

การขนานบักคอนเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคแบบดรู๊ปสำหรับระบบดีซีไมโครกริด

Droop Control Technique for Parallel Buck Converters in DC Microgrid

กฤษชัย วิถีพานิช¹ วุฒิพล ธารารัตน์เศรษฐ์¹ และ ชานัญฤทธิ์ ธาราสันติสุข²

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ถนนรังสิต-นครนายก คลอง 16 อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

E-mail: kritchai@g.swu.ac.th, vuttipon@ieee.org

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ถ. นางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

E-mail: chanrit.t@rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการขนานคอนเวอร์เตอร์สำหรับดีซีไมโครกริดโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบดรู๊ป (Droop) การขนานคอนเวอร์เตอร์ช่วยเพิ่มความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้า และความน่าเชื่อถือให้กับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า การขนานคอนเวอร์เตอร์ด้วยวงจรบักคอนเวอร์เตอร์จำนวน 2 โมดูลทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง และรับแรงดันขาเข้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่เลียนแบบการจ่ายกระแสและแรงดันเสมือนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV simulator) มีการควบคุมคอนเวอร์เตอร์แบบคาสเคดในวงรอบกระแสและแรงดันคงที่ 24 V ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบพีไอ การควบคุมขั้นต้น (Primary level control) ใช้เทคนิคดรู๊ปเพื่อแบ่งกระแสด้วยค่าความต้านทานเสมือน (Virtual resistance, R_d) และเป็นตัวควบคุมแบบดิจิทัลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM32 ผลการทดลองประกอบด้วยการจำลองการทำงานแบบสวิตซ์ด้วย Matlab/Simulink และการควบคุมคอนเวอร์เตอร์แบบแบบทันที (Real-time) ซึ่งผลการทดลองวงจรบักคอนเวอร์เตอร์สามารถแบ่งกระแสและรักษาระดับแรงดันคงที่ได้ที่ 24 V เทคนิคการขนานที่นำเสนอสามารถสร้างได้ง่ายและไม่ต้องการสื่อสารระหว่างโมดูล

คำสำคัญ: บักคอนเวอร์เตอร์ การควบคุมแบบดรู๊ป ดีซีไมโครกริด

ABSTRACT

This paper presents the design and implementation of parallel converters for dc microgrid using droop control approach. It provides many desirable features such as increased ability in supplying power output and improved reliability of power transmission systems. A parallel dc-dc buck converter system comprising two identical modules is operated in continuous current mode and its input voltage is supplied with a PV simulator. The converter is controlled using cascade control with two analog PI controllers involving two loops, i.e. current and constant voltage at 24 V. Additionally, the converter control system is augmented with the primary level control exploiting droop scheme to ensure appropriate current sharing through the use of a virtual resistance R_d . The droop-based primary control is implemented as a digital controller using a microcontroller ARM32. A set of simulation results using Matlab/Simulink illustrate that the current sharing is achieved and the output voltage is kept constantly at 24 V with the proposed design. Its viability is experimentally validated using an embedded, real-time control system. Besides, paralleling of dc-dc converters also enables practically simple and no-communication between connected modules implementation.

Keyword: Buck converter, Droop control technique, DC microgrid

1. บทนำ

ในปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทางเลือก เช่น แผงเซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลมขนาดเล็กและเซลล์เชื้อเพลิง มีมากขึ้นเป็นลำดับ เหตุผลมาจากความต้องการพึ่งพาตนเองด้านพลังงานไฟฟ้ามากขึ้น และการใช้พลังงานสะอาดมากขึ้น ปัจจัยสนับสนุนของการใช้พลังงานไฟฟ้าสะอาดเหล่านี้มาจากราคาของอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าและอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทกำลังมีราคาตกลง อย่างไรก็ตาม การใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้น กำลังไฟฟ้าและระดับแรงดันไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิที่แผง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรคอนเวอร์เตอร์เพื่อแปลงผันระดับแรงดันไฟฟ้าและควบคุมแรงดันขาออกให้คงที่ รวมถึงการแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อให้สามารถใช้งานกับเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือนทั่วไปได้ อย่างไรก็ตามระบบโครงข่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC grid) ได้รับความสนใจมากขึ้นเป็นลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการต่อเชื่อมคอนเวอร์เตอร์ในลักษณะของดีซีไมโครกริด (DC microgrid) ซึ่งสามารถแบ่งระดับชั้นการควบคุมได้ดังรูปที่ 1, [1] โดยสามารถแบ่งออกได้สามชั้น ดังนี้คือ

1.1 การควบคุมขั้นปฐมภูมิ (Primary control level) ในเบื้องต้นคอนเวอร์เตอร์จะมีวงรอบกระแสและแรงดันในคอนเวอร์เตอร์แต่ละโมดูล การควบคุมขั้นปฐมภูมิจะเป็นวงรอบถัดจากการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทั่วไป โดยการควบคุมขั้นปฐมภูมิจะใช้เทคนิคดรู๊ป (Droop)

1.2 การควบคุมขั้นทุติยภูมิ (Secondary control level) การควบคุมขั้นทุติยภูมิจะตรวจจับความถี่หรือแรงดัน เพื่อดึงกลับแรงดันเพื่อรักษาระดับคงที่ ซึ่งการจำลองการทำงานอาจใช้บล็อกประวิงเวลา (Delay) แทนการประวิงเวลาในระบบสื่อสารดังรูปที่ 2

1.3 การควบคุมขั้นที่สาม (Tertiary control level) เป็นการควบคุมในชั้นวิเคราะห์ความต้องการกำลังไฟฟ้า โดยตัวควบคุมจะส่งคำสั่งการไหลของพลังงานไฟฟ้าในลักษณะของการตั้งหรือส่งกลับกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจำหน่าย

ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed generation, DG) สามารถเทียบเคียงระบบไฟฟ้าในลักษณะของเอซีไมโครกริดและดีซีไมโครกริด โดยพิจารณาได้ดังตารางที่ 1, [2]

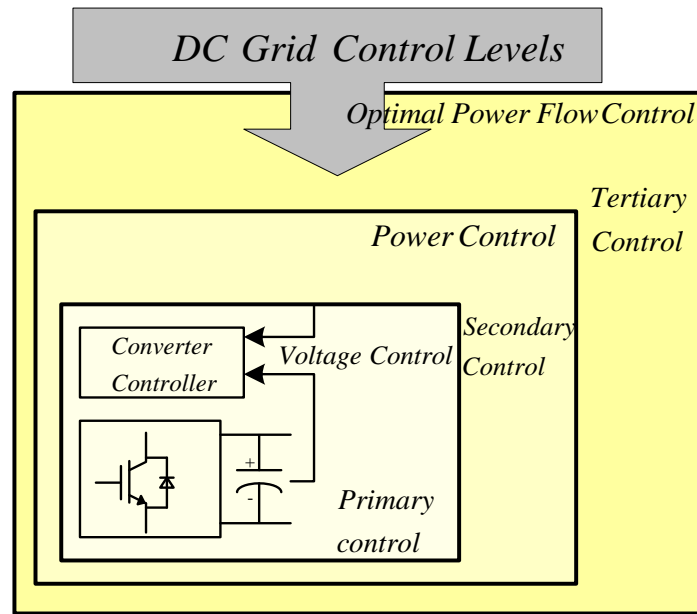
ตารางที่ 1 การเทียบเคียงระบบไมโครกริด

ลักษณะสมบัติ	เอซีไมโครกริด	ดีซีไมโครกริด
การซิงโครไนท์	ω	V_{dc}
การเปลี่ยนแปลงแรงดัน	$V \sin \delta$	ΔV_{dc}
อิมพีแดนซ์	X_{ac}	R_{dc}
กำลังไฟฟ้าจริง	$\frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X_{ac}}$	$\frac{V_{dc} \Delta V_{dc}}{R_{DC}}$
ความเฉื่อยระบบ	J	C
พลังงานไฟฟ้า	$\frac{1}{2} J \omega^2$	$\frac{1}{2} C V_{dc}^2$

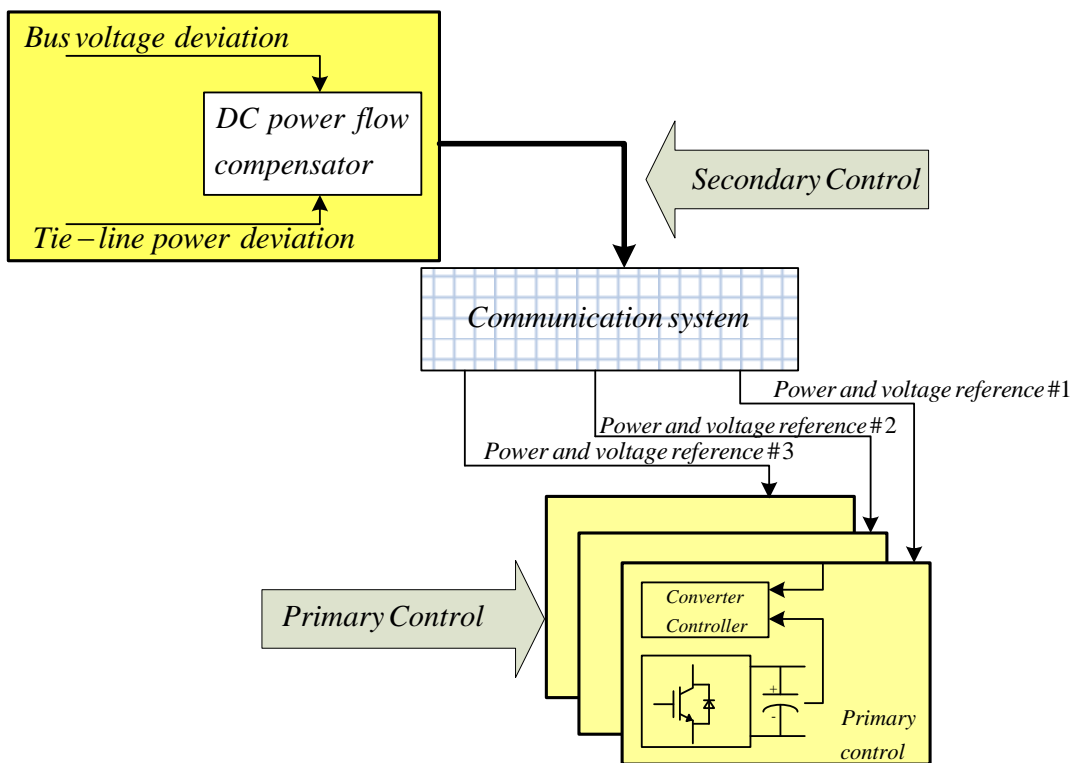
บทความนี้นำเสนอการออกแบบการขนานคอนเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบดรู๊ปในหัวข้อที่ 2 การออกแบบระบบและจำลองระบบด้วย Matlab/Simulink ในหัวข้อที่ 3 และผลการทดลองระบบควบคุมในหัวข้อที่ 4 จากนั้นเป็นการสรุปในหัวข้อที่ 5

2. การขนานวงจรคอนเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบดรู๊ป

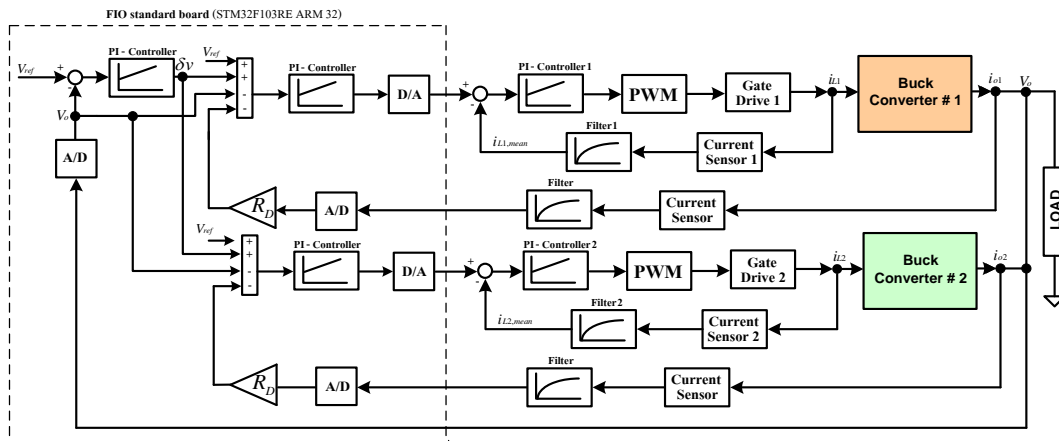
รูปที่ 3 และ 4 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมบัสคอนเวอร์เตอร์ 2 โมดูลที่มีการขนานด้วยเทคนิคดรู๊ป คอนเวอร์เตอร์จะมีการควบคุมในวงรอบกระแสด้วยตัวควบคุมกระแสแบบพีไอโดยใช้ออปแอมป์ วงรอบแรงดันจะใช้ทรานสดิวเซอร์ตรวจจับแรงดันส่งผ่าน ADC ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM 32 Cortex เพื่อเป็นสัญญาณป้อนกลับให้ตัวควบคุมดิจิทัลโดยใช้ RapidSTM32 Library ทำงานที่คาบเวลาสุ่ม (Sampling period) เท่ากับ 10 ms โดยสามารถทำงานได้ทั้งแบบทันเวลา (Real-time) และแบบฝังตัว (Embedded)



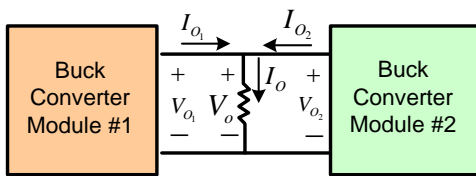
รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมลำดับชั้นการควบคุมในระบบดีซีไมโครกริด, [1]



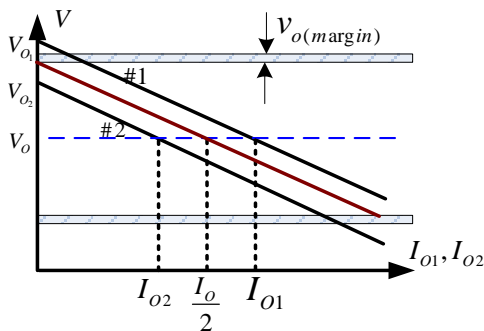
รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของการขนานวงจรคอนเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบรูปในการควบคุมขั้นต้น, [2]



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแรงดันและกระแสแบบขนาน 2 โมดูล



รูปที่ 4 การต่อวงจรกำลังบัคคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 5 กราฟคุณสมบัติโหลดแรกๆเลขชี้ด้วยเทคนิคดรู๊ป

รูปที่ 5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแส ($I-V$ droop curve), [3] สามารถเขียนความสัมพันธ์ตามสมการที่ (1) โดยคำนวณค่าความต้านทานเสมือน R_D ได้จากสมการที่ (2) จากกราฟเมื่อคอนเวอร์เตอร์ 2 โมดูลจ่ายกระแสไม่เท่ากัน จะเห็นว่าโมดูลที่ 1 จ่ายกระแสมากกว่าโมดูลที่ 2 ถ้าต้องการให้ทั้ง 2 โมดูลจ่ายกระแสเท่ากันคือ $\frac{I_0}{2}$ ด้วยการขนานคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถอธิบายได้จากสมการที่ (5)

$$v_o = v_{o(ref)} - R_D * i_o \quad (1)$$

$$R_D \leq [(v_{o(max)} - v_{o(margin)}) - (v_{o(min)} - v_{o(margin)})] / I_{o(FL)} \quad (2)$$

$$v_{o1} = v_{o(ref)} - R_{D1} * i_{o1} \quad (3)$$

$$v_{o2} = v_{o(ref)} - R_{D2} * i_{o2} \quad (4)$$

เมื่อละเลยค่าความต้านทานสายส่งสามารถหาอัตราส่วนของกระแสและความต้านทานเสมือนคือ

$$\frac{i_{o1}}{i_{o2}} = \frac{R_{D2}}{R_{D1}} \quad (5)$$

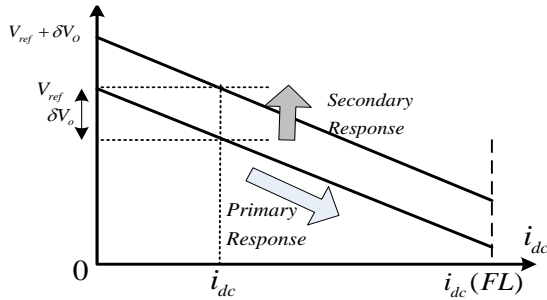
กล่าวคือ เมื่อต้องการให้คอนเวอร์เตอร์ 2 โมดูลจ่ายกระแสเท่ากัน เรากำหนดให้ $R_{D1} = R_{D2}$ การขนานด้วยเทคนิคดรู๊ปในระบบควบคุมแบบดิจิทัลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยสามารถคำนวณอัตราส่วนกระแสที่ต้องให้คอนเวอร์เตอร์จ่ายจากสมการที่ (5) การควบคุมแรงดันในขั้นสุดท้ายใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ โดยแบนวิทซ์ของระบบควบคุมต่ำกว่า แรงดันขาออกจะสามารถกลับสู่แรงดันขาออกอ้างอิงดังรูปที่ 6 จากนั้น บล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 7 แสดงระบบควบคุมกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ในลักษณะคาสเคด ที่มีวงรอบแรงดันใช้การขนานด้วยเทคนิคดรู๊ปในขั้นปฐมภูมิ

บล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 8 แสดงการควบคุมในขั้นสุดท้าย โดยมีบล็อกประวิงเวลาแทนค่า τ ในการสื่อสารที่สามารถกำหนดได้จากสมการที่ (7), [4, 5]

$$G_{pi_s}(s) = K_{PV_s} + \frac{K_{in_s}}{s} \quad (6)$$

$$G_{delay} = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (7)$$

$$G_{Current} = \frac{1}{1 + T_d s} \quad (8)$$



รูปที่ 6 ผลการควบคุมในขั้นทุติยภูมิเพื่อรักษาระดับแรงดันขาออก

3. การออกแบบระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์

หัวข้อนี้เป็นการออกแบบวงจรกำลังและระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ โดยวงจรกำลังถูกออกแบบโดยลดขนาดลงเป็นดีซีไมโครกริดที่มีแรงดันบัส 24 V กำหนดดีวีดีไซเคิล 50 % ที่แหล่งจ่ายแรงดันขาเข้าคงที่ 48 V เมื่อป้อนแหล่งจ่ายที่จำลองพฤติกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.2 กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในวงรอบกระแสและแรงดันของ 2 โมดูลมีค่าเท่ากัน

3.1 การออกแบบวงจรมาคกำลัง

ออกแบบวงจรกำลังให้ทำงานที่ความถี่สวิตซ์ซึ่ง 20 kHz คำนวณค่าความเหนี่ยวนำให้ทำงานในโหมดกระแสตัวเหนี่ยวนำไหลต่อเนื่องโดยใช้สมการที่ (9)

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f_s} \quad (9)$$

แรงดันขาออกที่ได้จากวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์จะต้องออกแบบตัวเก็บประจุเพื่อกรองแรงดันขาออกเพื่อลดแรงดันระลอกคลื่น (Ripple) โดยอาศัยสมการที่ (10)

$$\frac{\Delta v_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf_s^2} \quad (10)$$

ตารางที่ 2 รายการและค่าพารามิเตอร์วงจรกำลัง

รายการ/สัญลักษณ์	ค่า
แรงดันขาเข้า (V_{in})	48 V
แรงดันขาออก (V_o)	24 V
ค่าความเหนี่ยวนำ (L_1, L_2)	80 μ H
ค่าตัวเก็บประจุ (C)	220 μ F
ความถี่สวิตซ์กำลัง (f_s)	20 kHz

3.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์แสงอาทิตย์

จำลองโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงยี่ห้อ Magna-power กำหนดพารามิเตอร์สำหรับเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบจำลอง 4 พารามิเตอร์ จากสมการที่ (11)

$$I = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{V+IR_s}{V_t}} - 1 \right) \quad (11)$$

ที่สภาวะวงจรถัดได้ค่า $I_{sc} \cong I_{ph}$

$$I_o = \frac{I_{sc}}{e^{\frac{V_{oc}}{V_t}}} \quad (12)$$

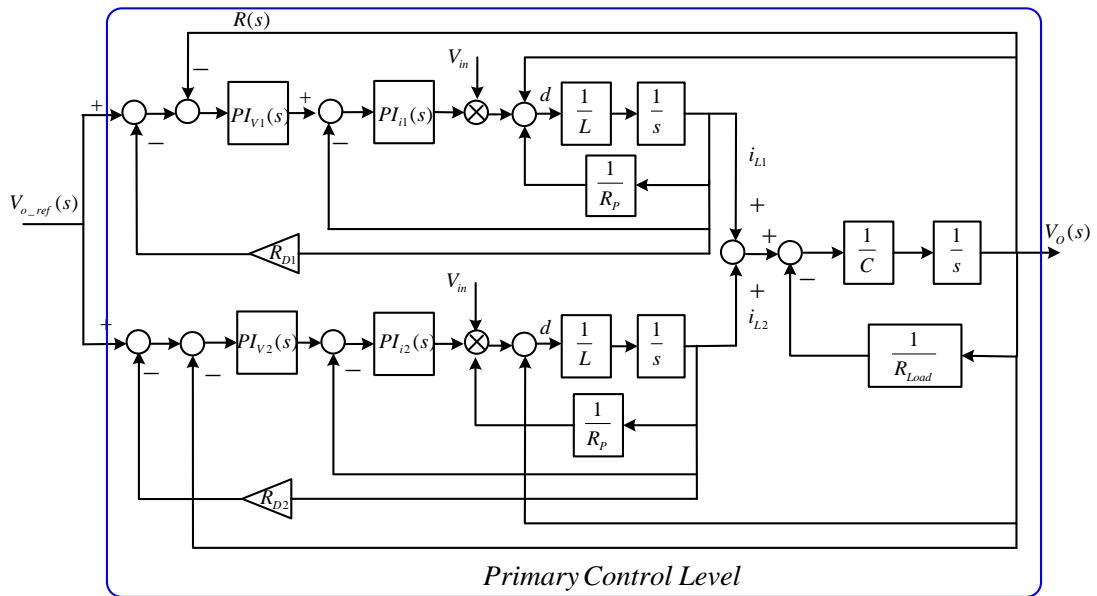
$$V_t = \frac{(2V_{mp} - V_{oc})(I_{sc} - I_{mp})}{I_{mp} - (I_{sc} - I_{mp}) \ln \left(\frac{I_{sc} - I_{mp}}{I_{sc}} \right)} \quad (13)$$

$$R_s = \frac{V_t \ln \left(\frac{I_{sc} - I_{mp}}{I_{sc}} \right) + V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (14)$$

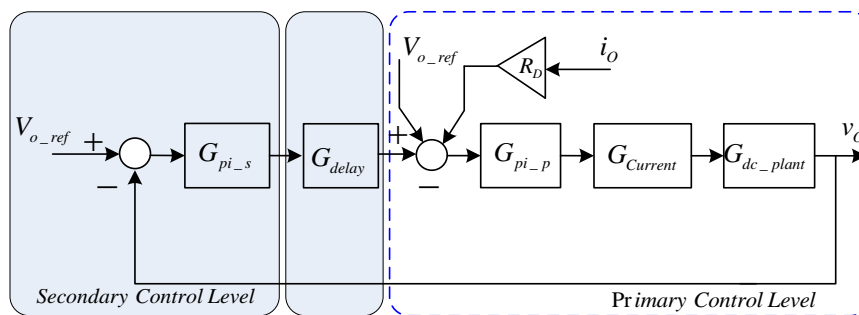
ใช้ค่าพารามิเตอร์จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยี่ห้อ Kaneka รุ่น LEG3024 แบบ Thin Film ดังนี้

$$T_{ref} = 25^\circ C, I_{ref} = 1,000 W/m^2, \\ V_{mp} = 31.0 V, I_{mp} = 0.96 A, V_{oc} = 42.9 A, \\ I_{sc} = 1.17 A, \beta = -0.4 \% V/^\circ C, \\ \alpha = 0.04 \% A/^\circ C$$

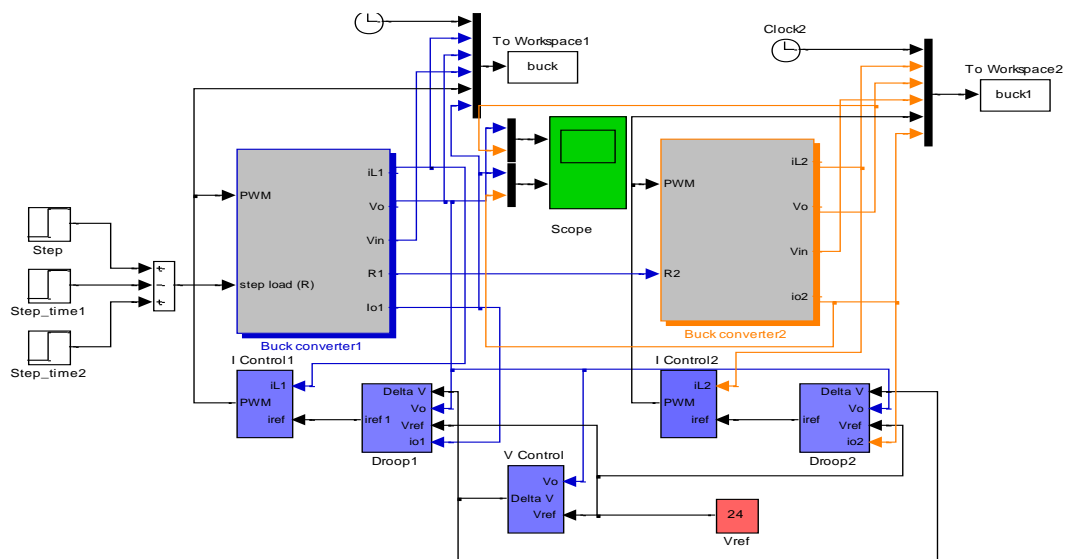
เมื่อป้อนค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์โปรแกรมจะคำนวณค่า I, V ตามสมการที่ (11) และส่งค่าอ้างอิงไปยังแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบโปรแกรมได้ผ่านพอร์ตอนุกรม RS232



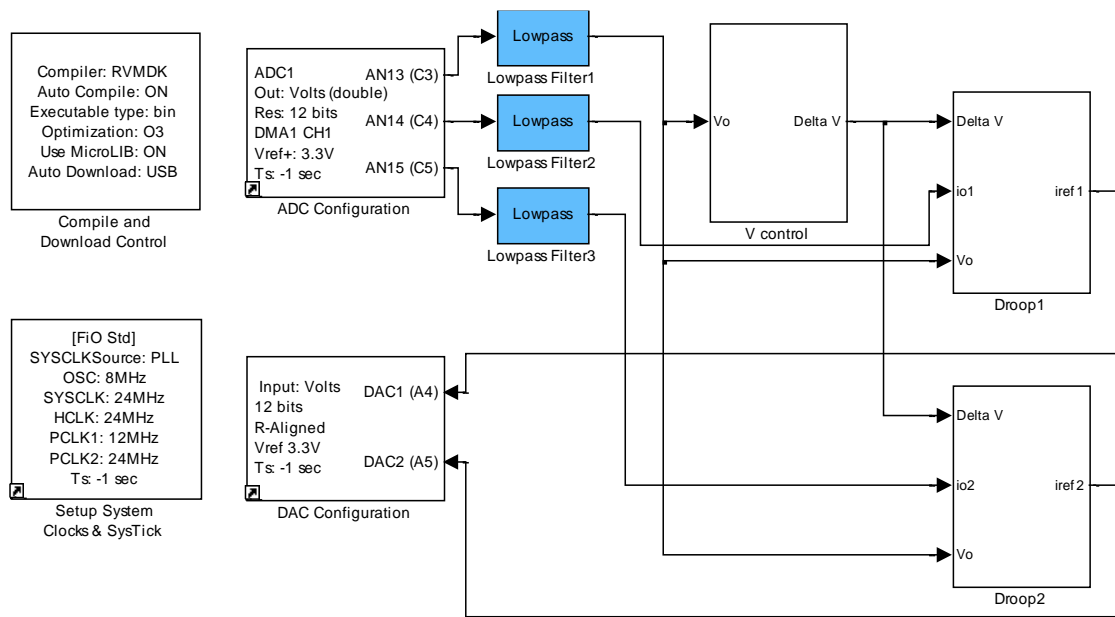
รูปที่ 7 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมสำหรับการควบคุมในชั้นปฐมภูมิ



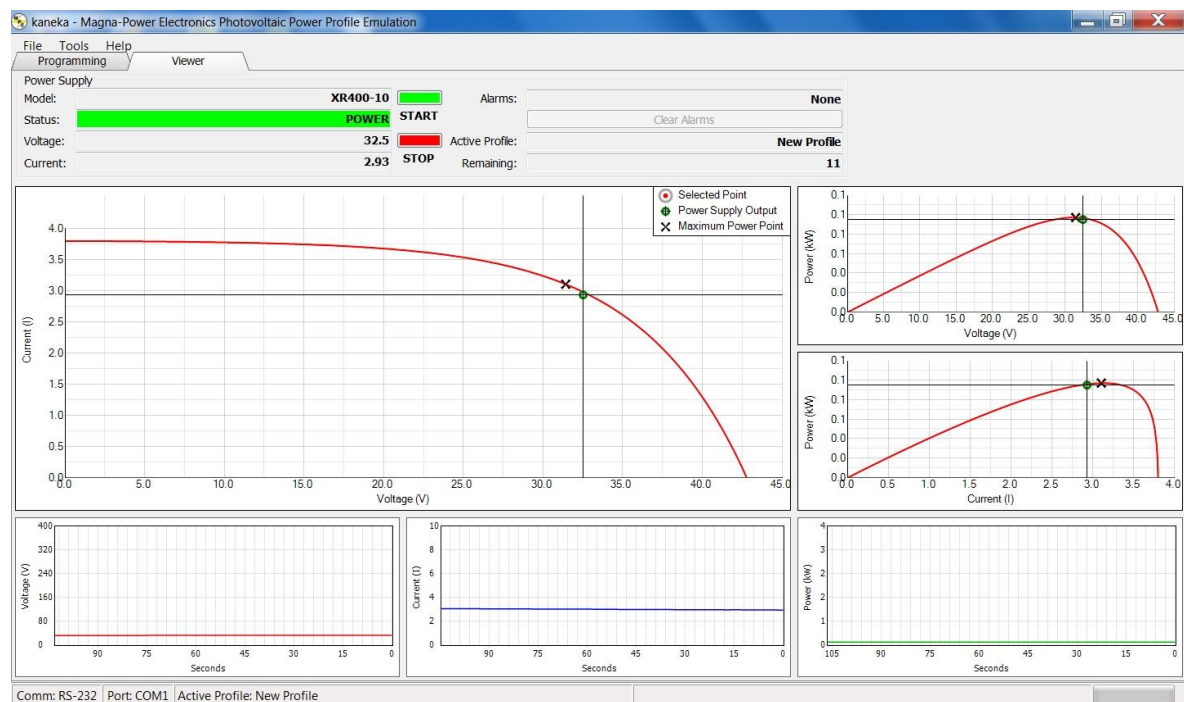
รูปที่ 8 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมสำหรับการควบคุมในชั้นทุติยภูมิ



รูปที่ 9 บล็อกไดอะแกรมจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink



รูปที่ 10 บล็อกไดอะแกรมควบคุมทำงานโดยใช้ RapidSTM32 library



รูปที่ 11 หน้าต่างโปรแกรมเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง Magna Power

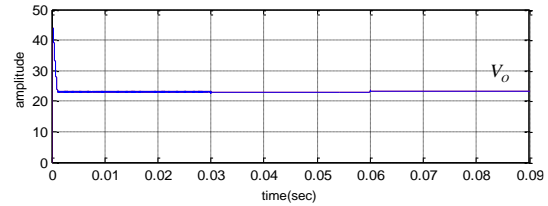
4. การจำลองการทำงานและผลการทดลอง

4.1 การจำลองการทำงานระบบการขนานคอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink แบบทีนเวลา

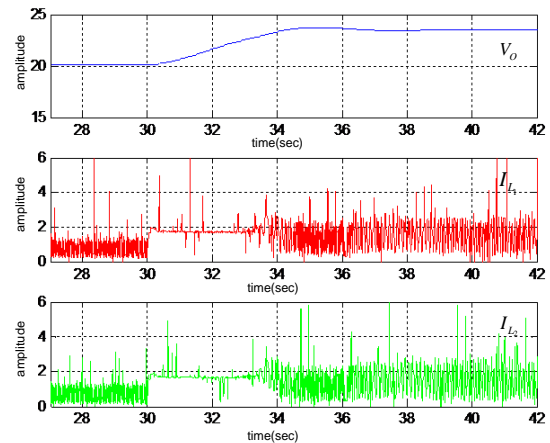
การจำลองการทำงานของวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์ใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ใช้งานสวิตช์แบบอุดมคติแทนอุปกรณ์กำลัง และเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ตัวแปรกระแส i_L และ V_o เพื่อสร้างแบบจำลองและทดสอบระบบควบคุมวงปิดด้วยตัวควบคุมแบบพีไอเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองในภาวะทรานเซียนต์ รูปที่ 12 แสดงสมรรถนะของระบบควบคุมกระแสและแรงดันคอนเวอร์เตอร์เมื่อเปลี่ยนแปลงความต้านทานโหลดแบบทันทีทันใด จะเห็นว่าคอนเวอร์เตอร์สามารถรักษาระดับแรงดันคงที่ 24 V ในรูปที่ 13 เมื่อเปลี่ยนระดับแรงดันอ้างอิงจาก $V_{O_ref} = 20 V$ เป็น 24 V ในขณะที่ขนานคอนเวอร์เตอร์ 2 โมดูลจะเห็นว่ากระแส i_{L1} และ i_{L2} สามารถแบ่งกระแสได้เท่ากัน และรูปที่ 14 แสดงค่าระดับแรงดันขาออก V_o เมื่อไม่มีวงรอบควบคุมชั้นต้น ทำให้ระดับแรงดันขาออกลดลงจากแรงดันอ้างอิง

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ตัวควบคุม

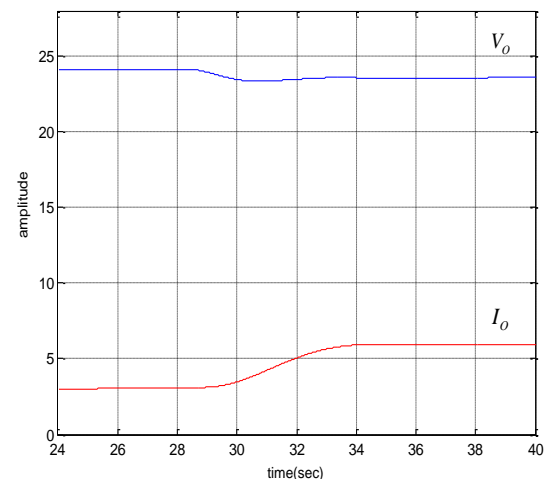
ตัวควบคุม/สัญลักษณ์	ค่า
ตัวควบคุมวงรอบกระแส/ K_{p_c}	5
K_{i_c}	330
ค่าตัวต้านทาน / R_{D1}	5.75 Ω
R_{D2}	5.75 Ω
ค่าประวิเวลา / τ	10 ms
ตัวควบคุมชั้นปฐมภูมิ/ K_{p_p}	0.135
K_{i_p}	0.016
ตัวควบคุมชั้นทุติยภูมิ/ K_{p_s}	0.64
K_{i_s}	0.094



รูปที่ 12 แรงดันขาออกและกระแสขาออกของโมดูลขณะเปลี่ยนแปลงภาระ



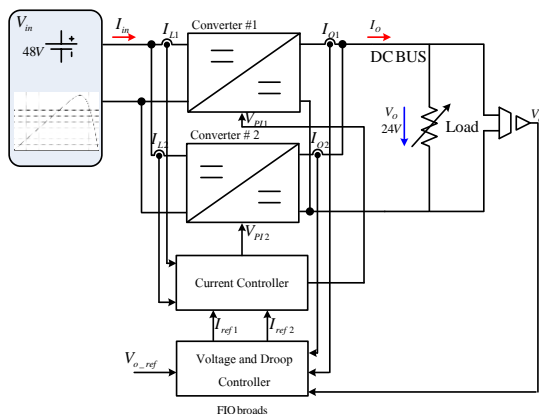
รูปที่ 13 แรงดันขาออก V_o และกระแส i_{L1}, i_{L2} และเมื่อเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงขาออก $V_{O_ref} = 20 \rightarrow 24V$



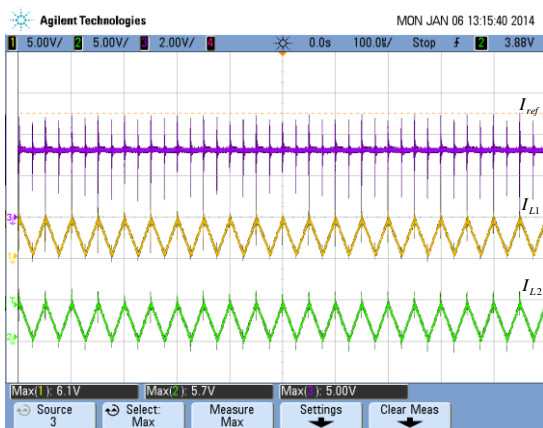
รูปที่ 14 กระแสขาออกและแรงดันขาออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระที่กระแสขาออก 3 A ไปที่ 6 A

4.2 ผลการทดสอบการขนานคอนเวอร์เตอร์ด้วย
เทคนิคการควบคุมแบบครูปเมื่อป้อนแรงดันคงที่ 48 V

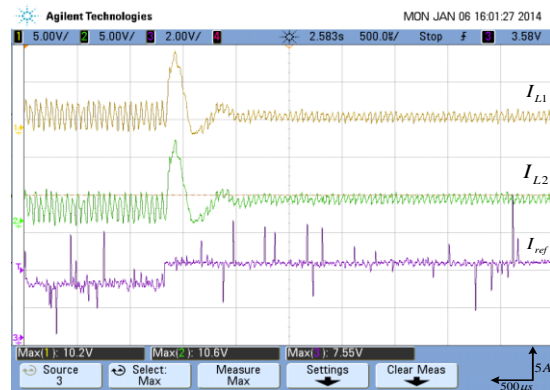
เมื่อทดสอบระบบดีซีไมโครกริดด้วยโหมดการทำงานไมโครคอนโทรลเลอร์แบบฝังตัว ป้อนแรงดันขาเข้าด้วยแหล่งจ่ายแรงดันขนาด 24 V ดังรูปที่ 15 เมื่อทดสอบการทำงานของตัวควบคุมในวงรอบกระแส ผลตอบสนองในภาวะคงตัวและภาวะทรานเซียนของกระแสตัวเหนี่ยวนำสามารถแสดงได้ในรูปที่ 16 และ 17 ตามลำดับ จะเห็นว่าวงจรทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องและสามารถแบ่งกระแสได้เท่ากัน รูปที่ 18 แสดงการรักษาระดับแรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดเมื่อใช้วงรอบการควบคุมในขั้นต้นด้วยเทคนิคครูป รูปที่ 19 แสดงสมรรถนะเมื่อใช้การควบคุมในขั้นสุดท้าย



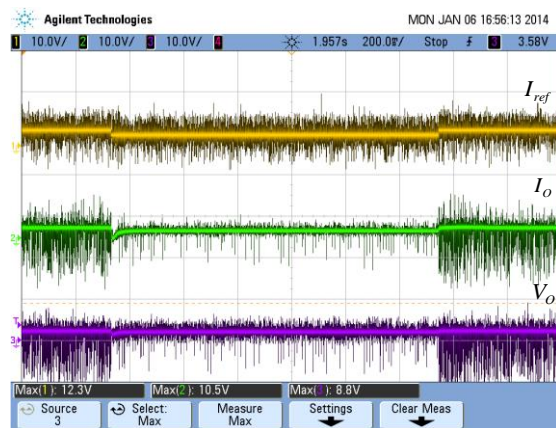
รูปที่ 15 บล็อกไดอะแกรมการทดสอบดีซีไมโครกริด



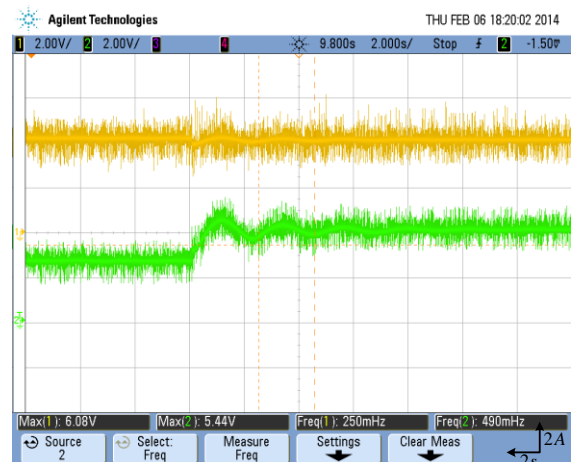
รูปที่ 16 กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำที่มีกระแส
อ้างอิง 3.3 A ในภาวะคงตัว



รูปที่ 17 กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ i_{L1}, i_{L2}
ที่กระแสอ้างอิง 3.3 A



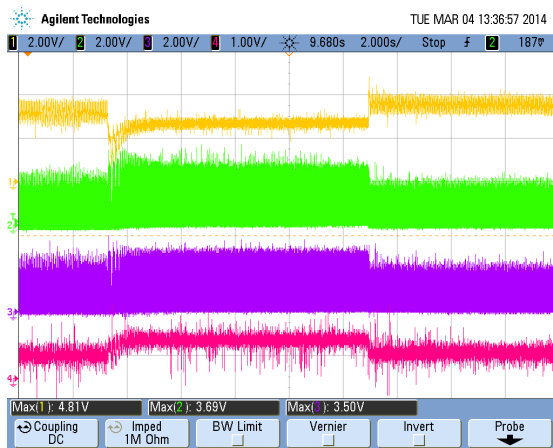
รูปที่ 18 แรงดัน V_o และกระแสขาออก I_o ขณะ
เปลี่ยนแปลงกระแสอ้างอิง I_{ref} 4A → 3A → 4A
โดยใช้งานวงรอบควบคุมขั้นปฐมภูมิ



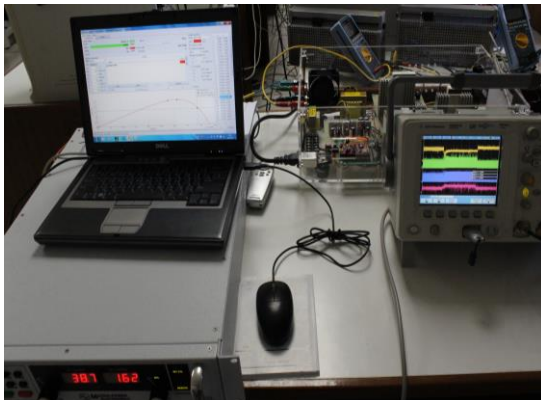
รูปที่ 19 แรงดัน V_o และกระแสขาออก I_o ขณะ
เปลี่ยนแปลงโหลดโดยใช้วงรอบควบคุมขั้นสุดท้าย

4.3 ผลการทดสอบการขนานคอนเวอร์เตอร์ด้วย เทคนิคการควบคุมแบบครูปเมื่อป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้า เลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์

การทดสอบนี้ใช้การตั้งค่าพารามิเตอร์ในหัวข้อ
ที่ 3.2 และกำหนดค่าแหล่งจ่ายการทำงานตามหน้าต่าง
ใช้งานในรูปที่ 11 การทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้งาน
กับเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งกระแสระหว่างโมดูลได้
อย่างไรก็ตามในบทความนี้ไม่มีอัลกอริทึม MPPT
ในขณะที่แรงดันขาเข้ามีการเปลี่ยนแปลงแรงดันตาม
กราฟคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้การรักษา
ระดับแรงดันขาออกมีสมรรถนะต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบ
กับผลในหัวข้อ 4.2



รูปที่ 20 แรงดันขาออก V_o กระแสตัว
เหนี่ยวนำ i_{L1}, i_{L2} และกระแสขาออก I_o ขณะป้อน
แรงดันขาเข้าด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าเลียนแบบเซลล์
แสงอาทิตย์



รูปที่ 21 การทดสอบการขนานคอนเวอร์เตอร์ด้วย
เทคนิคครูป

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการขนานวงจรบัคคอน
เวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคแบบครูปในระบบดีซีไมโครกริด
ด้วยการนำวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์มาขนานกัน เพื่อ
เพิ่มขีดความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มากขึ้น
จากผลการจำลองและทดสอบการทำงานแบบทันเวลา
และแบบฝังตัว ระบบดีซีไมโครกริดสามารถควบคุม
แรงดันขาออกคงที่ 24 V และสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้า
สูงสุด 200 W แสดงให้เห็นว่า คอนเวอร์เตอร์สามารถ
นำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์
แสงอาทิตย์ได้จริง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
สัญญาเลขที่ 289/2555

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuna, and M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids – a general approach toward standardization," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158-172, 2011.
- [2] K. Rouzbehi, C. Gavriluta, J. I. Candela, A. Luna, and P. Rodriguez, "Comprehensive analogy between conventional ac grids and dc grids characteristics," *The 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2013)*, Nov. 10-13, 2013, Vienna, Austria, pp. 2004-2010.
- [3] B. T. Irving and M. M. Jovanovic, "Analysis, design, and performance evaluation of droop current-sharing method," *The 15th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2000)*, Feb. 6-10, 2000, New Orleans, LA, pp. 235-241.

- [4] X. Lu, J. M. Guerrero , and K. Sun, "Distributed secondary control for dc microgrid applications with enhanced current sharing accuracy," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2013)*, May 28-31, 2013, Taipei, Taiwan, pp. 1-6.
- [5] J.-W. Kim, H.-S. Choi, and B. H. Cho, "A novel droop method for converter parallel operation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 17, no. 1, pp. 25-32, 2002.