

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การศึกษาผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ต่อค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า เลือนเฟสและการทำให้เป็นจริงด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าเลือนเฟส 15 องศา

ไพบุณย์ เกียรติสุขคนธา^{1*} ภาสวิญญ์ กล่ำรักษ์¹ ณรงค์ฤทธิ์ ยินดิยม¹

และ นภัทร วัจนเทพินทร์²

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

² ศูนย์วิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

¹ 450 หมู่ 6 ตำบลยานยาว อำเภอสามชูก จังหวัดสุพรรณบุรี 72140

² 217 ตำบลส่วนใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000

รับบทความ 22 ธันวาคม 2563 แก้ไขบทความ 30 กันยายน 2564 ตอรับบทความ 29 พฤศจิกายน 2564

บทคัดย่อ

แนวโน้มการอนุรักษ์พลังงานที่ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายและการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเลือนเฟสเพิ่มขึ้นอย่างกว้างขวาง บทความนี้นำเสนอการศึกษาผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ต่อค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเลือนเฟส ในบทความได้นำหม้อแปลงไฟฟ้าเลือนเฟสที่มีขดลวดทุติยภูมิจำนวน 4 ชุดโดยในแต่ละชุดมีมุมเลือนเฟสต่างกัน 15 องศา มาประยุกต์ใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฮาร์มอนิกส์และค่าสูญเสียของการทดสอบหา กำลังไฟฟ้าในขณะจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น 3 เฟส 3 สาย พร้อมกัน 2 ชุด และ 4 ชุด ทั้งกรณี 25%, 50%, 75% และ 100% ของกระแสพิกัดที่แตกต่างกัน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ากระแสฮาร์มอนิกส์มีผลต่อค่าสูญเสียจากกระแสไหลวน ที่ขดลวดอย่างมีนัยสำคัญ การจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นพร้อมกัน 2 ชุดพบว่าทั้งกรณีจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกัน และจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกัน จะมีค่าสูญเสียที่ใกล้เคียงกัน แม้ %THDi จะแตกต่างกัน แต่กรณีจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกัน %THDi จะมีค่าสูงกว่า 15% จึงไม่เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 519 ในขณะที่มีการจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น พร้อมกัน 4 ชุดจะเป็นไปตามมาตรฐานและยังให้ค่าสูญเสียน้อยกว่า 57% ของการจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นแบบชุดเดียว ลักษณะดังกล่าวหากนำมาประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์จะไม่เพียงแค่ลดกระแสฮาร์มอนิกส์เท่านั้นแต่ยังลดการใช้พลังงานได้ด้วย

คำสำคัญ : หม้อแปลงไฟฟ้าเลือนเฟส; คุณภาพไฟฟ้า; ฮาร์มอนิกส์; ค่าสูญเสีย; การประหยัดพลังงาน

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Investigation of the Effect of Harmonic Currents on Losses of Phase Shifting Transformers and Its Realization using a 15-Degree Phase shifting Transformer

Paiboon Kiatsookkanatorn^{1*} Passawit Klamrak¹ Narongrit Yindeeyom¹
and Napat Watjanatepin²

¹ Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Suphanburi Campus.

² SERTTC, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi Campus.

¹ 450 Moo 6, T. Yanyaw, A. Samchuk, Suphanburi, 72130, Thailand.

² 7/1 Nonthaburi-1, Nonthaburi, 11000, Thailand.

Received 22 December 2020; Revised 30 September 2021; Accepted 29 November 2021

Abstract

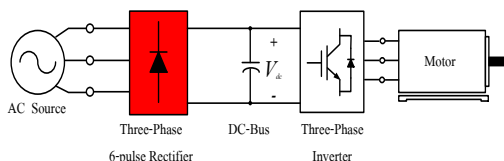
The trend of energy savings has been widely interested and phase shift transformers (HMT) have been extensively used. This paper presents the investigation of the effect of harmonic currents on losses of the HMT. In this paper, a 15-degree HMT with quad secondary winding is applied to find the relationship between harmonic currents and losses of the HMT. This relation can be met by testing the active power of primary and secondary sides while the HMT supplies for two and four non-linear loads at 25%, 50%, 75%, and 100% rated currents, respectively. The results reveal that harmonic currents affect winding eddy current losses significantly and the losses for loading the two secondaries 1 and 2 are the same as loading the two secondaries 1 and 3 while both %THDi are different. However, for loading the secondaries 1 and 2, the %THDi is more than 15% so it is not met IEEE 519 Std. while the HMT is supplied with four loads, the %THDi has met IEEE 519 Std. and the losses are less than 57% compared to one load. As a result of these, if the HMT is applied to an adjustable speed drive system, it is not only reduced the harmonics but also saved the energies.

Keywords : Phase Shifting Transformers; Power Quality; Harmonics; Losses; Energy Savings

** Corresponding Author. Tel.: +668 6789 1138, E-mail Address: Paiboon.k@rmutsb.ac.th*

1. บทนำ

ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ (Adjustable Speed Drive, ASD) ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นโพลดิเล็กทรอนิกส์กำลังชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยมแพร่หลายในอุตสาหกรรม[1] โพลดิชนิดนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงกระแสในเชิงพลวัตซึ่งมีวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบ 6 พัลส์ทำหน้าที่เป็นวงจรส่วนหน้า(Front-End) ลักษณะดังกล่าวทำให้เป็นเหมือนโพลดิไม่เชิงเส้นแบบ 3 เฟส 3 สายที่สร้างกระแสฮาร์มอนิกส์เชิงพลวัตอันดับที่ $6m \pm 1$ เมื่อ $m = 1, 2, 3, \dots$ โดยค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส(THDi) จะมีค่าประมาณ 30% ทำให้มีค่าสูงเกินกว่ามาตรฐาน[2], [3] และส่งผลให้เกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้าต่อระบบไฟฟ้าได้ นอกจากนั้นหากกระแสฮาร์มอนิกส์ดังกล่าวไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำให้มีค่าสูญเสียเพิ่มขึ้น[4]



รูปที่ 1 ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ในอุตสาหกรรม

จากปัญหาดังกล่าวจึงมีงานวิจัยมากมายได้นำเสนอวิธีการลดกระแสฮาร์มอนิกส์[5] การใช้รีแอคเตอร์สามารถลดฮาร์มอนิกส์ได้แต่ระดับฮาร์มอนิกยังมีค่าสูง ในขณะที่การใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟสามารถลดฮาร์มอนิกให้มีค่าต่ำได้ แต่จะมีข้อจำกัดเรื่องโพลดิที่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงพลวัต การใช้วงจรกรองแบบแอคทีฟก็เป็นแนวทางหนึ่งที่ดีซึ่งรองรับกับโพลดิที่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงพลวัตได้ และสามารถเลือกลดอันดับฮาร์มอนิกได้ตามต้องการแต่วงจรกรองแบบนี้มีราคาสูงมาก การใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟส (Phase shifting Transformers) จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย[6]-[17] เพื่อลดกระแสฮาร์มอนิกส์ของวงจร

เรียงกระแสแบบหลายพัลส์ ซึ่งมีลักษณะการใช้งานที่นำขดลวดด้านทุติยภูมิแต่ละชุดมาจ่ายโพลดิร่วมกัน อย่างไรก็ตามหม้อแปลงแบบนี้ยังสามารถนำมาใช้ในการลดกระแสฮาร์มอนิกส์สำหรับการจ่ายโพลดิแต่ละชุดอย่างอิสระได้ด้วย[18] ลักษณะดังกล่าวจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อลดกระแสฮาร์มอนิกส์ของเครื่องจักรที่มีระบบควบคุมมอเตอร์ในงานอุตสาหกรรมได้

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้นหากใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟสมาลดกระแสฮาร์มอนิกส์นอกจากจะทำให้เป็นไปตามมาตรฐานและระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพแล้ว ยังทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถจ่ายโพลดิเพิ่มขึ้น[19] อายุการใช้งานยาวนานขึ้น[20] และที่สำคัญยังทำให้ค่าสูญเสียที่เกิดจากผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ลดลงอีกด้วย ซึ่งค่าสูญเสียที่ลดลงดังกล่าวจะส่งผลให้ผู้ใช้ไฟมีต้นทุนรายจ่ายลดลง อย่างไรก็ตามยังไม่มีงานวิจัยใดนำเสนอให้เห็นว่าเมื่อนำหม้อแปลงเลื่อนเฟสมาจ่ายโพลดิไม่เชิงเส้นแต่ละชุดอย่างอิสระค่าสูญเสียที่หม้อแปลงจะลดลงอย่างไร ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่สำคัญต่อภาคอุตสาหกรรมที่สนใจด้านการอนุรักษ์พลังงาน

บทความนี้นำเสนอการศึกษาผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ต่อค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟสแบบขดลวดทุติยภูมิ 4 ชุด ซึ่งมีประเด็นที่จะนำเสนอ ดังนี้

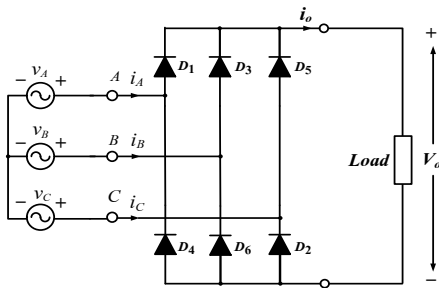
- ประยุกต์ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟส 15 องศาแบบขดลวดทุติยภูมิ 4 ชุด ในการจ่ายโพลดิไม่เชิงเส้น 3 เฟส 3 สายแต่ละชุดอย่างอิสระที่เป็นเหมือนระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์
- แสดงผลการทดสอบค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟสเมื่อจ่ายโพลดิ 2 ชุด และ 4 ชุดพร้อมกัน รวมทั้งค่าร้อยละ(%)ของการจ่ายโพลดิที่แตกต่างกันด้วย
- หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อกระแสฮาร์มอนิกส์ที่มีปริมาณและอันดับแตกต่างกัน
- แสดงการประหยัพลังงานจากผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ลดลงและค่าตอบแทนคืนกลับ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 โหลดไม่เชิงเส้น 3 เฟส 3 สาย โดยอาศัยวงจร

เรียงกระแส 6 พัลส์ (B6)

จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์จะมีวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบ 6 พัลส์ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นโหลดไม่เชิงเส้นเชื่อมต่อโดยตรงเข้ากับระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2 วงจรนี้จะประกอบด้วยไดโอด 6 ตัว ทำหน้าที่แปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบ 6 พัลส์

จากรูปที่ 2 แรงดันด้านเข้าที่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีเฉพาะความถี่หลักมูลสามารถเขียนแทนได้ตามสมการที่ (1) และเมื่อนำมาเป็นแหล่งจ่ายป้อนให้กับวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์ 6 พัลส์จะทำให้กระแสมีองค์ประกอบของฮาร์โมนิกส์ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยอนุกรมฟูเรียร์[21] ตามสมการที่ (2)

$$v(t) = V_{1,m} \sin(\omega_1 t + \theta_1) \quad (1)$$

$$i(t) = I_{1,m} \sin(\omega_1 t - \phi_1) + \sum_{n=6k \pm 1}^{\infty} (-1)^k I_{n,m} \sin n(\omega_1 t - \phi_n) \quad (2)$$

โดยที่

$V_{1,m}$ = แรงดันค่ายอดที่ความถี่หลักมูล

$I_{1,m}$ = กระแสค่ายอดที่ความถี่หลักมูล

$I_{n,m}$ = กระแสค่ายอดในแต่ละอันดับฮาร์โมนิก

n = อันดับฮาร์โมนิก

ω_1 = ความถี่หลักมูล

ϕ_n = มุมเฟสระหว่างแรงดันและกระแส

จากสมการที่ (1) และ (2) ค่ากำลังไฟฟ้าจริงสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3)

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} P_n = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{V_{n,m} I_{n,m}}{2} \right) \cos(\theta_n - \phi_n) \quad (3)$$

$$= \left(\frac{V_{1,m} I_{1,m}}{2} \right) \cos(\theta_1 - \phi_1) = V_{1,rms} I_{1,rms} \cos(\theta_1 - \phi_1)$$

และค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวมกระแส(Total Harmonic Distortion : THD) สามารถนิยามได้จาก

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_{1,rms}^2}}{I_{1,rms}} \quad (4)$$

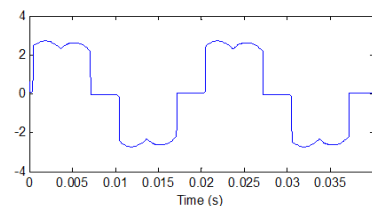
โดยที่ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสคือ

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_{n,rms}^2} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{I_{n,m}}{\sqrt{2}} \right)^2} \quad (5)$$

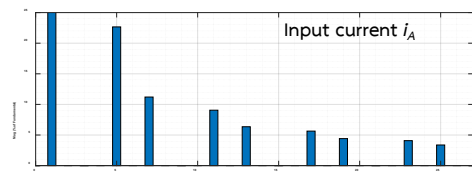
และในกรณีนี้จะได้ตัวประกอบกำลัง(Power factor)

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{rms} I_{rms}} = \left(\frac{I_{1,rms}}{I_{rms}} \right) \frac{\cos(\theta_1 - \phi_1)}{DPF} \quad (6)$$

จากรูปที่ 2 สามารถแสดงกระแสด้านเข้าได้ดังรูปที่ 3(ก) และสามารถแสดงสเปกตรัมของกระแสด้านเข้าได้ดังรูปที่ 3(ข)



(ก)



(ข)

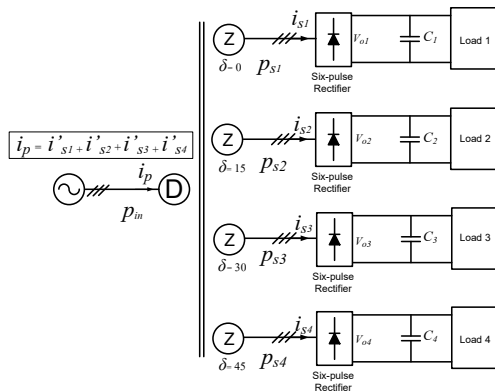
รูปที่ 3 กระแสของวงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์และสเปกตรัม

2.2 กระแสฮาร์โมนิกส์ต่อค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟส

หม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟสเป็นหม้อแปลงที่มีลักษณะแตกต่างจากหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสทั่วไป ตรงที่ขดลวดด้านทุติยภูมิจะมีอย่างน้อย 2 ชุด [22] โดยแต่ละชุดจะมีมุมเลื่อนเฟสที่แตกต่างกันอาทิเช่น 15, 20 หรือ 30 องศา เป็นต้น ซึ่งมุมเลื่อนเฟสที่แตกต่างกันของขดลวดทั้งสองชุดนี้จะทำให้สามารถลดกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงมีชื่อที่นิยมเรียกกันอีกอย่างหนึ่งว่า “หม้อแปลงไฟฟ้าลดฮาร์โมนิกส์” (Harmonic Mitigating Transformers, HMT) โดยในที่นี้จะเรียกสั้นๆว่า HMT ซึ่งปัจจุบันมีบริษัทต่างประเทศที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ [23]

2.2.1 HMT แบบขดลวดทุติยภูมิ 4 ชุด

ตระกูลของ HMT จะมีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับจำนวนชุดของขดลวดด้านทุติยภูมิ อาทิเช่น 2, 3 และ 4 ชุด โดยส่วนมากจะถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับวงจรเรียงกระแส 12 พัลส์ 18 พัลส์ และ 24 พัลส์ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในบทความนี้จะใช้ HMT ที่มีขดลวดด้านปฐมภูมิ 1 ชุด และด้านทุติยภูมิจำนวน 4 ชุด (Quad Secondary Winding) ที่มีมุมเลื่อนเฟสในแต่ละชุด 15 องศา มาประยุกต์ใช้จ่ายโหลดไม่เชิงเส้นที่แยกอิสระต่อกันดังแสดงในรูปที่ 4

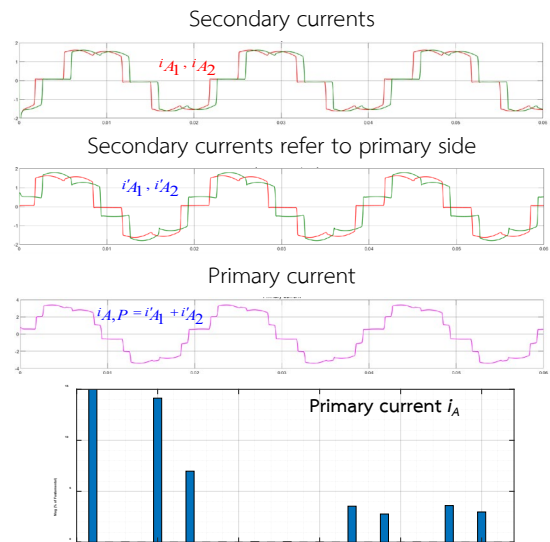


รูปที่ 4 HMT แบบขดลวดทุติยภูมิ 4 ชุด

รูปที่ 4 แสดง HMT แบบขดลวดทุติยภูมิ 4 ชุดที่ใช้วงจรเรียงสแ 3 เฟส 6 พัลส์ (B6) เป็นตัวแทนของโหลดไม่เชิงเส้นในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สาย และการจ่ายโหลดในแต่ละชุดจะแยกอิสระต่อกันจึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี คือกรณีจ่ายโหลด 2 ชุดพร้อมกัน และกรณีจ่ายโหลด 4 ชุดพร้อมกัน

ก) กรณีจ่ายโหลด 2 ชุดพร้อมกัน

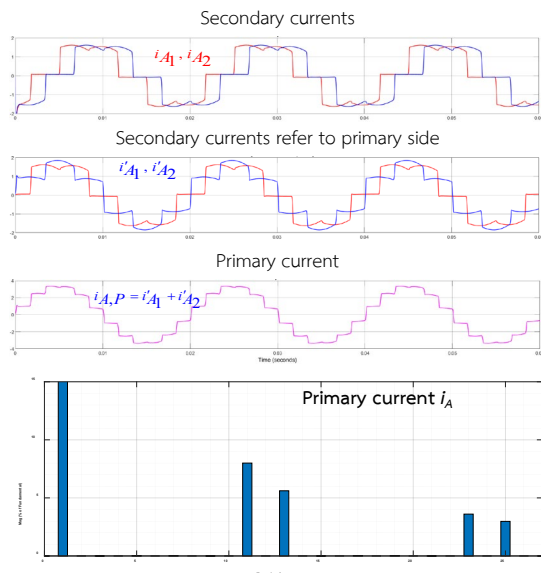
กรณีจ่ายโหลดสองชุดยังสามารถแบ่งออกเป็นแบบจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกันซึ่งแบบนี้จะมีมุมเลื่อนเฟส 15 องศาและแบบจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกันแบบนี้จะมีมุมเลื่อนเฟส 30 องศา ทั้งสองแบบให้ผลของการลดกระแสฮาร์โมนิกส์ในแต่ละอันดับที่แตกต่างกันดังแสดงการเปรียบเทียบในรูปที่ 5 และ 6



รูปที่ 5 กระแสและสเปกตรัมของ HMT เมื่อจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกัน (เลื่อนเฟส 15 องศา)

รูปที่ 5 แสดงผลการจำลองเมื่อใช้ชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกัน ด้านบนคือกระแสเฟส A ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเลื่อนเฟสชุดที่ 1 และ 2 โดยทั้งคู่จะมีเฟสต่างกัน 15 องศา ถัดมาคือกระแสด้านทุติยภูมิที่แปลงเข้ามาทางด้านปฐมภูมิ ถัดมาคือกระแสเฟส A ด้านปฐม-

ภูมิ และล่างสุดคือสเปกตรัมของกระแสด้านปฐมภูมิ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกันจะสามารถลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 และ 13 ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกสรวมของกระแสลดลงจาก 30.32% เหลือ 17.85%

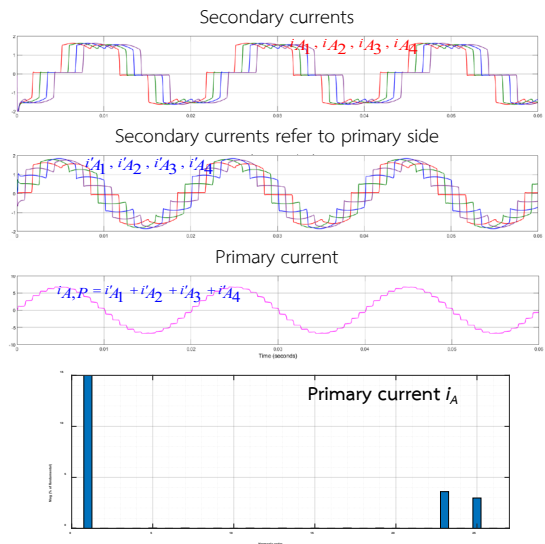


รูปที่ 6 กระแสและสเปกตรัมของ HMT เมื่อจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกัน (เลื่อนเฟส 30 องศา)

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นได้ว่าการใช้ HMT ชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกัน ซึ่งเป็นกรณีที่มีเฟสต่างกัน 30 องศา สามารถลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5, 7, 17 และ 19 อันดับฮาร์มอนิกที่ลดลงจะแตกต่างจากกรณีการใช้ HMT ชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกันจึงสามารถนำมาวิเคราะห์ผลของกระแสฮาร์มอนิกที่แตกต่างกันได้ ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกสรวมของกระแสกรณีนี้จะลดลงจาก 30.32% เหลือ 11.99%

ข) กรณีจ่ายโหลด 4 ชุดพร้อมกัน

HMT แบบขดลวดทุติยภูมิ 4 ชุด เมื่อจ่ายโหลดพร้อมกันสามารถลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5, 7, 11, 13, 17 และ 19 ได้ ทำให้กระแสฮาร์มอนิกที่เหลืออย่างมากโดยอันดับแรกจะอยู่ที่ 23 ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 กระแสและสเปกตรัมของ HMT เมื่อจ่ายโหลดพร้อมกันทั้ง 4 ชุด

เมื่อพิจารณารูปที่ 7 จะเห็นว่ากระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเลื่อนเฟสจะมีลักษณะใกล้เคียงไซน์ เมื่อนำกระแสมาแตกสเปกตรัมจะได้ดังรูปด้านล่าง และเมื่อนำไปเชื่อมโยงกับผลการจำลองในรูปที่ 5 และ 6 จะสามารถอธิบายได้ว่าชุดที่ 1 และ 3 จะหักล้างกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5, 7, 17 และ 19 ส่วนชุดที่ 1 และ 2 จะหักล้างกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 และ 13 ในทำนองเดียวกันกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5, 7, 17 และ 19 ของชุดที่ 2 และ 4 จะหักล้างกัน ในขณะที่กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 และ 13 ของชุดที่ 3 และ 4 จะหักล้างเช่นเดียวกันทำให้กระแสฮาร์มอนิกเริ่มต้นอยู่อันดับที่ 23 และค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกสรวมของกระแสลดลงเหลือเพียง 5.65% เท่านั้นและจากผลการจำลองในแต่ละกรณีได้ค่ากระแสที่ความถี่หลักมูล 1.175, 2.38, 2.38 และ 4.76 A ตามลำดับและค่าร้อยละกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่ากระแสฮาร์มอนิกเมื่อจ่ายโหลดทั้ง 4 กรณี

Loads of Sec.	Current harmonics in each order (%)								THDI (%)
	5	7	11	13	17	19	23	25	
1	22.69	11.26	9.06	6.38	5.62	4.39	4.03	3.29	30.32
1+2	15.78	7.81	-	-	3.98	3.21	3.98	3.26	17.85
1+3	-	-	8.94	6.3	-	-	3.98	3.26	11.99
1+2+3+4	-	-	-	-	-	-	3.98	3.25	5.65

2.2.2 ค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าจากผลของกระแสฮาร์มอนิกส์

ค่าสูญเสียหม้อแปลงไฟฟ้าตอนไร้โหลดคือค่าสูญเสียที่แกนเหล็กส่วนมากจะเชื่อมโยงกับฮาร์มอนิกส์เฉพาะแรงดันเท่านั้นโดยไม่ขึ้นกระแสฮาร์มอนิกส์ ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าสูญเสียตอนจ่ายโหลดอันมีสาเหตุมาจากกระแสฮาร์มอนิกส์จึงสามารถละเลยค่าสูญเสียที่แกนเหล็กได้ จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าในขณะที่จ่ายโหลดไม่เชิงเส้นจะได้จากผลรวมของค่าสูญเสียที่ขดลวดที่เกิดจากผลของกระแสฮาร์โมนิคและค่าสูญเสียจากกระแสไหลวนที่ขดลวดซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (7)

$$P_W = P_{DC} + P_{EC} \quad (7)$$

- การเพิ่มขึ้นของกระแสที่โหลดอันเนื่องมาจากร่องประกอบฮาร์มอนิก จะส่งผลให้ค่าสูญเสียในเทอมกระแสฮาร์โมนิคของหม้อแปลงไฟฟ้ามีการเพิ่มขึ้นตามกระแสยกกำลังสอง ซึ่งค่าสูญเสียนี้หาได้จาก

$$P_{DC} = R_{DC} I_{rms}^2 = R_{DC} \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_{n,rms}^2} \quad (8)$$

เมื่อ R_{DC} คือความต้านทานไฟตรงของขดลวดที่ไม่มีผลมาจากปรากฏการณ์ทางผิวหาได้ด้วยเครื่องวัดความต้านทานไฟตรง

- ค่าสูญเสียจากกระแสไหลวนที่ขดลวด(Winding eddy current losses) [24] จะเป็นสัดส่วนกับกระแยกกำลังสองและความถี่ยกกำลังสองหากหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายกระแสที่พิกัด I_R ค่าสูญเสียจากกระแสไหลวนที่ขดลวดจะสอดคล้องตามสมการที่ (9)

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{n=1}^{n=n_{max}} \underbrace{n^2 \left(\frac{I_n}{I_R} \right)^2}_{K \text{ factor}} \quad (9)$$

โดยที่

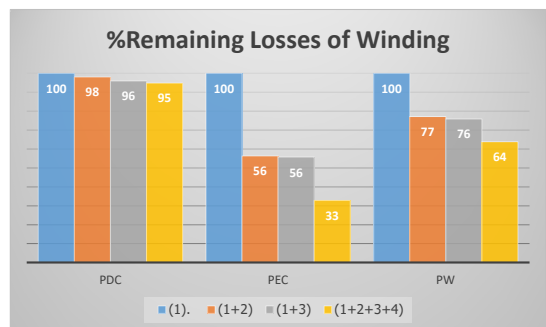
I_n = ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่อันดับต่างๆ

I_R = กระแสพิกัดที่ความถี่หลักมูลของหม้อแปลง

n = อันดับฮาร์มอนิกส์

P_{EC-R} = ค่าสูญเสียจากกระแสไหลวนที่ขดลวดจากความถี่หลักมูล

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าสูญเสียเพิ่มขึ้นเมื่อต้องจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นที่มีองค์ประกอบของฮาร์โมนิก ดังนั้นเพื่อหาความสัมพันธ์ว่ากระแสฮาร์มอนิกส์มีผลต่อค่าสูญเสียอย่างไร เราจึงสามารถนำกระแสฮาร์มอนิกส์ของหม้อแปลงเลื่อนเฟสในแต่ละกรณีตามตารางที่ 1 มาใช้ร่วมกับสมการที่ (7)-(9) หาความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 8



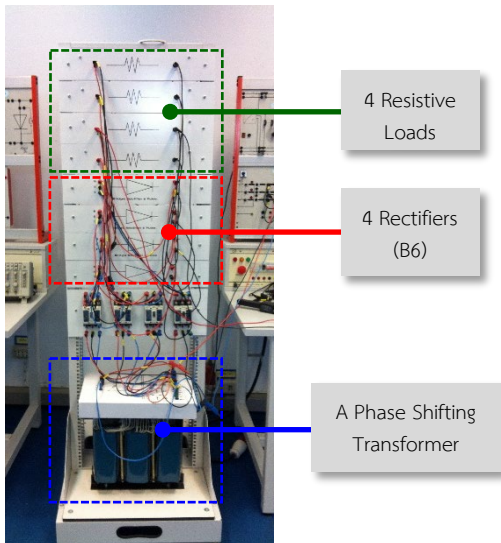
รูปที่ 8 ค่าร้อยละการสูญเสียของขดลวดในแต่ละกรณีเมื่อเทียบกับกรณีจ่ายโหลดชุดเดียว

จากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าเมื่อกระแสฮาร์มอนิกส์ลดลงค่าสูญเสียรวมของขดลวดจะลดลงอย่างมากโดยจะลดลงมากที่สุดเมื่อจ่ายโหลดพร้อมกันทั้ง 4 ชุด เหลือเพียง 64% และหากพิจารณาค่าสูญเสียกรณีจ่ายโหลด 2 ชุดพร้อมกัน พบว่าในกรณีจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกันจะลดลงเหลือ 77% และกรณีจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกันจะลดลงเหลือ 76% ซึ่งค่าสูญเสียทั้งสองกรณีจะลดลงใกล้เคียงกัน นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาค่าสูญเสียในแต่ละกรณีพบว่าค่าสูญเสียในเทอมของกระแสฮาร์โมนิค P_{DC} จะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ค่าสูญเสียในเทอมที่เกิดจากกระแสไหลวนที่ขดลวด P_{EC} จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

รูปที่ 9 คือฮาร์ดแวร์ต้นแบบระดับสเกลห้องปฏิบัติการที่ใช้ในการทดสอบจริงประกอบด้วย

- HMT ที่มีขดลวดทุติยภูมิ 4 ชุด มุมเลื่อนเฟสในแต่ละชุด 15 องศา ขนาด 4kVA, 400V/400V
- วงจรเรียงกระแส 6 พัลส์ 4 ชุดซึ่งเป็นตัวแทนของโหลดไม่เชิงเส้นในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์
- โหลดความต้านทานปรับค่าได้ 4 ชุด สำหรับปรับกระแสให้ได้ %โหลดที่ต้องการ ซึ่งในกรณีนี้การใช้โหลดความต้านทานที่ไม่มีตัวเก็บประจุแต่ก็สามารถสร้างกระแสฮาร์มอนิกส์ได้
- การวัดกำลังไฟฟ้าและฮาร์มอนิกส์จะใช้เครื่องวัดและวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า (Power Quality and Energy Analyzer) ยี่ห้อ Fluke รุ่น 435 ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน IEC61000-4-30 คลาส A

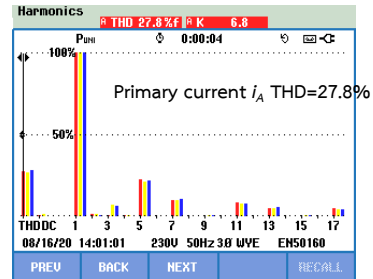


รูปที่ 9 ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบกระแสฮาร์มอนิกส์ต่อค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟส

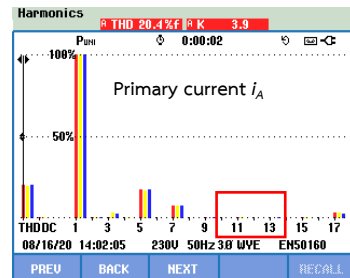
เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของ HMT เมื่อจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นที่มีกระแสฮาร์มอนิกส์แตกต่างกันจะให้ผลต่อค่าสูญเสียแตกต่างกันอย่างไร ดังนั้นจะแสดงผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าของ HMT ดังนี้

3.1 การทดสอบจ่ายโหลดแต่ละชุดที่แตกต่างกันต่ออันดับและปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์

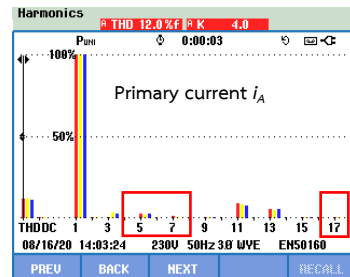
เพื่อยืนยันแนวคิดที่นำเสนอตั้งนั้นจะทดสอบการจ่ายโหลดที่แตกต่างกันต่อค่ากระแสฮาร์มอนิกส์แล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองซึ่งจะได้ดังรูปที่ 10



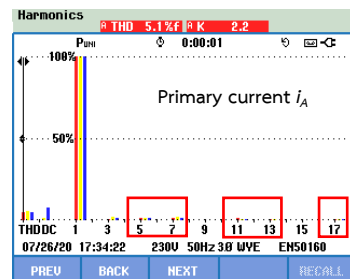
ก) การจ่ายโหลดเพียงชุดเดียว



ข) การจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกัน



ค) การจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกัน



ง) การจ่ายโหลด 4 ชุดพร้อมกัน

รูปที่ 10 สเปกตรัมและ %THDi กระแสด้านปฐมภูมิ

รูปที่ 10 แสดงสเปกตรัมกระแสด้านปฐมภูมิของการจ่ายโหลดในแต่ละกรณี จากรูปจะเห็นว่าฮาร์โมนิกส์จะมีค่าสูงสุดเมื่อจ่ายโหลดชุดเดียวเนื่องจากเป็นกรณีที่ยังไม่ได้ลดฮาร์โมนิกส์เลย ถัดมาเป็นการจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกันกรณีนี้ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 11 และ 13 จะหายไป ในขณะที่การจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกันฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5, 7 และ 17 จะหายไป และฮาร์โมนิกส์จะมีค่าต่ำสุดเมื่อจ่ายโหลดพร้อมกัน 4 ชุด สอดคล้องตามผลการจำลองในรูป 5-7 ค่าฮาร์โมนิกส์ในแต่ละกรณีแสดงได้ดังตารางที่ 2

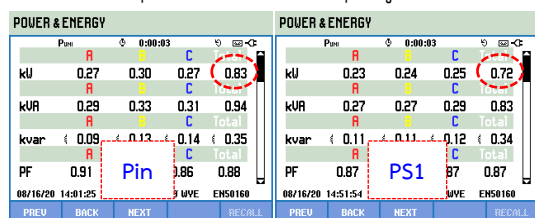
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบค่าฮาร์โมนิกทั้ง 4 กรณี

Loads of Sec.	1	1+2	1+3	1+2+3+4
%THDi	27.8	20.4	12.0	5.1
IEEE 519($\leq 15\%$)	x	x	✓	✓

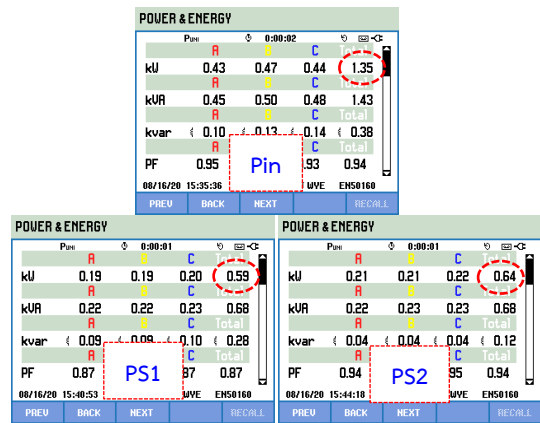
จากตารางที่ 2 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับตารางที่ 1 พบว่าผลการทดสอบจะให้ %THDi ที่ใกล้เคียงกับผลการจำลอง เมื่อนำค่าดังกล่าวมาอ้างอิงกับมาตรฐาน IEEE 519 พบว่ากรณีจ่ายโหลดชุดเดียวและจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกันจะไม่เป็นไปตามมาตรฐานเนื่องจากมี %THDi มากกว่า 15% ในขณะที่จ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกันและจ่ายโหลด 4 ชุด จะผ่านมาตรฐาน

3.2 การทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อกระแสฮาร์โมนิกส์ที่มีปริมาณและอันดับแตกต่างกัน

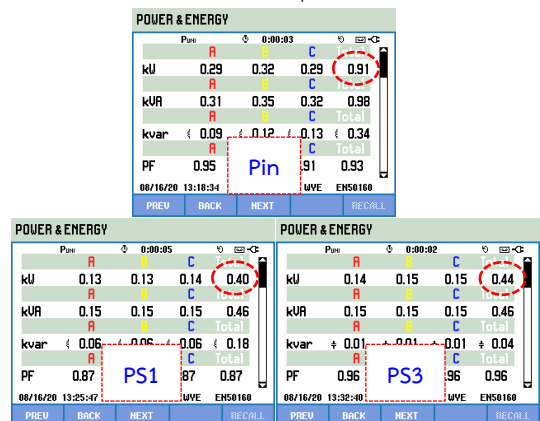
การทดสอบจ่ายโหลดที่ค่าร้อยละของกระแสพิกัด 25%, 50%, 75% และ 100% จะใช้ค่าความต้านทาน 1,225, 612, 410 และ 340 โอห์ม ตามลำดับ โดยมีจำนวนชุดการจ่ายโหลดด้านทุติยภูมิ 4 กรณี



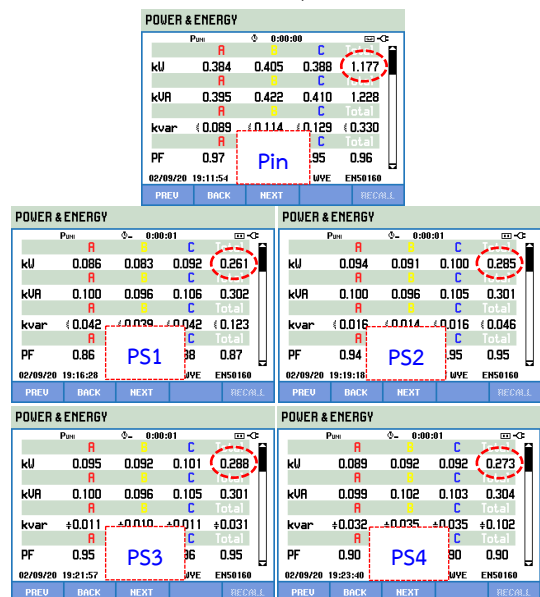
ก) กำลังไฟฟ้ากรณีจ่ายโหลดชุดเดียว(100%load)



ข) กำลังไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดชุด 1 และ 2 (75%load)



ค) กำลังไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดชุด 1 และ 3 (50%load)



ง) กำลังไฟฟ้ากรณีจ่ายโหลด 4 ชุด (25%load)

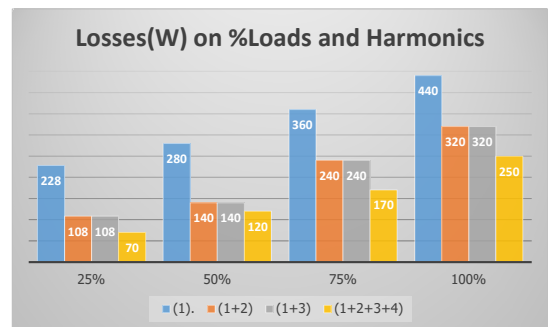
รูปที่ 11 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออกเมื่อจ่ายโหลดตามเงื่อนไขที่แตกต่างกัน

รูปที่ 11 คือผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิบางส่วน รูปที่ 11ก) แสดงกำลังไฟฟ้าของกรณีจ่ายโหลดเพียงชุดเดียวเมื่อจ่ายโหลด 100% ส่วนรูปที่ 11ข) คือกำลังไฟฟ้าของกรณีจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกันเมื่อจ่ายโหลด 75% ถัดมารูปที่ 11ค) คือกำลังไฟฟ้าของกรณีจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกันเมื่อจ่ายโหลด 50% และสุดท้ายรูปที่ 11ง) แสดงกำลังไฟฟ้าของกรณีจ่ายโหลดทั้ง 4 ชุดพร้อมกันเมื่อจ่ายโหลด 25% เมื่อนำกำลังไฟฟ้าจริง(W) ทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบในขณะที่จ่ายโหลด 25% 50% 75% และ 100% ตามลำดับทั้ง 4 กรณีจะแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลด 25%, 50%, 75% และ 100% ที่กระแสฟลักซ์ทั้ง 4 กรณี

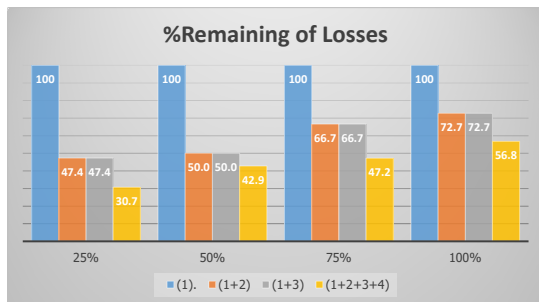
Loads of Sec.	Secondary Power (W)				Pout (W)	Pin (W)
	PS1	PS2	PS3	PS4		
25% Rated Trans.						
1	262	-	-	-	262	319
1+2	261	287	-	-	548	602
1+3	262	-	289	-	551	605
1+2+3+4	261	285	288	273	1107	1177
50% Rated Trans.						
1	400	-	-	-	400	470
1+2	400	430	-	-	830	900
1+3	400	-	440	-	840	910
1+2+3+4	380	410	420	390	1600	1720
75% Rated Trans.						
1	600	-	-	-	600	690
1+2	590	640	-	-	1230	1350
1+3	580	-	640	-	1220	1340
1+2+3+4	460	500	510	490	1960	2130
100% Rated Trans.						
1	720	-	-	-	720	830
1+2	700	750	-	-	1450	1610
1+3	700	-	750	-	1450	1610
1+2+3+4	600	650	650	620	2520	2770

จากตารางที่ 3 ค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้า(Pin)คือ กำลังไฟฟ้าด้านปฐมภูมิส่วนค่ากำลังไฟฟ้าด้านออก (Pout) ในแต่ละเงื่อนไขจะได้จากการนำกำลังไฟฟ้าด้านทุติยภูมิในแต่ละชุดมารวมกันยกตัวอย่างเช่นกำลังไฟฟ้าด้านออกของกรณีจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกันเมื่อจ่ายโหลด 75% จะได้กำลังไฟฟ้าด้านออกคือ ผลรวมของกำลัง PS1+PS2 =590W+640W=1230W เป็นต้น กรณีอื่นก็คิดได้ในการทำงานเดียวกันและเมื่อนำกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออกในแต่ละเงื่อนไขมาหาผลต่างจะได้ความสัมพันธ์ของค่าสูญเสียดังในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียต่อกระแสฮาร์มอนิกสในแต่ละกรณีและค่าร้อยละของกระแสฟลักซ์

จากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าการจ่ายโหลดชุดเดียวจะมีค่าสูญเสียค่อนข้างสูงแต่เมื่อจ่ายโหลดเพิ่มขึ้นเป็น 2 ชุดค่าสูญเสียจะลดลง ทั้งกรณีจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกัน และกรณีจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกัน แม้ว่าการลดอันดับและปริมาณกระแสฮาร์มอนิกทั้งสองกรณีจะแตกต่างกันดังในรูปที่ 10 แต่ค่าสูญเสียจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากปัจจัยหลักเกิดค่าสูญเสียของกระแสไหลวนที่ขดลวดที่มีผลมาจากอันดับฮาร์มอนิกด้วยไม่ใช่เพียงแค่นาตกระแสฮาร์มอนิกเท่านั้น ซึ่งจะสอดคล้องตามผลการจำลองในรูปที่ 8 ในขณะที่การจ่ายโหลดพร้อมกัน 4 ชุด จะให้ค่าสูญเสียลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถแสดงการลดลงของค่าสูญเสียเมื่อเทียบกับกรณีจ่ายโหลดชุดเดียวในแต่ละกรณีได้ดังรูปที่ 13



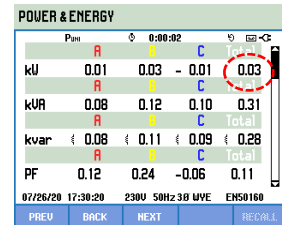
รูปที่ 13 ค่าร้อยละการสูญเสียที่เหลืออยู่ในแต่ละเงื่อนไขเมื่อเทียบกับการกระจายโหลดชุดเดียว

เมื่อพิจารณารูปที่ 13 พบว่าการลดลงของค่าสูญเสียสำหรับการจ่ายโหลด 2 ชุดจะเหลือน้อยกว่า 73% ในขณะที่การจ่ายโหลด 4 ชุดจะลดลงได้มากกว่าเหลืออยู่ไม่เกิน 57% เนื่องจากการนี้กระแสฮาร์โมนิกส์จึงลดลงอย่างมากฮาร์โมนิกส์อันดับแรกจะอยู่ที่ 23 ทำให้กระแสส่วนใหญ่จะมีแต่ความถี่หลักมูล นอกจากนั้นหากพิจารณาค่าร้อยละของกระแสพิคต์ในการจ่ายโหลดพบว่าที่ค่าต่ำการลดลงของค่าสูญเสียจะลดลงมากกว่าเนื่องจากเป็นจุดทำงานที่ค่าสูญเสียของขดลวดจะเข้าใกล้กับค่าสูญเสียของแกนเหล็กซึ่งหม้อแปลงจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อค่าสูญเสียของทั้งคู่เท่ากัน[25] และที่สำคัญผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าการใช้หม้อแปลงเลื่อนเฟสจ่ายโหลด 4 ชุดพร้อมกันจะสามารถลดค่าสูญเสียได้เกือบครึ่งเมื่อเทียบกับการจ่ายโหลดชุดเดียวที่ยังไม่ลดกระแสฮาร์โมนิกส์

3.3 การเปรียบเทียบการประหยัดพลังงาน

เพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานของกรณีจ่ายโหลด 4 ชุดพร้อมกันกับกรณีจ่ายโหลดชุดเดียว โดยในที่นี้จะใช้ผลการทดสอบในตารางที่ 3 เมื่อจ่ายโหลด 75% ของกระแสพิคต์ซึ่งจะเป็นกรณีทั่วไปในการจ่ายโหลดของหม้อแปลง เมื่อทราบแล้วว่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออกกรณีจ่ายโหลดชุดเดียวเป็นเท่าไรเราจึงหาค่าสูญเสียขณะจ่ายโหลด(On load losses)ได้ และหากเราทราบค่าสูญเสียของแกนเหล็ก(Core losses) ดัง

แสดงในรูปที่ 14 เป็นเท่าไร เราจึงทราบค่าสูญเสียที่ขดลวด(Copper losses) ได้เช่นเดียวกัน และเพื่อให้ค่าสูญเสียดังกล่าวสามารถนำมาเปรียบเทียบกับกรณีจ่ายโหลด 4 ชุดพร้อมกันได้ เราจะต้องนำค่าสูญเสียดังกล่าวคูณด้วย 4 เท่า สุดท้ายจึงได้ค่าสูญเสียที่ขดลวดที่จะนำมาใช้หาค่าพลังงานเพื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 4



รูปที่ 14 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงขณะไร้อุปกรณ์ที่แรงดันพิกัด

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าสูญเสียของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลด 75%

No.of Loads	Pin (W)	Pout (W)	On load losses(W)	Core Losses(W)	Copper Losses(W)
①	690	600	90	30	60*4=240
④	1,350	1,230	120	30	90

หมายเหตุ ①คือการจ่ายโหลดชุดเดียว ④คือการจ่ายโหลด 4 ชุดพร้อมกัน

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่าสูญเสียของหม้อแปลงเลื่อนเฟสขนาด 4 kVA ระหว่างกรณีจ่ายโหลด 1 ชุด และ 4 ชุด เมื่อจ่ายโหลด 75% จากตารางแสดงให้เห็นว่าค่าสูญเสียกรณีจ่ายโหลด 1 ชุดคิดเป็น 4 ชุดจะมีค่าสูงกว่ากรณีจ่ายโหลด 4 ชุดประมาณ 150 W ดังนั้นหากคิดว่าหม้อแปลงไฟฟ้าทำงานวันละ 8 ชั่วโมง เดือนละ 26 วัน การลดกระแสฮาร์โมนิกส์จะสามารถช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ประมาณ 374.4 หน่วย/ปี (150W*8ชม*26วัน*12เดือน/1000) คิดเป็นเงินประมาณ 1,621.04 บาท/ปี (4.3297 บาท/หน่วย, PEA) และหากคิดตามอายุใช้งานของหม้อแปลง 25 ปี จะได้ประมาณ 40,526 บาท นอกจากนั้นหากพิจารณาค่าตัวประกอบกำลังทั้งสองกรณีด้วยจะได้ดังรูปที่ 15

POWER & ENERGY					POWER & ENERGY				
P _{WH}	A	0.22	C	0.25	P _{WH}	A	0.72	C	0.74
kW	A	0.22	Total	0.69	kW	A	0.67	Total	2.13
kVA	A	0.25	Total	0.80	kVA	A	0.72	Total	2.23
kvar	A	0.09	Total	0.34	kvar	A	0.10	Total	0.32
PF	A	0.90	Total	0.86	PF	A	0.99	Total	0.96
08/16/20 15:34:38	230V	50Hz	30 WVE	EN50160	07/26/20 18:38:12	230V	50Hz	30 WVE	EN50160
PREV	BACK	NEXT	RECALL		PREV	BACK	NEXT	RECALL	

รูปที่ 15 ผลการทดสอบตัวประกอบกำลังกรณีจ่ายโหลด
ชุดเดียวและจ่ายโหลด 4 ชุดสำหรับโหลด 75%

จากรูปที่ 15 จะเห็นว่าค่าตัวประกอบกำลังของการจ่ายโหลด 4 ชุดจะมีค่าสูงถึง 0.96 แต่กรณีจ่ายโหลดชุดเดียวจะมีค่าต่ำเพียง 0.86 เท่านั้นซึ่งเกิดจากกระแสฮาร์โมนิกที่สูงดังแสดงความสัมพันธ์ตามสมการที่(6) หากค่าตัวประกอบกำลังดังกล่าวต่ำกว่า 0.85 ซึ่งเกินจากข้อกำหนดของการไฟฟ้าจะถูกปรับค่าวาร์ (Var charge) เพิ่มเติมได้ด้วย ดังนั้นการลดกระแสฮาร์โมนิกจึงช่วยให้ไม่ต้องเสียค่าวาร์ได้อีกทางหนึ่ง

4. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการศึกษาผลของกระแสฮาร์โมนิกจากวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 6 พัลส์ที่เป็นตัวแทนของโหลดไม่เชิงเส้น 3 เฟส 3 สาย ในระบบควบคุมมอเตอร์ต่อค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า ในบทความได้ประยุกต์ใช้หม้อแปลงเลื่อนเฟสแบบขดลวดทุติยภูมิ 4 ชุดมาจ่ายโหลดอย่างอิสระ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ากระแสฮาร์โมนิกจะทำให้ค่าสูญเสียจากกระแสไหลวนที่ขดลวดเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทำให้การจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกันและชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกันมีค่าสูญเสียใกล้เคียงกันแม้ว่าค่า %THDi จะแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามกรณีการจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกัน %THDi จะมีค่าประมาณ 20% จึงไม่เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 519 ในขณะที่การจ่ายโหลด 4 ชุดพร้อมกัน %THDi จะเป็นไปตามมาตรฐานและยังลดค่าสูญเสียได้ต่ำกว่า 57% เมื่อเทียบกับการจ่ายโหลดชุดเดียวจึงทำให้สามารถลดการใช้พลังงานได้มาก ดังนั้น

หากนำหม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟสมาประยุกต์ใช้ในระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์จะสามารถลดกระแสฮาร์โมนิกได้ตามมาตรฐานและลดการใช้พลังงานได้ด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิในการสนับสนุนทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*, Pearson Education, New Delhi, 2001.
- [2] *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, IEEE std. 519-1992, 1992.
- [3] *Limits of Harmonics in Electricity for Business and Industry*, PRC-PQG-01-1998, 1998.
- [4] E.F.Fuchs, D.Yildirim and W.M.Grady, "Measurement of eddy-current loss coefficient PEC-R, derating of single-phase transformers, and comparison with K-factor approach," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 15, pp. 148–154, Jan. 2000.
- [5] T.C. Sekar, B.J. Rabi, "A Review and Study of Harmonic Mitigation Techniques," in *Proc. of ICETEEM-2012*, IEEE, 2012, pp. 93–97.
- [6] B. Singh, S. Gairola, B. N. Singh, A. Chandra, and K. Al-Haddad, "Multipulse AC–DC converters for improving power quality: A review," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 3, pp. 260–281, Jan. 2008.

- [7] J. Rodriguez, J.-S. Lai, and F. Z. Peng, "Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 4, pp. 724–738, Aug. 2002.
- [8] B. Singh, G. Bhuvaneswari, and V. Garg, "A novel polygon based 18-pulse AC–DC converter for vector controlled induction motor drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 2, pp. 488–497, Feb. 2007.
- [9] B. S. Lee, P. N. Enjeti, and I. J. Pitel, "A new 24-pulse diode rectifier system for ac motor drives provides clean power utility interface with low kVA components," in *Proc. IEEE IAS'96*, 1996, pp. 1024–1031.
- [10] S. Choi, B. S. Lee, and P. N. Enjeti, "New 24-pulse diode rectifier systems for utility interface of high power AC motor drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 33, no. 2, pp. 531–541, Mar./Apr. 1997.
- [11] F. J. Chivite-Zabalza, A. J. Forsyth, and D. R. Trainer, "A simple passive 24-pulse ac–dc converter with inherent load balancing," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 2, pp. 430–439, Mar. 2006.
- [12] B. Singh, G. Bhuvaneswari, and V. Garg, "T-connected autotransformer-based 24-pulse ac–dc converter for variable frequency induction motor drives," *IEEE Trans. Energy Conv.*, vol. 21, no. 3, pp. 663–672, Sep. 2006.
- [13] B. Singh, G. Bhuvaneswari, and V. Garg, "24-pulse ac–dc converter for power quality improvement in vector controlled induction B motor drives," *Int. J. Elect. Power Compon. Syst.*, vol. 34, no. 10, Oct. 2006, pp. 1077–1098.
- [14] B. Singh, V. Garg, and G. Bhuvaneswari, "Polygon connected autotransformer based 24-pulse ac–dc converter for power quality improvement," in *Proc. India Int. Conf. Power Electron. IICPE'06*, Chennai, India, Dec. 19–21, 2006, pp. 125–130.
- [15] B. Singh and S. Gairola, "A fork connected auto-transformer based 24-pulse ac–dc converter," in *Proc. India Int. Conf. Power Electron. IICPE, Chennai*, India, Dec. 19–21, 2006, pp. 183–187.
- [16] B. Singh, V. Garg, and G. Bhuvaneswari, "Polygon-connected autotransformer-based 24-pulse AC–DC converter for vector controlled induction-motor drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 1, pp. 197–208, Jan. 2008.
- [17] P. Kiatsookkanatorn, N. Watjanatepin, "Power Quality Improvement by Using a 15-Degree Phase Shifting Transformer for 24-Pulse Rectifiers," *LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL.*, vol. 34, no. 1, PP 9–16, March. 2017.
- [18] B. Wu, *High-Power Converters and AC Drives*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006, pp. 68–76.
- [19] D. Yildirim and E. F. Fuchs, "Measured transformer derating and comparison with harmonic loss factor (FHL) approach," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 15, pp. 186 – 191, Jan. 2000.

- [20] A. Elmoudi, M. Lehtonen and H. Nordman, "Effect of harmonics on transformers loss of life," in *IEEE Int 'l Sympos. Elec. Insulation*, 2006, pp. 408-411.
- [21] N. Mohan, T. Undeland and W.P. Bobbins, *Power Electronics - Converters, Applications and Design*, John Wiley & Sons, 3rd Edition, 2003. pp.103 – 106.
- [22] L. W. Pierce, "Transformer design and application considerations for nonsinusoidal load currents," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 32, no. 3, pp. 633–645, May/June 1996.
- [23] MIRUS international Inc. (2021, September 27). Harmonic Mitigating Transformers. [Online]. Available: <http://www.mirusinternational.com>.
- [24] *IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry- Type Power and Distribution Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents*, IEEE C57.110-2008, August 2008.
- [25] B.L.Theraja, A.K. Theraja, "Transformers," in *A Text Book of Electrical Technology S.I units*, vol. 2: AC and DC machines, 23rd ed. India, S Chand & Co Ltd., 2006, pp. 1169.