

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับ เรโซแนนซ์ สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส บนพื้นฐานเทคนิคการควบคุมกระแสทางอ้อม

Optimization of Proportional-Resonant Controller For Single-Phase Shunt Active Power Filters Based On Indirect Current Control Technique

กวีวัชร โพธิ์คำรงค์ชัย¹ วันจักรี เล่นวาริ^{1*} คณาพจน์ ยอดมณี²

¹ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
²สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล
ประจวบคีรีขันธ์

บทคัดย่อ

ปัจจุบันได้มีความสนใจเรื่องคุณภาพไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ความก้าวหน้าในอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นสาเหตุให้เกิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า โดยฮาร์มอนิกสามารถส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายและการทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์ วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสำหรับปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าให้ดีขึ้นด้วยการกรองฮาร์มอนิก บทความนี้นำเสนอการออกแบบและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ (Proportional-Resonant: PR) สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟสบนพื้นฐานเทคนิคการควบคุมกระแสทางอ้อม การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมชนิด PR อาศัยวิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) การตรวจสอบความถูกต้องของการควบคุมที่เสนอใช้การจำลองจากผลการจำลองสามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม (%THD Harmonic Distortion: %THD) ได้ต่ำกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE Std 519-2014

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

Abstract

Nowadays, more attention has been paid to power quality of electricity. The advance in electrical equipment and power electronics causes harmonics in the electrical system. Harmonics can cause damage and malfunction of the equipment in the system. Shunt active power filters is one of effective devices used for improving power quality by harmonic filtering. This paper proposes optimized design of proportional-resonant controller for single-phase shunt active power filters based on indirect current control technique. The optimal parameters of the controller are obtained by genetic algorithm. The simulation results show that the proposed controller can reduce the total harmonic distortion (THD) to less than 3% which is within the IEEE Std 519-2014 standard.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

resonant (PR) controller for single-phase shunt active power filters based on indirect current control technique. Controller parameters are obtained through the use of Genetic Algorithms (GA). The validation of the proposed control is done through simulations. The results show that %THD is reduced to less than 3% which complies with IEEE Standard 519-2014.

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

1. บทนำ

ปัจจุบันการพัฒนาอุปกรณ์ไฟฟ้ามีความก้าวหน้า ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในระบบไฟฟ้า ฮาร์มอนิกเป็นปัญหา โดยเฉพาะในงานอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์ หรือ เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน เนื่องจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ตัวขับ กระแสสลับและกระแสตรง หลอดฟลูออเรสเซนต์ เครื่องคอมพิวเตอร์และยูพีเอส อุปกรณ์จะส่งผลให้กับระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานที่ผิดพลาด หรือก่อให้เกิดการชำรุดได้ง่าย [1] ดังนั้นเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกให้ลดลง สามารถทำได้โดยใช้วงจรกรองกำลัง แอคทีฟ (Active power filters) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในระบบหนึ่งเฟสและระบบไฟฟ้าสามเฟส [2]

เทคนิคการหาค่าอ้างอิงบนแกนดีคิว (D-Q Reference frame) สำหรับวงจรกรองกำลังแอคทีฟ (Active power filters) เป็นการหาค่าขนาดและแรงดันในปริมาณดีซีบนพื้นฐานการแปลงแกนของพาร์ก (Park transformation) โดยวิธีการอ้างอิงบนแกนดีควินั้นจะนิยมใช้กับวงจรกรองกำลังแอคทีฟของระบบไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งจะไม่สามารถใช้กับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้โดยตรง แต่สามารถทำได้โดยสมมุติตัวแปรขึ้นให้ค่าของตัวแปรหรือสัญญาณที่สมมุติขึ้นมานั้นทำมุมล่าช้ากับสัญญาณที่กำหนดหรือสัญญาณที่ต้องการวัดค่าออกไป 90 องศา เพื่อให้สามารถคำนวณบนพื้นฐานของพาร์กได้ [3]

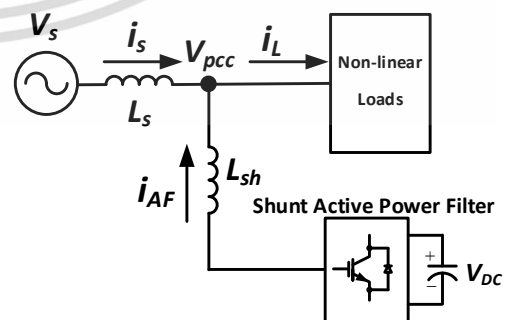
ตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ (Proportional-resonant controller) [4] เป็นตัวควบคุมกระแสที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการควบคุมกระแสอ้างอิงที่เป็นสัญญาณกระแสสลับ

ปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุม เช่น วิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) สามารถเข้ามาช่วยหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกระแสที่เหมาะสม [5-6]

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ ด้วยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส บนพื้นฐานเทคนิคการควบคุมกระแสทางอ้อมด้วยวิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม ผลการจำลองแสดงประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบให้มีความมาตรฐาน IEEE Std 519-2014 [7]

2. ทฤษฎี

รูปที่ 1 แสดงหลักการพื้นฐานของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน (Shunt active power filters) มีจุดประสงค์เพื่อกรองกระแสฮาร์มอนิกออกจากระบบ เพื่อให้กระแสของแหล่งจ่ายใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์และมีความถี่เท่ากับความถี่มูลฐานมากที่สุด ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ การควบคุมกระแสทางตรงและการควบคุมกระแสทางอ้อม

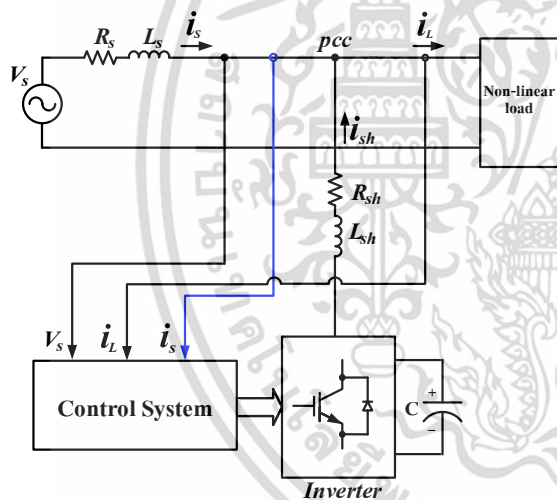


รูปที่ 1 วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 การควบคุมกระแสแบบทางอ้อม

จากรูปที่ 2 แสดงโครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ที่ควบคุมกระแสแบบทางอ้อม โดยการควบคุมกระแสแบบทางอ้อม จะใช้สัญญาณอ้างอิง i_s^* ที่เป็นกระแสรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่เท่ากับความถี่มูลฐาน ที่ผ่านการคำนวณจากการวัดกระแสที่โหลด i_L และวัดกระแสที่แหล่งจ่าย i_s เพื่อทำการป้อนกลับไปยังระบบควบคุม เพื่อบังคับให้กระแสที่แหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่เท่ากับความถี่มูลฐานเป็นไปตามสัญญาณอ้างอิง เพื่อกำจัดกระแสฮาร์มอนิกออกไป [8] ซึ่งการควบคุมกระแสแบบทางอ้อมมีข้อดีคือสามารถควบคุมกระแส i_s โดยตรงทำให้แน่ใจว่ากระแส i_s เป็นรูปคลื่นไซน์ แต่ข้อเสียคือ การออกแบบตัวควบคุมมีความซับซ้อนเนื่องจากไม่ทราบค่าฟังก์ชันถ่ายโอนที่แน่นอน



รูปที่ 2 โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

ชนิด 1 เฟส ที่ควบคุมกระแสแบบทางอ้อม

2.2 ตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์

ตัวควบคุมสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์จะมีอัตราขยายเป็นค่าอนันต์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ สมการของตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์แสดงได้ดังสมการที่ (1) [9]

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

ตัวควบคุมสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ได้นำมาพัฒนาสำหรับการประยุกต์ใช้บนแกนหยุดนิ่ง (Stationary

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

reference frame) เพื่อควบคุมสัญญาณที่ความถี่มูลฐานได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวควบคุมชนิดนี้ ได้มีการแก้ไขส่วนของเรโซแนนซ์ โดยเพิ่มเทอม ω_0 ตามสมการที่ (2) [10]

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

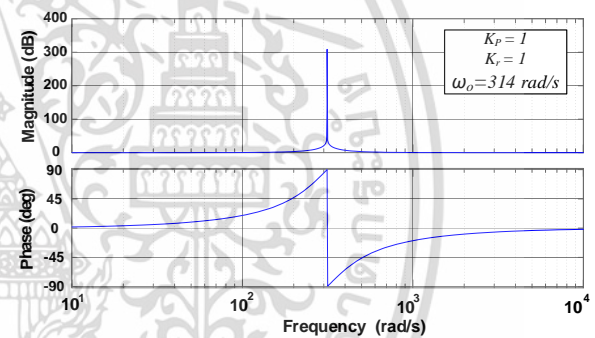
โดย

K_p คือ อัตราขยายแบบสัดส่วน

K_r คือ อัตราขยายแบบเรโซแนนซ์

ω_0 คือ ความถี่เรโซแนนซ์

จากรูปที่ 3 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ด้วยแผนภาพโพลเดของสมการที่ (2) โดยกำหนดให้ $K_p=1$, $K_r=1$ และ $\omega_0 = 50 \text{ Hz}$ (314 rad/s) ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์จะมีอัตราขยายที่สูง ทำให้มีการตอบสนองที่รวดเร็ว



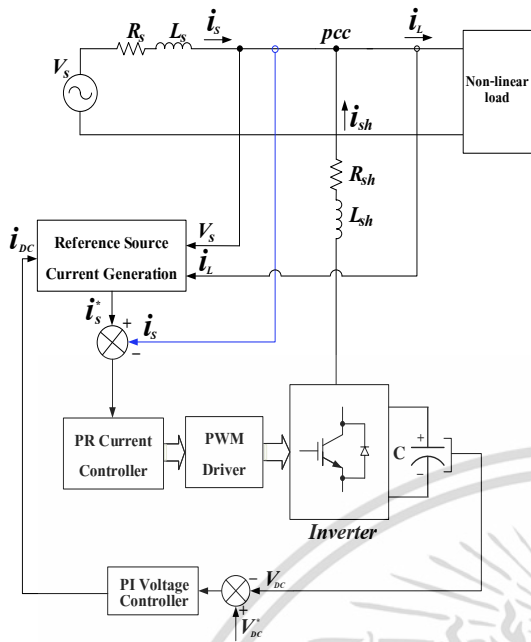
รูปที่ 3 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวควบคุมสัดส่วน

ร่วมกับเรโซแนนซ์

3. ระบบที่นำเสนอ

3.1 ตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส

วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ที่ควบคุมกระแสแบบทางอ้อมที่นำเสนอ แสดงในรูปที่ 4 จะสังเกตเห็นว่าทำการวัดค่ากระแส แรงดันและความถี่ของแหล่งจ่ายเท่านั้น โดยตัวควบคุม PR จะบังคับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{sh} เพื่อให้ได้ i_s ให้ตามกระแสอ้างอิง i_s^* ซึ่งตัวควบคุมกระแสชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ถูกออกแบบให้มีความถี่เรโซแนนซ์มีค่าเท่ากับความถี่มูลฐาน 50 เฮิร์ตซ์



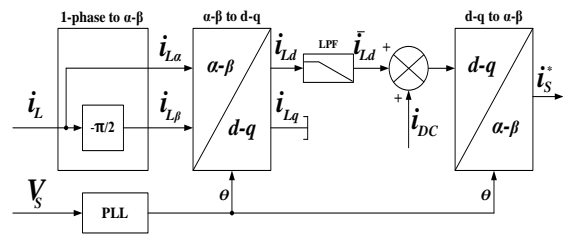
รูปที่ 4 โครงสร้างระบบที่นำเสนอ

3.2 เทคนิคการสร้างสัญญาณอ้างอิง

การสร้างสัญญาณอ้างอิง คือการวัดค่ากระแสไหลด i_L เข้ามาคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้มาซึ่งสัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุม การตรวจจับกระแสไหลดเพื่อสร้างสัญญาณอ้างอิงบนแกนตติวิ โดยใช้พื้นฐานการแปลงแกนของพาร์ก จะสามารถนำมาใช้กำจัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานได้

จากรูปที่ 5 แสดงบล็อกไดอะแกรมการตรวจจับกระแสไหลดเพื่อสร้างสัญญาณอ้างอิง i_s^* โดยทำการกำหนดค่าของตัวแปรหรือสัญญาณกระแสที่ไหลด i_L และทำการแปลงแกนให้ไปอยู่บนแนวแกน $\alpha - \beta$ Axis (Stationary reference frame) ซึ่งจะได้ตัวแปร $i_{L\alpha}$ และ $i_{L\beta}$ จากนั้นกำหนดให้ตัวแปร $i_{L\beta}$ ทำมุมล้าหลังออกไป 90 องศา หรือ $-\pi/2$ ต่อมาทำการเปลี่ยนกระแสไหลด $i_{L\alpha}$ และ $i_{L\beta}$ ให้ไปอยู่บนแกนตติวิ (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) ไปบวกกับเทอมของการควบคุมบัสแรงดันตติวิ (DC-Link) จะได้ค่า $\bar{i}_{Ld} + i_{DC}$ จากนั้นทำการอินเวอร์ส (Inverse) ค่ากระแส $\bar{i}_{Ld} + i_{DC}$ ในรูปแบบแกนตติวิ ให้

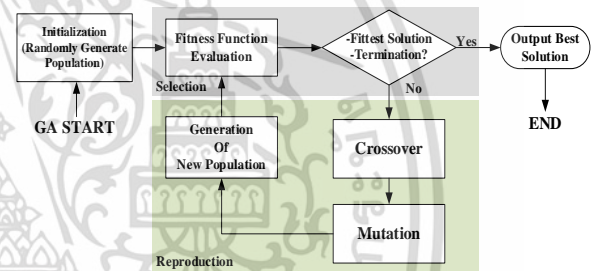
กลับไปอยู่ในรูปของ Stationary reference frame ดังนั้นจะได้ค่ากระแสอ้างอิง i_s^*



รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมการตรวจจับกระแสไหลดเพื่อสร้างสัญญาณอ้างอิง i_s^*

3.3 ทฤษฎีขั้นตอนวิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม

วิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) หรือ GA เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้หลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติและหลักการทางสายพันธุศาสตร์ รูปที่ 6 แสดงองค์ประกอบและการทำงานของ GA



รูปที่ 6 องค์ประกอบและการทำงานของ Genetic Algorithm

การทำงานของ Genetic Algorithm เริ่มต้นด้วยการหาค่าประชากรด้วยวิธีการสุ่ม โดยที่การทำซ้ำแต่ละครั้งนั้น จะมีวิธีการดำเนินการคือ ปฏิบัติการทางสายพันธุ (Reproduction) หลังจากขบวนการคัดเลือกได้ดำเนินไปจนเสร็จสมบูรณ์ โครโมโซมลูกหลานจะถูกสร้างขึ้นใหม่จากโครโมโซมที่ถูกคัดเลือกมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ โดยการเอาโครโมโซมที่เป็นต้นกำเนิดสายพันธุขึ้นมาทำการเปลี่ยนแปลงให้เกิดโครโมโซมใหม่ขึ้น ขั้นตอนดังกล่าวเป็นขั้นตอนที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของวัฏจักรของ GA ซึ่งมีการคาดหวังว่าโครโมโซมลูกหลานที่เกิดขึ้นนั้น จะได้รับส่วนดีของโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุโดยผ่านปฏิบัติการทางสายพันธุนี้ จะมีอยู่ 2 วิธีหลักๆ คือ การทำครอสโอเวอร์และการทำมิวเทชัน ครอสโอเวอร์เป็นวิธีการรวมตัวใหม่ของโครโมโซม โดยทำการรวมส่วนย่อยระหว่างโครโมโซมต้นกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ของเอกสารนี้จึงได้ดำเนินการจัดทำเอกสารนี้ขึ้นโดยไม่หวังกำไร หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายพันธุ์ ตั้งแต่สองโครโมโซมขึ้นไป เพื่อให้กลายเป็นโครโมโซมลูกหลาน โครโมโซมลูกหลานที่ได้จากการครอสโอเวอร์นี้จะมีพันธุกรรมจากต้นกำเนิดสายพันธุ์อยู่ในตัว มีเวชันเป็นวิธีการแปรผันยีนหรือส่วนย่อยของโครโมโซม ซึ่งเปรียบเทียบได้กับการกลายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิต ด้วยปกติแล้วการทำมิวเทชันจะมีค่าค่อนข้างต่ำ ถ้ามิวเทชันคือการเปลี่ยนแปลงยีนของโครโมโซมแล้ว ในระบบจริงมิวเทชันก็จะเป็นการเปลี่ยนแปลงเชิงตัวเลขเช่นกัน การทำมิวเทชันเปรียบเสมือนการก้าวเดินไปสู่คำตอบของระบบ เช่นเดียวกับการทำครอสโอเวอร์ ยิ่งไปกว่านั้นการทำมิวเทชันยังสามารถถูกพิจารณาเพื่อทำให้เกิดความหลากหลายขึ้นในกลุ่มประชากร มีผลให้คำตอบที่เกิดขึ้นในขบวนการ GA ครอบคลุมพื้นที่ที่การค้นหาคำตอบได้ทั่วถึงยิ่งขึ้น [11]

ในงานวิจัยนี้การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PR กำหนดให้ $\omega_p = 2\pi(50)$ เรเดียนต่อวินาที ซึ่งวิธีการออกแบบจะเริ่มต้นจากการสุ่มค่าของ K_p และ K_i โดยกำหนด K_p อยู่ในช่วง [0-20] และ K_i อยู่ในช่วง [0-20] ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของ GA แสดงในตารางที่ 2 หลังจากนั้น GA จะคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้อยู่ในรูปของ z-domain ด้วยวิธี Bilinear Approximation ก่อนนำค่าที่ได้ไปใส่ในสมการของตัวควบคุม PR ใน z-domain ดังสมการ (3)

$$G_c(z) = K_p + \frac{Az+B}{z^2-2z+C} \quad (3)$$

$$A = K_i \omega_p T_s$$

$$B = -K_i \omega_p T_s$$

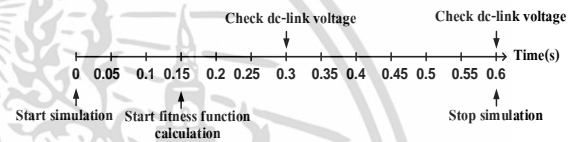
$$C = 1 + \omega_p^2 T_s^2$$

จากนั้นทำการกำหนดให้ค่าที่ 50 รุ่น (Generations) และในแต่ละรุ่น ให้คำนวณรอบละ 10 Individuals ในขณะกระบวนการทำ GA นั้นได้กำหนดให้ค่าความผิดพลาดของระบบ มีค่าน้อยที่สุดด้วยวิธี Integral of absolute error (IAE) ซึ่งมีความเหมาะสมกับวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน เนื่องจากมีการตอบสนองที่ไม่เร็วมากและมีการแกว่งกวัด (Oscillation) น้อย โดยเป็นการวัดค่าระหว่างกระแส

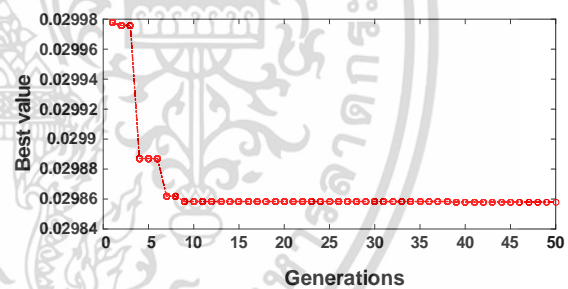
อ้างอิง i_s^* กับกระแสแหล่งจ่าย i_s ดังสมการ (4) เมื่อทำการหาค่ากระบวนการ GA แล้ว เราจะได้ค่าพารามิเตอร์ออกมาเช่น ค่าอัตราขยายและค่าความผิดพลาด

$$IAE = \int_{t_0}^T |i_s(t) - i_s^*(t)| dt \quad (4)$$

รูปที่ 7 แสดง Timing diagram ของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวควบคุมกระแส โดยกำหนดให้ $t_0 = 0.15$ s คือเวลาเริ่มต้น เพื่อให้ระบบเสถียรก่อนหาค่าที่เหมาะสมและ $T = 0.6$ s คือเวลาสิ้นสุดการคำนวณแต่ละรอบ นอกจากนี้มีการตรวจสอบความไม่เสถียรของระบบ ด้วยการวัดค่าแรงดัน DC-link ที่เวลา $t = 0.3$ ถึง 0.59 s



รูปที่ 7 Timing diagram ของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวควบคุมกระแส

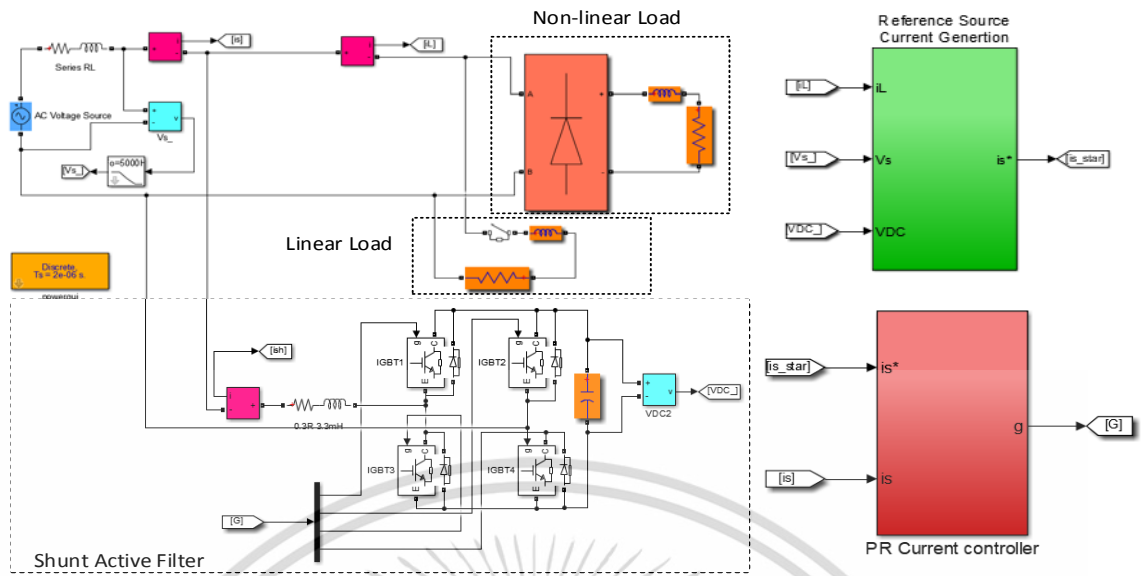


รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fitness Function กับจำนวนรอบ

หลังจากทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม GA แล้ว กราฟความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 8 ซึ่งจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกระแสชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ที่เหมาะสมที่สุดและมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด ค่า K_p มีค่าเท่ากับ 12.7254 และ K_i มีค่าเท่ากับ 9.7077 ตัวควบคุมสุดท้ายที่ได้แสดงดังสมการ (5)

$$G_c(z) = 12.7254 + \frac{0.0061z - 0.0061}{z^2 - 2z + 1} \quad (5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



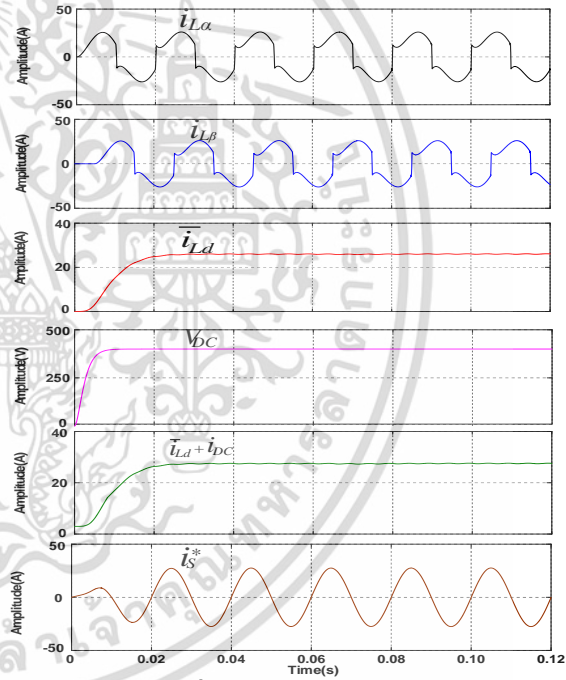
รูปที่ 9 บล็อกการจำลองของระบบ

4. ผลการจำลอง

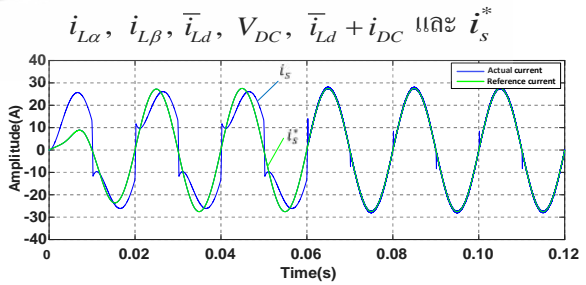
งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการทำงานของวงจรกำลังแอกทีฟ ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK (SimPowerSystems) ดังรูปที่ 9 โดยค่าพารามิเตอร์ของระบบแสดงในตารางที่ 1 ผลการจำลองแสดงดังต่อไปนี้

รูปที่ 10 แสดงการจำลองรูปคลื่นกระแสของการตรวจจับกระแสโหลดเพื่อกำเนิตสัญญาณอ้างอิงสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส บนแกนอ้างอิงดีควิว (D-Q Reference frame)

รูปที่ 11 แสดงรูปคลื่นสัญญาณระหว่าง i_s และ i_s^* ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ก่อนและหลังการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก ที่เวลา $t = 0.06$ s จะเห็นได้ว่าก่อนชดเชยกระแสฮาร์มอนิกนั้น กระแสที่แหล่งจ่าย มีรูปคลื่นที่ไม่เป็นไปตามรูปคลื่นกระแสอ้างอิง i_s^* แสดงว่ายังมีกระแสฮาร์มอนิกปะปนอยู่และหลังจากทำการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก ที่เวลา $t = 0.06$ s จะเห็นได้ว่ากระแสที่แหล่งจ่าย i_s มีรูปคลื่นใกล้เคียงรูปคลื่นกระแสอ้างอิง i_s^* ซึ่งแสดงว่าสามารถชดเชยกระแสฮาร์มอนิกได้จริง ส่งผลให้สามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม (%THD_i) จาก 27.18% เป็น 2.58% ซึ่งจะมีค่าลดลงต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับบทความ [5]-[12]

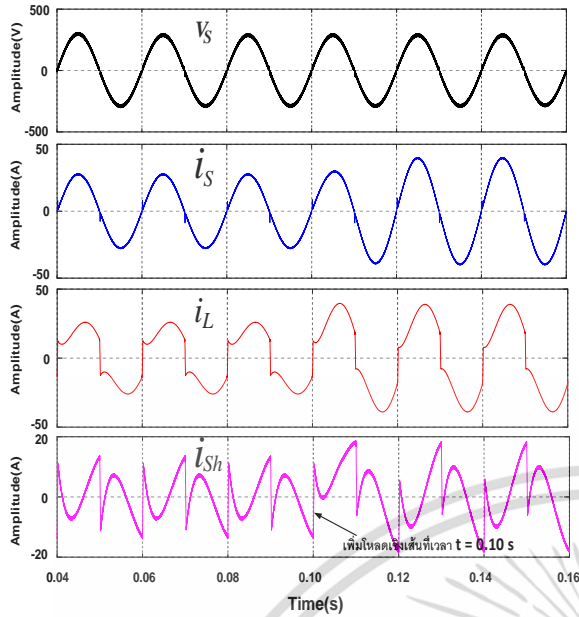


รูปที่ 10 รูปคลื่นสัญญาณ



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

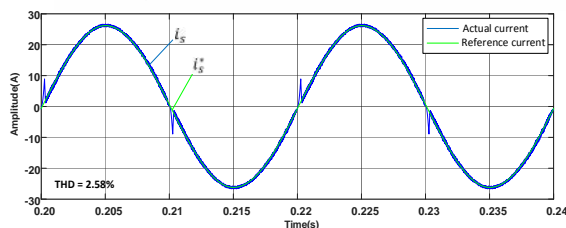


รูปที่ 12 รูปคลื่นสัญญาณของวงจรกริดกำลังแอกทีฟ

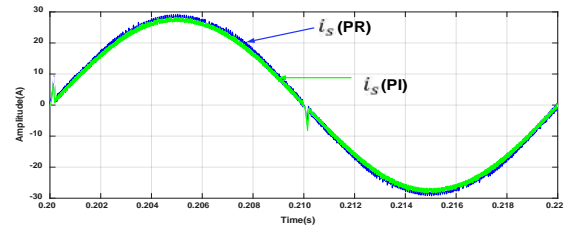
กรณีเพิ่มโหลดเชิงเส้น ที่เวลา $t = 0.10$ s

รูปที่ 12 แสดงรูปคลื่น V_s , i_s , i_L และ i_{sh} ขณะชดเชยกระแสฮาร์มอนิก กรณีเพิ่มโหลดเชิงเส้นที่เวลา $t = 0.10$ s จะเห็นได้ว่าระบบสามารถควบคุม i_s ติดตามสัญญาณอ้างอิง i_s^* ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้สามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก (%THD_i) จาก 17.13% เป็น 1.75%

รูปที่ 13 แสดงภาพขยายรูปคลื่นสัญญาณ i_s และ i_s^* ของรูปที่ 11 กรณีต่อโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่สภาวะคงตัว กระแสที่แหล่งจ่าย i_s มีรูปคลื่นสัญญาณเป็นรูปไซน์ที่สมบูรณ์และใกล้เคียงกับ i_s^* ที่ความถี่เท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ รูปที่ 14 เปรียบเทียบผลการตอบสนองระหว่างตัวควบคุม PI [6] และตัวควบคุม PR โดยสังเกตได้ว่าช่วงความชันสูงตัวควบคุม PR มีผลการตอบสนองที่รวดเร็วทำให้มีค่าความผิดพลาดของระบบน้อย ซึ่งดีกว่าตัวควบคุม PI



รูปที่ 13 รูปคลื่นสัญญาณ i_s และ i_s^* ที่สภาวะคงตัว



รูปที่ 14 เปรียบเทียบผลการตอบสนองระหว่างตัวควบคุม PI และตัวควบคุม PR

5. สรุปการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของวงจรกริดกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟสบนพื้นฐานเทคนิคการควบคุมกระแสแบบทางอ้อมโดยใช้ตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ที่ได้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุม ด้วยวิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม เพื่อเข้ามาช่วยหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ผลการจำลองเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ได้ออกแบบไว้ โดยสามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก (%THD_i) จาก 27.18% เป็น 2.58% กรณีโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นและสามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิก (%THD_i) จาก 17.13% เป็น 1.75% กรณีโหลดที่เชิงเส้นและโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ IEEE Std 519-2014 งานวิจัยในอนาคตจะเป็นการนำไปทดสอบกับระบบจริง

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบ

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
แหล่งจ่ายแรงดันและความถี่	220 Vrms, 50 Hz
โหลดแบบเชิงเส้น	25 mH, 20 Ω
โหลดแบบไม่เชิงเส้น	วงจรเรียงกระแส, 20 mH, 10 Ω
อิมพีแดนซ์ของตัวกริดแอกทีฟ	3.3 mH, 0.3 Ω
แรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง	400 V
คาปาซิเตอร์บัลแรงดันไฟตรง	1100 μF, 900 V
ความถี่การสวิตช์	20 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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
ค่าอัตราการกลายพันธุ์ (Mutation Rate)	0.05

6. กิตติกรรมประกาศ

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

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Report of the IEEE Task Force on the Effects of Harmonics on Equipment, “Effects of harmonics on equipment,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, No. 2, pp. 672–680, April 1993.
- [2] Jou, H.-004C., Wu, J.-C. and Chu, H.-Y., 1994, “New Single-Phase Active Power Filter,” IEE Proceedings-Electric Power Applications, Vol. 141, No. 3, pp. 129-134.
- [3] Zhang, R., Cardinal, M., Szczesny, P. and Dame, M., 2002, “A Grid Simulator with Control of Single-Phase Power Converters in D-Q Rotating Frame,” IEEE Power Electronics Specialists Conference, IEEE 33rd Annual, pp. 1431-1436.
- [4] Lenwari, W., 2013, “Optimized Design of Modified Proportional-Resonant Controller for Current Control of Active Filters,” 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), February 25-28, Cape Town, pp. 894-899.
- [5] Yodmanee, K. and Lenwari, W., 2016, “PI controller optimization for indirect current control for single-phase shunt active filter”, Ladkrabang Engineering Journal, Vol.33, No.1, March, pp. 42-47.
- [6] Lenwari, W., Sumner, M. and Zanchetta, P., 2009, “The Use of Genetic Algorithms for the Design of Resonant Compensators for Active Filters,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 8, pp. 2852-2861.
- [7] IEEE, 2014, “519-2014 IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,” IEEE Standard 519-2014 (Revision of IEEE Standard 519-1992), June 11, pp. 1-29.
- [8] Rahmani, S., Al-Haddad, K. and Fnaiech, F., 2003, “Reduced Switch Number Single-Phase Shunt Active Power Filter Using an Indirect Current Control Technique,” 2003 IEEE International Conference on Industrial Technology, December 10-12, pp. 1107-1112.
- [9] S. Fukuda and R. Imamura, “Application of a sinusoidal internal model to current control of three-phase utility-interface converters,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, no. 2, pp. 420–426, Apr. 2005
- [10] D. N. Zmood, D. G. Holmes, and G. Bode, “Frequency domain analysis of three phase linear current regulators,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, no. 2, pp. 601–610, Mar./Apr. 2001.
- [11] Haupt, R.L. and Haupt, S.E., 2004, Practical Genetic Algorithms, 2nd ed., John Wiley & Sons Press, United States of America, pp. 27-65.
- [12] Kongkachart, S. and Kinnarees, V., 2009, “Improvement of Indirect Current Control Algorithm Using Proportional Integral-Resonant Controller in Active Power Filters”, Ladkrabang Engineering Journal, Vol.26, No.4, December, pp. 25-30.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้