

การออกแบบและสร้างตัวควบคุมสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส บนพื้นฐานเทคนิคการควบคุมกระแสทางอ้อม

Design and Implementation of Proportional-Resonant Controller for Single-Phase Shunt Active Power Filter Using Indirect Current Control Technique

กวีวัชร โพธิ์ดำรงชัย¹ วันจักร์ เล่นวาริ^{1*} และ คณาพจน์ ยอดมณี²

Kaweewat Podumrongchai¹, Wanchak Lenwari^{1*} and Kanapot Yodmanee²

¹ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
กรุงเทพมหานคร 10140

²สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
วิทยาเขตวังไกลกังวล ประจวบคีรีขันธ์ 77110

¹Department of Control System and Instrumentation Faculty of Engineering
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140

²Department of Electrical Engineering Technology Faculty of Industry and Technology
Rajamangala University of Technology Rattanakosin Wang Klai Kangwon Campus,
Prachuap Khiri Khan, 77110

E-mail: wanchak.len@kmutt.ac.th, Telephone Number:085-400-5975

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ (Proportional-Resonant: PR) สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter: SAPF) ชนิด 1 เฟส การควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานอยู่บนพื้นฐานเทคนิคการควบคุมกระแสทางอ้อม ซึ่งใช้กระแสอ้างอิงที่ใช้ชดเชยเป็นกระแสของแหล่งจ่าย การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมอาศัยวิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) การตรวจสอบการทำงานของระบบควบคุมที่นำเสนอใช้การจำลองและการทดสอบ ต้นแบบของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ได้ถูกพัฒนาขึ้นและทดสอบโดยแหล่งจ่ายไฟฟ้าจริงที่มีฮาร์มอนิก จากผลการทดสอบแสดงว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion: THD) ของกระแสแหล่งจ่ายได้ต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE Standard 519-2014

คำสำคัญ: วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส, ตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ (Proportional-Resonant Controller), วิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm), การควบคุมกระแสทางอ้อม (Indirect Current Control)

ABSTRACT

The design and implementation of proportional-resonant (PR) controller for single-phase shunt active power filters (SAPF) is presented in this paper. The control of SAPF is implemented based on an indirect current control technique which employs the reference compensating current as reference source current. Controller parameters are optimized through the use of Genetic Algorithms (GA). The validation of the proposed control system is done through both simulation and experiment. The prototype of a single-phase SAPF is developed and tested under a real supply voltage which contains harmonics. Experimental results show that SAPF reduces the source current total harmonics distortion (THD) to less than 5% which complies with IEEE Standard 519-2014.

Keyword: Single Phase Shunt Active Power Filters, Proportional-Resonant Controller, Genetic Algorithms, Indirect Current Control

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการใช้เครื่องมือทางไฟฟ้าเพื่อตอบสนองความสะดวกสบายในการใช้ชีวิตประจำวันมากขึ้น ตัวอย่าง เช่น คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์สื่อสาร และอุปกรณ์อัตโนมัติต่าง ๆ ซึ่งจะสร้างมลพิษทางไฟฟ้าขึ้น เรียกว่าฮาร์โมนิก (Harmonic) และความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (Voltage distortion) ทำให้ประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าต่ำลง เกิดจากการใช้งานโหลดประเภทแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load) เช่น วงจรเรียงกระแส (Rectifier) แปลงไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งโหลดประเภทนี้ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดันไฟฟ้า ส่งผลให้อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบมีการทำงานที่ผิดพลาดและก่อให้เกิดการชำรุดเสียหายได้ [1-2] ดังนั้นการกำจัดฮาร์โมนิกให้ลดลงสามารถทำได้โดยการใช่วงจรกรองกำลังแอกทีฟ (Active Power Filter) ซึ่งเป็นอีกหนึ่งอุปกรณ์ที่กำจัดฮาร์โมนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสและระบบไฟฟ้าสามเฟส [3]

วิธีการอ้างอิงบนแกนดีคิว (D-Q Reference frame) นั้นจะนิยมใช้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟของระบบไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งจะไม่สามารถใช้กับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้โดยตรง แต่สามารถทำได้โดยสมมุติตัวแปรขึ้นให้ค่าของตัวแปรหรือสัญญาณที่สมมุติขึ้นมานั้นทำมุมล่าหลังกับสัญญาณที่กำหนดหรือสัญญาณที่ต้องการวัดค่าออกไป 90 องศา เพื่อให้สามารถคำนวณบนพื้นฐานของพาร์คได้ [4-5] ซึ่งเทคนิคการหาค่าอ้างอิงบนแกนดีคิวสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (Active power filters)

เป็นการหาค่าขนาดและแรงดันในปริมาณดีซีบนพื้นฐานการแปลงแกนของพาร์ค (Park transformation) [6]

วิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) สามารถนำมาช่วยหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกระแสที่เหมาะสม [7-8] โดยได้มีการนำเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

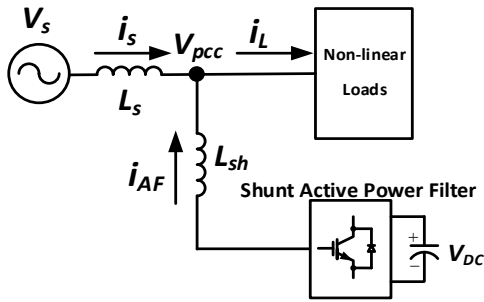
เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวจะเกิดค่าอัตราขยายเป็นอนันต์ ซึ่งมีข้อยกสูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ (Proportional-resonant controller) [9] จะสามารถจะปรับตัวตามความถี่เรโซแนนซ์ได้และยังเป็นตัวควบคุมกระแสที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการควบคุมกระแสอ้างอิงที่เป็นสัญญาณกระแสสลับ

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ ด้วยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส บนพื้นฐานเทคนิคการควบคุมกระแสทางอ้อมด้วยวิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม ผลการจำลองและผลการทดสอบจริงแสดงประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์โมนิกในระบบให้มีค่าตามมาตรฐาน IEEE Std 519-2014 [10]

2. ทฤษฎี

การควบคุมกระแสของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter) สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ๆ ได้แก่ การควบคุมกระแสแบบทางตรงและการควบคุมกระแสแบบทางอ้อม จากรูปที่ 1

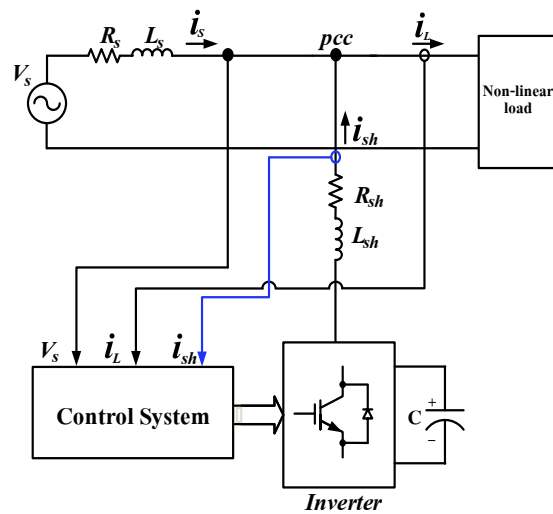
แสดงหลักการพื้นฐานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบมีจุดประสงค์เพื่อกรองกระแสฮาร์มอนิกออกจากระบบ เพื่อให้กระแสของแหล่งจ่ายใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์และมีความถี่เท่ากับความถี่มูลฐานมากที่สุด



รูปที่ 1 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

2.1 การควบคุมกระแสแบบทางตรง

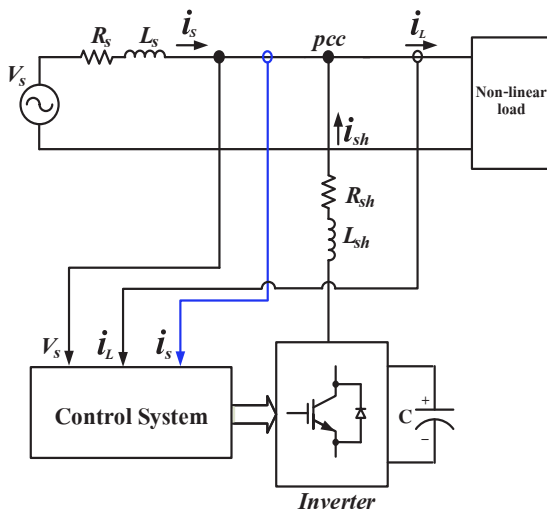
รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ที่ควบคุมกระแสแบบทางตรง โดยการควบคุมกระแสแบบทางตรงจะใช้สัญญาณกระแสอ้างอิง i_{sh}^* ที่เป็นกระแสฮาร์มอนิกที่ผ่านการคำนวณจากการวัดกระแสที่โหลด i_L และวัดกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{sh} เพื่อทำการป้อนกลับ (Feedback) ไปยังระบบควบคุม เพื่อทำให้ระบบควบคุมสามารถติดตามกระแสชดเชยให้เป็นไปตามสัญญาณอ้างอิงได้ ส่งผลให้กระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าหมดไปและกระแสของแหล่งจ่ายใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ เหลือไว้เฉพาะความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) [11-13] ซึ่งการควบคุมกระแสแบบทางตรงมีข้อดีคือ การออกแบบตัวควบคุมสามารถทำได้โดยตรง เนื่องจากสามารถรู้ค่าฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ของระบบ แต่ข้อเสียคือ เนื่องจากการควบคุมกระแสแบบทางตรง จะเป็นการควบคุมกระแสที่ฉีดเข้าระบบ i_{sh} ซึ่งความถูกต้องจะขึ้นกับความถูกต้องกระแสอ้างอิง i_{sh}^* และประสิทธิภาพของตัวควบคุม



รูปที่ 2 โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ที่ควบคุมกระแสแบบทางตรง

2.2 การควบคุมกระแสแบบทางอ้อม

จากรูปที่ 3 แสดงโครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ที่ควบคุมกระแสแบบทางอ้อม โดยการควบคุมกระแสแบบทางอ้อม จะใช้สัญญาณอ้างอิง i_s^* ที่เป็นกระแสรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่เท่ากับความถี่มูลฐาน ที่ผ่านการคำนวณจากการวัดกระแสที่โหลด i_L และวัดกระแสที่แหล่งจ่าย i_s เพื่อทำการป้อนกลับไปยังระบบควบคุม เพื่อบังคับให้กระแสที่แหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่เท่ากับความถี่มูลฐานเป็นไปตามสัญญาณอ้างอิง เพื่อกำจัดกระแสฮาร์มอนิกออกไป [14-17] ซึ่งการควบคุมกระแสแบบทางอ้อมมีข้อดีคือ สามารถควบคุมกระแส i_s โดยตรงทำให้แน่ใจว่ากระแส i_s เป็นรูปคลื่นไซน์ แต่ข้อเสียคือ การออกแบบตัวควบคุมมีความซับซ้อน เนื่องจากไม่ทราบค่าฟังก์ชันถ่ายโอนที่แน่นอน



รูปที่ 3 โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ชนิด 1 เฟส ที่ควบคุมกระแสแบบทางอ้อม

2.3 ตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์

ตัวควบคุมสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์จะมีอัตราขยายเป็นค่าอนันต์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ สมการของตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์แสดงได้ดังสมการที่ (1) [18]

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_r s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (1)$$

ตัวควบคุมสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ได้นำมาพัฒนาสำหรับการประยุกต์ใช้บนแกนหยุดนิ่ง (Stationary reference frame) เพื่อควบคุมสัญญาณที่มีความถี่มูลฐานได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวควบคุมชนิดนี้ได้มีการแก้ไขส่วนของเรโซแนนซ์ โดยเพิ่มเทอม ω_0 ตามสมการที่ (2) [19]

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_r \omega_0 s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (2)$$

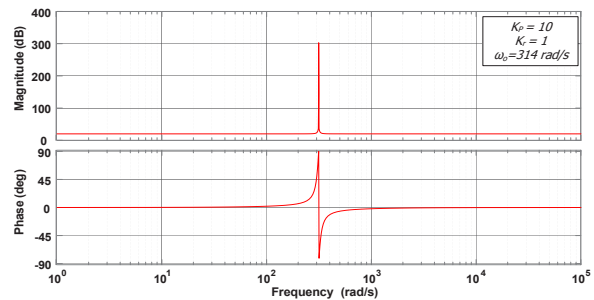
โดย

K_p คือ อัตราขยายแบบสัดส่วน

K_r คือ อัตราขยายแบบเรโซแนนซ์

ω_0 คือ ความถี่เรโซแนนซ์

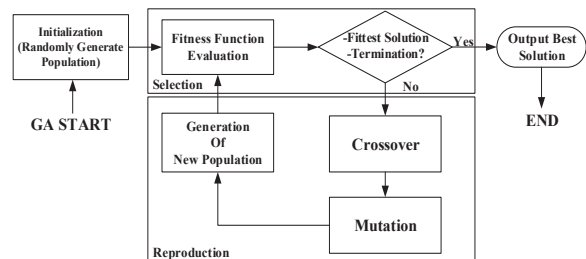
จากรูปที่ 4 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ด้วยแผนภาพโบเดของสมการที่ (2) โดยกำหนดให้ $K_p=10$, $K_r=1$ และ $\omega_0 = 50 \text{ Hz}$ (314 rad/s) ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์จะมีอัตราขยายที่สูง ทำให้มีการตอบสนองที่รวดเร็ว จึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นตัวควบคุมสำหรับสัญญาณอ้างอิงที่เป็นกระแสสลับที่มีความถี่ต่าง ๆ ได้ สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกความถี่เรโซแนนซ์ที่ 50 Hz



รูปที่ 4 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวควบคุมสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์

2.4 ขั้นตอนวิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม

วิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) หรือ GA เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้หลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติและหลักการทางสายพันธุศาสตร์ รูปที่ 5 แสดงองค์ประกอบและการทำงานของ GA



รูปที่ 5 องค์ประกอบและการทำงานของวิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม

องค์ประกอบและการทำงานของ GA สามารถอธิบายคือ

1. การสร้างประชากรเริ่มต้น(Initial population) ประชากร (Population) เริ่มต้นของระบบ GA คือ เซตของคำตอบแต่ละชุด โดยที่แต่ละคำตอบแต่ละชุด คือ วิธีการแก้ปัญหา การแทนค่าของคำตอบแต่ละชุด หรือ โครโมโซม(Chromosome) ขึ้นอยู่กับลักษณะและธรรมชาติของงาน วิธีหนึ่งที่น่าสนใจ คือ บิตสตริง หรือค่า “0” และ “1” ตัวอย่างเช่น ใช้ 8-บิตสตริง เพื่อแทนความฉลาด ดังนั้นคำตอบแต่ละชุดที่ฉลาดที่สุด อาจสามารถแทนค่าได้เป็นโครโมโซม “11111111” และคำตอบแต่ละชุดที่ฉลาดน้อยที่สุดอาจสามารถแทนค่าได้เป็นโครโมโซม “00000000” การใช้ค่า “0” และ “1” ในการแทนค่าโครโมโซมเป็นวิธีที่ธรรมดาและสะดวกที่สุด วิธีการใช้ค่าอื่นเช่นตัวอักษรและตัวเลขฐานสิบ ได้มีการถูกนำมาแทนค่าโครโมโซมได้เหมือนกันและเช่นเดียวกัน งานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าโครโมโซมเป็นแบบตัวเลขฐานสิบ แต่ขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่ใช้ GA อยู่ในขณะนั้น [20]

2. การประเมินค่าฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness function evaluation) เป็นขั้นตอนในการประเมินว่าโครโมโซมหนึ่ง ๆ ดีหรือไม่คืออย่างไร เมื่อเทียบกับโครโมโซมอื่น ๆ ที่มีในกลุ่มประชากรนั้น ๆ โดยปกติแล้ว การประเมินค่าความเหมาะสมของโครโมโซมจะคำนวณจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective/Evaluation function) ถือเป็นส่วนสำคัญในกระบวนการของ GA ที่ใช้ในการประเมินผลคำตอบของระบบว่าดีหรือไม่ดี ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันที่ทำการประเมินคำตอบจากโครโมโซมโดยเทียบกับเป้าหมายของระบบ ในกรณีที่เป็น ปัญหาของการค้นหาค่าที่น้อยที่สุด (Minimization problem) โครโมโซมที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุดของระบบจะมีตัวเลขจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุด ตัวอย่างของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้แก่ ฟังก์ชันทั่วไปที่ใช้คำนวณค่าผิดพลาดของระบบ (Error) เช่น MSE (Mean-squared error) ,SSE (Sum-squared error) ,RMSE (Root-mean-squared error) หรือ IAE (Integral of absolute error) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของระบบดังกล่าวก็คือต้องการให้ค่าความผิดพลาดของระบบ

มีค่าน้อยที่สุด ค่าการประเมิน (Evaluation value) ที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเป็นตัวบอกว่าคำตอบของระบบขณะนั้นดีหรือไม่คืออย่างไรในกรณีนี้ สำหรับคำตอบหนึ่ง ๆ ค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่าหมายถึงคำตอบนั้นจะเป็นคำตอบที่ดีกว่าเช่นกัน

3. การคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection)

การคัดเลือกสายพันธุ์เป็นขั้นตอนในการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุดจากภายในกลุ่มประชากรทั้งหมด ซึ่งโครโมโซมที่ดีจะถูกนำไปใช้เป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ “พ่อแม่” เพื่อใช้ในการให้กำเนิดลูกหลานในรุ่นถัดไป โดยปกติแล้ว เพื่อให้ได้สายพันธุ์ที่ดี ต้นกำเนิดของสายพันธุ์จะต้องดีด้วย จึงกลายเป็นปัญหาว่าจะทำการคัดเลือกต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ดีได้อย่างไร การคัดเลือกสายพันธุ์เป็นการจำลองการคัดเลือกโครโมโซมที่จะสามารถอยู่รอดได้ในแต่ละรุ่น สำหรับ GA นั้นจะทำการคัดเลือกโครโมโซมโดยการพิจารณาที่ค่าความเหมาะสมของโครโมโซมนั้น ๆ ดังนั้น โครโมโซมไหนมีค่าความเหมาะสมที่ดีย่อมหมายถึงการเป็นโครโมโซมที่ดีและควรมีโอกาสที่จะให้ลูกหลาน (Off-spring) ในจำนวนที่มากกว่าได้ ซึ่งย่อมเป็นการบ่งบอกว่าโอกาสในการอยู่รอดในรุ่นถัดไปก็จะมีเพิ่มมากขึ้นด้วย

4. ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (Genetic operation)

หรือ (Reproduction) หลังจากขบวนการคัดเลือกได้ดำเนินไปจนเสร็จสมบูรณ์ โครโมโซมลูกหลานจะถูกสร้างขึ้นใหม่จากโครโมโซมที่ถูกคัดเลือกมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ โดยการเอาโครโมโซมที่เป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์นั้นมาทำการเปลี่ยนแปลงให้เกิดโครโมโซมใหม่ขึ้น ขั้นตอนดังกล่าวเป็นขั้นตอนที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของวัฏจักรของ GA ซึ่งมีการคาดหวังว่าโครโมโซมลูกหลานที่เกิดขึ้นนั้นจะได้รับส่วนดีของโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์โดยผ่านปฏิบัติการทางสายพันธุ์นี้ จะมีอยู่ 2 วิธีหลัก ๆ คือ การทำครอสโอเวอร์และการทำมิวเทชัน

- ครอสโอเวอร์ (Crossover) เป็นวิธีการรวมตัวใหม่ของโครโมโซม โดยทำการรวมส่วนย่อยระหว่างโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ ตั้งแต่สองโครโมโซมขึ้น

ไป เพื่อให้กลายเป็นโครโมโซมลูกหลานโครโมโซมลูกหลานที่ได้จากการครอสโอเวอร์นี้จะมีพันธุกรรมจากต้นกำเนิดสายพันธุ์อยู่ในตัว

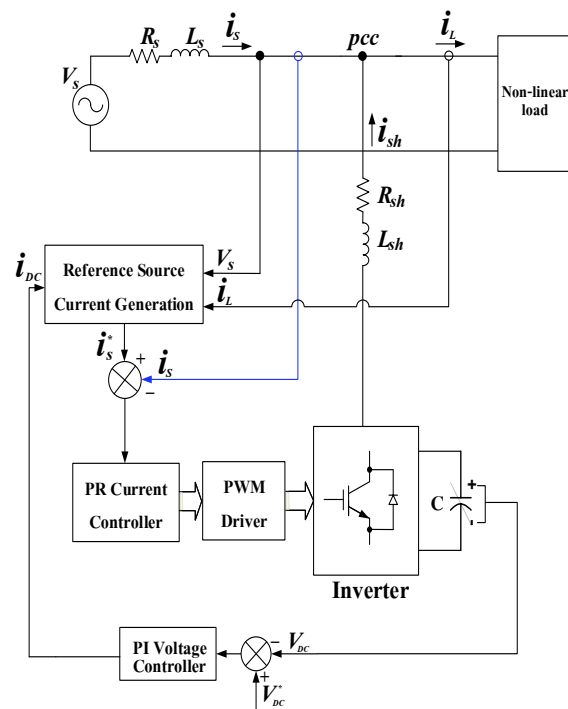
- มิวเทชัน (Mutation) เป็นวิธีการแปรผันยีนหรือส่วนย่อยของโครโมโซม ซึ่งเปรียบเทียบได้กับการกลายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิต ด้วยปกติแล้วการทำมิวเทชันจะมีค่าค่อนข้างต่ำ ถ้ามิวเทชันคือการเปลี่ยนแปลงยีนของโครโมโซมแล้ว ในระบบจริงมิวเทชันก็จะเป็นการเปลี่ยนแปลงเชิงตัวเลขเช่นกัน การทำมิวเทชันเปรียบเสมือนการก้าวเดินไปสู่คำตอบของระบบ เช่นเดียวกับการทำครอสโอเวอร์ ยิ่งไปกว่านั้นการทำมิวเทชันยังสามารถถูกพิจารณาเพื่อทำให้เกิดความหลากหลายขึ้นในกลุ่มประชากร มีผลให้คำตอบที่เกิดขึ้นในขบวนการ GA ครอบคลุมพื้นที่การค้นหาคำตอบได้ทั่วถึงยิ่งขึ้น

5. การแทนที่ (Replacement) คือขั้นตอนหลังจากที่กระบวนการ GA ได้โครโมโซมรุ่นลูกหลานมาเรียบร้อยแล้ว ต่อมาจะนำโครโมโซมรุ่นลูกหลานใหม่ที่ได้ไปแทนที่ประชากรรุ่นเก่า เพื่อที่จะทำให้ประชากรรุ่นถัดไปประกอบไปด้วยโครโมโซมใหม่ ๆ ซึ่งเป็นโครโมโซมที่ดีกว่าเนื่องจากได้รับการสืบสายพันธุ์ที่ดีจากโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ผ่านการคัดเลือกมาแล้ว

3. ระบบที่นำเสนอ

3.1 ตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส

วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ที่ควบคุมกระแสแบบทางอ้อมที่นำเสนอ แสดงในรูปที่ 6 จะสังเกตได้ว่าทำการวัดค่ากระแส แรงดันและความถี่ของแหล่งจ่ายเท่านั้น โดยตัวควบคุม PR จะบังคับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{sh} เพื่อให้ได้ i_s ให้ตามกระแสอ้างอิง i_s^* ซึ่งตัวควบคุมกระแสชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ถูกออกแบบให้มีความถี่เรโซแนนซ์มีค่าเท่ากับความถี่มูลฐาน 50 เฮิรตซ์



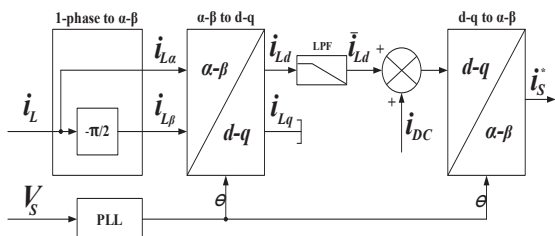
รูปที่ 6 โครงสร้างระบบที่นำเสนอ

3.2 เทคนิคการสร้างสัญญาณอ้างอิง

การสร้างสัญญาณอ้างอิงคือ การวัดค่ากระแสโหลด i_L เข้ามาคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้มาซึ่งสัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุม การตรวจจับกระแสโหลดเพื่อสร้างสัญญาณอ้างอิงบนแกนดีควิโดยใช้พื้นฐานการแปลงแกนของพาร์ก็จะสามารถนำมาใช้กำจัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานได้

จากรูปที่ 7 แสดงบล็อกไดอะแกรมการตรวจจับกระแสโหลดเพื่อสร้างสัญญาณอ้างอิง i_s^* โดยทำการกำหนดค่าของตัวแปรหรือสัญญาณกระแสที่โหลด i_L และทำการแปลงแกนให้ไปอยู่บนแนวแกนหยุดนิ่ง $\alpha - \beta$ ซึ่งจะได้ตัวแปร $i_{L\alpha}$ และ $i_{L\beta}$ จากนั้นกำหนดให้ตัวแปร $i_{L\beta}$ ทำมุมล้าหลังออกไป 90 องศา หรือ $-\pi/2$ ต่อมาทำการเปลี่ยนกระแสโหลด $i_{L\alpha}$ และ $i_{L\beta}$ ให้ไปอยู่บนแกนดีควิ (D-Q Reference frame) ผลลัพธ์ที่ได้คือ $d - Axis (i_{Ld})$ และ $q - Axis (i_{Lq})$ เมื่อได้ค่า i_{Ld} และ i_{Lq} จะทำการนำกระแส i_{Ld} ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) ไปบวกกับเทอมของการ

ควบคุมบัสแรงดันดีซี (DC-Link) จะได้ค่า $\bar{i}_{Ld} + i_{DC}$ จากนั้นทำการอินเวอร์ส (Inverse) ค่ากระแส $\bar{i}_{Ld} + i_{DC}$ ในรูปแบบแกนดิกิวให้กลับไปอยู่ในรูปของแกนหยดหนึ่ง ดังนั้นจะได้ค่ากระแสอ้างอิง i_s^*



รูปที่ 7 บล็อกไดอะแกรมการตรวจจับกระแสไหลคเพื่อสร้างสัญญาณอ้างอิง i_s^*

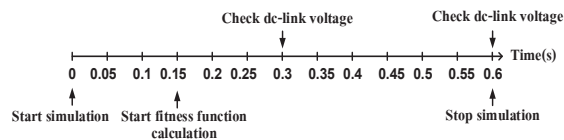
3.3 การออกแบบตัวควบคุมกระแสด้วยวิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม

ในงานวิจัยนี้จะทำการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PR ตามสมการ (2) โดยกำหนดให้ $\omega_0 = 2\pi(50)$ เรเดียนต่อวินาที ซึ่งวิธีการออกแบบจะเริ่มต้นจากการสุ่มค่าของ K_p และ K_r โดยกำหนด K_p อยู่ในช่วง $[0-20]$ และ K_r อยู่ในช่วง $[0-20]$ ต่อมาทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้กับ GA แสดงในตารางที่ 2 จากนั้นทำการกำหนดให้ค่าที่ 50 รุ่น (Generations) และในแต่ละรุ่น ให้คำนวณรอบละ 10 คำตอบแต่ละชุด ในขณะกระบวนการทำ GA นั้น ได้กำหนดให้หาค่าความผิดพลาดของระบบ มีค่าน้อยที่สุดด้วยวิธี Integral of absolute error (IAE) โดยเป็นการวัดค่าระหว่างกระแสอ้างอิง i_s^* กับกระแสแหล่งจ่าย i_s ดังสมการ (3) เมื่อทำการหาค่ากระบวนการ GA แล้วเราจะได้อัตราพารามิเตอร์ออกมาเช่น ค่าอัตราขยายและค่าความผิดพลาด

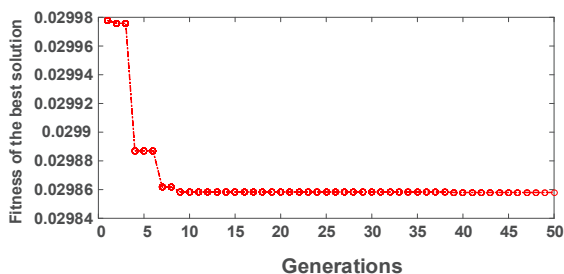
$$IAE = \int_{t_0}^T |i_s(t) - i_s^*(t)| dt \quad (3)$$

รูปที่ 8 แสดงไทม์มิงไดอะแกรมของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวควบคุมกระแส โดยกำหนดให้ $t_0 = 0.15$ s คือเวลาเริ่มต้น เพื่อให้ระบบเสถียรก่อนหาค่าที่เหมาะสมและ $T = 0.6$ s คือเวลาสิ้นสุด

การคำนวณแต่ละรอบ นอกจากนี้มีการตรวจสอบความไม่เสถียรของระบบ ด้วยการวัดค่าแรงดัน DC-link ที่เวลา $t = 0.3$ ถึง 0.59 s



รูปที่ 8 ไทม์มิงไดอะแกรมของการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับตัวควบคุมกระแส



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fitness Function กับจำนวนรอบ

หลังจากทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม GA แล้ว กราฟความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 9 สังเกตได้ว่าค่าลดลงเพียงเล็กน้อยจากค่าเริ่มต้น เนื่องจาก GA ในแต่ละรุ่นจะมีการเลือก 10 คำตอบแต่ละชุดมาหาความเหมาะสม ทำให้แต่ละรอบมีการเจอคำตอบแต่ละชุดที่เหมาะสมกับระบบ วิธีการนี้เป็นการเพิ่มความเร็วในการค้นหา หากเทียบกับจำนวนคำตอบแต่ละชุดที่น้อย ซึ่งจะใช้เวลาและจำนวนรุ่นที่มากกว่า

ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกระแสชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ที่เหมาะสมที่สุดและมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด K_p มีค่าเท่ากับ 12.7254 และ K_r มีค่าเท่ากับ 9.7077 ตัวควบคุมที่ได้หาค่าเหมาะสมที่สุดแล้วแสดงดังสมการ (4)

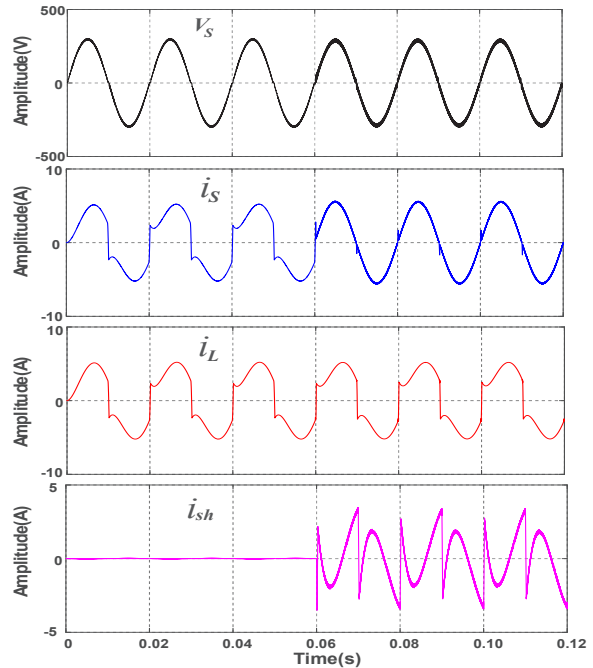
$$G_c(s) = 12.7254 + \frac{9.7077\omega_0 s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (4)$$

4. ผลการจำลองระบบ

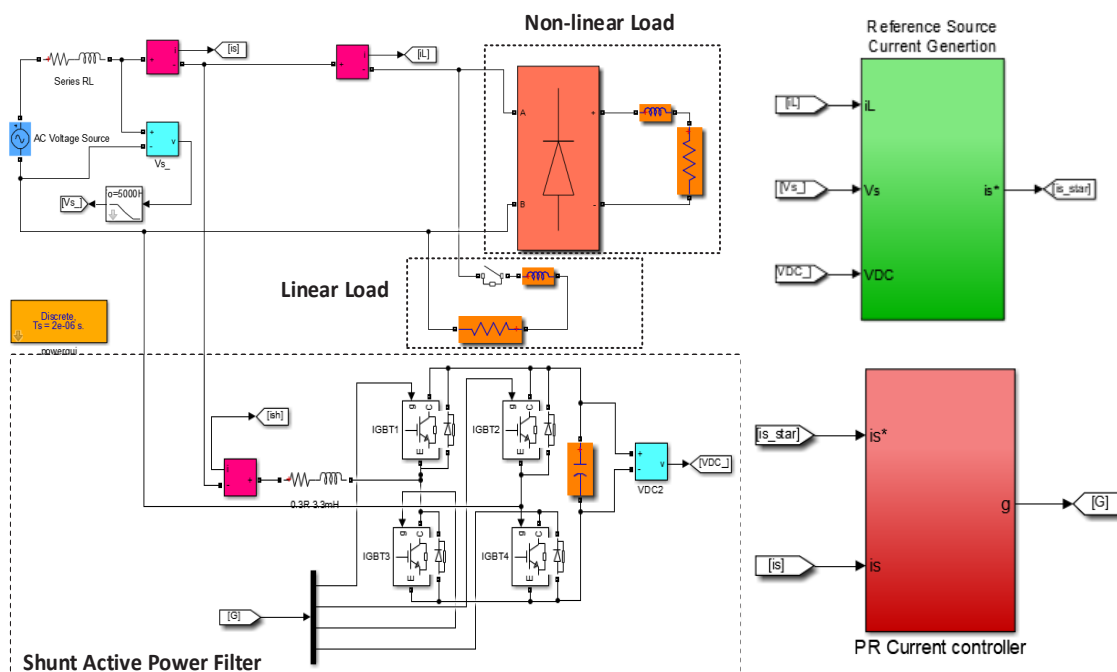
งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองการทำงานของวงจรกำลังแอกทีฟ ดังรูปที่ 10 โดยค่าพารามิเตอร์ของระบบแสดงในตารางที่ 1 จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK (SimPowerSystems)

4.1 ผลการจำลอง

รูปที่ 11 แสดงรูปคลื่น V_s , i_s , i_L และ i_{sh} ก่อนและหลังการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก ที่เวลา $t=0.06$ s จะเห็นได้ว่าก่อนชดเชยกระแสฮาร์มอนิกนั้น กระแสที่แหล่งจ่าย i_s มีรูปคลื่นใกล้เคียงกับกระแสโหลด i_L แสดงว่ายังมีกระแสฮาร์มอนิกปะปนอยู่และหลังจากทำการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก ที่เวลา $t = 0.06$ s จะเห็นได้ว่ากระแสที่แหล่งจ่าย i_s มีรูปคลื่นใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ ซึ่งแสดงว่าสามารถชดเชยกระแสฮาร์มอนิกได้จริง ส่งผลให้สามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม (%THD_i) จาก 28.28% เป็น 2.58%



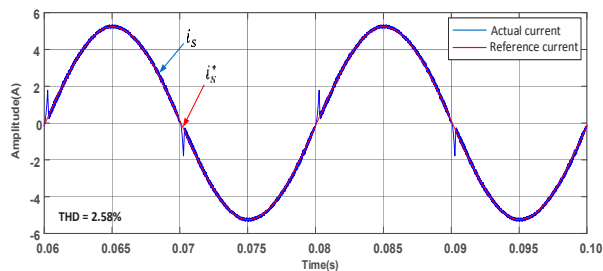
รูปที่ 11 รูปคลื่นสัญญาณของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ก่อนและหลังการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก ที่เวลา $t = 0.06$ s



รูปที่ 10 บล็อกการจำลองของระบบ

รูปที่ 12 แสดงรูปคลื่นสัญญาณ i_s และ i_s^* กรณีต่อโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่สภาวะคงตัว จะเห็นได้

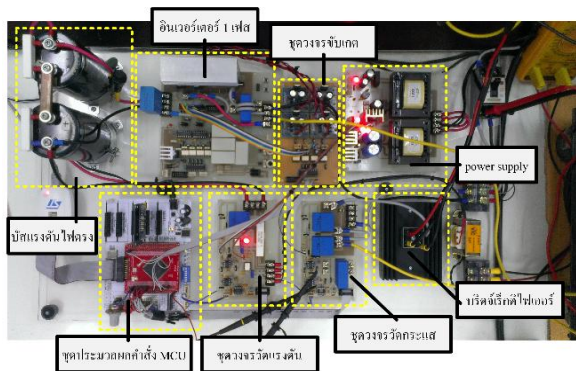
ว่ากระแสที่แหล่งจ่าย i_s มีรูปคลื่นสัญญาณเป็นรูปไซน์ที่สมบูรณ์และใกล้เคียงกับ i_s^*



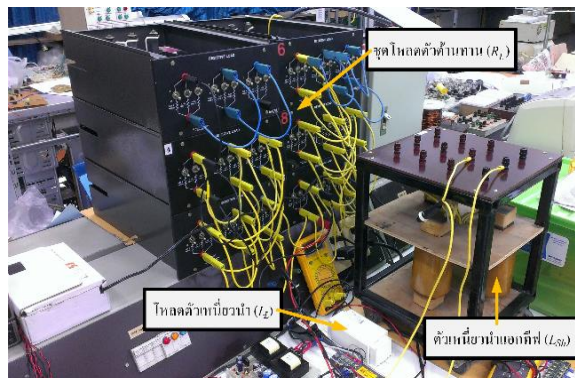
รูปที่ 12 รูปคลื่นสัญญาณ i_s และ i_s^* ที่สภาวะคงตัว

5. ผลการทดสอบจริง

จากรูปที่ 13 และ 14 เป็นการเตรียมและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจริงของชุดควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ที่ควบคุมกระแสแบบทางอ้อม โดยในส่วนของฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย ชุดประมวลผลคำสั่งโปรแกรม MCU ชุดวงจรวัดแรงดัน ชุดวงจรวัดกระแส ชุดแหล่งจ่ายกำลัง ชุดวงจรอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส บัสแรงดันไฟตรง วงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ ชุดโหลดตัวต้านทาน R_L โหลดตัวเหนี่ยวนำ L_L และตัวเหนี่ยวนำเอกทีฟ L_{Si} โดยค่าพารามิเตอร์ของระบบแสดงในตารางที่ 1

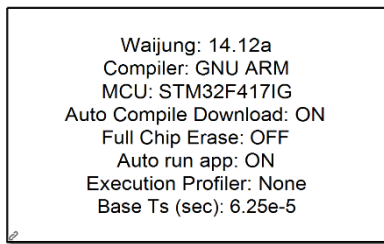


รูปที่ 13 วงจรที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 14 วงจรโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นและตัวเหนี่ยวนำ

ส่วนประกอบของซอฟต์แวร์ของชุดวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ที่ควบคุมกระแสทางอ้อม สร้างขึ้นโดยโปรแกรม Matlab/Simulink ด้วย Waijung Blockset รูปที่ 15 บล็อกไดอะแกรม Waijung target setup ทำหน้าที่กำหนดเวลาการทำงานของระบบทั้งหมด Sampling time โดยจะเป็นตัวจัดลำดับเวลาของการทำงานในแต่ละบล็อกไดอะแกรมเพื่อจะส่งให้ Systick module จัดลำดับก่อนและหลังของเวลาในการทำงานของบล็อกไดอะแกรมทั้งระบบให้เหมาะสมที่สุด (น้อยที่สุด) ในการประมวลผลแต่ละคาบของเวลาอัตราการสุ่ม (Sampling time) และเป็นบล็อกการกำหนดให้ระบบทราบว่า GNU ARM เป็นตัวคอมไพเลอร์ ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) เบอร์ STM32F417IG (LQFP176); FiO2 โดยกำหนดค่าการทำงานสัญญาณนาฬิกา (Clock configuration) เป็น FiO2 (HSEOSC-8MHz/HCLK-168MHz) และการถ่ายโอนข้อมูลจะเลือกใช้ ST-LINK เป็นตัวเชื่อมต่อสื่อสารในการโปรแกรมหรือแก้ไขโดยตรง โดยการถ่ายโอนข้อมูลผ่านช่องสัญญาณ USB ลงบนบอร์ด STM32F4 FiO2



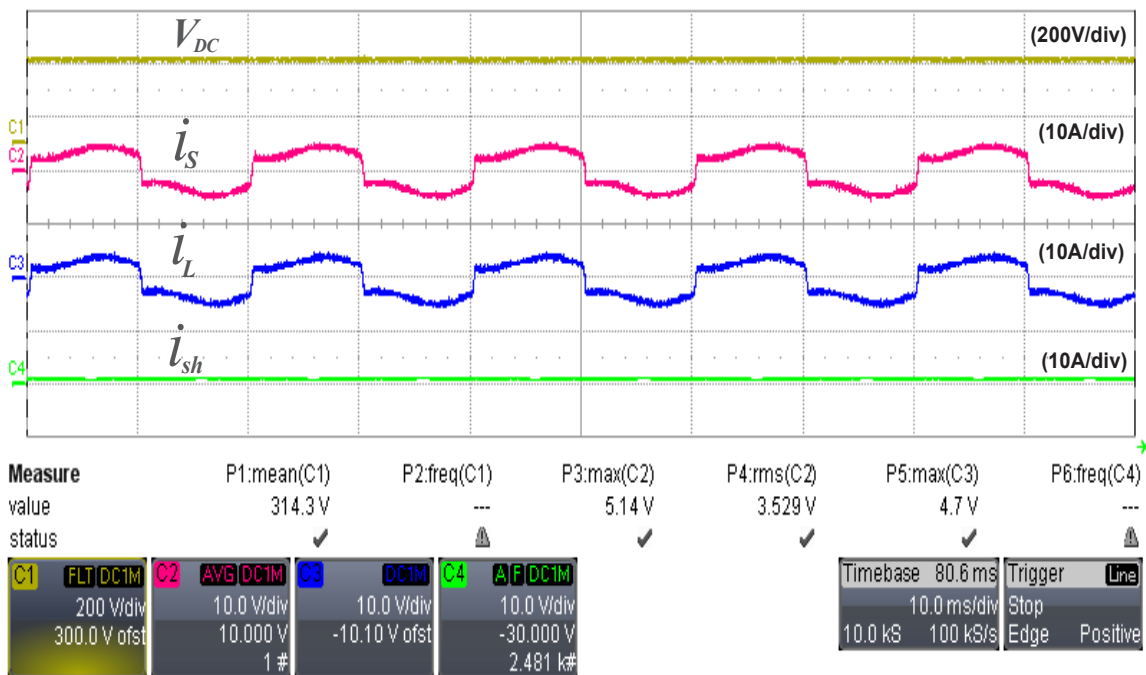
Target Setup

รูปที่ 15 บล็อกไดอะแกรม Waijung Target Setup

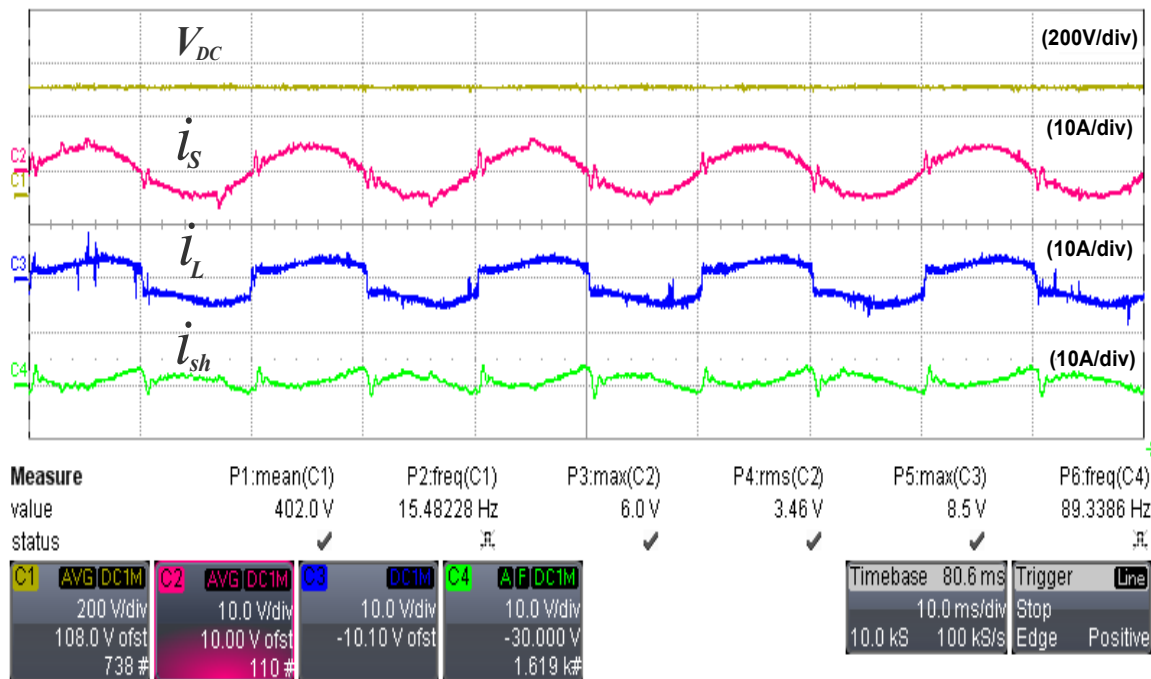
รูปที่ 16(ก) แสดงรูปคลื่นสัญญาณ V_{DC} , i_S , i_L และ i_{Sh} ก่อนชดเชยกระแสฮาร์มอนิก จะเห็นว่าก่อนชดเชยกระแสฮาร์มอนิก กระแสที่แหล่งจ่าย i_S มีรูปคลื่นใกล้เคียงกับกระแสโหลด i_L แสดงว่ายังมีกระแสฮาร์มอนิกปะปนอยู่ รูปที่ 16(ข) แสดงรูปคลื่นสัญญาณ

V_{DC} , i_S , i_L และ i_{Sh} หลังชดเชยกระแสฮาร์มอนิก กระแสที่แหล่งจ่าย i_S มีรูปคลื่นใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ มีความถี่เท่ากับ 50 เฮิรตซ์

รูปที่ 17(ก) แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม ก่อนชดเชยกระแสฮาร์มอนิก จะเห็นว่า มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมด้วย YOKOGAWA รุ่น CW500 (% THD_{i_S}) เท่ากับ 28.07% โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมแรงดัน (% THD_{V_s}) แสดงในตารางที่ 1 รูปที่ 17(ข) แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม หลังชดเชยกระแสฮาร์มอนิกสามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมจาก 28.07% เป็น 4.54%

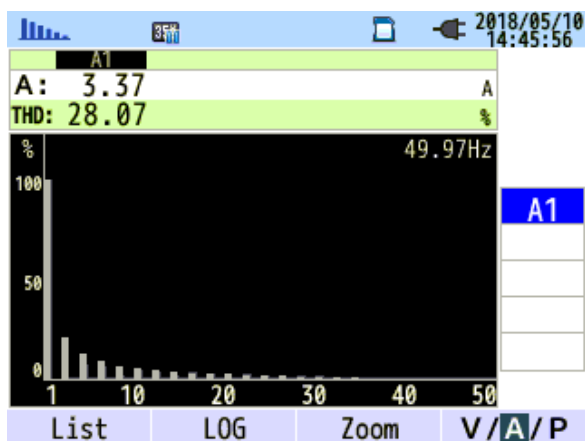
(ก) รูปคลื่นสัญญาณ V_{DC} , i_S , i_L และ i_{Sh} ก่อนชดเชยกระแสฮาร์มอนิก

รูปที่ 16 เปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณ V_{DC} , i_S , i_L และ i_{Sh} ก่อนและหลังชดเชยกระแสฮาร์มอนิก สำหรับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

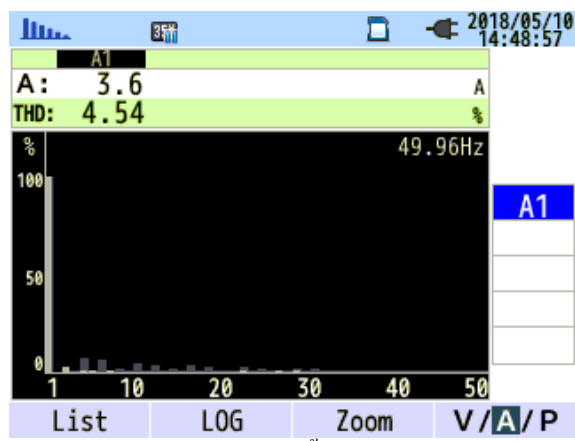


(ข) รูปคลื่นสัญญาณ V_{DC} , i_S , i_L และ i_{sh} หลังชดเชยกระแสฮาร์มอนิก

รูปที่ 16 (ต่อ) เปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณ V_{DC} , i_S , i_L และ i_{sh} ก่อนและหลังชดเชยกระแสฮาร์มอนิก สำหรับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น



(ก) ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม ก่อนชดเชยกระแสฮาร์มอนิก



(ข) ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม หลังชดเชยกระแสฮาร์มอนิก ที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 17 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม ก่อนและหลังชดเชยกระแสฮาร์มอนิก สำหรับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

6. สรุปการทดลอง

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการออกแบบและสร้างชุดควบคุมวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ที่ควบคุมกระแสแบบทางอ้อม โดยการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ ด้วยวิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithms) เพื่อกำจัดกระแสฮาร์มอนิกให้ลดลง ทำให้กระแสของแหล่งจ่ายใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์เหลือไว้เฉพาะความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) และเพื่อลดความยุ่งยากในการออกแบบตัวควบคุม ดังนั้นจึงแก้ปัญหาด้วยวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) โดยใช้วิธีการพื้นฐานเชิงพันธุกรรมเข้ามาช่วยในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการทำงานของระบบผลการจำลองเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ได้ออกแบบไว้ โดยสามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม (%THD_i) จาก 28.28% เป็น 2.58% และผลการทดสอบกับระบบจริงสามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม (%THD_i) จาก 28.07% เป็น 4.54% สำหรับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ IEEE Std 519-2014

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบ

| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|---|------------------------------|
| แหล่งจ่ายแรงดันและความถี่ | 220 Vrms, 50 Hz |
| ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมแรงดัน (%THD _v) ณ ห้องทดลอง | 1.95% |
| โหลดแบบไม่เชิงเส้น | วงจรเรียงกระแส, 149 mH, 80 Ω |

ตารางที่ 1 (ต่อ) พารามิเตอร์ของระบบ

| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|--|---|
| อิมพีแดนซ์ของตัวกรองแอกทีฟ | 3.75 mH, 0.3 Ω |
| แรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง | 400 V |
| คาปาซิเตอร์บัลแรงดันไฟตรง | 1100 μF, 900 V |
| ความถี่การสวิตช์ | 16 kHz |
| ความถี่การสุ่มสัญญาณ | 16 kHz |
| อุปกรณ์ที่ใช้ในการสวิตช์ | 1,200 V, 21 A |
| อัตราขยายตัวควบคุมกระแสชนิด PR | K _p = 12.7254, K _r = 9.7077 |
| อัตราขยายตัวควบคุมแรงดันที่บัลแรงดันไฟตรงชนิด PI | K _p = 0.1820, K _i = 4.8934 |

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของ GA

| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|--|----------------|
| ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน K _p | [0-20] |
| ค่าอัตราขยายแบบเรโซแนนซ์ K _r | [0-20] |
| ค่าความห่างของรุ่น (Generation Gap) | 0.9 |
| ค่าอัตราการไขว้เปลี่ยนพันธุ (Crossover Rate) | 0.7 |
| ค่าอัตราการกลายพันธุ (Mutation Rate) | 0.05 |

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก “Research Strengthening Project of the Faculty of Engineering, King Mongkut’s University of Technology Thonburi”

เอกสารอ้างอิง

- [1] A report prepared by Load Characteristics Task Force. The Effects of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads. *IEEE Power Engineering Review*, 1985; PAS-104(9): 2555–2563.

- [2] Balda, J. C., Griffithki, D. C., McEachern, A., Barnes, T. M., Hartmann, D. P., Phileggi, D. J., Emmanuel, A. E., Horton, W. F., Reid, W. E., Ferraro, R. J. and Jewell, W. T. Effects of Harmonics on Equipment. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1993; 8(2): 672–680.
- [3] Jou, H. C., Wu, J. C. and Chu, H. Y. New Single-Phase Active Power Filter. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 1994; 141(3): 129-134.
- [4] Liu, J., Yang, J. and Wang, Z. A New Approach for Single-Phase Harmonic Current Detecting and Its Application in a Hybrid Active Power Filter. IECON'99. Conference Proceedings. 25th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 29 November -3 December, San Jose, California, United State, 1999; 849-854.
- [5] Zhang, R., Cardinal, M., Szczesny, P. and Dame, M. A Grid Simulator with Control of Single-Phase Power Converters in D-Q Rotating Frame. 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 23-27 June, Cairns, Qld., Australia, 2002; 1431-1436.
- [6] Bhattacharya, S. and Divan, D. Synchronous Frame Based Controller Implementation for a Hybrid Series Active Filter System. Conference Record 30th IEEE Industry Applications, 8-12 October, Orlando, Florida, United States, 1995; 2531-2540.
- [7] Yodmanee, K. and Lenwari, W. PI Controller Optimization for Indirect Current Control for Single-Phase Shunt Active Filter. *Ladkrabang Engineering Journal*, 2016; 33(1): 42-47.
- [8] Lenwari, W., Sumner, M. and Zanchetta, P. The Use of Genetic Algorithms for the Design of Resonant Compensators for Active Filters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009; 56(8): 2852-2861.
- [9] Lenwari, W. Optimized Design of Modified Proportional-Resonant Controller for Current Control of Active Filters. 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 25-28 February, Cape Town, South Africa, 2013; 894-899.
- [10] 519-2014 IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE Standard 519-2014 (Revision of IEEE Standard 519-1992), 11 June 2014; 1-29.
- [11] Komrska, T., Zak, J. and Peroutka, Z. Control Strategy of Active Power Filter with Adaptive FIR Filter-Based and DFT-Based Reference Estimation. International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 14-16 June, Pisa, Italy, 2010; 1524-1529.
- [12] Usman, H., Hizam, H., Amram, M. and Radzi, M. Simulation of Single-Phase Shunt Active Power Filter with Fuzzy Logic Controller for Power Quality Improvement. 2013 IEEE Conference on Clean Energy and Technology, 18-20 November, Langkawi, Malaysia, 2013; 353-357.
- [13] Angélico, B.A., Campanhol, L.B.G. and Oliveira da Silva, S.A. Proportional-Integral/Proportional-Integral-Derivative Tuning Procedure of a Single-Phase Shunt Active Power Filter Using Bode Diagram. *IET Power Electronics*, 2014; 7(10): 2647-2659.
- [14] Rahmani, S., Al-Haddad, K. and Fnaiech, F. Reduced Switch Number Single-Phase Shunt Active Power Filter Using an Indirect Current Control Technique. 2003 IEEE International Conference on Industrial Technology, 10-12 December, Maribor, Slovenia, Slovenia, 2003; 1107-1112.
- [15] Khadkikar, V., Singh, M., Chandra, A. and Singh, B. Implementation of Single-Phase Synchronous DQ Reference Frame Controller for Shunt Active Filter Under Distorted Voltage Condition. 2010 Joint International Conference on Power Electronics Drives and Energy Systems (PEDES), 20-23 December, New Delhi, 2010; 1-6.
- [16] Adel, M., Zaid, S. and Mahgoub, O. Improved Active Power Filter Performance Based on an Indirect Current Control Technique. *Journal of Power Electronics*, 2011; 11(6): 931-937.
- [17] Trinh, Q. N. and Lee, H. H. An Advanced Current Control Strategy for Three-Phase Shunt Active Power Filters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013; 60(12): 5400-5410.
- [18] Fukuda, S. and Imamura, R. Application of A Sinusoidal Internal Model to Current Control of Three-Phase Utility-Interface Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2005; 52(2): 420–426.

- [19] Zmood, D. N., Holmes, D. G. and Bode, G. Frequency Domain Analysis of Three Phase Linear Current Regulators. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2001; 37(2): 601–610.
- [20] Haupt, R.L. and Haupt, S.E. Practical Genetic Algorithms. 2nd ed., John Wiley & Sons Press, United States of America, 2004; 27-65.