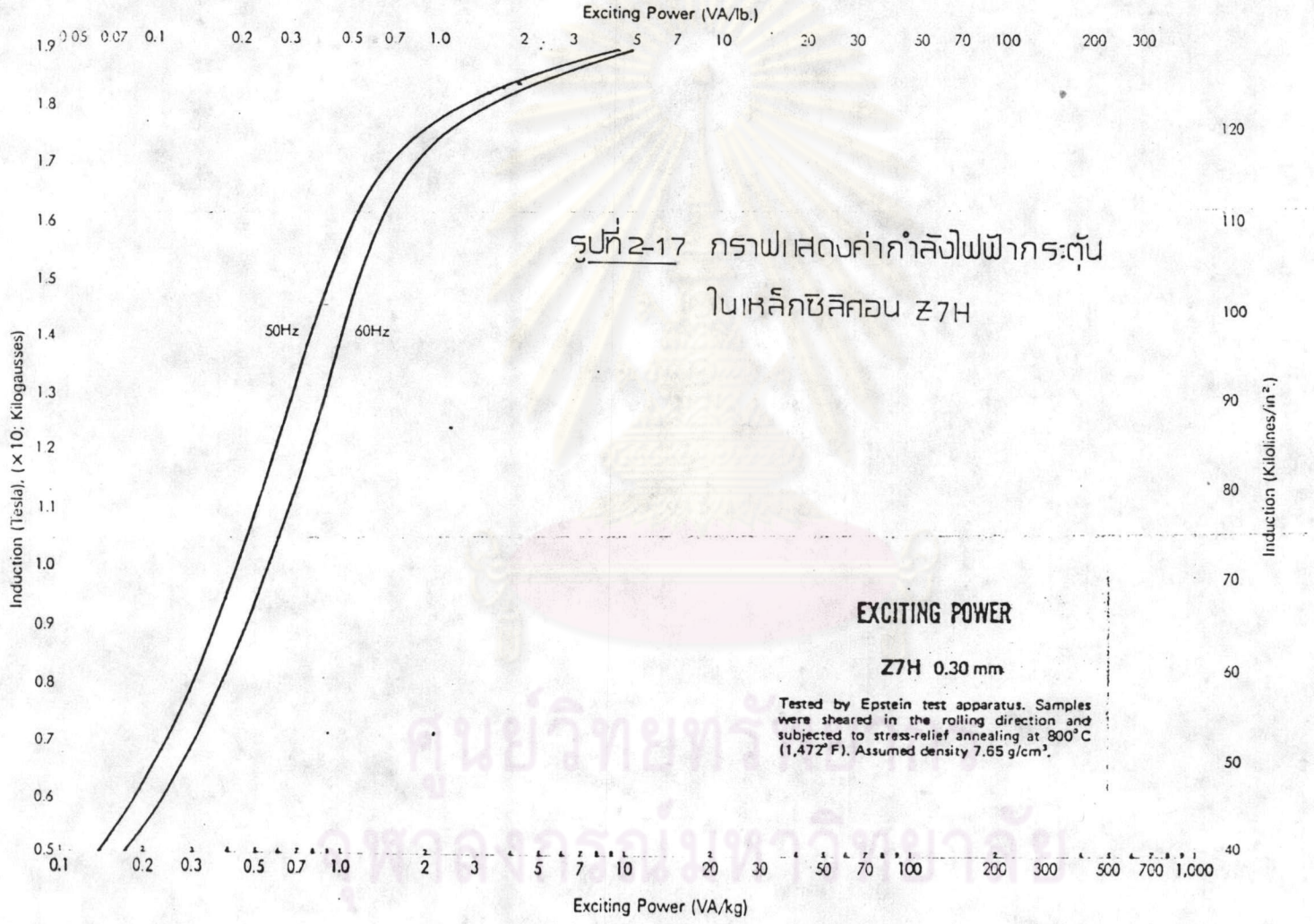
รูปที่ 2-15 กราฟแสดงค่าแรงกระตุ้นเส้นแรงแม่เหล็กกระแสตรง และเปอร์มีบิลิตี้กระแสตรงของเหล็กซิลิคอนชนิด Z7H

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-16 กราฟแสดงค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในเหล็กซิลิคอน Z7H

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-17 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้ากระตุ้นในเหล็กซิลิคอน Z7H

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.10 ค่ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบโดยทั่วไป

หม้อแปลงทดสอบจะกำหนดด้วย

- แรงดันที่ป้อนเข้าและจ่ายออก
- กำลังไฟฟ้า
- แรงดันลัดวงจร (short circuit voltage or impedance voltage) เมื่อเกิดวาบไฟตามผิวหรือเกิดเบรกดาวน์ที่วัสดุทดสอบ
- ความถี่และรูปคลื่นแรงดัน
- อุณหภูมิเพิ่มหรือ insulation class
- ลักษณะการฉนวนและโครงสร้าง

2.10.1 ขนาดแรงดันของหม้อแปลงทดสอบ

การกำหนดแรงดันของหม้อแปลงทดสอบขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบสูงสุดที่มีโอกาสจะใช้ อย่างน้อยที่สุดจะต้องสูงกว่าค่าแรงดันคงทนอยู่ได้ของวัสดุทดสอบที่ใช้กับระบบแรงดันที่กำหนดในตารางที่ 1.1 กรณีที่ต้องการทดสอบวาบไฟตามผิว เกิดเบรกดาวน์หรือเจาะผ่านทะลุ แรงดันที่ใช้ทดสอบจะต้องสูงมากขึ้นให้เพียงพอที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์นั้น เมื่อคำนึงถึงประสิทธิภาพและอายุการใช้งาน แรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบควรจะสูงกว่าแรงดันทดสอบประมาณ 10-20% ลักษณะคลื่นแรงดันจะต้องเป็นรูปคลื่นไซน์ มีค่าแตกต่างไม่เกิน 5% ของค่ายอดคลื่นพื้นฐาน

2.10.2 กระแสที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

ปกติโหลดของหม้อแปลงทดสอบจะเป็นแบบคะแปซิตีฟ หรือแบบตัวเก็บประจุ ดังได้กล่าวแล้วในตารางที่ 1.2 คือกระแสจะนำหน้าแรงดัน ขนาดกระแสที่ใช้ทดสอบอยู่ในช่วง 0.05 ถึง 1 A [4]

2.10.3 ขนาดกำลังของหม้อแปลงทดสอบ

เนื่องจากการทดสอบ อาจจะเกิดการเบรกดาวน์ สปาร์ก เจาะทะลุที่วัสดุทดสอบทำให้เกิดลัดวงจร กระแสลัดวงจรจะต้องสูงมากพอ เพื่อให้สังเกตเห็นถึงความบกพร่อง

ของการณวนของวัสดุทดสอบได้ชัดแจ้ง แต่กำลังไฟฟ้าลัดวงจรก็ไม่ควรสูงเกินไป เพราะจะทำให้เกิดการระเบิดขึ้นได้ ฉะนั้นกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงและกำลังไฟฟ้าลัดวงจรจะต้องสอดคล้องกัน กำลังไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ คำนวณได้จากสมการ

$$S_t = \omega C U_t^2$$

$$= 2\pi f C U_t^2 \times 10^{-9} \quad kVA$$

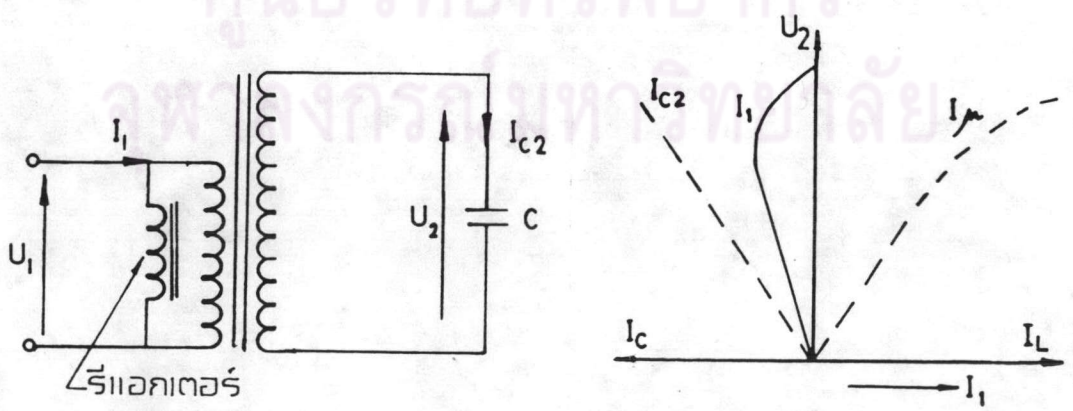
C คือ ค่าความจุไฟฟ้ารวม เป็น pF

U_t คือ แรงดันทดสอบ เป็น Vrms

f คือ ความถี่ของแรงดัน เป็น Hz

กำลังไฟฟ้ากำหนดของหม้อแปลง ควรมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าที่จะต้องป้อนให้กับวัสดุทดสอบ ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงแฟกเตอร์ความปลอดภัยด้วย เพื่อให้อายุการใช้งานสามารถใช้ได้นานขึ้น

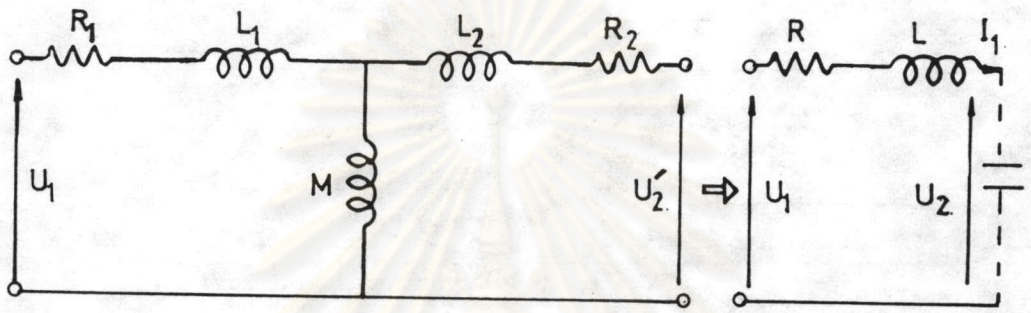
โดยเหตุที่โหลดของหม้อแปลงทดสอบส่วนมากเป็นแบบคะแปซิตีฟ กระแสจะนำหน้าแรงดัน ซึ่งเป็นเหตุให้หม้อแปลงทดสอบไม่สามารถสร้างแรงดันให้ถึงค่ากำหนดได้ เพราะกระแสสูงเกินกำหนด ปัญหานี้แก้ได้โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งกินกระแสล้าหลังแรงดันเป็นตัวชดเชย โดยการต่อรีแอกเตอร์เหนี่ยวนำขนานเข้ากับขดลวดทางป้อนเข้าของหม้อแปลงทดสอบ ถ้ามีการชดเชยให้พอเหมาะก็จะทำให้หม้อแปลงทดสอบสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าออกไปได้เต็มอัตราที่แรงดันและกระแสกำหนด ดังรูปที่ 2-18



รูปที่ 2-18 กระแสที่ป้อนเข้าหม้อแปลงทดสอบ

2.10.4 กำลังและแรงดันไฟฟ้าลัดวงจร

เมื่อเกิดวาบไฟตามผิวหรือลัดวงจรวัสดุทดสอบ แรงดันด้านจ่ายออกของหม้อแปลงทดสอบจะเหลือเพียงแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง จากวงจรสมมูลของหม้อแปลงในรูปที่ 2-19 ก็คือ $\bar{Z} = R+jX_L$



รูปที่ 2-19 วงจรสมมูลของหม้อแปลง เมื่อไม่คิดกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก

แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ มีค่าดังนี้

$$\Delta U = \sqrt{(I_2R)^2 + (I_2X_L)^2}$$

หม้อแปลงทดสอบ $R << X_L$

$$\Delta U = I_2X_L$$

ที่กระแสค่ากำหนด I_{2n}

$$\Delta U_n = \sqrt{(I_{2n}R)^2 + (I_{2n}X_L)^2}$$

$$\Delta U_n/U_{2n} = \sqrt{\epsilon_r + \epsilon_x}$$

เมื่อ $\epsilon_r = I_{2n}R/U_{2n}$ และ $\epsilon_x = I_{2n}X_L/U_{2n}$

ที่กระแสใด ๆ I_2 และ $R << X_L$

$$\Delta U/U_{2n} = I_2X_L/U_{2n} = I_2X_L/(I_{2n}X_L)\cdot\epsilon_{sc} = (I_2/I_{2n})\cdot\epsilon_{sc} = (S_2/S_{2n})\cdot\epsilon_{sc}$$

เมื่อหม้อแปลงโหลดเต็มที่ (full load) ที่แรงดันกำหนด เกิดลัดวงจรที่วัสดุทดสอบแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง จะเท่ากับ $U_{2n}\cdot\epsilon_{sc}$

ดังนั้น $(S_{sc}/S_n)\epsilon_{SC} = U_{2n}/U_{2n} = 1$

$$S_{sc} = S_n/\epsilon_{SC}$$

S_{sc} คือ กำลังไฟฟ้าขณะลัดวงจร

S_n คือ กำลังไฟฟ้ากำหนดของหม้อแปลง

โดยทั่วไป แรงดันไฟฟ้าลัดวงจรจะแสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าลัดวงจรสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$S_{sc} = (S_n/\epsilon_{SC}) \times 100$$

พิจารณาจากสมการ จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรของหม้อแปลง ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าลัดวงจร ϵ_{SC} ค่าแรงดันไฟฟ้าลัดวงจรไม่ควรเกิน 30% [4] เมื่อมีการต่อหม้อแปลงแบบขั้นบันไดหม้อแปลงแต่ละตัวจะต้องออกแบบให้ ϵ_{SC} มีค่าต่ำพอ เพราะเมื่อต่อขั้นบันไดแล้ว ค่า ϵ_{SC} รวมจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เช่น ถ้าใช้หม้อแปลง 3 ตัว ต่อขั้นบันได แต่ละตัวจะมีค่า ϵ_{SC} ประมาณ 5% จึงจะทำให้ ϵ_{SC} รวมมีค่าไม่เกิน 30% การจำกัด ϵ_{SC} ไม่ให้สูงเกินไป เพื่อป้องกันอันตรายจากแรงดันเกินและการเกิดรีโซแนนซ์ เนื่องจากโหลดของหม้อแปลงส่วนมากจะเป็นคะแปซิตีฟ แต่อย่างไรก็ตาม ϵ_{SC} ก็ไม่ควรต่ำเกินไป ทั้งนี้เพื่อมิให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรและกำลังไฟฟ้าลัดวงจรสูงมากเกินไป ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อหม้อแปลงทดสอบได้

เมื่อกำหนดกระแสที่กำหนด I_n และแรงดันไฟฟ้าลัดวงจรมาให้ ก็สามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sc} ที่แรงดันกำหนด U_n ได้

$$I_{sc} = (I_n/\epsilon_{SC}) \times 100$$

หม้อแปลงทดสอบส่วนมากจะจำกัด I_{sc} ประมาณไม่เกิน 20 เท่าของ I_n

กระแสเสิร์จไดนามิกส์ (dynamic surge current) I_{dy} ซึ่งเป็นตัวบอกถึงขนาดแรงระเบิดออกที่เกิดขึ้นแก่ขดลวด คำนวณได้จากสมการ [4]

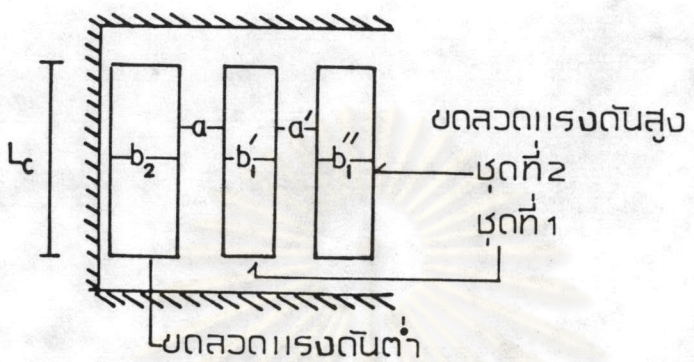
$$I_{dy} = 2 \times 1.8\, I_{sc}$$

$$I_{dy} = 2.5\, I_{sc}$$

จากการประมาณค่า $\epsilon_{SC} \simeq \epsilon_X = I_{2n}X_L/U_{2n}$ เมื่อ $R << X_L$

ดังนั้น หม้อแปลงทดสอบที่กระแสและแรงดันกำหนด ϵ_{SC} ขึ้นกับ X_L

ตัวอย่างการคำนวณหาค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงทรงกระบอกแกนร่วม ในรูปที่ 2-20 [11]



รูปที่ 2-20 การคำนวณหาค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงทรงกระบอกแกนร่วม

รีแอกแตนซ์ $X_L = [2\pi f \mu_o l_{mt}(AT)/L_c E_t] \times (a + b'_1 + b''_1 + b_2/3 + a'/4)$ [11]

l_{mt} = ความยาวเส้นรอบวงเฉลี่ยของชั้นขดลวดทั้งหมด

L_c = ความสูงของขดลวด

b'_1, b''_1, b_2 = ความหนาของชั้นขดลวด

a, a' = ความหนาของช่องอากาศ

AT = แอมแปร์-เทิร์น

f = ความถี่ของคลื่นแรงดัน

μ_o = เปอร์มิวบิลิตี้ของอากาศ

E_t = แรงดัน/รอบ

จะเห็นว่า รีแอกแตนซ์จะมีค่ามากขึ้น เมื่อ T, a, a', b'_1, b''_1, b_2 และ l_{mt} เพิ่มขึ้นและจะมีค่าลดลง เมื่อ L_c เพิ่มขึ้น ดังนั้นการที่จะทำให้รีแอกแตนซ์มีค่าน้อยทำได้โดยการออกแบบให้ T, a, a', b'_1, b''_1, b_2 และ l_{mt} มีค่าต่ำ และให้ L_c มีค่าสูง

2.10.5 <u>อุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือ Insulation class</u>

การกำหนดอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือ Insulation class ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้ฉนวนขดลวดและฉนวนแทรกซึม

- หม้อแปลงทดสอบที่ใช้ฉนวนขดลวดเป็นแบบกระดาษคร๊าฟท์ (Kraft paper) และฉนวนแทรกซึมเป็นน้ำมันหม้อแปลง ตามมาตรฐาน IEC จะกำหนดให้อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดไม่เกิน 65 °C และอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนตัวถังไม่เกิน 60 °C ขดลวดที่ใช้จะเคลือบฉนวน class A

- หม้อแปลงที่ใช้ไมล่าร์เป็นฉนวนขดลวดและใช้ก๊าซ SF_6 เป็นฉนวนแทรกซึมจะกำหนดให้อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดไม่เกิน 75 °C เป็นการฉนวนใน class E [7] และอุณหภูมิเพิ่มของก๊าซ SF_6 ด้านบนของตัวถังไม่เกิน 55 °C [7]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย