

## การออกแบบหม้อแปลงชนิดออโตสำหรับวงจรเรียงกระแสแบบ 18 พัลส์

พนาฤทธิ์ เศรษฐกุล<sup>1</sup> และ วัฒนา แก้วมณี<sup>2\*</sup>

### บทคัดย่อ

ระบบเรียงกระแสแบบมัลติพัลส์เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่ปล่อยเข้าสู่ระบบจากวงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าลงได้ ระบบเรียงกระแสแบบมัลติพัลส์ที่สามารถลดปริมาณฮาร์มอนิกส่งให้สอดคล้องกับข้อแนะนำ IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems ได้คือวงจรเรียงกระแสแบบ 18 พัลส์หรือมากกว่า แม้ว่าวงจรเรียงกระแสแบบ 18 พัลส์แบบดั้งเดิมซึ่งใช้หม้อแปลงชุกแซ็กจะมีข้อเสียเรื่องขนาดและน้ำหนัก แต่ข้อเสียดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยเปลี่ยนมาใช้หม้อแปลงชนิดออโต ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ได้มีบทความเกี่ยวกับการทดสอบและการใช้งานหม้อแปลงชนิดออโตในวงจรเรียงกระแสแบบ 18 พัลส์เป็นจำนวนมากแต่ยังไม่มีความใดกล่าวถึงวิธีการออกแบบหม้อแปลงชนิดดังกล่าวเลย บทความนี้จึงได้แสดงวิธีการออกแบบหม้อแปลงชนิดออโตสำหรับวงจรเรียงกระแสแบบ 18 พัลส์อย่างเป็นระบบ โดยพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบ ถูกนำไปสร้างและทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องซึ่งพบว่าทั้งตัวหม้อแปลงและระบบเรียงกระแสสามารถทำงานได้ดี จึงสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสำหรับผู้สนใจได้

**คำสำคัญ:** ฮาร์มอนิกส์ หม้อแปลงแบบออโต วงจรเรียงกระแสแบบ 18 พัลส์

<sup>1</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>2</sup> อาจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2913-2500 ต่อ 3302 E-mail : wattanak@kmutnb.ac.th

## Designing of Autotransformer for 18-pulse Rectifier Unit

Panarit Sethakul<sup>1</sup> and Wattana Kaewmanee<sup>2\*</sup>

### Abstract

It has been known that 6-pulse rectifiers and converters are the main sources of harmonics in electrical systems. Using multipulse rectifier is one of the harmonic mitigation methods for a system that contain 6-pulse rectifiers or converters. The multipulse rectifier that complies with the IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems is the one that has 18 pulses or more. The main problem of the classical 18-pulse rectifier which uses zigzag transformer is its size and weight; however, this problem can be diminished by using an autotransformer. Though there are many literatures state the merit of the 18-pulse autotransformer rectifier systems, none of them presents an autotransformer design procedure. This paper demonstrates the design of an autotransformer for the 18-pulse rectifier system. The parameters obtained from the design have been implemented and the experimental results shown that the designed autotransformer is working well.

**Keywords:** harmonics, autotransformer, 18-pulse rectifier

---

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

<sup>2</sup> Lecturer, Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

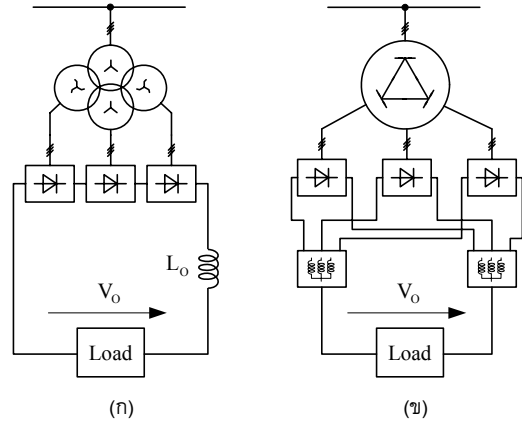
\* Corresponding Author Tel. 0-2913-2500-24 ext. 3302 E-mail : wattanak@kmutnb.ac.th

## 1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าเป็นปัญหาที่มีความสำคัญ [1-2] และนับวันจะทวีความรุนแรงมากขึ้น โดยสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกส์ คือการต่อโหลดที่มีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งก่อให้เกิดกระแสที่มีลักษณะไม่เป็นรูปไซน์ขึ้นในระบบไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่มีลักษณะไม่เป็นรูปไซน์นี้จะส่งผลกระทบต่อไป ทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบเกิดการบิดเบี้ยวจากรูปไซน์ไปด้วย โหลดที่มีลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายและเป็นสาเหตุหลักของปัญหาฮาร์มอนิกส์ คือวงจรซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กลายเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งได้แก่วงจรเรียงกระแสหรือวงจรแปลงผันแรงดัน [3]

วิธีการที่น่าสนใจในการลดปัญหากระแสฮาร์มอนิกส์ซึ่งเกิดจากโหลดกำลังสูงที่ต่ออยู่กับวงจรเรียงกระแสคือการเลือกใช้วงจรเรียงกระแสหรือคอนเวอร์เตอร์แบบมัลติพัลส์ [3-6] หลักการทั่วไปของวงจรเรียงกระแสแบบมัลติพัลส์คือการ ใช้ หม้อแปลงเพื่อจัดแรงดันที่เข้าสู่วงจรเรียงกระแสแบบหกพัลส์ซึ่งมีจำนวนตั้งแต่สองชุดขึ้นไปให้มีการต่างเฟสกันในมุมที่เหมาะสม ซึ่งจะส่งผลให้กระแสฮาร์มอนิกส์ของวงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์แต่ละชุดเกิดการหักล้างกันและปล่อยกระแสฮาร์มอนิกส์เข้าสู่ระบบจ่ายไฟฟ้าในปริมาณที่ต่ำลง วงจรเรียงกระแสแบบมัลติพัลส์โดยทั่วไปมักเป็นแบบ 12 พัลส์ ซึ่งพบได้ในระบบไฟฟ้าสำหรับรถราง เรือ เครื่องบิน [5] หรือเตาหลอมโลหะเป็นต้น แต่หากผู้ใช้ไฟฟ้าต้องการลดปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่ปล่อยสู่ระบบให้สอดคล้องกับข้อแนะนำ IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems วงจรเรียงกระแสที่ใช้ควรเป็นแบบ 18 พัลส์ หรือมากกว่า

ระบบเรียงกระแสแบบ 18 พัลส์ ทั่ว ๆ ไปสามารถทำได้โดยใช้หม้อแปลงแบบซิกแซ็ก ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) แต่ระบบดังกล่าวยังมีข้อด้อยที่สำคัญคือตัวหม้อแปลงมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก [6] แนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าวอาจทำได้โดยการใช้หม้อแปลงแบบออโต (Autotransformer) มาทำหน้าที่จัดแรงดันสำหรับป้อน



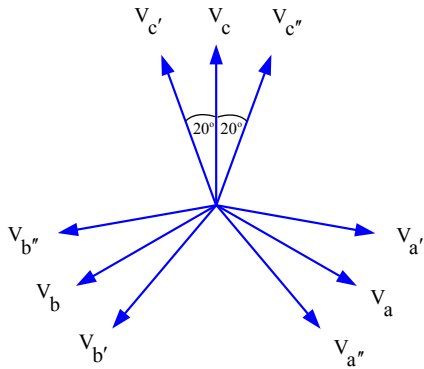
รูปที่ 1: ระบบเรียงกระแสแบบ 18 พัลส์ (ก) ใช้หม้อแปลงแบบซิกแซ็ก (ข) ใช้หม้อแปลงแบบออโต

ให้กับวงจรเรียงกระแสแบบหกพัลส์แต่ละชุด [7] ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) โดยหม้อแปลงแบบออโตจะถูกใช้เพื่อทำการเลื่อนเฟสของแรงดันในระบบไฟฟ้า ซึ่งอัตรากำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงแบบออโตคืออัตรากำลังไฟฟ้าที่ใช้คงความต่างเฟสของแรงดันเอาท์พุทของหม้อแปลง ทำให้ขนาดของหม้อแปลงมีขนาดเล็กกว่าแบบซิกแซ็ก

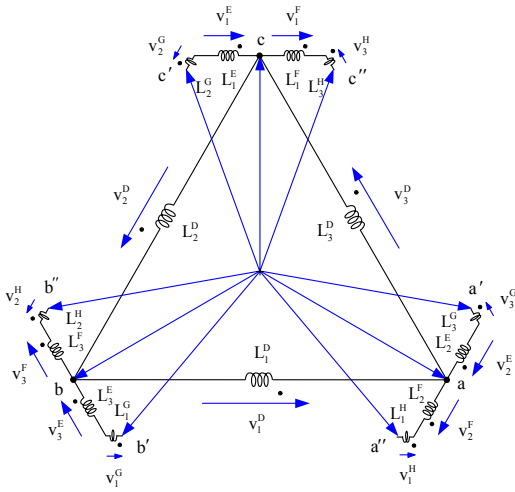
แม้ว่าในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาจะมีบทความเกี่ยวกับการทดสอบและการใช้งานหม้อแปลงชนิดออโตในวงจรเรียงกระแสแบบ 18 พัลส์ เป็นจำนวนมาก [8-12] แต่ยังไม่มีความชัดเจนถึงวิธีการออกแบบหม้อแปลงชนิดดังกล่าวเลย งานวิจัยนี้จึงมีขึ้นเพื่อศึกษาวิธีการออกแบบหม้อแปลงชนิดออโตโดยละเอียดเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ สร้าง และนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่อไป

## 2. การทำงานของหม้อแปลงชนิดออโตสำหรับระบบเรียงกระแสแบบ 18 พัลส์

หม้อแปลงออโตในระบบเรียงกระแสแบบ 18 พัลส์ ไม่ได้ทำหน้าที่ปรับระดับแรงดันแต่จะทำหน้าที่สร้างแรงดันไฟฟ้าชนิดสามเฟสสำหรับป้อนเข้าสู่วงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ขึ้นสองชุด โดยชุดหนึ่งมีเฟสนำหน้าแรงดันในไลน์ 20 องศา และอีกชุดหนึ่งมีเฟสล่าหลังแรงดันในไลน์ 20 องศา ส่วนวงจรเรียงกระแสชุดที่สาม

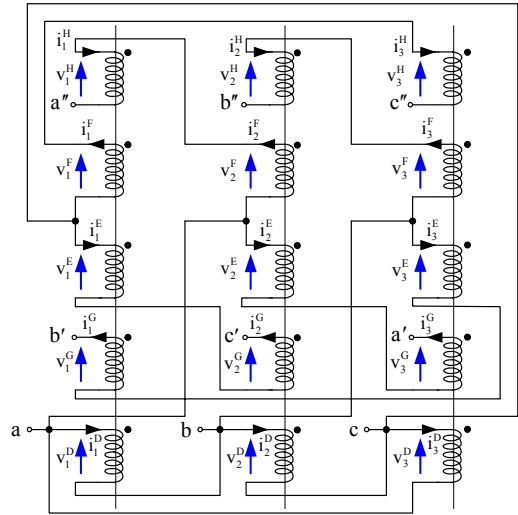


รูปที่ 2: เวกเตอร์แรงดันสำหรับระบบเรียงกระแสแบบ 18 พัลส์



รูปที่ 3: การจัดวางขดลวดของหม้อแปลงแบบอโต

จะต่อเข้ากับไลน์สามเฟสโดยตรง เวกเตอร์แรงดันสำหรับบ่อน้ำสูงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ ทั้งสามชุดแสดงในรูปที่ 2 วิธีการเพื่อให้ได้แรงดันในลักษณะดังกล่าวสามารถทำได้โดยการจัดเรียงขดลวดของหม้อแปลงตามรูปที่ 3 โดยจุด a, b และ c เป็นจุดซึ่งหม้อแปลงรับแรงดันอินพุตจากแหล่งจ่ายสามเฟส จุด a', b' และ c' เป็นจุดแรงดันขาออกซึ่งมีเฟสหน้าหน้าแรงดันในไลน์ 20 องศา และ จุด a'', b'' และ c'' เป็นจุดแรงดันขาออกซึ่งมีเฟสล่าหลังแรงดันในไลน์ 20 องศา การคำนวณจำนวนรอบที่เหมาะสมของขดลวดแต่ละชุดจะถูกนำเสนอในส่วนถัดไป



รูปที่ 4: การต่อขดลวดของหม้อแปลงแบบอโต

### 3. การออกแบบหม้อแปลง

เพื่อให้แรงดันสามเฟสแต่ละชุดมีการต่างเฟสกันตามไดอะแกรมในรูปที่ 3 จำเป็นจะต้องทราบอัตราส่วนแรงดันที่เหมาะสมระหว่างขดลวดชุด D, E, F, G และ H ก่อน

กำหนดให้  $V_1^D, V_1^E, V_1^F, V_1^G, V_1^H$  คือขนาดของแรงดัน rms ของเฟส i (i=1,2 และ 3) ในชุด D, E, F, G และ H ตามลำดับ จากเวกเตอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 3 จะสามารถใช้ทฤษฎีตรีโกณมิติคำนวณหาอัตราส่วนแรงดันระหว่างขดลวดแต่ละชุดได้ดังนี้

$$\frac{V_1^G}{V_1^D} = \frac{V_1^H}{V_1^D} = \frac{2}{3} (1 - \cos(20^\circ)) \quad (1)$$

$$= 0.0402$$

$$\frac{V_1^E}{V_1^D} = \frac{V_1^F}{V_1^D} = \frac{1}{3} (\cos(20^\circ) - \sqrt{3} \cdot \sin(20^\circ) - 1) \quad (2)$$

$$= 0.1773$$

เนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดชุด D เท่ากับ 380 โวลต์ ดังนั้นแรงดันของขดลวดชุด E และ F ที่เหมาะสมคือ 67 โวลต์ ส่วนแรงดันของขดลวดชุด G และ H ที่เหมาะสมคือ 15 โวลต์

เมื่อกำหนดให้วงจรเรียงกระแสแบบ 18 พัลส์ สามารถจ่ายกระแสเอาต์พุตได้สูงสุด 5 แอมแปร์ หรือคิดเป็นกำลังที่เอาต์พุตเท่ากับ 2.64 กิโลวัตต์ ทำงานที่ความถี่  $f_{line}$  เท่ากับ 50 Hz มีประสิทธิภาพไม่ต่ำกว่า 95 % มีค่าโหลตเร็กกูเลชันหรือค่า  $\alpha$  ไม่เกิน 5 % แกนเหล็กใช้ชนิดเหล็กผสมซิลิกอน (3% Si, 97% Fe) โดยกำหนดให้ขณะทำงานมีค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กหรือ  $B_{ac}$  ไม่เกิน 1.2 เทสลา การออกแบบหม้อแปลงสามารถทำได้โดยเริ่มจากการคำนวณหา กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านขดลวดด้านขาออกซึ่งกรณีนี้จะไม่เท่ากับกำลังด้านขาออกที่โหลตเพราะหม้อแปลงเป็นชนิดออโตโดย

$$P_{TFMR\_OUT} = 3 \left( \frac{(V_1^E + V_1^G) \cdot \frac{0.78 \cdot I_o}{3} + (V_1^F + V_1^H) \cdot \frac{0.78 \cdot I_o}{3}}{3} \right) \quad (3)$$

$$= 1.56 \cdot I_o \cdot (V_1^E + V_1^G)$$

เมื่อ  $P_{TFMR\_OUT}$  คือกำลังที่เกิดขึ้นเฉพาะขดด้านออกของหม้อแปลงและ  $I_o$  คือกระแสขาออกที่เอาต์พุตไฟตรง จากนั้นหาลำกำลังรวมของหม้อแปลงโดย

$$P_{TFMR} = \left( \frac{1}{\eta} + 1 \right) \cdot P_{TFMR\_OUT} \quad (4)$$

เมื่อกำหนดให้  $\eta$  คือเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ 100 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.95 จะได้ค่ากำลังรวมของหม้อแปลงหรือ  $P_{TFMR} = 1.323 \text{ kVA}$  จากนั้นคำนวณหาค่าคงที่ทางเรขาคณิต  $K_g$  โดย [13]

$$K_g = \frac{P_{TFMR}}{2 \cdot 2.86 \cdot f_{line}^2 \cdot B_{ac}^2 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha} \quad (5)$$

ซึ่งจะได้ค่า  $K_g = 137.12 \text{ cm}^5$  จากนั้นนำค่า  $K_g$  นี้ไปใช้เลือกขนาดของแกนหม้อแปลงโดยต้องเลือกแกนที่มีค่า  $K_g$  ไม่ต่ำกว่าค่าที่คำนวณไว้ ซึ่งในกรณีนี้เลือกแกนชนิดสามเฟสเบอร์ 1.50EI ซึ่งมีค่า  $K_g$  เท่ากับ

$187.898 \text{ cm}^5$  และมีขนาดพื้นที่หน้าตัดแกนหรือ  $A_c = 13.79 \text{ cm}^2$  ข้อมูลโดยละเอียดของแกนหม้อแปลงสามารถหาได้ใน [13] จากนั้นคำนวณจำนวนรอบของขดลวดชุด D จากสูตร

$$N_D = \frac{V_1^D \cdot 10^4}{4.44 \cdot B_{ac} \cdot A_c \cdot f_{line}} \quad (6)$$

ซึ่งจะได้จำนวนรอบของขดลวดชุด D เท่ากับ 1034 รอบ จากนั้นคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสหรือค่า  $J$  ของขดลวดในหม้อแปลงโดยใช้สูตร

$$J = P_{TFMR} \frac{10^4}{4.44 \cdot K_u \cdot B_{ac} \cdot f_{line} \cdot A_p} \quad (7)$$

เลือกใช้ค่า  $K_u$  หรืออัตราส่วนพื้นที่ทองแดงต่อพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กเท่ากับ 0.35 ส่วนค่า  $A_p$  เป็นค่าผลคูณพื้นที่ของแกนเหล็กที่เลือก โดยแกน 1.50EI ที่เลือกใช้จะมีค่า  $A_p = 750.68 \text{ cm}^4$  ทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากับ  $189.056 \text{ A/cm}^2$  ซึ่งเป็นค่าที่เท่ากันในทุกขดลวดที่ใช้พันหม้อแปลง จากนั้นทำการคำนวณหากระแส  $I_i^D$  ซึ่งเป็นกระแสในแต่ละเฟสของขดลวดชุด D โดย

$$I_i^D = \frac{P_{TFMR\_OUT}}{3 \cdot \eta \cdot V_1^D} \quad (8)$$

ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 0.595 แอมแปร์

เมื่อทราบค่ากระแสของขดลวดชุด D จะสามารถหาขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดชุดนี้ซึ่งจะเป็นค่าเฉพาะหน้าตัดทองแดงไม่รวมฉนวนได้โดย

$$A_{wD\_bare} = \frac{I_i^D}{J} \quad (9)$$

ซึ่งพบว่าขนาดที่เหมาะสมคือเบอร์ AWG22

ขั้นตอนต่อไปทำการคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดชุด E ทำได้โดยใช้สูตร

$$N_E = \left(1 + \frac{\alpha}{100}\right) \left(\frac{V_1^E}{V_1^D}\right) N_D \quad (10)$$

ซึ่งจะได้จำนวนรอบเท่ากับ 193 รอบ การคำนวณหาขนาดของขดลวดชุด E ทำได้โดยการหาค่ากระแสที่ไหลในขดลวดชุด E นี้ก่อนโดย

$$I_1^E = \frac{0.78 \cdot I_o}{3} \quad (11)$$

จากนั้นนำไปคำนวณหาขนาดพื้นที่หน้าตัดโดยใช้สูตรเช่นเดียวกับการคำนวณของขดลวดชุด D ทำให้ทราบว่าขนาดของขดลวดชุด E ที่เหมาะสมคือเบอร์ AWG18 และเนื่องจากขดลวดชุด F มีขนาดแรงดันและกระแสเหมือนกับขดลวดชุด E จำนวนรอบและพื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดงจึงใช้ค่าเดียวกัน

การคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดชุด G และ H ทำได้โดยใช้สูตร

$$N_G = N_H = \left(1 + \frac{\alpha}{100}\right) \left(\frac{V_1^G}{V_1^D}\right) N_D \quad (12)$$

ซึ่งจะได้จำนวนรอบเท่ากับ 44 รอบ และใช้ลวดทองแดงเบอร์ AWG18 เช่นเดียวกับขดลวดชุด E เพราะกระแสในขดลวดมีค่าเท่ากัน

#### 4. ผลการสร้างและทดสอบหม้อแปลง

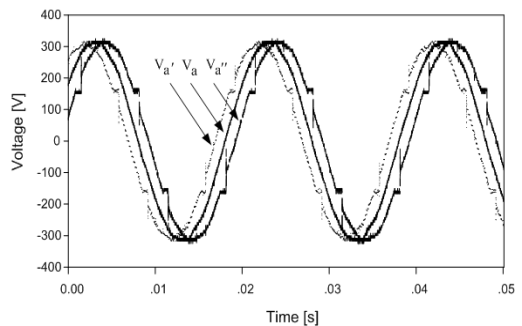
ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้ออกแบบไว้ถูกนำไปสร้างเป็นหม้อแปลงออตโตตั้งแสดงในรูปที่ 5 โดยในรูปที่ 6 เป็นการเปรียบเทียบขนาดหม้อแปลงชนิดออตโตที่สร้างขึ้นกับหม้อแปลงชนิดชิกแซ็กที่อัตรากำลังเท่ากัน แรงดันขาออกของเฟส a, a' และ a'' ของหม้อแปลงชนิดออตโตที่สร้างขึ้นแสดงไว้ในรูปที่ 7 เมื่อนำหม้อแปลงไปต่อเป็นระบบเรียงกระแสแบบ 18 พัลส์ ตามรูปที่ 1 (ข) แล้ว กระแสอินพุตของระบบเรียงกระแสจะมีลักษณะดังรูปที่ 8 ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากกว่ากระแสอินพุตของวงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ทั่วไป ผลวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกซ์ของระบบวัดที่กระแสพิคก (I<sub>o</sub> = 5 แอมแปร์) แสดงไว้ในรูปที่ 9 โดยมีค่า THD<sub>i</sub> เท่ากับ 6.2%



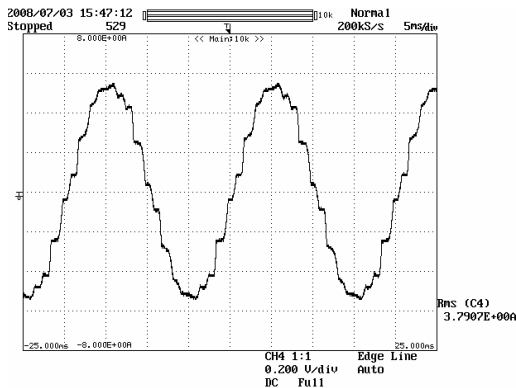
รูปที่ 5: หม้อแปลงแบบออตโตสำหรับระบบเรียงกระแสแบบ 18 พัลส์ ที่สร้างขึ้น



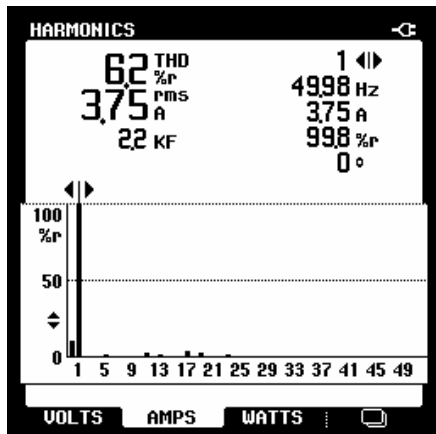
รูปที่ 6: เปรียบเทียบหม้อแปลงสำหรับระบบเรียงกระแสแบบ 18 พัลส์ที่อัตรากำลังเท่ากันโดยด้านซ้ายเป็นหม้อแปลงแบบออตโตและด้านขวาเป็นแบบชิกแซ็ก



รูปที่ 7: แรงดัน  $V_a$  และ  $V_{a''}$  ที่ออกจากหม้อแปลงออตโต ซึ่งจะนำหน้าและล่าหลัง  $V_a$  เป็นมุม 20 องศา



รูปที่ 8: กระแสอินพุตของระบบเรียงกระแสแบบ 18 พัลส์โดยใช้หม้อแปลงชนิดออตโตที่สร้างขึ้น



รูปที่ 9: ผลวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิกส์ของระบบที่สร้างขึ้นโดยวัดที่พิกัดกระแสเอาต์พุต 5 แอมป์ (กระแสอินพุตแต่ละเฟสจะมีค่าเท่ากับ  $0.78 \cdot I_o$ ) พบว่ามีค่า THD<sub>r</sub> เท่ากับ 6.2%

## 5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้แสดงการออกแบบหม้อแปลงชนิดออตโตสำหรับวงจรเรียงกระแสแบบ 18 พัลส์อย่างเป็นระบบโดยพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบได้ถูกนำไปสร้างและทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องซึ่งพบว่าทั้งตัวหม้อแปลงและระบบเรียงกระแสสามารถทำงานได้ดีจึงสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสำหรับผู้ที่สนใจได้

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยประเภทกลุ่มวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Stones and A. Collinson, "Power quality," *Power Engineering Journal*, Vol. 15, Issue 2, pp. 58 – 64, April 2001.
- [2] A. Emadi, A. Nasiri and S. B. Bekiarov, *Uninterruptible power supplies and active filters*, CRC Press LLC, Florida, 2000.
- [3] IEEE. *IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems*. New York, 1993.
- [4] P.K. Chaturvedi, Shailendra Jain, K.C. Pradhan and Veshali Goyal, "Multi-pulse converters as a viable solution for power quality improvement," *Power India Conference, 2006 IEEE*, 10-12 April 2006.
- [5] F. Wang, "System harmonics reduction using multipulse AC fed PWM voltage source inverters," *Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, IEEE*, Vol. 2, pp.1265 – 1268, 31 Jan-4 Feb 1999.
- [6] K.W.E. Cheng, "Comparative study of AC/DC converters for More Electric Aircraft," *Power Electronics and Variable Speed Drives, 1998. Seventh International Conference*, pp.299 – 304, 21-23 Sept. 1998.
- [7] D.A. Paice, *Power electronic converter harmonics. Multi-pulse method for clean power*, pp. 171, IEEE, 1996.
- [8] J. K. Kang, "Multi-Pulse Rectifier Solutions for Input Harmonics Mitigation," white paper, Yaskawa Electric America, Inc. 2005.

- [9] E.Aeloiza, Y.Durrani, M. Rayner, R. Gopinath and P. Enjeti, "A robust 18-pulse rectifier for adjustable speed drive systems," *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005. Twentieth Annual IEEE* , vol.1, no., pp. 665- 669 Vol. 1, 6-10 March 2005
- [10] B. Singh, G. Bhuvaneswari and V. Garg, "An 18-Pulse AC-DC Converter for Power Quality Improvement in Vector Controlled Induction Motor Drives," *1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2006*, pp.1-6, 24-26 May 2006
- [11] B. Singh, G. Bhuvaneswari and V. Garg, "A Novel Polygon Based 18-Pulse AC-DC Converter for Vector Controlled Induction Motor Drives," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.22, no.2, pp.488-497, March 2007
- [12] M. Swamy, T. J. Kume and N. Takada, "A hybrid 18-pulse rectification scheme for diode front end Variable Frequency Drives," *Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009*. pp.1562-1568, 20-24 Sept. 2009
- [13] Colonel WM. T. Mcllyman, *Transformer and Inductor Design Handbook*, 3<sup>rd</sup> edition, Marcel Dekker, California, U.S.A. 2004.