

การควบคุมอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส 5 ระดับ Control of a Single Phase 5 Level Inverter

พิสิทธิ วิสุทธิเมธีกร

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร pisit.w@cit.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบควบคุมสำหรับอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส 5 ระดับที่มีโทโปโลยีแบบทรานซิสเตอร์เคลมปีเอชบริดจ์ การมอดูเลตสัญญาณความกว้างพัลส์แบบสัญญาณพาหะถูกใช้ในการควบคุมสวิทช์กำลังของอินเวอร์เตอร์และความถี่ในการสวิทช์มีค่าเท่ากับ 10 kHz เทคนิคการควบคุมแบบสองลูปถูกใช้สำหรับการควบคุมอินเวอร์เตอร์ ลูปนอกเป็นการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์และกระแสตัวเหนี่ยวนำคือสัญญาณป้อนกลับของการควบคุมลูปใน ตัวควบคุมแบบสัดส่วนเรโซแนนซ์ถูกใช้สำหรับลูปการควบคุมทั้งสองของอินเวอร์เตอร์ การจำลองถูกใช้พิสูจน์ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอ จากผลการจำลองแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมให้เป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีองค์ประกอบฮาร์มอนิกต่ำ

คำสำคัญ: ตัวควบคุมแบบสัดส่วนเรโซแนนซ์ อินเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งเฟส

Abstract

This paper presents a control system for a single phase 5 level inverter with a transistor clamped H bridge topology. The carrier based pulse width modulation is employed to control the power switches of the inverter and the switching frequency is 10 kHz. Dual loop control technique is used for controlling the inverter. The outer loop is an inverter output voltage control and the inductor current is a feedback signal for an inner loop control. The proportional plus resonant controllers are used for both of the inverter control loop. The simulation is used to verify the proposed inverter control system. From the simulation results, the output voltage of the inverter can be controlled to be sinusoidal waveform with low harmonics content.

Keyword: proportional plus resonant controller, single phase inverter.

1. บทนำ

อินเวอร์เตอร์เป็นวงจรทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งถือเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของระบบผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทน นอกจากนั้นอินเวอร์เตอร์ยังเป็นส่วนของประกอบในแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบต่อเนื่องซึ่งเมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเกิดขัดข้องระบบก็จะทำงานโดยอาศัยพลังงานจากแบตเตอรี่ผ่านอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายให้กับโหลดอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่มุ่งเน้นการพัฒนาอินเวอร์เตอร์เพื่อให้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เป็นแรงดันไฟฟ้าสลับที่มีรูปคลื่นไซน์ความผิดเพี้ยนต่ำและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้ดี

ในงานวิจัย [1]-[2] เป็นงานวิจัยที่นำเทคนิคการควบคุมแบบทำซ้ำ (Repetitive Control) เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งเฟสทั้งวงจรแบบเอชบริดจ์และวงจรแบบกึ่งบริดจ์ อย่างไรก็ตามเทคนิคการควบคุมแบบทำซ้ำจะให้ผลดีในกรณีที่สิ่งรบกวนระบบนั้นมีรูปแบบซ้ำและมีความถี่แน่นอน อีกทั้งเทคนิคการควบคุมนี้จะมีปัญหาในเรื่องความเร็วในการลู่เข้าเพื่อให้ค่าผิดพลาดมีค่าเท่ากับศูนย์ งานวิจัย [3]-[4] ใช้ตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด (Sliding Mode Controller) เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์โดยข้อดีของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมดก็คือให้ผลตอบสนองการควบคุมที่รวดเร็ว ค่าแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์สามารถติดตามค่าคำสั่งได้ แต่มีข้อเสียในเรื่องความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ ในงานวิจัย [5]-[6] ได้นำเสนอการควบคุมแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์บนกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (Synchronous Reference Frame) ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่จะต้องมีการแปลงแรงดันที่เป็นสัญญาณไซน์ให้เป็นสัญญาณบนกรอบอ้างอิงซิงโครนัส โดยสัญญาณที่ได้จะเป็นปริมาณไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งง่ายในการควบคุมไม่มีปัญหาเรื่องค่าผิดพลาดที่เวลาลงตัวที่ไม่เท่ากับศูนย์ แต่วิธีการนี้อาจยุ่งยากในส่วนการแปลงปริมาณต่างๆระหว่างกรอบอ้างอิงซิงโครนัสและกรอบอ้างอิงนิ่ง (Stationary Reference Frame) โดยเฉพาะกรณีของอินเวอร์เตอร์แบบหนึ่งเฟส ต้องมีการสร้างสัญญาณเทียม

ขึ้นมาหนึ่งสัญญาณ เพื่อใช้ในการแปลงสัญญาณไฟฟ้าสลับบนกรอบอ้างอิงนิ่งไปเป็นสัญญาณในกรอบอ้างอิงซิงโครนัส

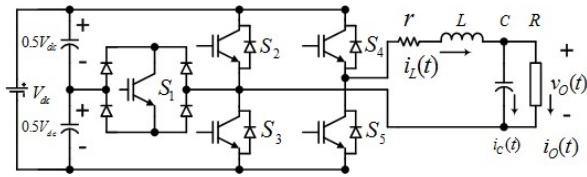
นอกจากการวิจัยเพื่อหาเทคนิคการควบคุมใหม่แล้วยังมีหลายงานวิจัยที่เน้นการพัฒนาลักษณะของวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อให้มีรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่มีหลายระดับ [7]-[8] ส่งผลให้ขนาดของวงจรองแรงดันเอาต์พุตมีขนาดเล็กลง อย่างไรก็ตามการพัฒนาของอินเวอร์เตอร์ให้แรงดันเอาต์พุตเป็นรูปคลื่นที่มีจำนวนระดับแรงดันหลายระดับนั้นจะมีข้อเสียในเรื่องของการใช้สวิตช์กำลังเป็นจำนวนมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบฟูลบริดจ์แบบเดิมที่มีสวิตช์กำลังเพียง 4 ตัวเท่านั้น ในงานวิจัย [7] ได้นำเสนอการสร้างสัญญาณควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่มีแรงดันเอาต์พุต 5 ระดับโดยเพิ่มสวิตช์เพียงหนึ่งตัวในวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบฟูลบริดจ์และมีตัวเก็บประจุสองตัวต่อที่บัสไฟตรงเพื่อแบ่งแรงดันบัสไฟตรงออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน อย่างไรก็ตามวิธีการสร้างสัญญาณในการควบคุมสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส 5 ระดับที่นำเสนอในงานวิจัยดังกล่าวยังคงค่อนข้างซับซ้อน

ดังนั้นในบทความวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนเรโซแนนซ์ (Proportional Plus - Resonant Controller) ในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส 5 ระดับแบบที่เรียกว่า ทรานซิสเตอร์แคแลมป์เอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีรูปแบบวงจรเช่นเดียวกับที่ปรากฏในงานวิจัย [7] โดยแนวคิดของงานวิจัยก็คือการนำอินเวอร์เตอร์ไปประยุกต์ใช้ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายให้กับโหลด

2. วงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับแบบทรานซิสเตอร์แคแลมป์

2.1 วงจรภาคกำลัง

วงจรภาคกำลังของอินเวอร์เตอร์ในบทความนี้มีลักษณะดังภาพที่ 1 ประกอบด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบฟูลบริดจ์มีสวิตช์กำลังคือ $S_2 - S_6$ และสวิตช์กำลัง S_1 เพิ่มมาอีกหนึ่งตัว โดยบัสไฟตรงด้านอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์จะมีคาปาซิเตอร์ C_1 และคาปาซิเตอร์ C_2 ทำหน้าที่แบ่งแรงดัน



ภาพที่ 1 อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส 5 ระดับแบบทรานซิสเตอร์แคลมป์

2.2 การมอดูเลตแบบสัญญาณอ้างอิงคู่

ระดับแรงดันด้านเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับในภาพที่ 1 กับสภาวะการทำงานของสวิตช์กำลังในวงจรมีความสัมพันธ์กันดังในตารางที่ 1 โดยสภาวะ on หมายถึงมีการนำกระแสของสวิตช์ และสภาวะ off คือสวิตช์กำลังไม่นำกระแส ในบทความนี้การสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์จะใช้สัญญาณพาหะเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง ด้วยเทคนิคการมอดูเลตแบบสัญญาณอ้างอิงคู่ (Dual Reference Modulation) ซึ่งถูกนำเสนอในงานวิจัย [8] สัญญาณอ้างอิงที่ใช้เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังจะเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์สองสัญญาณที่มีขนาดเท่ากันและมีค่าความถี่เท่ากับความถี่มูลฐานของแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ แต่สัญญาณอ้างอิงทั้งสองจะมีการเลื่อนระดับจากศูนย์ที่ไม่เท่ากัน ส่วนสัญญาณพาหะนั้นจะเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีค่าความถี่เท่ากับ 10 kHz ซึ่งเป็นค่าความถี่ในการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ ค่าดัชนีการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์ (Modulation Index) M_a จะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนค่ายอดของสัญญาณอ้างอิงหารด้วยสองเท่าค่ายอดของสัญญาณพาหะดังแสดงในสมการ (1)

$$M_a = \frac{\hat{V}_{Ref}}{2\hat{V}_C} \quad (1)$$

เมื่อ M_a คือค่าดัชนีการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์

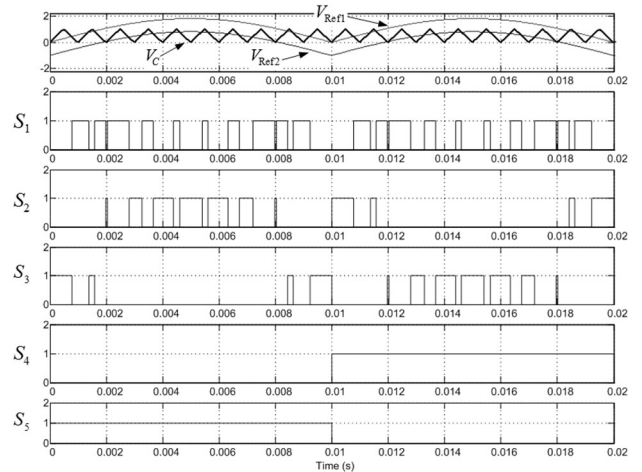
\hat{V}_{Ref} คือครึ่งหนึ่งของค่ายอดของสัญญาณอ้างอิง

\hat{V}_C คือค่ายอดของสัญญาณพาหะ

โดยการควบคุมอินเวอร์เตอร์จะให้ค่าดัชนีการมอดูเลตมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 เพื่อไม่ให้เกิดฮาร์มอนิกอันดับสูงที่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ในภาพที่ 2 เป็นตัวอย่างสภาวะของสวิตช์กำลัง $S_1 - S_5$ ที่เกิดจากวิธีการมอดูเลตแบบสัญญาณอ้างอิงคู่

ตารางที่ 1 สถานะสวิตช์และแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์

สวิตช์กำลัง					แรงดันเอาต์พุต
S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	
on	off	off	off	on	Vdc/2
off	on	off	off	on	Vdc
off	on	off	on	off	0
off	off	on	off	on	
on	off	off	on	off	-Vdc/2
off	off	on	on	off	-Vdc



ภาพที่ 2 สภาวะการทำงานสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับด้วยการมอดูเลตแบบสัญญาณอ้างอิงคู่

จากภาพที่ 2 ความถี่ของสัญญาณพาหะมีค่าเท่ากับ 10 kHz เพื่อให้ง่ายในการทำความเข้าใจวิธีการมอดูเลตแบบสัญญาณอ้างอิงคู่เท่านั้น แต่ค่าจริงที่ใช้ในระบบมีค่าเท่ากับ 10 kHz ซึ่งกล่าวได้ว่า สถานะการนำกระแสของสวิตช์กำลัง S_2 และ S_3 เป็นผลลัพธ์ที่เกิดจากการเปรียบเทียบสัญญาณพาหะและสัญญาณอ้างอิง โดยที่สวิตช์กำลัง S_1 จะขึ้นกับสถานะของสวิตช์กำลัง S_2 และ S_3 ส่วนสภาวะการนำกระแสของสวิตช์กำลัง S_4 และ S_5 จะขึ้นกับมุมเฟสของสัญญาณอ้างอิง โดยอาจเขียนสรุปสถานะของสวิตช์กำลังตามวิธีการมอดูเลตแบบสัญญาณอ้างอิงคู่ดังตารางที่ 2 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม สร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลัง $S_1 - S_5$ ของวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับแบบทรานซิสเตอร์แคลมป์

ตารางที่ 2 สถานะสวิตช์กำลังด้วยการมอดูเลตแบบสัญญาณอ้างอิงคู่

มอดูเลตสัญญาณอ้างอิง			
0-180°		180-360°	
S_1	$\bar{S}_2 \cdot \bar{S}_3$	S_1	$\bar{S}_2 \cdot \bar{S}_3$
S_2	on ถ้า $V_{ref2} > V_C$	S_2	off ถ้า $V_{ref1} > V_C$
	off ถ้า $V_{ref2} \leq V_C$		off ถ้า $V_{ref1} \leq V_C$
S_3	on ถ้า $V_{ref1} < V_C$	S_3	on ถ้า $V_{ref2} > V_C$
	off ถ้า $V_{ref1} \geq V_C$		off ถ้า $V_{ref2} \leq V_C$
S_4	off	S_4	on
S_5	on	S_5	off

3. ระบบควบคุม

การควบคุมอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับในบทความนี้จะเป็นการควบคุมแบบสองขั้ว โดยขั้วนอกเป็นการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ และการควบคุมขั้วในเป็นการควบคุมกระแสของตัวเหนี่ยวนำที่เอาต์พุตซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวงจรกรองแรงดันเอาต์พุตให้เป็นรูปคลื่นไซน์ จากวงจรด้านเอาต์พุตในภาพที่ 1 สามารถเขียนสมการทางพลศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต $v_o(t)$ ที่โหลด R และแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ $v_{INV}(t)$ ดังสมการ (2) และความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตที่โหลด กระแสโหลด $i_o(t)$ และ กระแสตัวเหนี่ยวนำ $i_L(t)$ ดังสมการ (3) จากสมการที่ (2) และ (3) หาผลแปลงลาปลาซและจัดรูปสมการใหม่ดังสมการที่ (4) และ (5)

$$v_{INV}(t) = r \cdot i_L(t) + L \frac{di_L(t)}{dt} + v_o(t) \quad (2)$$

$$v_o(t) = \frac{1}{C} \int (i_L(t) - i_o(t)) dt \quad (3)$$

$$I_L(s) = \frac{V_{INV}(s) - V_o(s)}{Ls + r} \quad (4)$$

$$V_o(s) = \frac{1}{Cs} \cdot I_C(s) \quad (5)$$

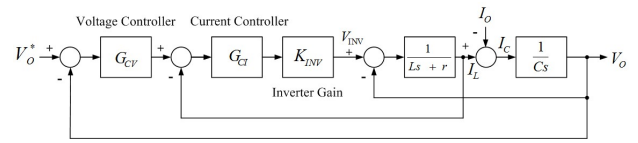
เมื่อ

$i_L(t)$ คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองแรงดัน

r คือ ความต้านของขดลวดในวงจรกรอง แรงดัน (Ω)

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดในวงจรกรอง แรงดัน (H)

C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุในวงจรกรอง แรงดัน (F)



ภาพที่ 3 ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอ

$v_i(t)$ คือ แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ก่อนผ่านวงจรกรอง

$v_o(t)$ คือ แรงดันที่โหลด

$i_o(t)$ คือ กระแสที่ไหลผ่านโหลด

จากสมการทางพลศาสตร์ของระบบเขียนเป็นไดอะแกรมระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับดังแสดงในภาพที่ 3 โดยที่ G_{CV} และ G_{CI} คือตัวควบคุมลูปแรงดันและตัวควบคุมลูปกระแสตามลำดับ ส่วน K_{INV} คืออัตราขยายของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเท่ากับ $\frac{V_{dc}}{2V_C}$

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนเรโซแนนท์ที่ใช้ในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตและการควบคุมกระแสตัวเหนี่ยวนำของอินเวอร์เตอร์มีฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ

$$G_{CV} = K_{PRV} + \frac{2K_{RV} \cdot \omega_b s}{s^2 + 2\omega_b s + \omega_o^2} \quad (5)$$

$$G_{CI} = K_{PRI} + \frac{2K_{RI} \cdot \omega_b s}{s^2 + 2\omega_b s + \omega_o^2} \quad (6)$$

เมื่อ

ω_o คือค่าความถี่เรโซแนนท์ (เรเดียน/วินาที)

ω_b คือแบนด์วิดท์ตัวควบคุมรอบจุดเรโซแนนท์ (เรเดียน/วินาที)

K_{RV} และ K_{RI} คืออัตราขยายเรโซแนนท์

K_{PRV} และ K_{PRI} คืออัตราขยายเทอมสัดส่วน

ในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้งในลูปแรงดันเอาต์พุตและลูปการควบคุมกระแสของตัวเหนี่ยวนำในวงจรกรองแรงดันเอาต์พุตนั้นจะใช้วิธีการออกแบบเชิงความถี่โดยมีการกำหนดค่ามูมเพื่อเฟส (Phase Margin) ของระบบที่ต้องการและกำหนดค่าความถี่ตัดข้าม (Crossover Frequency) ของระบบวงเปิดของลูปการควบคุมนั้นๆ จากนั้นจึงคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโดยการกำหนดค่าความถี่ตัดข้ามนั้นจะเลือกให้การควบคุมของ

อุปในคือการควบคุมกระแสที่มีความถี่ที่สูงกว่าการควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่เป็นอุปนอกเล็กน้อย

4. ผลการจำลองระบบที่นำเสนอ

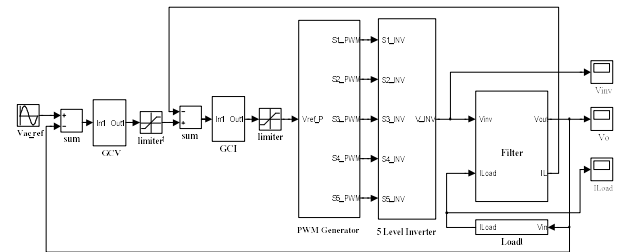
เพื่อตรวจสอบแนวคิดที่นำเสนอจะใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ทำการจำลองระบบโดยมีพารามิเตอร์ต่างๆของอินเวอร์เตอร์และตัวควบคุมดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์และตัวควบคุม

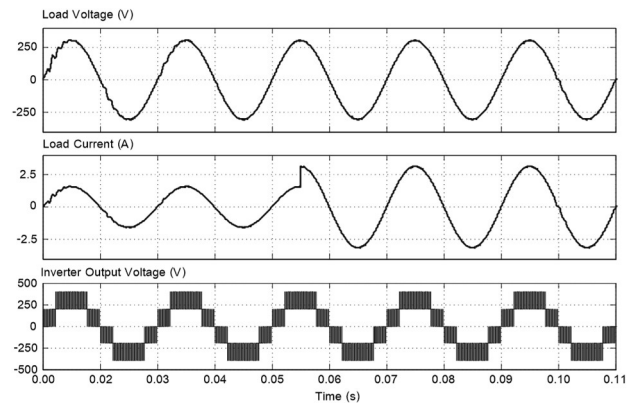
แรงดันอินพุต V_{ac}	220 Vrms
แรงดันบัสไฟตรง V_{dc}	400 V
ค่าพิกัดโหลดที่ 220 Vrms	500 W
ความถี่ในการสวิตช์	10 kHz
ค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองแรงดันเอาต์พุต L	0.5 mH
ค่าตัวเก็บประจุวงจรกรองแรงดันเอาต์พุต C	50 μ F
ความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำในวงจรกรองแรงดันเอาต์พุต r	0.5 Ω
K_{PRV}	0.64
K_{RV}	224
K_{PRI}	16
K_{RI}	8000

ภาพที่ 3 เป็นแบบจำลองระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอในบทความ ภาคกำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสแบบ 5 ระดับถูกเขียนขึ้น ตามความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์กับสถานะของสวิตช์กำลังดังในตารางที่ 1 สำหรับการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์จะใช้หลักการมอดูเลตแบบสัญญาณอ้างอิงคู่ตามหลักการที่แสดงในตารางที่ 2

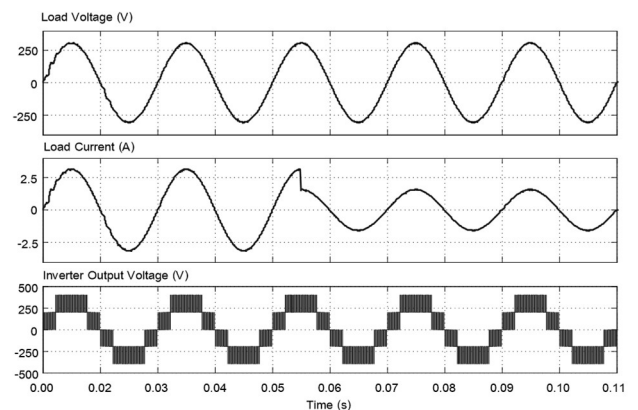
สำหรับการจำลองระบบในเบื้องต้นนี้ใช้โหลดที่เป็นตัวต้านทานค่า 97 Ω ซึ่งก็คือพิกัด 500 W ที่แรงดัน 220 Vrms จากนั้นมีการเปลี่ยนโหลดแบบทันทีที่เวลา 55 ms และเวลา 105 ms เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตที่โหลด



ภาพที่ 3 ระบบจำลองบน MATLAB/Simulink

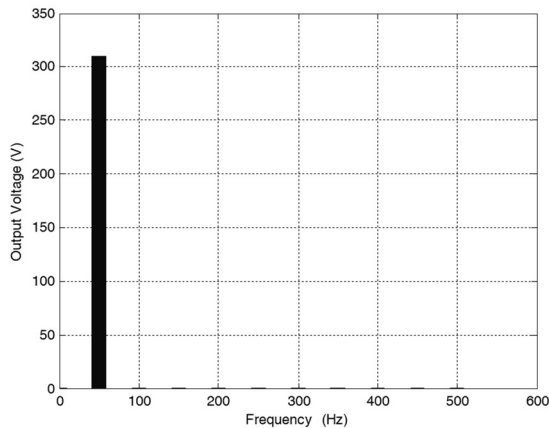


ภาพที่ 4 แรงดันที่โหลด (บน) กระแสโหลด (กลาง) และแรงดันที่เอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ (ล่าง) กรณีการเพิ่มโหลดด้านเอาต์พุตจาก 250 W เป็น 500 W



ภาพที่ 5 แรงดันที่โหลด (บน) กระแสโหลด (กลาง) และแรงดันที่เอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ (ล่าง) กรณีการลดโหลดด้านเอาต์พุตจาก 500 W เป็น 250 W

จากผลการจำลองในภาพที่ 4 และ 5 พบว่าการควบคุมแรงดันที่โหลดของอินเวอร์เตอร์มีค่าแรงดันที่เป็นไปตามค่าคำสั่งแรงดันทั้งในกรณีที่มีการเพิ่มโหลดและลดโหลดแบบทันที ส่วนภาพที่ 6 เป็นกราฟฮาร์มอนิกของแรงดันที่โหลดของอินเวอร์เตอร์ที่สภาวะคงตัวซึ่งมีค่าความผิดเพี้ยนต่ำ



ภาพที่ 6 ฮาร์มอนิกแรงดันที่โหลดของอินเวอร์เตอร์ที่สภาวะคงตัว

5. บทสรุป

จากผลการศึกษาและการจำลองระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบ 5 ระดับสามารถควบคุมด้วยวิธีการควบคุมแบบสองลูปโดยใช้ตัวควบคุมสัดส่วนเรโซแนนซ์ในการควบคุมทั้งลูปแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ และลูปการควบคุมกระแสตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองแรงดันด้านเอาต์พุต ซึ่งช่วยลดความซับซ้อนระบบควบคุม เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์ในกรอบอ้างอิงซิงโครนัสที่จะต้องมีการแปลงปริมาณที่ควบคุมให้เป็นค่าในกรอบอ้างอิงแบบซิงโครนัสก่อน อย่างไรก็ตามสิ่งที่ควรศึกษากันต่อไปก็คือกรณีที่โหลดเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นและผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์ที่มีต่อการควบคุมแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ KMUTNB-NEW-60-030 และผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ชื่นแขก ในฐานะนักวิจัยพี่เลี้ยงที่กรุณาให้คำแนะนำและความเห็นอันเป็นประโยชน์ในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Keliang Zhou, Kay-Soon Low, D. Wang, Fang-Lin Luo, Bin Zhang and Yigang Wang, "Zero-phase odd-harmonic repetitive controller for a single-phase PWM inverter," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 1, pp. 193-201, Jan. 2006.
- [2] Bin Zhang, Keliang Zhou, Danwei Wang, "Multirate Repetitive Control for PWM DC/AC Converters", *Industrial Electronics IEEE Transactions on*, vol. 61, pp. 2883-2890, 2014, ISSN 0278-0046.
- [3] H. Komurcugil, "Rotating-Sliding-Line-Based Sliding-Mode Control for Single-Phase UPS Inverters," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 10, pp. 3719-3726, Oct. 2012.
- [4] Tsang-Li Tai and Jian-Shiang Chen, "UPS inverter design using discrete-time sliding-mode control scheme," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 67-75, Feb 2002.
- [5] S. Golestan, M. Monfared, J. M. Guerrero and M. Joorabian, "A D-Q synchronous frame controller for single-phase inverters," *2011 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference*, Tehran, 2011, pp. 317-323.
- [6] A. Roshan, R. Burgos, A. C. Baisden, F. Wang and D. Boroyevich, "A D-Q Frame Controller for a Full-Bridge Single Phase Inverter Used in Small Distributed Power Generation Systems," *APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Anaheim, CA, USA, 2007, pp. 641-647.
- [7] J. Selvaraj and N. A. Rahim, "Multilevel Inverter For Grid-Connected PV System Employing Digital PI Controller," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 1, pp. 149-158, Jan. 2009.
- [8] Sung-Jun Park, Feel-Soon Kang, Man Hyung Lee and Cheul-U Kim, "A new single-phase five-level PWM inverter employing a deadbeat control scheme," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 3, pp. 831-843, May 2003.