

บทที่ 4

ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่อหม้อแปลง

4.1 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อกำลังสูญเสีย

ดังที่ได้กล่าวถึงกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไปแล้วในบทที่ 3 ในบทนี้จะกล่าวถึงผลกระทบของกระแสและแรงดันที่ผิดเพี้ยนไปเนื่องจากผลของฮาร์มอนิก ที่มีต่อกำลังสูญเสียภายในหม้อแปลง โดยจะได้กล่าวถึงผลกระทบต่อกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด , กำลังสูญเสียขณะมีโหลด และกำลังสูญเสียปลั๊กย่อยที่เกิดขึ้นภายในตัวถังของหม้อแปลง อันเป็นกำลังสูญเสียหลักที่ได้รับผลกระทบจากฮาร์มอนิกโดยตรง ดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลกระทบต่อกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด

จากสมการที่ (3.2) และ (3.3) ซึ่งเป็นสมการที่ได้จากการทดลองพบว่า ค่าของกำลังสูญเสียฮิสเตอร์ซิสในแกนเหล็กของหม้อแปลงจะขึ้นอยู่กับค่าของ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น แต่กำลังสูญเสียกระแสวนในแกนเหล็กจะขึ้นอยู่กับค่ากำลังสองของสนามแม่เหล็ก ซึ่งเราทราบกันโดยทั่วไปว่าแรงดันและสนามแม่เหล็กภายในหม้อแปลงมีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$E_{rms} = 4.44 f N A_c B_{max} \quad (4.1)$$

โดยที่

E_{rms} คือแรงดันประสิทธิผลที่เกิดขึ้น (V.)

f คือความถี่ของระบบไฟฟ้า (Hz.)

N คือจำนวนรอบของขดลวดที่พันอยู่บนแกนเหล็ก

A_c คือพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (m^2)

B_{max} คือค่ายอดของความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (Tesla)

ดังนั้นเราจึงสามารถที่จะแสดงค่าของกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ให้อยู่ในรูปของแรงดันได้ จากสมการจะพบว่ากำลังสูญเสียชนิดนี้จะไม่ขึ้นอยู่กับกระแสไหล นอกจากนั้นในสภาพจริงความผิดเพี้ยนของแรงดันที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจะมีค่าไม่เกิน 5 % ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่

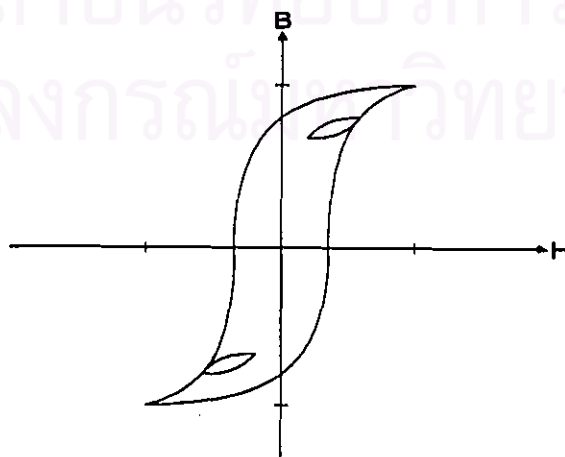
ยอมให้เกิดขึ้นได้จาก [9] และโดยทั่วไปแรงดันในระบบไฟฟ้าจะมีค่าค่อนข้างที่จะคงที่ ดังนั้น ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่ทำให้รูปคลื่นแรงดันผิดเพี้ยนไปจึงมีผลน้อย

4.1.1.1 กำลังสูญเสียฮิสเตอร์ซิส

ในกรณีที่รูปคลื่นแรงดันมีการผิดเพี้ยนไปมากเช่นในกรณีที่ เกิดมียอดคลื่นหลาย ยอดดังรูปที่ 4.1 จะเกิดวงรอบฮิสเตอร์ซิสเล็กซ้อนอยู่ในวงรอบฮิสเตอร์ซิสหลัก ดังรูปที่ 4.2 การประมาณกำลังสูญเสียฮิสเตอร์ซิสโดยใช้สมการที่ได้จากการทดลองจะมีข้อจำกัด ที่ทำให้ไม่สามารถใช้งานได้โดยสะดวก ซึ่งเราสามารถที่จะหลีกเลี่ยงได้โดยการประมาณจากการรวมพื้นที่ ที่อยู่ใวงรอบฮิสเตอร์ซิสหลักและวงรอบฮิสเตอร์ซิสเล็กๆ ทั้งหมดที่ซ้อนอยู่ใน เพราะกำลังสูญเสียฮิสเตอร์ซิสที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามพื้นที่รวมที่อยู่ใวงรอบฮิสเตอร์ซิส



รูปที่ 4.1 ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันที่มีค่ายอดหลายค่า



รูปที่ 4.2 วงรอบฮิสเตอร์ซิสเล็กที่ซ้อนอยู่ในวงรอบฮิสเตอร์ซิสหลัก

เนื่องจากในระบบไฟฟ้าความผิดเพี้ยนของแรงดันจะมีค่าน้อยกว่า 5% ทำให้ในหนึ่งคาบเวลารูปคลื่นแรงดันจะเกิดยอดคลื่นบวกเพียงครั้งเดียว จากปรากฏการณ์นี้จะไม่ทำให้เกิดวงรอบฮิสเตอร์ีสต์เล็กซ้อนอยู่ในวงรอบฮิสเตอร์ีสต์หลัก ทำให้การประมาณค่ากำลังสูญเสียฮิสเตอร์ีสต์โดยใช้สมการที่ไม่รับซ้อนสามารถกระทำได้ และในแบบจำลองของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ กำลังสูญเสียฮิสเตอร์ีสต์จะหาได้จาก [10] ดังสมการ

$$P_H = P_{HN} \left(\sum_{h=1}^{\infty} \frac{1}{h} \frac{V_h}{V} \cos \phi_h \right)^{\sigma} \quad (4.2)$$

โดยที่

- h คืออันดับฮาร์มอนิก
- P_H คือกำลังสูญเสียฮิสเตอร์ีสต์รวม (W.)
- P_{HN} คือกำลังสูญเสียฮิสเตอร์ีสต์ที่ความถี่หลักมูล (W.)
- V คือค่าแรงดันประสิทธิผล (V.)
- V_h คือค่าแรงดันประสิทธิผลที่ฮาร์มอนิกที่ h
- ϕ_h คือค่ามุมเฟสของแรงดัน (radian)
- σ คือค่าคงที่ของ Steimetz มีค่าระหว่าง 1.6 - 2.5

4.1.1.2 กำลังสูญเสียกระแสสวนในแกนเหล็ก

ในกรณีของกำลังสูญเสียกระแสสวนที่เกิดขึ้นภายในแกนเหล็ก เราพบว่าไม่สามารถใช้กราฟในการคำนวณ ดังเช่นกรณีของกำลังสูญเสียที่เกิดจากวงรอบฮิสเตอร์ีสต์ ดังนั้นจึงหลีกเลี่ยงการใช้สูตรที่ได้จากการทดลองไม่ได้ และในแบบจำลองของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำลังสูญเสียกระแสสวนในแกนเหล็กจะหาได้จาก [9] ดังสมการ

$$P_{EC} = P_{ECN} \left(\frac{V_1}{V} \right)^2 \left(1 + \sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{V_h}{V_1} \right)^2 C_{eh} C_{Th} \right) \quad (4.3)$$

โดยที่

- h คืออันดับฮาร์มอนิก
- P_{BC} คือกำลังสูญเสียกระแสสวนในแกนเหล็กรวม (W.)
- P_{ECN} คือกำลังสูญเสียกระแสสวนในแกนเหล็กที่ความถี่หลักมูล (W.)
- V คือค่าแรงดันประสิทธิผล (V.)
- V_l คือค่าแรงดันประสิทธิผลที่ความถี่หลักมูล (V.)
- V_h คือค่าแรงดันประสิทธิผลที่ฮาร์มอนิกที่ h (V.)
- C_{sh} คือค่า penetration depth
- C_{Th} คือค่าตัวปรับความถูกต้องของหม้อแปลง 3 เฟส

จากสมการที่ (4.3) ค่า C_{sh} จะเป็นค่าดังนี้

$$C_{sh} = 1 - 0.0017\xi^{3.61}, \text{ for } \xi < 3.6 \quad (4.4)$$

$$C_{sh} = \frac{3}{\xi}, \text{ for } \xi > 3.6$$

โดยที่ค่าของ ξ หาได้จากสมการ


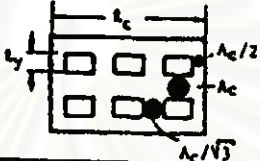

$$\xi = \sqrt{\pi\mu\gamma f} \quad (4.5)$$

โดยที่

- t คือความหนาของแผ่นเหล็กบางที่ประกอบเป็นแกนเหล็ก (m.)
- μ คือค่าเพอร์มิททิวิตีของแกนเหล็ก
- γ คือค่าความนำไฟฟ้าของแกนเหล็ก (W/m K)
- f คือค่าความถี่ของระบบไฟฟ้า (Hz.)

C_{Th} จะเป็นค่าที่ใช้ปรับความถูกต้องเฉพาะหม้อแปลงแบบ 3 เฟส โดยจะมีค่าเท่ากับ 1 สำหรับฮาร์มอนิกที่มีซีเคิร์ฟวนกและลบ ส่วนฮาร์มอนิกที่มีซีเคิร์ฟวนเป็นศูนย์ (หมายถึงฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 6, 9, ...) ค่านี้จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างและชนิดของแกนเหล็กดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าของ C_{Th} ที่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างและชนิดของแกนเหล็ก

Type of Transformer	GEOMETRY $\lambda_y = l_y / l_c$ $\lambda_y = y / \lambda_c$ $\lambda_c = l_c / l_c$ $\lambda_c = \lambda_c / \lambda_c$	$C_{Th} =$
Three Limbed Core-Type		$1 / (1 + 1.33 \lambda_y / \lambda_c)$
Shell-Type		$\frac{1 + 4.46 \lambda_y}{1 + 2.15 \lambda_y}$
Five Limbed Core-Type		$\frac{1 + 0.33 \lambda_y / \lambda_c + 1.5 \lambda_c / \lambda_c}{1 + 1.33 \lambda_y / \lambda_c}$

4.1.2 ผลกระทบต่อกำลังสูญเสียขณะมีโหลด

จาก[6]ได้แบ่งกำลังสูญเสียในขดลวดออกเป็น กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน I^2R และกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสวนในขดลวด โดยกำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่ากำลังสองของกระแสประสิทธิผล ส่วนกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสวนในขดลวดจะแปรผันตามค่าของ K factor ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.2.1 และ 4.2.2 แต่จาก[11]จะได้อะไรจากการคิดกำลังสูญเสียกระแสวนในขดลวดให้แปรผันตรงตามค่า K factor นั้นเป็นการคิดที่เกินความเป็นจริง โดยในสภาพจริงกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่า ดังนั้นในการประมาณเพื่อให้ค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นนี้ให้มีค่าใกล้เคียงความจริง จะต้องมีการใช้ตัวปรับค่าในแต่ละอันดับของฮาร์มอนิก เช่นจาก[11]คำนวณค่ากระแสประสิทธิผลเนื่องจากผลของปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect) และ ปรากฏการณ์ความใกล้เคียง (Proximity Effect) จะสามารถเขียนสมการได้ว่า

$$I_{EC}^2 = \sum_{h=2}^{\infty} \beta_h / h^2 \tag{4.6}$$

โดยที่

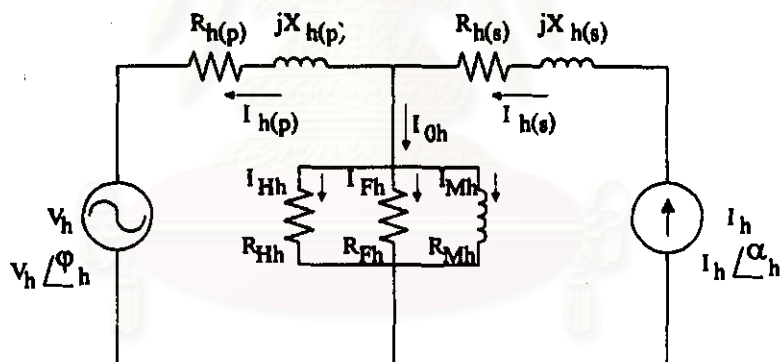
I_{EC} คือค่ากระแสประสิทธิภาพผลของฮาร์โมนิกรวม (A.)

I_h คือค่ากระแสประสิทธิภาพผลของฮาร์โมนิกลำดับที่ h (A.)

β_h คือค่าตัวปรับค่าของฮาร์โมนิกอันดับที่ h

สัมประสิทธิ์ β_h ขึ้นอยู่กับ อันดับฮาร์โมนิก , รูปร่างและขนาดของตัวนำ และยังขึ้นกับขนาดที่กักของหม้อแปลงด้วย มีสูตรที่ได้มาจากการทดลองหลายสูตรได้ถูกเสนอขึ้นมา แต่ก็มีข้อจำกัดที่สามารถใช้ได้กับความถี่บางช่วง โดยในความเป็นจริงจะมีการถ่วงน้ำหนักตามค่าของความถี่ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์ทางผิว

ในแบบจำลองของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะคิดค่ากำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานและกำลังสูญเสียกระแสสวนในแกนเหล็กรวมกัน ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช่วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงขณะมีโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงโดยรวมผลของฮาร์โมนิก

จากวงจรที่แสดงในรูปที่ 4.3 และ [12]จะได้ว่ากำลังสูญเสียในขดลวดเนื่องจากความต้านทานที่รวมที่ฮาร์โมนิกต่างๆ สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$P_{C_w} = \sum_{h=0}^{\infty} R_h(p) \cdot I_h^2(p) + \sum_{h=0}^{\infty} R_h(s) \cdot I_h^2(s) \quad (4.7)$$

โดยที่

P_{C_w} คือกำลังสูญเสียรวมภายในขดลวด (W.)

$R_h(p)$ คือความต้านทานทางด้านปฐมภูมิของฮาร์มอนิกอันดับที่ h (Ohm)

$R_h(s)$ คือความต้านทานทางด้านทุติยภูมิของฮาร์มอนิกอันดับที่ h (Ohm)

$I_h(p)$ คือกระแสประสิทธิผลทางด้านปฐมภูมิของฮาร์มอนิกอันดับที่ h (A.)

$I_h(s)$ คือกระแสประสิทธิผลทางด้านทุติยภูมิของฮาร์มอนิกอันดับที่ h (A.)

โดยค่าของกระแส I_{Oh} , I_{Hh} , I_{Fh} และ I_{Mh} จะเป็นส่วนที่เกิดขึ้นภายในแกนเหล็ก โดยทั่วไปจะเขียนในรูปแรงดันมากกว่าดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.1.1 และ 4.1.1.2 และจาก[10] กำลังสูญเสียรวมภายในขดลวดสามารถแทนได้ด้วยสมการ

$$P_{CuN} = R_p I_{pN}^2 G_N \quad (4.8)$$

เมื่อ

$$G_N = 1 + \chi_p + \beta(1 + \chi_s) \quad (4.9)$$

$$\beta = \left(R_s / R_p \right) \left(N_p / N_s \right)^2 \quad (4.10)$$

โดยที่

P_{CuN} คือกำลังสูญเสียภายในขดลวดที่ความถี่หลักมูล (W.)

R_p คือความต้านทานกระแสตรงทางด้านปฐมภูมิที่ความถี่หลักมูล (Ohm)

R_s คือความต้านทานกระแสตรงทางด้านทุติยภูมิที่ความถี่หลักมูล (Ohm)

I_{pN} คือกระแสประสิทธิผลทางด้านทุติยภูมิที่ความถี่หลักมูล (A.)

χ_p คือตัวประกอบกำลังสูญเสียปลีกย่อยของขดลวดปฐมภูมิ ซึ่งแยกเป็นค่าตามแนวแกนและแนวขวาง, $\chi_p = \chi_{px} + \chi_{py}$

χ_s คือตัวประกอบกำลังสูญเสียปลีกย่อยของขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งแยกเป็นค่าตามแนวแกนและแนวขวาง, $\chi_s = \chi_{sx} + \chi_{sy}$

โดยค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียปลีกย่อยของขดลวด ที่ฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ สามารถหาได้ดังสมการ

$$\chi_p = h^2 (\chi_{px} C_{pxh} + \chi_{py} C_{pyh}) \quad (4.11)$$

โดยที่

C_{psh}, C_{pyh} คือฟังก์ชันที่ใช้ในการปรับค่าเนื่องจากผลของกระแสน้ำในขดลวด ที่ฮาร์โมนิกอันดับที่ h

ค่าของ C_{psh}, C_{pyh} หาได้จากสมการ

$$C_{psh} = \frac{6 \sinh \xi_x - \sin \xi_x}{\xi_x^3 \cosh \xi_x + \cos \xi_x} \quad (4.12)$$

และ

$$C_{pyh} = \frac{6 \sinh \xi_y - \sin \xi_y}{\xi_y^3 \cosh \xi_y + \cos \xi_y} \quad (4.13)$$

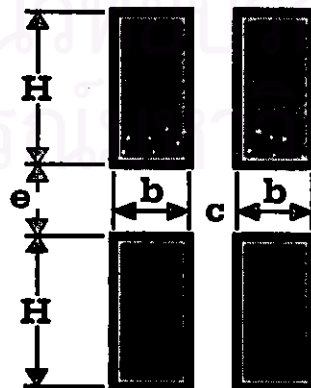
โดยที่

$$\xi_x = \sqrt{\pi \mu_0 \gamma h b^3 / (b+c)} \quad (4.14)$$

และ

$$\xi_y = \sqrt{\pi \mu_0 \gamma h H^3 / (H+e)} \quad (4.15)$$

ค่าของ b, c, H และ e จากสมการ (4.14) และ (4.15) เป็นค่าที่บอกลักษณะของขดลวดแบบสี่เหลี่ยม ซึ่งใช้เป็นขดลวดของหม้อแปลงโดยทั่วไป มีลักษณะดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ลักษณะของขดลวดสี่เหลี่ยมที่ใช้ในหม้อแปลง

จากสมการที่ (4.11) - (4.15) เป็นสมการที่แสดงเฉพาะด้านปฐมภูมิของขดลวด ส่วนทางด้านทุติยภูมิก็สามารถคำนวณโดยใช้สมการดังกล่าวแล้วได้เช่นกัน แต่ค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ต้องเป็นค่าทางด้านทุติยภูมิ และจากสมการที่ (4.7) - (4.15) เมื่อนำมาใช้กับกรณีที่มีฮาร์มอนิกปนอยู่จะได้สมการดังนี้

$$P_{Cv} = R_p I_p^2 G \quad (4.16)$$

โดยที่

I_p^2 คือค่ากำลังสองของกระแสประสิทธิผลที่รวมผลของฮาร์มอนิกแล้ว

G เป็นฟังก์ชันการแปลงค่าที่รวมผลของฮาร์มอนิกแล้ว

ค่าของ I_p^2 สามารถหาค่าได้ดังสมการ

$$I_p^2 = I_{pN}^2 \left(1 + p \sum_{h \neq 1}^{\infty} F_h^2 \right) \quad (4.17)$$

โดยค่า p และ F_h สามารถหาได้ดังจะได้กล่าวต่อไปนี้เป็น สมมติให้ค่าของ J คือค่าของความหนาแน่นของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำ จะได้ว่า

$$J = I / N_x b H \quad (4.18)$$

โดยที่

N_x คือจำนวนขดลวดตัวนำที่ต่อขนานกัน

b คือความกว้างของขดลวด ตามรูปที่ 4.4 (mm.)

H คือความสูงของขดลวด ตามรูปที่ 4.4 (mm.)

และในกรณีที่มีฮาร์มอนิกปนอยู่ ความหนาแน่นของกระแสหาค่าได้ดังสมการ

$$J = \sqrt{2} J_{11} \sin \omega t + \sqrt{2} J_{1c} \sum_{h \neq 1}^{\infty} F_h \sin(h \omega t + \theta_h) \quad (4.19)$$

โดยที่

J_{11} คือความหนาแน่นของกระแสประสิทธิผลที่ความถี่หลักมูล (A/m^2)

J_{1c} คือความหนาแน่นของกระแสประสิทธิผลของไหลคที่ไม่เป็นเชิงเส้น (A/m^2)

F_h เป็นฟังก์ชันที่นิยามโดยสมการ

$$F_h = J_h / J_{1c} \quad (4.20)$$

โดยที่

J_h คือความหนาแน่นของกระแสประสิทธิผลที่ฮาร์โมนิกอันดับที่ h (A/m^2)

จากการนิยามค่าต่างๆ ตามสมการที่ (4.18) - (4.20) จะสามารถหาค่าประสิทธิผลของความหนาแน่นกระแสได้ดังสมการ

$$\left. \begin{aligned} J^2 &= J_1^2 + J_{1c}^2 \sum_{h=1}^{\infty} F_h^2 \\ \text{หรือ} \\ J^2 &= J_1^2 (1 + p^2 \sum_{h=1}^{\infty} F_h^2) \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

โดยที่

$$J_1^2 = J_{11}^2 + J_{1c}^2 + 2J_1 J_{1c} \cos \theta_1 \quad (4.22)$$

และ

$$p = J_{1c} / J_1 \quad (4.23)$$

ค่าของ G ในสมการที่ (4.16) สามารถหาค่าได้ดังสมการ

$$G = 1 + \chi_p F_{pp} / F_{p1} + \beta \chi_s F_{ps} / F_{p1} \quad (4.24)$$

โดยที่

$$F_{p1} = 1 + p^2 \sum_{h=1}^{\infty} F_h^2 \quad (4.25)$$

$$F_{pp} = 1 + p^2 \sum_{h=1}^{\infty} F_h^2 \chi_{ph} / \chi_{pi} \quad (4.26)$$

$$F_{ps} = 1 + p^2 \sum_{h=1}^{\infty} F_h^2 \chi_{sh} / \chi_{si} \quad (4.27)$$

จากลักษณะของวงจรมูลยด์ังรูปที่ 4.3 และจากสมการที่ (4.8) และ (4.16) จะได้ว่า อัตราส่วนกำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่มีฮาร์มอนิกปนต่อกำลังสูญเสียขณะมีโหลด ที่ความถี่มูลฐานสามารถหาได้ดังสมการ

$$\frac{P_{Cw}}{P_{CwN}} = K^2 \frac{G}{G_N} \quad (4.28)$$

โดยที่

P_{Cw} กำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่มีฮาร์มอนิกปน (W.)

P_{CwN} กำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่ความถี่มูลฐาน (W.)

K คืออัตราส่วนพิภคขณะใช้งานหม้อแปลงต่อพิภคของหม้อแปลง

G, G_N คือฟังก์ชันที่หาได้จากสมการที่ (4.24) และ (4.9) ตามลำดับ

4.1.3 ผลกระทบต่อกำลังสูญเสียปลิกย่อย

กำลังสูญเสียปลิกย่อยเป็นส่วนที่คำนวณได้ยากที่สุด ไม่สามารถคำนวณได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์โดยตรง เนื่องจากลักษณะรูปทรงของส่วนประกอบของหม้อแปลงที่ไม่เป็นรูปเรขาคณิตต่างๆ ทำให้ลักษณะของฟลักซ์แม่เหล็กที่ไหลผ่านส่วนประกอบเหล่านี้ มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำลังสูญเสียปลิกย่อยจะคิดประกอบในแบบจำลองเฉพาะกรณีหม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน ทั้งนี้เนื่องมาจากกำลังงานสูญเสียส่วนนี้มีผลทำให้อุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงสูงขึ้น แต่ในหม้อแปลงแบบแห้งกำลังงานสูญเสียส่วนนี้ไม่ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นมากนัก และจะคิดเฉพาะกำลังงานสูญเสียในส่วนที่เกิดขึ้นกับตัวถังหม้อแปลงเท่านั้น โดยจาก[10]กำลังสูญเสียปลิกย่อยที่เกิดที่ตัวถังหม้อแปลงนี้สามารถแทนได้ด้วยสมการ

$$P_{TN} = K_T f^{1.5} I_N^2 \quad (4.29)$$

โดยที่

P_{TN} คือค่ากำลังงานสูญเสียที่ตัวถังที่ความถี่หลักมูล (W .)

K_T คือค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างและชนิดของวัสดุ

ในกรณีที่มีฮาร์มอนิกปนอยู่ในสเปกตรัมของกระแส จะได้สมการดังนี้

$$P_T = K_T \sum_{h=1}^{\infty} (hf)^{1.5} I_h^2 \quad (4.30)$$

โดยที่

P_T คือค่ากำลังงานสูญเสียที่ตัวถังขณะที่มีฮาร์มอนิก (W .)

จากสมการที่ (4.20) , (4.25) , (4.29) และ (4.30) จะได้ว่า

$$\frac{P_T}{P_{TN}} = K^2 (1 + p^2 \sum_{h=1}^{\infty} h^{1.5} F_h^{1.5}) / F_{pl} \quad (4.31)$$

จากทั้งหมดที่ได้กล่าวมาจะพบว่า เราสามารถที่จะหาฟังก์ชันที่เป็นอัตราส่วนของกำลังงานสูญเสีย ในกรณีที่มีฮาร์มอนิกปนอยู่ต่อกำลังงานสูญเสียที่ความถี่มูลฐานได้ โดยไม่จำเป็นต้องคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียที่แท้จริง ทั้งนี้เพราะเป็นการคำนวณเทียบกับหม้อแปลงตัวเดิม และอัตราส่วนกำลังสูญเสียดังที่กล่าวมาแล้วในกรณีต่างๆ สามารถหาได้จากสมการที่ (4.2) , (4.3) , (4.28) และ (4.31) โดยแยกตามชนิดของกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง

4.2 การแก้ไขปัญหาของหม้อแปลงเนื่องจากผลของฮาร์มอนิก

ในอดีตการพิจารณาเลือกใช้นหม้อแปลงนั้น ผู้ใช้จะพิจารณาที่พิกัดโหลดที่หม้อแปลงสามารถจ่ายได้เป็นสำคัญ แต่ในปัจจุบันจำเป็นต้องพิจารณาลักษณะของโหลดประกอบเข้าไปด้วย เนื่องจากมีการใช้งานโหลดประเภทที่ไม่เป็นเชิงเส้นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งโหลดประเภทนี้ เปรียบเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกป้อนเข้าไปในระบบไฟฟ้ามากขึ้น ทำให้ได้เริ่มมีการตระหนักถึงความสำคัญของผลกระทบที่เกิดขึ้น จึงได้มีองค์กรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องได้เข้า

มาวางแนวทางในการแก้ไขปัญหา และแม้แต่บริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงเอง ก็ต้องหาแนวทางการออกแบบใหม่ๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานขณะมีโหลดประเภทนี้ โดยเน้นที่การลดกำลังสูญเสีย กระแสวน ซึ่งเทคนิคที่นำมาใช้ได้แก่ การเปลี่ยนมาใช้วัสดุทำแกนเหล็กที่มีคุณภาพดีขึ้น เพื่อลดปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก หรือการใช้ลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงเพื่อลดผลของปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect)

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าผลกระทบของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นโดยตรง ก็จะทำให้หม้อแปลงมีกำลังสูญเสียเพิ่มขึ้น แต่ผลทางอ้อมที่ไม่สามารถวัดได้โดยง่ายที่เกิดขึ้นติดตามมาก็คืออัตราการเสื่อมสภาพของฉนวนเพิ่มขึ้นและอายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลง โดยในปัจจุบันแนวทางในการแก้ไขปัญหาก็เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป ได้แก่

4.2.1 การใช้ K factor

K factor ได้เริ่มเป็นที่รู้จักครั้งแรกในปี 1988 จากบทความของ Kerszebaum, Majur, Mistry, and Frank , "Specify dry-type distribution transformer for solid state applications" อ้างตาม[7] โดยได้นำเสนอวิธีการคิด K factor โดยนำค่าผลรวมของกำลังสองของผลคูณระหว่างกระแสและลำดับฮาร์มอนิก มาใช้ในการให้ค่าจำกัดความเพื่อปกป้องลักษณะของโหลดประเภทที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยอ้างอิงถึง ANSI/IEEE C57.110 [6] ซึ่งต่อมาภายหลังได้ถูกบรรจุอยู่ใน Underwriters Laboratory standard UL 1561 และ UL 1662 ซึ่งได้ให้ความหมายของ K factor ไว้ว่าเป็นเงื่อนไขในการพิจารณาถึงความสามารถของหม้อแปลง ที่จะจ่ายโหลดประเภทที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีสมการดังนี้

$$K \text{ factor} = \sum_{h=1}^{\infty} f_h^2 h^2 \quad (4.32)$$

โดยที่

- f_h คือค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h ต่อกระแสที่ความถี่มูลฐาน(มีหน่วยเป็น p.u.)
 h คืออันดับฮาร์มอนิก

พิกัด K factor ของหม้อแปลงจะเป็นค่าที่ใช้ไม่เหมาะสม หากมีโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ที่มีขนาดของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h มากกว่าค่า $1/h$ ของกระแสที่ความถี่มูลฐาน จาก

สมการที่ใช้ในการนิยาม K factor จะพบว่าเป็นสมการที่ใช้ในการหาอัตราส่วนของกำลังสูญเสีย กระแสรวมต่อกำลังสูญเสียกระแสที่มีความถี่มูลฐาน ดังนั้นความหมายของ K factor ที่กล่าว มา จึงเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถของหม้อแปลงที่จะทนต่อกำลังสูญเสียกระแสในขดลวด เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าจากกำลังสูญเสียกระแสในขดลวดที่มีความถี่มูลฐาน เช่น หม้อแปลงที่มี ค่า K factor เท่ากับ 13 หมายความว่า หม้อแปลงตัวนี้ถูกออกแบบให้สามารถใช้งานได้อย่าง ปกติขณะจ่ายโหลดที่มีกำลังสูญเสียกระแสในขดลวดเป็น 13 เท่าของกำลังสูญเสียกระแสใน ขดลวดที่มีความถี่มูลฐาน เป็นต้น

โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของฮาร์มอนิก ที่เกิดกับหม้อแปลงแบบ ฉนวนแห้งจะมีมากกว่าหม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน ทั้งนี้เนื่องจากค่าความร้อนจำเพาะของขดลวดมี ค่าสูงกว่าน้ำมัน และการระบายความร้อนของหม้อแปลงแบบน้ำมันจะระบายได้ดีกว่าแบบฉนวน แห้ง ดังนั้นค่า K factor นี้จึงนิยมใช้กับหม้อแปลงแบบฉนวนแห้งเท่านั้น

4.2.2 การลดขนาดพิคัดหม้อแปลง

ในขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น รูปคลื่นของกระแสจะไม่เป็นรูป คลื่นไซน์แต่จะมีส่วนที่เป็นฮาร์มอนิกปนอยู่ ซึ่งฮาร์มอนิกที่ปนอยู่นี้จะมีผลทำให้เกิดกำลังสูญเสีย กระแสทำให้อุณหภูมิสูงสุดของขดลวดเพิ่มขึ้นมากกว่า ในขณะที่จ่ายโหลดประเภทเชิงเส้น ธรรมดา ดังนั้นในขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นจึงต้องลดพิคัดของหม้อแปลงลง โดยการใส่สเปคตรัมของกระแสฮาร์มอนิกตามวิธีที่เสนอใน[6] จะทำให้ทราบว่าพิคัดของหม้อแปลง ควรจะลดลงไปเป็นเท่าใด โดยใช้สมการดังนี้

$$I_{max} (p.u.) = \sqrt{\frac{P_{LL-R} (p.u.)}{1 + \tau_{EC-R}^2 (p.u.) \sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2 h^2}} \quad (4.33)$$

โดยที่

I_h คือค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h ต่อกระแสประสิทธิผลรวม(มีหน่วยเป็น p.u.)

จาก[8]ได้มีการนำเสนอตัวอย่างประกอบ เพื่อความเข้าใจในการใช้งานสมการ ที่(4.33)ดังต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 1 จากการวัดสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกได้ดังตาราง

h	$I_h(A)$	$I_h(p.u.)$
1	1,345	0.9678
3	350	0.2519

โดยวัดกระแสได้ 1389.8 A.

$$\text{การคิดกระแสค่า } I_{rms} \text{ นั้น } \frac{1345}{I_{rms}} = \frac{1345}{\sqrt{1345^2 + 350^2}} = \frac{1345}{1389.8} = 0.9678 p.u.$$

และกำหนดให้ $P_{EC-R}(p.u.) = 0.15 p.u.$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากผู้ผลิตหม้อแปลงจะได้ว่า

$P_{LL-R}(p.u.) = 1 + 0.15 = 1.15 p.u.$ และจากตารางกระแสฮาร์มอนิกที่ให้มาเพื่อจะหาค่า $P_{LL}(p.u.)$ จะสร้างตารางเพิ่มดังนี้

h	$I_h(rms)$	$I_h(p.u.)$	h^2	$I_h(p.u.)^2 * h^2$
1	1,345	0.9678	1	0.9366
3	350	0.2519	9	0.5708
				1.5074

ดังนั้น

$$P_{LL}(p.u.) = 1 + (0.15 * 1.5074) = 1.226 p.u.$$

และ

$$I_{max}(p.u.) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(p.u.)}{P_{LL}(p.u.)}} = \sqrt{\frac{1.150}{1.226}} = 0.968 p.u.$$

สมมติหม้อแปลงมีพิกัดจริง 500 kVA จะได้ว่าพิกัดของหม้อแปลงที่ลดลงมาขณะจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น สามารถคำนวณได้จาก $500 \times 0.968 = 484 \text{ kVA}$

ตัวอย่างที่ 2 จากตัวอย่างที่ 1 สมมติให้สเปคตรัมของกระแสเปลี่ยนไปดังตาราง

h	$I_h(A)$	$I_h(p.u.)$
1	1672	0.9778
5	292	0.1708
7	185	0.1082
11	75	0.0439
13	48	0.0281
17	26	0.0152
19	17	0.0099

จากตารางกระแสฮาร์มอนิกที่นำมา เพื่อจะหาค่า $P_{LL}(pu)$ จะสร้างตารางเพิ่มดังนี้

$I_h(p.u.)^2$	h^2	$I_h(p.u.)^2 * h^2$
0.9561	1	0.9561
0.0292	25	0.7290
0.0117	49	0.5735
0.00192	121	0.23277
0.000788	169	0.13317
0.000231	289	0.06681
0.000099	361	0.03568
		2.72708

ดังนั้น

$$P_{LL}(p.u.) = 1 + (0.15 * 2.72708) = 1.4091 p.u.$$

และ

$$I_{max}(p.u.) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(p.u.)}{P_{LL}(p.u.)}} = \sqrt{\frac{1.150}{1.4091}} = 0.9034 p.u.$$

สมมติหม้อแปลงมีพิกัดจริง 500 kVA จะได้ว่าพิกัดของหม้อแปลงที่ลดลงมา
ขณะจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น สามารถคำนวณได้จาก $500 \times 0.9034 = 451 \text{ kVA}$

การที่จะประยุกต์ใช้วิธีการที่นำเสนอในหัวข้อนี้ ผู้ใช้จะต้องทราบทั้งลักษณะ
สเปคตรัมของกระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลง และค่ากำลังสูญเสียกระแสสวนในขดลวดในหน่วย
เปอร์เซ็นต์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย