

วงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับศูนย์สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสี่สาย

A Zero Sequence Harmonic Filter for Three-Phase Four-Wire Power Systems

ชัชวาลย์ เจริญบุตร

Chuttchaval Jeraputra

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

25/25 พุทธมณฑลสาย 4 ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170

โทรศัพท์ 0-2 889-2138 ต่อ 6501 Email: egcjr@mahidol.ac.th

บทคัดย่อ

เนื่องจากปัจจุบันมีการใช้งานโหลดไม่เชิงเส้นเป็นจำนวนมากในระบบไฟฟ้าส่งผลทำให้กระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัลมีค่าสูงเกินกว่าพิกัดของขนาดสาย งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะพัฒนาวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับศูนย์เพื่อลดปริมาณกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัลสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสี่สาย ในบทความได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับศูนย์อย่างเป็นระบบ การจำลองการทำงานของวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับศูนย์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การสร้างต้นแบบวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับศูนย์ขนาด 1kVA, 240/416V, 50Hz และการทดสอบในห้องปฏิบัติการในสภาวะโหลดสมดุลและโหลดไม่สมดุล ผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์และการทดลองในห้องปฏิบัติการมีความสอดคล้องและสรุปว่าวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับศูนย์ที่นำเสนอสามารถลดกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

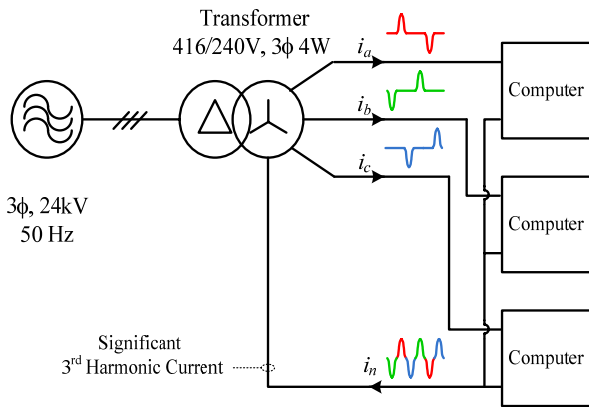
Abstract

The proliferation of electronic loads has been strongly related to the problems such as neutral conductor overloading, transformer overheating, and interference with communication systems As a result, this research aims to develop a zero sequence harmonic filter which capable of reducing the neutral current. In this paper analysis and design of the proposed zero sequence harmonic filter are presented. Viability of the proposed filter is evaluated by the computer simulation. The laboratory prototype of the proposed filter

1kVA, 240/416V, 50Hz is developed and tested under balanced loads and unbalanced loads. The results from computer simulation and laboratory test are consistent and confirm effectiveness of the proposed zero sequence harmonic filter

1. บทนำ

โดยทั่วไประบบไฟฟ้าสามเฟสสี่สายนำมาใช้เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ อาคารพาณิชย์ โรงพยาบาล โรงแรม และ ศูนย์การค้า ดังแสดงในรูปที่ 1 แต่เนื่องจากโหลดภายในอาคารดังกล่าวประกอบไปด้วยโหลดไม่เชิงเส้นจำนวนมาก เช่น คอมพิวเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในสำนักงาน และ แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง เป็นต้น ถึงแม้ว่าในขั้นตอนการออกแบบระบบไฟฟ้าได้มีการจัดโหลดเป็นสามเฟสอย่างสมดุล แต่ปัญหากระแสไฟฟ้าเกินในสายนิวทรัลและหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เป็นจำนวนเท่าของเลขคี่ของฮาร์โมนิกส์ลำดับที่สาม (Triplen odd harmonics) หรือ กระแสไฟฟ้าลำดับศูนย์ เช่น 3^{rd} , 9^{th} , 15^{th} ... เกิดจากสวิตช์โหมดเพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้วงจรไดโอดเรียงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงในอุปกรณ์ดังกล่าวไหลมารวมกันในสายนิวทรัล ส่งผลทำให้



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้าสามเฟสสี่สาย

กระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัลสูงกว่าค่าพิกัดที่สายนิวทรัลสามารถรับได้ จากการสำรวจในต่างประเทศพบว่า 22.6% ของอาคารที่ตรวจสอบประสบปัญหากระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัลเกินพิกัด [1] ปัญหากระแสไฟฟ้าลำดับศูนย์ในสายนิวทรัลจะทำให้เกิดความร้อนในสายนิวทรัล อาจทำให้สายนิวทรัลได้รับความเสียหาย ทำให้ความสามารถในการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลงถึง 50% [2] และ ทำให้ประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลง แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมอิมพีแดนซ์ในสายนิวทรัลเนื่องจากกระแสไฟฟ้าลำดับศูนย์ ส่งผลทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างสายนิวทรัลและกราวด์ของระบบ ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวสูงทำงานผิดพลาดได้ และ ทำให้ขีดจำกัดความทนได้ต่อแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะต่ำลง ในกรณีที่สายนิวทรัลถูกวางใกล้กับสายโทรศัพท์ กระแสไฟฟ้าลำดับศูนย์อาจเหนี่ยวนำทำให้เกิดสัญญาณรบกวนไปยังระบบสื่อสาร [3-4] ปัญหาโหลดเกินของสายนิวทรัลเนื่องจากกระแสไฟฟ้าลำดับศูนย์ในระบบสามเฟสสี่สายสามารถแก้ไขได้โดยใช้วงจรกรองกระแสฮาร์โมนิก ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทหลักคือ วงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกแบบแพสซีฟ และ วงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกแบบแอ็กทีฟ [5-8] โดยมีหลักการทำงานดังต่อไปนี้

วงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกแบบแพสซีฟประกอบด้วย รีซิสเตอร์, อินดักเตอร์, และ คาปาซิเตอร์ นำมาต่ออนุกรมหรือ ขนานกับระบบไฟฟ้า สำหรับวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกแบบแพสซีฟต่อขนานกับระบบไฟฟ้า (Parallel

connected resonant filter) ประกอบไปด้วย อินดักเตอร์ และ คาปาซิเตอร์ ต่ออนุกรมกัน อิมพีแดนซ์ของวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกมีค่าน้อยมากที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกที่ต้องการกรอง ตำแหน่งการติดตั้งวงจรกรองฮาร์โมนิกนี้ต้องอยู่ด้านหน้าโหลดที่เป็นต้นกำเนิดของกระแสฮาร์โมนิก เพื่อให้กระแสฮาร์โมนิกไหลวนอยู่ในวงจรปิดของวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกและโหลด ดังนั้นจึงทำให้กระแสฮาร์โมนิกไม่ไหลผ่านสายนิวทรัลและหม้อแปลงไฟฟ้า การติดตั้งวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ป้องกันระบบไฟฟ้า แต่วิธีดังกล่าวยังมีข้อเสียคือ เมื่อภาระโหลดหรืออิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง ส่งผลทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกเปลี่ยนและอาจทำให้วงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกทำงานไม่เป็นปกติ สำหรับวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกแบบแอ็กทีฟต่ออนุกรมกับระบบไฟฟ้า (Series connected resonant filter) ประกอบด้วย รีซิสเตอร์ อินดักเตอร์ และ คาปาซิเตอร์ ต่อขนานกัน เพื่อทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกมีค่าสูงมากที่ความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกที่ต้องการปิดกั้น ทำให้กระแสฮาร์โมนิกลดลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยตำแหน่งการติดตั้งวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกสามารถนำมาต่ออนุกรมระหว่างจุดนิวทรัลของหม้อแปลงและสายนิวทรัล วงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกดังกล่าวมีข้อเสียคือ ทำให้รูปร่างแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากรูปร่างไซน์มาก แรงดันไฟฟ้าค่ายอดลดลงเหลือ 88% ส่งผลทำให้ขีดจำกัดความทนได้ต่อแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะลดลง

วงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกแบบแอ็กทีฟ โดยทั่วไปใช้อุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุม หรือ ชดเชยกระแสฮาร์โมนิกในสายนิวทรัล สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ วงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกแบบแอ็กทีฟต่อขนานกับระบบไฟฟ้า และ วงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกแบบต่ออนุกรมกับระบบไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น วงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกแบบแอ็กทีฟ 3 เฟส 4 สาย [6] สามารถกำจัดกระแสฮาร์โมนิกและปรับกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสให้เป็นรูปร่างไซน์ และสามารถชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอ็กทีฟ แต่ข้อเสียคือระบบควบคุมมีความซับซ้อนและมีราคาสูง วงจรกรองกระแส

ฮาร์มอนิกในสายนิวทรัลแบบแอ็กทิฟร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบซิกแซ็ก [7] โดยการใช้อินเวอร์เตอร์ 1 เฟสทำการควบคุมการไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่สาม ในสายนิวทรัลให้เป็นศูนย์ โดยเปลี่ยนเส้นทางการไหลของกระแสฮาร์มอนิกให้ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าแบบซิกแซ็กให้ย้อนกลับไปยังโหลดทั้งสามเฟสเท่าๆกัน ดังนั้นจึงทำให้กระแสฮาร์มอนิกมีเส้นทางการไหลอยู่เฉพาะในวงจรปิดของอินเวอร์เตอร์และโหลด ถึงแม้จะช่วยลดกระแสฮาร์มอนิกในหม้อแปลงได้ แต่สายนิวทรัลบางช่วงอาจประสบปัญหาโหลดเกินได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องติดตั้งวงจรกรองดังกล่าวที่ตำแหน่งโหลดหลายๆจุด ซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง สำหรับวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกแบบแอ็กทิฟต่ออนุกรมกับสายนิวทรัล [8] โดยการใช้อินเวอร์เตอร์ 1 เฟสต่ออนุกรมกับสายนิวทรัลเพื่อควบคุมการไหลหรือปิดกั้นกระแสฮาร์มอนิก ทำให้ควบคุมการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในสายนิวทรัลทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังสามารถควบคุมไม่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ เมื่ออิมพีแดนซ์ของโหลดหรือระบบไฟฟ้าเปลี่ยน แต่มิข้อเสียคือแรงดันไฟฟ้าคายอดลดลงเช่นเดียวกับวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกแบบแพสซีฟต่ออนุกรมกับระบบไฟฟ้า

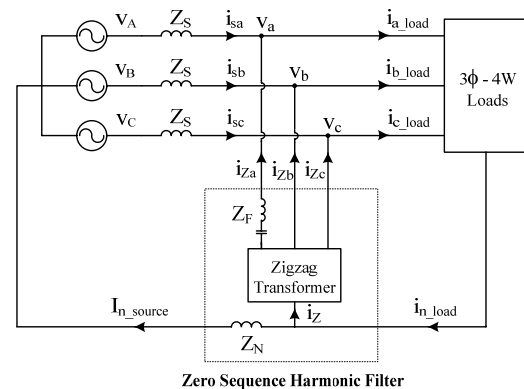
ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะพัฒนางจรกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับศูนย์ซึ่งสามารถลดกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัลไม่ให้เกินพิกัดกระแสไฟฟ้าของสายนิวทรัลที่รับได้ วงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับศูนย์ที่นำเสนอมีข้อดีคือ ราคาประหยัด เชื่อถือได้สูง คงทนต่อแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล โหลดไม่สมดุล และ แรงดันไฟฟ้าเพี้ยน รวมทั้งลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานได้เต็มพิกัด

ในบทความได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับศูนย์ การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภายใต้สภาวะโหลดสมดุล โหลดไม่สมดุล แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล และ แรงดันไฟฟ้าเพี้ยน การสร้างต้นแบบวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับศูนย์ขนาด 3kVA, 240/416V, 50Hz และทดสอบในห้องปฏิบัติการภายใต้สภาวะโหลดสมดุลและโหลดไม่สมดุล ผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์และการทดลองในห้องปฏิบัติการมีความสอดคล้องและสรุปได้ว่าวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิก

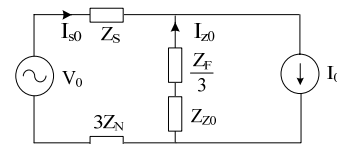
ลำดับศูนย์สามารถลดกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัลในทางปฏิบัติได้เป็นอย่างดี

2. วงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับศูนย์

วงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับศูนย์ที่นำเสนอในรูปที่ 2 มีองค์ประกอบหลักสามส่วนคือ หม้อแปลงไฟฟ้าซิกแซ็ก วงจรฮาร์มอนิกฟิลเตอร์ และ นิวทรัลอินดักเตอร์ เมื่อนำไปต่อขนานกับระบบไฟฟ้า ส่งผลทำให้กระแสฮาร์มอนิกลำดับศูนย์ที่ไหลมาจากแต่ละเฟสรวมกันในสายนิวทรัลแบ่ง



รูปที่ 2 วงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับศูนย์



รูปที่ 3 วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับศูนย์

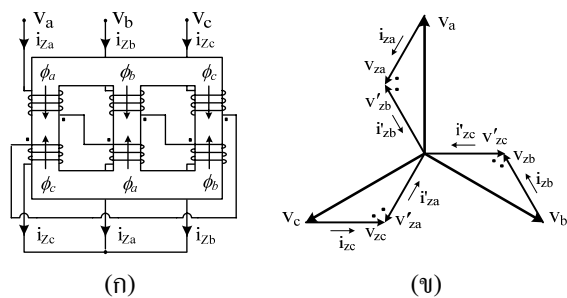
ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าซิกแซ็กย้อนกลับไปที่โหลด ทำให้กระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัลของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลง สำหรับวงจรฮาร์มอนิกฟิลเตอร์ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าชั้นมูลไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าซิกแซ็กขณะโหลดไม่สมดุลและแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

รูปที่ 3 แสดงวงจรสมมูลลำดับศูนย์ของวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับศูนย์ โดยกำหนดให้ระบบไฟฟ้ามีค่าอิมพีแดนซ์เป็น Z_S หม้อแปลงไฟฟ้าซิกแซ็กมีค่าอิมพีแดนซ์เป็น Z_{Z0} วงจรฮาร์มอนิกฟิลเตอร์มีค่าอิมพีแดนซ์เป็น Z_F นิวทรัลอินดักเตอร์มีค่าอิมพีแดนซ์เป็น Z_N กระแสฮาร์มอนิกลำดับ

ศูนย์สามารถจำลองโดยแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า I_0 และแรงดันไฟฟ้าลำดับศูนย์สามารถจำลองแทนด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า V_0 การวิเคราะห์และออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าชุกแซ็ก วงจรจูนฮาร์มอนิกส์ฟิลเตอร์ และ นิวทรัลอินคัลเตอร์ จะนำเสนอในหัวข้อต่อไป

2.1 หม้อแปลงไฟฟ้าชุกแซ็ก

หม้อแปลงไฟฟ้าชุกแซ็กประกอบด้วยขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบเท่ากับ 1:1 ต่ออนุกรมเป็นจำนวนสามเฟสดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4 หม้อแปลงไฟฟ้าชุกแซ็ก (ก) การต่อขดลวด (ข) เฟสเซอร์ไดอะแกรม

แต่ละเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้าชุกแซ็กแสดงในรูปที่ 4 (ข) จากวิธีการต่อขดลวดดังกล่าวส่งผลทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าชุกแซ็กมีคุณลักษณะเด่นคือ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิในแต่ละเฟสมีค่าเท่ากันแสดงในรูปสมการโดย

$$v_{za} = v'_{za}; v_{zb} = v'_{zb}; v_{zc} = v'_{zc} \quad (1)$$

$$i_{za} = i'_{zb}; i_{zb} = i'_{zc}; i_{zc} = i'_{za} \quad (2)$$

โดยกำหนดให้ v_{za} , v_{zb} และ v_{zc} เป็นแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวดปฐมภูมิของแต่ละเฟส v'_{za} , v'_{zb} และ v'_{zc} เป็นแรงดันไฟฟ้าขดลวดทุติยภูมิของแต่ละเฟส i_{za} , i_{zb} และ i_{zc} เป็นกระแสไฟฟ้าในขดลวดปฐมภูมิของแต่ละเฟส i'_{za} , i'_{zb} และ i'_{zc} เป็นกระแสไฟฟ้าในขดลวดทุติยภูมิของแต่ละเฟส จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 4 (ข) แรงดันไฟฟ้าเฟส A เท่ากับผลรวมทางเวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวดทุติยภูมิเฟส A และขดลวดปฐมภูมิเฟส B แสดงในรูปสมการ

$$v_a = v_{za} + v'_{zb} = 2L_z \frac{di_{za}}{dt} + 2L_{lk} \frac{di_{za}}{dt} - M \frac{d(i_{zb} + i_{zc})}{dt} \quad (3)$$

โดยตัวแปร L_z เป็นความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self inductance) L_{lk} เป็นความเหนี่ยวนำรั่ว (Leakage inductance) ของขดลวด และ M เป็นความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ (Mutual inductance)

ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้ามีความเหนี่ยวนำร่วมกับความเหนี่ยวนำตัวเอง ดังนั้นกระแสไฟฟ้าลำดับศูนย์เท่านั้นที่สามารถไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าชุกแซ็ก แรงดันไฟฟ้าลำดับศูนย์ในสมการที่ (3) มีค่าเท่ากับ

$$v_0 = 2L_{lk} \frac{di_{z0}}{dt} \quad (4)$$

โดยตัวแปร v_0 เป็นแรงดันไฟฟ้าลำดับศูนย์ และ i_{z0} เป็นกระแสไฟฟ้าลำดับศูนย์

แรงดันไฟฟ้าลำดับศูนย์ในสมการที่ (4) แสดงในรูปเฟสเซอร์ได้โดย

$$V_0(h) = j2(h)(\omega L_{lk})I_{z0} \quad (5)$$

โดยตัวแปร ω เป็นความถี่เชิงมุม และ h เป็นลำดับฮาร์มอนิกส์ ดังนั้นอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าชุกแซ็กมีค่าเท่ากับ

$$Z_{Z0}(h) = j2(h)(\omega L_{lk}) \quad (6)$$

จากสมการ (3) และ (6) สรุปได้ว่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าชุกแซ็กในลำดับบวกและลำดับลบมีค่าเป็น 3 เท่าของรีแอ็กแตนซ์เหนี่ยวนำตัวเอง และอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าชุกแซ็กมีค่าเป็น 2 เท่าของรีแอ็กแตนซ์รั่ว พิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้าชุกแซ็ก (VA) สามารถคำนวณได้ผลคูณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าลำดับศูนย์โดย

$$VA_{3\phi} = 3V_{za}I_{za} = \frac{V_{ab}I_{z0}}{3} \quad (7)$$

โดยตัวแปร V_{ab} เป็นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส และ I_{z0} เป็นกระแสไฟฟ้าลำดับศูนย์

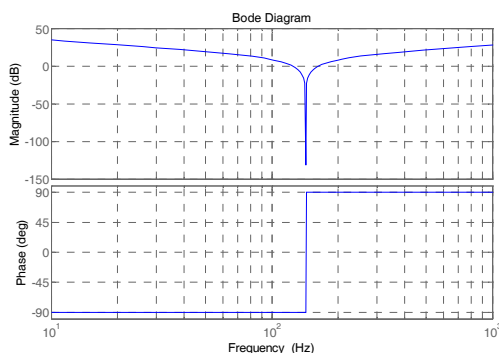
2.2 วงจรจูนฮาร์มอนิกส์ฟิลเตอร์

วงจรจูนฮาร์มอนิกส์ฟิลเตอร์ประกอบด้วยอินคัลเตอร์และคาปาซิเตอร์ต่ออนุกรมกัน [9] โดยมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับรีแอ็กแตนซ์ของอินคัลเตอร์และคาปาซิเตอร์รวมกันซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการของตัวแปรความถี่ดังต่อไปนี้

$$Z_F(h) = jh \left(\frac{1}{\omega C} \right) \left(\frac{1}{h_{r,n}^2} - \frac{1}{h^2} \right) \quad (8)$$

โดยตัวแปร $h_{r,n}$ เป็นอัตราส่วนความถี่เรโซแนนซ์ต่อความถี่ชั้นมูล และ C เป็นค่าคาปาซิแตนซ์ของวงจรฮาร์มอนิกส์ฟิลเตอร์ รูปที่ 5 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรฮาร์มอนิกส์ฟิลเตอร์จากสมการที่ (8) สรุปได้ว่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์มีค่าน้อยมากแต่จะมีค่าสูงในย่านความถี่อื่นๆ ดังนั้นถ้าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรฮาร์มอนิกส์ฟิลเตอร์เป็น 3 เท่าของความถี่ชั้นมูลจะทำให้กระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ในสายนิวทรัลแบ่งไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าซิกแซกย้อนกลับไปยังโหนดได้ ทำให้กระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัลลดลง นอกจากนั้นยังช่วยป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าชั้นมูลไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าซิกแซกขณะโหนดไม่สมดุลและแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ถึงแม้ว่าวงจรฮาร์มอนิกส์ฟิลเตอร์จะทำให้กระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับอื่นๆ ที่สูงกว่าลำดับที่ 3 ไม่สามารถไหลผ่านตัวมันเองและหม้อแปลงไฟฟ้าซิกแซกได้ แต่กระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับอื่นๆ ดังกล่าวมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ดังนั้นจึงไม่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรฮาร์มอนิกส์ที่น่าเสนอลดลง

ในขั้นตอนการออกแบบความถี่เรโซแนนซ์ที่เหมาะสมควรต่ำกว่าความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 (150 Hz) เมื่อพิจารณาถึงความคลาดเคลื่อนของค่าอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์ในขบวนการผลิต ผลของอุณหภูมิสถานะแวดล้อม และ ความเสื่อมสภาพของอุปกรณ์เนื่องจากการใช้งาน ความถี่เรโซแนนซ์สูงสุดไม่ควรเกิน 0.95 เท่าของความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่สาม (142.5 Hz) ดังนั้นวงจรฮาร์มอนิกส์ฟิลเตอร์จะมีคุณลักษณะเป็นอินดักเตอร์ตั้งแต่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 เป็นต้นไป เมื่อต่ออนุกรมกับหม้อแปลงไฟฟ้าซิกแซกจะไม่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์และไม่ทำให้วงจรฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ทำงานล้มเหลว



รูปที่ 5 อิมพีแดนซ์ของวงจรฮาร์มอนิกส์ฟิลเตอร์

2.3 นิวทรัลอินดักเตอร์

นิวทรัลอินดักเตอร์เป็นอินดักเตอร์ที่ต่ออนุกรมในสายนิวทรัลอยู่ระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าซิกแซกและสายนิวทรัลของระบบไฟฟ้า อินดักเตอร์ดังกล่าวทำหน้าที่เพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ให้กับนิวทรัลของระบบไฟฟ้า ทำให้กระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์แบ่งไหลไปได้สองทิศทางโดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าซิกแซกย้อนกลับไปยังโหนดและนิวทรัลของระบบไฟฟ้าตามสัดส่วนค่าอิมพีแดนซ์ นอกจากนั้นการออกแบบขนาดนิวทรัลอินดักเตอร์ที่เหมาะสมทำให้วงจรฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเพี้ยน (โดยเฉพาะฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3)

จากวงจรสมมูลลำดับศูนย์ในรูปที่ 3 ถ้ากำหนดให้กระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 เท่านั้นไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าซิกแซกอิมพีแดนซ์ของนิวทรัลอินดักเตอร์สามารถคำนวณจากสมการ

$$Z_N(3) = \left(\frac{K_a}{1-K_a} \right) \left(\frac{Z_{Z0}(3)}{3} + \frac{Z_F(3)}{9} \right) - \frac{Z_S(3)}{3} \quad (9)$$

โดยตัวแปร K_a เป็นอัตราส่วนของกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าซิกแซกต่อกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัลของระบบไฟฟ้า ($0 < K_a < 1$)

ในกรณีที่ระบบไฟฟ้ามีระดับแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 สูง นิวทรัลอินดักเตอร์ต้องมีขนาดใหญ่ เพื่อจำกัดกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ไม่ให้ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าซิกแซกกลับเข้าไปในสายนิวทรัลของระบบไฟฟ้าสูงเกินไปจนทำให้เกิดความเสียหายต่อวงจรฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ อย่างไรก็ตามการใช้นิวทรัลอินดักเตอร์ขนาดใหญ่ต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อการดำเนินงานของรีเลย์ป้องกันระบบไฟฟ้า

2.4 ตัวอย่างการออกแบบ

ในหัวข้อนี้เสนอตัวอย่างการออกแบบวงจรฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสี่สาย 240/416V, 50Hz โดยมีโหนดเป็นสวิตช์เพาเวอร์ซัพพลาย 240V/0.60 kW กระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสเท่ากับ 3.85 A และ กระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัลเท่ากับ 6.67 A ซึ่งมีค่าสูงเป็น 1.7 เท่าของกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส ถ้าต้องการลดกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัลลงเหลือหนึ่งในสาม ดังนั้นอัตราส่วน K_a มีค่าเท่ากับ 2/3 ขนาดพิกัดของอุปกรณ์ต่างๆตามสมการที่ (7-9) ได้นำสรุป

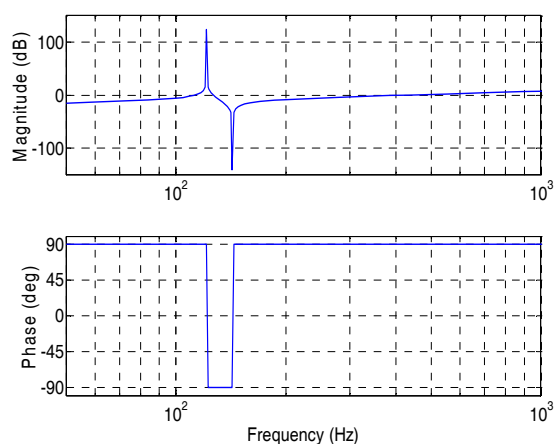
ไว้ในตารางที่ 1 เสร็จสภาพการทำงานของวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์เมื่อต่อขนานกับระบบไฟฟ้าวิเคราะห์ได้จากผลตอบสนองเชิงความถี่ของอิมพีแดนซ์รวมของระบบจากสมการต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ข้อมูลการออกแบบ

พารามิเตอร์	ขนาด
คาปาซิเตอร์ของ Z_F	300 μ F
อินดักเตอร์ของ Z_F	4.16 mH
อินดักเตอร์ของ Z_N	165 μ H
พิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าชุกแซ็ก	0.60 kVA

$$Z(s) = \frac{6.59 \times 10^{-10} s^3 + 5.28 \times 10^4 s}{1.72 \times 10^{-6} s^2 + 1} \quad (10)$$

รูปที่ 6 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของสมการที่ (10) อิมพีแดนซ์รวมมีค่าต่ำมากที่ความถี่เรโซแนนซ์ 142.5 Hz ซึ่งเป็นผลจากวงจรฮาร์มอนิกส์ฟิลเตอร์ นอกจากนั้นยังเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 121 Hz ทำให้อิมพีแดนซ์รวมมีค่าสูงมาก เนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่ดังกล่าวไม่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติ ดังนั้นวงจรกรองฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย



รูปที่ 6 อิมพีแดนซ์ของวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ต่อขนานกับระบบไฟฟ้า

3 คอมพิวเตอร์จำลองการทำงาน

วงจรกรองฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 1 ถูกนำมาจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PSIM

ภายใต้สภาวะการทำงาน 4 แบบ เช่น โหลดสมดุล โหลดไม่สมดุล แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล และ แรงดันไฟฟ้าเพี้ยน โดยมีโหลดเป็นสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย 240V, 0.6kW, 50 Hz ในแต่ละเงื่อนไขได้ทำการวิเคราะห์และประเมินความสามารถในการลดกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ในสายนิวทรัลและข้อจำกัดในการทำงานโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การทำงานในสภาวะโหลดสมดุล

รูปที่ 7 (ก) แสดงกระแสไฟฟ้าโหลดทั้งสามเฟสขณะทำงานในสภาวะโหลดสมดุล เนื่องจากโหลดมีคุณสมบัติไม่เชิงเส้น กระแสไฟฟ้าจึงมีรูปร่างผิดเพี้ยนจากรูปไซน์ รูปที่ 7(ข) แสดงกระแสไฟฟ้านิวทรัลได้จากกระแสไฟฟ้าโหลดในแต่ละเฟสรวมกัน โดยมีกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 เป็นองค์ประกอบหลักดังแสดงในรูปที่ 7 (ค) หลังจากการติดตั้งวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ กระแสไฟฟ้านิวทรัลบางส่วนจะไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าชุกแซ็กและเมื่อรวมกับกระแสไฟฟ้าโหลดจะทำให้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายในแต่ละเฟสมีรูปร่างต่างจากกระแสไฟฟ้าโหลดดังแสดงในรูปที่ 7 (ง) สำหรับกระแสไฟฟ้านิวทรัลที่ไม่ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าชุกแซ็กจะกลับไปในนิวทรัลของระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 7 (จ) โดยกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ลดลงเหลือ 1/3 ดังแสดงในรูปที่ 6 (ฉ) สรุปได้ว่าในสภาวะโหลดสมดุลวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ทำงานได้เป็นอย่างดี

3.2 การทำงานในสภาวะโหลดไม่สมดุล

ในรูปที่ 8 (ก) แสดงกระแสไฟฟ้าโหลดไม่สมดุลในแต่ละเฟส โดยมีเฟส A ง่ายโหลดเพียงเฟสเดียว กระแสไฟฟ้านิวทรัลจึงมีรูปร่างเช่นเดียวกับกระแสไฟฟ้าในเฟส A ดังแสดงในรูปที่ 8 (ข) โดยมีกระแสฮาร์มอนิกส์เป็นลำดับเลขคี่ดังแสดงในรูปที่ 8 (ค) หลังจากการติดตั้งวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ กระแสไฟฟ้านิวทรัลบางส่วนจะถูกแบ่งไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าชุกแซ็กเมื่อรวมกับกระแสไฟฟ้าโหลดในแต่ละเฟสจะทำให้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายในแต่ละเฟสมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 8 (ง) สำหรับกระแสไฟฟ้านิวทรัลส่วนที่เหลือจะไหลกลับไปยังนิวทรัลของระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 8 (จ) และฮาร์มอนิกส์ของกระแสดังกล่าว

แสดงในรูปที่ 8 (ฉ) สังเกตได้ว่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 เท่านั้นที่ลดลงเหลือ 1/3 ตามที่ออกแบบไว้ ดังนั้นวงจรกรองฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ที่นำเสนอสามารถทำงานภายใต้สภาวะโหลดไม่สมดุลได้เป็นอย่างดี

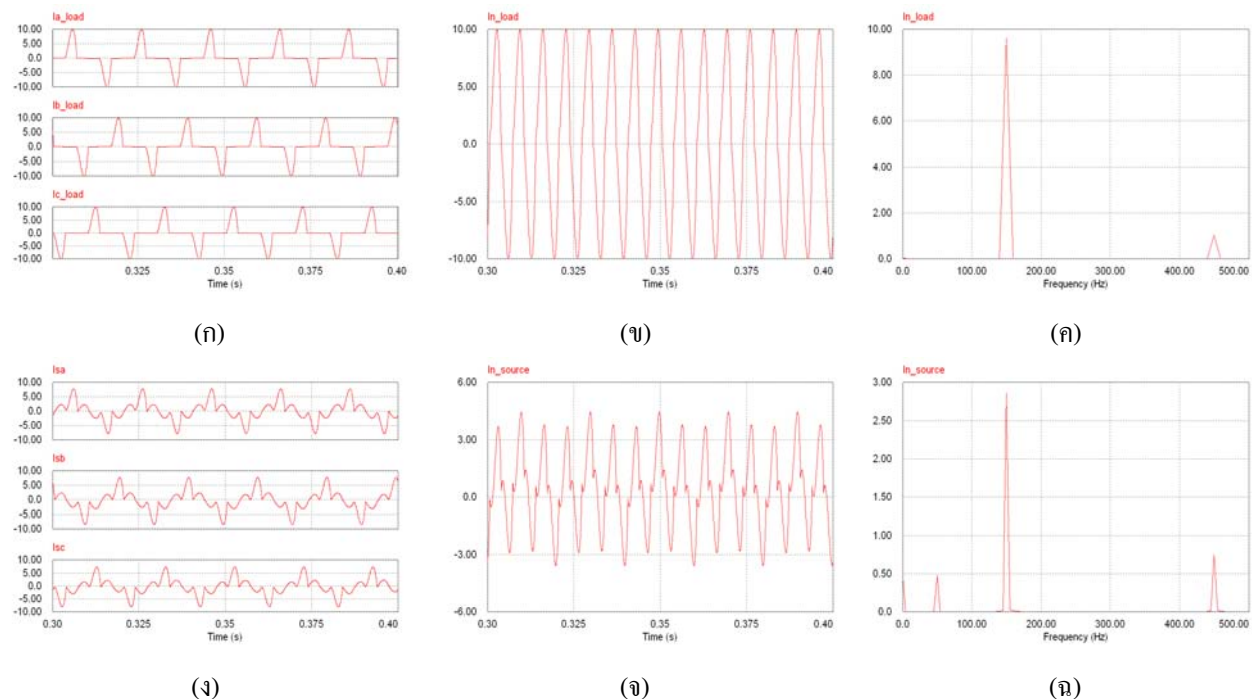
3.3 การทำงานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

ขณะเกิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% ส่งผลทำให้กระแสไฟฟ้าโหลดในแต่ละเฟสมีค่าต่างกันเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 9 (ก) รูปที่ 9 (ข) แสดงกระแสไฟฟ้านิวทรัลซึ่งได้จากการรวมกระแสไฟฟ้าโหลดในแต่ละเฟสและมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 เป็นองค์ประกอบหลักดังแสดงในรูปที่ 9 (ค) ภายหลังการติดตั้งวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์กระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 เท่านั้นที่ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าชุกแซ็กและเมื่อรวมกับกระแสไฟฟ้าโหลดส่งผลทำให้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายในแต่ละเฟสแตกต่างไปจากกระแสไฟฟ้าโหลดเดิมดังแสดงในรูปที่ 9 (ง) สำหรับส่วนที่เหลือจะไหลกลับไปยังนิวทรัลของระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 9 (จ) โดยมีกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ลดลงเหลือ 1/3 เท่าของเดิมดังแสดงในรูปที่ 9 (ฉ) ดังนั้นวงจรกรองฮาร์มอนิกส์

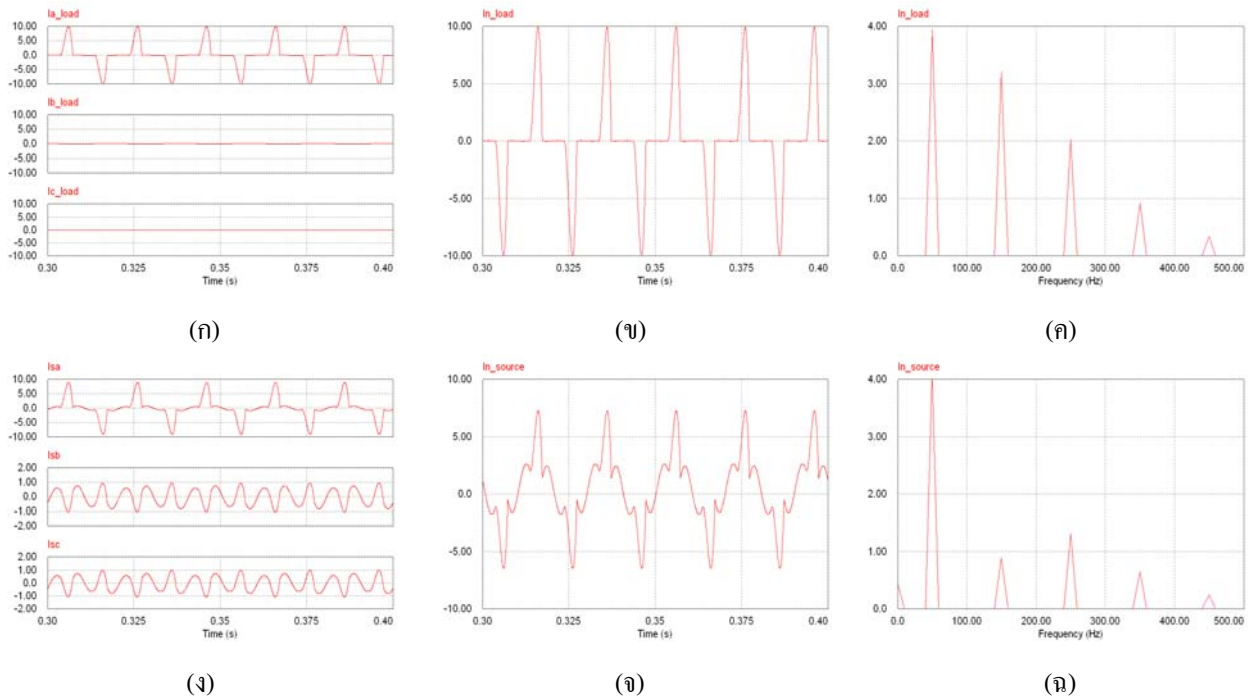
ลำดับศูนย์ที่นำเสนอสามารถทำให้สามารถทำงานภายใต้สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้เป็นอย่างดี

3.4 การทำงานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าเพี้ยน

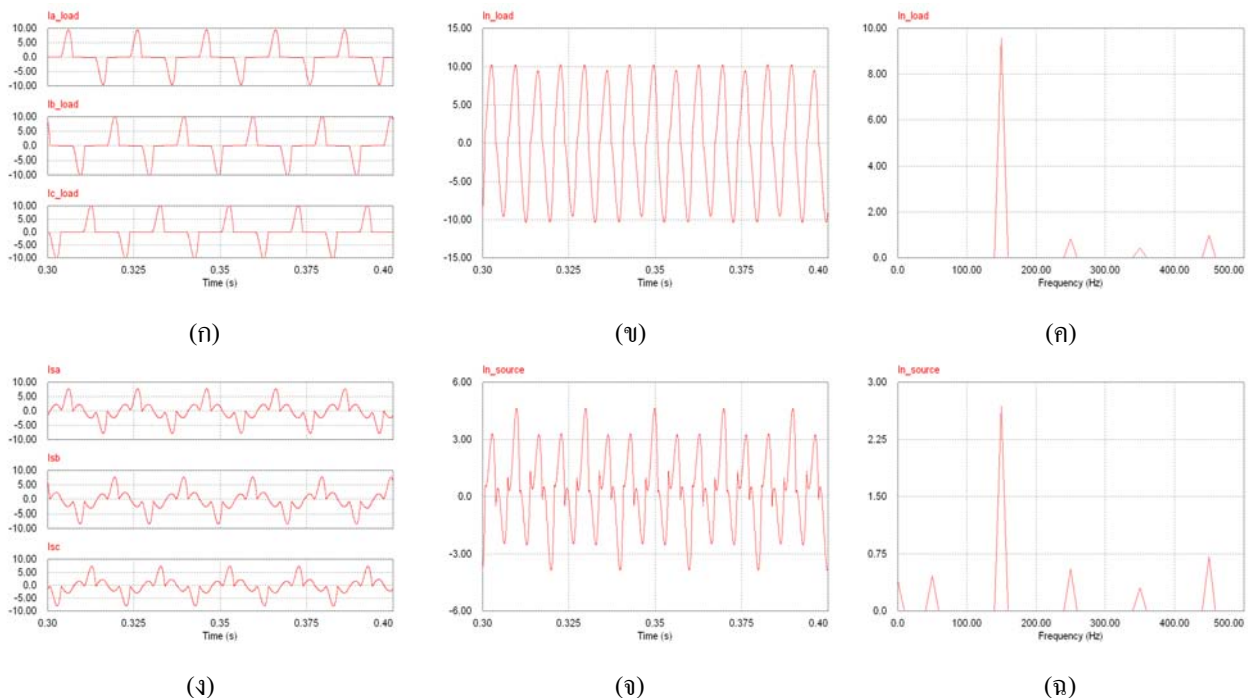
ขณะเกิดแรงดันไฟฟ้าเพี้ยน 3% จากผลของแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ในกรณีโหลดสมดุลกระแสไฟฟ้านิวทรัลจะไม่แตกต่างมากไปจากกรณี 3.1 ดังแสดงในรูปที่ 10 (ก) แต่ผลของแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ในระบบไฟฟ้าจะทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ปริมาณสูงไหลผ่านวงจรกรองฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์กลับไปยังนิวทรัลของระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 10 (ข) ทำให้ไม่สามารถลดกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ในสายนิวทรัลได้อย่างมีประสิทธิภาพและอาจทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าชุกแซ็กและวงจรจูนฮาร์มอนิกส์ฟิลเตอร์เสียหาย ในการแก้ปัญหาดังกล่าวจำเป็นต้องเพิ่มขนาดนิวทรัลอินดักเตอร์ให้มีขนาดใหญ่เพื่อจำกัดกระแสไฟฟ้าดังกล่าว ถ้าเพิ่มขนาดนิวทรัลอินดักเตอร์เป็น 1.65 mH จะทำให้กระแสไฟฟ้านิวทรัลลดลงในระดับปลอดภัยดังแสดงในรูปที่ 10 (ค) แต่การเพิ่มขนาดนิวทรัลอินดักเตอร์ต้องพิจารณาไม่ให้เกิดผลกระทบต่อการทำงานของรีเลย์ป้องกันระบบไฟฟ้า



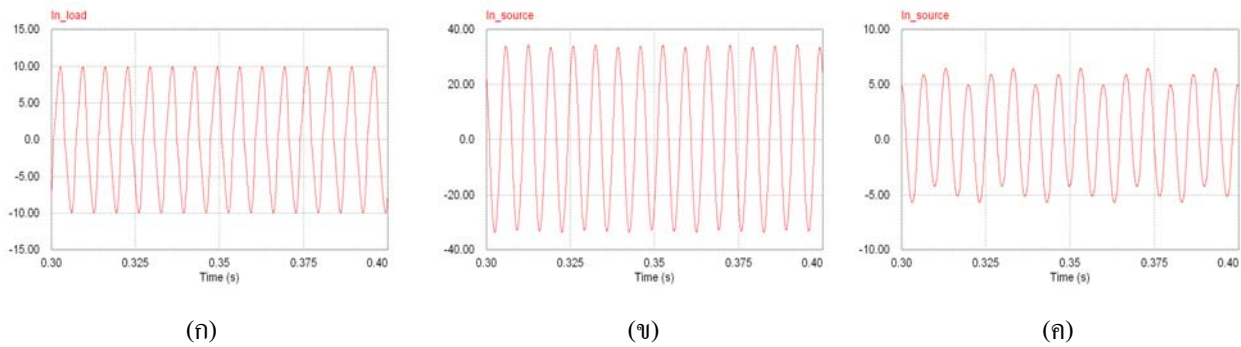
รูปที่ 7 การจำลองการทำงานในสภาวะโหลดสมดุล (ก) กระแสไฟฟ้าโหลด (ข) กระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัล (ค) ฮาร์มอนิกส์ของกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัล (ง) กระแสไฟฟ้าโหลด (จ) กระแสไฟฟ้านิวทรัลของระบบไฟฟ้า (จ) ฮาร์มอนิกส์ของกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัลหลังติดตั้งวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์



รูปที่ 8 การจำลองการทำงานในสภาวะโหลดไม่สมดุล (ก) กระแสไฟฟ้าโหลด (ข) กระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัล (ค) ฮาร์มอนิกส์ของกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัล (ง) กระแสไฟฟ้าโหลดหลังติดตั้งวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ (จ) กระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัลของระบบไฟฟ้า (ฉ) ฮาร์มอนิกส์ของกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัล



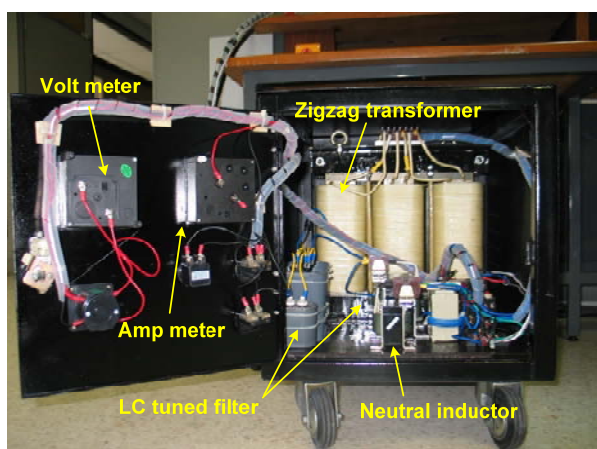
รูปที่ 9 การจำลองการทำงานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล (ก) กระแสไฟฟ้าโหลด (ข) กระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัล (ค) ฮาร์มอนิกส์ของกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัล (ง) กระแสไฟฟ้าโหลดหลังติดตั้งวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ (จ) กระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัลของระบบไฟฟ้า (ฉ) ฮาร์มอนิกส์ของกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัล



รูปที่ 10 การจำลองการทำงานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าเพี้ยน (ก) กระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัล (ข) กระแสไฟฟ้านิวทรัลของระบบไฟฟ้า (ค) กระแสไฟฟ้านิวทรัลของระบบไฟฟ้าหลังจากเพิ่มขนาดนิวทรัลอินดักเตอร์เป็น 1.65 mH

4 ผลการทดลอง

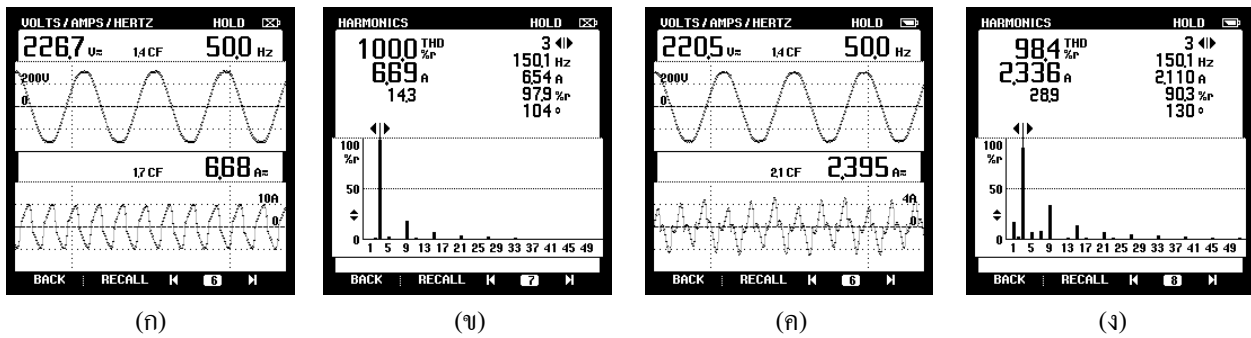
ในรูปที่ 11 แสดงวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ที่ได้รับการพัฒนาจากตัวอย่างการออกแบบในตารางที่ 1 เพื่อใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ วงจรภายในประกอบด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าชุกแซ็ก 1 kVA, 240/416V, 50Hz, นิวทรัลอินดักเตอร์ 165 μ H, วงจรจูนฮาร์มอนิกส์ฟิลเตอร์ (อินดักเตอร์ 4.16 mH และ คาปาซิเตอร์ 300 μ F), แอมป์มิเตอร์ และ โวลต์มิเตอร์ สำหรับโหลดไม่เชิงเส้นสามารถสร้างจากวงจรไดโอดเรียงกระแสไฟฟ้า 240V, 0.6 kW จำนวน 3 ชุด เพื่อสร้างกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ในสายนิวทรัล สำหรับการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์สามารถวัดโดยใช้เครื่องตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้า FLUKE 43B ในการทดลองได้ทดสอบการทำงานของวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ในสภาวะโหลดสมดุลและโหลดไม่สมดุลดังนี้



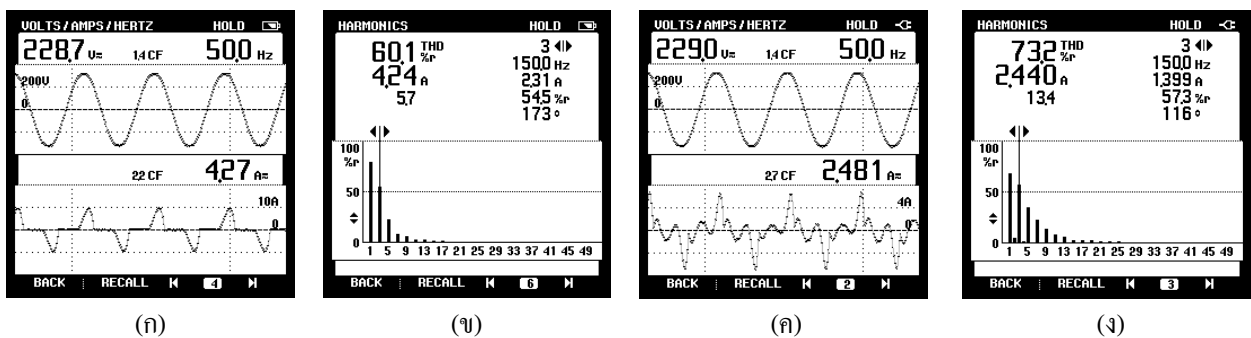
รูปที่ 11 วงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์

รูปที่ 12 (ก) แสดงกระแสไฟฟ้านิวทรัลขณะโหลดอยู่ในสภาวะสมดุล โดยกระแสไฟฟ้านิวทรัลมีค่าสูงถึง 6.68 A คิดเป็น 1.74 เท่าของกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส และกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 เป็นองค์ประกอบหลักมีค่าเท่ากับ 6.54 A ดังแสดงในรูปที่ 12 (ข) หลังการติดตั้งวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ กระแสไฟฟ้านิวทรัลลดลงเท่ากับ 2.39 A ดังแสดงในรูปที่ 12 (ค) และกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ลดลงเหลือ 2.11 A หรือคิดเป็น 32.26% ของกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ก่อนการติดตั้งวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ ผลที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการคำนวณและการจำลองการทำงาน ดังนั้นวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์สามารถทำงานในสภาวะโหลดสมดุลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

รูปที่ 13 (ก) แสดงกระแสไฟฟ้านิวทรัลขณะโหลดต่อกับเฟสใดเฟสหนึ่ง (โหลดไม่สมดุล) กระแสไฟฟ้านิวทรัลมีค่าเท่ากับ 4.27 A และมีกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 เท่ากับ 2.31 A ดังแสดงในรูปที่ 13 (ข) หลังการติดตั้งวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ กระแสไฟฟ้านิวทรัลลดลงเท่ากับ 2.48 A ดังแสดงในรูปที่ 13 (ค) โดยมีกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ลดลงเหลือ 1.40 A หรือคิดเป็น 60.60% ของกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 เดิมก่อนการติดตั้งวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ดังแสดงในรูปที่ 13 (ง) แต่กระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ดังกล่าวมีค่าสูงกว่าที่ออกแบบไว้ซึ่งอาจมีสาเหตุจากกระแสไฟฟ้าสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าชุกแซ็กทำให้ผลการทดลองที่ได้คลาดเคลื่อน แต่ในการนำไปใช้งาน



รูปที่ 12 การทดสอบในสภาวะโหลดสมดุล (ก) กระแสไฟฟ้านิวทรัล (ข) ฮาร์โมนิกส์ของกระแสไฟฟ้านิวทรัล (ค) กระแสไฟฟ้านิวทรัลหลังจากการติดตั้งวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ลำดับศูนย์ (ง) ฮาร์โมนิกส์ของกระแสไฟฟ้านิวทรัล



รูปที่ 13 การทดสอบในสภาวะโหลดไม่สมดุล (ก) กระแสไฟฟ้านิวทรัล (ข) ฮาร์โมนิกส์ของกระแสไฟฟ้านิวทรัล (ค) กระแสไฟฟ้านิวทรัลหลังจากการติดตั้งวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ลำดับศูนย์ (ง) ฮาร์โมนิกส์ของกระแสไฟฟ้านิวทรัล

จริงกระแสไฟฟ้าสร้างสนามแม่เหล็กดังกล่าวมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าโหลด ดังนั้นจึงไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับศูนย์

5 สรุป

ในบทความนี้เสนอวงจรกรองกระแสไฟฟ้าลำดับศูนย์สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสี่สาย เพื่อแก้ไขปัญหากระแสไฟฟ้าเกินในสายนิวทรัลและหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากการใช้โหลดไม่เชิงเส้นจำนวนมาก วงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับศูนย์ที่นำเสนอประกอบด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าชุกซ์เบิร์ก วงจรกรองฮาร์โมนิกส์ฟูลเตอร์ และ นิวทรัลอินดักเตอร์ โดยได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบส่วนประกอบต่างๆ อย่างเป็นระบบ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้จึงได้จำลองการทำงานวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับศูนย์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และสร้างต้นแบบวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับศูนย์พิกัด 1kVA, 240/416V, 50Hz เพื่อใช้ทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

ในสภาวะโหลดสมดุลและโหลดไม่สมดุล ผลจากการคำนวณผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ และ ผลการทดลองยืนยันได้ว่าวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับศูนย์สามารถลดกระแสไฟฟ้าในสายนิวทรัลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6 กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยมหิดล

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. M. Gruz, "A Survey of Neutral Currents in Three-Phase Computer Power Systems," IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 26, No. 4, pp. 719-725, July/August 1990
- [2] P. P. Khera, "Application of Zigzag Transformers for Reducing Harmonics in the Neutral Conductor of Low Voltage Distribution System," IEEE/IAS Conference Proceedings IEEE, 1990, p. 1092
- [3] J. S. Lai and T. S. Key, "Effectiveness of Harmonic Mitigation Equipment for Commercial Office Buildings,"

IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 33, No. 4, pp. 1104-1110, July/August 1997

[4] S. Kim, "Active Zero-Sequence Cancellation Technique in Unbalanced Commercial Building Power System," IEEE/APEC Conference Proceedings IEEE, 2004, pp. 185-190

[5] T. Key and J. S. Lai, "Analysis of Harmonic Mitigation Methods for Building Wiring Systems," IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 13, No. 3, pp. 890-897, August 1998

[6] S. Kim and P. Enjeti, "Control Strategies for Active Power Filter in Three-Phase Four-Wire Systems," IEEE/APEC Conference Proceedings IEEE, 2000, pp. 420-426

[7] P. Enjeti, W. Shireen, P. Packebush, and I. Pitel, "Analysis and Design of a New Active Power Filter to Cancel Neutral Current Harmonics in Three-Phase Four-Wire Electric Distribution Systems," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No.6, pp.1565-1572, November/December 1994

[8] P. T. Cheng, Y. F. Huang, and C. C. Hou, "Design of a Neutral Harmonic Mitigator for Three-Phase Four-Wire Distribution Systems," IEEE/IAS Conference Proceedings IEEE, 2001, pp. 164-171

[9] C. Jeraputra, S. Rattanapanachote, and D" Wilairat, "Optimization based Design of Single-Tuned Harmonic Filters for Industrial Power Systems," Proc EECON 30, Vol. 1, pp. 524-527

[10] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santose, and H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality, 2nd Ed, McGraw-Hill, New York, 2002