การศึกษาการลดกระแสฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายด้วยหม้อแปลงแบบซิกแซก

THE STUDY OF HARMONIC CURRENT REDUCTION IN DISTRIBUTION LINE USING ZIG-ZAG TRANSFORMER

ชัยรัตน์ วิสุทธิรัตน์ นิมิต บุญภิรมย์ ปรากฤต เหลี่ยงประดิษฐ์

อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: chairat.vi@spu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอการศึกษาการลดกระแสฮาร์มอนิกในสายระบบจำหน่ายด้วยหม้อแปลงแบบซิกแซก วัตถุประสงค์จะเป็นการลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับ 3 หารลงตัวที่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น 1 เฟส ต่อร่วมกับระบบ 3 เฟส 4 สาย โหลดไม่เป็นเชิงเส้น 1 เฟส จะสร้างกระแสฮาร์มอนิกที่ประกอบด้วยอันดับที่ 3 หารลงตัวไหลลงสู่สายนิวตรอนของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า มีผลทำให้มีกระแสในนิวตรอลเกิดความร้อนในสายนิวตรอล และส่งผลสู่หม้อแปลงไฟฟ้า ในบทความนี้ได้นำเสนอการใช้หม้อแปลงแบบซิกแซกมาต่อเชื่อมระหว่างสายป้อนระบบจำหน่าย กับสายที่จ่ายให้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น โดยรายละเอียด จะออกแบบขนาดของหม้อแปลงซิกแซก การทดลองต่อหม้อแปลงเพื่อจ่ายโหลดวงจรเรียงกระแส 1 เฟส 3 ชุด วิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกอันดับ 3 หารลงตัว ทดลองวัดกระแสฮาร์มอนิกอันดับ 3 และอันดับ 9 ที่หม้อแปลงแบบซิกแซก ด้านทุติยภูมิและด้านปฐมภูมิ โดยใช้เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า จากผลการทดลองสามารถลดค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับ 3 หารลงตัว ที่ไหลในนิวตรอล ที่ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่ต่อด้านระบบจำหน่ายไฟฟ้า ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: หม้อแปลงไฟฟ้าแบบซิกแซก ฮาร์มอนิกอันดับ 3 หารลงตัว วงจรเรียงกระแส

ABSTRACT

This paper presents the study of harmonic current reduction in distribution line using zigzag transformer. The objective is to reduce the triplen harmonic that are generated by the single nonlinear loads connecting to the 3 phase 4 wire distribution line. As the results, this triplen harmonic will flow into neutral line of distribution line and always cause the high temperature of distribution transformer winding. Furthermore, the DZ0 zigzag transformer design and experimental processes are proposed by applying to the 3 sets of 300 watts single phase AC-DC rectifiers. As the experimental results, the comparison of line current waveform, 3rd harmonic current spectrum, 9th harmonic current between line input and line output of transformer are significantly achieved.

KEYWORDS: Zigzag Transformer, Triplen Harmonic, Rectifier Circuit.

1.บทนำ

ในปัจจุบันโหลดไฟฟ้าที่ประกอบด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังหรือเรียกกันว่าโหลดไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากรูปคลื่นของแรงดันและรูปคลื่นกระแสแตกต่างกันไม่ใช่รูปคลื่นไซน์ โหลดประเภทนี้จะสร้างกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้าทำให้เกิดปัญหามากมายกับระบบไฟฟ้าที่ต่อร่วมกันหรือบริเวณใกล้เคียง กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 หารลงตัวเช่น อันดับ 3,9, 15,21……เป็นต้นหรือเรียกว่า Triplen Harmonic จะเป็นกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลลงสายนิวตรอลลงสู่ระบบกราวน์ หรือไหลวนในระบบ ปัญหาของฮาร์มอนิกลำดับ 3 หารลงตัวนี้จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายเกิดกระแสลูปร่วม (Common Mode Current) ทำให้เกิดความร้อนในหม้อแปลง ทำให้ระบบป้องกันไฟฟ้าหรือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานผิดพลาด เป็นต้น การแก้ปัญหาฮาร์มอนิกด้วยวิธีใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบหม้อแปลงกราวนด์ (H. K. Høidalen, R. Sporild, 2005)(S.Ranjith Kumar,2011)ได้ถูกนำมาใช้ในการขจัดกระแสฮาร์มอนิกในสายนิวตรอล แต่จะเพิ่มกำลังไฟฟ้าของระบบ ได้มีการพัฒนาการเพิ่มขดลวดของหม้อแปลงแบบซิกแซก เพื่อให้เพิ่มประสิทธิภาพโดยเพิ่มสนามแม่เหล็กในการหักล้าง (Chairul Gagarin Irianto, Rudy Setiabudy, and Chairul Hudaya, 2010)จะทำให้โครงสร้างใหญ่ขึ้น การใช้หม้อแปลงแบบซิกแซกชนิดต่อเชื่อมโยงกับระบบจำหน่าย (Azhar Ahmad, Rosli Omar and Marizan Sulaiman, 2006) จะเกิดการหักล้างของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 หารลงตัวที่เกิดจากโหลดไหลลงสู่นิวตรอล มาถูกขจัดที่หม้อแปลงไฟฟ้าแบบซิกแซก ทำให้ไม่มีกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 หารลงตัวในด้านระบบจำหน่ายเข้าที่จ่ายกำลังผ่านหม้อแปลง วิธีนี้จะเป็นวิธีที่เหมาะกับงานในอุตสาหกรรมที่กำลังไฟฟ้าสูง มีราคาถูกเมื่อเทียบกับการใช้ตัวกรอง และมีความคงทน ในบทความนี้เป็นการทำเสนอการประยุกต์ใช้หม้อแปลงแบบซิกแซกเพื่อลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับ 3 หารลงตัว โดยต่อเชื่อมกับระบบ3 เฟส 4 สาย จ่ายโหลดวงจรเรียงกระแส 1 เฟส 3 ชุด

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

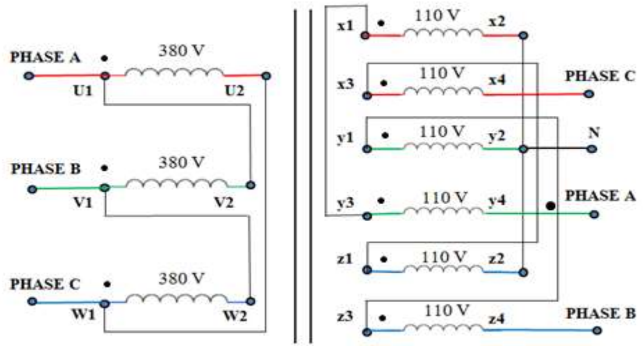
1. เพื่อศึกษาการลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับ 3 หารลงตัวในระบบจำหน่ายด้วยหม้อแปลงแบบซิกแซก
2. เพื่อออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสแบบซิกแซกเพื่อใช้ในงานวิจัย
3. เพื่อวิเคราะห์การหักล้างของกระแสฮาร์มอนิกในขดลวดของหม้อแปลงแบบซิกแซก
4. เพื่อสร้างระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นโดยให้วงจรเรียงกระแส 1 เฟส 3 ชุด
5. เพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกระแสฮาร์มอนิกอันดับ 3 หารลงตัวที่สายของสายจ่ายเข้าและด้านจ่ายไฟออกของหม้อแปลงซิกแซก

3. ขอบเขตของงานวิจัย

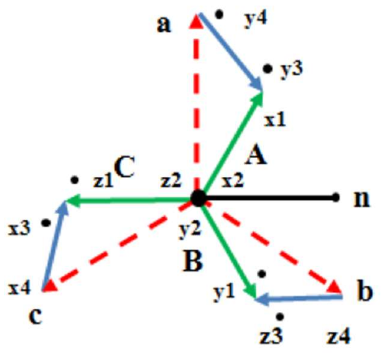
1. ออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแบบซิกแซก 3 เฟส 380 โวลท์
2. สร้างวงจรเรียงกระแส 1 เฟส 3 ชุด จ่ายโหลดความต้านทานรวม 300 วัตต์
3. สร้างชุดทดลองใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบซิกแซกจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้นในหัวข้อที่ 2
4. วัดค่ารูปคลื่นแรงดัน กระแสไฟฟ้า ทางด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลด
5. วัดสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกอันดับ 3 และ อันดับ 9 ทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงซิกแซก

4. หลักการของหม้อแปลงแบบซิกแซก

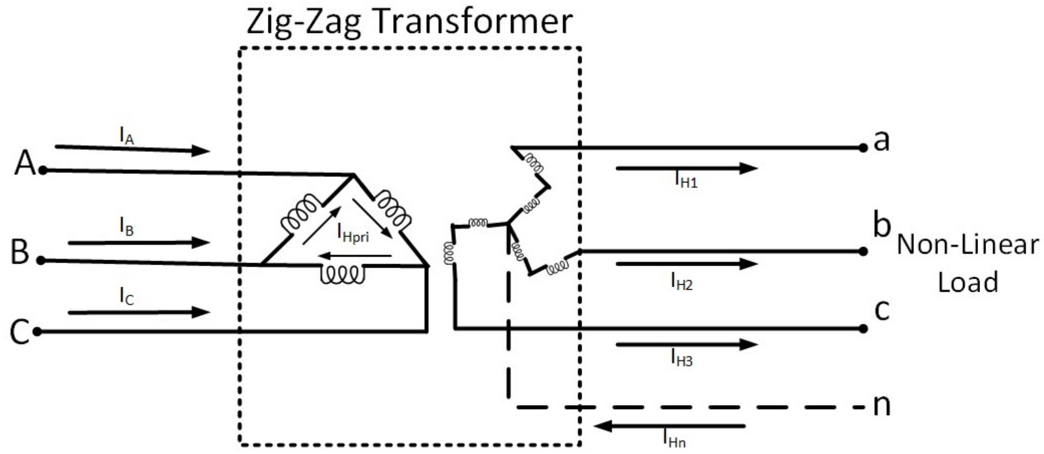
หม้อแปลงแบบซิกแซกเป็นหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสที่มีขดลวดปฐมภูมิ 3 ชุดและขดลวดทุติยภูมิ 6 ชุด หม้อแปลงที่ใช้ในบทความนี้เป็นหม้อแปลงที่มีพิกัด ของขดลวด ต่อเฟส เท่ากับ 380/220 V. ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นการต่อขนานหม้อแปลงแบบ Dz0 ลักษณะของขั้วของการต่อทำให้เกิดเวกเตอร์แรงดันทางขดลวดทุติยภูมิดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2



รูปที่ 1 โครงสร้างขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบซิกแซกในบทความ



รูปที่ 2 เวกเตอร์ของแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Dz0



รูปที่ 3 การนำหม้อแปลงแบบซิกแซกไปใช้จ่ายโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

เมื่อนำหม้อแปลงไฟฟ้าแบบซิกแซกนำไปต่อเชื่อมเพื่อจ่ายโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น 1 เฟส 3 ชุดทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 หารลงตัว ไหลในสายนิวตรอน จากรูปที่ 3 ค่ากระแส I_{Hn} เป็นกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 หารลงตัว ซึ่งจะมีค่ากระแสเท่ากับ 3 เท่าของกระแสฮาร์มอนิกลำดับ 3 หรือประมาณ $\sqrt{3}$ ของกระแสในสายด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง I_{Hn} กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในนิวตรอนนี้จะเป็นกระแสลำดับศูนย์ (Zero Sequence) คือมีเฟสของกระแสฮาร์มอนิกเท่ากัน ดังนั้นเมื่อไหลเข้าไปสู่นิวตรอนของหม้อแปลง จะแยกออกเป็นกระแสแต่ละสาย วนลูปกลับไปที่โหลด I_{H1} , $I_{H2,}$ I_{H3} ตามลำดับ กระแสฮาร์มอนิกจากนิวตรอนที่ไหลเข้ากลับเข้าไปในขดลวดทุติยภูมิจะเหนี่ยวนำไปที่ขดลวดปฐมภูมิและจะไปไหลวนและหักล้างกันที่ขดลวดปฐมภูมิ ทำให้ไม่มีกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 หารลงตัว

5. ลำดับขั้นในการดำเนินการวิจัย

5.1 การออกแบบหม้อแปลงแบบซิกแซก

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ: $P_t = P_0\left(\frac{1}{\eta} + 1\right)$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเกิดสนามแม่เหล็ก

$$K_e = 0.145\left(K_f\right)^2(f)^2(B_m)^2(10^{-4})$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของแกน: $K_g = \frac{P_t}{2K_e a}$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่าความเร็วรอบด้านปฐมภูมิ: $N_p = \frac{V_{in}(10^4)}{K_f B_{ac} f A_c}$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่าความหนาแน่นของกระแสที่ไหลผ่านแกน: $J = \frac{P_t(10^4)}{K_f K_u B_{ac} f A_p}$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณค่ากระแสด้านอินพุต: $I_{in} = \frac{P_o}{V_{in}\eta}$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณค่าพื้นที่โดยรวมของสายด้านปฐมภูมิ

โดยผลลัทธ์จะได้หม้อแปลงซิกแซก แบบ Dz0 ขนาด 300 VA. แรงดัน 380/110 V.

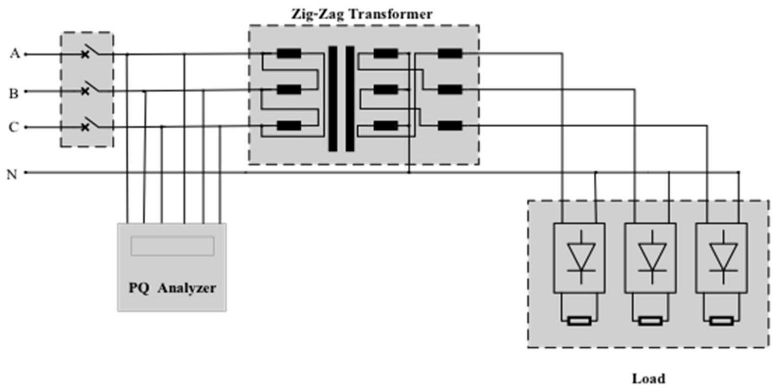
5.2 การทดลองโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

5.2.1 เครื่องมือและวงจรการทดสอบ

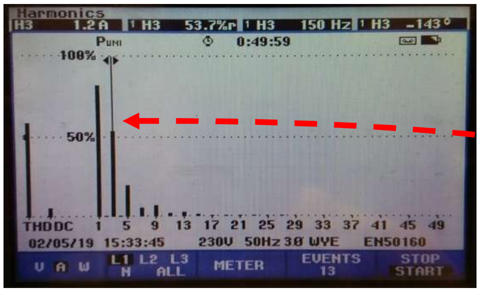
1. เครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าและพลังงาน Fluke 435 Series II Class A.

2. ต่อวงจรหม้อแปลงแบบซิกแซกทางด้านขดลวดปฐมภูมิกับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สาย ขนาด 380 V. ทางด้านเอาท์พุท ต่อกับวงจรเรียงกระแส AC-DC 1 เฟส 220 V.จ่ายโหลดความต้านทาน ชุดละ 100 W. จำนวน 3 ชุดรวมเป็นกำลังไฟฟ้ารวมเท่ากับ 300 W. และใช้เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าวัดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4

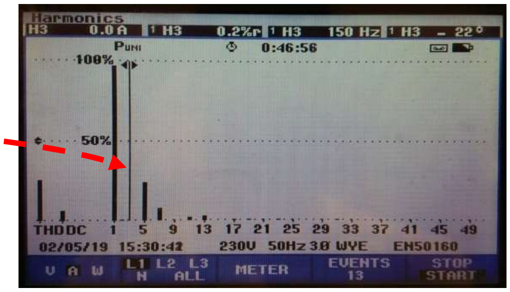
3. บันทึกค่าสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกลำดับ 3 หารลงตัว ในการทดลองนี้จะบันทึกลำดับ 3,5,7 และ ลำดับ 9 ตามลำดับ โดยบันทึกค่ารูปคลื่นของกระแสด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง เปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 9 ตามลำดับ



รูปที่ 4 การนำหม้อแปลงแบบซิกแซกไปใช้จ่ายโหลดวงจรเรียงกระแส AC-DC 1 เฟส 3 ชุด



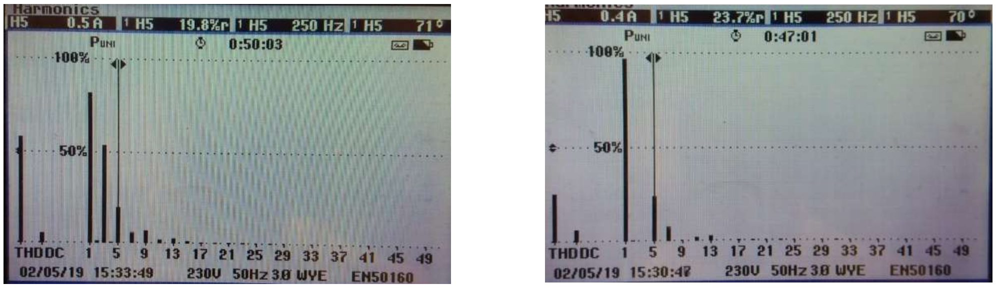
ก. ด้านทุติยภูมิ(I_3=1.2 A.)



ข. ด้านปฐมภูมิ (I_3= 0.0 A.)

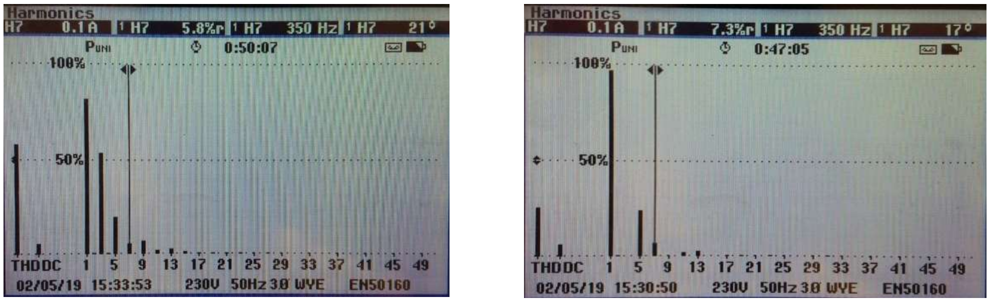
รูปที่ 5 การลดลงของกระแสฮาร์มอนิกอันดับ 3 ในสายระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

จากรูปที่ 5 ได้แสดงให้เห็นว่า กระแสฮาร์มอนิกอันดับ 3 หารลงตัวเช่น อันดับ 3, 9, 15......เป็นต้น โดยเริ่มต้นที่อันดับ 3 ที่ไหลในสายนิวตรอนจะไหลเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านขดลวดทุติยภูมิ ไหลวนกลับไปที่โหลดจะเกิดการเหนี่ยวนำสู่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงแบบซิกแซก เกิดการหักล้างกัน ทำให้กระแสฮาร์มอนิกในสายจ่ายเข้าขดลวดปฐมภูมลดลงในรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับ 3 ที่ไหลออกจากหม้อแปลงทางขดลวดทุติยภูมิ จะมีค่า เท่ากับ 1.2 A. แต่ถ้ามาพิจารณาทางกระแสไหลเข้าหาหม้อแปลงทางขดลวดปฐมภูมิจะมีค่า เท่ากับ 0.0 A. จากนั้นทำการวัดที่ลำดับ 5, 7 และลำดับ 9 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า กระแสฮาร์มอนิกลำดับ 5 และ ลำดับ 7 ไม่ได้เป็นฮาร์มอนิกที่ 3 หารลงตัว และไม่ได้ไหลในสายนิวตรอล จะมีค่าแตกต่างระหว่าง ขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิน้อยมาก (ดังแสดงในรูปที่ 6 และรูปที่ 7) หม้อแปลงแบบซิกแซกไม่ส่งผลต่อกระแสฮาร์มอนิกลำดับนี้ อย่างไรก็ดีเมื่อวัดกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับ 9 ซึ่ง 3 หารลงตัวเช่นกัน จะเห็นได้ว่ากระแสด้านทุติยภูมิ มีค่าเท่ากับ 0.2 A. แต่กระแสด้านปฐมภูมิถูกขจัดจนเหลือ 0.0 A. เช่นกัน



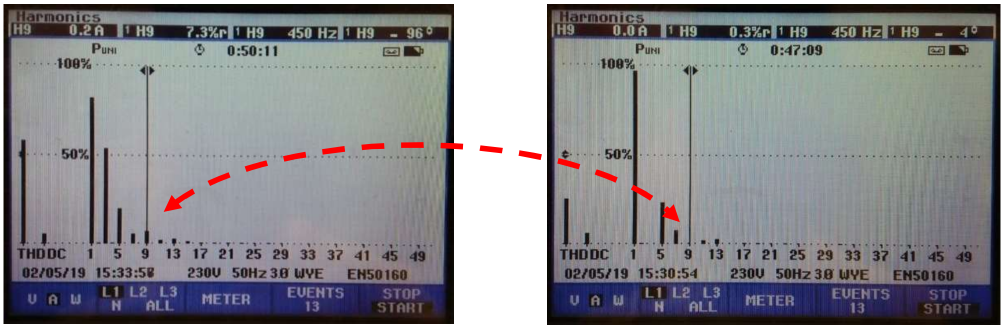
ก. ด้านทุติยภูมิ(I_5=0.5 A.) ข. ด้านปฐมภูมิ(I_5=0.4 A.)

รูปที่ 6 การลดลงของกระแสฮาร์มอนิกอันดับ 5 ในสายระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ



ก. ด้านทุติยภูมิ(I_7=0.1 A.) ข. ด้านปฐมภูมิ(I_7=0.1 A.)

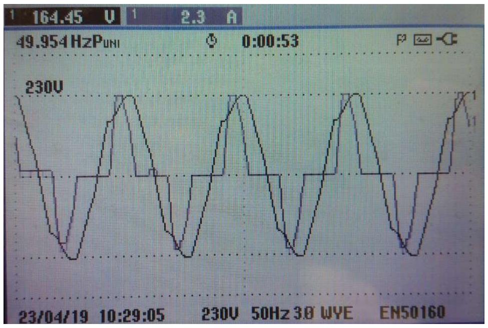
รูปที่ 7 การลดลงของกระแสฮาร์มอนิกอันดับ 7 ในสายระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

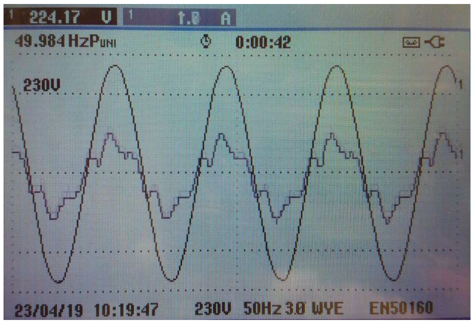


ข. ด้านทุติยภูมิ(I_9=0.2 A.) ข. ด้านปฐมภูมิ(I_9=0.0 A.)

รูปที่ 8 การลดลงของกระแสฮาร์มอนิกอันดับ 9 ในสายระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

ในรูปที่ 9 ได้แสดงรูปคลื่นของกระแสระหว่างกระแสไหลออกจากขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง และกระแสไหลเข้าขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง กระแสด้านออกจากหม้อแปลงไปสู่โหลดจะมีความเพี้ยนสูงและมีองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 หารลงตัว เมื่อกระแสเหนี่ยวนำไปทางขดลวดทุติยภูมิทำให้ทางด้านกระแสไหลเข้ามีรูปเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์ แสดงให้เห็นว่า กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในนิวตรอลจะถูกขจัดออกทางขดลวดปฐมภูมิทำให้ลดการเกิดกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลออกระบบไฟฟ้าภายนอก





ก. ด้านทุติยภูมิ ข. ด้านปฐมภูมิ

รูปที่ 9 รูปคลื่นกระแสในสายระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

6. สรุปและเสนอแนะ

จากผลการศึกษาการใช้หม้อแปลงแบบซิกแซกเพื่อลดกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 หารลงตัวหรือเรียกว่า Triplen Harmonic ที่ไหลกลับเข้าไปสู่ระบบไฟฟ้า จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ากระแสลำดับ 3 และ ลำดับ 9 จะไหลวนจากหม้อแปลงซิกแซกกลับไปที่โหลดโดยกระแสฮาร์มอนิกนี้ จะเหนี่ยวนำจากขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไปสู่ขดลวดปฐมภูมิ และเกิดการหักล้างในด้านปฐมภูมิทำให้กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ระบบลดลงไม่สร้างปัญหาให้ระบบไฟฟ้า วิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน ราคาไม่สูงและมีความคงทนเหมาะกับการแก้ปัญหาในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจาก การใช้วิธีอื่น ๆ ในระดับกระแสสูง ๆ เช่นการใช้ตัวกรองแบบพาสซีฟและแอคทีฟจะมีราคาสูงมาก นอกจากนี้การใช้หม้อแปลงซิกแซกยังเพิ่มค่าอิมพิแดนซ์ของกระแสลัดวงจรของระบบอีกด้วยจะทำให้ปริมาณของกระแสลัดวงจรจะลดลง แต่ในข้อเสียอาจจะทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียของการส่งกำลังเพิ่มขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

H. K. Høidalen, R. Sporild, 2005 “Using Zigzag Transformers with Phase-shift to reduce Harmonics in AC-DC Systems” **International Conference on Power Systems Transients (IPST’05)** in Montreal, Canada on June.

S.Ranjith Kumar, S.Surendhar, Ashish Negi and P.Raja, 2011 “Zig Zag Transformer performance analysis on harmonic reduction in distribution load” **International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering,** Pahang, Malaysia, June 21-22.

Chairul Gagarin Irianto, Rudy Setiabudy, and Chairul Hudaya, 2010 “Design of Delta Primary - Transposed zigzag Secondary (DTz) Transformer to Minimize Harmonic Currents on the Three-phase Electric Power Distribution System” **International Journal on Electrical Engineering and Informatics** - Volume 2, Number 4.

Azhar Ahmad, Rosli Omar and Marizan Sulaiman, 2006 “Application of ZigZag Transformers to Mitigate Triplen Harmonics in 3 Phase 4 Wire Electrical Distribution System” **Conference on Research and Development (SCOReD 2006)**, MALAYSIA.