

อินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีที
ชนิดโหมดการเลื่อน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2558

**SINGLE-PHASE TWO-STAGE GRID-CONNECTED PV
INVERTER WITH SLIDING-MODE MPPT**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2015

อินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.วิโรจน์ แสงชงทอง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์)

กรรมการ

(รศ. ดร.ก้องพล อารีรักษ์)

กรรมการ

(อ. ดร.สุชาติรัตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ถาวร หินชุย : อินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมด
การเลื่อน (SINGLE-PHASE TWO-STAGE GRID-CONNECTED PV INVERTER
WITH SLIDING-MODE MPPT) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อาจารย์ ดร.วิโรจน์
แสงชงทอง, 252 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาการผลิตกำลังงานไฟฟ้าจากแผงพีวีไปยังกริดเอซีเพื่อให้ได้กำลังงาน
ไฟฟ้าสูงสุดภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีแสงแตกต่างกัน ด้วยการใช่วงจรแปลงผันบุสต์ที่มีแผนการ
ติดตามกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดหรือหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนที่บังคับการเปิดและปิดของ
มอสเฟตกำลัง ระบบวงจรอินเวอร์เตอร์สองภาคเฟสเดียวที่ใช้ในการศึกษานี้มีส่วนของวงจรแปลง
ผันบุสต์และวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวชนิดพีดับเบิลยูเอ็ม หน่วยเอ็มพีพีทีได้ใช้หลักการ
ของเส้นตรงการเลื่อนบังคับให้แผงพีวีมีจุดการทำงานเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งของจุดสมมูล ซึ่งเป็น
จุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวี อัลกอริทึมพีแอนด์ไอที
ออกแบบสำหรับงานค้นแบบนี้เป็นส่วนหนึ่งของหน่วยเอ็มพีพีทีที่มีความสำคัญ โดยได้ใช้กำลัง
งานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงพีวีไปปรับเปลี่ยนเส้นตรงการเลื่อนให้เกิดการขยับเลื่อนเข้าหาตำแหน่ง
ของจุดเอ็มพีพีที ระบบการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าของแผงพีวีจึงมีจุดการทำงานที่ติดตามและเคลื่อนที่
เข้าสู่จุดเอ็มพีพีที ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยคณิตศาสตร์และการจำลองสถานการณ์แสดงว่ามี
ความเป็นไปได้ในการผลิตกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดจากแผงพีวีไปยังกริดเอซี

การทดสอบชุดวงจรต้นแบบของวงจรแปลงผันบุสต์และวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟส
เดียวนี้มีตัวควบคุมแรงดันดีซี ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด และเฟสล็อกที่กำหนดลำดับการ
สวิตช์ของไอจีบีที 4 ตัว ระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์ได้สร้างแรงดันดีซีอินพุต
เท่ากับแรงดันดีซีอ้างอิง 100 V และบังคับกระแสไฟฟ้ากริดไซน์ซอซอด้ให้มีมุมเฟสตรงกับมุมเฟส
ของแรงดันกริด เนื่องจากการเกิดซิงโครไนซ์ที่ติระหว่างแรงดันกริดและกระแสไฟฟ้ากริด กริดเอซี
จะมีตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นการถ่ายโอนกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงพีวีไปยังกริดเอ
ซีจึงเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

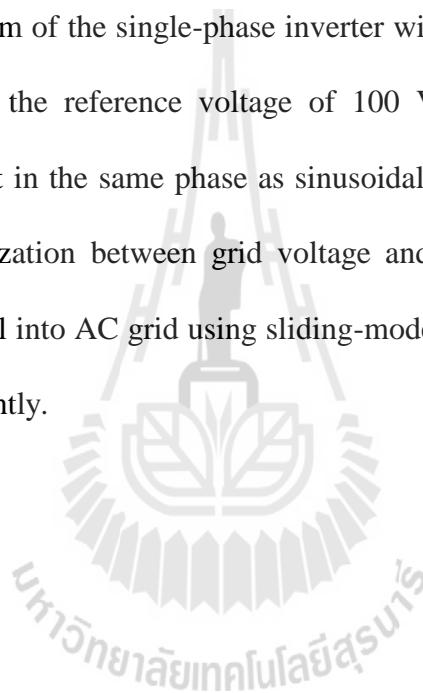
THAWORN HINSUI : SINGLE-PHASE TWO-STAGE GRID-CONNECTED
PV INVERTER WITH SLIDING-MODE MPPT. THESIS ADVISOR :
WIROTE SANGTUNGTONG, Ph.D., 252 PP.

INVERTER PV/SLIDING-MODE/ MPPT/ P&O/SINGLE-PHASE INVERTER/
PHOTOVOLTAIC

Maximum power generated from a photovoltaic (PV) panel into an AC grid has been studied under various illumination conditions by using the designed boost converter with the maximum power point tracker (MPPT). The MPPT system with sliding-mode scheme also consists of a single-phase full-bridge pulse-width modulation (PWM) inverter and the boost converter with one switching power MOSFET. The operation principle of MPPT system is to govern the operating point of the PV panel moving onto the intercept point between the sliding-line and current-voltage curve of PV panel. The P&O algorithm significantly incorporated within the MPPT was designed for the prototype system in order to utilize the PV generated power to adjust the intercept point into a new maximum power point (MPP). The algorithm has resulted to the PV generated power system to have a tracking and a shifting toward a MPP. The simulated results and the stability and convergence analyses with mathematic model were indicated in this study under the various light intensity values. It is found that the convergence of the point reaches the MPP by the P&O algorithm. Therefore, the boost converter with using sliding-mode scheme and

P&O algorithm is most possible to obtain the maximum power generation from PV transferring to AC grid.

The whole prototype circuit of the boost converter and the single-phase full-bridge inverter was experimentally tested including a phase-locked loop (PLL), DC-voltage and grid-current controllers. Three components are used to manipulate the different turned-on and turned-off sequence of 4-IGBT devices. Meanwhile, the feedback control system of the single-phase inverter will obtain the DC input voltage at the same level as the reference voltage of 100 V and is able to control the sinusoidal grid current in the same phase as sinusoidal grid voltage. As result of the preferential synchronization between grid voltage and grid current, electric power transfer from PV panel into AC grid using sliding-mode scheme with P&O algorithm can be realized efficiently.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2015

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Co-Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และโครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และผลการวิจัยพัฒนานวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ภายใต้โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินกองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ผู้ดำเนินงานวิทยานิพนธ์ จึงขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และหน่วยงานอื่น ๆ ที่ให้ทุนวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการเสร็จสิ้นตามวัตถุประสงค์ด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือทางด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ดังนี้

อาจารย์ ดร.วิโรจน์ แสงธงทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้ความรู้อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างมาก และสละเวลาตรวจสอบ แนะนำการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้าน

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้คำแนะนำและกำลังใจอย่างดียิ่งตลอดมา

เจ้าหน้าที่ บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คุณเดชา พลวิเศษ ที่ได้ให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์เกี่ยวกับการเชื่อมต่อกริดไฟฟ้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตลอดจนมาตรฐานข้อกำหนดการรับซื้อขายไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (solar rooftop)

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ถาวร หินชูย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	4
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	4
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	6
2 การติดตามกำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์และการติดตามกำลังงานสูงสุด.....	8
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแผนการติดตามกำลังงานสูงสุดของแผงพีวี.....	13
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบแปลงผันกำลังงานไฟฟ้าดีซีเป็นกำลังงานไฟฟ้าเอซี ที่เชื่อมต่องานกริดเอซีเฟสเดียว.....	18
2.5 สรุป.....	22
3 อินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่องานกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน.....	23
3.1 บทนำ.....	23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2	แผงเซลล์แสงอาทิตย์	24
3.3	พิกัดแรงดันและการเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้า	25
3.4	วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน	27
3.4.1	วงจรแปลงผันบูสต์.....	29
3.4.2	เส้นตรงการเลื่อนที่ดิสคริบนระนาบ $i-v$ ของแผงพีวี	30
3.4.3	หน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน.....	35
3.4.4	อัลกอริทึมการรั้งความและสังเกด (พีแอนด์โอ).....	39
3.5	วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวและระบบควบคุมป้อนกลับ	44
3.5.1	วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์.....	45
3.5.2	ระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว.....	45
3.6	สรุป	48
4	เสถียรภาพของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน	50
4.1	บทนำ.....	50
4.2	เสถียรภาพของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน	50
4.3	การดูเข้าหาจุดเอ็มพีพีของอัลกอริทึมพีแอนด์โอ	59
4.4	สรุป	65
5	การจำลองสถานการณ์วงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกริดสองภาคเฟสเดียว ที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน	67
5.1	บทนำ.....	67
5.2	บล็อกแผงพีวี	67
5.3	การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีโหมดการเลื่อน	69
5.3.1	กรณีที่ 1 ความเข้มแสงอาทิตย์มีระดับคงที่.....	71
5.3.2	กรณีที่ 2 ความเข้มแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงระดับแบบขั้นบันได	77
5.3.3	กรณีที่ 3 ความเข้มแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงระดับแบบลาดเอียง.....	80
5.4	การจำลองสถานการณ์วงจรอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกริดสองภาคเฟสเดียว ที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน	82
5.4.1	กรณีที่ 1 ความเข้มแสงอาทิตย์มีระดับคงที่.....	84

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4.2	กรณีที่ 2 ความเข้มแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงระดับแบบขั้นบันได	90
5.5	สรุป	95
6	การสร้างชุดวงจรต้นแบบของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียว	
	ที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน	97
6.1	บทนำ.....	97
6.2	แผงพีวีและเส้นตรงการเลื่อนที่คิดที่สุด.....	97
6.3	วงจรแปลงผันบูสท์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน	98
6.3.1	มอสเฟตกำลัง Q1 และไดโอด D1	100
6.3.2	ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุด้านอินพุต และตัวเก็บประจุดีซี	101
6.3.3	วงจรแหล่งจ่ายแรงดันดีซี	102
6.3.4	วงจรขั้วขาเกิดของมอสเฟตกำลัง Q1	103
6.3.5	วงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสท์	105
6.3.6	วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสท์	108
6.3.7	การปรับปรุงวงจรแปลงผันบูสท์เพื่อลดขนาดแรงดันที่มีขอดเหลม	110
6.3.8	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1	112
6.4	วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว	113
6.4.1	โมดูลไอจีบีทีเฮชบริดจ์.....	115
6.4.2	วงจรแหล่งจ่ายแรงดันดีซี	116
6.4.3	วงจรขั้วขาเกิดของไอจีบีที	117
6.4.4	วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันดีซี	120
6.4.5	วงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริด	122
6.4.6	วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันกริด	124
6.4.7	ตัวเหนี่ยวนำ L_f และหม้อแปลงไฟฟ้า	126
6.4.8	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2	126
6.5	โปรแกรมภาษาซีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1 และ MCU2	128
6.5.1	โปรแกรมภาษาซีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1	128
6.5.2	โปรแกรมภาษาซีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2	131

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.6 สรุป	134
7 การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีที ชนิดโหมคการเลื่อน	135
7.1 บทนำ.....	135
7.2 วิธีการทดสอบชุดวงจรต้นแบบที่สร้างขึ้น.....	135
7.3 การทดสอบวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน	139
7.4 การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริด 220 V	148
7.5 การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีที ชนิดโหมคการเลื่อน	152
7.6 สรุป	156
8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	158
8.1 สรุป	158
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	159
รายการอ้างอิง	161
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. แผนภาพวงจรของชุดวงจรต้นแบบวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริด สองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน	164
ภาคผนวก ข. โปรแกรมภาษาซีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1 และ MCU2 สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335	166
ภาคผนวก ค. เซ็นเซอร์และอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างชุดวงจรต้นแบบ	197
ภาคผนวก ง. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335	206
ภาคผนวก จ. การประมาณค่าจุดเอ็มพีพีทีบนกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะของแผงพีวี จากเอกสารข้อมูลเฉพาะของผู้ผลิตด้วยโปรแกรม Graph digitizer	222
ภาคผนวก ฉ. การจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของโปรแกรมแมทแลบ	229
ภาคผนวก ช. การออกแบบวงจรแปลงผันบูสต์และวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว ...	240
ภาคผนวก ซ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา	244
ประวัติผู้เขียน	252

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สรุปงานวิจัยก่อนหน้าที่เกี่ยวข้องกับหน่วยเอ็มพีพีที 13
2.2	สรุปงานวิจัยก่อนหน้าที่เกี่ยวข้องกับระบบแปลงผันกำลังงาน ไฟฟ้าดีซีเป็น กำลังงาน ไฟฟ้าเอซีที่เชื่อมต่อกับกริดเอซีเฟสเดียว..... 19
3.1	ข้อมูลคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงพีวี Hanwha Solar รุ่น SF260, 295 W 25
3.2	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรแปลงผันบูสต์..... 30
3.3	จุดเอ็มพีพีทีของแผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260 ที่ได้จากการใช้โปรแกรมประมาณค่า ด้วยโปรแกรม Graph digitizers 32
5.1	คุณลักษณะทางไฟฟ้าของบล็อกแผงพีวี Hanwha Solar รุ่น SF260, 295W ที่อุณหภูมิ 25°C 68
5.2	ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันบูสต์และหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน ที่ใช้จำลองสถานการณ์ 71
5.3	ค่าพารามิเตอร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มี หน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนที่ใช้จำลองสถานการณ์ 84
6.1	ข้อมูลเฉพาะที่สำคัญของมอสเฟตกำลังเบอร์ FCH041N60E 100
6.2	ข้อมูลเฉพาะที่สำคัญของไดโอดเบอร์ VS-30EPF06-M3 101
6.3	พารามิเตอร์ที่ใช้งานในวงจรสับเบอร์ของมอสเฟตกำลัง Q1 112
6.4	ข้อมูลเฉพาะที่สำคัญโมดูลไอจีบีที MKI 50-06 A7 115
6.5	อุปกรณ์และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรขับเคลื่อนไอจีบีทีชุดที่ 1 – 4 120
ค.1	ข้อมูลเฉพาะที่สำคัญของไอซีขับขาเกต เบอร์ TD352ID 198
ค.2	ข้อมูลเฉพาะที่สำคัญของตัวเชื่อมต่อผ่านแสงเบอร์ HCPL-4506 199
ค.3	ข้อมูลเฉพาะที่สำคัญของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP 201
ค.4	ข้อมูลเฉพาะที่สำคัญของเซนเซอร์วัดแรงดัน เบอร์ LV 25-P 203
ง.1	โหมดการทำงานของการ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 209
ง.2	ขา GPIO ของการ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 211

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	กราฟคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่ไม่เชิงเส้นของแผงพีวี2
2.1	วงจรสมมูลของแผงพีวีที่มีเซลล์แสงอาทิตย์หลาย ๆ เซลล์ต่ออนุกรมกัน9
2.2	กราฟคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีที่ขึ้นอยู่กับความเข้มแสงอาทิตย์ 10
2.3	กราฟคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่ไม่เชิงเส้นของแผงพีวีที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ 10
2.4	กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดัน และกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกำลังงานไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวี..... 12
3.1	วงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน23
3.2	แผงพีวี Hanwha Solar รุ่น SF260 และกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีที่อุณหภูมิ 25°C..... 24
3.3	การเปลี่ยนรูปแรงดันดีซีไปเป็นแรงดันเอซีจากแผงพีวีถึงกริดเอซี25
3.4	วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน28
3.5	เส้นตรงการเลื่อนบนระนาบเส้นโค้งกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวี31
3.6	เส้นตรงการเลื่อนที่ดีที่สุดบนระนาบ $i-v$ ของแผงพีวี Hanwha Solar รุ่น SF260 35
3.7	หน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนที่ใช้เส้นตรงการเลื่อนที่ดีที่สุดสร้างสัญญาณขับขาเกต 36
3.8	ระนาบเส้นโค้ง $i-v$ ของแผงพีวีที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยเส้นตรงการเลื่อนที่ดีที่สุด 36
3.9	การเปรียบเทียบผลบวกเชิงเส้นในลักษณะฮิสเตอร์ซิส37
3.10	แผนภาพการทำงานของอัลกอริทึมพีแอนด์ไอในการค้นหาพลังงานมากที่สุด 41
3.11	การขยับเลื่อนของเส้นตรงการเลื่อนสลับไปมาภายในขอบเขตน้อย ๆ ค่าหนึ่ง 43
3.12	วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริดและระบบควบคุมป้อนกลับ 44
3.13	ระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่มีเฟสล็อกูป 46
3.14	การเปรียบเทียบสัญญาณพาหะสามเหลี่ยมเพื่อสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มชนิดชั่วเดียว 48
4.1	วงจรสมมูลในแต่ละโหมคการทำงาน of วงจรแปลงผันบูสต์ที่ขึ้นอยู่กับค่า S (ก) เมื่อ $S < 0$ วงจรแปลงผันบูสต์ทำงานในโหมคออน 52 (ข) เมื่อ $S > 0$ วงจรแปลงผันบูสต์ทำงานในโหมคออฟ 52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 แนววิถีสถานะของระบบบนระนาบเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวี	56
4.3 การเปลี่ยนแปลงของขอบเขตเสถียรภาพและกระแสไฟฟ้า i ในสถานะชั่วคราว.....	58
4.4 ขอบเขตเสถียรภาพและกระแสไฟฟ้า i ในสถานะอยู่ตัว	58
4.5 กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะระหว่างกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงพีวีและค่าคงที่ ref	62
5.1 บล็อกแผงพีวี Hanwha Solar รุ่น SF260, 295 W ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์.....	68
5.2 กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ 4 เส้นของบล็อกแผงพีวี Hanwha Solar รุ่น SF260, 295 W	68
5.3 เส้นตรงการเลื่อนที่ดีที่สุดบนระนาบ $i-v$ ของบล็อกแผงพีวี Hanwha Solar รุ่น SF260, 295 W	69
5.4 การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน	
(ก) วงจรแปลงผันบูสต์ หน่วยเอ็มพีพีที และพารามิเตอร์ต่าง ๆ	71
(ข) แบบจำลองสถานการณ์ ระบบย่อยและส่วนประกอบต่าง ๆ	71
5.5 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีภายใต้สภาพแวดล้อม ที่มีความเข้มแสงอาทิตย์คงที่ 1.00 kW/m^2 และอุณหภูมิ 25°C	
(ก) กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือกระแสไฟฟ้าของบล็อกแผงพีวี	73
(ข) แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือแรงดันของบล็อกแผงพีวี.....	73
5.6 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีภายใต้สภาพแวดล้อม ที่มีความเข้มแสงอาทิตย์คงที่ 0.75 kW/m^2 และอุณหภูมิ 25°C	
(ก) กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือกระแสไฟฟ้าของบล็อกแผงพีวี	74
(ข) แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือแรงดันของบล็อกแผงพีวี.....	74
5.7 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีภายใต้สภาพแวดล้อม ที่มีความเข้มแสงอาทิตย์คงที่ 0.50 kW/m^2 และอุณหภูมิ 25°C	
(ก) กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือกระแสไฟฟ้าของบล็อกแผงพีวี	75
(ข) แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือแรงดันของบล็อกแผงพีวี.....	75
5.8 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีภายใต้สภาพแวดล้อม ที่มีความเข้มแสงอาทิตย์คงที่ 0.25 kW/m^2 และอุณหภูมิ 25°C	
(ก) กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือกระแสไฟฟ้าของบล็อกแผงพีวี	76
(ข) แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือแรงดันของบล็อกแผงพีวี.....	76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9	กระแสไฟฟ้าและแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีที่เมื่อเชื่อมต่อโหลดตัวต้านทานแตกต่างกันที่ความเข้มแสงอาทิตย์คงที่ 1.00 kW/m ²
(ก)	โหลดตัวต้านทาน 25 Ω..... 76
(ข)	โหลดตัวต้านทาน 75 Ω..... 76
5.10	ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นแบบขั้นบันได
(ก)	การเพิ่มขึ้นแบบขั้นบันไดของระดับความเข้มแสงอาทิตย์ที่เวลา 2 s 78
(ข)	กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือกระแสไฟฟ้าของบล็อกแผงพีวี 78
(ค)	แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือแรงดันของบล็อกแผงพีวี 78
5.11	ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์ลดลงแบบขั้นบันได
(ก)	การลดลงแบบขั้นบันไดของระดับความเข้มแสงอาทิตย์ที่เวลา 2 s..... 79
(ข)	กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือกระแสไฟฟ้าของบล็อกแผงพีวี 79
(ค)	แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือแรงดันของบล็อกแผงพีวี 79
5.12	ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีภายใต้สภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์ลดลงและเพิ่มขึ้นแบบลาดเอียง
(ก)	การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์ลดลงและเพิ่มขึ้นแบบลาดเอียง..... 81
(ข)	กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือกระแสไฟฟ้าของบล็อกแผงพีวี 81
(ค)	กำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ผลิตได้จากบล็อกแผงพีวี..... 81
5.13	การจำลองสถานการณ์วงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน
(ก)	วงจรภาคแรก วงจรภาคที่สอง และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ..... 83
(ข)	แบบจำลองสถานการณ์ ระบบย่อยและส่วนประกอบต่าง ๆ ของวงจรทั้ง 2 ภาค 83
5.14	ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวเมื่อกริดเอชีสรางแรงดันไซน์ซออยด์ที่มีมูมเฟส 0 องศา
(ก)	กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือกระแสไฟฟ้าของบล็อกแผงพีวี 85
(ข)	แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือแรงดันของบล็อกแผงพีวี 87

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ค) แรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์.....	87
(ง) แรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง	87
(จ) กระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง	87
(ฉ) กำลังงานเฉลี่ยที่กริดเอซีได้รับจากบล็อกแผงพีวี	87
5.15 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียว เมื่อกริดเอซีสร้างแรงดันไซน์ซอชอยด์ที่มีมมเฟส 90 องศา	
(ก) กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือกระแสไฟฟ้าของบล็อกแผงพีวี	88
(ข) แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือแรงดันของบล็อกแผงพีวี	88
(ค) แรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์.....	88
(ง) แรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง	88
(จ) กระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง	88
5.16 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียว เมื่อกริดเอซีสร้างแรงดันไซน์ซอชอยด์ที่มีมมเฟส 180 องศา	
(ก) กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือกระแสไฟฟ้าของบล็อกแผงพีวี	90
(ข) แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือแรงดันของบล็อกแผงพีวี	90
(ค) แรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์.....	90
(ง) แรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง	90
(จ) กระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง	90
5.17 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวี ๑ ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการ เปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์ลดลงอย่างฉับพลันแบบขั้นบันได	
(ก) การลดลงแบบขั้นบันไดของระดับความเข้มแสงอาทิตย์ที่เวลา 10 s	93
(ข) แรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์.....	93
(ค) แรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง.....	93
(ง) กระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง	93
(จ) กำลังงานเฉลี่ยที่กริดเอซีได้รับจากบล็อกแผงพีวี	93
5.18 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวี ๑ ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการ เปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันแบบขั้นบันได	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ก) การเพิ่มแบบขั้นบันไดของระดับความเข้มแสงอาทิตย์ที่เวลา 10 s	95
(ข) แรงดันคิซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์	95
(ค) แรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง	95
(ง) กระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง	95
(จ) กำลังงานเฉลี่ยที่กริดเอซีได้รับจากบล็อกแผงพีวี	95
6.1 การติดตั้งแผงพีวี Hanwha Solar รุ่น SF260, 295 W บนฐานรองที่เคลื่อนย้ายได้	98
6.2 ชุดวงจรต้นแบบวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนที่ใช้งาน	99
6.3 มอสเฟตกำลังเบอร์ FCH041N60E (ก) ตัวถังและหมายเลขขา (ข) สัญลักษณ์และชื่อขา	100
6.4 ไดโอดเบอร์ VS-30EPF06-M3 (ก) ตัวถังและหมายเลขขา (ข) สัญลักษณ์และชื่อขา	101
6.5 ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุด้านอินพุต และตัวเก็บประจุคิซีที่ใช้	
(ก) ตัวเหนี่ยวนำชนิดแกนเหล็ก 20 mH	102
(ข) ตัวเก็บประจุ เบอร์ ECOS2AA102CA	102
(ค) ตัวเก็บประจุ เบอร์ ALS30A222MF400	102
6.6 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันคิซีที่ใช้งานในวงจรแปลงผันบูสต์	102
6.7 วงจรขับขาเกตของมอสเฟตกำลัง Q1	103
6.8 วงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์	106
6.9 วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์	108
6.10 ผลการทดสอบของวงจรแปลงผันบูสต์ด้วยสัญญาณพัลส์ 20 kHz ที่ค่าวัฏจักร 50 %	
(ก) แรงดัน V_{DS} ของมอสเฟต (สีน้ำเงิน) และแรงดันคิซี (สีแดง) ก่อนปรับปรุง	111
(ข) แรงดัน V_{DS} ของมอสเฟต (สีน้ำเงิน) และแรงดันคิซี (สีแดง) หลังปรับปรุง	111
6.11 วงจรสับเบอร์อาร์แอลดีและวงจรสับเบอร์อาร์ซีดีของมอสเฟตกำลัง Q1	111
6.12 การเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1	113
6.13 ชุดวงจรต้นแบบวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่ใช้งาน	114
6.14 โมดูลไอจีบีที MKI 50-06 A7 (ก) ตัวถังและหมายเลขขา (ข) สัญลักษณ์และชื่อขา	115
6.15 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันคิซีที่ใช้งานวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว	116
6.16 วงจรขับขาเกตของไอจีบีทีทั้ง 4 ชุดที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว	
(ก) วงจรขับขาเกตไอจีบีทีชุดที่ 1 ทำหน้าที่ขับขาเกตของไอจีบีที T1	119

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ข) วงจรขับขาเกตไอจีบีทีชนิดที่ 2 ทำหน้าที่ขับขาเกตของไอจีบีที T2.....	118
(ก) วงจรขับขาเกตไอจีบีทีชนิดที่ 3 ทำหน้าที่ขับขาเกตของไอจีบีที T3.....	118
(ข) วงจรขับขาเกตไอจีบีทีชนิดที่ 4 ทำหน้าที่ขับขาเกตของไอจีบีที T4.....	119
6.17 วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันคิซีที่ใช้งานในวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว	121
6.18 วงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริดที่ใช้งานในวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว	123
6.19 วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันกริดที่ใช้งานในวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว	124
6.20 ตัวเหนี่ยวนำเอชซีและหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานในวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว	
(ก) ตัวเหนี่ยวนำ L_f ชนิดแกนแผ่นเหล็กขนาด 5mH.....	126
(ข) หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 500 VA ที่มีอัตราส่วนแรงดันเท่ากับ 60/220 V.....	126
6.21 การเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2.....	127
6.22 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมภาษาซีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1.....	129
6.23 การทำงานของโปรแกรมบริการอินเตอร์รัพต์บนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1	130
6.24 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมภาษาซีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2.....	132
6.25 การทำงานของโปรแกรมบริการอินเตอร์รัพต์บนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2	133
7.1 อุปกรณ์และชุดวงจรทดสอบหากราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีที่เกิดขึ้นจริง	
(ก) กล้องถ่ายภาพอัตโนมัติที่บันทึกภาพของค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดแสงสว่าง	136
(ข) วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบหากราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวี	136
7.2 ชุดโคมไฟหลอดไอโอดีนที่ใช้สร้างแสงอาทิตย์เทียม	137
7.3 พลังงานสเปกตรัมแสงของแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่าง ๆ ที่ความยาวคลื่น 250 – 2500 nm .	138
7.4 การทดสอบวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีที่ร่วมกับแผงพีวีภายใต้แสงอาทิตย์จริง ...	139
7.5 ผลการทดสอบของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีที่ร่วมกับแผงพีวีภายใต้แสงเทียม	
(ก) เส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีที่ได้จากการทดสอบ	140
(ข) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันคิซี (สีชมพู) 120V ..	140
(ค) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันคิซี (สีชมพู) 100V ..	141
(ง) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันคิซี (สีชมพู) 75V.....	141
7.6 ผลการทดสอบของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนร่วมกับแผงพีวีภายใต้แสงอาทิตย์จริงในวันที่ท้องฟ้าโปร่งและมีแสงอาทิตย์จ้า	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ก) เส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีที่ได้จากการทดสอบ	143
(ข) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 120V ..	143
(ค) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 100V ..	143
(ง) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 75V.....	143
7.7 ผลการทดสอบของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนร่วมกับ แผงพีวีภายใต้แสงอาทิตย์จริงในวันที่ท้องฟ้าโปร่งและมีแสงอาทิตย์อ่อน ๆ	
(ก) เส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีที่ได้จากการทดสอบ	145
(ข) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 120V ..	145
(ค) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 100V ..	145
(ง) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 75V.....	145
7.8 ผลการทดสอบของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนร่วมกับ แผงพีวีภายใต้แสงอาทิตย์จริงในวันที่ท้องฟ้ามีดกริม	
(ก) เส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีที่ได้จากการทดสอบ	147
(ข) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 120V ..	147
(ค) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 100V ..	147
(ง) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 75V.....	147
7.9 การทดสอบชุดวงจรต้นแบบวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกกริดเอซี.....	148
7.10 วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว	149
7.11 สัญญาณกระแสไฟฟ้ากริด (สีชมพู) และแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (สีแดง)	
(ก) เมื่อกำหนดค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงเท่ากับ 3.0 A.....	150
(ข) เมื่อกำหนดค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงเท่ากับ 7.5 A.....	150
7.12 การลู่เข้าหาค่าแรงดันดีซีอ้างอิง 100 V ของแรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์	151
7.13 การทดสอบชุดวงจรต้นแบบทั้ง 2 ภาคที่มีการเชื่อมต่อกกริดภายใต้แสงอาทิตย์จริง	152
7.14 สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการวัดของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกกริดสองภาคเฟสเดียว ที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนภายใต้แสงอาทิตย์จริงที่ทดสอบ	
(ก) กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีที่ได้จากการทดสอบ	154

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ข) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) และแรงดันดีซี (สีเขียว) ของวงจรแปลงผันบูสต์.....	154
(ค) แรงดันเอซีเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ (สีน้ำเงิน) แรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (สีแดง) และกระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (สีเขียว).....	154
7.15 สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการวัดของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียว ที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนภายใต้แสงอาทิตย์จริงที่ทดสอบ	
(ก) เส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีที่ได้จากการทดสอบ	156
(ข) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) และแรงดันดีซี (สีเขียว) ของวงจรแปลงผันบูสต์.....	156
(ค) แรงดันเอซีเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ (สีน้ำเงิน) แรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (สีแดง) และกระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (สีเขียว).....	156
ค.1 ไอซีขับขาเกตเบอร์ TD352ID รูปร่างตัวถัง (ก) ชื่อขาและสัญลักษณ์ (ข)	198
ค.2 ตัวเชื่อมต่อผ่านแสงเบอร์ HCPL-4506 รูปร่างตัวถัง (ก) ชื่อขาและสัญลักษณ์ (ข).....	199
ค.3 เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP รูปร่างตัวถัง (ก) ชื่อขาและสัญลักษณ์ (ข).....	200
ค.4 แรงดันทุติยภูมิและกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิของเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP ..	201
ค.5 เซนเซอร์วัดแรงดันเบอร์ LV 25-P รูปร่างตัวถัง (ก) ชื่อขาและสัญลักษณ์ (ข).....	202
ค.6 กระแสไฟฟ้าทุติยภูมิและกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิของเซ็นเซอร์วัดแรงดันเบอร์ LV 25-P.....	204
ค.7 ออปแอมป์เบอร์ OP284EPZ รูปร่างตัวถัง (ก) ชื่อขาและสัญลักษณ์ (ข)	205
ง.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 Experimenter Kits	207
ง.2 การ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 (ซ้าย) และบอร์ด Docking station (ขวา) ...	207
ง.3 สวิตช์ SW1 และ SW2 บนการ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335	209
ง.4 ระบบสัญญาณนาฬิกาของการ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335.....	210
ง.5 แผนผังรีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดหน้าที่ขา GPIO ของ TMS320F28335	213
ง.6 แผนภาพระบบสัญญาณนาฬิกาของโมดูล ePWM	214
ง.7 แผนภาพรีจิสเตอร์และการทำงานของโมดูล ePWM ของ TMS320F28335	214
ง.8 แผนภาพการซิงโครไนซ์สัญญาณนาฬิกาของโมดูล ePWM.....	215
ง.9 แผนภาพการแปลงเอชดีแบบ Cascaded Sequencer ADC ของ TMS320F28335	217

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.10	แผนภาพการแปลงเอาต์พุตแบบ Dual Sequencer ADC ของ TMS320F28335 218
ง.11	ระบบสัญญาณนาฬิกาโมดูลการแปลงเอาต์พุต ของ TMS320F28335..... 219
ง.12	เวลาที่ใช้ในการแปลงเอาต์พุตแบบทีละ 1 ช่องสัญญาณอินพุต 219
ง.13	เวลาที่ใช้ในการแปลงเอาต์พุตแบบทีละ 2 ช่องสัญญาณอินพุต 219
ง.14	แผนภาพระบบอินเทอร์รัพต์ของ TMS320F28335..... 221
จ.1	โปรแกรม UN-SCAN-IT Graph Digitizing 223
จ.2	กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะเฉพาะของบล็อกแผงพีวี Hanwha Solar รุ่น SF260 224
ฉ.1	แบบจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน 230
ฉ.2	บล็อกหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน 230
ฉ.3	บล็อกอัลกอริทึมพีแอนด์ไอ 231
ฉ.4	แบบจำลองสถานการณ์วงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียว ที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน 231
ฉ.5	บล็อกระบบควบคุมป้องกันกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ประกอบด้วย ตัวควบคุมแรงดันดีซี ตัวกระแสไฟฟ้ากริด และเฟสล็อกกลุ๊ป 232
ฉ.6	บล็อกตัวควบคุมแรงดันดีซี 232
ฉ.7	บล็อกตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด 232
ฉ.8	แบบจำลองสถานการณ์ตัวอย่างระบบผลิตกำลังไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เชื่อมต่อกับกริดไฟฟ้าขนาด 100 kW 233
ฉ.9	บล็อกแผงพีวีและหน้าต่ากำหนดค่าพารามิเตอร์ 234
ฉ.10	หน้าต่าสำหรับจัดการแก้ไขหน้าต่ากของบล็อกแผงพีวี 235
ฉ.11	วงจรสมมูลของแผงพีวีที่มีเซลล์แสงอาทิตย์หลาย ๆ เซลล์ต่ออนุกรมกัน 237

บทที่ 1

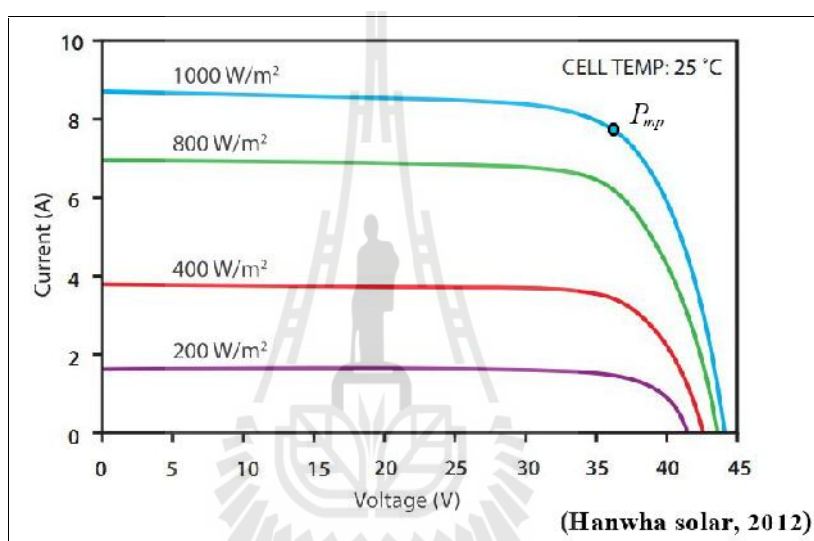
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันและในอนาคตมนุษย์มีแนวโน้มในการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และมีความต้องการใช้พลังงานให้เพียงพอในกิจกรรมต่าง ๆ จึงได้เกิดการพัฒนาแหล่งผลิตพลังงานทางเลือกที่เป็นพลังงานธรรมชาติ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม เป็นต้น พลังงานแสงอาทิตย์คือพลังงานทางเลือกหนึ่งที่น่ามาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าในอันดับต้นของโลก หน่วยงานภาครัฐในประเทศไทยได้ให้ความสนใจและสนับสนุนการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ผลิตพลังงานไฟฟ้าอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในปี พ.ศ. 2547 หน่วยงานภาครัฐได้ออกระเบียบการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนขนาดเล็กมาก (VSPP) เป็นครั้งแรก และล่าสุดในปี พ.ศ. 2556 คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานได้ออกประกาศการรับซื้อไฟฟ้าจากการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา (solar roof-top) ในปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตได้พัฒนาแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือแผงพีวี (PV: photovoltaic modules) ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่การนำแผงพีวีมาใช้งานหรือเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น ระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่องริด (grid-connected systems) ระบบไฟฟ้าเอกเทศ (stand-alone systems) หรือระบบไฟฟ้าที่ไม่เชื่อมต่องริด (off-grid systems) ที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าหรือมีโหนดที่แตกต่างกัน ซึ่งการเชื่อมต่องระบบไฟฟ้างกล่าวทำให้แผงพีวีมีจุดการทำงาน (operating point) ที่แตกต่างกัน และเมื่อสภาพแวดล้อมโดยรอบแผงพีวี เช่น แสงสว่าง หรือความเข้มของแสงอาทิตย์ อุณหภูมิ เพิ่มขึ้นหรือลดลงจะทำให้แผงพีวีมีจุดการทำงานที่เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน

แผงพีวีประกอบด้วยไดโอดป้องกัน (blocking diode) พอลิเมอร์อีวีเอ (Ethylene vinyl acetate: EVA) กระจกกันกระแทก (tempered glass) และเซลล์แสงอาทิตย์ (photovoltaic cells) หลาย ๆ เซลล์ที่เชื่อมต่อเรียงกันแบบอนุกรม (IEC, 1993) ทำให้แผงพีวีมีค่าแรงดันเอาต์พุต กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต และกำลังงานเอาต์พุตตามที่ต้องการ แผงพีวีมีพฤติกรรมสติกที่ไม่เป็นเชิงเส้นหรือมีคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่ไม่เชิงเส้น (nonlinear characteristics) (Wenham, Green, et al., pp. 43-51) แสดงในรูปที่ 1.1 จุดการทำงานของแผงพีวี (I_{pv} , V_{pv}) อยู่ที่จุดใดจุดหนึ่งบนเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีที่ขึ้นอยู่กับโหนดทางไฟฟ้าที่นำมา

เชื่อมต่อด้านเอาต์พุตโดยตรง แผงพีวีมีเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันหลายเส้นที่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงอาทิตย์ (solar insolation) และอุณหภูมิ (ambient temperature) ถ้าโหลดหรือความเข้มของแสงอาทิตย์เกิดการเปลี่ยนแปลง แผงพีวีจะมีจุดการทำงานที่เปลี่ยนตำแหน่งจากเดิม และเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีแต่ละเส้นจะมีจุดการทำงานเพียงจุดเดียวเท่านั้นที่ทำให้แผงพีวีผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด (P_{mp}) จุดการทำงานดังกล่าวมีชื่อว่าจุดเอ็มพีพี (MPP: maximum power point) เมื่อแผงพีวีมีจุดการทำงานอยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดเอ็มพีพี แผงพีวีจะมีประสิทธิภาพดีที่สุดในสภาพแวดล้อมโดยรอบที่เกิดขึ้น



รูปที่ 1.1 กราฟคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่ไม่เชิงเส้นของแผงพีวี

การแผ่รังสีของแสงอาทิตย์ (solar irradiance) ในระดับที่แตกต่างกัน และอุณหภูมิแวดล้อม (ambient temperature) ที่แตกต่างกันทำให้แผงพีวีมีเส้นโค้งคุณลักษณะและจุดเอ็มพีพีที่แตกต่างกัน แผงพีวีที่เชื่อมต่อกับโหลดมีความเป็นไปได้สูงมากที่มีจุดการทำงานอยู่ในตำแหน่งที่แตกต่างจากจุดเอ็มพีพี ถ้าผู้ใช้งานต้องการให้แผงพีวีผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุดตลอดเวลา หรือต้องการให้แผงพีวีมีจุดการทำงานที่อยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดเอ็มพีพีตลอดเวลา ผู้ใช้งานหรือผู้ผลิตจะต้องเพิ่มเติมหน่วยติดตามกำลังงานสูงสุดหรือเอ็มพีพีที (MPPT: maximum power point tracker) และวงจรแปลงผันกำลังที่เชื่อมต่อกันกลางระหว่างแผงพีวีและโหลด เมื่อโหลดมีปริมาณคงที่หรือโหลดมีการเปลี่ยนแปลง หน่วยเอ็มพีพีทีและวงจรแปลงผันกำลังจะบังคับให้แผงพีวีมีจุดการทำงานที่อยู่ในตำแหน่งเดียวกับหรือใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพีในสภาพแวดล้อมโดยรอบที่ต่าง

หน่วยเอ็มพีพีทีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ เทคนิคการรบกวนและสังเกตหรือพีแอนด์โอ (perturb and observe: P&O) เนื่องจากพีแอนด์โอเป็นเทคนิคที่ไม่ซับซ้อนและการสร้างพีแอนด์โอมีต้นทุนต่ำ การติดตามกำลังงานสูงสุดมีสมรรถนะที่ขึ้นอยู่กับค่าการรบกวน (perturb value) ถ้าค่าการรบกวนมีค่ามาก การติดตามกำลังงานสูงสุดนั้นใช้เวลาสั้นแต่เกิดการสั่นหรือการแกว่งในสถานะอยู่ตัว ทำให้แรงแพวีวีมีจุดการทำงานที่วนอยู่รอบ ๆ จุดเอ็มพีพีและแรงแพวีวีผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้น้อยกว่ากำลังงานไฟฟ้ามากที่สุด แต่ถ้าค่าการรบกวนมีค่าน้อย การติดตามกำลังงานสูงสุดนั้นใช้เวลานานแต่เกิดการสั่นหรือการแกว่งน้อยมากในสถานะอยู่ตัว ทำให้แรงแพวีวีมีจุดการทำงานที่ใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพีมากขึ้น และแรงแพวีวีผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นและใกล้เคียงกับกำลังงานไฟฟ้ามากที่สุด ดังนั้นผู้ใช้งานหรือผู้ผลิตต้องเลือกค่าการรบกวนที่เหมาะสมที่สุด (Abdelsalem, Massoud, et al., 2011) วิธีโหมดการเลื่อน (sliding-mode method) ใช้พื้นผิวหรือเส้นตรงการเลื่อน (sliding line) บังคับการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังและทำให้แรงแพวีวีมีจุดการทำงานอยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดเอ็มพีพี นอกจากนี้วิธีฟัซซีลอจิก (fuzzy logic) (Islam, Talukdar, et al., 2010) หรือวิธีการอื่นที่ใช้คณิตศาสตร์ขั้นสูงนั้นมีความยุ่งยากและซับซ้อน และใช้ต้นทุนสูงและระยะเวลาที่ยาวนานในการสร้าง (Singh, Shine, and Janamala, 2014)

หน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนใช้เส้นตรงการเลื่อนบังคับการสวิตช์ของวงจรแปลงผันบูสต์ (boost converter) ทำให้แรงแพวีวีมีจุดการทำงานเคลื่อนที่ไปตามเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้า และจุดการทำงานเคลื่อนที่เข้าหาจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะ เทคนิคพีแอนด์โอใช้กำลังงานที่ผลิตได้จากแรงแพวีวีนำมาปรับเปลี่ยนค่าคงที่ของเส้นตรงการเลื่อน ทำให้จุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะเคลื่อนที่เข้าหาจุดเอ็มพีพี แต่เส้นตรงการเลื่อนมีความชันคงที่ วิธีโหมดการเลื่อนบังคับให้แรงแพวีวีมีจุดการทำงานที่ติดตามและเคลื่อนที่ถึงจุดเอ็มพีพีได้ในช่วงระยะเวลาสั้น หรือ ให้ผลตอบสนองการติดตามกำลังงานสูงสุดที่รวดเร็ว (Levron & Shmilovitz, 2013) เนื่องจากแรงแพวีวีคือแหล่งจ่ายแรงดันดีซีที่สร้างแรงดันดีซีที่มีค่าต่ำและกระแสไฟฟ้ดีซีที่มีค่าสูง แต่โหลดหรือเอาต์พุตของระบบที่ต้องการคือกริดเอซีเฟสเดียวที่มีแรงดันเอซี 220 V_{rms} และมีความถี่ 50 Hz การเปลี่ยนรูปแรงดันดีซีที่ผลิตได้จากแรงแพวีวีไปเป็นแรงดันเอซีจึงต้องใช้วงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว (single-phase inverter) ที่มีขดลวดเหนี่ยวนำหรือรีแอคเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นฟิลเตอร์ หม้อแปลงทำหน้าที่ยกระดับแรงดันเอซีเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ให้สูงเท่ากับแรงดันกริด และระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับของแรงดันและกระแสไฟฟ้กริด ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ในการเปลี่ยนรูปแรงดันดีซีไปเป็นแรงดันเอซี และบังคับให้เกิดการส่งจ่ายกำลังงานที่ผลิตได้จากแรงแพวีวีถึงกริดเอซี (Kim &

Youn, 2005) การควบคุมการส่งจ่ายกำลังงานสูงสุดจากแผงพีวีไปยังกริดเอซีให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาระบบแปลงผันกำลังงานไฟฟ้าดีซีสูงสุดจากแผงพีวีเป็นกำลังงานไฟฟ้าเอซีที่เชื่อมต่อถึงกริดเอซีเฟสเดียว วงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน ประกอบด้วยวงจร 2 ภาค ภาคแรกคือวงจรแปลงผันบุสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน วงจรแปลงผันบุสต์มีด้านอินพุตที่เชื่อมต่อเข้ากับแผงพีวี และภาคที่สองคือวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว (single-phase full-bridge inverter) ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันดีซีไปเป็นแรงดันเอซี และเชื่อมต่อกับกลางระหว่างวงจรแปลงผันบุสต์และกริดเอซี วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวมีระบบควบคุมป้อนกลับที่ประกอบด้วยตัวควบคุมแรงดันดีซี ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด และเฟสล็อกkup ทำหน้าที่ควบคุมการซิงโครไนซ์ (synchronize) ระหว่างแรงดันกริดและกระแสไฟฟ้ากริดให้มีมุมเฟสเดียวกัน (in phase) ทำให้กริดเอซีมีตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่งและแผงพีวีส่งจ่ายกำลังงานอย่างมีประสิทธิภาพถึงกริดเอซีได้ ระบบนี้ประกอบด้วยวงจรแปลงผันกำลังที่ไม่ซับซ้อน และเชื่อมต่อเข้ากับแผงพีวีที่มีกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 400 W เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Kim และ Youn (2005) การสร้างวงจรและออกแบบระบบควบคุมจึงมีความง่าย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 สร้างชุดวงจรต้นแบบที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน ซึ่งประกอบด้วยภาคแรกคือวงจรแปลงผันบุสต์ที่มีด้านอินพุตเชื่อมต่อเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือแผงพีวี (PV: Photovoltaic) และมีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนที่ทำหน้าที่ติดตามกำลังงานสูงสุดของแผงพีวี และภาคที่สองคือวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อเข้ากับกริดไฟฟ้า ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันดีซีเอาต์พุตของวงจรแปลงผันบุสต์ไปเป็นแรงดันเอซี

1.2.2 วิเคราะห์เสถียรภาพของเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนและวิเคราะห์การลู่เข้าหาจุดเอ็มพีพีของอัลกอริทึมการรั้งความและสังเกต (P&O algorithm)

1.2.3 จำลองสถานการณ์วงจรต้นแบบและแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และทดลองหรือทดสอบชุดวงจรต้นแบบและแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแสงสว่างที่เลียนแบบแสงอาทิตย์หรือแสงอาทิตย์เทียมและในแสงอาทิตย์จริง

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 การจำลองสถานการณ์ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Power System Blocksets) พร้อมกับ Simulink ในโปรแกรม MATLAB

1.3.2 วงจรต้นแบบที่เป็นฮาร์ดแวร์ (Hardware) ประกอบด้วยภาคแรกคือวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีด้านอินพุตเชื่อมต่อเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาได้ไม่น้อยกว่า 250 วัตต์ในช่วงกลางวัน และภาคที่สองคือวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวเต็มบริดจ์ที่เชื่อมต่อเข้ากับกริดเอชี่ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์

1.3.3 วงจรแปลงผันบูสต์มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนทำหน้าที่ติดตามกำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

1.3.4 วงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวเต็มบริดจ์มีระบบควบคุมป้อนกลับที่ประกอบด้วยตัวควบคุมแรงดันดีซี ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด และเฟสล็อกกลูป

1.3.5 แสงสว่างที่ใช้ทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์และวงจรต้นแบบ คือแสงสว่างเลียนแบบแสงอาทิตย์หรือแสงอาทิตย์เทียม และแสงอาทิตย์จริง

1.3.6 แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีจุดเอ็มพีพีหรือจุดการทำงานที่ผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 การสร้างวงจรต้นแบบที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน ซึ่งประกอบด้วยภาคแรกคือวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีด้านอินพุตเชื่อมต่อเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือแผงพีวี และมีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนที่ทำหน้าที่ติดตามกำลังงานสูงสุด และภาคที่สองคือวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวเต็มบริดจ์ที่เชื่อมต่อเข้ากับกริด

1.4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนและการวิเคราะห์การลู่เข้าหาจุดเอ็มพีพีของอัลกอริทึมการรั้งความและสังเกต

1.4.3 จำลองสถานการณ์วงจรต้นแบบและแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และทดลองหรือทดสอบวงจรต้นแบบและแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Hardware) ในแสงสว่างที่เลียนแบบแสงอาทิตย์หรือแสงอาทิตย์เทียม และในแสงอาทิตย์จริง

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 สมมุติฐาน

แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีจุดเอ็มพีพีอยู่จริง

1.5.2 สถานที่วิจัย

อาคารเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 3 และ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5.3 ระเบียบวิธีวิจัย

ดำเนินการวิจัยตามหลักทางวิศวกรรมไฟฟ้า มีการวิเคราะห์ภาคทฤษฎีและการทดลองในภาคปฏิบัติ

1.5.4 วิธีการเก็บข้อมูล

การใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลบันทึกผลลัพธ์และเก็บข้อมูลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ และการใช้เครื่องมือวัดหรืออุปกรณ์วัดเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดสอบชุดวงจรต้นแบบในห้องปฏิบัติการ

1.5.5 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล พร้อมติดตั้งโปรแกรม MATLAB
2. แผงพีวี อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องมือช่าง
3. อุปกรณ์วัดหรือเครื่องมือวัดปริมาณทางไฟฟ้า
4. หลอดไฟเลียนแบบแสงอาทิตย์และชุดติดตั้งแผงพีวีที่ใช้ในการทดสอบ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ชุดวงจรต้นแบบของระบบควบคุมที่ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปกำลังงานไฟฟ้าดีซีสูงสุดจากแผงพีวีเป็นกำลังไฟฟ้าเอซีที่เชื่อมต่อถึงกริดเอซี และบังคับการส่งจ่ายกำลังงานที่ผลิตได้จากแผงพีวีถึงกริดเอซีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.6.2 การใช้งานองค์ความรู้เอ็มพีพีทีและการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุม

1.6.3 บทความวิจัยที่ได้เผยแพร่ระดับประเทศหรือระดับนานาชาติ

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีเนื้อหาประกอบด้วย 8 บท

บทที่ 1 คือบทนำที่ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย วิธีการดำเนินงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือแผงพีวี คุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวี การติดตามกำลังงานสูงสุดของแผงพีวี รวมถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแผนการติดตามกำลังงานสูงสุดของแผงพีวี และระบบเปลี่ยนรูปกำลังไฟฟ้าดีซีที่ผลิตได้จากแผงพีวีเป็นกำลังไฟฟ้าเอซีที่เชื่อมต่อถึงกริดเอซี

บทที่ 3 กล่าวถึงวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิด โหมดการเลื่อน ซึ่งประกอบด้วยภาคแรกคือวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิด โหมดการ เลื่อนทำหน้าที่ติดตามกำลังงานสูงสุดของแผงพีวีเชื่อมต่อกับแผงพีวีด้านอินพุตของวงจร และ ภาค ที่สองคือวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริดเอซี

บทที่ 4 กล่าวถึงเสถียรภาพและการวิเคราะห์เสถียรภาพของเอ็มพีพีทีชนิด โหมดการเลื่อน และการสูญเสียที่จุดเอ็มพีพีทีของอัลกอริทึมการรั้งความและสังเกตหรือพีแอนด์ไอ

บทที่ 5 กล่าวถึงการจำลองสถานการณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟส เดียวที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิด โหมดการเลื่อน แสดงผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรมุ่งกล่าวและ อภิปรายผลการจำลองสถานการณ์

บทที่ 6 กล่าวถึงการออกแบบสร้างชุดวงจรต้นแบบของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริด สองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิด โหมดการเลื่อน ซึ่งประกอบด้วยแผงพีวี วงจรแปลงผันบูสต์ที่มี หน่วยเอ็มพีพีทีชนิด โหมดการเลื่อน และวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกันกลาง ระหว่างวงจรแปลงผันบูสต์และกริดเอซี รวมถึงไมโครคอนโทรลเลอร์และโปรแกรมภาษาซีที่ กำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็นหน่วยเอ็มพีพีทีและระบบควบคุมป้อนกลับของวงจร อินเวอร์เตอร์

บทที่ 7 กล่าวถึงการทดสอบชุดวงจรต้นแบบที่สร้างขึ้น และแสดงผลการทดสอบของชุด วงจรต้นแบบวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิด โหมดการเลื่อน ภายใต้แสงอาทิตย์จริงและแสงอาทิตย์เทียม รวมถึงการอภิปรายผลการทดสอบ

บทที่ 8 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

การติดตามกำลังงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ปรีทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

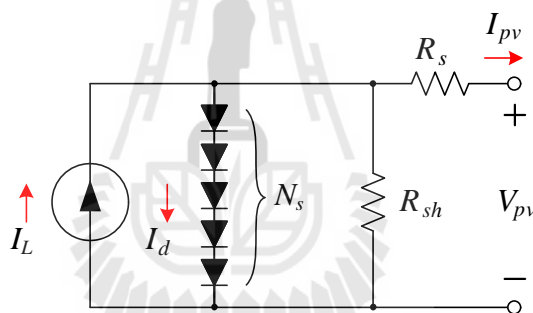
2.1 บทนำ

บทนี้จะอธิบายถึงพฤติกรรมสถิติหรือคุณลักษณะที่ไม่เชิงเส้นของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือแผงพีวี การติดตามกำลังงานสูงสุดของแผงพีวี และกล่าวถึงงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวข้องกับแผนการติดตามกำลังงานสูงสุดของแผงพีวีหรือหน่วยเอ็มพีพีที และระบบแปลงผันกำลังงานไฟฟ้าดีซีเป็นกำลังงานไฟฟ้าเอซีที่เชื่อมต่อถึงกริดเอซี การสำรวจและศึกษางานวิจัยดังกล่าวจะนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในงานวิทยานิพนธ์ การสำรวจจะแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคืองานวิจัยก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวข้องกับหน่วยเอ็มพีพีที และส่วนที่สองคืองานวิจัยก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวข้องกับระบบแปลงผันกำลังงานไฟฟ้าดีซีเป็นกำลังงานไฟฟ้าเอซีที่เชื่อมต่อถึงกริดเอซีเฟสเดียว การสำรวจในแต่ละส่วนจะนำเสนอเรียงตามลำดับปีที่ตีพิมพ์ และสรุปสาระสำคัญของงานวิจัยแต่ละงาน

2.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์และการติดตามกำลังงานสูงสุด

แผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือแผงพีวี (photovoltaics panel) คือแผงที่ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์หลายเซลล์ที่เชื่อมต่อกันในลักษณะอนุกรมเพื่อให้ได้ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าตามต้องการ เซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์มีโครงสร้างของรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction) ที่สามารถแปลงรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง แผงพีวีมีแบบจำลองหรือวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.1 และมีคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้นตามสมการที่ (2.1) ดังนั้นเมื่อเชื่อมต่อกับโหลดทางไฟฟ้าโดยตรง แผงพีวีจึงมีจุดการทำงานหรือมีแรงดันที่อยู่กับโหลดที่นำมาเชื่อมต่อ กล่าวคือถ้านำแผงพีวีเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าดีซี 24 v แผงพีวีจะมีจุดการทำงานที่ค่าแรงดันเท่ากับ 24 v เช่นเดียวกับระบบไฟฟ้าดีซีที่นำมาเชื่อมต่อโดยตรง เส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดัน ($I-V$ curves) ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของแผงพีวีขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงอาทิตย์ (solar insolation levels) ที่แสดงในรูปที่ 2.2 ผลการทดสอบของแผงพีวียี่ห้อ Hanwha solar รุ่น SF260 ภายใต้สภาพแวดล้อมโดยรอบตามเงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบของแผงพีวี (standard test conditions: STC) ที่มีความเข้มแสงอาทิตย์เทียบแตกต่างกันสี่ระดับ (1000 w/m^2 800 w/m^2 400 w/m^2 และ 200 w/m^2) และมีอุณหภูมิคงที่ 25°C ซึ่งได้มาจากเอกสาร

ข้อมูลเฉพาะของผู้ผลิต (product manual) (Hanwha Solar, 2012) เมื่อแสงอาทิตย์มีความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงในระดับที่เพิ่มขึ้น แผงพีวีจะมีเส้นโค้งคุณลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่มีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (short-circuit current: I_{sc}) เพิ่มขึ้น และมีแรงดันเปิดวงจร (open-circuit voltage: V_{oc}) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยมาก นั่นคือแผงพีวีจ่ายกระแสไฟฟ้าและผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นเมื่อมีความเข้มแสงอาทิตย์สูง ส่วนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแวดล้อมของแผงพีวีนั้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกำลังงานของแผงพีวีเพียงเล็กน้อย เมื่อแผงพีวีมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ค่า (0°C 25°C 50°C และ 75°C) และแสงอาทิตย์มีความเข้มแสงในระดับที่คงที่ 1000 W/m^2 แผงพีวีจะให้กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่ลดลงตรงข้ามกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแสดงได้ในรูปที่ 2.3 แผงพีวีมีแรงดันเปิดวงจรที่ลดลงและมีกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ($\square\square.32\ \square\square\square^{\circ}\text{C}$ และ $\square\square.04\ \square\square\square^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับสำหรับแผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260) นั่นคือแผงพีวีสร้างแรงดันได้ลดลงเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Wenham, Green, et al., 2007, pp. 43-51)

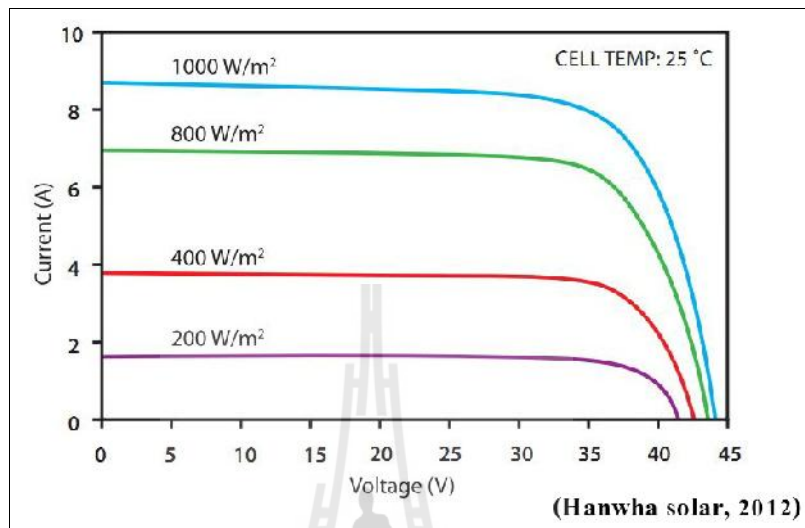


รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของแผงพีวีที่มีเซลล์แสงอาทิตย์หลาย ๆ เซลล์ต่อกัน

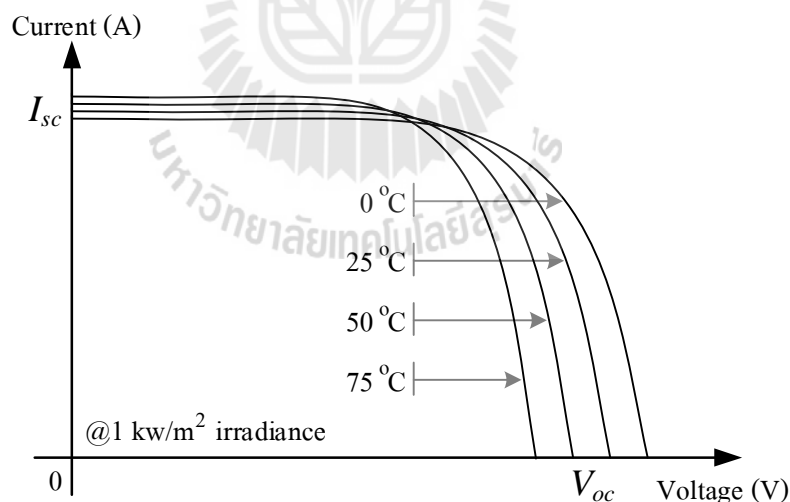
$$I_{pv} = I_L - I_{sat} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t} \right) - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

โดยที่	I_{pv}	คือ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงพีวี (PV output current)
	V_{pv}	คือ แรงดันเอาต์พุตของแผงพีวี (PV output voltage)
	I_L	คือ กระแสไฟฟ้าของแผงพีวีที่เกิดขึ้นจากพลังงานแสง (light generated current)
	I_{sat}	คือ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวของไดโอดในกรณีที่ไม่มีแสง (Saturation of dark current)
	V_t	คือ แรงดันอันเนื่องมาจากความร้อน (Thermal voltage) ของแผงพีวี
	I_d	คือ กระแสไฟฟ้าของไดโอดที่เป็นรอยต่อพีเอ็นของแผงพีวี
	R_{sh}	คือ ความต้านทานชั้นพีของแผงพีวี (shun resistance)

R_s คือ ความต้านทานอนุกรมของแผงโซลาร์ (series resistance)
 และ N_s คือ จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกันใน 1 โมดูล (Number of cells)



รูปที่ 2.2 กราฟคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงโซลาร์ที่ขึ้นอยู่กับความเข้มแสงอาทิตย์



รูปที่ 2.3 กราฟคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่ไม่เชิงเส้นของแผงโซลาร์ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

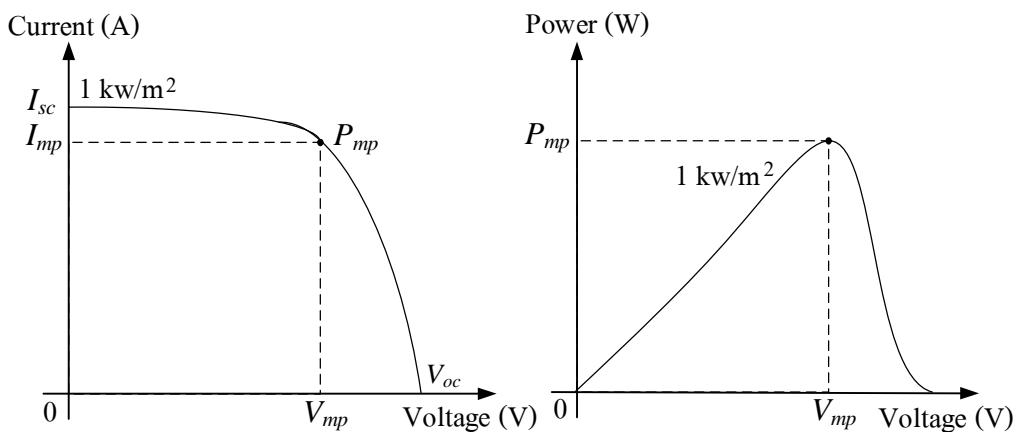
สภาพแวดล้อมโดยรอบคือปัจจัยภายนอกทางธรรมชาติที่ทำให้แผงโซลาร์มีจุดเอ็มพีพีและเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่เปลี่ยนแปลงจากเดิม เพราะแสงอาทิตย์มีความเข้มแสงและอุณหภูมิที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในแต่ละฤดูกาลและในแต่ละท้องถิ่น แสงอาทิตย์

ที่แผงพีวีใช้ในกระบวนการดูดกลืนแสงเพื่อสร้างหรือผลิตกระแสไฟฟ้า (light generation) นั่นคือ แสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านชั้นบรรยากาศของโลกมากระทบแผงพีวีบนพื้นผิวโลก ประกอบด้วย แสงอาทิตย์ที่ส่องมากระทบแผงพีวีโดยตรง (direct insolation) และแสงอาทิตย์แบบกระเจิงแสง (diffuse insolation) หรือแสงอาทิตย์ที่เกิดจากการสะท้อนหรือหักเหแสงของไอน้ำและแก๊สในชั้นบรรยากาศของโลกต่อมากระทบแผงพีวี (Wenham, Green, et al., 2007, pp. 8-9) ในบางฤดูกาล ท้องฟ้าโปร่งและมีเมฆบังแสงอาทิตย์น้อย แสงอาทิตย์ที่ส่องมายังแผงพีวีจึงมีความเข้มแสงสูง แต่ในบางฤดูกาลท้องฟ้ามีเมฆบังแสงอาทิตย์มาก แสงอาทิตย์ที่ส่องมากระทบแผงพีวีจึงมีความเข้มแสงต่ำ ระยะเวลาการใช้งานของแผงพีวีคือปัจจัยภายในอย่างหนึ่งที่ทำให้แผงพีวีมีจุดเอ็มพีพีและเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่เปลี่ยนแปลงจากเดิม ปัจจัยเหล่านี้ไม่สามารถนำมาออกแบบสร้างระบบควบคุมบังคับให้แผงพีวีทำงานที่จุดเอ็มพีพีได้ เนื่องจากเป็นปัจจัยทางธรรมชาติที่ขึ้นอยู่กับท้องถิ่นและสภาพภูมิอากาศ

การเชื่อมต่อแผงพีวีเข้ากับโหลดโดยตรง เช่น หลอดไฟหรือหลอดไฟแบบเผาไส้ หลอดแอลอีดี มอเตอร์ดีซี หรือเครื่องจักรที่มีเพลาหมุนเชื่อมต่อเชิงกลเข้ากับเครื่องสูบน้ำหรือเครื่องพ่นน้ำ แผงพีวีจะจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีค่าหนึ่งถึงโหลด ทำให้แผงพีวีสร้างแรงดันดีซีค่าหนึ่งที่ดกคร่อมโหลด แรงดันและกระแสไฟฟ้านี้จะกำหนดให้แผงพีวีมีจุดการทำงานอยู่บนเส้นโค้งคุณลักษณะเส้นหนึ่ง และมีความเป็นไปได้สูงมากที่จุดการทำงานไม่อยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดเอ็มพีพี นั่นคือ โหลดไม่ได้รับกำลังงานมากที่สุดที่ผลิตจากแผงพีวี หรือแผงพีวีไม่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในสภาพแวดล้อมโดยรอบที่แตกต่างกัน เมื่อความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลง แผงพีวีมีเส้นโค้งคุณลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมและมีเส้นโค้งคุณลักษณะเส้นใหม่ ทำให้แผงพีวีมีจุดการทำงานที่เปลี่ยนแปลงถึงตำแหน่งใหม่ แผงพีวีจึงสร้างแรงดันและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ถ้าผู้ใช้งานต้องการให้แผงพีวีมีจุดการทำงานอยู่ที่จุดเอ็มพีพีหรือผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด ($\text{maximum power: } P_{mp}$) ในแต่ละสภาพแวดล้อม ผู้ใช้งานต้องเพิ่มเติมหน่วยติดตามกำลังงานสูงสุดหรือเอ็มพีพีทีและวงจรแปลงผันกำลังที่เชื่อมต่อกันกลางระหว่างแผงพีวีและโหลด หน่วยเอ็มพีพีทีที่จะกำหนดลำดับการสวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังที่ทำให้โหลดเปลี่ยนแปลง แผงพีวีจะมีแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน ถ้าหน่วยเอ็มพีพีทีมีแผนการทำงานหรืออัลกอริทึมที่ถูกต้อง นั่นคือฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ไม่มีจุดบกพร่อง หน่วยเอ็มพีพีทีและวงจรแปลงผันกำลังจะบังคับให้แผงพีวีมีจุดการทำงานอยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดเอ็มพีพี และผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด ได้ตลอดเวลาในแต่ละสภาพแวดล้อมโดยรอบที่แตกต่างกัน

แผงพีวีมีเส้นโค้งคุณลักษณะไม่เชิงเส้นในแต่ละเส้นที่มีจุดเอ็มพีพีเพียงแก่จุดเดียวซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 2.4 ทำให้เส้นโค้งคุณลักษณะของกำลังงานและแรงดัน ($P-V$ curves) มีจุดสูงสุดเพียงแก่

จุดเดี่ยว (Wenham, Green, et al., 2007, pp. 43-51) เมื่อแผงพีวีมีจุดการทำงานอยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดเอ็มพีพีพี แผงพีวีจะสร้างแรงดันตกคร่อมที่เหมาะสมที่มีชื่อว่าแรงดันที่จุดกำลังงานสูงสุด (maximum power point voltage: V_{mp}) และจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่มีชื่อว่ากระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานสูงสุด (maximum power point current: I_{mp}) เมื่อแผงพีวีมีขั้วต่อสองขั้วที่เป็นขาลอยที่ไม่เชื่อมต่อเข้ากับโหลดหรือเปิดวงจรขั้วต่อ แผงพีวีจะมีแรงดันมากที่สุดตกคร่อมที่มีชื่อว่าแรงดันเปิดวงจร และเมื่อแผงพีวีมีขั้วต่อสองขั้วที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกัน หรือลัดวงจรขั้วต่อ แผงพีวีจะจ่ายกระแสไฟฟ้ามากที่สุดออกมาที่มีชื่อว่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร เส้นโค้งคุณลักษณะไม่เชิงเส้นในแต่ละเส้นมีแรงดันเปิดวงจรและกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเพียงค่าเดียว เมื่อแสงอาทิตย์ที่มีความเข้มแสงในระดับคงที่ 1000 W/m^2 ส่องมากระทบแผงพีวี และแผงพีวีมีอุณหภูมิคงที่ 25°C ถ้าแผงพีวีมีจุดการทำงานอยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดเอ็มพีพีพี แผงพีวีจะผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดที่เป็นกำลังงานพิกัด (rated power) เอกสารข้อมูลเฉพาะของผู้ผลิตจะระบุกำลังงานพิกัดดังกล่าวให้เป็นกำลังงานที่ผลิตได้จากแผงพีวี กล่าวคือเมื่อนำแผงพีวี 295 W มาทดสอบ และแผงพีวี 295 W มีจุดการทำงานอยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดเอ็มพีพีพีในสภาพแวดล้อมที่ทดสอบตามมาตรฐานที่มีอุณหภูมิคงที่ 25°C และระดับการแผ่รังสีของแสงอาทิตย์คงที่ 1000 W/m^2 แผงพีวี 295 W จะผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้ 295 W (Hanwha Solar, 2012) แต่ในการใช้งานจริง แผงพีวี 295 W จะผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้น้อยกว่า 295 W เพราะแสงอาทิตย์ที่ส่งมากระทบแผงพีวีมีความเข้มแสงในระดับที่น้อยกว่า 1000 W/m^2 และมีอุณหภูมิสูงกว่า 25°C สภาพอากาศในฤดูหนาวของประเทศไทยมีท้องฟ้าโปร่งและมีเมฆน้อย แสงอาทิตย์ที่ส่งมากระทบแผงพีวีจึงมีความเข้มแสงในระดับที่สูงสุด รวมทั้งในฤดูหนาวนี้มีอุณหภูมิต่ำทำให้แผงพีวีผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด



รูปที่ 2.4 กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดัน และกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกำลังงานไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวี

หน่วยเอ็มพีพีทีที่ใช้ค้นหาจุดเอ็มพีพีของแผงพีวีมีหลายประเภท แต่วิธีการที่นิยมใช้งานมากที่สุดคือ เทคนิคการรบกวนและสังเกตหรือพีแอนด์โอ เพราะเทคนิคนี้มีความง่ายไม่ซับซ้อน และการสร้างพีแอนด์โอ นั้นมีต้นทุนต่ำ ค่าการรบกวน (perturb value หรือ perturb step-size) มีผลกระทบต่อสมรรถนะของการติดตามกำลังงานสูงสุด ถ้าค่าการรบกวนมีค่ามาก การติดตามกำลังงานสูงสุดจะใช้เวลาสั้นแต่เกิดการสั่นหรือการแกว่งในสถานะอยู่ตัว ทำให้แผงพีวีมีจุดการทำงานที่วนอยู่รอบ ๆ จุดเอ็มพีพีและแผงพีวีจะผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้น้อยกว่ากำลังงานไฟฟ้ามากที่สุด แต่ถ้าค่าการรบกวนมีค่าน้อย การติดตามกำลังงานสูงสุดจะใช้เวลาานแต่เกิดการสั่นหรือการแกว่งน้อยมากในสถานะอยู่ตัว ทำให้แผงพีวีมีจุดการทำงานที่ใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพีมากขึ้น และแผงพีวีจะผลิตกำลังงานได้เพิ่มขึ้นและใกล้เคียงกับกำลังงานสูงสุด ดังนั้นผู้ใช้งานหรือผู้ผลิตต้องเลือกค่าการรบกวนที่เหมาะสมที่สุด (Abdelsalem, Massoud, et al., 2011) ขณะที่วิธีโหมดการเลื่อนนั้นใช้พื้นผิวหรือเส้นตรงการเลื่อนบังคับการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลัง ทำให้แผงพีวีมีจุดการทำงานอยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดเอ็มพีพี วิธีโหมดการเลื่อนจะมีความซับซ้อนที่ขึ้นอยู่กับการออกแบบเส้นตรงการเลื่อน (Levron & Shmilovitz, 2013)

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแผนการติดตามกำลังงานสูงสุดของแผงพีวี

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาและใช้งานแผนการติดตามกำลังงานสูงสุดหรือหน่วยเอ็มพีพีทีที่ทำหน้าที่ค้นหาจุดเอ็มพีพีรวมทั้งบังคับให้แผงพีวีมีจุดการทำงานที่อยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดเอ็มพีพีเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการส่งจ่ายกำลังงาน ไฟฟ้าดีซีที่ผลิตได้จากแผงพีวีไปยังกริดเอซี สรุปสาระสำคัญของงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวข้องกับหน่วยเอ็มพีพีที่ได้กล่าวถึงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สรุปงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวข้องกับหน่วยเอ็มพีพี

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2007	T. ESRAM และ P. L. Chapman	เปรียบเทียบวิธีการของหน่วยเอ็มพีพีที่ชนิดต่าง ๆ เวลาที่ใช้ค้นหาจุดเอ็มพีพี ความต้องการเซนเซอร์ในการวัดข้อมูลอินพุต ต้นทุนและข้อจำกัดของหน่วยเอ็มพีพีที หน่วยเอ็มพีพีทีที่ใช้เวลาสั้นมากในการค้นหาจุดเอ็มพีพีแต่ใช้ต้นทุนในการสร้างปานกลางถึงสูงมากในการสร้าง เช่น RCC (ripple correlation control) พีซีแอลจิก โหมดการเลื่อน และโครงข่ายประสาทเทียม เป็นต้น หน่วยเอ็มพีพีทีที่ใช้ต้นทุนต่ำในการสร้างแต่ใช้เวลาปานกลางในการค้นหาจุดเอ็มพีพี เช่น พีแอนด์โอ วิธีการ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		กำหนดค่า V_{mp} ที่น้อยกว่า V_{oc} และวิธีการกำหนดค่า I_{mp} ที่น้อยกว่า I_{sc} เป็นต้น
2008	C. Jaen, C. Moyano และคณะ	นำเสนอหน่วยเอ็มพีพีที 4 ชนิด กล่าวคือ วิธีการควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้า (VMPPT หรือ CMPPT) วิธีการปีนเขา (hill climbing) พีแอนด์โอ และวิธีการใช้การเพิ่มขึ้นของค่าความนำไฟฟ้า (incremental conductance) การจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบสมรรถนะของหน่วยเอ็มพีพีที 4 ชนิดนี้ แต่เลือกทดสอบหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดพีแอนด์โอเท่านั้น หน่วยเอ็มพีพีทีนี้ใช้วงจรแปลงผันบuck-boost การทำงานของแผงพีวี 50 W
2008	F. Liu, Y. Kang และคณะ	เปรียบเทียบสมรรถนะของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดพีแอนด์โอและชนิดการปีนเขา หน่วยเอ็มพีพีทีทั้งสองชนิดนี้ควบคุมการสวิทช์ของวงจรแปลงผันบูสต์ที่เป็นวงจรภาคแรก วงจรภาคที่สองคือวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีตัวควบคุมแรงดันและตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบพีโอที่คุมค่าแรงดันดีซี 380 V และคุมค่าตัวประกอบกำลังของกริดเอซี 220 V 50 Hz การจำลองสถานการณ์ใช้แบบจำลองของแผงพีวี 120 W จำนวน 10 แผง หน่วยเอ็มพีพีทีชนิดพีแอนด์โอติดตามกำลังงานสูงสุดได้เร็วกว่าและสามารถคุมค่าแรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวีได้ดีกว่าชนิดการปีนเขา
2010	E.A.J. Brea, E.I. Ortiz-Rivera, และคณะ	นำเสนอหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเคลื่อนที่ใช้งานในตัวควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ 12 V หน่วยเอ็มพีพีทีโหมดการเคลื่อนที่ใช้นี้พื้นผิวการเคลื่อนที่เป็นผลต่างระหว่างแรงดันจริงและแรงดันที่เหมาะสมของแผงพีวี ($s = V_{pv} - V_{mp}$) หน่วยเอ็มพีพีทีนี้ใช้สมการแบบจำลองแผงพีวีของ Ortiz คำนวณและค้นหาแรงดันที่เหมาะสม $V_{mp} = c \cdot V_{oc}$ โดยที่ c คือค่าตัวคูณที่เปลี่ยนแปลงได้สำหรับบังคับให้ตัวแปรสถานะของระบบเคลื่อนที่ไปถึงจุดสมดุลและบังคับให้แผงพีวีมีจุดการทำงานอยู่ที่จุดเอ็มพีพีที วงแปลงผันบูสต์ได้รับค่าวัฏจักรการทำงานที่เปลี่ยนแปลงตามแรงดัน V_{mp} ตัวควบคุมใช้เครื่องหมายของพื้นผิวการเคลื่อนที่สร้างสัญญาณขับขาเกิดของมอสเฟต ($s > 0$)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		<p>→ ON และ $S < 0$ → OFF) ในการจำลองสถานการณ์ เมื่ออุณหภูมิและความเข้มของแสงอาทิตย์มีระดับที่เปลี่ยนแปลง (ไม่ได้ระบุไว้ชัดเจน) หน่วยเอมพีพีที่ติดตามกำลังงานสูงสุดได้รวดเร็วมาก งานวิจัยนี้ใช้ สมการแบบจำลองของแผงพีวีที่ซับซ้อนมาก เพราะแบบจำลองประกอบด้วยพจน์ของฟังก์ชันแลมเบิร์ต (Lambert) และจำนวนจินตภาพ</p>
2010	Md. A. Islam, A. B. Talukdar, และคณะ	<p>นำเสนอหน่วยเอมพีพีที่ชนิดพีซีลอจิกที่ใช้ค้นหาจุดเอมพีพีของแผงพีวี หน่วยเอมพีพีที่พีซีลอจิกประกอบด้วย 3 ส่วน Fuzzification คือส่วนแรกที่มีเซตพีซีฐานกฎพีซี (fuzzy rule base) คือส่วนที่สองที่มีตารางเปรียบเทียบเงื่อนไขที่ใช้กำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุต (ΔV_{pv}) และ Defuzzification คือส่วนที่สามที่จ่ายสัญญาณเอาต์พุต งานวิจัยนี้ใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานที่เทียบกับแรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี ($\Delta P_{pv} / \Delta V_{pv}$) เป็นเงื่อนไขในฐานกฎพีซี ในการจำลองสถานการณ์ หน่วยเอมพีพีที่ติดตามกำลังงานสูงสุดได้อย่างแม่นยำและบังคับให้แผงพีวีมีจุดการทำงานลู่เข้าหาจุดเอมพีพีภายในเวลาสั้น (ไม่ได้ระบุเวลาที่ชัดเจน)</p>
2011	S.S.W. Walker, N.K. Sooriyaarachchi, และคณะ	<p>ทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะของหน่วยเอมพีพีที่ชนิดต่าง ๆ เช่น พีแอนด์ไอ การเพิ่มขึ้นของค่าความนำไฟฟ้า และวิธีการสามจุด (three-point) การทดลองใช้หลอดเผาไส้สร้างแสงอาทิตย์เทียม แผงพีวีที่มี $V_{oc} = 6\text{ V}$ และ $I_{sc} = 1.05\text{ A}$ เชื่อมต่อเข้ากับวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีด้านเอาต์พุตเชื่อมต่อกับโหลดตัวต้านทาน หน่วยเอมพีพีที่ชนิดการเพิ่มขึ้นของค่าความนำไฟฟ้าบังคับให้แผงพีวีมีจุดการทำงานลู่เข้าหาจุดเอมพีพีได้เร็วกว่าหน่วยเอมพีพีที่ชนิดพีแอนด์ไอ และวิธีการสามจุดกล่าวคือใช้เวลา 54 s, 1.23 min, และ 3.12 min ตามลำดับในการติดตามกำลังงานสูงสุด</p>
2011	A. K. Abdelsalem, A. M. Massoud,	<p>นำเสนอหน่วยเอมพีพีที่ชนิดพีแอนด์ไอแบบปรับตัว (adaptive P&O) ที่ใช้อัลกอริทึมการปีนเขา (hill climbing) ค้นหาแรงดัน</p>

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
	และคณะ	<p>แผงพีวีอ้างอิง V_{mp} ค่าการรั้งความ และนำมาบวกหรือลบกับแรงดันแผงพีวีอ้างอิง ตัวควบคุมพีไอแบบดิคริตตัวแรกใช้การเปลี่ยนแปลงของกำลังงานที่ผลิตได้จากแผงพีวีนำมาปรับเปลี่ยนค่าการรั้งความ และตัวควบคุมพีไอแบบดิคริตตัวที่สองใช้ความผิดพลาดระหว่างแรงดันแผงพีวีอ้างอิงและแรงดันแผงพีวีจริงนำมาคำนวณหาอัตราส่วนหน้าที่ (duty ratio) ของวงจรแปลงผันบูสต์ที่บังคับให้แผงพีวีจริง 54 W มีแรงดันเข้าหา V_{mp} งานวิจัยนี้ไม่ได้พิสูจน์การลู่เข้าหาค่าแรงดันแผงพีวี V_{mp} ของเทคนิคพีแอนด์โอแบบปรับตัว (ไม่ได้ระบุเวลาไว้ชัดเจน)</p>
2012	D. K. Sharma และ G. Purohit	<p>นำเสนอหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดพีแอนด์โอขั้นสูง (advanced P&O) ที่ใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานที่ผลิตได้จากแผงพีวีในการค้นหาจุดเอ็มพีพีทีที่ละเอียดกว่า หน่วยเอ็มพีพีทีนี้ได้ใช้ข้อมูลกำลังงานที่ผลิตได้จากแผงพีวีที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างในอดีตหลายขั้น ได้แก่ $P_{pv}(k)$, $P_{pv}(k-2)$ และ $P_{pv}(k-3)$ นำมาใช้ในการเปรียบเทียบค้นหาจุดกำลังงานสูงสุดของแผงพีวี ในการจำลองสถานการณ์หน่วยเอ็มพีพีทีที่บังคับแผงพีวีให้มีจุดการทำงานลู่เข้าหาจุดเอ็มพีพีทีได้เร็วกว่าหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดพีแอนด์โอทั่วไป (ไม่ได้ระบุเวลาไว้ชัดเจน)</p>
2013	Y. Levron และ D. Shmilovitz	<p>นำเสนอหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนที่มีเทคนิคพีแอนด์โอทำหน้าที่ค้นหาจุดเอ็มพีพีที เส้นตรงการเลื่อนบังคับการสวิตช์ของวงจรแปลงผันบูสต์ ทำให้แผงพีวีมีจุดการทำงานเคลื่อนที่เข้าหาจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะ เทคนิคพีแอนด์โอใช้กำลังงานที่ผลิตได้จากแผงพีวีนำมาปรับเปลี่ยนเส้นตรงการเลื่อนทั้งเส้น ทำให้จุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะเคลื่อนที่เข้าหาจุดเอ็มพีพีที แผงพีวีจึงมีจุดการทำงานเคลื่อนที่เข้าหาจุดเอ็มพีพีที การทดสอบหน่วยเอ็มพีพีทีที่ใช้แหล่งจ่ายกำลังที่เลียนแบบแผงพีวี (PV emulator) แทนที่แผงพีวีจริง และหน่วยเอ็มพีพีทีนี้มีเวลาในการลู่เข้าหาจุดเอ็มพีพีทีภายในเวลา 15 ms งานวิจัยนี้</p>

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2014	M.D. Singh, Shine V J, และ V. Janamala	ไม่ได้พิสูจน์การคู่เข้าหาจุดเอมพีพีของเทคนิคพีแอนด์ไอ นำเสนอหน่วยเอมพีพีที่ชนิดโครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural networks) หน่วยเอมพีพีที่โครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี (radial basis function network: RBFN) ที่ประกอบด้วยชั้นอินพุต ชั้นซ่อน และชั้นเอาต์พุต ชั้นซ่อนมีโครงข่ายที่สัมพันธ์กับอินพุตและประมวลผลค้นหาแรงดัน V_{mp} ที่ใช้อ้างอิงและสร้างสัญญาณขับขาเกตของมอดเฟสในวงจรแปลงผันดิซิทูดีซีที่บังคับให้แรงแพวีวีมีจุดการทำงานอยู่ที่จุดเอมพีพี ในการจำลองสถานการณ์ หน่วยเอมพีพีที่บังคับแรงแพวีวีให้มีจุดการทำงานคู่เข้าหาจุดเอมพีพีภายในเวลาสั้น (ไม่ได้ระบุเวลาไว้ชัดเจน)

เมื่อพิจารณาตารางที่ 2.1 จะได้ว่าหน่วยเอมพีพีที่สำหรับแรงแพวีวีมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน บางชนิดสามารถติดตามกำลังงานสูงสุดได้รวดเร็วมาก เช่น วิธีการแบบโหมคการเลื่อน Fuzzy logic โครงข่ายประสาทเทียม เป็นต้น แต่หน่วยเอมพีพีที่เหล่านี้มีต้นทุนสูงและมีข้อจำกัดเมื่อใช้งานจริง เนื่องจากต้องการหน่วยประมวลผลที่รวดเร็วซึ่งมีราคาแพง งานวิจัยก่อนหน้านี (Levron & Shmilovitz, 2013) ใช้วงจรอนาล็อกที่ประกอบด้วยออปแอมป์และตัวเปรียบเทียบที่ทำหน้าที่สร้างเส้นตรงการเลื่อน และมีไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่เป็นหน่วยพีแอนด์ไอปรับเปลี่ยนเส้นตรงการเลื่อนทั้งเส้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้เชื่อมต่อเข้ากับตัวแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาล็อกหรือดีทูเอ ทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งค่าอ้างอิงที่ใช้ปรับเปลี่ยนเส้นตรงการเลื่อนถึงตัวเปรียบเทียบได้ การทดสอบหน่วยเอมพีพีที่ชนิดโหมคการเลื่อนนี้ให้สมรรถนะที่รวดเร็วในการติดตามจุดเอมพีพี กล่าวคือ เมื่อกำหนดให้แหล่งจ่ายกำลังที่เลียนแบบแรงแพวีวีมีการถ่ายรังสีของแสงอาทิตย์ที่มีระดับเพิ่มขึ้นฉับพลัน หน่วยเอมพีพีที่และวงจรแปลงผันบูสต์จะบังคับให้แหล่งจ่ายกำลังที่เลียนแบบแรงแพวีวีผลิตกำลังงานได้เพิ่มขึ้นจาก 26.6 w ถึง 55.2 w ภายในช่วงเวลา 5 ms และโหลดตัวต้านทานที่เชื่อมต่อด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันบูสต์สามารถได้รับกำลังงานเพิ่มขึ้นจาก 25.2 w ถึง 52.6 w ภายในช่วงเวลา 16 ms

ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกใช้วงจรแปลงผันบูสต์มีหน่วยเอมพีพีที่ชนิดโหมคการเลื่อนเป็นวงจรภาคแรกของระบบแปลงผันกำลังงาน ไฟฟ้าดิซิทูสูงสุดที่ผลิตได้จากแรงแพวีวีไปเป็นกำลังงานไฟฟ้าเอซีที่เชื่อมต่อถึงกริดเอซี ระบบดังกล่าวจะบังคับให้แรงแพวีวีมีจุดการทำงานเคลื่อนที่

เข้าหาจุดเอ็มพีพี หน่วยเอ็มพีพีที่ชนิดโหมคการเลื่อนที่ใช้งานมีพีแอนด์โอเป็นอัลกอริทึมย่อยที่ทำหน้าที่ค้นหาจุดเอ็มพีพีและปรับเปลี่ยนเส้นตรงการเลื่อน ทำให้หน่วยเอ็มพีพีที่มีสมรรถนะในการติดตามกำลังงานสูงสุดที่เร็วกว่าหน่วยเอ็มพีพีที่ชนิดพีแอนด์โอทั่วไป เพราะหน่วยเอ็มพีพีที่ชนิดโหมคการเลื่อนจะใช้เส้นตรงการเลื่อนกำหนดให้แผงพีวีมีจุดการทำงานเริ่มต้นที่อยู่ในตำแหน่งหรือบริเวณใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพี และอัลกอริทึมพีแอนด์โอจะบังคับให้แผงพีวีมีจุดการทำงานที่ขยับเลื่อนเข้าหาจุดเอ็มพีพี แต่หน่วยเอ็มพีพีที่ชนิดพีแอนด์โอทั่วไปจะกำหนดให้แผงพีวีมีจุดการทำงานเริ่มต้นที่อยู่ห่างไกลจากจุดเอ็มพีพี ทำให้หน่วยเอ็มพีพีที่ชนิดพีแอนด์โอใช้เวลาในการติดตามกำลังงานสูงสุดนานกว่า เพราะหน่วยเอ็มพีพีที่ชนิดพีแอนด์โอมีการค้นหาจุดเอ็มพีพีที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานที่ผลิตได้จากแผงพีวี ระยะเวลาที่ใช้ในการติดตามกำลังงานสูงสุดจึงขึ้นอยู่กับคาบระยะเวลาในการสุ่มวัดและค่าการรั้งความ

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบแปลงผันกำลังงานไฟฟ้าดีซีเป็นกำลังงานไฟฟ้าเอซีที่เชื่อมต่อถึงกริดเอซีเฟสเดียว

เนื่องจากแผงพีวีคือแหล่งจ่ายแรงดันดีซีที่สร้างแรงดันดีซีที่มีค่าต่ำและกระแสไฟฟ้าดีซีที่มีค่าสูง แต่เอาต์พุตของระบบแปลงผันกำลังงานไฟฟ้าดีซีสูงสุดที่ผลิตได้จากแผงพีวีเป็นกำลังงานไฟฟ้าเอซีที่เชื่อมต่อถึงกริดคือ กริดเอซีเฟสเดียว 220 V_{rms} และมีความถี่ 50 Hz ดังนั้นการเปลี่ยนรูปแรงดันดีซีเป็นแรงดันเอซีและการส่งจ่ายกำลังงานที่ผลิตได้จากแผงพีวีถึงกริดเอซี จึงต้องใช้เชื่อมต่อกันกลางระหว่างวงจรแปลงผันบูสต์และกริดเอซี เพื่อทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันดีซีไปเป็นแรงดันเอซีและควบคุมการซิงโครไนซ์ระหว่างแรงดันกริดและกระแสไฟฟ้ากริดให้มีมุมเฟสเดียวกัน ด้วยเหตุนี้จึงได้เลือกใช้วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่มีตัวเหนี่ยวนำเป็นวงจรภาคที่สองของระบบแปลงผันกำลังงานไฟฟ้าดีซีสูงสุดที่ผลิตได้จากแผงพีวีเป็นกำลังงานไฟฟ้าเอซีที่เชื่อมต่อถึงกริดเอซี ซึ่งได้สรุปสาระสำคัญของงานวิจัยก่อนหน้าที่เกี่ยวข้องกับระบบแปลงผันกำลังงานไฟฟ้าดีซีเป็นกำลังงานไฟฟ้าเอซีที่เชื่อมต่อถึงกริดเอซีเฟสเดียวได้กล่าวถึงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยก่อนหน้าที่เกี่ยวข้องกับระบบแปลงผันกำลังงานไฟฟ้าดิซีเป็นกำลังงานไฟฟ้าเอซีที่เชื่อมต่อกับกริดเอซีเฟสเดียว

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2005	I.-S. Kim และ M. -J. Youn	นำเสนอระบบแปลงผันกำลังงานไฟฟ้าดิซีจากแผงพีวีเป็นกำลังงานไฟฟ้าเอซีที่เชื่อมต่อกับกริดเอซีที่ใช้วงจรภาคเดียวคือ วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่มีด้านอินพุตเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งจ่ายกำลังที่เลียนแบบแผงพีวี (solar-array simulator) และมีด้านเอาต์พุตเชื่อมต่อเข้ากับกริดเอซี ระบบนี้มีหม้อแปลงที่เชื่อมต่อกันกลางระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์และกริดเอซี ระบบควบคุมวงปิดของวงจรอินเวอร์เตอร์นี้ประกอบด้วยตัวสังเกตสถานะ เอ็มพีพีที ตัวควบคุมแรงดันดิซีแบบพีไอ ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดแบบทำนาย เฟสล็อก ลูป เซนเซอร์วัดแรงดัน และเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า เฟสล็อก ลูปทำหน้าที่ซิงโครไนซ์กระแสไฟฟ้ากริดให้มีมุมเฟสตรงกับมุมเฟสของแรงดันกริด ทำให้กริดเอซีมีตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่ง แหล่งจ่ายกำลังที่เลียนแบบแผงพีวีผลิตกำลังงานได้มากที่สุด 75 W
2008	J. Selvaraj, N.A. Rahim, และ C. Krishnadinata	นำเสนอตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ซัดเซยกระแสไฟฟ้ากริดในระบบควบคุมวงปิดของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดเอซีภาคแรกคือวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีด้านอินพุตเชื่อมต่อกับแผงพีวี และภาคที่สองคือวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์ที่เชื่อมต่อกับกริดเอซี ไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F2812 ทำหน้าที่เป็นหน่วยเอ็มพีพีทีและตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่เป็นตัวควบคุมพีไอแบบดิสครีตในระบบควบคุมวงปิด การจำลองสถานการณ์ใช้ตรวจสอบสมรรถนะของระบบควบคุมวงปิดและการทดลองใช้แผงพีวีจริง 1.2 kW
2009	D. Yazdani, M. Pahlevaninezhad, และ A. Bakhshai	เปรียบเทียบแผนการควบคุมการแปลงผันดิซีทูเอซีสำหรับการเชื่อมต่อกับกริดเอซีทั้ง 3 แผนการ คือ วิธีการแรงดันข้ามศูนย์ (voltage zero crossing) เฟสล็อก ลูป และวงล็อกความถี่ (frequency locked loop: FLL) การจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบแผนการควบคุมทั้ง 3 วิธีการ แผนการควบคุม

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		ชนิดวงลือกความถี่ที่มีตัวกรองนอซ์แบบปรับตัว (adaptive notch filter: ANF) สามารถติดตามความถี่ของแรงดันกริดได้เร็วกว่าแผนการควบคุมอื่น
2009	Y. -M. Chen, K. -Y. Liu และคณะ	นำเสนอแผนการควบคุมแบบสองทิศทางของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์ที่เชื่อมต่อกับกริดเอซี (bi-directional grid-tied inverter: BGI) และการปรับปรุงตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบทำนาย (predictive current controller) เอาต์พุตของตัวควบคุมนี้คือ คำว่าปฏิบัติการการทำงานสำหรับสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแบบขั้วเดียว (unipolar) คำว่าปฏิบัติการการทำงานคำนวณจากสมการของโหมดการทำงานที่มีความสัมพันธ์กับผลต่างระหว่างกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงและกระแสไฟฟ้ากริดที่ได้จากการวัด โหมดการทำงานของ BGI แบ่งออกเป็น 2 โหมด คือ โหมดการเชื่อมต่อกับกริด (grid-connection mode: GCM) สำหรับควบคุมการเชื่อมต่อกับกริด โหมดนี้เกิดขึ้นเมื่อกำลังงานอินพุตมากกว่าความต้องการโหลดหรือแรงดันดีซีมีค่าสูงกว่าแรงดันกริด และโหมดการแก้ไขตัวประกอบกำลัง (power-factor correction mode: PFCM) สำหรับควบคุมค่าแรงดันดีซีของวงจรอินเวอร์เตอร์โดยการฉีดกระแสไฟฟ้ากริดย้อนกลับด้านอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ตัวควบคุมแบบทำนายนี้ไม่ต้องการเฟสล็อกการทดสอบเชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันดีซีทูดีซีที่มีแผงพีวีเชื่อมต่อด้านอินพุตของวงจร (ไม่ได้รับูปักัดกำลังของแผงพีวี) วงจรอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับกริดเอซี 220 V _{rms} คุมค่าแรงดันดีซีอินพุต 400 V สามารถบังคับให้กระแสไฟฟ้ากริดมีมุมเฟสตรงกับแรงดันกริด และทำให้กริดเอซีมีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.997
2011	G. -R. Yu และ J. -S. Wei	นำเสนอแผนการควบคุมแบบสองทิศทางของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์ที่เชื่อมต่อกับกริดเอซีที่ใช้ตัวควบคุมทำนายกระแสไฟฟ้าแบบดิจิทัล (digital predictive current controller) และสมการแบบจำลองปริภูมิสถานะเฉลี่ยของโหมดการทำงาน GCM และ PFCM สำหรับใช้ในการคำนวณคำว่าปฏิบัติการการทำงานเพื่อสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแบบขั้ว

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		เดี่ยว แผนการควบคุมนี้ไม่ต้องการเฟสบล็อกูป ในการจำลองสถานการณ์ วงจรอินเวอร์เตอร์คุมค่าแรงดันดีซีอินพุตได้ในโหมดการแก้ไขตัวประกอบกำลัง และบังคับให้กระแสไฟฟ้ากริดมีมุมเฟสตรงกับแรงดันกริดได้ในโหมดการเชื่อมต่องริด

เมื่อพิจารณาตารางที่ 2.2 พบว่าวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดี่ยวที่เชื่อมต่อถึงกริดเอชมีรูปแบบของวงจรแปลงผันกำลังที่ไม่ซับซ้อนและเป็นวงจรมาตรฐานที่ใช้แปลงแรงดันดีซีไปเป็นแรงดันเอช และสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวงจรภาคที่สองของระบบที่ศึกษาได้ เนื่องจากวงจรดังกล่าวและระบบควบคุมวงปิดของงานวิจัยเหล่านี้มีการส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าได้ไม่เกิน 2 kw ซึ่งเหมาะสมกับระบบที่ศึกษาในงานวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งได้เลือกใช้วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดี่ยวและหม้อแปลงเชื่อมต่อกันกลางระหว่างวงจรภาคแรกและกริดเอช โดยที่หม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะเชื่อมต่อกันกลางระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์และกริดเอชเพื่อทำหน้าที่ช่วยยกระดับแรงดันเอชให้สูงขึ้นเท่ากับแรงดันกริดเอช ในขณะที่ระบบควบคุมวงปิดของวงจรอินเวอร์เตอร์นั้นประกอบด้วยตัวควบคุมแรงดันดีซี ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด และเฟสบล็อกูป ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) ชนิดชั่วเดียวควบคุมการทำงานหรือลำดับการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ให้เกิดการแปลงผันแรงดันดีซีเป็นแรงดันเอชเพื่อส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าได้สองทิศทาง กล่าวคือวงจรอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันดีซีด้านอินพุตของวงจร และควบคุมการแปลงแรงดันดีซีไปเป็นแรงดันเอชเพื่อส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายดีซีด้านอินพุตไปยังกริดเอชที่อยู่ด้านเอาต์พุตของวงจร ซึ่งการทำงานในลักษณะดังกล่าวนี้จะสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อแรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์มีค่ามากกว่าค่ายอดหรือแอมพลิจูดของแรงดันกริด

นอกจากนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในปัจจุบันมีหน่วยในสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม หน่วยแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลหรือเอพดี และหน่วยจัดการอินเตอร์รัพต์ภายในและภายนอก รวมทั้งมีไลบรารีเฟสบล็อกูป ไลบรารีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ และไลบรารีอื่น ๆ ที่ผู้ผลิตได้จัดเตรียมไว้ช่วยเหลือผู้ใช้งาน ดังนั้นในการเขียนโปรแกรมภาษาซีที่กำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็นระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ประกอบด้วยตัวควบคุมแรงดันดีซี ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด และเฟสบล็อกูป ให้มีการการสุมตัวอย่างของข้อมูลลงที่ตามที่ต้องการนั้นจึงมีความง่ายและใช้ระยะเวลาในการสร้างสั้นลง ซึ่งช่วยให้สามารถสร้างชุดวงจรต้นแบบได้ง่าย

2.5 สรุป

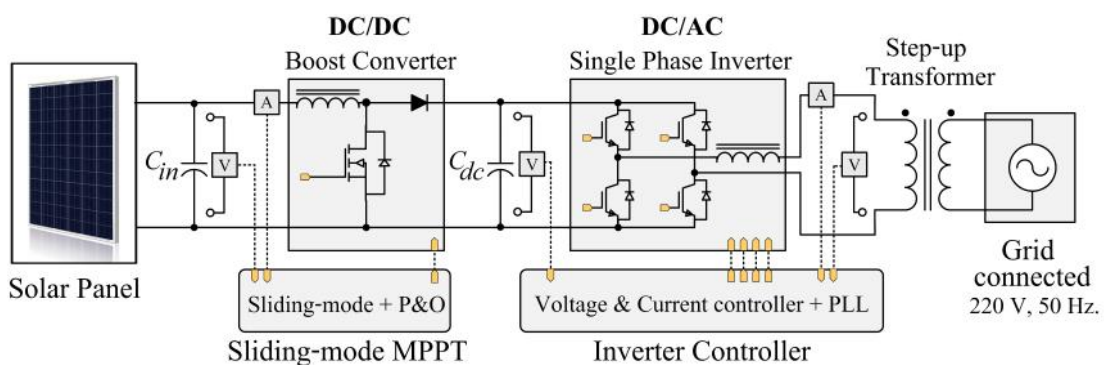
เมื่อพิจารณางานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่าหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื้อนที่มีเทคนิคพีแอนด์ไอให้สมรรถนะที่รวดเร็วในการติดตามจุดเอ็มพีพีของแผงพีวี และในปัจจุบันการสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกรีดเอซีและระบบควบคุมวงปิดนั้นสามารถดำเนินการได้อย่างง่าย สะดวกและใช้ระยะเวลาสั้นลง ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาระบบแปลงผันกำลังงานไฟฟ้าดีซีสูงสุดที่ผลิตได้จากแผงพีวีเป็นกำลังงานไฟฟ้าเอซีที่เชื่อมต่อกรีดเอซี ที่ประกอบด้วยวงจรภาคแรกและภาคที่สองที่เป็นวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื้อนและวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวตามลำดับ ซึ่งเรียกว่าระบบดังกล่าวนี้ว่า “วงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกรีดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื้อน” นอกจากนี้ระบบเปลี่ยนรูปพลังงานดังกล่าวยังต้องการหน่วยอื่น ๆ เพิ่มเติมในการสร้างขึ้น เช่น ตัวเชื่อมต่อผ่านแสง (optocoupler) ไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรขั้วขาเกต ไอซีขั้วขาเกตของมอสเฟตกำลัง ไอซีขั้วขาเกตของไอจีบีที เซนเซอร์ต่าง ๆ และวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอดีซี เป็นต้น ซึ่งจะอธิบายถึงการออกแบบและการสร้างชุดวงจรต้นแบบในบทถัดไป

บทที่ 3

อินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีที ชนิดโหมดการเลื่อน

3.1 บทนำ

ระบบแปลงผันกำลังงานไฟฟ้าดีซีสูงสุดที่ผลิตได้จากแผงพีวีเป็นกำลังงานไฟฟ้าเอซีที่เชื่อมต่อกับกริดในงานวิทยานิพนธ์นี้คือ วงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนที่แสดงในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยแผงพีวีและวงจรไฟฟ้า 2 ภาค วงจรภาคแรกคือวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนและเทคนิคพีแอนด์โอที่ติดตามกำลังงานสูงสุดของแผงพีวี ด้านอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์เชื่อมต่อกับแผงพีวี และวงจรภาคที่สองคือ วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่มีหม้อแปลงไฟฟ้าเชื่อมต่อกันกลางระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์และกริดเอซีเฟสเดียว 220 V 50 Hz ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันดีซีไปเป็นแรงดันเอซีและควบคุมการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าเอซีถึงกริดเอซี วงจรอินเวอร์เตอร์มีระบบควบคุมป้อนกลับที่ประกอบด้วยตัวควบคุมแรงดันดีซี ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด และเฟสล็อกกลุ๊ป (PLL) ตัวควบคุมแรงดันดีซีทำหน้าที่คุมค่าแรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าคงที่เท่ากับแรงดันดีซีอ้างอิง ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดและเฟสล็อกกลุ๊ปทำหน้าที่ควบคุมให้กระแสไฟฟ้ากริดมีมุมเฟสที่ตรงกับมุมเฟสของแรงดันกริด เนื่องจากวงจรอินเวอร์เตอร์ให้แรงดันเอซีเอาต์พุตที่มีค่าอาร์เอ็มเอส (RMS) น้อยกว่า 220 V ดังนั้นจึงใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเชื่อมต่อกันกลางระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์และกริดเอซีเพื่อช่วยเพิ่มค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันเอซีให้สูงขึ้นเท่ากับแรงดันกริด

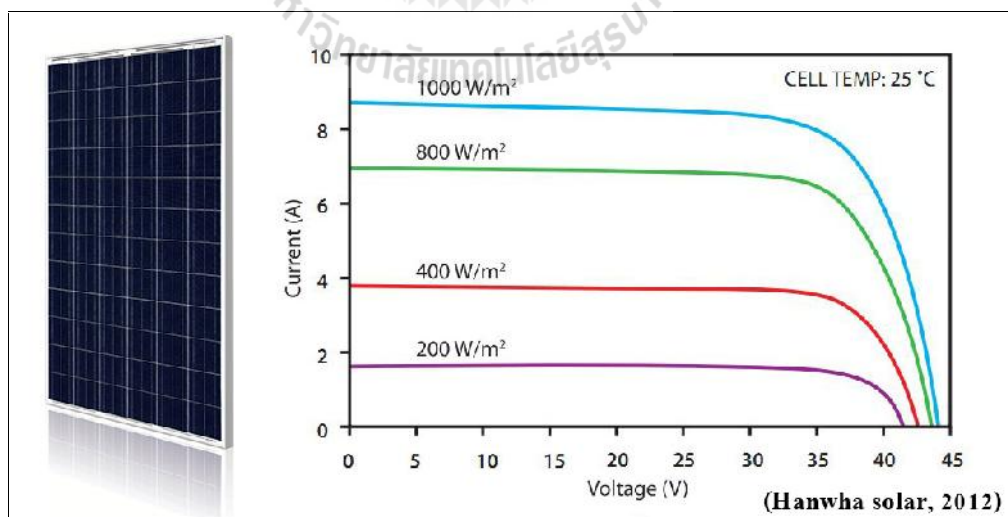


รูปที่ 3.1 วงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน

3.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์

การเลือกแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือแผงพีวีที่เหมาะสมให้ตรงกับความต้องการของการใช้กำลังงานไฟฟ้าของโหลด นั้นสามารถพิจารณาได้จากรายการข้อมูลเฉพาะในเอกสารของผู้ผลิตแผงพีวีมีข้อมูลเฉพาะเชิงกลและข้อมูลคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่สำคัญที่ประกอบด้วย ขนาดพื้นที่ ความหนา น้ำหนัก และกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่ได้จากการทดสอบภายใต้การแผ่รังสีแสงอาทิตย์ในระดับที่มีความเข้มแสงแตกต่างกัน ($I-V$ curves) แผงพีวีที่ใช้งานได้ผ่านการทดสอบภายใต้เงื่อนไขมาตรฐาน STC (standard test conditions: 1000 W/m^2 irradiance, AM1.5 solar spectrum, 25°C) และการทดสอบภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิในการทำงานปกติของแผงพีวีหรือ NOCT (normal operating cell temperature: 800 W/m^2 irradiance, wind speed 1 m/s)

เนื่องจากงานวิทยานิพนธ์นี้ต้องการใช้งานแผงพีวีที่ผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้ไม่ต่ำกว่า 250 W ภายใต้แสงอาทิตย์จริงในวันที่มีท้องฟ้าโปร่ง ดังนั้นจึงเลือกใช้แผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260, 295 W ที่สามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุดเท่ากับ 295 W แผงพีวีรุ่นนี้มีข้อมูลคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบภายใต้เงื่อนไขมาตรฐาน STC และ NOCT ที่แสดงในตารางที่ 3.1 แผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260, 295 W ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมจำนวน 72 เซลล์ต่อเรียงกันแบบอนุกรมทำให้แผงพีวีมีแรงดันเปิดวงจรสูงสุดเท่ากับ 44.9 V และมีกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่ได้จากการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 3.2



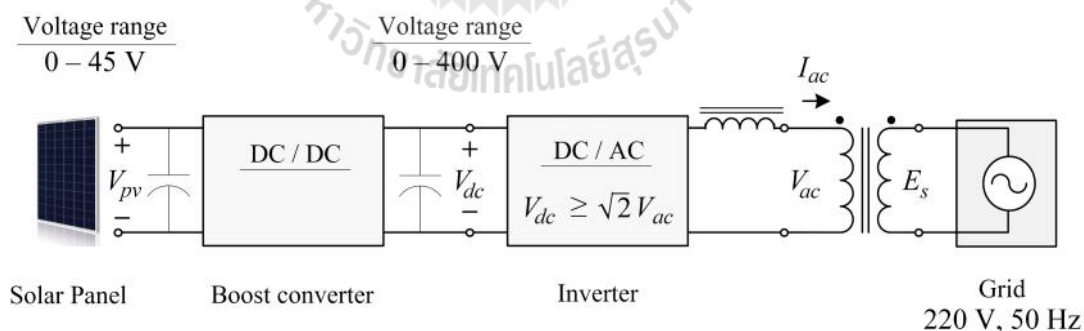
รูปที่ 3.2 แผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260 และกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีที่อุณหภูมิ 25°C

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260, 295 W

คุณลักษณะทางไฟฟ้า	STC	NOCT
แรงดันเปิดวงจร (open circuit voltage) V_{oc}	44.90 V	41.30 V
กระแสไฟฟ้ลัดวงจร (Short Circuit Current) I_{sc}	8.55 A	6.92 A
กำลังงานสูงสุด (maximum power) P_{mp}	295 W	215 W
แรงดันที่จุดกำลังงานสูงสุด (maximum power voltage) V_{mp}	36.40 V	33.30 V
กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานสูงสุด (maximum power current) I_{mp}	8.11 A	6.49 A

3.3 พิกัดแรงดันและการเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้า

กริดเอชซีที่ใช้ในบ้านเรือนที่พักอาศัยและอาคารสำนักงานในประเทศไทยคือแหล่งจ่ายแรงดันเอชซีเฟสเดียวที่เป็นแรงดันกระแสสลับไซนูซอยด์ 220 V_{rms} ที่มีความถี่ 50 Hz แต่แผงพีวีที่ใช้งานสร้างแรงดันดีซีได้ในช่วง 0 ถึง 40 V เท่านั้น การออกแบบวงจรทั้งสองภาคจึงได้พิจารณาแรงดันพิกัดของแผงพีวีและแรงดันกริดเอชซี วงจรอินเวอร์เตอร์พีวีสองภาคที่เชื่อมต่อกกริดเอชซี (on-grid) ที่แสดงในรูปที่ 3.3 จะต้องจ่ายกระแสไฟฟ้กริด (I_{ac}) ที่มีรูปคลื่นไซนูซอยด์และมีมุมเฟสตรงกับแรงดันกริดเอชซีปฐมภูมิของหม้อแปลง (V_{ac}) ทำให้แผงพีวีจ่ายกำลังงานไฟฟ้าถึงกริดเอชซีได้ หม้อแปลงทำหน้าที่เพิ่มระดับของแรงดันกริดปฐมภูมิให้มีค่าอาร์เอ็มเอสสูงขึ้นและมีค่าเท่ากับค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันกริดเอชซีทุติยภูมิ (E_s)



รูปที่ 3.3 การเปลี่ยนรูปแรงดันดีซีไปเป็นแรงดันเอชซีจากแผงพีวีถึงกริดเอชซี

เนื่องจากวงจรอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกกริดนั้นต้องคุมค่าแรงดันดีซีอินพุตให้มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง วงจรอินเวอร์เตอร์จึงมีค่าดัชนีการมอดูเลตขนาด (amplitude modulation index) ที่สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้กริดเอชซีที่ต้องการในขณะหนึ่งและการซิงโครไนซ์ระหว่างแรงดันกริดและกระแส

ไฟฟ้ากริด ดังนั้นวงจรอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกกริดจึงต้องมีตัวควบคุมแรงดันดีซีอินพุตและตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดเอช และเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีที่ใช้งานในระบบแยกเดี่ยวหรือระบบอิสระ (stand-alone system) ค่าดัชนีการมอดูเลตขนาดจะสัมพันธ์กับแรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง และค่าอาร์เอ็มเอส ของแรงดันเอชทุติยภูมิที่โหลดต้องการ ทำให้ค่าดัชนีการมอดูเลตขนาดจึงมีค่าที่แน่นอนค่าหนึ่ง นั่นคือระบบแยกเดี่ยวจะต้องมีตัวควบคุมค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันเอช และโหลดอาจจะมีแรงดันเอชที่ตกคร่อมและมีกระแสไฟฟ้าเอชที่ไหลผ่านที่มีมุมเฟสแตกต่างกันหรือไม่มีมุมเฟสเดียวกัน เมื่อพิจารณารูปที่ 3.3 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแยกกราวด์ (isolation transformer) ที่เชื่อมต่อกันกลางระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์และกริดเอชนั้นทำหน้าที่ช่วยเพิ่มค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันเอชเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ให้เท่ากับค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันกริดเอช (E_g) ดังนั้นสามารถพิจารณาเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าจากเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1.) กำลังงานพิกัดของหม้อแปลง สามารถพิจารณาได้จากกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดของแผงพีวีที่ใช้งานนั่นคือ 295 W โดยที่หม้อแปลงไฟฟ้านั้นต้องสามารถส่งผ่านกำลังงานเฉลี่ยได้มากกว่า 295 W ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกใช้หม้อแปลงที่มีกำลังงานพิกัด 500 VA

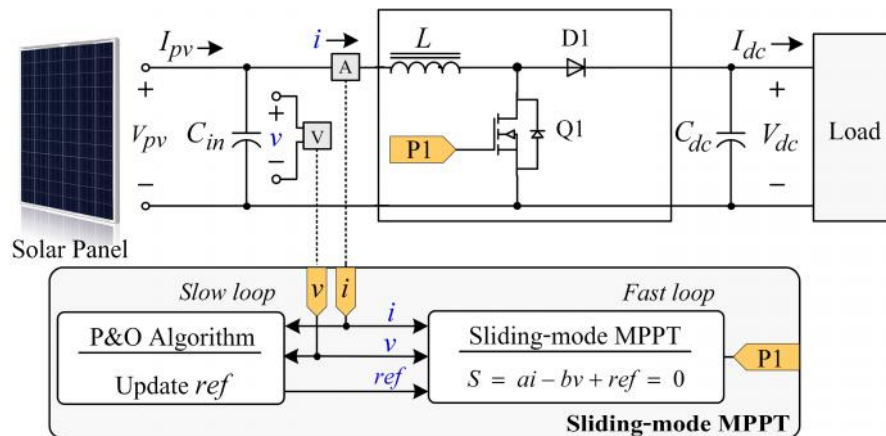
2.) แรงดันทุติยภูมิพิกัด สามารถพิจารณาได้จากพิกัดของแรงดันกริดเอชที่ต้องการเชื่อมต่อ นั่นคือกริดเอชมีค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดัน 220 V ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีแรงดันทุติยภูมิพิกัดเท่ากับ 220 V

3.) แรงดันปฐมภูมิพิกัด สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 3.3 นั่นคือการเปลี่ยนแรงดันดีซีอินพุต (V_{dc}) ไปเป็นแรงดันเอชเอาต์พุต (V_{ac}) ของวงจรอินเวอร์เตอร์ และการส่งผ่านกำลังงานที่ผลิตได้จากแผงพีวีถึงกริดเอชได้ของระบบแปลงผันกำลังงานไฟฟ้าดีซีสูงสุดจากแผงพีวีเป็นกำลังงานไฟฟ้าเอชที่เชื่อมต่อถึงกริดเอช จะเกิดขึ้นได้เมื่ วงจรอินเวอร์เตอร์มีแรงดันดีซีอินพุตมากกว่าค่ายอด (peak) ของแรงดันเอชปฐมภูมิของหม้อแปลง (V_{ac}) นั่นคือแรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์จะต้องมีค่ามากกว่า $\sqrt{2}$ เท่าของค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันเอชปฐมภูมิของหม้อแปลง พิจารณาวงจรไฟฟ้าในภาคแรก ถ้าวจรแปลงผันบัสต์ที่มีด้านอินพุตเชื่อมต่อแผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260, 295 W ที่มีแรงดันไม่เกิน 45 V ได้รับสัญญาณขับขาเกตที่มีค่าวัฏจักรการทำงาน (duty cycle) สูง วงจรแปลงผันบัสต์นี้อาจสามารถสร้างแรงดันดีซีเอาต์พุตได้สูงถึง 400 V แต่การใช้วงจรแปลงผันบัสต์ทำงานที่ค่าวัฏจักรการทำงานสูง ๆ นั้นไม่ส่งผลดีต่อการส่งผ่านกำลังงานที่ผลิตได้จากแผงพีวีไปยังกริดเอช เนื่องจากวงจรแปลงผันบัสต์นั้นมีประสิทธิภาพในการทำงานต่ำเมื่อทำงานที่ค่าวัฏจักรการทำงานสูง ๆ (Liang & Tseng, 2005)

งานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกออกแบบระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อคุมค่าแรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 100 V เพื่อให้วงจรแปลงผันบูสต์ทำงานที่ค่าวัฏจักรการทำงานไม่เกิน 60% และมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง เนื่องจากวงจรแปลงผันบูสต์มีด้านอินพุตของวงจรเชื่อมต่อกับแผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260, 295 W ที่มีแรงดันไม่เกิน 45 V เมื่อทำงานที่ค่าวัฏจักรการทำงานสูงสุดไม่เกิน 60% จะสามารถสร้างแรงดันดีซีเอาต์พุต (แรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์) ได้ใกล้เคียงเท่ากับ 100 V กำหนดให้แรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์เท่ากับ $\sqrt{3}$ เท่าของค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันเอซีปฐมภูมิของหม้อแปลง ดังนั้นหม้อแปลงจึงมีแรงดันปฐมภูมิพิกัดเท่ากับ 60 V ($100 \div \sqrt{3} \approx 60$)

3.4 วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน

วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนที่เป็นวงจรภาคแรกของของระบบแปลงผันกำลังงานไฟฟ้าดีซีสูงสุดจากแผงพีวีเป็นกำลังงานไฟฟ้าเอซีที่เชื่อมต่อถึงกริดเอซีประกอบด้วยแผงพีวี วงจรแปลงผันบูสต์ และหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน ดังที่แสดงในรูปที่ 3.4 วงจรแปลงผันบูสต์ประกอบด้วยตัวเก็บประจุด้านอินพุต (C_{in}) ตัวเหนี่ยวนำ (L) มอสเฟตกำลัง ใดโอด และตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc}) ตัวเก็บประจุด้านอินพุตที่ต่อขนานกับแผงพีวีและตัวเก็บประจุดีซีที่ต่อขนานกับโหลดมีหน้าที่รักษาแรงดันที่ตกคร่อมไม่ให้เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน หรือให้เปลี่ยนแปลงได้อย่างต่อเนื่องเท่านั้น หน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนที่มีอัลกอริทึมพีแอนด์โอทำหน้าที่จ่ายสัญญาณขับขาเกต (P1) ควบคุมการสวิตช์ของมอสเฟตกำลัง Q1 ในวงจรแปลงผันบูสต์ การสวิตช์ดังกล่าวนี้บังคับให้แผงพีวีมีจุดการทำงานเคลื่อนที่ถึงจุดเอ็มพีพี (Levron & Shmilovitz, 2013) เช่นเซอร์วัดแรงดันของแผงพีวีและเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวีทำหน้าที่วัดและส่งสัญญาณแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ (v) และสัญญาณกระแสไฟฟ้าอินพุตที่ไหลเข้าวงจรแปลงผันบูสต์ (i) ไปยังหน่วยเอ็มพีพีที



รูปที่ 3.4 วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเคลื่อน

การทำงานของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเคลื่อนนั้นจะนำข้อมูลของแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ (v) และกระแสไฟฟ้าอินพุตที่ไหลเข้าวงจรแปลงผันบูสต์ (i) มาคำนวณหาตัวเลขค่าหนึ่ง ($ai - bv$) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าคงที่ ($-ref$) ของเส้นตรงการเคลื่อน $S = 0$ ถ้าตัวเลขที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่าค่าคงที่ของเส้นตรงการเคลื่อน สัญญาณขับขาเกตจะมีลอจิกหนึ่ง (ON) และมอสเฟตกำลังจะนำกระแสไฟฟ้า แต่ถ้าตัวเลขที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่าคงที่ของเส้นตรงการเคลื่อน สัญญาณขับขาเกตจะมีลอจิกศูนย์ (OFF) และมอสเฟตกำลังจะหยุดนำกระแสไฟฟ้า นั่นคือผลการเปรียบเทียบระหว่างจุดการทำงานของแผงพีวีและเส้นตรงการเคลื่อน $S = 0$ การสวิตช์ของมอสเฟตกำลังในวงจรแปลงผันบูสต์ส่งผลทำให้แผงพีวีมีจุดการทำงานเคลื่อนที่ถึงเส้นตรงการเคลื่อน ในลักษณะนี้แผงพีวีมีจุดการทำงานเคลื่อนที่ถึงจุดตัดระหว่างเส้นโค้งคุณลักษณะและเส้นตรงการเคลื่อน อัลกอริทึมพีแอนด์ไอจะใช้อุณหภูมิกำลังงานที่ผลิตได้จากแผงพีวี ค้นหาจุดเอ็มพีพีทีและปรับเปลี่ยนค่าคงที่ของสมการเส้นตรงการเคลื่อน (ref) ทำให้เส้นตรงการเคลื่อนทั้งเส้นเกิดการขยับเลื่อนในระนาบ $i-v$ ของเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวี แต่เส้นตรงการเคลื่อนนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความชัน เมื่อค่าคงที่ ref เปลี่ยนแปลงจนถึงค่าหนึ่ง เส้นตรงการเคลื่อนจะขยับเลื่อนเข้าหาจุดเอ็มพีพีที ซึ่งเป็นจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเคลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวี ทำให้แผงพีวีมีจุดการทำงานเคลื่อนที่ถึงจุดเอ็มพีพีที อัลกอริทึมพีแอนด์ไอจะได้รับข้อมูลกำลังงานมากที่สุดและใช้ข้อมูลนี้คงค่า ref ทำให้เส้นตรงการเคลื่อนไม่ขยับเลื่อนออกจากจุดเอ็มพีพีที การทำงานของเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเคลื่อนหรือการเปรียบเทียบระหว่างจุดการทำงานของแผงพีวีและเส้นตรงการเคลื่อนนั้นมีการทำงานวนซ้ำที่เร็วกว่าหรือมีความถี่ในการสุ่มตัวอย่างที่สูงกว่า แต่อัลกอริทึมพีแอนด์ไอจะ

ทำงานวนซ้ำที่ช้ากว่า หรือมีความถี่ในการสุมตัวอย่างต่ำเกินไป เพื่อป้องกันไม่ให้ค่า *ref* ของเส้นตรงการเลื่อนมีการเปลี่ยนแปลงเร็วเกินไปซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการทำงานของหน่วยเอ็มพีพีที

3.4.1 วงจรแปลงผันบัสต์

การออกแบบวงจรแปลงผันบัสต์โดยทั่วไปนั้นสามารถพิจารณาได้จากเงื่อนไขของแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบัสต์ ความถี่การสวิตช์ (switching frequency) แรงดันพลิว (ripple voltage) กระแสไฟฟ้าพลิว (ripple current) และค่าเฉลี่ยของแรงดันที่ตกคร่อมโหลดหรือแรงดันดีซีเอาต์พุตของวงจรแปลงผันบัสต์ที่ต้องการ (Hart, 2011) ซึ่งงานวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาออกแบบเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรแปลงผันบัสต์ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1.) ความถี่การสวิตช์ การทำงานของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนนั้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่การสวิตช์ของวงจรแปลงผันบัสต์โดยตรง สัญญาณขับขาเกตที่เป็นเอาต์พุตของหน่วยเอ็มพีพีทีนั้นมีความถี่การสวิตช์ที่สูงมาก ค่าความถี่การสวิตช์นี้สามารถควบคุมให้มีค่าคงที่ได้ซึ่งขึ้นอยู่กับจุดการทำงานของแผงพีวีที่เป็นแหล่งจ่ายอินพุตของวงจรแปลงผันบัสต์ โดยจะอธิบายในหัวข้อถัดไป การออกแบบเลือกใช้ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันบัสต์นั้นจำเป็นต้องกำหนดค่าความถี่การสวิตช์ที่ชัดเจน ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้กำหนดให้ค่าความถี่การสวิตช์ของวงจรแปลงผันบัสต์อยู่ในช่วง 10 kHz ถึง 100 kHz

2.) แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบัสต์คือแผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF-260, 295 W ที่สามารถสร้างแรงดันดีซีได้มากที่สุดไม่เกินค่าแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) และจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีได้มากที่สุดไม่เกินค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) ของแผงพีวี นั่นคือแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบัสต์สามารถสร้างแรงดันดีซีได้ไม่เกิน 50 V และจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีได้ไม่เกิน 10 A จำนวนออกแบบสร้างวงจรแปลงผันบัสต์โดยกำหนดให้แรงดันพลิวและกระแสไฟฟ้าพลิวของวงจรแปลงผันบัสต์มีค่าต่ำ ๆ (ไม่เกิน 5%) เพื่อให้วงจรแปลงผันบัสต์มีสัญญาณแรงดันดีซีและกระแสไฟฟ้าดีซีเอาต์พุตที่มีความราบเรียบสูง พิจารณาเลือกใช้ตัวเก็บประจุดีซีและตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันบัสต์ที่ความถี่การสวิตช์เท่ากับ 10 kHz ตามวิธีการออกแบบที่ระบุในหนังสือ Power Electronics (Hart, 2011) ซึ่งได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ข

ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรแปลงผันบัสต์ตามการออกแบบดังกล่าว โดยได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุดีซีและตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดใหญ่กว่าค่าที่คำนวณได้จากกรออกแบบ ตัวเก็บประจุดีซีเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุ 6600 μF พิกัดแรงดัน 400 V เพื่อให้สามารถทนแรงดันดีซีได้สูงถึง 400 V ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีที่วงจรแปลงผันบัสต์ทำงานที่ค่าวัฏจักรการทำงานสูง ๆ ตามที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 3.3 ตัวเก็บประจุด้านอินพุตเลือกใช้

ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุ 1000 μF พิกัดแรงดัน 100 V เพื่อให้สามารถทนแรงดันดีซีได้สูงกว่าค่าแรงดันเปิดวงจรของแผงพีวี ตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันบูสต์เลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำ 20 mH พิกัดกระแสไฟฟ้า 15 A เพื่อให้สามารถทนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านได้สูงกว่าค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของแผงพีวี ตารางที่ 3.2 แสดงถึงรายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรแปลงผันบูสต์

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรแปลงผันบูสต์

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์
ตัวเก็บประจุด้านอินพุต	C_{in}	1000 μF , 100 V
ตัวเหนี่ยวนำ	L	20 mH, 15 A
ตัวเก็บประจุดีซี	C_{dc}	6600 μF , 400 V
ความถี่การสวิตช์	f_{sw}^{boost}	10 kHz ถึง 100 kHz

3.4.2 เส้นตรงการเคลื่อนที่ที่ดีที่สุดบนระนาบ $i > v$ ของแผงพีวี

การออกแบบที่สำคัญของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเคลื่อนคือ การเลือกพื้นผิวการเคลื่อนหรือเส้นตรงการเคลื่อนที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นเส้นตรงการเคลื่อนที่เหมาะสมกับการติดตามกำลังงานสูงสุดของแผงพีวี การสร้างหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเคลื่อนนั้นมีความยากง่ายหรือมีความซับซ้อนในการสร้างขึ้นอยู่กับการออกแบบเส้นตรงการเคลื่อน งานวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้จุดเอ็มพีพีบนเส้นโค้งคุณลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวี นำมาสร้างเส้นตรงการเคลื่อนที่เหมือนกับการสร้างเส้นตรงการเคลื่อนในงานวิจัยของ Levron และ Shmilovitz (2013) เพราะเอกสารข้อมูลเฉพาะของแผงพีวีมีกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่ไม่เชิงเส้นภายใต้การทดสอบตามเงื่อนไขการทดสอบมาตรฐาน (STC) ที่มีความเข้มของแสงอาทิตย์เทียมในระดับที่แตกต่างกัน 4 ระดับและมีอุณหภูมิคงที่ 25 °C เส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีแต่ละเส้นมีจุดเอ็มพีพีอยู่ในบริเวณจุดโค้งงอ (knee point) ของเส้นกราฟ กำหนดให้ตัวแปรสถานะคือ กระแสไฟฟ้าอินพุต (i) และแรงดันอินพุต (v) ของวงจรแปลงผันบูสต์ กระแสไฟฟ้าอินพุตคือกระแสไฟฟ้าอินพุตที่ไหลเข้าวงจรแปลงผันบูสต์ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (L) ส่วนแรงดันอินพุตคือแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ซึ่งเป็นแรงดันของแผงพีวีที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุด้านอินพุตที่ต่อขนานกับแผงพีวี พิจารณาเลือกใช้เส้นตรงการเคลื่อน ($S = 0$) เป็นสมการที่เกิดจากผลบวกเชิงเส้น (S) ของกระแสไฟฟ้าอินพุต (i) แรงดันอินพุต (v) และค่าคงที่ ref

$$S = ai - bv + ref = 0 \quad (3.1)$$

โดยที่ a และ b คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่บวกของสมการเส้นตรงการเลื่อน ($a \geq 0$ และ $b \geq 0$)

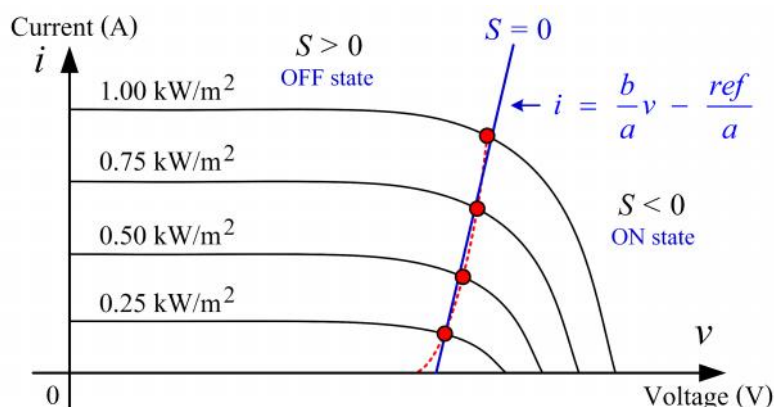
ref คือ ค่าคงที่ของสมการเส้นตรงการเลื่อน

i คือ กระแสไฟฟ้าอินพุตที่ไหลเข้าวงจรแปลงผันบูสต์

v คือ แรงดันของแผงพีวีหรือแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์

และ $S = 0$ คือ สมการเส้นตรงการเลื่อนที่ดีที่สุดของแผงพีวี

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ a b และค่าคงที่ ref ของสมการเส้นตรงการเลื่อนนั้นใช้วิธีการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยที่สุด (least square estimate: LSE) (ปราโมทย์ และนิพนธ์, 2555: 215-250) โดยนำชุดข้อมูลจุดเอ็มพีพีบนกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีมาใช้ในการประมาณค่าเชิงเส้นตรงเพื่อสร้างเส้นตรงการเลื่อน $S = 0$ ที่ประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์ a b และค่าคงที่ ref บนระนาบเส้นโค้งกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวี นั่นคือเป็นเส้นตรงสีน้ำเงิน $i = \frac{b}{a}v - \frac{ref}{a}$ ที่แสดงในกราฟรูปที่ 3.5 เส้นตรงการเลื่อนดังกล่าวนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับแนวเส้นโค้งของจุดเอ็มพีพีในทางอุดมคติ (เส้นประสีแดง) ซึ่งมีผลบวกกำลังสองของระยะห่างระหว่างจุดเอ็มพีพีแต่ละจุดและเส้นตรงการเลื่อนที่มีค่าน้อยที่สุด หรือเป็นเส้นตรงที่อยู่ใกล้เคียงมากกับจุดเอ็มพีพี (จุดสีแดง) แต่ละจุด โดยเส้นตรงการเลื่อนนี้อาจจะไม่ผ่านจุดเอ็มพีพีจุดใดจุดหนึ่ง หรือไม่มีจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนกับเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีในบริเวณที่ตรงกันกับจุดเอ็มพีพี



รูปที่ 3.5 เส้นตรงการเลื่อนบนระนาบเส้นโค้งกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวี

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้นำข้อมูลจุดเอ็มพีพีหรือคู่ลำดับของกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่จุดกำลังงานสูงสุด (I_{mp} , V_{mp}) ของแผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260 ที่ได้จากการประมาณค่าด้วยโปรแกรม Graph digitizer ในตารางที่ 3.3 มาใช้ในการประมาณค่าเชิงเส้นตรงเพื่อสร้างสมการเส้นตรงการเลื่อน เนื่องจากเอกสารข้อมูลเฉพาะของแผงพีวีที่ใช้งานนี้มีเฉพาะกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่ได้จากการทดสอบภายใต้เงื่อนไขมาตรฐาน (STC) ที่มีความเข้มแสงอาทิตย์แตกต่างกัน 4 ระดับ และมีอุณหภูมิคงที่ 25°C เท่านั้น ไม่ได้แสดงจุดเอ็มพีพีบนกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะในแต่ละเส้น ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ใช้โปรแกรม Graph digitizers เพื่อคัดลอกหรือประมาณค่าข้อมูลคู่ลำดับของกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีในแต่ละเส้นโค้งจากรูปกราฟ และนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรมแมทแล็บเพื่อประมาณค่าจุดเอ็มพีพีแต่ละจุดบนบนกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะแต่ละเส้นของแผงพีวี โดยวิธีการใช้งานโปรแกรม Graph digitizers และการประมวลด้วยโปรแกรมแมทแล็บเพื่อประมาณค่าจุดเอ็มพีพีนั้นได้อธิบายในภาคผนวก จ

ตารางที่ 3.3 จุดเอ็มพีพีของแผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260 ที่ได้จากการประมาณค่าด้วยโปรแกรม Graph digitizers

ความเข้มแสงอาทิตย์ (W/m^2)	แรงดันที่จุดกำลังงานสูงสุด (V)	กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานสูงสุด (A)
1000	$V_{mp,1} = 35.9379$	$I_{mp,1} = 7.7960$
800	$V_{mp,2} = 35.2877$	$I_{mp,2} = 6.4101$
400	$V_{mp,3} = 35.5884$	$I_{mp,3} = 3.4899$
200	$V_{mp,4} = 35.4397$	$I_{mp,4} = 1.4885$

ตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับแผงพีวีไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในสถานะคงตัว ทำให้กระแสไฟฟ้าอินพุตที่ไหลเข้าวงจรแปลงผันบูสต์มีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี ($i \approx I_{pv}$) แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์เท่ากับแรงดันเอาต์พุตของแผงพีวี ($v \approx V_{pv}$) ดังนั้นกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่จุดกำลังงานสูงสุดของแผงพีวีจึงเป็นค่าหนึ่งของกระแสไฟฟ้าอินพุตและแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ เมื่อพิจารณาการหาค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของสมการเส้นตรงการเลื่อนจากชุดข้อมูลจุดเอ็มพีพีของแผงพีวีที่แสดงในตารางที่ 3.3 กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ $a = 1$ และเขียนสมการที่ (3.1) ได้เป็น

$$i = bv - ref \quad (3.2)$$

เนื่องจากเส้นตรงการเลื่อนไม่ผ่านจุดเอ็มพีพีจุดใดจุดหนึ่ง การแทนค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันที่จุดกำลังงานสูงสุดลงในสมการที่ (3.2) จะทำให้สมการดังกล่าวไม่เป็นจริง นั่นคือเกิดความผิดพลาดในสมการเส้นตรงการเลื่อน ดังนั้นจึงได้พิจารณาตัวแปรสถานะ i และ v แทนด้วยจุดเอ็มพีพีของแต่ละจุด หรือมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานสูงสุด (I_{mp}) และแรงดันที่จุดกำลังงานสูงสุด (V_{mp}) ตามลำดับ และกำหนดให้ E คือ ผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดที่เกิดจากการแทนค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันที่จุดกำลังงานสูงสุดแต่ละจุดลงในสมการที่ (3.2) หรืออาจกล่าวได้ว่า E คือ ผลบวกกำลังสองของระยะห่างระหว่างจุดเอ็มพีพีแต่ละจุดและเส้นตรงการเลื่อนในแกน i ดังนั้นจะได้ว่า

$$E = \sum_{i=1}^n (I_{mp,j} - (bV_{mp,j} - ref))^2 \quad (3.3)$$

โดยที่ $I_{mp,j}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานสูงสุดจุดที่ j

$V_{mp,j}$ คือ แรงดันที่จุดกำลังงานสูงสุดจุดที่ j

j คือ ลำดับของจุดกำลังงานสูงสุดที่ 1, 2, 3, ...

และ n คือ จำนวนข้อมูลจุดเอ็มพีพีหรือคู่ลำดับ (I_{mp}, V_{mp}) ของแผงพีวีทั้งหมด

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ b และค่าคงที่ ref มีการเปลี่ยนแปลงค่า ค่า E จะมีการเปลี่ยนแปลงตาม โดยอาจมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง ต่อมาพิจารณา b และ ref ที่ทำให้ E มีค่าน้อยที่สุดโดยกำหนดให้สมการอนุพันธ์ย่อยของ E เทียบกับตัวแปร b และ ref ตามลำดับมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ $\frac{\partial E}{\partial b} = 0$ และ $\frac{\partial E}{\partial ref} = 0$ ทำให้ได้ระบบสมการเชิงเส้น 2 สมการดังสมการที่ (3.4) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของสมการเส้นตรงการเลื่อนได้

$$\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n V_{mp,j}^2 & -\sum_{j=1}^n V_{mp,j} \\ \sum_{j=1}^n V_{mp,j} & -n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ ref \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n V_{mp,j} I_{mp,j} \\ \sum_{j=1}^n I_{mp,j} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

โดยที่ $\sum_{j=1}^n V_{mp,j}$ คือ ผลบวกของแรงดันที่จุดกำลังงานสูงสุด

$\sum_{j=1}^n V_{mp,j}^2$ คือ ผลบวกกำลังสองของแรงดันที่จุดกำลังงานสูงสุด

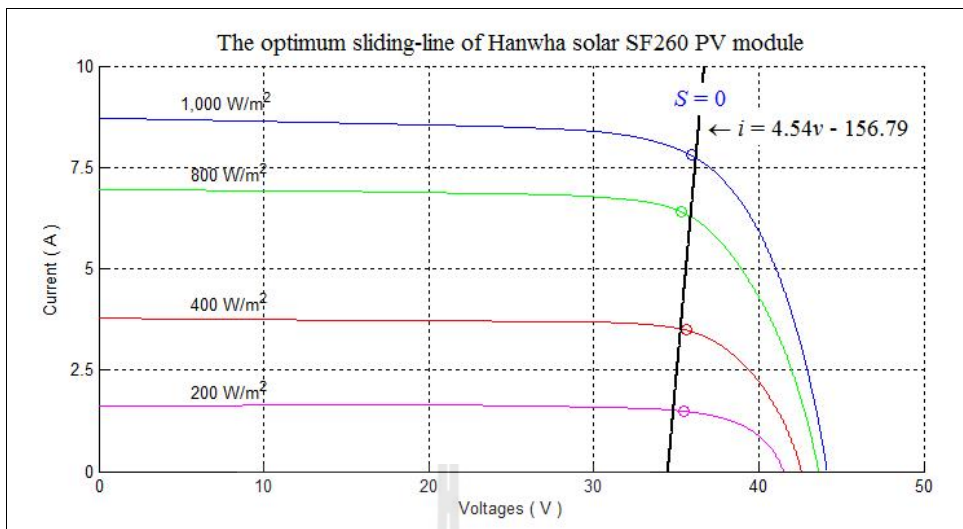
$\sum_{j=1}^n I_{mp,j}$ คือ ผลบวกของกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานสูงสุด

และ $\sum_{j=1}^n V_{mp,j} I_{mp,j}$ คือ ผลบวกของผลคูณกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่จุดกำลังงานสูงสุด

เนื่องจากแผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260 มีกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่ได้จากการทดสอบภายใต้เงื่อนไขมาตรฐาน (STC) ที่มีความเข้มแสงอาทิตย์แตกต่างกัน 4 ระดับ ดังนั้นจึงมีจำนวนข้อมูลจุดเอ็มพีพีทั้งหมด 4 จุด ($n=4$) แทนค่าจุดเอ็มพีพีทั้ง 4 จุดลงในสมการที่ (3.4) จึงได้สมการเส้นตรงการเลื่อนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ $a = 1$ $b = 4.5437$ และค่าคงที่ $ref = 156.7917$ ดังนั้นสมการเส้นตรงการเลื่อนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแผงพีวีรุ่นนี้คือ

$$S = i - 4.5437v + 156.7917 = 0 \quad (3.5)$$

เส้นตรงการเลื่อนดังกล่าวนี้มีจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพี (จุดวงกลม) ทั้ง 4 จุด บนเส้นโค้งกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีแต่ละเส้น โดยมีระยะห่างน้อยที่สุดและไม่ผ่านจุดเอ็มพีพีจุดใดจุดหนึ่งบนกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3.6 สมมุติว่าเส้นตรงการเลื่อนเส้นเดียวกันนี้อยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพีจุดอื่นที่อยู่บนเส้นโค้งคุณลักษณะของแผงพีวีเส้นอื่นที่มีระดับความเข้มแสงอาทิตย์แตกต่างจากค่าที่แสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งในทางอุดมคติเมื่ออุณหภูมิของจุดเอ็มพีพีของแผงพีวีจะอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับเส้นตรงการเลื่อนนี้ ดังนั้นเส้นตรงการเลื่อนในสมการที่ (3.5) จึงเป็นเส้นตรงการเลื่อนที่ดีที่สุดในระยะนาบ $i-v$ ของแผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260

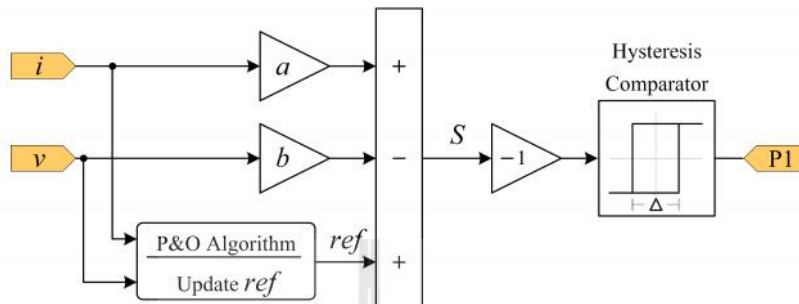


รูปที่ 3.6 เส้นตรงการเคลื่อนที่ที่ดีที่สุดบนระนาบ $i-v$ ของแผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260

3.4.3 หน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเคลื่อน

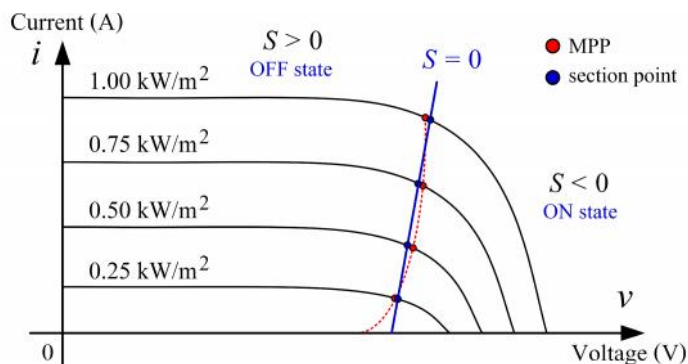
หน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเคลื่อนในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้เส้นตรงการเคลื่อนที่ที่ดีที่สุดของแผงพีวีนำมาสร้างสัญญาณขับขาเกตควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันบูสต์ โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าผลบวกเชิงเส้นในลักษณะฮิสเตอร์ซิสส์เพื่อกำหนดรูปแบบลอจิกของสัญญาณขับขาเกต P1 ดังที่แสดงในรูปที่ 3.7 หน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเคลื่อนนี้ได้รับข้อมูลที่แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี (v) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (i) ซึ่งเป็นแรงดันและกระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ที่ได้จากเซนเซอร์ตามลำดับ ข้อมูลแรงดันและกระแสไฟฟ้างัดถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาผลบวกเชิงเส้น $S = ai - bv + ref$ สำหรับใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าขอบเขตฮิสเตอร์ซิสส์ (Hysteresis band: Δ) เพื่อสร้างเงื่อนไขในการกำหนดรูปแบบลอจิกของสัญญาณขับขาเกต P1 ที่สามารถกำหนดค่าความถี่การสวิตช์ของสัญญาณขับขาเกตได้ เนื่องจากมอสเฟตกำลัง Q1 มีสถานะนำกระแสไฟฟ้าและสถานะหยุดนำกระแสไฟฟ้าเท่านั้น ทำให้หน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเคลื่อนต้องสร้างสัญญาณดิจิทัลที่มีลอจิกหนึ่งและลอจิกศูนย์ที่ตรงกับสถานะทั้งสองของมอสเฟตกำลัง การเปรียบเทียบในลักษณะฮิสเตอร์ซิสส์จึงนำมาใช้จำกัดความถี่การสวิตช์ได้ แต่ฟังก์ชันอิมพัลส์ไม่สามารถนำมาใช้ลดผลกระทบของแชตเตอร์ริง (shattering) ได้ เพราะสัญญาณขับขาเกตของมอสเฟตกำลังไม่เป็นสัญญาณแอนะล็อก ส่วนอัลกอริทึมพีแอนด์ไอซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเคลื่อนนั้นทำหน้าที่ค้นหาจุดกำลังงานสูงสุด โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงพีวีในแต่ละคาบการสุ่ม เพื่อสร้างเงื่อนไขในการปรับเปลี่ยนค่า ref ของเส้นตรงการเคลื่อนใหม่ ซึ่งการ

เปลี่ยนแปลงค่า ref นี้ส่งผลทำให้เส้นตรงการเลื่อนทั้งเส้นเกิดการขยับเลื่อนเข้าหาตำแหน่งของจุดเอ็มพีพีมากขึ้น ส่งผลทำให้เส้นตรงการเลื่อนดังกล่าวนั้นมีจุดตัดอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพีตลอดเวลา



รูปที่ 3.7 หน่วยเอ็มพีพีที่ชนิดโหมคการเลื่อนที่ใช้เส้นตรงการเลื่อนที่ดีที่สุดสร้างสัญญาณขับขาเกต

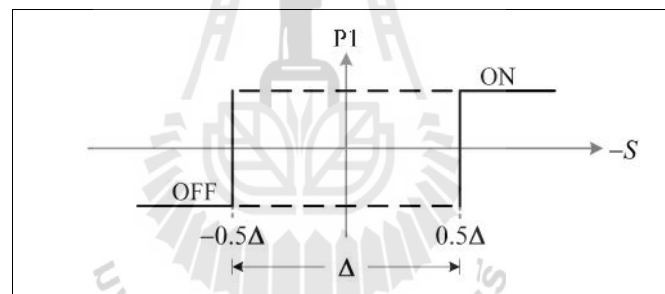
การกำหนดลอจิกของสัญญาณขับขาเกตเพื่อควบคุมลำดับการสวิตช์ของวงจรแปลงผันบวสตันขึ้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการเปรียบเทียบผลบวกเชิงเส้น (S) กล่าวคือ ถ้าผลบวกเชิงเส้นมีค่าเป็นลบ สัญญาณขับขาเกตจะเป็นลอจิกหนึ่งทำให้วงจรแปลงผันบวสตันทำงานในโหมคออน (ON state) แต่ถ้าผลบวกเชิงเส้นนั้นมีค่าเป็นบวก สัญญาณขับขาเกตจะเป็นลอจิกศูนย์ทำให้วงจรแปลงผันบวสตันทำงานในโหมคออฟ (OFF state) การกำหนดลอจิกของสัญญาณขับขาเกตในลักษณะดังกล่าวนี้คือ วิธีการควบคุมการสวิตช์ของวงจรแปลงผันบวสตันด้วยหน่วยเอ็มพีพีที่ชนิดโหมคการเลื่อนที่ใช้วงจรออปแอมป์ในการเปรียบเทียบผลบวกเชิงเส้น (Levron & Shmilovitz, 2013) โดยเส้นตรงการเลื่อนที่ดีที่สุดนั้น ได้แบ่งระนาบเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีออกเป็น 2 ส่วนคือ บริเวณที่มี $S < 0$ ซึ่งเป็นบริเวณที่วงจรแปลงผันบวสตันทำงานในโหมคออน และบริเวณที่มี $S > 0$ ซึ่งเป็นบริเวณที่วงจรแปลงผันบวสตันทำงานในโหมคออฟ แสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ระนาบเส้นโค้ง $i-v$ ของแผงพีวีที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยเส้นตรงการเลื่อนที่ดีที่สุด

การเปรียบเทียบผลบวกเชิงเส้นในลักษณะฮิสเทอรีซิสที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้คือ การเปรียบเทียบระหว่างค่าลบของผลบวกเชิงเส้น ($-S$) และค่าขอบเขตฮิสเทอรีซิส (Δ) ซึ่งประกอบด้วยขอบเขตค่าบวก (0.5Δ) และขอบเขตค่าลบ (-0.5Δ) แทนการเปรียบเทียบระหว่างค่าผลบวกเชิงเส้น (S) และค่าศูนย์ เพื่อให้ได้สัญญาณับขาเกตที่เป็นลอจิกหนึ่งเมื่อ $S < 0$ และเป็นลอจิกศูนย์เมื่อ $S > 0$ เช่นเดียวกับวิธีการควบคุมการสวิตช์ของวงจรแปลงผันบูสต์ด้วยหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน ดังนั้นก่อนการเปรียบเทียบผลบวกเชิงเส้นจึงได้นำตัวเลข -1 มาคูณกับผลบวกเชิงเส้นเพื่อคำนวณหาค่าลบของผลบวกเชิงเส้นที่ใช้ในการเปรียบเทียบ โดยลอจิกของสัญญาณับขาเกตที่เป็นเอาต์พุตของหน่วยเอ็มพีพีทีนั้นสามารถพิจารณาได้จากกราฟในรูปที่ 3.9 ซึ่งแบ่งเป็น 3 กรณี คือ

- | | | |
|-----------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| กรณีที่ 1 | ถ้า $-S \geq 0.5\Delta$ | สัญญาณับขาเกต P1 เป็นลอจิกหนึ่ง |
| กรณีที่ 2 | ถ้า $-S \leq -0.5\Delta$ | สัญญาณับขาเกต P1 เป็นลอจิกศูนย์ |
| กรณีที่ 3 | ถ้า $-0.5\Delta < -S < 0.5\Delta$ | สัญญาณับขาเกต P1 ไม่มีการเปลี่ยนแปลง |



รูปที่ 3.9 การเปรียบเทียบผลบวกเชิงเส้นในลักษณะฮิสเทอรีซิส

การเปรียบเทียบผลบวกเชิงเส้นเพื่อสร้างสัญญาณับขาเกตไปควบคุมลำดับการสวิตช์ของมอสเฟตกำลังที่อยู่ในวงจรแปลงผันบูสต์นั้นคือ การเปรียบเทียบระหว่างจุดการทำงานของแฉงพีวีและเส้นตรงการเลื่อนที่มีผลต่อโหมดการทำงานของวงจรแปลงผันบูสต์ ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้คือการเปรียบเทียบระหว่างค่าลบของผลบวกเชิงเส้นและค่าขอบเขตฮิสเทอรีซิส โดยมอสเฟตกำลังในวงจรแปลงผันบูสต์นั้นจะนำกระแสไฟฟ้าหรือหยุดนำกระแสไฟฟ้าได้อย่างไรอย่างหนึ่งตามลักษณะของสัญญาณับขาเกต ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ถ้า $-S \geq 0.5\Delta$ วงจรแปลงผันบูสต์จะทำงานในโหมดออน (ON state) โดยมอสเฟตกำลัง Q1 ปิดวงจรนำกระแสไฟฟ้า ไดโอด D1 อยู่ในสถานะไบแอสย้อนกลับและหยุดนำกระแสไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำ L มีแรงดันตกคร่อมเท่ากับแรงดันของแฉงพีวี ($V_L = v = V_{pv}$) ซึ่งมี

ค่ามากกว่าศูนย์ กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ (i) ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้แรงดันที่จ่ายกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อแรงดันที่จ่ายกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทำให้แรงดันของแรงดันของแรงดันที่เหนี่ยวนำมีแนวโน้มลดลง ดังนั้นผลบวกเชิงเส้น (S) จึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากเดิมและเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จากค่าลบไปเป็นค่าบวก จนกระทั่งผลบวกเชิงเส้นนั้นมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.5Δ วงจรแปลงผันบูสต์จะเปลี่ยนสถานะการทำงานใหม่ตามลักษณะของสัญญาณชับขาเกตที่เปลี่ยนเป็นลอจิกศูนย์

กรณีที่ 2 ถ้า $-S \leq -0.5\Delta$ วงจรแปลงผันบูสต์จะทำงานในโหมดออฟ (OFF state) โดยมอสเฟตกำลัง Q1 เปิดวงจรหยุดนำกระแสไฟฟ้า และไดโอด D1 อยู่ในสถานะไบแอสตรงและนำกระแสไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำ L มีแรงดันตกคร่อมเท่ากับ $v - V_{dc}$ ซึ่งมีค่ามากกว่าศูนย์ กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ (i) ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีแนวโน้มลดลง ส่งผลทำให้แรงดันที่จ่ายกระแสไฟฟาลดลงเช่นเดียวกัน เมื่อแรงดันที่จ่ายกระแสไฟฟาลดลงทำให้แรงดันของแรงดันที่เหนี่ยวนำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนั้นผลบวกเชิงเส้น (S) จึงมีแนวโน้มลดลงจากเดิมและลดลงเรื่อย ๆ จากค่าบวกไปเป็นค่าลบ จนกระทั่งผลบวกเชิงเส้นนั้นมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ -0.5Δ วงจรแปลงผันบูสต์จะเปลี่ยนสถานะการทำงานใหม่ตามลักษณะของสัญญาณชับขาเกตที่เปลี่ยนเป็นลอจิกหนึ่ง

การทำงานของวงจรแปลงผันบูสต์สลับกันระหว่าง 2 กรณีนี้ตามลำดับการสวิตช์ของสัญญาณชับขาเกตที่ได้จากการเปรียบเทียบผลบวกเชิงเส้นนั้น ส่งผลทำให้ผลบวกเชิงเส้น (S) มีค่าลดลงและเข้าสู่ใกล้ค่าศูนย์ในสถานะชั่วคราว ซึ่งทำให้แรงดันที่เหนี่ยวนำมีจุดการทำงานเคลื่อนที่ไปตามเส้นโค้งคุณลักษณะของแรงดันและเคลื่อนที่เข้าหาเส้นตรงการเคลื่อน เมื่อผลบวกเชิงเส้น (S) มีขนาดใกล้เคียงกับค่าศูนย์หรือเป็นค่าลบที่บวกสลับกับค่าลบที่มีขนาดน้อย ๆ ประมาณค่าศูนย์ในสถานะอยู่ตัว แรงดันที่เหนี่ยวนำมีจุดการทำงานที่เคลื่อนที่มาอยู่ในตำแหน่งที่อยู่ใกล้เคียงกับจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเคลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะของแรงดัน กล่าวคือจุดการทำงานของแรงดันจะเคลื่อนที่ตัดผ่านเส้นตรงการเคลื่อนในลักษณะข้ามไปและข้ามมาสลับกัน และอยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งของจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเคลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแรงดัน การเคลื่อนที่ของจุดการทำงานสลับไปมาในลักษณะดังกล่าวนี้ ส่งผลทำให้สัญญาณชับขาเกตที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างผลบวกเชิงเส้นนั้นมีความถี่การสวิตช์ที่สูงมาก โดยถ้าแรงดันที่เหนี่ยวนำมีจุดการทำงานเคลื่อนที่มาถึงจุดตัดระหว่างเส้นโค้งคุณลักษณะและเส้นตรงการเคลื่อน แรงดันที่เหนี่ยวนำจะมีจุดการทำงานเคลื่อนที่ตัดผ่านเส้นตรงการเคลื่อนในลักษณะข้ามไปและข้ามมาสลับกันในสถานะอยู่ตัว ส่งผลทำให้แรงดันที่เหนี่ยวนำมีจุดการทำงานเคลื่อนที่เข้าไปมาภายในขอบเขตหนึ่ง ในขณะที่สัญญาณชับขาเกตนั้นจะมีลอจิกหนึ่งและลอจิกศูนย์สลับกันที่ความถี่ค่าหนึ่ง ซึ่ง Levron และ Shmilovitz (2013) ได้แสดง

สมการที่ใช้ประมาณค่าความถี่การสวิตช์ของมอสเฟตกำลังในวงจรแปลงผันบูสต์ในสถานะอยู่ตัว (f_{sw}^{boost}) นั้นคือ

$$f_{sw}^{boost} = \frac{aV_{mp}}{L\Delta} \left(1 - \frac{V_{mp}}{V_{dc}} \right) \quad (3.6)$$

โดยที่ V_{mp} คือ แรงดันที่จุดกำลังงานสูงสุดของแผงพีวีที่เกิดขึ้นภายใต้สภาพแวดล้อมจริง
 V_{dc} คือ แรงดันดีซีเอาต์พุตของวงจรแปลงผันบูสต์ และ $V_{dc} > V_{mp}$
 Δ คือ ค่าขอบเขตฮิสเทอรีซิส ซึ่งเป็นความกว้างของฮิสเทอรีซิส (hysteresis band)
 และ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำในวงจรแปลงผันบูสต์

สำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้หน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนนั้นใช้งาน มีฮิสเทอรีซิสที่มีความกว้างขอบเขต (Δ) เท่ากับ 0.0125 เพื่อให้ได้สัญญาณขับขาเกต P1 หรือวงจรแปลงผันบูสต์มีความถี่การสวิตช์ (f_{sw}^{boost}) อยู่ในช่วงระหว่าง 10 kHz ถึง 100 kHz ในสถานะอยู่ตัว ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันบูสต์ที่ใช้งานนั้นคือ $V_{dc} = 100$ V และ $L = 20$ mH ในขณะที่ $V_{mp} < V_{oc} < 45$ V เนื่องจากแรงดันที่จุดกำลังงานสูงสุดของแผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260, 295 W ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาพแวดล้อมจริงนั้นมีโอกาสเป็นไปได้ทุกค่า ดังนั้นแรงดันของแผงพีวีที่ผลิตได้จึงมีค่าอยู่ในพิสัยระหว่างช่วง 0 ถึง V_{oc} ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิ

3.4.4 อัลกอริทึมการรั้งความและสังเกตรหัสหรือพีแอนด์โอ

อัลกอริทึมการรั้งความและสังเกตรหัสหรืออัลกอริทึมพีแอนด์โอเป็นส่วนหนึ่งของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งอัลกอริทึมพีแอนด์โอนี้ทำหน้าที่ในการค้นหาจุดเอ็มพีพีทีที่ทำให้แผงพีวีผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนที่ได้จากการออกแบบและเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริงนั้นอาจไม่ใช่ว่าจุดเดียวกันกับจุดเอ็มพีพีทีของแผงพีวี โดยการทำงานของอัลกอริทึมพีแอนด์โอนั้นได้ใช้ข้อมูลแรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี (v) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี (i) ที่ได้จากการวัดของเซนเซอร์เป็นข้อมูลอินพุต และนำมาคำนวณหาลำดับงานที่ผลิตได้จากแผงพีวี กล่าวคือ

$$P_{pv}(k) = v(k) \cdot i(k) \quad (3.7)$$

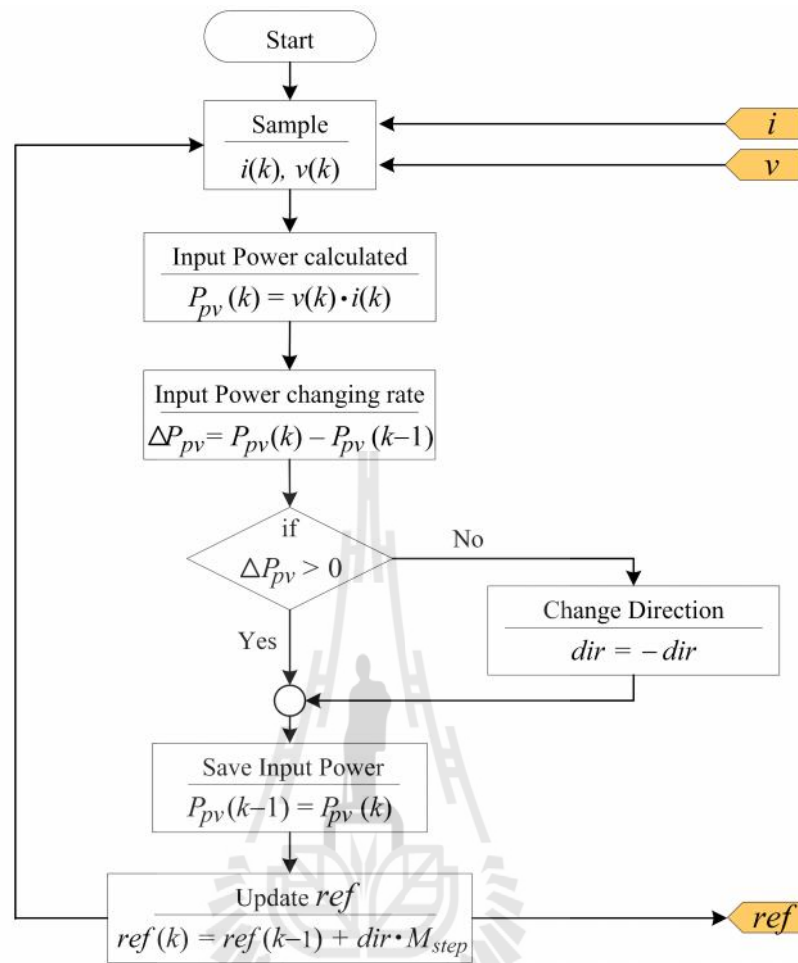
โดยที่ $P_{pv}(k)$ คือ กำลังงานที่ผลิตได้จากแผงพีวี ซึ่งเป็นกำลังงานอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ ในเวลาปัจจุบันหรือในรอบการวนซ้ำครั้งที่ k (การสุ่มตัวอย่างวัดครั้งที่ k)
 $v(k)$ คือ แรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวี ซึ่งเป็นแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ ในเวลาปัจจุบันหรือในรอบการวนซ้ำครั้งที่ k (การสุ่มตัวอย่างวัดครั้งที่ k)
 และ $i(k)$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าอินพุตที่ไหลเข้า วงจรแปลงผันบูสต์ ในเวลาปัจจุบันหรือในรอบการวนซ้ำครั้งที่ k

อัลกอริทึมพีแอนด์ไอจะคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงพีวีในเวลาปัจจุบันหรือในรอบการวนซ้ำครั้งที่ k ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างระหว่างกำลังงานที่ผลิตได้จากแผงพีวีในการวนซ้ำครั้งที่ k ($P_{pv}(k)$) และในรอบการวนซ้ำครั้งที่ $k-1$ ($P_{pv}(k-1)$) ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta P_{pv}(k) = P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1) \quad (3.8)$$

โดยที่ $\Delta P_{pv}(k)$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงพีวีในเวลาปัจจุบันหรือในรอบการวนซ้ำครั้งที่ k
 $P_{pv}(k-1)$ คือ กำลังงานที่ผลิตได้จากแผงพีวี ซึ่งเป็นกำลังงานอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ในเวลาปัจจุบันหรือในรอบการวนซ้ำครั้งที่ $k-1$

อัลกอริทึมพีแอนด์ไอจะนำอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงพีวีในเวลาปัจจุบันหรือ $\Delta P_{pv}(k)$ นี้ไปเปรียบเทียบกับค่าศูนย์เพื่อสร้างเงื่อนไขในการปรับเปลี่ยนหรืออัปเดตค่าค่าคงที่ *ref* ของสมการเส้นตรงการเลื่อนใหม่ ดังแผนภาพการทำงานของอัลกอริทึมพีแอนด์ไอที่แสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผนภาพการทำงานของอัลกอริทึมพีแอนด์โอในการค้นหากำลังงานมากที่สุด

การปรับเปลี่ยนค่าคงที่ ref ในลักษณะดังกล่าวนี้ส่งผลทำให้เส้นตรงการเลื่อนทั้งเส้นเกิดการขยับเลื่อนไปด้านซ้ายมือหรือด้านขวามือบนระนาบเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีอย่างใดอย่างหนึ่ง โดยที่ความชันของเส้นตรงการเลื่อนนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือถ้าค่าคงที่ ref ของเส้นตรงการเลื่อนมีค่าเพิ่มขึ้น เส้นตรงการเลื่อนจะเกิดการขยับเลื่อนไปด้านขวามือของระนาบเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวี แต่ถ้าค่าคงที่ ref ของเส้นตรงการเลื่อนนั้นมีค่าลดลง เส้นตรงการเลื่อนจะเกิดการขยับเลื่อนไปด้านซ้ายมือของระนาบเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวี เมื่อพิจารณาแผนภาพการทำงานของอัลกอริทึมพีแอนด์โอในรูปที่ 3.10 ถ้ากำหนดให้ $dir > 0$ และ $M_{step} = 1$ ดังนั้นสามารถอธิบายการทำงานของอัลกอริทึมพีแอนด์โอที่ใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานไฟฟ้าที่แผงพีวีผลิตได้ในการเปรียบเพื่อปรับเปลี่ยนค่า ref ได้ดังนี้

กรณีที่ 1 ถ้า $\Delta P_{pv}(k) > 0$ จะได้ว่า

$ref(k) = ref(k-1) + dir$ หรือ $ref(k) = ref(k-1) - dir$ อย่างไม่อย่างหนึ่ง
 กล่าวคือ ถ้า $\Delta P_{pv}(k) > 0$ แสดงว่าแผงพีวีผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นจากเดิม ดังนั้นค่า ref
 จึงมีการปรับเปลี่ยนค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากเดิมอย่างต่อเนื่อง หรือการปรับเปลี่ยนค่า
 ref นั้นยังคงมีทิศทางในปรับเปลี่ยนค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงในทิศทางเดิมตามคาบเวลาใน
 การสุ่มก่อนหน้าหนึ่งคาบ ซึ่งส่งผลทำให้เส้นตรงการเคลื่อนนี้เกิดการขยับเลื่อนไป
 ทางด้านขวามือหรือทางด้านซ้ายมืออย่างไม่อย่างหนึ่งบนระนาบ $i-v$ ของแผงพีวีตาม
 ทิศทางเดิมของคาบเวลาในการสุ่มก่อนหน้า

กรณีที่ 2 ถ้า $\Delta P_{pv}(k) < 0$ จะได้ว่า

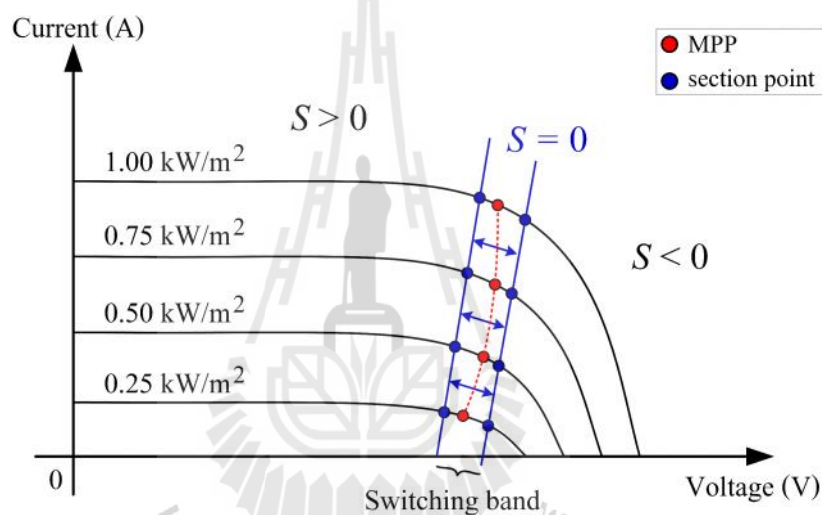
$$ref(k-1) = ref(k-2) - dir \rightarrow ref(k) = ref(k-1) + dir \text{ หรือ}$$

$$ref(k-1) = ref(k-2) + dir \rightarrow ref(k) = ref(k-1) - dir \text{ อย่างไม่อย่างหนึ่ง}$$

กล่าวคือ ถ้า $\Delta P_{pv}(k) < 0$ แสดงว่าแผงพีวีผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้ลดลงจากเดิม ดังนั้นค่า ref จึง
 มีการปรับเปลี่ยนค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากเดิมในทิศทางตรงข้ามกัน กล่าวคือ ถ้าใน
 คาบเวลาการสุ่มก่อนหน้าหนึ่งคาบมีแนวโน้มการปรับเปลี่ยนค่า ref ลดลง ซึ่งทำให้ค่า
 $ref(k-1) < ref(k-2)$ ดังนั้นค่า $ref(k)$ จึงปรับเปลี่ยนค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม แต่ถ้าใน
 คาบเวลาการสุ่มก่อนหน้าหนึ่งคาบนั้นมีแนวโน้มการปรับเปลี่ยนค่า ref เพิ่มขึ้น ซึ่งทำ
 ให้ $ref(k-1) > ref(k-2)$ ดังนั้นค่า $ref(k)$ จึงปรับเปลี่ยนค่าลดลงจากเดิม การ
 ปรับเปลี่ยนค่า ref ในกรณีนี้ส่งผลทำให้เส้นตรงการเคลื่อนเกิดการขยับเลื่อนไปทางด้าน
 ขวามือหรือทางด้านซ้ายมืออย่างไม่อย่างหนึ่งในทิศทางย้อนกลับทางเดิม

การทำงานของอัลกอริทึมพีแอนด์โอในลักษณะดังกล่าวนี้ส่งผลทำให้ค่าคงที่ ref ของ
 เส้นตรงการเคลื่อนปรับเปลี่ยนค่าทุกคาบเวลาการสุ่ม เส้นตรงการเคลื่อนนี้จึงเกิดการขยับเลื่อนไป
 ทางด้านขวามือหรือทางด้านซ้ายมืออย่างไม่อย่างหนึ่งไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งเส้นตรงการเคลื่อนนี้อยู่ใน
 ตำแหน่งที่ใกล้เคียงจุดเอ็มพีพี หรือมีจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเคลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$
 ของแผงพีวีที่อยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงจุดเอ็มพีพีของแผงพีวี ซึ่งในตำแหน่งดังกล่าวนี้เป็นบริเวณที่
 แผงพีวีมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้น้อยมากและลู่เข้าใกล้ค่าศูนย์ นั่นคือ
 $0 < |\Delta P_{pv}(k)| \leq \varepsilon$ โดยที่ ε เป็นค่าคงที่บวกใด ๆ ดังนั้นในสถานะคงตัวเส้นตรงการเคลื่อนนี้จึง
 เกิดการขยับเลื่อนไปทางด้านขวามือหรือทางด้านซ้ายมือสลับกันไปมาภายในบริเวณที่มีขอบเขต
 น้อย ๆ ค่าหนึ่งที่เราเรียกว่า ขอบเขตการสวิตซ์ของเส้นตรงการเคลื่อน (switching band) (Levron &
 Shmilovitz, 2013) ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.11 การขยับเลื่อนของเส้นตรงการเคลื่อนสลับกันไปมาใน
 ลักษณะดังกล่าวนี้ส่งผลทำให้แผงพีวีมีจุดการทำงานที่มีการแกว่งสั่นในสถานะคงตัว หรือทำให้

แผงพีวีมีจุดการทำงานเคลื่อนที่เข้าไปภายในบริเวณที่ขอบเขตแคบ ๆ และอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพี เนื่องจากหน่วยเอ็มพีพีที่ชนิดโหมคการเคลื่อนที่นั้นได้ใช้ผลบวกเชิงเส้นที่ได้จากการปรับเปลี่ยนค่า ref ใหม่มาใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อสร้างสัญญาณขับจากควบคุมลำดับการสวิทช์ของวงจรแปลงผันบูสต์ ซึ่งมีผลทำให้แผงพีวีมีจุดการทำงานจุดใหม่อยู่ในตำแหน่งจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวี โดยจุดตัดดังกล่าวนี้มีการเปลี่ยนตำแหน่งไปมาเช่นเดียวกับการขยับเลื่อนของเส้นตรงการเลื่อน การแกว่งสั้นรอบจุดเอ็มพีพีในสถานะคงตัวที่เกิดขึ้นจากการขยับเลื่อนของเส้นตรงการเลื่อนนี้ขึ้นอยู่กับค่า M_{step} ซึ่งเป็นค่าการรบกวนของอัลกอริทึมพีแอนด์ไอ (perturb value) โดยสามารถพิจารณาได้เป็นกรณีดังต่อไปนี้



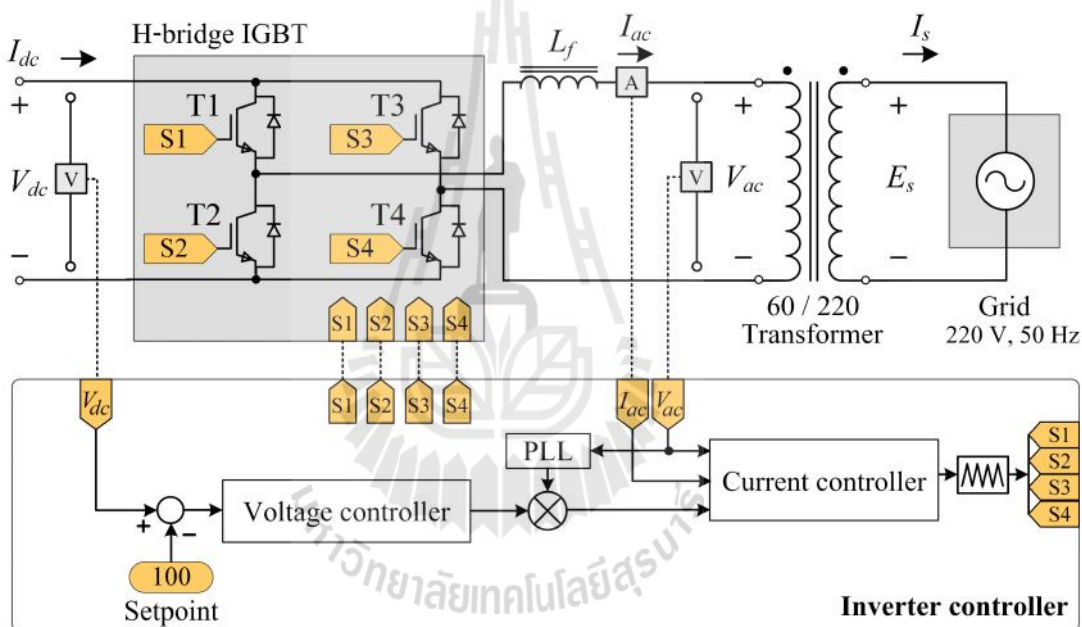
รูปที่ 3.11 การขยับเลื่อนของเส้นตรงการเลื่อนสลับไปมาภายในขอบเขตน้อย ๆ ค่าหนึ่ง

กรณีที่ 1 ถ้าค่าการรบกวนของอัลกอริทึมพีแอนด์ไอนั้นมีค่ามาก การแกว่งสั้นรอบจุดเอ็มพีพีจะมีขอบเขตกว้าง และส่งผลทำให้แผงพีวีมีจุดการทำงานที่อยู่ห่างจากจุดเอ็มพีพีในสถานะอยู่ตัว อย่างไรก็ตามการใช้น้ำค่าการรบกวนที่มีค่ามาก ๆ นั้นมีข้อดีคือ หน่วยเอ็มพีพีที่จะมีผลตอบสนองในการติดตามกำลังงานสูงสุดที่รวดเร็วขึ้น

กรณีที่ 2 ถ้าค่าการรบกวนของอัลกอริทึมพีแอนด์ไอนั้นมีค่าน้อย การแกว่งสั้นรอบจุดเอ็มพีพีจะมีขอบเขตที่แคบ และส่งผลทำให้แผงพีวีมีจุดการทำงานที่อยู่ใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพีในสถานะอยู่ตัว อย่างไรก็ตามการใช้น้ำค่าการรบกวนที่มีค่าน้อย ๆ นั้นมีข้อเสียคือ หน่วยเอ็มพีพีที่จะมีผลตอบสนองในการติดตามกำลังงานสูงสุดที่ช้าลง

3.5 วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวและระบบควบคุมป้อนกลับ

วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่แสดงในรูปที่ 3.12 คือวงจรภาคที่สองของระบบที่ศึกษาในงานวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งทำหน้าที่ในการเปลี่ยนรูปแรงดันดีซีไปเป็นแรงดันเอซีและจ่ายกระแสไฟฟ้าเอซีถึงกริดเอซี วงจรอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวนี้ได้ใช้งาน โมดูลกำลังที่มีอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีที 4 ตัวเชื่อมต่อกันแบบเฮชบริดจ์ (H-bridge IGBT) และมีด้านเอาต์พุตของโมดูลกำลังนี้เชื่อมต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ L_f และหม้อแปลงไฟฟ้าตามลำดับ โดยหม้อแปลงนี้เชื่อมต่อกันกลางระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์และ กริดเอซี 220 V เพื่อช่วยยกระดับแรงดันหรือเพิ่มค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันเอซีเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ให้สูงขึ้นเท่ากับแรงดันกริด



รูปที่ 3.12 วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริดและระบบควบคุมป้อนกลับ

ระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้คือ ระบบควบคุมป้อนกลับที่ใช้เฟสล็อกกลูปในการซิงโครไนซ์สัญญาณแรงดันกริด ซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมแรงดันดีซี (voltage controller) ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด (current controller) และเฟสล็อกกลูป (phase-locked loop: PLL) โดยตัวควบคุมแรงดันดีซีนั้นทำหน้าที่ในการคุมค่าแรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าคงที่เท่ากับจุดปรับตั้ง (setpoint) ส่วนตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดนั้นทำหน้าที่ควบคุมบังคับให้กระแสไฟฟ้า กริดมีมุมเฟสที่ตรงกับมุมเฟสของแรงดันกริด ในขณะที่เฟสล็อกกลูปนั้นทำหน้าที่ประมาณค่าไชนซ์ของตำแหน่งเชิงมุมของแรงดันกริด

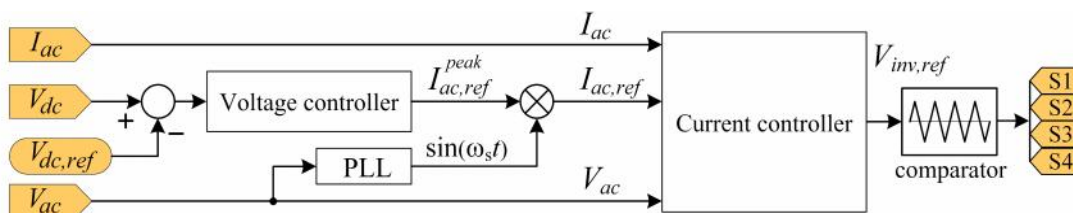
ที่เป็นแรงดันปฐมภูมิของหม้อแปลง ระบบควบคุมดังกล่าวนี้ได้ใช้ข้อมูลอินพุตที่ได้จากการวัดของเซนเซอร์ทั้งหมด 3 ข้อมูล ข้อมูลแรกคือ แรงดันดีซีอินพุตของวงจรรินเวอร์เตอร์ (V_{dc}) ซึ่งเป็นแรงดันดีซีเอาต์พุตของวงจรแปลงผันบูสต์ ข้อมูลที่สองคือ แรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (V_{ac}) ซึ่งเป็นแรงดันกริดที่เป็นแรงดันปฐมภูมิของหม้อแปลง และข้อมูลที่สามคือ กระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (I_{ac}) ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้ากริดที่เป็นกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิของหม้อแปลง นำมาใช้ในการคำนวณหาแรงดันเอซีเอาต์พุตอ้างอิงสำหรับการเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะรูปคลื่นสามเหลี่ยม เพื่อสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มชนิดขั้วเดียว (unipolar PWM) ซึ่งเป็นสัญญาณขับขาเกตที่ควบคุมลำดับการสวิตช์ของไอจีบีที 4 ตัวในวงจรรินเวอร์เตอร์

3.5.1 วงจรรินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้งานโมดูลกำลังที่มีอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีที 4 ตัวเชื่อมต่อกันแบบเฮชบริดจ์เป็นอุปกรณ์สวิตช์ซิงของวงจรรินเวอร์เตอร์ เพื่อความสะดวกในการสร้างชุดวงจรต้นแบบ ส่วนวิธีการเลือกใช้งานตัวเหนี่ยวนำ L_f ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกรองกระแสไฟฟ้ากริดนั้นได้เลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำ 5 mH เช่นเดียวกับค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในงานวิจัยของ Kim และ Youn (2005) เนื่องจากเป็นงานวิจัยที่มีพิกัดกำลังและแรงดันกริดใกล้เคียงกัน รวมทั้งตัวเหนี่ยวนำนี้มีค่าความเหนี่ยวนำที่สูงมากและสามารถกรองกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดให้มีความราบเรียบมากขึ้น ขณะที่วิธีการเลือกใช้หม้อแปลงนั้นได้อธิบายการออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 3.3 นั่นคือ หม้อแปลงชนิดแยกขดลวดที่มีพิกัดกำลัง 500 VA มีอัตราส่วนแรงดัน 60/220 V และมีความถี่ 50 Hz

3.5.2 ระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรรินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว

ระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรรินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวนั้นได้ใช้เฟสล็อกคูลในการซิงโครไนซ์สัญญาณแรงดันกริด ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.13 ระบบควบคุมดังกล่าวนี้มีตัวควบคุมแรงดันดีซีอยู่ในวงรอบนอก (outer loop) และมีตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดอยู่ในวงรอบใน (inner loop) ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ตัวควบคุมแรงดันดีซีที่เป็นตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดนั้นเป็นตัวควบคุมพีไอที่มีการป้อนไปหน้าของแรงดันกริด เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Kim และ Youn (2005) ที่ได้ใช้ตัวควบคุมทำนายกระแสไฟฟ้ากริด (predictive controller) ที่เป็นตัวควบคุมพีไอที่มีการป้อนไปหน้าของแรงดันกริดเหมือนกัน



รูปที่ 3.13 ระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่มีเฟสล็อกกลุ่

ตัวควบคุมแรงดันดีซีทำหน้าที่ในการคุมค่าแรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าคงที่เท่ากับจุดปรับตั้ง (setpoint) ซึ่งได้ใช้ค่าความผิดพลาด (error) ระหว่างแรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการวัด (V_{dc}) และแรงดันดีซีอ้างอิง ($V_{dc, ref}$) ซึ่งเป็นจุดปรับตั้ง (setpoint) หรือค่าแรงดันดีซีที่ต้องการคุมค่า เป็นข้อมูลอินพุตที่ใช้ในการคำนวณค่ายอดของกระแสไฟฟ้า กริดอ้างอิง ($I_{ac, ref}^{peak}$) นั่นคือ

$$I_{ac, ref}^{peak} = K_{Pv}(V_{dc} - V_{dc, ref}) + K_{Iv} \int_0^t (V_{dc} - V_{dc, ref}) dt \tag{3.9}$$

- โดยที่ $I_{ac, ref}^{peak}$ คือ ค่ายอดหรือแอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง
- V_{dc} คือ แรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการวัด
- $V_{dc, ref}$ คือ แรงดันดีซีอ้างอิงหรือจุดปรับตั้งที่ต้องการคุมค่าแรงดันดีซี
- K_{Pv} คือ อัตราขยายสัดส่วน (proportional gain) ของตัวควบคุมแรงดันดีซี
- และ K_{Iv} คือ อัตราขยายปริพันธ์ (integral gain) ของตัวควบคุมแรงดันดีซี

เฟสล็อกกลุ่ทำหน้าที่ประมาณค่าไซน์ของตำแหน่งเชิงมุมของแรงดันกริด ($\sin(\omega_s t)$) ซึ่งได้ใช้สัญญาณแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลงที่ได้จากการวัด (V_{ac}) เป็นข้อมูลอินพุตที่ใช้ในการประมาณค่าไซน์ของตำแหน่งเชิงมุมของแรงดันกริดแทนแรงดันกริดเอชี่ (E_s) เนื่องจากมีค่าไซน์ของตำแหน่งเชิงมุมเท่ากัน โดยค่าไซน์ของตำแหน่งเชิงมุมดังกล่าวนี้จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง ($I_{ac, ref}$) ที่มีมุมเฟสที่ตรงกันกับแรงดันกริด ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงและค่าไซน์ของตำแหน่งเชิงมุมของแรงดันกริดที่ได้จาเฟสล็อกกลุ่ นั่นคือ

$$I_{ac, ref} = I_{ac, ref}^{peak} \sin(\omega_s t) \quad (3.10)$$

โดยที่	$I_{ac, ref}$	คือ กระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงหรือกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงในขณะใดขณะหนึ่ง
	ω_s	คือ ความถี่เชิงมุมของแรงดันกริด ($\omega_s = 2\pi f_s$)
	f_s	คือ ความถี่ของแรงดันกริดเอซี
	$\omega_s t$	คือ ตำแหน่งเชิงมุมของแรงดันกริด
และ	$\sin(\omega_s t)$	คือ ค่าไซน์ของตำแหน่งเชิงมุมของแรงดันกริด

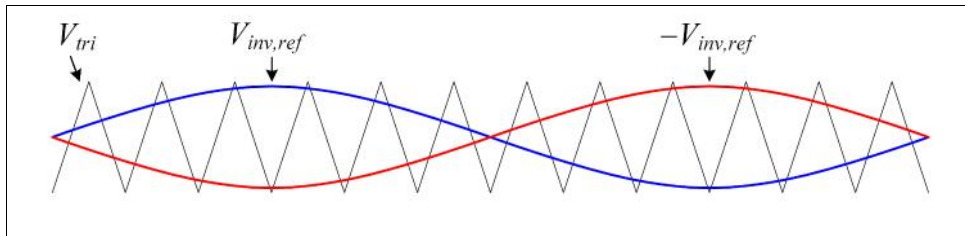
ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดนั้นเป็นตัวควบคุมที่มีโครงสร้างพีไอและมีการป้อนไปหน้าของแรงดันกริด ซึ่งได้ใช้ความผิดพลาดระหว่างกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงและกระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลงที่ได้จากการวัด (I_{ac}) นำมาคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_f เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าแรงดันเอซีเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรถอี่ยอนเวอร์เตอร์ ($V_{inv, ref}$) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลบวกระหว่างแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลงและแรงดันอ้างอิงที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_f โดยตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด นั้นคือ

$$V_{inv, ref} = V_{ac} + K_{Pi}(I_{ac, ref} - I_{ac}) + K_{Ii} \int_0^t (I_{ac, ref} - I_{ac}) dt \quad (3.11)$$

โดยที่	$V_{inv, ref}$	คือ แรงดันเอซีเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรถอี่ยอนเวอร์เตอร์
	V_{ac}	คือ แรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลงที่ได้จากการวัด
	I_{ac}	คือ กระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลงที่ได้จากการวัด
	K_{Pi}	คือ อัตราขยายสัดส่วน (proportional gain) ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด
	K_{Ii}	คือ อัตราขยายปริพันธ์ (integral gain) ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด
และ	$K_{Pi}(I_{ac, ref} - I_{ac}) + K_{Ii} \int_0^t (I_{ac, ref} - I_{ac}) dt$	คือแรงดันอ้างอิงที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_f

ค่าแรงดันเอซีเอาต์พุตอ้างอิงที่ได้จากตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดนี้ถูกนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะสามเหลี่ยม (V_{tri}) ที่มีความถี่สูง 20 kHz เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Kim และ Youn (2005) เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์เบิกลยูเอ็มชนิดซัวเดี่ยวที่มีความถี่การสวิตช์ 20 kHz ซึ่งการเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะสามเหลี่ยมดังกล่าวนี้ต้องการค่าแรงดันเอซีเอาต์พุตอ้างอิง 2 ค่ามาใช้ในการเปรียบเทียบนั้นคือ ค่าแรงดันเอซีเอาต์พุตอ้างอิงที่ไม่กลับซัว ($V_{inv, ref}$) และค่าแรง

ดันเอซีเอาต์พุตอ้างอิงที่กลับขั้วหรือมีเฟสตรงข้ามกัน ($-V_{inv,ref}$) ซึ่งเป็นค่าลบของค่าแรงดันเอซีเอาต์พุตอ้างอิงดังที่แสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การเปรียบเทียบสัญญาณพหุสามเหลี่ยมเพื่อสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มชนิดขั้วเดียว

การเปรียบเทียบสัญญาณพหุสามเหลี่ยมดังที่แสดงในรูปที่ 3.14 นี้ส่งผลทำให้วงจรอินเวอร์เตอร์มีแรงดันเอซีเอาต์พุตเท่ากับ $0.5V_{dc} (\text{sgn}(V_{inv,ref} - V_{tri}) - \text{sgn}(-V_{inv,ref} - V_{tri}))$ ส่วนตัวควบคุมแรงดันดีซีและตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดมีค่าเกนพีและค่าเกนไอที่ได้จากการปรับจูนแบบลองผิดลองถูก (trial and error tuning) ซึ่งถ้าตัวควบคุมแรงดันดีซีและตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดมีอัตราขยายหรือค่าเกนพีไอที่เหมาะสม ไอจีบีทีทั้ง 4 ตัวจะมีลำดับการสวิตช์ที่ส่งผลทำให้วงจรอินเวอร์เตอร์มีแรงดันดีซีอินพุตคงที่เท่ากับค่าแรงดันดีซีอ้างอิง 100 V และสามารถบังคับให้วงจรอินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้ากริดรูปคลื่นไซน์ที่มีมุมเฟสที่ตรงกับมุมเฟสของแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง กริดเอซีจึงมีตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่งและเกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากด้านอินพุตของวงจรไปยังกริดเอซีที่อยู่ทางด้านเอาต์พุตของวงจรได้

3.6 สรุป

วงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนที่ได้ศึกษาในงานวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วยวงจรไฟฟ้าสองภาค วงจรภาคแรกคือวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน ซึ่งมีอัลกอริทึมแอนด์ไอเป็นส่วนหนึ่งของหน่วยเอ็มพีพีที วงจรแปลงผันบูสต์ดังกล่าวนี้มีด้านอินพุตที่เชื่อมต่อกับแผงพีวีที่สามารถผลิตกำลังงานได้มากที่สุด 295 W และมีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนที่ใช้เส้นตรงการเลื่อนในการเปรียบเทียบเพื่อสร้างสัญญาณชับขาเกตของมอสเฟตกำลัง โดยการสวิตช์ของมอสเฟตกำลังนี้จะบังคับให้แผงพีวีมีจุดการทำงานเคลื่อนที่ถึงจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวี ส่วนอัลกอริทึมพีแอนด์ไอนั้นได้ใช้กำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงพีวีมาใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อปรับเปลี่ยนค่าคงที่ของเส้นตรงการเลื่อน ซึ่งมีผลทำให้เส้นตรงการเลื่อนนี้เกิดการชับเคลื่อนเข้า

หาจุดเอ็มพีพี ดังนั้นแผงพีวีจึงมีจุดการทำงานเคลื่อนที่ถึงจุดเอ็มพีพีและสามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดในสถานะอยู่ตัว ส่วนวงจรภาคที่สองคือ วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว เชื่อมต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำและหม้อแปลงไฟฟ้า วงจรอินเวอร์เตอร์นี้มีระบบควบคุมป้อนกลับที่ใช้เฟสล็อกกลุ๊ปในการซิงโครไนซ์ โดยมีตัวควบคุมแรงดันดีซีทำหน้าที่คุมค่าแรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าคงที่เท่ากับจุดปรับตั้ง 100 V และมีตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดที่ทำหน้าที่บังคับให้กระแสไฟฟ้ากริดมีมุมเฟสที่ตรงกับมุมเฟสของแรงดันกริด โดยมีหม้อแปลงไฟฟ้าเชื่อมต่อขึ้นกลางระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์และกริดเอซีเพื่อทำหน้าที่ยกระดับแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลงให้สูงขึ้นและมีค่าอาร์เอ็มเอสเท่ากับแรงดันกริดเอซีเฟสเดียว 220 V ถ้าแผงพีวีสามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้มากเพียงพอที่หน่วยเอ็มพีพีที่สามารถทำงานได้ดี และถ้าตัวควบคุมแรงดันดีซีและตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดนั้นมีอัตราขยายที่เหมาะสม ระบบดังกล่าวนี้จะสามารถส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุดจากแผงพีวีไปยังกริดเอซีได้อย่างมีประสิทธิภาพ



บทที่ 4

เสถียรภาพของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน

4.1 บทนำ

เนื่องจากหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนและอัลกอริทึมพีแอนด์ไอที่เป็นส่วนหนึ่งของหน่วยเอ็มพีพีทีนั้นมีหน้าที่บังคับให้แรงแพวีมีจุดการทำงานอยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดเอ็มพีพีที ดังนั้นหน่วยเอ็มพีพีทีดังกล่าวจึงต้องมีเสถียรภาพในการทำงานตลอดเวลาเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิ ซึ่งมีผลทำให้จุดเอ็มพีพีทีของแรงแพวีนั้นมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งไปจากตำแหน่งเดิม เนื้อหาในบทนี้จึงได้อธิบายถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนและคุณสมบัติการลู่เข้าหาจุดเอ็มพีพีทีของอัลกอริทึมพีแอนด์ไอ ซึ่งสามารถใช้อธิบายถึงเสถียรภาพการทำงานของหน่วยเอ็มพีพีทีนี้ได้เป็นอย่างดี โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนนั้นได้อธิบายถึงการเคลื่อนที่ของจุดการทำงานของแรงแพวีที่ลู่เข้าหาจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแรงแพวีจุดใหม่ ซึ่งจุดตัดดังกล่าวนี้อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพีทีจุดใหม่ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มแสงอาทิตย์ ขณะที่การวิเคราะห์คุณสมบัติการลู่เข้าหาจุดเอ็มพีพีทีของอัลกอริทึมพีแอนด์ไอได้อธิบายถึงการปรับเปลี่ยนค่า ref ที่ทำให้เส้นตรงการเลื่อนเกิดการขยับเลื่อนลู่เข้าหาตำแหน่งที่ทำให้เกิดจุดตัดกับเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแรงแพวีที่อยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งของจุดเอ็มพีพีที

4.2 เสถียรภาพของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน

เนื่องจากการทำงานของวงจรแปลงผันบวสต์ตามลำดับการสวิตช์ของสัญญาณขับขาเกตนันมีผลต่อการบังคับให้แรงแพวีมีจุดการทำงานเคลื่อนที่เข้าหาจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแรงแพวี ดังนั้นเสถียรภาพการทำงานของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนนั้นจึงสามารถวิเคราะห์ได้จากพฤติกรรมพลวัตของวงจรแปลงผันบวสต์ โดยพฤติกรรมพลวัตดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับโหมดการทำงานของวงจรแปลงผันบวสต์ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากตัวแปรสถานะอินพุตของวงจรแปลงผันบวสต์ นั่นคือ ค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบวสต์ ซึ่งเป็นจุดการทำงานของแรงแพวีหรือมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแรงแพวีที่ผลิตได้ในขณะใดขณะหนึ่ง กำหนดให้วงจรแปลงผันบวสต์มีเวกเตอร์ตัวแปรสถานะอินพุตดังนี้

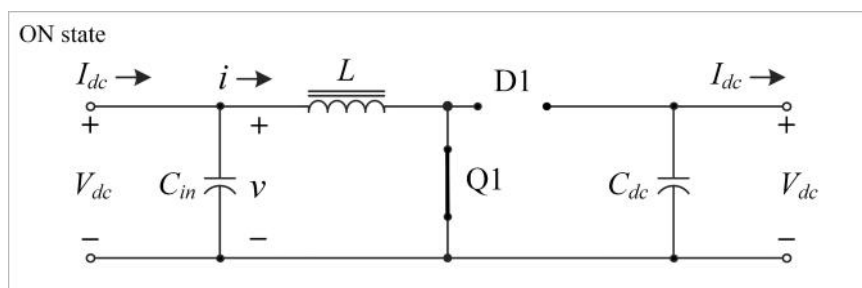
$$x = \begin{bmatrix} v \\ i \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

- โดยที่ x คือ เวกเตอร์ตัวแปรสถานะอินพุตของวงจรแปลงผันบัสต์
 v คือ แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบัสต์ ซึ่งเป็นแรงดันของแผงพีวีหรือแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุด้านอินพุตของวงจรแปลงผันบัสต์
 และ i คือ กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบัสต์ ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันบัสต์

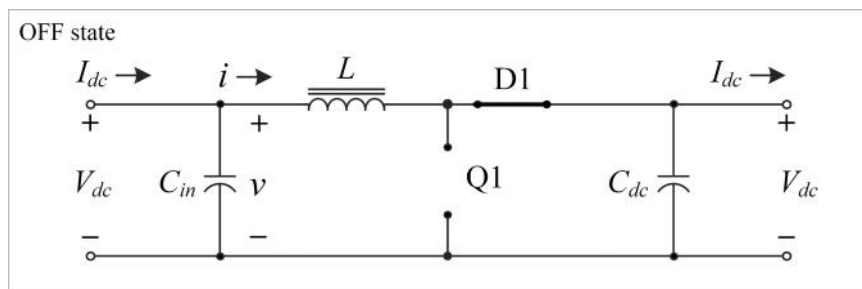
กำหนดให้ค่าขอบเขตสวิตเซอร์ชีส (Δ) เท่ากับศูนย์เพื่อให้สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพการทำงานของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนได้ง่ายขึ้น ดังนั้นสัญญาณขับขาเกตที่เป็นเอาต์พุตของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน ซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมลำดับการสวิตช์ของมอสเฟตกำลัง Q1 ในวงจรแปลงผันบัสต์ให้ทำงานในโหมดต่าง ๆ นั้นจึงขึ้นอยู่กับค่าบวกหรือค่าลบของผลบวกเชิงเส้น (S) ซึ่งสามารถพิจารณาได้เป็น 2 กรณีดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 ถ้า $S < 0$ สัญญาณขับขาเกตเป็นลอจิกหนึ่งส่งผลทำให้วงจรแปลงผันบัสต์ทำงานในโหมดออน (ON state) โดยในโหมดการทำงานนี้สวิตช์มอสเฟตกำลัง Q1 ที่อยู่ในวงจรแปลงผันบัสต์นั้นจะปิดวงจรเพื่อนำกระแสไฟฟ้า ในขณะที่ไดโอด D1 นั้นอยู่ในสถานะไบแอสย้อนกลับและหยุดนำกระแสไฟฟ้า ดังที่แสดงในวงจรสมมูลรูปที่ 4.1 (ก)

กรณีที่ 2 ถ้า $S > 0$ สัญญาณขับขาเกตเป็นลอจิกศูนย์ส่งผลทำให้วงจรแปลงผันบัสต์จะทำงานในโหมดออฟ (OFF state) โดยในโหมดการทำงานนี้สวิตช์มอสเฟตกำลัง Q1 ที่อยู่ในวงจรแปลงผันบัสต์นั้นจะเปิดวงจรเพื่อหยุดนำกระแสไฟฟ้า ในขณะที่ไดโอด D1 นั้นอยู่ในสถานะไบแอสตรงและปิดวงจรเพื่อนำกระแสไฟฟ้า ดังที่แสดงในวงจรสมมูลรูปที่ 4.1 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลในแต่ละโหมดการทำงานของวงจรแปลงผันบัสต์ที่ขึ้นอยู่กับค่า S

(ก) เมื่อ $S < 0$ วงจรแปลงผันบัสต์ทำงานในโหมดคอน

(ข) เมื่อ $S > 0$ วงจรแปลงผันบัสต์ทำงานในโหมดออฟ

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลของวงจรแปลงผันบัสต์ในทั้ง 2 โหมดการทำงานดังกล่าวทำให้ได้แบบจำลองที่เขียนเป็นสมการปริภูมิสถานะอินพุตของวงจรแปลงผันบัสต์ ซึ่งเป็นค่าอนุพันธ์ของเวกเตอร์ตัวแปรสถานะอินพุตของวงจรแปลงผันบัสต์ที่เทียบกับเวลาดังนี้

$$\frac{dx}{dt} = \begin{bmatrix} \frac{dv}{dt} \\ \frac{di}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_{in}}(I_{pv}(v) - i) \\ \frac{1}{L}(v - 0.5V_{dc}(1 + \text{sgn}(S))) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

โดยที่ $\frac{dx}{dt}$ คือ อนุพันธ์ของเวกเตอร์ตัวแปรสถานะของวงจรแปลงผันบัสต์เทียบกับเวลา

$I_{pv}(v)$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับแรงดันของแผงพีวี
เมื่อ $I_{pv}(v) = I_{pv}$

C_{in} คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านอินพุตของวงจรแปลงผันบัสต์

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำในวงจรแปลงผันบัสต์

V_{dc} คือ แรงดันดีซีเอาต์พุตของวงจรแปลงผันบัสต์

$I_{pv} - i$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุด้านอินพุตของวงจรแปลงผันบัสต์

และ $\text{sgn}(S)$ คือ ฟังก์ชันเครื่องหมาย (signum function) ของผลบวกเชิงเส้น

เมื่อ $S > 0 \rightarrow \text{sgn}(S) = +1$

$S < 0 \rightarrow \text{sgn}(S) = -1$

$S = 0 \rightarrow \text{sgn}(S) = 0$

เนื่องจากผลบวกเชิงเส้น (S) นั้นคือผลบวกเชิงเส้นของตัวแปรสถานะอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ที่ต้องการพิจารณา ดังนั้นในการวิเคราะห์เสถียรภาพการทำงานของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนนี้ จึงได้กำหนดฟังก์ชันเลียปูนอฟเป็นฟังก์ชันค่ากำลังสองของผลบวกเชิงเส้นที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ กล่าวคือ

$$V = 0.5S^2 \geq 0 \quad (4.3)$$

เงื่อนไขที่ทำให้หน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนมีเสถียรภาพที่ดีนั้นสามารถพิจารณาได้จากอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟที่เทียบกับเวลา ดังนี้

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = S \frac{dS}{dt} = S\dot{S} \leq 0 \quad (4.4)$$

โดยที่ \dot{V} คือ อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟที่เทียบกับเวลา

และ \dot{S} คือ อนุพันธ์ของผลบวกเชิงเส้นที่เทียบกับเวลา

เนื่องจากผลบวกเชิงเส้น $S = ai - bv + ref$ ดังนั้นค่าอนุพันธ์ของผลบวกเชิงเส้นที่เทียบกับเวลา มีค่าเท่ากับ

$$\dot{S} = \frac{dS}{dt} = a \frac{di}{dt} - b \frac{dv}{dt} + \frac{d(ref)}{dt} \approx a \frac{di}{dt} - b \frac{dv}{dt} \quad (4.5)$$

โดยที่ $\frac{d(ref)}{dt} \approx 0$ เนื่องจากอัลกอริทึมพีแอนด์ไอออนนั้นมีความคาบเวลาในการทำงานวนซ้ำที่ความถี่การสุ่มน้อยกว่าคาบเวลาในการทำงานวนซ้ำเพื่อคำนวณค่าผลบวกเชิงเส้น (S) ของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน ดังนั้นค่า ref จึงเป็นค่าคงที่หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่หน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนคำนวณค่าผลบวกเชิงเส้น ด้วยเหตุนี้ให้ค่าอนุพันธ์ของค่า ref นั้นมีค่าเท่ากับศูนย์ จากนั้นแทนค่าอนุพันธ์ของเวกเตอร์ตัวแปรสถานะอินพุตลงในสมการที่ (4.5) จะได้ว่า

$$\dot{S} = \frac{a}{L}(v - 0.5V_{dc}(1 + \text{sgn}(S))) - \frac{b}{C_{in}}(I_{pv}(v) - i) \quad (4.6)$$

เนื่องจากค่า $\text{sgn}(S) = \pm 1$ ทำให้ได้ค่า $\text{sgn}^2(S) = 1$ นำมาแทนค่าลงในสมการที่ (4.6) และเขียนกระจายรูปใหม่ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\dot{V} &= S\left(-\frac{aV_{dc}}{2L}\text{sgn}(S) + \text{sgn}^2(S)\left(\frac{a}{L}(v - 0.5V_{dc}) - \frac{b}{C_{in}}(I_{pv}(v) - i)\right)\right) \\ \dot{V} &= -S\cdot\text{sgn}(S)\left(\frac{aV_{dc}}{2L} - \text{sgn}(S)\left(\frac{a}{L}(v - 0.5V_{dc}) - \frac{b}{C_{in}}(I_{pv}(v) - i)\right)\right) \\ \dot{V} &= -|S|\left(\frac{aV_{dc}}{2L} - \text{sgn}(S)\left(\frac{a}{L}(v - 0.5V_{dc}) - \frac{b}{C_{in}}(I_{pv}(v) - i)\right)\right) \leq 0 \quad (4.7)\end{aligned}$$

พิจารณหาเงื่อนไขที่ทำให้หน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนมีเสถียรภาพที่ดีหรือทำให้สมการที่ (4.7) เป็นจริงนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ถ้า $S < 0$ กล่าวคือ $i < \frac{b}{a}v - \frac{ref}{a}$ จะได้ว่า $\text{sgn}(S) = -1$ และ

$$\dot{V} = -|S|\left(\frac{a}{L}v - \frac{b}{C_{in}}(I_{pv}(v) - i)\right) \leq 0 \quad (4.8)$$

เนื่องจาก $|S| > 0$ ดังนั้นเงื่อนไขที่ทำให้ $\dot{V} \leq 0$ คือ $\frac{a}{L}v - \frac{b}{C_{in}}(I_{pv} - i) \geq 0$

หรือ $i \geq I_{pv}(v) - \frac{aC_{in}}{bL}v$

กรณีที่ 2 ถ้า $S > 0$ กล่าวคือ $i > \frac{b}{a}v - \frac{ref}{a}$ จะได้ว่า $\text{sgn}(S) = +1$ และ

$$\dot{V} = -|S|\left(\frac{a}{L}(V_{dc} - v) + \frac{b}{C_{in}}(I_{pv}(v) - i)\right) \leq 0 \quad (4.9)$$

เนื่องจาก $|S| > 0$ ดังนั้นเงื่อนไขที่ทำให้ $\dot{V} \leq 0$ คือ $\frac{a}{L}(V_{dc} - v) + \frac{b}{C_{in}}(I_{pv} - i) \geq 0$

$$\text{หรือ } i \leq I_{pv}(v) + \frac{aC_{in}}{bL}(V_{dc} - v)$$

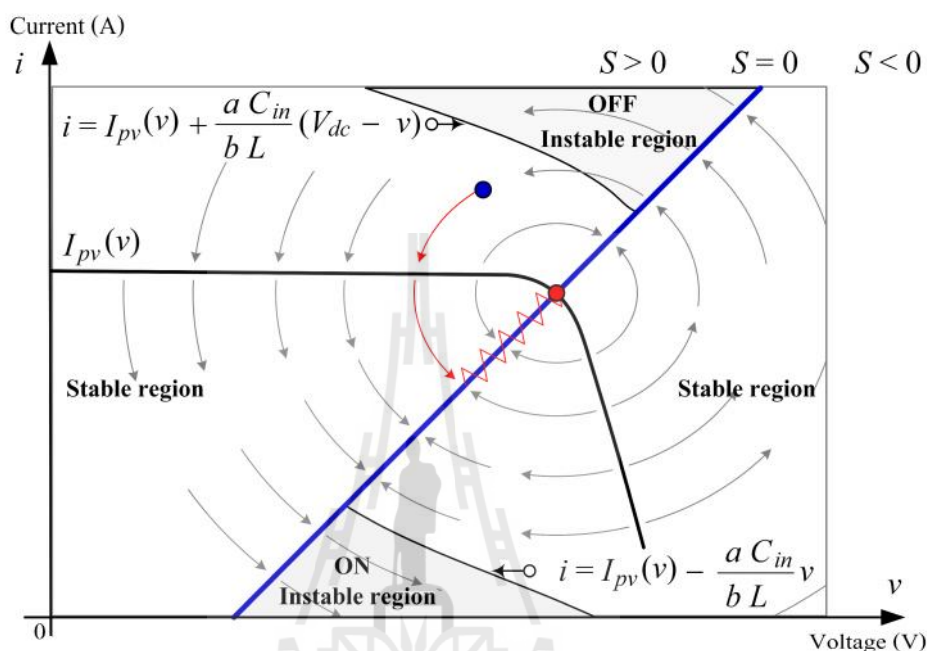
เงื่อนไขการเกิดเสถียรภาพของหน่วยเอ็มพีพีทีทั้ง 2 ข้อนี้เป็นขอบเขตที่บังคับให้ตัวแปรสถานะอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์หรือจุดการทำงานของแผงพีวีเกิดการเคลื่อนที่ในทิศทางพุ่งเข้าหาหรือพุ่งออกจากเส้นตรงการเลื่อนสลับกันไปมาในสถานะชั่วคราว ซึ่งมีผลทำให้ค่าผลบวกเชิงเส้นมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงสลับกันไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งตัวแปรสถานะนี้เคลื่อนที่มาอยู่ในแห่งจุดตัดของเส้นตรงการเลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะของแผงพีวีในสถานะอยู่ตัว โดยสามารถพิจารณาได้เป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ถ้า $S < 0$ มอสเฟตกำลัง Q1 จะปิดวงจรนำกระแสไฟฟ้าในขณะที่ไดโอด D1 นั้นเปิดวงจรหยุดนำกระแสไฟฟ้า ส่งผลทำให้ตัวเหนี่ยวนำ L ในวงจรแปลงผันบูสต์มีแรงดันตกคร่อมเท่ากับแรงดันของแผงพีวี ($v = V_{pv}$) และมีกระแสไฟฟ้า (i) ไหลผ่านเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้อสมการ $i \geq I_{pv}(v) - \frac{aC_{in}}{bL}v$ มีโอกาสเป็นจริง

กรณีที่ 2 ถ้า $S > 0$ มอสเฟตกำลัง Q1 จะเปิดวงจรหยุดนำกระแสไฟฟ้าในขณะที่ไดโอด D1 นั้น ปิดวงจรนำกระแสไฟฟ้า ส่งผลทำให้ตัวเหนี่ยวนำ L ในวงจรแปลงผันบูสต์มีแรงดันตกคร่อมเท่ากับ $v - V_{dc} < 0$ และมีกระแสไฟฟ้า i ไหลผ่านลดลงเรื่อย ๆ ทำให้อสมการ $i \leq I_{pv}(v) + \frac{aC_{in}}{bL}(V_{dc} - v)$ มีโอกาสเป็นจริง

พฤติกรรมพลวัตของวงจรแปลงผันบูสต์ที่เกิดขึ้นในทั้ง 2 กรณีดังกล่าวนี้แสดงถึงเสถียรภาพในการทำงานที่ดีของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเคลื่อนนี้ เนื่องจากในแต่ละโหมดการทำงาน of วงจรแปลงผันบูสต์สลับกันไปมาตามการเปลี่ยนแปลงของค่าผลบวกเชิงเส้น นั้นมีโอกาที่ทำให้ตัวแปรสถานะอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์เคลื่อนที่มาอยู่ในบริเวณที่มีเสถียรภาพภายใต้เงื่อนไขของการเกิดเสถียรภาพ โดยเส้นทางการเคลื่อนที่ของตัวแปรสถานะอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์นั้นสามารถพิจารณาได้จากแนววิถีสถานะของระบบ (system trajectory) บนระนาบเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีที่แสดงในรูปที่ 4.2 แนววิถีสถานะของระบบดังกล่าวนี้มีเส้นตรงการเลื่อน $i = \frac{b}{a}v - \frac{ref}{a}$ เส้นโค้ง $i = I_{pv}(v) + \frac{aC_{in}}{bL}(V_{dc} - v)$ และเส้นโค้ง $i = I_{pv}(v) - \frac{aC_{in}}{bL}v$ แบ่งพื้นที่ออกเป็น 2 ส่วนคือ บริเวณที่มีเสถียรภาพ (stable region) และบริเวณที่ไม่มีเสถียรภาพ (instable region) โดยบริเวณที่มีเสถียรภาพนั้นอยู่ภายในขอบเขตเงื่อนไข

ที่ทำให้เกิดเสถียรภาพ นั่นคือ $I_{pv}(v) - \frac{aC_{in}}{bL}v \leq i < \frac{b}{a}v - \frac{ref}{a}$ หรือ $\frac{b}{a}v - \frac{ref}{a} < i \leq I_{pv}(v) + \frac{aC_{in}}{bL}(V_{dc} - v)$ ส่วนบริเวณที่ไม่มีเสถียรภาพนั้นคือบริเวณที่อยู่ภายนอกขอบเขตเงื่อนไขที่ทำให้เกิดเสถียรภาพดังกล่าว



รูปที่ 4.2 แนววิถีสถานะของระบบบนระนาบเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวี

พิจารณารูปที่ 4.2 กำหนดให้จุดสีน้ำเงินคือจุดการทำงาน (v, i) ใด ๆ ของแผงพีวีภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลง ถ้าแผงพีวีมีจุดการทำงานนี้อยู่ภายในบริเวณที่มีเสถียรภาพ วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนจะบังคับให้แผงพีวีมีจุดการทำงานเคลื่อนที่ในทิศทางที่พุ่งเข้าหาเส้นตรงการเลื่อน แต่ถ้าแผงพีวีมีจุดการทำงานอยู่ภายนอกบริเวณที่มีเสถียรภาพดังกล่าว วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีจะบังคับให้แผงพีวีมีจุดการทำงานเคลื่อนที่ในทิศทางที่พุ่งออกจากเส้นตรงการเลื่อน ด้วยเหตุนี้แผงพีวีจึงมีจุดการทำงานที่เคลื่อนที่ในทิศทางพุ่งเข้าหาและพุ่งออกจากเส้นตรงการเลื่อนสลับกันตามแนววิถีสถานะของระบบไปเรื่อย ๆ ในสถานะชั่วคราว และในสถานะคงตัวจุดทำงานนี้จะเกิดการเคลื่อนที่ไปตามแนวเส้นตรงการเลื่อนเข้าไปอยู่ในตำแหน่งจุดสมดุลดังกล่าว ซึ่งจุดสมดุลดังกล่าวคือจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีหรือจุดสีแดงที่อยู่ภายในบริเวณที่มีเสถียรภาพ ส่วนในกรณีที่สภาพแวดล้อมเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์นั้นแผงพีวีจะมีเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ส่งผลทำให้จุดตัดระหว่างเส้นตรงการ

เลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีเปลี่ยนแปลงตำแหน่งไปจากเดิม และทำให้บริเวณที่มีเสถียรภาพมีขอบเขตที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามจุดสมดุลของระบบนั้นยังคงอยู่ภายในบริเวณที่มีเสถียรภาพตลอดเวลา ดังนั้นการทำงานของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดใหม่คือการเลื่อนนี้จึงมีเสถียรภาพในการทำงานที่ดี เนื่องจากสามารถบังคับให้แผงพีวีมีจุดการทำงานที่อยู่ในตำแหน่งจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีตลอดเวลาเมื่อแสงอาทิตย์มีความเข้ม 1.00 kW/m^2 และโหลดตัวต้านทานมีค่าความต้านทานเท่ากับ 50Ω การจำลองสถานการณ์จะให้ขอบเขตเงื่อนไขที่ทำให้เกิดเสถียรภาพหรือขอบเขตเสถียรภาพและกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวีที่แสดงได้ในรูปที่ 4.3 และ 4.4 การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้างกล่าวคือพฤติกรรมเคลื่อนที่ของจุดการทำงานแผงพีวี ผลการจำลองสถานการณ์จะแสดงถึงขอบเขตเสถียรภาพและกระแสไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงในสถานะชั่วคราวเนื่องจากวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดใหม่เคลื่อนที่มีเงื่อนไขที่ทำให้เกิดเสถียรภาพ 2 เงื่อนไข การวิเคราะห์เสถียรภาพจึงต้องใช้กราฟสองชุด กล่าวคือกราฟชุดแรกแสดงเส้นกราฟกระแสไฟฟ้าและขอบเขตเสถียรภาพของเงื่อนไขแรก และกราฟชุดที่สองแสดงเส้นกราฟกระแสไฟฟ้าและขอบเขตเสถียรภาพของเงื่อนไขที่สอง โดยที่กราฟแต่ละชุดนั้นประกอบด้วยเส้นกราฟจำนวน 3 เส้นดังนี้

กราฟชุดแรก ประกอบด้วย

เส้นกราฟสีน้ำเงิน คือ ขอบเขตเสถียรภาพ $i = I_{pv}(v) - \frac{aC_{in}}{bL}v$ ที่เกิดจาก
วงจรแปลงผันบูสต์และแผงพีวี

เส้นกราฟสีแดง คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี i

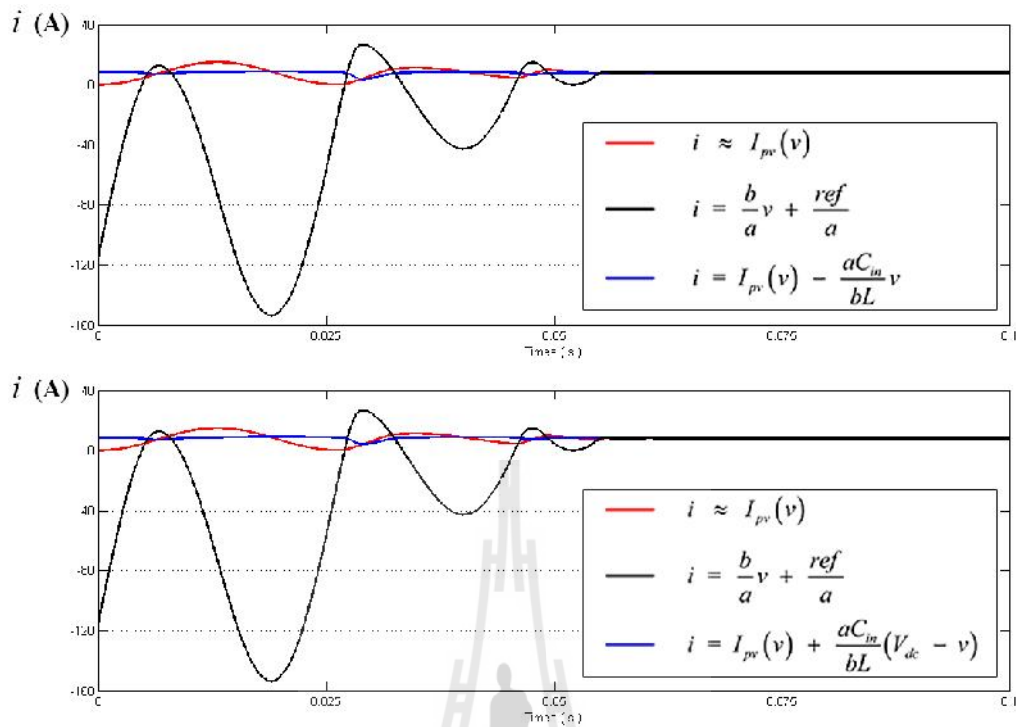
และ เส้นกราฟสีดำ คือ ขอบเขตเสถียรภาพ $i = \frac{b}{a}v - \frac{ref}{a}$ ที่เกิดจาก
เส้นตรงการเลื่อน

กราฟชุดที่สอง ประกอบด้วย

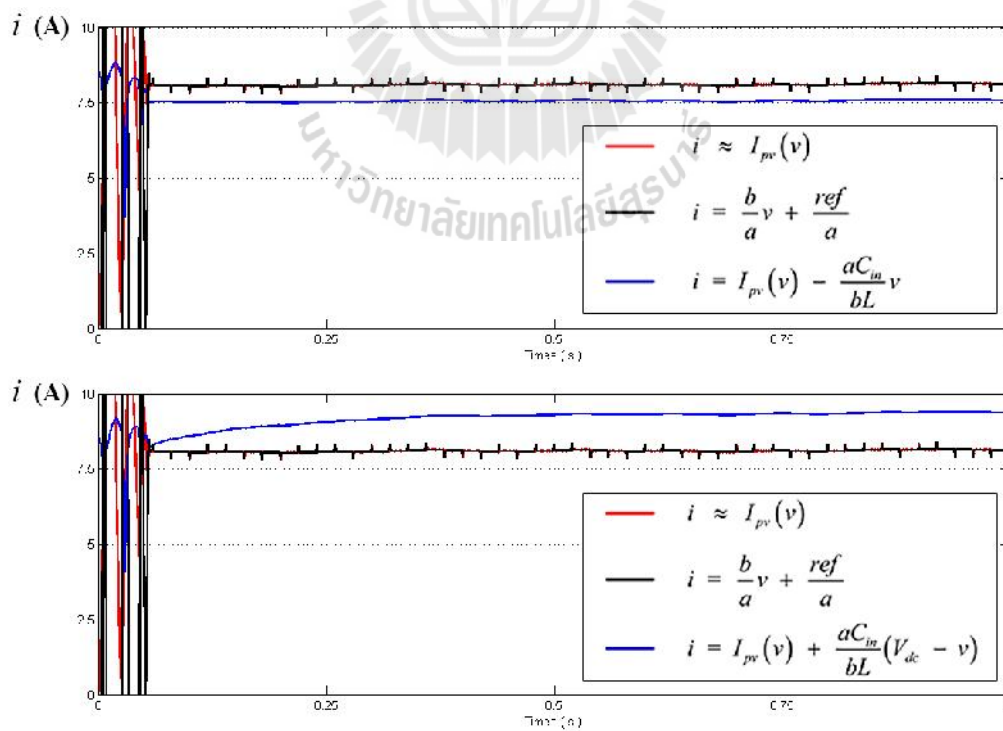
เส้นกราฟสีน้ำเงิน คือ ขอบเขตเสถียรภาพ $i = I_{pv}(v) + \frac{aC_{in}}{bL}(V_{dc} - v)$
ที่เกิดจากวงจรแปลงผันบูสต์และแผงพีวี

เส้นกราฟสีแดง คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี i

และ เส้นกราฟสีดำ คือ ขอบเขตเสถียรภาพ $i = \frac{b}{a}v - \frac{ref}{a}$ ที่เกิดจาก
เส้นตรงการเลื่อน



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของขอบเขตเสถียรภาพและกระแสไฟฟ้า i ในสถานะชั้วครู่



รูปที่ 4.4 ขอบเขตเสถียรภาพและกระแสไฟฟ้า i ในสถานะอยู่ตัว

เมื่อเส้นกราฟสีแดงอยู่ต่ำกว่าเส้นกราฟสีดำ กราฟชุดแรก (กราฟบน) ที่แสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะอธิบายการมีหรือไม่มีเสถียรภาพได้ ถ้าเส้นกราฟสีน้ำเงินอยู่ต่ำสุด เส้นกราฟสีดำอยู่สูงกว่า และเส้นกราฟสีแดงอยู่ระหว่างเส้นกราฟสีน้ำเงินและเส้นกราฟสีดำ แผลงพีวีจะมีจุดการทำงานที่เคลื่อนที่เข้าหาเส้นตรงการเลื่อนและอยู่ในบริเวณที่มีเสถียรภาพ แต่ถ้าเส้นกราฟสีน้ำเงินไม่อยู่ต่ำสุด แผลงพีวีจะมีจุดการทำงานที่เคลื่อนที่ห่างออกจากเส้นตรงการเลื่อนหรืออยู่ในบริเวณที่ไม่มีเสถียรภาพ และเมื่อเส้นกราฟสีดำอยู่ต่ำกว่าเส้นกราฟสีแดง กราฟชุดที่สอง (กราฟล่าง) ที่แสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะอธิบายการมีหรือไม่มีเสถียรภาพได้ ถ้าเส้นกราฟสีดำอยู่ต่ำสุด เส้นกราฟสีน้ำเงินอยู่สูงกว่า และเส้นกราฟสีแดงอยู่ระหว่างเส้นกราฟสีดำและเส้นกราฟสีน้ำเงิน แผลงพีวีจะมีจุดการทำงานที่เคลื่อนที่เข้าหาเส้นตรงการเลื่อนหรืออยู่ในบริเวณที่มีเสถียรภาพ แต่ถ้าเส้นกราฟสีน้ำเงินไม่อยู่สูงสุด แผลงพีวีจะมีจุดการทำงานที่เคลื่อนที่ห่างออกจากเส้นตรงการเลื่อนหรืออยู่ในบริเวณที่ไม่มีเสถียรภาพ

ผลการจำลองสถานการณ์ในสถานะชั่วคราวที่แสดงในรูปที่ 4.3 จะอธิบายถึงการเกิดเสถียรภาพและการไม่มีเสถียรภาพของวงจรแปลงผันบวสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนและขอบเขตเสถียรภาพที่เกิดจากเส้นตรงการเลื่อนจะเปลี่ยนแปลงเร็วกว่าขอบเขตเสถียรภาพที่เกิดจากวงจรแปลงผันบวสต์และแผลงพีวี กล่าวคือแผลงพีวีมีจุดการทำงานที่เคลื่อนที่ห่างออกจากเส้นตรงการเลื่อนและเคลื่อนที่เข้าหาหรือเข้าใกล้เส้นตรงการเลื่อนอย่างสลับกัน พฤติกรรมของการเคลื่อนที่ดังกล่าวเกิดขึ้น 7 ครั้ง แต่จุดการทำงานของแผลงพีวีมีแนวโน้มเคลื่อนที่เข้าหาเส้นตรงการเลื่อนมากกว่า เพราะขอบเขตเสถียรภาพที่เกิดจากเส้นตรงการเลื่อนมีการเปลี่ยนแปลงที่เข้าใกล้กระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผลงพีวี และก่อนการสิ้นสุดสถานะชั่วคราว แผลงพีวีมีจุดการทำงานที่เคลื่อนที่ถึงเส้นตรงการเลื่อน ผลการจำลองสถานการณ์ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 4.4 จะอธิบายถึงการเกิดเสถียรภาพ เพราะขอบเขตเสถียรภาพที่เกิดจากเส้นตรงการเลื่อนเกือบมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผลงพีวี และขอบเขตเสถียรภาพที่เกิดจากวงจรแปลงผันบวสต์และแผลงพีวีมีค่าต่ำกว่าและสูงกว่าที่แสดงในกราฟบนและกราฟล่างของรูปที่ 4.4 ตามลำดับ นั่นคือแผลงพีวีมีจุดการทำงานอยู่บนเส้นตรงการเลื่อนและวงจรแปลงผันบวสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีนี้มีเสถียรภาพที่แน่นอนในสถานะอยู่ตัว

4.3 การหาค่าจุดเอ็มพีพีของอัลกอริทึมพีแอนด์โอ

เนื่องจากอัลกอริทึมพีแอนด์โอ นั้นมีหน้าที่ค้นหาจุดเอ็มพีพีที่ทำให้แผลงพีวีผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุดภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริง โดยใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผลงพีวีนำมาปรับเปลี่ยนค่าคงที่ ref ของเส้นตรงการเลื่อน การปรับเปลี่ยนค่า ref ใน

ลักษณะดังกล่าวนี้ส่งผลทำให้เส้นตรงการเลื่อนนั้นเกิดการขยับเลื่อนไปยังตำแหน่งใหม่ ซึ่งทำให้เกิดจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีจุดใหม่ที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพี โดยจุดตัดดังกล่าวนี้คือจุดสมดุลของระบบจุดใหม่ที่เกิดขึ้นหลังการปรับเปลี่ยนค่าคงที่ ref ดังนั้นเพื่อศึกษาและอธิบายถึงการทำงานของอัลกอริทึมพีแอนด์โอในการบังคับให้เส้นตรงการเลื่อนเกิดการขยับเลื่อนไปยังตำแหน่งที่มีจุดตัดดังกล่าวที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพีได้จริง งานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้วิเคราะห์คุณสมบัติการลู่เข้าหาจุดเอ็มพีพีของอัลกอริทึมพีแอนด์โอโดยพิจารณาจากแผนภาพการทำงานของอัลกอริทึมพีแอนด์โอที่แสดงในรูปที่ 3.9 บทที่ 3 เมื่อกำหนดให้ $M_{step} = 1$ และ $dir > 0$ พบว่าอัลกอริทึมพีแอนด์โอที่มีสมการที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าคงที่ ref ดังนี้

$$ref(k) = ref(k-1) + dir \cdot (\text{sgn}(\Delta P_{pv}(k)) \cdot \text{sgn}(ref(k-1) - ref(k-2))) \quad (4.10)$$

โดยที่ $\Delta P_{pv}(k) = P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)$

dir คือ ขั้น (step) ที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าคงที่ ref ให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง

$ref(k)$ คือ ค่า ref ในเวลาปัจจุบันหรือในรอบการสุ่มตัวอย่างวัดครั้งที่ k

$ref(k-1)$ คือ ค่า ref ในอดีตก่อนหน้านี้นี้หนึ่งคาบการสุ่มหรือในรอบการสุ่มครั้งที่ $k-1$

$ref(k-2)$ คือ ค่า ref ในอดีตก่อนหน้านีสองคาบการสุ่มหรือในรอบการสุ่มครั้งที่ $k-2$

และ sgn คือ ฟังก์ชันเครื่องหมาย (signal fuction)

พิจารณาสมการที่ (4.10) สมมติว่าแผงพีวีนั้นอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิคงที่ กล่าวคือแผงพีวีไม่มีการเปลี่ยนแปลงเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวี ถ้าเส้นตรงการเลื่อนเดิมก่อนการปรับเปลี่ยนค่า ref นั้นมีจุดตัดกับเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีอยู่ในตำแหน่งใด ๆ ซึ่งไม่ใช่ตำแหน่งเดียวกันกับจุดเอ็มพีพี ซึ่งถ้าแผงพีวีมีจุดการทำงานอยู่ในตำแหน่งของจุดตัดนี้จะทำให้แผงพีวีผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้ต่ำกว่ากำลังงานไฟฟ้าที่สูงที่สุด ดังนั้นในการบังคับให้เส้นตรงการเลื่อนเกิดการขยับเลื่อนไปยังตำแหน่งใหม่ที่ทำให้เกิดจุดตัดกับเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีอยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดเอ็มพีพีนั้นกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงพีวีต้องมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเท่านั้น ส่วนในกรณีที่แผงพีวีผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้ลดลงนั้นเส้นตรงการเลื่อนจะเกิดการขยับเลื่อนย้อนกลับไปยังทิศทางเดิมเพื่อให้แผงพีวีผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น การขยับเลื่อนของเส้นตรงการเลื่อนในลักษณะดังกล่าวนี้เกิดขึ้นตามการปรับเปลี่ยนค่า ref ทีละขั้นของอัลกอริทึมพีแอนด์โอ ซึ่งสามารถพิจารณาได้เป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 ถ้า $\Delta P_{pv}(k) > 0$ และ $\Delta P_{pv}(k-1) > 0$ แสดงว่าแผงพีวีนั้นสามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นอัลกอริทึมพีแอนด์โอจึงได้ปรับเปลี่ยนค่าคงที่ ref เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างใดอย่างหนึ่งต่อเนื่องกัน ซึ่งมีสมการในการปรับเปลี่ยนค่าคงที่ ref ดังนี้

1.) ค่าคงที่ ref มีการปรับเปลี่ยนค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

$$ref(k) = ref(k-1) + dir \text{ และ } ref(k-1) = ref(k-2) + dir \text{ จะได้ว่า}$$

$$ref(k) - ref(k-2) = 2 \cdot dir \quad (4.11)$$

2.) ค่าคงที่ ref มีการปรับเปลี่ยนค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง

$$ref(k) = ref(k-1) - dir \text{ และ } ref(k-1) = ref(k-2) - dir \text{ จะได้ว่า}$$

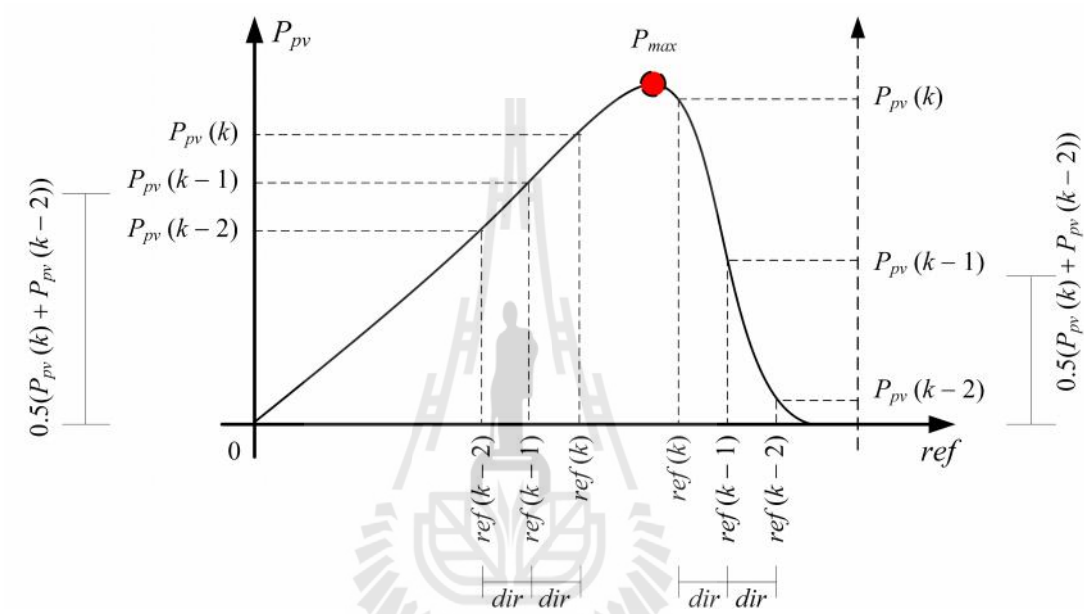
$$ref(k) - ref(k-2) = -2 \cdot dir \quad (4.12)$$

กรณีที่ 2 ถ้า $\Delta P_{pv}(k) < 0$ แสดงว่าแผงพีวีนั้นสามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้ลดลง ดังนั้นอัลกอริทึมพีแอนด์โอจึงได้ปรับเปลี่ยนค่าคงที่ ref เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างใดอย่างหนึ่งในทิศทางตรงกันข้ามกับการปรับเปลี่ยนค่าคงที่ ref ก่อนหน้านี้หนึ่งคาบการสุ่ม ดังนั้นการปรับเปลี่ยนค่าคงที่ ref ของเส้นตรงการเลื่อนในกรณีนี้ทำให้ค่า $ref(k) = ref(k-2)$ ซึ่งมีผลทำให้เส้นตรงการเลื่อนเกิดการขยับเลื่อนไปยังตำแหน่งเดิมก่อนหน้าีสองคาบการสุ่ม

พิจารณากราฟเส้นโค้งคุณลักษณะของกำลังงานไฟฟ้าที่แผงพีวีผลิตได้และค่าคงที่ ref ($P_{pv} - ref$ curve) ที่แสดงในรูปที่ 4.5 กราฟเส้นโค้งดังกล่าวนี้มีลักษณะคล้ายภูเขาเช่นเดียวกับกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะระหว่างกำลังงานไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวี ($P-v$ curve) และมีจุดเอ็มพีพีหรือจุดกำลังงานไฟฟ้าที่สูงสุดที่ผลิตได้จากแผงพีวี (P_{max}) อยู่ในตำแหน่งจุดยอดของภูเขาเหมือนกันซึ่งแสดงด้วยจุดสี่แฉงดังรูป จุดเอ็มพีพีดังกล่าวนี้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงพีวีหรือความชันของเส้นกราฟเท่ากับศูนย์ ในขณะที่จุดอื่น ๆ ที่อยู่บนเส้นโค้งคุณลักษณะนี้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงพีวีหรือความชันของเส้นกราฟไม่เท่ากับศูนย์ กล่าวคือกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $P_{pv} - ref$ นี้มีความชันเพิ่มขึ้นจากฐานของภูเขาและมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าเป็นศูนย์ในบริเวณจุดยอดของภูเขา ซึ่งเป็นตำแหน่งของจุดเอ็มพีพีของแผงพีวีบนระนาบเส้นโค้งคุณลักษณะ $P_{pv} - ref$ และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความชันของกราฟเส้นโค้ง $P_{pv} - ref$ เทียบกับค่า ref ลดลงเรื่อย ๆ จนเท่ากับศูนย์ กล่าวคือ

$$\frac{\frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{ref(k) - ref(k-1)} - \frac{P_{pv}(k-1) - P_{pv}(k-2)}{ref(k-1) - ref(k-2)}}{ref(k) - ref(k-2)}} < 0 \quad (4.13)$$

โดยที่ $\frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{ref(k) - ref(k-1)}$ และ $\frac{P_{pv}(k-1) - P_{pv}(k-2)}{ref(k-1) - ref(k-2)}$ คือ ความชันของกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $P_{pv} - ref$ ในรอบการวนซ้ำครั้งที่ k และ $k-1$ ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะระหว่างกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงพีวีและค่าคงที่ ref

แทนค่าสมการที่ (4.13) ด้วยสมการที่ (4.11) ได้ดังนี้

$$\frac{\frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{dir} - \frac{P_{pv}(k-1) - P_{pv}(k-2)}{dir}}{2 \cdot dir}} < 0 \quad (4.14)$$

แทนค่าสมการที่ (4.13) ด้วยสมการที่ (4.12) ได้ดังนี้

$$\frac{\frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{-dir} - \frac{P_{pv}(k-1) - P_{pv}(k-2)}{-dir}}{-2 \cdot dir}} < 0 \quad (4.15)$$

พิจารณาหาค่าอนุพันธ์ของสมการที่ (4.14) และ (4.15) เทียบกับค่า ref ได้ดังนี้

$$\frac{1}{2(dir)^2}(P_{pv}(k) + P_{pv}(k-2) - 2P_{pv}(k-1)) < 0 \quad (4.16)$$

เงื่อนไขที่ทำให้อนุพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงของความชันของกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $P_{pv}-ref$ เทียบกับค่า ref มีค่าน้อยกว่าศูนย์ คือ

$$P_{pv}(k) + P_{pv}(k-2) - 2P_{pv}(k-1) < 0 \quad (4.17)$$

พิจารณาเงื่อนไขในสมการที่ (4.17) พบว่าอัลกอริทึมพีแอนด์โอต้องมีการปรับเปลี่ยนค่า ref เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้แผงพีวีมีจุดการทำงานที่สามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น หรือทำให้กำลังงานไฟฟ้าที่แผงพีวีผลิตได้เกิดการเคลื่อนที่เข้าหาจุดเอ็มพีพีทีที่อยู่ในตำแหน่งจุดสูงสุดของเส้นโค้งคุณลักษณะ $P_{pv}-ref$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีค่าอนุพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงของความชันของกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $P_{pv}-ref$ เทียบกับค่า ref น้อยกว่าศูนย์ ต่อจากนั้นพิจารณาค่ากำลังสองของความชันของกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $P_{pv}-ref$ ในรอบการสุ่มตัวอย่างวัดครั้งที่ k และ $k-1$ ตามลำดับ กล่าวคือ

$$L(k) = \left(\frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{ref(k) - ref(k-1)} \right)^2 \geq 0 \quad (4.18)$$

$$L(k-1) = \left(\frac{P_{pv}(k-1) - P_{pv}(k-2)}{ref(k-1) - ref(k-2)} \right)^2 \geq 0 \quad (4.19)$$

คำนวณหาผลต่างระหว่างค่ากำลังสองของความชันของกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $P_{pv}-ref$ ในรอบการสุ่มตัวอย่างวัดครั้งที่ k และในรอบการสุ่มตัวอย่างวัดครั้งที่ $k-1$ ได้ดังนี้

$$\Delta L(k) = L(k) - L(k-1) \quad (4.20)$$

$$\Delta L(k) = \left(\frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{ref(k) - ref(k-1)} \right)^2 - \left(\frac{P_{pv}(k-1) - P_{pv}(k-2)}{ref(k-1) - ref(k-2)} \right)^2$$

$$\Delta L(k) = \left(\frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{\pm dir} \right)^2 - \left(\frac{P_{pv}(k-1) - P_{pv}(k-2)}{\pm dir} \right)^2$$

$$\Delta L(k) = \frac{1}{(dir)^2} ((P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1))^2 - (P_{pv}(k-1) - P_{pv}(k-2))^2)$$

$$\Delta L(k) = \frac{1}{(dir)^2} (P_{pv}(k) - P_{pv}(k-2))(P_{pv}(k) + P_{pv}(k-2) - 2P_{pv}(k-1)) \quad (4.21)$$

พิจารณาสมการที่ (4.21) เนื่องจากการปรับเปลี่ยนค่าคงที่ *ref* ของอัลกอริทึมพีแอนด์โอในลักษณะเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างต่อเนื่องนั้นส่งผลทำให้กำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงพีวีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือ $\Delta P_{pv}(k-1) > 0$ และ $\Delta P_{pv}(k) > 0$ แสดงว่า

$$P_{pv}(k) - P_{pv}(k-2) > 0 \quad (4.22)$$

และในสมการที่ (4.17) $P_{pv}(k) + P_{pv}(k-2) - 2P_{pv}(k-1) < 0$ จะได้ว่า

$$\Delta L(k) = L(k) - L(k-1) < 0 \quad (4.23)$$

พิจารณาสมการที่ (4.23) เจื่อนใจในการปรับเปลี่ยนค่าคงที่ *ref* ของอัลกอริทึมพีแอนด์โอ นั้นส่งผลทำให้ $\Delta L(k)$ มีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ จนเท่ากับศูนย์ แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงพีวีเพิ่มขึ้นไปยังตำแหน่งจุดสูงสุดของเส้นกราฟ ซึ่งมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความชันของกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $P_{pv} - ref$ ลดลงเรื่อยๆ จนเท่ากับศูนย์ การเปลี่ยนแปลงของกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงพีวีเพิ่มขึ้นในลักษณะดังกล่าว ส่งผลทำให้ อัลกอริทึมพีแอนด์โอปรับเปลี่ยนค่าคงที่ *ref* เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างใดอย่างหนึ่งต่อเนื่องกันในสถานะชั่วคราว เมื่อเข้าสู่สถานะอยู่ตัวอัลกอริทึมพีแอนด์โอจะได้รับขนาดของอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงพีวีน้อย ๆ ค่าหนึ่ง กล่าวคือ $0 < |\Delta P_{pv}(k)| \leq \beta$ โดยที่ β คือค่าคงที่บวกค่าหนึ่ง ด้วยเหตุนี้อัลกอริทึมพีแอนด์โอจึงได้ปรับเปลี่ยนค่าคงที่ *ref* เพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันไปเรื่อยๆ ส่งผลทำให้เส้นตรงการเลื่อนจึงเกิดการขยับเลื่อนไปทางด้านขวามือและทางซ้าย ข้ามมือสลับกันไปเรื่อยๆ อยู่ในบริเวณดังกล่าวซึ่งมีขอบเขตน้อย ๆ ค่าหนึ่ง โดยการขยับเลื่อนของเส้นตรงการเลื่อนในลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนและเส้นโค้ง

คุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีในตำแหน่งใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพีที่ตลอดเวลา ดังนั้นอัลกอริทึมพีแอนด์โอที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงมีคุณสมบัติในการลู่เข้าหาจุดเอ็มพีพี

การขยับเลื่อนของเส้นตรงการเลื่อนสลับกันไปมาในสถานะคงตัวภายในบริเวณแคบ ๆ นั้น มีขอบเขตขึ้นอยู่กับค่าการรั้งความของอัลกอริทึมพีแอนด์โอที่ใช้งาน (M_{step}) ซึ่งงานวิทยานิพนธ์นี้ได้นำมาคูณกับค่า dir และใช้ผลคูณดังกล่าวนี้แทนค่า dir ในการปรับเปลี่ยนค่าคงที่ ref ของเส้นตรงการเลื่อน โดยกำหนดให้ $0 < M_{step} \leq \delta < 1$ และ δ คือค่าคงที่บวกที่มีค่าน้อยค่าหนึ่ง ถ้าค่าการรั้งความดังกล่าวนี้มีค่ามากจะทำให้เส้นตรงการเลื่อนขยับเลื่อนสลับกันไปมาภายในขอบเขตที่กว้างขึ้นหรือมีค่า β มาก อย่างไรก็ตามการใช้ค่ารั้งความที่มีค่ามาก ๆ นี้ทำให้มีผลตอบสนองในลู่เข้าหาตำแหน่งของจุดเอ็มพีพีที่รวดเร็ว แต่ถ้าค่าการรั้งความนี้มีค่าน้อยจะทำให้เส้นตรงการเลื่อนขยับเลื่อนสลับกันไปมาภายในขอบเขตที่แคบลงหรือมีค่า β น้อย อย่างไรก็ตามการใช้ค่ารั้งความที่มีค่าน้อย ๆ นี้ทำให้มีผลตอบสนองในลู่เข้าหาตำแหน่งของจุดเอ็มพีพีที่ช้าลง

เมื่อความเข้มแสงอาทิตย์หรืออุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงส่งผลทำให้กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีและกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $P_{pv} - ref$ เปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นจุดเอ็มพีพีและจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีที่เป็นจุดสมดุลของระบบจึงมีตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเช่นเดียวกัน แต่อัลกอริทึมพีแอนด์โอยังคงปรับเปลี่ยนค่าคงที่ ref ที่ทำให้เส้นตรงการเลื่อนขยับเลื่อนตำแหน่งใหม่ที่มีจุดตัดกับเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีอยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดเอ็มพีพีอีกครั้งหนึ่ง แผงพีวีจึงมีจุดการทำงานที่เคลื่อนที่ถึงตำแหน่งของจุดเอ็มพีพีและผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด

4.4 สรุป

หน่วยเอ็มพีพีที่ชนิดโหมดการเลื่อนมีเสถียรภาพในการทำงานที่ดี เนื่องจากหน่วยเอ็มพีพีพีนี้ได้บังคับให้แผงพีวีมีจุดการทำงานอยู่ที่ตำแหน่งจุดตัดระหว่างจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวี ซึ่งเป็นจุดสมดุลของระบบที่อยู่ในบริเวณที่มีเสถียรภาพบนระนาบเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวี ซึ่งวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีที่ชนิดโหมดการเลื่อนนั้นได้บังคับให้แผงพีวีมีจุดการทำงานเคลื่อนที่ไปตามเส้นโค้งคุณลักษณะและเคลื่อนที่เข้าหาเส้นตรงการเลื่อน โดยมีทิศทางในการเคลื่อนที่พุ่งเข้าหาเส้นตรงการเลื่อนเมื่อแผงพีวีมีจุดการทำงานอยู่ในบริเวณที่มีเสถียรภาพ และเกิดการเคลื่อนที่พุ่งออกจากเส้นตรงการเลื่อนเมื่อแผงพีวีมีจุดการทำงานอยู่นอกบริเวณดังกล่าว การเคลื่อนที่ในลักษณะดังกล่าวนี้เกิดขึ้นสลับกันไปมาในสถานะชั่วครู่ และเมื่อเข้าสู่สถานะคงตัวแผงพีวีจึงมีจุดการทำงานอยู่ในตำแหน่งจุดตัดระหว่างจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวี ส่วน

อัลกอริทึมพีแอนด์ไอ นั้นมีคุณสมบัติในการลู่เข้าหาจุดเอ็มพีพีที่ดี เนื่องจากแผนการทำงานของ อัลกอริทึมพีแอนด์ไอ นั้นเป็นเงื่อนไขที่ทำให้เกิดการลู่เข้าหาจุดเอ็มพีพี ซึ่งเป็นตำแหน่งจุดสูงสุด ของกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $P_{pv} - ref$ ที่มีความชันของเส้นกราฟเท่ากับศูนย์และมีอัตราการ เปลี่ยนแปลงของความชันของเส้นกราฟน้อยกว่าศูนย์



บทที่ 5

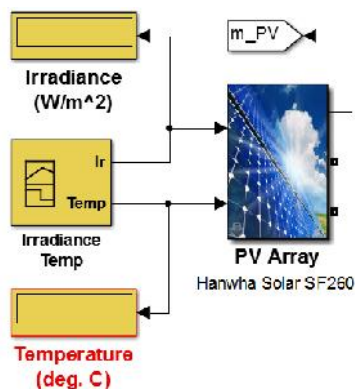
การจำลองสถานการณ์วงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาค เฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน

5.1 บทนำ

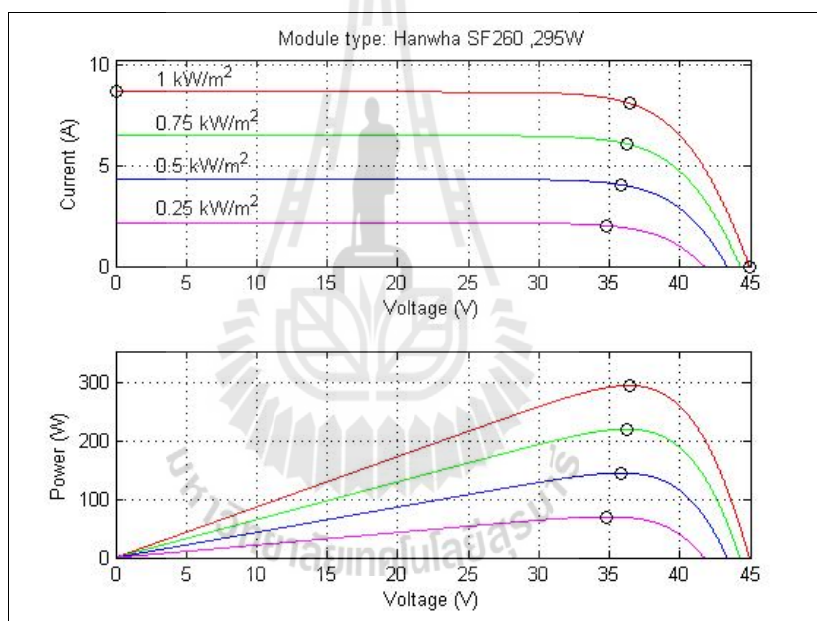
เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายถึงการจำลองสถานการณ์และแสดงผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนด้วยชุดบล็อกระบบไฟฟ้ากำลัง (SimPowerSystem) ของโปรแกรมแมทแลบ (MATLAB) ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรดังกล่าวนี้แสดงถึงสมรรถนะในการติดตามกำลังงานสูงสุดของแผงพีวี การเปลี่ยนแรงดันดีซีไปเป็นแรงดันเอซีของระบบ การจ่ายกระแสไฟฟ้าเอซีและการส่งจ่ายกำลังงานสูงสุดที่ผลิตได้จากแผงพีวีไปยังกริดเอซีเฟสเดียว เนื้อหาในบทนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน กล่าวคือ ระบบย่อยหรือแบบจำลองของแผงพีวีที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนที่ทำหน้าที่ติดตามกำลังงานสูงสุด และการจำลองสถานการณ์วงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน ซึ่งประกอบด้วยวงจรภาคแรกและวงจรภาคที่สอง

5.2 บล็อกแผงพีวี

บล็อกแผงพีวีที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์สร้างขึ้นจากชุดบล็อกระบบไฟฟ้ากำลังในซิมูลิงก์ (Simulink) ของโปรแกรมแมทแลบ โดยได้คัดลอกบล็อกแผงพีวีมาจากแบบจำลองสถานการณ์ตัวอย่าง (Simulink example) และนำมาแก้ไขเพิ่มเติมพารามิเตอร์ใหม่เพื่อสร้างบล็อกแผงพีวีที่มีคุณลักษณะทางไฟฟ้าใกล้เคียงกับแผงพีวี Hanwha Solar รุ่น SF260, 295 W ที่ใช้งานจริงสำหรับการจำลองสถานการณ์ในงานวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งได้แสดงรายละเอียดวิธีการสร้างบล็อกแผงพีวีดังกล่าวในภาคผนวก ก.3 บล็อกแผงพีวี Hanwha Solar รุ่น SF260, 295 W ที่แสดงได้ในรูปที่ 5.1 มีกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ และกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $P-v$ ของแผงพีวีที่แสดงในรูปที่ 5.2 และมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าหรือข้อมูลจุดเอ็มพีพีของแผงพีวีที่แสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งข้อมูลจุดเอ็มพีพี (I_{mp} , V_{mp}) ดังกล่าวนี้มีค่าที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจุดเอ็มพีพีของแผงพีวีที่ใช้งานจริงโดยแตกต่างกันเล็กน้อย ดังนั้นในการจำลองสถานการณ์จึงได้พิจารณาเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์กับข้อมูลจุดเอ็มพีพีของบล็อกแผงพีวีที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แทนแผงพีวีจริง



รูปที่ 5.1 บล็อกแผงฟิวิ Hanwha Solar รุ่น SF260, 295 W ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์



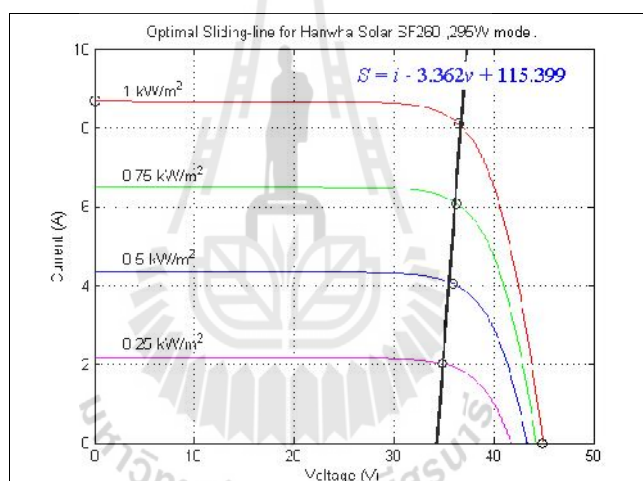
รูปที่ 5.2 กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ 4 เส้นของบล็อกแผงฟิวิ Hanwha Solar รุ่น SF260, 295 W

ตารางที่ 5.1 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของบล็อกแผงฟิวิ Hanwha Solar SF260, 295 W ที่อุณหภูมิ 25 °C

ระดับความเข้มแสงอาทิตย์ (kW/m ²)		1.00	0.75	0.50	0.25
I_{sc}	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (A)	8.67	6.50	4.33	2.17
V_{oc}	แรงดันเปิดวงจร (V)	44.90	44.26	43.32	41.71
I_{mp}	กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (A)	8.11	6.08	4.06	2.02
V_{mp}	แรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (V)	36.42	36.26	35.84	34.80
P_{mp}	กำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (W)	295	220	145	70

การศึกษานี้ได้พิจารณาหาเส้นตรงการเลื่อนที่ดีที่สุด ($S = 0$) ของบล็อกแผงพีวี Hanwha Solar รุ่น SF260, 295 W จากกราฟเส้นโค้งโวลต์แอมป์ลักษณะ $i - v$ 4 เส้น ($n = 4$) ซึ่งได้ใช้ชุดข้อมูลจุดเอ็มพีพี (I_{mp}, V_{mp}) 4 จุดที่แสดงในตารางที่ 5.1 นำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของเส้นตรงการเลื่อนที่ดีที่สุดด้วยวิธีการประมาณค่าเชิงเส้นแบบกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งได้เส้นตรงการเลื่อนที่ดีที่สุดที่ประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ $a = 1$ $b = 3.362$ และ $ref = 115.399$ แสดงได้ดังสมการที่ (5.1) เส้นตรงการเลื่อนนี้คือ เส้นตรง $i = 3.362v - 115.399$ ที่มีจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนและเส้น โวลต์แอมป์ลักษณะ $i - v$ ใกล้เคียงกับตำแหน่งของจุดเอ็มพีพีของบล็อกแผงพีวีทั้ง 4 ระดับของความเข้มแสงอาทิตย์ ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5.3

$$S = i - 3.362v + 115.399 = 0 \quad (5.1)$$



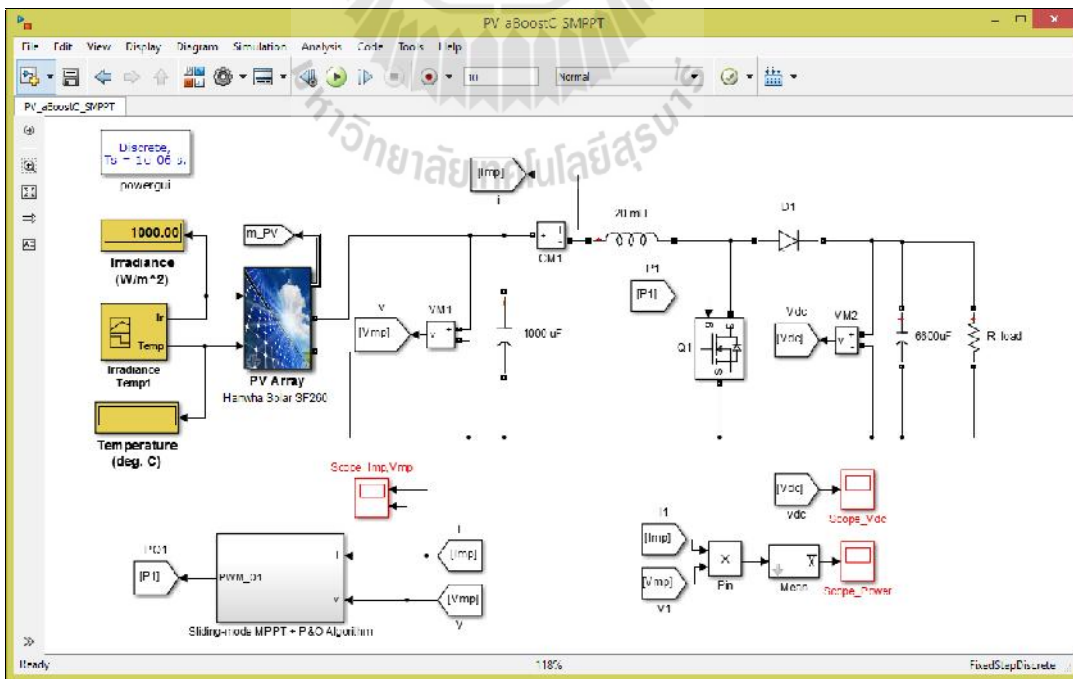
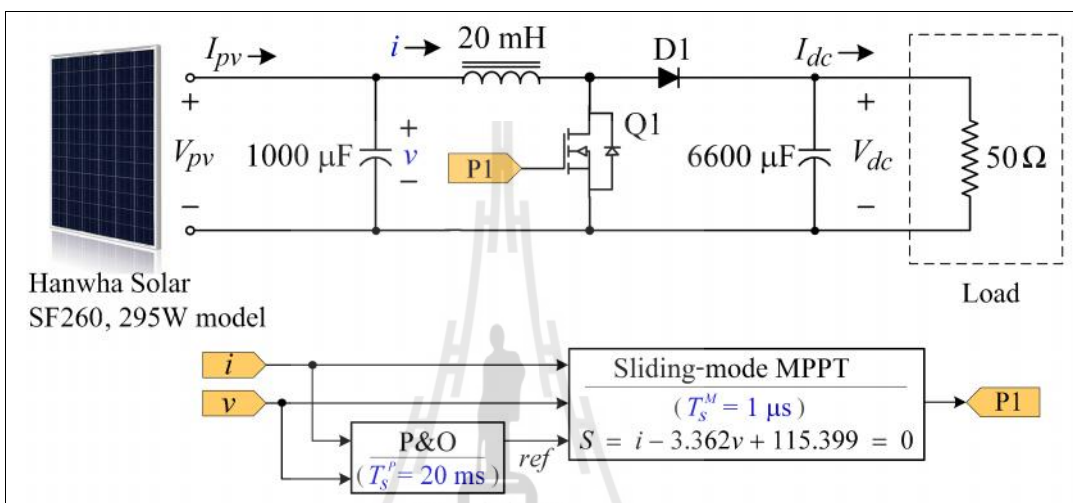
รูปที่ 5.3 เส้นตรงการเลื่อนที่ดีที่สุดบนระนาบ $i-v$ ของบล็อกแผงพีวี Hanwha Solar SF260, 295 W

5.3 การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีที่ชนิดโหมดการเลื่อน

วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีที่ชนิดโหมดการเลื่อนและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แสดงในรูปที่ 5.4 (ก) ประกอบด้วยบล็อกแผงพีวี ระบบย่อยของวงจรแปลงและหน่วยเอ็มพีพีที่ชนิดโหมดการเลื่อน โดยมีด้านอินพุตของวงจรเชื่อมต่อกับบล็อกแผงพีวีและมีด้านเอาต์พุตของวงจรเชื่อมต่อกับโหลดตัวต้านทาน การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีที่ชนิดโหมดการเลื่อนด้วยชุดซิมมูลิงค์ของโปรแกรมแมทแลบแสดงได้ในรูปที่ 5.4 (ข) ซึ่งได้แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับการจำลองสถานการณ์นี้ในภาคผนวก จ.1 โดยการ

จำลองสถานการณ์นี้มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แสดงได้ตามตารางที่ 5.2 โดยได้ศึกษาและทำการจำลองสถานการณ์แบ่ง 3 กรณีตามเงื่อนไขของความเข้มแสงอาทิตย์ดังนี้

- กรณีที่ 1 ความเข้มแสงอาทิตย์มีระดับคงที่ (constant insolation)
- กรณีที่ 2 ความเข้มแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงระดับแบบขั้นบันได (step insolation)
- กรณีที่ 3 ความเข้มแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงระดับแบบลาดเอียง (ramp insolation)



รูปที่ 5.4 การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน

(ก) วงจรแปลงผันบูสต์ หน่วยเอ็มพีพีที และพารามิเตอร์ต่าง ๆ

(ข) แบบจำลองสถานการณ์ ระบบย่อยและส่วนประกอบต่าง ๆ

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันบูสต์และหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

ส่วนประกอบหรือระบบย่อย	พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
1.) บล็อกแผงพีวี		รูปที่ 5.2
2.) ตัวเก็บประจุด้านอินพุต	C_{in}	1000 μ F
3.) ตัวเก็บประจุดีซี	C_{dc}	6600 μ F
4.) ตัวเหนี่ยวนำ	L	20 mH
5.) เส้นตรงการเลื่อนที่ดีที่สุด	a	1
	b	3.362
	ref	115.399
6.) ความกว้างหรือค่าขอบเขตของฮิสเตอร์ซิส	Δ	0.0125
7.) ค่าการรั้งความหรือตัวปรับจูนขั้นที่ใช้ปรับเปลี่ยนค่าคงที่ ref	M_{step}	0.25
8.) ค่าคงที่ dir	dir	1
9.) โหลดตัวต้านทาน	R_{load}	50 Ω
10.) คาบเวลาการสุ่มของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน	T_S^M	1 μ s
11.) คาบเวลาการสุ่มของอัลกอริทึมพีแอนด์โอ	T_S^P	20 ms

5.3.1 กรณีที่ 1 ความเข้มแสงอาทิตย์มีระดับคงที่

ในกรณีนี้ได้จำลองสถานการณ์โดยพิจารณาเงื่อนไขที่แผงพีวีได้รับความเข้มแสงอาทิตย์ในระดับคงที่แตกต่างกัน 4 ระดับคือ 1.00 kW/m² 0.75 kW/m² 0.50 kW/m² และ 0.25 kW/m² ภายใต้อุณหภูมิคงที่ 25 °C และกำหนดให้โหลดตัวต้านทานที่เชื่อมต่อด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันบูสต์ (R_{load}) เท่ากับ 50 Ω ซึ่งในการจำลองสถานการณ์พบว่า วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนนั้นสามารถบังคับให้บล็อกแผงพีวีสร้างแรงดันและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ติดตามแรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (V_{mp}) และกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp}) ของบล็อกแผงพีวีได้ภายในช่วงระยะเวลาสั้นมากโดยไม่เกิน 160 ms ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5.5 ถึงรูปที่ 5.8 ตามลำดับของความเข้มแสงอาทิตย์ ผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวนี้ได้แสดงถึงสมรรถนะของการติดตามกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ถูกต้องและรวดเร็วของวงจรแปลง

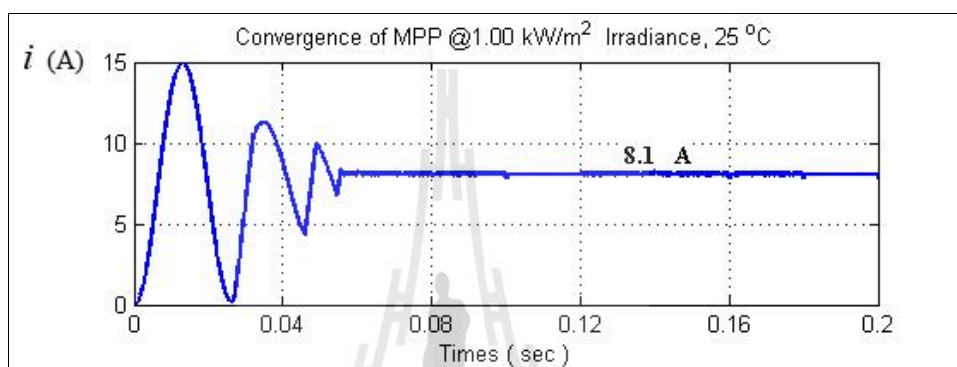
ผันบุสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื้อนภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีระดับความเข้มแสงอาทิตย์คงที่ได้เป็นอย่างดี โดยกระแสไฟฟ้าอินพุตที่ไหลเข้าวงจรแปลงผันบุสต์ (i) ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L นั้นเกิดการแกว่งสั้นในสถานะชั่วคราว และลดลงจนกระทั่งมีค่าคงที่ค่าหนึ่งเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp}) ของบล็อกแผงพีวีในสถานะคงตัว ซึ่งแสดงได้ในกราฟรูป (ก) ของรูปที่ 5.5 ถึงรูปที่ 5.8 ขณะที่แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบุสต์ (v) ซึ่งเป็นแรงดันของแผงพีวีที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุด้านอินพุตของวงจรแปลงผันบุสต์นั้นเกิดการแกว่งสั้นในสถานะชั่วคราว และลดลงจนกระทั่งมีค่าคงที่ค่าหนึ่งเท่ากับแรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (V_{mp}) ของบล็อกแผงพีวีในสถานะคงตัว ซึ่งแสดงได้ในกราฟรูป (ข) ของรูปที่ 5.5 ถึงรูปที่ 5.8 ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งบล็อกแผงพีวีจะมีจุดการทำงานเคลื่อนที่ถึงจุดเอ็มพีพี และส่งผลทำให้บล็อกแผงพีวีนั้นสร้างแรงดันและจ่ายกระแสไฟฟ้าได้เท่ากับ V_{mp} และ I_{mp} ของบล็อกแผงพีวีตลอดเวลาในสถานะคงตัว โดยสามารถพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์ตามเงื่อนไขของระดับความเข้มแสงอาทิตย์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

1.) กรณีที่ความเข้มแสงอาทิตย์มีระดับคงที่ 1.00 kW/m^2 ในสถานะคงตัววงจรแปลงผันบุสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื้อนนั้นสามารถบังคับให้บล็อกแผงพีวีสร้างแรงดัน (v) และจ่ายกระแสไฟฟ้า (i) ได้เท่ากับ 36.4 V และ 8.1 A ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับแรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดของบล็อกแผงพีวีในตารางที่ 5.1 หรือมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ 36.42 V และ 8.11 A ตามลำดับ ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5.5 ดังนั้นบล็อกแผงพีวีจึงผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ $(36.4)(8.1) \approx 295 \text{ W}$

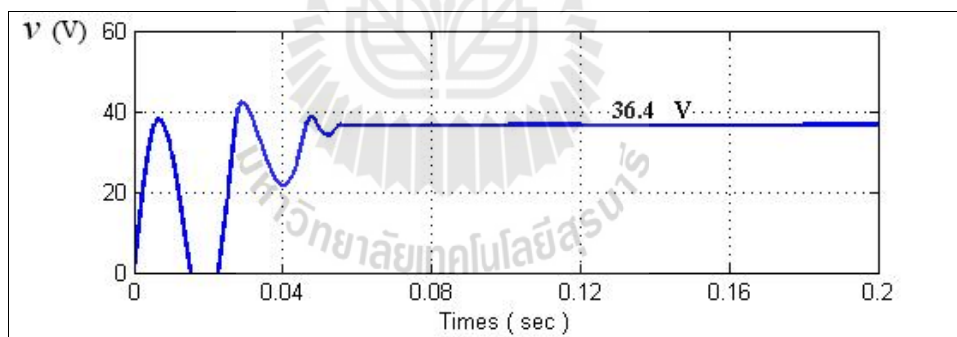
2.) กรณีที่ความเข้มแสงอาทิตย์มีระดับคงที่ 0.75 kW/m^2 ในสถานะคงตัววงจรแปลงผันบุสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื้อนนั้นสามารถบังคับให้บล็อกแผงพีวีสร้างแรงดัน (v) และจ่ายกระแสไฟฟ้า (i) ได้เท่ากับ 36.2 V และ 6.0 A ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับแรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดของบล็อกแผงพีวีในตารางที่ 5.1 หรือมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ 36.26 V และ 6.08 A ตามลำดับ ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5.6 ดังนั้นบล็อกแผงพีวีจึงผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ $(36.2)(6.0) \approx 220 \text{ W}$

3.) กรณีที่ความเข้มแสงอาทิตย์มีระดับคงที่ 0.50 kW/m^2 ในสถานะคงตัววงจรแปลงผันบุสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื้อนนั้นสามารถบังคับให้บล็อกแผงพีวีสร้างแรงดัน (v) และจ่ายกระแสไฟฟ้า (i) ได้เท่ากับ 35.8 V และ 4.0 A ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับแรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดของบล็อกแผงพีวีในตารางที่ 5.1 ($V_{mp} = 35.84 \text{ V}$ และ $I_{mp} = 4.06 \text{ A}$) ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5.7 ดังนั้นบล็อกแผงพีวีจึงผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ $(35.8)(4.0) \approx 145 \text{ W}$

4.) กรณีที่ความเข้มแสงอาทิตย์มีระดับคงที่ 0.25 kW/m^2 ในสถานะคงตัววงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลือนั้นสามารถบังคับให้บล็อกแผงพีวีสร้างแรงดัน (v) และจ่ายกระแสไฟฟ้า (i) ได้เท่ากับ 34.8 V และ 2.0 A ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับแรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดของบล็อกแผงพีวีในตารางที่ 5.1 ($V_{mp} = 34.80 \text{ V}$ และ $I_{mp} = 2.02 \text{ A}$) ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5.8 ดังนั้นบล็อกแผงพีวีจึงผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ $(34.8)(2.0) \approx 70 \text{ W}$



(ก)

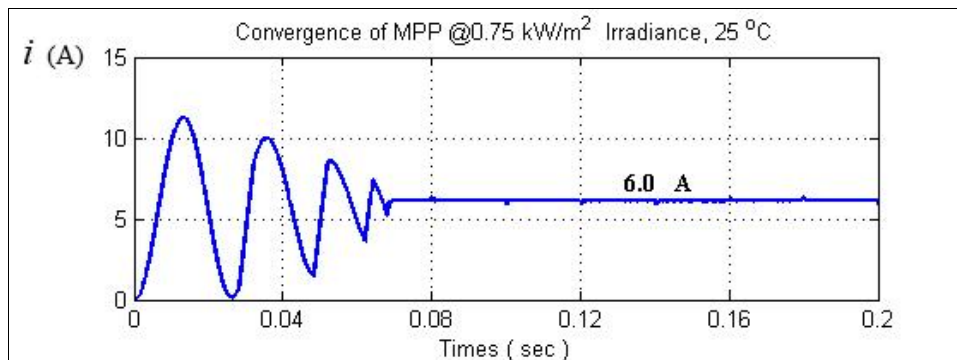


(ข)

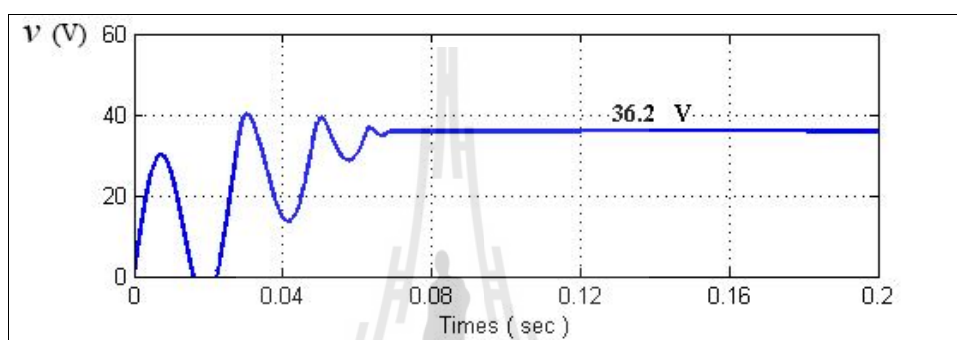
รูปที่ 5.5 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความเข้มแสงอาทิตย์คงที่ 1.00 kW/m^2 และอุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$

(ก) กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือกระแสไฟฟ้าของบล็อกแผงพีวี

(ข) แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือแรงดันของบล็อกแผงพีวี



(ก)

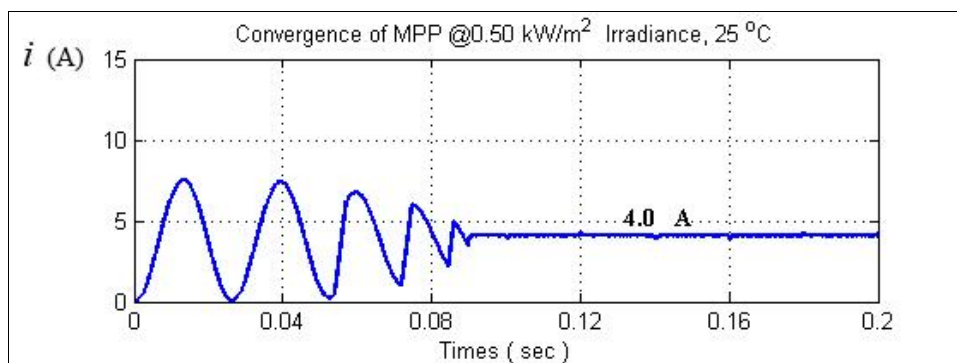


(ข)

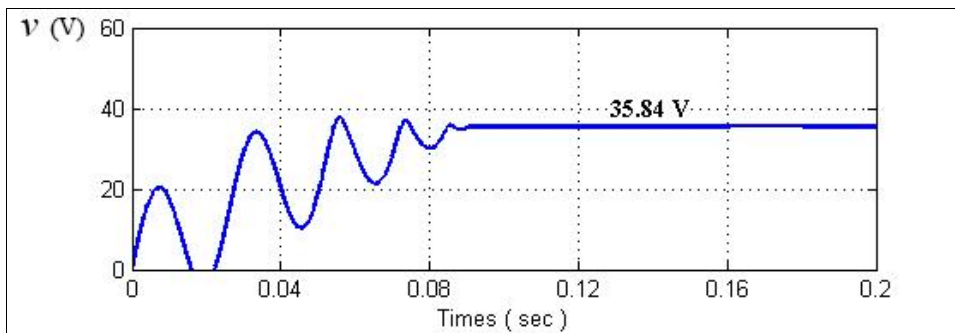
รูปที่ 5.6 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความเข้มแสงอาทิตย์คงที่ 0.75 kW/m^2 และอุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$

(ก) กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือกระแสไฟฟ้าของบล็อกแผงพีวี

(ข) แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือแรงดันของบล็อกแผงพีวี



(ค)

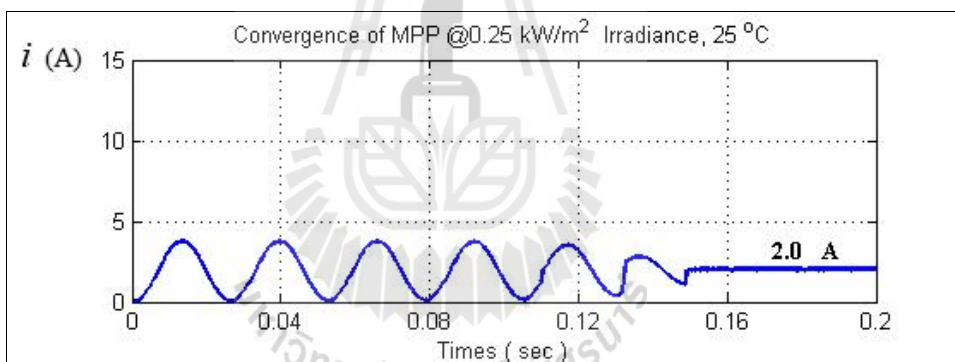


(ข)

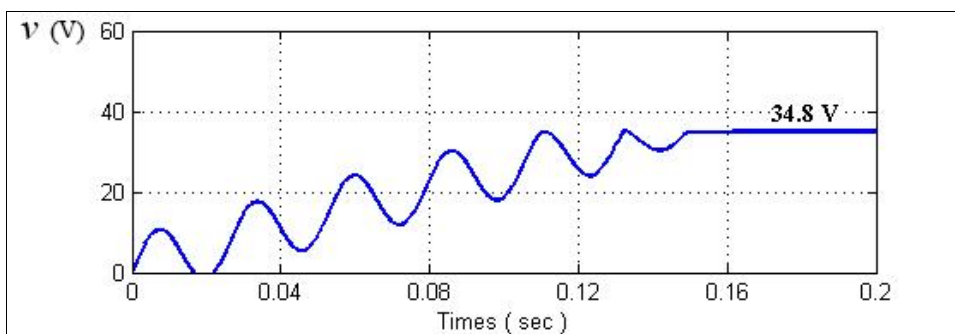
รูปที่ 5.7 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความเข้มแสงอาทิตย์คงที่ 0.50 kW/m^2 และอุณหภูมิ 25°C

(ก) กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือกระแสไฟฟ้าของบล็อกแผงพีวี

(ข) แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือแรงดันของบล็อกแผงพีวี



(ก)



(ข)

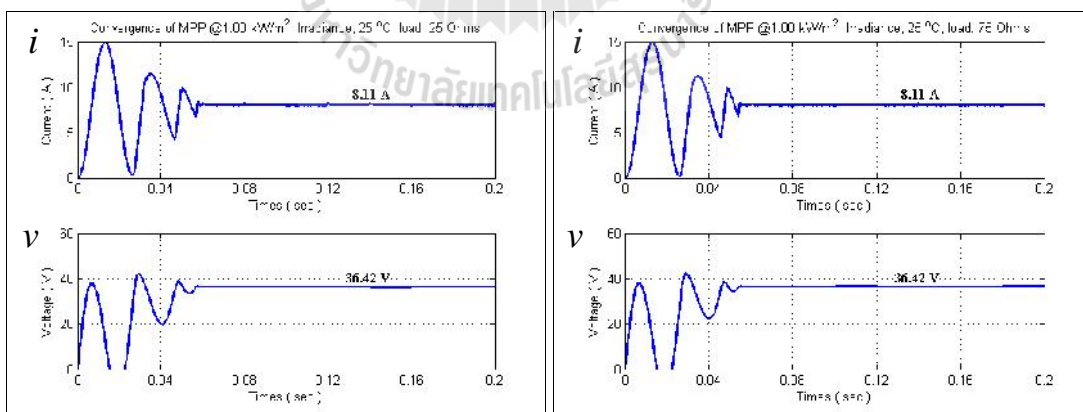
รูปที่ 5.8 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีภายใต้สภาพแวดล้อม

ที่มีความเข้มแสงอาทิตย์คงที่ 0.25 kW/m^2 และอุณหภูมิ 25°C

(ก) กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือกระแสไฟฟ้าของบล็อกแผงพีวี

(ข) แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือแรงดันของบล็อกแผงพีวี

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดตัวต้านทานที่เชื่อมต่อด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันบูสต์ (R_{load}) เท่ากับ 25Ω และ 75Ω ตามลำดับ และได้จำลองสถานการณ์โดยกำหนดให้บล็อกแผงพีวีได้รับความเข้มแสงอาทิตย์ในระดับคงที่ 1.00 kW/m^2 ภายใต้อุณหภูมิกงที่ 25° จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่า วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนนั้นได้บังคับให้บล็อกแผงพีวีสร้างแรงดันและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ติดตามแรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (V_{mp}) และกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp}) ได้ภายในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5.9 (ก) และ (ข) ตามลำดับของค่าโหลดตัวต้านทาน โดยที่รูปบนและรูปล่างนั้นแสดงถึงกระแสไฟฟ้าและแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวนี้ได้แสดงถึงสมรรถนะของการติดตามกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนได้เป็นอย่างดี เนื่องจากในกรณีที่วงจรแปลงผันบูสต์เชื่อมต่อกับโหลดตัวต้านทานที่มีค่าแตกต่างกัน วงจรดังกล่าวยังคงสามารถบังคับให้บล็อกแผงพีวีมีจุดการทำงานอยู่ในตำแหน่งจุดเอ็มพีพีได้อย่างถูกต้องและรวดเร็วได้เช่นเดียวกัน ซึ่งมีช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการติดตามกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละค่าโหลดตัวต้านทานแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย



(ก)

(ข)

รูปที่ 5.9 กระแสไฟฟ้าและแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีเมื่อเชื่อมต่อกับโหลดตัวต้านทานแตกต่างกันที่ความเข้มแสงอาทิตย์คงที่ 1.00 kW/m^2

(ก) โหลดตัวต้านทาน 25Ω

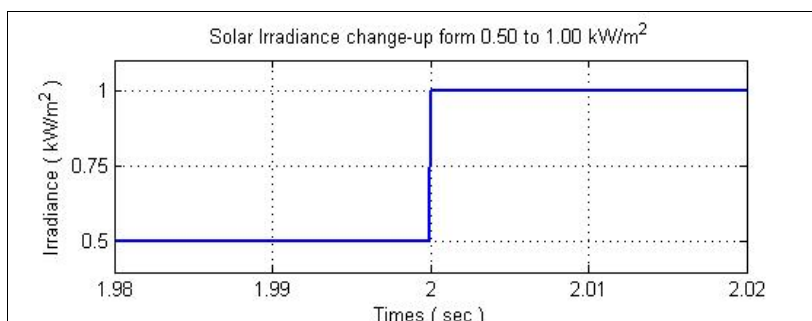
(ข) โหลดตัวต้านทาน 75Ω

5.3.2 กรณีที่ 2 ความเข้มแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงระดับแบบขั้นบันได

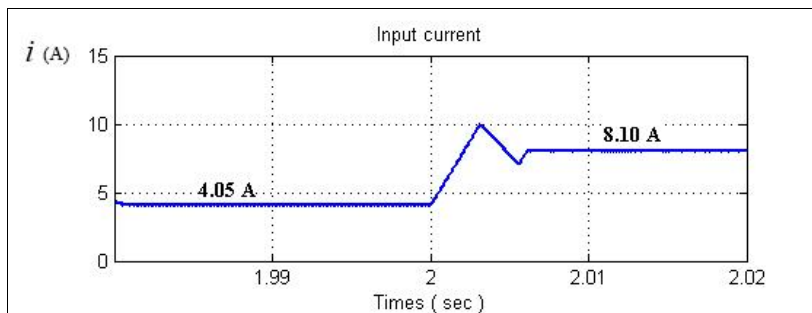
ในกรณีนี้ได้จำลองสถานการณ์โดยพิจารณาเงื่อนไขที่แผงพีวีได้รับความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับอย่างฉับพลันแบบขั้นบันไดภายใต้อุณหภูมิคงที่ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยกำหนดให้โหลดตัวต้านทานที่เชื่อมต่อด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันบูสต์ (R_{load}) เท่ากับ $50\ \Omega$ และกำหนดให้ความเข้มแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงระดับดังนี้

- 1.) ความเข้มแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงระดับเพิ่มขึ้นจาก $0.50\ \text{kW/m}^2$ ไปยังระดับ $1.00\ \text{kW/m}^2$ อย่างฉับพลันที่เวลา $2\ \text{s}$ (step-up insolation)
- 2.) ความเข้มแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงระดับลดลงจาก $1.00\ \text{kW/m}^2$ ไปยังระดับ $0.50\ \text{kW/m}^2$ อย่างฉับพลันที่เวลา $2\ \text{s}$ (step-down insolation)

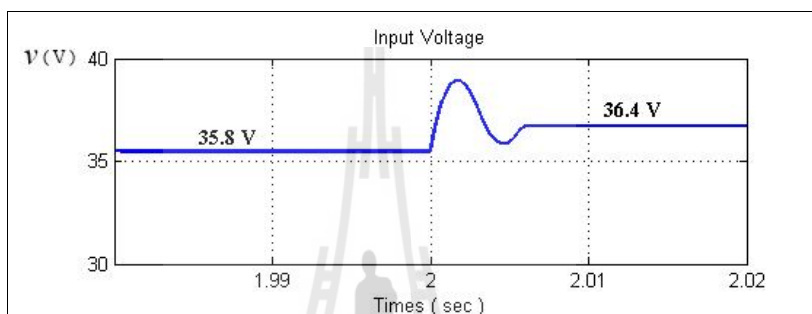
ในขณะที่ความเข้มแสงอาทิตย์มีระดับ $0.50\ \text{kW/m}^2$ คงที่ บล็อกแผงพีวีได้สร้างแรงดัน (v) และจ่ายกระแสไฟฟ้า (i) ที่มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดในตารางที่ 5.1 นั่นคือมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ $35.84\ \text{V}$ และ $4.06\ \text{A}$ ตามลำดับ ต่อมาที่เวลา $2\ \text{s}$ ความเข้มแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงระดับเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันแบบขั้นบันไดไปยังระดับ $1.00\ \text{kW/m}^2$ ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.10 (ก) วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนนั้นได้บังคับให้บล็อกแผงพีวีสร้างแรงดันและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีการพุ่งเกิน (overshoot) และพุ่งต่ำ (undershoot) ในสถานะชั่วคราวภายในช่วงระยะเวลาที่สั้นมากไม่เกิน $10\ \text{ms}$ หลังจากนั้นเมื่อเข้าสู่สถานะคงตัวบล็อกแผงพีวีได้สร้างแรงดัน (v) และจ่ายกระแสไฟฟ้า (i) ที่มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดในตารางที่ 5.1 นั่นคือมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ $36.42\ \text{V}$ และ $8.11\ \text{A}$ ตามลำดับ ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.10 (ข) และ (ค) ตามลำดับ



(ก)



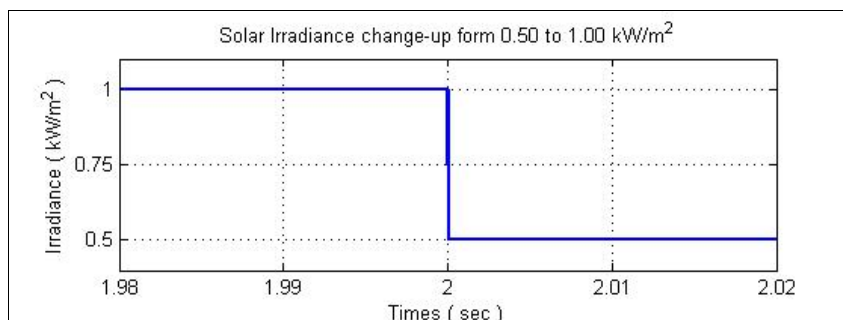
(จ)



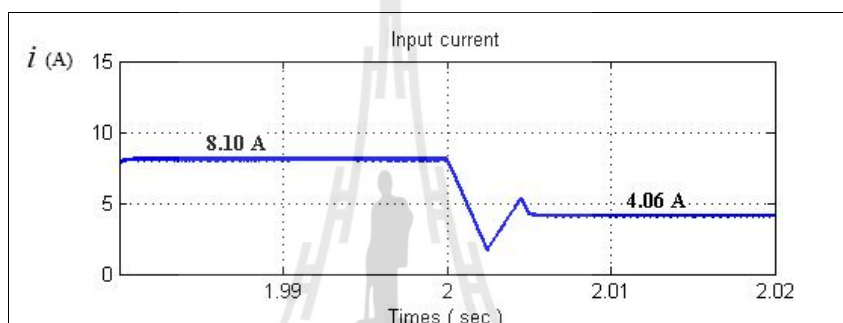
(ค)

- รูปที่ 5.10 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นแบบขั้นบันได
- (ก) การเพิ่มขึ้นแบบขั้นบันไดของระดับความเข้มแสงอาทิตย์ที่เวลา 2 s
- (ข) กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือกระแสไฟฟ้าของบล็อกแผงพีวี
- (ค) แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือแรงดันของบล็อกแผงพีวี

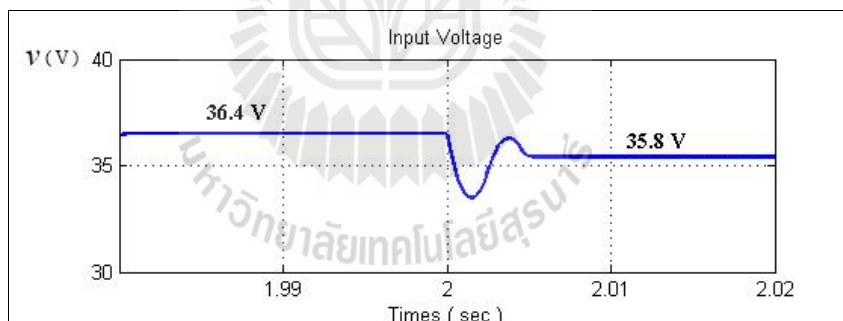
ในขณะที่ความเข้มแสงอาทิตย์มีระดับ 1.00 kW/m^2 คงที่ บล็อกแผงพีวีได้สร้างแรงดัน (v) และจ่ายกระแสไฟฟ้า (i) ที่มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดในตารางที่ 5.1 นั่นคือมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ 36.42 V และ 8.11 A ตามลำดับ ต่อมาที่เวลา 2 s ความเข้มแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงระดับลดลงอย่างฉับพลันแบบขั้นบันไดไปยังระดับ 0.50 kW/m^2 ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.11 (ก) วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนนั้นได้บังคับให้บล็อกแผงพีวีสร้างแรงดันและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีการพุ่งเกินและพุ่งต่ำในสถานะชั่วคราวภายในช่วงระยะเวลาที่สั้นมากไม่เกิน 10 ms หลังจากนั้นเมื่อเข้าสู่สถานะคงตัว บล็อกแผงพีวีได้สร้างแรงดัน (v) และจ่ายกระแสไฟฟ้า (i) ที่มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดในตารางที่ 5.1 นั่นคือมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ 35.84 V และ 4.06 A ตามลำดับ ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.11 (ข) และ (ค) ตามลำดับ



(ก)



(ข)



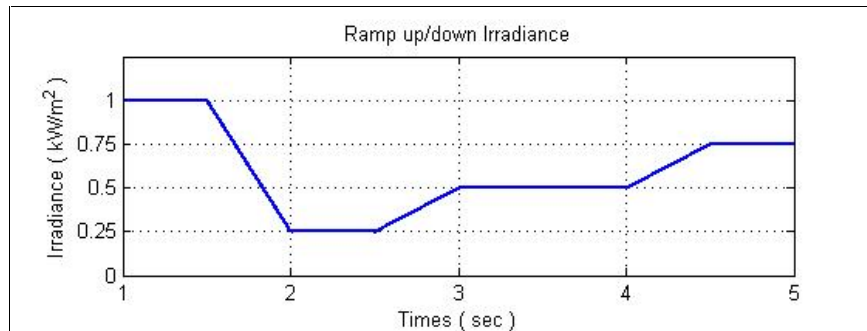
(ค)

- รูปที่ 5.11 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์ลดแบบขั้นบันได
- (ก) การลดแบบขั้นบันไดของระดับความเข้มแสงอาทิตย์ที่เวลา 2 s
 - (ข) กระแสไฟฟ้ายินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือกระแสไฟฟ้าของบล็อกแผงฟิวิ
 - (ค) แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือแรงดันของบล็อกแผงฟิวิ

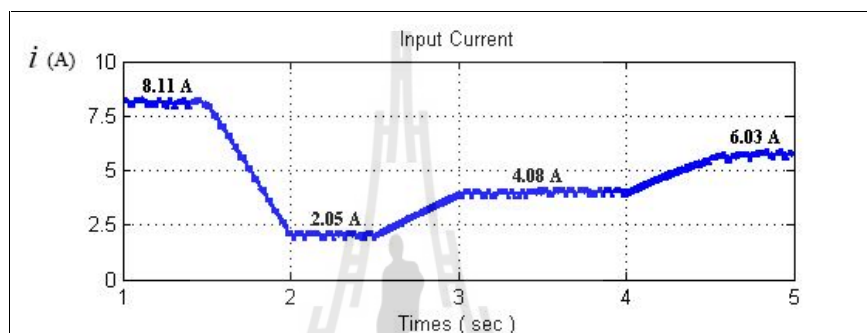
ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.10 และ 5.11 ได้แสดงถึงสมรรถนะในการติดตามกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนได้เป็นอย่างดี เนื่องจากในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างฉับพลันแบบขั้นบันได วงจรดังกล่าวยังคงสามารถบังคับให้บล็อกแมงพีวีมีจุดการทำงานเคลื่อนที่ถึงจุดเอ็มพีพีในตำแหน่งใหม่ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ดังนั้นบล็อกแมงพีวีจึงสร้างแรงดันและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ติดตามแรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (V_{mp}) และกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp}) ได้ตามลำดับ ซึ่งส่งผลทำให้บล็อกแมงพีวีผลิตสามารถกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดตลอดเวลา

5.3.3 กรณีที่ 3 ความเข้มแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงระดับแบบลาดเอียง

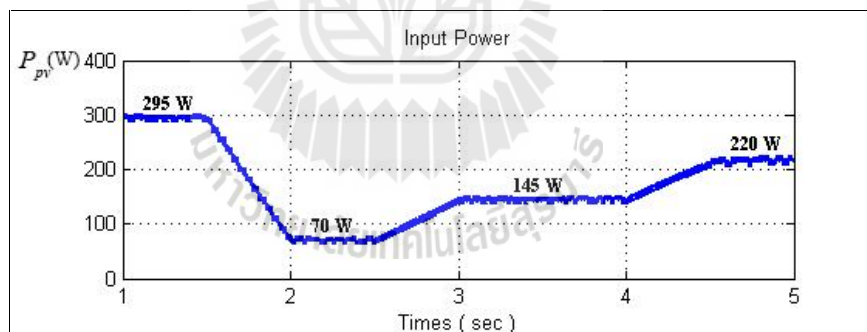
ในกรณีนี้ได้จำลองสถานการณ์โดยพิจารณาเงื่อนไขที่แมงพีวีได้รับความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับลดลงและเพิ่มขึ้นแบบลาดเอียงซึ่งแสดงในรูปที่ 5.12 (ก) ภายใต้อุณหภูมิคงที่ 25°C โดยกำหนดให้โหลดตัวต้านทานที่เชื่อมต่อด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันบูสต์ (R_{load}) เท่ากับ $50\ \Omega$ ในกรณีดังกล่าวนี้วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนได้บังคับให้บล็อกแมงพีวีจ่ายกระแสไฟฟ้าและผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้ลดลงและเพิ่มขึ้นแบบลาดเอียงในลักษณะเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงอาทิตย์ ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5.12 (ข) และ (ค) ตามลำดับ โดยบล็อกแมงพีวีได้จ่ายกระแสไฟฟ้าและผลิตกำลังงานไฟฟ้าที่มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp}) และกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (P_{mp}) ของบล็อกแมงพีวีในสถานะคงตัวซึ่งแสดงในตารางที่ 5.1 จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวนี้ได้แสดงถึงสมรรถนะในการติดตามกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนได้อย่างถูกต้องและต่อเนื่อง การเปลี่ยนแปลงขึ้นลงหรือความไม่ราบเรียบของสัญญาณกำลังงานไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแมงพีวีที่ปรากฏเห็นในผลการจำลองสถานการณ์นั้น เกิดขึ้นตามจุดการทำงานของบล็อกแมงพีวีที่เปลี่ยนแปลงตามการขยับเลื่อนของเส้นตรงการเลื่อนซึ่งมีผลมาจากการทำงานของอัลกอริทึมพีแอนด์โอในทุก ๆ เวลา $20\ \text{ms}$ ($T_s^P = 20\ \text{ms}$) เพื่อปรับเปลี่ยนค่าคงที่ ref ของเส้นตรงการเลื่อน



(ก)



(ข)



(ค)

- รูปที่ 5.12 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์ลดลงและเพิ่มขึ้นแบบลาดเอียง
- (ก) การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์ลดลงและเพิ่มขึ้นแบบลาดเอียง
 - (ข) กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือกระแสไฟฟ้าของบล็อกรวมพีวี
 - (ค) กำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ผลิตได้จากบล็อกรวมพีวี

ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนในทั้ง 3 กรณีนี้ได้แสดงถึงสมรรถนะในการติดตามกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดของบล็อกรวมพีวีที่ถูกต้อง

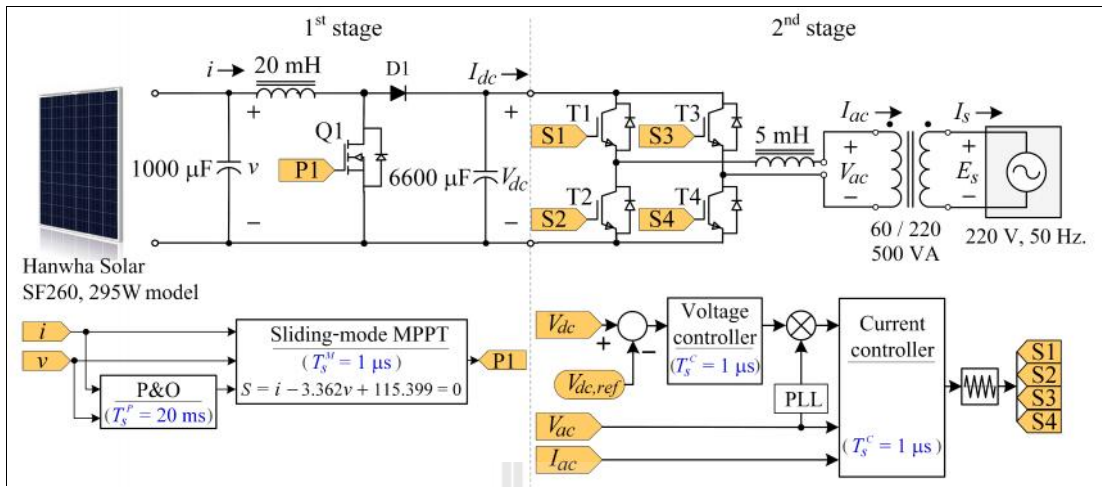
และรวดเร็ว โดยเมื่อบล็อกแผงพีวีได้รับความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีระดับคงที่ วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนนั้นสามารถบังคับให้บล็อกแผงพีวีมีจุดการทำงานเคลื่อนที่ถึงจุดเอ็มพีพีทีตลอดเวลา แต่เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับของความเข้มแสงอาทิตย์ในลักษณะแบบขั้นบันไดหรือแบบลาดเอียง วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนนั้นยังคงสามารถบังคับให้บล็อกแผงพีวีมีจุดการทำงานอยู่ในจุดเอ็มพีพีทีตำแหน่งใหม่ได้อย่างรวดเร็วหรือค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของระดับความเข้มแสงอาทิตย์ ดังนั้นบล็อกแผงพีวีจึงมีจุดการทำงานเคลื่อนที่และติดตามจุดเอ็มพีพีทีได้อย่างถูกต้องภายในช่วงระยะเวลาที่สั้นมากในสถานะชั่วคราว และเมื่อเข้าสู่สถานะคงตัวบล็อกแผงพีวีจึงสามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดตลอดเวลาภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นในขณะนั้น

5.4 การจำลองสถานการณ์วงจรอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน

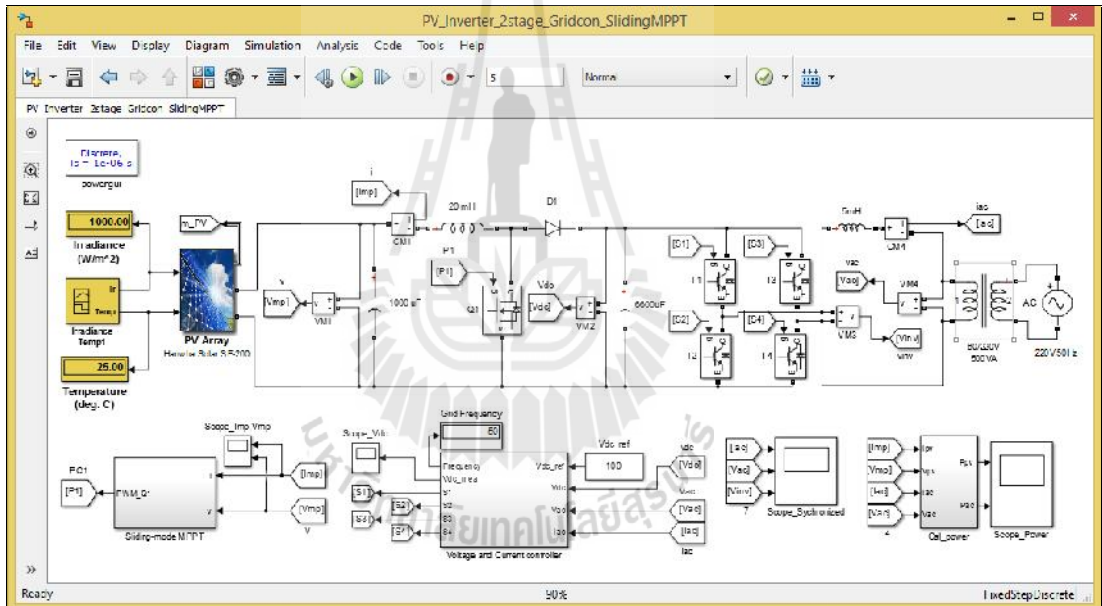
วงจรอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แสดงในรูปที่ 5.13 (ก) ประกอบด้วยระบบย่อยของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนและวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวเชื่อมต่อกัน โดยมีด้านอินพุตของวงจรเชื่อมต่อกับบล็อกแผงพีวีและมีด้านเอาต์พุตของวงจรเชื่อมต่อกับหม้อแปลงและกริดเอซีเฟสเดียว 220 V 50 Hz ตามลำดับ การจำลองสถานการณ์วงจรอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนด้วยชุดซิมมูลิงค์ของโปรแกรมเมทแลบแสดงได้ในรูปที่ 5.13 (ข) ซึ่งได้แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับการจำลองสถานการณ์นี้ในภาคผนวก ฉ.2 ซึ่งการจำลองสถานการณ์ของวงรดังกล่าวนี้มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แสดงได้ตามตารางที่ 5.3 โดยได้ศึกษาและทำการจำลองสถานการณ์แบ่ง 2 กรณีตามเงื่อนไขของความเข้มแสงอาทิตย์ดังนี้

กรณีที่ 1 ความเข้มแสงอาทิตย์มีระดับคงที่ (constant insolation)

กรณีที่ 2 ความเข้มแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงระดับแบบขั้นบันได (step insolation)



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.13 การจำลองสถานการณ์วงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน

(ก) วงจรภาคแรก วงจรภาคที่สอง และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

(ข) แบบจำลองสถานการณ์ ระบบย่อยและส่วนประกอบต่าง ๆ ของวงจรทั้ง 2 ภาค

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนที่ใช้จำลองสถานการณ์

วงจรแปลงผันบุสต์และหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน	พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
1.) บล็อกแผงพีวี		รูปที่ 5.2
2.) ตัวเก็บประจุด้านอินพุต	C_{in}	1000 μ F
3.) ตัวเหนี่ยวนำ (ดีซี)	L	20 mH
4.) ตัวเก็บประจุดีซี	C_{dc}	6600 μ F
5.) เส้นตรงการเลื่อนที่ดีที่สุด	a	1
	b	3.362
	ref	115.399
6.) ความกว้างหรือค่าขอบเขตของฮิสเตอร์ซิส	Δ	0.0125
7.) ค่าการรั้งความหรือตัวปรับคูณขั้นที่ใช้ปรับเปลี่ยนค่าคงที่ ref	M_{step}	0.25
8.) ค่าคงที่ dir	dir	1
9.) คาบระยะเวลาการสุ่มของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน	T_S^M	1 μ s
10.) คาบระยะเวลาการสุ่มของอัลกอริทึมพีแอนด์โอ	T_S^P	20 ms
วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว	พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
1.) ตัวเหนี่ยวนำเอซี	L_f	5 mH
2.) แรงดันดีซีอ้างอิงหรือจุดปรับตั้ง	$V_{dc, ref}$	100 V
3.) อัตราขยายสัดส่วนของตัวควบคุมแรงดันดีซี	K_{Pv}	0.75
4.) อัตราขยายปริพันธ์ของตัวควบคุมแรงดันดีซี	K_{Iv}	0.375
5.) อัตราขยายสัดส่วนของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด	K_{Pi}	100
6.) อัตราขยายปริพันธ์ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด	K_{Ii}	1
7.) กริดเอซีเฟสเดียว	E_S	220 V _{rms}
8.) คาบระยะเวลาการสุ่มของระบบควบคุมป้อนกลับ	T_S^C	1 μ s

5.4.1 กรณีที่ 1 ความเข้มแสงอาทิตย์มีระดับคงที่

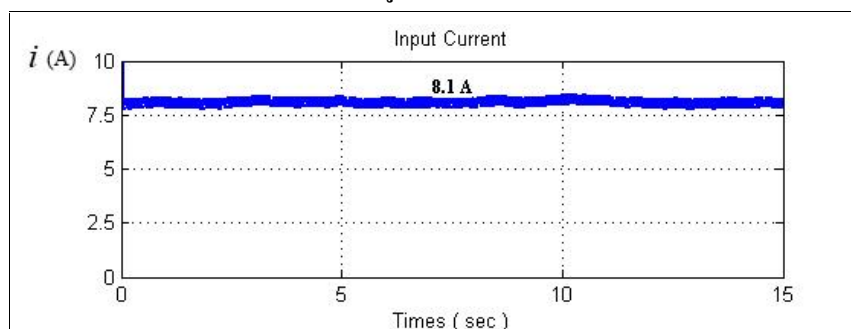
ในกรณีนี้ได้จำลองสถานการณ์โดยพิจารณาเงื่อนไขที่แผงพีวีได้รับความเข้มแสงอาทิตย์ในระดับคงที่ 1.00 kW/m² ภายใต้อุณหภูมิคงที่ 25 °C และกำหนดให้กริดเอซีสร้างสัญญาณแรงดันไซน์ชอยด์ที่มีความถี่ 50 Hz แยกต่างหากดังนี้

$$1.) \text{ แรงดันกริดเอซีที่มีมุมเฟส } 0 \text{ องศา หรือ } E_S = 220\sqrt{2} \sin(100\pi t)$$

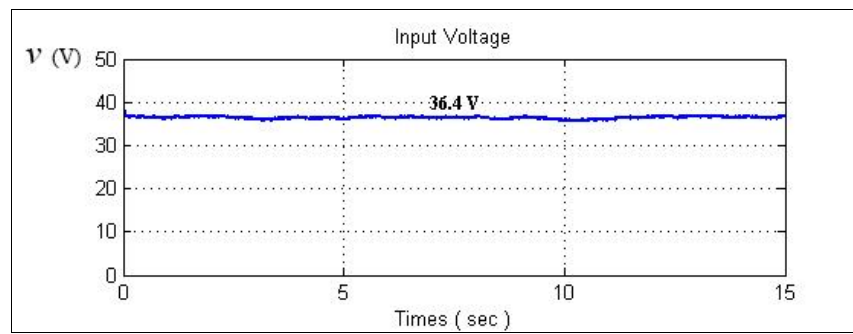
2.) แรงดันกริดเอซีที่มีมุมเฟส 90 องศา หรือ $E_s = 220\sqrt{2} \sin(100\pi t + 90^\circ)$

3.) แรงดันกริดเอซีที่มีมุมเฟส 180 องศา หรือ $E_s = 220\sqrt{2} \sin(100\pi t + 180^\circ)$

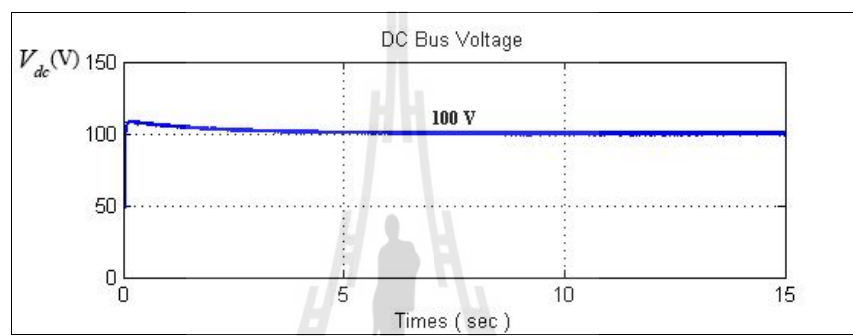
รูปที่ 5.14 ถึงรูปที่ 5.16 คือผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวี ๓ ทั้งสองภาคที่เชื่อมต่อกับกริดเอซีที่มีมุมเฟสแตกต่างกันคือ 0 องศา 90 องศา และ 180 องศา ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวพบว่า วงจรแปลงผันบุสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนได้บังคับให้บล็อกแผงพีวีสร้างแรงดัน (v) ที่มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับแรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด 36.42 V ในสถานะคงตัว ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5.14 (ก) 5.15 (ก) และ 5.16 (ก) ตามลำดับของมุมเฟสของกริดเอซี และได้บังคับให้บล็อกแผงพีวีจ่ายกระแสไฟฟ้า (i) ที่มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด 8.11 A ในสถานะคงตัว ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5.14 (ข) 5.15 (ข) และ 5.16 (ข) ตามลำดับของมุมเฟสของกริดเอซี ในขณะที่ตัวควบคุมแรงดันดีซีได้บังคับให้วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์สร้างแรงดันดีซีอินพุต (V_{dc}) ที่มีการพุ่งเกินเล็กน้อยในสถานะชั่วคราวและเริ่มลดลงจนมีค่าคงที่เท่ากับแรงดันดีซีอ้างอิง 100 V ในสถานะคงตัวได้อย่างรวดเร็วภายในช่วงระยะเวลา 5 s ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5.14 (ค) 5.15 (ค) และ 5.16 (ค) ตามลำดับของมุมเฟสของกริดเอซี ส่วนตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดนั้นได้บังคับให้วงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (I_{ac}) ที่มีรูปคลื่นเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ ในสถานะชั่วคราว หลังจากนั้นกระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลงจึงมีรูปคลื่นไซน์ซอซอด้ที่มีมุมเฟสตรงกับมุมเฟสของแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (V_{ac}) ในสถานะคงตัวได้อย่างรวดเร็วภายในช่วงระยะเวลา 100 ms 130 ms และ 150 ms ตามลำดับของมุมเฟสของกริดเอซี ซึ่งได้แสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้ากริดในรูปที่ 5.14 (จ) 5.15 (จ) และ 5.16 (จ) ตามลำดับของมุมเฟสของกริดเอซี และได้แสดงสัญญาณแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลงในรูปที่ 5.14 (ง) 5.15 (ง) และ 5.16 (ง) ตามลำดับของมุมเฟสของกริดเอซี ดังนั้นในสถานะคงตัวกริดเอซีจึงมีตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่งและเกิดการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากแผงพีวีไปยังกริดเอซี ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.14 (ด)



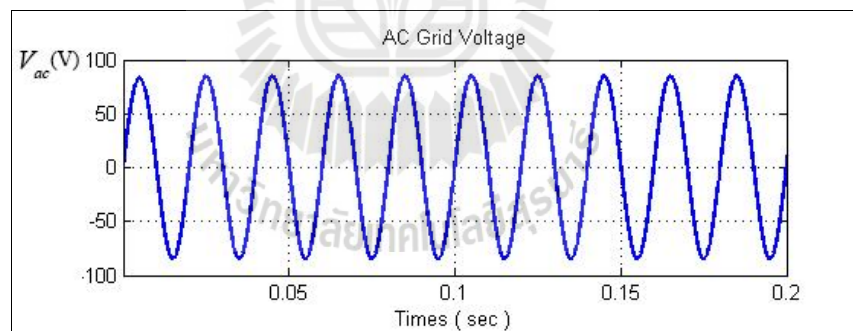
(ก)



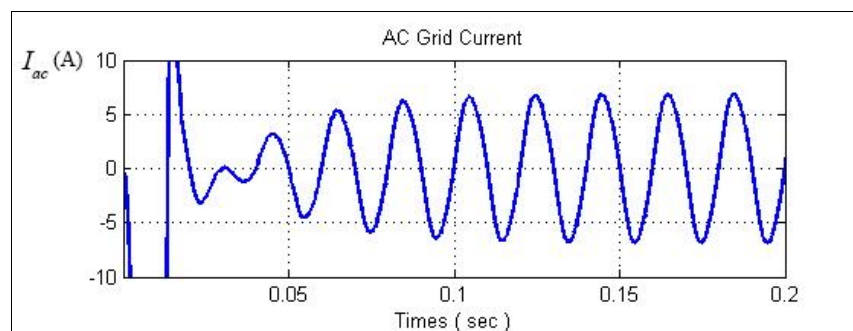
(f)



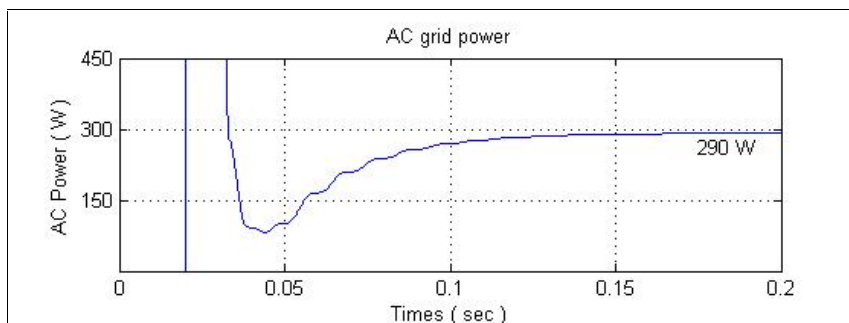
(g)



(h)



(i)



(ฉ)

รูปที่ 5.14 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกริดสองภาคเฟสเดียว

เมื่อกริดเอชี่สร้างแรงดันไซน์ซอชยด์ที่มีมมเฟส 0 องศา

(ก) กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบุนสต์ หรือกระแสไฟฟ้าของบล้อกแผงพีวี

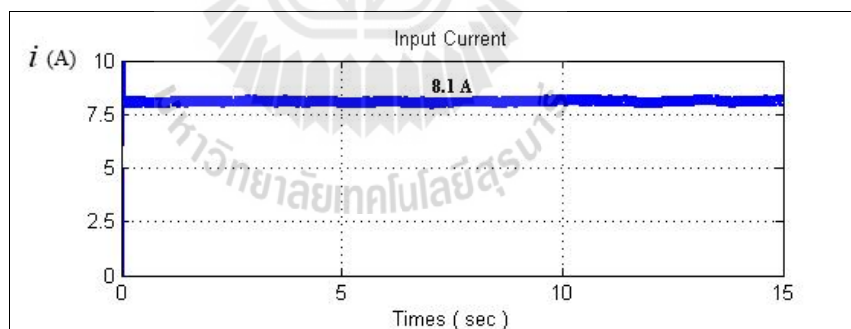
(ข) แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบุนสต์ หรือแรงดันของบล้อกแผงพีวี

(ค) แรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์

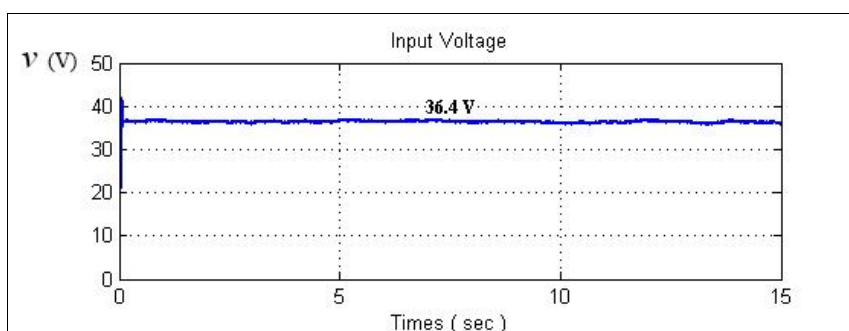
(ง) แรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง

(จ) กระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง

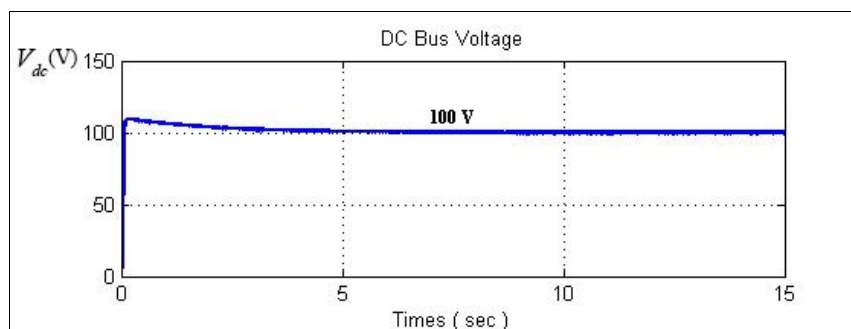
(ฉ) กำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่กริดเอชี่ได้รับจากบล้อกแผงพีวี



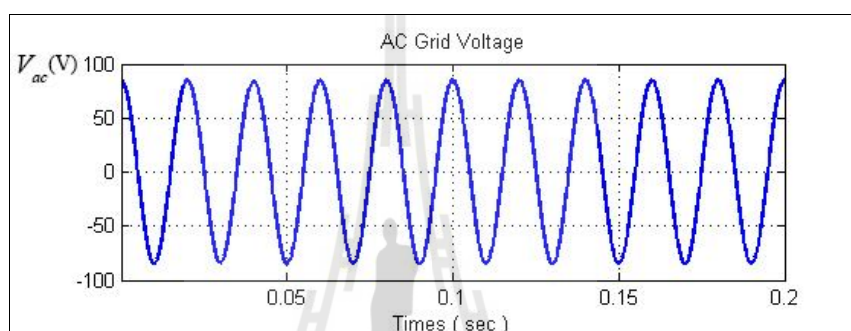
(ค)



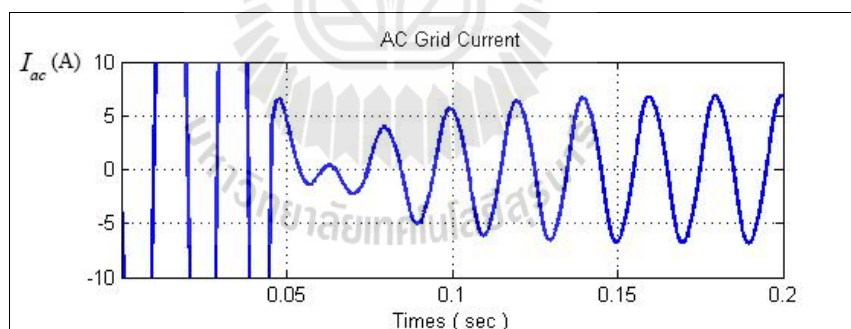
(ง)



(ก)



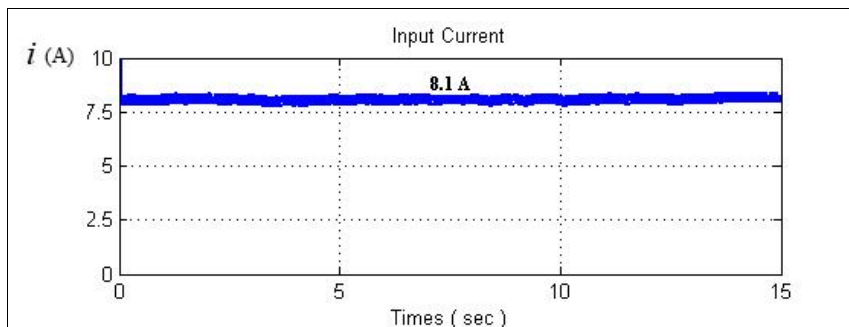
(ง)



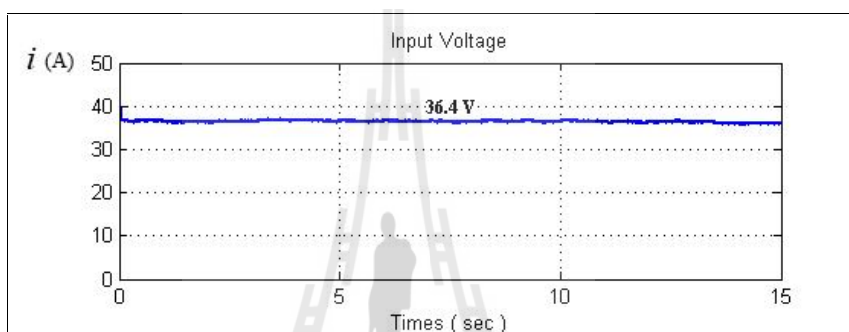
(จ)

รูปที่ 5.15 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกริดสองภาคเฟสเดียว
เมื่อกริดเอชีสร้างแรงดัน 150 โวลต์ที่มีมุมเฟส 90 องศา

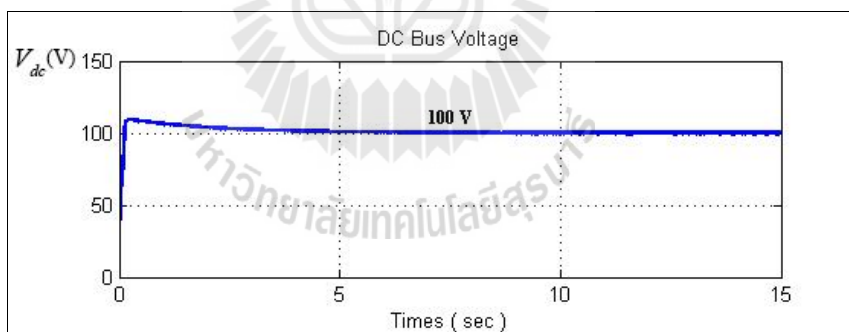
- (ก) กระแสไฟฟ้ายินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือกระแสไฟฟ้าของบล็อกรวมพีวี
- (ข) แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือแรงดันของบล็อกรวมพีวี
- (ค) แรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์
- (ง) แรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง
- (จ) กระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง



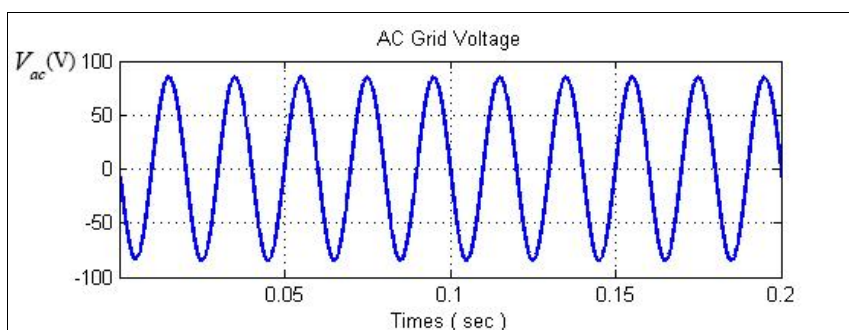
(ก)



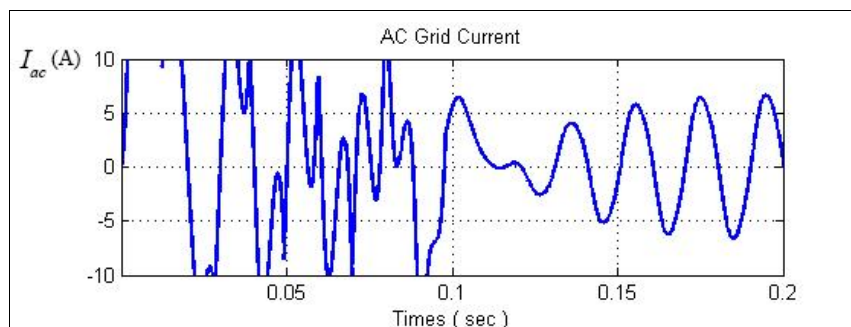
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 5.16 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียว

เมื่อกริดเอชีสรางแรงดัน 180 องศา

(ก) กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือกระแสไฟฟ้าของบล็อกแผงพีวี

(ข) แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ หรือแรงดันของบล็อกแผงพีวี

(ค) แรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์

(ง) แรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง

(จ) กระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง

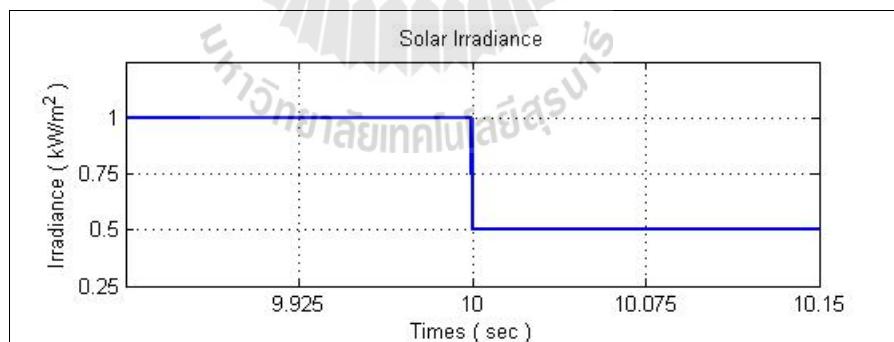
ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.14 ถึงรูปที่ 5.16 แสดงถึงสมรรถนะในการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากแผงพีวีไปยังกริดเอชียของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวี ๑ ใได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถึงแม้ว่าวงจรดังกล่าวนั้นมีเชื่อมต่อกับกริดเอชียที่มีมุมเฟสของแรงดันกริดแตกต่างกัน แต่วงจรดังกล่าวยังคงสามารถบังคับให้บล็อกแผงพีวีมีจุดการทำงานอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพีได้ตลอดเวลา และสามารถบังคับให้วงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสไฟฟ้ากริดรูปคลื่นไซน์ซุชอยด์ที่มีมุมเฟสตรงกันแรงดันกริด ส่งผลทำให้กริดเอชียมีตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่ง และเกิดการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากแผงพีวีไปยังกริดเอชียในสถานะคงตัว ส่วนในสถานะชั่วคราวนั้นมุมเฟสของกระแสไฟฟ้ากริดและแรงดันกริดไม่ตรงกัน ดังนั้นจึงเกิดการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าระหว่างด้านอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์และกริดเอชียสลับกัน

5.4.2 กรณีที่ 2 ความเข้มแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงระดับแบบขั้นบันได

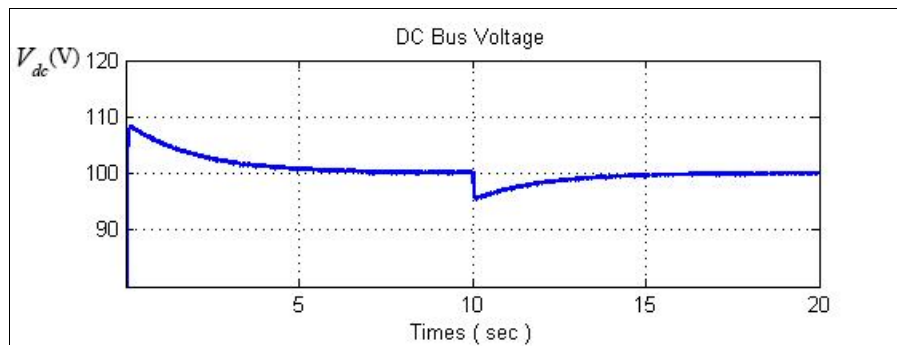
ในกรณีนี้ได้จำลองสถานการณ์โดยพิจารณาเงื่อนไขที่แผงพีวีได้รับความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับอย่างฉับพลันแบบขั้นบันไดที่เวลา 10 s ภายใต้อุณหภูมิคงที่

25 °C และกำหนดให้กริดเอซีสร้างสัญญาณแรงดันไซน์ซอซด์ที่มีความถี่ 50 Hz และมีมุมเฟสของแรงดันกริดเท่ากับ 0 องศา หรือ $E_s = 220\sqrt{2} \sin(100\pi t)$

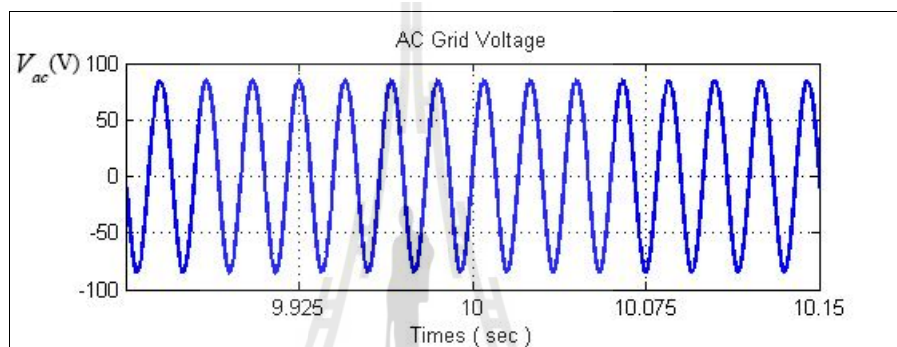
ในขณะที่วางจอร์อินเวอร์เตอร์พีวี ฯ ทำงานบังคับให้เกิดการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากบล็อกแผงพีวีไปยังกริดเอซีในสถานะคงตัวอยู่นั้น เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์ลดลงอย่างฉับพลันแบบขั้นบันไดจากระดับ 1.00 kW/m² ไปยังระดับ 0.50 kW/m² ที่เวลา 10 s ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.17 (ก) ตัวควบคุมแรงดันดีซีได้บังคับให้จอร์อินเวอร์เตอร์สร้างแรงดันดีซีอินพุต (V_{dc}) ที่มีการพุ่งต่ำลงเล็กน้อยในสถานะชั่วคราว และมีค่าเพิ่มขึ้นจนเท่ากับแรงดันดีซีอ้างอิง 100 V ในสถานะคงตัวได้อย่างรวดเร็วภายในช่วงระยะเวลา 5 s ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.17 (ข) ขณะที่ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดนั้น ได้บังคับให้จอร์อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสไฟฟ้ากริดรูปคลื่นไซน์ซอซด์ (I_{ac}) ที่มีมุมเฟสตรงกับมุมเฟสของแรงดันกริด (V_{ac}) ได้อย่างรวดเร็วภายในช่วงระยะเวลา 75 ms ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.17 (ง) และ 5.17 (ค) ตามลำดับ โดยกระแสไฟฟ้ากริดนี้มีค่ายอดหรือแอมพลิจูดลดลงเนื่องจากบล็อกแผงพีวีนั้นสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้น้อยลงตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงอาทิตย์ ดังนั้นกริดเอซีจึงมีตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่งตลอดเวลา ส่งผลทำให้เกิดการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากบล็อกแผงพีวีไปยังกริดเอซีได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงอาทิตย์ลดลงอย่างฉับพลันแบบขั้นบันได ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 5.17 (จ)



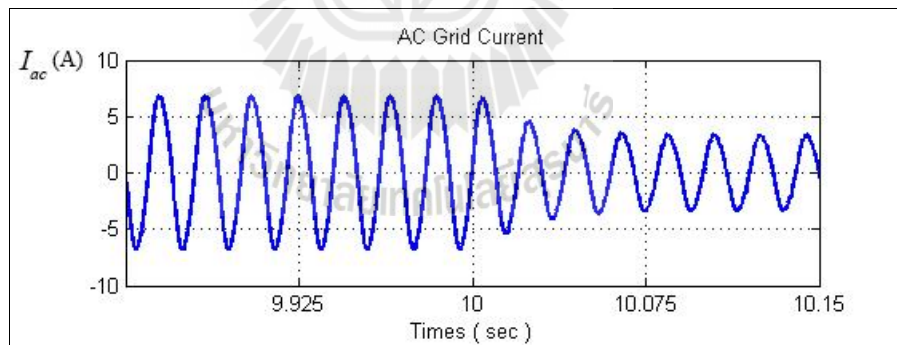
(ก)



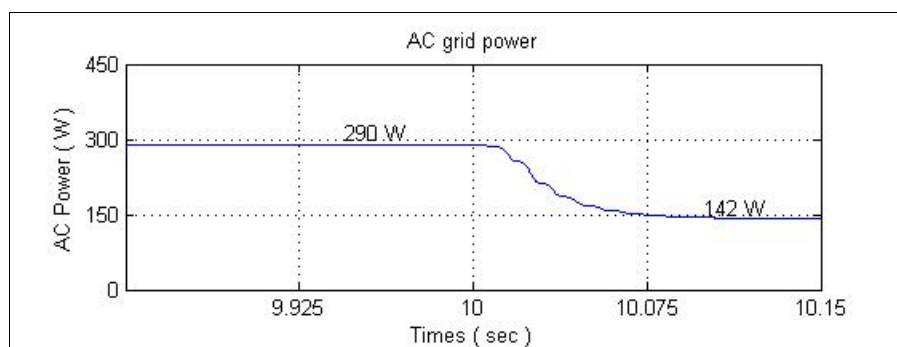
(f)



(g)



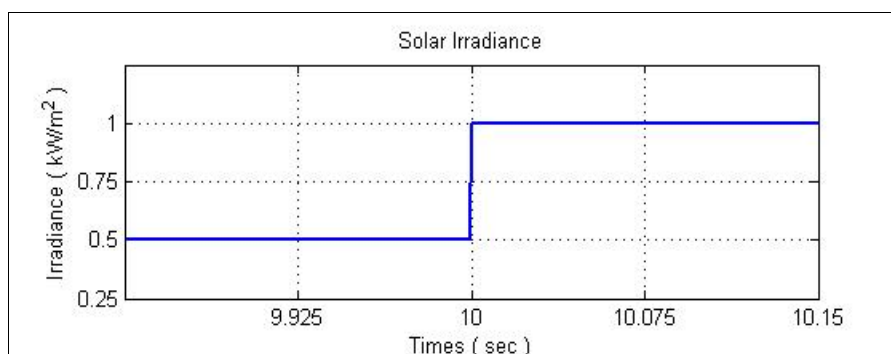
(h)



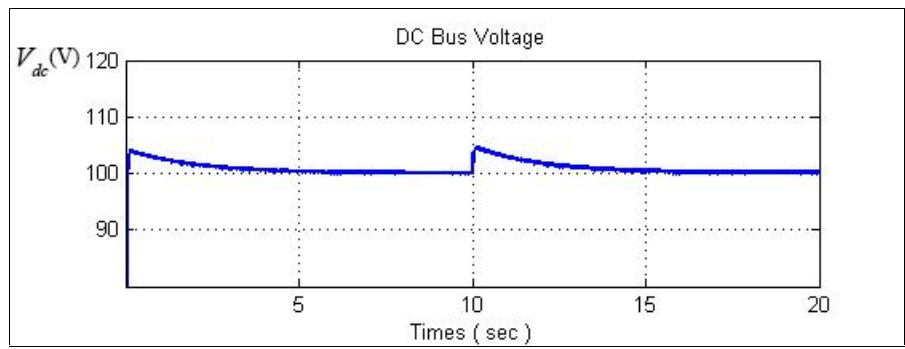
(i)

- รูปที่ 5.17 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรรินเวอร์เตอร์พีวี ฯ ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์ลดลงอย่างฉับพลันแบบขั้นบันได
- (ก) การลดลงแบบขั้นบันไดของระดับความเข้มแสงอาทิตย์ที่เวลา 10 s
 - (ข) แรงดันดีซีอินพุตของวงจรรินเวอร์เตอร์
 - (ค) แรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง
 - (ง) กระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง
 - (จ) กำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่กริดเอซีได้รับจากบล็อกแผงพีวี

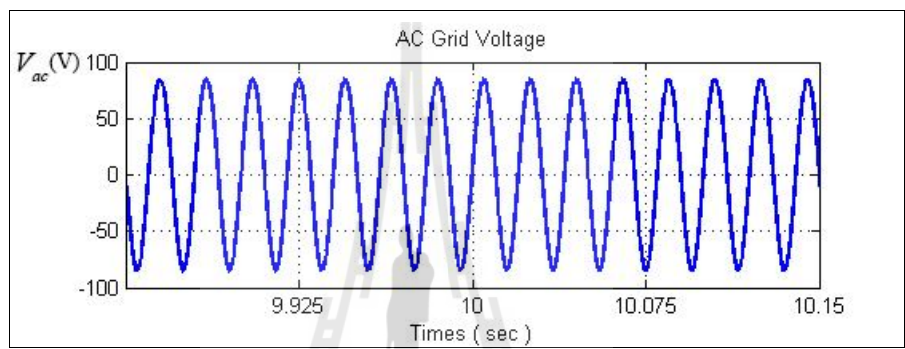
ในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันแบบขั้นบันไดจากระดับ 0.50 kW/m^2 ไปยังระดับ 1.00 kW/m^2 ที่เวลา 10 s ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.18 (ก) ตัวควบคุมแรงดันดีซีได้บังคับให้วงจรรินเวอร์เตอร์สร้างแรงดันดีซีอินพุต (V_{dc}) ที่มีการพุ่งสูงขึ้นเล็กน้อยในสถานะชั่วคราว และมีค่าลดลงจนเท่ากับแรงดันดีซีอ้างอิง 100 V ในสถานะคงตัวได้อย่างรวดเร็วภายในช่วงระยะเวลา 5 s ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.18 (ข) ขณะที่ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดนั้นได้บังคับให้วงจรรินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสไฟฟ้ากริดรูปคลื่นไซน์ซอซอด์ (I_{ac}) ที่มีมุมเฟสตรงกับมุมเฟสของแรงดันกริด (V_{ac}) ได้อย่างรวดเร็วภายในช่วงระยะเวลา 75 ms ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.18 (ง) และ 5.18 (ค) ตามลำดับ โดยกระแสไฟฟ้ากริดนี้มีค่ายอดหรือแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นเนื่องจากบล็อกแผงพีวีนั้นสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงอาทิตย์ ดังนั้นกริดเอซีจึงมีตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่งตลอดเวลา ส่งผลทำให้เกิดการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากบล็อกแผงพีวีไปยังกริดเอซีได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันแบบขั้นบันได ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 5.18 (จ)



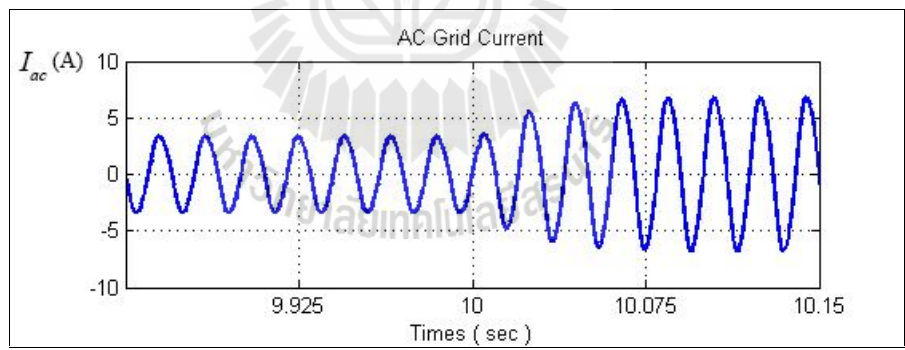
(ก)



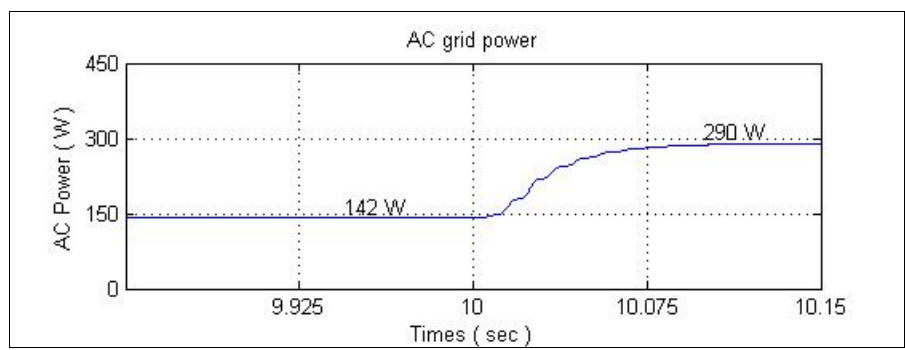
(f)



(g)



(h)



(i)

- รูปที่ 5.18 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวี ๑ ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันแบบขั้นบันได
- (ก) การเพิ่มขึ้นแบบขั้นบันไดของระดับความเข้มแสงอาทิตย์ที่เวลา 10 s
 - (ข) แรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์
 - (ค) แรงดันกริดประมุขของหม้อแปลง
 - (ง) กระแสไฟฟ้ากริดประมุขของหม้อแปลง
 - (จ) กำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่กริดเอซีได้รับจากบล็อกแผงพีวี

ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวี ๑ ในรูปที่ 5.14 ถึงรูปที่ 5.18 นี้แสดงถึงสมรรถนะในการทำงานที่แยกอิสระออกจากกันระหว่างวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนและวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวชนิดพีดับเบิลยูเอ็มได้อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือ วงจรแปลงผันบูสต์นั้นสามารถบังคับให้บล็อกแผงพีวีสร้างแรงดันและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ติดตามแรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (V_{mp}) และกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp}) ตามลำดับได้ภายในช่วงระยะเวลาสั้น ขณะที่ตัวควบคุมแรงดันดีซีและตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดนั้นสามารถบังคับให้วงจรอินเวอร์เตอร์สร้างแรงดันดีซีอินพุตที่มีค่าคงที่เท่ากับแรงดันดีซีอ้างอิง 100 V ในสถานะคงตัวได้ และสามารถบังคับให้วงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสไฟฟ้ากริดรูปคลื่นไซน์ซอซด์ที่มีมุมเฟสตรงกับมุมเฟสของแรงดันกริดได้ตลอดเวลาในสถานะคงตัว ส่งผลทำให้กริดเอซีมีตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่งตลอดเวลา ส่วนในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างฉับพลันแบบขั้นบันไดนั้น วงจรดังกล่าวยังคงสามารถบังคับให้บล็อกแผงพีวีมีจุดการทำงานอยู่ในตำแหน่งของจุดเอ็มพีพีทีตำแหน่งใหม่ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ตลอดจนสามารถบังคับให้กริดเอซีมีตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่งได้ตลอดเวลา ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการชิงโครโนระหว่างกระแสไฟฟ้ากริดและแรงดันกริดเอซีตลอดเวลา ดังนั้นบล็อกแผงพีวีจึงสามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดส่งจ่ายไปยังกริดเอซีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.5 สรุป

ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนที่ได้แสดงในบทนี้ แสดงถึงสมรรถนะในการติดตามกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดและส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากบล็อกแผงพีวีไปยังกริดเอซีได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากในกรณีที่บล็อกแผงพีวีได้รับความเข้มแสงอาทิตย์ในระดับคงที่หรือมีระดับความเข้มแสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดหรือแบบลาดเอียง วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีที

ชนิดโหมคการเลื้อนยั้งคงสามารถบั้งคั้บให้บลือกแผลงพีวีมีจุดการทำงานเคลื้อนที่และติดตามจุดเอื้อมพีพีได้อย่างถูกต้องภายและรวดเร็ว สัผลทำให้บลือกแผลงพีวีผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดตลอดเวลาภายได้สภาพแเวคล้อมที่เกื้อคั้บในขณะนั้น ในขณะทีตัวควบคุมแรงดันดีซีนั้นสามารถบั้งคั้บให้วงจอรินเวอร์เตอร์มีแรงดันดีซีอินพุตคองทีเท่ากับแรงดันดีซีอ้างอิง 100 V ซึ่มีค่ามากกว่าค่ายอดคองแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง สัผลทำให้ควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดสามารถบั้งคั้บให้วงจอรินเวอร์เตอร์เต็มบริคัจจ่ายกระแสไฟฟ้ากริดไซนูซอยคั้บที่มีมุมเฟสตรงคั้บมุมเฟสของแรงดันกริดได้ตลอดเวลาในสถานะคงตัว ซึ่มีผลทำให้กริดเอซีมีตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่งคั้บนั้นบลือกแผลงพีวีจึงสามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดส่งจ่ายไปยังกริดเอซีได้อย่างมีประสิทธิภาย



บทที่ 6

การสร้างชุดวงจรต้นแบบของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริด สองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน

6.1 บทนำ

บทนี้จะอธิบายถึงวิธีการสร้างชุดวงจรต้นแบบของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน เพื่อใช้ในศึกษาและทดสอบสมรรถนะในการติดตามกำลังงานสูงสุดของแผงพีวีจริงและการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากแผงพีวีไปยังกริดเอซีของวงจรดังกล่าวด้วยชุดฮาร์ดแวร์จริง ซึ่งได้ออกแบบสร้างขึ้นโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 และได้แสดงแผนภาพวงจร (schematics circuits) ต่าง ๆ ของชุดวงจรต้นแบบที่สร้างขึ้นไว้ในภาคผนวก ก ส่วนเนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงรายละเอียดทางฮาร์ดแวร์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์และวงจรแปลงผันกำลัง (electronic schematics and power circuitries) ที่ใช้งานและวิธีการสร้างวงจรไฟฟ้าต่าง ๆ ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

- (1) แผงพีวีที่ใช้งานและเส้นตรงการเคลื่อนที่ดีที่สุดของแผงพีวี
- (2) การสร้างวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน วงจรขับขาเกตของมอสเฟตกำลัง วงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ และวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์
- (3) การสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว วงจรขับขาเกตไอจีบีที วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง และวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง
- (4) โปรแกรมภาษาซีที่กำหนดให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็นหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน และระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่ประกอบด้วยตัวควบคุมแรงดันดีซี ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด และเฟสล็อก

6.2 แผงพีวีและเส้นตรงการเคลื่อนที่ดีที่สุด

แผงพีวีที่ใช้งานคือแผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260, 295 W ที่ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกกรวม (polycrystalline) จำนวน 72 เซลล์เชื่อมต่อกันแบบอนุกรม และมีขั้วต่อชนิด MC4 (multi-contact 4 mm²) 2 ขั้วคือขั้วบวกและขั้วลบสำหรับต่อใช้งาน โดยแผงพีวี

รุ่นดังกล่าวนี้มีคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่แสดงในตารางที่ 3.1 และมีสมการเส้นตรงการเลื่อนที่ดีที่สุดคือสมการที่ (3.6) ในบทที่ 3 ซึ่งสมการเส้นตรงการเลื่อนนี้ได้ถูกนำมาใช้การเขียนโปรแกรมภาษาซีเพื่อกำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็นหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันบูสต์ ในการศึกษาสำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ติดตั้งแผงพีวีรุ่นดังกล่าวบนฐานรองที่เคลื่อนย้ายได้ โดยวางเอียงทำมุม 15 องศา กับแนวพื้นราบซึ่งได้แสดงในรูปที่ 6.1 การติดตั้งแผงพีวีในลักษณะดังกล่าวนี้จะช่วยทำให้แผงพีวีมีโอกาสได้รับความเข้มแสงอาทิตย์ที่สูงและทำให้แผงพีวีสามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงขึ้น เนื่องจากมุมของการติดตั้งแผงพีวีที่ทำให้สามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดนั้นควร สอดคล้องกับข้อมูลพิกัดเส้นรุ้ง (latitude) ตามตำแหน่งที่ตั้งของประเทศไทย (Wenham, Green, et al , 2007, pp. 22-25)



รูปที่ 6.1 การติดตั้งแผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260, 295 W บนฐานรองที่เคลื่อนย้ายได้

6.3 วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน

ชุดวงจรต้นแบบของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน ซึ่งเป็นวงจรภาคแรกของงานวิทยานิพนธ์นี้แสดงได้ในรูปที่ 6.2 ประกอบด้วยวงจรแปลงผันบูสต์ วงจรขับขาเกตของมอสเฟตกำลัง Q1 (MOSFET Q1 driver) วงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ และหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนที่สร้างขึ้นโดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1 (TMS320F28335 experimenter kit) ขณะที่ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรแปลงผันบูสต์นั้นได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.4 ของบทที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยมอสเฟตกำลัง (Q1) ไดโอดกำลัง (D1) ตัวเหนี่ยวนำ (L) 20 mH ตัวเก็บประจุด้านอินพุต (C_{in}) 1000 μ F และตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc}) 6600 μ F นำมาเชื่อมต่อกันเป็นวงจรแปลงผันบูสต์ ส่วนวิธีการออกแบบสร้างวงจรย่อยต่างๆ ของวงจรแปลงผันบูสต์นั้นได้พิจารณาจากแผงพีวีที่ใช้งานซึ่งมีกระแสไฟฟ้าและแรงดันมากที่สุดเท่ากับ $I_{sc} = 8.55$ A และ

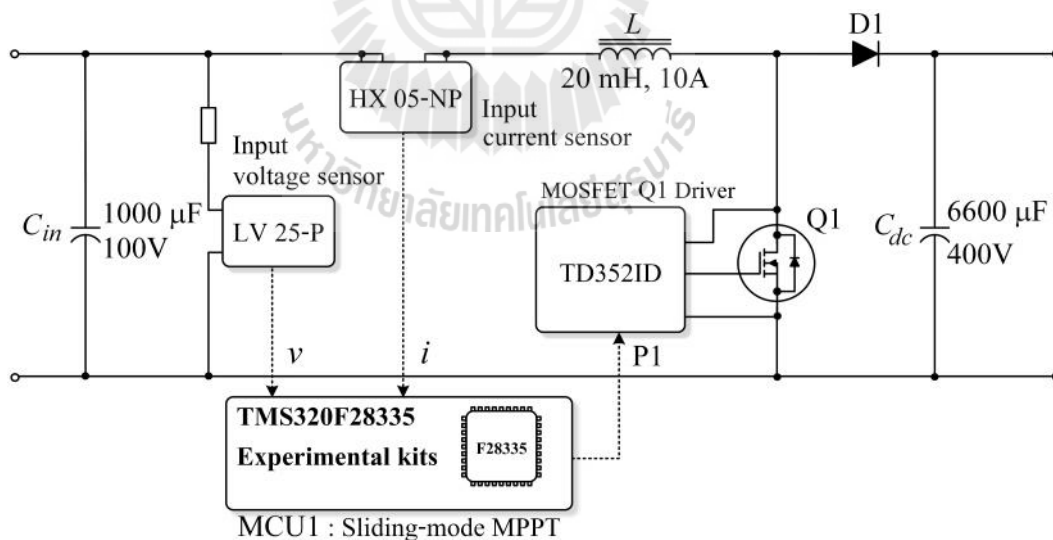
$V_{oc} = 44.9 \text{ V}$ ตามลำดับ และพิจารณาจากความต้องการของโหลดที่นำมาเชื่อมต่อวงจรแปลงผันบูสต์ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้คุมค่าแรงดันคิซีเอาต์พุตของวงจรแปลงผันบูสต์ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 100 V ดังนั้นในการออกแบบสร้างชุดวงจรต้นแบบของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนนี้จึงได้กำหนดค่าพิกัดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

วงจรแปลงผันบูสต์

กระแสไฟฟ้าอินพุตพิกัด (i_{rated})	10 A
แรงดันอินพุตพิกัด (v_{rated})	50 V
กำลังงานพิกัด (P_{rated})	320 W
แรงดันคิซีเอาต์พุตที่ต้องการคุมค่า ($V_{dc, ref}$)	100 V
แรงดันคิซีเอาต์พุตพิกัด ($V_{dc, rated}$)	400 V
ความถี่การสวิตช์ (f_{sw}^{boost})	10 kHz ถึง 100 kHz

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1 (TMS320F28335 experimenter kit)

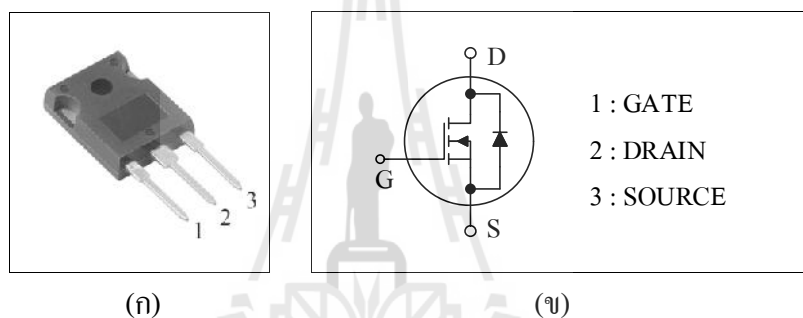
แรงดันคิซีพิกัดหรือไฟเลี้ยงของบอร์ด	3.3 V
แรงดันอนาล็อกที่แปลงเป็นตัวเลขฐานสอง	0 ถึง 3.0 V
ตัวเลขฐานสองที่ได้จากการแปลงแรงดันอนาล็อก	0 ถึง 4095



รูปที่ 6.2 ชุดวงจรต้นแบบของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนที่ใช้งาน

6.3.1 มอสเฟตกำลัง Q1 และไดโอดกำลัง D1

มอสเฟตกำลังที่ใช้ในงานในวงจรแปลงผันบูสต์คือ มอสเฟตกำลังช่องเอ็น (N-channel power MOSFET) เบอร์ FCH041N60E เนื่องจากมอสเฟตกำลังเบอร์นี้สามารถมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้มากกว่ากระแสไฟฟ้าอินพุตพิกัดที่ไหลเข้าวงจรแปลงผันบูสต์ ($I_{D(max)} > 10 \text{ A}$) และสามารถมีแรงดันตกคร่อมได้มากกว่าแรงดันคิซีเอาต์พุตพิกัดของวงจรแปลงผันบูสต์ ($V_{DS(off)(max)} > 400 \text{ V}$) นอกจากนี้มอสเฟตกำลังดังกล่าวยังมีไดโอดที่ต่อขนานกลับด้าน (antiparallel) ภายในตัวถัง และมีข้อมูลเฉพาะที่สำคัญที่แสดงในตารางที่ 6.1 ตลอดจนมีรูปตัวถังแบบ TO-247 ที่สามารถใช้งานได้ง่าย ซึ่งแสดงในรูปที่ 6.3 (ก) ประกอบด้วยขา 3 ขาได้แก่ ขา 1 คือขาเกต (gate) ขา 2 คือขาเดรน (drain) และขา 3 คือขาซอร์ส (source) ที่แสดงในรูปที่ 6.3 (ข)



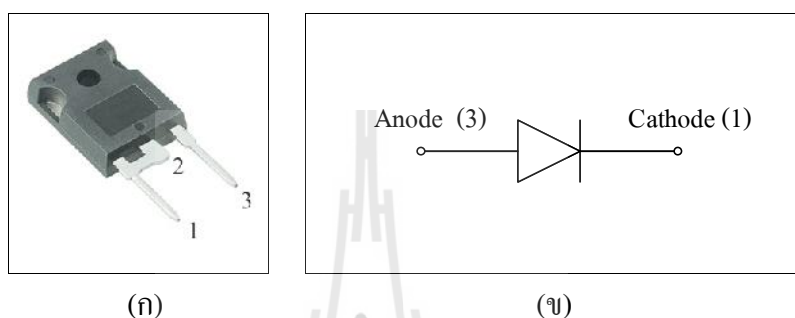
รูปที่ 6.3 มอสเฟตกำลังเบอร์ FCH041N60E (ก) ตัวถังและหมายเลขขา (ข) สัญลักษณ์และชื่อขา

ตารางที่ 6.1 ข้อมูลเฉพาะที่สำคัญของมอสเฟตกำลังเบอร์ FCH041N60E

ชื่อและชนิดของปริมาณทางไฟฟ้า	สัญลักษณ์	ปริมาณและหน่วย	
1.) แรงดันขา D-S สูงสุด (maximum drain-source voltage)	$V_{DS(off)(max)}$	600	V
2.) แรงดันขา G-S สูงสุด (maximum gate-source voltage)	$V_{GS(max, min)}$	± 20	
3.) แรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนขา G-S (gate threshold voltage)	$V_{GS(th)}$	3.5	
4.) กระแสไฟฟ้าขา D สูงสุด (maximum drain current)	$I_{D(max)}$	77	A
5.) ค่าความต้านทานในขณะที่นำกระแสไฟฟ้า (on resistance)	$R_{DS(on)}$	41	m Ω

ไดโอดกำลัง D1 คือสวิตช์ที่นำกระแสไฟฟ้าและหยุดนำกระแสไฟฟ้าที่ทำงานสัมพันธ์กับการหยุดนำกระแสไฟฟ้าและการนำกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตกำลัง Q1 ดังนั้นในการเลือกใช้งานไดโอดกำลัง D1 สำหรับวงจรแปลงผันบูสต์นั้นจึงสามารถพิจารณาได้จากคุณลักษณะเฉพาะ

เช่นเดียวกับวิธีการเลือกใช้ออสเฟตกำลัง กล่าวคือไดโอดกำลังที่ใช้งานต้องมี $I_{F(avg)} > 10 \text{ A}$ และมี $V_{RRM} > 400 \text{ V}$ ดังนั้นจึงเลือกใช้งานไดโอดกำลังเบอร์ VS-30EPF06-M3 เป็นสวิตช์ไดโอด D1 ของวงจรแปลงผันบูสต์ ซึ่งไดโอดกำลังเบอร์นี้มีข้อมูลเฉพาะที่สำคัญแสดงในตารางที่ 6.2 และมีรูปร่างตัวถังแบบ TO-247 ที่สามารถใช้งานได้ง่ายเช่นเดียวกัน ซึ่งแสดงในรูปที่ 6.4 (ก) ประกอบด้วยขา 2 ขา โดยที่ขา 1 คือขาแคโทด และขา 2 คือขาแอนโนดที่แสดงในรูปที่ 6.4 (ข)



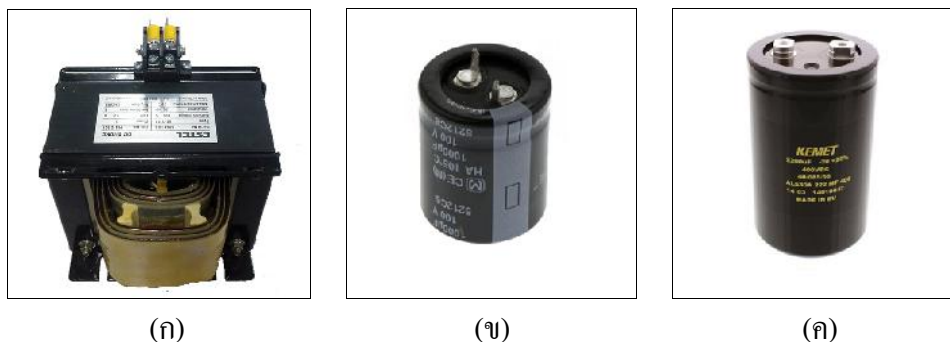
รูปที่ 6.4 ไดโอดเบอร์ VS-30EPF06-M3 (ก) ตัวถังและหมายเลขขา (ข) สัญลักษณ์และชื่อขา

ตารางที่ 6.2 ข้อมูลเฉพาะที่สำคัญของไดโอดเบอร์ VS-30EPF06-M3

ชื่อและชนิดของปริมาณทางไฟฟ้า	สัญลักษณ์	ปริมาณ	
กระแสไฟฟ้าไปหน้าเฉลี่ยสูงสุด (maximum average forward current)	$I_{F(avg)}$	30	A
แรงดันย้อนกลับค่ายอดสูงสุด (maximum peak reverse voltage)	V_{RRM}	600	V
เวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (reverse recovery time)	t_{rr}	60	ns

6.3.2 ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุด้านอินพุต และตัวเก็บประจุดีซี

ตัวเหนี่ยวนำ (L) ขนาด 20 mH ที่ใช้งานในวงจรแปลงผันบูสต์แสดงในรูปที่ 6.5 (ก) ซึ่งสามารถทนกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้เท่ากับกระแสไฟฟ้าอินพุตพิกัด 10 A ขณะที่ตัวเก็บประจุด้านอินพุต (C_{in}) นั้นได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte capacitor) เบอร์ ECOS2AA102CA ซึ่งมีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 1000 μF 100 V ที่แสดงในรูปที่ 6.5 (ข) ส่วนตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc}) นั้นได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์เบอร์ ALS30A222MF400 ซึ่งมีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 2200 μF 400 V ที่แสดงในรูปที่ 6.5 (ค) จำนวน 3 ตัวนำมาเชื่อมต่อขนานกัน เพื่อให้ได้ตัวเก็บประจุดีซีที่มีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 6600 μF ตามที่ต้องการ



รูปที่ 6.5 ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุค่านินพุต และตัวเก็บประจุคิซีที่ใช้งาน

(ก) ตัวเหนี่ยวนำชนิดแกนเหล็ก 20 mH

(ข) ตัวเก็บประจุ เบอร์ ECOS2AA102CA

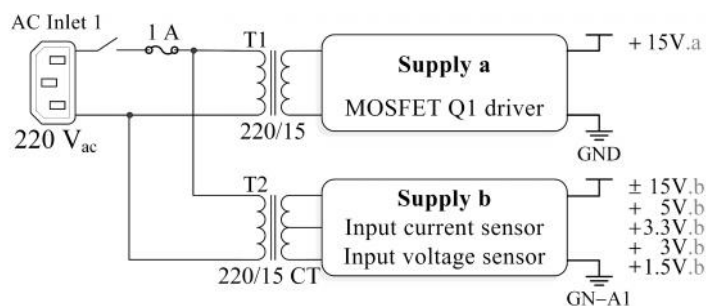
(ค) ตัวเก็บประจุ เบอร์ ALS30A222MF400

6.3.3 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันคิซี

วงจรแหล่งจ่ายแรงดันคิซีที่แสดงในรูปที่ 6.6 ทำหน้าที่สร้างแรงดันคิซีหรือไฟเลี้ยงคิซีที่มีการคุมค่าแรงดันป้อนให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ของวงจรขับเคลื่อนและวงจรเซนเซอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในวงจรแปลงผันบูสต์ วงจรแหล่งจ่ายแรงดันคิซีนีมีตัวรับเอซี (AC inlet) 220 V เป็นแหล่งจ่ายแรงดันเอซีที่ใช้ในการสร้างแรงดันคิซีดังกล่าว และได้แบ่งออกวงจรออกเป็น 2 ชุดดังนี้

วงจรแหล่งจ่ายคิซีชุด a (supply a) ทำหน้าที่สร้างและจ่ายแรงดันคิซี +15 V ให้กับวงจรขับเคลื่อนของมอสเฟตกำลัง Q1

วงจรแหล่งจ่ายคิซีชุด b (supply b) ทำหน้าที่สร้างและจ่ายแรงดันคิซี ± 15 V +5 V +3.3V +3 V และ +1.5 V ให้กับวงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้านินพุตและวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์



รูปที่ 6.6 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันคิซีที่ใช้งานในวงจรแปลงผันบูสต์

ฟังก์ชันแอกทีฟมิลเลอร์แคลมป์ (active miller clamp) ที่ช่วยลดผลกระทบจากตัวเก็บประจุมิลเลอร์ของมอสเฟตกำลัง แต่เนื่องจากไอซีขับขาเกตเบอร์นี้ให้สัญญาณเอาต์พุตที่มีลอจิกตรงกันข้ามกับลอจิกของสัญญาณอินพุต (inverting output) ดังนั้นจึงได้ใช้ตัวเชื่อมต่อผ่านแสงเบอร์ HCPL-4506 ที่ให้สัญญาณเอาต์พุตที่มีลอจิกตรงกันข้ามกับลอจิกของสัญญาณอินพุตเช่นเดียวกัน นำมาเชื่อมต่อกันกลางระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และไอซีขับขาเกต เพื่อให้ได้สัญญาณเอาต์พุตของไอซีขับขาเกตที่มีลอจิกเหมือนกันกับลอจิกของสัญญาณขับขาเกต P1 โดยได้เชื่อมต่อเข้ากับแรงดันดิซีอ้างอิง (V_{ref}) +5 V ของไอซีขับขาเกตเบอร์ TD352ID เพื่อให้ตัวเชื่อมต่อผ่านแสงดังกล่าวมีสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นสัญญาณพัลส์ 0 ถึง 5 V ซึ่งเป็นสัญญาณอินพุตที่เหมาะสมกับไอซีขับขาเกตเบอร์ TD352ID ที่ต้องการสัญญาณดิจิทัลอินพุตไม่เกิน 7 V

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรขับขาเกตของมอสเฟตกำลัง Q1 นั้นสามารถพิจารณาได้จากเอกสารข้อมูลเฉพาะของไอซีขับขาเกตเบอร์ TD352ID และตัวเชื่อมต่อผ่านแสงเบอร์ HCPL-4506 ซึ่งได้อธิบายและแสดงรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับไอซีดังกล่าวนี้ในภาคผนวก ค โดยสามารถพิจารณาเลือกใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรขับขาเกตได้ตามรายละเอียดต่อไปนี้

1.) วงจรตรวจสอบความผิดปกติในการทำงานของมอสเฟต ที่ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดกระแสไฟฟ้าเกินและการทำงานในบริเวณอิ่มตัว (saturation region) ของมอสเฟต งานวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบโดยกำหนดให้ช่วงระยะเวลาที่ยินยอมให้มีกระแสไฟฟ้ามากกว่า 250 μA ไหลผ่านวงจรตรวจสอบความผิดปกติได้เท่ากับ 2 μs ถึง 3 μs ตามที่ระบุในเอกสารข้อมูลเฉพาะของไอซีขับขาเกตเบอร์ TD352ID (STMicroelectronics, 2011) ซึ่งได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

- | | |
|--|------------------------------------|
| ตัวต้านทานของวงจรตรวจสอบความผิดปกติ (R_{sat}) | 1 k Ω |
| ตัวเก็บประจุของวงจรตรวจสอบความผิดปกติ (C_{sat}) | 50 pF |
| ไดโอดของวงจรตรวจสอบความผิดปกติ (D_{sat}) | ไดโอดเบอร์ 1N4007 |
| 2.) ตัวต้านทานประวิง (delay time: R_D) | 4.7 k Ω |
| 3.) ตัวเก็บประจุบูตสเตรป (boostarp capacitor: C_{bst}) | 100 nF |
| 4.) ตัวต้านทานประวิง (delay time: R_D) | 4.7 k Ω |
| 5.) ตัวเก็บประจุลดการเชื่อมต่อ (decoupling capacitor: C_{de}) | 100 nF |
| 6.) ตัวต้านทานขาเกต (R_g) | 10 Ω |
| 7.) ตัวต้านทานระหว่างขาเกตและขาซอร์ส (R_{gs}) | 10 k Ω |
| 8.) ไดโอดซีเนอร์ระหว่างขาเกตและขาซอร์ส (D_{gs}) | ทำหน้าที่ป้องกันแรงดันเกินชั่วคราว |

(Transient voltage suppression: TVS) ระหว่างขาเกตและขาซอร์สของมอสเฟต ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ไดโอด TVS เบอร์ P6KE16CA ที่มีแรงดันเบรกดาวน์เท่ากับ 15 V

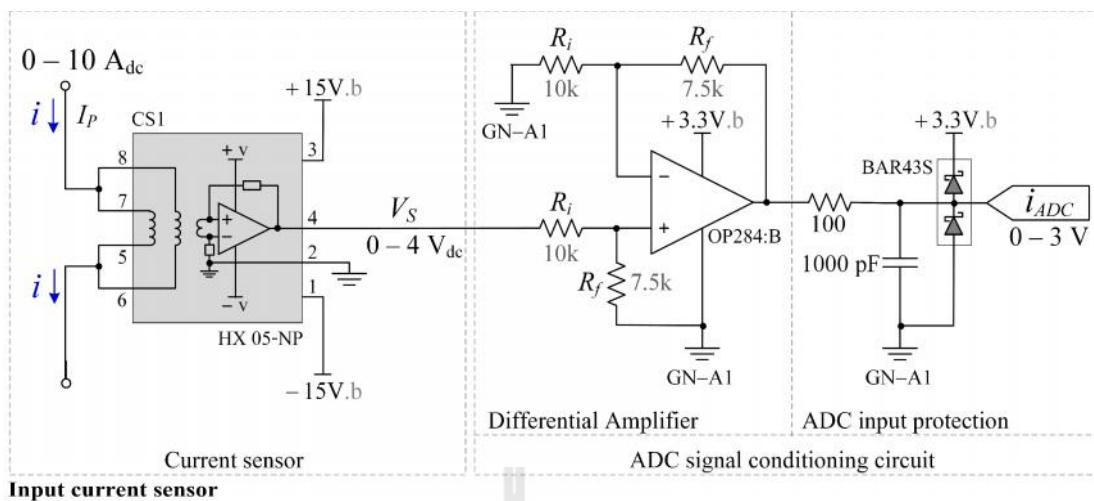
9.) ตัวต้านทานด้านอินพุตของตัวเชื่อมต่อผ่านแสง (R_{op}) ทำหน้าที่จำกัดกระแสไฟฟ้าอินพุตของตัวเชื่อมต่อผ่านแสงให้มีปริมาณอยู่ในช่วง 10 mA ถึง 20 mA โดยสามารถคำนวณหาได้จากกฎของโอห์มตามสมการที่ (6.1) ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบโดยกำหนดให้ตัวเชื่อมต่อผ่านแสงมีค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าอินพุตเท่ากับ 10 mA ดังนั้นตัวต้านทานด้านอินพุตของตัวเชื่อมต่อผ่านแสงจึงมีค่าความต้านทานเท่ากับ 330 Ω เนื่องจากตัวเชื่อมต่อผ่านแสงดังกล่าวมีสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณจับขาคัด P1 ที่มีแรงดันอยู่ในช่วง 0 ถึง 3.3 V

$$R_{op} = \frac{V_{op}}{I_{op}} \quad (6.1)$$

โดยที่ R_{op} คือ ค่าตัวต้านทานด้านอินพุตของตัวเชื่อมต่อผ่านแสง
 V_{op} คือ แรงดันอินพุตของตัวเชื่อมต่อผ่านแสง
 และ I_{op} คือ ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าอินพุตของตัวเชื่อมต่อผ่านแสง

6.3.5 วงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์

วงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ ทำหน้าที่วัดกระแสไฟฟ้าของแผงพีวีหรือกระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ (i) ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (L) วงจรเซนเซอร์ดังกล่าวนี้ประกอบด้วยวงจรไฟฟ้า 2 ภาคเชื่อมต่ออนุกรมกัน นั่นคือเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP และวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณแอนะล็อก (ADC signal conditioning circuit) โดยมีด้านอินพุตของวงจรเชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันบูสต์ผ่านขดลวดปฐมภูมิของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า และมีด้านเอาต์พุตของวงจรเชื่อมต่อกับพอร์ตแอนะล็อก (analog to digital converter interface) ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1 ที่ทำหน้าที่เป็นหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 วงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันนูนสต์

วงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันนูนสต์ที่ได้ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ สามารถวัดกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 10 A ตามข้อกำหนดของกระแสไฟฟ้าอินพุตพิกัดของวงจรแปลงผันนูนสต์ที่ได้ออกแบบไว้ โดยได้ทำการต่อขดลวดปฐมภูมิทั้ง 2 ชุดของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าแบบขนานกันและได้เชื่อมต่อเข้ากับวงจรแปลงผันนูนสต์ ส่วนด้านทุติยภูมิของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้านั้นได้เชื่อมต่อกับวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอดีซีและแหล่งจ่ายแรงดันดีซี ± 15 V ซึ่งการต่อเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP ในลักษณะดังกล่าวนี้ส่งผลทำให้เซนเซอร์ดังกล่าวสามารถวัดกระแสไฟฟ้าได้ในช่วง 0 ถึง 10 A โดยมีสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์เป็นแรงดันทุติยภูมิ (secondary voltage: V_s) ที่เป็นสัญญาณอนาล็อก 0 ถึง 4 V ตามความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันทุติยภูมิและกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดเพิ่มเติมไว้ในภาคผนวก ก.3

วงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอดีซีทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนรูปสัญญาณแรงดันทุติยภูมิ (V_s) ของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP ที่เป็นสัญญาณอนาล็อก 0 ถึง 4.0 V ไปเป็นสัญญาณอนาล็อกกระแสไฟฟ้าอินพุต (i_{ADC}) ที่มีแรงดันในช่วง 0 ถึง 3.0 V ซึ่งเหมาะสมต่อการแปลงเอทูดิจิตอลไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้งาน โดยวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอดีซีนี้ได้เชื่อมต่อกับไฟเลี้ยงดีซี +3.3 V เพื่อให้ได้สัญญาณอนาล็อกที่เป็นเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอดีซีที่มีแรงดันสูงสุดไม่เกิน 3.3 V เท่ากับแรงดันดีซีพิกัดของไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอดีซีที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยวงจรไฟฟ้า 2 ภาคดังต่อไปนี้

1.) วงจรขยายผลต่าง (differential amplifier) ทำหน้าที่ขยายหรือลดขนาดสัญญาณแรงดันทุติยภูมิของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าให้ได้สัญญาณเอาต์พุตเป็นแรงดันอนาล็อก 0 ถึง 3.0 V ซึ่ง

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ออปแอมป์เบอร์ OP284 นำมาสร้างเป็นวงจรขยายผลต่าง เนื่องจากออปแอมป์เบอร์นี้มีความแม่นยำสูงและเป็นที่ยอมรับในการใช้งานกับวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอดีซี โดยทั่วไป ซึ่งรายละเอียดเพิ่มเติมที่เกี่ยวข้องกับออปแอมป์เบอร์นี้ได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ค.5

2.) วงจรป้องกันขาเอดีซี (ADC input protection) ทำหน้าที่ป้องกันขาเอดีซีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่ให้เกิดความเสียหายเมื่อได้รับสัญญาณอนาล็อกที่มียอดแหลม (spike) และมีแรงดันเกิน 3.3 V วงจรป้องกันขาเอดีซีประกอบด้วยวงจร 2 ภาคเชื่อมต่ออนุกรมกัน วงจรแรกคือวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) ที่มีตัวต้านทาน 100 Ω และตัวเก็บประจุ 1000 pF และวงจรที่สองคือวงจรเอดีซีคลอมป์ (ADC clamping) ที่มีไดโอดชอททกี (schottky) เบอร์ BAR43S เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันดีซี +3.3 V เพื่อทำหน้าที่ตัดสัญญาณอนาล็อกที่มีแรงดันเกิน 3.3 V ทิ้งไป โดยวงจรป้องกันขาเอดีซีดังกล่าวนี้ได้ประยุกต์ใช้ตามรายงานแอปพลิเคชัน (application report) ระบบอินเวอร์เตอร์พีวีไมโครกริดของบริษัท Texas Instruments (Tao & Xue, 2013) ซึ่งได้ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ซีรีส์ C2000 รุ่นเดียวกับงานวิทยานิพนธ์นี้

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอดีซีที่ใช้ในวงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบัสตั้นสามารถพิจารณาได้จากอัตราขยายของวงจรขยายผลต่างได้ดังนี้

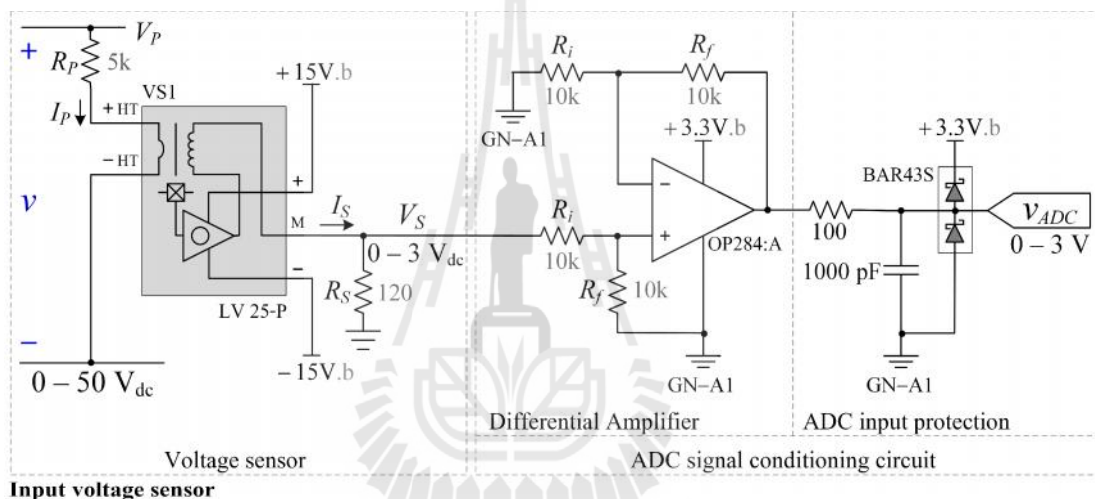
$$i_{ADC} = \frac{R_f}{R_i} V_S \quad (6.2)$$

โดยที่ i_{ADC} คือ สัญญาณอนาล็อกกระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบัสตั้น
 V_S คือ สัญญาณแรงดันหตุยุมิของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าอินพุต
 R_i คือ ค่าความต้านทานอินพุตของวงจรขยายผลต่าง
 และ R_f คือ ค่าความต้านทานย้อนกลับของวงจรขยายผลต่าง

เนื่องจากวงจรขยายผลต่างมีสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณแรงดันหตุยุมิของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า (V_S) สูงสุดเท่ากับ 4.0 V และมีสัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการคือสัญญาณอนาล็อกกระแสไฟฟ้าอินพุต (i_{ADC}) ที่มีแรงดันสูงสุดเท่ากับ 3.0 V กำหนดให้ตัวต้านทานอินพุตของวงจรขยายผลต่าง (R_i) เท่ากับ 10 k Ω แทนค่าลงในสมการที่ (6.2) จะได้ตัวต้านทานย้อนกลับของวงจรขยายผลต่าง (R_f) เท่ากับ 7.5 k Ω โดยในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ตัวต้านทานของวงจรขยายผลต่างที่มีค่าความผิดพลาด 1% เพื่อให้ได้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่มีความแม่นยำสูง

6.3.6 วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์

วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ทำหน้าที่วัดแรงดันของแผงพีวีหรือแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ (v) วงจรเซนเซอร์ดังกล่าวนี้มีลักษณะวงจรที่คล้ายกับวงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ กล่าวคือเป็นวงจรที่ประกอบด้วยวงจรไฟฟ้า 2 ภาคเชื่อมต่ออนุกรมกัน นั่นคือ เซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P และวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอ็ดจี โดยมิด้านอินพุตของวงจรเชื่อมต่อกับคร่อมตัวเก็บประจุอินพุต (C_{in}) ของวงจรแปลงผันบูสต์และมีด้านเอาต์พุตของวงจรเชื่อมต่อกับพอร์ตเอ็ดจีซีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1 หรือหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์

วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ที่ได้ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ สามารถวัดแรงดันได้สูงสุดเท่ากับ 50 V ตามข้อกำหนดของแรงดันอินพุตพิกัดของวงจรแปลงผันบูสต์ที่ได้ออกแบบไว้ โดยได้ทำการต่อขดลวดปฐมภูมิของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเข้ากับตัวต้านทานปฐมภูมิ (primary resistor: R_p) เพื่อจำกัดปริมาณกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิพิกัด ($I_p = I_{PN} = 10 \text{ mA}$) สำหรับกำหนดค่าแรงดันปฐมภูมิพิกัด (primary nominal voltage: V_{PN}) หรือพิสัยในการวัดแรงดันดีซีของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P เท่ากับ 50 V ตามกฎของโอห์มได้ดังนี้

$$V_{PN} = I_{PN} R_p \quad (6.3)$$

โดยที่ V_{PN} คือ แรงดันปฐมภูมิพิคคของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P
 I_{PN} คือ กระแสไฟฟ้าปฐมภูมิพิคค เมื่อ $I_{PN} = 10 \text{ mA}$
 และ R_p คือ ตัวต้านทานปฐมภูมิของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P

พิจารณาค่าตัวต้านทานปฐมภูมิ (R_p) ของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าโดยการแทนค่าแรงดันปฐมภูมิพิคค (V_{PN}) เท่ากับ 50 V และกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิพิคค (I_{PN}) เท่ากับ 10 mA ลงในสมการที่ (6.3) จะได้ตัวต้านทานปฐมภูมิ (R_p) เท่ากับ $5 \text{ k}\Omega$ ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ใช้ตัวต้านทานปฐมภูมิเท่ากับ $5 \text{ k}\Omega$ ที่มีค่าความผิดพลาดต่ำและมีพิคคกำลังมากกว่า $(10 \text{ mA})^2 \times 5 \text{ k}\Omega = 0.5 \text{ W}$

ด้านทุติยภูมิของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P มีการเชื่อมต่อกับวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอดีซีและแหล่งจ่ายแรงดันดีซี $\pm 15 \text{ V}$ เช่นเดียวกับเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า ซึ่งการต่อเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าในลักษณะดังกล่าวนี้ส่งผลทำให้เซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้ามีสัญญาณเอาต์พุตเป็นกระแสไฟฟ้าทุติยภูมิ (secondary current: I_s) ในช่วง 0 ถึง 25 mA เมื่อมีกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิเท่ากับ 0 ถึง 10 mA ตามความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าทุติยภูมิและกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดเพิ่มเติมไว้ในภาคผนวก ก.4 โดยสัญญาณแรงดันทุติยภูมิของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์นี้เท่ากับผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้าทุติยภูมิ (I_s) และตัวต้านทานทุติยภูมิ (secondary resistor: R_s) ที่มีค่าระหว่าง 100Ω ถึง 350Ω (LEM, 2012) ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกใช้ตัวต้านทานทุติยภูมิเท่ากับ 120Ω ที่มีค่าความผิดพลาดต่ำ $\pm 1\%$ เพื่อให้ได้สัญญาณแรงดันทุติยภูมิพิคคของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 3.0 V ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากกฎของโอห์มดังสมการต่อไปนี้

$$V_{SN} = I_{PN} R_s \quad (6.4)$$

โดยที่ V_{SN} คือ แรงดันทุติยภูมิพิคคของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P
 I_{SN} คือ กระแสไฟฟ้าทุติยภูมิพิคค เมื่อ $I_{SN} = 25 \text{ mA}$
 และ R_s คือ ตัวต้านทานทุติยภูมิของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P

การต่อใช้งานเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P ที่มีตัวต้านทานปฐมภูมิและตัวต้านทานทุติยภูมิเท่ากับ $5 \text{ k}\Omega$ และ 120Ω ตามลำดับนั้นส่งผลทำให้เซนเซอร์ดังกล่าวสามารถวัดแรงดันดีซีได้ในช่วง 0 ถึง 50 V และมีสัญญาณแรงดันทุติยภูมิที่เป็นสัญญาณอนาล็อกในช่วง 0 ถึง

3.0 V ป้อนให้กับวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอ็ดจีซี ซึ่งมีลักษณะของวงจรที่เหมือนกับวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอ็ดจีซีที่ได้ใช้งานในวงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ โดยมีวงจรไฟฟ้า 2 ภาคคือวงจรขยายผลต่างและวงจรเอ็ดจีซีเคลมปี้งเชื่อมต่อกันเหมือน ส่วนที่แตกต่างกันคือค่าพารามิเตอร์ตัวต้านทานอินพุต (R_f) และตัวต้านทานย้อนกลับ (R_i) ของวงจรขยายผลต่าง ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากอัตราขยายของวงจรผลต่างได้ดังนี้

$$v_{ADC} = \frac{R_f}{R_i} V_S \quad (6.5)$$

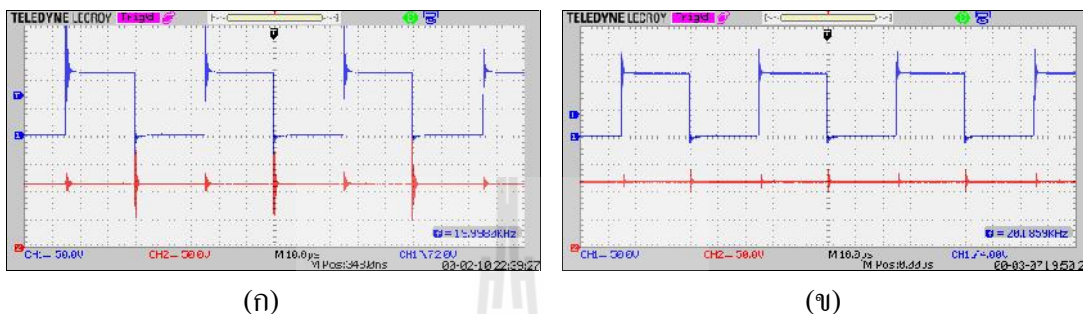
โดยที่ v_{ADC} คือ สัญญาณอนาล็อกแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์
และ V_S คือ สัญญาณแรงดันทุติยภูมิของเซนเซอร์วัดแรงดันอินพุต เมื่อ $V_S = I_S R_S$

กำหนดให้ตัวต้านทานอินพุตของวงจรขยายผลต่าง (R_i) เท่ากับ 10 k Ω ทำการแทนค่าแรงดันทุติยภูมิของเซนเซอร์วัดแรงดันอินพุต (V_S) สูงสุดเท่ากับ 3.0 V และสัญญาณอนาล็อกแรงดันอินพุต (v_{ADC}) สูงสุดที่ต้องการเท่ากับ 3.0 V ลงในสมการที่ (6.5) จะได้ตัวต้านทานย้อนกลับของวงจรขยายผลต่าง (R_f) เท่ากับ 10 k Ω ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ตัวต้านทานของวงจรขยายผลต่างทั้งหมดเท่ากับ 10 k Ω

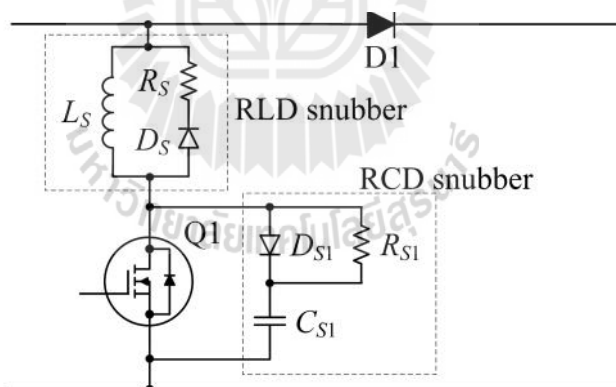
6.3.7 การปรับปรุงวงจรแปลงผันบูสต์เพื่อลดขนาดแรงดันที่มียอดแหลม

ในรูปที่ 6.10 คือผลการทดสอบของวงจรแปลงผันบูสต์ด้วยสัญญาณพัลส์ 20 kHz ที่มีค่าวัฏจักรการทำงานเท่ากับ 50 % กับแหล่งจ่ายดีซีที่สร้างขึ้นเองโดยใช้หม้อแปลงปรับแรงดันได้ (variac transformer) และวงจรเรียงกระแส ซึ่งได้ทำการปรับโวลต์และหม้อแปลงให้แรงดันและกระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีค่าใกล้เคียงกับพิกัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าของแผงพีวีนั้นคือ 60 V และ 8 A ตามลำดับ ซึ่งก่อนการปรับปรุงพบว่า สัญญาณแรงดันดีซีเอาต์พุตและสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟตกำลัง Q1 ของวงจรแปลงผันบูสต์มีขนาดแรงดันสไปร์ท (voltage spike) สูงมากกว่า 50 V ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 6.10 (ก) ดังนั้นจึงได้ทำการปรับปรุงวงจรแปลงผันบูสต์ใหม่เพื่อลดขนาดแรงดันที่มียอดแหลมของสัญญาณแรงดันดีซีของวงจรแปลงผันบูสต์ โดยการเพิ่มวงจรสแน็บเบอร์ให้กับมอสเฟตกำลัง Q1 ที่แสดงในรูปที่ 6.11 ซึ่งวงจรสแน็บเบอร์ของมอสเฟตกำลัง Q1 นี้ประกอบด้วยสแน็บเบอร์ 2 ชุดดังนี้

- 1.) สนับเบอร์อาร์แอลดี (RLD snubber) ประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และ ไดโอด ทำหน้าที่ปรับปรุงพลวัตการสวิตช์ของมอสเฟตในขณะที่เริ่มนำกระแสไฟฟ้า (turn-on)
- 2.) สนับเบอร์อาร์ซีดี (RCD snubber) ประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และ ไดโอด ทำหน้าที่ปรับปรุงพลวัตการสวิตช์ของมอสเฟตกำลังในขณะที่เริ่มหยุดนำกระแสไฟฟ้า (turn-off)



รูปที่ 6.10 ผลการทดสอบของวงจรแปลงผันบูสต์ด้วยสัญญาณพัลส์ 20 kHz ที่ค่าวัฏจักร 50 %
 (ก) แรงดัน V_{DS} ของมอสเฟตกำลัง (สีน้ำเงิน) และแรงดันดีซี (สีแดง) ก่อนปรับปรุง
 (ข) แรงดัน V_{DS} ของมอสเฟตกำลัง (สีน้ำเงิน) และแรงดันดีซี (สีแดง) หลังปรับปรุง



รูปที่ 6.11 วงจรสับเบอร์อาร์แอลดีและวงจรสับเบอร์อาร์ซีดีของมอสเฟตกำลัง Q1

การออกแบบวงจรสับเบอร์ของมอสเฟตกำลัง Q1 นั้นสามารถพิจารณาได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟตและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอสเฟตกำลัง ตามวิธีการออกแบบวงจรสับเบอร์สำหรับอิเล็กทรอนิกส์กำลังของ Rudy Severns (2008) ซึ่งได้พารามิเตอร์ของวงจรสับเบอร์ที่ใช้งานตามตารางที่ 6.3 โดยหลังการปรับปรุงวงจรแปลงผันบูสต์

ใหม่พบว่า สัญญาณแรงดันคิซีเอาต์พุตและสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟตกำลัง Q1 ของวงจรแปลงผันบูสต์มีขนาดแรงดันสไปร์ตกลงอย่างมาก ซึ่งแสดงในรูปที่ 6.10 (ข)

ตารางที่ 6.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในงานในวงจรสับเบอร์ของมอสเฟตกำลัง Q1

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์
ตัวต้านทานสับเบอร์อาร์แอลดี	R_S	8.2 Ω , 3 W
ตัวเหนี่ยวนำสับเบอร์อาร์แอลดี	L_S	1 μ H, 10 A
ไดโอดสับเบอร์อาร์แอลดี	D_S	HFA15TB60PBF
ตัวต้านทานสับเบอร์อาร์ซีดี	R_{S1}	–
ตัวเก็บประจุสับเบอร์อาร์ซีดี	C_{S1}	150 pF, 400 V
ไดโอดสับเบอร์อาร์ซีดี	D_{S1}	HFA15TB60PBF

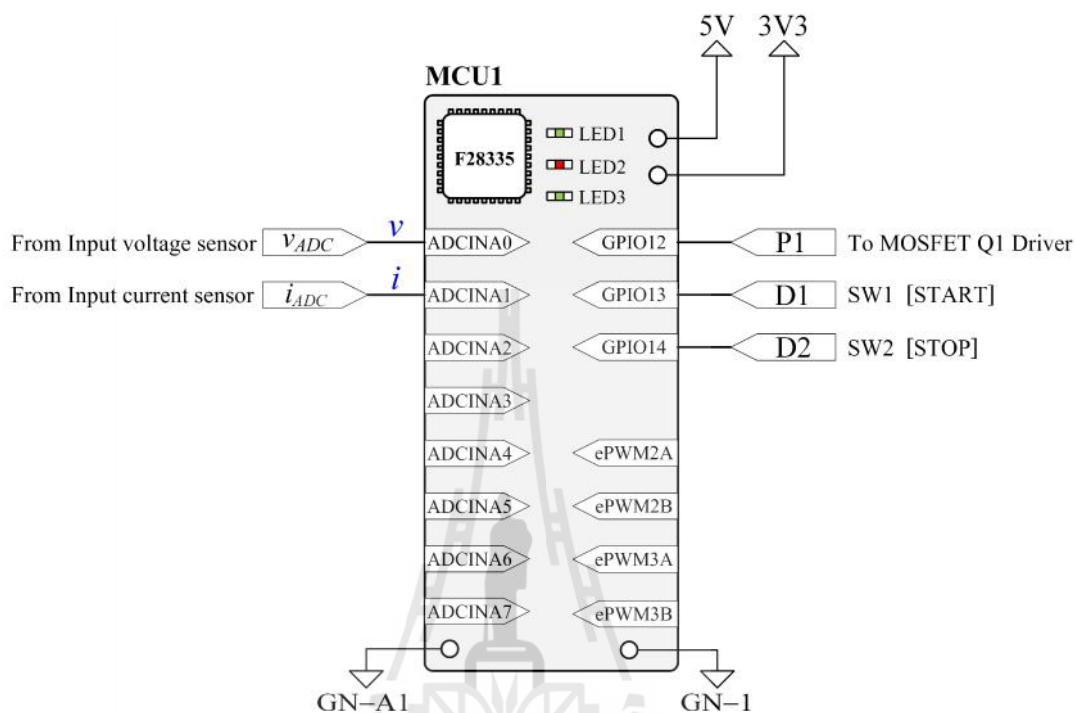
6.3.8 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1 ทำหน้าที่เป็นหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเคลื่อนที่สร้างขึ้นโดยใช้ชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 Experimental kits ของบริษัท Texas Instruments ที่มีหน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (digital signal controller: DSC) ขนาด 32 บิต โดยรายละเอียดเพิ่มเติมและความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์นี้ได้อธิบายไว้ในภาคผนวก การเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1 หรือหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเคลื่อนที่แสดงในรูปที่ 6.12 แสดงถึงการเชื่อมต่อพอร์ตเอ็ดซีและขาอินพุต/เอาต์พุตของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ไปยังวงจรในส่วนต่าง ๆ ของวงจรแปลงผันบูสต์ดังนี้

- 1.) พอร์ตเอ็ดซี สำหรับการแปลงเอาต์พุตของสัญญาณอนาล็อก v_{ADC} และ i_{ADC} ตามลำดับ
 - A0 (ADCINA0) เชื่อมต่อมาจากด้านเอาต์พุตของวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันอินพุต
 - A1 (ADCINA1) เชื่อมต่อมาจากด้านเอาต์พุตของวงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าอินพุต
- 2.) ขาดิจิตอลอินพุต/เอาต์พุต
 - 12 (GPIO12) ทำหน้าที่เป็นขาเอาต์พุตของหน่วยเอ็มพีพีทีที่จ่ายสัญญาณขับขาเกต P1 ไปยังด้านอินพุตของวงจรขับขาเกตมอสเฟตกำลัง Q1
 - 13 (GPIO13) ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ควบคุมการทำงานของหน่วยเอ็มพีพีที (RUN)
 - 14 (GPIO14) ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ควบคุมการทำงานของหน่วยเอ็มพีพีที (STOP)
- 3.) กราวด์ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1
 - GN-1 เชื่อมต่อไปยังกราวด์ด้านอินพุตของวงจรขับขาเกตมอสเฟตกำลัง Q1

GN-A1

เชื่อมต่อไปยังกราวด์ของวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันอินพุตและวงจร
เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าอินพุต



รูปที่ 6.12 การเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1

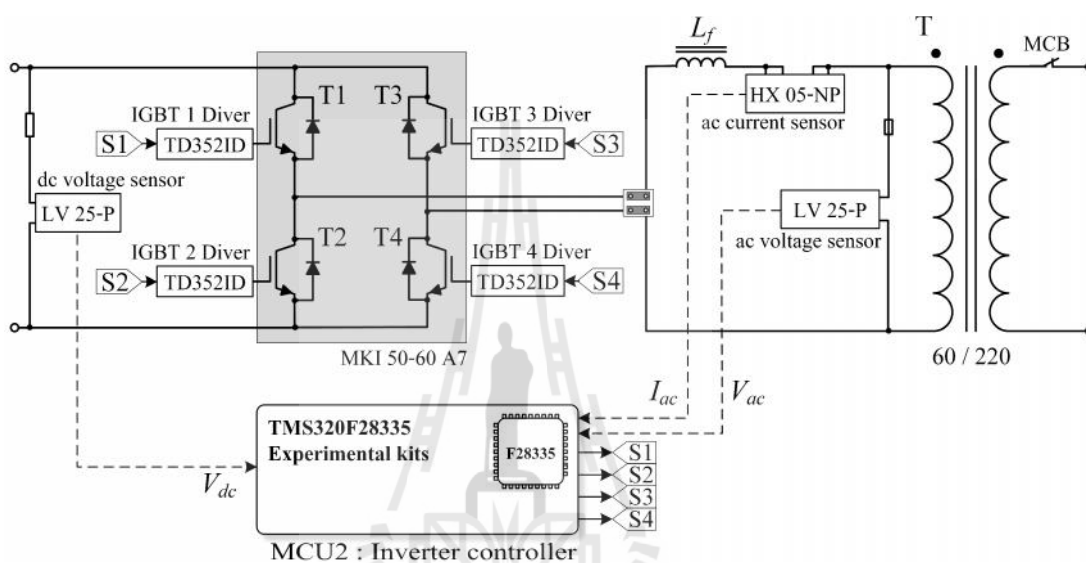
6.4 วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว

ชุดวงจรต้นแบบของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวหรือวงจรภาคที่สองที่แสดงใน

รูปที่ 6.13 ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 1.) โมดูลไอจีบีทีเฮชบริดจ์ (H-bridge IGBT)
- 2.) ตัวเหนี่ยวนำ (L_f) 5 mH
- 3.) หม้อแปลง (T) 60/220 V ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 500 VA
- 4.) วงจรขับเคลื่อนของไอจีบีที 4 ชุด (IGBT x Driver) ทำหน้าที่ขับเคลื่อนไอจีบีทีทั้ง 4 ตัว
- 5.) วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันดีซี (dc voltage sensor) ทำหน้าที่วัดแรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์
- 6.) วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันกริด (ac voltage sensor) ทำหน้าที่วัดแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลงหรือแรงดันกริดที่เป็นแรงดันปฐมภูมิของหม้อแปลง

- 7.) วงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริด (ac current sensor) ทำหน้าที่วัดกระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลงหรือกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง
- 8.) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2 (TMS320F28335 Experimental kits) ทำหน้าที่เป็นชุดควบคุมหรือระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรมอเตอร์ที่ประกอบด้วยตัวควบคุมแรงดันดีซี ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด และเฟสล็อกคูล



รูปที่ 6.13 ชุดวงจรต้นแบบวงจรมอเตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่ใช้งาน

การออกแบบสร้างชุดวงจรต้นแบบของวงจรมอเตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวนั้นได้ใช้ค่าพิกัดแรงดันและกำลังไฟฟ้าตามวงจรแปลงผันบูสต์ที่เป็น วงจรภาคแรกและบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้งานได้ดังนี้

วงจรมอเตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว

กำลังงานพิกัด (P_{rated})	320 W
แรงดันดีซีอินพุตพิกัด ($V_{dc, rated}$)	100 V
แรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลงพิกัด ($V_{ac, rated}$)	60 V
ความถี่การสวิตช์ (f_{sw}^{inv})	20 kHz

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2 (TMS320F28335 experimenter kit)

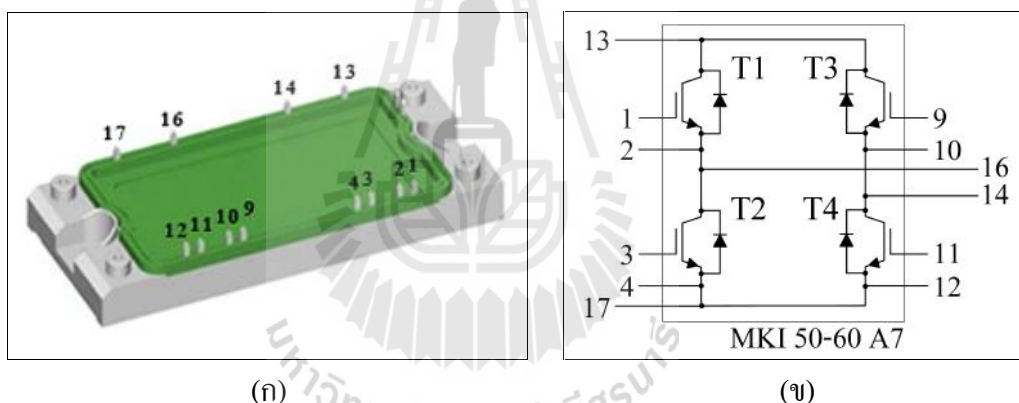
แรงดันดีซีพิกัดหรือไฟเลี้ยงของบอร์ด	3.3 V
แรงดันอนาล็อกที่แปลงเป็นตัวเลขฐานสอง	0 ถึง 3.0 V

ตัวเลขฐานสองที่ได้จากการแปลงแรงดันอนาล็อก

0 ถึง 4095

6.4.1 โมดูลไอจีบีทีเฮชบริดจ์

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้โมดูลไอจีบีทีเฮชบริดจ์ IXYS รุ่น MKI 50-06 A เป็นอุปกรณ์สวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว ซึ่งมีโมดูลดังกล่าวนี้มีสวิตช์ไอจีบีทีช่องเอ็น (N-channel IGBT) ทั้งหมด 4 ตัวได้แก่ไอจีบีที T1 T2 T3 และ T4 เชื่อมต่อกันแบบเฮชบริดจ์ (H-bridge) บรรจุอยู่ในโมดูลกล่องสี่เหลี่ยมที่มีขาทั้งหมด 12 ขา ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 6.14 โดยที่ไอจีบีทีแต่ละตัวนั้นมีไดโอดที่ต่อขนานกลับด้าน (antiparallel) และมีข้อมูลเฉพาะที่สำคัญแสดงได้ในตารางที่ 6.4 ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นอุปกรณ์สวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวได้ เนื่องจากไอจีบีทีแต่ละตัวนั้นสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 72 A และสามารถทนแรงดันย้อนกลับได้สูงสุด 600 V



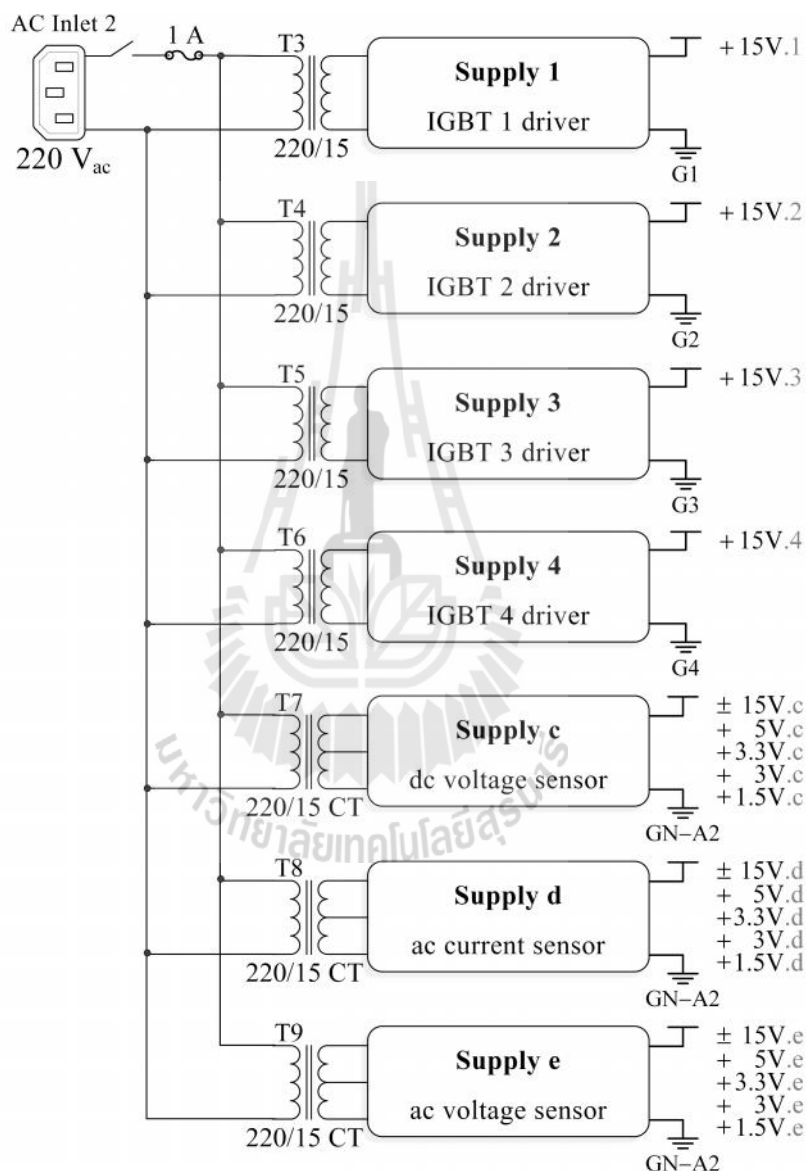
รูปที่ 6.14 โมดูลไอจีบีที MKI 50-06 A7 (ก) รูปร่างตัวถัง (ข) สัญลักษณ์และชื่อขา

ตารางที่ 6.4 ข้อมูลเฉพาะที่สำคัญโมดูลไอจีบีที MKI 50-06 A7

รายละเอียด	พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	
1. แรงดันขา C-E สูงสุด (Maximum collector-emitter voltage)	$V_{CE(off,max)}$	600	V
2. แรงดันขา G-E สูงสุด (Maximum gate-emitter voltage)	$V_{GE(max,min)}$	± 20	
3. แรงดันขา G-E เริ่มต้น (Gate threshold voltage)	$V_{GE(th)}$	4.5	
4. กระแสไฟฟ้าขา C สูงสุด (Maximum collector current)	$I_{C(max)}$	72	A
5. ค่าประจุไฟฟ้าการชาร์จขาเกต (gate charge)	Q_g	120	nC

6.4.2 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันดีซี

วงจรแหล่งจ่ายแรงดันดีซีที่แสดงในรูปที่ 6.15 ทำหน้าที่สร้างแรงดันดีซีหรือไฟเลี้ยงดีซีที่มีการคุมค่าแรงดันป้อนให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ของวงจรขับเคลื่อนขาเกตและวงจรเซนเซอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว



รูปที่ 6.15 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันดีซีที่ใช้ในงานในวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว

วงจรแหล่งจ่ายแรงดันคัตซีซีที่มีเต้ารับเอซี (AC inlet) 220 V เป็นแหล่งจ่ายแรงดันเอซีที่ใช้ในการสร้างแรงดันคัตซีซีที่มีการคุมค่าแรงดันสำหรับป้อนให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่ใช้งานวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งวงจรแหล่งจ่ายแรงดันคัตซีซีเป็นวงจรย่อยทั้งหมด 7 ชุดดังต่อไปนี้

วงจรแหล่งจ่ายคัตซีซีชุด 1 2 3 และ 4 ทำหน้าที่สร้างและจ่ายแรงดันคัตซีซี +15 V ป้อนให้กับวงจรขับเคลื่อนของไอจีบีทีแต่ละชุด

วงจรแหล่งจ่ายคัตซีซีชุด c (supply c) ทำหน้าที่สร้างและจ่ายแรงดันคัตซีซี ± 15 V +5 V +3.3V +3 V และ +1.5 V ให้กับวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันคัตซีซี

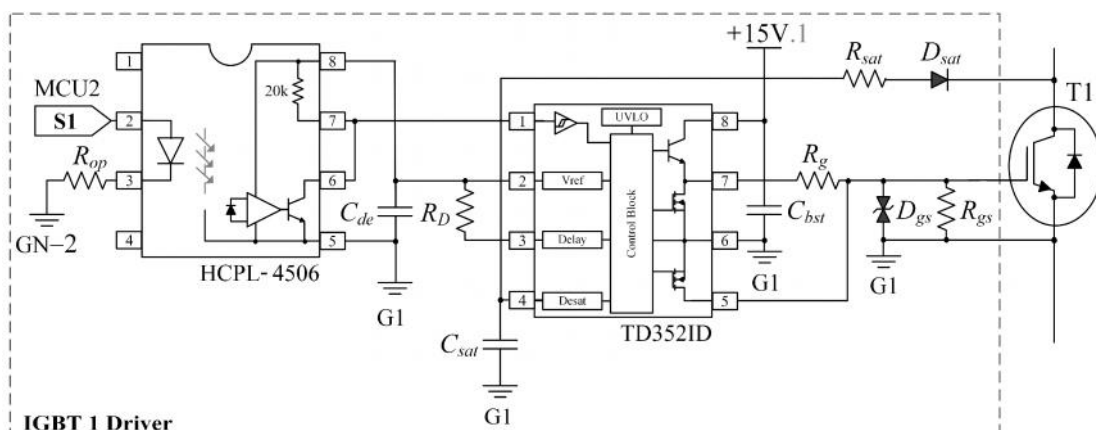
วงจรแหล่งจ่ายคัตซีซีชุด d (supply d) ทำหน้าที่สร้างและจ่ายแรงดันคัตซีซี ± 15 V +5 V +3.3V +3 V และ +1.5 V ให้กับวงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริด

วงจรแหล่งจ่ายคัตซีซีชุด e (supply e) ทำหน้าที่สร้างและจ่ายแรงดันคัตซีซี ± 15 V +5 V +3.3V +3 V และ +1.5 V ให้กับวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันกริด

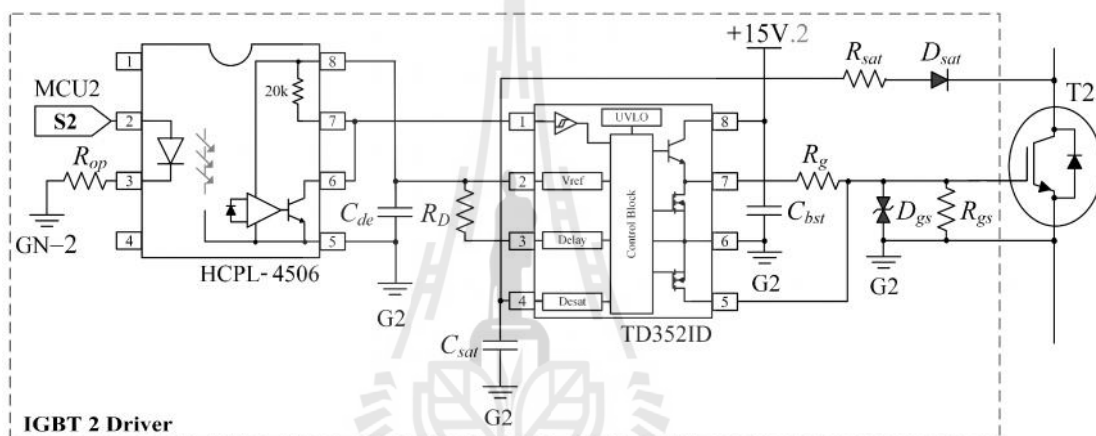
วงจรแหล่งจ่ายแรงดันคัตซีซีแต่ละชุดนั้นประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสเต็มบริดจ์ และไอซีคุมค่าแรงดันเชื่อมต่อกันตามลำดับ ซึ่งได้แสดงแผนภาพของวงจรดังกล่าวนี้ไว้ในภาคผนวก ก

6.4.3 วงจรขับเคลื่อนของไอจีบีที

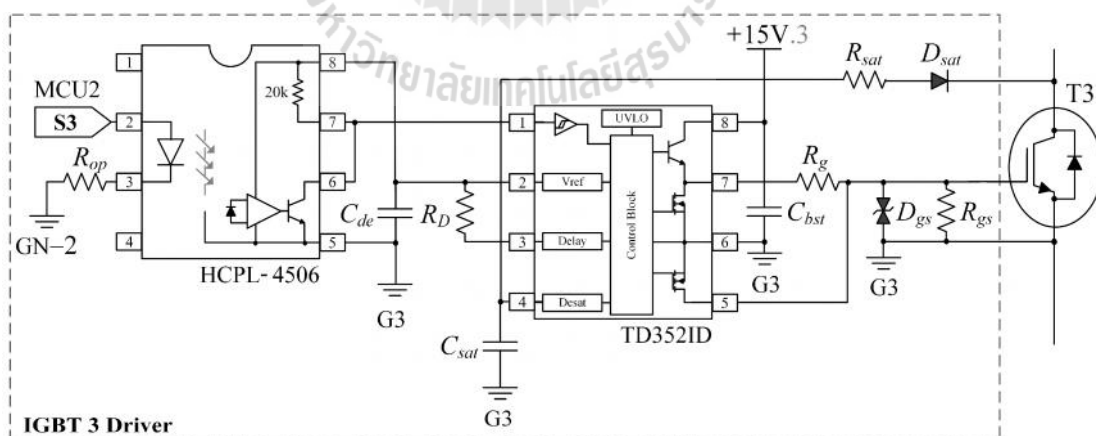
วงจรขับเคลื่อนของไอจีบีทีที่ใช้งานในวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวนั้นประกอบด้วยวงจรขับเคลื่อนไอจีบีทีทั้งหมด 4 ชุดคือ วงจรขับเคลื่อนไอจีบีทีชุดที่ 1 (IGBT 1 Driver) วงจรขับเคลื่อนไอจีบีทีชุดที่ 2 (IGBT 2 Driver) วงจรขับเคลื่อนไอจีบีทีชุดที่ 3 (IGBT 3 Driver) และวงจรขับเคลื่อนไอจีบีทีชุดที่ 4 (IGBT 4 Driver) สำหรับทำหน้าที่ขับเคลื่อนของไอจีบีที T1 T2 T3 และ T4 ของโมดูลไอจีบีทีเซมิบริดจ์ MKI 50-06 A7 ตามลำดับที่แสดงในรูปที่ 6.16 (ก) 6.16 (ข) 6.16 (ค) และ 6.16 (ง) ตามลำดับ ซึ่งวงจรดังกล่าวนี้มีด้านอินพุตของวงจรเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2 ที่ทำหน้าที่เป็นระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์สร้างและจ่ายสัญญาณขับเคลื่อน S1 S2 S3 และ S4 ไปยังวงจรขับเคลื่อนไอจีบีทีแต่ละชุด



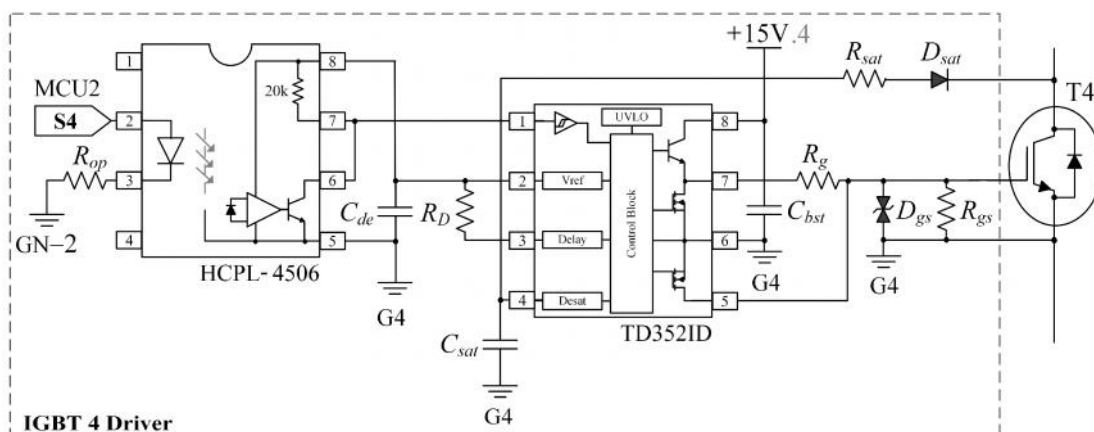
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 6.16 วงจรขับขาเกตของไอจีบีทีทั้ง 4 ชุดที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว

- (ก) วงจรขับขาเกตไอจีบีทีชุดที่ 1 ทำหน้าที่ขับขาเกตของไอจีบีที T1
- (ข) วงจรขับขาเกตไอจีบีทีชุดที่ 2 ทำหน้าที่ขับขาเกตของไอจีบีที T2
- (ค) วงจรขับขาเกตไอจีบีทีชุดที่ 3 ทำหน้าที่ขับขาเกตของไอจีบีที T3
- (ง) วงจรขับขาเกตไอจีบีทีชุดที่ 4 ทำหน้าที่ขับขาเกตของไอจีบีที T4

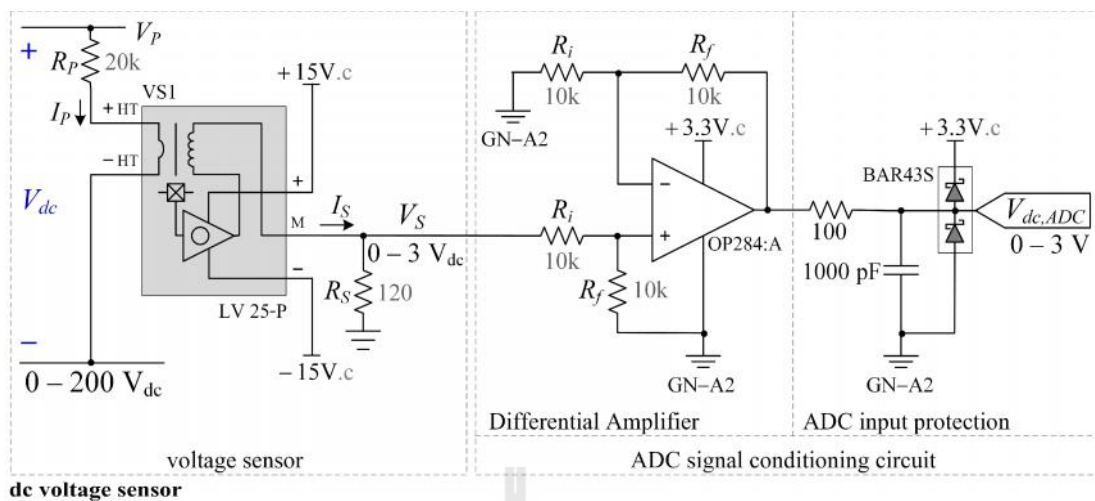
วงจรขับขาเกตไอจีบีทีแต่ละชุดมีลักษณะวงจรที่เหมือนกับวงจรขับขาเกตของมอสเฟตที่ใช้ในงานในวงจรแปลงผันบูสต์ นั่นคือประกอบด้วยไอซีขับขาเกตเบอร์ TD352ID และตัวเชื่อมต่อผ่านแสงเบอร์ HCPL-4506 ที่เหมือนกัน โดยวงจรขับขาเกตไอจีบีทีแต่ละชุดนั้นมีการเชื่อมต่อวงจรแหล่งจ่ายแรงดันดีซี +15 V คนละวงจรมันคือวงจรแหล่งจ่ายแรงดันดีซีชุด 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ เพื่อให้วงจรขับขาเกตไอจีบีทีแต่ละชุดนั้นสามารถทำงานได้อย่างอิสระ โดยแยกออกจากกันตามลักษณะลอจิกของสัญญาณขับขาเกตที่ได้รับจากระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์ ในส่วนของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้งานในวงจรขับขาเกตไอจีบีทีแต่ละชุดนั้นเป็นพารามิเตอร์ชุดเดียวกันกับพารามิเตอร์ของวงจรขับขาเกตมอสเฟตกำลังที่ใช้งานในวงจรแปลงผันบูสต์ ซึ่งแสดงได้ในตารางที่ 6.5 ส่วนที่แตกต่างกันคือวงจรขับขาเกตไอจีบีทีนั้นได้ใช้ตัวต้านทานขาเกต (R_g) เท่ากับ 47Ω ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถพิจารณาได้จากรายละเอียดคู่มือผลิตภัณฑ์ของไอซีขับขาเกตเบอร์ TD352ID ตัวเชื่อมต่อผ่านแสงเบอร์ HCPL-4506 และ โมดูลไอจีบีที MKI 50-06 A7 ที่ใช้งานเหมือนกับวิธีการเลือกพารามิเตอร์ของวงจรขับขาเกตของมอสเฟตที่ใช้ในวงจรแปลงผันบูสต์ ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 6.3.4

ตารางที่ 6.5 อุปกรณ์และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรขับขาเกตไอจีบีทีชุดที่ 1 – 4

รายละเอียด	พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ตัวต้านทานอินพุตของตัวเชื่อมต่อผ่านแสง	R_{op}	330 Ω
ตัวต้านทานของวงจรที่ตรวจสอบความผิดปกติของไอจีบีที	R_{sat}	1 k Ω
ตัวเก็บประจุของวงจรที่ตรวจสอบความผิดปกติของไอจีบีที	C_{sat}	50 pF
ไดโอดของวงจรที่ตรวจสอบความผิดปกติของไอจีบีที	D_{sat}	1N4007
ตัวต้านทานขาเกต	R_g	47 Ω
ตัวต้านทานระหว่างขาเกตและขาอิมิตเตอร์	R_{gs}	10 k Ω
ไดโอดซีเนอร์ระหว่างขาเกตและขาอิมิตเตอร์	D_{gs}	P6KE16CA
ตัวต้านทานประวิง	R_D	4.7 k Ω
ตัวเก็บประจุบูตสเตรป (boostarp capacitor)	C_{bst}	100 nF
ตัวเก็บประจุลดการเชื่อมต่อ (decoupling capacitor)	C_{de}	100 nF

6.4.4 วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันดีซี

วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันดีซีทำหน้าที่วัดแรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวซึ่งเป็นแรงดันดีซีเอาต์พุตของวงจรแปลงผันบูสต์ วงจรเซนเซอร์ดังกล่าวนี้ประกอบด้วยวงจร 2 ภาคคือ เซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P และวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอดีซีเชื่อมต่อกันเช่นเดียวกับวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ โดยมีด้านอินพุตของวงจรเชื่อมต่อกับวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว และมีด้านเอาต์พุตของวงจรเชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2 ที่ทำหน้าที่เป็นระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 6.17



รูปที่ 6.17 วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันคิซีซีที่ใช้ในงานวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว

วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันคิซีซีที่ได้ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้มีลักษณะและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรที่เหมือนกันกับวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบุสต์ โดยเฉพาะใน ส่วนของวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอ็ดซีซีนั้นได้ใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรที่เหมือนกันกับ วงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอ็ดซีซีที่ใช้ในงานวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบุสต์ทุกประการ ส่วนที่แตกต่างกันคือเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P ที่อยู่ภาคแรก ของวงจรมันได้ตัวต้านทานปรัสมภูมิ (R_p) ของเซนเซอร์เท่ากับ $20\text{ k}\Omega$ เพื่อให้เซนเซอร์ดังกล่าวมี แรงดันปรัสมภูมิ (V_{PN}) เท่ากับ 200 V หรือสามารถวัดแรงดันคิซีซีได้สูงสุดเท่ากับ 200 V ซึ่งเป็น แรงดันที่มีค่ามากกว่าแรงดันคิซีซีอินพุตพิกัดของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อให้สามารถ ตรวจวัดแรงดันคิซีซีในช่วงที่มีค่าใกล้เคียงเท่ากับ 100 V ได้อย่างละเอียดและครอบคลุมต่อการ เปลี่ยนแปลงค่าแรงดันคิซีซีที่อาจเกิดขึ้นได้ในสถานะชั่วคราวของการคุมค่าแรงดันคิซีซีอินพุตของวงจร อินเวอร์เตอร์ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 100 V ดังนั้นจึงได้ใช้ตัวต้านทานปรัสมภูมิ (R_p) เท่ากับ $20\text{ k}\Omega$ เชื่อมต่อเข้ากับขดลวดปรัสมภูมิของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P โดยค่าตัวต้านทาน ดังกล่าวนี้สามารถพิจารณาหาได้ตามสมการที่ (6.3) ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 6.3.6

การต่อขดลวดปรัสมภูมิของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P เข้ากับตัวต้านทานปรัสม ภูมิ (R_p) $20\text{ k}\Omega$ นั้นส่งผลทำให้เซนเซอร์ดังกล่าวสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0 ถึง 200 V และมีกระแสไฟฟ้าทุติยภูมิ (I_S) เท่ากับ 0 ถึง 25 mA ดังนั้นจึงได้ใช้ตัวต้านทานทุติยภูมิ (R_S) เท่ากับ $120\text{ }\Omega$ เช่นเดียวกับวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบุสต์ เพื่อให้ เซนเซอร์ดังกล่าวมีแรงดันทุติยภูมิ (V_S) เป็นสัญญาณอนาล็อกที่มีแรงดันในช่วง 0 ถึง 3.0 V

($120 \Omega \times 25 \text{ mA}$) ตามกฎของโอห์มในสมการที่ (6.4) ด้วยเหตุนี้วงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอ็ดซีซีที่ใช้งานในวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันดีซีจึงมีลักษณะและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรที่เหมือนกันกับวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอ็ดซีซีที่ใช้ในวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบัสต์ทุกประการ โดยสามารถคำนวณหาสัญญาณอนาล็อกแรงดันดีซี ($V_{dc,ADC}$) ที่เป็นเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอ็ดซีซีนี้ได้ดังนี้

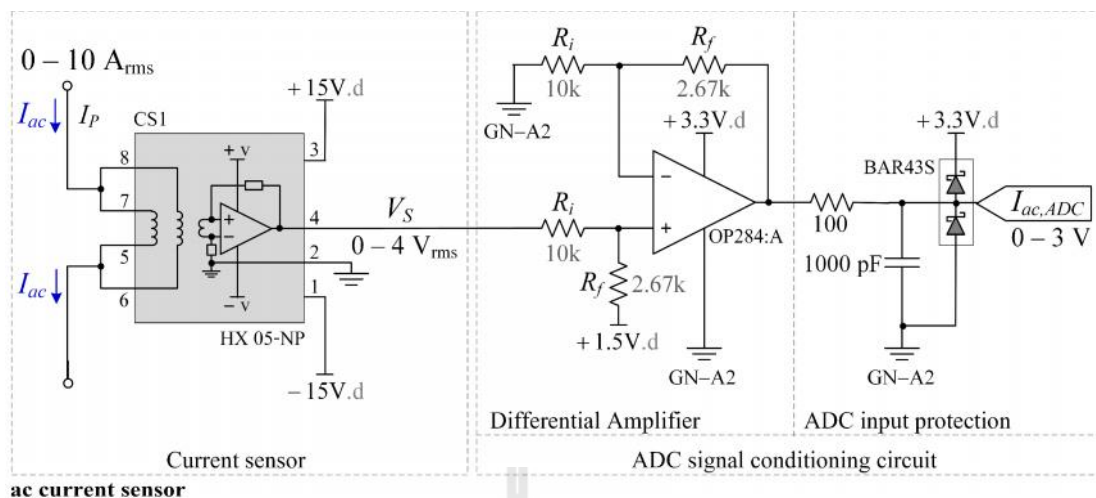
$$V_{dc,ADC} = \frac{R_f}{R_i} V_S \quad (6.6)$$

โดยที่ $V_{dc,ADC}$ คือ สัญญาณอนาล็อกแรงดันดีซี

และ V_S คือ สัญญาณแรงดันทุติยภูมิของเซนเซอร์วัดแรงดันดีซี โดยที่ $V_S = I_S R_S$

6.4.5 วงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริด

วงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริดทำหน้าที่วัดกระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง หรือกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (I_{ac}) วงจรเซนเซอร์ดังกล่าวนี้ประกอบด้วยวงจร 2 ภาคคือ เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP และวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอ็ดซีซีเชื่อมต่อกันตามลำดับ โดยมีด้านอินพุตของวงจรเชื่อมต่อกับวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวและมีด้านเอาต์พุตของวงจรเชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2 ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 6.18 วงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริดที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้มีลักษณะของวงจรที่คล้ายกันกับวงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบัสต์ โดยมีส่วนที่แตกต่างกันคือวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอ็ดซีซีที่ใช้งานนั้นมีด้านอินพุตของวงจรเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันดีซี + 1.5 V เพื่อทำหน้าที่ยก (shift) ระดับสัญญาณแรงดันทุติยภูมิของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า (V_S) ซึ่งเป็นสัญญาณรูปคลื่น ไชน์ที่มีทั้งซีกบวกและซีกลบให้เป็นสัญญาณอนาล็อกที่มีแรงดันในช่วง 0 ถึง 3.0 V



รูปที่ 6.18 วงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริดที่ใช้งานในวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว

เนื่องจากวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวมีกำลังพิกัดเท่ากับ 320 W และมีแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลงเท่ากับ 60 V_{rms} ดังนั้นกระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลงพิกัด ($I_{ac, rated}$) จึงมีค่าเท่ากับ $320 \text{ W} / 60 \text{ V} = 5.33 \text{ A}_{rms}$ ด้วยเหตุนี้จึงได้ออกแบบให้วงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริดนั้นสามารถวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าเอซีในช่วง 0 ถึง 10 A_{rms} โดยได้ทำการต่อขดลวดปฐมภูมิของเซนเซอร์แบบขนานกันเพื่อให้เซนเซอร์ดังกล่าวมีกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิพิกัดเท่ากับ 10 A ซึ่งการต่อเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP ในลักษณะดังกล่าวนี้ทำให้เซนเซอร์มีสัญญาณแรงดันทุติยภูมิ (V_S) เป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีทั้งซีกบวกและซีกลบและมีแรงดันในช่วง 0 ถึง 4.0 V_{rms} ตามความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันทุติยภูมิและกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP ซึ่งได้อธิบายในภาคผนวก ค.3

การออกแบบวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอซีซีที่ใช้ในวงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริดนั้นสามารถพิจารณาได้จากสมการเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอซีซีได้ดังนี้

$$I_{ac,ADC} = \frac{R_f}{R_i} V_S + 1.5 \quad (6.7)$$

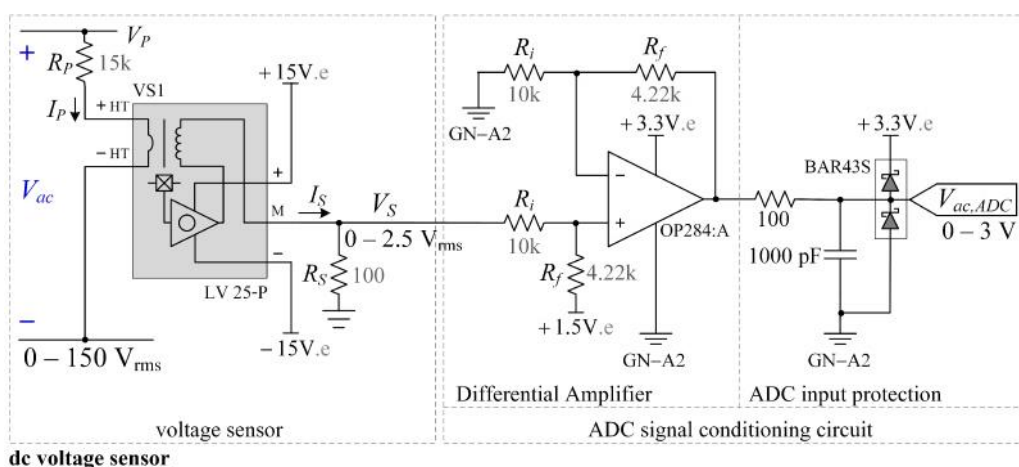
โดยที่ $I_{ac,ADC}$ คือ สัญญาณอนาล็อกกระแสไฟฟ้ากริดเอซีซี

และ V_S คือ สัญญาณแรงดันทุติยภูมิของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริด

สมมติว่าสัญญาณกระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลงที่ต้องการวัดนั้นเป็นรูปคลื่นไซน์ ดังนั้นวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอดีซีบีจึงมีสัญญาณอินพุตสูงสุดเท่ากับค่ายอดของสัญญาณแรงดันหุติยภูมิ (V_S) ของเซนเซอร์นั้นคือ $4\sqrt{2}$ V และมีสัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการคือสัญญาณอนาล็อกกระแสไฟฟ้ากริด ($I_{ac,ADC}$) ที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.0 V งานวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้ตัวต้านทานอินพุตของวงจรขยายผลต่าง (R_i) เท่ากับ 10 k Ω และแทนค่าลงในสมการที่ (6.7) จะได้ตัวต้านทานย้อนกลับของวงจรขยายผลต่าง (R_f) 2.65 k Ω ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ตัวต้านทานอินพุตและตัวต้านทานย้อนกลับของวงจรขยายผลต่าง 10 k Ω และ 2.67 k Ω ตามลำดับ เนื่องจากเป็นตัวต้านทานที่มีค่าความต้านใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้และหาซื้อได้ง่าย

6.4.6 วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันกริด

วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันกริดที่ทำหน้าที่วัดสัญญาณแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (V_{ac}) ประกอบด้วยวงจร 2 ภาคคือ เซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P และวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอดีซีบีเชื่อมต่ออนุกรมกันตามลำดับ โดยมีด้านอินพุตของวงจรเชื่อมต่อกับด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าและมีด้านเอาต์พุตของวงจรเชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2 ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 6.19 วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันกริดที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้มีลักษณะของวงจรที่คล้ายกันกับวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ โดยมีส่วนที่แตกต่างกันคือวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอดีซีบีที่ใช้งานนั้นมีด้านอินพุตของวงจรเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันดิซีซี +1.5 V เพื่อยกระดับสัญญาณแรงดันหุติยภูมิของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า (V_S) ที่เป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ให้เป็นสัญญาณอนาล็อกที่มีแรงดันในช่วง 0 ถึง 3.0 V



รูปที่ 6.19 วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันกริดที่ใช้งานในวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบสร้างวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันกริดให้สามารถวัดสัญญาณแรงดันเอซีได้สูงสุดเท่า $150 \text{ V}_{\text{rms}}$ ($V_{PN} = 150 \text{ V}$) เพื่อสามารถตรวจวัดสัญญาณแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลงในสถานชั่วคราวได้ ซึ่งในสถานะดังกล่าวนี้สัญญาณแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลงอาจมีค่ายอดหรือแอมพลิจูดที่มีค่ามากกว่า 100 V ตามแรงดันคิซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ในสถานะชั่วคราวดังนั้นจึงได้ใช้ตัวต้านทานปฐมภูมิ (R_p) เท่ากับ $15 \text{ k}\Omega$ เชื่อมต่อเข้ากับขดลวดปฐมภูมิของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P โดยค่าตัวต้านทานดังกล่าวนี้สามารถพิจารณาหาได้ตามสมการที่ (6.3) ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 6.3.6 การต่อเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P ในลักษณะดังกล่าวนี้มีผลทำให้เซนเซอร์ดังกล่าวสามารถวัดสัญญาณแรงดันเอซีได้ในช่วง 0 ถึง $150 \text{ V}_{\text{rms}}$ โดยมีเอาต์พุตของเซนเซอร์เป็นกระแสไฟฟ้าทุติยภูมิในช่วง 0 ถึง $25 \text{ mA}_{\text{rms}}$ ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ใช้ตัวต้านทานทุติยภูมิ (R_s) เท่ากับ 100Ω เพื่อให้เซนเซอร์ดังกล่าวมีแรงดันทุติยภูมิ (V_s) เป็นสัญญาณอนาล็อกที่มีแรงดันในช่วง 0 ถึง $2.5 \text{ V}_{\text{rms}}$ ($100 \Omega \times 25 \text{ mA}_{\text{rms}}$) ตามกฎของโอห์มในสมการที่ (6.4)

การออกแบบวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอดีซีที่ใช้ในวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันกริดนั้นสามารถพิจารณาได้จากสมการเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอดีซีได้ดังนี้

$$V_{ac,ADC} = \frac{R_f}{R_i} V_s + 1.5 \quad (6.8)$$

โดยที่ $V_{ac,ADC}$ คือ สัญญาณอนาล็อกแรงดันกริดเอดีซี

และ V_s คือ สัญญาณแรงดันทุติยภูมิของเซนเซอร์วัดแรงดันกริด

สมมติว่าสัญญาณแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลงที่ต้องการวัดนั้นเป็นรูปคลื่นไซน์ ดังนั้นวงจรปรับแต่งสภาพสัญญาณเอดีซีนี้จึงมีสัญญาณอินพุตสูงสุดเท่ากับค่ายอดของสัญญาณแรงดันทุติยภูมิ (V_s) ของเซนเซอร์นั้นคือ $2.5\sqrt{2} \text{ V}$ และมีสัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการคือสัญญาณอนาล็อกแรงดันกริด ($V_{ac,ADC}$) ที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.0 V งานวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้ตัวต้านทานอินพุตของวงจรขยายผลต่าง (R_i) เท่ากับ $10 \text{ k}\Omega$ และแทนค่าลงในสมการที่ (6.8) จะได้ตัวต้านทานย้อนกลับของวงจรขยายผลต่าง (R_f) $4.24 \text{ k}\Omega$ ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ตัวต้านทานอินพุตและตัวต้านทานย้อนกลับของวงจรขยายผลต่าง $10 \text{ k}\Omega$ และ $4.22 \text{ k}\Omega$ ตามลำดับ เนื่องจากเป็นตัวต้านทานที่มีค่าความต้านใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้และหาซื้อได้ง่าย

6.4.7 ตัวเหนี่ยวนำ L_f และหม้อแปลงไฟฟ้า

ตัวเหนี่ยวนำเอซี (L_f) ที่ใช้งานในวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวได้เลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำชนิดแกนแผ่นเหล็กขนาด 5 mH ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 6.20 (ก) โดยตัวเหนี่ยวนำนี้สามารถทนกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้สูงสุดเท่ากับ 10 A ซึ่งมีค่ามากกว่ากระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลงพิกัดที่ได้ออกแบบไว้จึงสามารถนำใช้สร้างชุดวงจรต้นแบบนี้ได้ ส่วนหม้อแปลงไฟฟ้านั้นได้ใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้ามากกว่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว (320 W) นั่นคือได้ใช้หม้อแปลงขนาด 500 VA ที่มีอัตราส่วนแรงดันเท่ากับ 60/220 V ซึ่งแสดงในรูปที่ 6.20 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.20 ตัวเหนี่ยวนำเอซีและหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานในวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว

(ก) ตัวเหนี่ยวนำ L_f ชนิดแกนแผ่นเหล็กขนาด 5mH

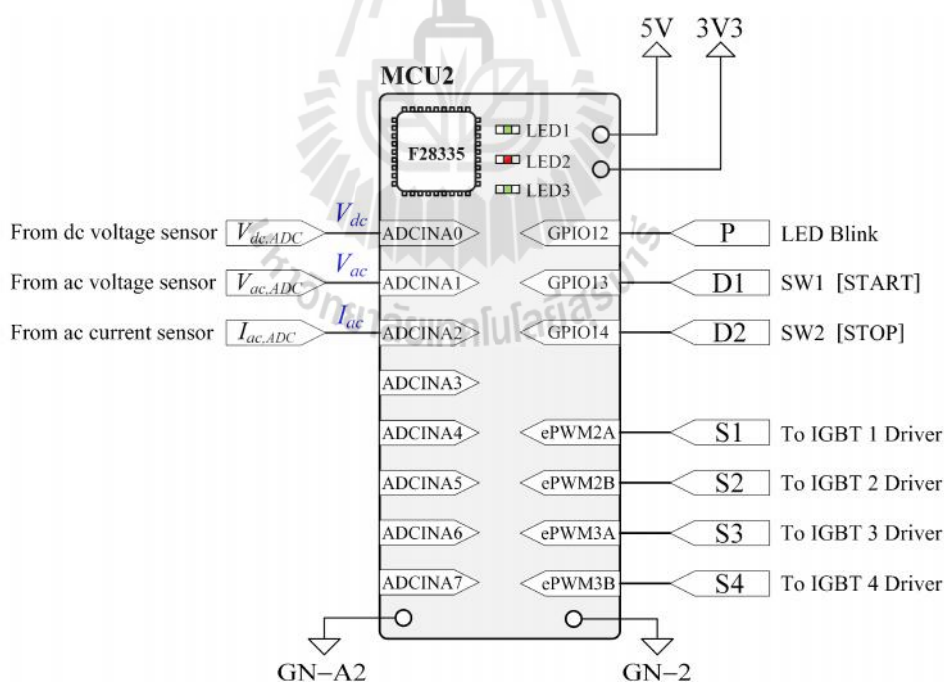
(ข) หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 500 VA ที่มีอัตราส่วนแรงดันเท่ากับ 60/220 V

6.4.8 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2 ทำหน้าที่เป็นชุดควบคุมหรือระบบควบคุมป้องกันกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่สร้างขึ้นโดยใช้ชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 Experimental kits เช่นเดียวกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2 นี้มีการเชื่อมต่อไปยังวงจรต่าง ๆ ที่ใช้งานในวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวตามที่แสดงในรูปที่ 6.12 โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1.) พอร์ตเอดีซี สำหรับการแปลงเอาต์พุตของสัญญาณอนาล็อก $V_{dc,ADC}$ $I_{ac,ADC}$ และ $V_{ac,ADC}$
 - A0 (ADCINA0) เชื่อมต่อมาจากด้านเอาต์พุตของวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันดีซี
 - A1 (ADCINA1) เชื่อมต่อมาจากด้านเอาต์พุตของวงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริด

- A2 (ADCINA2) เชื่อมต่อมาจากค่านเอาต์พุตของวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันกริด
- 2.) ขาเอาต์พุตสัญญาณพีดีบีเอ็มชนิดชั่วคราว
- ePWM2A จ่ายสัญญาณขับขาเกต S1 ป้อนให้วงจรขับขาเกตไอจีบีทีชุดที่ 1
- ePWM2B จ่ายสัญญาณขับขาเกต S2 ป้อนให้วงจรขับขาเกตไอจีบีทีชุดที่ 2
- ePWM3A จ่ายสัญญาณขับขาเกต S3 ป้อนให้วงจรขับขาเกตไอจีบีทีชุดที่ 3
- ePWM3B จ่ายสัญญาณขับขาเกต S4 ป้อนให้วงจรขับขาเกตไอจีบีทีชุดที่ 4
- 3.) ขาดิจิตอลอินพุต/เอาต์พุต
- 13 (GPIO13) สวิตช์ควบคุมการทำงานของระบบควบคุมป้อนกลับ (RUN)
- 14 (GPIO14) สวิตช์ควบคุมการทำงานของระบบควบคุมป้อนกลับ (STOP)
- 4.) กราวด์ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2
- GN-2 เชื่อมต่อไปยังกราวด์ค่านอินพุตของวงจรขับขาเกตไอจีบีทีแต่ละชุด
- GN-A2 เชื่อมต่อไปยังกราวด์ของวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันดีซี วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันกริด และวงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริด



รูปที่ 6.21 การเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2

6.5 โปรแกรมภาษาซีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1 และ MCU2

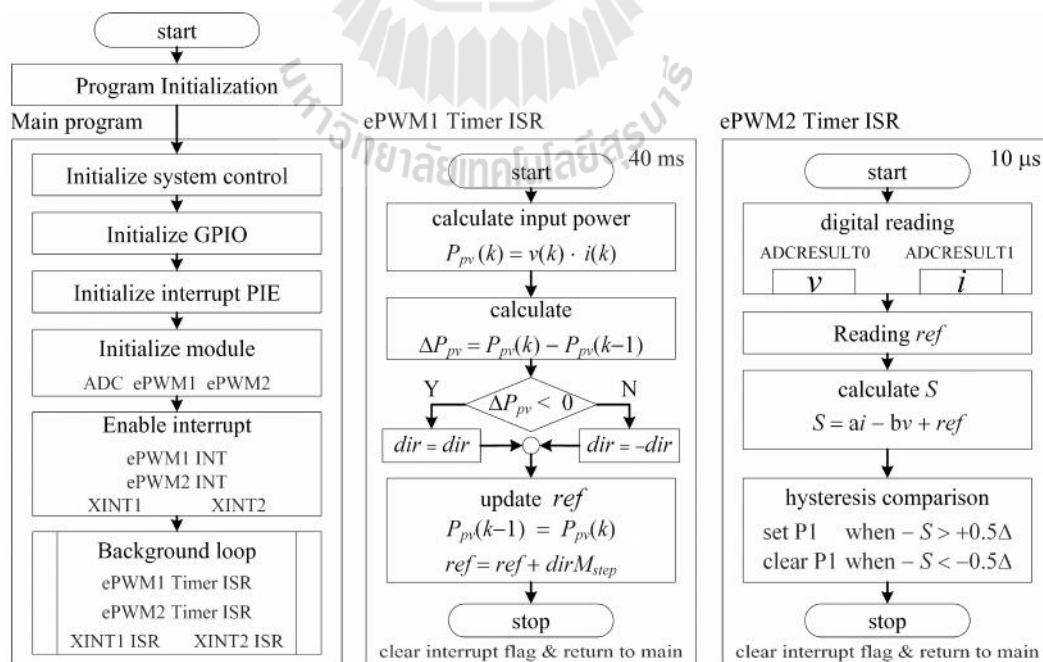
โปรแกรมภาษาซีที่เขียนขึ้นเพื่อกำหนดให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1 และ MCU2 ทำหน้าที่เป็นหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน และชุดควบคุมของวงจรรีจิสเตอร์นั้น ประกอบด้วยโปรแกรมหลัก (main program) และโปรแกรมบริการอินเตอร์รัพต์ (interrupt service routine: ISR) ที่สร้างขึ้นจากอินเตอร์รัพต์ไทม์เมอร์ของโมดูลการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (ePWM Timer interrupt) ในไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 ซึ่งโมดูลดังกล่าวนี้สามารถกำหนดลักษณะการเกิดอินเตอร์รัพต์และรูปแบบลอจิกของสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มได้จากเงื่อนไขของการเปรียบเทียบระหว่างการเปรียบเทียบระหว่างตัวนับสัญญาณนาฬิกา (Timer counter) และรีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้อง โดยการนับสัญญาณนาฬิกาหรือไทม์เมอร์นี้สามารถกำหนดคาบเวลาหรือความถี่ของสัญญาณนาฬิกาได้ ทำให้สามารถกำหนดคาบเวลาในการสุ่มวัดตัวอย่างของโปรแกรมภาษาซีและความถี่การสวิทช์ของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้มีการนับสัญญาณนาฬิกาแบบขึ้นลงจากค่าศูนย์ (ZERO) ไปยังค่าสูงสุดของสัญญาณนาฬิกา (TBPRD) เพื่อสร้างเงื่อนไขหรือเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่สามารถใช้ในการกำหนดลอจิกของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (ePWM Action Qualifier) และลักษณะของการเกิดสัญญาณทริกซ์เกอร์ต่าง ๆ เช่น สัญญาณเอาต์พุตทริกซ์เกอร์ (SOCA trigger) ที่ทำหน้าที่สั่งให้เริ่มต้นกระบวนการแปลงเอชดูดี และสัญญาณอินเตอร์รัพต์ทริกซ์เกอร์ (INT trigger) ที่ทำหน้าที่สั่งให้โปรแกรมบริการอินเตอร์รัพต์แต่ละชุดเริ่มต้นทำงานตามคำสั่งของโปรแกรมภาษาซี

6.5.1 โปรแกรมภาษาซีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1

โปรแกรมภาษาซีที่เขียนขึ้นเพื่อกำหนดให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1 ทำหน้าที่เป็นหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนแสดงในภาคผนวก ข.1 โดยมีแผนภาพการทำงานแสดงได้ในรูปที่ 6.22 ซึ่งประกอบด้วยโปรแกรมต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 1.) โปรแกรมหลัก (Main program) เป็นโปรแกรมพื้นหลังแบ่งเป็น 3 ส่วนดังนี้
 - ส่วนที่ 1 ทำหน้าที่กำหนดค่าเริ่มต้น ตัวแปร และฟังก์ชันต่าง ๆ ของโปรแกรม
 - ส่วนที่ 2 ทำหน้าที่โหลดค่าเริ่มต้นต่าง ๆ ของโปรแกรมหลัก ได้แก่ ค่าเริ่มต้นพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ค่าเริ่มต้นสำหรับขาอินพุต/เอาต์พุต ค่าเริ่มต้นของอินเตอร์รัพต์ ค่าเริ่มต้นสำหรับโมดูลต่าง ๆ
 - ส่วนที่ 3 คือ รูปการทำงานพื้นหลังที่ทำงานวนซ้ำไปเรื่อย ๆ เพื่อรอให้โปรแกรมบริการอินเตอร์รัพต์แต่ละชุดเริ่มต้นทำงานตามสัญญาณอินเตอร์รัพต์ทริกซ์เกอร์ที่เกิดขึ้นตามเหตุการณ์ต่าง ๆ

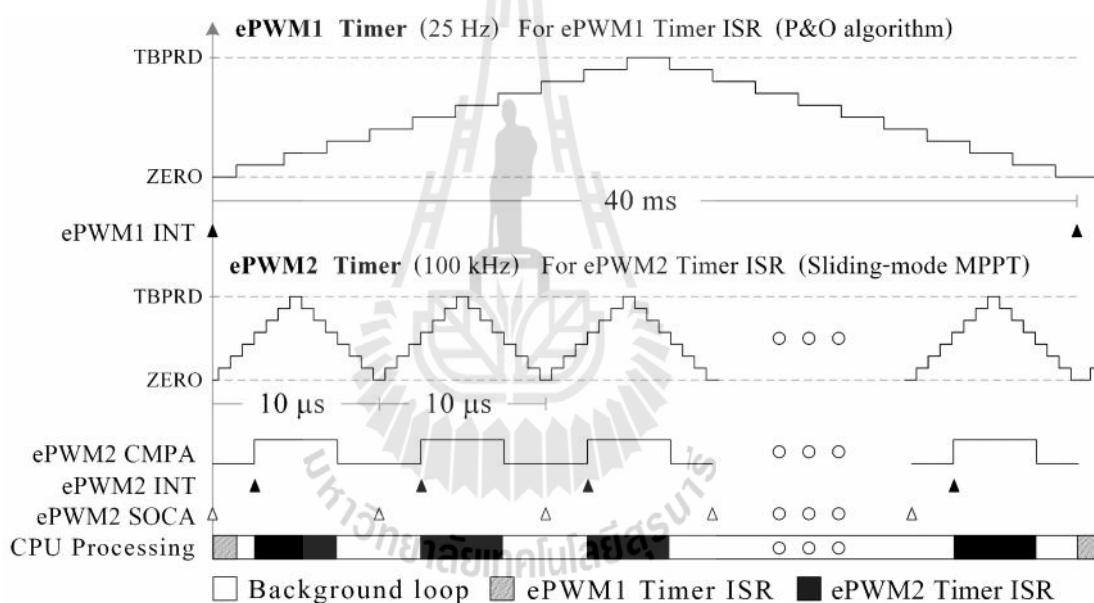
- 2.) โปรแกรมบริการอินเตอร์รัพต์ไทม์เมอร์ของโมดูลการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม 2 (ePWM2 Timer ISR) ทำหน้าที่เป็นหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนที่มีคาบเวลาในการสุ่มตัวอย่างวัดเท่ากับ $10\ \mu\text{s}$ (100 kHz) ซึ่งมีขั้นตอนในการทำงานดังนี้
 1. อ่านค่าดิจิทัลที่ได้จากการแปลงแอนะล็อกในรีจิสเตอร์ผลลัพธ์แอนะล็อก
 2. คำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าอินพุตและแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบวสด์
 3. คำนวณหาผลบวกเชิงเส้น (S)
 4. เปรียบเทียบผลบวกเชิงเส้นและกำหนดรูปแบบลอจิกของสัญญาณขับขาเกต
- 3.) โปรแกรมบริการอินเตอร์รัพต์ไทม์เมอร์ของโมดูลการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม 1 (ePWM1 Timer ISR) ทำหน้าที่เป็นอัลกอริทึมพีแอนด์ไอที่มีคาบเวลาในการสุ่มตัวอย่างวัด (sampling time) เท่ากับ $40\ \text{ms}$ (25 Hz) และมีขั้นตอนในการทำงานดังนี้
 1. คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่แผงพีวีผลิตได้ ($P_{pv}(k)$)
 2. เปรียบเทียบผลของอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่แผงพีวีผลิตได้
 3. ปรับเปลี่ยนค่าคงที่ ref
- 4.) โปรแกรมบริการอินเตอร์รัพต์ภายนอก (external interrupt ISR) ประกอบด้วย XINT1 ISR และ XINT2 ISR ทำหน้าที่ควบคุมการเปิดหรือปิดการทำงานของหน่วยเอ็มพีพีทีด้วยการกดสวิตช์ SW1 หรือ SW2 ตามลำดับ



รูปที่ 6.22 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมภาษาซีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1

การทำงานของโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์แต่ละชุดเกิดขึ้นตามคาบเวลาของสัญญาณนาฬิกาที่แสดงในรูปที่ 6.23 โดยเริ่มต้นนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำงานวนซ้ำอยู่ที่ลูปการทำงานพื้นหลัง (background loop) ของโปรแกรมหลักไปเรื่อย ๆ เพื่อรอการทำงานของโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ที่จะเกิดตามคาบเวลาที่ของสัญญาณนาฬิกาที่กำหนดไว้ดังนี้

- 1.) สัญญาณนาฬิกาของโมดูลการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม 2 มีความถี่เท่ากับ 100 kHz ทำหน้าที่กำหนดคาบเวลาในการทำงานของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน
- 2.) สัญญาณนาฬิกาของโมดูลการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม 1 มีความถี่เท่ากับ 25 Hz ทำหน้าที่กำหนดคาบเวลาในการทำงานของอัลกอริทึมพีแอนด์โอ



รูปที่ 6.23 การทำงานของโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์บนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1

เมื่อตัวนับสัญญาณนาฬิกาของโมดูลการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม 2 มีค่าเท่ากับศูนย์ (CTR = ZERO) จะมีสัญญาณเอชดิวทริกซ์เกอร์ (ePWM2 SOCA) เกิดขึ้นเพื่อสั่งให้เริ่มต้นการแปลงเอชดิวทริกซ์ทั้ง 2 ช่องสัญญาณ (ADCINA0 และ ADCINA1) จนเสร็จสิ้น และเมื่อตัวนับสัญญาณนาฬิกาของโมดูลการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม 2 มีค่าเท่ากับรีจิสเตอร์เปรียบเทียบขาขึ้น (CTRU = CMPA) จะมีสัญญาณอินเทอร์รัพต์ทริกซ์เกอร์ ePWM2 INT เกิดขึ้น ส่งผลทำให้โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ไทม์เมอร์ของโมดูลการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม 2 เริ่มต้นทำงานจนเสร็จสิ้น

หลังจากนั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จะย้อนกลับไปทำงานที่ลูปการทำงานพื้นหลังอีกครั้งเพื่อรอการเกิดอินเทอร์รัพต์ใหม่ในรอบถัดไปซึ่งจะเกิดขึ้นในทุก ๆ คาบเวลา 10 μ s

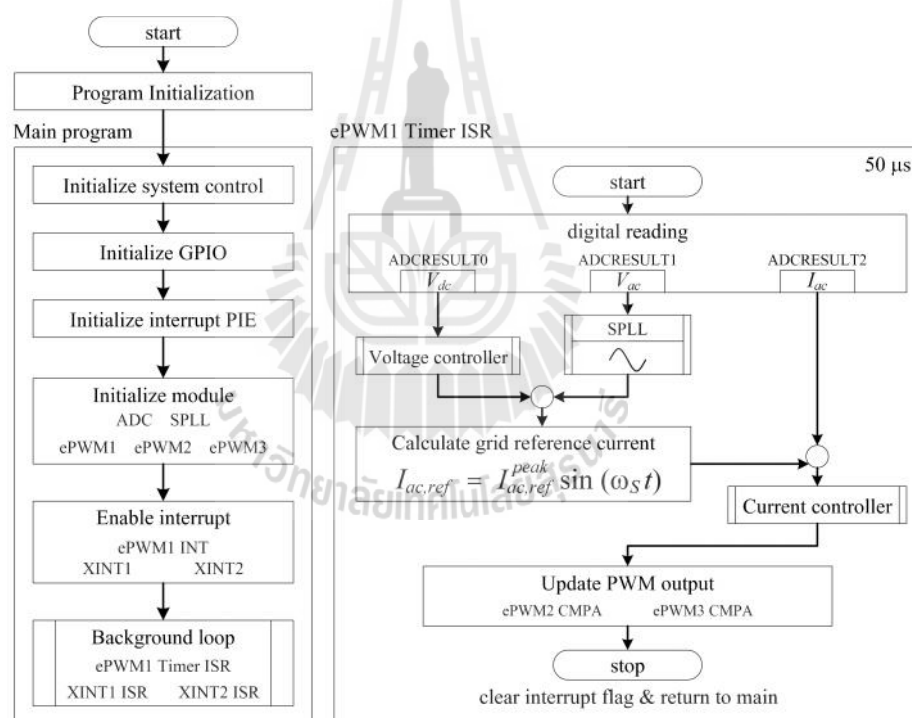
เมื่อตัวนับสัญญาณนาฬิกาของโมดูลการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม 1 มีค่าเท่ากับศูนย์ (CTRU = ZERO) จะมีสัญญาณอินเทอร์รัพต์ทริกซ์เกอร์ ePWM1 INT เกิดขึ้น ส่งผลทำให้โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ไทม์เมอร์ของโมดูลการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม 1 เริ่มต้นทำงานจนเสร็จสิ้น หลังจากนั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จะย้อนกลับไปทำงานที่ลูปการทำงานพื้นหลังของโปรแกรมหลักเพื่อรอการเกิดอินเทอร์รัพต์ใหม่ในรอบถัดไปซึ่งจะเกิดขึ้นในทุก ๆ คาบเวลา 40 ms โดยที่โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์แต่ละชุดจะไม่เกิดขึ้นพร้อมกัน แต่ถ้าเกิดเหตุการณ์ที่มีสัญญาณอินเทอร์รัพต์ทริกซ์เกอร์เกิดขึ้นพร้อมกัน โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ที่มีลำดับความสำคัญมากกว่า (higher interrupt priority) จะเริ่มต้นทำงานก่อนเสมอตามลำดับความสำคัญของอินเทอร์รัพต์

6.5.2 โปรแกรมภาษาซีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2

โปรแกรมภาษาซีที่เขียนขึ้นเพื่อกำหนดให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2 ทำหน้าที่เป็นหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเคลื่อนแสดงในภาคผนวก ข.2 โดยมีแผนภาพการทำงานแสดงได้ในรูปที่ 6.24 ซึ่งประกอบด้วยโปรแกรมต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 1.) โปรแกรมหลัก (Main program) เป็นโปรแกรมพื้นหลังแบ่งเป็น 3 ส่วนดังนี้
 - ส่วนที่ 1 ทำหน้าที่กำหนดค่าเริ่มต้น ตัวแปร และฟังก์ชันต่าง ๆ ของโปรแกรม
 - 2 ทำหน้าที่โหลดค่าเริ่มต้นต่าง ๆ ของโปรแกรมหลัก ได้แก่ ค่าเริ่มต้นพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ค่าเริ่มต้นสำหรับขาอินพุต/เอาต์พุต ค่าเริ่มต้นของอินเทอร์รัพต์ ค่าเริ่มต้นสำหรับโมดูลต่าง ๆ
 - 3 คือ ลูปการทำงานพื้นหลังที่ทำงานวนซ้ำไปเรื่อย ๆ เพื่อรอให้โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์แต่ละชุดเริ่มต้นทำงานตามสัญญาณอินเทอร์รัพต์ทริกซ์เกอร์ที่เกิดขึ้นตามเหตุการณ์ต่าง ๆ
- 2.) โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ไทม์เมอร์ของโมดูลการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม 1 (ePWM1 Timer ISR) ทำหน้าที่เป็นระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรรีจิสเตอร์ที่มีคาบเวลาในการสุ่มตัวอย่างวัดเท่ากับ 50 μ s (20 kHz) ซึ่งมีขั้นตอนในการทำงานดังนี้
 1. อ่านค่าดิจิตอลที่ได้จากการแปลงเอาต์พุตในรีจิสเตอร์ผลลัพธ์เอาต์พุต
 2. คำนวณหาค่าแรงดันคิซี แรงดันและกระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง

3. ใช้งานไลบรารีเฟสล็อกกลุ๊ป (SPLL library) เพื่อคำนวณหาค่าไซน์ของตำแหน่งเชิงมุมของแรงดันกริด
 4. ใช้ฟังก์ชันตัวควบคุมแรงดันดีซีเพื่อคำนวณค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง
 5. คำนวณค่ากระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงจากผลคูณระหว่างค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงและค่าไซน์ของตำแหน่งเชิงมุมของแรงดันกริด
 6. ใช้ฟังก์ชันตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดเพื่อคำนวณแรงดันเอซีเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับสัญญาณนาฬิกาของโมดูลการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มเพื่อกำหนดรูปแบบลอจิกของขาขาเกต S1 S2 S3 และ S4
- 3.) โปรแกรมบริการอินเตอร์รัพท์ภายนอก (external interrupt ISR) ประกอบด้วย XINT1 ISR และ XINT2 ISR ทำหน้าที่ควบคุมการเปิดหรือปิดการทำงานของระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วยการกดสวิตช์ SW1 หรือ SW2 ตามลำดับ

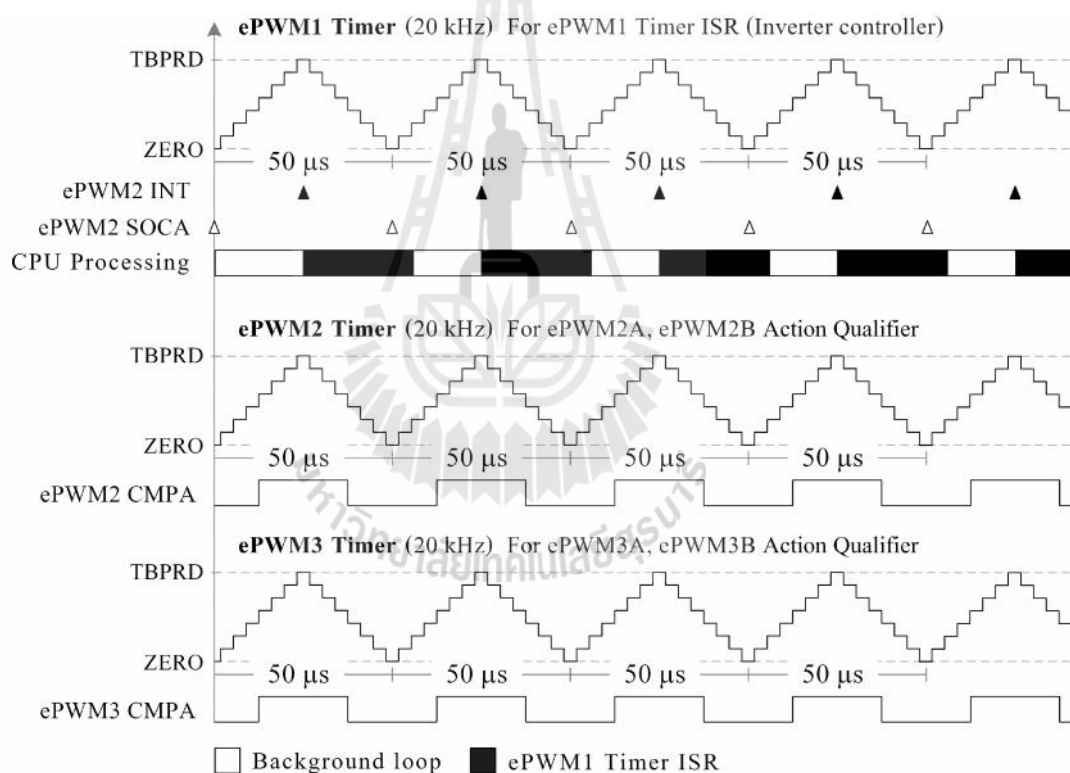


รูปที่ 6.24 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมภาษาซีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2

การทำงานของโปรแกรมบริการอินเตอร์รัพท์ไทม์เมอร์ของโมดูลการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม 1 จะเกิดขึ้นตามคาบเวลาของสัญญาณนาฬิกาที่แสดงในรูปที่ 6.25 โดยเริ่มต้นนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำงานวนซ้ำอยู่ที่ลูปการทำงานพื้นหลัง (background loop) ของ

โปรแกรมหลักไปเรื่อย ๆ เพื่อรอการทำงานของโปรแกรมบริการอินเทอร์เน็ตที่จะเกิดตามคาบเวลาที่ของสัญญาณนาฬิกาที่กำหนดไว้ดังนี้

- 1.) สัญญาณนาฬิกาของโมดูลการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม 1 มีความถี่เท่ากับ 20 kHz ทำหน้าที่กำหนดคาบเวลาในการทำงานของระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว
- 2.) สัญญาณนาฬิกาของโมดูลการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม 2 มีความถี่เท่ากับ 20 kHz ทำหน้าที่เป็นสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่ใช้ในการเปรียบเทียบสร้างสัญญาณ PWM
- 3.) สัญญาณนาฬิกาของโมดูลการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม 3 มีความถี่เท่ากับ 20 kHz ทำหน้าที่เป็นสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่ใช้ในการเปรียบเทียบสร้างสัญญาณ PWM



รูปที่ 6.25 การทำงานของโปรแกรมบริการอินเทอร์เน็ตบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2

เมื่อตัวนับสัญญาณนาฬิกาของโมดูลการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม 1 มีค่าเท่ากับศูนย์ (CTR = ZERO) จะมีสัญญาณเอชดิวทริกซ์เกอร์ (ePWM1 SOCA) เกิดขึ้นเพื่อสั่งให้เริ่มต้นการแปลงเอชดิวทริกซ์ทั้ง 3 ช่องสัญญาณนั้นคือ ADCINA0 ADCINA2 และ ADCINA3 ตามลำดับจนเสร็จสิ้น และเมื่อตัวนับสัญญาณนาฬิกาของโมดูลการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม 1 มีเท่ากับค่าสูงสุดของ

สัญญาณนาฬิกา (CTRU = TBPRD) จะมีสัญญาณอินเทอร์รัพต์ทริกซ์เกอร์ ePWM1 INT เกิดขึ้น ส่งผลทำให้ทำให้โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ไทม์เมอร์ของโมดูลการสร้างสัญญาณพิดับเบิลยูเอ็ม 1 เริ่มต้นทำงานตามคำสั่งจนเสร็จสิ้น หลังจากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะย้อนกลับไปทำงานที่ถูกละทิ้งการทำงานพื้นหลังของโปรแกรมหลักเพื่อรอการเกิดอินเทอร์รัพต์ใหม่ในรอบถัดไปซึ่งจะเกิดในทุก ๆ คาบเวลา 50 μ s

6.6 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอวิธีการสร้างชุดวงจรต้นแบบทั้ง 2 ภาคของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวี ๓ ที่ได้ศึกษาในงานวิทยานิพนธ์นี้ ตั้งแต่การสร้างวงจรแปลงผันบูสต์ วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว วงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์เฟด วงจรขับเคลื่อนของไอจีบีที วงจรเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันดีซี วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันกริด และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้งานในการสร้างชุดวงจรต้นแบบ ซึ่งงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบสร้างตามเงื่อนไขของแผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260 และกริดเอซี 220 V ที่ใช้งานจริงเพื่อให้ชุดวงจรต้นแบบนี้สามารถใช้งานได้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยชุดวงจรต้นแบบดังกล่าวนี้ได้นำไปทดสอบกับแผงพีวีจริงนั่นคือแผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260 ภายได้แสงอาทิตย์จริงและแสงอาทิตย์เทียม ซึ่งได้นำเสนอและแสดงผลการทดสอบของวงจрдังกล่าวนี้ในบทถัดไป

บทที่ 7

การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียว ที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน

7.1 บทนำ

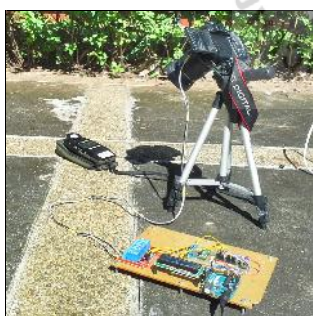
ในบทนี้ได้ทำการศึกษาทดสอบและแสดงผลการทดสอบของชุดวงจรต้นแบบวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนที่สร้างขึ้น ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 6 การทดสอบนี้ได้แบ่งออกเป็นการทดสอบภายใต้แสงเทียมที่เลียนแบบแสงอาทิตย์และการทดสอบภายใต้แสงอาทิตย์จริง โดยผลการทดสอบดังกล่าวจะแสดงถึงสมรรถนะในการติดตามกำลังงานสูงสุดของวงจรแปลงผันบุสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน และการเปลี่ยนแรงดันดีซีไปเป็นแรงดันเอซีของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริดเอซี รวมถึงการทำงานพร้อมกันของวงจรแปลงผันบุสต์ที่มีด้านอินพุตเชื่อมต่อกับแผงพีวีและวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริดเอซีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7.2 วิธีการทดสอบชุดวงจรต้นแบบที่สร้างขึ้น

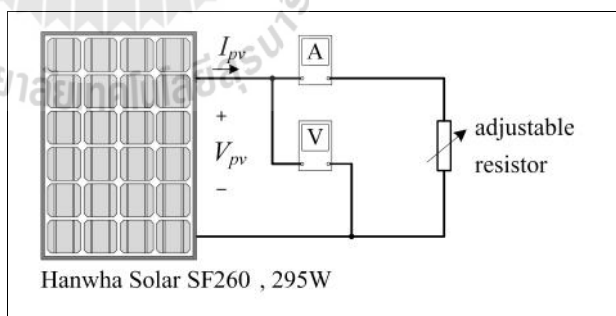
งานวิทยานิพนธ์นี้ได้ติดตั้งแผงพีวีไว้ด้านบนของรถเข็นเคลื่อนที่และได้นำชุดวงจรต้นแบบมาติดตั้งไว้ด้านล่างของรถเข็นเพื่อให้สะดวกต่อการเคลื่อนย้ายไปยังพื้นที่ทดสอบต่าง ๆ การทดสอบชุดวงจรต้นแบบในแต่ละครั้งนั้นได้ทำการทดสอบวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าของแผงพีวีก่อนและหลังการทดสอบชุดวงจรต้นแบบจริงทุกครั้ง เพื่อประมาณค่าหากกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีที่เกิดขึ้นจริงในขณะก่อนและหลังการทดสอบแต่ละครั้ง ซึ่งการสอบดังกล่าวนี้ได้ใช้โพลดตัวต้านทานที่สามารถปรับค่าได้เชื่อมต่อเข้ากับแผงพีวีตามวงจรที่แสดงในรูปที่ 7.1 (ข) การทดสอบนี้ได้ทำการปรับค่าความต้านทานทีละขั้น จากนั้นบันทึกค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าของแผงพีวีที่อ่านได้จากดิจิตอลมัลติมิเตอร์เพื่อนำไปกำหนดจุดบนระนาบ $i - v$ หรือนำไปสร้างกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวี ดังนั้นจึงได้กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ 2 เส้น นั่นคือกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $i - v$ ของแผงพีวีในก่อนและหลังการทดสอบชุดวงจรต้นแบบ ต่อมาได้ทำการกำหนดจุดเฉลี่ยที่อยู่ระหว่างกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะทั้ง 2 เส้นนี้เพื่อสร้างกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะเฉลี่ย ซึ่งจะนำไปใช้เป็นกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $i - v$ ของแผงพีวีที่เกิดขึ้นจริงในระหว่างการทดสอบ โดยได้ใช้ตำแหน่งของจุดเอ็มพีพีทีที่อยู่บนกราฟเส้นนี้มาเป็น

ข้อมูลอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับจุดการทำงานของแผงพีวีที่เกิดขึ้นจากการทำงานของชุดวงจรต้นแบบ หรืออาจกล่าวได้นำจุดเอ็มพีพีดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ที่อ่านได้จากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ในสถานะอยู่ตัว โดยถ้าวงจรแปลงผันบูสต์มีแรงดันและกระแสไฟฟ้าอินพุตใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดเอ็มพีพีของกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ เฉลี่ยนั้นแสดงว่าชุดวงจรต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถบังคับให้แผงพีวีมีจุดการทำงานอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกับจุดเอ็มพีพีได้

การทดสอบชุดวงจรต้นแบบที่เชื่อมต่อกับแผงพีวีภายใต้แสงอาทิตย์จริงได้ใช้กล้องถ่ายรูปและเครื่องมือวัดแสงสว่างดังที่แสดงในรูปที่ 7.1 (ก) กล้องถ่ายรูปนี้ทำหน้าที่บันทึกภาพค่าความสว่าง (illuminance : lux) ของแสงอาทิตย์ที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดแสงสว่างหรือลักซ์มิเตอร์ MINOLTA รุ่น T-10 ในทุก ๆ 1 นาที เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการเก็บข้อมูลหรือบันทึกผลการทดสอบของชุดวงจรต้นแบบในแต่ละครั้ง กล่าวคือในระหว่างการทดสอบชุดวงจรต้นแบบแต่ละครั้งจะได้รับข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความแสงสว่างของแสงอาทิตย์ว่ามีการเปลี่ยนแปลงมากหรือไม่ ถ้าแสงอาทิตย์มีระดับแสงสว่างคงที่หรือไม่เปลี่ยนแปลงมาก กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ เฉลี่ยของแผงพีวีที่ได้จากการทดสอบแผงพีวีก่อนและหลังการทดสอบชุดวงจรต้นแบบจะมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ซึ่งผลการทดสอบแผงพีวีและชุดวงจรต้นแบบที่ได้แสดงในบทนี้เป็นผลการทดสอบภายใต้แสงอาทิตย์ที่มีระดับแสงสว่างที่คงที่หรือไม่เปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นผลการทดสอบดังกล่าวนี้จึงมีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้เปรียบเทียบจุดการทำงานของแผงพีวีได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 7.1 อุปกรณ์และชุดวงจรทดสอบหากราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีที่เกิดขึ้นจริง

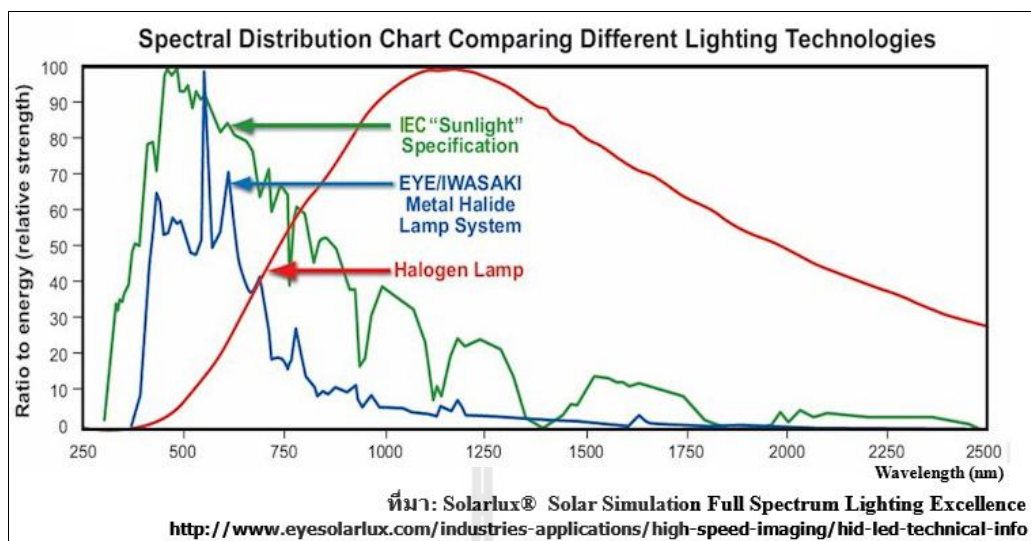
(ก) กล้องถ่ายรูปอัตโนมัติที่บันทึกภาพของค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดแสงสว่าง

(ข) วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบหากราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวี

การทดสอบชุดวงจรต้นแบบที่เชื่อมต่อกับแผงพีวีภายใต้แสงอาทิตย์เทียมได้ใช้ชุดโคมไฟหลอดไอโอดีนเป็นแหล่งกำเนิดแสงสว่างที่แสดงในรูปที่ 7.2 โคมไฟหลอดไอโอดีนหลายดวงทำให้ได้แสงสว่างที่กระจายทั่วถึงแผงพีวี หลอดไอโอดีนเป็นหลอดฮาโลเจน (Halogen lamp) ชนิดหนึ่งที่ทำซื้อได้ง่าย และมีสเปกตรัมแสงแบบต่อเนื่องในช่วงความยาวคลื่น 775 nm ถึง 1240 nm ที่แสดงในรูปที่ 7.3 ช่วงความยาวคลื่นแสงดังกล่าวนี้สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งโดยทั่วไปผลิตด้วยสารกึ่งตัวนำที่มีแถบช่องว่างพลังงาน (energy band-gap) ในช่วงระหว่าง 1.0 eV ถึง 1.6 eV (Wenham, Green, et al., 2007, pp. 47-49) ดังนั้นแผงพีวีจึงดูดกลืนคลื่นแสงนี้ได้ดี ส่งผลให้มีพลังงานโฟตอนแสงที่เกิดขึ้นจากความยาวคลื่นดังกล่าวนี้ไปกระตุ้นให้เกิดการสร้างพาหะอิเล็กตรอนและโฮลมากขึ้น แผงพีวีจึงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำหลอดไอโอดีนมาใช้สร้างเป็นแหล่งกำเนิดแสงเทียมได้



รูปที่ 7.2 ชุดโคมไฟหลอดไอโอดีนที่ใช้สร้างแสงอาทิตย์เทียม



รูปที่ 7.3 พลังงานสเปกตรัมแสงของแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่าง ๆ ที่ความยาวคลื่น 250 – 2,500 nm



7.3 การทดสอบวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน

การทดสอบชุดวงจรต้นแบบในส่วนนี้เป็นการทดสอบวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนหรือวงจรภาคแรกที่มีการเชื่อมต่อกับโหลดตัวต้านปรับค่าได้ วงจรแปลงผันบูสต์นี้มีด้านอินพุตของวงจรเชื่อมต่อเข้ากับแผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260, 295 W และมีด้านเอาต์พุตของวงจรเชื่อมต่อเข้ากับโหลดตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ โดยโหลดตัวต้านทานดังกล่าวนี้ใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันคิซีเอาต์พุตของวงจรแปลงผันบูสต์ให้มีค่าแตกต่างกัน 3 ค่า นั่นคือ 120 V 100 V และ 75 V เพื่อใช้ในการทดสอบสมรรถนะในการทำงานของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนและวงจรแปลงผันบูสต์ในกรณีที่มีการเชื่อมต่อโหลดตัวต้านทานแตกต่างกันหรือมีแรงดันคิซีเอาต์พุตของวงจรแปลงผันบูสต์ไม่เท่ากัน ซึ่งงานวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 วิธีการดังนี้

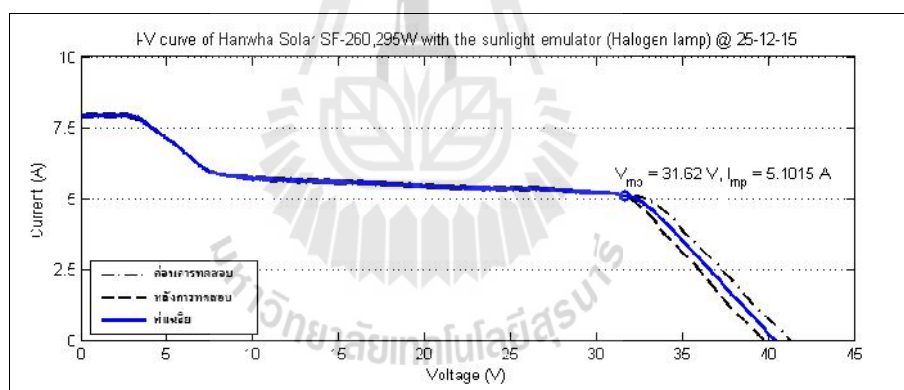
- 1.) การทดสอบวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนร่วมกับแผงพีวีภายใต้แสงเทียมที่สร้างขึ้นจากชุดโคมไฟหลอดไอโอดีนในรูปที่ 7.2
- 2.) การทดสอบวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนร่วมกับแผงพีวีภายใต้แสงอาทิตย์จริงที่แสดงในรูปที่ 7.4



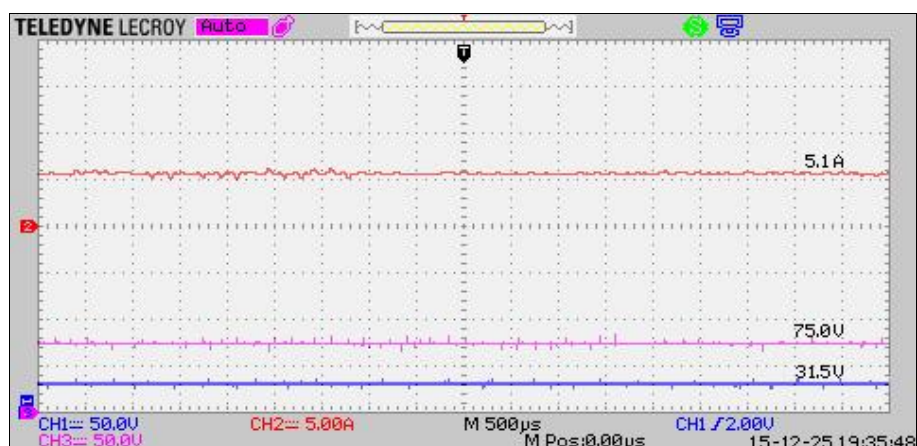
รูปที่ 7.4 การทดสอบวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีร่วมกับแผงพีวีภายใต้แสงอาทิตย์จริง

แผงพีวีและวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนภายใต้แสงเทียมให้ผลการทดสอบที่แสดงได้ในรูปที่ 7.5 แผงพีวีให้กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ และจุดเอ็มพีพีทีที่มีกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 5.1 A และ 31.6 V ตามลำดับซึ่งแสดงในรูปที่ 7.5 (ก) จากผลการทดสอบพบว่ากราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีมีระดับกระแสไฟฟ้าลดลงเมื่อแผงพีวีมีแรงดันเท่ากับ 5 V เนื่องจากแสงเทียมที่ได้จาก

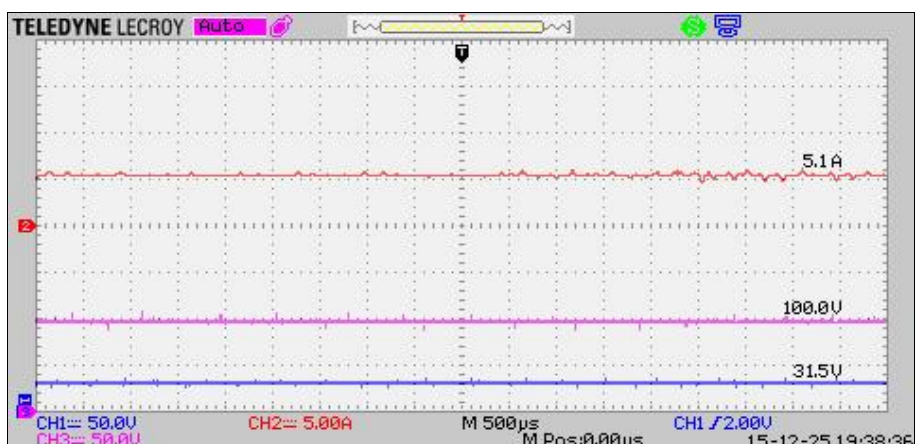
โหลดไอโอดีนมีความไม่สม่ำเสมอ ส่งผลทำให้เซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์ได้รับแสงสว่างไม่เท่ากันทำให้ผลิตรกระแสไฟฟ้าได้แตกต่างกันเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เข้ากัน (mismatch effect) ขณะที่ปรับเปลี่ยนค่าโหลดตัวทานของวงจรแปลงผันบูสต์ให้ได้แรงดันคิซีเอาต์พุตเท่ากับ 120 V 100 V และ 75 V ซึ่งแสดงในรูปที่ 7.5 (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ โดยในแต่ละค่าแรงดันคิซีเอาต์พุตนั้นวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคเลื่อนสามารถบังคับให้แผงพีวีจ่ายกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและสร้างแรงดันเฉลี่ยที่มีค่าเท่ากับ 5.1 A และ 31.5 V ตามลำดับ ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าและแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ที่อ่านได้จากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ จากผลการทดสอบดังกล่าวนี้แสดงถึงสมรรถนะในการทำงานของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนได้เป็นอย่างดี เนื่องจากวงจรดังกล่าวสามารถบังคับให้แผงพีวีสร้างแรงดันและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ติดตามแรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (V_{mp}) และกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp}) ภายได้แสงเทียมได้อย่างถูกต้องแม้ว่าวงจรดังกล่าวจะมีการเชื่อมกับโหลดตัวต้านทานที่มีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นแผงพีวีจึงผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ $(5.1 \text{ A}) \times (31.5 \text{ V}) = 160 \text{ W}$ ส่งไปยังด้านอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์



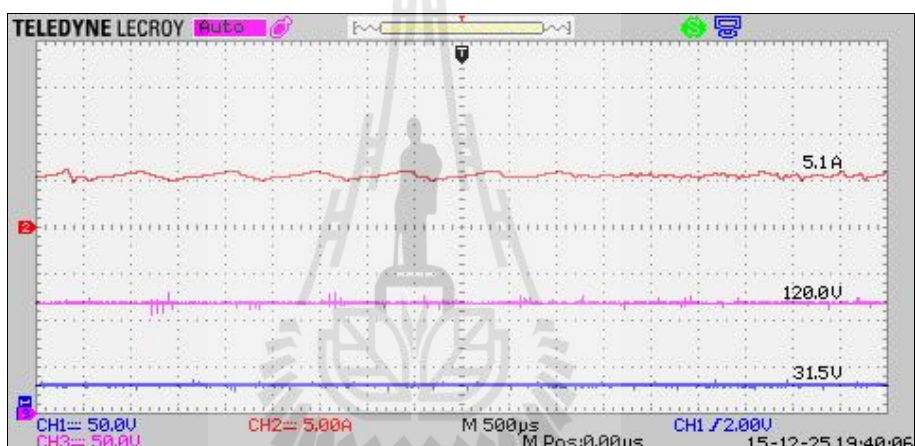
(ก)



(ข)



(ก)



(ง)

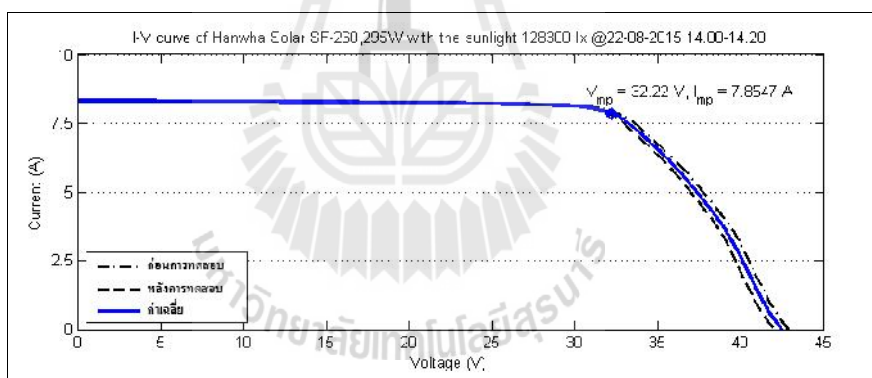
รูปที่ 7.5 ผลการทดสอบของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีร่วมกับแผงพีวีภายใต้แสงเทียม

- (ก) กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีที่ได้จากการทดสอบ
 (ข) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 120 V
 (ค) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 100 V
 (ง) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 75 V

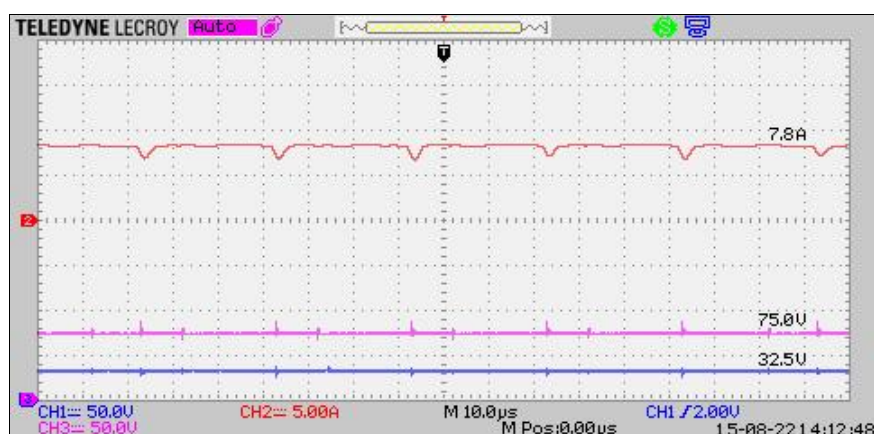
ในเงื่อนไขการทดสอบภายใต้แสงอาทิตย์จริงซึ่งมีระดับความเข้มแสงอาทิตย์แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและเวลาในขณะนั้น ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการทดสอบชุดวงจรต้นแบบร่วมกับแผงพีวีภายใต้แสงอาทิตย์จริงในวันและเวลาที่มีสภาพอากาศแตกต่างกันดังนี้

- 1.) วันที่มีท้องฟ้าโปร่งและมีแสงอาทิตย์จ้า ซึ่งได้ทดสอบในวันที่ 22 สิงหาคม พ.ศ. 2558 ช่วงเวลา 14.00 ถึง 14.20 น. แสงอาทิตย์มีความสว่างเฉลี่ยเท่ากับ 128,300 lx ทำให้แผงพีวีมีกราฟ

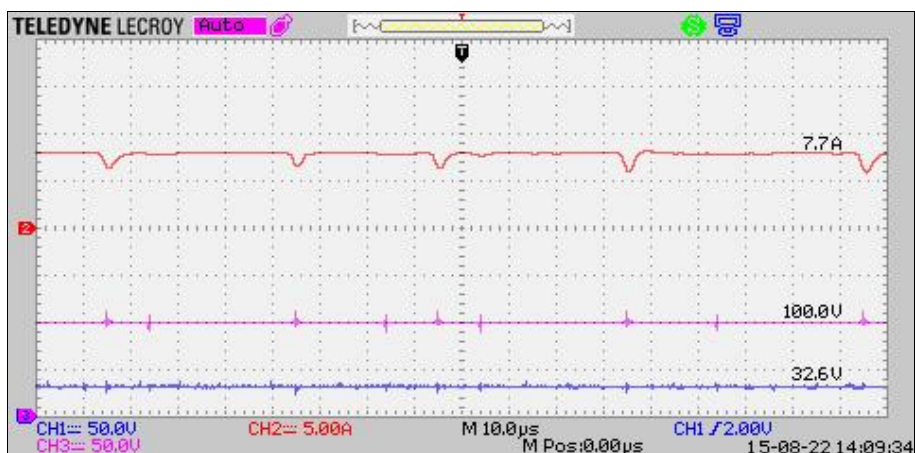
เส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ และจุดเอ็มพีพีที่มีกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 7.8 A และ 32.2 V ตามลำดับซึ่งแสดงในรูปที่ 7.6 (ก) จากผลการทดสอบชุดวงจรต้นแบบพบว่า ขณะที่ปรับเปลี่ยนค่าโหลดตัวทานของวงจรแปลงผันบูสต์ให้ได้แรงดันดีซีเอาต์พุตเท่ากับ 120 V 100 V และ 75 V ซึ่งแสดงในรูปที่ 7.6 (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ โดยในแต่ละค่าแรงดันดีซีเอาต์พุตนั้นวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีที่ชนิดโหมดเลื่อนสามารถบังคับให้แผงพีวีจ่ายกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและสร้างแรงดันเฉลี่ยที่มีค่าในช่วง 7.7 A ถึง 7.8 A และในช่วง 32.5 V ถึง 32.6 V ตามลำดับ ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าและแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ที่อ่านได้จากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ จากผลการทดสอบดังกล่าวนี้แสดงถึงสมรรถนะในการทำงานของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีที่ชนิดโหมดการเลื่อนได้เป็นอย่างดี เนื่องจากวงจรดังกล่าวสามารถบังคับให้แผงพีวีสร้างแรงดันและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ติดตามแรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (V_{mp}) และกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp}) ภายใต้อาติศย์จริงได้อย่างถูกต้องแม้ว่าวงจรดังกล่าวจะมีการเชื่อมกับโหลดตัวต้านทานที่มีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นแผงพีวีจึงผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ $(7.8 \text{ A}) \times (32.6 \text{ V}) = 254 \text{ W}$ ส่งไปยังด้านอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์



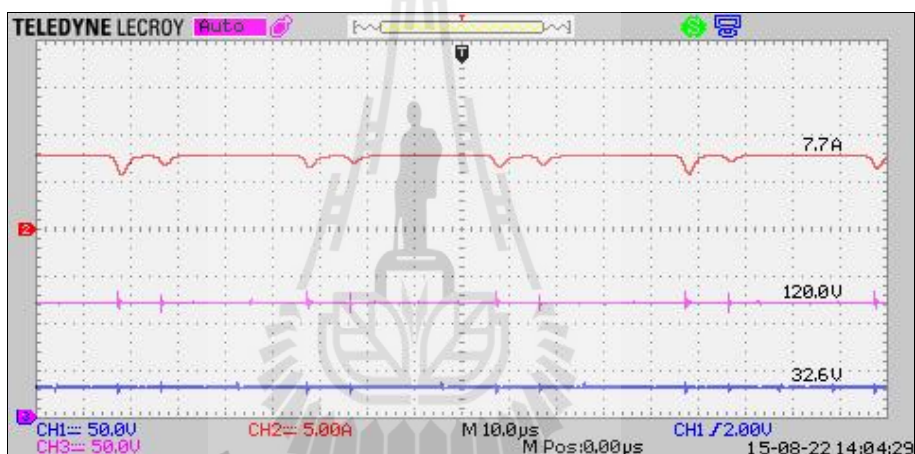
(ก)



(ข)



(ก)



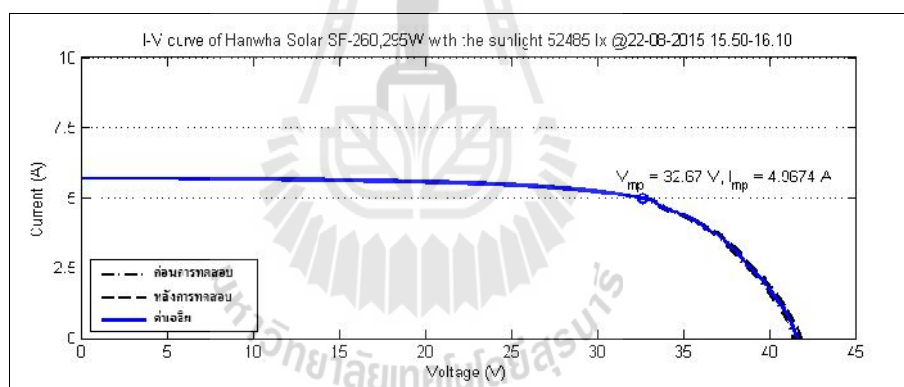
(ง)

รูปที่ 7.6 ผลการทดสอบของวงจรแปลงผันบัสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนร่วมกับแผงพีวีภายใต้แสงอาทิตย์จริงในวันที่ท้องฟ้าโปร่งและมีแสงอาทิตย์จ้า

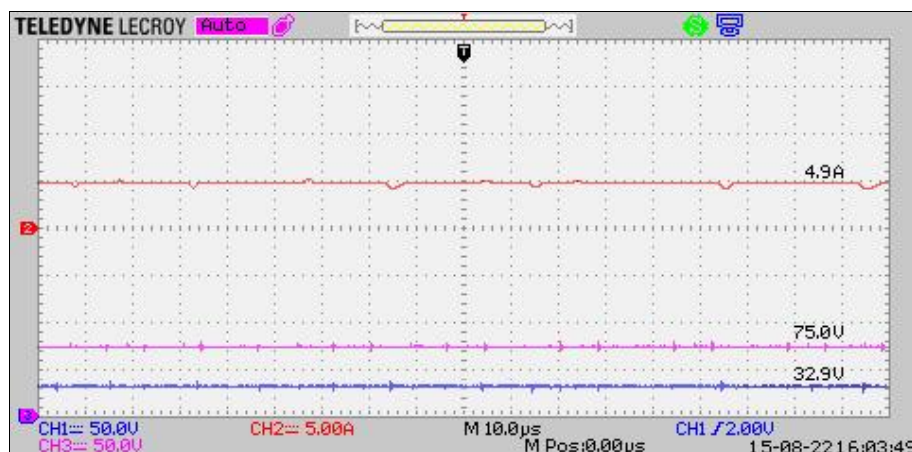
- (ก) กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีที่ได้จากการทดสอบ
- (ข) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 120 V
- (ค) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 100 V
- (ง) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 75 V

2.) วันที่มีท้องฟ้าโปร่งและมีแสงอาทิตย์อ่อน ๆ ซึ่งได้ทดสอบในวันที่ 22 สิงหาคม พ.ศ. 2558 ช่วงเวลา 15.50 ถึง 16.10 น. แสงอาทิตย์มีความสว่างเฉลี่ยเท่ากับ 52,485 lx ทำให้แผงพีวีมีกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ และจุดเอ็มพีพีทีที่มีกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด

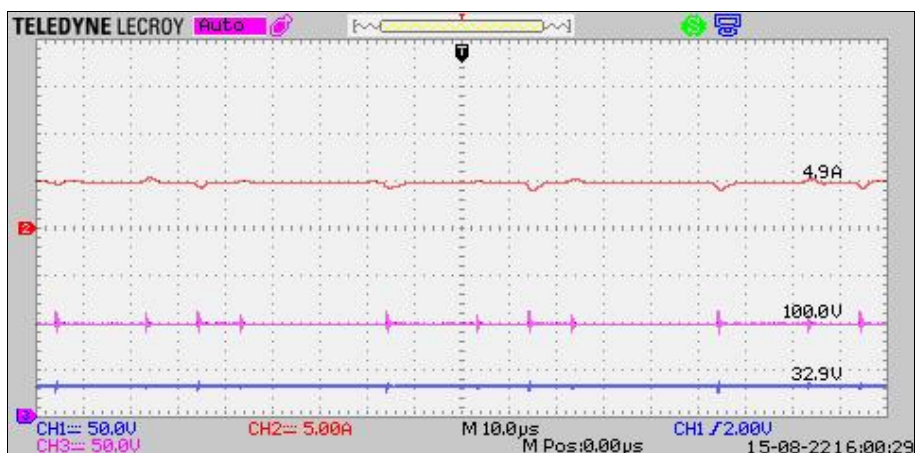
เท่ากับ 5.0 A และ 32.7 V ตามลำดับซึ่งแสดงในรูปที่ 7.7 (ก) จากผลการทดสอบชุดวงจรต้นแบบพบว่า ขณะที่ปรับเปลี่ยนค่าโหลดตัวทานของวงจรแปลงผันบูสต์ให้ได้แรงดันดีซีเอาต์พุตเท่ากับ 120 V 100 V และ 75 V ซึ่งแสดงในรูปที่ 7.7 (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ โดยในแต่ละค่าแรงดันดีซีเอาต์พุตนั้นวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคเลื่อนสามารถบังคับให้แผงพีวีจ่ายกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและสร้างแรงดันเฉลี่ยที่มีค่าเท่ากับ 4.9 A และ 32.9 V ตามลำดับ ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าและแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ที่อ่านได้จากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ จากผลการทดสอบดังกล่าวนี้แสดงถึงสมรรถนะในการทำงานของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนได้เป็นอย่างดี เนื่องจากวงจรดังกล่าวสามารถบังคับให้แผงพีวีสร้างแรงดันและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ติดตามแรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (V_{mp}) และกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp}) ภายได้แสงอาทิตย์จริงได้อย่างถูกต้องแม้ว่าวงจรดังกล่าวจะมีการเชื่อมกับโหลดตัวต้านทานที่มีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นในช่วงเวลาดังกล่าวแผงพีวีจึงผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ $(4.9 \text{ A}) \times (32.9 \text{ V}) = 161 \text{ W}$ ส่งไปยังด้านอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์



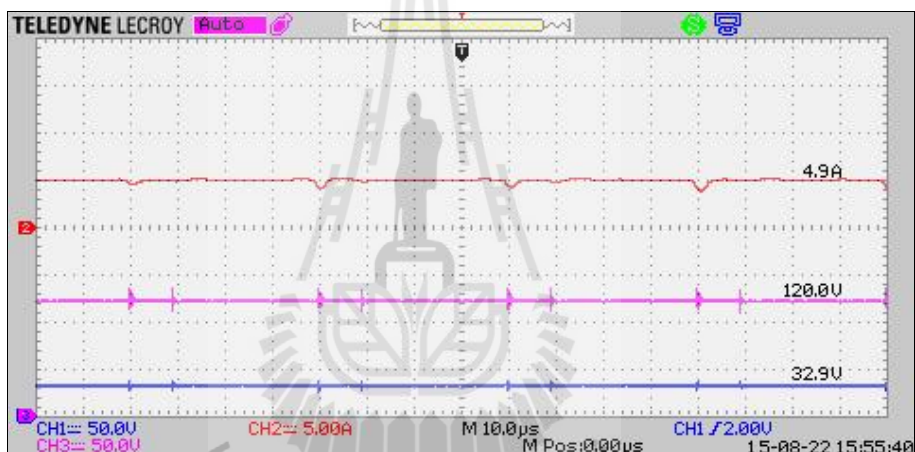
(ก)



(ข)



(ก)



(ง)

รูปที่ 7.7 ผลการทดสอบของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนร่วมกับแผงพีวีภายใต้แสงอาทิตย์จริงในวันที่ท้องฟ้าโปร่งและมีแสงอาทิตย์อ่อน ๆ

(ก) กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีที่ได้จากการทดสอบ

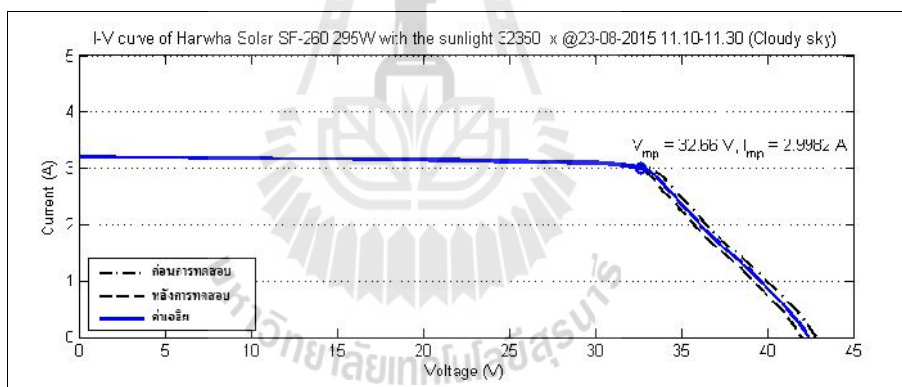
(ข) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 120 V

(ค) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 100 V

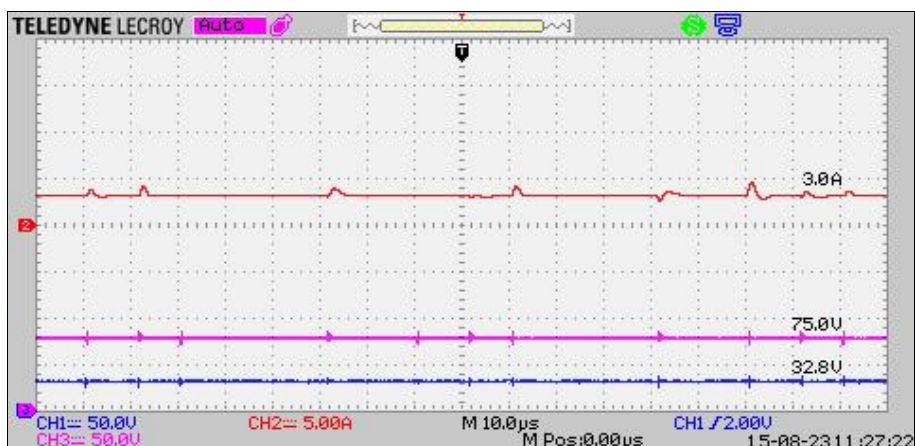
(ง) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 75 V

3.) วันที่มีท้องฟ้ามีครึ้ม ซึ่งได้ทดสอบในวันที่ 23 สิงหาคม พ.ศ. 2558 ช่วงเวลา 11.10 ถึง 11.30 น. แสงอาทิตย์มีความสว่างเฉลี่ยเท่ากับ 32,350 lx ทำให้แผงพีวีมีกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ และจุดเอ็มพีพีทีที่มีกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 3.0 A และ 32.7

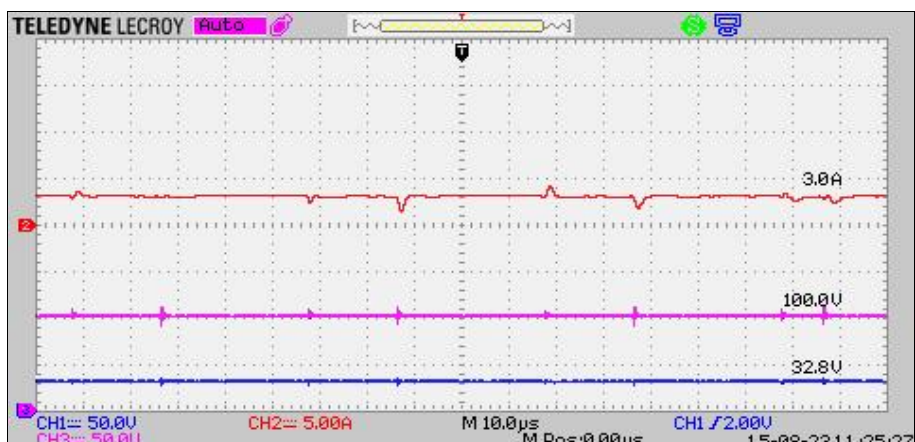
V ตามลำดับซึ่งแสดงในรูปที่ 7.8 (ก) จากผลการทดสอบชุดวงจรต้นแบบพบว่า ขณะที่ปรับเปลี่ยนค่าโหลดตัวทานของวงจรแปลงผันบูสต์ให้ได้แรงดันดีซีเอาต์พุตเท่ากับ 120 V 100 V และ 75 V ซึ่งแสดงในรูปที่ 7.8 (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ โดยในแต่ละค่าแรงดันดีซีเอาต์พุตนั้นวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดเล็กลงสามารถบังคับให้แผงพีวีจ่ายกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและสร้างแรงดันเฉลี่ยที่มีค่าเท่ากับ 3.0 A และ 32.8 V ตามลำดับ ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าและแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ที่อ่านได้จากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ จากผลการทดสอบดังกล่าวนี้แสดงถึงสมรรถนะในการทำงานของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเล็กลงได้เป็นอย่างดี เนื่องจากวงจรดังกล่าวสามารถบังคับให้แผงพีวีสร้างแรงดันและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ติดตามแรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (V_{mp}) และกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp}) ภายใต้อาติคัยจริงได้อย่างถูกต้องแม้ว่าวงจรดังกล่าวจะมีการเชื่อมกับโหลดตัวต้านทานที่มีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นในช่วงเวลาดังกล่าวแผงพีวีจึงผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ $(3.0 \text{ A}) \times (32.8 \text{ V}) = 98 \text{ W}$ ส่งไปยังด้านอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์



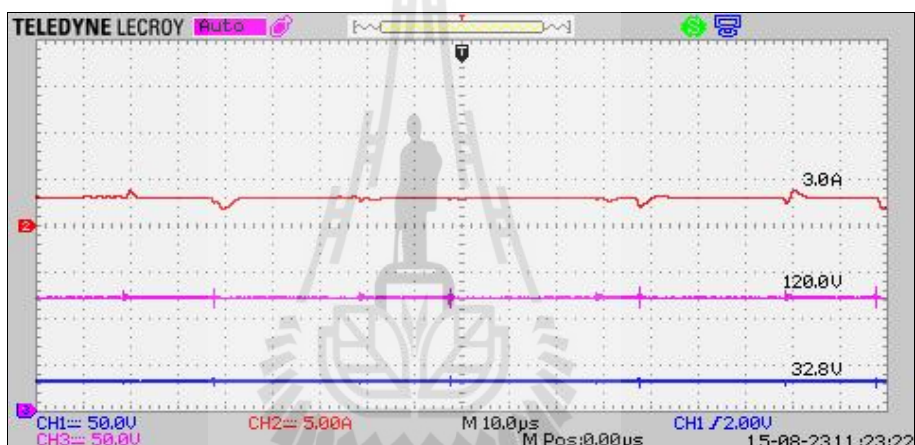
(ก)



(ข)



(ก)



(ง)

รูปที่ 7.8 ผลการทดสอบของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเคลื่อนร่วมกับแผงฟิวิภายใต้แสงอาทิตย์จริงในวันที่ท้องฟ้ามีดครึ้ม

(ก) กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงฟิวิที่ได้จากการทดสอบ

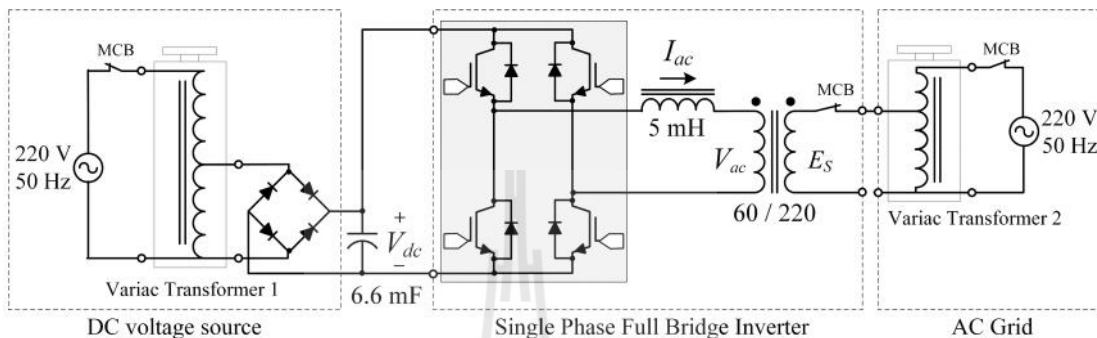
(ข) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 120 V

(ค) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 100 V

(ง) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) ที่แรงดันดีซี (สีชมพู) 75 V

ผลการทดสอบของแผงฟิวิและวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเคลื่อนภายใต้แสงอาทิตย์จริงและแสงเทียมที่ได้แสดงในรูปที่ 7.5 ถึง 7.8 แสดงถึงสมรรถนะในการติดตามกำลังงานสูงสุดของแผงฟิวิและวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีได้เป็นอย่างดีเนื่องจากเมื่อวงจรแปลงผันบูสต์เชื่อมต่อโหลดที่มีค่าความต้านทานที่แตกต่างกัน วงจรแปลง

- (4) ตัวเหนี่ยวนำ L_f 5 mH (5) หม้อแปลง 60/220 V, 50 Hz
 (6) วงจรวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าด้วยไอซี AMC1200
 (7) หม้อแปลงที่ปรับแรงดันได้ตัวที่ 2 (8) โหลดตัวต้านทานที่ปรับค่าได้
 (9) ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ FLUKE รุ่น 79III, ออสซิลโลสโคป LeCroy waveAce 2024



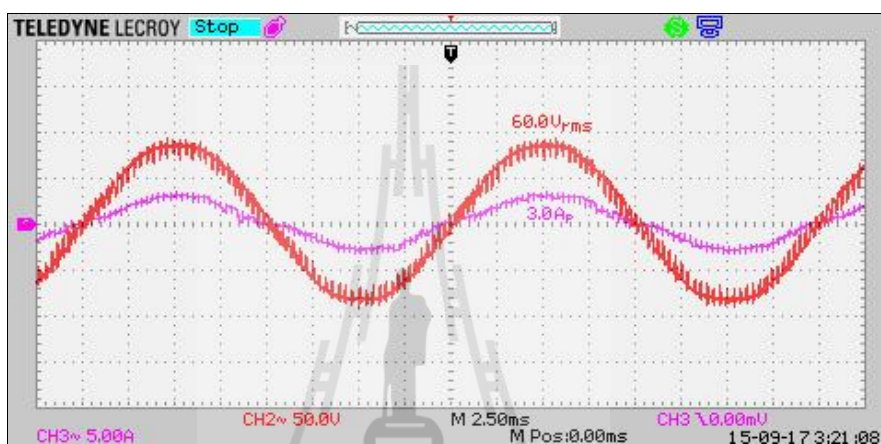
รูปที่ 7.10 วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว

การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวในส่วนแรกเป็นการทดสอบการแปลงแรงดันดีซีไปเป็นแรงดันเอซีสำหรับการเชื่อมต่อกริด เริ่มต้นทดสอบโดยการปรับหม้อแปลงที่ปรับแรงดันได้ตัวที่ 1 ให้ได้แรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ (V_{dc}) เท่ากับ 100 V จากนั้นทำการปรับหม้อแปลงที่ปรับแรงดันได้ตัวที่ 2 ให้ได้แรงดันกริดเอซี (E_s) เท่ากับ 220 V_{rms} ในการทดสอบนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ของควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดดังนี้

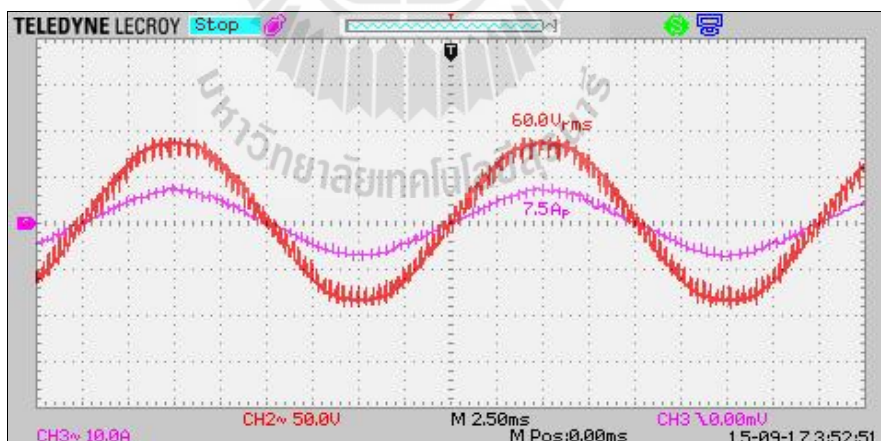
1.) เมื่อกำหนดค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง ($I_{ac, ref}^{peak}$) เท่ากับ 3 A จากผลการทดสอบพบว่า ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดสามารถบังคับให้วงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (I_{ac}) เป็นรูปคลื่นไซน์ซอซอด์และมีมุมเฟสตรงกันกับสัญญาณแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (V_{ac}) 60 V_{rms} โดยที่กระแสไฟฟ้ากริดดังกล่าวนี้มีค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดเท่ากับค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง 3 A ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 7.11 (ก)

2.) เมื่อกำหนดค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง ($I_{ac, ref}^{peak}$) เท่ากับ 7.5 A จากผลการทดสอบพบว่า ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดสามารถบังคับให้วงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (I_{ac}) เป็นรูปคลื่นไซน์ซอซอด์และมีมุมเฟสตรงกันกับสัญญาณแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (V_{ac}) 60 V_{rms} โดยที่กระแสไฟฟ้ากริดดังกล่าวนี้มีค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดเท่ากับค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง 7.5 A ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 7.11 (ข)

ผลการทดสอบชุดวงจรต้นแบบดังกล่าวนี้แสดงถึงสมรรถนะในการทำงานของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดได้เป็นอย่างดี เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าวสามารถบังคับให้วงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสไฟฟ้ากริดที่มีค่าสอดคล้องกับค่าของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงได้อย่างถูกต้อง รวมถึงการบังคับให้กระแสไฟฟ้ากริดดังกล่าวมีรูปคลื่นไซน์ชอยด์และมีมมเฟสตรงกันกับสัญญาณแรงดันกริด ซึ่งส่งผลทำให้กริดเอซีมีตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่งและเกิดการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายดีซีด้านอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ไปยังกริดเอซี



(ก)



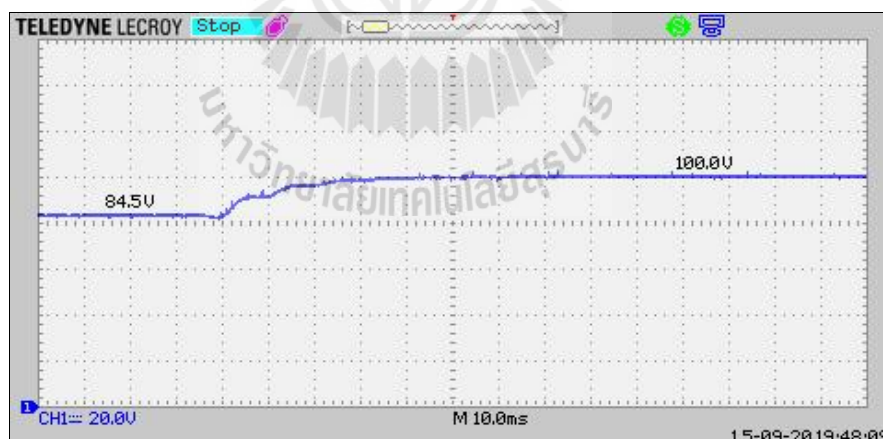
(ข)

รูปที่ 7.11 สัญญาณกระแสไฟฟ้ากริด (สีชมพู) และแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (สีแดง)

(ก) เมื่อกำหนดค่าของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงเท่ากับ 3.0 A

(ข) เมื่อกำหนดค่าของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงเท่ากับ 7.5 A

การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวในส่วนที่สองเป็นการทดสอบการคุมค่าแรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าคงที่เท่ากับจุดปรับตั้ง 100 V ซึ่งการทดสอบในส่วนนี้ได้ใช้วงจรทดสอบชุดเดียวกันกับการทดสอบในส่วนแรกนั่นคือ วงจรไฟฟ้าในรูปที่ 7.10 โดยมีส่วนที่แตกต่างคือด้านอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวนั้นไม่มีส่วนของแหล่งจ่ายดีซีหรือไม่มีหม้อแปลงที่ปรับแรงดันได้ตัวที่ 1 และวงจรเรียงกระแส เพื่อให้สามารถควบคุมแรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ตกรวมตัวเก็บประจุดีซี 6.6 mF ได้ เริ่มต้นทดสอบโดยการปรับหม้อแปลงที่ปรับแรงดันได้ตัวที่ 2 ให้ได้แรงดันกริดเอซี (E_g) เท่ากับ 220 V_{rms} หรือมีแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (V_{ac}) เท่ากับ 60 V_{rms} ตามอัตราส่วนขดลวดของหม้อแปลง ด้วยเหตุนี้วงจรอินเวอร์เตอร์จึงมีแรงดันดีซีอินพุตเท่ากับ 84.5 V หรือมีค่าเท่ากับแรงดันดีซีที่เกิดขึ้นจากการทำงานของไดโอดที่ต่อขนานกลับด้าน (antiparallel diode) ของไอจีบีทีแต่ละตัวในโมดูลไอจีบีทีเซพบริดจ์ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรเรียงกระแสเปลี่ยนแรงดันกริดเอซีเป็นแรงดันดีซีที่มีค่าประมาณเท่ากับค่ายอดของแรงดันกริด $60\sqrt{2}$ V ในการทดสอบนี้ได้กำหนดให้ตัวควบคุมแรงดันดีซีมีแรงดันดีซีอ้างอิง ($V_{dc, ref}$) เท่ากับ 100 V จากผลการทดสอบพบว่า ตัวควบคุมแรงดันดีซีสามารถบังคับให้วงจรอินเวอร์เตอร์มีแรงดันดีซีอินพุตเข้าสู่หาค่าแรงดันดีซีอ้างอิง 100 V ในสถานะอยู่ตัวได้อย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 40 ms ซึ่งแสดงในรูปที่ 7.12



รูปที่ 7.12 การลู่เข้าหาค่าแรงดันดีซีอ้างอิง 100 V ของแรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์

7.5 การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน

การทดสอบชุดวงจรต้นแบบในส่วนนี้เป็นการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน ซึ่งประกอบด้วยชุดวงจรต้นแบบทั้ง 2 ภาคได้แก่ วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนและวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวเชื่อมต่ออนุกรมกันตามลำดับ โดยชุดวงจรต้นแบบนี้มีด้านอินพุตของวงจรเชื่อมต่อกับแผงพีวี Hanwha Solar รุ่น SF260, 295W และมีด้านเอาต์พุตเชื่อมต่อกับกริดเอซี 220 V ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ไฟฟ้าเอซีที่เชื่อมต่อมาจากปลั๊กไฟฟ้าภายในอาคารนำมาใช้เป็นกริดเอซีสำหรับการทดสอบ ขณะเดียวกันได้นำหม้อแปลงที่ปรับแรงดันได้ (variac transformer) และเบรกเกอร์มาเชื่อมต่อระหว่างด้านเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์และกริดเอซีดังกล่าว หม้อแปลงที่ปรับแรงดันได้นี้จะช่วยให้สามารถปรับแรงดันกริดเอซีในระหว่างการทดสอบได้ ส่วนเบรกเกอร์นั้นทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อการเชื่อมต่อกริดเอซีและยังป้องกันการเกิดกระแสไฟฟ้าเกินในระหว่างดำเนินการทดสอบชุดวงจรต้นแบบด้วย ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทดสอบชุดวงจรต้นแบบทั้ง 2 ภาคร่วมกับแผงพีวีภายใต้เงื่อนไขดังนี้

- 1.) การทดสอบชุดวงจรต้นแบบทั้ง 2 ภาคที่มีการเชื่อมต่อกริดภายใต้แสงอาทิตย์จริง ซึ่งแสดงในรูปที่ 7.13
- 2.) การทดสอบชุดวงจรต้นแบบทั้ง 2 ภาคที่มีการเชื่อมต่อกริดภายใต้แสงเทียม

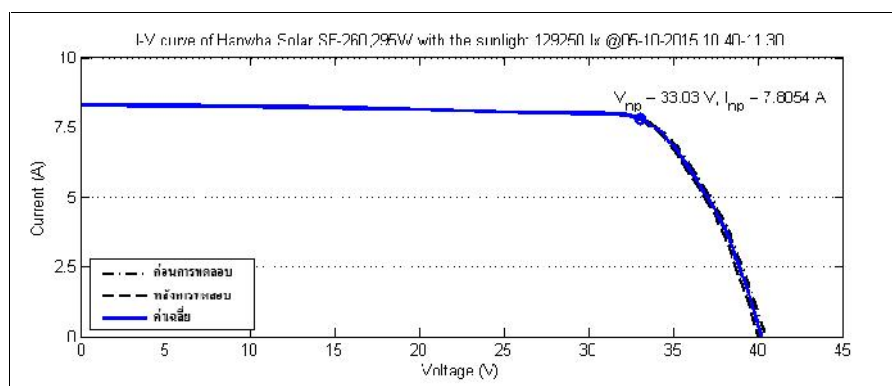


รูปที่ 7.13 การทดสอบชุดวงจรต้นแบบทั้ง 2 ภาคที่มีการเชื่อมต่อกริดภายใต้แสงอาทิตย์จริง

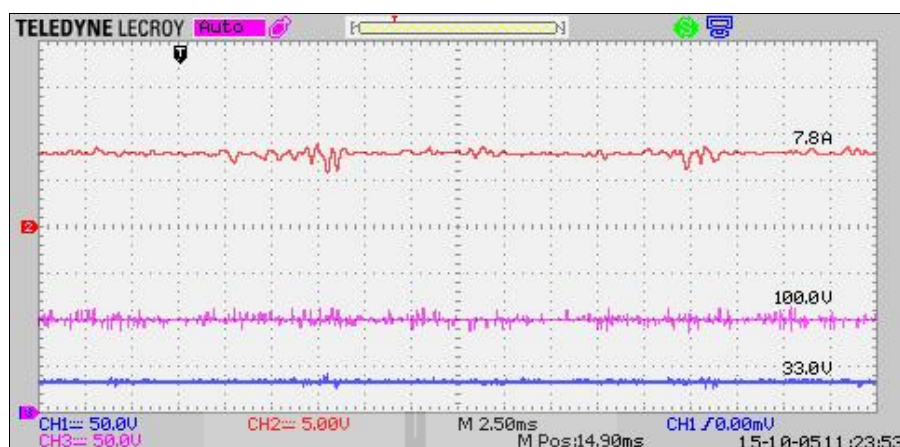
ภายใต้แสงอาทิตย์จริงซึ่งได้ทดสอบชุดวงจรต้นแบบทั้ง 2 ภาคในวันที่ 5 ตุลาคม พ.ศ. 2558 ช่วงเวลา 10.40 ถึง 11.30 น. แสงอาทิตย์มีความสว่างเฉลี่ยเท่ากับ 129,250 lx ในช่วงเวลาดังกล่าว

นี้แผงพีวีมีกราฟเส้นโค้งลักษณะ $i-v$ และจุดเอ็มพีพีทีที่มีกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 7.8 A และ 33.0 V ตามลำดับซึ่งแสดงในรูปที่ 7.14 (ก) จากผลการทดสอบชุดวงจรต้นแบบทั้ง 2 ภาคพบว่า วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนได้บังคับให้แผงพีวีจ่ายกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและสร้างแรงดันเฉลี่ยที่มีค่าเท่ากับ 7.8 A และ 33.0 V ตามลำดับซึ่งแสดงในรูปที่ 7.14 (ข) อาจกล่าวได้ว่าวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีนี้สามารถบังคับให้แผงพีวีสร้างแรงดันและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ติดตามแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดของแผงพีวีได้ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $(7.8 \text{ A}) \times (33.0 \text{ V}) = 257 \text{ W}$ ส่งจ่ายไปยังด้านอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ ในขณะที่ระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์ได้บังคับให้แรงดันคิซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวมีค่าคงที่เท่ากับจุดปรับตั้ง 100 V ซึ่งแสดงในรูปที่ 7.14 (ข) และมีกระแสไฟฟ้าคิซี (I_{dc}) ไหลเข้าด้านอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 2.2 A ส่งผลทำให้มีกำลังไฟฟ้าคิซีเฉลี่ยเท่ากับ $(2.2 \text{ A}) \times (100.0 \text{ V}) = 220 \text{ W}$ ไหลผ่านไปยังด้านอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ นอกจากนี้ระบบควบคุมป้อนกลับดังกล่าวยังได้บังคับให้วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวจ่ายกระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (I_{ac}) ให้มีรูปคลื่นไซน์ซอซอซด์เท่ากับ $3.4 \text{ A}_{\text{rms}}$ และมีมุมเฟสตรงกันกับสัญญาณแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (V_{ac}) เท่ากับ $60 \text{ V}_{\text{rms}}$ ซึ่งแสดงในรูปที่ 7.14 (ค) ด้วยเหตุนี้กริดเอซีจึงมีตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่งและทำให้เกิดส่งจ่ายของกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากแผงพีวีไปยังกริดเอซีเท่ากับ $(3.4 \text{ A}_{\text{rms}}) \times (60 \text{ V}_{\text{rms}}) = 204 \text{ W}$ และการทดสอบชุดวงจรต้นแบบทั้ง 2 ภาคจะให้ประสิทธิภาพดังนี้

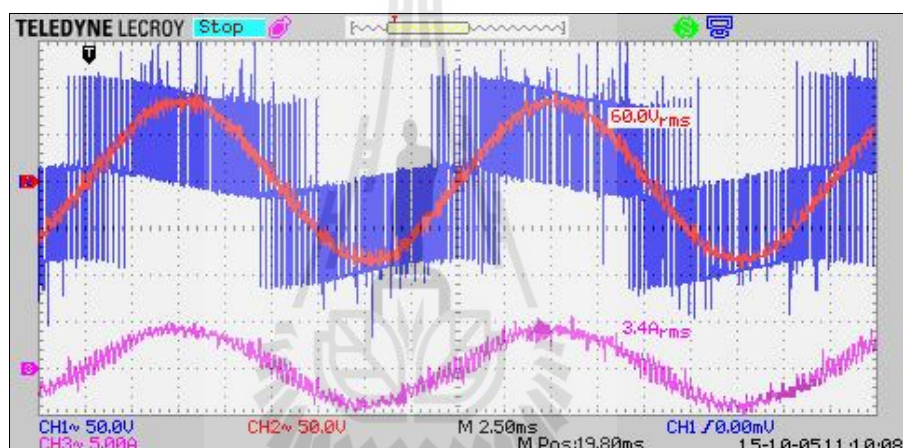
- 1.) วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนมีประสิทธิภาพเท่ากับ $(220 \text{ W} / 257 \text{ W}) \times 100\% = 85.6\%$
- 2.) วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวมีประสิทธิภาพเท่ากับ $(204 \text{ W} / 220 \text{ W}) \times 100\% = 92.7\%$



(ก)



(ข)

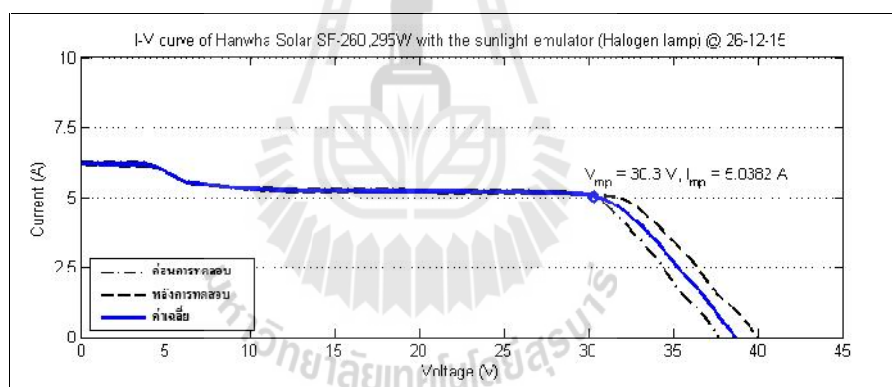


(ค)

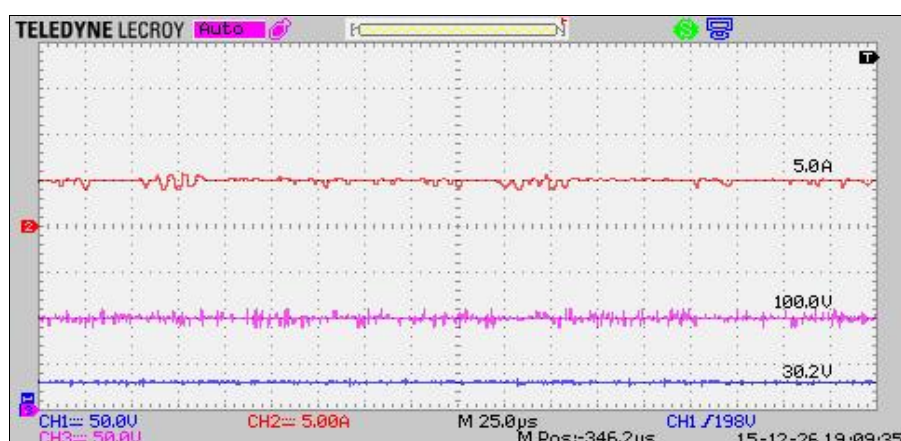
- รูปที่ 7.14 สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการวัดของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียว ที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนภายใต้แสงอาทิตย์จริงที่ทดสอบ
- (ก) กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีที่ได้จากการทดสอบ
- (ข) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) และแรงดันดีซี (สีชมพู) ของวงจรแปลงผันบูสต์
- (ค) แรงดันเอซีเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ (สีน้ำเงิน) แรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (สีแดง) และกระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (สีชมพู)

ภายใต้แสงเทียมซึ่งได้ทดสอบชุดวงจรต้นแบบทั้ง 2 ภาค แผงพีวีมีกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ และจุดเอ็มพีพีทีที่มีกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 5.0 A และ 30.3 V ตามลำดับซึ่งแสดงในรูปที่ 7.15 (ก) จากผลการทดสอบชุดวงจรต้นแบบทั้ง 2 ภาค

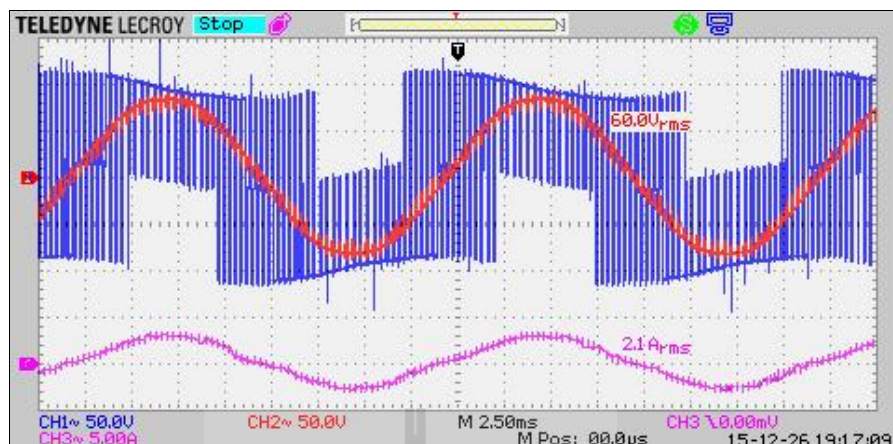
พบว่า วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนได้บังคับให้แผงพีวีจ่ายกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและสร้างแรงดันเฉลี่ยที่มีค่าเท่ากับ 5.0 A และ 30.2 V ตามลำดับ ซึ่งแสดงในรูปที่ 7.15 (ข) อาจกล่าวได้ว่าวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีนี้สามารถบังคับให้แผงพีวีสร้างแรงดันและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ติดตามแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดของแผงพีวีได้ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $(5.0 \text{ A}) \times (30.2 \text{ V}) = 151 \text{ W}$ ส่งจ่ายไปยังด้านอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ ในขณะที่ระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์ได้บังคับให้แรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวมีค่าคงที่เท่ากับจุดปรับตั้ง 100 V ซึ่งแสดงในรูปที่ 7.15 (ข) รวมทั้งได้บังคับให้วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวจ่ายกระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (I_{ac}) ให้มีรูปคลื่นไซน์ชอยด์เท่ากับ 2.1 A_{rms} และมีมุมเฟสตรงกันกับสัญญาณแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (V_{ac}) เท่ากับ 60 V_{rms} ซึ่งแสดงในรูปที่ 7.15 (ค) ด้วยเหตุนี้กริดเอซีจึงมีตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่งและทำให้เกิดส่งจ่ายของกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากแผงพีวีไปยังกริดเอซีเท่ากับ $(2.1 \text{ A}_{rms}) \times (60 \text{ V}_{rms}) = 126 \text{ W}$



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 7.15 สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการวัดของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียว ที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนภายใต้แสงเทียมที่ทดสอบ

(ก) กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีที่ได้จากการทดสอบ

(ข) แรงดันอินพุต (สีน้ำเงิน) กระแสไฟฟ้าอินพุต (สีแดง) และแรงดันดีซี (สีชมพู) ของวงจรแปลงผันบูสต์

(ค) แรงดันเอซีเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ (สีน้ำเงิน) แรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (สีแดง) และกระแสไฟฟ้ากริดปฐมภูมิของหม้อแปลง (สีชมพู)

7.6 สรุป

ผลการทดสอบชุดวงจรต้นแบบของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียว ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนที่ได้นำเสนอในบทนี้ แสดงถึงสมรรถนะในการทำงานร่วมกันของวงจรทั้งสองภาคได้เป็นอย่างดี เนื่องจากวงจрдังกล่าวนั้นสามารถบังคับแผงพีวีผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดและได้บังคับให้เกิดการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าดังกล่าวไปยังกริดเอซีได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นที่น่าพอใจบรรลุตามวัตถุประสงค์การวิจัยของงานวิทยานิพนธ์นี้ กล่าวคือ วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนซึ่งเป็นวงจรในภาคแรกนั้นสามารถบังคับให้แผงพีวีสร้างแรงดันและจ่ายกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ติดตามค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดของแผงพีวีได้ตลอดเวลา ซึ่งในการทดสอบภายใต้แสงอาทิตย์จริงนั้นแผงพีวีสามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยได้สูงสุดเท่ากับ 257 W ในขณะที่วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวซึ่งเป็นวงจรในภาคที่สองนั้นสามารถคุมค่าแรงดันดีซีอินพุต

ของวงจรอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าคงที่ 100 V รวมทั้งสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้ากริดที่มีรูปคลื่นไซน์ ซอยด์และมีมุมเฟสตรงกันกับสัญญาณแรงดันกริดปฐมภูมิของหม้อแปลง 60 V_{rms} ซึ่งมีผลทำให้กริดเอชมีตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่งและเกิดการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงฟิโวลไปยังกริดเอชสูงสุดเท่ากับ 204 W



บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

จากการศึกษาและพัฒนาระบบการแปลงผันกำลังงานไฟฟ้าดิซีสสูงสุดที่ผลิตได้จากแผงพีวีไปเป็นกำลังงานไฟฟ้าเอซีที่เชื่อมต่อถึงกริดเอซี สามารถสรุปผลงานวิทยานิพนธ์ได้ดังนี้

1. งานวิทยานิพนธ์นี้ได้การออกแบบสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน ซึ่งประกอบด้วยวงจรไฟฟ้า 2 ภาคคือวงจรแปลงผันบวสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนและวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว

2. หน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนได้ใช้เส้นตรงการเลื่อนที่ดีที่สุดของแผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260 นำมาสร้างสัญญาณขับขาเกตควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันบวสต์ ซึ่งการทำงานของวงจรแปลงผันบวสต์ตามลักษณะสัญญาณขับขาเกตนี้ ส่งผลบังคับให้แผงพีวีมีจุดการทำงานอยู่ในตำแหน่งจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนนี้กับเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีขณะที่อัลกอริทึมพีแอนด์โอซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของหน่วยเอ็มพีพีทีนี้ได้ปรับเปลี่ยนค่าคงที่ ref ของเส้นตรงการเลื่อนใหม่ตามค่ากำลังงานไฟฟ้าที่แผงพีวีผลิตได้ เพื่อช่วยบังคับให้เส้นตรงการเลื่อนนี้ขยับเลื่อนไปยังตำแหน่งที่มีจุดตัดกับเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งจุดเอ็มพีพีวียิ่งขึ้นส่งผลทำให้แผงพีวีสามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด

3. ระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวประกอบด้วยตัวควบคุมแรงดันดิซีส ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด และเฟสล็อกกลูบ โดยตัวควบคุมแรงดันดิซีสทำหน้าที่คุมค่าแรงดันดิซีสอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าคงที่เท่ากับจุดปรับตั้ง 100 V ขณะที่ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดนั้นทำหน้าที่บังคับให้กระแสไฟฟ้ากริดมีคลื่นเป็นสัญญาณไซน์ซอชอยด์และมีมุมเฟสตรงกันกับมุมเฟสของสัญญาณแรงดันกริด

4. หน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนมีเสถียรภาพในการทำงานที่ดี เนื่องจากหน่วยเอ็มพีพีทีดังกล่าวและวงจรแปลงผันบวสต์ได้บังคับให้แผงพีวีมีจุดการทำงานเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในตำแหน่งจุดตัดระหว่างเส้นตรงการเลื่อนและเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวี ซึ่งเป็นจุดสมดุลที่อยู่ภายในบริเวณที่มีเสถียรภาพบนระนาบเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวี

5. ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมตการเลื่อน แสดงถึงสมรรถนะในการติดตามกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดและการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากแผงพีวีไปยังกริดเอซีได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากวงจรดังกล่าวสามารถบังคับให้แผงพีวีสร้างแรงดันและจ่ายกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดได้ ตลอดจนมีสัญญาณกระแสไฟฟ้ากริดที่มีรูปคลื่นไซน์ซอซอด์และมีมุมเฟสตรงกันกับสัญญาณแรงดันกริดเอซี ซึ่งส่งผลทำให้กริดเอซีมีตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับหนึ่งทำให้เกิดการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากแผงพีวีไปยังกริดเอซีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. ชุดวงจรต้นแบบของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมตการเลื่อนที่ได้ออกแบบสร้างมีพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 320 W โดยมีแรงดันอินพุตพิกัดของวงจรแปลงผันบูสต์เท่ากับ 50 V และมีแรงดันกริดเอซีพิกัดเท่ากับ 220 V_{rms} ซึ่งระบบดังกล่าวมีผลการทดสอบที่ให้ประสิทธิภาพเท่ากับ 79% โดยประมาณภายใต้แสงอาทิตย์จริง และ 75.7% โดยประมาณภายใต้แสงอาทิตย์เทียม โดยวงจรดังกล่าวนี้สามารถบังคับให้แผงพีวีสร้างแรงดันและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ติดตามค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้อง ส่งผลทำให้แผงพีวีสามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด 254 W

8.2 ข้อเสนอแนะ

เมื่อพิจารณาการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ ผลการจำลองสถานการณ์ และผลการทดสอบของชุดวงจรต้นแบบที่สร้างขึ้นภายใต้แสงอาทิตย์จริงและแสงเทียม ทำให้ได้รับปัญหาและเกิดแนวคิดหรือข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคตดังนี้

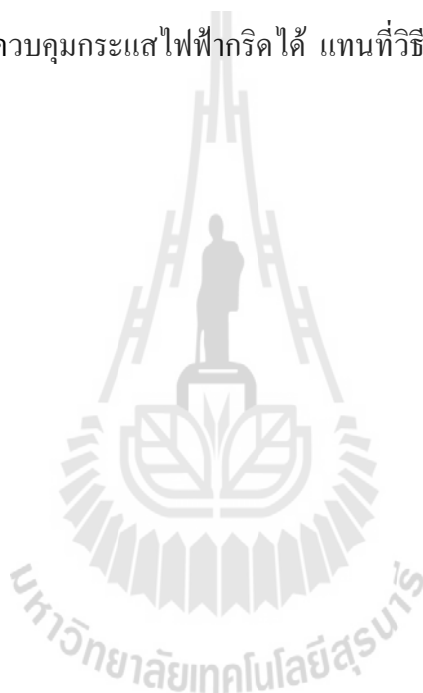
1.) ถ้าสามารถควบคุมชุดโคมไฟที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงเทียมนั้นให้มีความสว่างที่เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันได้ จะช่วยให้สามารถศึกษาและทดสอบชุดวงจรต้นแบบในงานวิทยานิพนธ์นี้ในสถานะชั่วคราวได้

2.) การสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการหากราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ของแผงพีวีที่เกิดขึ้นจริงภายใต้แสงอาทิตย์ที่ทดสอบในทุก ๆ 30 นาที ตลอดจนอุปกรณ์ที่ใช้ในการค้นหาตำแหน่งจุดเอ็มพีพีทีและเส้นตรงการเลื่อนที่ดีที่สุดของแผงพีวี ซึ่งจะช่วยให้เกิดความสะดวกในการสร้างหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมตการเลื่อนที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งมีความสะดวกในการเปรียบเทียบผลระหว่างจุดการทำงานของแผงพีวีและกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะ $i-v$ ในการทดสอบแต่ละครั้งได้

3.) การแก้ไขและพัฒนาโปรแกรมภาษาซีที่ทำให้สามารถใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวเดียวหรืออาจใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลางสองหน่วย (dual-core) แทนการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 2 ตัวที่ใช้ในการสร้างชุดวงจรต้นแบบของงานวิทยานิพนธ์นี้

4.) การใช้โมดูลกำลังที่มีวงจรแปลงผันบูสต์และวงจรอินเวอร์เตอร์เซชบริดจ์อยู่ภายในโมดูลเดียวกันจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น

5.) การเปลี่ยนกรอบอ้างอิงหรือการแปลงแกนของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดจากปริมาณเอซีไปเป็นปริมาณดีซีและการแปลงแกนย้อนกลับ จะช่วยให้เขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมป้อนกลับทั้งหมดได้ทำให้เกิดความสะดวกในการออกแบบหรือคำนวณค่าเกนของตัวควบคุมแรงดันดีซีและตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดได้ แทนที่วิธีการลองผิดลองถูกปรับจูนค่าเกนที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้

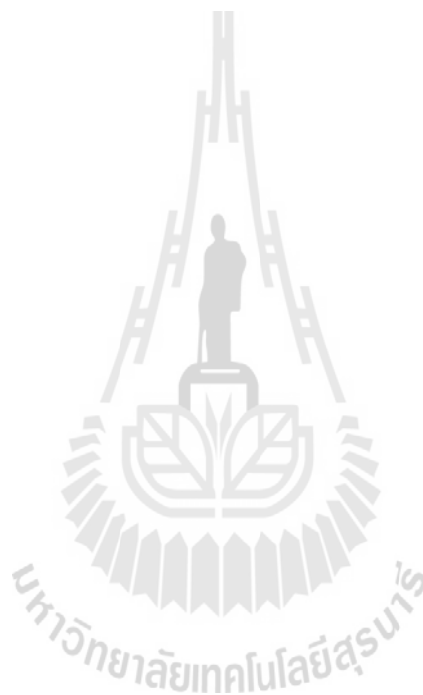


รายการอ้างอิง

- “ประกาศคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน เรื่อง การรับซื้อไฟฟ้าจากการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา” (2556, 6 กันยายน): 1-6
- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2547). ระเบียบการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนขนาดเล็ก (VSPP): 1-22
- ปราโมทย์ เคะชะอำไพ และนิพนธ์ วรรณโสภณ (2555). การถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.: 215-250
- Abdelsalam, A.K., Massoud, A.M., Ahmed, S., and Enjeti, P.N. (2011). High-Performance Adaptive Perturb and Observe MPPT Technique for Photovoltaic-Based Microgrids. **IEEE Trans. Power Electronics**. 26(4): 1010-1021
- Brea, E.A.J., Ortiz-Rivera, E.I., Salazar-Llinas, A., and Gonzalez-Llorente, J. (2010). Simple Photovoltaic Solar Cell Dynamic Sliding Mode Controlled Maximum Power Point Tracker for Battery Charging Applications. **25th Annual IEEE Conf. Applied Power Electronics.**: 666-671
- Chen, Y.-M., Liu, K.-Y., Chiang, S.-K., and Chang, Y.-R. (2009). Bi-Directional Grid-Tied Inverter with Predictive Current Control. **IEEE Conf. Energy Conversion Congress and Exposition.**: 916-919
- Esrarn, T., and Chapman, P.L. (2007). Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. **IEEE Trans. Energy Conversion**. 22(2): 439-449
- Green, M.A. (1982). **Solar Cells**. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Hanwha Solar (2012). Hanwha Solar SF260 Poly x-tra. [Internet]. [cited 2015 Dec 25]. Available from: <http://www.solarpanelsplus.com/PV-Specials/Hanwha-Poly-290.pdf>
- Hart, D.W. (2011). The Boost Converter. **Power Electronics**. McGraw-Hill: New York.: 211-220
- Islam, Md.A., Talukdar, A.B., Mohammad, N., Khan, P.K.S. (2010). Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Arrays in Matlab Using Fuzzy Logic Controller. **Annual IEEE India Conf.**: 1-4

- Jaen, C., Moyano, C., Santacruz, X., Pou, J., and Arias, A. (2008). Overview of Maximum Power Point Tracking Control Techniques Used in Photovoltaic Systems. **15th IEEE Int. Conf. Electronics, Circuits and Systems.**: 1099-1102
- Kim, I.-S., and Youn, M.-J. (2005). Variable-Structure Observer for Solar-Array Current Estimation in a Photovoltaic Power-Generation System. **IEE Proc. -Electr Power Appl.** 152(4): 953-959
- LEM (2012). Voltage Transducer LV 25-P. [Internet]. [cited 2015 Dec 25]. Available from: <http://www.lem.com/docs/products/lv%2025-p.pdf>
- Levron, Y., and Shmilovitz, D. (2013). Maximum Power Point Tracking Employing Sliding Mode Control. **IEEE Trans. Circuits And Systems.** 60(3): 724-732
- Liu, F., Kang, Y., Zhang, Y., and Duan, S. (2008). Comparison of P&O and Hill Climbing MPPT Methods for Grid-Connected PV Converter. **3rd IEEE Conf. Industrial Electronics and Applications.**: 804-807
- Selvaraj, J., Rahim, N.A., and Krismadinata, C. (2008). Digital PI Current Control for Grid Connected PV Inverter. **IEEE Conf. Industrial Electronics and Applications.**: 742-746
- Sharma, D.K., and Purohit G. (2012). Advanced Perturbation and Observation (P&O) based Maximum Power Point Tracking (MPPT) of a Solar Photo-Voltaic System. **5th IEEE India Int. Conf. Power Electronics.**: 1-5
- Singh, M.D., Shine V J, and Janamala, V. (2014). Application of Artificial Neural Networks in Optimizing MPPT Control for Standalone Solar PV System. **Int. Conf. Contemporary Computing and Informatics.**: 162-166
- STMicroelectronics (2011). TD352. [Internet]. [cited 2015 Dec 25]. Available from: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00047616.pdf>
- Tao, J., Xue, V., and Texas Instruments. (2013). Grid-Connected Micro Solar Inverter Implement Using a C2000 MCU. **Application Report. (SPRABT0).**: 1-35
- Walker, S.S.W., Sooriyaarachchi, N.K., Liyanage, N.D.B., Abeynayake P.A.G.S., and Abeyratne S.G. (2011). Comparative Analysis of Speed of Convergence of MPPT Techniques. **6th IEEE Int. Conf. Industrial and Information Systems.**: 522-526
- Wenham, S.R., Green, M.A., Watt, M.E., and Corkish, R. (2007). Radiation on tilted surfaces. **Applied Photovoltaics.** 2nd ed. Earthscan.: 22-25

- Wenham, S.R., Green, M.A., Watt, M.E., and Corkish, R. (2007). The Behavior of Solar Cells. **Applied Photovoltaics**. 2nd ed. Earthscan.: 43-51
- Yazdani, D., Pahlevaninezhad, M., and Bakhshai, A. (2009). Single-Phase Grid-Synchronization Algorithms For Converter Interfaced Distributed Generation Systems. **Canadian Conf. Electrical and Computer Engineering**.: 127-131
- Yu, G.-R., and Wei, J.-S. (2011). Modeling and Control of a Bi-directional Inverter for DC Microgrids. **Int. Conf. System Science and Engineering**.: 425-430





ภาคผนวก ก

แผนภาพวงจรของชุดวงจรต้นแบบวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกริด
สองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน

แผนภาพวงจร (schematics circuit) ของชุดวงจรต้นแบบวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนที่แสดงรายละเอียดทางฮาร์ดแวร์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ไอซี โมดูลกำลัง และพารามิเตอร์ที่ใช้สร้างชุดวงจรต้นแบบ ประกอบด้วยแผนภาพวงจรทั้งหมด 14 รายการดังต่อไปนี้

1. วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน
2. วงจรเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าอินพุต (i) และวงจรเซ็นเซอร์วัดแรงดันอินพุต (v)
3. การเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1
4. วงจรแหล่งจ่ายดีซีสำหรับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กำลัง Q1 และวงจรเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบูสต์
5. วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว
6. วงจรเซ็นเซอร์วัดแรงดันดีซีอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว (V_{dc})
7. วงจรเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริด และวงจรเซ็นเซอร์วัดแรงดันกริด
8. วงจรขับเคลื่อนไอจีบีทีที่ 1 และ 2 ทำหน้าที่ขับเคลื่อนของไอจีบีที T1 และ T2 ของโมดูลไอจีบีทีเซชบริดจ์ตามลำดับ
9. วงจรขับเคลื่อนไอจีบีทีที่ 3 และ 4 ทำหน้าที่ขับเคลื่อนของไอจีบีที T3 และ T4 ของโมดูลไอจีบีทีเซชบริดจ์ตามลำดับ
10. การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU2
11. วงจรแหล่งจ่ายดีซีสำหรับวงจรขับเคลื่อนไอจีบีทีชุดที่ 1 – 4 ของวงจรอินเวอร์เตอร์
12. วงจรแหล่งจ่ายดีซีสำหรับวงจรเซ็นเซอร์วัดแรงดันดีซี
13. วงจรแหล่งจ่ายดีซีสำหรับวงจรเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริด
14. วงจรแหล่งจ่ายดีซีสำหรับวงจรเซ็นเซอร์วัดแรงดันกริด

ภาคผนวก ข

โปรแกรมภาษาซีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1 และ MCU2
สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โปรแกรมภาษาซีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCU1 และ MCU2 ที่กำหนดให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 Experimental kits ทำหน้าที่หน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนและระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรถึงอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว ตามลำดับ ที่ใช้งานในชุดวงจรต้นแบบวงจรถึงอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน ประกอบด้วยโปรแกรมภาษาซี จำนวน 2 โปรแกรมดังต่อไปนี้

MCU1 โปรแกรมภาษาซีของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน

- 1.) MCU1.c คือ โปรแกรมหลัก (main program)
- 2.) Ext_Interrupt1.c คือ โปรแกรมอินเตอร์รัพต์ภายนอก

(สวิตซ์เลือกโหมคการทำงานของโปรแกรม)

MCU2 โปรแกรมภาษาซีของระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรถึงอินเวอร์เตอร์

- 1.) MCU2.c คือ โปรแกรมหลัก (main program)
- 2.) CNTL_INV_F.c คือ ตัวควบคุมแรงดันดีซีและตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด
- 3.) CNTL_INV_H.h คือ Header file ของไฟล์ CNTL_INV_F.c
- 4.) Solar library 1.2 คือ ไลบรารีแอปพลิเคชันของแผงพีวีสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ซีรีส์ C2000 (Texas Instruments, 2014)
- 5.) Ext_Interrupt.c คือ โปรแกรมอินเตอร์รัพต์ภายนอก

(สวิตซ์เลือกโหมคการทำงานของโปรแกรม)

ข.1 โปรแกรมภาษาซีของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน

```
// #####
//
//          MCU1.c
//          โปรแกรมภาษาซีของหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน
// =====
// 1. Sliding mode MPPT: โปรแกรมบริการอินเตอร์รัพต์ ePWM2 Timer 100 kHz (10 µs)
// 2. P&O algorithm: โปรแกรมบริการอินเตอร์รัพต์ ePWM1 Timer 25 Hz (40 ms)
// #####
#include "DSP28x_Project.h" // โหลด Headerfile และ Examples Include File
#include <math.h>           // โหลด Math Library
```

```

// กำหนดค่าพื้นฐานสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335
// =====
// เปิดการใช้งานอินเตอร์รัพต์ (Interrupt Enable) และฟังก์ชันอื่น ๆ ของโปรแกรม
#define EPWM1_INT_ENABLE 1 // Enable EPWM1 Timer
Interrupt
#define EPWM2_INT_ENABLE 1 // Enable EPWM2 Timer Interrupt
#define Ext_INT_ENABLE 1 // Enable External Interrupt
#define Flash_boot_ENABLE 1 // อนุญาตให้บันทึกโปรแกรมลงใน Flash memory
// ประกาศฟังก์ชันภายนอก (ฟังก์ชันพื้นฐานที่อยู่ใน Headerfile)
extern void InitSysCtrl(void); // ฟังก์ชันกำหนดค่าพื้นฐานของ CPU
extern void InitPieCtrl(void); // ฟังก์ชันการควบคุม Peripheral Interrupt Expansion
extern void InitPieVectTable(void); // ฟังก์ชันตาราง Peripheral Interrupt Expansion
extern void InitFlash(void); // ฟังก์ชันการบันทึกโปรแกรมลงใน Flash memory
extern unsigned int RamfuncsLoadStart;
extern unsigned int RamfuncsLoadEnd;
extern unsigned int RamfuncsRunStart;
#if Ext_INT_ENABLE // ฟังก์ชันอินเตอร์รัพต์ภายนอกที่สร้างขึ้นเอง
    extern volatile Uint16 Program_mode;
    extern interrupt void xint1_isr(void); extern interrupt void xint2_isr(void);
    extern void xint_initial(void);
#endif
// ประกาศฟังก์ชันภายใน (ฟังก์ชันที่สร้างขึ้นเองและอยู่ในไฟล์นี้)
void Gpio_setup(void); // ฟังก์ชันกำหนดหน้าที่ของขา Input / Output
void ePWM1_Timer_setup(void); // ฟังก์ชันกำหนดค่าสำหรับ ePWM1 Timer
void ePWM2_Timer_setup(void); // ฟังก์ชันกำหนดค่าสำหรับ ePWM2 Timer
interrupt void epwm1_timer_isr(void); // ฟังก์ชัน โปรแกรมบริการอินเตอร์รัพต์ ePWM1 INT
interrupt void epwm2_timer_isr(void); // ฟังก์ชัน โปรแกรมบริการอินเตอร์รัพต์ ePWM2 INT

// ประกาศตัวแปรและกำหนดค่าคงที่
// =====
#define a 1.0000 // ค่าคงที่ a ของสมการเส้นตรงการเลื่อน

```

```

#define b      4.5437      // ค่าคงที่ b ของสมการเส้นตรงการเลื่อน
#define Pdelta (0.00625) // Positive Hysteresis band = 0.5Δ
#define Ndelta (-0.00625) // Negative Hysteresis band = -0.5Δ
#define S_ON  1           // สถานะออน (ON state) ของ S
#define S_OFF 0           // สถานะออฟ (OFF state) ของ S
float32 ref = 156.7917;  // ค่า ref ของสมการเส้นตรงการเลื่อน
int16 state = S_OFF;     // กำหนดสถานะเริ่มต้นของ S คือ สถานะออน
int16 dir_c = 1;        // กำหนดให้เครื่องหมายเริ่มต้นของ dir เป็น +
int16 Vadc_a0;          // ตัวแปรเก็บค่าดิจิทัลที่ได้จากการแปลงเอาต์พุตของ ADCINA0
int16 Vadc_a1;          // ตัวแปรเก็บค่าดิจิทัลที่ได้จากการแปลงเอาต์พุตของ ADCINA1
float32 v;              // แรงดันอินพุตของวงจรแปลงพันธุสต์ (v)
float32 i;              // กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงพันธุสต์ (i)
float32 S;              // สมการเส้นตรงการเลื่อน ( $S \ N \ ai > bv < ref$ )
float32 Mstep = 0.25;   // ค่าการรั้งควาน (Mstep)
float32 Ppv_K;          // กำลังงานอินพุตที่คาบเวลาการสุ่มที่ k หรือ  $P_{pv}(k)$ 
float32 Ppv_K1 = 0.0;   // กำลังงานอินพุตที่คาบเวลาการสุ่มที่ k - 1 หรือ  $P_{pv}(k - 1)$ 
float32 D_Ppv;          // อัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานอินพุต
float32 D_Ppv_abs;      // ค่าสัมบูรณ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานอินพุต
// ค่าคงที่สำหรับการแปลงเอาต์พุต (ADC scaling)
#define ADC_A_Fullscale 3.00 // แรงดันแอนาล็อกเต็มสเกล (analog voltage full-scale)
#define ADC_A_Offset 1.50 // แรงดันแอนาล็อกออฟเซต (analog voltage offset)
#define ADC_D_Fullscale 4095.0 // ค่าดิจิทัลเต็มสเกล (ADC digital full-scale)
#define ADC_D_Offset 2048.0 // ค่าดิจิทัลครึ่งสเกล (ADC digital half-scale)
#define Gain_v 16.3333 // ค่าเกนของวงจรเซ็นเซอร์แรงดันอินพุต (50 V/3 V)
#define Gain_i 3.3333 // ค่าเกนของวงจรเซ็นเซอร์กระแสไฟฟ้าอินพุต (10 A/3 V)
#define Gain_Vadc ((Gain_v * ADC_A_Fullscale) / ADC_D_Fullscale)
#define Gain_Iadc ((Gain_i * ADC_A_Fullscale) / ADC_D_Fullscale)

// โปรแกรมหลัก (Main function)
// *****

void main(void) {

```

```

// กำหนดค่าพื้นฐานของ TMS320F28335 (Initialize system control)
// =====
InitSysCtrl();           // โหลด PLL, WatchDog, enable Peripheral Clocks
#if Flash_boot_ENABLE   // อนุญาตให้บันทึกโปรแกรมลงใน Flash memory
    memcpy(&RamfuncsRunStart, &RamfuncsLoadStart, &RamfuncsLoadEnd -
        &RamfuncsLoadStart);
    InitFlash();         // บันทึกโปรแกรมลงใน RAM (SARAM - L0)
#endif
#if (CPU_FRQ_150MHZ)    // กรณี 150 MHz SYSCLKOUT (Default)
    #define ADC_MODCLK 0x3
#endif
#if (CPU_FRQ_100MHZ)   // กรณี 100 MHz SYSCLKOUT
    #define ADC_MODCLK 0x2
#endif
// กำหนดสัญญาณนาฬิกาสำหรับการแปลงเอชดี
// HSPCLK = SYSCLKOUT/(2*ADC_MODCLK) = 25 MHz
EALLOW;
SysCtrlRegs.HISPCP.all = ADC_MODCLK;
EDIS;
Gpio_setup();          // กำหนดหน้าที่ของขาอินพุต/เอาต์พุต (GPIO Initialize)

// กำหนดอินเตอร์รัพต์ Peripheral Interrupt Expansion (PIE)
// =====
DINT;                  // หยุดการทำงานของอินเตอร์รัพต์ทั้งหมด (Disable CPU interrupts)
InitPieCtrl();         // เริ่มต้น PIE control registers
                        // หยุดการทำงานของ PIE interrupts และเคลียร์ interrupts flags
// หยุดการทำงานของ CPU interrupt flags และเคลียร์ interrupts flags
IER = 0x0000;          IFR = 0x0000;
// เริ่มต้น PIE vector table สำหรับโปรแกรมบริการอินเตอร์รัพต์
// อนุญาตให้ Interrupt service routines (ISR) เริ่มทำงานเมื่อเกิดอินเตอร์รัพต์ตาม Priority
InitPieVectTable();

```

```

#if EPWM1_INT_ENABLE // เริ่มต้น ePWM1 timer ISR เมื่อเกิดอินเทอร์รัพต์
    EALLOW;
    PieVectTable.EPWM1_INT = &epwm1_timer_isr;
    EDIS;
#endif
#if EPWM2_INT_ENABLE // เริ่มต้น ePWM2 timer ISR เมื่อเกิดอินเทอร์รัพต์
    EALLOW;
    PieVectTable.EPWM2_INT = &epwm2_timer_isr;
    EDIS;
#endif
#if Ext_INT_ENABLE // เริ่มต้น XINT1 / XINT2 ISR เมื่อเกิดอินเทอร์รัพต์
    EALLOW;
    PieVectTable.XINT1 = &xint1_isr; PieVectTable.XINT2 = &xint2_isr;
    EDIS;
#endif

// กำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับ โมดูลพิเศษ (Device Peripherals)
// =====
// โมดูลการแปลงแอนะล็อก (Initialize ADC module)
InitAdc(); // โหลดค่าเริ่มต้นพื้นฐานของการแปลงแอนะล็อก
// กำหนดสัญญาณนาฬิกา (ADC clock) และระยะเวลาในการซั๊กตัวอย่าง (Sampling Time)
AdcRegs.ADCTRL3.bit.ADCCLKPS = 0x1; // FCLK = HSPCLK/2 = 12.5 MHz
// FCLK = HSPCLK/1 สำหรับ ADCCLKPS = 0000b
// FCLK = HSPCLK/(2*ADCCLKPS) สำหรับ ADCCLKPS = xxxxb
AdcRegs.ADCTRL1.bit.CPS = 0; // ADCCLK = FCLK/(CPS+1) = 12.5 MHz [80ns]
// กำหนดความเร็วในการแปลงแอนะล็อก (Conversion rate) 1.25 MSPS
AdcRegs.ADCTRL1.bit.ACQ_PS = 0x8; // Sampling rate = 1/((2+8)*80ns) = 1.25 MHz
// Sequential: Sampling rate = 1/[(2+ACQ_PS)*[(1/ADCCLK) in ns]]
// S/H clock (1 ADC cycle) = (2 + ACQ_PS) ADC clock
// Simultaneous: Sampling rate = 1/[(3+ACQ_PS)*[(1/ADCCLK) in ns]]
// S/H clock (1 ADC cycle) = (3 + ACQ_PS) ADC clock

```



```

// Acquisition window (s) = (ACQ_PS + 1) ADC clock
// กำหนดลักษณะของการแปลงเอพวดี
AdcRegs.ADCTRL3.bit.SMODE_SEL = 0; // เลือกวิธีการซักร้อยอย่างแบบ Sequential
AdcRegs.ADCTRL1.bit.SEQ_CASC = 1; // เลือกโหมดการแปลงเอพวดีแบบ Cascaded
AdcRegs.ADCTRL1.bit.CONT_RUN = 0; // หยุดการแปลงเอพวดีแบบต่อเนื่อง
// กำหนดช่องสัญญาณสำหรับการแปลงเอพวดี (ADC channel select configuration)
AdcRegs.ADCMAXCONV.all = 0x0001; // จำนวนช่องสัญญาณ = 1 + 1 = 2 ช่อง
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0x0; // ADCINA0 as 1st. of SEQ
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV01 = 0x1; // ADCINA1 as 2nd. of SEQ
// กำหนดให้เริ่มการแปลงเอพวดีด้วยสัญญาณ ePWM SOCA trigger
AdcRegs.ADCTRL2.bit.EPWM_SOCA_SEQ1 = 1; // อนุญาตให้ SOCA เริ่ม SEQ1
AdcRegs.ADCTRL2.bit.INT_ENA_SEQ1 = 0; // ไม่อนุญาต SEQ1 interrupt
// โมดูลการสร้างสัญญาณ ePWM (EPWM Initialize configuration)
EALLOW;
SysCtrlRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 0; // Stop all the EPWM TB clocks
EDIS;
ePWM1_Timer_setup(); // โหลดค่าเริ่มต้นสำหรับ ePWM1 Timer (10 μs)
ePWM2_Timer_setup(); // โหลดค่าเริ่มต้นสำหรับ ePWM2 Timer (40 ms)
EALLOW;
SysCtrlRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 1; // Start all EPWM TB clocks synced
EDIS;

// เปิดการทำงานของอินเทอร์รัพต์ (Enable Interrupt)
// =====
#if Ext_INT_ENABLE // เลือกการใช้งานอินเทอร์รัพต์ภายนอก:
    xint_initial(); // XINT1 ที่ขา GPIO13
#endif // XINT2 ที่ขา GPIO14
#if (EPWM1_INT_ENABLE || EPWM2_INT_ENABLE)
    IER |= M_INT3; // อนุญาตอินเทอร์รัพต์ INT3 สำหรับ ePWM1 – 6 INT
#endif
#if Ext_INT_ENABLE

```

```

IER |= M_INT1;          // อนุญาตอินเทอร์รัพต์ INT4 (XINT1) และ INT5 (XINT2)
#endif

// Enable Peripheral Interrupt Expansion [PIE]
PieCtrlRegs.PIEIER3.bit.INTx1 = EPWM1_INT_ENABLE;
// อนุญาตอินเทอร์รัพต์ PIE กลุ่มที่ 3 INT1 สำหรับ EPWM1_INT
PieCtrlRegs.PIEIER3.bit.INTx2 = EPWM2_INT_ENABLE;
// อนุญาตอินเทอร์รัพต์ PIE กลุ่มที่ 3 INT2 สำหรับ EPWM2_INT
PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx4 = Ext_INT_ENABLE;
// อนุญาตอินเทอร์รัพต์ PIE กลุ่มที่ 1 INT4 สำหรับ XINT1
PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx5 = Ext_INT_ENABLE;
// อนุญาตอินเทอร์รัพต์ PIE กลุ่มที่ 1 INT5 สำหรับ XINT2
EINT;                  // Enable global Interrupt
ERTM;                  // Enable higher priority real-time debug event
for (;;) {           // ลูปการทำงานหลัก (Background loop)
    // โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ทำงานตามเวลาของ ePWM Timer
}
}

// *****
// โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์และฟังก์ชันที่สร้างขึ้นเอง
// EPWM1 Timer ISR: โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์อัลกอริทึมพีแอนด์โอ
// =====
interrupt void epwm1_timer_isr(void) {
    if (Program_mode == 0) {           // โปรแกรมโหมดหยุดการทำงานของโปรแกรม
        ref = 156.7917; Ppv_K1 = 0.0;   // รีเซตค่า ref
    }

    else if (Program_mode == 1) {      // โปรแกรมโหมดทำงาน
        Ppv_K = v_pu * i_pu;           // สุ่มวัดกำลังงานอินพุต  $P_{pv}(k) = v(k) \cdot i(k)$ 
        D_Ppv = Ppv_K - Ppv_K1;       // จำนวนการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานอินพุต
        if (D_Ppv < 0) {               // ถ้ากำลังงานอินพุตน้อยกว่าศูนย์

```

```

        dir_c = -dir_c ;                // เปลี่ยนเครื่องหมายของ dir
    }
    else {                            // ถ้ากำลังงานอินพุตมากกว่าศูนย์
        dir_c = dir_c ;                // เปลี่ยนเครื่องหมายของ dir
    }
    Ppv_K1 = Ppv_K;                    // บันทึกกำลังงานอินพุต  $P_{pv}(k-1)$ 
    ref = ref + (dir_c * Mstep);       // เปลี่ยนแปลงค่า ref

    GpioDataRegs.GPATOGGLE.bit.GPIO31 = 1; // เอาต์พุตแสดงสถานะ LED2
    GpioDataRegs.GPBTOGGLE.bit.GPIO34 = 1; // เอาต์พุตแสดงสถานะ LED3
}
// สิ้นสุดการทำงานของโปรแกรมบริการอินเตอร์รัพต์และเคลียร์ Interrupt flag
EPwm1Regs.ETCLR.bit.INT = 1;
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP3;
}

// EPWM2 Timer ISR: โปรแกรมบริการอินเตอร์รัพต์หน่วยเอ็มพีพีที่ชนิดโหมดการเลื่อน
// =====
interrupt void epwm2_timer_isr(void) {
    // อ่านค่าดิจิทัลที่ได้จากการแปลงแอนะล็อกในช่องสัญญาณ ADCINA0 และ ADCINA1
    Vadc_a0 = AdcMirror.ADCRESULT0 ;
    Vadc_a1 = AdcMirror.ADCRESULT1 ;
    // แปลงค่าดิจิทัลที่ได้จากการแปลงแอนะล็อกเป็นแรงดันและกระแสไฟฟ้าอินพุต
    v = (Gain_Vadc * Vadc_a0);        // อ่านค่า (สัณฐาน) แรงดันอินพุต
    i = (Gain_Iadc * Vadc_a1);        // อ่านค่า (สัณฐาน) กระแสไฟฟ้าอินพุต
    // คำนวณแรงดันและกระแสไฟฟ้าอินพุตในหน่วย p.u. (per unit) สำหรับ P&O algorithm
    Vpv_pu = Vadc_a0/ADC_D_Fullscale;
    Ipv_pu = Vadc_a1/ADC_D_Fullscale;
    // เตรียมความพร้อมสำหรับการแปลงแอนะล็อกต่อไป (ADC sequencer reset)
    AdcRegs.ADCTRL2.bit.RST_SEQ1 = 1; // รีเซ็ต SEQ1 กลับสู่สถานะเริ่มต้น (initial state)
    //-----
    if (Program_mode == 1){           // โปรแกรมโหมดทำงาน

```

```

// คำนวณผลบวกเชิงเส้น (สมการเส้นตรงการเลื่อน):  $S = a \cdot i - b \cdot v + ref$ 
S = a * I_ind1 - b * V_pv + ref;
S = -S;
// กำหนดเอาต์พุตด้วยฮิสเทอรีซิส (hysteresis)
if (!state && (S >= Pdelta)) // สถานะออน (On state)
{
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO12 = 1; // กำหนดเอาต์พุต "High"
    state = S_ON;
}
else if (state && (S <= Ndelta)) // สถานะออน (On state)
{
    GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO12 = 1; // กำหนดเอาต์พุต "Low"
    state = S_OFF;
}
}
else if (Program_mode == 0){ // โปรแกรมโหมดหยุดการทำงาน
    GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO12 = 1; // กำหนดเอาต์พุต "Low"
}
// สิ้นสุดการทำงานของโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์และเคลียร์ Interrupt flag
EPwm2Regs.ETCLR.bit.INT = 1;
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP3;
}

// ฟังก์ชันกำหนดหน้าที่ของขาอินพุต/เอาต์พุต (GPIO setup)
// =====
void Gpio_setup(void){
    EALLOW;
    // กำหนดหน้าที่ของขาอินพุต/เอาต์พุต (GPIO multiplex configuration)
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all = 0; // GPIO15 – GPIO0 ทำหน้าที่เป็น General Purpose I/O
    GpioCtrlRegs.GPAMUX2.all = 0; // GPIO31 – GPIO16 ทำหน้าที่เป็น General Purpose I/O
    GpioCtrlRegs.GPBMUX1.all = 0; // GPIO47 – GPIO32 ทำหน้าที่เป็น General Purpose I/O
    GpioCtrlRegs.GPBMUX2.all = 0; // GPIO63 – GPIO48 ทำหน้าที่เป็น General Purpose I/O
    GpioCtrlRegs.GPCMUX1.all = 0; // GPIO79 – GPIO64 ทำหน้าที่เป็น General Purpose I/O
}

```

```

GpioCtrlRegs.GPCMUX2.all = 0; // GPIO87 – GPIO80 ทำหน้าที่เป็น General Purpose I/O
// กำหนดทิศทางของขาอินพุต/เอาต์พุต (GPIO Direction)
GpioCtrlRegs.GPADIR.all = 0; // กำหนดให้ GPIO31 – GPIO0 เป็นขาอินพุต
GpioCtrlRegs.GPBDIR.all = 0; // กำหนดให้ GPIO63 – GPIO32 เป็นขาอินพุต
GpioCtrlRegs.GPCDIR.all = 0; // กำหนดให้ GPIO87 – GPIO64 เป็นขาอินพุต
// กำหนดให้ขา GPIO12 เป็นขาเอาต์พุตสัญญาณขั้วขาเกต P1
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO12 = 1; // กำหนดให้ GPIO12 เป็นขาเอาต์พุต
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO12 = 0; // ใช้งาน pull-up resistor สำหรับขา GPIO12
// กำหนดเอาต์พุตไฟแสดงสถานะ LED2 (GPIO31) และ LED3 (GPIO34)
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO31 = 1;
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO31 = 1;
GpioCtrlRegs.GPBDIR.bit.GPIO34 = 1;
GpioDataRegs.GPBCLEAR.bit.GPIO34 = 1;
EDIS;
}

// ฟังก์ชันกำหนดค่าสำหรับ ePWM1 Timer
// =====
void ePWM1_Timer_setup(void){
    // กำหนดสัญญาณนาฬิกา 25 Hz (40 ms) ชนิดขึ้น – ลง (up – down Timer based)
    // TBCLK = SYSCLKOUT/(HSPCLKDIV*CLKDIV)
    // TBPRD = (1/2)*[SYSCLKOUT/(Fpwm*HSPCLKDIV*CLKDIV)]
    // Phase = (TBPHS/2*TBPRD)*360 deg
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = 0x6; // HSPCLKDIV = /12
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = 0x6; // CLKDIV = /64
    EPwm1Regs.TBPRD = 3906; // กำหนดคาบเวลา = 7812 TBCLK
    EPwm1Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0; // กำหนดเฟสเริ่มต้น = 0 TBCLK
    EPwm1Regs.TBCTR = 0x0000; // เคลียร์ time – base counter
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN;
    // ตั้งค่าเกี่ยวกับการซิงค์โครโนซ์สัญญาณนาฬิกาและมุมเฟสเริ่มต้น

```

```

EPwm1Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE; // ปิดการซิงค์โครไนซ์เฟส
EPwm1Regs.TBCTL.bit.PRDLN = TB_SHADOW; // โหลด Period Shadow Register
EPwm1Regs.TBCTL.bit.SYNCSEL = TB_CTR_ZERO;
// กำหนดให้โหลด CMPA Shadow registers เมื่อ CTR = ZERO
EPwm1Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE = CC_SHADOW;
EPwm1Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE = CC_CTR_ZERO;
EPwm1Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE = CC_CTR_ZERO;
// กำหนดลักษณะเอาต์พุต (Action Qualifier) ของ ePWM เมื่อมีการเปรียบเทียบ CTR
EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 1953; // กำหนด CMPA 50% duty cycle
//EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_SET; // ปิดเอาต์พุตของ ePWM1
//EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_CLEAR; // ปิดเอาต์พุตของ ePWM1
// กำหนดค่าสำหรับอินเทอร์รัพต์ ePWM1 timer
#if EPWM1_INT_ENABLE
    // เปิดการใช้งานอินเทอร์รัพต์ ePWM1 timer
    EPwm1Regs.ETSEL.bit.INTEN = 1;
    // กำหนดให้เกิดสัญญาณทริกซ์ (Interrupt trigger) เมื่อ CTR = ZERO
    EPwm1Regs.ETSEL.bit.INTSEL = ET_CTR_ZERO;
    EPwm1Regs.ETPS.bit.INTPRD = ET_1ST;
#endif
}

// ฟังก์ชันกำหนดค่าสำหรับ ePWM2 Timer
// =====
void ePWM2_Timer_setup(void){
    // กำหนดสัญญาณนาฬิกา 100 kHz (10 μs) ชนิดขึ้น – ลง (up – down Timer based)
    // TBCLK = SYSCLKOUT/(HSPCLKDIV*CLKDIV)
    // TBPRD = (1/2)*[SYSCLKOUT/(Fpwm*HSPCLKDIV*CLKDIV)]
    // Phase = (TBPHS/2*TBPRD)*360 deg
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = TB_DIV1; // HSPCLKDIV = /12
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = TB_DIV1; // CLKDIV = /64
    EPwm2Regs.TBPRD = 750; // กำหนดคาบเวลา = 1500 TBCLK

```

```

EPwm2Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0;           // กำหนดเฟสเริ่มต้น = 0 TBCLK
EPwm2Regs.TBCTR = 0x0000;                // เคลียร์ time – base counter
EPwm2Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN;
// ตั้งค่าเกี่ยวกับการซิงค์โครไนซ์สัญญาณนาฬิกาและมุมเฟสเริ่มต้น
EPwm2Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE;  // ปิดการซิงค์โครไนซ์เฟส
EPwm2Regs.TBCTL.bit.PRDLT = TB_SHADOW;   // โหลด Period Shadow Register
EPwm2Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = TB_SYNC_IN;
// กำหนดให้โหลด CMPA Shadow registers เมื่อ CTR = ZERO
EPwm2Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE = CC_SHADOW;
EPwm2Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE = CC_CTR_ZERO;
EPwm2Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE = CC_CTR_ZERO;
// กำหนดลักษณะเอาต์พุต (Action Qualifier) ของ ePWM เมื่อมีการเปรียบเทียบ CTR
EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = 375;         // กำหนด CMPA 50% duty cycle
//EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_SET;     // ปิดเอาต์พุตของ ePWM2
//EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_CLEAR;   // ปิดเอาต์พุตของ ePWM2
// กำหนดค่าสำหรับอินเทอร์รัพต์ ePWM2 timer
#ifdef EPWM2_INT_ENABLE
    EPwm2Regs.ETSEL.bit.INTEN = 1;       // เปิดการใช้งานอินเทอร์รัพต์ ePWM1 timer
    // กำหนดให้เกิดสัญญาณทริกซ์ (Interrupt trigger) เมื่อ CTRU = CMPA
    EPwm2Regs.ETSEL.bit.INTSEL = ET_CTRU_CMPA;
    EPwm2Regs.ETPS.bit.INTPRD = ET_1ST;
#endif

// กำหนดค่าสำหรับการสร้างสัญญาณทริกซ์ของการแปลงเอชดูดี (SOCA Trigger)
EPwm2Regs.ETSEL.bit.SOCAEN = 1;        // เปิดการใช้งาน EPWM2 SOCA Trigger
// กำหนดให้เกิดสัญญาณทริกซ์ (SOCA trigger) เมื่อ CTRU = ZERO
EPwm2Regs.ETSEL.bit.SOCASEL = ET_CTR_ZERO;
EPwm2Regs.ETPS.bit.SOCAPRD = ET_1ST;
}

```

```

// #####
//
//                               Ext_Interrupt1.c
//                               โปรแกรมอินเทอร์รัพต์ภายนอก
// =====
// 1. สวิตช์ 1 (GPIO13) โปรแกรมโหมด 0 หยุดการทำงาน
// 2. สวิตช์ 2 (GPIO14) โปรแกรมโหมด 1 เริ่มการทำงาน
// #####
#include "DSP2833x_Device.h"      // โหลด DSP2833x Headerfile File
#include "DSP2833x_Examples.h"    // โหลด DSP2833x Examples Include File
// ประกาศฟังก์ชัน โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ภายนอก และค่าคงที่
interrupt void xint1_isr(void);   // ฟังก์ชัน โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ XINT1
interrupt void xint2_isr(void);   // ฟังก์ชัน โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ XINT2
void xint_initial(void);         // ฟังก์ชันเริ่มต้นของอินเทอร์รัพต์ภายนอก
volatile Uint16 Program_mode;

// ฟังก์ชันเริ่มต้นของอินเทอร์รัพต์ภายนอก
void xint_initial(void) {
    Program_mode = 0;           // โปรแกรมโหมดหยุดการทำงานของโปรแกรมคือ หยุดการ
    ทำงาน
    // กำหนดขา GPIO13 และ GPIO14 เป็นขาดิจิตอลอินพุตสำหรับสวิตช์ 1 และ 2
    EALLOW;
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO13 = 0;
    GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO13 = 0;
    GpioCtrlRegs.GPAQSEL1.bit.GPIO13 = 2;
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO14 = 0;
    GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO14 = 0;
    GpioCtrlRegs.GPAQSEL1.bit.GPIO14 = 2;
    GpioCtrlRegs.GPACTRL.bit.QUALPRD1 = 0xFF;
    EDIS;
}

```



```

// เลือกขา GPIO13 เป็นสวิตช์ของ XINT1 และ GPIO14 เป็นสวิตช์ของ XINT2
EALLOW;
GpioIntRegs.GPIOXINT1SEL.bit.GPIOSEL = 13;
GpioIntRegs.GPIOXINT2SEL.bit.GPIOSEL = 14;
EDIS;
XIntruptRegs.XINT1CR.bit.POLARITY = 1;
XIntruptRegs.XINT2CR.bit.POLARITY = 1;
XIntruptRegs.XINT1CR.bit.ENABLE = 1; // เปิดการใช้งานอินเทอร์รัพต์ XINT1
XIntruptRegs.XINT2CR.bit.ENABLE = 1; // เปิดการใช้งานอินเทอร์รัพต์ XINT2
}
// ฟังก์ชันโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ XINT1
interrupt void xint1_isr(void) {
    Program_mode = 1;
    // สิ้นสุดการทำงานของโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์และเคลียร์ interrupt flag
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;
}
// ฟังก์ชันโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ XINT2
interrupt void xint2_isr(void){
    Program_mode = 0;
    // สิ้นสุดการทำงานของโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์และเคลียร์ interrupt flag
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;
}

```

ข.2 โปรแกรมภาษาซีของตัวควบคุมวงจรรีจิสเตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว

```

// #####
//
// MCU2.c
//
// โปรแกรมภาษาซีของตัวควบคุมวงจรรีจิสเตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว
// =====
// 1. โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ ePWM1 Timer 20 kHz (50 μs)

```

```

//      สำหรับตัวควบคุมแรงดันดีซีและกระแสไฟฟ้ากริด
// 2. สร้างสัญญาณเอาต์พุต PWM แบบ unipolar ด้วยโมดูล ePWM2 และ ePWM3
// #####

#include "DSP28x_Project.h" // โหลด Headerfile และ Examples Include File
#include "Solar_F.h"       // โหลด Solar Library (SPLL, Data-Logger, Sine Analyzer)
#include <math.h>          // โหลด Math Library

// กำหนดค่าพื้นฐานสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335
// =====

// เปิดการใช้งานอินเตอร์รัพต์ (Interrupt Enable) และฟังก์ชันอื่น ๆ ของโปรแกรม
#define EPWM1_INT_ENABLE 1 // Enable EPWM1 Timer Interrupt
#define Ext_INT_ENABLE 1 // Enable External Interrupt
#define Flash_boot_ENABLE 1 // อนุญาตให้บันทึกโปรแกรมลงใน Flash memory
// ประกาศฟังก์ชันภายนอก (ฟังก์ชันพื้นฐานที่อยู่ใน Headerfile)
extern void InitSysCtrl(void); // ฟังก์ชันกำหนดค่าพื้นฐานของ CPU
extern void InitPieCtrl(void); // ฟังก์ชันการควบคุม Peripheral Interrupt Expansion
extern void InitPieVectTable(void); // ฟังก์ชันตาราง Peripheral Interrupt Expansion
extern void InitFlash(void); // ฟังก์ชันการบันทึกโปรแกรมลงใน Flash memory
extern unsigned int RamfuncsLoadStart;
extern unsigned int RamfuncsLoadEnd;
extern unsigned int RamfuncsRunStart;
#if Ext_INT_ENABLE // ฟังก์ชันอินเตอร์รัพต์ภายนอกที่สร้างขึ้นเอง
    extern volatile Uint16 Program_mode;
    extern volatile float32 C_limit;
    extern interrupt void xint1_isr(void);
    extern interrupt void xint2_isr(void);
    extern void xint_initial(void);
#endif
// ประกาศฟังก์ชันภายใน (ฟังก์ชันที่สร้างขึ้นเองและอยู่ในไฟล์นี้)
void Gpio_setup(void); // ฟังก์ชันกำหนดหน้าที่ของขา Input / Output
void ePWM1_setup(void); // ฟังก์ชันกำหนดค่าสำหรับ ePWM1 Timer

```

```

void ePWM2_setup(void);           // ฟังก์ชันกำหนดค่าสำหรับ ePWM2
void ePWM3_setup(void);           // ฟังก์ชันกำหนดค่าสำหรับ ePWM3
interrupt void epwm1_timer_isr(void); // ฟังก์ชัน โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ ePWM1 INT
// ประกาศตัวแปรและกำหนดค่าคงที่
// =====
int16 Vadc_a0;                    // ตัวแปรเก็บค่าดิจิทัลที่ได้จากการแปลงแอนะล็อกของ ADCINA0
int16 Vadc_a1;                    // ตัวแปรเก็บค่าดิจิทัลที่ได้จากการแปลงแอนะล็อกของ ADCINA1
int16 Vadc_a2;                    // ตัวแปรเก็บค่าดิจิทัลที่ได้จากการแปลงแอนะล็อกของ ADCINA2
float32 V_dc;                     // ตัวแปรแรงดันดีซี
float32 V_dc_pu;                  // ตัวแปรแรงดันดีซี (per unit)
float32 V_grid;                   // ตัวแปรแรงดันกริดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง
float32 V_grid_pu;                // ตัวแปรแรงดันกริดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (per unit)
float32 I_grid;                   // ตัวแปรกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง
float32 I_grid_pu;                // ตัวแปรกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (per unit)
float32 Igrid_ref;                // ตัวแปรกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดอ้างอิง
float32 U_ref_P;                  // แรงดันกริดอ้างอิง 1 (เอาต์พุตของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้างกริด)
float32 U_ref_N;                  // แรงดันกริดอ้างอิง 2 (เอาต์พุตของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้างกริด)
Uint16 LED_Count = 0; // ตัวนับ (counter) สำหรับกำหนดไฟแสดงสถานะ LED
#define PI 3.141592654             // ค่าคงที่  $\pi$ 
#define GRID_FREQ 50.0            // ความถี่ของกริดไฟฟ้า 50Hz
#define ISR_FREQUENCY 20000.0     // ความถี่ของ ISR 20 kHz
#define T_intigral 0.00001        // เวลาที่ใช้ในการคำนวณตัวอินทิเกรต (Integral times)
#define Vdc_ref 100.0             // แรงดันดีซี ( $V_{dc}$ ) ที่ต้องการควบคุมให้คงที่ 100 V

// ค่าคงที่สำหรับการแปลงแอนะล็อก (ADC scaling)
#define ADC_A_Fullscale 3.00       // แรงดันแอนะล็อกเต็มสเกล (analog voltage full-scale)
#define ADC_A_Offset 1.50         // แรงดันแอนะล็อกออฟเซต (analog voltage offset)
#define ADC_D_Fullscale 4095.0    // ค่าดิจิทัลเต็มสเกล (ADC digital full-scale)
#define ADC_D_Offset 2048.0      // ค่าดิจิทัลครึ่งสเกล (ADC digital half-scale)
#define Gain_Vdc 66.6667          // ค่าเกนของวงจรเซ็นเซอร์แรงดันดีซี (200V/3V)
#define Gain_Vgrid 141.5094       // ค่าเกนของวงจรเซ็นเซอร์แรงดันกริด (150Vrms/1.06Vrms)

```

```

#define Gain_Igrid 9.4340 // ค่าเกณฑ์ของวงจรเซ็นเซอร์กระแสไฟฟ้ากริด ( $10A_{rms}/1.06V_{rms}$ )
#define Gain_30 (ADC_A_Fullscale / ADC_D_Fullscale)
#define Gain_15 (ADC_A_Offset / ADC_D_Offset)
#define Gain_Vdc1 ((Gain_Vdc * ADC_A_Fullscale) / ADC_D_Fullscale)
#define Gain_Vgrid1 (Gain_Vgrid * Gain_15)
#define Gain_Igrid1 (Gain_Igrid * Gain_15)
// ค่าคงที่สำหรับการสร้างสัญญาณ PWM (20kHz)
#define PWM_CMPA_F 3750.0 // คาบของสัญญาณ PWM = TBPRD
#define PWM_CMPA_H 1875.0 // ครึ่งคาบของสัญญาณ PWM = TBPRD/2
#define PWM_DB 300 // ระยะแถบตาย (Dead-band) 2us @20kHz
// ตัวแปรประเภทโครงสร้างสำหรับ SPLL ตัวควบคุมแรงดันดีซี และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด
SPLL_1ph_F spll1; // ประกาศตัวแปรสำหรับ SPLL
SPLL_1ph_F_NOTCH_COEFF spll_notch_coef1;
CNTL_VC_F cntl_vc; // ประกาศตัวแปรสำหรับตัวควบคุมแรงดันดีซี
CNTL_CC_F cntl_cc; // ประกาศตัวแปรสำหรับตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด

// โปรแกรมหลัก (Main function)
// *****
void main(void) {
    // กำหนดค่าพื้นฐานของ TMS320F28335 (Initialize system control)
    // =====
    InitSysCtrl(); // โหลด PLL, WatchDog, enable Peripheral Clocks
    #if Flash_boot_ENABLE // อนุญาตให้บันทึกโปรแกรมลงใน Flash memory
        memcpy(&RamfuncsRunStart, &RamfuncsLoadStart, &RamfuncsLoadEnd -
            &RamfuncsLoadStart);
        InitFlash(); // บันทึกโปรแกรมลงใน RAM (SARAM - L0)
    #endif
    #if (CPU_FRQ_150MHZ) // กรณี 150 MHz SYSCLKOUT (Default)
        #define ADC_MODCLK 0x3
    #endif
    #if (CPU_FRQ_100MHZ) // กรณี 100 MHz SYSCLKOUT

```

```

#define ADC_MODCLK 0x2

#endif
// กำหนดสัญญาณนาฬิกาสำหรับการแปลงเอชดี
// HSPCLK = SYSCLKOUT/(2*ADC_MODCLK) = 25 MHz
EALLOW;
SysCtrlRegs.HISPCP.all = ADC_MODCLK;
EDIS;

Gpio_setup();      // กำหนดหน้าที่ของขาอินพุต/เอาต์พุต (GPIO Initialize)

// กำหนดอินเตอร์รัพต์ Peripheral Interrupt Expansion (PIE)
// =====
DINT;              // หยุดการทำงานของอินเตอร์รัพต์ทั้งหมด (Disable CPU interrupts)
InitPieCtrl();    // เริ่มต้น PIE control registers
                  // หยุดการทำงานของ PIE interrupts และเคลียร์ interrupts flags
// หยุดการทำงานของ CPU interrupt flags และเคลียร์ interrupts flags
IER = 0x0000;     IFR = 0x0000;
// เริ่มต้น PIE vector table สำหรับโปรแกรมบริการอินเตอร์รัพต์
// อนุญาตให้ Interrupt service routines (ISR) เริ่มทำงานเมื่อเกิดอินเตอร์รัพต์ตาม Priority
InitPieVectTable();
#if EPWM1_INT_ENABLE // เริ่มต้น ePWM1 timer ISR เมื่อเกิดอินเตอร์รัพต์
    EALLOW;
    PieVectTable.EPWM1_INT = &epwm1_timer_isr;
    EDIS;
#endif
#if Ext_INT_ENABLE // เริ่มต้น XINT1 / XINT2 ISR เมื่อเกิดอินเตอร์รัพต์
    EALLOW;
    PieVectTable.XINT1 = &xint1_isr;
    PieVectTable.XINT2 = &xint2_isr;
    EDIS;
#endif
// กำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับโมดูลพิเศษ (Device Peripherals)

```

```

// =====
// โมดูลการแปลงเอชดี (Initialize ADC module)
InitAdc(); // โหลดค่าเริ่มต้นพื้นฐานของการแปลงเอชดี
// กำหนดสัญญาณนาฬิกา (ADC clock) และระยะเวลาในการซักร้อยอย่าง (Sampling Time)
AdcRegs.ADCTRL3.bit.ADCCLKPS = 0x1; // FCLK = HSPCLK/2 = 12.5 MHz
// FCLK = HSPCLK/1 สำหรับ ADCCLKPS = 0000b
// FCLK = HSPCLK/(2*ADCCLKPS) สำหรับ ADCCLKPS = xxxxb
AdcRegs.ADCTRL1.bit.CPS = 0; // ADCCLK = FCLK/(CPS+1) = 12.5 MHz [80ns]
// กำหนดความเร็วในการแปลงเอชดี (Conversion rate) 1.25 MSPS
AdcRegs.ADCTRL1.bit.ACQ_PS = 0x8; // Sampling rate = 1/((2+8)*80ns) = 1.25 MHz
// Sequential: Sampling rate = 1/[(2+ACQ_PS)*[(1/ADCCLK) in ns]]
// S/H clock (1 ADC cycle) = (2 + ACQ_PS) ADC clock
// Simultaneous: Sampling rate = 1/[(3+ACQ_PS)*[(1/ADCCLK) in ns]]
// S/H clock (1 ADC cycle) = (3 + ACQ_PS) ADC clock
// Acquisition window (s) = (ACQ_PS + 1) ADC clock
// กำหนดลักษณะของการแปลงเอชดี
AdcRegs.ADCTRL3.bit.SMODE_SEL = 0; // เลือกวิธีการซักร้อยอย่างแบบ Sequential
AdcRegs.ADCTRL1.bit.SEQ_CASC = 1; // เลือกโหมดการแปลงเอชดีแบบ Cascaded
AdcRegs.ADCTRL1.bit.CONT_RUN = 0; // หยุดการแปลงเอชดีแบบต่อเนื่อง
// กำหนดช่องสัญญาณสำหรับการแปลงเอชดี (ADC channel select configuration)
AdcRegs.ADCMAXCONV.all = 0x0001; // จำนวนช่องสัญญาณ = 1 + 1 = 2 ช่อง
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0x0; // ADCINA0 as 1st. of SEQ
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV01 = 0x1; // ADCINA1 as 2nd. of SEQ
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV02 = 0x2; // ADCINA1 as 3nd. of SEQ
// กำหนดให้เริ่มการแปลงเอชดีด้วยสัญญาณ ePWM SOCA trigger
AdcRegs.ADCTRL2.bit.EPWM_SOCA_SEQ1 = 1; // อนุญาตให้ SOCA เริ่ม SEQ1
AdcRegs.ADCTRL2.bit.INT_ENA_SEQ1 = 0; // ไม่อนุญาต SEQ1 interrupt
// โมดูลการสร้างสัญญาณ ePWM (Initialize EPWM module)
EALLOW;
SysCtrlRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 0; // Stop all the EPWM TB clocks

```

```

EDIS;
ePWM1_setup(); // โหลดค่าเริ่มต้นสำหรับ ePWM1 Timer (50  $\mu$ s)
ePWM2_setup(); // โหลดค่าเริ่มต้นสำหรับ ePWM2 (unipolar PWM output)
ePWM3_setup(); // โหลดค่าเริ่มต้นสำหรับ ePWM3 (unipolar PWM output)
EALLOW;
SysCtrlRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 1; // Start all EPWM TB clocks synced
EDIS;
// ค่าเริ่มต้นสำหรับ SPLL
SPLL_1ph_F_init(GRID_FREQ,((float)(1.0/ISR_FREQUENCY)),&spll1);
SPLL_1ph_F_notch_coeff_update(((float)(1.0/ISR_FREQUENCY)),(float)(2*PI*GRID_FR
EQ*2),(float)0.00001,(float)0.1,&spll1);
// ค่าเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมแรงดันดีซี
CNTL_VC_F_init(&cntl_vc); // โหลดค่าเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมแรงดันดีซี
cntl_vc.Kp = (0.75); // ค่าเกนสัดส่วนของตัวควบคุมแรงดันดีซี
cntl_vc.Ki = (0.375); // ค่าเกนอินทิกรัลของตัวควบคุมแรงดันดีซี
cntl_vc.Ti = (T_intigral); // เวลาอินทิกรัลที่ใช้ในการคำนวณ
cntl_vc.Umax = (C_limit); // จำกัดเอาต์พุตของตัวควบคุมแรงดันดีซี
// ค่าเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด
CNTL_CC_F_init(&cntl_cc); // โหลดค่าเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด
cntl_cc.Kp = (100.0); // ค่าเกนสัดส่วนของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด
cntl_cc.Ki = (1.0); // ค่าเกนอินทิกรัลของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด
cntl_cc.Ti = (T_intigral); // เวลาอินทิกรัลที่ใช้ในการคำนวณ

// เปิดการทำงานของอินเตอร์รัพต์ (Enable Interrupt)
// =====
#if Ext_INT_ENABLE // เลือกการใช้งานอินเตอร์รัพต์ภายนอก:
    xint_initial(); // XINT1 ที่ขา GPIO13
#endif // XINT2 ที่ขา GPIO14
#if EPWM1_INT_ENABLE
    IER |= M_INT3; // อนุญาตอินเตอร์รัพต์ INT3 สำหรับ ePWM1 – 6 INT
#endif

```

```

#if Ext_INT_ENABLE
    IER |= M_INT1;          // อนุญาตอินเทอร์รัพต์ INT4 (XINT1) และ INT5 (XINT2)
#endif

// Enable Peripheral Interrupt Expansion [PIE]
PieCtrlRegs.PIEIER3.bit.INTx1 = EPWM1_INT_ENABLE;
    // อนุญาตอินเทอร์รัพต์ PIE กลุ่มที่ 3 INT1 สำหรับ EPWM1_INT
PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx4 = Ext_INT_ENABLE;
    // อนุญาตอินเทอร์รัพต์ PIE กลุ่มที่ 1 INT4 สำหรับ XINT1
PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx5 = Ext_INT_ENABLE;
    // อนุญาตอินเทอร์รัพต์ PIE กลุ่มที่ 1 INT5 สำหรับ XINT2
EINT;                      // Enable global Interrupt
ERTM;                      // Enable higher priority real-time debug event
for (;;) {                // ลูปการทำงานหลัก (Background loop)
    // โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ทำงานตามคาบเวลาของ ePWMx Timer
}
}

// *****

// โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์และฟังก์ชันที่สร้างขึ้นเอง
// ฟังก์ชันโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ ePWM1 INT (ตัวควบคุมวงจรรีจิสเตอร์)
// =====

interrupt void epwm1_timer_isr(void) {
    // อ่านค่าดิจิทัลที่ได้จากการแปลงเอชดูดี
    Vadc_a0 = AdcMirror.ADCRESULT0;
    Vadc_a1 = AdcMirror.ADCRESULT1 - ADC_D_Offset;
    Vadc_a2 = AdcMirror.ADCRESULT2 - ADC_D_Offset;
    // เตรียมความพร้อมสำหรับการแปลงเอชดูดีรอบถัดไป (ADC sequencer reset)
    AdcRegs.ADCTRL2.bit.RST_SEQ1 = 1; // รีเซ็ต SEQ1 กลับสู่สถานะเริ่มต้น (initial state)
    //-----

if (Program_mode == 0) {    // โปรแกรมโหมดหยุดการทำงานของโปรแกรม

```



```

// เคลียร์เอาต์พุตสัญญาณขาขาเกต S1 S2 S3 และ S4 เป็นลอจิก "LOW"
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO2 = 0;      // ปิด ePWM2A (S1)
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO3 = 0;      // ปิด ePWM2B (S2)
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO4 = 0;      // ปิด ePWM3A (S3)
GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO5 = 0;      // ปิด ePWM3B (S4)
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO2 = 1;       // กำหนด GPIO2 เป็นขาเอาต์พุต
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO2 = 1;     // เคลียร์เอาต์พุต GPIO2
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO3 = 1;       // กำหนด GPIO3 เป็นขาเอาต์พุต
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO3 = 1;     // เคลียร์เอาต์พุต GPIO3
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO4 = 1;       // กำหนด GPIO4 เป็นขาเอาต์พุต
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO4 = 1;     // เคลียร์เอาต์พุต GPIO4
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO5 = 1;       // กำหนด GPIO5 เป็นขาเอาต์พุต
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO5 = 1;     // เคลียร์เอาต์พุต GPIO5
EDIS;
// ไฟแสดงสถานะ LED กระพริบทุก 0.5 วินาที
LED_Count++;
if (LED_Count == 10000){
    GpioDataRegs.GPATOGGLE.bit.GPIO12 = 1; // LED 4
    GpioDataRegs.GPATOGGLE.bit.GPIO31 = 1; // LED 2
    GpioDataRegs.GPBTOGGLE.bit.GPIO34 = 1; // LED 3
    LED_Count = 0 ;
}
}

else if (Program_mode ==1) { // โปรแกรมโหมดทำงาน
    // แปลงค่าดิจิทัลที่ได้จากการแปลงเอทูดิเป็นแรงดันและกระแสไฟฟ้า
    V_dc = (Gain_Vdc1 * Vadc_a0); // แรงดันดีซี
    V_grid = (Gain_Vgrid1 * Vadc_a1); // แรงดันกริดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง
    I_grid = (Gain_Igrid1 * Vadc_a2); // กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด
    // จำนวนแรงดันและกระแสไฟฟ้าในหน่วย p.u. (per unit)

```

```

V_dc_pu = Vadc_a0 / ADC_D_Fullscale; // แรงดันดีซี (p.u.)
V_grid_pu = Vadc_a1/ADC_D_Offset; // แรงดันกริดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (p.u.)
I_grid_pu = Vadc_a2/ADC_D_Offset; // กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (p.u.)
// เรียกใช้งาน SPLL จาก Solar library
spll1.AC_input = V_grid_pu; // ป้อนอินพุตให้กับ SPLL
SPLL_1ph_F_FUNC(&spll1); // Run SPLL Macro
// เอาต์พุตของ SPLL คือ .theta[2],cos[2],sin[2] ชนิด float32 [-1,1]
// เรียกใช้งานตัวควบคุมแรงดันดีซี
cntl_vc.Vref = (Vdc_ref); // อินพุต 1: แรงดันดีซี
cntl_vc.Vfbk = (V_dc); // อินพุต 2: แรงดันดีซีอ้างอิง
CNTL_VC_F_FUNC(&cntl_vc); // เริ่มฟังก์ชันตัวควบคุมแรงดันดีซี
// เอาต์พุตของตัวควบคุมแรงดันดีซี คือ .Out ชนิด float32

Igrid_ref = cntl_vc.Out*spll1.sin[1]; // ค่าแรงกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดอ้างอิง
// เรียกใช้งานตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด
cntl_cc.Vgrid = (V_grid); // อินพุต 1: แรงดันกริดด้านปฐมภูมิหม้อแปลง
cntl_cc.Iref = (Igrid_ref); // อินพุต 2: กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดอ้างอิง
cntl_cc.Ifbk = (I_grid); // อินพุต 3: กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด
CNTL_CC_F_FUNC(&cntl_cc); // เริ่มฟังก์ชันตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด
// เอาต์พุตของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด คือ .Out ชนิด float32
// เปลี่ยนแปลงค่า U_ref_P และ U_ref_N สำหรับการเปรียบเทียบเพื่อสร้างสัญญาณ PWM
U_ref_P = PWM_CMPA_H - (cntl_cc.Out * 18.75);
U_ref_N = PWM_CMPA_H + (cntl_cc.Out * 18.75);
// เปรียบเทียบแรงดันกริดอ้างอิงเพื่อสร้างสัญญาณ PWM ชนิด Unipolar
if(U_ref_P > PWM_CMPA_F) { U_ref_P = (PWM_CMPA_F);}
if(U_ref_P < 0){ U_ref_P = 0;}
if(U_ref_N > PWM_CMPA_F){ U_ref_N = (PWM_CMPA_F);}
if(U_ref_N < 0){ U_ref_N = 0;}
EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = U_ref_P; // อัปเดต ePWM2A, ePWM2B
EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = U_ref_N; // อัปเดต ePWM3A, ePWM3B
// ไฟแสดงสถานะ LED กระพริบทุก 0.25 วินาที

```

```

LED_Count++;

if (LED_Count == 5000){

    GpioDataRegs.GPATOGGLE.bit.GPIO12 = 1;        // LED 4
    GpioDataRegs.GPATOGGLE.bit.GPIO31 = 1;        // LED 2
    GpioDataRegs.GPBTOGGLE.bit.GPIO34 = 1;        // LED 3
    LED_Count = 0 ;

}

}

// สิ้นสุดการทำงานของโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์และเคลียร์ Interrupt flag
EPwm1Regs.ETCLR.bit.INT = 1;
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP3;
}

// ฟังก์ชันกำหนดหน้าที่ของขาอินพุต/เอาต์พุต (GPIO setup)
// =====

void Gpio_setup(void){
    EALLOW;
    // กำหนดหน้าที่ของขาอินพุต/เอาต์พุต (GPIO multiplex configuration)
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all = 0; // GPIO15 – GPIO0 ทำหน้าที่เป็น General Purpose I/O
    GpioCtrlRegs.GPAMUX2.all = 0; // GPIO31 – GPIO16 ทำหน้าที่เป็น General Purpose I/O
    GpioCtrlRegs.GPBMUX1.all = 0; // GPIO47 – GPIO32 ทำหน้าที่เป็น General Purpose I/O
    GpioCtrlRegs.GPBMUX2.all = 0; // GPIO63 – GPIO48 ทำหน้าที่เป็น General Purpose I/O
    GpioCtrlRegs.GPCMUX1.all = 0; // GPIO79 – GPIO64 ทำหน้าที่เป็น General Purpose I/O
    GpioCtrlRegs.GPCMUX2.all = 0; // GPIO87 – GPIO80 ทำหน้าที่เป็น General Purpose I/O
    // กำหนดทิศทางของขาอินพุต/เอาต์พุต (GPIO Direction) และเปิดใช้งาน ePWM
    GpioCtrlRegs.GPADIR.all = 0; // กำหนดให้ GPIO31 – GPIO0 เป็นขาอินพุต
    GpioCtrlRegs.GPBDIR.all = 0; // กำหนดให้ GPIO63 – GPIO32 เป็นขาอินพุต
    GpioCtrlRegs.GPCDIR.all = 0; // กำหนดให้ GPIO87 – GPIO64 เป็นขาอินพุต
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO2 = 1; // เปิดใช้งาน ePWM2A
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO3 = 1; // เปิดใช้งาน ePWM2B
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO4 = 1; // เปิดใช้งาน ePWM3A

```

```

GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO5 = 1;    // เปิดใช้งาน ePWM3B
// เปิดใช้งาน pull-up resistor สำหรับขาเอาต์พุตและขา ePWM ทั้ง 4 ขา
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO2 = 0;    // Enable pull-up on GPIO2 [ePWM2A]
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO3 = 0;    // Enable pull-up on GPIO3 [ePWM2B]
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO4 = 0;    // Enable pull-up on GPIO4 [ePWM3A]
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO5 = 0;    // Enable pull-up on GPIO5 [ePWM3B]
// กำหนดเอาต์พุตไฟแสดงสถานะ LED2 (GPIO31) LED3 (GPIO34) และ LED4 (GPIO12)
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO12 = 1;
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO12 = 1;
GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO31 = 1;
GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO31 = 1;
GpioCtrlRegs.GPBDIR.bit.GPIO34 = 1;
GpioDataRegs.GPBCLEAR.bit.GPIO34 = 1;
EDIS;
}

// ฟังก์ชันกำหนดค่าสำหรับ ePWM1 Timer
// =====
void ePWM1_setup(void){
    // กำหนดสัญญาณนาฬิกา 20 kHz (50 μs) ชนิดขึ้น - ลง (up - down Timer based)
    // TBCLK = SYSCLKOUT/(HSPCLKDIV*CLKDIV)
    // TBPRD = (1/2)*[SYSCLKOUT/(Fpwm*HSPCLKDIV*CLKDIV)]
    // Phase = (TBPHS/2*TBPRD)*360 deg
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = TB_DIV1; // HSPCLKDIV = /1
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = TB_DIV1; // CLKDIV = /1
    EPwm1Regs.TBPRD = PWM_CMPA_F; // กำหนดคาบเวลา = 7500 TBCLK
    EPwm1Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0; // กำหนดเฟสเริ่มต้น = 0 TBCLK
    EPwm1Regs.TBCTR = 0x0000; // เคลียร์ time - base counter
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN;
    // ตั้งค่าเกี่ยวกับการซิงค์โครไนซ์สัญญาณนาฬิกาและมุมเฟสเริ่มต้น

```

```

EPwm1Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE; // ปิดการซิงค์โครไนซ์เฟส
EPwm1Regs.TBCTL.bit.PRDL = TB_SHADOW; // โหลด Period Shadow Register
EPwm1Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = TB_CTR_ZERO;
// กำหนดให้โหลด CMPA Shadow registers เมื่อ CTR = ZERO
EPwm1Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE = CC_SHADOW;
EPwm1Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE = CC_CTR_ZERO;
EPwm1Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE = CC_CTR_ZERO;
// กำหนดลักษณะเอาต์พุต (Action Qualifier) ของ ePWM เมื่อมีการเปรียบเทียบ CTR
EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = PWM_CMPA_H; // กำหนด CMPA 50% duty cycle
EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_SET; // เปิดเอาต์พุต ePWM1
EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_CLEAR; // ปิดเอาต์พุต ePWM1
// กำหนดค่าสำหรับอินเทอร์รัพต์ ePWM1 timer
#ifdef EPWM1_INT_ENABLE
    // เปิดการใช้งานอินเทอร์รัพต์ ePWM1 timer
    EPwm1Regs.ETSEL.bit.INTEN = 1;
    // กำหนดให้เกิดสัญญาณทริกซ์ (Interrupt trigger) เมื่อ CTR = TBPRD
    EPwm1Regs.ETSEL.bit.INTSEL = ET_CTR_PRD;
    EPwm1Regs.ETPS.bit.INTPRD = ET_1ST;
#endif
// กำหนดค่าสำหรับการสร้างสัญญาณทริกซ์ของการแปลงเอทูดี้ (SOCA Trigger)
EPwm1Regs.ETSEL.bit.SOCAEN = 1; // เปิดการใช้งาน EPWM1 SOCA Trigger
// กำหนดให้เกิดสัญญาณทริกซ์ (SOCA trigger) เมื่อ CTRU = ZERO
EPwm1Regs.ETSEL.bit.SOCASEL = ET_CTR_ZERO;
EPwm1Regs.ETPS.bit.SOCAPRD = ET_1ST;
}

// ฟังก์ชันกำหนดค่าสำหรับ ePWM2
// =====
void ePWM2_setup(void){
    // กำหนดสัญญาณนาฬิกา 20 kHz (50 μs) ชนิดขึ้น – ลง (up – down Timer based)
    // TBCLK = SYSCLKOUT/(HSPCLKDIV*CLKDIV)

```

```

// TBPRD = (1/2)*[SYSCLKOUT/(Fpwm*HSPCLKDIV*CLKDIV)]
// Phase = (TBPMS/2*TBPRD)*360 deg
EPwm2Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = TB_DIV1; // HSPCLKDIV = /1
EPwm2Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = TB_DIV1; // CLKDIV = /1
EPwm2Regs.TBPRD = PWM_CMPA_F; // กำหนดคาบเวลา = 7500 TBCLK
EPwm2Regs.TBPMS.half.TBPMS = 0; // กำหนดเฟสเริ่มต้น = 0 TBCLK
EPwm2Regs.TBCTR = 0x0000; // เคลียร์ time – base counter
EPwm2Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN;
// ตั้งค่าเกี่ยวกับการซิงค์โครไนซ์สัญญาณนาฬิกาและมุมเฟสเริ่มต้น
EPwm2Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE; // ปิดการซิงค์โครไนซ์เฟส
EPwm2Regs.TBCTL.bit.PRDL = TB_SHADOW; // โหลด Period Shadow Register
EPwm2Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = TB_SYNC_IN;
// กำหนดให้โหลด CMPA Shadow registers เมื่อ CTR = ZERO
EPwm2Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE = CC_SHADOW;
EPwm2Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE = CC_CTR_ZERO;
EPwm2Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE = CC_CTR_ZERO;
// กำหนดค่าเกี่ยวกับระยะแถบตาย (Dead-band) 2 μs
EPwm2Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE = DB_FULL_ENABLE; // เปิดใช้ Dead-band
EPwm2Regs.DBCTL.bit.POLSEL = DB_ACTV_HIC; // เลือกโหมด
EPwm2Regs.DBCTL.bit.IN_MODE = DBA_ALL; // กำหนดสัญญาณอ้างอิง
EPwm2Regs.DBRED = PWM_DB;
//Rising edge delay (sec.) = (1/TBCLK)* DBRED (s)
EPwm2Regs.DBFED = PWM_DB;
//Falling edge delay (sec.) = (1/TBCLK)* DBFED (s)
// กำหนดลักษณะเอาต์พุต (Action Qualifier) ของ ePWM เมื่อมีการเปรียบเทียบ CTR
EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = PWM_CMPA_H; // กำหนด CMPA 50% duty cycle
EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_SET; // เปิดเอาต์พุต ePWM2
EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_CLEAR; // เปิดเอาต์พุต ePWM2
}
// ฟังก์ชันกำหนดค่าสำหรับ ePWM3

```

```

// =====
void ePWM3_setup(void){
    // กำหนดสัญญาณนาฬิกา 20 kHz (50 μs) ชนิดขึ้น – ลง (up – down Timer based)
    // TBCLK = SYSCLKOUT/(HSPCLKDIV*CLKDIV)
    // TBPRD = (1/2)*[SYSCLKOUT/(Fpwm*HSPCLKDIV*CLKDIV)]
    // Phase = (TBPHS/2*TBPRD)*360 deg
    EPwm3Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = TB_DIV1; // HSPCLKDIV = /1
    EPwm3Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = TB_DIV1; // CLKDIV = /1
    EPwm3Regs.TBPRD = PWM_CMPA_F; // กำหนดคาบเวลา = 7500 TBCLK
    EPwm3Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0; // กำหนดเฟสเริ่มต้น = 0 TBCLK
    EPwm3Regs.TBCTR = 0x0000; // เคลียร์ time – base counter
    EPwm3Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN;
    // ตั้งค่าเกี่ยวกับการซิงค์โครไนซ์สัญญาณนาฬิกาและมุมเฟสเริ่มต้น
    EPwm3Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE; // ปิดการซิงค์โครไนซ์เฟส
    EPwm3Regs.TBCTL.bit.PRDL = TB_SHADOW; // โหลด Period Shadow Register
    EPwm3Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = TB_SYNC_IN;
    // กำหนดให้โหลด CMPA Shadow registers เมื่อ CTR = ZERO
    EPwm3Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE = CC_SHADOW;
    EPwm3Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE = CC_CTR_ZERO;
    EPwm3Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE = CC_CTR_ZERO;
    // กำหนดค่าเกี่ยวกับระยะแถบตาย (Dead-band) 2 μs
    EPwm3Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE = DB_FULL_ENABLE; // เปิดใช้ Dead-band
    EPwm3Regs.DBCTL.bit.POLSEL = DB_ACTV_HIC; // เลือกโหมด
    EPwm3Regs.DBCTL.bit.IN_MODE = DBA_ALL; // กำหนดสัญญาณอ้างอิง
    EPwm3Regs.DBRED = PWM_DB;
    //Rising edge delay (sec.) = (1/TBCLK)* DBRED (s)
    EPwm3Regs.DBFED = PWM_DB;
    //Falling edge delay (sec.) = (1/TBCLK)* DBFED (s)
    // กำหนดลักษณะเอาต์พุต (Action Qualifier) ของ ePWM เมื่อมีการเปรียบเทียบ CTR
    EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = PWM_CMPA_H; // กำหนด CMPA 50% duty cycle
    EPwm3Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_SET; // เปิดเอาต์พุต ePWM3
}

```

```

EPwm3Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_CLEAR;    // เปิดเอาต์พุต ePWM3
}

#####

//
//                               Ext_Interrupt.c
//                               โปรแกรมอินเทอร์รัพต์ภายนอก
// =====

// 1. สวิตช์ 1 (GPIO13) โปรแกรมโหมด 0 หยุดการทำงาน
// 2. สวิตช์ 2 (GPIO14) โปรแกรมโหมด 1 เริ่มการทำงาน
// #####

#include "DSP2833x_Device.h"           // โหลด DSP2833x Headerfile File
#include "DSP2833x_Examples.h"        // โหลด DSP2833x Examples Include File
// ประกาศฟังก์ชัน โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ภายนอก และค่าคงที่
interrupt void xint1_isr(void);       // ฟังก์ชัน โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ XINT1
interrupt void xint2_isr(void);       // ฟังก์ชัน โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ XINT2
void xint_initial(void);              // ฟังก์ชัน เริ่มต้นของอินเทอร์รัพต์ภายนอก
volatile Uint16 Program_mode, C_limit;

// ฟังก์ชัน เริ่มต้นของอินเทอร์รัพต์ภายนอก
void xint_initial(void) {
    Program_mode = 0; C_limit = 10; // โปรแกรมโหมดหยุดการทำงาน
    // กำหนดขา GPIO13 และ GPIO14 เป็นขาดีจิตอลอินพุตสำหรับสวิตช์ 1 และ 2
    EALLOW;
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO13 = 0;
    GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO13 = 0;
    GpioCtrlRegs.GPAQSEL1.bit.GPIO13 = 2;
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO14 = 0;
    GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO14 = 0;
    GpioCtrlRegs.GPAQSEL1.bit.GPIO14 = 2;
    GpioCtrlRegs.GPACTRL.bit.QUALPRD1 = 0xFF;
    EDIS;
    // เลือกขา GPIO13 เป็นสวิตช์ของ XINT1 และ GPIO14 เป็นสวิตช์ของ XINT2

```



```

EALLOW;

GpioIntRegs.GPIOXINT1SEL.bit.GPIOSEL = 13;
GpioIntRegs.GPIOXINT2SEL.bit.GPIOSEL = 14;

EDIS;

XIntruptRegs.XINT1CR.bit.POLARITY = 1;
XIntruptRegs.XINT2CR.bit.POLARITY = 1;
XIntruptRegs.XINT1CR.bit.ENABLE = 1;    // เปิดการใช้งานอินเทอร์รัพต์ XINT1
XIntruptRegs.XINT2CR.bit.ENABLE = 1;    // เปิดการใช้งานอินเทอร์รัพต์ XINT2
}
// ฟังก์ชัน โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ XINT1
interrupt void xint1_isr(void) {
    Program_mode = 1;
    EALLOW;
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO2 = 1;    // เปิดการใช้งาน ePWM2A
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO3 = 1;    // เปิดการใช้งาน ePWM2B
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO4 = 1;    // เปิดการใช้งาน ePWM3A
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO5 = 1;    // เปิดการใช้งาน ePWM3B
    EDIS;
    EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_SET;
    EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_CLEAR;
    EPwm3Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_SET;
    EPwm3Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_CLEAR;
    // สิ้นสุดการทำงานของโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์และเคลียร์ interrupt flag
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;
}
// ฟังก์ชัน โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ XINT2
interrupt void xint2_isr(void){
    Program_mode = 0;
    // สิ้นสุดการทำงานของโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์และเคลียร์ interrupt flag
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;
}

```

ภาคผนวก ค

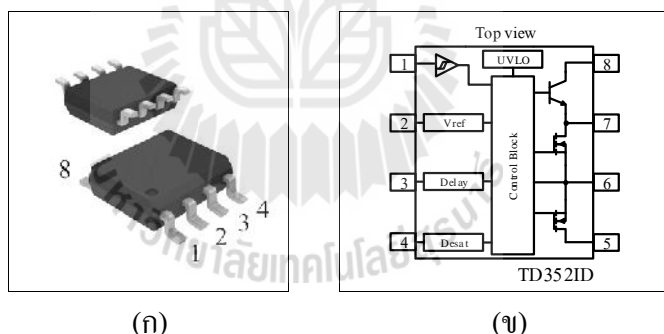
เซนเซอร์และอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างชุดวงจรต้นแบบ



ค.1 ไอซีขับขาเกต เบอร์ TD352ID

ไอซีขับขาเกตเบอร์ TD352ID เป็นไอซีขับขาเกตไอจีบีทีหรือมอสเฟตกำลังชนิดที่ให้สัญญาณเอาต์พุตกลับเฟสจากสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้ (inverting output) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของ STMicroelectronics ไอซีขับขาเกตเบอร์นี้มีฟังก์ชันพิเศษ 2 ฟังก์ชัน ฟังก์ชันแรกคือ active miller clamping ที่ช่วยลดผลกระทบจากตัวเก็บประจุ Miller ของอุปกรณ์สวิตช์ทำให้มีขนาดแรงดันที่มียอดแหลมลดต่ำลง (low voltage spike) และฟังก์ชันที่สองคือ desaturation detection ซึ่งทำหน้าที่ตรวจสอบกระแสไฟฟ้าเกินและความผิดปกติในการทำงานของ ไอจีบีทีหรือมอสเฟตกำลัง โดยเมื่อตรวจพบความผิดปกติได้นั้น ไอซีดังกล่าวจะให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นลอจิกศูนย์เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์สวิตช์ ไอซีขับขาเกตเบอร์นี้มีข้อมูลเฉพาะที่สำคัญแสดงในตารางที่ ค.1 และมีรูปร่างตัวถังแบบ SO-8 ที่มีขาทั้งหมด 8 ขา ซึ่งแสดงในรูปที่ ค.1 และมีรายละเอียดดังนี้

- | | |
|--|------------------------------|
| ขา 1 คือ ขาสัญญาณอินพุต | ขา 5 คือ ขา Miller clamp |
| ขา 2 คือ ขาแรงดันอ้างอิง +5V | ขา 6 คือ ขากราวด์ (VL) |
| ขา 3 คือ ขาที่ใช้กำหนดเวลาดีเลย์ (delay times) | ขา 7 คือ ขาสัญญาณเอาต์พุต |
| ขา 4 คือ ขา desaturation detection | ขา 8 คือ ขาไฟเลี้ยงดีซี (VH) |



รูปที่ ค.1 ไอซีขับขาเกตเบอร์ TD352ID รูปร่างตัวถัง (ก) ชื่อขาและสัญลักษณ์ (ข)

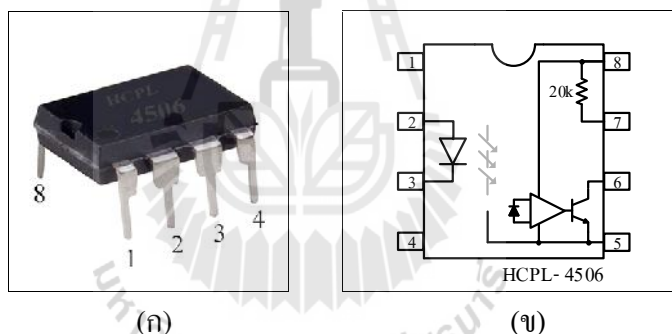
ตารางที่ ค.1 ข้อมูลเฉพาะที่สำคัญของ ไอซีขับขาเกตเบอร์ TD352ID

พารามิเตอร์	ต่ำสุด	สูงสุด
แหล่งจ่ายแรงดันดีซี (ไฟเลี้ยงดีซี) VH – VL (V)		28
ระดับแรงดันของสัญญาณอินพุต (V)	- 0.3	7
แรงดันอ้างอิง V_{ref} (V)	4.85	5.15
กระแสไฟฟ้าสำหรับการตรวจสอบกระแสไฟฟ้าเกิน (μA)		250

ค.2 ตัวเชื่อมต่อผ่านแสงเบอร์ HCPL-4506

ตัวเชื่อมต่อผ่านแสงเบอร์ HCPL-4506 เป็นตัวเชื่อมต่อผ่านแสงชนิดที่มีสัญญาณเอาต์พุตกลับเฟสจากสัญญาณอินพุต (inverting optocoupler) ผลิตภัณฑ์ของ Avago technologies ที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีไดโอดแอลอีซีชนิด GaAsP ซึ่งช่วยให้มีสัญญาณเอาต์พุตที่ใกล้เคียงกับสัญญาณอินพุตมากหรือได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีประวิงเวลาน้อย (delay time) นอกจากนี้ภายในตัวยังมีตัวต้านทานภายใน (internal pull-up resistor) $20\text{ k}\Omega$ ให้เลือกต่อใช้งานได้ง่ายขึ้น ตัวเชื่อมต่อผ่านแสงเบอร์ HCPL-4506 มีข้อมูลเฉพาะที่สำคัญแสดงในตารางที่ ค.2 และมีรูปร่างตัวถัง DIP-8 ที่มีขาทั้งหมด 8 ขา ซึ่งแสดงในรูปที่ ค.2 และมีรายละเอียดดังนี้

- ขา 1 และ 4 ไม่มีการเชื่อมต่อใด ๆ
- ขา 2 และ 3 ขาแอนโอดและขาแคโทดของตัวเชื่อมต่อผ่านแสง ตามลำดับ
- ขา 5 และ 6 ขากราวด์และขาเอาต์พุตของตัวเชื่อมต่อผ่านแสง ตามลำดับ
- ขา 7 และ 8 ขาที่เชื่อมต่อกับตัวต้านทานภายในและขาไฟเลี้ยงดีซี V_{cc} ตามลำดับ



รูปที่ ค.2 ตัวเชื่อมต่อผ่านแสงเบอร์ HCPL-4506 รูปร่างตัวถัง (ก) ชื่อขาและสัญลักษณ์ (ข)

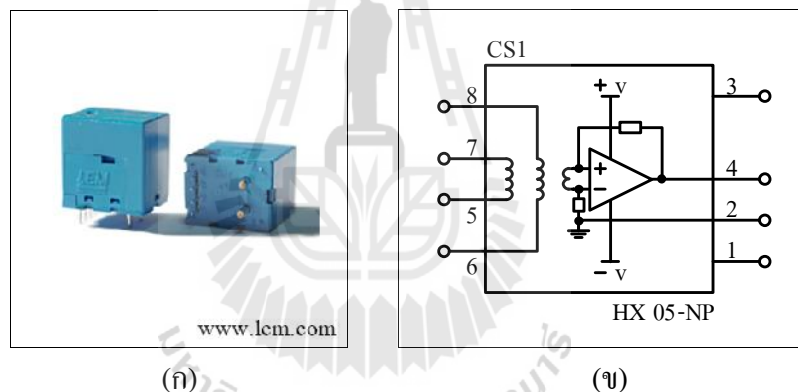
ตารางที่ ค.2 ข้อมูลเฉพาะที่สำคัญของตัวเชื่อมต่อผ่านแสงเบอร์ HCPL-4506

พารามิเตอร์	ต่ำสุด	สูงสุด
แหล่งจ่ายแรงดันดีซีหรือระดับไฟเลี้ยงดีซี (V)	4.5	30
ระดับแรงดันของสัญญาณเอาต์พุต (V)	0	30
กระแสไฟฟ้ายินพุตเฉลี่ยในขณะที่ไดโอดแอลอีซีออน (mA)	10	20

ค.3 เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า LEM เบอร์ HX 05-NP

เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า LEM เบอร์ HX 05-NP เป็นเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าชนิดปรากฏการณ์ฮอลล์แบบวงเปิด (open loop hall-effect current sensor) ที่สามารถวัดได้ทั้งสัญญาณกระแสไฟฟ้าดีซี เอซี และอื่น ๆ เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเบอร์นี้ประกอบด้วยวงจร 2 ด้านที่แยกออกจากกันคือ วงจรด้านปฐมภูมิที่มีขดลวดปฐมภูมิจำนวน 2 ชุดสำหรับเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าที่ต้องการวัดกระแสไฟฟ้า และวงจรด้านทุติยภูมิที่เป็นส่วนของเอาต์พุตและไฟเลี้ยงดีซีของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า โดยเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP มีรูปร่างตัวถังทรงสี่เหลี่ยมที่แสดงในรูปที่ ก.3 (ก) โดยมีทั้งหมด 8 ขา ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- | | | | |
|------------|-----------------------------------|------|-----------------------------------|
| ขา 1 | คือ ขาไฟเลี้ยงดีซี -15 V | ขา 3 | คือ ขาไฟเลี้ยงดีซี $+15\text{ V}$ |
| ขา 2 | คือ ขากราวด์ (GND) | ขา 4 | คือ ขาเอาต์พุต |
| ขา 5 และ 7 | คือ ปลายของขดลวดปฐมภูมิชุดที่ 1 | | |
| ขา 6 และ 8 | คือ ปลายของขดลวดปฐมภูมิชุดที่ 2 | | |



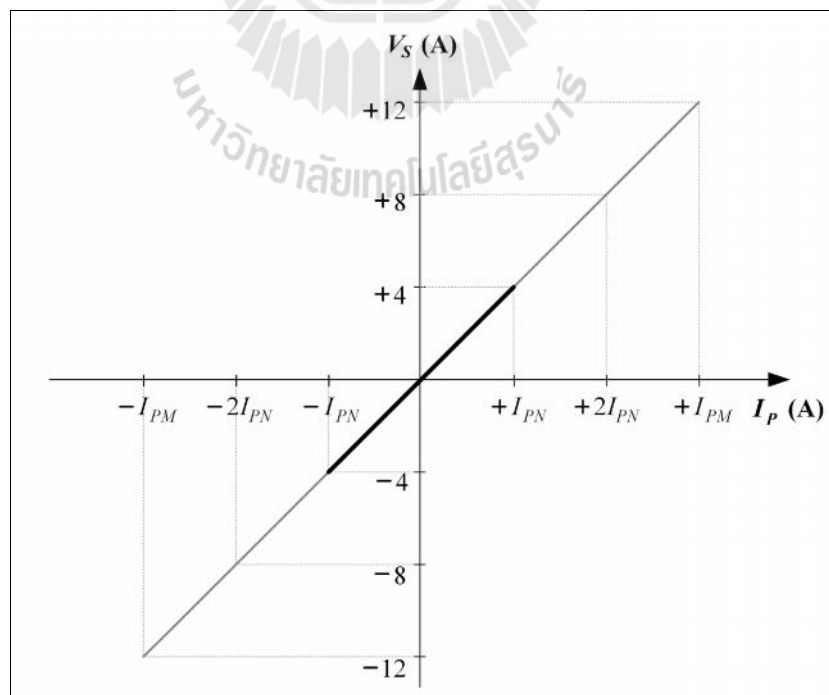
รูปที่ ก.3 เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP รูปร่างตัวถัง (ก) ชื่อขาและสัญลักษณ์ (ข)

ในการต่อขดลวดปฐมภูมิทั้ง 2 ชุดของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้านั้นแบ่งได้เป็น 2 กรณีคือการต่อขดลวดปฐมภูมิแบบอนุกรมและแบบขนานกัน ซึ่งการต่อในแต่ละแบบนี้มีค่ากระแสไฟฟ้าปฐมภูมิพิกัด (primary nominal current: I_{PN}) ซึ่งเป็นค่าพิกัดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิในสถานะอยู่ตัว และมีพิสัยการวัดอื่น ๆ กระแสไฟฟ้าปฐมภูมิ (primary current measuring range: I_{PM}) สูงสุดที่เซนเซอร์สามารถตรวจวัดได้ในสถานะชั่วคราวแตกต่างกันตามตารางที่ ก.3

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลเฉพาะที่สำคัญของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP

พารามิเตอร์		การต่อขดลวดปฐมภูมิ	
		อนุกรม	ขนาน
กระแสไฟฟ้าปฐมภูมิพิกัด (A)	I_{PN}	5	10
พิสัยการวัดกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิ (A)	I_{PM}	15	30
แรงดันทุติยภูมิพิกัด (V)	V_{SN}	4	4
แรงดันทุติยภูมิสูงสุดในสถานะชั่วคราว (V)	V_{SM}	12	12

เอาต์พุตของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP คือสัญญาณแรงดันทุติยภูมิ (secondary voltage: V_S) ที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิ (primary current: I_P) ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ ค.4 โดยเมื่อกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิหรือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิพิกัด ($I_P = I_{PN}$) สัญญาณแรงดันทุติยภูมิของเซนเซอร์จะเท่ากับแรงดันทุติยภูมิพิกัด (secondary nominal voltage: V_{SN}) ± 4 V แต่ถ้ากระแสไฟฟ้าปฐมภูมินั้นมีค่าเท่ากับพิสัยการวัดกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิ ($I_P = I_{PM}$) สัญญาณแรงดันทุติยภูมิของเซนเซอร์จะเท่ากับแรงดันทุติยภูมิสูงสุดในสถานะชั่วคราว (secondary voltage measuring range: V_{SM}) ± 12 V

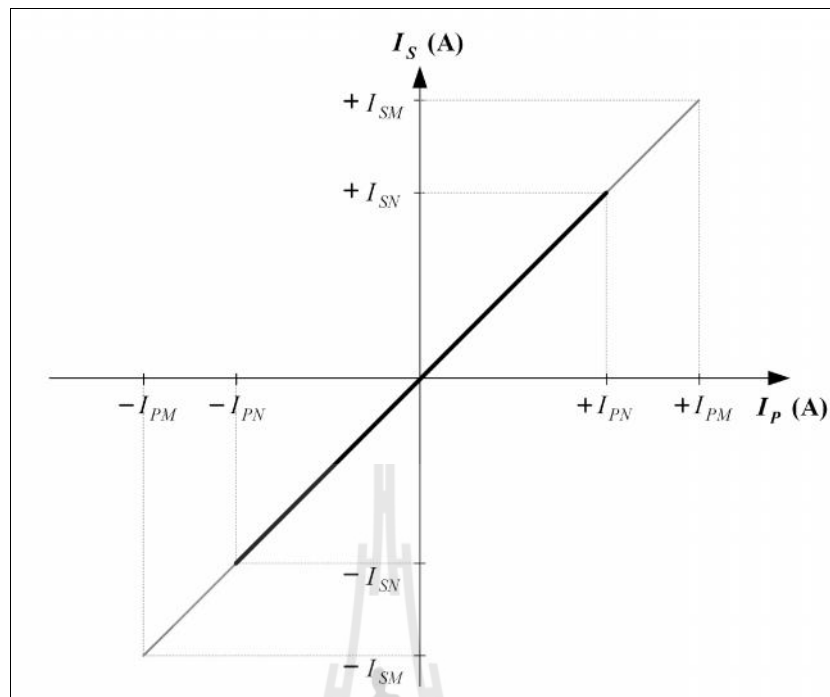


รูปที่ ค.4 แรงดันทุติยภูมิและกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP

ตารางที่ ค.4 ข้อมูลเฉพาะที่สำคัญของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า เบอร์ LV 25-P

รายละเอียด	พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
แรงดันปฐมภูมิพิกัด (V)	V_{PN}	10 – 500
กระแสไฟฟ้าปฐมภูมิพิกัด (mA)	I_{PN}	10
พิสัยการวัดกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิ (mA)	I_{PM}	14
กระแสไฟฟ้าทุติยภูมิพิกัด (mA)	I_{SN}	25
กระแสไฟฟ้าทุติยภูมิสูงสุด (mA)	I_{SM}	35

ในการใช้งานเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P ต้องต่อตัวต้านทานปฐมภูมิ (R_p) เข้ากับขดลวดปฐมภูมิของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าक्रमระบบไฟฟ้าที่ต้องการวัดแรงดัน เพื่อให้จำกัดปริมาณกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิ (primary current: I_p) ของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์นี้ให้มีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิพิกัด (I_{PN}) 10 mA สำหรับใช้ในการกำหนดแรงดันปฐมภูมิพิกัด (primary nominal voltage: V_{PN}) หรือพิสัยการวัดของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า สัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์นี้คือ กระแสไฟฟ้าทุติยภูมิ (secondary current: I_s) ที่ไหลออกจากขาเอาต์พุตของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า โดยมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิที่แสดงในรูปที่ ค.6 โดยถ้ากระแสไฟฟ้าปฐมภูมิของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับกระแสไฟฟ้าปฐมภูมิพิกัด เซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าจะมีกระแสไฟฟ้าทุติยภูมิเท่ากับกระแสไฟฟ้าทุติยภูมิพิกัด (secondary nominal current: I_{SN}) ไหลออกจากขาเอาต์พุตของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ ๓.6 กระแสไฟฟ้าทุกขุมและกระแสไฟฟ้าปฐมขุมของเซนเซอร์วัดแรงดันเบอร์ LV 25-P

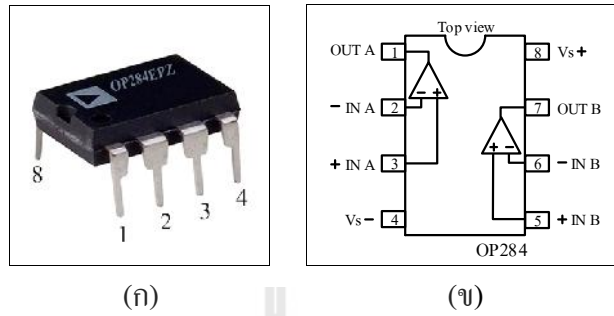
โดยที่หน่วยของกระแสไฟฟ้าปฐมขุมและกระแสไฟฟ้าทุกขุมของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์นี้คือ A_{dc} สำหรับการวัดสัญญาณแรงดันคิซี แต่ถ้าเป็นการวัดสัญญาณแรงดันเอซึ้นหน่วยของกระแสไฟฟ้าปฐมขุมและกระแสไฟฟ้าทุกขุมของเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์นี้คือ A_{rms}

๓.5 ออปแอมป์เบอร์ OP284

ออปแอมป์เบอร์ OP284 เป็นออปแอมป์ชนิดสัญญาณอินพุตหรือเอาต์พุตที่เต็มสเกลของไฟเลี้ยงคิซีที่มีความแม่นยำสูง (precision rail to rail input/output operational amplifiers) จำนวน 2 ช่องสัญญาณ (dual operational amplifiers) นิยมใช้ในวงจรวัด วงจรเซนเซอร์ และวงจรการแปลงเอซึดต่าง ๆ เนื่องจากมีอัตราขยายสัญญาณรบกวนที่ต่ำมาก ($3.9 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$) มีแรงดันออฟเซตที่ต่ำมาก ($65 \text{ } \mu\text{V}$) และมีแบนด์วิดท์สูง (4 MHz) ซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับไฟเลี้ยงคิซีได้สูงสุด $\pm 18\text{V}$ และต่ำสุด $\pm 1.5\text{V}$ ไอซีออปแอมป์เบอร์นี้มีรูปร่างตัวถังแบบ DIP-8 (dual in-line package 8 pin) ที่แสดงในรูปที่ ๓.7 มีทั้งหมด 8 ขา ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- | | |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| ขา 1 คือ ขาเอาต์พุตช่องสัญญาณ A | ขา 5 คือ ขาอินพุตไม่ผกผันช่องสัญญาณ B |
| ขา 2 คือ ขาอินพุตผกผันช่องสัญญาณ A | ขา 6 คือ ขาอินพุตผกผันช่องสัญญาณ B |

ขา 3 คือ ขาอินพุตไม่ผกผันช่องสัญญาณ A ขา 7 คือ ขาเอาต์พุตช่องสัญญาณ B
 ขา 4 คือ ขาไฟเลี้ยงดิซี -VCC ขา 8 คือ ขาไฟเลี้ยงดิซี +VCC



รูปที่ ก.7 ออปแอมป์เบอร์ OP284 รูปร่างตัวถัง (ก) ชื่อขาและสัญลักษณ์ (ข)



ภาคผนวก ง

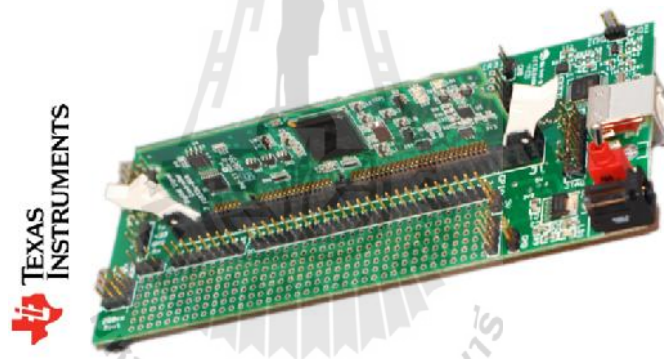
ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

TMS320F28335 Experimental Kits

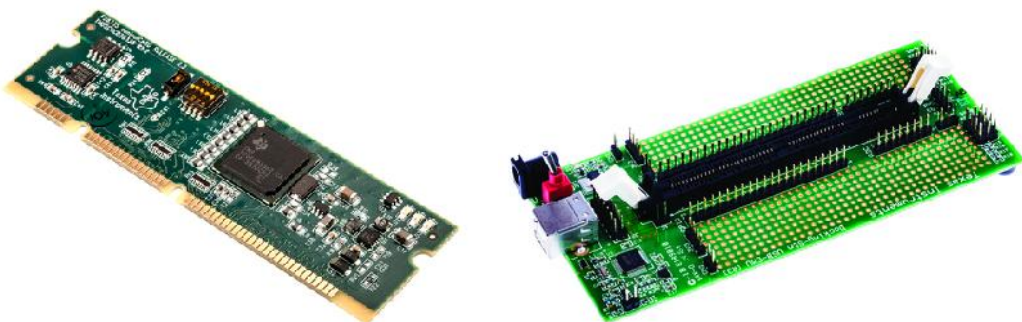
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 Experimental Kits

การสร้างชุดวงจรต้นแบบวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อน หน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมคการเลื่อนและระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่ประกอบด้วยตัวควบคุมแรงดันดีซี ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด และเฟสล็อกกลุ๊ป สร้างขึ้นด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 Experimental Kits ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Texas Instruments แสดงในรูปที่ ๑.1 ประกอบด้วยการ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 (TMS320F28335 controlCARD) ที่ใช้หน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Controller: DSC) เบอร์ TMS320F28335 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Texas Instruments เช่นเดียวกัน และบอร์ด Docking station ที่แสดงในรูปที่ ๑.2 ซึ่งมี USB JTAG emulation สำหรับเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล รวมทั้งพอร์ตเชื่อมต่อต่าง ๆ เช่น พอร์ตเอ็ดจีซี ขาอินพุตและขาเอาต์พุต (GPIO) ที่สามารถ โปรแกรมใช้งานหรือกำหนดหน้าที่ได้



รูปที่ ๑.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 Experimental Kits



รูปที่ ๑.2 การ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 (ซ้าย) และบอร์ด Docking station (ขวา)

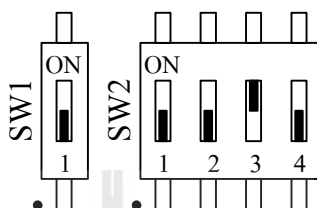
คุณสมบัติที่สำคัญของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 Experimental Kits

1. หน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิทัล 32 บิต เบอร์ TMS320F28335 รองรับการประมวลผลทั้งแบบ floating point unit และ fixed point unit
2. สัญญาณนาฬิกาอินพุต (On-chip oscillator) 30 MHz. ความเร็วในการประมวลผล 150 MHz. (150 MIPS) หรือ 6.67 ns. ต่อหนึ่งรอบสัญญาณนาฬิกา
3. หน่วยความจำประกอบด้วย
 - หน่วยความจำประเภท RAM 68 กิโลไบต์ (68K bytes on-chip RAM)
 - หน่วยความจำประเภท Flash 512 กิโลไบต์ (512K bytes on-chip Flash memory)
 - หน่วยความจำประเภท SRAM 256 กิโลไบต์ (256K bytes on-chip SRAM memory)
4. พอร์ตเชื่อมต่อ XDS100 JTAG Emulator และพอร์ตเชื่อมต่อ RS232 แบบแยก (isolated RS232) สำหรับโปรแกรมแบบเวลาจริง (real-time in system programming)
5. พอร์ต Analog to Digital converter แบบ 12 บิต ความเร็วในการสุ่มวัดสูงสุด 12.5 MSPS (80 ns Conversion Rate) จำนวน 16 ช่อง
6. ePWM 12 channel (6 โมดูล) ที่มีความละเอียดสูงสำหรับการสร้างสัญญาณ PWM
7. Enhanced capture modules จำนวน 6 ชุด
8. Enhanced QEP (Quadrature Encoder Pulse) modules จำนวน 2 ชุด
9. Enhanced controller area network (eCAN) modules จำนวน 2 ชุด
10. Serial communications interface modules จำนวน 3 ชุด (SCI-A, SCI-B, SCI-C)
11. Serial peripheral interface (SPI) module จำนวน 1 ชุด (SPI-A)
11. ขาอินพุตและเอาต์พุตสำหรับเลือกโปรแกรมใช้งานจำนวน 100 ขา
12. Jumper สำหรับเลือกโหมดในการบูตทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

ง.1 โหมดการทำงานของการ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335

การ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 มีโหมดการทำงานที่แตกต่างกันทั้งหมด 16 โหมดแสดงในตารางที่ ง.1 การเลือกโหมดการทำงานนี้สามารถทำได้ด้วยการปรับสวิตช์ SW2 ของตัวการ์ดที่แสดงในรูปที่ ง.4 สวิตช์นี้เชื่อมต่อกับขาดิจิทัลอินพุต 4 ขาคือ GPIO87 GPIO86 GPIO85 และ GPIO84 เมื่อเชื่อมต่อไฟเลี้ยง (Power supply) ไมโครคอนโทรลเลอร์จะเริ่มทำงานตามโหมดการทำงานที่เลือกไว้ ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้โหมดการทำงาน 2 โหมดคือ โหมด Jump to SARAM และ โหมด Jump to Flash โหมด Jump to SARAM คือโหมดการทำงานที่สามารถเข้าถึงหน่วยความจำได้โดยตรงภายในหนึ่งสัญญาณนาฬิกา (single-access RAM) จึง

เหมาะสำหรับใช้งานด้านการจำลองสถานการณ์ (simulation) การประมวลผลข้อมูลแบบเวลาจริง (Real Time Data eXchange) และฮาร์ดแวร์อินลูป (Hardware in loop) โหมด Jump to Flash คือ โหมดการทำงานที่ใช้สำหรับการควบคุมแบบแยกเดี่ยว (Standalone embedded control application) ซึ่งสามารถโหลดโปรแกรมควบคุมบันทึกไว้ในหน่วยความจำแฟลช (Flash memory)



รูปที่ ง.3 สวิตช์ SW1 และ SW2 บนการ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335

ตารางที่ ง.1 โหมดการทำงานของการ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335

PIN mode	ตำแหน่งที่ 4 Boot-3 (GPIO87)	ตำแหน่งที่ 3 Boot-2 (GPIO86)	ตำแหน่งที่ 2 Boot-1 (GPIO85)	ตำแหน่งที่ 1 Boot-0 (GPIO84)	โหมดการทำงาน (Boot mode)
1111	ON	ON	ON	ON	Jump to Flash
1110	ON	ON	ON	OFF	SCI-A boot
1101	ON	ON	OFF	ON	SPI-A boot (default mode)
1100	ON	ON	OFF	OFF	I ² C-A boot
1011	ON	OFF	ON	ON	eCAN-A boot
1010	ON	OFF	ON	OFF	McBSP-A boot
1001	ON	OFF	OFF	ON	Jump to XINTX x16
1000	ON	OFF	OFF	OFF	Jump to XINTX x32
0111	OFF	ON	ON	ON	Jump to OTP
0110	OFF	ON	ON	OFF	Parallel GPIO I/O boot
0101	OFF	ON	OFF	ON	Parallel XINTF boot
0100	OFF	ON	OFF	OFF	Jump to SARAM
0011	OFF	OFF	ON	ON	Branch to check boot mode
0010	OFF	OFF	ON	OFF	Branch to Flash, skip ADC CAL
0001	OFF	OFF	OFF	ON	Branch to SARAM, skip ADCCAL
0000	OFF	OFF	OFF	OFF	Branch to SCI, skip ADC CAL

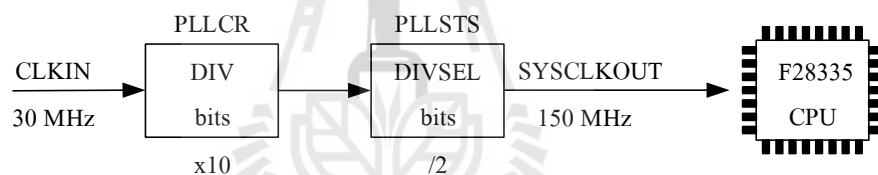
ง.2 สัญญาณนาฬิกาและระบบควบคุม (Clock and System Control)

การ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 ใช้ external crystal 30MHz เป็นระบบสัญญาณนาฬิกา และมี PLL based clock Register เป็นตัวปรับคูณเพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาเอาต์พุต (SYSCLKOUT) 150 MHz ให้กับระบบประมวลผลแสดงในรูปที่ ง.4 นอกจากนี้การ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 ยังมีโมดูลพิเศษที่เกี่ยวข้องกับระบบสัญญาณนาฬิกาคือ

1. Watchdog Timer Module เคาน์เตอร์อิสระขนาด 8 bits ทำหน้าที่ผลิตสัญญาณพัลส์ Oscillator clock (OSCLK) สำหรับป้องกันการดำเนินงานผิดพลาดของหน่วยประมวลผล และการรีเซตการทำงานของหน่วยประมวลผล

2. CPU Timer คือ ตัวนับสัญญาณนาฬิกา (counter) ขนาด 32 bits จำนวน 3 ชุด ได้แก่

- CPU Timer 0 สามารถใช้ได้ทุกแอปพลิเคชัน
- CPU Timer 1 สามารถใช้ได้ทุกแอปพลิเคชัน
- CPU Timer 2 สามารถใช้ได้เฉพาะงานที่เกี่ยวข้องกับ DSP/BIOS™



รูปที่ ง.4 ระบบสัญญาณนาฬิกาของการ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335

ง.3 ขาอินพุต / เอาต์พุต ของการ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335

การ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 มีขาอินพุต / ขาเอาต์พุตทั้งหมด 100 ขา ในแต่ละขาสามารถเลือกโปรแกรมใช้งานหรือกำหนดหน้าที่ได้แตกต่างกัน (Multiplexed GPIO Pins) ด้วยรีจิสเตอร์ MUX (MUX Control Register) ตามตารางที่ ง.2 ที่แสดงถึงหน้าที่ของขาอินพุต/เอาต์พุตและการเชื่อมต่อโมดูลพิเศษ (Peripheral Frames) 4 ชุดคือ PF0 PF1 PF2 และ PF3

1. PF0 (peripheral frame 0) ประกอบด้วยรีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานและหน่วยความจำดังนี้

PIE คือ รีจิสเตอร์ควบคุมการใช้งานอินเตอร์รัพต์พีไออี (PIE interrupt control register)

Flash คือ รีจิสเตอร์หน่วยความจำแฟลช (flash wait state register)

XINTF คือ รีจิสเตอร์ควบคุมการเชื่อมต่อภายนอก (external interface register)

DMA คือ รีจิสเตอร์ควบคุมการติดต่อหน่วยความจำโดยตรง (direct memory access)

CSM คือ รีจิสเตอร์ควบคุมความปลอดภัย (code security module keys register)

- ADC รีจิสเตอร์ผลลัพธ์ของการแปลงเอชดี (ADC result register)
2. PF1 (peripheral frame 1) ประกอบด้วยรีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานและหน่วยความจำดังนี้
- eCAN คือ รีจิสเตอร์ควบคุมการเชื่อมต่อแบบ CAN (enhanced controller area network)
 - ePWM คือ รีจิสเตอร์ควบคุมการสร้างสัญญาณ PWM (enhanced pluse width modulator)
 - eCAP คือ รีจิสเตอร์ควบคุมการตรวจวัดสัญญาณ (enhanced capture module register)
 - eQEP คือ รีจิสเตอร์ควบคุมการตรวจจับและการแปลงสัญญาณพัลส์
(enhanced quadrature encorder module and register)
3. PF2 (peripheral frame 2) ประกอบด้วยรีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานและหน่วยความจำดังนี้
- SYS คือ รีจิสเตอร์ระบบควบคุมและสัญญาณนาฬิกา (systems control register)
 - SCI คือ รีจิสเตอร์ควบคุมการเชื่อมต่อสื่อสารอนุกรม (serial communication interface)
 - SPI คือ รีจิสเตอร์ควบคุมพอร์ตเชื่อมต่ออนุกรม (serial port interface register)
 - ADC คือ รีจิสเตอร์สถานะและการควบคุมเอดีซี (ADC status, result, and controller)
 - I2C คือ รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานแบบ I2C (I2C control register)
 - XINT คือ รีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับอินเตอร์รัพท์ภายนอก (external interrupt register)
4. PF3 (Peripheral Frame 3) ประกอบด้วยรีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานและหน่วยความจำดังนี้
- McBSP คือ Multichannel Buffered Serial Port Register
 - ePWM คือ Enhanced Pluse Width Modulator module and Register

ตารางที่ ง.2 ขา GPIO ของการ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335

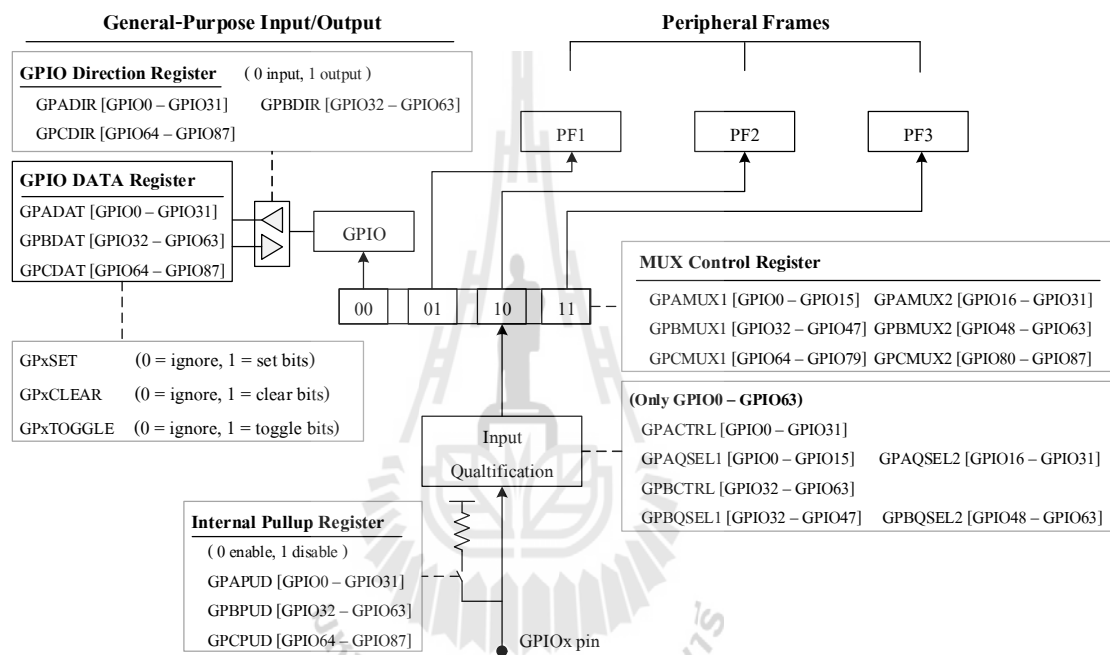
PF0 / PF1 / PF2 / PF3	pin		PF0 / PF1 / PF2 / PF3
V33D-ISO	1	51	V33D-ISO
ISO-RX-RS232	2	52	ISO-TX-RS232
GND_ISO	6	56	GND_ISO
ADCIN-B0	7	57	ADCIN-A0
GND	8	58	GND
ADCIN-B1	9	59	ADCIN-A1
GND	10	60	GND
ADCIN- B2	11	61	ADCIN-A2
GND	12	62	GND
ADCIN- B 3	13	63	ADCIN-A3
GND	14	64	GND
ADCIN- B4	15	65	ADCIN-A4
ADCIN-B5	17	67	ADCIN-A5

GPIO-58 / MCLKR-A / XD21 (EMIF)	18	68	GPIO-59 / MFSR-A / XD20 (EMIF)
ADCIN-B6	19	69	ADCIN-A6
GPIO-60 / MCLKR-B / XD19 (EMIF)	20	70	GPIO-61 / MFSR-B / XD18 (EMIF)
ADCIN-B7	21	71	ADCIN-A7
GPIO-62 / SCIRX-C / XD17 (EMIF)	22	72	GPIO-63 / SCITX-C / XD16 (EMIF)
GPIO-00 / EPWM-1A	23	73	GPIO-01 / EPWM-1B / MFSR-B
GPIO-02 / EPWM-2A	24	74	GPIO-03 / EPWM-2B / MCLKR-B
GPIO-04 / EPWM-3A	25	75	GPIO-05/EPWM-3B/MFSR-A/ECAP-1
GPIO-06 / EPWM-4A / SYNCl / SYNCO	26	76	GPIO-07/EPWM-4B/MCLKR-A/ECAP-2
GND	27	77	+5V in
GPIO-08/EPWM-5A/CANTX-B/ADCSOC-A	28	78	GPIO-09/EPWM-5B/SCITX-B/ECAP-3
GPIO-10/EPWM-6A/CANRX-B/ADCSOC-B	29	79	GPIO-11/EPWM-6B/SCIRX-B/ECAP-4
GPIO-48 / ECAP5 / XD31 (EMIF)	30	80	GPIO-49 / ECAP6 / XD30 (EMIF)
GPIO-84	31	81	GPIO-85
GPIO-86	32	82	+5V in
GPIO-12 / TZ-1 / CANTX-B / MDX-B	33	83	GPIO-13 / TZ-2 / CANRX-B / MDR-B
GPIO-15 / TZ-4 / SCIRX-B / MFSX-B	34	84	GPIO-14 / TZ-3 / SCITX-B / MCLKX-B
GPIO-24 / ECAP-1 / EQEPA-2 / MDX-B	35	85	GPIO-25 / ECAP-2 / EQEPB-2 / MDR-B
GPIO-26/ECAP-3/EQEPI-2/MCLKX-B	36	86	GPIO-27 / ECAP-4 / EQEPS-2 / MFSX-B
GND	37	87	+5V in
GPIO-16 / SPISIMO-A / CANTX-B / TZ-5	38	88	GPIO-17 / SPISOMI-A / CANRX-B / TZ-6
GPIO-18 / SPICLK-A / SCITX-B	39	89	GPIO-19 / SPISTE-A / SCIRX-B
GPIO-20 / EQEPA-1 / MDX-A / CANTX-B	40	90	GPIO-21/EQEPB-1/MDR-A/CANRX-B
GPIO-22/EQEPS-1/MCLKX-A/SCITX-B	41	91	GPIO-23 /EQEPI-1 /MFSX-A /SCIRX-B
GPIO-87	42	92	+5V in
GPIO-28 / SCIRX-A / Resv / TZ5	43	93	GPIO-29 / SCITX-A / Resv / TZ6
GPIO-30 / CANRX-A	44	94	GPIO-31 / CANTX-A
GPIO-32 / I2CSDA / SYNCl / ADCSOCA	45	95	GPIO-33 / I2CSCL / SYNCO / ADCSOCB
GPIO-34 / ECAP1 / XREADY (EMIF)	46	96	+5V in
GND	47	97	TDI
TCK	48	98	TDO
TMS	49	99	TRSTn
EMU1	50	100	EMU0

หมายเหตุ: ขาที่ไม่ได้ระบุในตารางคือขาที่ไม่ได้เชื่อมต่อใด ๆ

แผนผังรีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดหน้าที่ขา GPIO ของ TMS320F28335 ที่แสดงในรูปที่ ๓.5 การโปรแกรมเลือกใช้งานหรือกำหนดหน้าที่ของขา GPIO เป็นขาดิจิตอลอินพุตหรือเอาต์พุต สามารถทำได้ด้วยการกำหนดทิศทางการทำงานผ่านรีจิสเตอร์ GPIO Direction Register

(GPxDIR) แต่ละขาสามารถอ่านและเขียนข้อมูลลงในหน่วยความจำได้โดยตรงผ่านรีจิสเตอร์ GPIO DATA Register (GPxDAT) หรือกระทำทางอ้อมผ่านรีจิสเตอร์ GPxSET, GPxCLEAR, และ GPxTOGGLE ขาดิจิตอลอินพุตหรือเอาต์พุตในกรุป A และ B (GPIO0 – GPIO63) มีฟังก์ชันการกรองสัญญาณอินพุต (input qualification) ควบคุมด้วยรีจิสเตอร์ GPxCTRL และ GPxQSEL1 นอกจากนี้ในแต่ละขายังสามารถเปิดใช้งานตัวต้านทานพูลอัพภายใน (Internal pullup Resister) เพื่อยกระดับแรงดันที่ขาได้ผ่านรีจิสเตอร์ GPxPUD

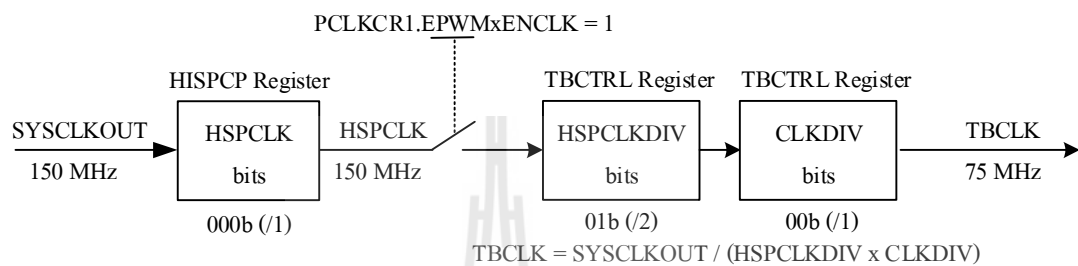


รูปที่ ๓.5 แผนผังรีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดหน้าที่ขา GPIO ของ TMS320F28335

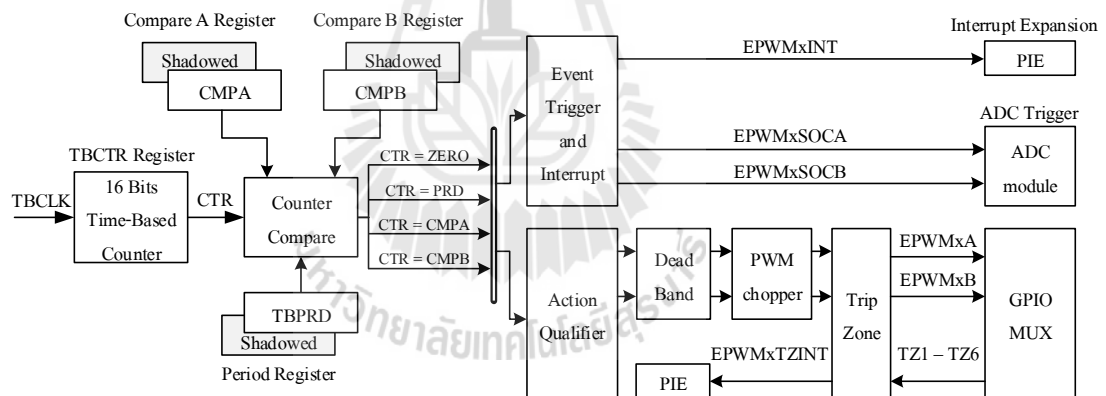
๓.4 enhanced PWM modules

โมดูลการสร้างสัญญาณพัลส์เบิ่ลยูเอ็ม (Pluse Width Modulus: PWM) เพื่อใช้ในการขับขาเกตวงจรถือเล็กทรอนิกส์กำลัง การ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 มีโมดูล enhanced PWM จำนวน 6 ชุด คือ ePWM3 ePWM2 ePWM3 ePWM4 ePWM5 และ ePWM6 แต่ละชุดสามารถสร้างเอาต์พุตได้ 2 เอาต์พุตที่สอดคล้องกันคือ เอาต์พุต ePWMxA และ ePWMxB นั่นคือสามารถสร้างสัญญาณ PWM ได้ทั้งหมด 12 สัญญาณ แต่ละชุดมีโหมดการนับของสัญญาณนาฬิกาทั้งหมด 3 โหมดคือ โหมดการนับขึ้น (Count Up mode) โหมดการนับลง (Count Down mode) และโหมดการนับขึ้น-ลง (Count Up-Down mode) ซึ่งระบบสัญญาณนาฬิกา (Time Based Counter) ของโมดูล ePWM จะมีลักษณะดังรูปที่ ๓.6 การสร้างสัญญาณ PWM ของโมดูล ePWM

จะใช้วิธีการเปรียบเทียบเคาน์เตอร์ (Counter Compare) ของสัญญาณนาฬิกา TBCLK กับข้อมูลหรือค่าในรีจิสเตอร์ CMPA และ CMPB เพื่อสร้างเงื่อนไขให้กับส่วน Action Qualifier สำหรับการกำหนดรูปแบบสัญญาณ PWM ให้มีลอจิกแตกต่างกันและมีความถี่ของสัญญาณตามที่ต้องการ หรือการกำหนดเพื่อสร้างสัญญาณทริกซ์ให้กับอินเทอร์รัพต์ (Interrupt trigger) ตามเงื่อนไขหรือเหตุการณ์ต่าง ๆ และการสร้างสัญญาณทริกเกอร์เพื่อสั่งให้เริ่มการแปลงเอชดูตี ดังรูปที่ ๖.7



รูปที่ ๖.6 แผนภาพระบบสัญญาณนาฬิกาของโมดูล ePWM



รูปที่ ๖.7 แผนภาพรีจิสเตอร์และการทำงานของโมดูล ePWM ของ TMS320F28335

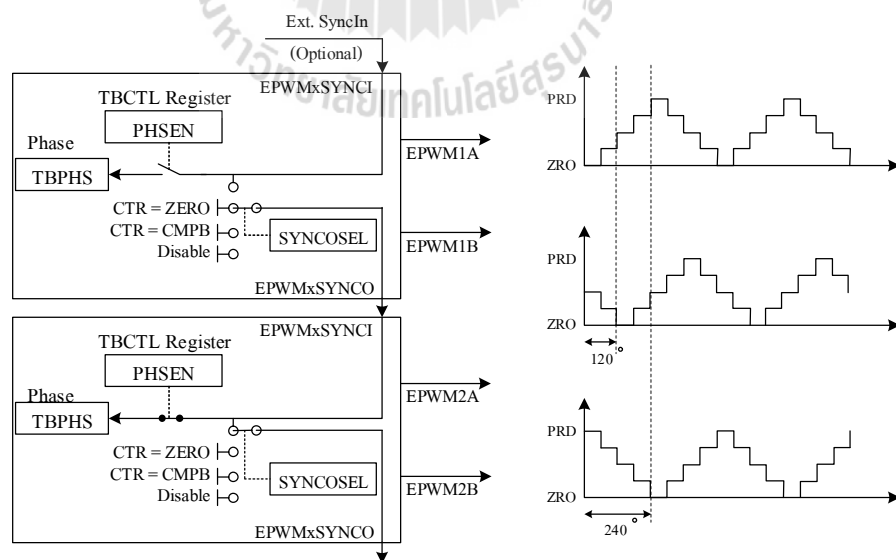
ความถี่ของสัญญาณ PWM สามารถกำหนดได้ด้วยรีจิสเตอร์ TBPRD (ePWM Period Register) ซึ่งเป็นรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต นั่นคือค่า TBPRD จะอยู่ในช่วง 00000 – 65535 โดยมีความสัมพันธ์กับระบบสัญญาณนาฬิกา 150 MHz และรีจิสเตอร์ปรับคุณสัญญาณนาฬิกา HSPCLKDIV และ CLKDIV ดังสมการที่ (๖.1) และ (๖.2) สำหรับโหมดการนับแบบขึ้นลง และโหมดการนับแบบขึ้นหรือลงตามลำดับ ลักษณะพิเศษของสัญญาณ PWM จะถูกกำหนดด้วยรีจิสเตอร์พิเศษอื่น ๆ ที่ทำหน้าที่แก้ไขตัดแปลงสัญญาณ PWM เพิ่มเติม แบ่งเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกคือ PWM Dead Band ทำหน้าที่กำหนดระยะเวลาแถบตายของสัญญาณ PWM ส่วนที่สองคือ PWM

Chopper ทำหน้าที่กำหนดรูปแบบสัญญาณ PWM ในลักษณะ Chopper และส่วนที่สามคือ PWM Tripzone ทำหน้าที่ช่วยในการตรวจสอบกระแสไฟฟ้าเกิน โมดูล ePWM แต่ละชุดสามารถซิงโครไนซ์บนฐานเวลาเดียวกันได้ (time-based synchronisation) ดังรูปที่ ๓.8 ทำให้สามารถจัดเวลาการทำงานของโมดูลแต่ละชุดได้ หรือจัดแผนภาพเวลาการทำงานของโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ และช่วยในการกำหนดเพื่อสร้างสัญญาณ PWM ที่มีเฟสแตกต่างกันได้

$$TBPRD = \frac{1}{2} \left[\frac{f_{SYSCLKOUT}}{f_{PWM} (HSPCLKDIV \times CLKDIV)} \right] \tag{๓.1}$$

$$TBPRD = \left[\frac{f_{SYSCLKOUT}}{f_{PWM} (HSPCLKDIV \times CLKDIV)} \right] - 1 \tag{๓.2}$$

- โดยที่ f_{PWM} คือ ความถี่ของสัญญาณ PWM ที่ต้องการสร้าง (Hz)
- $f_{SYSCLKOUT}$ คือ ความถี่ระบบสัญญาณนาฬิกา 150 MHz
- $HSPCLKDIV$ คือ ตัวปรับลดความเร็วสูงสัญญาณนาฬิกา (high speed clock scalar)
- $CLKDIV$ คือ ตัวปรับลดสัญญาณนาฬิกา (clock scalar)
- และ $TBPRD$ คือ ค่าสูงสุดของตัวนับสัญญาณนาฬิกา



รูปที่ ๓.8 แผนภาพการซิงโครไนซ์สัญญาณนาฬิกาของโมดูล ePWM

๓.5 Analog to Digital Converter

TMS320F28335 มีโมดูลสำหรับการแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่มีความละเอียด 12 bits อัตราเร็วของการแปลงแอนะล็อกสูงสุด (maximum conversion rate) 12.5 MHz (12.5 MSPS) สามารถรองรับสัญญาณแอนะล็อกที่มีแรงดัน 0 V ถึง 3.0 V (ไม่เกิน 3.3 V) นั่นคือมีความละเอียดเท่ากับ 0.732 mV/ bits ค่าดิจิทัล (ผลลัพธ์) ที่ได้จากการแปลงแอนะล็อกจะมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (๓.3) โมดูลสำหรับการแปลงแอนะล็อกของ TMS320F28335 มีทั้งหมด 3 โหมดการทำงานที่ผสมผสานกัน ได้แก่ โหมดแรกคือ Sequencer mode เป็นโหมดการทำงานแบบลำดับขั้น (Sequence) โหมดที่สองคือ Sampling mode เป็นโหมดการทำงานแบบกำหนดรอบเวลาในการชักตัวอย่าง และโหมดที่สามคือ Start - Stop mode เป็นโหมดการทำงานแบบเริ่มการแปลงข้อมูลแล้วหยุด ซึ่งสามารถเลือกได้ด้วยการกำหนดค่ารีจิสเตอร์ควบคุมการแปลงแอนะล็อก ได้แก่ ADCTRL1 ADCTRL2 และ ADCTRL3 โหมดการทำงานแบบที่ 1 และ 2 สามารถทำงานต่อเนื่องกัน (Cascaded Sequencer) ส่วนโหมดที่ 3 ไม่ทำงานแบบต่อเนื่องกันโดยจะรอสัญญาณทริกเกอร์ให้เริ่มลำดับการแปลงแอนะล็อกใหม่ ซึ่งนิยมใช้ในโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ (Interrupt service routines: ISR) พอร์ตเชื่อมต่อเอ็ดจีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 Experimental Kits มีทั้งหมด 16 ขา แบ่งเป็นพอร์ตชุด A 8 ขา (ADCINA0 – ADCINA7) และพอร์ตชุด B 8 ขา (ADCINB0 – ADCINB7)

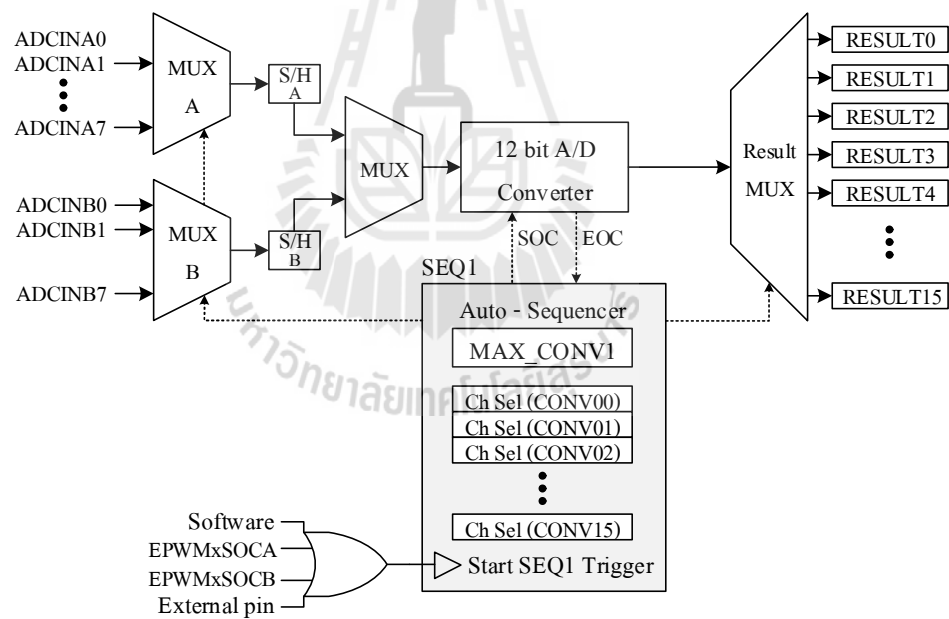
$$V_{analog} = \frac{(Digital\ Values) \times 3.0V}{4095} \quad (๓.3)$$

โดยที่ V_{analog} คือ สัญญาณ (แรงดัน) อนาลอก (V)

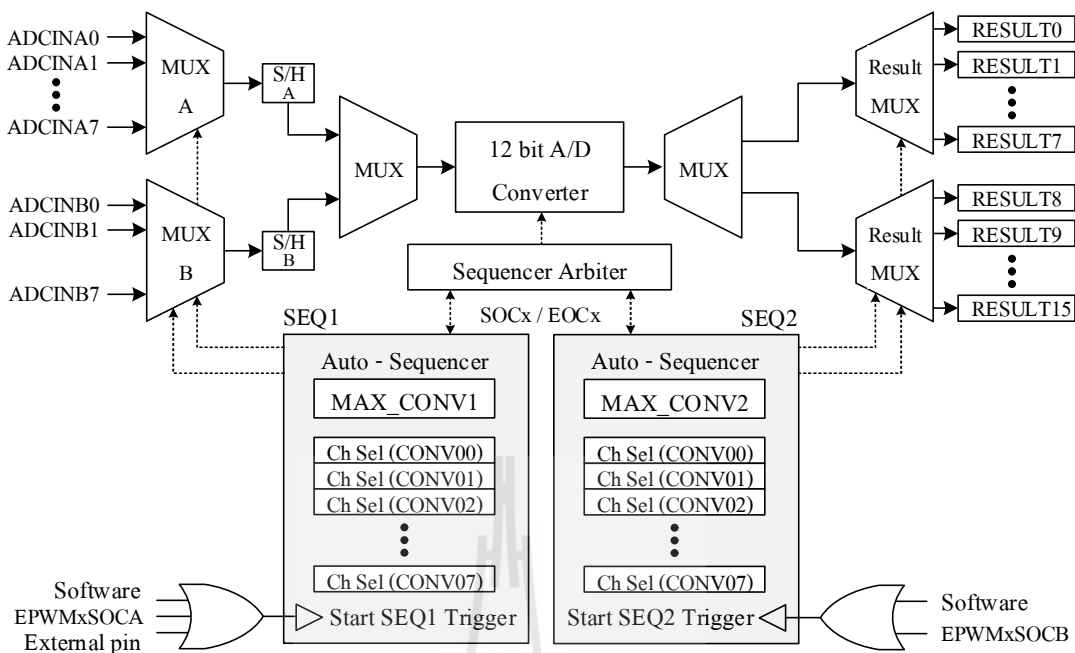
และ $Digital\ Values$ คือ ค่าดิจิทัลผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงแอนะล็อก

การแปลงแอนะล็อกของ TMS320F28335 ประกอบด้วย Analog input Multiplexers 2 ชุด (MUX A และ MUX B) และหน่วยชักตัวอย่าง (Sample/Hold : S/H) 2 หน่วย ทำให้สามารถแปลงแอนะล็อกได้ 2 วิธีการคือ การแปลงแอนะล็อกครั้งละช่องสัญญาณอินพุตตามลำดับการแปลงต่อเนื่องกัน (Cascaded Sequencer ADC) ดังรูปที่ ๓.9 และการแปลงแอนะล็อกครั้งละ 2 ช่องสัญญาณพร้อมกันในเวลาเดียวกัน (Dual Sequencer ADC) ดังรูปที่ ๓.10 การแปลงแอนะล็อกในวิธีการแรกลำดับของการแปลงแอนะล็อก SEQ1 ที่เรียกว่า Sequencer ต้องกำหนดจำนวนสูงสุดและเลือกช่องสัญญาณอินพุตที่ต้องการแปลงแอนะล็อกด้วยรีจิสเตอร์ MAX_CONV1 และรีจิสเตอร์ ADCCHSELSEQ1 – ADCCHSELSEQ4 ตามลำดับ หลังจากที่กระบวนการแปลงแอนะล็อกเสร็จสิ้น ผลลัพธ์ของการแปลง

เอาต์พุตจะถูกบันทึกไว้ในรีจิสเตอร์ ADCRESULT0 – ADCRESULT15 ส่วนการแปลงเอาต์พุตในวิธีการที่สอง จะมีลำดับของการแปลงเอาต์พุต 2 ชุดคือ SEQ1 และ SEQ2 ดังนั้นต้องกำหนดจำนวนสูงสุดของช่องสัญญาณอินพุตที่ต้องการแปลงเอาต์พุตไว้ในรีจิสเตอร์ MAX_CONV1 สำหรับ SEQ1 และ MAX_CONV2 สำหรับ SEQ2 เลือกช่องสัญญาณอินพุตที่ต้องการแปลงเอาต์พุตด้วยรีจิสเตอร์ ADCCHSELSEQ1 – ADCCHSELSEQ4 หลังจากทีกระบวนกรแปลงเอาต์พุตเสร็จสิ้น ผลลัพธ์ของการแปลงเอาต์พุตจะถูกบันทึกไว้ในรีจิสเตอร์ ADCRESULT0 – ADCRESULT7 สำหรับ SEQ1 และ ADCRESULT8 – ADCRESULT15 สำหรับ SEQ2 กระบวนการแปลงเอาต์พุตจะเริ่มขึ้นเมื่อมีสัญญาณตรีกเกอร์มาสั่งให้เริ่มแปลงเอาต์พุตตามลำดับการแปลงเอาต์พุต SEQ1 และ SEQ2 ซึ่งอาจเป็นสัญญาณตรีกเกอร์ที่มาจากตัวซอฟต์แวร์ (Software) โปรแกรมที่สร้างขึ้นโดยกำหนดคาบเวลาในการซั๊กตัวอย่าง (Sampling Time) หรือสัญญาณตรีกเกอร์ที่เกิดจากอินเตอร์รัพต์หรือเหตุการณ์ต่าง ๆ หรือสัญญาณตรีกเกอร์ภายนอกผ่านขา GPIO

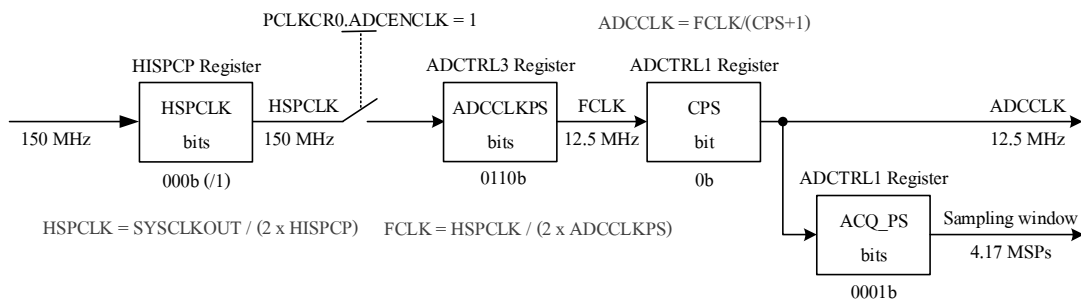


รูปที่ ง.9 แผนภาพการแปลงเอาต์พุตแบบ Cascaded Sequencer ADC ของ TMS320F28335

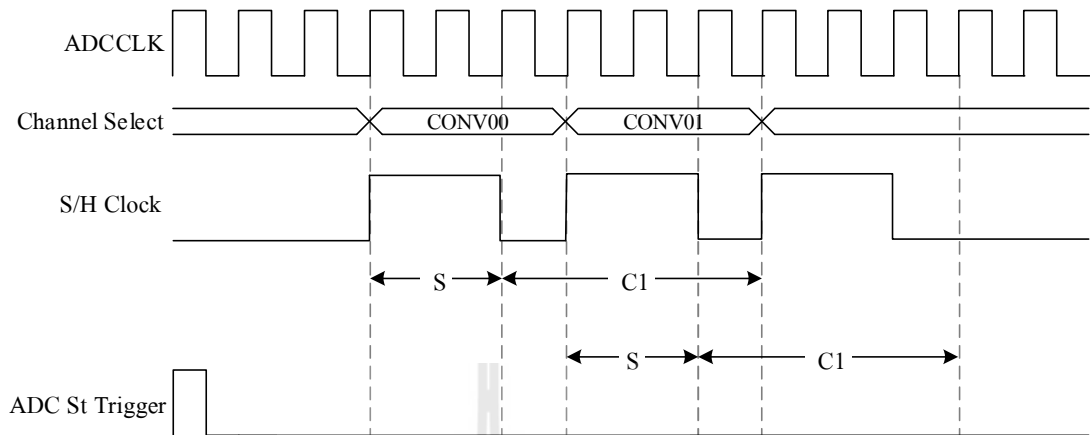


รูปที่ ๓.10 แผนภาพการแปลงเอชดีแบบ Dual Sequencer ADC ของ TMS320F28335

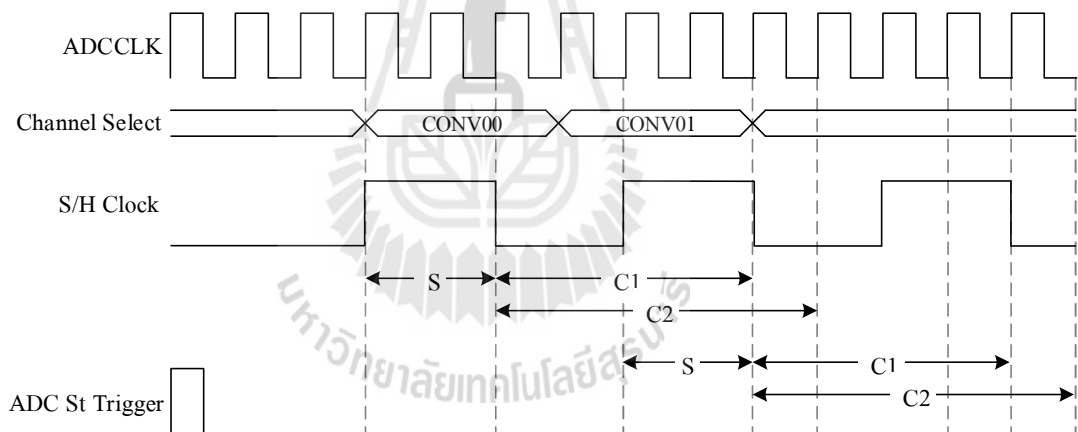
การกำหนดคาบเวลาในการชักตัวอย่าง (Sampling Window) ได้ผ่านรีจิสเตอร์ ACQ_PS รูปที่ ๓.11 คือระบบสัญญาณนาฬิกาของโมดูลการแปลงเอชดีที่มีสัญญาณนาฬิกา 12.5 MHz (ADCCLK) เป็นความเร็วสูงสุด แต่ละวิธีการแปลงเอชดีจะมีจำนวนสัญญาณนาฬิกาในการชักตัวอย่าง (S/H Clock) ช่วงเวลาในการแปลงเอชดี S (Acquisition window) และช่วงเวลาในการอัปเดตหรือบันทึกค่าดิจิทัลลงในรีจิสเตอร์ผลลัพธ์ของการแปลงเอชดี ADCRESULTx (C1 สำหรับช่องสัญญาณ ADCINAx และ C2 สำหรับช่องสัญญาณ ADCINBx) แตกต่างกัน ดังรูปที่ ๓.12 และ ๓.13 ที่แสดงถึงแผนภาพเวลาที่ใช้ในการแปลงเอชดี (ADC Conversion Time) ของวิธีการแปลงเอชดีครั้งละ 1 และ 2 ช่องสัญญาณอินพุต ตามลำดับ



รูปที่ ง.11 ระบบสัญญาณนาฬิกาโมดูลการแปลงเอชดี ของ TMS320F28335



รูปที่ ง.12 เวลาที่ใช้ในการแปลงเอชดีแบบทีละ 1 ช่องสัญญาณอินพุต



รูปที่ ง.13 เวลาที่ใช้ในการแปลงเอชดีแบบทีละ 2 ช่องสัญญาณอินพุต

วิธีการแปลงเอชดีแบบทีละ 1 และ 2 ช่องสัญญาณอินพุตจะมีช่วงเวลาที่ใช้ในการแปลงเอชดี (S) เท่ากับ $1 + ACQ_PS$ (ADCLK) เหมือนกันทั้งสองวิธีการ แต่จะมีจำนวนสัญญาณนาฬิกาในการซักรตัวอย่าง (S/H Clock) แตกต่างกันดังสมการที่ (ง.5ก) และ (ง.5ข) ตามลำดับ และมีอัตราเร็วในการซักรตัวอย่าง (sample time) แตกต่างกันดังสมการที่ (ง.4ก) และ (ง.4ข) ตามลำดับ

$$Sample\ Rate = \frac{1}{[(2 + ACQ_PS) \times (1 / ADCCLK)]} \quad (ง. 4ก)$$

$$Sample\ Rate = \frac{1}{[(3 + ACQ_PS) \times (1 / ADCCLK)]} \quad (ง. 4ข)$$

$$S / H = 2 + ACQ_PS (ADCCLK) \quad (ง.5ก)$$

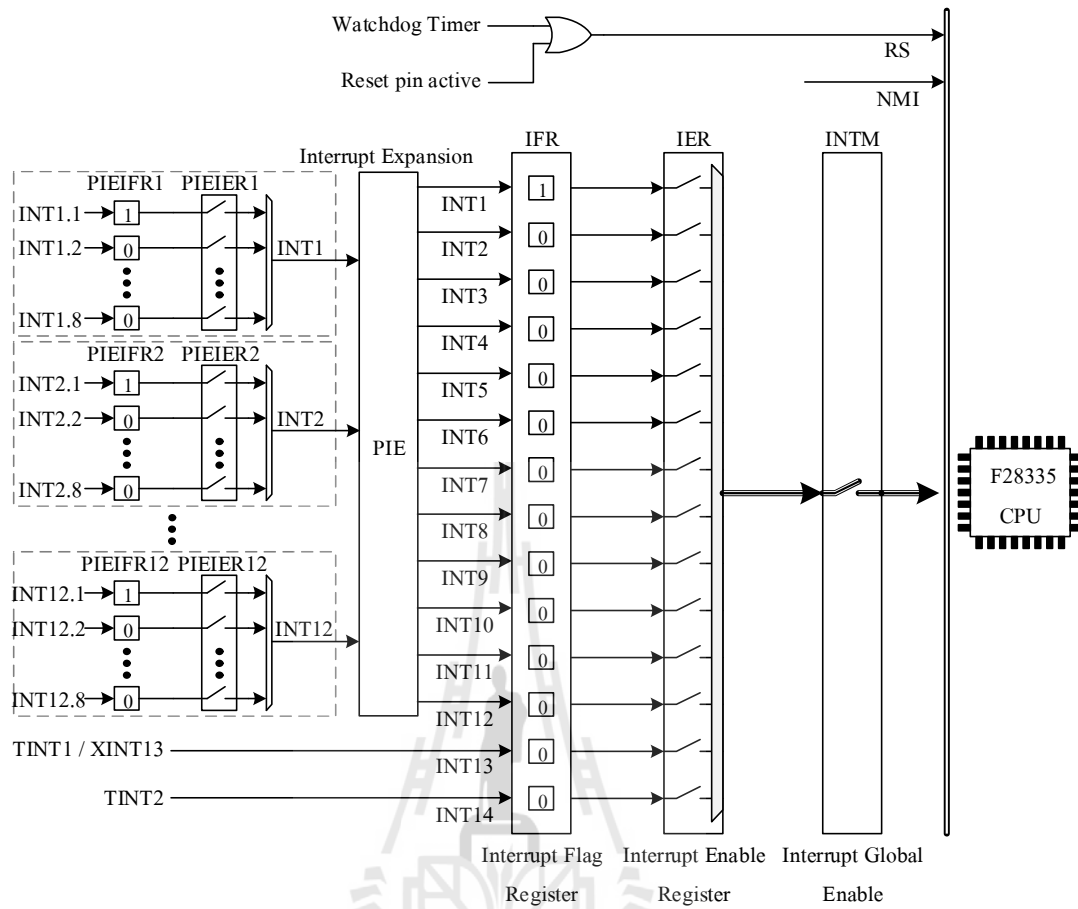
$$S / H = 3 + ACQ_PS (ADCCLK) \quad (ง.5ข)$$

โดยที่ *Sample Rate* คือ อัตราเร็วของการชักตัวอย่าง (Hz)

ADCCLK คือ สัญญาณนาฬิกาของระบบ ADC (Hz)

ง.6 Interrupt Systems

TMS320F28335 เชื่อมต่อกับอินเทอร์รัพต์หลัก (F28335 Core Interrupt) 16 ชุด แบ่งเป็นอินเทอร์รัพต์ที่ไม่สามารถโปรแกรมใช้งานได้ (Non-Maskable Interrupt) 2 ชุด คือ RS และ NMI ซึ่งมีลำดับความสำคัญสูงสุด (High Priority) ทำหน้าที่หยุดและรีเซ็ตการทำงานของ CPU และอินเทอร์รัพต์ที่สามารถโปรแกรมใช้งานได้ (Maskable Interrupt) 14 ชุด แสดงในรูปที่ ง. 14



รูปที่ ง.14 แผนภาพระบบอินเตอร์รัพต์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335

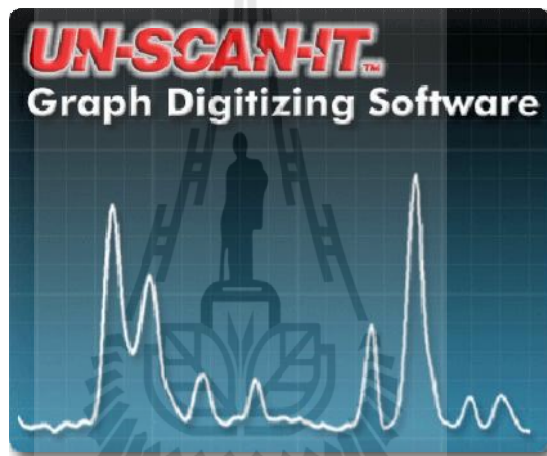


ภาคผนวก จ

การประมาณค่าจุดเอ็มพีพีบนกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะของแผงพีวีจากเอกสาร
ข้อมูลเฉพาะของผู้ผลิตด้วยโปรแกรม Graph digitizer

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ชุดข้อมูลจุดเอ็มพีพี (จุดกำลังงานสูงสุด) ที่ประกอบด้วยคู่อันดับกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังงานสูงสุด (V_{mp} , I_{mp}) ของแผงพีวี Hanwha Solar รุ่น SF260 ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้มาจากการประมาณค่าจุดเอ็มพีพีบนกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะของแผงพีวีจากเอกสารข้อมูลเฉพาะของผู้ผลิตด้วยโปรแกรมกราฟดิจิทัลไอเซอร์ (Graph Digitizer) โปรแกรมกราฟดิจิทัลไอเซอร์เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถประมาณค่าข้อมูลของเส้นกราฟบนรูปภาพหรือเอกสารได้ ซอฟต์แวร์ที่เลือกใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้คือ UN-SCAN-IT Graph Digitizing เวอร์ชัน Demo แสดงในรูปแบบที่ จ.1 สามารถใช้งานได้ง่าย รองรับรูปแบบไฟล์ภาพหลายชนิด สามารถประมวลผลได้หลายกรณีไม่ว่าจะมีเส้นกราฟเส้นเดียวหรือหลายเส้นที่มีจุดตัดกันของเส้นกราฟได้ดี

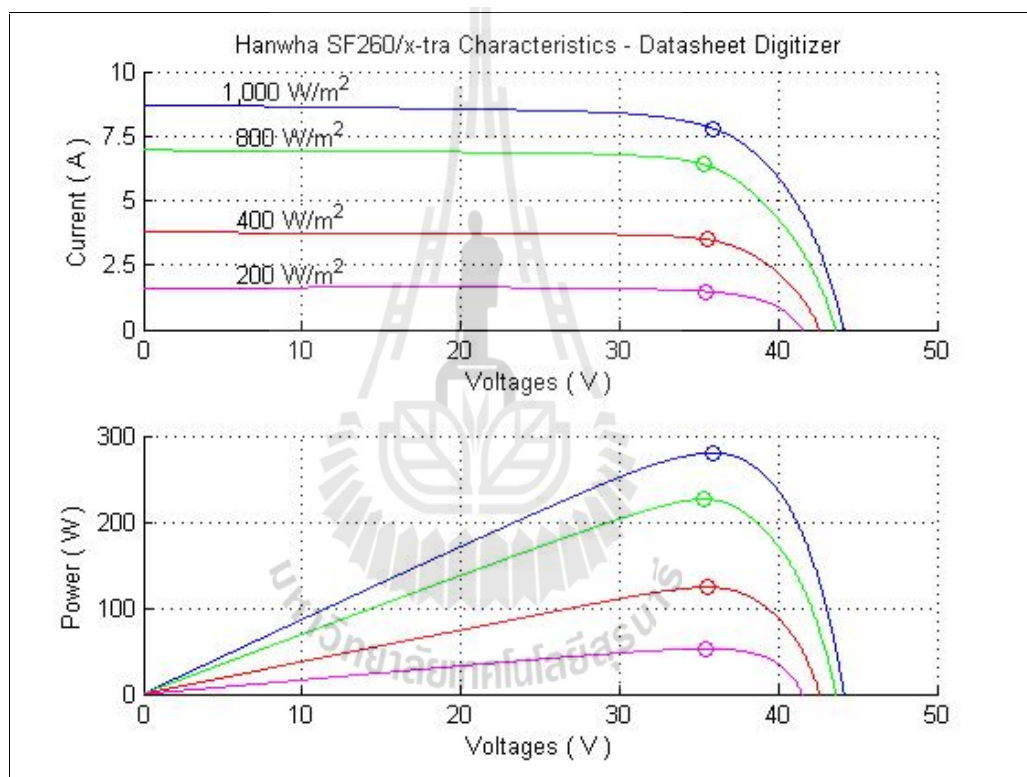


รูปที่ จ.1 โปรแกรม UN-SCAN-IT Graph Digitizing

การใช้งานโปรแกรม UN-SCAN-IT Graph Digitizing ในการประมาณค่าข้อมูลจากเส้นกราฟบนรูปภาพหรือเอกสารข้อมูลเฉพาะของผู้ผลิต มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1.) เลือกรูปภาพที่มีเส้นกราฟที่ต้องการประมาณค่าข้อมูล
- 2.) กำหนดสเกล จุดกำเนิดของกราฟ (Origin) แกนกราฟ (Axis) สเกลกราฟ (Scale) และเลือกเส้นกราฟ (Curve) ที่ต้องการประมาณค่าข้อมูล
- 3.) การประมาณค่าข้อมูลของเส้นกราฟ ซอฟต์แวร์จะแปลงค่าข้อมูลค่าของเส้นกราฟบนรูปภาพหรือเอกสารข้อมูลเฉพาะของผู้ผลิตออกมาเป็นคู่อันดับ (x , y) ที่สามารถนำออก (Export) ในรูปแบบไฟล์ Microsoft Excel หรือสามารถพล็อตเป็นกราฟได้

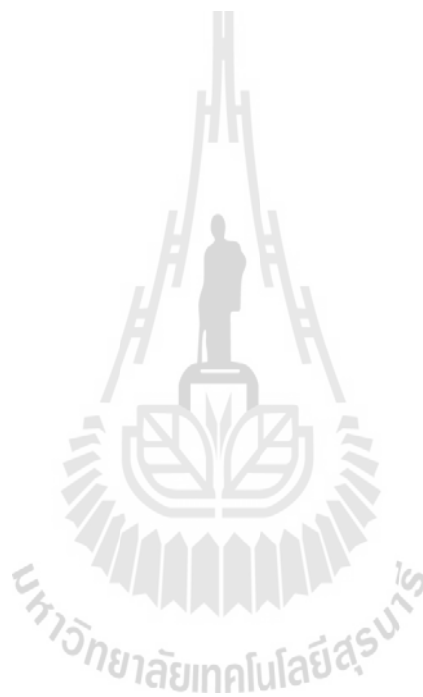
ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้นำข้อมูลคู่อันดับ (x, y) ที่ได้จากประมาณค่าข้อมูลของกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีมาประมวลผลด้วยโปรแกรมแมทแลบ เพื่อพล็อตเส้นกราฟและประมาณค่าข้อมูลจุดเอ็มพีพีในแต่ละสภาพแวดล้อมที่มีความเข้มแสงอาทิตย์แตกต่างกัน สำหรับการออกแบบเส้นตรงการเลื่อน กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะของแผงพีวีในรูปที่ จ.2 คือเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวี Hanwha Solar SF-260 มีข้อมูลจุดเอ็มพีพีตามตารางที่ 3.3 (ในบทที่ 3) ที่ได้มาจากการแปลงค่าข้อมูลจากเส้นกราฟบนภาพหรือเอกสารข้อมูลเฉพาะของผู้ผลิต



รูปที่ จ.2 กราฟเส้นโค้งคุณลักษณะเฉพาะของบล็อกแผงพีวี Hanwha Solar รุ่น SF260

โค้ดโปรแกรมในส่วนต่อไปนี้เป็นโปรแกรมแมทแลบที่ใช้ในการประมวลผลเพื่อพล็อตกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะของแผงพีวี และประมาณค่าจุดเอ็มพีพีของแผงพีวีที่ได้จากเส้นโค้งคุณลักษณะของแผงพีวีตามเอกสารคู่มือเฉพาะของแผงพีวีในแต่ละสภาพแวดล้อมที่มีระดับความเข้มแสงอาทิตย์แตกต่างกัน 4 ระดับ ซึ่งเป็นข้อมูลคู่อันดับ (x, y) หรืออันดับกระแสไฟฟ้าและแรงดันของแผงพีวีในแต่ละสภาพแวดล้อมที่มีระดับความเข้มแสงอาทิตย์แตกต่างกัน 4 ระดับคือ

1000 800 400 และ 200 W/m² ที่ได้จากการประมาณค่าข้อมูลของกราฟเส้น โด่งคุณลักษณะของ
แผงพีวีด้วยโปรแกรมกราฟดิจิทัลไทเซอร์ ซึ่งถูกบันทึกไว้ในไฟล์ “Hanwha260_digitizer.mat”



```

% =====
%          โปรแกรมประมวลผลเพื่อพล็อตเส้นกราฟและประมาณค่าข้อมูล
%          จุดเอ็มพีพีของแผงพีวี Hanwha Solar รุ่น SF260
% =====
% โหลดข้อมูลเส้นโค้งคุณลักษณะที่ได้จาก UN-SCAN-IT Graph Digitizing
load ('Hanwha260_digitizer.mat') ;
% ที่ระดับ 1000 W/m2: คู่อันดับ (I1,V1) ในไฟล์ Hanwha260_digitizer.mat
Vpv1 = 0: 1e-4 : V1(length (I1) ) ;
Ipv1 = interp1 (V1, I1, Vpv1, 'pchip') ; % ประมาณค่าข้อมูลให้ละเอียดมากขึ้น
for n = 1 : length (Ipv1) % ค้นหาจุดเอ็มพีพี
    I_PV(n) = Ipv1(n); V_PV(n) = Vpv1(n); P_PV(n) = V_PV(n).*I_PV(n) ;
end
n = find (P_PV == max (P_PV) ) ;
% พล็อตเส้นโค้งกระแสและแรงดันไฟฟ้า
figure (1); plot (V_PV, I_PV, 'b', V_PV(n), I_PV(n), 'bo'); axis ([0 50 0 10]) ;
set (gca, 'Ygrid', 'on', 'Xgrid', 'on', 'xtick', 0:10:50, 'ytick', 0:2.5:10);
text (5, I_PV(1) + 0.3, '1,000 W/m^2') ;
% พล็อตเส้นโค้งกระแสและแรงดันไฟฟ้า
figure (2); plot(V_PV,P_PV,'b');
Vmp(1) = V_PV(n); Imp(1) = I_PV(n); Pmp(1) = P_PV(n); clear V_PV I_PV P_PV n;
% ที่ระดับ 800 W/m2: คู่อันดับ (I2,V2) ในไฟล์ Hanwha260_digitizer.mat
Vpv2 = 0: 1e-4 : V2(length (I2) ) ;
Ipv2 = interp1 (V1, I1, Vpv2, 'pchip') ; % ประมาณค่าข้อมูลให้ละเอียดมากขึ้น
for n = 1 : length (Ipv2) % ค้นหาจุดเอ็มพีพี
    I_PV(n) = Ipv2(n); V_PV(n) = Vpv2(n); P_PV(n) = V_PV(n).*I_PV(n) ;
end
n = find (P_PV == max (P_PV) ) ;
% พล็อตเส้นโค้งกระแสและแรงดันไฟฟ้า
figure (1); plot (V_PV, I_PV, 'g', V_PV(n), I_PV(n), 'go'); axis ([0 50 0 10]) ;
set (gca, 'Ygrid', 'on', 'Xgrid', 'on', 'xtick', 0:10:50, 'ytick', 0:2.5:10);

```

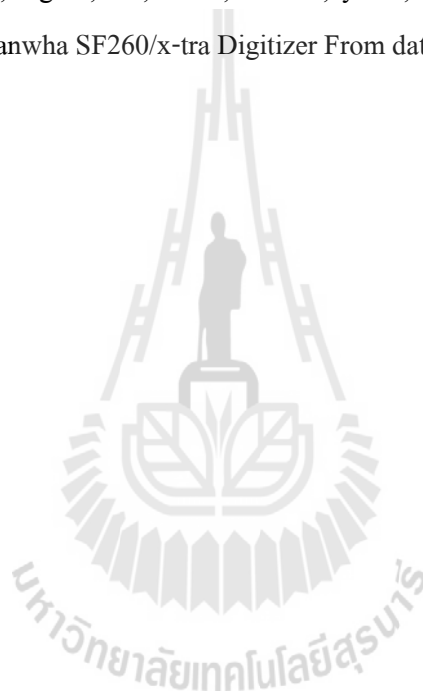
```

text (5, I_PV(1) + 0.3, '800 W/m^2' );
% พล็อตเส้นโค้งกระแสและแรงดันไฟฟ้า
figure (2); plot(V_PV,P_PV,'g');
Vmp(2) = V_PV(n); Imp(2) = I_PV(n); Pmp(2) = P_PV(n); clear V_PV I_PV P_PV n;
% ที่ระดับ 400 W/m2 : คู่อันดับ (I3,V3) ในไฟล์ Hanwha260_digitizer.mat
Vpv3 = 0: 1e-4 : V3(length (I3) ) ;
Ipv3 = interp1 (V3, I3, Vpv3, 'pchip') ; % ประมาณค่าข้อมูลให้ละเอียดมากขึ้น
for n = 1 : length (Ipv3) % ค้นหาจุดเอ็มพีพี
I_PV(n) = Ipv3(n); V_PV(n) = Vpv3(n); P_PV(n) = V_PV(n).*I_PV(n);
end
n = find (P_PV == max (P_PV) ) ;
% พล็อตเส้นโค้งกระแสและแรงดันไฟฟ้า
figure (1); plot (V_PV, I_PV, 'r', V_PV(n), I_PV(n), 'ro'); axis ([0 50 0 10]) ;
set (gca, 'Ygrid', 'on', 'Xgrid', 'on', 'xtick', 0:10:50, 'ytick', 0:2.5:10);
text (5, I_PV(1) + 0.3, '400 W/m^2' );
% พล็อตเส้นโค้งกระแสและแรงดันไฟฟ้า
figure (2); plot(V_PV,P_PV,'r');
Vmp(3) = V_PV(n); Imp(3) = I_PV(n); Pmp(3) = P_PV(n); clear V_PV I_PV P_PV n;
% ที่ระดับ 200 W/m2 : คู่อันดับ (I4,V4) ในไฟล์ Hanwha260_digitizer.mat
Vpv4 = 0: 1e-4 : V1(length (I4) ) ;
Ipv4 = interp1 (V4, I4, Vpv4, 'pchip') ; % ประมาณค่าข้อมูลให้ละเอียดมากขึ้น
for n = 1 : length (Ipv4) % ค้นหาจุดเอ็มพีพี
I_PV(n) = Ipv4(n); V_PV(n) = Vpv4(n); P_PV(n) = V_PV(n).*I_PV(n);
end
n = find (P_PV == max (P_PV) ) ;
% พล็อตเส้นโค้งกระแสและแรงดันไฟฟ้า
figure (1); plot (V_PV, I_PV, 'm', V_PV(n), I_PV(n), 'mo'); axis ([0 50 0 10]) ;
set (gca, 'Ygrid', 'on', 'Xgrid', 'on', 'xtick', 0:10:50, 'ytick', 0:2.5:10);
text (5, I_PV(1) + 0.3, '1,000 W/m^2' );

```



```
% พล็อตเส้นโค้งกระแสและแรงดันไฟฟ้า
figure (2); plot(V_PV,P_PV,'m');
Vmp(4) = V_PV(n); Imp(4) = I_PV(n); Pmp(4) = P_PV(n); clear V_PV I_PV P_PV n;
% ปรับแต่งการแสดงผลข้อมูลกราฟ
figure (1); xlabel ('PV Voltages ( V )'); ylabel ('PV Currents ( A )');
title ('I-V curve - Hanwha SF260/x-tra Digitizer From datasheet');
figure (2); xlabel ('PV Voltages ( V )'); ylabel ('PV Power ( W )'); axis ([0 50 0 300]);
set (gca, 'Ygrid', 'on', 'Xgrid', 'on', 'xtick', 0:10:50, 'ytick', 0:100:300);
title ('P-V curve - Hanwha SF260/x-tra Digitizer From datasheet');
```



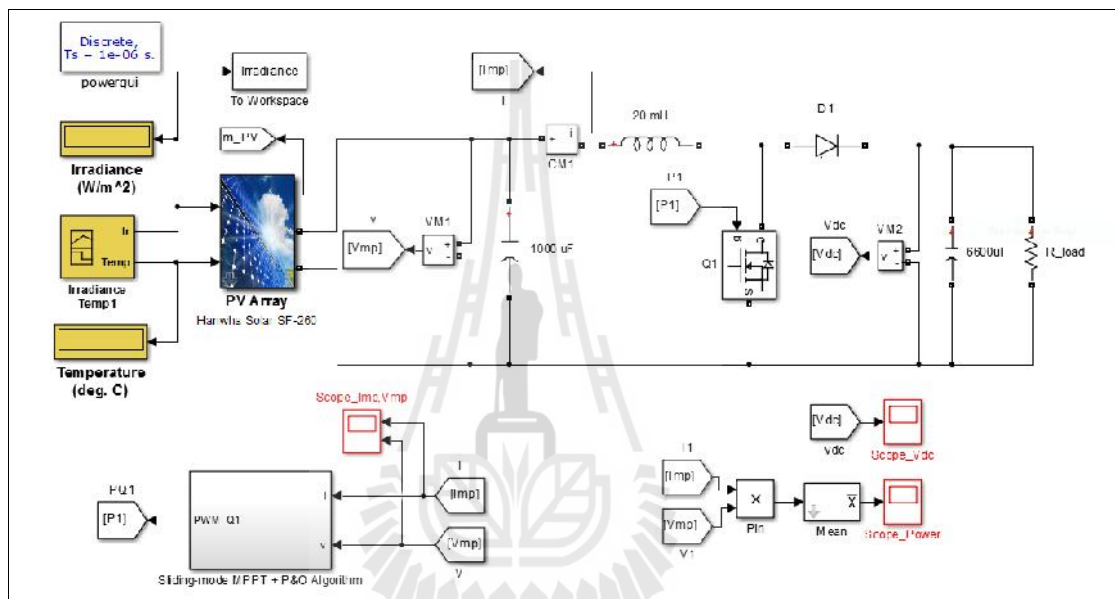
ภาคผนวก ฉ

การจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของโปรแกรมแมทแลบ

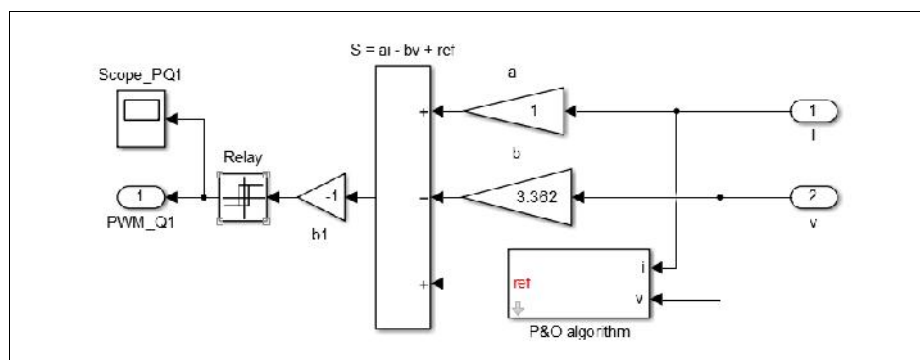


จ.1 การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันแบบบูสต์ที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน

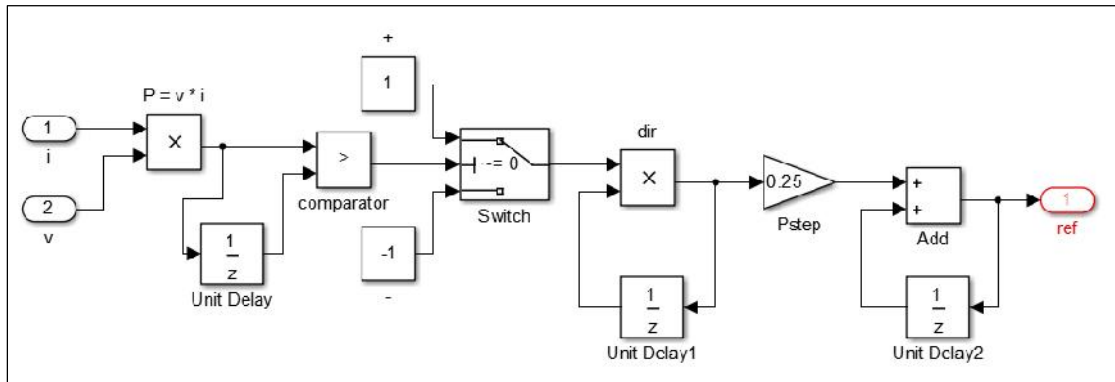
การจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (SimPowerSystem™) ของโปรแกรมแมทแลบ งานวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดค่าคุณสมบัติของการจำลองสถานการณ์ (Model configuration parameters) ให้ดำเนินการแก้ปัญหาด้วยวิธีการแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Solver) และกำหนดคาบเวลาในการจำลองสถานการณ์แบบคงที่ (Fixed-step size) เท่ากับ 1 μ s



รูปที่ จ.1 แบบจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน



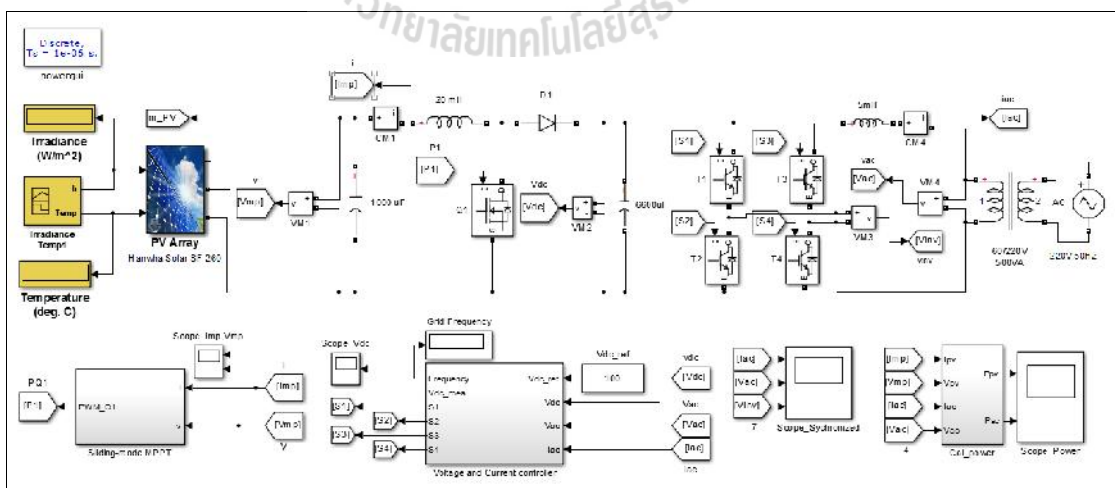
รูปที่ จ.2 บล็อกหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน



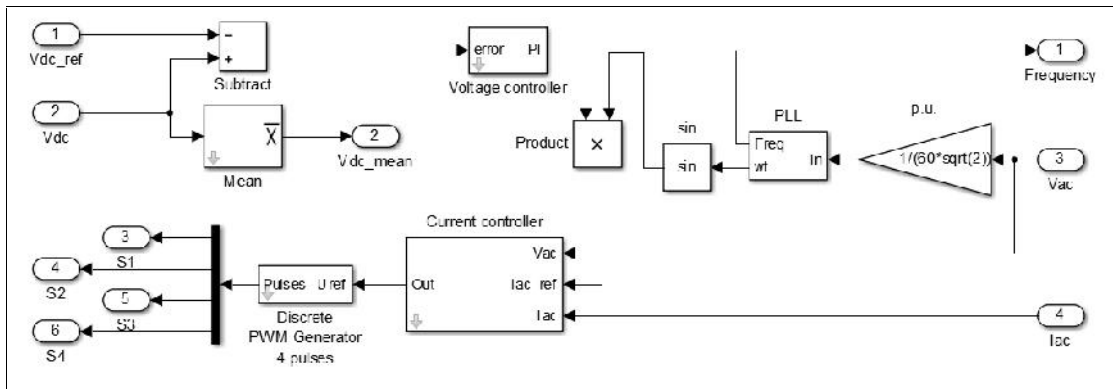
รูปที่ ๓.3 บล็อกอัลกอริทึมพีแอนดีไอ

๓.2 การจำลองสถานการณ์วงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน

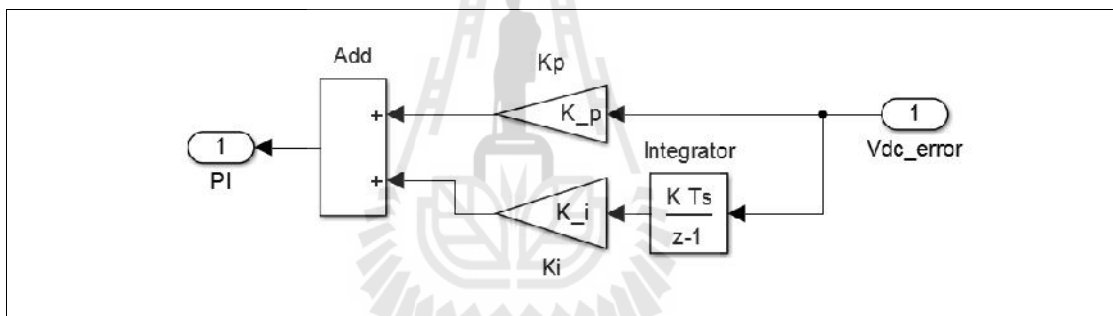
การจำลองสถานการณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อนด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (SimPowerSystem™) ของโปรแกรมแมทแลบ งานวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดค่าคุณสมบัติของการจำลองสถานการณ์ (Model configuration parameters) ให้ดำเนินการแก้ปัญหาด้วยวิธีการแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Solver) และกำหนดคาบเวลาในการจำลองสถานการณ์แบบคงที่ (Fixed-step size) เท่ากับ 1 μ s เช่นเดียวกับการจำลองสถานการณ์ของวงจรภาคแรก



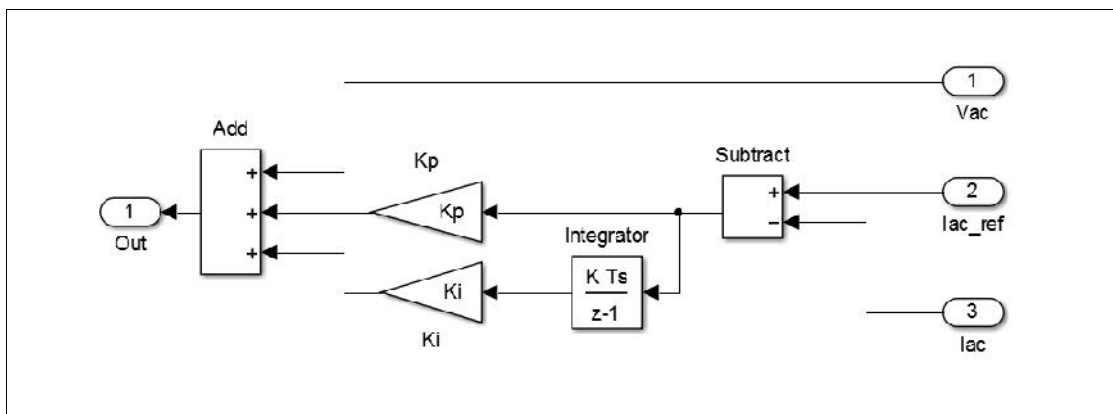
รูปที่ ๓.4 แบบจำลองสถานการณ์วงจรอินเวอร์เตอร์พีวีเชื่อมต่อกับกริดสองภาคเฟสเดียวที่มีเอ็มพีพีทีชนิดโหมดการเลื่อน



รูปที่ ๓.5 บล็อกระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ประกอบด้วย ตัวควบคุมแรงดันคัตซี ตัวกระแสไฟฟ้ากริด และเฟสล็อกกลุ่บ

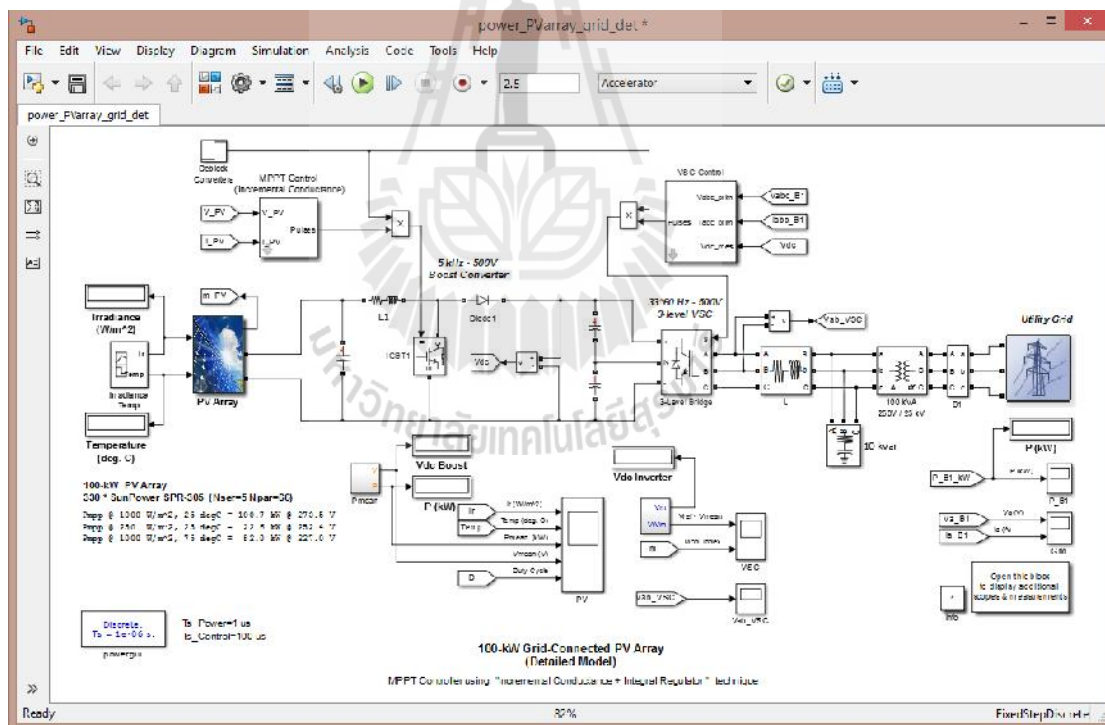


รูปที่ ๓.6 บล็อกตัวควบคุมแรงดันคัตซี



รูปที่ ๓.7 บล็อกตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด

๓.3 การสร้างและแก้ไขบล็อกแผงพีวีที่ได้จากการคัดลอกมาจากแบบจำลองสถานการณ์ตัวอย่าง บล็อกแผงพีวีที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์สร้างขึ้นโดยการแก้ไขเพิ่มเติมจากบล็อกแผงพีวีที่อยู่ในแบบจำลองสถานการณ์ตัวอย่างของโปรแกรม MATLAB Simulink ซึ่งการจำลองสถานการณ์นี้เป็นระบบผลิตกำลังไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดไฟฟ้าขนาด 100 kW (A 100-kW Grid-Connected PV Array model) ที่นำเสนอโดย Pierre Giroux, MathWorks และคณะ (2013) ประกอบด้วยแผงพีวีขนาด 100 kW เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันบูสต์ที่มีหน่วยเอ็มพีพีทีชนิดการเพิ่มขึ้นของตัวนำกระแสไฟฟ้าเป็นวงจรภาคแรก และวงจรภาคที่สองเป็นอินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบสามระดับ (Three-phase three-level VSC) ที่มีด้านเอาต์พุตเชื่อมต่อกับกริดไฟฟ้า 100 kV ดังรูปที่ ๓.8 การเรียกใช้หรือเปิดแบบจำลองสถานการณ์นี้สามารถป้อนคำสั่ง “power_PVarray_grid_det” ลงบนหน้า Command Window ของโปรแกรมเมทแลบ (เฉพาะโปรแกรมเมทแลบเวอร์ชัน 2013b หรือใหม่กว่าเท่านั้น)

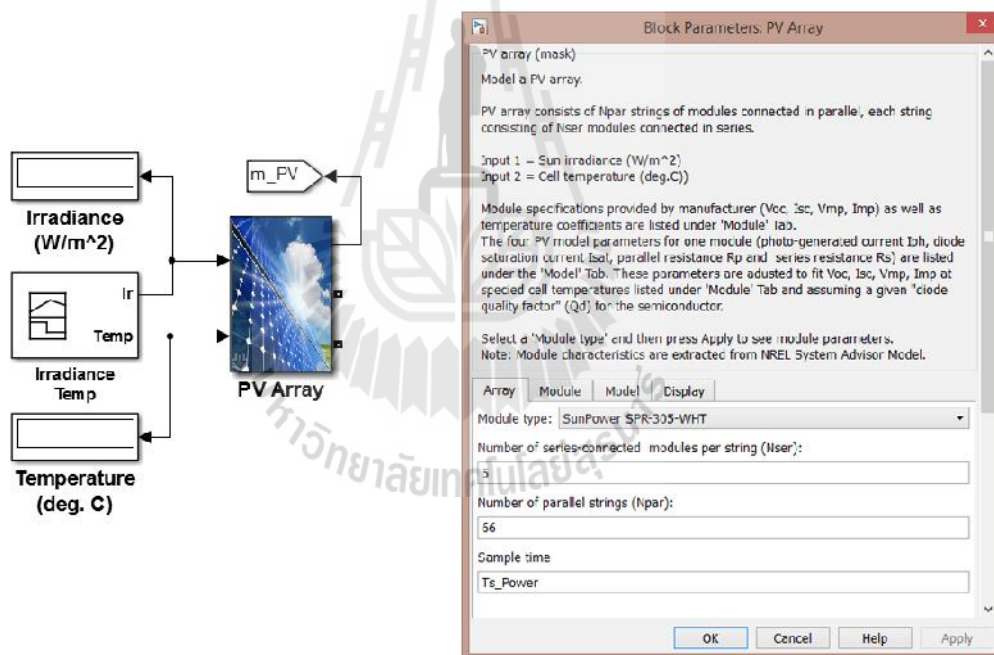


รูปที่ ๓.8 แบบจำลองสถานการณ์ตัวอย่างระบบผลิตกำลังไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับกริดไฟฟ้าขนาด 100 kW

บล็อกแผงพีวีที่คัดลอกมาจากแบบจำลองสถานการณ์ตัวอย่างนั้นมีลักษณะเช่นเดียวกับบล็อกอื่นๆ ในไลบรารีของชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Power System Blocksets library) ซึ่งสามารถ

คัดลอกแก้ไขและนำไปสร้างแบบจำลองสถานการณ์ใหม่ได้ บล็อกแผงพีวีนี้ประกอบด้วยช่องอินพุต 2 ช่อง ได้แก่ ช่องสำหรับป้อนความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของแผงพีวี นอกจากนี้ยังช่องเอาต์พุต 1 ช่องสำหรับวัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงพีวี และยังมีขั้วไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมต่อโหลดดังที่แสดงรูปที่ ๑.9 หน้าต่างสำหรับกำหนดค่าพารามิเตอร์ของบล็อกแผงพีวี ประกอบด้วยคำอธิบายและแท็บ (Tab panel) ในการกำหนดค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 1.) Array สำหรับกำหนดหรือเลือกรุ่นแผงพีวีและลักษณะการเชื่อมต่อกันของแผงพีวี
- 2.) Module สำหรับแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโมดูลแผงพีวี เช่น กำลังไฟฟ้าสูงสุดแรงดันที่จุดกำลังงานสูงสุด กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานสูงสุด เป็นต้น
- 3.) Model สำหรับแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองแผงพีวี
- 4.) Display สำหรับแสดงกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะของแผงพีวีในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ

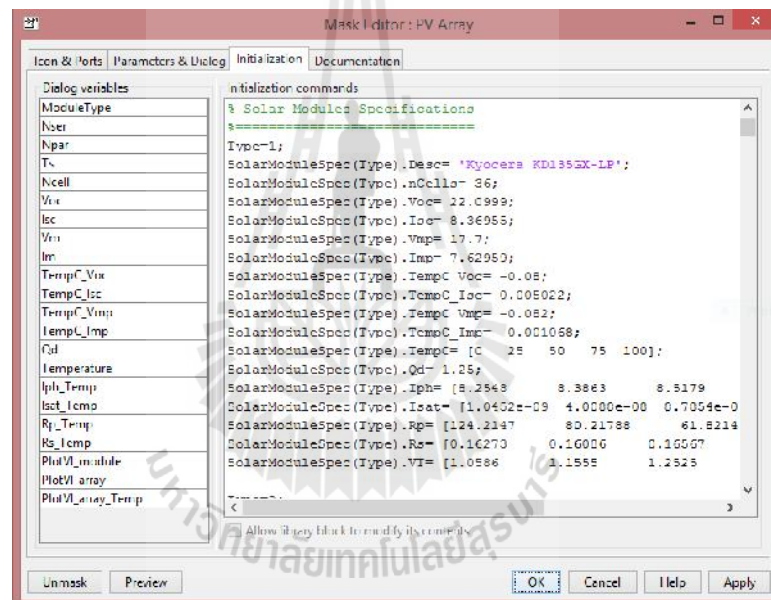


รูปที่ ๑.9 บล็อกแผงพีวีและหน้าต่างกำหนดค่าพารามิเตอร์

บล็อกแผงพีวีที่คัดลอกมาจากแบบจำลองสถานการณ์ตัวอย่างประกอบด้วยแผงพีวีทั้งหมด 10 รุ่นให้เลือกใช้จำลองสถานการณ์ แต่การจำลองสถานการณ์ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้แก้ไขบล็อกแผงพีวีใหม่โดยได้เพิ่มแบบจำลองของแผงพีวี Hanwha Solar รุ่น SF260, 295 W ซึ่งการเพิ่มแบบจำลองแผงพีวีรุ่นใหม่นี้สามารถแก้ไขได้ที่ส่วนหน้ากากของบล็อกโมเดล (Block Masks) ดังที่

แสดงในรูปที่ ๑.10 หน้ากากของบล็อกโมเดลเป็นส่วนในการกำหนดพารามิเตอร์และโค้ดโปรแกรมเริ่มต้นของบล็อกโมเดล ผู้ใช้งานสามารถแก้ไขหน้ากากของบล็อกโมเดลได้โดยการคลิกเมาส์ขวาที่บล็อกแผงฟิวด์และเลือกคำสั่ง Mask >> Edit Mask... หน้าต่างสำหรับจัดการแก้ไขหน้ากากของบล็อกโมเดลประกอบด้วยแท็บต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 1.) Icon & Ports สำหรับกำหนดการแสดงผลภายนอกของบล็อกแผงฟิวด์ รูปไอคอนบล็อก
- 2.) Parameters & Dialog สำหรับกำหนดและจัดการพารามิเตอร์หรือตัวแปรต่าง ๆ
- 3.) Initialization สำหรับกำหนดโค้ดโปรแกรมหรือเงื่อนไขเริ่มต้นของบล็อกแผงฟิวด์ ส่วนที่เก็บข้อมูลพารามิเตอร์ของโมเดลของแผงฟิวด์รุ่นต่าง ๆ
- 4.) Documentation สำหรับกำหนดคำอธิบายของบล็อกแผงฟิวด์



รูปที่ ๑.10 หน้าต่างสำหรับจัดการแก้ไขหน้ากากของบล็อกแผงฟิวด์

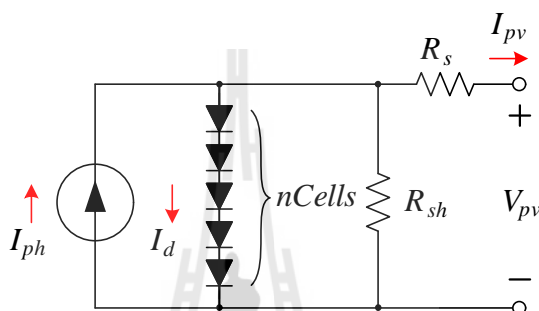
พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแผงฟิวด์แต่ละรุ่น (solar module specifications) ที่จำเป็นต้องระบุสำหรับการเพิ่มแบบจำลองแผงฟิวด์รุ่นใหม่ลงในบล็อกแผงฟิวด์ประกอบด้วย

SolarModuleSpec (Type).Desc	ชื่อโมเดลหรือรุ่นของแผงฟิวด์
SolarModuleSpec (Type).nCells	จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดใน 1 โมดูล
SolarModuleSpec (Type).Voc	แรงดันเปิดวงจรของแผงฟิวด์
SolarModuleSpec (Type).Isc	กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของแผงฟิวด์
SolarModuleSpec (Type).Vmp	แรงดันที่จุดกำลังงานสูงสุดของแผงฟิวด์

SolarModuleSpec (Type).Imp	กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังงานสูงสุดของแผงพีวี
SolarModuleSpec (Type).TempC_Voc	ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเปิดวงจรต่ออุณหภูมิ
SolarModuleSpec (Type).TempC_Isc	ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่ออุณหภูมิ
SolarModuleSpec (Type).TempC_Vmp	ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จุดกำลังงานสูงสุดต่ออุณหภูมิ
SolarModuleSpec (Type).TempC_Imp	ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่ออุณหภูมิ
SolarModuleSpec (Type).TempC	เวกเตอร์อุณหภูมิขณะทำงานของแผงพีวีเท่ากับ [0 25 50 75 100] °C
SolarModuleSpec (Type).Qd	ตัวประกอบสภาพอุดมคติของสารกึ่งตัวนำ
SolarModuleSpec (Type).Iph	เวกเตอร์กระแสไฟฟ้าของแผงพีวีที่เกิดขึ้นจากแสงอาทิตย์
SolarModuleSpec (Type).Isat	เวกเตอร์กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวของแผงพีวีในกรณีที่ไม่มีแสงมาตกกระทบ
SolarModuleSpec (Type).Rp	เวกเตอร์ความต้านทานชั้นของแผงพีวี
SolarModuleSpec (Type).Rs	เวกเตอร์ความต้านอนุกรมของแผงพีวี
SolarModuleSpec (Type).VT	เวกเตอร์แรงดันเนื่องจากความร้อนของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการผลิตแผงพีวี

การระบุค่าพารามิเตอร์ของบล็อกโมเดลแผงพีวีจะอาศัยข้อมูลที่ได้จากเอกสารข้อมูลเฉพาะของผู้ผลิต และการคำนวณประมาณค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ เพิ่มเติมโดยใช้สมการ โมเดลของแผงพีวี โดย Kachhiya, Lokhande, และ Patel (2011) ได้นำเสนอจากสมการ โมเดลของแผงพีวีเพื่อใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมแมทแล็บ แผงพีวีประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์หลายเซลล์ต่อเรียงกัน เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์จะมีแรงดันประมาณ 700 mV ดังนั้นเพื่อให้แผงพีวีมีแรงดันเอาต์พุตที่สูง ๆ ตามต้องการจึงต้องนำเซลล์แสงอาทิตย์หลาย ๆ เซลล์มาต่อเรียงกันแบบอนุกรม ในรูปที่ ๑.11 คือวงจรสมมูลของแผงพีวีที่ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์หลาย ๆ เซลล์มาต่อกันแบบอนุกรม สัญลักษณ์ไดโอดแทนรอยต่อพีเอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน n Cells เซลล์ และกำหนดให้

- I_{pv} คือ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงพีวี (PV output current)
 V_{pv} คือ แรงดันเอาต์พุตของแผงพีวี (PV output voltage)
 I_d คือ กระแสไฟฟ้าของไดโอดที่เป็นรอยต่อพีเอ็นของแผงพีวี
 R_{sh} คือ ความต้านทานชั้นท์ของแผงพีวี (shun resistance)
 R_s คือ ความต้านทานอนุกรมของแผงพีวี (series resistance)
 $nCells$ คือ จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาต่อกันใน 1 โมดูล (Number of cells)



รูปที่ ๑.11 วงจรสมมูลของแผงพีวีที่มีเซลล์แสงอาทิตย์หลาย ๆ เซลล์ต่ออนุกรมกัน

สมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันเอาต์พุตของแผงพีวี คือ

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t} \right) - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{R_{sh}} \quad (๑.1)$$

โดยที่ V_t คือ แรงดันอันเนื่องมาจากความร้อนของแผงพีวี (Thermal voltage)

I_{ph} คือ กระแสไฟฟ้าของแผงพีวีที่เกิดขึ้นจากพลังงานแสง (light generated current)

และ I_{sat} คือ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวของไดโอดในกรณีที่ไม่มีแสง (Saturation of dark current)

แรงดันอันเนื่องมาจากความร้อนของแผงพีวีเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าอันเนื่องมาจากความร้อนของสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นวัสดุในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (๑.2)

$$V_t = nCells * \left(\frac{nkT}{q} \right) \quad (๑.2)$$

- โดยที่ n คือ ตัวประกอบสภาพอุดมคติ (ideality factor)
 k คือ ค่าคงที่โบลซ์มันต์ (Boltzmann 's constant) มีค่าเท่ากับ 1.3806×10^{-23} J/K
 q คือ ค่าประจุอิเล็กตรอน (Electric charge) มีค่าเท่ากับ 1.6022×10^{-19} C

ในกรณีที่แผงฟิวอยู่ในที่ที่มีแสงอาทิตย์จะเกิดการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันกับระดับการถ่ายรังสีแสงอาทิตย์ หรือ โฟตอนแสงอาทิตย์ต่อหน่วยพื้นที่ตามสมการต่อไปนี้

$$I_{ph} = [I_{ph0} + K_{sc}(T - T_{sc})] \quad (จ.3)$$

- โดยที่ I_{ph0} คือ กระแสไฟฟ้าของแผงฟิวที่เกิดขึ้นจากแสงอาทิตย์ที่ STC และ $I_{ph0} \approx I_{sc}$
 $\}$ คือ ระดับการถ่ายรังสีแสงอาทิตย์ในหน่วย kW/m²
 K_{sc} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่ออุณหภูมิ
 T คือ อุณหภูมิในการทำงานของแผงฟิวในหน่วย K
 T_{sc} คือ อุณหภูมิอ้างอิงที่ 298 K (@STC = 25 °C)

ในกรณีที่แผงฟิวอยู่ในที่มืด (ไม่มีแสงสว่าง) จะมีกระแสไหลผ่านรอยต่อพีเอ็นที่มีค่าอิมิตัวค่าหนึ่ง เรียกว่า กระแสอิมิตัวของไดโอดในกรณีที่ไม่มีแสง

$$I_{sat} = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{sc}} \right)^3 \exp \left(\frac{E_g}{nkT/q} \left(\frac{T}{T_{sc}} - 1 \right) \right) \quad (จ.4)$$

- โดยที่ I_{rs} คือ กระแสย้อนกลับอิมิตัว (Reverse saturation current) ของแผงฟิว

$$I_{rs} = I_{sc} / \left[\exp \left(\frac{V_{oc}}{nCells * (nkT/q)} \right) - 1 \right] \quad (จ.5)$$

- และ E_g คือ ระดับพลังงานแบนด์แกป (band-gap energy) ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการผลิต
 V_{oc} คือ แรงดันเปิดวงจรของแผงฟิว
 I_{sc} คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของแผงฟิว

สมการที่ (ฉ.1) ถึง (ฉ.5) เป็นสมการแบบจำลองของแผงพีวีที่ใช้ในการคำนวณเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแผงพีวีสำหรับการเพิ่มแผงพีวีรุ่นใหม่ลงในบล็อกแผงพีวี ซึ่งงานวิทยานิพนธ์นี้ได้แก้ไขและเพิ่มพารามิเตอร์ของแผงพีวี Hanwha solar รุ่น SF260, 295W เพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์ และได้นำเสนอเอาต์พุตและเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันของบล็อกแผงพีวีรุ่นนี้ไว้ในบทที่ 5



ภาคผนวก ข

การออกแบบวงจรแปลงผันบูสต์และวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว



ข.1 การออกแบบวงจรแปลงผันบูสต์

การออกแบบสร้างวงจรแปลงผันบูสต์ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาเลือกใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามวิธีการออกแบบที่ระบุในหนังสือ Power Electronics (Hart, 2011) ซึ่งได้กำหนดเงื่อนไขในการออกแบบดังนี้

- 1.) แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ (v) เท่ากับแรงดันของแผงพีวี (V_{pv}) นั่นคือ 0 ถึง 45 V
- 2.) กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ (i) เท่ากับกระแสไฟฟ้าของแผงพีวี (I_{pv}) นั่นคือ 0 ถึง 10 A
- 3.) ความถี่การสวิตช์ (f_{sw}^{boost}) เท่ากับ 10 kHz ถึง 100 kHz
- 4.) แรงดันพลิว (ΔV_{dc}) มีค่าไม่เกิน 0.1%
- 5.) กระแสไฟฟ้าพลิว (Δi) มีค่าไม่เกิน 5%
- 6.) แรงดันดีซีเอาต์พุตของวงจรแปลงผันบูสต์ (V_{dc}) พิกัดเท่ากับ 100 V

เนื่องจากวงจรแปลงผันบูสต์มีแรงดันอินพุตต่ำสุดเท่ากับ 0 V ดังนั้นวงจรแปลงผันบูสต์นี้จึงมีค่าวัฏจักรการทำงาน (d) สูงสุดเท่ากับ

$$d = 1 - \frac{v}{V_{dc}} = 1 - \frac{0 \text{ V}}{100 \text{ V}} = 1.00 \quad (\text{ข.1})$$

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันบูสต์ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้มาจากการพิจารณาที่ค่าความถี่การสวิตช์ต่ำสุดที่ได้ออกแบบไว้ นั่นคือ 10 kHz เนื่องจากในกรณีที่วงจรแปลงผันบูสต์มีความถี่การสวิตช์ที่ต่ำๆ นั้นจำเป็นต้องมีค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ใหญ่มาก เพื่อให้ได้แรงดันพรีวและกระแสไฟฟ้าพรีวตามที่ต้องการ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ได้จากการออกแบบนี้ไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของวงจรแปลงผันบูสต์ที่ความถี่การสวิตช์สูงๆ

ตัวเหนี่ยวนำ (L) ที่ใช้ในวงจรแปลงผันบูสต์นั้นควรมีกระแสไฟฟ้าพิกัดมากกว่าค่ากระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ นั่นคือมีค่ามากกว่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดของแผงพีวีที่ใช้ งาน ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีกระแสไฟฟ้าพิกัดเท่ากับ 15 A ส่วนค่าความเหนี่ยวนำที่เลือกใช้นั้นสามารถพิจารณาหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$L \geq \frac{v \cdot d}{\Delta i \cdot f_{sw}^{boost}} \quad (\text{ข.2})$$

เนื่องจากงานวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดกระแสไฟฟ้าพลั่ว (Δi) ให้มีค่าไม่เกิน 5% ดังนั้น วงจรแปลงผันบูสต์นี้จึงมีกระแสไฟฟ้าพลั่วสูงสุดเท่ากับ $(0.05) \times (10 \text{ A}) = 0.5 \text{ A}$ หลังจากนั้น พิจารณาค่าความเหนี่ยวนำจากค่าแรงดันอินพุตสูงสุดของวงจรแปลงผันบูสต์นั้นคือ $v = 45 \text{ V}$ เมื่อแทนค่าวัฏจักรการทำงาน (d) เท่ากับ 1.00 ค่าความถี่การสวิตช์ (f_{sw}^{boost}) เท่ากับ 10 kHz จะได้ค่าความเหนี่ยวนำ (L) เท่ากับ 9 mH ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำดังกล่าวนี้คือ ค่าความเหนี่ยวนำน้อยที่สุดที่สามารถเลือกใช้งานได้ ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำ (L) ขนาด 20 mH และสามารถทนกระแสไฟฟ้าดีซีได้สูงสุดเท่ากับ 15 A

ตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc}) ที่ใช้ในวงจรแปลงผันบูสต์นั้นต้องสามารถทนแรงดันย้อนกลับได้สูงสุดเท่ากับแรงดันดีซีเอาต์พุตของวงจรแปลงผันบูสต์ นั่นคือต้องสามารถทนแรงดันได้สูงสุดเท่ากับ 400 V ส่วนขนาดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าดีซีนั้นสามารถพิจารณาได้จากสมการต่อไปนี้

$$C_{dc} \geq \frac{d}{R \cdot (\Delta V_{dc} / V_{dc}) \cdot f_{sw}^{boost}} \quad (\text{ข.3})$$

โดยที่ R คือ ค่าความต้านทานโหลดที่นำมาเชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันบูสต์มีค่าเท่ากับ $\frac{V_{dc}}{I_{dc}}$

เนื่องจากงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบให้วงจรแปลงผันบูสต์มีกำลังพิกัดเท่ากับ 500 W และแรงดันพลั่ว (ΔV_{dc}) มีค่าไม่เกิน 0.1% ดังนั้นเมื่อแรงดันดีซีเอาต์พุตพิกัดของวงจรแปลงผันบูสต์เท่ากับ 100 V จะได้ว่ากระแสไฟฟ้าดีซีพิกัดเท่ากับ 2.95 A ส่งผลทำให้วงจรแปลงผันบูสต์นี้ควรใช้ตัวเก็บประจุดีซีที่มีค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าหรือเท่ากับ

$$C_{dc} \geq \frac{1}{\left(\frac{100 \text{ V}}{5.00 \text{ A}}\right)(0.001)(10 \text{ kHz})} = 5 \text{ mH} \quad (\text{ข.4})$$

ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc}) ที่มีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 6600 μF และสามารถทนแรงดันดีซีย้อนกลับได้สูงเท่ากับ 400 V

ตัวเก็บประจูด้านอินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์ (C_{in}) ที่ใช้ต่อคร่อมแผงพีวีนั้นทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้แรงดันของแผงพีวีเปลี่ยนแปลงเร็วจนเกินไป ซึ่งโดยทั่วไปไม่มีวิธีการออกแบบหรือวิธีการเลือกขนาดตัวเก็บประจูดังกล่าวที่ชัดเจน ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกใช้ตัวเก็บ

ประจุค่านินพุตของวงจรแปลงผันบูสต์เท่ากับ $1000 \mu\text{F}$ และสามารถทนแรงดันดีซีย้อนกลับได้เท่ากับ 100 V

ข.2 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้งานในวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวของงานวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ตามงานวิจัยของงานวิจัยของ Kim และ Youn (2005) เนื่องจากเป็นงานวิจัยที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าของแผงพีวีและแรงดันกริดเอซีที่ใกล้เคียงกัน รวมทั้งงานวิจัยดังกล่าวนี้ยังเป็นงานวิจัยต้นแบบที่ได้นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.) เลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำ L_f ขนาด 5 mH เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Kim และ Youn (2005) โดยที่ตัวเหนี่ยวนำนี้ต้องสามารถทนกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้สูงสุดเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง นั่นคือมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ $(500 \text{ W}/60 \text{ V}) = 8.33 \text{ A}$ ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำ L_f ขนาด 5 mH ที่สามารถทนกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้สูงสุดเท่ากับ 10 A

2.) อัตราขยายสัดส่วนและอัตราขยายอินทิกรัลของตัวควบคุมแรงดันดีซีและตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดได้มาจากวิธีการปรับจูนแบบลองผิดลองถูก (Trial and error)



ภาคผนวก ซ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Wirote Sangtungtong, Thaworn Hinsui, and Thipwan Fangsuwannarak (2014). **Study on Sliding-Mode Based MPPT for PV Array and Supplying Power to AC Grid**, Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2014 11th International Conference.

ยื่นจดลิขสิทธิ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์

“โปรแกรมที่กำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดเอชของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกกริด”



Study on Sliding-Mode Based MPPT for PV Array and Supplying Power to AC Grid

Wirote Sangtungong, Thaworn Hinsui

School of electrical engineering, Institute of engineering
Suranaree of university technology (SUT)
111, University avenue, Muang district, Nakhon ratchasima,
30000, Thailand, cewirote@sut.ac.th, thaworn.hinsui@gmail.com

Thipwan Fangsuwannarak

School of electrical engineering, Institute of engineering
Suranaree of university technology (SUT)
111, University avenue, Muang district, Nakhon ratchasima,
30000, Thailand, thipwan@sut.ac.th

Abstract—This paper aims to study the recent work regarding the maximum power point tracker (MPPT) based on a sliding-mode manner for a PV array. Such a MPPT accompanies a perturbation and observation algorithm as well as a boost converter. Moreover, it needs a straight sliding-line and some adjustments on its location until a PV characteristic curve and this sliding line cross each other at the maximum power point (MPP). The switching pattern of the boost converter is influenced by this straight line so that the PV operating point is compelled to move along an instant PV curve and onto the sliding line. Thereby the PV array will generate the maximum power. An easier explanation for convergence towards the sliding line is provided. Through the boost converter and the single-phase inverter, power delivery from a PV array to an AC grid under the above MPPT will be also considered.

Keywords—AC grid; boost converter; MPPT; single-phase PWM inverter; sliding-mode; solar array;

I. INTRODUCTION

The electricity being reformed from the solar energy grows larger and higher all the time. Many dedicated MPPT algorithms have been created for the purpose of manipulating the solar-array at the best efficiency of electric energy generation. A class of the MPPTs being known as the “perturb and observe” (P&O) methodology has been widely adopted and accepted [1]. It executes the increment value of duty cycle or reference voltage via detecting the voltage and current at the terminals of PV generator (i.e., at the power stage input), calculating the power and then seeking the MPP iteratively. The small values alleviate fluctuation of the PV operating point in steady-state due to weak perturbations around the MPP while the large values improve the dynamic behavior of tracking the MPP in situations under quickly changing irradiation conditions or load characteristics. Thus, there must be a tradeoff in choosing such an increment value [1]. The sliding-mode concept has been recognized for controlling switched-mode converter because it offers stability with fast dynamics (typically superior to linear controllers) and in many cases is simple to implement if the sliding surface is not complicated. The earlier work reported a sliding-mode based MPPT [2]. It presented two major advantages. With a proper choice of the sliding surface, convergence to maximum power against variations in radiation was accelerated. Stability was analyzed by the stability-region method which is easy to comprehend. Also it guaranteed stability all across the PV

curve. Therefore it is worthwhile to attach the boost converter with such an MPPT to the single-phase inverter connecting to an AC grid.

II. THE CHARACTERISTICS OF SOLAR ARRAY

The solar cell is a semiconductor device with its internal structure in type of p-n junction such that it is able to convert the solar irradiance into electricity. The nonlinear characteristics and the operating point of the solar array rely upon insolation level, ambient temperature and electric load connected to its terminals. The key specification of the commercial solar array comprises the voltage and current at the maximum power point (MPP) (V_{mp} and I_{mp}), the open-circuit voltage (V_{oc}) and the short-circuit current (I_{sc}). Each of the photovoltaic (PV) characteristic-curves of current (i) against voltage (v) contains a different MPP where a quantity of maximum power (P_{max}) being the most power at a specific condition is generated. Due to improper electric load, the operating point and the MPP of the solar array often disagree. Thus, without load regulation a solar array is not likely to hold the best efficiency for energy conversion. A variation in one or more surrounding factors causes both the operating point and the MPP to shift from their corresponding standing-points onto others. Whenever the insolation level rises as shown in Fig. 1 [3], the characteristic-curve expands itself with increment of

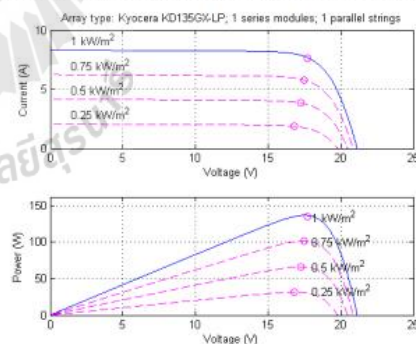


Fig. 1. The PV characteristic curves at four different insolation levels.

current range and nearly fixed voltage span. Either more power or larger maximum one can be produced. Reversely, if the insolation level falls, it contracts itself and either less power or smaller maximum one will be supplied. An increase in panel temperature makes the characteristic-curve shrink with reduction in voltage span but current range almost not changing. Its contraction also leads to both less power generation and smaller peak power.

III. THE SLIDING-MODE MPPT

Owing to the lack of some priori information and the extremely precise PV model, it is impractical to indicate exactly the MPP on a PV curve and accurately predict the new one on the other curve after the transition from a surrounding condition to another. Herein such an MPP can be determined by a searching and tracking strategy that combines the sliding-mode technique with the perturbation and observation (P&O) algorithm together [2]. The sliding-mode scheme desires one sliding line (the sliding surface) intercepting a set of PV curves as shown in Fig. 2 and the DC-DC boost converter wired up to the solar array as shown in Fig. 3. A collection of distinct MPPs at some insolation levels under constant temperature is brought to computation on two coefficients of the sliding line. These MPPs belong to the ordered pair of (I_{mp}, V_{mp}) being a coordinate on each PV curve in the $i-v$ plane. The linear regression or least-square method is used to fit the most suitable coefficients so that the sliding line deviates from these MPPs with the minimum sum of squared distances being the shortest ones between them and this straight line. The model of KYOCERA KD135GX-LP solar-module accommodates four

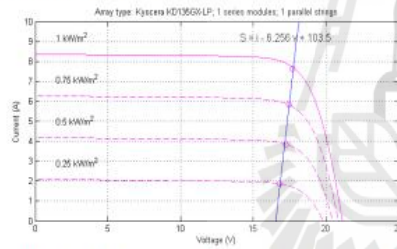


Fig. 2. The straight sliding-line intercepting a set of PV curves at 25 °C

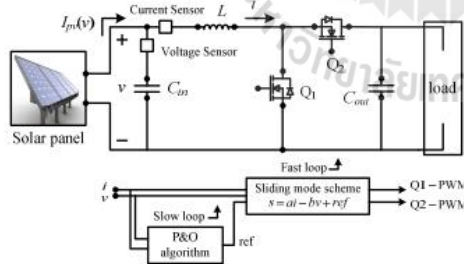


Fig. 3. The DC-DC boost converter with MPPT wired up to the solar array

distinctive MPPs at the four insolation levels under the same 25 °C [3]. The sliding line in form of $s(v, i) = ai - bv + ref = 0$ with $a, b \geq 0$ possesses $a = 1, b = 6.256$ as well as $ref = 103.5$ and probably it could not pass through any MPP. Conduction of and blocking current flow by semiconductor switches in the boost converter will force any operating point of PV array into where the above sliding line and the PV curve at the instant surrounding factors cross each other. The P&O algorithm serves updating a numeric amount of ref so that the sliding line moves itself with a fixed positive slope. When the ref is adjusted towards a correct value, such a crossing point reaches at the MPP and then the operating point becomes the MPP. Thereby, the maximum power will be extracted out of the solar array [2].

The dynamic model of the boost converter is expressed as

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{C_{in}}(i_{pv}(v) - i) \quad (1),$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L}(v - 0.5v_o(1 + \text{sgn}(s))) \quad (2),$$

where v denotes the solar-array voltage (the input voltage), $i_{pv}(v)$ stands for the solar-array current that depends upon v , i represents the inductor current, v_o is the output voltage (the load voltage) that is assumed to be semi-constant, C_{in} means the input capacitance, L is the inductance, $\text{sgn}(s) = 1$ if $s > 0$ and $\text{sgn}(s) = -1$ if $s < 0$. The voltage v and the current i that both are regarded as two state variables will be monitored and then fed into the calculation element of the sliding line. When the value of s is negative, the low switch Q_1 will be driven into on-state whereas the high switch Q_2 inhibits current flow. Both the current i and $s(v, i)$ are raised and the inductor keeps increased energy because $\frac{di}{dt} = \frac{v}{L} > 0$ and v is normally positive ($v > 0$). When the value of s becomes positive, the low switch Q_1 will be left into off-state whereas the high switch Q_2 carries current flow. The current i drops and $s(v, i)$ also declines because $\frac{di}{dt} = \frac{1}{L}(v - v_o) < 0$ and v_o is usually greater than v ($v_o > v$). The stored energy is transferred to the load. Consequently, $s(v, i)$ is maintained in the sliding line with a switching band around $s = 0$. To manifest a stipulation of attracting any operating point towards the sliding line, the quadratic function will be chosen as

$$V = 0.5s^2 \quad (3).$$

Its derivative with respect to time gives

$$\dot{V} = s(a \frac{di}{dt} - b \frac{dv}{dt} + \frac{d(ref)}{dt}) \quad (4).$$

The substitution from the first two equations into the last equation and some arrangements yield

$$\dot{V} = s\left(\frac{a}{L}(v - 0.5v_o(1 + \text{sgn}(s))) - b\frac{1}{C_m}(i_{pv}(v) - i) + \frac{d(\text{ref})}{dt}\right)$$

$$\dot{V} = s\left(\frac{a}{L}v - \frac{a}{2L}v_o - \frac{a}{2L}v_o\text{sgn}(s) - \frac{b}{C_m}(i_{pv}(v) - i) + \frac{d(\text{ref})}{dt}\right)$$

$$\dot{V} = s\left(-\frac{a}{2L}v_o\text{sgn}(s) + \frac{a}{L}(v - 0.5v_o) - \frac{b}{C_m}(i_{pv}(v) - i) + \frac{d(\text{ref})}{dt}\right)$$

$$\dot{V} = -|s|\left(\frac{a}{2L}v_o - \text{sgn}(s)\left(\frac{a}{L}(v - 0.5v_o) - \frac{b}{C_m}(i_{pv}(v) - i) + \frac{d(\text{ref})}{dt}\right)\right) \quad (5)$$

Whenever the derivative of V gets negative ($\dot{V} < 0$), both V and $|s|$ will go down. $\dot{V} < 0$ requires

$$\frac{a}{2L}v_o - \text{sgn}(s)\left(\frac{a}{L}(v - 0.5v_o) - \frac{b}{C_m}(i_{pv}(v) - i) + \frac{d(\text{ref})}{dt}\right) > 0.$$

This suggests $\frac{a}{L}v - \frac{b}{C_m}(i_{pv}(v) - i) + \frac{d(\text{ref})}{dt} > 0$ for $s < 0$

and $-\frac{a}{L}(v - v_o) + \frac{b}{C_m}(i_{pv}(v) - i) - \frac{d(\text{ref})}{dt} > 0$ for $s > 0$. In general, the ref is varied much slowly, compared with faster variations of the state variables, i.e. $\frac{d(\text{ref})}{dt} = 0$. Then, these

signify $i > i_{pv}(v) - \frac{aC_m}{bL}v$ for $s < 0$ and

$i < i_{pv}(v) + \frac{aC_m}{bL}(v_o - v)$ for $s > 0$ which both postulate two stipulations for the convergence of the PV operating point so long as they are satisfied. Besides, they establish the extent of the stable region in the state-space as shown in Fig. 4.

Because the sliding line may not meet a PV curve at an MPP, the ref has to be altered in some way for intersection of them at a definite MPP. The P&O algorithm as shown in Fig. 5 [2] acquires the input power ($P_m = v \cdot i$) being equivalent to the power emitted from the solar array. Iteratively it retains two successive samples covering immediate and preceding ones and treats updating the ref with a decision on the trend of variation in the input power at a fewer sampling rate than that of the sliding-line calculation. On each occasion of iteration the ref is added or subtracted with an infinitesimal number of $ds \cdot \text{dir}$. The ref goes up or decreases according to a difference of these two consecutive samples. When the input power grows, the whole sliding-line moves horizontally in the same direction as it did just previously. However its movement

proceeds in the opposite direction if the input power recedes. Therefore the PV operating point enters an MPP along the path where the sliding line and the PV curve intersect. When the insolation level changes with an abrupt step, the operating point will trace the sliding line towards the new or latest MPP as shown in Fig. 6.

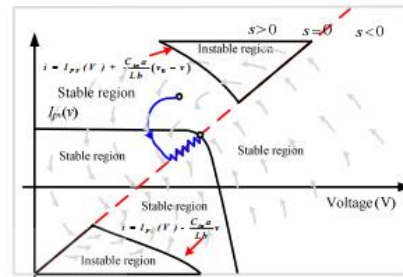


Fig. 4. The extent of the stable region in the state-space

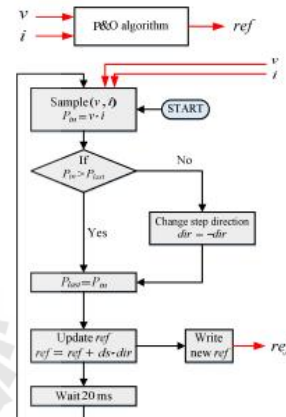


Fig. 5. The flowchart of the P&O algorithm

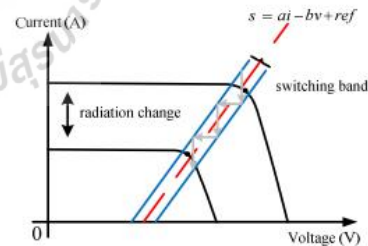


Fig. 6. the operating point tracing the sliding line towards the new MPP

IV. SIMULATION RESULTS

The solar panel and its boost converter under tests are associated with some important parameters as itemized in the Table I. The capability of achieving the maximum power from the solar array will be examined at the four different insolation levels. On start-up, all the state-variables are initiated at zeroes. The input and output powers are enhanced to a steady-state quantity within a finite time interval. The output power occurs at the output side of the boost converter. In steady-state the input power is identical to the maximum power and the output power is barely distinguishable from it. During transient-state, the input powers rather oscillate thanks to enforcing the PV operating point onto the sliding line and caused by discharging energy away from the input capacitor their spikes could exceed the steady-state ones whereas the output power escalates more smoothly without overshoot as shown in Fig. 7 to Fig. 10. At a lower insolation level, the input and output powers will take longer duration to draw into their steady-state quantities. When the insolation level is turned down or up (stepped down or up) stepwise suddenly, the input power reacts sharply by momentarily changing to a new quantity while the output power responds somewhat sluggishly by virtue of the converter dynamics as shown in Fig. 11 and Fig. 12. When the insolation level is reduced continually from the highest to the lowest one and subsequently it rises intermittently in a style of ramp until it is at the highest one again, the input power can follow regularly the maximum power and simultaneously the output power can also pursue the input one as shown in Fig. 13. Therefore the PV operating point always tracks an MPP.

TABLE I. SOME IMPORTANT PARAMETERS OF THE BOOST CONVERTER

Parameter	Value
Solar module	KYOCERA KD135GX-LP 1 module
P_{mp}	135 W at STC
V_{mp}	17.7 V at STC
I_{mp}	7.63 A at STC
C_{in}	100 μ F
C_{out}	200 μ F
L	200 μ H
Load	Resistor 12 Ω
Switches	MOSFET with default setting

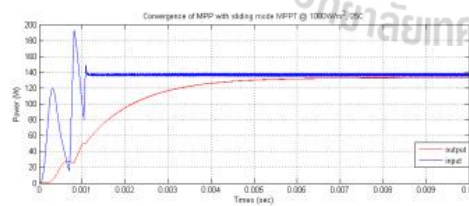


Fig. 7. The input and output powers at the isolation level 1000 W/m²

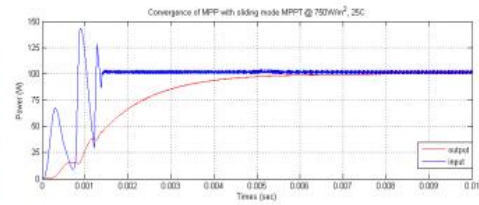


Fig. 8. The input and output powers at the isolation level 750 W/m²

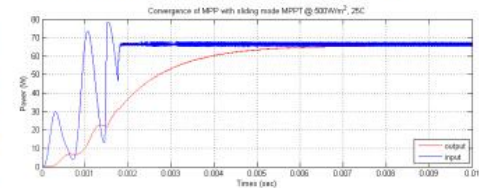


Fig. 9. The input and output powers at the isolation level 500 W/m²

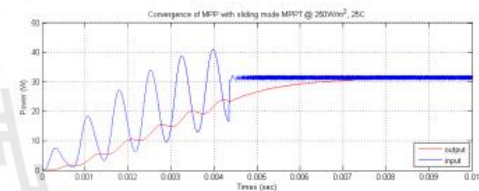


Fig. 10. The input and output powers at the isolation level 250 W/m²

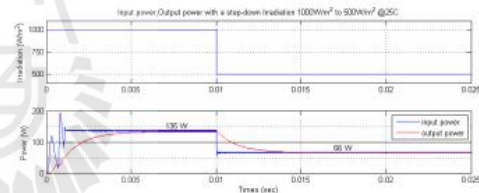


Fig. 11. The input and output powers when the isolation level changes from 1000 W/m² from 500 W/m²

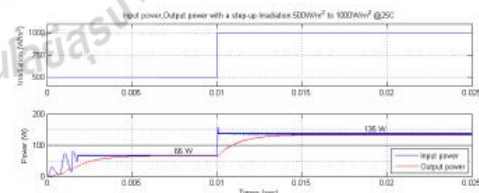


Fig. 12. The input and output powers when the isolation level changes from 500 W/m² from 1000 W/m²

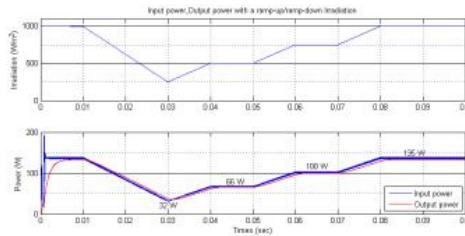


Fig. 13. The input and output powers when the isolation level changes in a style of ramp

Later on the sliding-mode MPPT-based boost converter interfacing with the solar panel and the single-phase full-bridge inverter connected to grid will be joined together as shown in Fig. 14. The feedback control of the single-phase PWM inverter includes the inner loop of grid-current control and the outer loop of DC bus-voltage control. Some essential parameters listed in Table II are involved in the PWM inverter. The current controller employs the PI one with grid-voltage compensation and the voltage controller utilizes the PI one which its output is multiplied by the sine signal of phase angle concerning grid-voltage. The phase-locked loop (PLL) senses grid-voltage and evaluates such a sine signal for grid synchronization. The current controller outputs the inverter-voltage reference that is further modulated with a high-frequency triangle carrier in order to attain four gate-drive signals for each of the four switches in the PWM inverter [4]. When the insolation level is brought down, the amplitude of the grid-current, the input power and the grid power will come down to their one value on account of a decline in the

TABLE II. SOME PARAMETERS OF THE BOOST CONVERTER AND SINGLE-PHASE INVERTER

Parameter	Value
Boost converter	-
C_{in}	100 μ F
C_{out}	1 mF
L	200 μ H
Single-phase inverter	-
L_n	5 mH
Grid voltage	$15\sin(100\pi t)$ V
Switches	MOSFET with default setting
Voltage controller	-
K_p	0.025
K_i	0.025
Current controller	-
K_p	1000
K_i	50

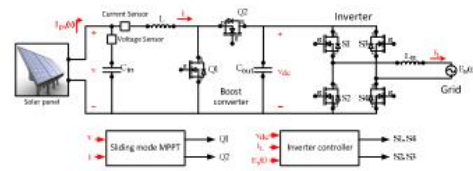


Fig. 14. The boost converter interfacing with the single-phase inverter connected to grid

maximum power as shown in Fig. 15 and Fig. 16. After a brief time elapses, the grid current becomes in phase with the grid voltage. In other words, a unity power factor will appear at grid and the energy from the solar array is absorbed into it.

V. CONCLUSION

In this article, the sliding-mode scheme that underlies the MPPT is studied. The straight sliding-line intersecting with PV curves has already found out. The sliding line will impose the boost converter on the particular switching sequences until the PV operating point approaches and converges on it. The P&O algorithm tunes only one coefficient of the sliding line in order to relocate this entire line to an appropriate location in the PV characteristic plane so that an instantaneous PV curve and it cross each other at the MPP. Thereby, the operating point becomes the MPP and stays over there. Thus, the maximum power can be obtained from the solar array. When the insolation level varies dramatically or gradually, this situation will change the MPP from an original position and places it into the new point. Such a scheme allows the PV operating point to track the MPP always. Finally, when the boost converter with sliding-mode MPPT is interfaced with the simple single-phase grid-connected inverter, the solar array can potentially deliver electric energy to AC grid.

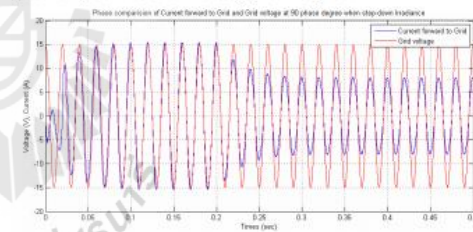


Fig. 15. The grid voltage and current

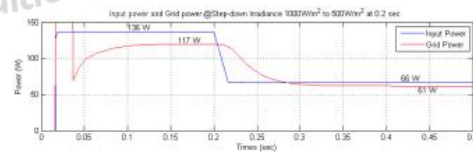


Fig. 16. The input and grid powers

ACKNOWLEDGMENT

This research is supported from Suranaree University of Technology (SUT) and by the office of the Higher Education Commission under NRU project of Thailand.

REFERENCES

- [1] A.K. Abdelsalam, A.M. Massoud, S. Ahmed, and P.N. Enjeti, "High-Performance Adaptive Perturb and Observe MPPT Technique for Photovoltaic-Based Microgrids," *IEEE Trans. on Power Electronics.*, Vol. 26, No. 4, April 2011, pp.1010-1021.
- [2] Y. Levron, and D. Shmilovitz, "Maximum Power Point Tracking Employing Sliding Mode Control," *IEEE Trans. on Circuit and Systems.*, Vol. 60, no 3, March 2013, pp.724-732.
- [3] Kyocera., [Online], "KYOCERA KD135GX-LP", Available <http://www.kyocerasolar.com/assets/5198.pdf>
- [4] I-S. KIM, and M.-J. Youn, "Variable-structure observer for solar-array current estimation in photovoltaic power-generation systems", *IEEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 152, no 4, July 2005, pp.953-959.



ประวัติผู้เขียน

นายถาวร หินซุย เกิดเมื่อวันที่ 27 มกราคม พ.ศ. 2533 ที่อำเภอหนองฮี จังหวัดร้อยเอ็ด สำเร็จการศึกษาในระดับประถมศึกษา จากโรงเรียนบ้านหนองคุณ จังหวัดร้อยเอ็ด ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนบ้านเด่นราษฎร์ จังหวัดร้อยเอ็ด และระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนหนองฮีเจริญวิทย์ จังหวัดร้อยเอ็ด ในปี พ.ศ. 2551 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2555 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในกลุ่มวิจัย อิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในขณะศึกษาระดับปริญญาโทได้ปฏิบัติหน้าที่ดังนี้

1. เป็นผู้สอนรายวิชาปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 4 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการระบบควบคุม (2) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้ามูลฐาน (3) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 และ (4) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2

2. เป็นผู้สอนรายวิชาเขียนแบบวิศวกรรม (Engineering Graphics I)

และมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดังปรากฏในภาคผนวก ข. ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจในด้านพลังงานทางธรรมชาติ พลังงานแสงอาทิตย์ ระบบควบคุมอัตโนมัติ การเชื่อมต่อกริดไฟฟ้า การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ การเขียนโปรแกรมควบคุมด้วยภาษาซี และการประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลัง