

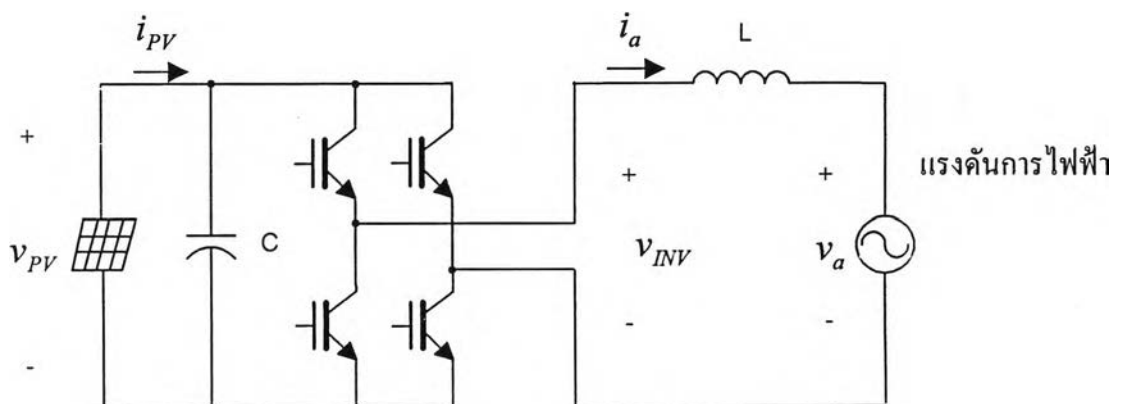
บทที่ 2

อินเวอร์เตอร์และการควบคุมกระแส

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงวิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้จ่ายกระแสด้านออกที่มีความผันผวนต่ำ และมีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่งแก่การไฟฟ้า โดยอาศัยการป้อนไปหน้าและการป้อนกลับ กระแสผ่านตัวควบคุม PI โดยเราจะเริ่มต้นอธิบายถึงอินเวอร์เตอร์เป็นลำดับแรกเพื่อให้เข้าใจถึง โครงสร้างและหลักการทำงาน จากนั้นจึงกล่าวถึงวิธีการควบคุมกระแสและผลการทดสอบระบบ ตามลำดับ

2.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์

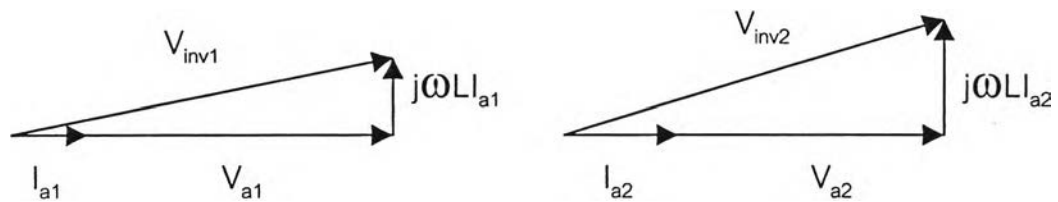
ในการวิจัยนี้เราได้เลือกใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์เนื่องจากต้องการแรงดันไฟตรง ด้านเข้าต่ำกว่าแบบครึ่งบริดจ์ ที่ด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์จะมีตัวเก็บประจุต่อขนานกับเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เพื่อลดผลกระทบคลื่นแรงดันไฟสลับของแรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายออกไปจึงมีแต่องค์ประกอบไฟตรงทำให้ไม่เกิดการแกว่งรอบๆ จุดทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่ตัดต่อแรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมกับแรงดันการไฟฟ้า แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ (V_{INV}) จะถูกสร้างขึ้นเพื่อควบคุมกระแสด้านออกให้มีค่าตามกำหนดดังจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์

2.2 การควบคุมกระแส

เมื่อพิจารณาที่ความถี่หลักมูล เฟสเซอร์ของกระแสด้านออกจะถูกกำหนดจากเฟสเซอร์ของแรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำซึ่งเป็นผลต่างระหว่างเฟสเซอร์ของแรงดันอินเวอร์เตอร์กับแรงดันการไฟฟ้า ดังนั้นหากเราสามารถปรับเปลี่ยนเฟสเซอร์ของแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เราก็จะสามารถปรับเปลี่ยนขนาดของกระแส โดยยังคงเฟสของกระแสให้ตรงกับเฟสของแรงดันการไฟฟ้า



รูปที่ 2.2 แผนภาพเฟสเซอร์กรณีเฟสของกระแส I_a ตรงกับเฟสของแรงดัน V_a

เราได้เลือกใช้วิธีการสร้างแรงดันอินเวอร์เตอร์จากการป้อนไปหน้าของแรงดันการไฟฟ้า (V_a) และการชดเชยแรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำตามที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น นอกจากนี้เรายังเพิ่มวงรอบการป้อนกลับค่ากระแสเพื่อลดผลความผิดพลาดจากการมอดูเลตความกว้างพัลส์ของอินเวอร์เตอร์และความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ รวมทั้งความผิดพลาดของอุปกรณ์ตรวจวัด ดังแสดงในสมการที่ 2.1 และแผนภาพบล็อกการควบคุมกระแสในรูปที่ 2.3 เพื่อให้ได้กระแสที่จ่ายแก่การไฟฟ้ามีค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง ค่ากระแสที่ใช้อ้างอิงของการควบคุมแบบป้อนกลับจะถูกสร้างขึ้นจากสมการที่ 2.2 โดยที่ความถี่ (ω) และเฟส (ωt) ของกระแสอ้างอิงจะถูกกำหนดจากวงรอบล็อกเฟส (PLL) เพื่อให้เข้าจังหวะและมีเฟสตรงกันกับแรงดันการไฟฟ้า ส่วนค่ายอดของกระแสอ้างอิง (i_m^*) จะถูกกำหนดจากส่วนตรวจหาค่าถึงสูงสุดเพื่อควบคุมกำลังด้านออกของอินเวอร์เตอร์ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวถึงในบทที่ 3

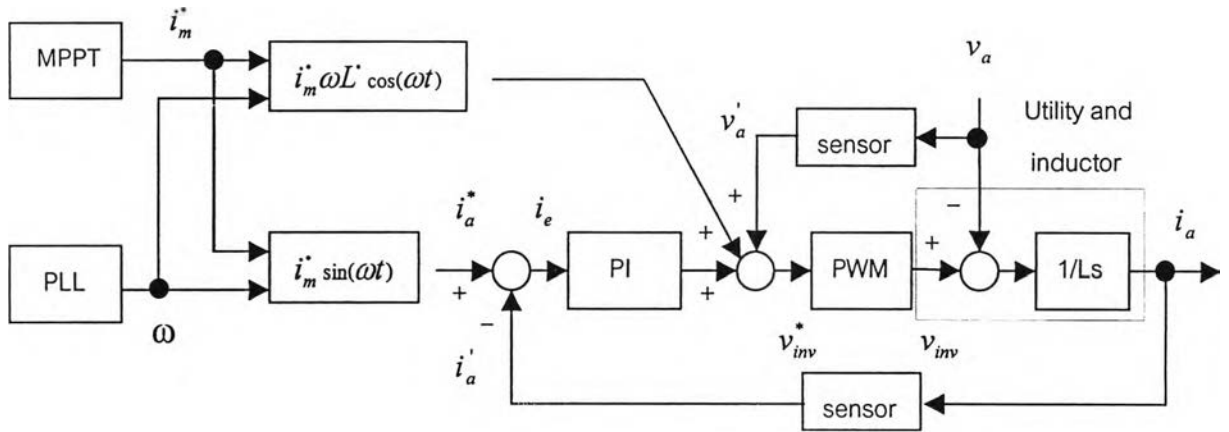
$$v_{inv}^* = v_a + i_m^* \omega L \cos(\omega t) + K_p (i_a^* - i_a) + K_I \int (i_a^* - i_a) dt \quad (2.1)$$

$$i_a^* = i_m^* \sin(\omega t) \quad (2.2)$$

โดยที่

v_{inv}^* คือ แรงดันคำสั่งของอินเวอร์เตอร์

- i_a^* และ i_m^* คือ กระแสอ้างอิง และ ค่ายอดของกระแสอ้างอิง ตามลำดับ
- v_a' และ i_a' คือ แรงดันการไฟฟ้า และ กระแสด้านออกที่ตรวจจับได้
- L^* คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำที่กำหนดขึ้นสำหรับการชดเชย
- K_p และ K_i คือ อัตราขยายของตัวควบคุม PI



รูปที่ 2.3 แผนภาพบล็อกการควบคุมกระแส

ในการวิเคราะห์ระบบเราจะประมาณความผิดพลาดของแรงดันคำสั่งกับแรงดันอินเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้นจากการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ด้วยสัญญาณ v_{DT} ดังแสดงในสมการที่ 2.3 ซึ่งเป็นแรงดันที่เกิดจากผลการประวิงเวลา (Dead time) สัญญาณ v_{DT} จะถูกประมาณว่าเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาดคงที่ แต่เครื่องหมายขึ้นกับทิศทางของกระแส

$$v_{inv}^* + v_{DT} = v_{inv} = L \frac{di_a}{dt} + v_a \quad (2.3)$$

เพื่อความสะดวกต่อการวิเคราะห์ เราจะสมมติว่าเราสามารถตรวจจับแรงดันการไฟฟ้าและกระแสด้านออกได้อย่างถูกต้อง ($v_a' = v_a$ และ $i_a' = i_a$) และเมื่อแทนค่าสัญญาณคำสั่งจากสมการที่ 2.1 และ 2.2 ลงในสมการที่ 2.3 จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสด้านออกดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$i_m^* \omega L^* \cos(\omega t) + K_p [i_m^* \sin(\omega t) - i_a'] + K_i \int_0^t [i_m^* \sin(\omega t) - i_a'] dt + v_{DT} = L \frac{di_a}{dt} \quad (2.4)$$

ในที่นี้เราต้องการให้รูปคลื่นของกระแสมีความเพี้ยนต่ำ ดังนั้นเราจึงกำหนดค่ายอดของกระแสคำสั่งให้มีค่าคงตัว (I_m^*) ตลอดหนึ่งคาบของสายกำลัง และจะแปรเปลี่ยนค่าได้ขณะที่มุมเฟส

มีค่าเท่ากับศูนย์เท่านั้น ส่วนความถี่ (ω) จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ จึงประมาณได้ว่ามีค่าคงตัวในแต่ละคาบ ดังนั้นเราจึงสามารถวิเคราะห์เชิงความถี่จากการแปลงลาปลาซได้ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6

$$\frac{s\omega LI_m^*}{s^2 + \omega^2} + \frac{\omega K_p I_m^*}{s^2 + \omega^2} - K_p I_a(s) + \frac{\omega K_I I_m^*}{s(s^2 + \omega^2)} - \frac{K_I}{s} I_a(s) + V_{DT}(s) = L(sI_a(s) - I_a(0)) \quad (2.5)$$

$$I_a(s) = \frac{\omega I_m^*}{s^2 + \omega^2} \cdot \frac{Ls^2 + K_p s + K_I}{Ls^2 + K_p s + K_I} + \frac{s}{Ls^2 + K_p s + K_I} V_{DT}(s) + \frac{Ls \cdot I_a(0)}{Ls^2 + K_p s + K_I} \quad (2.6)$$

กระแสผิดพลาด $I_e(s)$ สามารถหาได้จากผลต่างของกระแสคำสั่งในสมการที่ 2.2 ที่ได้ทำการแปลงลาปลาซแล้ว $I_a^*(s)$ กับกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ $I_a(s)$ ในสมการที่ 2.6 ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 2.7

$$\begin{aligned} I_e(s) &= I_a^*(s) - I_a(s) \\ &= \underbrace{\frac{\omega \Delta L I_m^* s^2}{(Ls^2 + K_p s + K_I)(s^2 + \omega^2)}}_{I_{\Delta L}(s)} + \underbrace{\frac{s}{Ls^2 + K_p s + K_I} V_{DT}(s)}_{I_{DT}(s)} + \underbrace{\frac{Ls \cdot I_a(0)}{Ls^2 + K_p s + K_I}}_{I_O(s)} \quad (2.7) \end{aligned}$$

โดยที่ $\Delta L = L - L^*$ เป็นผลต่างของตัวเหนี่ยวนำจริงกับตัวเหนี่ยวนำที่กำหนดขึ้น

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัวจากสมการที่ 2.7 พบว่าพจน์ชั่วสุด $I_O(s)$ ซึ่งเกิดจากค่าตั้งต้นที่ไม่เท่ากับศูนย์ จะมีผลตอบสนองชั่วคราวและมีขนาดลดลงตามเวลาจนสามารถละเลยได้ เช่นเดียวกันพจน์ชั่วสุด $I_{\Delta L}(s)$ ซึ่งเกิดจากความไม่ตรงกันของค่าจริงและค่ากำหนดของตัวเหนี่ยวนำ ผลตอบสนองจะประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกมีลักษณะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลจนละเลยได้ ส่วนหลังเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ยังคงปรากฏในสภาวะอยู่ตัว พจน์กลาง $I_{DT}(s)$ เป็นผลของแรงดันจากการประวิงเวลาซึ่งมีสัญญาณเป็นรูปสี่เหลี่ยมแบบรายคาบ ดังนั้นจึงเกิดผลตอบสนองแบบชั่วคราวทุกๆ ครั้งคาบและผลตอบสนองนี้จะมีนัยสำคัญต่อความเพี้ยนของกระแส

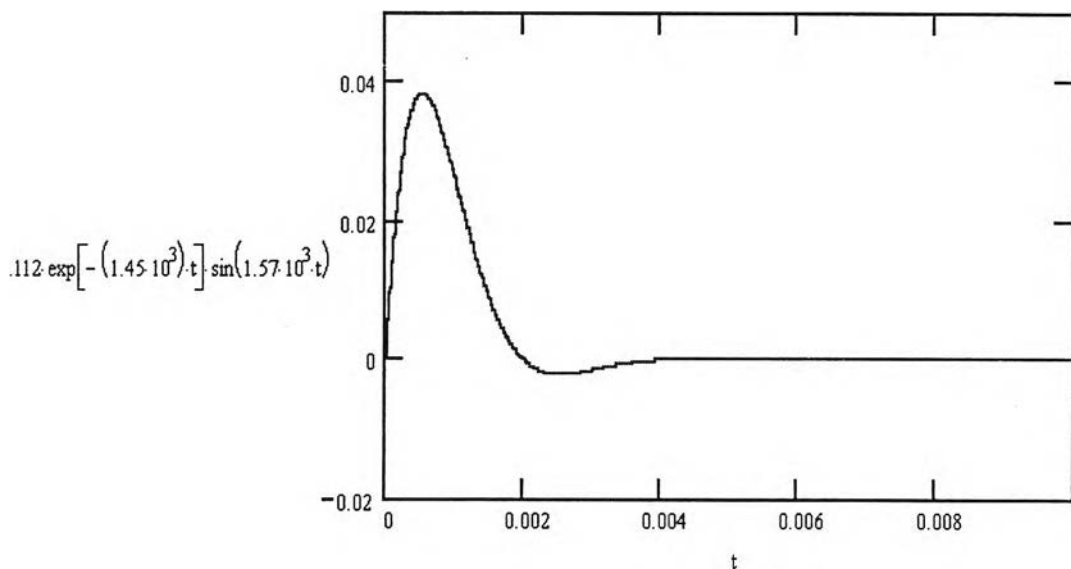
เมื่อแทนแรงดันจากการประวิงเวลา $V_{DT}(s)$ ด้วยสัญญาณแบบขั้นขนาดหนึ่งหน่วย (unit step) จะได้สมการของกระแสผิดพลาดที่เกิดจากแรงดันจากการประวิงเวลาดังสมการที่ 2.8

$$I_{DT}(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{s}{Ls^2 + K_p s + K_I} \quad (2.8)$$

เราสามารถหาผลตอบสนองทางเวลาจากการแปลงกลับลาปลาซสมการที่ 2.8 ได้ดังสมการที่ 2.9

$$\begin{aligned} i_{DT}(t) &= L^{-1} \left[\frac{1}{Ls^2 + K_p s + K_I} \right] \\ &= 2 \cdot \frac{e^{-\frac{K_p}{2L}t}}{\sqrt{4K_I L - K_p^2}} \cdot \sin \left(\frac{1}{2L} \sqrt{4K_I L - K_p^2} \cdot t \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

จากสมการที่ 2.9 กระแสผิดพลาดจากการประวิงเวลาจะมีรูปคลื่นเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีขนาด(amplitude) ลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลด้วยค่าคงตัวเวลา $\frac{2L}{K_p}$ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มค่า K_p จะทำให้ระบบสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม จะต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของระบบดังรายละเอียดในภาคผนวก ง จากเกณฑ์ที่ได้รับการออกแบบไว้ เมื่อแทนค่า $K_p=16$ และ $K_I=25120$ ลงในสมการ 2.9 เราสามารถแสดงสัญญาณกระแสผิดพลาดที่เกิดจากการประวิงเวลาที่เป็นสัญญาณแบบขั้นหนึ่งหน่วยได้ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระแสผิดพลาดจากผลการประวิงเวลาที่เป็นสัญญาณขั้นหนึ่งขนาดหน่วย

จะเห็นได้ว่าตัวควบคุม PI ไม่สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนได้เร็วเพียงพอ เราสามารถแก้ปัญหานี้ได้ โดยการป้อนสัญญาณไปหน้าเพื่อชดเชยแรงดันจากการประวิง ดังที่จะกล่าวถึงต่อไป ในหัวข้อผลการทดสอบ

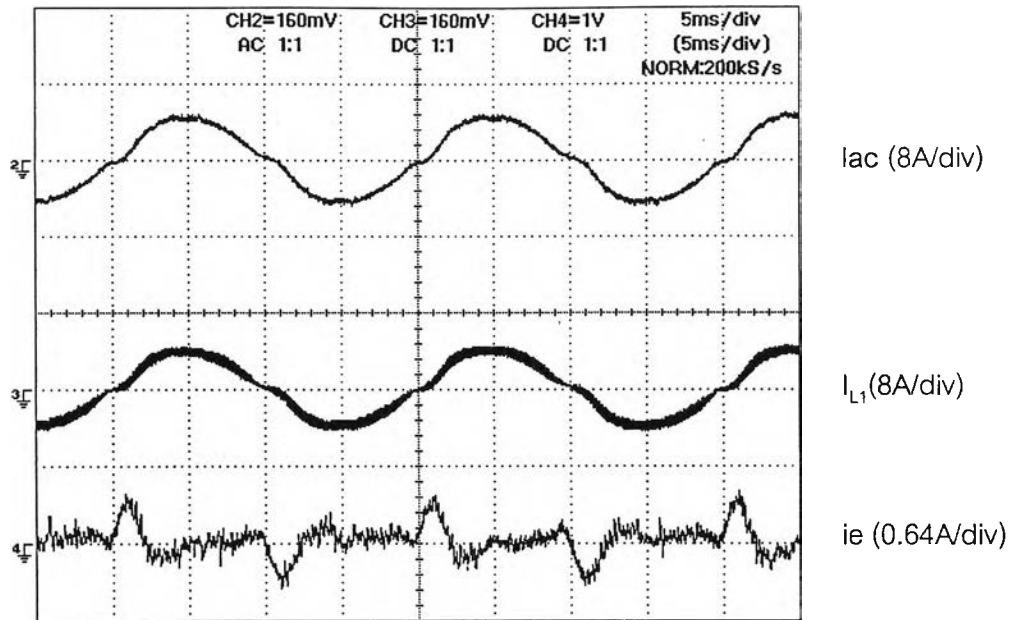
2.3 ผลการทดสอบ

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบการควบคุมกระแสของอินเวอร์เตอร์ที่สำคัญได้แก่ ความถี่การสวิตช์ ซึ่งในที่นี้เลือกใช้ความถี่ 16 kHz การขั้วนำสวิตช์ตัวบนและตัวล่างจะมีการประวิงเวลาเท่ากับ $4\mu s$ และตัวเหนี่ยวนำมีค่า 5.6 mH ระบบจริงที่ใช้ทดสอบจะมีการติดตั้งวงจรกรองแบบ CLC เพิ่มเติมเพื่อลดค่าระลอกคลื่นของกระแสด้านออก ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ง ในขั้นแรกส่วนควบคุมจะสร้างสัญญาณคำสั่ง v_{in}^* ให้แก่อินเวอร์เตอร์ ตามสมการที่ 2.1 โดยพารามิเตอร์ของการควบคุมมีค่าดังนี้ $K_p=16$, $K_i=25120$ เฟสและความถี่ของกระแสอ้างอิงจะได้จากวงรอบสล็อตเฟสที่ประสานจังหวะกับแรงดันการไฟฟ้าดังแสดงรายละเอียดของวงรอบสล็อตเฟสในภาคผนวก ค

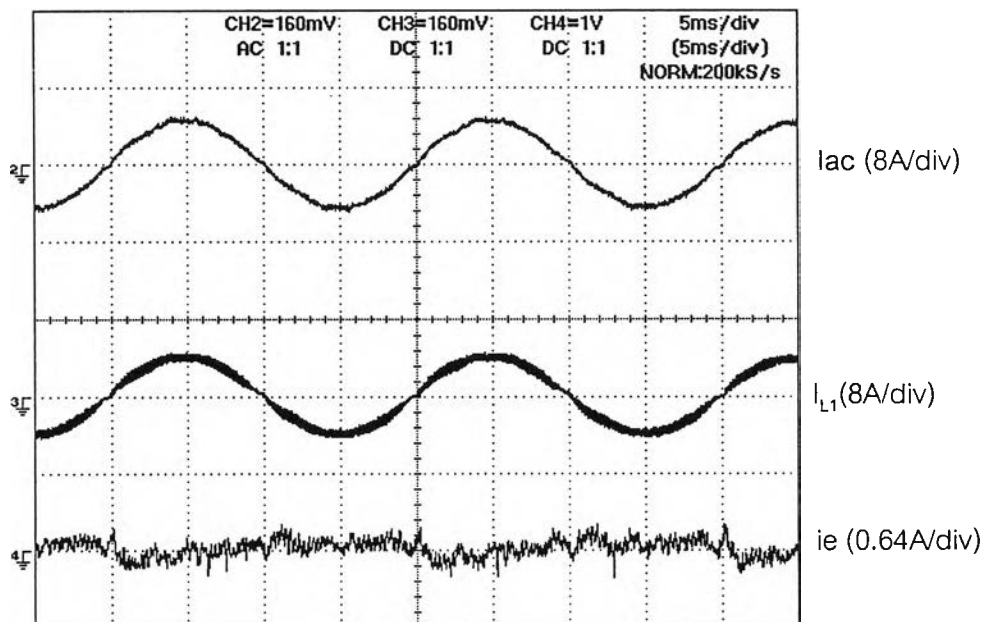
ผลการทดสอบในรูปที่ 2.5 แสดงถึงกระแสด้านออกที่จ่ายให้การไฟฟ้า (i_d) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1}) จะเห็นได้ว่าตัวกรองที่ต่อเพิ่มเติมช่วยลดระลอกคลื่นกระแสที่ปรากฏให้เห็นใน i_{L1} ได้เป็นอย่างดี

เราสามารถสังเกตเห็นความเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสได้อย่างชัดเจน เมื่อพิจารณากระแสผิดพลาด (i_e) จะพบว่ากระแสผิดพลาดมีค่าสูงในช่วงเวลาที่กระแสผ่านศูนย์และจะมีทิศทางตรงข้ามในอีกครึ่งคาบถัดไป เนื่องจากตัวควบคุม PI ไม่สามารถตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนจากการประวิงเวลาได้เร็วพอจึงเกิดกระแสผิดพลาดในลักษณะเดียวกันกับรูปที่ 2.4

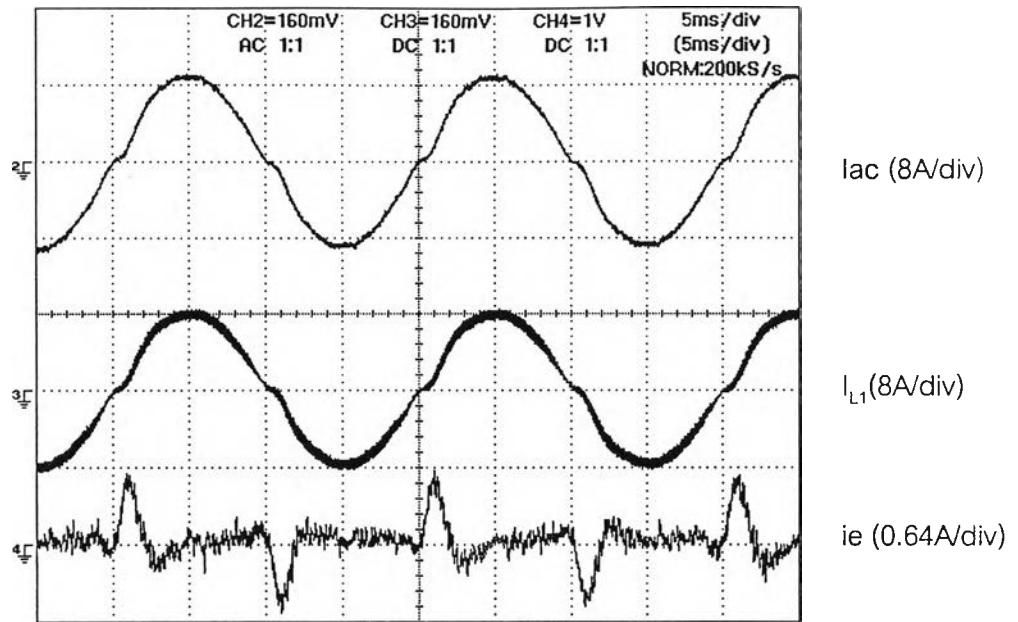
กระแสผิดพลาดนี้จะเกิดจากผลของการประวิงเวลา ที่ทำให้เกิดความผิดพลาดของแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันคำสั่ง แรงดันผิดพลาดนี้จะมีรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีทิศทางขึ้นกับทิศทางของกระแส ซึ่งเราสามารถชดเชยได้โดยการป้อนไปหน้า ด้วยการเพิ่มหรือลดเวลาในการขั้วนำสวิตช์ทดแทนเวลาที่ขาดหายไปจากการประวิงเวลา การเพิ่มหรือลดเวลาในการสวิตช์จะขึ้นกับทิศทางของกระแสคำสั่งแทนการใช้กระแสจริง รูปที่ 2.6 แสดงกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ขนาดกระแสเท่ากับรูปที่ 2.5 ที่มีการชดเชยผลของการประวิงเวลา จะเห็นได้ว่าการชดเชยแรงดันจากการประวิงเวลาจะช่วยลดความเพี้ยนของกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ลงได้อย่างมาก รูปที่ 2.7 แสดงกระแสผิดพลาดที่สูงขึ้นตามกระแสด้านออกที่เพิ่มขึ้น และการชดเชยเวลาการประวิงก็ยังคงลดกระแสผิดพลาดได้เป็นอย่างดีดังแสดงในรูปที่ 2.8



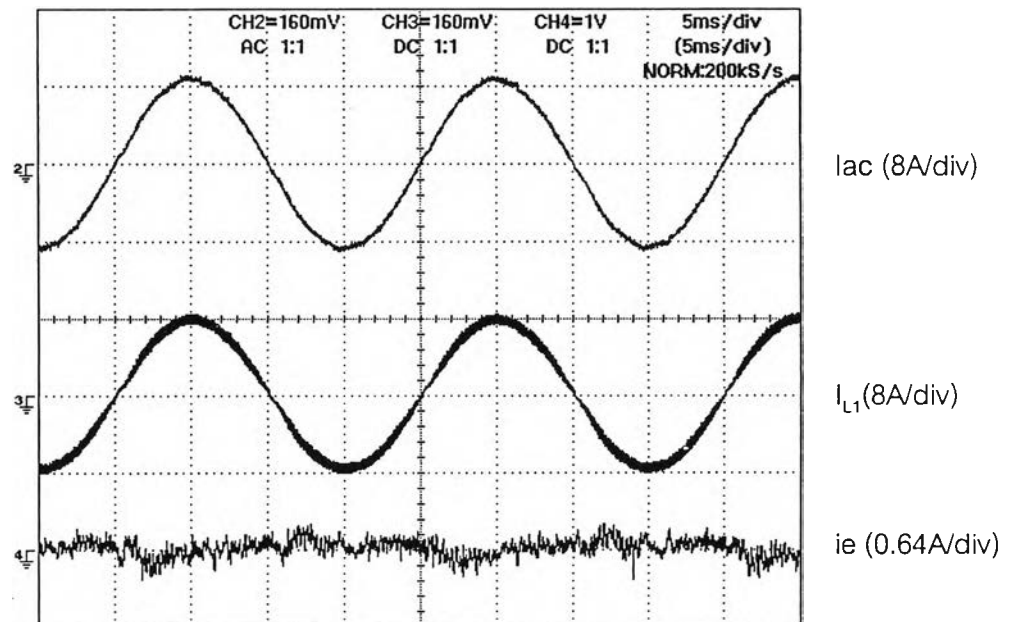
รูปที่ 2.5 กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์และกระแสผิดพลาด
ที่ไม่มีการชดเชยผลของการประวิงเวลา ที่โหลด 0.6 kW



รูปที่ 2.6 กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์และกระแสผิดพลาด
ที่มีการชดเชยผลของการประวิงเวลา ที่โหลด 0.6 kW

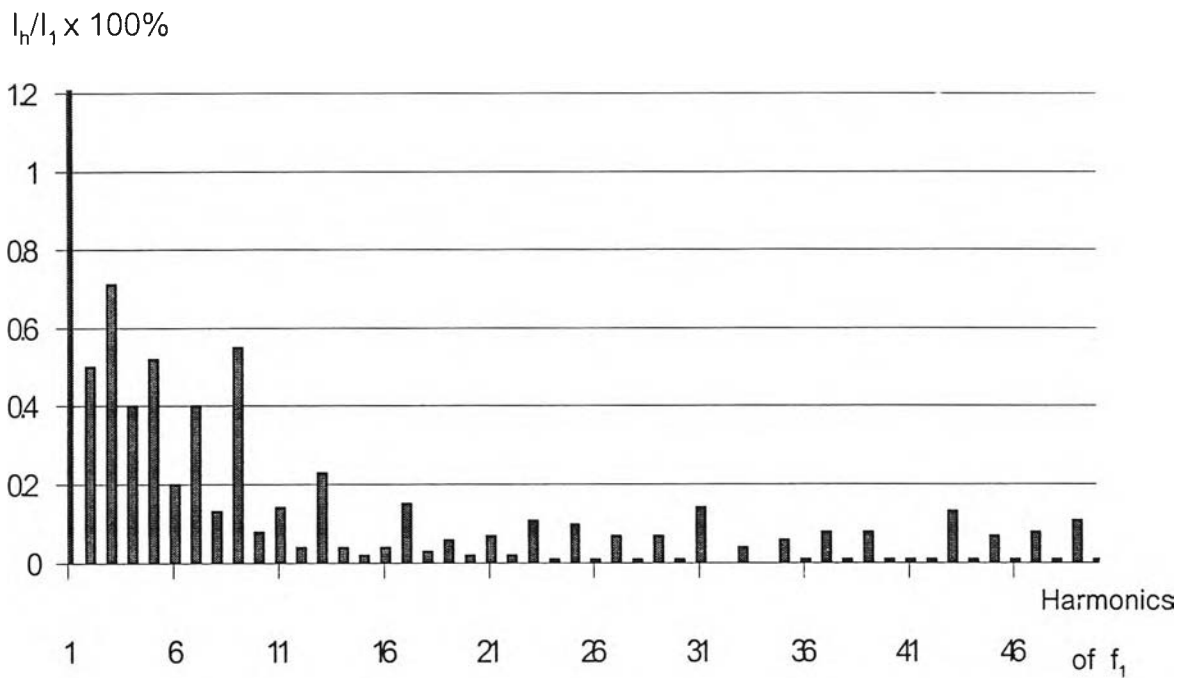


รูปที่ 2.7 กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์และกระแสผิดพลาด
ที่ไม่มีการชดเชยผลของการประวิงเวลา ที่โหลด 1.4 kW



รูปที่ 2.8 กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์และกระแสผิดพลาด
ที่มีการชดเชยผลของการประวิงเวลา ที่โหลด 1.4 kW

รูปที่ 2.9 แสดงความเพี้ยนของกระแสด้านออกที่โหลดพิกัด 3.0 kW ที่มีการชดเชยเวลาการประวิงแล้ว จะเห็นได้ว่ากระแสด้านออกมีค่าความเพี้ยนแต่ละฮาร์โมนิกน้อยกว่า 1% ตารางที่ 2.1 แสดงค่าตัวประกอบกำลังและค่าความเพี้ยนเชิงความถี่ที่โหลดค่าต่างๆ จะเห็นได้ว่าตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงหนึ่งและความเพี้ยนรวมมีค่าน้อยกว่า 2% ที่โหลดค่าพิกัด



รูปที่ 2.9 ความเพี้ยนของกระแสด้านออกที่ โหลดพิกัด 3.0 kW

ตารางที่ 2.1 ค่าตัวประกอบกำลังและความเพี้ยนรวมของกระแสด้านออกที่ โหลดค่าต่างๆ

Load	PF	THD*
0.5kW	0.9980	4.06 %
1.0kW	0.9994	1.81 %
1.5kW	0.9997	1.49 %
2.0kW	0.9995	1.52 %
2.5kW	0.9994	1.16 %
3.0kW	0.9995	1.39%

$$\text{หมายเหตุ : } THD^* = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_1} \times 100\%$$