การลดกระแสฮาร์มอนิกในสายนิวทรัลโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซก

Zigzag Ground Transformer for Triplen Harmonic Current Reduction

นิมิต บุญภิรมย์ สำเริง ฮินท่าไม้ จักรกฤษณ์ ขุนแก้ว นายธีรพันธ์ นันทิยาพร
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม nimi.bo@spu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการลดกระแสฮาร์มอนิกในสายนิวทรัลโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซก ซึ่งวัตถุประสงค์จะเป็นการนำเสนอการประยุกต์หม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซกเพื่อลดกระแสทริปเปิ้ลฮาร์มอนิกที่ไหลในสายนิวทรัล โดยการวิเคราะห์หลักการลดกระแสฮาร์มอนิกด้วยหม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซก จากนั้นนำเสนอการทดลอง 2 ส่วนคือการสร้างแบบจำลองการใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซกร่วมกับวงจรเรียงกระแส 3 เฟส 4 สายด้วยโปรแกรมซิมมูลิงค์ และ ทดลองกับวงจรเป็นวงจรเรียงกระแส และวงจรเอซีคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส 4 สาย ขนาด 800 วัตต์ และ 300 วัตต์ตามลำดับจากผลการทดลองหม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซกสามารถลดค่ากระแสทริปเปิ้ลฮาร์มอนิกได้โดยวัดเปรียบเทียบกับค่าความเพี้ยนรวมก่อนและหลังติดตั้ง

คำสำคัญ: หม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซก ทริปเปิ้ลฮาร์มอนิก

Abstract

This paper presents the zigzag ground transformer for triplen harmonic current reduction. The main objective is to propose the application of zigzag ground transformer for reduction triplen harmonic current that flows in neutral line. The principle of triplen harmonic current reduction is presented. Furthermore, the Simulink model of zigzag ground transformer connecting with 3 phase 4 wire of AC-DC rectifier is simulated. Moreover, the experiment of the zigzag ground transformer with 800 watts 3 phase 4 wire of AC-DC rectifier and 3000 watts AC converter are carry on, respectively. Consequently, the experimental results of the simulation and experimental by the percentage of current total harmonic distortion (THD_I) show that the triplen harmonic current is efficiently reduced.

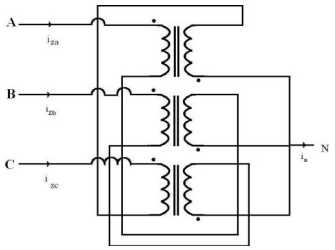
Keywords: Zigzag ground transformer, Triplen Harmonic.

1. บทนำ

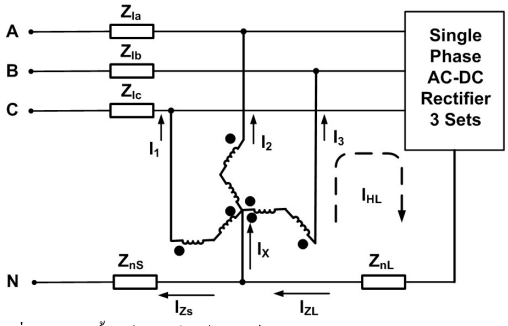
ปัญหาเรื่องฮาร์มอนิกเป็นปัญหาที่กระทบระบบไฟฟ้าเสมอมาจากการใช้โหลดจำพวกอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อความสะดวกในการควบคุมและการประหยัดพลังงาน การขจัดหรือลดจำนวนฮาร์มอนิกมีหลายวิธี เช่นจะใช้ตัวกรองแบบพาสซีสและแบบแอคทีฟ แต่มีขอจำกัดด้านราคาและจำนวนตัวกรอง การใช้หม้อแปลงแบบซิกแซกเป็นวิธีหนึ่งในการลดกระแสฮาร์มอนิกที่มีลำดับที่หาร 3 ลงตัว เช่น ลำดับ 3, 9, 15 หรือ 21 เป็นต้นหรือเรียกว่ากระแส Triplen Harmonic มีงานวิจัยที่จะลดกระแส Triplen Harmonic [1] โดยการติดตั้ง Zigzag Ground Transformer โดยพิจารณาทั้งสภาวะสมดุลและไม่สมดุล การใช้ Zigzag Transformer คู่กับ DSTATCOM[2] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการขจัดกระแส Triplen Harmonic ซึ่งค่อนข้างมีความซับซ้อนในโครงสร้างของวงจร นอกจากนี้การวิเคราะห์แบบจำลองของ Zigzag Transformer [3][4] ซึ่งแสดงถึงวงจรการไหลของกระแสในลูประหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าและโหลดจะไหลลงสายนิวทรัลและลงระบบดิน จะส่งผลต่อสายนิวทรัล ทำให้เกิดความร้อนและรบกวนระบบควบคุมต่าง ๆ ที่ใช้สายนิวทรัลร่วมกัน ในบทความฉบับนี้ได้นำเสนอการใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซก

2. หม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซก(Zigzag Ground Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซก มีโครงสร้างคล้ายหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสทั่วไปมีขดลวดปฐมภูมิ 3 ชุดและ ทุติยภูมิ 3ชุดมีอัตราส่วน 1:1 ในการต่อขดลวดจะต่อเชื่อมขดลวดเป็นแบบ Z ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยที่มีจุด(Dot)ที่ขั้วของขดลวดและแสดงทิศทางของเวกเตอร์ของแรงดันในแต่ละขดลวด



รูปที่ 1 โครงสร้างพื้นฐานของ Zigzag Ground Transformer



รูปที่ 2 การติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซกกับวงจรเรียงกระแส

GN 45

การไหลของกระแส Triplen Harmonic จะไหลลงสายนิวทรัล มีขนาดเป็น 3 เท่าของกระแสแต่ละเฟสมีเฟสเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงถือว่าเป็นกระแสในองค์ประกอบศูนย์ ดังแสดงในสมการที่(1)และสมการที่(2)

$$\begin{aligned} i_{a(3)}(t) &= I_{m(3)}\cos(3\omega t) = I_{m(3)}\angle 0^\circ \\ i_{b(3)}(t) &= I_{m(3)}\cos 3(\omega t - 120^\circ) = I_{m(3)}\angle 0^\circ \\ i_{c(3)}(t) &= I_{m(3)}\cos 3(\omega t + 120^\circ) = I_{m(3)}\angle 0^\circ \end{aligned} \quad (1)$$

$$I_T = 3I_{m(3)} = I_Z \quad (2)$$

โดยที่ I_T = กระแสฮาร์มอนิกรวม,

I_Z = กระแสองค์ประกอบศูนย์ (Sequence Component Current),

$i_{a(3)}, i_{b(3)}(t), i_{c(3)}(t)$ = กระแสฮาร์มอนิกอันดับ 3.

จากรูปที่ 2 ได้แสดงให้เห็นว่ากระแส Triplen Harmonic มีเฟสศูนย์จะกลายเป็นกระแสในองค์ประกอบศูนย์(Zero Sequence Component) ไหลผ่านสายนิวทรัลของโหลดผ่านเข้าไปยังหม้อแปลงกราวด์แบบซิกแซกแยกเป็น 3 ส่วนเท่ากัน เนื่องจากมีอิมพิแดนซ์แต่ละเฟสเท่ากัน ดังสมการที่ (3)

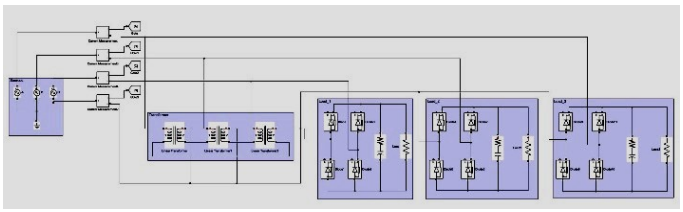
$$I_x = I_1 + I_2 + I_3 \quad (3)$$

เนื่องจากกระแสแต่ละส่วนผ่านขดลวดของหม้อแปลงที่มีขั้ว(Dot)ที่ตรงข้ามกันทำให้เกิดการหักล้างของแรงดันเหนี่ยวนำจากหม้อแปลง ผลจะทำให้กระแสองค์ประกอบศูนย์มองค่าอิมพิแดนซ์ของหม้อแปลงเป็นค่าต่ำผลของการไหลผ่านหม้อแปลงนี้ กระแสนี้จะไปไหลวนกลับไปที่โหลดทำให้กระแสองค์ประกอบศูนย์ ซึ่งก็คือกระแส Triplen Harmonicที่ไหลไปที่แหล่งจ่ายผ่านสายนิวทรัล (I_{zs})ลงไปที่สายดินมีค่าลดลงการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซกนี้จะติดตั้งใกล้กับโหลดซึ่งอิมพิแดนซ์ของสายนิวทรัลระหว่างหม้อแปลงกับโหลด (Z_{nL})มีค่าน้อยกว่าอิมพิแดนซ์ระหว่างหม้อแปลงกับแหล่งจ่าย(Z_{nS})มาก

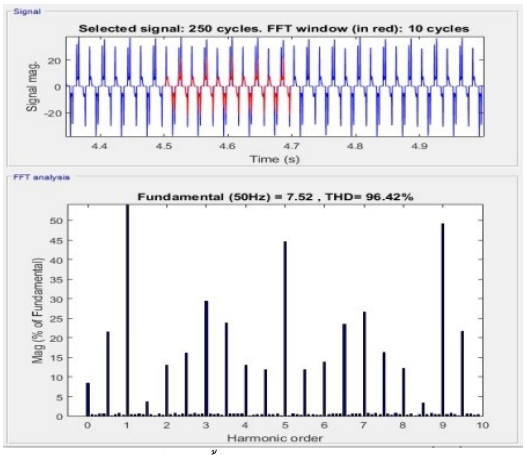
3. การทดลองใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซกเพื่อลดค่ากระแส Triplen Harmonic

3.1 การทดลองโดยการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Simulink

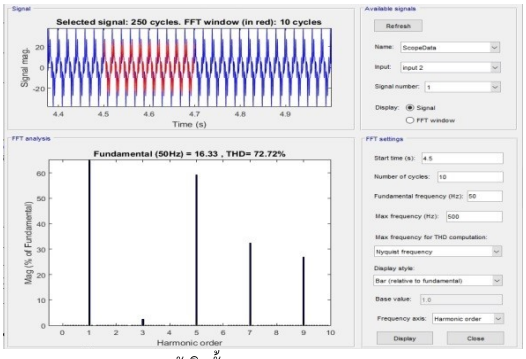
3.1.1. สร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซกโดยจ่ายวงจรเรียงกระแส 3 เฟส 4 สาย ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแส 1 เฟส ที่มีตัวกรองด้วยตัวเก็บประจุและจ่ายโหลดความต้านทานจำนวน 3 ชุด ๆละ 400 วัตต์ ด้วยโปรแกรม Simulink ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การจำลองการใช้ Zigzag Ground Transformer ต่อรวมกับวงจรเรียงกระแส 3 เฟส 4 สาย



ก. ก่อนติดตั้ง Zigzag Ground Transformer



ข. หลังติดตั้ง Zigzag Ground Transformer

รูปที่ 4 สเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกของวงจรเรียงกระแสก่อนและหลังติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซก

จากผลการทดลองพบว่า ก่อนติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซกจะเกิดกระแสฮาร์มอนิกจำนวนมากจากผลของการใช้วงจรเรียงกระแส 1 เฟสที่ต้องต่อสายนิวทรัล ในระบบ 3 เฟส 4 สาย จำนวนกระแสฮาร์มอนิกที่มีค่าสูงจะเป็นอันดับ 3,5,9 ในรูปที่ 4 ก. แสดงสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิก และมีค่า THD_i = 96.42 % เมื่อติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซก ดังแสดงในรูปที่ 3 ในวงจรเดียวกัน สเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกอันดับ 3 และ อันดับ 9 ลดลงและมีค่า THD_i= 72.72 % ดังแสดงในรูปที่ 4 ข. ลำดับต่อไปจะเป็นการทดลองกับอุปกรณ์จริงในโครงสร้างวงจรเดียวกัน

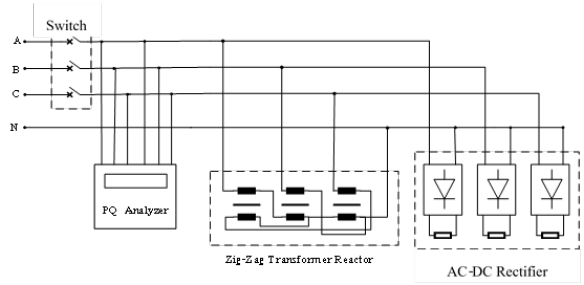
3.2 การทดลองโดยการสร้างอุปกรณ์จริง

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1.เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า ยี่ห้อ Fluke 435 Series II มาตฐาน IEC61000-4-30 Class A

2. หม้อแปลงกราวด์แบบซิกแซกขนาดพิกัดแรงดันเฟส 220 โวลท์ 500 วัตต์ มีเหนี่ยวนำของขดลวดเท่ากับ 0.025 เฮนรี่

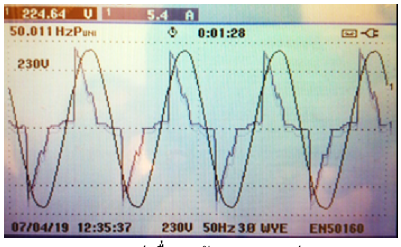
3.2.2 วิธีการทดลองการใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซก โดยต่อวงจรดังรูปที่ 5 จ่ายวงจรเรียงกระแส 3 เฟส 4 สายจ่ายโหลดความต้านทานขนาด 800 วัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 5



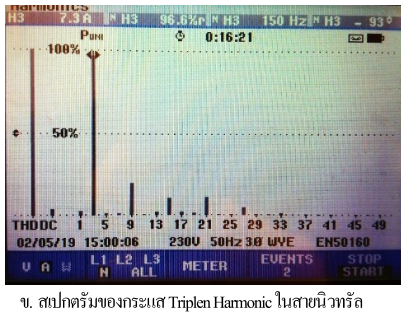
รูปที่ 5 แสดงวงจรเรียงกระแส 1 เฟส 3 ชุดที่ติดตั้ง Zigzag Ground Transformer

3.2.3 วัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และ สเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกด้วยเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้า

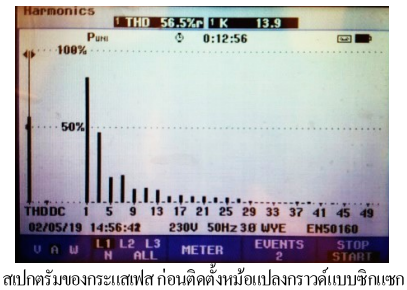
3.2.4 วัดค่าสเปกตรัมของ กระแส Triplen Harmonic ที่ไหลในสายนิวทรัล ดังแสดงในรูปที่ 6 ข. และ สเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกลำดับคี่ของกระแสเฟส ดังแสดงในรูปที่ 6 ค



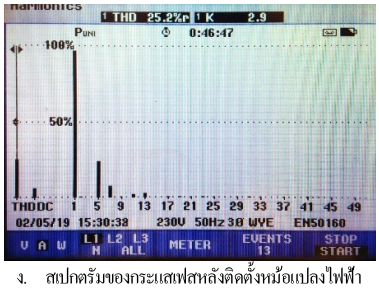
ก. รูปคลื่นแรงดันและกระแสเฟส



ข. สเปกตรัมของกระแส Triplen Harmonic ในสายนิวทรัล ก่อนติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซก



ค. สเปกตรัมของกระแสเฟส ก่อนติดตั้งหม้อแปลงกราวด์แบบซิกแซก

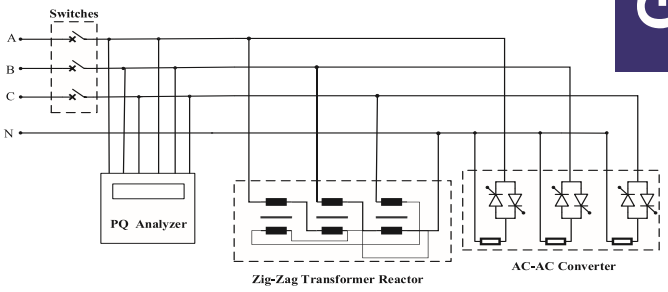


ง. สเปกตรัมของกระแสเฟสหลังติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซก

รูปที่ 6 แสดงวงจรเรียงกระแส 1 เฟส 3 ชุดที่ติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซก

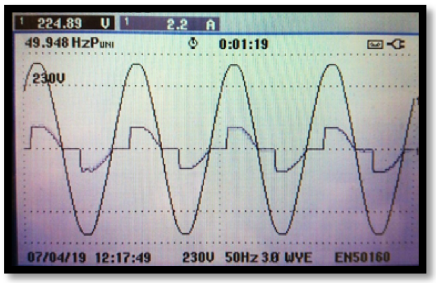
3.2.5 วัดค่าสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกกระแสเฟส หลังติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซก ดังแสดงในรูปที่ 6 ง. จากรูปที่ 6 ได้แสดงผลของการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซกในวงจรเรียงกระแส ดังแสดงในรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า ค่า THD_i ก่อนที่จะติดตั้งหม้อแปลงกราวด์แบบซิกแซก ที่ค่าเท่ากับ 56.9 % และมีค่า Triplen Harmonic (3^{rd}, 9^{th}, 15^{th},.....) สูงมาก แต่ภายหลังที่ติดตั้งหม้อแปลง ค่าสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกลำดับ_3,9, 15.. ลดลง แสดงให้เห็นว่าหม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซกสามารถลดกระแส Triplen Harmonic ได้ และค่า THD_i จะลดลงเหลือ 25.2 % ดังแสดงในรูปที่ 6 ง.

3.2.6 เปลี่ยนโหลดมาใช้เป็น AC Converter ในรูปที่ 7 จ่ายโหลดขดลวดความร้อนความต้านทานขนาด 3000 วัตต์ ปรับมุมจุดชนวนไทริสเตอร์30 องศา และทำการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 3.2.2 ถึงข้อ 3.2.5

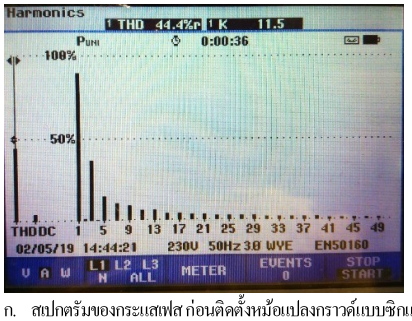


รูปที่ 7 วงจร AC Converter 1 เฟส 3 ชุดจ่ายโหลดความร้อนรวม 8000 วัตต์ ติดตั้งหม้อแปลงกราวด์แบบซิกแซก

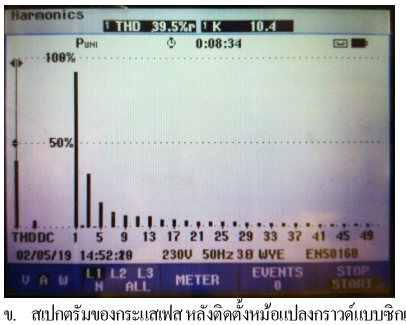
GN 45



รูปที่ 8 รูปคลื่นแรงดันและกระแสจ่ายเข้า ของ AC-AC Converter



ก. สเปกตรัมของกระแสเฟส ก่อนติดตั้งหม้อแปลงกราวด์แบบซิกแซก



ข. สเปกตรัมของกระแสเฟส หลังติดตั้งหม้อแปลงกราวด์แบบซิกแซก

รูปที่ 8 รูปสเปกตรัมของการใช้โหลด AC Converter

3.2.7 จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4 นี้พบว่า ค่า THD ลงลงไม่มากนัก เมื่อเทียบกับการใช้โหลดวงจรเรียงกระแส 1 เฟส ดังหัวข้อที่ 3 ค่า THD จะลดจาก 44.4 % ลงถึง 39.5 % ดังแสดงในรูปที่ 8 ก. และรูปที่ 8 ข. ที่เป็นดังนี้ขึ้นกับจำนวนค่ากำลังไฟฟ้าของ AC-AC Converter ขึ้นกับความเหมาะสมของการออกแบบพารามิเตอร์ของโหลดและกำลังของโหลดในแต่ละชนิด

4. สรุป

จากผลการนำเสนอการใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากราวด์แบบซิกแซกเพื่อใช้ลดค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับ 3 หารลงตัวหรือ กระแส Triplen Harmonic นั้นจากผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ และ จากการทดลองกับโหลดไม่เป็นเชิงเส้นระบบ 3 เฟส 4 สาย ซึ่งประกอบด้วย วงจรเรียงกระแส 1 เฟส จ่ายโหลดความต้านทานสมดุล 3 ชุดและวงจร AC Converter จ่ายโหลดความร้อนประเภทความต้านทาน 3 ชุด ได้รับผลในการสามารถลดกระแส Triplen Harmonic ได้ โดยการวัดจากค่า THD ที่ลดลง แต่ประมาณการลดลงที่ไม่เท่ากัน เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำที่ยังไม่เหมาะสมกับโหลดที่ต่างกัน แต่วิธีนี้เป็นวิธีที่เหมาะสมในทางปฏิบัติ เนื่องจากมีราคาถูกมีองค์ประกอบที่ไม่ซับซ้อน เหมาะสมในการลดปัญหาของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในสายนิวทรัล ซึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพการลดทอนต้องพัฒนาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] Azhar Ahmad, Rosli Omar and Marizan Sulaiman, “Application of ZigZag Transformers to Mitigate Triplen Harmonics in 3 Phase 4 Wire Electrical,” 4"h Student Conference on Research and Development (SCOReD 2006), Shah Alam, Selangor, MALAYSIA, 27-28 June, 2006

[2] P. Jayaprakash, Member, IEEE, Bhim Singh, “Icosϕ Algorithm Based Control of Zig-zag Transformer Connected Three Phase Four Wire DSTATCOM,” IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems December16-19, Bengaluru, India, 2012.

[3] Hurng-Liahng Jou, Jinn-Chang Wu, Kuen-Der Wu, Wen-Jung Chiang, and Yi-Hsun Chen, Analysis of Zig-Zag Transformer Applying in the Three-Phase Four-Wire Distribution Power System, “IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, no 2, April, 2005.

[4] Chairul Gagarin Irianto, Rudy Setiabudy, Chairul Hudaya, “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 – Vol. 2, 2010.

นิมิต บุญภิรมย์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ทำงานวิจัยด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง คุณภาพทางไฟฟ้า และ EMC.

สำเริง ฮินท่าไม้ ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ประยุกต์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม มีความสนใจงานวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ระบบการต่อลงดินและระบบการป้องกันฟ้าผ่าและการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า