ดำรงค์ บัวยอม*

ฮาร์มอนิก กับการอนุรักษ์พลังงาน

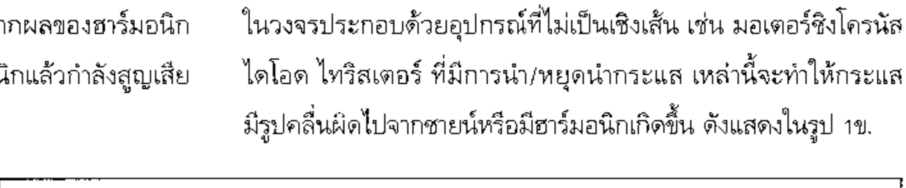
คำนำ

ไม่นานมานี้วิศวกรสนามได้นำปัญหาที่น่าสนใจมาให้ศึกษากัน หลังจากที่ได้ออกไปตรวจวัดการใช้พลังงานของโรงงานผลิตสายไฟฟ้าแห่งหนึ่ง โรงงานนี้มีการใช้ฮีทเตอร์ที่ควบคุมด้วยไทริสเตอร์จำนวนหลายชุด หม้อแปลงของโรงงานมีขนาด 2000 kVA วัดโหลดได้ประมาณ 1000 kVA หรือ 50% แต่หม้อแปลงร้อนมากจนชำรุดไปแล้ว 1 ลูก ลูกที่ใช้งานปัจจุบันต้องใช้พัดลม 3 ตัว เป่าระบายความร้อนตลอดเวลา ทั้งนี้เนื่องมาจากกระแสหม้อแปลงมีฮาร์มอนิกอยู่สูงมาก กรณีนี้การแก้ไขทำได้โดย 1. กำจัดฮาร์มอนิกด้วยการติดตั้งฟิลเตอร์ หรือ 2. เปลี่ยนหม้อแปลงใช้หม้อแปลงที่ใหญ่ขึ้น หรือหม้อแปลงที่ทนฮาร์มอนิกได้ คำถามที่น่าสนใจยิ่งกว่านี้ก็คือ เราจะสามารถคำนวณการสูญเสียจากผลของฮาร์มอนิกที่ปนมาในกระแสไฟฟ้าอย่างไร เมื่อเราลดฮาร์มอนิกแล้วกำลังสูญเสียจะลดลงอย่างไร

เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอิเล็กทรอนิกส์กำลังมีประสิทธิภาพสูง จึงมีการใช้งานอย่างแพร่หลายขึ้นทุกที ผลเสียที่เกิดขึ้นด้วยก็คือ ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ฮาร์มอนิกทำให้เกิดผลเสียหลายประการ เช่น สัญญาณรบกวนต่อระบบสื่อสาร การทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ เกิดความร้อนในสายไฟ, หม้อแปลง ฯลฯ การศึกษาและแก้ปัญหาฮาร์มอนิกมักเนื่องจากปัญหาสัญญาณรบกวนต่อสัญญาณโทรศัพท์ หรือคอมพิวเตอร์ รุนแรงจนยอมรับไม่ได้ มักจะไม่ใช่แง่มุมของการสูญเสียที่เกิดขึ้น บทความนี้จะเป็นการมองการแก้ฮาร์มอนิกในแง่ของการประหยัดพลังงาน จะได้ทำความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับฮาร์มอนิก และประเมินกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า

1. ฮาร์มอนิกเกิดได้อย่างไร ?

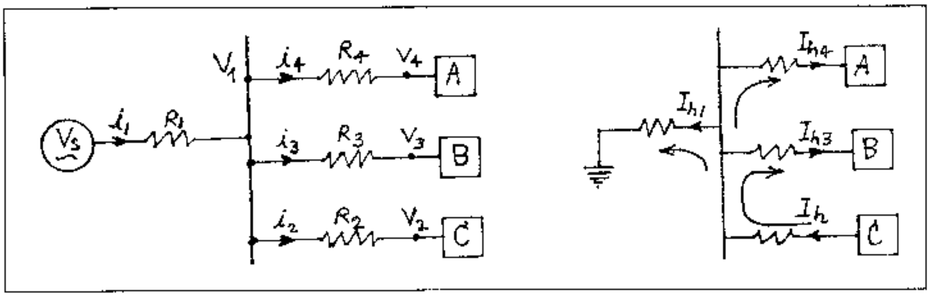
ฮาร์มอนิก คือ ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแส หรือแรงดันจากรูปคลื่นซายน์มาตรฐานที่ควรจะเป็น ลองพิจารณาเมื่อเราป้อนแรงดันรูปซายน์ให้กับอุปกรณ์เชิงเส้น ได้แก่ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 1ก. กระแสที่ไหลก็ยังมีรูปคลื่นซายน์ แต่จะมีเฟสนำหน้าหรือตามหลังแรงดัน แล้วแต่กรณี อย่างนี้ไม่เกิดฮาร์มอนิก แต่ถ้าในวงจรประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น มอเตอร์ซิงโครนัส ไดโอด ไทริสเตอร์ ที่มีการนำ/หยุดนำกระแส เหล่านี้จะทำให้กระแสมีรูปคลื่นผิดไปจากซายน์หรือมีฮาร์มอนิกเกิดขึ้น ดังแสดงในรูป 1ข.



1ก. อุปกรณ์เชิงเส้น ไม่สร้างฮาร์มอนิก　　1ข. อุปกรณ์ไม่เชิงเส้น สร้างฮาร์มอนิก

รูปที่ 1 กำเนิดของฮาร์มอนิก

เราสามารถทำความเข้าใจการแพร่ของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าได้จากตัวอย่างในรูปที่ 2 เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือโรงไฟฟ้าจ่ายแรงดัน V_s ที่มีรูปคลื่นซายน์สวยงามให้กับโหลดเชิงเส้น A,B,C และ R_1 ถึง R_4 เป็นความต้านทานของสายส่ง รูปคลื่นกระแสและแรงดันทุกจุดก็จะเป็นซายน์สวยงาม แต่ถ้าโหลด C เกิดเป็นโหลดไม่เชิงเส้น เป็นอินเวอร์เตอร์ที่สร้างกระแสฮาร์มอนิก กระแส i_2 ก็จะมีรูปร่างยืดยือ กระแสรวมจากแหล่งกำเนิด i_1 เป็นผลรวมของ i_2, i_3, i_4 ก็จะมีรูปร่างผิดเพี้ยนไปด้วยเนื่องจาก i_2 ดังนั้นแรงดัน V_1 ซึ่งเท่ากับ $V_s - i_1 R_1$ ก็จะผิดเพี้ยนไปตามค่า i_1 ทำให้ขณะนี้แรงดันที่บัส V_1 มีฮาร์มอนิกขึ้นแล้ว กลายเป็นฮาร์มอนิกของแรงดันแล้วแรงดัน V_1 จ่ายให้โหลด A และ B ด้วยก็จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกในกระแส i_3, i_4 ขึ้นด้วย แม้ว่า A และ B จะเป็นโหลดเชิงเส้นก็ตาม คล้ายกับว่าอุปกรณ์ C เป็นแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกให้กับอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้า



รูปที่ 2 การแพร่กระจายของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า

2. การวิเคราะห์รูปคลื่นฮาร์มอนิก

อนุกรมฟูริเยร์บอกเราว่า รูปคลื่นฮาร์มอนิกใดๆ ก็ตาม จะสามารถแยกให้เป็นผลรวมของรูปคลื่นซายน์จำนวนมากมายที่มีความถี่เริ่มจากความถี่พื้นฐาน แล้วเป็น 2 เท่า 3 เท่า 4 เท่า ไปเรื่อยๆ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3 รูปคลื่นนี้มีองค์ประกอบที่ความถี่ 3 เท่า และ 5 เท่า เราจึงเรียกว่ามีฮาร์มอนิกที่ 3 และ 5 ดังนั้นในระบบไฟฟ้า 50 เฮิรตซ์ ก็จะมีฮาร์มอนิกความถี่ 100,150,200,250,...เฮิรตซ์ เป็นองค์ประกอบ (อันที่ไม่มีก็คือมีแอมปลิจูดศูนย์โวลต์)

ถ้าเขียนให้เป็นคณิตศาสตร์ก็จะได้ว่า ถ้า i เป็นกระแสที่มีฮาร์มอนิกใดๆ แล้ว

$$i = I_1 \sin(wt+\varnothing) + I_2 \sin(2wt+\varnothing) + I_3 \sin(3wt+\varnothing) + \ldots$$
$$= \sum_{n=1}^{\alpha} I_n \sin(nwt+\varnothing)$$

i เป็นค่าชั่วขณะ แต่ $I_1, I_2, I_3, \ldots$ นั้นเป็นแอมปลิจูดของฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ดังนั้นค่าประสิทธิผล (Root Mean Square) ของกระแส หรือ Irms ตามนิยาม

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt}$$

หรือ $$I_{rms}^2 = \frac{1}{T}\int_0^T \left[I_1 \sin(wt+\varnothing) + I_2 \sin(2wt+\varnothing) + \ldots\right] \left[I_1 \sin(wt+\varnothing) + I_2 \sin(2wt+\varnothing) + \ldots\right] dt$$

เมื่อคูณกระจายเทอมต่างๆ แล้วอินติเกรตตลอดหนึ่งคาบ จะได้ว่าเทอมที่คูณไขว้กันฮาร์มอนิกที่ 2 ไปคูณกับฮาร์มอนิกที่ 3 เช่นนี้ เมื่ออินติเกรตรวมตลอดคาบจะเป็นศูนย์หายไปหมด คงเหลือแต่เทอมที่ฮาร์มอนิกเดียวคูณกันเอง

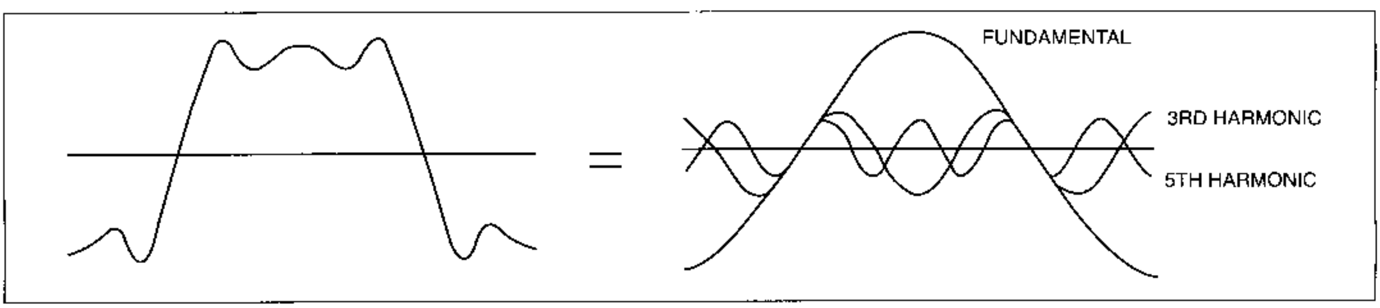
$$I_{rms}^2 = \frac{1}{T}\int_0^T I_1^2 \sin^2(wt+\varnothing)\, dt + \frac{1}{T}\int_0^T (I_2^2 \sin^2(2wt+\varnothing)\, dt + \ldots$$

สรุปก็คือ $\boxed{I_{rms}^2 = I_{1rms}^2 + I_{2rms}^2 + I_{3rms}^2 + \ldots}$

กำลังสองของกระแส RMS เท่ากับผลรวมของกำลังสองของค่า RMS ของแต่ละฮาร์มอนิก และเทอมตั้งแต่ $I_2, I_3, I_4, \ldots$ เป็นตัวที่บอกว่ารูปคลื่นมีความผิดเพี้ยนไปจากรูปพื้นฐาน คือ มากน้อยเท่าใด เราจึงนิยามความผิดเพี้ยนรวม (Total Harmonic distortion) หรือ THD =

$$THD = \sqrt{\frac{I_{2rms}^2 + I_{3rms}^2 + I_{4rms}^2 + \ldots}{I_{1rms}^2}}$$

ในการบอกปริมาณองค์ประกอบฮาร์มอนิก เรามักจะเปรียบเทียบเป็นสัดส่วนของค่าพื้นฐาน (I_{1rms}) คือ $\frac{I_{1rms}}{I_{1rms}}, \frac{I_{3rms}}{I_{1rms}}, \ldots$



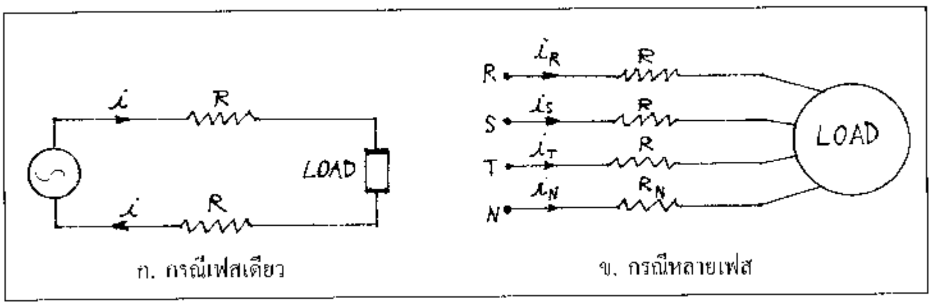
เช่น รูปคลื่นหนึ่งมีฮาร์มอนิกที่ 3 อยู่ 20% และที่ 5 อยู่ 30% เป็นต้น

3. กำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้าอันเนื่องมาจากฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นในสายไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า และมอเตอร์ไฟฟ้า ในกรณีของมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันฮาร์มอนิกที่ความถี่สูงๆ จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในแกนเหล็กเกิดการสั่น และมีเสียงครางได้ แต่เป็นการยากที่จะประเมินการสูญเสียส่วนนี้ออกมา จะขอละเลยการสูญเสียส่วนนี้

สำหรับคาปาซิเตอร์ไม่เกิดผลเรื่องกำลังสูญเสียเท่าใดนัก แต่จะเป็นอายุการใช้งานที่สั้นลงเพราะว่าอิมพีแดนซ์ของคาปาซิเตอร์ แปรผกผันกับความถี่ จึงมีค่าต่ำสำหรับฮาร์มอนิกความถี่สูง กระแสฮาร์มอนิกจะไหลผ่านได้มาก แรงดันที่คร่อมคาปาซิเตอร์ก็สูงขึ้นตาม ($V_c = I_1X_{c1} + I_2X_{c2} + I_3X_{c3} + \dots$) และทำให้สารไดอิเล็กตริกเสียหาย ดังนั้นการเลือกพิกัดแรงดันของคาปาซิเตอร์ในระบบที่มีฮาร์มอนิกสูง ต้องคำนึงถึงข้อนี้ด้วย

ก.การสูญเสียในสายไฟฟ้า



รูปที่ 4 การสูญเสียในสายไฟฟ้า

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำก็จะเกิดกำลังสูญเสีย I^2R

กรณีเฟสเดียว ในรูป 4ก.

$$
\begin{aligned}
\text{กำลังสูญเสีย} &= I_{rms}^2(2R) \\
&= (I_{1rms}^2 + I_{2rms}^2 + I_{3rms}^2 + \dots)\,2R \\
&= I_{1rms}^2(2R)\left(1 + \left(\frac{I_{2rms}}{I_{1rms}}\right)^2 + \left(\frac{I_{3rms}}{I_{1rms}}\right)^2 + \dots\right) \\
&= I_{1rms}^2(2R)\,(1+THD^2)
\end{aligned}
$$

ดังนั้นกำลังสูญเสียที่เพิ่มขึ้นจากรูปคลื่นพื้นฐาน คือ $THD^2 \times 100\%$ เช่นรูปคลื่นที่มี THD 30% จะทำให้เกิดการสูญเสียในตัวนำเพิ่มขึ้น $0.3 \times 0.3 \times 100 = 9\%$

กรณีระบบสามเฟสสี่สาย ในรูป 4ข.

ถ้ากระแสในแต่ละสายคือ I_R, I_S, I_T, I_N มีฮาร์มอนิก THD_1, THD_2, THD_3 และ THD_N

$$
\text{กำลังสูญเสียรวม} = I_{R1}^2R(1+THD_1^2) + I_{S1}^2R(1+THD_2^2) + I_{T1}^2R(1+THD_3^2) + I_{N1}^2R(1+THD_N^2) +
$$

หมายเหตุ

1. กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 และจำนวนเท่าของ 3 ของทุกเฟสจะมาเสริมกันในกระแสนิวตรอนจึงมักจะพบว่า THD ของสายนิวตรอนสูงกว่าสายเฟสมาก และกลายเป็นสายที่มีการสูญเสียมากที่สุด

2. ค่ากำลังสูญเสียที่คำนวณนี้จะน้อยกว่าที่เป็นจริง เพราะค่าความต้านทานของตัวนำนั้นมีค่าไม่เท่ากันที่แต่ละความถี่ (เนื่องจาก Skin effect) ผลของขนาดตัวนำและระยะห่างระหว่างสาย (Proximity effect) ยิ่งรูปคลื่นมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกสูงๆ ยิ่งมากก็ยิ่งผิดไปมาก

ข. การสูญเสียในหม้อแปลง

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานทั่วไป ถูกออกแบบให้สามารถรับกระแสฮาร์มอนิกได้ไม่เกิน 5% THD ในที่นี้เราจะพิจารณากรณีที่ต้องจ่ายกระแสฮาร์มอนิกสูงกว่านี้ หม้อแปลงไฟฟ้านั้นเราก็รู้กันที่มีการสูญเสียอยู่ 2 แบบคือ ที่แกนเหล็ก และที่แปรตามโหลด กำลังสูญเสียทั้งสองได้รับผลจากกระแสฮาร์มอนิก ดังนี้

กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss)

เมื่อหม้อแปลงจ่ายกระแสที่มีฮาร์มอนิก อิมพีแดนซ์จะทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นด้วย แรงดันที่มีฮาร์มอนิกนี้จะทำให้การสูญเสียในแกนเหล็กเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ผลที่เกิดจะน้อยเมื่อเทียบกับกำลังสูญเสียตามโหลด เราสามารถละเลยส่วนนี้ (การสูญเสียในแกนเหล็กแปรตามกำลังสองของแรงดัน)

กำลังสูญเสียตามโหลด (load loss)

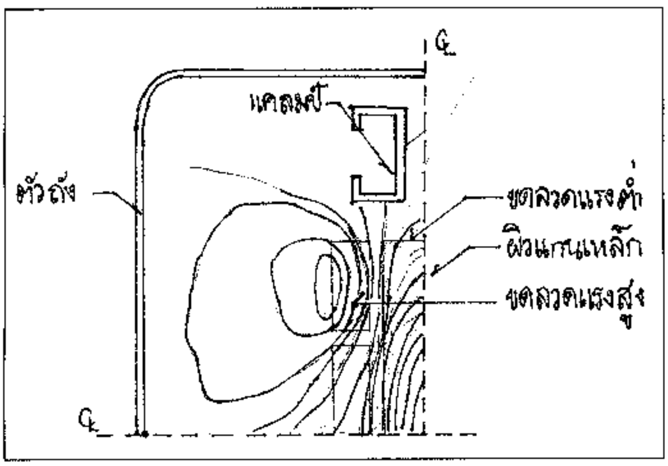
กำลังสูญเสียประเภทนี้จะแปรตามโหลดที่จ่าย ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ กำลังสูญเสียในตัวนำ I^2R เนื่องจากความต้านทานของขดลวด และกำลังสูญเสียสเตรย์

$$
P_{load\ loss} = I^2R + P_{stray} \qquad ....(1)
$$

● <u>กำลังสูญเสีย I^2R</u> เมื่อค่า I_{rms} เพิ่มขึ้นเนื่องจากฮาร์มอนิก ค่า ก็เพิ่มขึ้นตามนั้น เหมือนกับกรณีของสายไฟ เพิ่มขึ้น $THD^2 \times 100\%$

● <u>กำลังสูญเสียสเตรย์</u> เป็นกำลังสูญเสียที่แปรตามโหลดเหมือนกัน เกิดขึ้นเนื่องจากในหม้อแปลงนั้นมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นเพราะมีไฟฟ้ากระแสสลับไหลผ่านตัวนำ เส้นแรงจะเกิดขึ้นรอบตัวนำแต่ละเส้น ผลรวมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 5 ทำให้ชิ้นส่วนโลหะในถังหม้อแปลง เช่น ขดลวด, แคลมป์ยึดแกนเหล็ก ผิวของตัวถังล้วนอยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (เราไม่กล่าวถึงแกนเหล็ก เพราะ

ส่วนนั้นจัดเป็นกำลังสูญเสียในแกนเหล็กไปแล้ว) จึงทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy current) ขึ้นในเนื้อโลหะเหล่านี้และเกิดความร้อนขึ้น การสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งแปรตามกระแส จะเห็นได้ว่าความเข้มสนามสูงสุดเกิดขึ้นที่ขดลวดแรงต่ำซึ่งอยู่ด้านใน จึงทำให้จุดนี้เกิดความร้อนสูง (Hot Spot) ทำให้แม้บางครั้งหม้อแปลงจ่ายโหลดไม่มาก แต่รูปคลื่นมีฮาร์มอนิกอยู่มาก กระแสไหลวนในขดลวดก็สามารถทำให้ความร้อนขึ้นที่ขดลวดจนเสียหายได้ ปรากฏการณ์ลักษณะนี้เป็นแบบเดียวกับที่เราร้อยสายไฟไม่ครบสามเฟสในท่อโลหะ ท่อโลหะจะร้อนมากเนื่องจากกระแสไหลวน หรือการเจาะรูนำสายผ่านผนังคอนกรีตถ้าแยกสาย เฟสละรูโลหะรอบสาย หรือเหล็กเส้นโครงสร้างรอบรูที่เจาะจะร้อนผิดปกติ



รูปที่ 5 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในถังหม้อแปลง

ในการคำนวณเราสามารถประมาณได้ว่า กระแสไหลวนที่เกิดบนตัวถังโลหะ แคลมป์ มีส่วนน้อยกว่าที่เกิดในขดลวดมาก ดังนั้น

$P_{stray} \approx P_{EC}$ เมื่อ P_{EC} คือกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวด

เมื่อเราจ่ายรูปคลื่นที่มีฮาร์มอนิก กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวด (P_{EC}) นี้จะแปรตามกำลังสองของกระแสไฟฟ้าแต่ละฮาร์มอนิก และความถี่ ซึ่งก็คือลำดับของฮาร์มอนิก ดังนั้น

$$P_{stray} = P_{EC} = P_{EC\text{-}R}\Big(\frac{I_1^2(1)^2}{I_R^2} + \frac{I_2^2(2)^2}{I_R^2} + \frac{I_3^2(3)^2}{I_R^2} + \frac{I_4^2(4)^2}{I_R^2} + \dots \Big)$$

$$\text{หรือ} \quad P_{EC\text{-}R}\left(\sum_{h=1}^{\infty}\left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2 h^2\right) \qquad \dots(2)$$

โดยที่ P_{EC} เป็นค่ากำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวดเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดใดๆ

$P_{EC\text{-}R}$ เป็นค่ากำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวดเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเต็มพิกัด

h เป็นลำดับของฮาร์มอนิก

I_h ค่ากระแส RMS ของฮาร์มอนิกลำดับที่ h

I_R ค่ากระแสพิกัด (Rated Current)

เราจำเป็นต้องรู้ค่า $P_{EC\text{-}R}$ เพื่อคำนวณ P_{EC} จากรูปคลื่นต่างๆ ตามสมการ (2) วิธีการที่จะได้ $P_{EC\text{-}R}$ มาก็คือ เรานำกำลังสูญเสียตามโหลดทั้งหมดที่พิกัด หักออกด้วยกำลังสูญเสีย I^2R ที่พิกัด ก็จะได้ $P_{EC\text{-}R}$

จากสมการ (1) $\quad P_{load\ loss} = I^2R + P_{EC}$

ถ้าเราพิจารณาที่โหลดเต็มพิกัด $P_{load\ loss\text{-}R} = I_R^2R + P_{EC\text{-}R}$

หรือ $P_{EC\text{-}R} = P_{load\ loss\text{-}R} - I_R^2R$

เมื่อพิจารณาทั้งขดลวดแรงสูงและแรงต่ำจะได้ว่า

$$P_{EC\text{-}R} = P_{load\ loss\text{-}R} - K\left(I_H^2R_H + I_L^2R_L\right) \qquad \dots(3)$$

เมื่อ $k = 1$ สำหรับหม้อแปลงเฟสเดียว

$= 1.5$ สำหรับหม้อแปลงสามเฟส

I_H, I_L เป็นกระแสด้านแรงสูงและแรงต่ำ ตามลำดับ

R_H, R_L เป็นความต้านทานของขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ ตามลำดับ

ค่า R_H และ R_L คำนวณได้จากผลการทดสอบหม้อแปลง ดังนี้

ถ้าเป็นขดลวดที่ต่อแบบเดลต้า

R_H หรือ $R_L = \frac{2}{9}$ ของความต้านทานสามเฟสอนุกรมกัน

ถ้าขดลวดต่อแบบวาย

R_H หรือ $R_L = \frac{2}{3}$ ของความต้านทานสามเฟสอนุกรมกัน

กล่าวโดยสรุป วิธีการคำนวณก็คือ หาค่า $P_{EC\text{-}R}$ จากสมการ (3) เมื่อรู้องค์ประกอบฮาร์มอนิกของรูปคลื่น ก็จะสามารถหาค่า P_{EC} จากสมการ (2) ได้ ดังแสดงในตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่าง หม้อแปลงขนาด 2000 kVA พิกัดแรงดัน 11 kV/400V อุณหภูมิเพิ่ม 100°C กำลังสูญเสียตามโหลดที่ 75°C = 15.750 วัตต์ กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก 2890 วัตต์ มีผลการวัดความต้านทานขดลวดทั้งสามเฟสอนุกรมกันที่ 75°C ดังนี้ ความต้านทานด้านแรงสูง 1.082 โอห์ม ความต้านทานแรงต่ำ 0.000845 โอห์ม การต่อเป็นแบบ DY11 จ่ายกระแสให้ศูนย์คอมพิวเตอร์ วัดค่า RMS ได้ 2000A และมีฮาร์มอนิกในกระแสดังนี้

ลำดับที่	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
องค์ประกอบ	100%	65.7%	37.7%	12.7%	4.4%	5.3%	2.5%	1.9%	1.8%	1.1%

1. กำลังสูญเสีย ถ้าไม่มีฮาร์มอนิกเลย กระแสพื้นฐานล้วนๆ

$$I_{rms}^2 = I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots = 1^2 + 0.657^2 + 0.377^2 + 0.127^2 + 0.044^2 + 0.053^2 + 0.025^2 + 0.019^2 + 0.018^2 + 0.011^2$$

= 1.267 หน่วย หรือ 2000 A

ดังนั้น I_1 = 1 หน่วย = 1587A หรือ KVA = $\sqrt{3 \times 400 \times 1587}$

= 1099 KVA

กำลังสูญเสียรวม = $2890 + \left(\frac{1099}{2000}\right)^2 \times 15,750$

= 7,646 วัตต์

2. กำลังสูญเสีย เมื่อจ่ายโหลดดังกล่าว

พิกัดหม้อแปลง 2000 KVA ที่แรงดัน 11 kV/400 V

กระแสพิกัด

$I_{H\text{-}R} = 150A, I_{L\text{-}R} = 2887\ A$

กระแสที่โหลด 2000 A

$I_H = 72.7A, I_L = 2000\ A$ (จากอัตราส่วนของแรงดัน)

แทนค่าตามหมายเหตุสมการ (3) ได้

$R_H = 1.24, R_L = 0.000563$ โอห์ม

ดังนั้นตามสมการ (3)

$P_{EC\text{-}R} = 15750\text{-}1.5\ (105^2 \times 0.24 + 2887^2 \times 0.000563)$

= 4742 วัตต์

ลำดับที่	% Harmonic	คำนวณ ข้อ 2		คำนวณ ข้อ 3	
		ค่า RMS (A)	$\left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2 h^2$	ค่า RMS (A)	$\left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2 h^2$
1	100%	1587.0	0.629	1587.0	0.629
3	65.7%	1042.7	2.446	79.35	0.007
5	37.7%	598.3	2.237	0	0
7	12.7%	201.5	0.497	0	0
9	4.4%	69.8	0.099	0	0
11	5.3%	84.1	0.214	0	0
13	2.5%	39.7	0	0	0
15	1.9%	30.2	0	0	0
17	1.8%	28.6	0	0	0
19	1.1%	17.5	0	0	0
		Σ	**6.123**	Σ	**0.636**

จะได้ $P_{EC} = 4742 \times 6.123 = 29,034$ วัตต์

เพราะว่า $P_{load\ loss} = P_{EC} + 1.5\ (I_H^2 R_H + I_L^2 R_L)$

$= 29,034 + 1.5\ (72.7^2 \times 0.24 + 2000^2 \times 0.000561)$

$= 34,314$ วัตต์

กำลังสูญเสียรวม $= 2890 + 34,314 = 37,204$ วัตต์

3. กำลังสูญเสียหลังปรับปรุงติดตั้งฟิลเตอร์ ทำให้เหลือฮาร์มอนิกที่ 3 เพียง 5%, ที่เหลือมีค่าต่ำมาก ดังแสดงในตาราง

$$I_L = \sqrt{15872^2 + 79.352^2} = 1589A, I_H = 82.5A$$

$P_{EC} = 4742 \times 0.636 = 3016$ วัตต์

$P_{load\ loss} = P_{EC} + 1.5\ (I_H^2 R_H + I_L^2 R_L)$

$= 3016 + 1.5\ (82.5^2 \times 0.24 + 1589^2 \times 0.000563)$

$= 7598.5$ วัตต์

กำลังสูญเสียรวม $= 2890 + 7598.5 = 10488.5$ วัตต์

สรุป

บทความนี้นำเสนอการประเมินผลของฮาร์มอนิก ต่อกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในหม้อแปลงไฟฟ้า ค่าที่คำนวณได้นี้เป็นค่าโดยประมาณ เนื่องจากได้ใช้สมมติฐานหลายประการ แต่ก็เพียงพอที่จะแสดงให้เห็นความสำคัญของการลดฮาร์มอนิกในการอนุรักษ์พลังงาน

เอกสารอ้างอิง

- IEEE, Recommened Practice for Estabilishing Transformers. Capability when Supplying Nonsinusoidal Load current, ANSI/IEEE C57.110-1986
- IEEE, Harmonics in Power System, IEEE std 141-1993
- IEEE Standard Test code for liguid immersed Transformer, IEEE std C 57.12.90-1993
- Holec Transformer Test report