

เทคนิคการควบคุมกระแสแบบสัดส่วนบวกกรีซแนนซ์สำหรับอินเวอร์เตอร์ต่อเข้า ระบบจำหน่ายในกรณีแรงดันระบบจำหน่ายมีความผิดเพี้ยน

Proportional plus Resonant (PR) Current Controller for Grid Connected- Inverter under Grid Distortion

ชาญฤทธิ์ ชารานันตีสุข^{1*} ทองอินทร์ สุธะทา¹ วุฒิพล ชาราธิ์เศรษฐ์²

¹Power Electronics and Energy Research Lab (PEER)

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

*Corresponding author: E-mail: chanrit.t@rmutk.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

ถนนรังสิต-นครนายก อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก

E-mail: vuttipon@g.swu.ac.th

บทคัดย่อ

การควบคุมกระแสอินเวอร์เตอร์แบบต่อเข้าระบบจำหน่ายแบบสัดส่วนบวกกรีซแนนซ์ (PR) เป็นเทคนิคการควบคุมกระแสแบบใหม่ที่สามารถลดความผิดเพี้ยนของกระแส (THD_i) ให้ได้ตามมาตรฐานการเชื่อมต่อ IEEE Std. 1547-2003 โดยระบบทดสอบอินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบ HIL ขนาด 2.5 kW ด้วยตัวกรองแบบ LCL ที่ด้านเข้าที่พุดของอินเวอร์เตอร์ ภายใต้เงื่อนไขแรงดันระบบจำหน่ายมีความผิดเพี้ยน การทดลองด้วยตัวควบคุมกระแสแบบสัดส่วนบวกกรีซแนนซ์ที่ความถี่กรีซแนนซ์ 50 Hz และตัวควบคุมกระแสที่มีชดเชยฮาร์มอนิกของกระแส ในสภาวะที่แรงดันระบบจำหน่ายมีความผิดเพี้ยนด้วยฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และ 7 ผลทดลองในสภาวะจ่ายโหลดแบบแยกอิสระและแบบต่อเข้าระบบจำหน่ายได้คุณภาพกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกต่ำกว่า 5 % ตามมาตรฐานการเชื่อมระบบไฟฟ้า

คำสำคัญ: การควบคุมกระแสแบบสัดส่วนบวกกรีซแนนซ์ อินเวอร์เตอร์ และฮาร์ดแวร์จำลองระบบ

ABSTRACT

The new proportional plus resonant (PR) current controller for grid-connected inverter is studied and implemented in this paper. With the PR current controller, the total harmonic distortion of the current (THD_i) waveform can be reduced and can be complied with the IEEE standard (IEEE Std. 1547-2003). The 2.5 kW Inverter with LCL filter using hardware-in-the-loop (HIL) under various condition of input voltage distortions is experimented. Finally, the experimental results show that the designed PR current controller at resonant frequency of 50 Hz can be suppressed the THD_i below 5 % under grid voltages which contains dominant odd-order harmonics i.e. 5th and 7th.

Keyword: Proportional plus Resonant (PR) Current Controller, Inverter and Hardware in the loop (HIL)

1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนมากขึ้น ทำให้มีการใช้งานอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงผันพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจำหน่ายมากขึ้น อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีการมอดูเลตสัญญาณ (SPWM) หรือแบบสเปซเวกเตอร์ (SVPWM) เกิดฮาร์โมนิกที่ความถี่สวิตช์ (Switching frequency) จำเป็นต้องใช้ตัวกรองกระแสแบบตัวเหนี่ยวนำ (L) เพื่อให้ความถี่มูลฐาน 50 Hz ผ่านเข้าสู่ระบบจำหน่าย [1] ซึ่งการใช้ตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว จะต้องใช้ค่าเหนี่ยวนำสูงเพื่อลดฮาร์โมนิกของกระแสให้ต่ำกว่า มาตรฐานการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบกระจายตัว [2], [3] ผลคือขนาดตัวเหนี่ยวนำใหญ่ มีค่าความสูญเสียสูง ดังนั้นเพื่อลดขนาดและควบคุมกระแสฮาร์โมนิก จึงได้มีการวิจัยด้านตัวกรองกระแสแบบ LCL ซึ่งเมื่อใช้ตัวควบคุมกระแสแบบ PR จะมีปัญหาเรื่องเสถียรภาพของวงรอบกระแสจากความถี่รีโซแนนซ์ของชุดวงจรกรอง LC [4] ดังนั้นจึงมีการใช้ตัวกรองกระแสแบบ LCL ที่มีตัวหน่วงแบบพาสซีฟสามารถแก้ปัญหาเรื่องเสถียรภาพแต่มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ตัวต้านทานหน่วง (R_d) จึงได้มีการวิจัยโดยใช้ตัวกรองกระแสแบบ LCL ที่มีตัวหน่วงแบบแอกทีฟ [6] ทำให้ได้ประสิทธิภาพสูง กระแสฮาร์โมนิกต่ำ

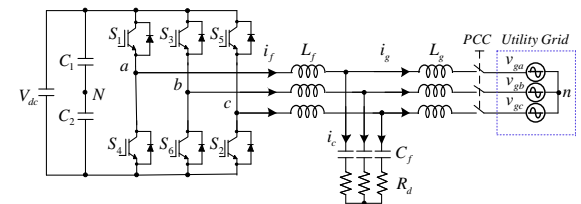
การควบคุมกระแสแบบพีไอในแกนอ้างอิงซิงโครนัส (Synchronously reference frame, I_{dq}) ให้ค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ ($e_{ss} = 0$) [1] แต่ด้วยเงื่อนไขที่แรงดันระบบจำหน่ายผิดเพี้ยนด้วยฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 และ 7 ทำให้ประสิทธิภาพของการควบคุมกระแสบนแกนอ้างอิงซิงโครนัสลดลง และฮาร์โมนิกของกระแสเกินมาตรฐานการเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่ายงานวิจัยด้วยตัวควบคุมกระแสแบบสัดส่วนบวกรีโซแนนซ์ สามารถลดปัญหาของการควบคุมกระแสแบบเดิม โดยใช้ควบคุมกระแสบนแกนอ้างอิงนิ่ง (stationary reference frame, $i_{\alpha\beta}$) [7], [8] ในงานวิจัยนี้จะใช้การชดเชยฮาร์โมนิกด้วยตัวควบคุมสัดส่วนบวกรีโซแนนซ์ที่ฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 และ 7 ตัวควบคุมที่นำเสนอมีข้อดีคือ สามารถลดฮาร์โมนิกลำดับต่ำได้และสร้างตัวควบคุมเพื่อชดเชยฮาร์โมนิกได้ง่าย บทความนี้

จะนำเสนอโครงสร้างอินเวอร์เตอร์ต่อเข้าระบบจำหน่าย ทฤษฎีตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกรีโซแนนซ์ และผลทดลองด้วยฮาร์ดแวร์จำลองระบบอินเวอร์เตอร์สามเฟส (HIL)

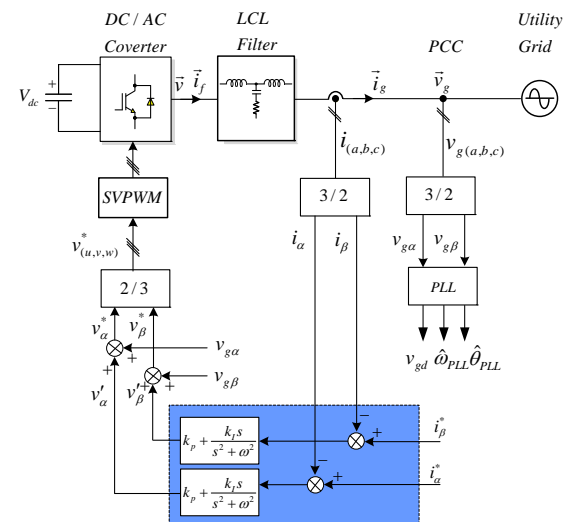
2. อินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบต่อเข้าระบบจำหน่าย

2.1 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์สามเฟสต่อเข้าระบบจำหน่าย

บล็อกไดอะแกรมอินเวอร์เตอร์ในการเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าในระบบสามเฟส ประกอบด้วย 4 ส่วน คือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส การควบคุมแบบดิจิตอล และวงจรกรองความถี่ต่ำ แสดงดังรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 1. อินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบต่อระบบจำหน่าย



รูปที่ 2. บล็อกไดอะแกรมควบคุมระบบอินเวอร์เตอร์

2.2 การควบคุมกระแสบนแกนอ้างอิงนิ่ง (stationary reference frame, $i_{\alpha\beta}$)

การควบคุมกระแสบนแกนอ้างอิงหนึ่งคือกระแส α และ β ในปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับสองเฟส โดยสมการกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าปรากฏแสดงดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$P = \frac{2}{3}(v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) \quad (1)$$

$$Q = \frac{2}{3}(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) \quad (2)$$

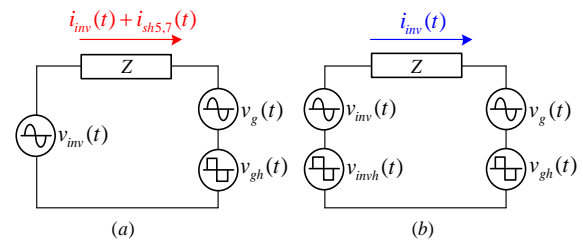
ซึ่งจากสมการกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าปรากฏจะสามารถคำนวณหากระแสอ้างอิง (i_α^*, i_β^*) จากสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$i_\alpha^* = \frac{3}{2} \frac{P^* v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \quad (3)$$

$$i_\beta^* = \frac{3}{2} \frac{Q^* v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \quad (4)$$

2.3 คุณลักษณะความผิดเพี้ยนของแรงดันระบบจำหน่าย

จากรูปที่ 2 เมื่อแรงดันระบบจำหน่ายมีความผิดเพี้ยน สามารถพิจารณาแรงดันที่จุดร่วมระหว่างอินเวอร์เตอร์ (PCC) ซึ่งเป็นผลรวมแรงดันระหว่างระบบจำหน่ายและแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดเชื่อมต่อ วงจรสมมูลทางไฟฟ้าจากกรณีแรงดันระบบจำหน่ายผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกแสดงจากรูปที่ 3(a) จากในกรณีดังกล่าวจะส่งผลโดยตรงต่อเฟสล็อกกลูปและค่ากระแสคำสั่ง i_α^*, i_β^* ของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟส ดังนั้นเมื่อคำนวณหาค่ากระแสคำสั่งโดยใช้สมการที่ (1) ถึง (4) จะพบว่ากระแสคำสั่งที่ได้มีการกระเพื่อมในลักษณะเช่นเดียวกับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ โดยค่ากระแสคำสั่งที่มีความผิดเพี้ยนส่งผลให้กระแสที่จ่ายเข้าระบบจำหน่ายให้มีความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกตามไปด้วย แนวการแก้ไขปัญหาดังกล่าว สามารถแก้ไขได้ด้วยการเพิ่มการชดเชยฮาร์มอนิกด้วยสมการที่ (7) ในวงรอบของระบบควบคุมวงจรสมมูลทางไฟฟ้าเมื่อมีการชดเชยฮาร์มอนิกแสดงดังรูปที่ 3(b)



รูปที่ 3 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์ภายใต้การพิจารณากรณีความผิดเพี้ยนของแรงดันระบบจำหน่าย

a) กรณีไม่มีการชดเชยฮาร์มอนิก b) กรณีมีการชดเชยฮาร์มอนิก

3. การออกแบบตัวควบคุมกระแสแบบสัดส่วนบวกรีโซแนนซ์

การเลือกใช้งานตัวควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟสเมื่อเปรียบเทียบตัวควบคุมทั้งสองแบบระหว่างพีไอและพีอาร์ ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกรีโซแนนซ์ (พีอาร์) จะมีข้อได้เปรียบดังนี้

3.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกรีโซแนนซ์สามารถติดตามสัญญาณแรงดันและความถี่ของระบบจำหน่ายได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอ และสภาวะอยู่ตัวมีค่าเป็นศูนย์

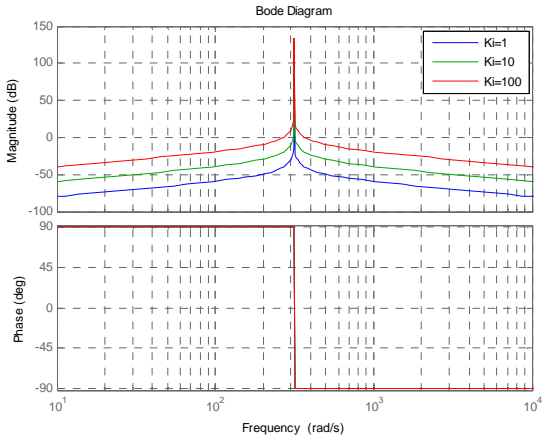
3.2 อัตราขยายตัวควบคุมสัดส่วนบวกรีโซแนนซ์ในอุดมคติจะขยายเป็นอนันต์ที่ความถี่มูลฐานของระบบจำหน่าย ซึ่งสมการอุดมคติของตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกรีโซแนนซ์แสดงได้ดังสมการที่ (5)

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_i s}{s^2 + \omega^2} \quad (5)$$

จากข้อจำกัดเมื่อใช้อัตราขยายอนันต์ที่ความถี่ของมูลฐาน 50 Hz จะทำให้ไม่เกิดการเลือนของมุมเฟสและไม่เกิดอัตราขยายที่ความถี่อื่น ซึ่งในทางปฏิบัติอัตราขยายที่มีค่าอนันต์ อาจนำไปสู่ปัญหาเสถียรภาพของระบบ ดังนั้น การปรับปรุงตัวควบคุมเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวโดยจะใช้สมการที่ (6)

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_i \omega_c s}{s^2 + \omega_c^2 s + \omega_h^2} \quad (6)$$

รูปที่ 4 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ด้วยแผนภาพโบเดของสมการที่ (6) โดยเปรียบเทียบค่าอัตราขยาย K_i ตัวควบคุมในอุดมคติ ซึ่งจะพบว่าที่อัตราขยายสูงจะได้ผลตอบสนองทางเอาท์พุทมีค่าเป็นศูนย์



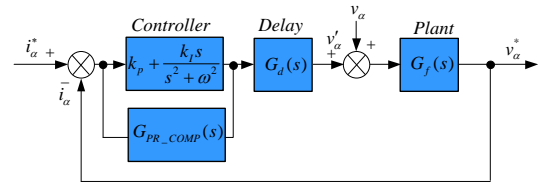
รูปที่ 4 แผนภาพโบเดทางอุดมคติตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกรีโซแนนซ์

3.3 ตัวควบคุมสัดส่วนบวกรีโซแนนซ์สามารถเพิ่มการชดเชยฮาร์มอนิกที่ไม่ต้องการที่อาจเกิดขึ้นจากความผิดเพี้ยนของแรงดันระบบจำหน่าย โดยเพิ่มการชดเชยระบบควบคุมกระแสตามสมการที่ (7) จะช่วยขจัดสัญญาณรบกวน

$$G_{PR_COMP}(s) = K_p + \frac{2K_i\omega_c s}{s^2 + \omega_c^2 s + \omega_h^2} + \frac{2K_i\omega_5 s}{s^2 + \omega_5^2 s + \omega_h^2} + \frac{2K_i\omega_7 s}{s^2 + \omega_7^2 s + \omega_h^2} \quad (7)$$

จากรูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมวงรอบกระแสประกอบด้วย 3 ส่วน บล็อกตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกรีโซแนนซ์, บล็อกตัวกรองกระแสและบล็อกผลของเวลาหน่วง (delay time) สมการที่ (8) แสดงถึงผลของเวลาหน่วงจากการประมวลผลสัญญาณในระบบเวลาไม่ต่อเนื่องของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟส

$$G_{PR}(s) = e^{-1.5T_d s} \quad (8)$$



รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมควบคุมในวงรอบกระแส

เมื่อพิจารณาบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 5 สามารถเขียนทรานเฟอร์ฟังก์ชันวงรอบเปิดระบบควบคุมได้จาก

$$G_{OL}(s) = G_{PR}(s)G_d(s)G_{LCL}(s) \quad (9)$$

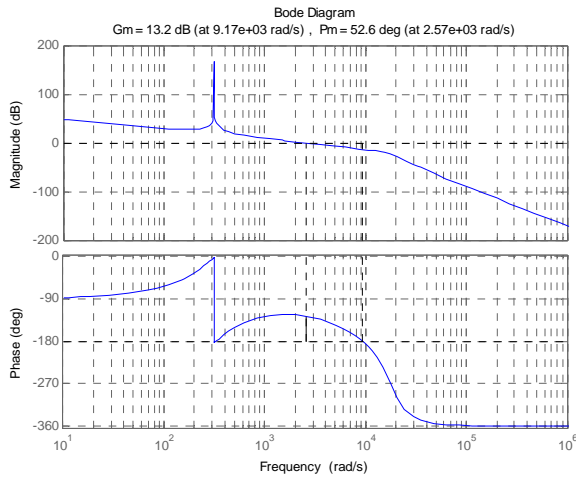
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันวงจรกรองกระแสแบบ LCL

$$G_{LCL}(s) = \frac{C_f R_f s + 1}{L_1 C_f L_2 s^3 + C_f R_d (L_1 + L_2) s^2 + (L_1 + L_2) s} \quad (10)$$

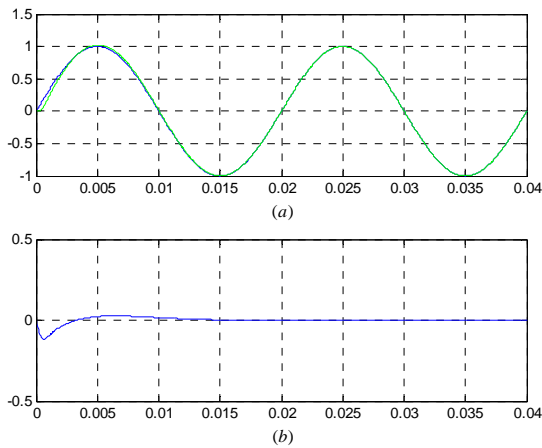
จากสมการที่ (8) ถึง (10) สามารถเขียนทรานเฟอร์ฟังก์ชันวงรอบเปิดสำหรับควบคุมระบบเขียนได้ดังนี้

$$G_{CL}(s) = \frac{G_{PR}(s)G_d(s)G_{LCL}(s)}{1 + G_{PR}(s)G_d(s)G_{LCL}(s)} \quad (11)$$

การออกแบบวงรอบระบบควบคุมแบบรีโซแนนซ์ของระบบควบคุมชั้นวงรอบเปิดดังในรูปที่ 5 แสดงเฉพาะกระแสคำสั่งบนแกน α การออกแบบเลือกความถี่ตัดข้าม $\omega_0 \approx 2500 \text{ rad/sec}$ และเลือกความถี่ $\omega_{cn} \approx 20\%$ ของความถี่ ω_0 จากการออกแบบอัตราขยายจะได้ $k_p = 9.6$ และ $k_i = 5000$ เมื่อนำค่าพารามิเตอร์แทนค่าในสมการที่ (11) จะได้ผลตอบสนองทางความถี่ดังรูปที่ 6 ได้ส่วนเฟสเท่ากับ 53° และส่วนเฟสอัตราขยายเท่ากับ 13.2 dB ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานการทดสอบการติดตามสัญญาณอ้างอิงไซน์ระหว่างอินพุตและเอาท์พุทจากวงรอบควบคุมปิดแสดงได้จากรูปที่ 7a ระบบสามารถควบคุมเอาท์พุทติดตามค่าสัญญาณอินพุตอ้างอิงเริ่มต้นได้ภายในเวลาเข้าที่ 15 ms ซึ่งมีความเร็วเพียงพอต่อการใช้งาน และจากรูปที่ 7b ค่าผิดพลาดสัญญาณ (error) มีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 6 แผนภาพโบเดทรานเฟอ์ฟังก์ชันระบบควบคุมวงรอบเปิด

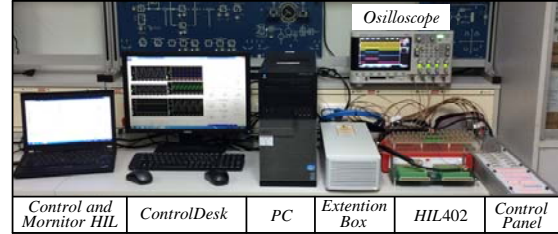


รูปที่ 7 a) การติดตามสัญญาณไซน์อ้างอิง b) ค่าความผิดพลาด (error)

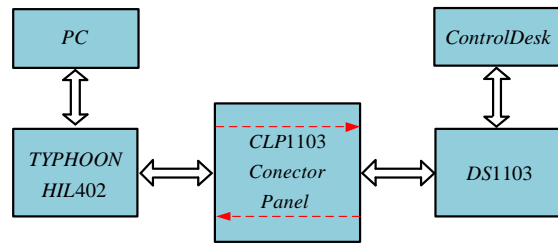
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
พิกัดอินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบแหล่งจ่ายแรงดัน	2500	W
แหล่งจ่ายแรงดันดีซี, V_{DC}	750	V
แรงดันกริดสามเฟส, v_{an}	240	V_{rms}
ตัวเหนี่ยวนำด้านอินเวอร์เตอร์, L_f	2.3	mH
ตัวเก็บประจุ, C_f	10	μF
ตัวต้านทาน, R_d	5	Ω
ตัวเหนี่ยวนำด้านกริด, L_g	1.8	mH
ความถี่สวิตช์, f_s	16	kH_z
อัตราขยาย k_p, k_i	9.6, 5000	-
เวลาการสุ่มสัญญาณ, T_s	6.25	μs

4. ผลการทดลองระบบอินเวอร์เตอร์สามเฟสด้วยฮาร์ดแวร์จำลองระบบ (HIL)



รูปที่ 8 ภาพระบบอินเวอร์เตอร์เข้าระบบจำหน่ายด้วยฮาร์ดแวร์จำลองระบบอินเวอร์เตอร์



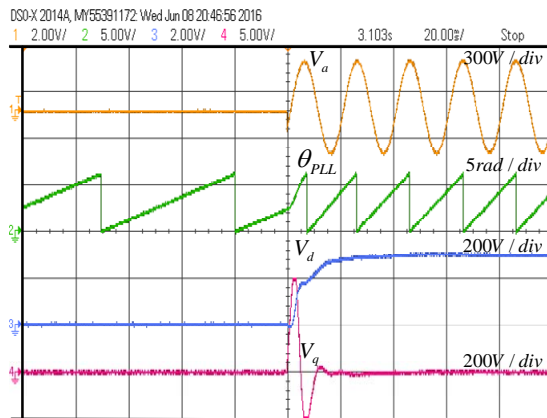
รูปที่ 9 โครงสร้างฮาร์ดแวร์จำลองวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบต่อเข้าระบบจำหน่าย

การทดลองระบบควบคุมด้วยฮาร์ดแวร์จำลองระบบอินเวอร์เตอร์ รุ่น HIL402 ดังในรูปที่ 8 จะสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ และกำหนดค่าพารามิเตอร์ตารางที่ 1 ด้วยโปรแกรม Schematic และ Control Panel (HIL 402) โดยรับสัญญาณสเปซเวกเตอร์พัลส์วิดมอดดูเลชัน (SVPWM) ควบคุมไोजีบีทีจากช่องสัญญาณ Digital I/O ส่วนค่ากระแสและแรงดันผ่านช่องสัญญาณ Analog I/O ตามรูปที่ 9 การทดลองแบบนี้ทำให้ลดการสูญเสียจากวงจรกำลัง และทดสอบเงื่อนไขแรงดันระบบจำหน่ายได้สะดวกมากขึ้น ระบบควบคุมใช้การ์ดอินเตอร์เฟส dSPACE รุ่น DS1103 ซึ่งระบบควบคุมประกอบด้วยเฟสล็อกกลุ่ม ตัวควบคุมกระแสบนแกน α, β แบบสัดส่วนบวกรีโซแนนซ์ โดยการทดลองตามขั้นตอนดังนี้

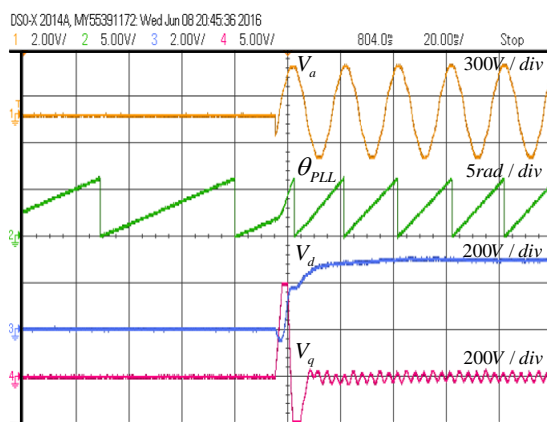
4.1 การทดสอบเฟสล็อกกลุ่มสำหรับการซิงโครไนซ์เข้าระบบจำหน่าย

ผลการทดลองการทำงานของเฟสล็อกกลุ่มระหว่างกรณีที่แรงดันระบบจำหน่ายไม่ผิดเพี้ยนทางฮาร์โมนิก และแรงดันระบบจำหน่ายผิดเพี้ยนทางฮาร์โมนิก แสดง

ในรูปที่ 10 - 11 ตามลำดับ การทำงานในสภาวะปกติ เมื่อเฟสล็อกถูปรวจจับแรงดันระบบจำหน่ายสามเฟส (V_a) จะแปลงให้อยู่ปริมาณของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง (V_d) และใช้ตัวควบคุมพีไอเพื่อกำจัดค่า ความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเป็นศูนย์ การออกแบบ กำหนดให้อัตราหน่วง (ζ) เท่ากับ 0.7 แรงดันด้านออก จากบล็อกกำเนิดความถี่ควบคุมด้วยแรงดัน (VCO) เป็น แรงดันมุมทางไฟฟ้า (θ_{PLL}) สำหรับเป็นมุมเฟสอ้างอิง การซิงโครไนซ์เข้าระบบจำหน่าย แสดงในรูปที่ 10 แต่ เมื่อแรงดันระบบจำหน่ายผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกลำดับ 5,7 ที่ค่า 8 % ของแรงดันมูลฐาน ผลทำให้เกิดแรงดัน กระเพื่อมที่ความถี่ของฮาร์มอนิก แสดงในรูปที่ 11



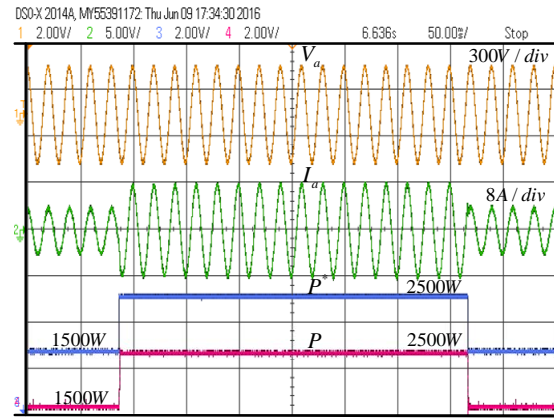
รูปที่ 10 ผลการทดลองเฟสล็อกถูปรวจจับสามเฟสสำหรับ ซิงโครไนซ์เข้าระบบจำหน่าย



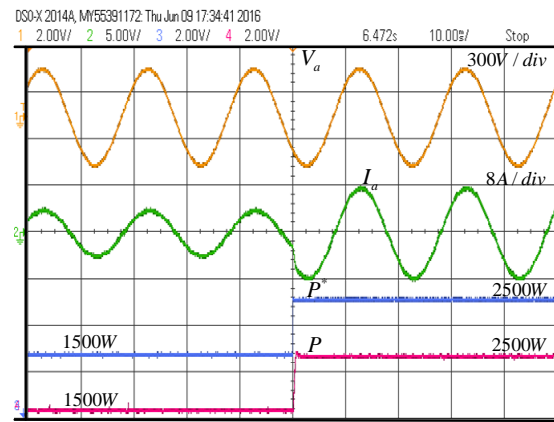
รูปที่ 11 ผลการทดลองเฟสล็อกถูปรวจจับสามเฟสกรณีระบบ จำหน่ายที่ผิดเพี้ยนด้วยฮาร์มอนิกลำดับ 5,7

4.2 ทดลองด้วยตัวควบคุมสัดส่วนบวกรีโซแนนซ์ ที่ ความถี่ 50 Hz

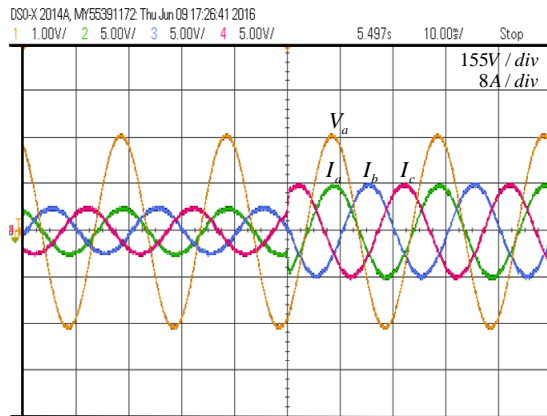
การทดลองในหัวข้อนี้ใช้เงื่อนไขในกรณีของ แรงดันระบบจำหน่ายปกติ ผลการทดลองเชื่อมต่อ อินเวอร์เตอร์เข้าระบบจำหน่ายด้วยการควบคุมกระแส แบบสัดส่วนบวกรีโซแนนซ์การเปลี่ยนคำสั่งกำลังไฟฟ้า อ้างอิงแบบขั้นที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 1500 W ไปที่ 2500 W ผลการทดลองตลอดช่วงของการเปลี่ยนแปลงคำสั่งจ่าย กำลังไฟฟ้าจริง (P^*) และกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้ (P) สามารถติดตามค่าคำสั่งได้ทุกช่วงของการทำงาน ค่า ความผิดเพี้ยน THD_i ของกระแสเท่ากับ 2.24% แสดง ในรูปที่ 12 - 14



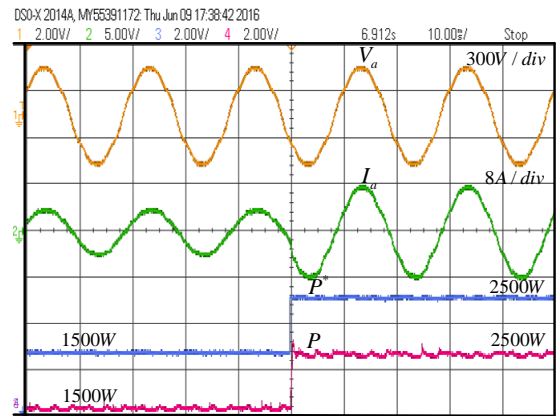
รูปที่ 12 ผลการทดลองอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อเข้าระบบ จำหน่ายด้วยการเปลี่ยนแปลงคำสั่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง



รูปที่ 13 ผลการทดลองอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อเข้าระบบ จำหน่ายในขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 1500W ไปที่ 2500 W



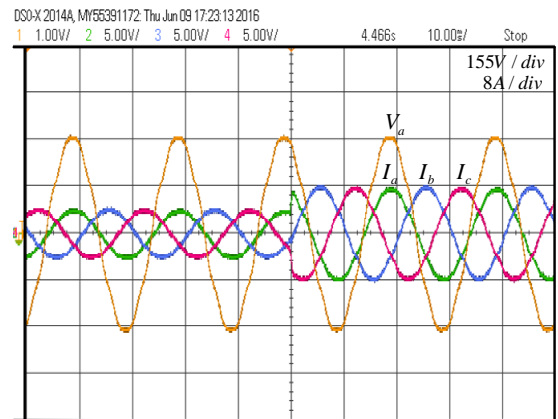
รูปที่ 14 ผลการทดลองอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อเข้าระบบ
จำหน่ายในขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 1500 W ไปที่ 2500 W



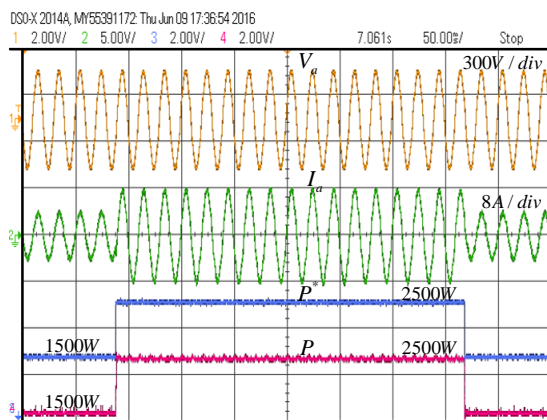
รูปที่ 16 ผลการทดลองอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อเข้าระบบ
จำหน่ายในขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 1500 W ไปที่ 2500 W

4.3 ทดลองตัวควบคุมสัดส่วนส่วนบวกริโซแนนซ์ที่มีการ
ชดเชยฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และ 7

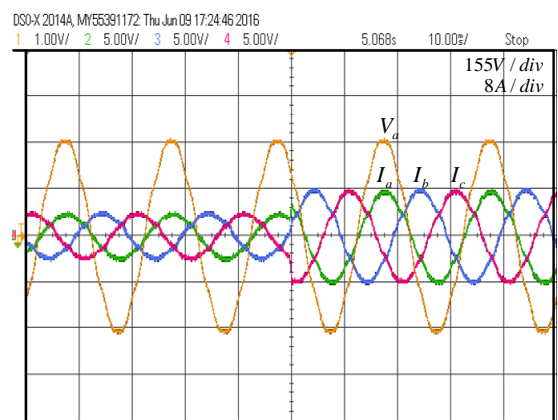
การทดลองกับระบบจำหน่ายโดยทำการเพิ่ม
แรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ 5, 7 ที่ค่า 8 % ของแรงดัน
หลักมูล ผลการทดลองการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้า
ระบบจำหน่ายด้วยตัวควบคุมที่มีการชดเชยฮาร์มอนิก
ตลอดช่วงของการทำงานค่ากำลังไฟฟ้าคำสั่งและกำลัง
ไฟฟ้าที่วัดได้ยังคงให้ผลตอบสนองเช่นเดิม แสดงในรูป
ที่ 15 ค่าความผิดเพี้ยน THD_i ของกระแส 2.02 % และ
ในกรณีที่ไม่มีชดเชยฮาร์มอนิก 4.02 % แสดงในรูป
ที่ 17 และ 18 ตามลำดับ



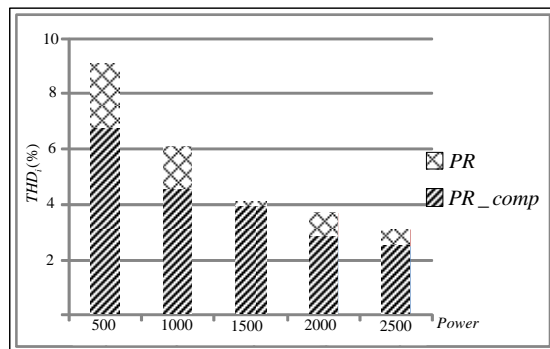
รูปที่ 17 ผลการทดลองกระแสและแรงดันอินเวอร์เตอร์ที่
มีการชดเชยฮาร์มอนิก



รูปที่ 15 ผลการทดลองอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อเข้าระบบ
จำหน่ายด้วยการเปลี่ยนแปลงคำสั่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง



รูปที่ 18 ผลการทดลองกระแสและแรงดันอินเวอร์เตอร์ที่
ไม่มีการชดเชยฮาร์มอนิก



รูปที่ 19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้า

5. สรุป

การควบคุมกระแสแบบสัดส่วนบวกกรีไซแอนซ์โดยใช้เทคนิคการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และ 7 เมื่อทดลองกับระบบจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วยฮาร์ดแวร์จำลองระบบ (HIL402) ขนาด 2.5 kW โดยใช้ตัวควบคุมกระแสที่ออกแบบได้ค่า THD_i น้อยกว่า 5% เมื่อซิงโครไนซ์กับระบบจำหน่ายที่แรงดันผิดเพี้ยน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สัญญาเลขที่ 357/2557

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Teodorescu, R., Liserre, M., and Rodríguez, P., "Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems," Wiley, 1st Ed., pp. 205-236, 2011.
- [2] IEEE. Std. 1547-2003 "Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems," ISBN 0-7381-3720-0 SH95144, 2003.
- [3] IEEE. Std. 1547.1-2005 "IEEE Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems", 2005.

- [4] M. Liserre, A. Dell'Aquila, and F. Blaabjerg, "Stability improvements of an LCL-filter based three-phase active rectifier," *PESC*, vol. 2, pp. 1195 - 1201, 2002.
- [5] R. N. Beres, X. Wang, F. Blaabjerg, M. Liserre, and C. L. Bak, "Optimal Design of High-Order Passive-Damped Filters for Grid-Connected Applications," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 31, no. 3, pp. 2083-2098, 2016.
- [6] P. C. Loh and D. G. Holmes, "Analysis of Multiloop Control Strategies for LC/CL/LCL-Filtered Voltage-Source and Current-Source Inverters," *IEEE Trans on Industry App.*, vol. 41, no. 2, pp. 644-654, 2005.
- [7] D. Zmood and D. G. Holmes, "Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 18, no. 3, pp. 814-822, 2003.
- [8] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre, and P. C. Loh, "Proportional-Resonant Controllers and Filters for Grid-Connected Voltage-Source Converters," *IEE Proceedings on Electric Power Applications*, vol. 15, issue 5, 2006.
- [9] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. V. Timbus, "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems," *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, vol. 53, pp. 1398-1409, 2006.
- [10] S.-K. Chung, "Phase-Locked Loop for grid-connected three-phase power conversion systems," *IEE Proceedings on Electronic Power Applications*, vol. 147, no. 3, pp. 213-219, 2000.