

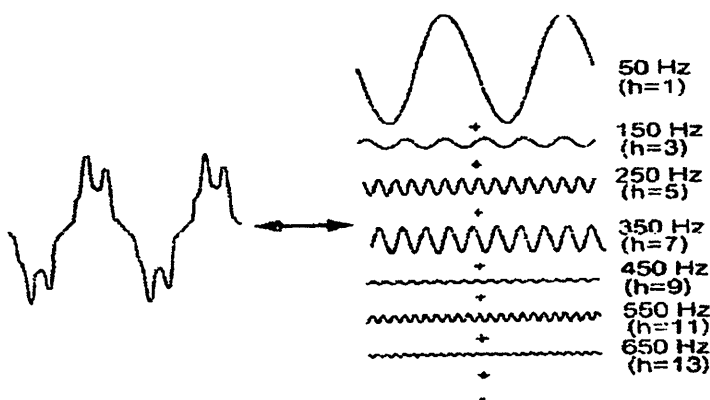
บทที่ 2

แนวคิดทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฮาร์โมนิก

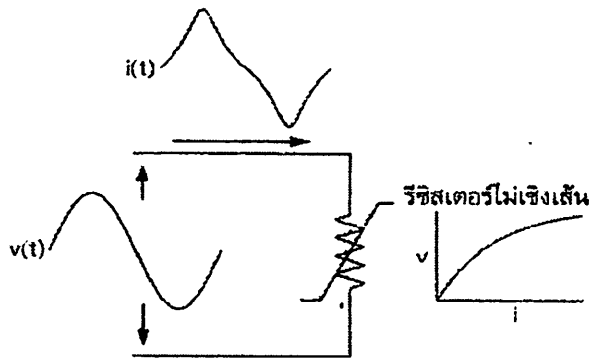
2.1.1 ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิก

ฮาร์โมนิก (Harmonic) เป็นสัญญาณรบกวนระบบไฟฟ้า โดยมีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล และเมื่อมีฮาร์โมนิกผสมเข้ากับความถี่หลักมูล จะทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของรูปคลื่น จากภาพประกอบที่ 2.1 แสดงรูปคลื่นที่ถูกทำให้ผิดเพี้ยนไปเนื่องจากการรวมกันของผลรวมของฮาร์โมนิกแต่ละอันดับ



ภาพประกอบที่ 2.1 ลักษณะรูปคลื่นสัญญาณที่ผิดเพี้ยนเนื่องจากฮาร์โมนิก

ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นจากฮาร์โมนิกเป็นปรากฏการณ์ที่มีมานานแล้วในระบบไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า หรือระบบผลิตไฟฟ้าที่มาจากโรงไฟฟ้า แต่ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นที่ได้หม้อแปลงไฟฟ้า หรือระบบของการไฟฟ้ายังอยู่ในเกณฑ์การยอมรับได้ ในปัจจุบันเองฮาร์โมนิกมีสาเหตุมาจากโหลดไม่เชิงเส้น (non-linear load) โดยมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอาคารสำนักงาน และในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ชูตขับแบบแปรความเร็วได้ เต้าหอลอมสมัยใหม่ โหลดระบบไฟฟ้าแสงสว่าง คอมพิวเตอร์ ดังนั้นจึงต้องให้ความสำคัญในการแก้ไขหรือบรรเทาปัญหาจากภาพประกอบที่ 2.2 เป็นการอธิบายปรากฏการณ์ฮาร์โมนิกได้อย่างเข้าใจง่าย คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ามีรูปคลื่นไซน์ เมื่อจ่ายกระแสให้กับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น จะทำให้อุปกรณ์กระแสไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

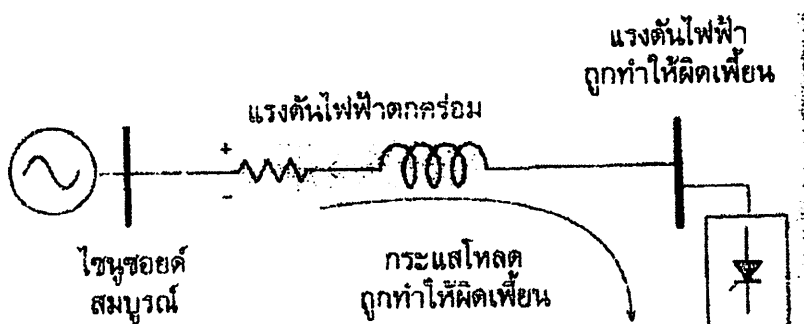


ภาพประกอบที่ 2.2 ความผิดเพี้ยนรูปคลื่นกระแสที่เกิดจาก โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น มีทั้งความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า เพราะฉะนั้นฮาร์มอนิกที่ถูกใช้กันอยู่บ่อยครั้ง หมายถึงอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนี้

1. แรงดันฮาร์มอนิกที่ถูกทำให้ผิดเพี้ยนมากเกินไป
2. กระแสฮาร์มอนิกที่ใหญ่กว่าขนาดกำลังของอุปกรณ์จ่ายกำลังไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าหรือเครื่องจักรไฟฟ้า ทำให้ต้องลดขนาดพิกัดกำลังลง
3. แรงดันฮาร์มอนิกที่ใหญ่เกินไป เนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกที่ใหญ่เกินไปซึ่งเกิดจากอุปกรณ์ในระบบ

โดยทั่วไปโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ถือเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก เนื่องจากว่า เป็นการต่อแบบขนานและทำให้รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าผิดเพี้ยน โหลดเข้าสู่ระบบ ในการวิเคราะห์จึงถือเอา โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก ยกเว้นว่ามีข้อมูลที่ชัดเจนจึงพิจารณาเป็นแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์มอนิก ซึ่งปกติความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าเป็นผลมาจากการที่กระแสไฟฟ้าถูกทำให้ผิดเพี้ยนโดยโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสนั้นมีรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนไป ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.3



ภาพประกอบที่ 2.3 กระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิก

นอกจากนี้ เงื่อนไขของการเกิดฮาร์โมนิกนอกจากประเภทของโหลดที่เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นแล้ว ตำแหน่งการติดตั้งโหลดก็ต้องมีการพิจารณาเช่นเดียวกัน โหลดที่เหมือนกันแต่ตำแหน่งที่ติดตั้งในตำแหน่งที่ต่างกัน ก็มีผลทำให้ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดัน ไฟฟ้าต่างกัน มาตรฐาน IEEE 519-1992 ได้ระบุถึงการแบ่งความรับผิดชอบของการควบคุมฮาร์โมนิก ไว้ดังนี้ คือ

1. การควบคุมปริมาณกระแสฮาร์โมนิกที่จ่ายเข้าสู่ระบบจะอยู่ที่ตำแหน่งผู้ใช้งานปลายทาง
2. หากกระแสฮาร์โมนิกที่จ่ายเข้าสู่ระบบอยู่ภายในของเขตที่กำหนด การควบคุมการผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า เป็นความรับผิดชอบของการไฟฟ้า

ดังนั้นเมื่อเป็นโหลดจะหมายถึงกระแสฮาร์โมนิก และหากเป็นระบบของการไฟฟ้าจะหมายถึงแรงดันฮาร์โมนิก

2.1.2 ปริมาณทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

ปริมาณต่างๆทางไฟฟ้า เช่น ค่า *rms* กำลังไฟฟ้าปรากฏ กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าเสมือน หรือค่าตัวประกอบกำลัง เป็นต้น จะเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ในกรณีที่เป็นรูปคลื่นไซน์ แต่ในกรณีที่ไม่ใช่รูปคลื่นไซน์หรือมีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นไซน์ ต้องมีการพิจารณาใหม่ ดังนี้

1. ค่า *rms* ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

ในกรณีที่เป็นรูปคลื่นไซน์ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าจะมีรูปคลื่นที่ความถี่หลักมูลเท่านั้น โดยมีค่า *rms* คือ

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_m \quad \text{V} \quad (1)$$

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m \quad \text{A} \quad (2)$$

เมื่อ

V_m คือ ค่าสูงสุดของรูปคลื่นไซน์ของแรงดันไฟฟ้า

I_m คือ ค่าสูงสุดของรูปคลื่นไซน์ของกระแสไฟฟ้า

ในกรณีไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ รูปคลื่นถูกทำให้ผิดเพี้ยนไปเนื่องจากความถี่ฮาร์โมนิก ค่า *rms* จะเป็นค่ารากที่สองของผลรวมกำลังสองของ *rms* แต่ละความถี่

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2)} \quad \text{V} \quad (3)$$

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_h^2)} \quad \text{A} \quad (4)$$

เมื่อ

V_h คือ ค่า rms ของแรงดันไฟฟ้าที่มีลำดับฮาร์โมนิกที่ h

I_h คือ ค่า rms ของกระแสไฟฟ้าที่มีลำดับฮาร์โมนิกที่ h

2. กำลังไฟฟ้าจริง (active power)

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt \quad \text{W} \quad (5)$$

จากสมการ (5) สามารถใช้ทั้งในกรณีที่เป็นรูปคลื่นไซน์ และกรณีที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ซึ่งในกรณีที่เป็นรูปคลื่นไซน์ ค่า rms ของกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่หลักมูลมีค่าเป็น I_{rms1} และ V_{rms1} จะได้ว่า

$$P = \frac{V_1 I_1}{2} \cos \theta_1 = V_{rms1} I_{rms1} \cos \theta_1 = S \cos \theta_1 \quad \text{W} \quad (6)$$

เมื่อ

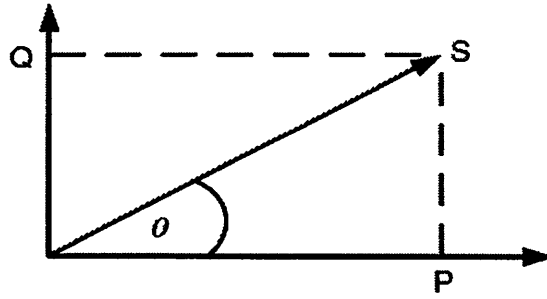
θ_1 คือ มุมเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล

จะเห็นว่า สมการที่ (6) เป็นกำลังไฟฟ้าจริงที่ความถี่หลักมูล และในกรณีที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ การคำนวณกำลังไฟฟ้าจริงจะต้องพิจารณาจากฮาร์โมนิกทั้งหมด คือ เป็นผลรวมของกำลังไฟฟ้าจริงแต่ละฮาร์โมนิก

3. กำลังไฟฟ้าเสมือน (reactive power) เป็นกำลังไฟฟ้าซึ่งโดยทั่วไปจะมาจากค่าอินดักแตนซ์ และคาปาซิแตนซ์ ในกรณีที่เป็นรูปคลื่นไซน์ จะได้ว่า

$$Q = S \cdot \sin \theta_1 = V_{rms1} I_{rms1} \cdot \sin \theta_1 \quad \text{Var} \quad (7)$$

ดังนั้นความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าเมื่อพิจารณาในกรณีที่เป็นรูปคลื่นไซน์



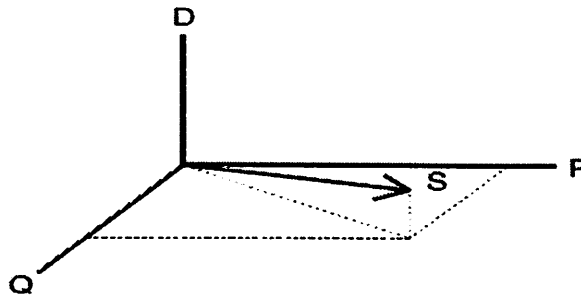
ภาพประกอบที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (P, Q, S)

แต่เมื่อมีความผิดเพี้ยน จะต้องพิจารณากำลังไฟฟ้าเสมือนเป็นพิเศษ โดยจะต้องพิจารณาจาก “กำลังไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยน” (Distortion power) (D) หรือ “โวลท์แอมแปร์ที่ผิดเพี้ยน” และ Q เป็นผลรวมของกำลังไฟฟ้าเสมือนแต่ละความถี่ ดังนั้น P, Q, D จะมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2 + D^2)} \quad \text{VA} \quad (8)$$

$$Q = \sum_K V_k I_k \sin \theta_k \quad \text{Var} \quad (9)$$

แสดงในรูปของเวกเตอร์ได้



ภาพประกอบที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าต่างๆ

4. ตัวประกอบกำลัง เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงกับกำลังไฟฟ้าปรากฏ

$$PF = \frac{P}{S} \quad (10)$$

ในกรณีที่ป็นรูปคลื่นไซน์ ตัวประกอบกำลังจะเป็นค่าโคไซน์ของมุมเฟสตามสมการที่ (10) เรียกว่า “ตัวประกอบกำลังแทนที่” (Displacement power factor) แต่หากไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

ค่าตัวประกอบกำลังจะเรียกว่า เรียกว่า “ตัวประกอบกำลังจริง” (True Power Factor) โดยจะเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงทั้งหมดของเวลาที่ทั้งหมดกับกำลังไฟฟ้าปรากฏที่มาจากระบบของการไฟฟ้า

2.1.3 ลำดับเฟสฮาร์โมนิก

วิศวกรไฟฟ้าจะใช้วิธีการองค์ประกอบสมมาตร (symmetrical) เพื่อการอธิบายพฤติกรรมระบบไฟฟ้า 3 เฟส โดยระบบไฟฟ้า 3 เฟส จะถูกอธิบายจากระบบ 1 เฟส 3 ชุด เพื่อความง่ายต่อการวิเคราะห์ ซึ่งอธิบายในรูปแบบของลำดับเฟสฮาร์โมนิก ได้แก่ ลำดับบวก (positive sequence) ลำดับลบ (negative sequence) และลำดับศูนย์ (zero sequence)

ในระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่สมดุลอย่างสมบูรณ์นั้น ลำดับเฟสฮาร์โมนิกจะหาได้จากการคูณลำดับฮาร์โมนิก (h) ด้วยการหมุนของเฟสลำดับบวก รูปคลื่นผิผิวในระบบไฟฟ้าจะประกอบด้วยลำดับคี่เท่านั้น และมีการหมุนของเฟสฮาร์โมนิกลำดับคี่เท่านั้น ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

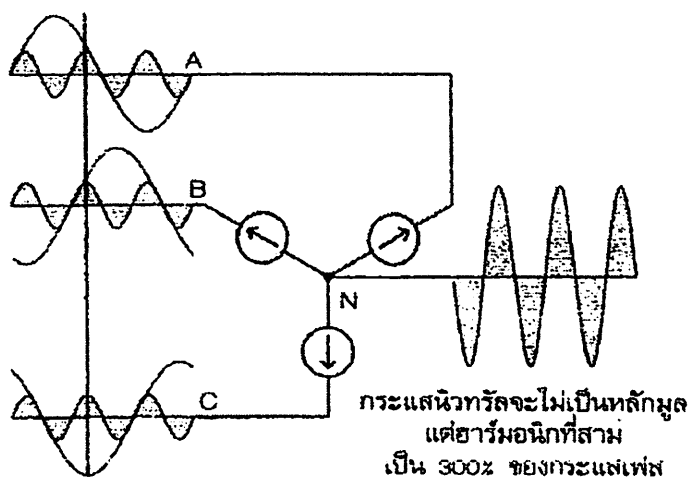
- ฮาร์โมนิกของลำดับ $h = 1, 7, 13, \dots$ เป็นลำดับบวกอย่างสมบูรณ์
- ฮาร์โมนิกของลำดับ $h = 5, 11, 17, \dots$ เป็นลำดับลบอย่างสมบูรณ์
- ฮาร์โมนิกของลำดับเลขคี่คูณสาม (Triplens) $h = 3, 9, 15, \dots$ เป็นลำดับศูนย์อย่างสมบูรณ์

2.1.4 ฮาร์โมนิกเลขคี่คูณสาม (Triplen harmonics)

ฮาร์โมนิกเลขคี่คูณสาม เป็นการคูณเลขคี่เข้ากับฮาร์โมนิกที่สาม ($h = 3, 9, 15, \dots$) ซึ่งควรได้รับการพิจารณาเป็นพิเศษเนื่องจากเป็นลำดับฮาร์โมนิกที่สร้างความเสียหายให้เกิดขึ้นในระบบ เนื่องจากเลขคี่คูณสามจะส่งผลกระทบต่อระบบวาย (Y) ที่มีการต่อลงดิน เนื่องจากว่าจะมีกระแสไหลในสายนิวทรัล

กรณีระบบที่มีโหลดหนึ่งเฟสที่ถูกทำให้สมดุลอย่างสมบูรณ์ และสมมุติว่ามีฮาร์โมนิกลำดับที่สาม กระแสไฟฟ้ารวมที่จุดนิวทรัล จะมีผลให้กระแสไฟฟ้าความถี่หลักมูลในนิวทรัลเป็นศูนย์ แต่ฮาร์โมนิกที่สามจะสร้างกระแสในนิวทรัลเป็นสามเท่าของกระแสไฟฟ้าเฟสเนื่องจากมีการร่วมเฟสของกระแสฮาร์โมนิก ดังแสดงตามภาพประกอบที่ 2.6

กระแสหลักมูลที่สมดุลรวมกันเป็น 0
แต่กระแสฮาร์มอนิกที่สาม
ที่สมดุลจะหักกันสนิท



ภาพประกอบที่ 2.6 กระแสนิวทรัลมีค่าสูงในวงจรที่ต่อกับโหลดไม่เชิงเส้น

2.1.5 ผลกระทบฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้า

ปัญหาทั่วไปที่เกิดจากฮาร์มอนิก มีส่วนของกระแสฮาร์มอนิก และแรงดันฮาร์มอนิก ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า และประสิทธิภาพไฟฟ้าในระบบหลายประการ ยกตัวอย่าง เช่น

1. ผลกระทบต่อหม้อแปลงไฟฟ้า

- กระแสฮาร์มอนิกทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลด และกำลังสูญเสียสเตรย์ฟลักซ์ (Stray flux) เพิ่มขึ้น

- แรงดันฮาร์มอนิก ทำให้เกิดกำลังสูญเสียแบบไหลวน (Current) และกำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ในแกนเหล็กเพิ่มขึ้น

- ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ระหว่างขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ากับคาปาซิเตอร์ของสาย

2. ผลกระทบต่อคาปาซิเตอร์

- เกิดความร้อน และความเครียดไดอิเล็กทริกต่อคาปาซิเตอร์

- เกิดกำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์ เนื่องจากแรงดันผิผิวขึ้น

3. ผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายในระบบ

- พิจารณาเมื่อขนาดประสิทธิภาพไฟฟ้ามากขึ้น ทำให้ต้นทุนสูงขึ้น

- ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง ส่งผลให้ค่าไฟฟ้าที่จ่ายเพิ่มขึ้น

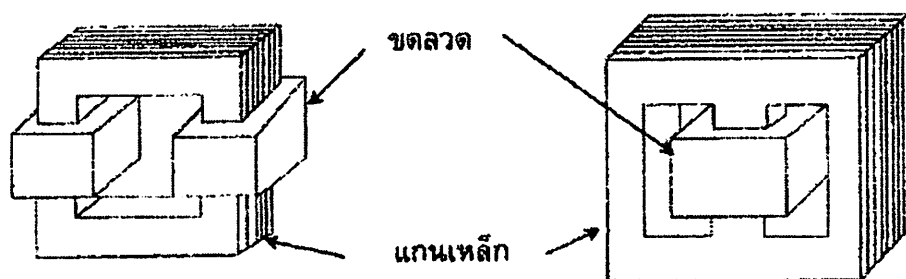
2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นปริภัณฑ์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจากวงจรด้านหนึ่งไปยังวงจรอีกด้านหนึ่ง โดยการเปลี่ยนแปลงทั้งค่าแรงดันและกระแส หม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไปประกอบด้วยขดลวดพันอยู่วงจรแม่เหล็กเดียวกันอย่างน้อย 2 ชุด เรียกว่า ขดลวดด้านรับแรงดันจากแหล่งจ่าย เรียกว่า ขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) และขดลวดด้านจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับโหลด เรียกว่า ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding)

โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญอยู่ 2 ส่วน แกนเหล็ก (Core) ซึ่งทำหน้าที่เป็นเส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก มีลักษณะของการจัดวางหรือการจัดรูปของแกนเหล็ก แบ่งได้ 2 ประเภท คือ

แบบ Core Type ตามภาพประกอบ 2.7 (ก) มีลักษณะครึ่งของขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิ พันไว้รอบขาแต่ละข้างของแกนเหล็ก

แบบ Shell Type ตามภาพประกอบ 2.7 (ข) มีลักษณะที่ขดลวดทั้งสองพันที่แกนกลางของแกนเหล็ก

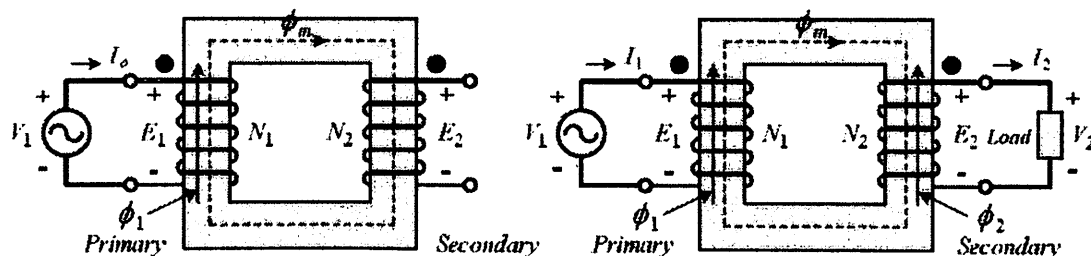


(ก) Core Type

(ข) Shell Type

ภาพประกอบที่ 2.7 โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า

หลักการทำงานหม้อแปลงไฟฟ้า



ก. กรณีไม่มีโหลด

ข. กรณีมีโหลด

ภาพประกอบที่ 2.8 การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า

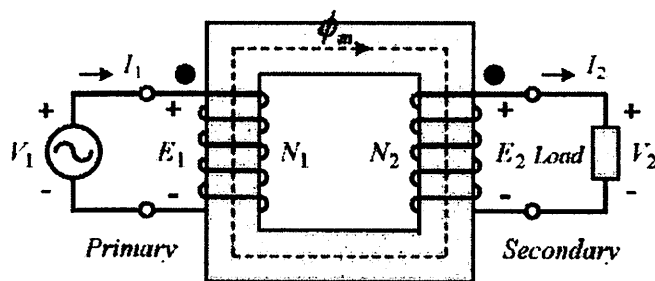
เพื่อทำความเข้าใจในหลักการการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเบื้องต้นก่อนที่ศึกษาในส่วนของคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ และหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นจริงต่อไป จากภาพประกอบที่ 2.8 จะพิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ไร้โหลด และกรณีที่มีโหลด

ขณะที่หม้อแปลงยังไม่จ่ายโหลด จะมีกระแสไหลจากแหล่งจ่ายไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ เรียกว่า กระแสกระตุ้น (Exciting current: I_ϕ) เป็นกระแสไฟฟ้าค่าต่ำๆ โดยปกติมีค่าประมาณ 2-5 % ของกระแสพิกัด ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ เส้นแรงแม่เหล็กนี้จะไหลในแกนเหล็กไปตัดผ่านขดลวด N_1 และ N_2 ทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ E_1 และ E_2 ตามลำดับ เรียกเส้นแรงแม่เหล็กนี้ว่า เส้นแรงแม่เหล็กร่วม (Mutual flux: ϕ_m) กรณีที่ไร้โหลด เส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กจะทำกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดปฐมภูมิ นั่นคือ $\phi_m = \phi_1$

เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลด กระแสที่ไหลผ่านขดลวดทุติยภูมิ I_2 หรือกระแสโหลด ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_2 ในทิศทางตรงกันข้ามกับ ϕ_1 ตามกฎของเลนซ์ เพื่อรักษาให้ ϕ_m มีค่าเท่าเดิม ทำให้ ϕ_1 เพิ่มขึ้น $\phi_m = \phi_1 - \phi_2$ เป็นเหตุให้กระแสไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิมากขึ้นจาก I_ϕ เป็น I_1

เมื่อทราบหลักการการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในเบื้องต้น จำเป็นต้องทราบถึงลักษณะการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าและการเกิดค่าสูญเสีย โดยจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ลักษณะ คือ หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ (Ideal transformer) และหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นจริง (Actual transformer)

2.2.1 หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ (Ideal transformer) เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการสมมติขึ้นมาว่า เป็นหม้อแปลงที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากว่าเป็นหม้อแปลงที่ไม่พิจารณาการสูญเสียในแกนเหล็ก การสูญเสียในขดลวด และการสูญเสียเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล มีไว้เพื่อเป็นการศึกษาถึงคุณสมบัติการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้า



ภาพประกอบที่ 2.9 หม้อแปลงในอุดมคติ

จากภาพประกอบที่ 2.9 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E_1 และ E_2 มีค่าเท่ากับ

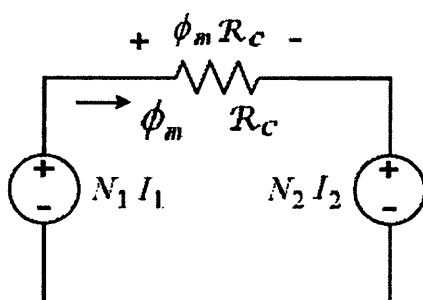
$$V_1 = E_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad \text{V} \quad (11)$$

$$V_2 = E_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad \text{V} \quad (12)$$

จากสมการที่ 11 และ 12 จะได้อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าและจำนวนรอบของขดลวดทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยอัตราส่วนนี้ เรียกว่าอัตราส่วนรอบหม้อแปลงไฟฟ้า (Turn ratio: a)

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (13)$$

เมื่อต่อโหลดทางด้านทุติยภูมิ หม้อแปลงไฟฟ้าจะมีกระแสทุติยภูมิ i_2 ไหล ซึ่งทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านทุติยภูมิ ไปต้านแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านปฐมภูมิ สามารถแสดงตามภาพประกอบที่ 2.10



ภาพประกอบที่ 2.10 วงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ

เขียนเป็นสมการได้

$$-N_1 I_1 + \phi_m \mathcal{R}_c + N_2 I_2 \quad (14)$$

แต่เนื่องจากคุณสมบัติหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ ทำให้ \mathcal{R}_c มีค่าเท่ากับศูนย์

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 = 0 \quad (15)$$

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (16)$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = a \quad (17)$$

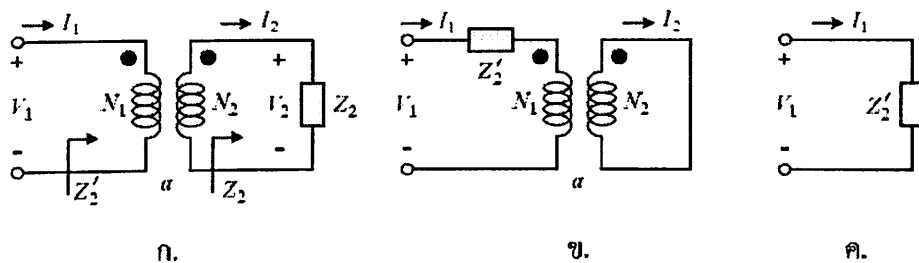
เมื่อนำสมการที่ (13) และ (17) เขียนรวมกันจะได้ว่า

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = a \quad (18)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่ด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับด้านทุติยภูมิ

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (19)$$

ย้ายค่า (referred) อิมพีแดนซ์นั้น จากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง สามารถใช้หลักการของ turn ratio ช่วยในการคำนวณ ดังภาพประกอบที่ 2.10



ภาพประกอบที่ 2.11 การย้ายค่าอิมพีแดนซ์

เมื่อจะย้ายค่าอิมพีแดนซ์จากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง เช่นดังภาพประกอบที่ 2.10 จะเป็นการย้ายค่าอิมพีแดนซ์จากด้านทุติยภูมิไปด้านปฐมภูมิ คือ จาก Z_2 ของด้านทุติยภูมิ ไปเป็นค่า Z'_2 จะได้ว่า

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} \quad (20)$$

$$Z_2' = \frac{V_1}{I_1} \quad (21)$$

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} \text{ และ } I_1 = \frac{I_2}{a} \quad (22)$$

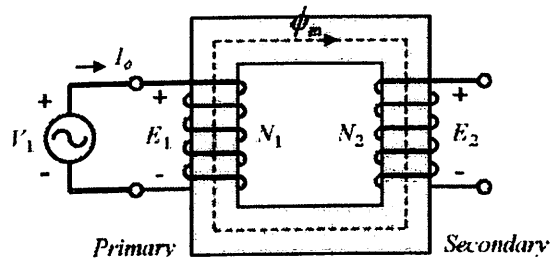
$$Z_2' = \frac{V_1}{I_1} = a^2 \frac{V_2}{I_2} = a^2 Z_2 \quad (23)$$

2.2.2 หม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นจริง (Actual transformer) จะพิจารณาตามคุณสมบัติจริงของหม้อแปลงไฟฟ้า คือ มีการสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า ได้แก่

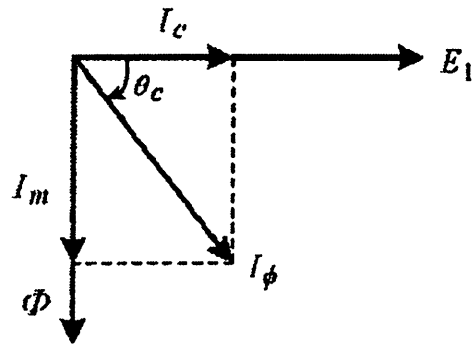
1. การสูญเสียในแกนเหล็ก
2. การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของขดลวดค้ำานปฐมภูมิและทุติยภูมิ
3. การสูญเสียที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล

หลักการทํางานของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นจริง สามารถแบ่งการพิจารณาเป็น 2 กรณี คือ สภาวะที่ไร้โหลด และ สภาวะที่มีโหลด

ในสภาวะไร้โหลด (No load condition) ในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้ายังไม่ได้มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าออกไปทางค้ำานทุติยภูมิ จะเห็นว่าขดลวดปฐมภูมิจะเพียงกระแสกระตุ้นเท่านั้น ตามภาพประกอบที่ 2.12 พบว่าจะเกิดค้ำากำลังไฟฟ้าสูญเสียไปในการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นสนามแม่เหล็ก เรียกว่า การสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) การสูญเสียนี้จะกำหนดหรือพิจารณาให้ค่ากระแสกระตุ้นประกอบด้วยกระแส 2 ส่วน คือ กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (magnetizing current : I_m) และกระแสที่ทำให้เกิดค้ำาสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss current : I_c) โดยมีความสัมพันธ์ตามภาพประกอบที่ 2.13



ภาพประกอบที่ 2.12 หม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นจริงในสภาวะไร้โหลด



ภาพประกอบที่ 2.13 เฟสเซอร์ไดอะแกรมส่วนประกอบค่ากระแสกระตุ้น

จากภาพประกอบ จะเห็นว่า I_ϕ มีเฟสตามหลัง E_1 เป็นมุม θ_c มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_\phi = I_c + I_m \quad (24)$$

$$I_c = I_\phi \cos \theta_c \quad (25)$$

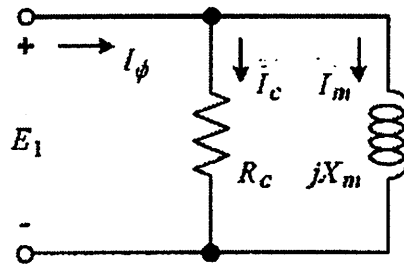
$$I_m = I_\phi \sin \theta_c \quad (26)$$

พารามิเตอร์ 2 ค่า เมื่อพิจารณาจากสมการ เสมือนค่าทั้งสองต่อขนานกันอยู่ โดยกำหนดให้ค่า I_c ไหลผ่าน R_c ซึ่งเป็นความต้านทานสมมูลการสูญเสียในแกนเหล็ก (equivalent core loss resistance)

$$I_c = \frac{E_1}{R_c} \quad (27)$$

และค่า I_m ไหลผ่าน X_m ซึ่งเป็นค่ารีแอกแตนซ์สมมูลการสร้างสนามแม่เหล็ก (equivalent magnetizing reactance)

$$I_m = \frac{E_1}{jX_m} \quad (28)$$



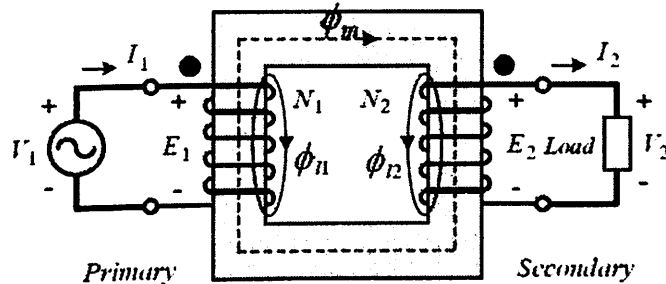
ภาพประกอบที่ 2.14 วงจรสมมูลค่ากระแสกระตุ้น

ค่าสูญเสียในแกนเหล็ก คือค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ตัวต้านทาน R_c มีค่าเท่ากับ

$$P_c = I_c^2 R_c = \frac{E_1^2}{R_c} = E_1 I_c = E_1 I_\phi \cos \theta_c \quad (29)$$

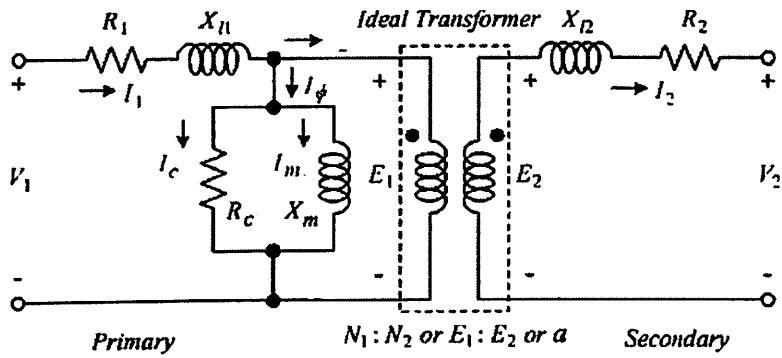
เมื่อ $\cos \theta_c$ คือ ค่าตัวประกอบกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไร้โหลด

ในสถานะที่มีโหลด (On load condition)



ภาพประกอบที่ 2.15 แบบจำลองการทำงานหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นจริง

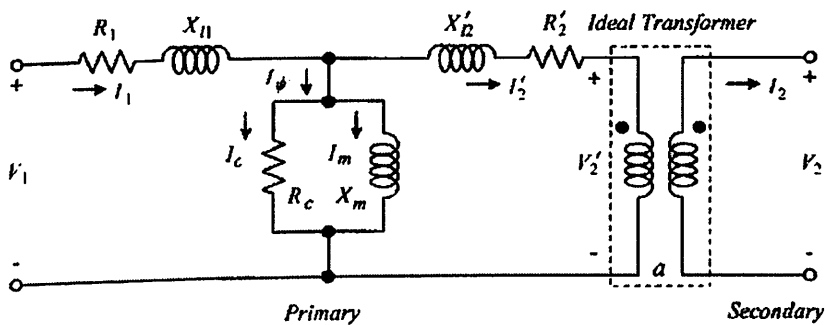
จากภาพประกอบที่ 2.15 เป็นแบบจำลองการทำงานจริงเมื่อมีการจ่ายโหลด ซึ่งจะพิจารณา
รวมการสูญเสียทั้งหมด คือ การสูญเสียในแกนเหล็ก การสูญเสียในขดลวด และการสูญเสีย
เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล ซึ่งเมื่อนำเขียนเป็นวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นจริงจะ
เป็นไปตามภาพประกอบที่ 2.16



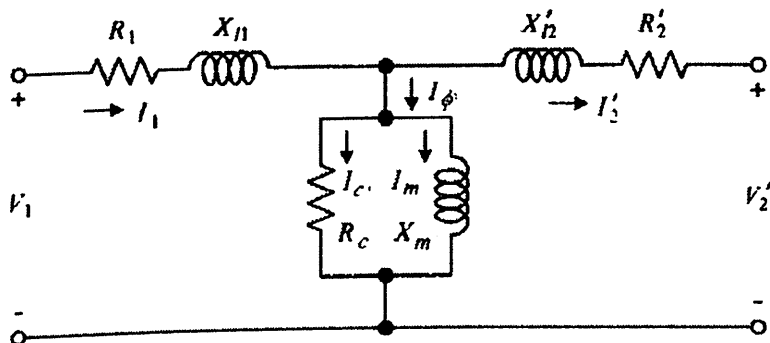
ภาพประกอบที่ 2.16 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นจริง

เมื่อ

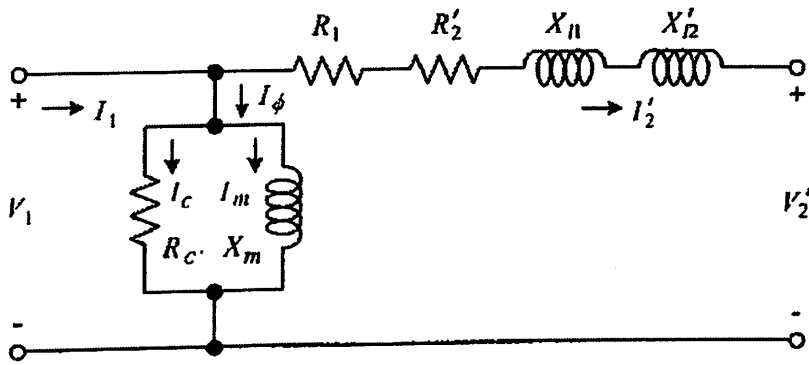
- R_1 คือ ค่าความต้านทานขดลวดปฐมภูมิ
- R_2 คือ ค่าความต้านทานขดลวดทุติยภูมิ
- X_{11} คือ ค่ารีแอกแตนซ์ขดลวดปฐมภูมิเกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล ϕ_{11}
- X_{22} คือ ค่ารีแอกแตนซ์ขดลวดปฐมภูมิเกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล ϕ_{12}
- R_c คือ ค่าความต้านทานสมมูลการสูญเสียในแกนเหล็ก
- X_m คือ ค่ารีแอกแตนซ์สมมูลการสร้างสนามแม่เหล็ก



ภาพประกอบที่ 2.17 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นจริงเมื่อย้ายค่ามาด้านปฐมภูมิ

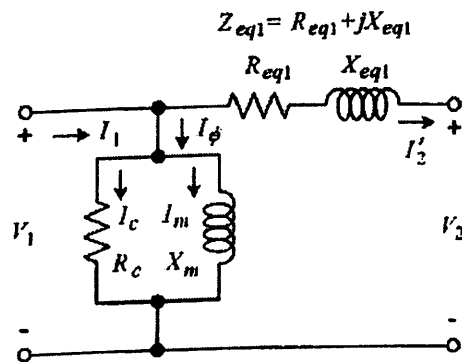


ภาพประกอบที่ 2.18 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นจริงทางด้านปฐมภูมิ



ภาพประกอบที่ 2.19 วงจรสมมูลเมื่อย้ายค่าในส่วนกระแสกระตุ้นมาพร้อมแหล่งจ่าย V_1

จากภาพประกอบที่ 2.17 เป็นวงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นจริงที่แสดงค่าทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ แต่พบว่ายังมีความยุ่งยากในการคำนวณจึงได้ย้ายค่ามาทางด้านปฐมภูมิ เพื่อง่ายต่อการคำนวณดังแสดงตามภาพประกอบที่ 2.18 ซึ่งยังพบว่ามีความยุ่งยากบ้าง เนื่องจากรูปแบบวงจรเป็นแบบ T-circuit จึงได้ย้ายส่วนประกอบของกระแสกระตุ้นมาพร้อมที่แหล่งจ่าย V_1 เพื่อง่ายต่อการคำนวณดังในวงจรตามภาพประกอบที่ 2.19 และตัดแปลงวงจรให้ง่ายและมีการใช้งานที่สะดวกขึ้น จึงรวมค่าความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิกับค่าความต้านทานของขดลวดทุติยภูมิที่ย้ายมาทางปฐมภูมิ และรวมค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลด้านปฐมภูมิและค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลด้านทุติยภูมิที่ย้ายมาทางปฐมภูมิ สามารถแสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นจริงตามภาพประกอบที่ 2.20



ภาพประกอบที่ 2.20 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยประมาณ

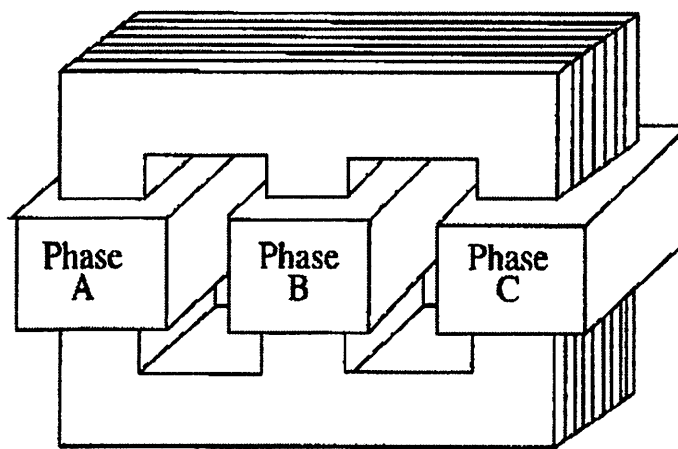
$$R_{eq1} = R_1 + R_2' = R_1 + a^2 R_2 \quad (30)$$

$$X_{eq1} = X_{11} + X_{12}' = X_1 + a^2 X_{12} \quad (31)$$

$$V_1 = V_2' + I_2'(R_{eq1} + jX_{eq1}) \quad (32)$$

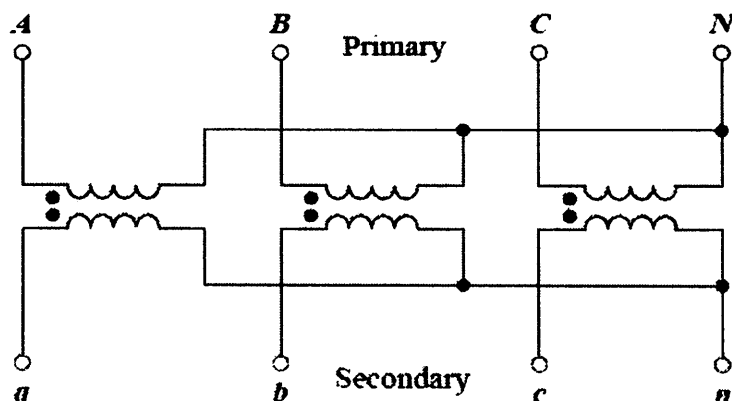
2.2.3 หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส (Three Phase Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส มีหลักการเช่นเดียวกับแบบ 1 เฟส โดยนำหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส มาต่อกันให้เป็น 3 เฟสแต่ก็ทำให้สูญเสียพื้นที่ในการติดตั้ง และพื้นที่การวางหม้อแปลงไฟฟ้า มากกว่าแบบ 3 เฟส นอกจากนั้นก็ยังมีน้ำหนักมากกว่าเมื่อคิดบนฐานพิคัดกำลังไฟฟ้าเท่ากัน โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าปัจจุบันจึงเป็นแบบ 3 เฟสในโครงสร้างชุดเดียวกัน

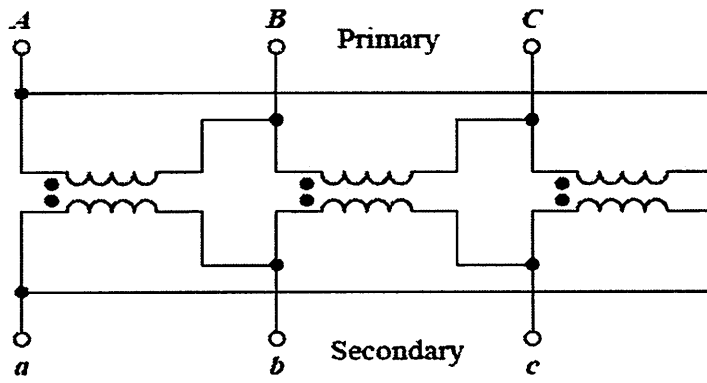


ภาพประกอบที่ 2.21 โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส

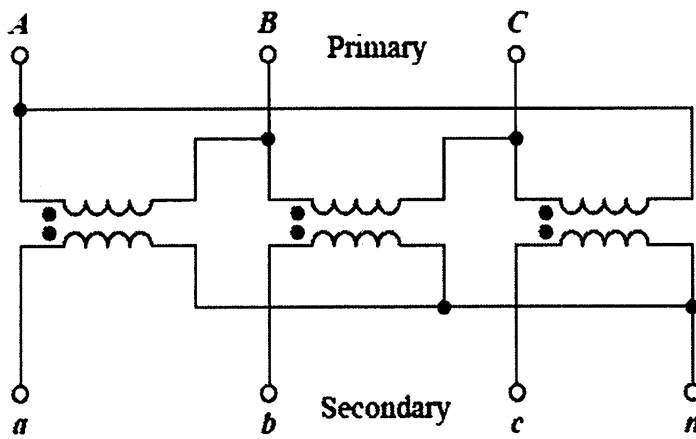
โดยทั่วไปต่อขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสก็จะมี การต่อขดลวดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ เป็นแบบสตาร์ (Y) และแบบเดลต้า (Δ)



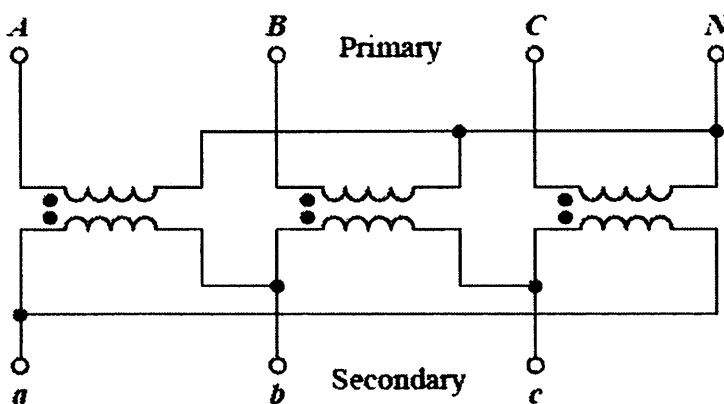
ภาพประกอบที่ 2.22 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ Y-Y



ภาพประกอบที่ 2.23 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ $\Delta - \Delta$

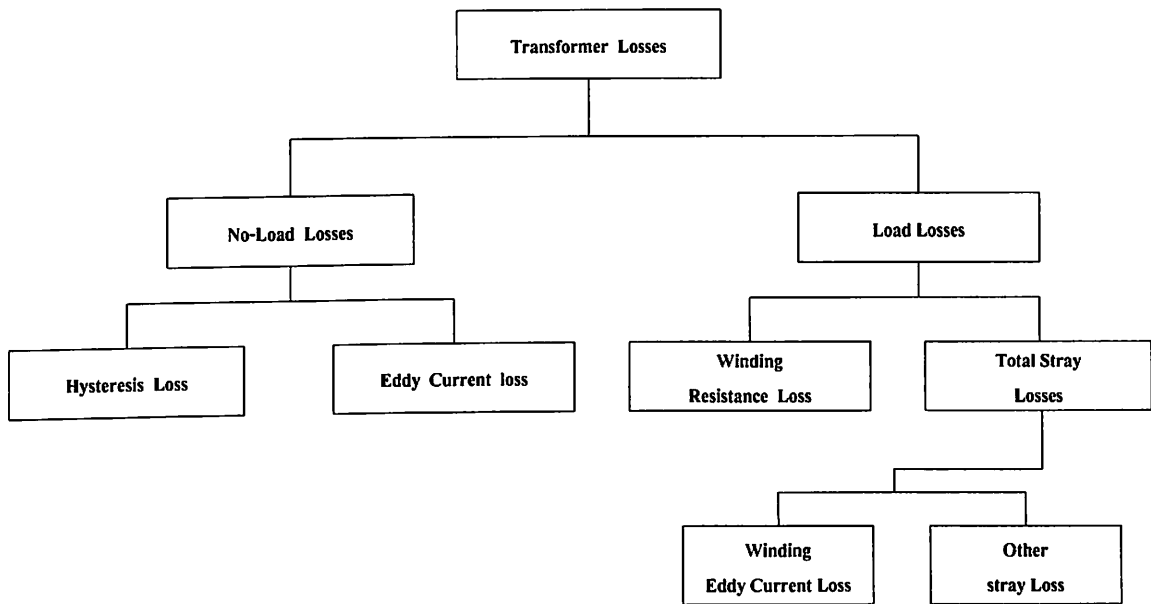


ภาพประกอบที่ 2.24 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ $\Delta - Y$



ภาพประกอบที่ 2.25 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ $Y - \Delta$

การสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า มีข้อแนะนำไว้ในมาตรฐาน IEEE Std C57.12.90 และ IEEE Std C57.12.91 ได้แบ่งการสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า ตามภาพประกอบดังนี้



ภาพประกอบที่ 2.26 การสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า

จากภาพประกอบที่ 2.26 เมื่อนำมาแสดงในรูปของสมการ จะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$P_T = P_{NL} + P_{LL} \quad \text{W} \quad (33)$$

เมื่อ

- P_T คือ การสูญเสียรวม
 P_{NL} คือ การสูญเสียแบบไร้โหลด
 P_{LL} คือ การสูญเสียแบบมีโหลด

การสูญเสียแบบไร้โหลด (No Load Loss) เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันกระตุ้นแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า (Voltage excitation) ประกอบด้วย การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอรีซิส (Hysteresis Loss) และ การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (Eddy current loss) สมการหาค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก หรือการสูญเสียแบบไร้โหลด คือ

$$P_{NL} = P_h + P_e \quad \text{W} \quad (34)$$

การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์ซิส

$$P_h = K_h V f B_{\max}^n \quad \text{W} \quad (35)$$

การสูญเสียแบบกระแสไหลวนในแกนเหล็ก

$$P_e = K_e (B_{\max} t f)^2 \quad \text{W/m}^3 \quad (36)$$

เมื่อ

V	คือ	ปริมาตรของแกนเหล็ก, ลูกบาศก์เมตร
K_h	คือ	ค่าคงที่ hysteresis constant ขึ้นอยู่กับเนื้อสารแม่เหล็ก
n	คือ	ค่าที่ได้จากการทดลอง มีค่าประมาณ 1.5-2.5
K_e	คือ	ค่าคงที่จากสารที่ทำแกนแม่เหล็ก
t	คือ	ความหนาของเหล็กบางแต่ละแผ่นที่มาอัดซ้อนเป็นแกนเหล็ก
f	คือ	ความถี่ของระบบไฟฟ้า
B_{\max}	คือ	ค่าสูงสุดของ Magnetic flux density

การสูญเสียแบบมีโหลด (Load Losses) คือ การสูญเสียขณะที่จ่ายโหลดประกอบด้วย การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของขดลวดตัวนำ การสูญเสียสเตรย์ทั้งหมด ซึ่งแบ่งออกเป็นการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวด และการสูญเสียสเตรย์ในส่วนประกอบ โครงสร้างของ หม้อแปลงไฟฟ้ายกเว้นขดลวด แสดงสมการ ดังนี้

$$P_{L.L.} = P_{dc} + P_{TSL} = P_{dc} + (P_{EC} + P_{OSL}) \quad \text{W} \quad (37)$$

เมื่อ

P_{dc}	คือ	การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของขดลวดตัวนำ $I^2 R_{DC}$
P_{TSL}	คือ	การสูญเสียสเตรย์ทั้งหมด
P_{EC}	คือ	การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวด
P_{OSL}	คือ	การสูญเสียสเตรย์ในส่วนประกอบ โครงสร้างยกเว้นขดลวด

2.3 ผลกระทบฮาร์มอนิกที่มีต่อหม้อแปลงไฟฟ้า

2.3.1 แรงดันฮาร์มอนิก (Harmonic voltage) ทำให้เกิดการสูญเสียฮีสเตอร์ซิส และ กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็กเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากว่าระบบไฟฟ้ามีการควบคุมคุณภาพไฟฟ้ามีค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมน้อยกว่า 5 % และระดับปริมาณของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล ซึ่งในประเด็นของผลกระทบจากแรงดันฮาร์มอนิกสามารถที่จะละเลยผลกระทบดังกล่าวได้

2.3.2 กระแสฮาร์มอนิก (Harmonic current) ในระบบไฟฟ้าส่วนมากแล้ว ปัญหาความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกจะเป็นในส่วนของกระแสฮาร์มอนิก โดยกระแสฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดการสูญเสียในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า และส่วนประกอบ โครงสร้างอื่นๆของหม้อแปลงไฟฟ้า กระแสฮาร์มอนิกมีผลกระทบต่อการสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า ได้แก่

1. กระแสฮาร์มอนิกมีผลต่อการสูญเสียในขดลวด I^2R มากขึ้น เนื่องจากกระแส rms รวมทั้งหมด มีส่วนประกอบฮาร์มอนิกรวมอยู่ด้วย
2. กระแสฮาร์มอนิกมีผลต่อการสูญเสียไหลวนในขดลวด P_{EC} การสูญเสียเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไหลวนยกกำลังสองและความถี่กำลังสอง
3. กระแสฮาร์มอนิกมีผลต่อการสูญเสียสเตรย์ในส่วนประกอบ โครงสร้าง ยกเว้นขดลวด P_{OSL} เนื่องจากกระแสไหลวนที่รูปคลื่นไม่เป็นไซน์
4. ส่วนประกอบที่เป็นกระแสดตรงของไหลวน ทำให้การสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่กระแสร่างสนามแม่เหล็กและระดับเสียงรบกวนที่ได้ยินจะเพิ่มขึ้น

มาตรฐาน IEEE std C57.110-1998 ระบุการหาค่าการสูญเสียเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังนี้

การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวด (winding Eddy current Loss: P_{EC}) มีสมการหาค่า ดังนี้

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} h^2 \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 \quad W \quad (38)$$

เมื่อ

P_{EC}	คือ	การสูญเสียสเตรย์ในขดลวด
P_{EC-R}	คือ	พิกัดการสูญเสียสเตรย์ในขดลวด
h	คือ	ลำดับฮาร์มอนิกที่

I_h คือ กระแสฮาร์โมนิกในลำดับฮาร์โมนิกที่ h
 I_R คือ พิกัดกระแสไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล

การสูญเสียสเตรย์ในส่วนประกอบโครงสร้างยกเว้นขดลวด

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} h^{0.8} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 \quad \text{W} \quad (39)$$

เมื่อ

P_{OSL} คือ การสูญเสียสเตรย์ในส่วนประกอบโครงสร้างยกเว้นขดลวด
 P_{OSL-R} คือ พิกัดการสูญเสียสเตรย์ในส่วนประกอบโครงสร้างยกเว้นขดลวด

เพื่อความสะดวกในการคำนวณหาค่า winding eddy current loss จึงมีการกำหนดแฟคเตอร์เพื่อความสะดวกในการคำนวณ เรียกว่า Harmonic load factor for winding eddy current loss : F_{HL}

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I} \right] h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_2}{I} \right]} \quad \text{W} \quad (40)$$

อีกหนึ่งแฟคเตอร์เพื่อความสะดวกในการคำนวณในการหาค่า Other stray loss factor จึงมีการกำหนด แฟคเตอร์ เรียกว่า Harmonic load factor for other stray loss : F_{HL-STR}

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I} \right] h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_2}{I} \right]} \quad \text{W} \quad (41)$$

เพราะฉะนั้น สามารถหาค่าความสูญเสียแบบมีโหลด (Load loss)

$$P_{LL} = P + F_{HL} \times P_{EC} + F_{OSL} \times P_{OSL} \quad \text{W} \quad (42)$$

2.4 ฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า

ฉนวนที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า มีทั้งฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer insulation oil) และฉนวนกระดาษหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer insulation paper) โดยประเภทของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ามักมีการใช้งานจากประเภทต่างๆ เช่น น้ำมันแร่ หรือน้ำมันจากพืชธรรมชาติ ซึ่งมีการวิจัยและพัฒนาในปัจจุบัน หรือแม้กระทั่งวัสดุที่ใช้ทำเป็นฉนวนกระดาษเอง เช่น Pressboard, Kraft paper และวัสดุอื่นๆ

2.4.1 ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า คุณสมบัติที่มีการใช้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า มีดังนี้

- ความสามารถทนทานต่อแรงดันไฟฟ้าสูง
- ระบายความร้อนจากขดลวดและแกนเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- ป้องกันขดลวดตัวนำ และแกนเหล็กจากปฏิกิริยาทางเคมี
- ป้องกันการเกิดตะกอนหรือขี้ไต้ในหม้อแปลงไฟฟ้า

2.4.2 ฉนวนกระดาษหม้อแปลงไฟฟ้า

เป็นฉนวนประเภทของแข็งที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า คุณสมบัติที่มีการใช้ฉนวนกระดาษในหม้อแปลงไฟฟ้า คือ ทนทานต่อแรงทางไฟฟ้า และแรงทางกลซึ่งเป็นผลจากแรงดันไฟฟ้าสูง ดังนั้นฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำหน้าที่หลักๆ ใน 4 ประเด็น คือ

- มีความสามารถในการทนทานต่อแรงดันไฟฟ้าสูงทั้งในสถานะใช้งานปกติ และสถานะเกิดแรงดันเสิร์จ เช่น สวิตช์เสิร์จ หรือ เสิร์จฟ้าผ่า

- มีความสามารถทนทานต่อแรงทางกล (mechanical) และ ความร้อน (Thermal) ทั้งในสถานะใช้งานปกติ หรือสถานะที่เกิดการลัดวงจร

- มีความสามารถในการระบายหรือถ่ายเทความร้อนได้ดี

- มีความสามารถในการที่จะรักษาสภาพความเป็นฉนวนได้ดี

2.4.3 การเสื่อมสภาพของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า

การเสื่อมสภาพของฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ปกติแล้วจะมาจากสาเหตุออกซิเดชัน เกิดเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนภายในหม้อแปลงที่อาจมากับน้ำหรือเข้าสู่หม้อแปลงในขั้นตอนการผลิต ซึ่งจะเกิดการออกซิไดซ์น้ำมันในกลุ่มของสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวจนเกิดการเสื่อมสภาพของน้ำมัน น้ำมันมีลักษณะเหลืองเข้มมากขึ้นจนกลายเป็นสีน้ำตาลในระยะเวลาที่รวดเร็วกว่าปกติ และอีกปัจจัยที่ทำให้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าเสื่อมสภาพ

คือ ความชื้น (Moisture) นอกจากนี้ยังมีปัจจัยเสริมที่ช่วยเร่งให้เกิดออกซิเดชันให้เร็วขึ้น เช่น อุณหภูมิ การสั่นสะเทือน แรงดันเสิร์จ เป็นต้น

การเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษหม้อแปลงไฟฟ้า ฉนวนกระดาษมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากว่าในการวินิจฉัยสุขภาพหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer health diagnosis) จะวินิจฉัยจากสภาพของฉนวนกระดาษหม้อแปลงไฟฟ้า โดยเป็นดัชนีที่บ่งชี้ได้ถึงอายุการใช้งาน หม้อแปลงไฟฟ้าได้ เพราะหากฉนวนกระดาษเสื่อมสภาพ หรือเกิดความเสียหายทางกายภาพแล้ว ถือได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าลูกนั้น ต้องได้รับการแก้ไขให้กับมาใช้งานได้ อีก หรือเลิกการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าลูกนั้น การเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษก็มีสาเหตุมาจาก ความเครียดทางไฟฟ้า ความเครียดทางกล หรือความเครียดทางเคมี ซึ่งอาจมาจากปัจจัยอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือมาจากปัจจัยหลายอย่างรวมกันก็เป็นได้

2.4.4 การทดสอบเพื่อวิเคราะห์ฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า

การประเมินสภาพการใช้งาน หรือประเมินอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้านั้น จะมีวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้านั้น มีหลายวิธีการ ซึ่งสามารถแบ่งวิธีการตามประเภทของฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า ได้ดังนี้

วิธีการวิเคราะห์ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ได้แก่

1. Dissolved gas analysis
2. Moisture
3. Tan-delta
4. Resistivity
5. Breakdown voltage
6. Acidity

วิธีการวิเคราะห์ฉนวนกระดาษหม้อแปลงไฟฟ้า ได้แก่

1. Tensile strength
2. Degree of polymerization
3. Partial discharge
4. Furan analysis

การทดสอบสภาพฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นที่นิยมวิธีหนึ่ง คือ การวิเคราะห์ก๊าซเจือปน ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า (Dissolved gases analysis) หรือการวิเคราะห์ก๊าซผิพรองที่เกิดขึ้น ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า (Fault gases analysis)

2.4.5 การวิเคราะห์ก๊าซผุดพร่องในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า (Fault gases analysis)

ก๊าซที่เกิดขึ้นจะเป็นก๊าซที่สามารถละลาย (solubility) ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ก๊าซที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

Hydrocarbon and hydrogen	Carbon oxide	Non-fault gases
Methane (CH ₄)	Carbon monoxide (CO)	Nitrogen (N ₂)
Ethane (C ₂ H ₆)	Carbon dioxide (CO ₂)	Oxygen (O ₂)
Ethylene (C ₂ H ₄)		
Acetylene (C ₂ H ₂)		
Hydrogen (H ₂)		

การวิเคราะห์ก๊าซผุดพร่องในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นวิธีการวิเคราะห์ก๊าซที่เกิดจากการแตกตัวหรือสลายตัว (decomposition) เนื่องจากฉนวนในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าคือน้ำมันและกระดาษได้รับความเครียดทางไฟฟ้า หรือความเครียดอุณหภูมิ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ก๊าซผุดพร่องที่เกิดขึ้นจากประเภทของฉนวนไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า จะพบว่า

การแตกตัวของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า จะเกิดก๊าซ

- ไฮโดรเจน (H₂)
- มีเทน (CH₄)
- อีเทน (C₂H₆)
- เอทิลีน (C₂H₄)
- อะเซทิลีน (C₂H₂)

การแตกตัวของฉนวนกระดาษ จะเกิดก๊าซ

- ไฮโดรเจน (H₂)
- มีเทน (CH₄)
- คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)
- คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

ซึ่งก๊าซที่ขึ้นสามารถที่จะเกิดจากการที่หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานในสภาวะเงื่อนไขปกติ (Normal condition) และสภาวะที่เกิดการผุดพร่อง (Fault condition) เช่น ในสภาวะปกติมีการ

ทำงานจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด ย่อมเกิดความร้อนในขดลวดและถ่ายเทความร้อนผ่านมายังฉนวนกระดาษ และน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าทำให้ฉนวนมีการเสื่อมสภาพจากการใช้งานตามปกติแต่ปริมาณก๊าซอยู่ในเงื่อนไขหรือเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่หากเกิดจากการที่เกิดการผิพร่องในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าไฟฟ้า ก็จะทำให้ฉนวนมีการเสื่อมสภาพเร็วขึ้นนั่นเอง ดังตารางที่ 2.2 แสดงก๊าซที่เกิดขึ้นตามเงื่อนไขของการเกิดความผิพร่อง

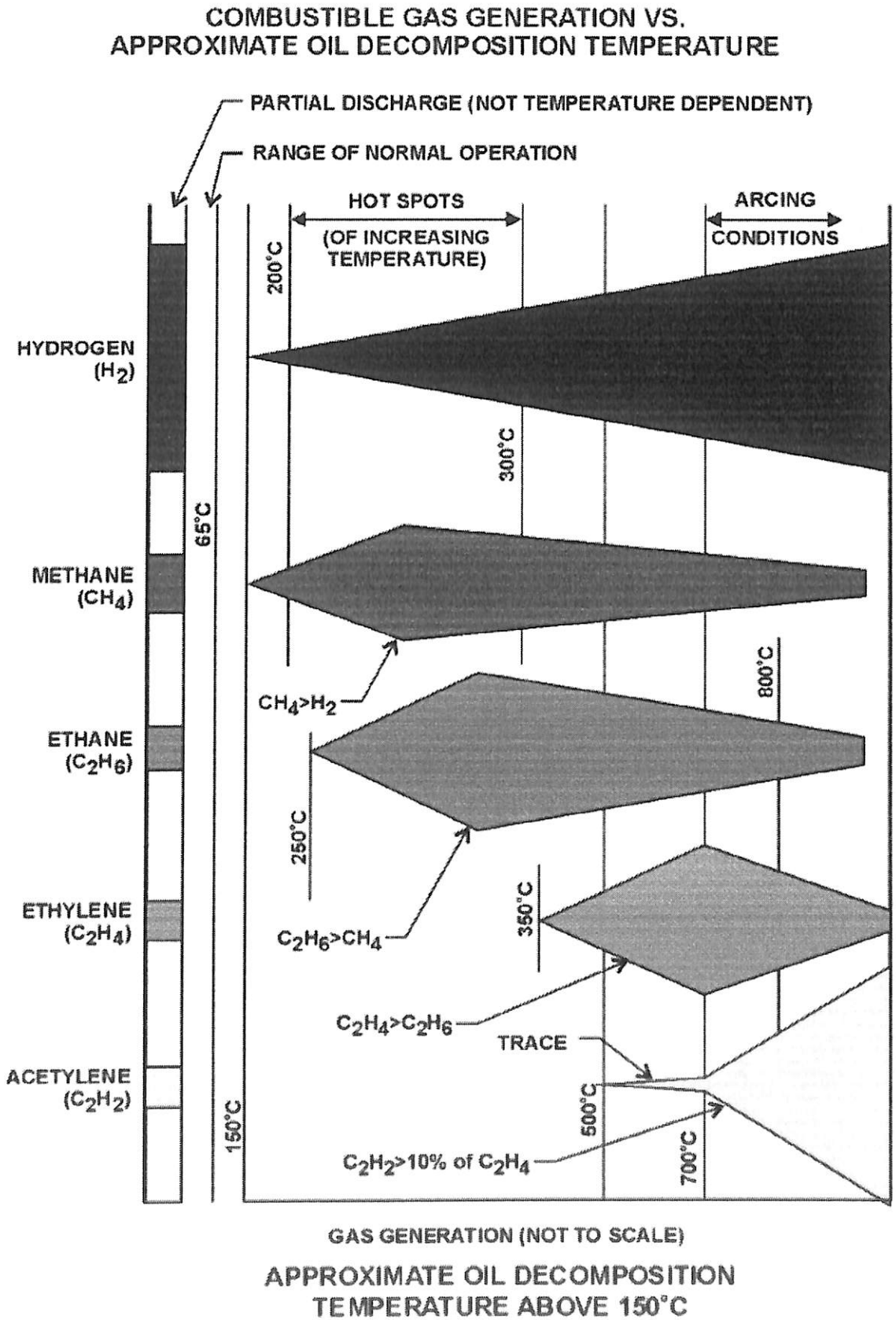
ตารางที่ 2.2 ก๊าซผิพร่องที่เกิดขึ้นตามเงื่อนไขการเกิดความผิพร่อง

Fault type	Fault gases
Corona	
Oil	H ₂
Cellulose	H, CO, CO ₂
Thermal or Overheat	
Oil	
Low temperature	CH ₄ , C ₂ H ₆
High temperature	C ₂ H ₄ , H ₂ (CH ₄ , C ₂ H ₆)
Cellulose	
Low temperature	CO ₂ (CO)
High temperature	CO (CO ₂)
Arcing	H ₂ , C ₂ H ₂ , (CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄)

2.4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซที่เกิดขึ้นกับระดับอุณหภูมิ

จากภาพประกอบที่ 2.24 เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ชนิดของก๊าซ และปริมาณของก๊าซที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงมีรูปแผนภาพแสดงการเกิดก๊าซที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ สามารถอธิบายได้ว่าจากแผนภูมิของก๊าซต้องการแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ชนิดของก๊าซ และปริมาณของก๊าซที่เกิดขึ้น จะเห็นว่าที่อุณหภูมิตั้งแต่ 150 °C ถึง 500 °C จะทำให้น้ำมันมีการแตกตัวและทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน(H₂) ก๊าซมีเทน(CH₄) และเกิดก๊าซอีเทน(C₂H₆) เป็นจำนวนมาก ส่วนก๊าซเอทิลีน(C₂H₄) จะมีการเกิดขึ้นอีกจำนวนหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันสูงขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัวจะพบว่าก๊าซไฮโดรเจน(H₂) มากพอที่จะทำให้พบว่าก๊าซอีเทน(C₂H₆) มีค่ามากกว่า ก๊าซมีเทน(CH₄) และก๊าซเอทิลีน(C₂H₄) มีค่ามากกว่าก๊าซอีเทน(C₂H₆) ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นก๊าซไฮโดรเจน(H₂) ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นก็จะเกิดก๊าซเอทิลีน(C₂H₄) และก๊าซ

อะเซทิลีน(C_2H_2) แต่จะมีค่าขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับการเกิดก๊าซอื่น ซึ่งก๊าซอะเซทิลีนจะสามารถพบได้ชัดเจนขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงตั้งแต่ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ขึ้นไป

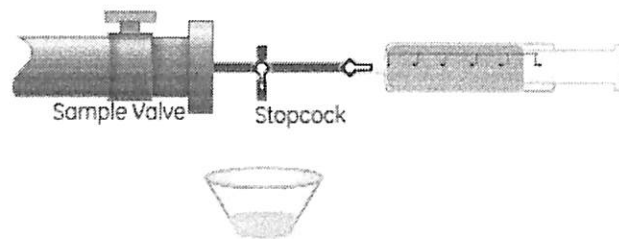


ภาพประกอบที่ 2.27 การเกิดก๊าซผิพรองที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

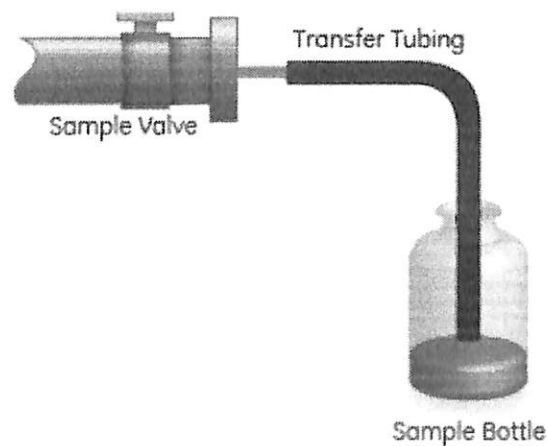
การวิเคราะห์ก๊าซผิพรองในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า จะมีกระบวนการตามมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับในระดับนานาชาติ ตั้งแต่การเก็บตัวอย่างน้ำมัน การแยกก๊าซออกจากตัวอย่างน้ำมัน การวิเคราะห์น้ำมัน และการวินิจฉัยก๊าซที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า โดยมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ก๊าซผิพรองในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าได้แก่ มาตรฐาน ASTM D3612 มาตรฐาน IEC 60567-2005 มาตรฐาน IEC 60599-1999 และมาตรฐาน IEEE C57.104-1991

ขั้นตอนเบื้องต้นในการวิเคราะห์ก๊าซผิพรองในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ

1. การเก็บตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า (Sampling Oil) IEC 60567
 ระบุวิธีการเก็บตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ามีวิธีการหลักๆ อยู่ 2 วิธี Gas Tight Syringe และ Bottle



ภาพประกอบที่ 2.28 การเก็บตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า Gas Tight Syringe



ภาพประกอบที่ 2.29 การเก็บตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า Bottle

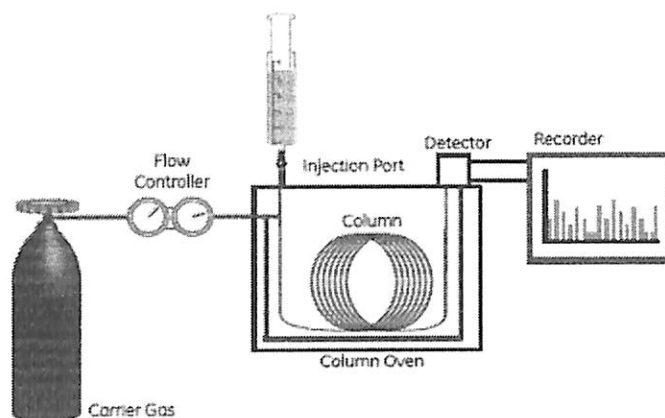
2. การแยกก๊าซจากน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า (Gas Extraction from Oil)
 ASTM D 3612 และ IEC 60567 ระบุมี 3 วิธีในการทำกระบวนการนี้ ได้แก่

2.1 Vacuum Extraction

2.2 Stripping Extraction

2.3 Headspace Method

3. การวิเคราะห์ก๊าซ (Gases Analysis) ASTM D 3612 ระบุการวิเคราะห์ ก๊าซโดยวิธี Gas Chromatography



ภาพประกอบที่ 2.30 การวิเคราะห์ก๊าซโดย Gas Chromatography

4. การวินิจฉัยหรือการแปลความหมายจากก๊าซผิดปกติ (Diagnosis based on fault gases) มีวิธีการหลายวิธี ในมาตรฐาน IEEE C57.104-1991 และมาตรฐาน IEC 60599-1999 ได้ระบุไว้ เช่น ก๊าซหลัก (key gas method) , อัตราส่วน โรเจอร์ (Roger ratio method) และ สามเหลี่ยมคูวัล (Duval triangle)

2.5 วิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด

เป็นวิธีการประมาณค่าข้อมูลวิธีหนึ่งโดยใช้เส้นโค้งที่สร้างขึ้นเพื่อปรับข้อมูล (fitting data) ซึ่งอาจเป็นข้อมูลที่มีความต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่อง ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ขอนำเสนอในส่วนที่ใช้กับข้อมูลที่ไม่มีความต่อเนื่อง

ข้อมูลที่นำมาเพื่อการประมาณค่าวิธีกำลังสองน้อยสุด เป็นข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมหรือได้จากการทดลอง แล้วนำมาวาดเป็นกราฟจะได้เป็นจุดกระจายซึ่งรูปกราฟที่ได้ก็อาจยังไม่สามารถบอกความสัมพันธ์ของข้อมูลได้อย่างชัดเจน และไม่สามารถบอกค่า ณ จุดที่ไม่มีข้อมูลได้ แต่ถ้าหากสร้างเส้นโค้งจากจุดข้อมูลเหล่านี้ สมการเส้นโค้งจะประมาณค่าที่จุดใดๆ ในช่วงข้อมูลได้

เส้นโค้งที่สร้างขึ้นอาจผ่านจุดข้อมูลบางจุด หรือไม่ผ่านจุดข้อมูลเลยก็ได้ การสร้างเส้นโค้งการประมาณค่าวิธีกำลังสองน้อยสุด 3 วิธี ได้แก่ วิธีการถดถอยเชิงเส้น วิธีการถดถอยเชิงพหุนาม และวิธีการถดถอยเชิงพหุคูณ

2.5.1 วิธีการถดถอยเชิงเส้น

การสร้างสมการด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยสุดเชิงเส้น (linear regression) คือ การหาสมการเส้นตรงที่เหมาะสมกับจุดข้อมูลโดยหาค่าต่ำสุดของผลรวมของผลต่างระหว่างจุดข้อมูลที่แทนด้วยลำดับ (x_i, y_i) กับค่าบนเส้นตรงที่จะสร้างขึ้น ณ จุด x_i หากกำหนดให้สมการเส้นตรงที่จะสร้างขึ้น คือ

$$f(x) = a + bx \quad (43)$$

เมื่อ a และ b คือ สัมประสิทธิ์ของสมการเส้นตรงซึ่งเป็นตัวแปร ดังนั้น ค่าคลาดเคลื่อน e_i หรือผลต่างระหว่างจุดข้อมูล (x_i, y_i) กับเส้นตรงที่จุด x_i คือ

$$e_i = y_i - (a + bx_i) \quad (44)$$

เมื่อ $i = 1, 2, \dots, n$ และ n แทนจำนวนจุดข้อมูลทั้งหมด

กำหนดให้ $S_r = \sum_{i=1}^n (e_i)^2$ แทนผลรวมของผลต่าง e_i กำลังสอง หรือ

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - (a + bx_i))^2 \quad (45)$$

ดังนั้น การหาสมการเส้นตรงด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด คือ การหาค่า a และ b ที่ทำให้ S_r มีค่าน้อยที่สุด การหาค่า a และ b ที่จะทำให้เกิดค่าที่ต่ำที่สุด คือ การหาค่าของสมการที่ได้จากอนุพันธ์ของ S_r เทียบกับ a และ b ที่ทำให้อนุพันธ์เท่ากับศูนย์

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial a} \sum_{i=1}^n (y_i - (a + bx_i))^2 &= 2 \sum_{i=1}^n (-1)(y_i - a - bx_i) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^n (y_i - (a + bx_i))^2 &= 2 \sum_{i=1}^n (-x_i)(y_i - a - bx_i) = 0 \end{aligned} \quad (46)$$

จัดรูปสมการทางขวาใหม่ จะได้ระบบสมการเชิงเส้น เรียกว่า สมการปรกติ (normal equation)

$$\begin{aligned}
 an + b \sum_{i=1}^n x_i &= \sum_{i=1}^n y_i \\
 a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 &= \sum_{i=1}^n x_i y_i
 \end{aligned}
 \tag{47}$$

จัดสมการใหม่เพื่อหาค่า a และ b ใหม่จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 b &= \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \\
 a &= \frac{\sum_{i=1}^n y_i - b \sum_{i=1}^n x_i}{n}
 \end{aligned}
 \tag{48}$$

การหาค่าคลาดเคลื่อน ค่าคลาดเคลื่อนของสมการกำลังสองน้อยสุด หาได้โดยใช้การถดถอย (regression) ซึ่งจะทำให้เห็นในเชิงปริมาณได้อย่างชัดเจนว่า สมการที่สร้างขึ้นเหมาะสมกับข้อมูลที่มีอยู่หรือไม่ เรียกว่า ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าประมาณ ค่าคลาดเคลื่อนประเภทนี้มีประโยชน์สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างสมการที่สร้างขึ้นมากกว่าหนึ่งสมการเพื่อหาสมการที่เหมาะสมโดยจะพิจารณาจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ซึ่งเป็นปริมาณทางสถิติที่บ่งบอกว่าข้อมูลมีการกระจายตัวรอบๆ เส้นตรงมากหรือน้อยเพียงใด ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับกำลังสองน้อยสุดเชิงเส้น หาได้จาก

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{S_r}{n-2}}
 \tag{49}$$

$S_{y/x}$ คือ ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าประมาณ (standard error of the estimate)

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination) หรืออาจเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา เป็นค่าที่บอกความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนของข้อมูลก่อนการประมาณ กับค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองน้อยสุด หรือ S_r หาได้จาก

$$R^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t}
 \tag{50}$$

$$S_t = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2
 \tag{51}$$

เมื่อ S_r คือค่าคลาดเคลื่อนของข้อมูลเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของข้อมูลจำนวน n ข้อมูล

อีกค่าหนึ่งที่มีความเกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ หรือค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) เขียนแทนด้วย R หาได้จาก $\sqrt{R^2}$ ความหมายของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) จะเป็นตัวบอกค่าความสัมพันธ์ว่าตัวแปรอิสระมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามมากน้อยเพียงใด และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) เป็นตัวบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งหากค่าทั้งสองมีค่าเข้าใกล้ 1.0 แสดงว่า ตัวแปรอิสระมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามมาก และมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกันมาก เช่นเดียวกัน ในบางข้อมูลที่มีลักษณะที่ไม่เป็นแบบเชิงเส้นหรือมีลักษณะการเรียงตัวของชุดข้อมูลไม่เป็นลักษณะเส้นตรง (nonlinear relationship) เมื่อนำสมการเชิงเส้นมาปรับสมการก็อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ แต่ก็มีความสัมพันธ์ไม่เชิงเส้นที่สามารถเปลี่ยนให้เป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นได้ เช่น สมการเลขชี้กำลัง (exponential equation) สมการยกกำลัง (power equation) และสมการการอิ่มตัวของอัตราเพิ่ม (saturation growth rate equation) เป็นต้น

2.5.2 วิธีการถดถอยเชิงพหุนาม (Polynomial regression)

การหาสมการพหุนามกำลัง m สำหรับชุดข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กันแบบไม่เชิงเส้น โดยหาค่าต่ำสุดของผลรวมของผลต่างระหว่างจุดข้อมูลที่แทนด้วยคู่ลำดับ (x_i, y_i) กับเส้นโค้งพหุนามที่จะสร้างขึ้นที่จุด x_i ยกกำลังสอง เมื่อ $i = 1, 2, \dots, n$ และ n คือจุดจำนวนข้อมูล รูปแบบสมการทั่วไปของสมการพหุนามกำลัง m

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad (52)$$

เมื่อ a_0, a_1, \dots, a_m เป็นสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนาม การสร้างสมการกำลังสองน้อยสุดเชิงพหุนามคือ การหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามที่ทำให้ $S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + \dots + a_mx_i^m))^2$ มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามได้ดังนี้

$$\begin{aligned} n(a_0) + \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)a_2 + \dots + \left(\sum_{i=1}^n x_i^m\right)a_m &= \sum_{i=1}^n y_i \\ \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^3\right)a_2 + \dots + \left(\sum_{i=1}^n x_i^{m+1}\right)a_m &= \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{aligned}
 & (\sum_{i=1}^n x_i^2)a_0 + (\sum_{i=1}^n x_i^3)a_1 + (\sum_{i=1}^n x_i^4)a_2 + \dots + (\sum_{i=1}^n x_i^{m+2})a_m = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \\
 & \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\
 & (\sum_{i=1}^n x_i^m)a_0 + (\sum_{i=1}^n x_i^{m+1})a_1 + (\sum_{i=1}^n x_i^{m+2})a_2 + \dots + (\sum_{i=1}^n x_i^{2m})a_m = \sum_{i=1}^n x_i^m y_i
 \end{aligned}$$

2.5.3 วิธีการถดถอยเชิงพหุคูณ

วิธีกำลังสองน้อยสุดเชิงเส้น และวิธีกำลังสองน้อยสุดเชิงพหุคูณ เป็นวิธีการหาสมการเส้นโค้งสำหรับข้อมูล y ที่ขึ้นอยู่กับข้อมูล x ตัวแปรเดียว แต่ถ้าข้อมูล y มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับข้อมูล x มากกว่าหนึ่งตัวแปร จะต้องสร้างสมการกำลังสองน้อยสุดเชิงเส้นพหุคูณ (Multi linear least square equation) ยกตัวอย่าง เช่น ตัวแปรหรือข้อมูล y แปรตามตัวแปรหรือข้อมูลสองตัวแปร คือ x_1 และ x_2 รูปแบบทั่วไปของสมการเชิงเส้นสองตัวแปร คือ

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 \tag{54}$$

การสร้างสมการกำลังสองน้อยสุดเชิงเส้นพหุคูณ คือ การหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเชิงเส้นพหุคูณที่ทำให้ $S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - (a_0 + a_1x_{1i} + a_2x_{2i}))^2$ มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเชิงเส้นพหุคูณได้

$$\begin{aligned}
 na_0 + \sum_{i=1}^n x_{1i}a_1 + \sum_{i=1}^n x_{2i}a_2 &= \sum_{i=1}^n y_i \\
 \sum_{i=1}^n x_{1i}a_0 + \sum_{i=1}^n x_{1i}a_1 + \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{2i}a_2 &= \sum_{i=1}^n x_{1i}y_i \\
 \sum_{i=1}^n x_{2i}a_0 + \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{2i}a_1 + \sum_{i=1}^n x_{2i}^2a_2 &= \sum_{i=1}^n x_{2i}y_i
 \end{aligned} \tag{55}$$

2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A. Elmoudi. ,M. Lehtonen. ,Hasse Nordman.2006. ได้เสนอแบบจำลองทางความร้อน (Thermal model) โดยพิจารณาถึงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิหม้อแปลงไฟฟ้าเนื่องจากโหลดฮาร์มอนิกที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยข้อมูลที่พัฒนาแบบจำลองได้จากข้อมูลการทดสอบจากโรงงานเพื่อประมาณค่าความสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้าที่พิกัดโหลดและพิกัดความถี่โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยได้ทำการศึกษา 3 กรณี คือ 1. ไม่มีกระแสฮาร์มอนิก, 2. THD 10 % และ 3. THD 22 % ได้

สรุปว่า กรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น 2 % และ 8 % เมื่อเทียบกับกรณีที่ 1 ซึ่ง ไม่มีกระแสฮาร์โมนิก

Sumaryadi, Harry GUMILIANG, Achmad SUSILO. 2009. ได้ทำการศึกษาผลกระทบฮาร์โมนิกต่อการเสื่อมสภาพของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการวิเคราะห์ก๊าซเจือปนในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า พบว่า CO เป็นแก๊สหลักที่ทำให้เกิดความร้อนในกระดาษเซลลูโลส ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพลง

Jae Hoon Kim, Doo Ki Park, Sang Ok Han, 2010. ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกล (ค่า Tensile Strength) และคุณสมบัติทางเคมี (furfural, CO, อุณหภูมิทดสอบ) ของฉนวนกระดาษหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ ผลทดลองพบว่าเมื่อค่าอุณหภูมิการทดสอบเพิ่มมากขึ้น ค่า Tensile Strength จะมีอัตราลดลง แต่ ค่า Furfural, CO มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น และได้นำมาวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Multiple Linear Regression เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรด้านคุณสมบัติทางกล และตัวแปรด้านคุณสมบัติทางเคมี