

การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าโดยอาศัยหม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟส

15 องศาสำหรับวงจรเรียงกระแส 24 พัลส์

Power Quality Improvement by Using a 15-Degree Phase

Shifting Transformer for 24-Pulse Rectifiers

ไพบุลย์ เกียรติสุขคนธา¹ นภัทร วัจนเทพินทร์²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

² ศูนย์วิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

บทคัดย่อ

วงจรเรียงกระแสเป็นโหลดไม่เชิงเส้นชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นวงจรส่วนหน้าของอินเวอร์เตอร์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ วงจรเรียงกระแสเหล่านี้จะมีค่ากระแสฮาร์มอนิกและค่าแรงดันแรงดันด้านออกสูง ทำให้มีผลกับคุณภาพไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าโดยอาศัยหม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟสสำหรับวงจรเรียงกระแส ในบทความได้ประยุกต์ใช้หม้อแปลงเลื่อนเฟส 15 องศาสำหรับวงจรเรียงกระแส 24 พัลส์ เพื่อลดกระแสฮาร์มอนิกและค่าแรงดันของแรงดันด้านออก นอกจากนี้ยังได้แสดงการวิเคราะห์หาร์มเฟสของหม้อแปลงต่อการลดค่ากระแสฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิอย่างชัดเจน ผลการจำลองและการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถลดกระแสฮาร์มอนิกได้ต่ำกว่า 5% และค่าแรงดันของแรงดันน้อยกว่า 0.5% โดยไม่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรอง

คำสำคัญ : วงจรเรียงกระแส หม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟส คุณภาพไฟฟ้า ฮาร์มอนิก

Abstract

Rectifiers in a front-end of inverters for motor drive system are a non-linear load widely used for industries. These rectifiers do affect the power quality in power system due to high input current harmonic and high output voltage ripple. This paper presents power quality improvement by using a phase shifting transformer for rectifiers. In this paper, a 15-degree phase shifting transformer is applied for a 24-pulse rectifier to reduce the harmonic currents and the ripple of output voltage. Moreover, the analysis of phase angle with reduction of primary and secondary order harmonic currents is also shown. The simulation and experimental results reveal that the proposed method can reduce less than 5% of the total harmonic distortion of currents and less than 0.5% of the ripple of output voltages without capacitor filters.

Keywords : Rectifier, Phase shifting transformer, Power quality, Harmonic, Ripple

1. บทนำ

ปัจจุบันการควบคุมคุณภาพไฟฟ้าได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย[1] เนื่องจากคุณภาพไฟฟ้าที่ดีจะทำให้ระบบไฟฟ้ามี

เสถียรภาพและความน่าเชื่อถือได้ ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่ได้รับ ความสนใจมากที่สุดคือปัญหาที่มีผลมาจากฮาร์มอนิก ซึ่งเกิดจากการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีลักษณะเป็นโหลด

ไม่เชิงเส้น (Non-linear loads) วงจรเรียงกระแส 3 เฟส 6 พัลส์ เป็นโหลดไม่เชิงเส้นชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นวงจรส่วนหน้า (Front-End) ซึ่งทำหน้าที่แปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ (Motor drive system) วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบนี้จะสร้างกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ $6m \pm 1$ เมื่อ $m = 1, 2, 3, \dots$

เทคนิคและวิธีการลดฮาร์มอนิกสำหรับวงจรเรียงกระแสมีมากมาย[2] อาทิเช่น 1) การใช้รีแอคเตอร์ต่ออนุกรมขึ้นระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับวงจรเรียงกระแส (Line reactors) แต่ระดับฮาร์มอนิกยังคงมีค่าสูง 2) การใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟ (Passive filters) ซึ่งลดฮาร์มอนิกให้มีค่าต่ำได้ แต่ตัวเก็บประจุในวงจรกรองดังกล่าวจะมีผลทำให้ค่าประกอบกำลังดิสเพลซเมนต์ของวงจรเรียงกระแสที่ได้อยู่แล้วเสียไปและ 3) การใช้วงจรกรองแบบแอคทีฟ (Active filters) ซึ่งสามารถเลือกลดลำดับฮาร์มอนิกได้ตามต้องการและไม่กระทบต่อค่าประกอบกำลังดิสเพลซเมนต์ แต่วงจรกรองแบบนี้มีราคาสูงมาก

นอกจากแนวทางที่กล่าวมาแล้วในเบื้องต้นการลดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับวงจรเรียงกระแสอีกแนวทางหนึ่งคือการเลือกใช้วงจรเรียงกระแสแบบมัลติพัลส์[3] ซึ่งวงจรแบบนี้จะต้องอาศัยหม้อแปลงไฟฟ้าเฟื่อนเฟสเป็นอุปกรณ์ร่วม การเฟื่อนเฟสของหม้อแปลงจะขึ้นอยู่กับจำนวนพัลส์ด้านออกของวงจรเรียงกระแส อาทิเช่นวงจรเรียงกระแส 12 พัลส์จะใช้หม้อแปลงเฟื่อนเฟส 30 องศาที่มีขดลวดด้านทุติยภูมิ 2 ชุดต่อกับวงจรเรียงกระแส 6 พัลส์ 2 ชุด ซึ่งวงจรแบบนี้นิยมนำมาประยุกต์ใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ[4] เนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5, 7, 17 และ 19 ของวงจรเรียงกระแส 6 พัลส์ทั้งสองชุดจะหักล้างกันเองทำให้กระแสฮาร์มอนิกลดลง อย่างไรก็ตามกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 11 และ 13 ของวงจรมีค่าสูงและที่สำคัญปริมาณค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสยังไม่สอดคล้องตามมาตรฐาน IEEE 519-1992 [5] ด้วย ดังนั้นจึงได้มีผู้นำเสนอวงจรเรียงกระแส 18 พัลส์ที่ใช้หม้อแปลงเฟื่อนเฟส 20 องศา [6] วงจรเรียงกระแสแบบนี้ไม่เพียงจะทำให้กระแสฮาร์มอนิกรวมลดต่ำกว่า 8% แต่ยังคงกระแส

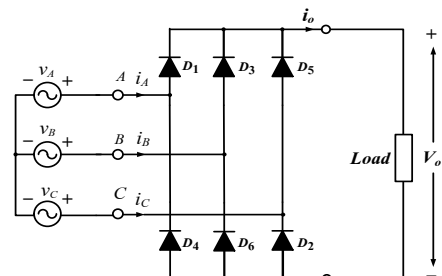
ฮาร์มอนิกลำดับที่ 11 และ 13 ให้มีค่าต่ำลงอีกด้วย อย่างไรก็ตามกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 17 และ 19 กลับมีค่าเพิ่มขึ้น

บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าโดยอาศัยหม้อแปลงเฟื่อนเฟส 15 องศาสำหรับวงจรเรียงกระแส 24 พัลส์เพื่อลดกระแสฮาร์มอนิกด้านเข้าและลดค่าระลอกของแรงดันด้านออก แม้ว่าวิธีการลดกระแสฮาร์มอนิกโดยอาศัยหม้อแปลงเฟื่อนเฟส 15 องศาจะมีผู้นำเสนอมากมาย[7]-[14] แต่ส่วนใหญ่จะแสดงเพียงผลของกระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเฟื่อนเฟสหรือค่าของกระแสฮาร์มอนิกที่ลดลงเท่านั้นโดยไม่แสดงการวิเคราะห์ให้เห็นความสัมพันธ์ของมุมเฟสต่อการหักล้างกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงได้อย่างชัดเจน ดังนั้นในบทความนี้จึงมีประเด็นหลักที่จะนำเสนอ ดังนี้

- ประยุกต์ใช้หม้อแปลงเฟื่อนเฟส 15 องศา สำหรับวงจรเรียงกระแส 24 พัลส์เพื่อลดกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5, 7, 11, 13, 17 และ 19 และลดค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสให้มีค่าไม่เกิน 5% รวมทั้งค่าระลอกของแรงดันด้านออกให้มีค่าไม่เกิน 1% โดยไม่ต้องใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรอง
- แสดงการวิเคราะห์ผลของการเฟื่อนเฟสของหม้อแปลงในแต่ละชุดต่อการลดกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิอย่างชัดเจน

2. วงจรเรียงกระแส 3 เฟส 6 พัลส์ (B6)

วงจรเรียงกระแส 3 เฟส 6 พัลส์ แสดงดังรูปที่ 1 วงจรนี้จะประกอบด้วยไดโอด 6 ตัว ซึ่งทำหน้าที่แปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้าให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้านออก



รูปที่ 1 วงจรเรียงกระแส 3 เฟส 6 พัลส์

จากรูปที่ 1 แรงดันด้านเข้าทั้งสามเฟสซึ่งเป็นรูปคลื่นไซน์สามารถเขียนแทนได้ตามสมการที่ (1) และเมื่อนำมาเป็น

แหล่งจ่ายป้อนให้กับวงจรเรียงกระแสที่เป็นโหลดไม่เชิงเส้น จะทำให้กระแสผิดเพี้ยนไปจากไซน์ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยอนุกรมฟูเรียร์ตามสมการที่ (2)

$$v_{A,B,C}(t) = V_{1mA,B,C} \sin(\omega t + \theta_{1A,B,C}) \quad (1)$$

$$i_{A,B,C}(t) = I_{0A,B,C} + \sum_{n=1}^{\infty} I_{nmA,B,C} \sin(n\omega t + \phi_{nA,B,C}) \quad (2)$$

โดยที่ $V_{1mA,B,C}$ คือแรงดันค่ายอดที่ความถี่หลักมูลเฟส A, B และ C $\theta_{1A,B,C}$ คือมุมเฟสของแรงดันที่ความถี่หลักมูลเมื่ออ้างอิงกับแรงดันเฟส A $I_{0A,B,C}$ คือกระแสค่าเฉลี่ยเฟส A, B และ C n คือลำดับฮาร์โมนิก $I_{nmA,B,C}$ คือกระแสค่ายอดเฟส A, B และ C ω คือความถี่หลักมูล และ $\phi_{nA,B,C}$ คือมุมเฟสระหว่างแรงดันและกระแสเฟส A, B และ C จากสมการที่ (1) และ (2) ค่ากำลังไฟฟ้าจริง(Active power)เฟส A สามารถได้ตามสมการที่ (3) ในกรณีเฟสอื่นก็คิดได้เช่นทำนองเดียวกัน

$$P_A = \sum_{n=0}^{\infty} P_{nA} = V_{0A} I_{0A} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{V_{nmA} I_{nmA}}{2} \right) \cos(\theta_{nA} - \phi_{nA}) \quad (3)$$

$$= \left(\frac{V_{1mA} I_{1mA}}{2} \right) \cos(\theta_{1A} - \phi_{1A}) = V_{1rmsA} I_{1rmsA} \cos(\theta_{1A} - \phi_{1A})$$

สังเกตได้ว่ากำลังไฟฟ้าจริงจะเกิดจากกระแสที่ความถี่หลักมูลเท่านั้นซึ่งเป็นความถี่เดียวกับแรงดัน ในกรณีนี้ตัวประกอบกำลัง(Power factor)จะได้

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{rms} I_{rms}} = \underbrace{\left(\frac{I_{1,rms}}{I_{rms}} \right)}_{DF} \underbrace{\cos(\theta_1 - \phi_1)}_{DPF} \quad (4)$$

โดยที่ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสคือ

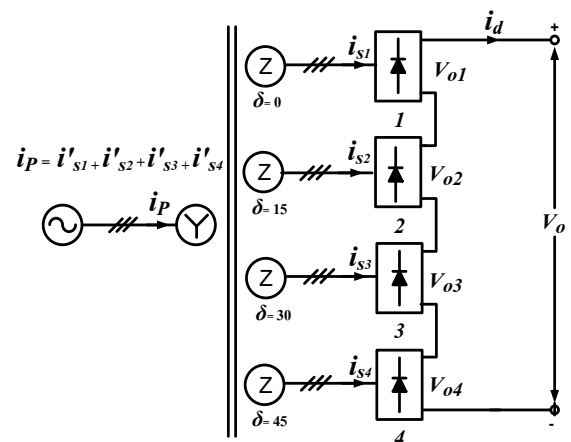
$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_{n,rms}^2} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{I_{n,m}}{\sqrt{2}} \right)^2} \quad (5)$$

และค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม(Total harmonic distortion : THD) ของกระแสไฟฟ้าสามารถนิยามได้จาก

$$THD = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_{1,rms}^2}}{I_{1,rms}} \quad (6)$$

3. การประยุกต์ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟส 15 องศา กับวงจรเรียงกระแส 24 พัลส์ (B24)

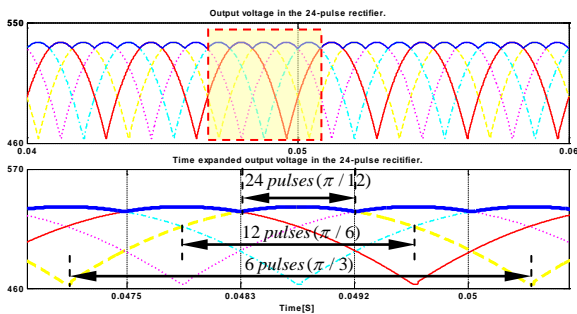
หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส โดยทั่วไปจะมีมุมเฟสระหว่างด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิแตกต่างกันขึ้นอยู่กับการต่อเวกเตอร์กรุป (Vector group) ยกตัวอย่างเช่น หม้อแปลงต่อแบบ Y/d11 จะหมายถึงแรงดันด้านทุติยภูมิที่มีเฟสหน้าหน้าแรงดันด้านปฐมภูมิ 30 องศา แต่สำหรับกรณีที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้ามีขดลวดด้านปฐมภูมิ 1 ชุด และด้านทุติยภูมิ 2 ชุด (dual secondary-winding) หม้อแปลงแบบนี้สามารถออกแบบให้มุมเฟสของแรงดันด้านทุติยภูมิทั้งสองชุดแตกต่างกันได้ ยกตัวอย่างเช่น หม้อแปลงต่อแบบ Y/y0/d1 จะหมายถึง แรงดันด้านทุติยภูมิที่ต่อแบบวายจะมีมุมเฟสเหมือนกับแรงดันด้านปฐมภูมิ ส่วนแรงดันด้านทุติยภูมิที่ต่อแบบเดลต้าจะมีมุมเฟสล่าหลังแรงดันด้านปฐมภูมิ 30 องศา ลักษณะดังกล่าวจึงทำให้แรงดันด้านทุติยภูมิทั้งสองชุดมีมุมเฟสที่แตกต่างกัน 30 องศาด้วย ซึ่งเราจะเรียกหม้อ-แปลงแบบนี้ว่า “หม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟส” การเลื่อนเฟสของหม้อแปลงจะอาศัยการปรับเปลี่ยนเวกเตอร์กรุปซึ่งมุมเฟสที่ได้จะเป็นจำนวนเท่าของ 30 องศา อย่างไรก็ตาม หากต้องการ มุมเฟสที่แตกต่างจากกรณีดังกล่าวจะต้องใช้เทคนิคการพันขดลวดหม้อแปลงร่วมด้วย[15],[16] ซึ่งในบทความนี้จะใช้หม้อแปลงเลื่อนเฟส 15 องศา ที่มีขดลวดด้านปฐมภูมิ 1 ชุด และด้านทุติยภูมิจำนวน 4 ชุด (quad secondary-winding) มาประยุกต์ใช้กับวงจรเรียงกระแส 24 พัลส์ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 หม้อแปลงเลื่อนเฟส 15 องศา ที่นำมาประยุกต์ใช้กับวงจรเรียงกระแส 24 พัลส์

3.1 ค่าระลอกของแรงดันด้านออก

วงจรเรียงกระแสซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง มักต้องการให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกเรียบๆ หรือมีเฉพาะองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) เท่านั้น ไม่มีค่าระลอกหรือไม่มีองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับ (V_{ac}) ในกรณีที่ไม่มีตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรอง ค่าระลอกดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับจำนวนพัลส์ของรูปคลื่นในหนึ่งรอบคาบดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แรงดันด้านออกและค่าระลอก

รูปที่ 3 แสดงค่าระลอกของแรงดันด้านออกสำหรับวงจรเรียงกระแส 6 พัลส์ 12 พัลส์ และ 24 พัลส์ ตามลำดับ จากรูปเมื่อพิจารณาในส่วนของขยายสเกลเวลาจะเห็นได้ว่าในกรณี 6 พัลส์ แรงดันด้านออกในแต่ละพัลส์จะมีความกว้าง 60 องศา ทำให้ค่าสูงสุดและต่ำสุดของแรงดันแตกต่างกันค่อนข้างมาก ค่าระลอกจึงมีค่าสูง เมื่อจำนวนพัลส์เพิ่มขึ้นเป็น 12 พัลส์ ความกว้างพัลส์จะลดลงเหลือ 30 องศา ทำให้ค่าระลอกลดลงเช่นกัน และเมื่อเพิ่มเป็น 24 พัลส์ แรงดันด้านออกในแต่ละพัลส์จะมีความกว้างเหลือเพียง 15 องศา ทำให้ค่าสูงสุดและต่ำสุดของแรงดันจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ค่าระลอกจึงต่ำมากซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระลอกกับจำนวนพัลส์ได้ตามสมการที่ (7)

$$RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \frac{\left(\sqrt{V_{rms}^2 - V_{dc}^2}\right)}{V_{dc}} \quad (7)$$

โดยที่

$$V_{dc} = V_m \frac{N}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)$$

$$V_{rms} = V_m \sqrt{\frac{N}{2\pi} \left(\frac{\pi}{N} + \frac{1}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right)\right)}$$

และ N คือจำนวนพัลส์ V_m คือค่ายอดของแรงดันระหว่างเฟส

3.2 การวิเคราะห์ผลของการเลื่อนเฟสหม้อแปลงไฟฟ้าต่อการลดกระแสฮาร์มอนิก

ในหัวข้อนี้จะแสดงการวิเคราะห์ผลของการเลื่อนเฟสของหม้อแปลงในแต่ละชุดต่อการลดกระแสฮาร์มอนิกส์ในแต่ละลำดับทั้งด้านทฤษฎีและปฐมภูมิเพื่อแสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้หม้อแปลงเลื่อนเฟส 15 องศาสำหรับวงจรเรียงกระแส 24 พัลส์มีความเหมาะสมมากกว่าค่าอื่นๆ

จากรูปที่ 2 แรงดันด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิชุดที่ 1 จะมีลำดับเฟสตรงกัน ส่วนชุดที่ 2, 3 และ 4 จะมีมุมเฟสต่างกัน 15, 30 และ 45 องศา ตามลำดับ ส่งผลให้แรงดันทุติยภูมิชุดที่ 1 และ 2 จะมีมุมเฟสต่างกัน 15 องศา ส่วนแรงดันชุดที่ 1 และ 3 จะมีมุมเฟสต่างกัน 30 องศา ชุดอื่นๆ ก็คิดได้ในการทำงานเดียวกัน จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะได้ผลรวมของกระแสเฟส A ด้านทุติยภูมิ

$$i_{A,S}(t) = i_{A_1}(t) + i_{A_2}(t) + i_{A_3}(t) + i_{A_4}(t) \quad (8)$$

โดยที่

$$i_{A_1}(t) = I_{1m} \sin(\omega t + \phi_1) + I_{5m} \sin(5\omega t + \phi_5) + I_{7m} \sin(7\omega t + \phi_7) + I_{11m} \sin(11\omega t + \phi_{11}) + I_{13m} \sin(13\omega t + \phi_{13}) + \dots$$

$$i_{A_2}(t) = I_{1m} \sin(\omega t + 15 + \phi_1) + I_{5m} \sin(5\omega t + 15 + \phi_5) + I_{7m} \sin(7\omega t + 15 + \phi_7) + I_{11m} \sin(11\omega t + 15 + \phi_{11}) + I_{13m} \sin(13\omega t + 15 + \phi_{13}) + \dots$$

$$i_{A_3}(t) = I_{1m} \sin(\omega t + 30 + \phi_1) + I_{5m} \sin(5\omega t + 30 + \phi_5) + I_{7m} \sin(7\omega t + 30 + \phi_7) + I_{11m} \sin(11\omega t + 30 + \phi_{11}) + I_{13m} \sin(13\omega t + 30 + \phi_{13}) + \dots$$

$$i_{A_4}(t) = I_{1m} \sin(\omega t + 45 + \phi_1) + I_{5m} \sin(5\omega t + 45 + \phi_5) + I_{7m} \sin(7\omega t + 45 + \phi_7) + I_{11m} \sin(11\omega t + 45 + \phi_{11}) + I_{13m} \sin(13\omega t + 45 + \phi_{13}) + \dots$$

และผลรวมของกระแสเฟส A ด้านปฐมภูมิ

$$i_{A,P}(t) = i'_{A_1}(t) + i'_{A_2}(t) + i'_{A_3}(t) + i'_{A_4}(t) \quad (9)$$

โดยที่

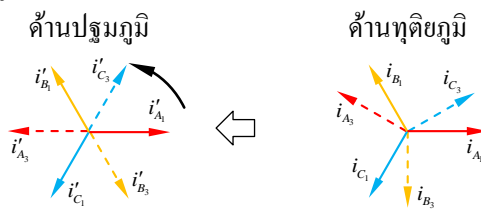
$$i'_{A_1}(t) = i_{A_1}(t)$$

$$i'_{A_2}(t) = I_{1m} \sin(\omega t + 15 - 15 + \phi_1) + I_{5m} \sin(5\omega t + 15) + 15 + \phi_5 + I_{7m} \sin(7\omega t + 15) - 15 + \phi_7 + I_{11m} \sin(11\omega t + 15) + 15 + \phi_{11} + I_{13m} \sin(13\omega t + 15) - 15 + \phi_{13} + \dots$$

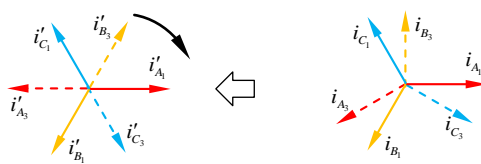
$$i'_{A_3}(t) = I_{1m} \sin(\omega t + 30 - 30 + \phi_1) + I_{5m} \sin(5\omega t + 30) + 30 + \phi_5 + I_{7m} \sin(7\omega t + 30) - 30 + \phi_7 + I_{11m} \sin(11\omega t + 30) + 30 + \phi_{11} + I_{13m} \sin(13\omega t + 30) - 30 + \phi_{13} + \dots$$

$$i'_{A_4}(t) = I_{1m} \sin(\omega t + 45 - 45 + \phi_1) + I_{5m} \sin(5\omega t + 45) + 45 + \phi_5 + I_{7m} \sin(7\omega t + 45) - 45 + \phi_7 + I_{11m} \sin(11\omega t + 45) + 45 + \phi_{11} + I_{13m} \sin(13\omega t + 45) - 45 + \phi_{13} + \dots$$

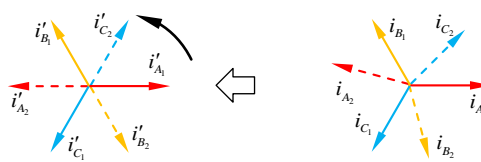
จากสมการของกระแสฮาร์โมนิกในแต่ละลำดับทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิสามารถนำมาแสดงเป็นแผนภาพเฟสเซอร์ได้ดังรูปที่ 4



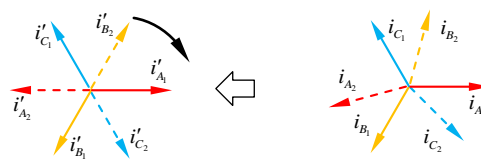
ก) กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 ของชุดที่ 1 และ 3 (30°)



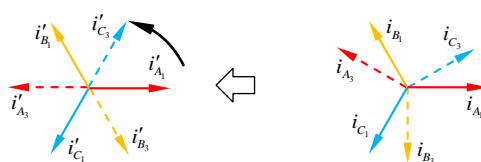
ข) กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 7 ของชุดที่ 1 และ 3 (30°)



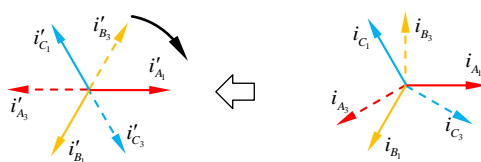
ค) กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 11 ของชุดที่ 1 และ 2 (15°)



ง) กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 13 ของชุดที่ 1 และ 2 (15°)



จ) กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 17 ของชุดที่ 1 และ 3 (30°)

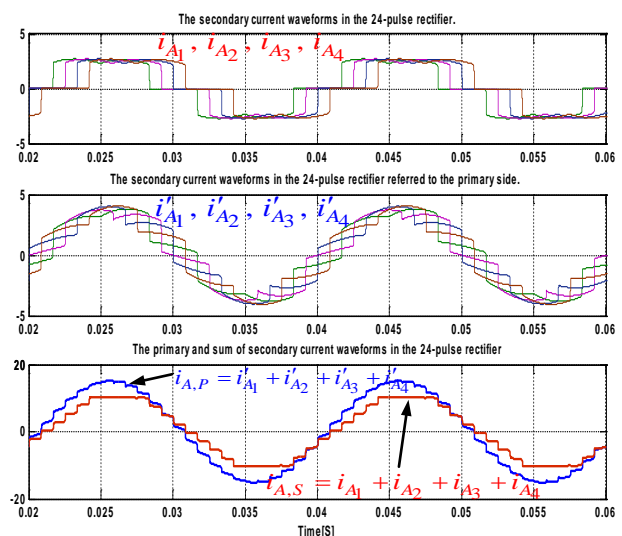


ฉ) กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 19 ของชุดที่ 1 และ 3 (30°)

รูปที่ 4 แผนภาพเฟสเซอร์ของกระแสฮาร์โมนิกด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ

รูปที่ 4 แสดงแผนภาพเฟสเซอร์ของกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 5,7,11,13,17 และ 19 ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ จากรูปที่ 4ก) จะเห็นได้ว่ากระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 ด้านทุติยภูมิ

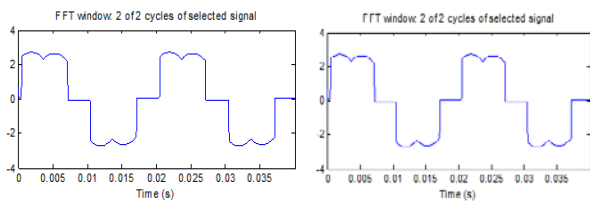
ของชุดที่ 1 และ 3 จะมีมุมเฟสต่างกัน 150 องศา ซึ่งมีทิศทางเกือบตรงกันข้ามและเมื่อแปลงข้ามมายังด้านปฐมภูมิกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 ของชุดที่ 3 ซึ่งเป็นฮาร์โมนิกลำดับลบ (Negative sequence) จะหมุนไปอีก 30 องศาในทิศทางเข็มนาฬิกาจึงมีผลทำให้กระแสทั้งสองชุดมีทิศทางตรงข้ามกันพอดี ส่วนรูปที่ 4ง) แสดงให้เห็นว่ากระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 13 ด้านทุติยภูมิของชุดที่ 1 และ 2 จะมีมุมเฟสต่างกัน 195 องศา ซึ่งมีทิศทางเกือบจะตรงข้ามเช่นเดียวกันและเมื่อแปลงข้ามมายังด้านปฐมภูมิกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 13 ของชุดที่ 2 ซึ่งเป็นฮาร์โมนิกลำดับบวก (Positive sequence) จะหมุนไปอีก 15 องศาในทิศทางเข็มนาฬิกาทำให้กระแสมีทิศทางตรงข้ามกันพอดี ในกรณีอื่น ๆ ก็คิดได้ในการทำงานเดียวกัน ลักษณะดังกล่าวทำให้สนามแม่เหล็กของหม้อแปลงเลื่อนเฟสที่เกิดจากกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 5,7,11,13,17 และ 19 ในขดลวดแต่ละชุดจะหักล้างกันเองส่งผลให้ไม่มีกระแสฮาร์โมนิกลำดับดังกล่าวทางด้านปฐมภูมิ จากการวิเคราะห์ดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการใช้หม้อแปลงเลื่อนเฟส 15 องศาสำหรับวงจรเรียงกระแส 24 พัลส์มีความเหมาะสม เนื่องจากกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 11 และ 13 ของชุดที่ 1 และ 2 จะหักล้างกัน ส่วนกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 5, 7, 17 และ 19 ของชุดที่ 1 และ 3 ก็จะหักล้างเหมือนกัน ในทำงานเดียวกันกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 11 และ 13 ของชุดที่ 3 และ 4 จะหักล้างกัน ส่วนกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 5, 7, 17 และ 19 ของชุดที่ 2 และ 4 ก็จะหักล้างเช่นเดียวกัน หากเป็นเฟสอื่นจะไม่สามารถทำได้ในลักษณะนี้



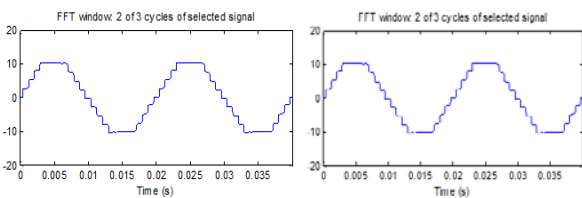
รูปที่ 5 กระแสด้านปฐมภูมิ ทุติยภูมิ และผลรวมของกระแส

3.3 ผลการจำลอง

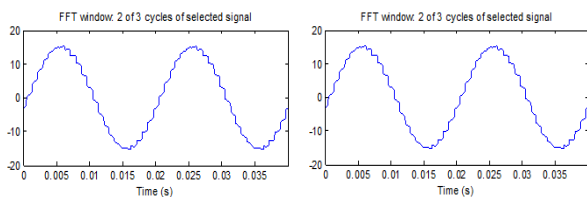
เพื่อยืนยันการวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอในเบื้องต้นจะแสดงการจำลองการทำงานของวงจรเรียงกระแส 24 พัลส์ที่ใช้หม้อแปลงเลื่อนเฟส 15 องศา รูปที่ 5 ด้านบนสุดแสดงผลการจำลองกระแสด้านเข้าเฟส A ของวงจรเรียงกระแส 6 พัลส์หรือกระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเลื่อนเฟสในแต่ละชุด ถัดมาคือกระแสด้านทุติยภูมิที่แปลงข้ามมายังด้านปฐมภูมิโดยกระแสแต่ละชุดจะมีการเลื่อนเฟสที่แตกต่างกัน ถ่างสุดคือกระแสเฟส A ด้านปฐมภูมิและกระแสรวมเฟส A ด้านทุติยภูมิ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่ากระแสเฟส A ด้านทุติยภูมิในแต่ละชุดที่แปลงข้ามมายังด้านปฐมภูมิจะมีความผิดเพี้ยนจากรูปคลื่นไซน์ลดลง และเมื่อนำกระแสดังกล่าวมารวมกันจะได้กระแสเฟส A ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเลื่อนเฟสที่มีลักษณะใกล้เคียงไซน์



(ก) กระแสด้านทุติยภูมิชุดที่ 1 (i_{p1}) และสเปกตรัม



(ข) ผลรวมของกระแสด้านทุติยภูมิทั้ง 4 ชุดและสเปกตรัม

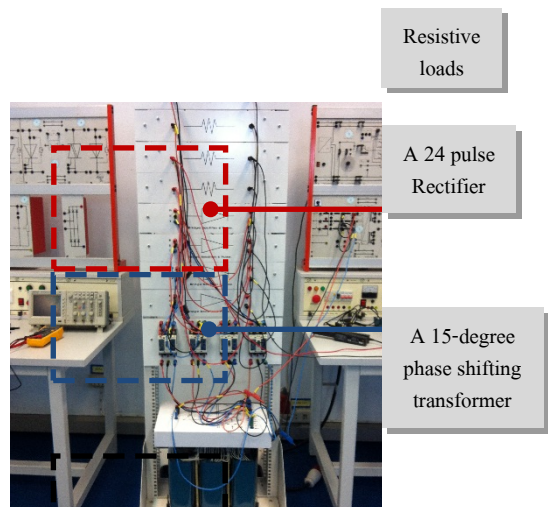


(ค) กระแสด้านปฐมภูมิ (i_p) และสเปกตรัม

รูปที่ 6 กระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิและสเปกตรัม

รูปที่ 6 แสดงกระแสและสเปกตรัมด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงสำหรับวงจรเรียงกระแส 24 พัลส์ รูปที่ 6ก) คือกระแสของวงจรเรียงกระแส 6 พัลส์ซึ่งจะมีฮาร์มอนิกที่สูงมากค่าความผิดเพี้ยนรวมของกระแสฮาร์มอนิก (%THD) มีค่าประมาณ 29% โดยกระแสฮาร์มอนิกจะเริ่มต้นที่ลำดับ 5 รูปที่ 6ข) คือผลรวมของกระแสด้านทุติยภูมิทั้ง 4 ชุด จะเห็น

ได้ว่าผลรวมของกระแสด้านทุติยภูมิทั้ง 4 ชุด จะมีลักษณะใกล้เคียงไซน์มากขึ้น เนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5,7, 11,13,17 และ 19 มีการหักล้างกันทางด้านทุติยภูมิบ้างแล้ว สังเกตได้จากค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสที่ลดลงเหลือประมาณ 7.73% ส่วนรูปที่ 6ค)คือกระแสด้านปฐมภูมิที่มีการหักล้างกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5,7,11,13,17 และ 19 หหมดแล้วจึงทำให้กระแสฮาร์มอนิกเริ่มต้นอยู่ลำดับที่ 23



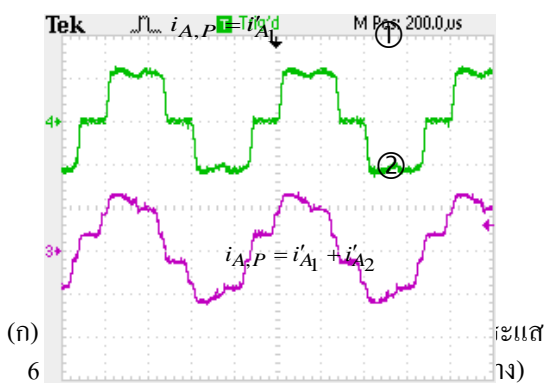
รูปที่ 7 ฮาร์ดแวร์วงจรเรียงกระแส 24 พัลส์ที่ใช้ในการทดสอบ

4. ผลการทดสอบ

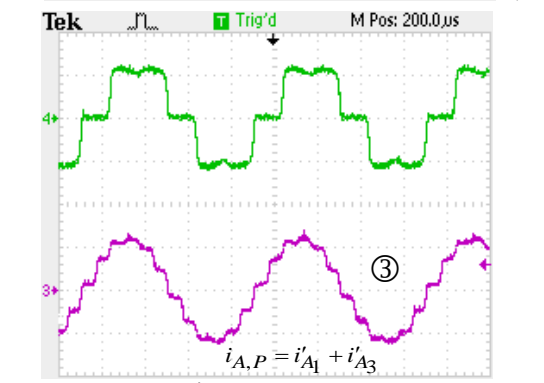
รูปที่ 7 คือฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบจริงตามแนวคิดที่ได้นำเสนอ หลักๆจะประกอบด้วย 1) โหลดตัวต้านทาน 4 ชุด 2) วงจรเรียงกระแส 6 พัลส์ 4 ชุด และ 3) หม้อแปลงเลื่อนเฟส 15 องศา รูปที่ 8 และ 9 คือผลการทดลองเมื่อกำหนดให้แรงดันระหว่างเฟสด้านเข้า 80 V โหลดตัวต้านทาน 800 Ω รูปที่ 8ก) แสดงกระแสด้านปฐมภูมิของวงจรเรียงกระแสเพียงชุดเดียว (6 พัลส์) และวงจรเรียงกระแสชุดที่ 1 และ 2 รูปที่ 8ข) คือกระแสด้านปฐมภูมิเมื่อใช้วงจรเรียงกระแสชุดที่ 1 และ 3 ส่วนรูปที่ 8ค) คือกระแสด้านปฐมภูมิเมื่อใช้วงจรเรียงกระแสทั้ง 4 ชุด (24 พัลส์) และรูปที่ 8ง) คือสเปกตรัมของกระแส จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่มุมเฟสต่างกัน 15 องศา จะลดกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 11 และ 13 ส่วนที่มุมเฟสต่างกัน 30 องศาจะลดกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5,7,17 และ 19 สอดคล้องตามที่ได้อธิบายไว้ในเบื้องต้น ลักษณะดังกล่าวทำให้การใช้

หม้อแปลงเลื่อนเฟส 15 องศาสำหรับวงจรเรียงกระแส 24 พัลส์จะมีกระแสฮาร์มอนิกเริ่มต้นลำดับที่ 23 จึงทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมกระแสฮาร์มอนิกต่ำมากเหลือเพียง 3.91% เท่านั้น

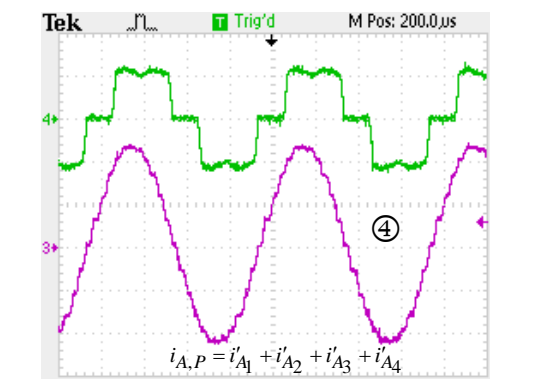
รูปที่ 9 คือผลการทดลองวงจรเรียงกระแส 24 พัลส์ที่ใช้หม้อแปลงเลื่อนเฟส 15 องศา โดยไม่ใช่ตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรอง จากรูปที่ 9ก) จะเห็นได้ว่าแรงดันด้านออกในแต่ละชุดจะเลื่อนเฟสกัน 15 องศา สอดคล้องตามการเลื่อนเฟสของหม้อแปลง เมื่อนำแรงดันทั้ง 4 ชุดรวมกันจะได้แรงดันด้านออกเกือบจะเป็นเส้นตรง ตามรูปที่ 9ข) คำนบน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าวงจรนี้มีค่าระลอกต่ำมากแม้ไม่ใช่ตัวเก็บประจุก็ตาม



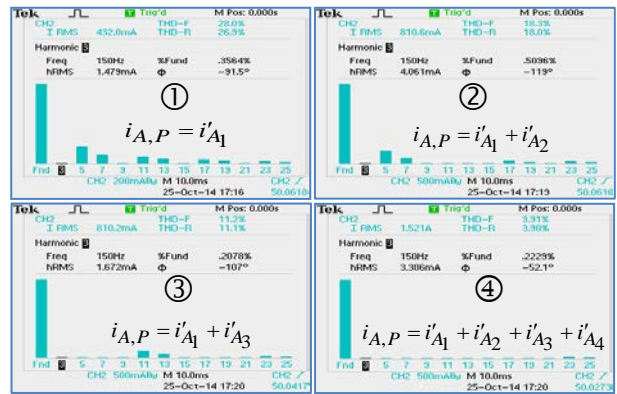
(ก) กระแสเฟส A ด้านปฐมภูมิสำหรับวงจรเรียงกระแส 6 พัลส์ที่เลื่อนเฟส 15 องศา



(ข) กระแสเฟส A ด้านปฐมภูมิสำหรับวงจรเรียงกระแส 12 พัลส์ที่เลื่อนเฟส 30 องศา (ล่าง)

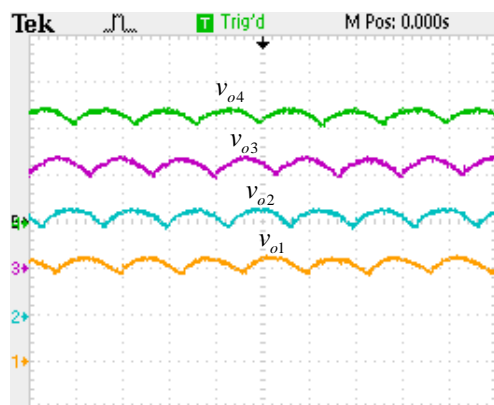


(ค) กระแสเฟส A ด้านปฐมภูมิสำหรับวงจรเรียงกระแส 24 พัลส์ (ล่าง)

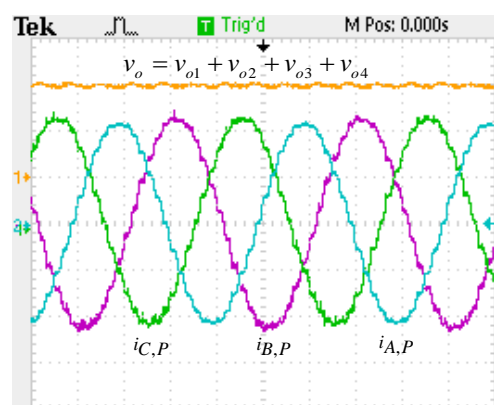


(ง) สเปกตรัมกระแสเฟส A ด้านปฐมภูมิของวงจรเรียงกระแส 1) 6 พัลส์ 2) 12 พัลส์เลื่อนเฟส 15 องศา 3) 12 พัลส์เลื่อนเฟส 30 องศา และ 4) 24 พัลส์ ตามลำดับ

รูปที่ 8 กระแสเฟส A ด้านปฐมภูมิและสเปกตรัม



(ก) แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแส 6 พัลส์ทั้ง 4 ชุด



(ข) แรงดันด้านออกและกระแสด้านปฐมภูมิทั้ง 3 เฟส รูปที่ 9 แรงดันด้านออกและกระแสด้านปฐมภูมิทั้ง 3 เฟส ของวงจรเรียงกระแส 24 พัลส์

จากผลการทดสอบสามารถสรุปค่าฮาร์มอนิกและค่าระลอกของวงจรเรียงกระแสได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าฮาร์มอนิกและค่าระลอกของวงจรเรียงกระแส

No. of pulses	Harmonics								THDi (%)	RF (%)
	5	7	11	13	17	19	23	25		
6	23.32	11.6	8.5	6.2	4.1	2.88	2.29	1.62	28.0	5.1
12 (15°)	14.48	6.8	-	-	3.7	3.1	2.67	1.54	18.3	2.32
12 (30°)	-	-	7.8	5.4	-	-	2.37	1.87	11.2	1.43
24	-	-	-	-	-	-	2.61	1.30	3.91	0.38

5. สรุป

บทความนี้แนะนำเสนอการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าโดยอาศัยหม้อแปลงเลื่อนเฟสสำหรับวงจรเรียงกระแส โดยได้ประยุกต์ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟส 15 องศาต่อวงจรเรียงกระแส 24 พัลส์ และแสดงการวิเคราะห์หุ้มเฟสต่อการลดกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับทั้งด้านทฤษฎีและปฏิกิริยาอย่างชัดเจน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ามุมเฟสต่างกัน 15 องศาจะลดกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 11 และ 13 ส่วนมุมเฟสต่างกัน 30 องศาจะลดกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5, 7, 17 และ 19 จากคุณลักษณะดังกล่าวทำให้สามารถปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของวงจรเรียงกระแสให้ดีขึ้น ค่าความผิดเพี้ยนรวมของกระแส ฮาร์มอนิกลดลงต่ำกว่า 5% โดยกระแสฮาร์มอนิกจะเริ่มต้นลำดับที่ $24m \pm 1$ ซึ่งผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการเลือกมุมเลื่อนเฟสของหม้อแปลง 15 องศา มีความเหมาะสมกับวงจรเรียงกระแส 24 พัลส์ นอกจากนั้นค่าระลอกของแรงดันด้านออกยังน้อยกว่า 0.5% โดยไม่ต้องใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรอง แนวคิดการใช้หม้อแปลงเลื่อนเฟสเพื่อลดกระแสฮาร์มอนิกไม่เพียงแต่นำมาใช้กับวงจรเรียงกระแสเท่านั้นยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโหลดไม่เชิงเส้นใดๆ ได้ด้วยซึ่งจะเกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์อย่างมาก หากต้องใช้หม้อแปลงทำหน้าที่ในการปรับระดับแรงดันอยู่แล้ว และที่สำคัญวงจรเรียงกระแส 24 พัลส์ที่แนะนำนี้ยังสามารถนำมาพัฒนาต่อออกมาเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับได้อีกด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Kannan, et al., "A review of power quality standards, electrical software tools, issues and solutions," *Renewable Energy and Sustainable Energy (ICRESE)*, IEEE, pp. 91-97, 5-6 Dec. 2013.
- [2] T.C. Sekar, B.J. Rabi, "A Review and Study of Harmonic Mitigation Techniques," in *Proc. of ICETEEEM-2012*, IEEE, pp. 93-97, 2012.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE std. 519-1992, 1992.
- [6] 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.
- [7] 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*, pp. 1024-1031, 1996.
- [8] 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. Appicat.*, vol. 33, no. 2, pp. 531-541, Mar./Apr. 1997.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] B. Singh, G. Bhuvaneswari, and V. Garg, "24-pulse ac-dc converter for power quality improvement in vector controlled induction motor drives," *Int. J. Elect. Power Compon. Syst.*, vol. 34, no. 10, pp. 1077-1098, Oct. 2006.
- [12] 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, pp. 125-130, 2006.
- [13] 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, pp. 183-187, 2006.
- [14] 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.
- [15] D. A. Paice, *Power Electronic Converter Harmonics, Multipulse Methods for Clean Power*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1996.
- [16] B. Wu, *High-Power Converters and AC Drives*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006.