



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

การเปรียบเทียบตัวควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

Comparison of Compensating Current Controllers for Shunt Active Power Filter in Single-Phase Power Systems

มนีรัตน์ ผดุงศิลป์¹ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์^{1*} กองพล อารีรักษ์¹

¹ กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

Maneerat Padungsin¹ Tosaporn Narongrit^{1*} Kongpol Areerak¹

¹ Power Electronics, Energy, Machines and Control Research Group, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima 30000

* Corresponding author.

E-mail: tosaporn@sut.ac.th; Telephone: 0 4422 4402

วันที่รับบทความ 21 พฤษภาคม 2562; วันที่แก้ไขบทความ 16 กรกฎาคม 2562; วันที่ตอบรับบทความ 16 กรกฎาคม 2562

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบตัวควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (shunt active power filter: SAPF) สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส โดยจะทำการเปรียบเทียบการใช้ตัวควบคุม 3 ชนิด คือ ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส และตัวควบคุมทำนาย การตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมทั้งสามชนิดดังกล่าวจะใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (hardware in loop: HIL) ที่ใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experimental Kit โดยจะพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิก (%THD_i) ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยเป็นตัวบ่งชี้สมรรถนะการควบคุม ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์พบว่า ตัวควบคุมกระแสชดเชยทั้งสามชนิดสามารถควบคุมการบิดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟให้มีลักษณะตามกระแสอ้างอิงได้อย่างถูกต้อง แม้โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า %THD_i ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าลดลงและอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE std 519-2014 โดยในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมทำนายให้ค่า %THD_i ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยน้อยที่สุด นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลการตามรอยของกระแสชดเชยในช่วงที่รูปสัญญาณของกระแสอ้างอิงมีความชันสูง พบว่า ตัวควบคุมทำนายและตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสมีความไวในการตามรอยที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ

คำสำคัญ

การควบคุมกระแสชดเชย ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส ตัวควบคุมทำนาย วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน การกำจัดฮาร์มอนิก ฮาร์ดแวร์ในลูป

Abstract

This paper presents the comparison of compensating current controllers of shunt active power filter (SAPF) for single-phase power systems. The three compensating current controllers: PI controller, Hysteresis controller and predictive controller are compared. Hardware in loop simulation technique by Simulink/MATLAB program and TMS320C2000™ Experimental Kit DSP board is applied for the testing of controller's performance. The total harmonic distortion percentage (%THD_i) value of the source current after compensation is considered to indicate the performance of three controllers. The simulation results show that the compensating currents of SAPF controlled by the three controllers are tracked the reference current correctly even though the system load was changed. The %THD_i of the source current after compensation from all controllers are decreased and satisfied under the IEEE std 519-2014. Where the predictive controller provides the best result %THD_i value. In addition, when the signal of reference current has high slope shapes, the predictive and hysteresis controllers have response sensitivity in tracking the reference current more than the PI controller.

Keywords

compensating current control; PI controller; hysteresis controller; predictive controller; shunt active power filter; harmonic elimination; hardware in loop

1. บทนำ

ปัจจุบันทั้งโรงงานอุตสาหกรรมและบ้านพักอาศัยมีการใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear load) อย่างเป็นจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ วงจรควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ เครื่องสำอางไฟฟ้า เครื่องเชื่อมไฟฟ้า อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ และบลูสแต๊ดอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น โหลดเหล่านี้เมื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังทั้งในระบบหนึ่งเฟสและระบบสามเฟสจะก่อให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้า และจะส่งผลกระทบหลายประการ เช่น เกิดสัญญาณรบกวนในวงจรสื่อสาร [1] ทำให้อุปกรณ์ป้องกัน เช่น เบรกเกอร์และรีเลย์ ทำงานผิดพลาด [2] ก่อให้เกิดความร้อนจากกำลังงานสูญเสียในสายส่งและหม้อแปลงที่มากขึ้น และทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบมีอายุการใช้งานสั้นลง [3,4] เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นต้องกำจัดฮาร์มอนิกให้หมดหรือลดลงเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางไฟฟ้าและลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากฮาร์มอนิกดังกล่าว ในบทความนี้จะพิจารณาการกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส เนื่องจากเป็นระบบไฟฟ้าที่ถูกใช้

งานมาก วิธีการกำจัดฮาร์มอนิกที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่ 3 วิธี ได้แก่ การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ การใช้วงจรกรองกำลังแอ็กทีฟ และการใช้วงจรกรองกำลังไฮบริดที่ผสมผสานระหว่างวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟและพาสซีฟเข้าด้วยกัน อย่างไรก็ตามในบทความนี้เลือกใช้วงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานหรือวงจร SAPF เนื่องจากไม่ก่อให้เกิดปัญหาเรโซแนนซ์ซึ่งพบได้เมื่อใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ อีกทั้งยังให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดี และมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ [5] การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจร SAPF ในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยส่วนประกอบการทำงานร่วมกับวงจร SAPF จะแบ่งออกได้ 3 ส่วนที่สำคัญ ส่วนแรก คือ การตรวจจับฮาร์มอนิก (harmonic detection) ทำหน้าที่คำนวณกระแสฮาร์มอนิกเพื่อใช้เป็นกระแสอ้างอิงให้กับวงจร SAPF ซึ่งในบทความนี้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (sliding window with Fourier transform: SWFA) [6,7] เนื่องจากวิธีดังกล่าวสามารถคำนวณกระแสอ้างอิงได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และมีความรวดเร็วในการประมวลผล ส่วนที่สองคือ

$$\frac{I_C}{I_C^*} = \frac{\left(\frac{K_p s + K_I}{L_f} \right)}{s^2 + \left(\frac{K_p}{L_f} \right) s + \frac{K_I}{L_f}} \quad (1)$$

$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta s \omega_n + \omega_n^2} \quad (2)$$

$$K_p = 2\zeta \omega_n L_f \quad (3)$$

$$K_I = L_f \omega_n^2 \quad (4)$$

โดยที่ ζ คือ อัตราส่วนการหน่วง (damping ratio)

L_f คือ ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองเท่ากับ 8 mH

ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติในหน่วย rad/s

สำหรับการออกแบบค่า ζ จะกำหนดให้เท่ากับ $\sqrt{2}/2$

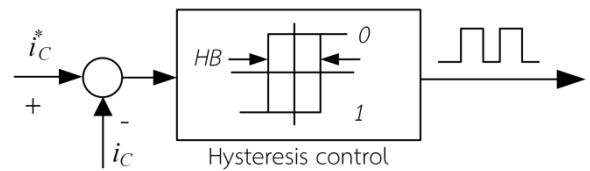
ส่วนค่า ω_n จะพิจารณาจากค่าความถี่ของอันดับฮาร์โมนิกสูงสุดที่ต้องการกำจัด ($f_{h,max}$) ซึ่งบทความนี้ต้องการกำจัดฮาร์โมนิกสูงสุดที่อันดับ 50 ที่มีค่าความถี่เท่ากับ 2500 Hz ดังนั้น จะสามารถคำนวณค่า ω_n ตามสมการที่ (5) ได้เท่ากับ 5000π rad/s

$$\omega_n = 2\pi f_{h,max} \quad (5)$$

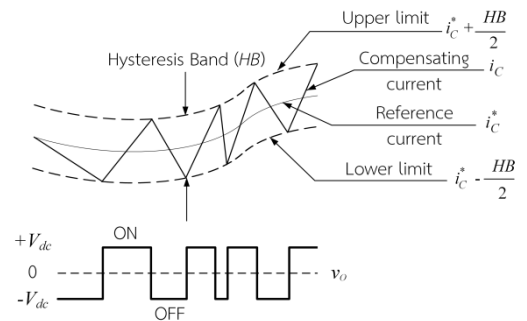
จากค่า ζ ค่า ω_n ดังกล่าวในข้างต้น จะสามารถคำนวณออกแบบค่า K_p และ K_I ของตัวควบคุมพีไอจากสมการที่ (3) และ (4) ได้ค่าเท่ากับ 177.69 และ 1.974×10^6 ตามลำดับ

2.2 การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส

การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสถือเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ให้ผลการตอบสนองทางพลวัตที่ดี มีวิธีการทำงานและการออกแบบที่ไม่ซับซ้อน อีกทั้งยังง่ายต่อการสร้างจริง [9,11] แผนภาพการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 โดยผลต่างระหว่างค่ากระแสอ้างอิง (i_C^*) และค่ากระแสชดเชย (i_C) จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าแถบฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis band: HB) เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ควบคุมการสวิตช์ให้กับวงจร SAPF กระแสชดเชยที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสจะมี



รูปที่ 4 ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส



รูปที่ 5 หลักการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส

ลักษณะแกว่ง (swing) ภายในขอบแบนของค่า HB ที่เกาะตามกระแสอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 5 จากรูปดังกล่าว ถ้ากระแสชดเชยมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าขอบบน (upper limit) สวิตช์จะหยุดนำกระแส (OFF) เพื่อให้กระแสชดเชยมีค่าตกลง และเมื่อค่ากระแสชดเชยตกลงจนถึงค่าขอบล่าง (lower limit) สวิตช์จะนำกระแส (ON) เพื่อทำให้กระแสชดเชยที่มีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้ง โดยจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ตลอดการทำงาน และจะส่งผลให้วงจร SAPF สามารถฉีดกระแสชดเชยได้ตามลักษณะรูปสัญญาณของกระแสอ้างอิง

ค่าแถบฮิสเตอร์ซิส (HB) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

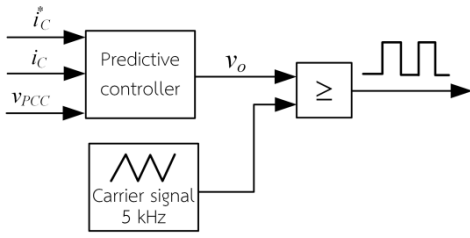
$$HB = \frac{V_{dc}^* - V_{PCC}}{L_f f_s} \quad (6)$$

โดยที่ V_{dc}^* คือ ค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง

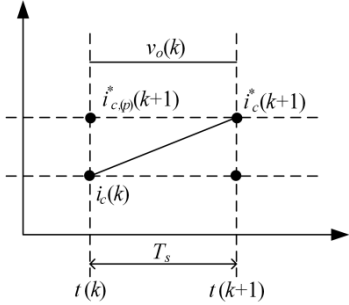
V_{PCC} คือ ค่ายอดแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ของระบบ

f_s คือ ค่าความถี่ในการสวิตช์สูงสุด

จากระบบที่พิจารณาในรูปที่ 1 V_{PCC} มีค่าเท่ากับ 312 V ค่า V_{dc}^* เท่ากับ 350 V และกำหนดให้ค่า f_s เท่ากับ 50 kHz



รูปที่ 6 ระบบควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมทำนาย



รูปที่ 7 หลักการทำงานของตัวควบคุมทำนาย

ดังนั้น จะสามารถคำนวณค่า HB ด้วยสมการที่ (6) ได้ค่าเท่ากับ 0.095 A

2.3 การควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมทำนาย

การควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมทำนายเป็นวิธีการควบคุมกระแสแบบดิจิทัลที่ช่วยลดความคลาดเคลื่อน (error) ของกระแสเนื่องจากการประวิงเวลาของตัวควบคุม อีกทั้งยังให้ผลการตอบสนองทางพลวัตที่ดีอีกด้วย [10,11] แผนภาพการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมทำนาย และหลักการควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

จากรูปที่ 6 ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจร SAPF (v_o) ที่ได้จากการคำนวณด้วยตัวควบคุมทำนายจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยมเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ควบคุมการสวิตช์ของวงจร SAPF ตามหลักการสวิตช์แบบ PWM โดยค่า v_o ดังกล่าว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7)

$$v_o = L_f \left(\frac{di_C}{dt} \right) + v_{PCC} \quad (7)$$

จากสมการที่ (7) สามารถใช้การคำนวณประมาณแบบไปข้างหน้า (forward difference approximation) แสดงได้ดังสมการที่ (8)

$$v_o(k) = \frac{L_f}{T_s} [i_C^*(k+1) - i_C(k)] + v_{PCC}(k) \quad (8)$$

โดย $v_{PCC}(k)$ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ของระบบ

T_s คือ คาบเวลาในการชั่งตัวอย่าง (สำหรับบทความนี้กำหนดใช้ค่าเท่ากับ 2×10^{-5} วินาที)

จากสมการที่ (8) ค่า $i_C^*(k+1)$ คือ ค่ากระแสชดเชยในอนาคต ซึ่งสามารถหาได้จากการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงทำนาย ($i_{C,(p)}^*(k+1)$) แทน นั่นคือ $i_C^*(k+1) = i_{C,(p)}^*(k+1)$ ดังแสดงในรูปที่ 7 การคำนวณค่า $i_{C,(p)}^*(k+1)$ ดังกล่าว จะอาศัยสมการของลากรานจ์ (Lagrange's equations) ดังสมการที่ (9) อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาใช้การคำนวณ $i_{C,(p)}^*(k+1)$ แบบการประมาณด้วยสมการลากรานจ์อันดับที่ 1 ($n=1$) จะสามารถคำนวณค่า $i_{C,(p)}^*(k+1)$ ได้ด้วยสมการที่ (10) เมื่อ $i_C^*(k)$ และ $i_C^*(k-1)$ คือ ค่ากระแสอ้างอิงค่าปัจจุบันและค่าในอดีต ตามลำดับ ที่ได้จากส่วนการตรวจจับฮาร์มอนิก

$$i_{C,(p)}^*(k+1) = a_0 i_C^*(k) + a_1 i_C^*(k-1) + \dots + a_n i_C^*(k-n) \quad (9)$$

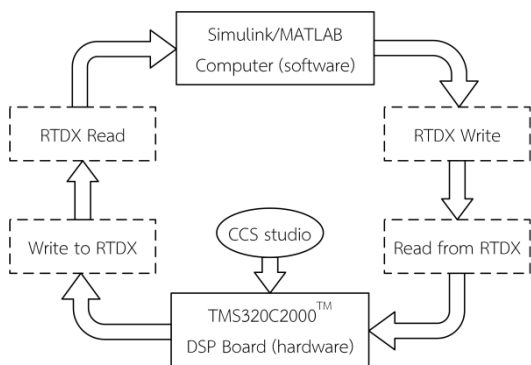
โดยที่ $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ลากรานจ์

$$i_{C,(p)}^*(k+1) = a_0 i_C^*(k) + a_1 i_C^*(k-1) \quad (10)$$

สำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ลากรานจ์ ($a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$) ของ $i_{C,(p)}^*(k+1)$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (11)

$$i_{C,(p)}^*(k+1) = \sum_{l=0}^n (-1)^{n-l} \frac{(n+1)!}{l!(n+1-l)!} \cdot i_{C,(p)}^*(k+l-n) \quad (11)$$

จากสมการที่ (11) ในกรณีที่ $n=1$ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ลากรานจ์ คือ $a_0 = 2$ และ $a_1 = -1$ ดังนั้น จะสามารถเขียนสมการที่ (10) ได้ใหม่ดังสมการที่ (12)



รูปที่ 8 แผนภาพการทำงานของระบบฮาร์ดแวร์ในลูป

$$i_{C,(p)}^*(k+1) = 2i_C^*(k) - i_C^*(k-1) \quad (12)$$

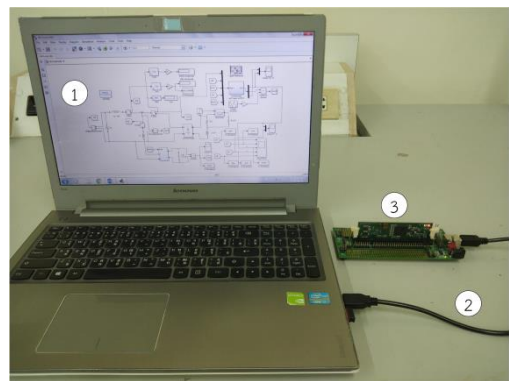
หลังจากคำนวณหาค่า $i_{C,(p)}^*(k+1)$ ได้แล้ว ลำดับต่อไปของการควบคุมแบบทำนาย คือ การคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุต $v_o(k)$ ของวงจร SAPF ด้วยสมการที่ (13) สำหรับนำไปผ่านเทคนิคการสวิตช์แบบ PWM ต่อไป

$$v_o(k) = \frac{L_f}{T_s} [i_{C,(p)}^*(k+1) - i_C(k)] + v_{PCC}(k) \quad (13)$$

จากการอธิบายหลักการทำงานและรวมไปถึงการออกแบบตัวควบคุมกระแสชดเชยทั้งสามชนิดดังกล่าวมาทั้งหมดในหัวข้อนี้ จะถูกนำไปเขียนโปรแกรมสร้างเป็นระบบควบคุมให้กับวงจร SAPF บนบอร์ด DSP และจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยของตัวควบคุมแต่ละชนิด ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้จากหัวข้อที่ 3 และ 4

3. การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป

การตรวจสอบผลสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจร SAPF ในระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 1 บทความนี้จะใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (hardware in loop: HIL) [12] ที่ใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000TM Experimental Kit โดยแผนภาพการทำงานของระบบการจำลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 8 กระบวนการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่าง

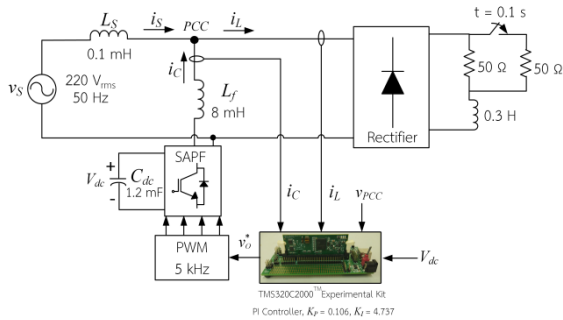


1. Simulink/MATLAB 2. USB JTAG emulator
3. TMS320C2000TM Experimental Kit

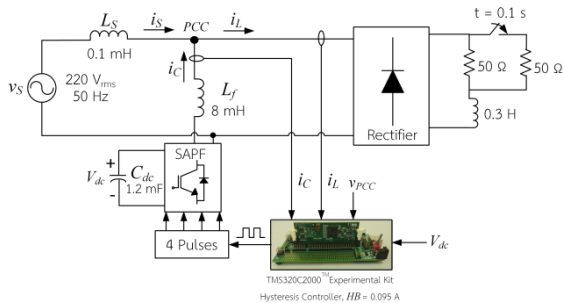
รูปที่ 9 การเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000TM Experimental Kit

โปรแกรม Simulink และบอร์ด DSP จะเชื่อมต่อกันทางสาย USB JTAG emulation ดังแสดงในรูปที่ 9

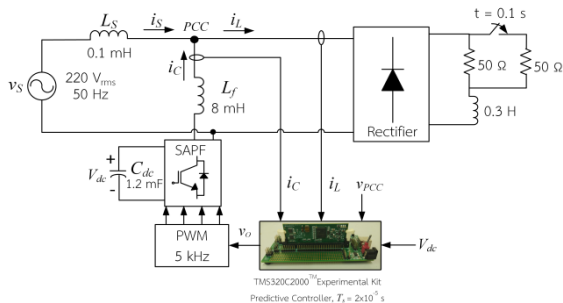
จากระบบที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกในรูปที่ 1 เมื่อนำไปสร้างเป็นระบบสำหรับจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปที่แยกตามกรณีชนิดของตัวควบคุมกระแสชดเชย คือ กรณีใช้ตัวควบคุมพีไอ กรณีใช้ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส และกรณีใช้ตัวควบคุมทำนาย จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10 ถึง 12 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าว ระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสที่ต่อเข้ากับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (วงจรเรียงกระแสที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ) และวงจร SAPF จะถูกสร้างขึ้นบนโปรแกรม Simulink โดยใช้บล็อกในไลบรารี Simscape /Power Systems ในขณะที่การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA [7] การควบคุมกระแสชดเชย และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงจะถูกโปรแกรมที่บอร์ด DSP ระบบจำลองสถานการณ์ทั้งสามกรณีชนิดตัวควบคุมจะใช้ข้อมูลอินพุตที่เหมือนกัน คือ ค่ากระแสโหลด (i_L) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC (v_{PCC}) ค่ากระแสชดเชย (i_C) ป้อนกลับ และค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ในขณะที่ข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จากบอร์ด DSP สำหรับกรณีใช้ตัวควบคุมพีไอคือค่าแรงดันอ้างอิง (v_o^*) (ดังรูปที่ 10) และกรณีใช้ตัวควบคุมทำนายคือค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจร SAPF (v_o) ที่ได้จากการคำนวณแบบทำนาย (ดังรูปที่



รูปที่ 10 ระบบจำลองสถานการณ์การณืใช้ตัวควบคุมพีไอ

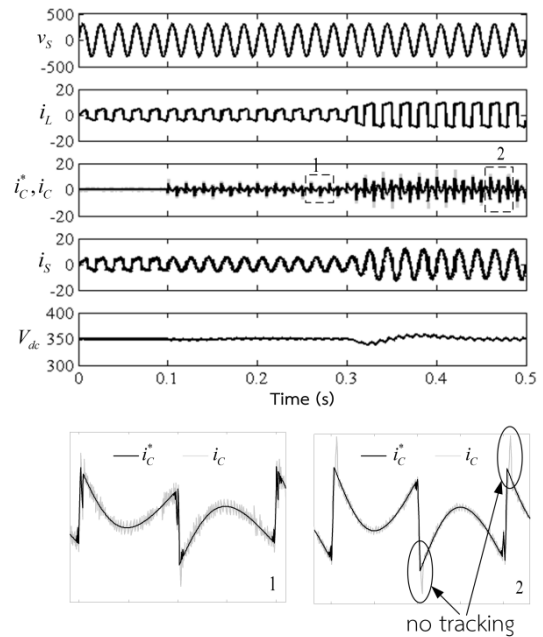


รูปที่ 11 ระบบจำลองสถานการณ์การณืใช้ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส



รูปที่ 12 ระบบจำลองสถานการณ์การณืใช้ตัวควบคุมทำนาย

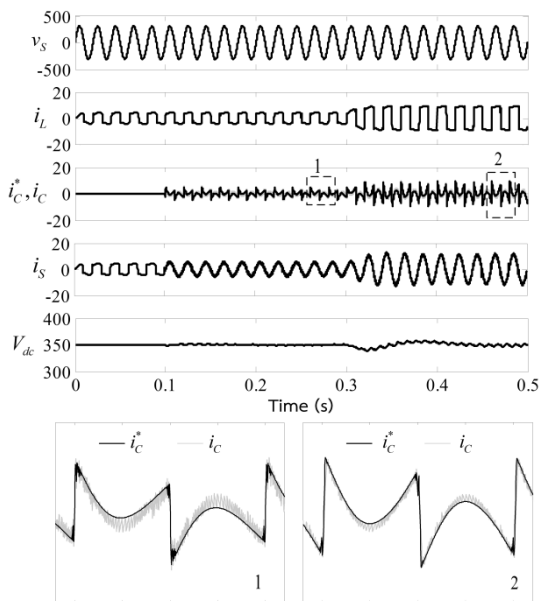
12) ซึ่งค่าเหล่านี้จะถูกส่งไปยังโปรแกรม Simulink และนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะรูปสาม เหลี่ยมเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ควบคุมการสวิตช์ให้กับวงจร SAPF ตามเทคนิค PWM ส่วนข้อมูลเอาต์พุตสำหรับกรณีที่ใช้ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสคือสัญญาณพัลส์ควบคุมการสวิตช์ของวงจร SAPF โดยตรง (ดังรูปที่ 11) จากระบบจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป ทั้งสามกรณีดังกล่าว สามารถดูผลการจำลองสถานการณ์การก่้าจัดฮาร์โมนิกได้ในหัวข้อที่ 4



รูปที่ 13 การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ

4. ผลการจำลองสถานการณ์

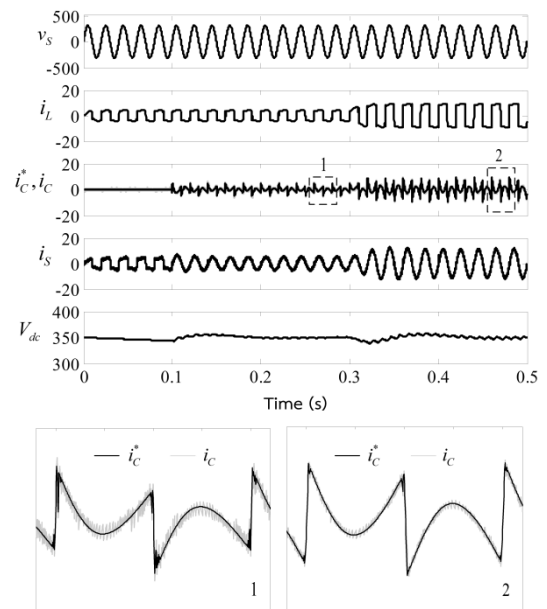
ผลการจำลองสถานการณ์การก่้าจัดฮาร์โมนิกของระบบกรณีใช้ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส และตัวควบคุมทำนายดังรูปที่ 10 ถึง 12 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 13 ถึง 15 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าว ในช่วงเวลา 0 ถึง 0.1 วินาที เป็นช่วงเวลาก่อนมีการชดเชย ซึ่งจะสังเกตได้ว่า ลักษณะของกระแสที่แหล่งจ่าย (i_s) มีลักษณะผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์ เหมือนกับกระแสโหลด (i_L) ทุกประการ โดยวัดค่า %THD_i ก่อนการชดเชยได้เท่ากับ 43.87% อย่างไรก็ตามตั้งแต่เวลา 0.1 ถึง 0.3 วินาที เมื่อวงจร SAPF ทำการฉีดกระแสชดเชย (i_c) ที่มีลักษณะคล้ายตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง (i_c^*) ที่ได้จากการตรวจจบบาร์โมนิกด้วยวิธี SWFA เข้าสู่ระบบไฟฟ้า จะเห็นได้ว่า รูปสัญญาณของ i_s มีลักษณะเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์มากขึ้น โดยวัดค่า %THD_i ภายหลังการชดเชยสำหรับกรณีที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส และตัวควบคุมทำนายได้เท่ากับร้อยละ 4.76 4.08 และ 3.81 ตามลำดับ ซึ่งค่า %THD_i



รูปที่ 14 การควบคุมกระแสขดเคียวด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส

ดังกล่าวได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 นอกจากนี้ ที่เวลา 0.3 วินาที เป็นต้นไป โหลดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีการเปลี่ยนแปลง ขนาดกระแสเพิ่มขึ้น ซึ่งจะสังเกตได้ว่า วงจร SAPF ร่วมกับการใช้ตัวควบคุมกระแสขดเคียวทั้งสามชนิดยังคงมีความยืดหยุ่น สามารถฉีดกระแสขดเคียวได้ตามลักษณะรูปสัญญาณของ กระแสอ้างอิงที่เปลี่ยนแปลงได้ จึงส่งผลให้ i_s ยังคงมีลักษณะ เป็นรูปไซน์ต่อเนื่อง โดยสามารถวัดค่า %THD_i ของ i_s หลัง โหลดเปลี่ยนแปลงได้ค่าเท่ากับร้อยละ 4.07 3.63 และ 3.16 ตามลำดับชนิดตัวควบคุม ซึ่งสามารถดูผลได้จากตารางที่ 1 จากตารางดังกล่าว พบว่า ค่า %THD_i ภายหลังการชดเชยกรณี ที่ใช้ตัวควบคุมทำนายมีค่าน้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตามค่า %THD_i ภายหลังการชดเชยทั้งหมดยังคงอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE 519-2014

เมื่อพิจารณาผลการตามรอย (tracking) ของ i_c ในช่วงที่ รูปสัญญาณ i_c^* ที่มีความชันสูงดังรูปขยายในรูปที่ 13 ถึง 15 จะสังเกตเห็นได้ว่า รูปสัญญาณของ i_c ที่ควบคุมโดยใช้ตัว ควบคุมฮีสเตอร์ซิสและตัวควบคุมทำนาย (รูปที่ 14 และ 15) มี ค่าความคลาดเคลื่อนในการตามรายน้อยกว่ากรณีที่ใช้ตัว



รูปที่ 15 การควบคุมกระแสขดเคียวด้วยตัวควบคุมทำนาย

ควบคุมพีไอ (รูปที่ 13) จากผลดังกล่าวหมายความว่า ตัว ควบคุมฮีสเตอร์ซิสและตัวควบคุมทำนายมีความไวในการ ตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ

จากผลค่า %THD_i ในตารางที่ 1 และผลการตามรอยของ กระแสขดเคียวดังกล่าวในช่วงต้น สามารถสรุปได้ว่าตัวควบคุม แบบทำนายสามารถให้ผลสมรรถนะการควบคุมกระแสขดเคียว ของวงจร SAPF ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส และตัว ควบคุมพีไอ เรียงตามลำดับ

นอกจากนี้ สำหรับผลการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ในรูปที่ 13 ถึง 15 สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีไอ ($K_P = 0.106$ และ $K_I = 4.737$) [8] มีสมรรถนะที่ดีสามารถควบคุม ค่า V_{dc} ให้มีค่าเท่ากับ 350 V ตามค่าอ้างอิง (V_{dc}^*) ได้ตลอดทุก ช่วงเวลา

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการ ควบคุมกระแสขดเคียวของวงจรรอกกำลังแยกที่ฟแบบขนาน ในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสโดยใช้ตัวควบคุม 3 ชนิด คือ ตัว

ตารางที่ 1 ค่า %THD_i ของกระแสที่แหล่งจ่าย (i_g)

ชนิดตัวควบคุม	%THD _i ก่อนการชดเชย	%THD _i หลังการชดเชย	
		ก่อนเปลี่ยนแปลงโหลด	หลังเปลี่ยนแปลงโหลด
PI	43.87%	4.76%	4.07%
Hysteresis		4.08%	3.63%
Predictive		3.81%	3.16%

ควบคุมพีไอ ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส และตัวควบคุมทำนาย โดยผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมกระแสชดเชยทั้งสามชนิดสามารถควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟให้ฉัดกระแสชดเชยที่มีลักษณะตามกระแสอ้างอิงได้อย่างถูกต้องทั้งในช่วงเวลาก่อนการเปลี่ยนแปลงโหลดและหลังการเปลี่ยนแปลงโหลด ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีลักษณะเป็นรูปไซน์ และมีค่า %THD_i อยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE 519-2014 โดยกรณีที่ใช้ตัวควบคุมทำนายให้ค่า %THD_i น้อยที่สุด นอกจากนี้ ผลการตามรอยของกระแสชดเชยในช่วงที่รูปสัญญาณของกระแสอ้างอิงมีความชันสูงพบว่า ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสและตัวควบคุมทำนายมีสมรรถนะการตามรอยที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมถึงสถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wagner VE, Balda JC, Griffith DC. Effects of harmonics on equipment. *IEEE Trans. Power Del.* 1993; 8(2): 672–680.
- [2] IEEE std 519-2014. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. 2014.

- [3] Hiranandani A. Calculation of Cable Ampacities Including the Effects of Harmonics. *IEEE Ind. Appl. Mag.* 1998: 42–51.
- [4] Henderson RD, Rose PJ. Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformers. *IEEE Trans. on Ind. Appl.* 1994; 30(3): 528–532.
- [5] Izhar M, Hadzer CM, Syafrudin M, Taib S, Idris S. Performance for Passive and Active Power Filter in Reducing Harmonics in The Distribution system. In: *Proceedings of Power and Energy Conference, PECon. Kuala Lumpur, Malaysia, 29-30 November*. 2004. p. 104–108.
- [6] Habrouk ME, Darwish MK. Design and implementation of a modified Fourier analysis harmonic current computation technique for power active filters using DSPs. *IEE Proc.-Electr. Power Appl.* 2001; 148: 21–28.
- [7] มณีรัตน์ ผดุงศิลป์, ทศพร ณรงค์ฤทธิ์, กองพล อารีรักษ์. การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อนสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส. *TNI Journal of Engineering and Technology*. 2017; 5(2): 10–13.
- [8] Rahmani S, Mendalek N, Al-Haddad K. Experimental Design of a Nonlinear Control Technique for Three-Phase Shunt Active Power Filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010; 57: 3364–3375.
- [9] Dahono PA. New hysteresis current controller for single-phase full-bridge inverters. *IET Power Electron.* 2009; 2(5): 585–594.
- [10] Tiayrachakun S, Areerak KP, Areerak KN. Instantaneous Power Theory with Fourier and Optimal Predictive Controller Design for Shunt Active Power Filter. *Hindawi Publishing Corporation*

Modelling and Simulation in Engineering, Article ID 38176. 2014.

- [11] มณีนรัตน์ ผดุงศิลป์, ทศพร ณรงฤทธิ์, กองพล อารีรักษ์.
การเปรียบเทียบตัวควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรอง
กำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่ง
เฟส. ใน: การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่
41, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีร่วมกับมหาวิทยาลัยศรี
ปทุม, 21-23 พฤศจิกายน 2561. 2561. หน้า 193-196.
- [12] Narongrit T, Areerak KL. Areerak KN. A New Design
Approach of Fuzzy Controller for Shunt Active
Power Filter. *Electric Power Components and
Systems*. 2015; 43: 685-694.