

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์กับแหล่งจ่ายการไฟฟ้า

PV – GRID CONNECTED INVERTER SYSTEM



T104292



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 104292  
วัน,เดือน,ปี..... พ.ศ. 2552

.b. 1210694X  
.i.....

ปฏิญานีพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2551

ระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์กับแหล่งจ่ายการไฟฟ้า  
PV – GRID CONNECTED INVERTER SYSTEM



รศ.ดร. วิจิตร

กฤษเรศ

อ. ชัยทัต

มณีอินทร์

รศ.ดร. สมชาติ

จิรวិภากร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์กับแหล่งจ่ายการไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

1. นายวชิรวิชญ์ ศรีจันทร์
2. นายวรพงษ์ ทานะ
3. นายวิทยา มูลดี
4. นายศรัญญ์ เหมหงษ์



.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร กิณเวศ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาติ จิรวีภากร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์กับแหล่งจ่ายการไฟฟ้า

|               |           |                  |
|---------------|-----------|------------------|
| นายวชิรวิชัย  | ศรีจันทร์ |                  |
| นายวรพงษ์     | ทานะ      |                  |
| นายวิทยา      | มูลดี     |                  |
| นายศรัญญู     | เหมหงษ์   |                  |
| รศ.ดร. วิจิตร | กิณเรศ    | อาจารย์ที่ปรึกษา |
| อ. ชัยทัต     | มณีอินทร์ | อาจารย์ที่ปรึกษา |
| รศ.ดร. สมชาติ | จิรวินากร | อาจารย์ที่ปรึกษา |

ปีการศึกษา 2551

### บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการนำเอาพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างจากเซลล์แสงอาทิตย์มาแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายเข้าระบบกริด เนื่องจากคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องหาจุดทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาพบรรยากาศใดๆ โดยปฏิญานิพนธ์นี้จะใช้เทคนิคการเพิ่มค่าความนำไปควบคุมวัฏจักรการทำงานของตัวแปลงผันแบบทอนระดับเพื่อปรับความต้านทานที่เหมาะสมที่จะดึงเอากำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ ส่วนการสร้างกระแสรูปคลื่นไซน์ที่มีมุมเฟสทับกันกับแรงดันของระบบกริด จะใช้หลักการควบคุมแบบฮีสเทอรีซิส โดยสร้างสัญญาณกระแสอ้างอิงรูปคลื่นไซน์มาเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสจริงที่จ่ายเข้าระบบกริดเพื่อไปควบคุมการทำงานของสวิตช์อินเวอร์เตอร์ โดยกระแสอ้างอิงรูปคลื่นไซน์จะสร้างจากผลคูณของค่ากระแสที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดกับสัญญาณไซน์ของแรงดันของระบบกริด โดยส่วนควบคุมจะใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของบริษัท Cypress Semiconductor เบอร์ CY8C27643 และ CY8C27443 เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมด

ในปฏิญานิพนธ์นี้ได้มีการจำลอง และวิเคราะห์การทำงานของระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อนำผลที่ได้จากการจำลองมาวิเคราะห์การทำงานของระบบที่ได้ ออกแบบขึ้นเพื่อตรวจสอบการทำงานที่ถูกต้องตามที่ออกแบบไว้ก่อนทดสอบจริง

## PV – GRID CONNECTED INVERTER SYSTEM

Washirawich Srichun

Woraphong Thana

Wittaya Moondee

Sarunyu Hemhong

Assoc. Prof. Dr. Vijit Kinnares Supervisor

Mr.Chaitat Maneeinn Supervisor

Assoc.Prof.Dr.Somchat Jiriwibhakorn Supervisor

2008

### ABSTRACT

This thesis proposes an algorithm that converts dc current from PV cells to ac current which will be injected to a grid. Due to the nonlinear characteristic of PV cells, the system must include an algorithm to track the maximum power point (MPPT) at any atmospheric conditions. The algorithm used in this thesis is the incremental conductance method. The output of the MPPT controller is used to control the duty cycle of a buck converter so that maximum power is obtained from the PV cells at all times. The sinusoidal output current which is in-phase with the grid voltage is synthesized by a hysteresis control which generates the controlling signal for inverter switches. The controller compares the reference sinusoidal signal with the actual current which is injected to the grid. The reference sinusoidal signal is the product of the signal which corresponds with the maximum power available from the PV cells at that time and the sinusoidal voltage synthesized from the mains. The system is controlled by an CY8C27643 and CY8C27443 PSOC chips.

The system design is analyzed by MATLAB/SIMULINK. Simulation results can compare with implementation results in order to improve the system process.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ อ.ชัยทัต มณีอินทร์ และรศ.ดร. สมชาติ จิรวิภากร อาจารย์ที่ปรึกษา ปริญญาบัตรที่ให้แนวคิด คำปรึกษาตลอดจนช่วยแนะนำ และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นตลอดจนจัดหาอุปกรณ์และเครื่องมือที่เป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญาบัตรนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ในภาควิชาที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ให้กับผู้จัดทำในครั้งนี้ ถ้าปราศจากท่านโครงการนี้ก็คงไม่สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยส่งเสียเงินทอง และคอยเป็นกำลังใจให้ผู้จัดทำ เรียนหนังสือจนจบในครั้งนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อ.....   | I    |
| ABSTRACT.....   | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | III  |
| สารบัญ.....   | IV   |
| สารบัญรูป.....  | VII  |
| สารบัญตาราง.....  | IX   |
| บทที่ 1 บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและที่มาของปัญหา.....                           | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....                               | 3    |
| 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....                          | 3    |
| 1.4 ระเบียบวิจัย.....   | 3    |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                            | 4    |
| 1.6 โครงสร้างปริญญานิพนธ์.....                                | 4    |
| บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการ.....                                 | 5    |
| 2.1 คุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์.....                          | 5    |
| 2.2 วิธีการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุด.....                          | 8    |
| 2.2.1 วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร.....                  | 9    |
| 2.2.2 วิธีการรบกวนและการสังเกต.....                           | 9    |
| 2.2.3 วิธีเพิ่มความแม่นยำ.....                                | 11   |
| 2.2.4 การหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยหลักการของระลอกคลื่น.....    | 12   |
| 2.3 การสร้างกระแสรูปคลื่นไซน์.....                            | 15   |
| 2.4 ตัวแปลงผันแบบทอนระดับ.....                                | 16   |
| 2.4.1 การหาค่าความเหนี่ยวนำต่ำสุดของวงจรมักคอนเวอร์เตอร์..... | 18   |
| 2.4.2 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุต.....                     | 19   |
| 2.5 อินเวอร์เตอร์.....  | 20   |
| 2.6 การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า.....                                 | 21   |
| 2.7 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล.....                             | 24   |
| 2.7.1 คุณสมบัติของ CY8C27643.....                             | 25   |

## สารบัญ(ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| 2.8 มาตรฐานคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อระบบโซลาร์เซลล์<br>กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....                           | 26   |
| 2.8.1 IEEE Std. 929-2000.....   | 26   |
| 2.8.2 JEAG 9701-1993.....   | 27   |
| 2.8.3 ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและ<br>อุตสาหกรรมของประเทศไทย โดยกฟผ. กฟน. และกฟภ. .... | 27   |
| 2.8.3.1 ขอบเขต.....   | 27   |
| 2.8.3.2 วัตถุประสงค์.....   | 28   |
| 2.8.3.3 มาตรฐานอ้างอิง.....   | 28   |
| 2.8.3.4 นิยาม.....  | 28   |
| 2.8.3.5 ขีดจำกัดกระแสและแรงดันฮาร์โมนิก.....  | 29   |
| บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....  | 31   |
| 3.1 แบบจำลองระบบ.....   | 31   |
| 3.1.1 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์.....  | 32   |
| 3.1.2 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์.....  | 35   |
| 3.2 การออกแบบฮาร์ดแวร์.....   | 35   |
| 3.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์.....  | 35   |
| 3.2.2 ตัวแปลงผันแบบทอนระดับ.....  | 36   |
| 3.2.3 อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส.....  | 37   |
| 3.2.4 ตัวแปลงค่าสัญญาณอนาล็อกเป็นค่าสัญญาณดิจิทัล.....  | 37   |
| 3.2.5 ตัววัดสัญญาณอนาล็อก.....  | 38   |
| 3.2.5.1 HCPL-788J.....  | 38   |
| 3.2.5.2 ACS712ELCTR-20A-T.....  | 41   |
| 3.2.6 วงจรขับ.....  | 42   |
| 3.2.7 วงจร Zero Crossing.....   | 43   |
| 3.2.8 วงจร Dead Time.....   | 44   |
| 3.3 การควบคุม.....  | 45   |

## สารบัญ(ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 4 ผลการทดลอง.....  | 49   |
| 4.1 พารามิเตอร์ของระบบ.....  | 49   |
| 4.2 ผลการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า.....   | 50   |
| 4.2.1 ผลการทดลองที่กระแสคำสั่งต่างกัน.....   | 50   |
| 4.3 ผลการทดลองเชื่อมต่อการไฟฟ้า เมื่อวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2552<br>ตั้งแต่เวลา 11.00 น. ถึง 14.00 น. .... | 53   |
| บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ.....  | 55   |
| 5.1 บทสรุป.....  | 55   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....  | 56   |
| บรรณานุกรม.....  | 57   |
| ภาคผนวก  |      |
| ก โครงสร้างของชั้นงานที่ใช้ในการทดลอง.....   | 59   |
| ข โปรแกรมควบคุมการทำงาน.....   | 61   |
| ค โค้ดโปรแกรมควบคุมการทำงาน.....   | 63   |
| ประวัติผู้เขียน.....   | 90   |

## สารบัญรูป

| ภาพที่  | หน้า |
|---|------|
| 1.1 ระบบที่ทำงานแบบโอดเดี่ยว.....   | 1    |
| 1.2 ระบบใช้งานแบบไฮบริดจ์.....  | 2    |
| 1.3 ระบบเชื่อมต่อกริด.....  | 2    |
| 2.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์.....                                      | 5    |
| 2.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....                                      | 6    |
| 2.3 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์.....                                  | 6    |
| 2.4 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะต่างๆ.....                     | 7    |
| 2.5 รูปแบบของเซลล์แสงอาทิตย์.....   | 8    |
| 2.6 ผลของโหลดต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....                                      | 8    |
| 2.7 ลักษณะการเบี่ยงเบนจากจุดจ่ายกำลังสูงสุดของวิธี P&O.....               | 9    |
| 2.8 กราฟกำลังไฟฟ้า-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....                          | 10   |
| 2.9 ขั้นตอนการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุด ด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำ.....            | 11   |
| 2.10 ระบบเชื่อมต่อกริดแบบเฟสเดี่ยว.....                                   | 12   |
| 2.11 รูปคลื่นสัญญาณที่เกิดขึ้นในระบบเชื่อมต่อกริด.....                    | 13   |
| 2.12 ย่านการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....                                  | 13   |
| 2.13 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์..... | 14   |
| 2.14 การควบคุมแบบฮีสเทอรีซิส.....   | 15   |
| 2.15 วงจรตัวแปลงผันแบบทอนระดับ.....                                       | 16   |
| 2.16 วงจรตัวแปลงผันแบบทอนระดับขณะสวิตช์นำกระแส.....                       | 16   |
| 2.17 วงจรตัวแปลงผันแบบทอนระดับขณะสวิตช์ไม่นำกระแส.....                    | 17   |
| 2.18 อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกริดแบบแหล่งจ่ายแรงดัน.....                    | 21   |
| 2.19 วงจรสมมูลการส่งถ่ายกำลังไฟฟาระหว่างบัส 1 และบัส 2.....               | 21   |
| 2.20 (ก) เฟสเซอร์ไดอะแกรมของการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า.....                     | 21   |
| (ข) เฟสเซอร์ไดอะแกรมโหมดเรกติไฟเออร์.....                                 | 22   |
| (ค) เฟสเซอร์ไดอะแกรมโหมดอินเวอร์เตอร์.....                                | 22   |
| 2.21 โครงสร้างการทำงานของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล PSoc.....               | 24   |
| 3.1 ระบบเชื่อมต่อกริด.....  | 31   |
| 3.2 แบบจำลองระบบเชื่อมต่อกริด.....  | 32   |
| 3.3 (ก) และ (ข) แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์.....                              | 34   |
| 3.4 กราฟกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น BS-40.....                     | 34   |

## สารบัญญรูป(ต่อ)

| ภาพที่   | หน้า |
|--|------|
| 3.5 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว.....   | 35   |
| 3.6 การต่อเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 320 วัตต์.....   | 36   |
| 3.7 การติดต่อแบบ SPI.....  | 38   |
| 3.8 ฟังก์ชันการทำงานของ HCPL-788J.....   | 39   |
| 3.9 วงจรใช้งานของ HCPL-788J.....   | 40   |
| 3.10 ตำแหน่งตัววัดสัญญาณอนาล็อก.....   | 41   |
| 3.11 การวัดสัญญาณของ ACS712ELCTR-20A-T.....  | 41   |
| 3.12 เปรียบเทียบค่ากระแสที่วัดได้กับแรงดันเอาต์พุตของตัววัด.....                       | 42   |
| 3.13 วงจรขับสวิตช์.....  | 42   |
| 3.14 ลักษณะการต่อวงจรขับ.....  | 43   |
| 3.15 วงจร Zero Crossing.....   | 44   |
| 3.16 วงจรตัดไหม้สำหรับสวิตช์กึ่งเดียวกัน.....  | 45   |
| 3.17 โครงสร้างโปรแกรมหลัก.....   | 45   |
| 3.18 โครงสร้างโปรแกรม GPIO Interrupt.....  | 46   |
| 3.19 โครงสร้างโปรแกรม Timer_Igrid Interrupt.....                                       | 47   |
| 3.20 โครงสร้างโปรแกรม Bang Bang.....   | 48   |
| 4.1 การวัดแรงดัน และกระแสในระบบเชื่อมต่อกริด.....                                      | 49   |
| 4.2 รูปคลื่นกระแสที่เชื่อมต่อกับระบบกริด.....  | 50   |
| 4.3 รูปคลื่นกระแส และแรงดันที่เชื่อมต่อกับระบบกริด.....                                | 50   |
| 4.4 รูปคลื่นกระแส และแรงดันที่เชื่อมต่อกับระบบกริด โดยใช้กระแสคำสั่งเท่ากับ 0.4 A..... | 51   |
| 4.5 รูปคลื่นกระแส และแรงดันที่เชื่อมต่อกับระบบกริด โดยใช้กระแสคำสั่งเท่ากับ 0.6 A..... | 51   |
| 4.6 รูปคลื่นกระแส และแรงดันที่เชื่อมต่อกับระบบกริด โดยใช้กระแสคำสั่งเท่ากับ 0.8 A..... | 52   |
| 4.7 รูปคลื่นกระแส และแรงดันที่เชื่อมต่อกับระบบกริด โดยใช้กระแสคำสั่งเท่ากับ 1 A.....   | 52   |
| 4.8 กราฟกำลังไฟฟ้าที่เวลาใดๆ.....  | 53   |
| 5.1 การมอดูเลตความกว้างพัลส์ความถี่คงตัวโดยการควบคุมรูปคลื่นของกระแส.....              | 56   |
| ก.1 ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลอง.....   | 60   |
| ก.2 การทดสอบการทำงานของฮาร์ดแวร์.....  | 60   |
| ข.1 โปรแกรมสำหรับการควบคุมฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลอง.....                               | 62   |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 เส้นไขที่ใช้ในการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุด.....  | 15   |
| 2.2 การตอบสนองแรงดันผิดปกติ (Response to Abnormal Voltages).....  | 27   |
| 2.3 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้ารายใด ๆ ที่จุดต่อร่วม.....  | 30   |
| 2.4 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันสำหรับผู้ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้ารายใด ๆ ที่จุดต่อร่วม<br>(รวมทั้งระดับความเพี้ยนที่มีอยู่เดิม)..... | 30   |
| 3.1 โครงสร้าง bit สำหรับ MCP3202.....   | 37   |
| 4.1 คุณลักษณะของระบบเชื่อมต่อกริดที่เวลาต่างๆ.....  | 53   |
| 4.2 ประสิทธิภาพของระบบเชื่อมต่อกริดที่เวลาใดๆ.....  | 54   |



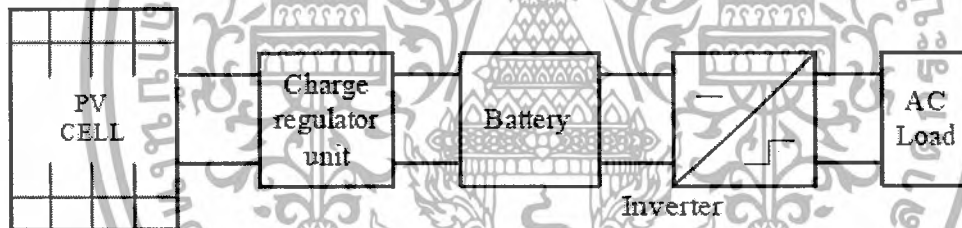
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและที่มาของปัญหา

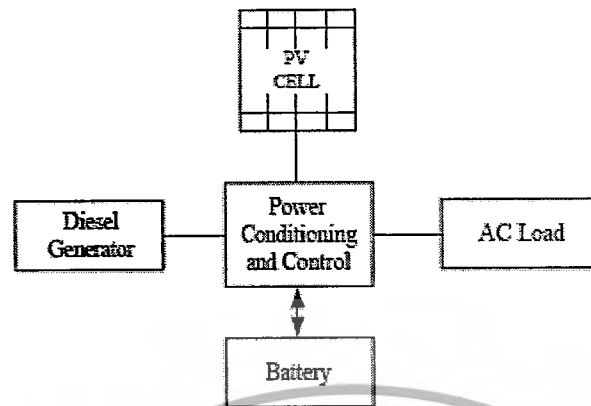
ในปัจจุบันนี้วัตถุดิบที่ใช้ผลิตไฟฟ้าเช่น น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ มีปริมาณลดลง และมีราคาแพงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้น การหาพลังงานอย่างอื่นมาทดแทนจึงมีความจำเป็น ซึ่งแหล่งพลังงานที่น่าสนใจคือพลังงานจากแสงอาทิตย์เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาดไม่สร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถพบได้ทั่วโลก การเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงสามารถทำได้โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ ระบบที่ใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์มี 3 ระบบคือ

1. ระบบที่ทำงานแบบโดดเดี่ยว (Stand-Alone System) เป็นระบบที่ใช้งานในสถานที่ห่างไกลหรือไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้าไปถึง โดยเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่ และใช้อินเวอร์เตอร์สร้างไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับจ่ายโหลดโดยมีไดอะแกรมการทำงานดังรูปที่ 1.1 การใช้งานหลักของระบบนี้จะใช้สำหรับชาร์จแบตเตอรี่ และใช้กับมอเตอร์ปั้มน้ำ



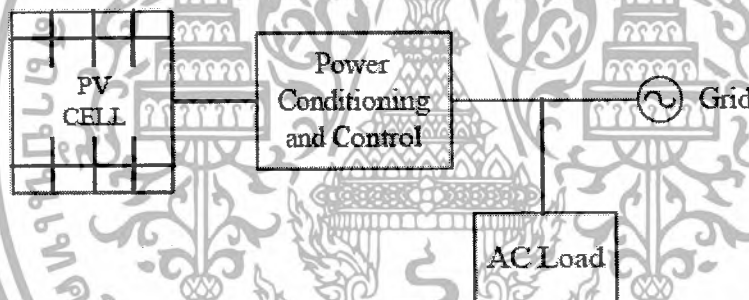
รูปที่ 1.1 ระบบที่ทำงานแบบโดดเดี่ยว

2. ระบบไฮบริดจ์ (Hybrid System) จะเป็นระบบที่นำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบดีเซล (Diesel Generator) เพื่อช่วยจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบ ซึ่งทำให้ระบบสามารถจ่ายไฟฟ้าได้ตลอดเวลา โดยไดอะแกรมการทำงานแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ระบบใช้งานแบบไฮบริดจ์

3. ระบบเชื่อมต่องริต (Grid-Connected System) เป็นระบบที่สร้างไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่เดียวกับระบบกริดเพื่อจ่ายโหลด และจ่ายกำลังส่วนที่เหลือให้กับระบบกริด โดยไดอะแกรมการทำงานแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ระบบเชื่อมต่องริต

ในการนำเอาเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้กับระบบต่างๆ จะต้องหาจุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นได้ ณ เวลาใดเวลาหนึ่งจะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพบรรยากาศ และโหลด นอกจากนี้เซลล์แสงอาทิตย์ยังมีราคาสูง ดังนั้นจึงต้องหาวิธีในการดึงเอากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายได้ในขณะนั้นมาใช้ ซึ่งมีวิธีการต่างๆ เช่น วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร (A fixed percentage of the open circuit voltage) [1,5] วิธีการรบกวนและการสังเกต (Perturbation and Observation) [2,5] วิธีเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance) [3,5] และการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยหลักการของระลอกคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(A ripple-based maximum power point tracking) [4] ส่วนหลักการที่ใช้สร้างกระแสรูปคลื่นไซน์จ่ายเข้าระบบกริดจะมีหลักการต่างๆ เช่นหลักการควบคุมแบบฮีสเทอรีซิส (Hysteresis Control) [6] หลักการทำนายกระแส (Predictive Current Control) [7] และวิธีการมอดูเลตแบบพัลส์-ไซน์ (Sinusoidal Pulse Width Modulation: SPWM)

ในปฏิญญาพันธันี้เสนอการนำเทคนิคการเพิ่มค่าความนำมาใช้ควบคุมวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ตัวแปลงผันแบบทบระดับ เพื่อหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายไม่ซับซ้อน มีประสิทธิภาพสูงในการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุด และใช้หลักการควบคุมแบบฮีสเทอรีซิสควบคุมการสร้างกระแสรูปคลื่นไซน์ที่จ่ายเข้ากับระบบกริด โดยควบคุมการทำงานของระบบด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล PSoc เบอร์ CY8C27643 และเบอร์ CY8C27443 ของบริษัท Cypress Semiconductor [8]

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาแบบจำลอง และคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์
2. เพื่อศึกษาวิธีการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์
3. เพื่อศึกษาระบบการเชื่อมต่อกริด
4. เพื่อศึกษาการใช้งานตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล PSoc เบอร์ CY8C27643 และเบอร์ CY8C27443 ของ บริษัท Cypress Semiconductor ในการควบคุมการทำงานของระบบ

## 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ออกแบบระบบให้สามารถติดตามหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้
2. ออกแบบระบบให้สามารถแปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากเซลล์แสงอาทิตย์ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายกระแสรูปคลื่นไซน์ที่มีเฟสตรงกับเฟสแรงดันของระบบกริดเพื่อเชื่อมต่อระบบกริดได้ โดยมีขนาดพิกัดของระบบ 320 Watt

## 1.4 ระเบียบวิจัย

1. ศึกษาคุณลักษณะการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ และการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำ
2. ศึกษาอินเวอร์เตอร์และระบบเชื่อมต่อกริด
3. สร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ และการเชื่อมต่อเข้ากริดด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK
4. ศึกษาการใช้งานตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล PSoc เบอร์ CY8C27643 และเบอร์ CY8C27443 ของ บริษัท Cypress Semiconductor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ออกแบบฮาร์ดแวร์ และเขียนโปรแกรมควบคุมการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุด และการสร้างกระแสรูปคลื่นไซน์จ่ายเข้าระบบกริด
6. ทดลอง และสรุปผลการทำงานของระบบควบคุม

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงคุณลักษณะการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์
2. สามารถวิเคราะห์ และออกแบบฮาร์ดแวร์สำหรับการใช้งานได้
3. สามารถเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบบนตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล PSoc เบอร์ CY8C27643 และเบอร์ CY8C27443 เพื่อให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์มาจ่ายเข้าสู่ระบบกริดได้

### 1.6 โครงสร้างปริญญานิพนธ์

บทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่ คุณลักษณะการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ เทคนิคการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุด การควบคุมการสร้างกระแสรูปคลื่นไซน์ด้วยหลักการฮิสเตอร์รีซิส การทำงานของตัววงจรแปลงผันแบบทบระดับ การทำงานของอินเวอร์เตอร์ การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า และโครงสร้างการทำงานของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล PSoc เบอร์ CY8C27643 และเบอร์ CY8C27443

บทที่ 3 จะเป็นส่วนขั้นตอนการดำเนินงาน ตั้งแต่การใช้โปรแกรม MATLAB SIMULINK จำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ และการทำงานของระบบเชื่อมต่อกับกริด โครงสร้างของอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์ การออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบบนตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล PSoc เบอร์ CY8C27643 และเบอร์ CY8C27443 และผลการทดลองเบื้องต้น

บทที่ 4 จะเป็นผลการทดลอง การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ เข้ากับระบบกริดโดยทดลองกับแสงอาทิตย์จริง

บทที่ 5 จะเป็นบทสรุปการทำงานทั้งหมด และข้อเสนอแนะต่างๆ

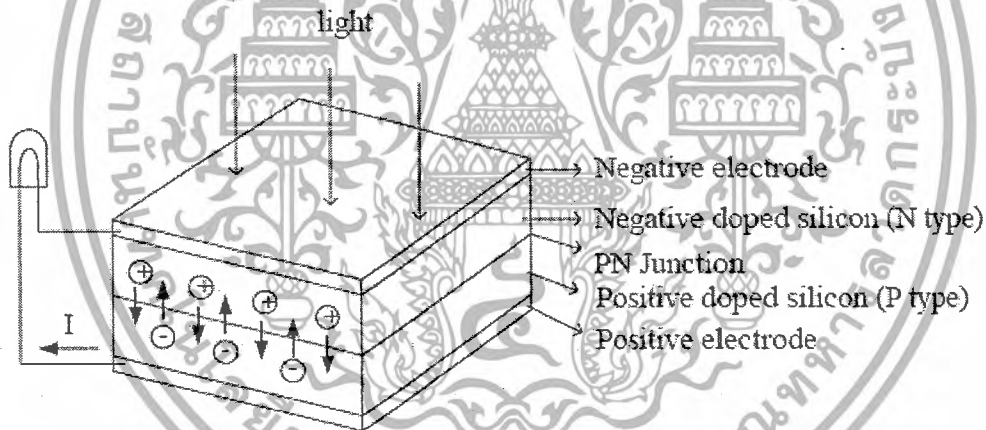
## บทที่ 2

### ทฤษฎี และหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่คุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ การหาจุดจ่ายกำลังสูงสุด การทำงานของวงจรแปลงผันแบบทบระดับ อินเวอร์เตอร์ และการทำงานของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล PSoc เบอร์ CY8C27643 และเบอร์ CY8C27443

#### 2.1 คุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ 1 เซลล์จะประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดพี สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชั้นระหว่างสารกึ่งตัวนำพีและเอ็น (P-N Junction) ซึ่งทั้งหมดนี้ประกอบกันเป็นแผ่นบางๆ ที่เรียกว่าเวเฟอร์ดังรูปที่ 2.1 เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงอาทิตย์พลังงานจากแสงอาทิตย์ที่เรียกว่าโฟตอนจะทำให้สารกึ่งตัวนำแยกตัวเป็นคู่ของโฮลและอิเล็กตรอน โดยโฮลจะวิ่งไปด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าบวก ส่วนอิเล็กตรอนจะวิ่งไปด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าลบ เมื่อนำโหนดมาต่อก็คือเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า

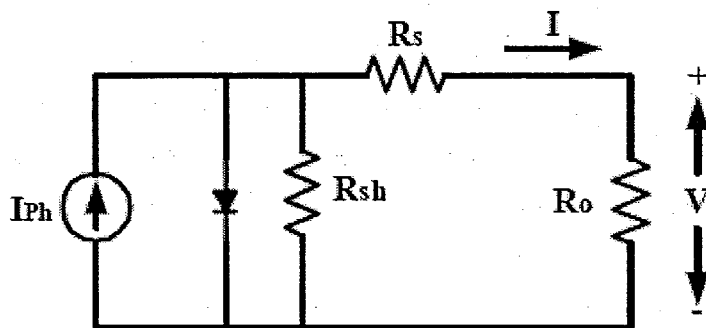


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

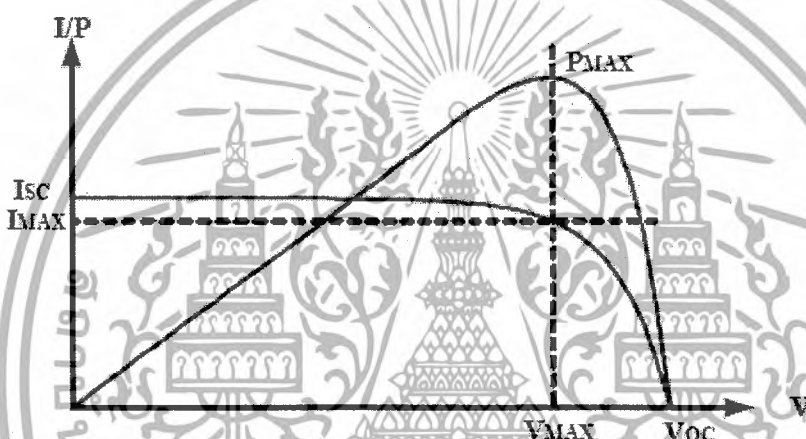
สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนมากจะเป็นซิลิกอนเนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่จำนวนมากบนโลก โดยแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline Si cells) จะมีประสิทธิภาพ 15-24 เปอร์เซ็นต์ และสามารถตอบสนองต่อแสงในแถบความยาวคลื่นกว้าง โดยมีประสิทธิภาพที่ดีในช่วงความยาวคลื่นของแสงอาทิตย์ เซลล์ชนิดนี้มีเสถียรภาพทางประสิทธิภาพดี
2. ซิลิกอนแบบหลายผลึก (Polycrystalline Si cells) จะมีประสิทธิภาพ 10-17 เปอร์เซ็นต์ และสามารถตอบสนองต่อแสงในแถบความยาวคลื่นกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
3. ซิลิกอนแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous Si cells) จะมีประสิทธิภาพ 8-13 เปอร์เซ็นต์  
ไม่จำกัดอายุ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีหัดแต่ได้ดีมีอายุและต้องอาศัยเงินจากของเอกสารหากครั้งที่มีมีการนำไปใช้  
และสามารถตอบสนองต่อแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นสั้นของแสงอาทิตย์



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.3 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์

จากโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลในรูปของแหล่งจ่ายกระแสต่อขนานกับไดโอด และได้กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 จากกราฟกระแส-แรงดันจะพบว่ามีจุดที่สำคัญ 2 จุดคือแรงดันขณะเปิดวงจร (VOC) และกระแสลัดวงจร (ISC) โดยขณะที่เกิดการลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์กระแสที่สร้างขึ้นได้จะไหลผ่านวงจรภายนอก ส่วนขณะเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์กระแสที่สร้างขึ้นได้จะไหลผ่านไดโอดที่ต่อขนานภายในเซลล์ จากวงจรสมมูลสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันอย่างง่ายเมื่อละค่าความต้านทานขนาน ( $R_{sh}$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ได้ดังสมการ (2.1), (2.2) และ (2.3) [3]

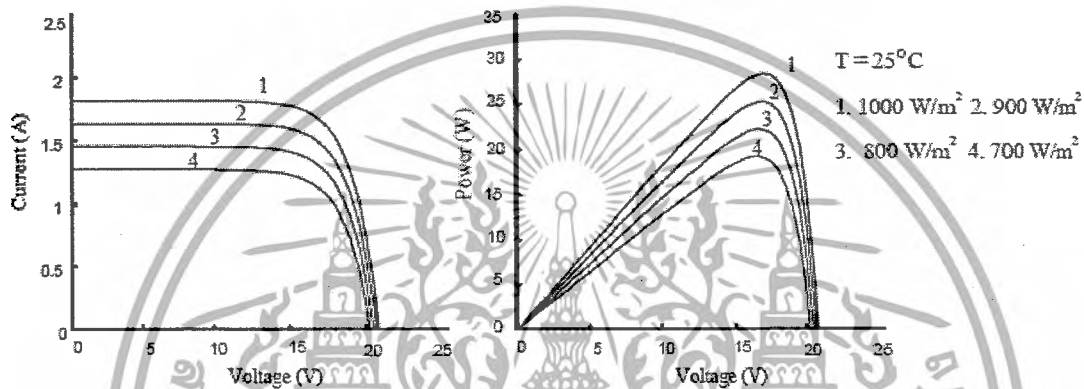
$$I = N_p I_{ph} - N_p I_r \left[ \exp\left(\frac{qV}{AKTN_s}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

$$I_r = I_{rr} \left[ \frac{T}{T_R} \right]^3 \exp\left[ \frac{qE_G}{kA} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.2)$$

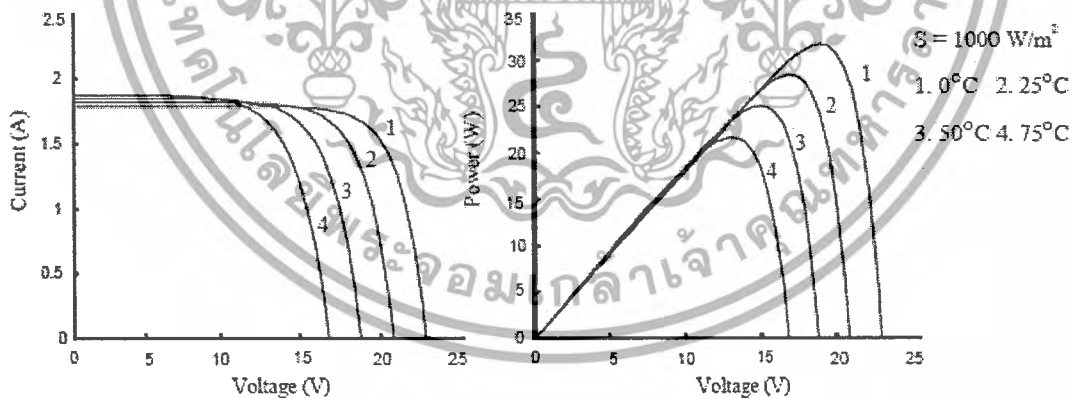
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{Ph} = \left[ I_{SCR} + k_i(T - T_r) \frac{S}{100} \right] \quad (2.3)$$

จากสมการ (2.1), (2.2), (2.3) และวงจรสมมูลในรูปที่ 2.2 พบว่าคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ปริมาณแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ และโหลดที่ต่ออยู่ในวงจร เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะมีผลต่อแรงดันที่จ่ายออกมาของเซลล์แสงอาทิตย์ ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงปริมาณแสงจะมีผลต่อกระแสที่จ่ายได้ของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2.4



ก) เมื่อปริมาณแสงเปลี่ยนในขณะที่อุณหภูมิคงที่



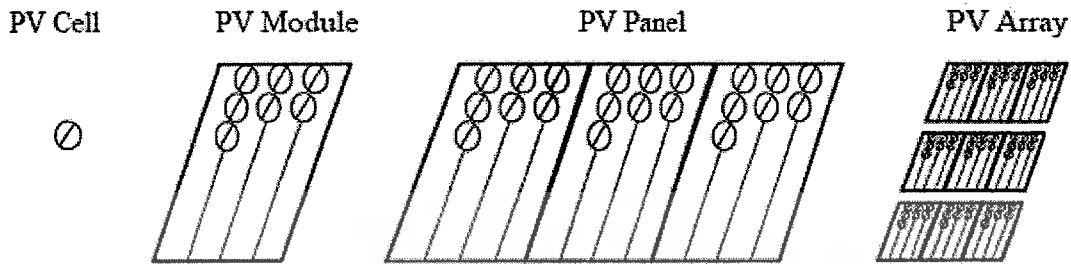
ข) เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนในขณะที่ปริมาณแสงคงที่

### รูปที่ 2.4 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะต่างๆ

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากผลึกซิลิกอนขนาด 1 ตารางเซนติเมตรจะมีแรงดันขณะเปิดวงจร ประมาณ 0.6-0.7 โวลต์ และกระแสลัดวงจร 20 - 40 มิลลิแอมป์ ดังนั้นถ้าต้องการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าก็ทำได้โดยการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่ออนุกรมกัน และถ้าต้องการเพิ่มปริมาณกระแสก็ทำได้โดยการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อขนานกัน ซึ่งการนำเอาเซลล์แสงอาทิตย์ย่อยเหล่านี้มารวมกันเป็นเซลล์แสงอาทิตย์หน่วยใหญ่ขึ้นจะเรียกว่าพิวโมดูล หากนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สละไปส่วนราชการของระบบเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากหน่วยงานต้นทาง  
ไม่อาจกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

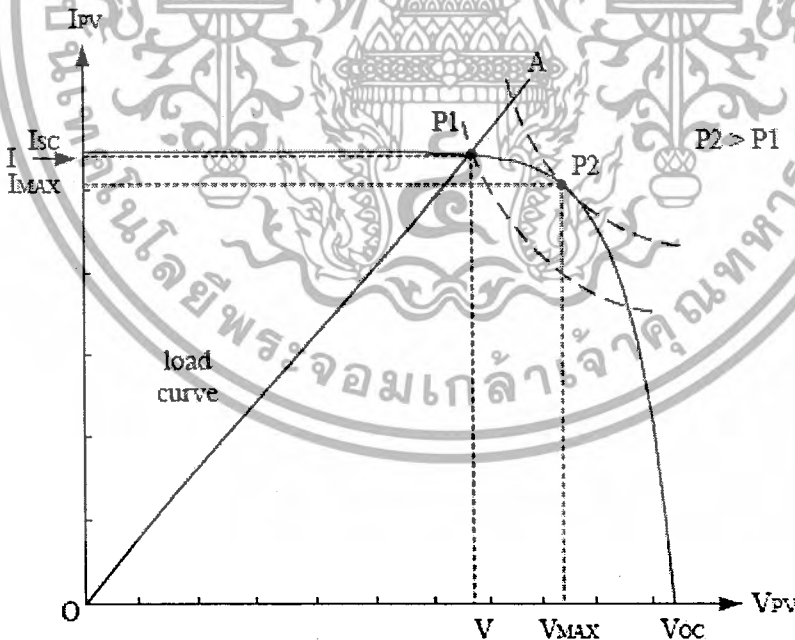
พีวีโมดูลมาต่อเพื่อเพิ่มปริมาณทางไฟฟ้าก็จะเรียกว่าเป็นพีวีพาแนล และการนำพีวีพาแนลมาต่อรวมกันเป็นระบบใหญ่จะเรียกว่าพีวีอาร์เรย์  
 ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 รูปแบบของเซลล์แสงอาทิตย์

## 2.2 วิธีการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุด

การจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับโหลดพบว่าเส้นกราฟคุณลักษณะของ โหลด (Load line) จะต้องเหมาะสมกับเส้นกราฟระหว่างแรงดันและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2.6 พบว่าจากเส้นกราฟคุณลักษณะของโหลดที่แสดงด้วยเส้น OA เซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายกำลังเป็น  $P_1$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่ากำลังที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายได้สูงสุดคือ  $P_2$  ดังนั้นจึงมีเทคนิคต่างๆ ในการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.6 ผลของโหลดต่อเซลล์แสงอาทิตย์

### 2.2.1 วิธีเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร (A fixed percentage of the open-circuit voltage) [1]

เอกสารนี้วิธีนี้จะตั้งอยู่บนพื้นฐานที่ว่าแรงดันที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดจะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับบ้านการค่าแรงดันขณะเปิดวงจรไว้ โดยกำหนดให้แรงดันที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดมีค่าประมาณ 76 เปอร์เซ็นต์เข้าไปใช้

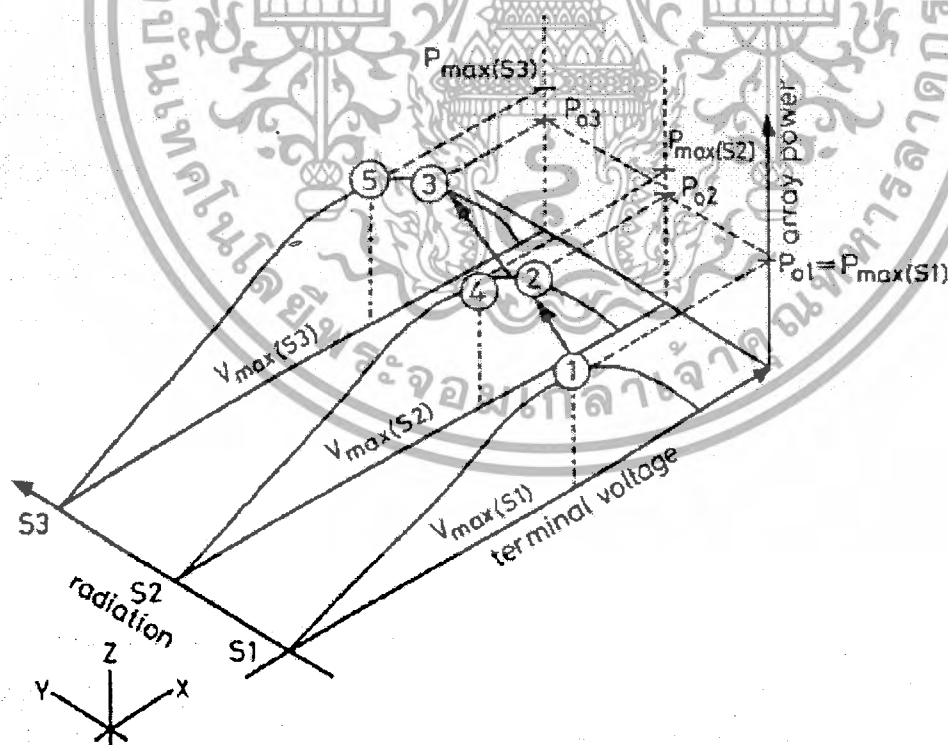
ของแรงดันขณะเปิดวงจร แต่เนื่องจากแรงดันขณะเปิดวงจรไม่คงที่ในแต่ละเวลาดังนั้นการทำงานของวิธีนี้จะทำงานเป็นคาบเวลาโดยตัดโหลดออกเพื่อวัดขนาดแรงดันขณะเปิดวงจรเพื่อนำไปหาแรงดันที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด (โดยทั่วไปจะตัดโหลดออกทุกๆ 1 วินาที เป็นเวลา 10-50 ms) ซึ่งข้อเสียของวิธีนี้คือจะทำให้การทำงานของโหลดไม่ต่อเนื่อง

## 2.2.2 วิธีการรบกวนและการสังเกต (Perturbation and Observation: P&O) [2]

วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายไม่ซับซ้อนทำงานเป็นคาบเวลาโดยใช้การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนดังสมการ (2.4)

$$dP = p(k) - P(k-1) \quad (2.4)$$

โดยถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ามีค่าเป็นบวกระบบจะปรับทิศทางของแรงดัน (เพิ่มหรือลดแรงดัน) ตามทิศทางเดิม และถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ามีค่าเป็นลบระบบจะปรับทิศทางของแรงดันสวนทางกับทิศทางเดิมเพื่อวิ่งเข้าหาจุดจ่ายกำลังสูงสุด ซึ่งวิธีนี้สามารถทำงานได้ดีที่สภาวะคงตัว (สภาวะที่ปริมาณแสง และอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ) แต่จะมีข้อเสียคือเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณแสงอย่างรวดเร็วจะทำให้การตามหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดผิดพลาดได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะการเบี่ยงเบนจากจุดจ่ายกำลังสูงสุดของวิธี P&O

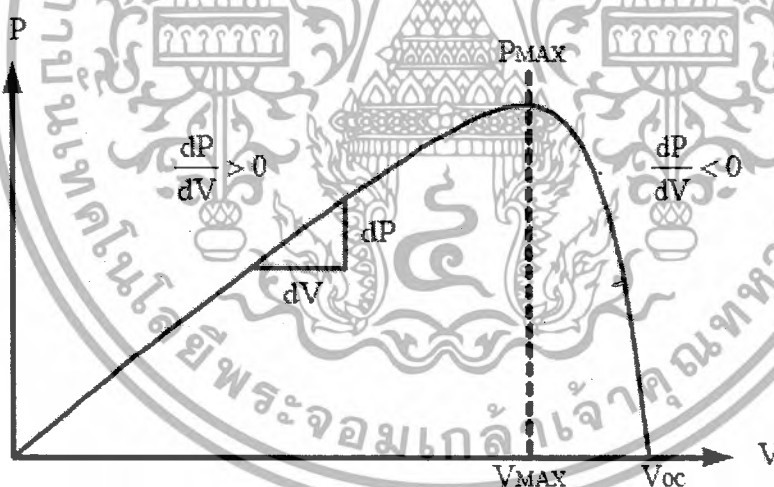
โดยที่  $P_{o3} > P_{o2} > P_{o1}$  แต่  $P_{o3} < P_{MAX}(S3)$  และ  $P_{o2} < P_{MAX}(S2)$  [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.7 สมมติจุดการทำงานเริ่มต้นของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่จุด 1 ซึ่งเป็นจุดจ่ายกำลังสูงสุดที่ปริมาณแสง S1 เมื่อระบบกวนระบบครั้งต่อไปในขณะที่ปริมาณแสงเพิ่มขึ้นเป็น S2 จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดที่ 2 ซึ่งมีกำลังไฟฟ้ามากกว่าจุดที่ 1 แต่น้อยกว่าจุดที่ 4 ซึ่งเป็นจุดจ่ายกำลังสูงสุดของปริมาณแสง S2 ระบบก็จะปรับเพิ่มแรงดันขึ้นซึ่งทำให้จุดทำงานวิ่งออกจากจุดจ่ายกำลังสูงสุดของปริมาณแสง S2 และเมื่อระบบกวนระบบอีกครั้งในขณะที่ปริมาณแสงเพิ่มขึ้นเป็น S3 จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่จุด 3 ซึ่งมีกำลังไฟฟ้ามากกว่าจุดที่ 2 แต่น้อยกว่าจุดที่ 5 ซึ่งเป็นจุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของปริมาณ S3 ระบบก็จะปรับเพิ่มแรงดันขึ้นอีกทำให้จุดการทำงานเบี่ยงเบนไปจากจุดจ่ายกำลังสูงสุดทำให้ไม่สามารถดึงกำลังสูงสุดมาใช้ได้ ส่วนการที่ระบบจะสามารถกลับมาหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้อย่างถูกต้องอีกครั้งจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณแสงมีการเปลี่ยนแปลงช้าลง หรือเข้าสู่สภาวะคงตัว

### 2.2.3 วิธีเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance: IncCond) [3]

จากกราฟกำลังไฟฟ้า-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 2.8 จะได้ความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันเป็น



รูปที่ 2.8 กราฟกำลังไฟฟ้า-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

- ถ้า  $dP/dV > 0$  แสดงว่าจุดทำงานอยู่ทางด้านซ้ายของจุดจ่ายกำลังสูงสุด
- ถ้า  $dP/dV = 0$  แสดงว่าจุดทำงานอยู่ที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด
- ถ้า  $dP/dV < 0$  แสดงว่าจุดทำงานอยู่ทางด้านขวาของจุดจ่ายกำลังสูงสุด

ดังนั้นถ้าเราจัด  $dP/dV$  ใหม่ให้อยู่ในรูปของกระแส และแรงดันจะได้สมการเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบ  $\frac{dP}{dV}$  นี้เพื่อหาอะไรจะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dP}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV}$$

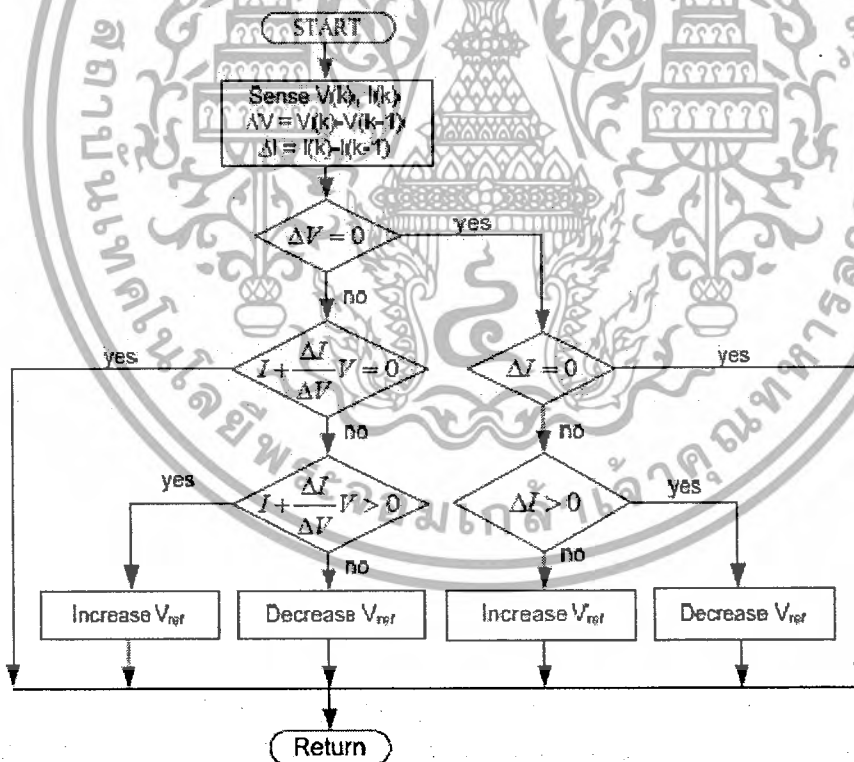
$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (2.5)$$

ดังนั้นที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดจะได้ค่าเป็น

$$\frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} = 0 \quad (2.6)$$

โดย  $I/V$  คือ ค่าความนำของเซลล์แสงอาทิตย์ และ  $dI/dV$  คือ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความนำ ซึ่งถ้าผลรวมของสมการ (2.6) มีค่าเป็นบวกแสดงว่าระบบกำลังทำงานทางด้านซ้ายของจุดจ่ายกำลังสูงสุดตัวระบบก็จะปรับค่าแรงดันเพิ่มขึ้น แต่ถ้าผลรวมมีค่าเป็นลบแสดงว่าระบบทำงานอยู่ทางด้านขวาของจุดจ่ายกำลังสูงสุดระบบก็จะปรับลดค่าแรงดันลง และถ้าผลรวมมีค่าเท่ากับศูนย์แสดงว่าระบบทำงานที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดระบบก็จะคงแรงดันเดิมนั้นไว้

วิธีนี้จะสามารถหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้แม้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณแสงอย่างรวดเร็ว แต่ก็มีขั้นตอนการคำนวณเพิ่มขึ้น ซึ่งได้นำมาใช้ในปริยายานิพนธ์นี้ดังรูปที่ 2.9

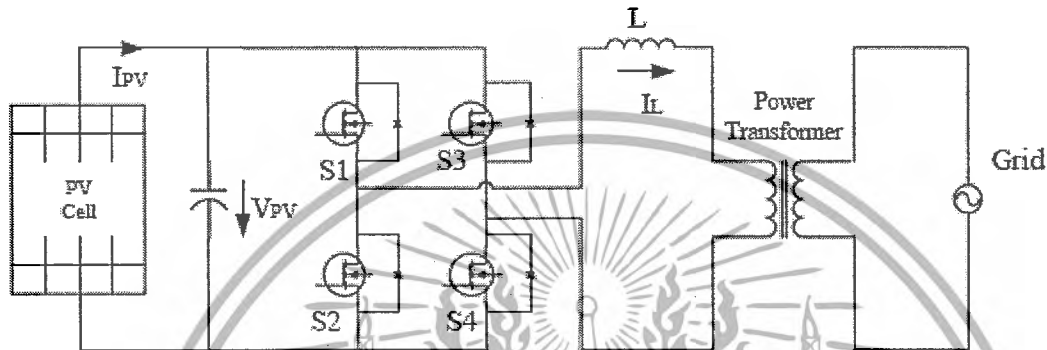


รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุด ด้วยวิธีเพิ่มค่าความนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 การหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยหลักการของระลอกคลื่น (A Ripple-Based Maximum Power Point Tracking) [4]

จากคุณลักษณะของระบบเชื่อมต่องริตเฟสเดียวดังรูปที่ 2.10 จะทำให้กำลังไฟฟ้าทางด้านไฟสลับมีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่ระบบกริดทำให้เกิดระลอกคลื่นบนแรงดัน และกำลังไฟฟ้าทางด้านไฟตรงจากระลอกคลื่นของทั้ง 2 สัญญาณสามารถนำไปใช้หาจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยสัญญาณที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 ระบบเชื่อมต่องริตแบบเฟสเดียว

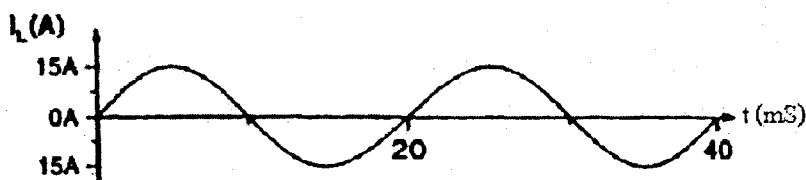
ในการวิเคราะห์การหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดด้วยระลอกคลื่นแรงดันและกำลังไฟฟ้าจะพิจารณาเป็นคาบเวลา รูปที่ 2.12 จะแสดงพื้นที่การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จะแบ่งเป็นพื้นที่ส่วน A, B และ C โดยพื้นที่ส่วน A จะมีแรงดันต่ำกว่าแรงดันที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด พื้นที่ส่วน B จะมีแรงดันใกล้เคียงกับแรงดันที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด และพื้นที่ส่วน C จะมีแรงดันสูงกว่าแรงดันที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด และเมื่อจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ทำงานจากพื้นที่ C ไปยังพื้นที่ A (ที่เวลา 0 วินาที ถึง 0.6 วินาที) จะได้สัญญาณดังรูปที่ 2.13 ซึ่งพบว่า

- ในพื้นที่ส่วน A ระลอกคลื่นของแรงดัน และกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงสุดหรือต่ำสุดที่เวลาเดียวกัน

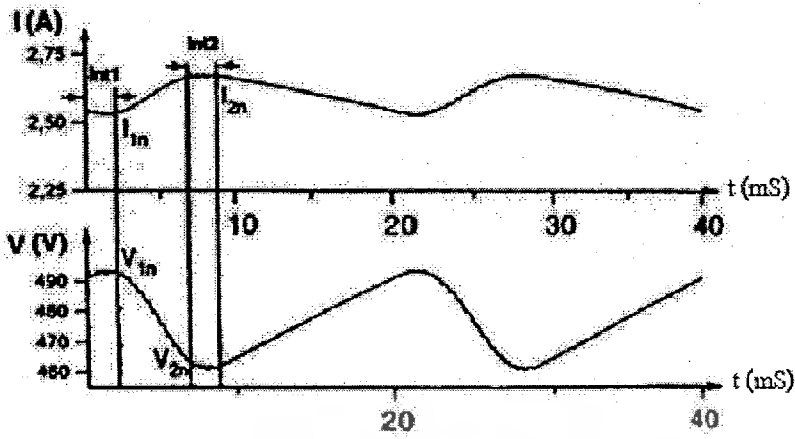
- ในพื้นที่ส่วน B จะมีระลอกคลื่นกำลังไฟฟ้าต่ำ และมีความถี่เพิ่มขึ้น

- ในพื้นที่ส่วน C ที่เวลาเดียวกันระลอกคลื่นของแรงดันจะมีค่าสูงสุด (ต่ำสุด) ในขณะที่ระลอกคลื่นของกำลังไฟฟ้าจะมีค่าต่ำสุด (สูงสุด)

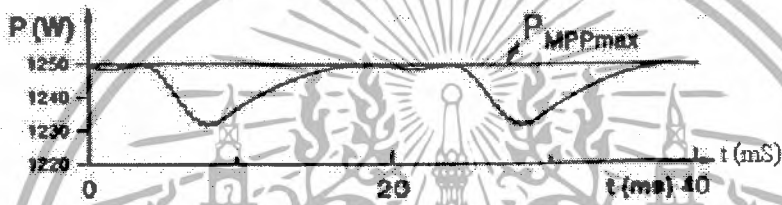
- ระลอกคลื่นของกำลังไฟฟ้าจะมีค่ามากขึ้นเมื่อจุดทำงานเคลื่อนที่ออกจากจุดจ่ายกำลังสูงสุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ ก) กระแสที่จ่ายเข้าระบบกริดนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

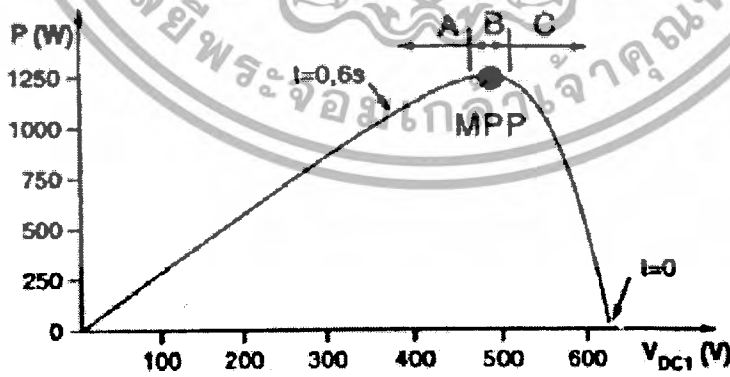


ข) กระแสที่จ่ายจากเซลล์แสงอาทิตย์ และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บ



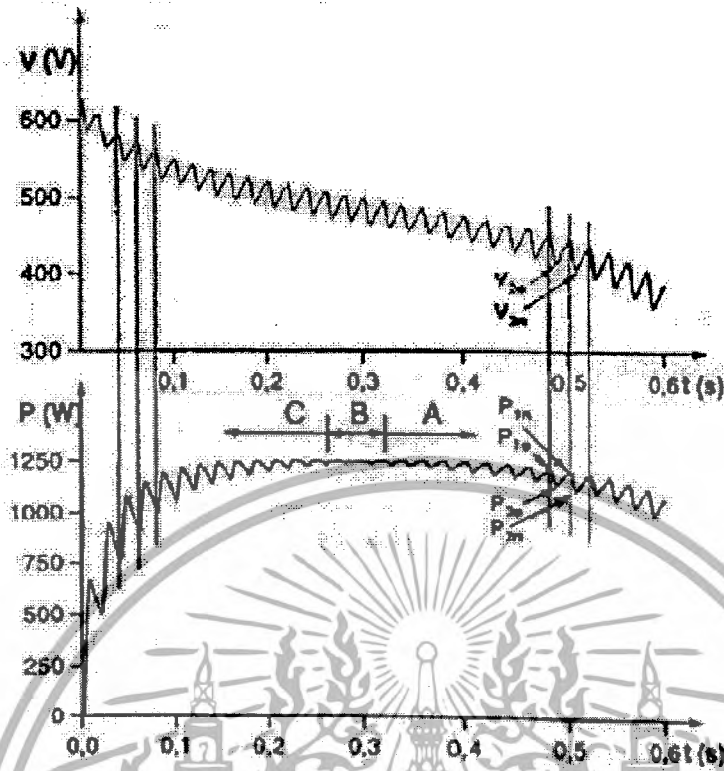
ค) กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์

รูปที่ 2.11 รูปคลื่นสัญญาณที่เกิดขึ้นในระบบเชื่อมตอกาวิต [4]



รูปที่ 2.12 ย่านการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ [4]

จากลักษณะดังกล่าวสามารถที่จะนำไปใช้ปรับจุดทำงานให้เข้าใกล้จุดจ่ายกำลังสูงสุด โดยการเพิ่มหรือลดค่าแรงดันอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) ด้วยแรงดันค่าน้อยๆ ซึ่งค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันจะเป็นตัวตรวจสอบเส้นทางของจุดทำงานว่าวิ่งเข้าหรือวิ่งออกจากจุดจ่ายกำลังสูงสุด ส่วนค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจะเป็นตัวบอกพื้นที่ของจุดทำงานว่าอยู่ในพื้นที่ส่วนใด (A, B หรือ C) จากรูปที่ 2.13 เมื่อเปรียบเทียบค่า  $P_{1n}$  และ  $P_{2n}$  พบว่า  $P_{1n}$  มีค่ามากกว่า  $P_{2n}$  แสดงว่าจุดทำงานอยู่ในพื้นที่ A

และเมื่อเปรียบเทียบค่า  $V_{2o}$  และ  $V_{2n}$  พบว่า  $V_{2o}$  มีค่ามากกว่า  $V_{2n}$  แสดงว่าเส้นทางเดินของจุดทำงานวิ่งไปทางซ้ายของกราฟกำลังไฟฟ้า-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ สรุปได้ว่าขณะนี้จุดทำงานอยู่ในพื้นที่ A และกำลังวิ่งออกจากจุดจ่ายกำลังสูงสุด ดังนั้นจะต้องเพิ่มค่าแรงดันอ้างอิงเพื่อไปควบคุมให้จุดทำงานวิ่งเข้าหาจุดจ่ายกำลังสูงสุด โดยค่าตัวแปรต่างๆคือ (ดูรูปที่ 2.11 ประกอบ)

- $P_{1n}$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ในช่วงที่ระลอกคลื่นแรงดันมีค่าสูงสุดที่คาบเวลาปัจจุบัน
- $P_{2n}$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ในช่วงที่ระลอกคลื่นแรงดันมีค่าต่ำสุดที่คาบเวลาปัจจุบัน
- $V_{2o}$  คือ ค่าระลอกคลื่นแรงดันต่ำสุดที่คาบเวลาก่อน
- $V_{2n}$  คือ ค่าระลอกคลื่นแรงดันต่ำสุดที่คาบเวลาปัจจุบัน

แต่ถ้าจุดทำงานอยู่ในพื้นที่ B แรงดันอ้างอิงที่ใช้จะแทนด้วยแรงดันเฉลี่ย ( $V_{mean}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้  $V_{mean} = \frac{V_{1n} + V_{2n}}{2}$  บลิ่งเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งในการนำไปใช้ (2.7)

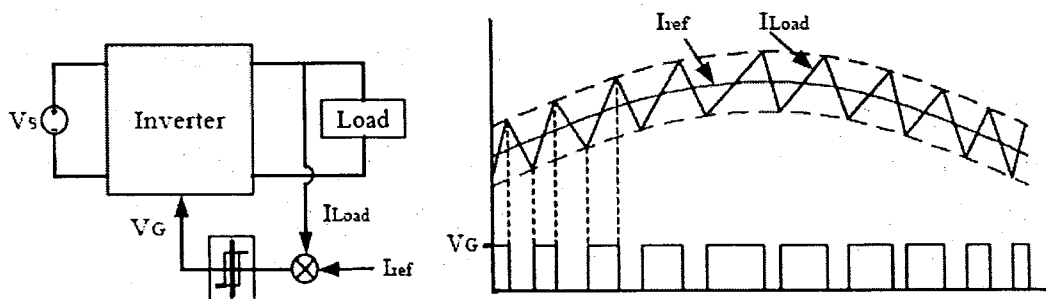
ขั้นตอนการควบคุมการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุด [4]

| Case | Power comparison                                 | Voltage comparison      | Operating area   | Direction                 | Measure taken by MPPT          |
|------|--|-------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------------|
| 1    | $P_{1n} < P_{2n}$                                | $V_{2o} < V_{2n}$       | Moving through C | Away from MPP             | $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$ |
| 2    | $P_{1n} < P_{2n}$                                | $V_{2o} > V_{2n}$       | Moving through C | Towards MPP               | $V_{ref} = V_{ref}$            |
| 3    | $P_{1n} < P_{2n}$                                | $V_{2o} \approx V_{2n}$ | Stationary in C  |                           | $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$ |
| 4    | $P_{1n} > P_{2n}$                                | $V_{2o} < V_{2n}$       | Moving through A | Towards MPP               | $V_{ref} = V_{ref}$            |
| 5    | $P_{1n} > P_{2n}$                                | $V_{2o} > V_{2n}$       | Moving through A | Away from MPP             | $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$ |
| 6    | $P_{1n} > P_{2n}$                                | $V_{2o} \approx V_{2n}$ | Stationary in A  |                           | $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$ |
| 7    | $P_{1n} \approx P_{2n}$ and $P_{2n} < P_{1n}$    | $V_{2o} > V_{2n}$       | Moving through B | Away from MPP towards A   | $V_{ref} = V_{max} + \Delta V$ |
| 8    | $P_{1n} \approx P_{2n}$ and $P_{2n} \geq P_{1n}$ | $V_{2o} > V_{2n}$       | Moving through B | Towards MPP coming from C | $V_{ref} = V_{max}$            |
| 9    | $P_{1n} \approx P_{2n}$ and $P_{2n} < P_{1n}$    | $V_{2o} < V_{2n}$       | Moving through B | Away from MPP towards C   | $V_{ref} = V_{max} - \Delta V$ |
| 10   | $P_{1n} \approx P_{2n}$ and $P_{2n} \geq P_{1n}$ | $V_{2o} < V_{2n}$       | Moving through B | Towards MPP coming from A | $V_{ref} = V_{max}$            |
| 11   | $P_{1n} \approx P_{2n}$                          | $V_{2o} \approx V_{2n}$ | Stationary in B  |                           | $V_{ref} = V_{max}$            |

### 2.3 การสร้างกระแสรูปคลื่นไซน์

การสร้างกระแสรูปคลื่นไซน์จะใช้เทคนิคการควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Control) หรือ เรียกว่าวิธีเบง-เบงกระแส (current bang-bang) ดังรูปที่ 2.14 โดยเป็นการเปรียบเทียบกระแสโหลดกับกระแสอ้างอิงรูปไซน์ เมื่อกระแสโหลดมีค่าเกินขอบเขตบนของกระแสอ้างอิง สวิตช์ก็จะตัดวงจรเพื่อลดกระแสโหลด และเมื่อกระแสโหลดลดลงต่ำกว่าขอบล่างของกระแสอ้างอิง สวิตช์ก็จะต่อวงจรเพื่อเพิ่มกระแสโหลดใหม่ การใช้เทคนิคนี้จะมีข้อดีคือได้รูปคลื่นของกระแสใกล้เคียงไซน์ และสามารถควบคุมให้วงจรตอบสนองต่อการเปลี่ยนความถี่หรือแอมพลิจูดของกระแสอ้างอิงได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากความถี่ในการตัดต่อวงจรจะไม่คงที่ ทำให้การวิเคราะห์เชิงความถี่ และการกรองฮาร์มอนิกจะมีความยุ่งยากขึ้น แต่ในบริบทนี้พจน์นี้ ใช้การควบคุมโดยซอฟต์แวร์ โดยการเขียนโปรแกรมให้ตัวประมวลผลดิจิทัล จึงทำให้สามารถควบคุมความถี่ในการตัดต่อวงจร ให้คงที่ได้

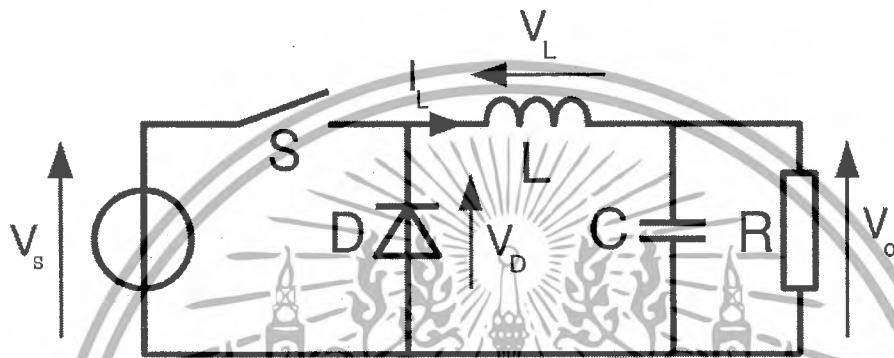


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 2.14 การควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ตัวแปลงผันแบบทอนระดับ (Buck Converter)

วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ หรือเรียกว่า วงจรทอนระดับ เป็นวงจรที่ทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่าแรงดันด้านอินพุต และเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตที่มีความเป็นกระแสดรรมมากๆ จะนิยมใช้ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass filter) ซึ่งโดยมากจะเลือกใช้วงจรกรองแบบ LC เพราะมีอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการผกผันกับกำลังสองของความถี่

หลักการทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์



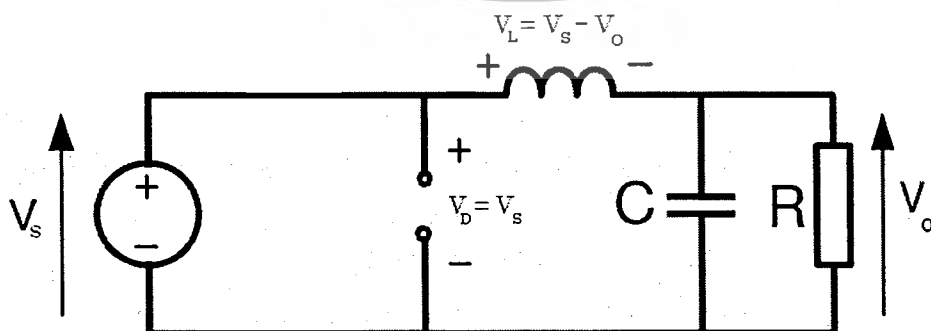
รูปที่ 2.15 วงจรตัวแปลงผันแบบทอนระดับ

จากความสัมพันธ์

$$V_o = DV_s \quad (2.8)$$

จากรูปกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงผ่านสวิตช์ ผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังโหลด โดยที่กระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะเก็บที่ตัวเก็บประจุ จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ สามารถเขียน สมการของแรงดันไฟฟ้าได้ดังนี้

ขณะสวิตช์นำกระแส



รูปที่ 2.16 วงจรตัวแปลงผันแบบทอนระดับขณะสวิตช์นำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-V_s + v_L + V_o = 0$$

$$v_L = V_s - V_o$$

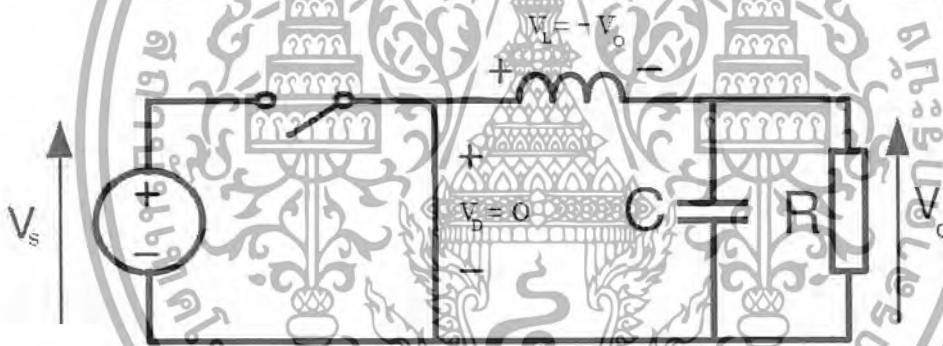
$$v_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L}$$

dt ในกรณีอยู่ในช่วงนำกระแส คือ dt = DT

$$\Delta i_{L,on} = \left( \frac{V_s - V_o}{L} \right) DT \quad (2.9)$$

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส



รูปที่ 2.17 วงจรตัวแปลงผันแบบทอนระดับขณะสวิตช์ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส ไดโอดจะถูกไบอัสตรง จากภาระคืนพลังงานของตัวเหนี่ยวนำ ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำผ่านโหลด ทำให้เกิดการไหลของกระแสอย่างต่อเนื่อง และจากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้างดังนี้

$$v_L = -v_o$$

$$v_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_{L,off}}{\Delta t} = -\frac{V_o}{L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ จะค่อยๆมีค่าลดลง เพราะการเปลี่ยนแปลงกระแสตัวเหนี่ยวนำต่อเวลามีค่าเป็นลบ

$dt$  ในกรณีที่อยู่ในช่วงเวลาหยุดนำกระแส จะมีค่าเท่ากับ  $dt = (1-D)T$  จึงสามารถรูปแบบใหม่เป็น

$$\Delta i_{L,off} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T \quad (2.10)$$

อัตราขยายแรงดันของวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์จะมีค่าสูงสุดไม่เกิน 100% ตามค่า  $D$  ซึ่งวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุต มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่า  $D$

#### 2.4.1 การหาค่าความเหนี่ยวนำต่ำสุดของวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์

การหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่ต่ำสุดที่จะทำให้วงจรบีกคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง โดยเริ่มจากการหากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจะเท่ากับกระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านโหลด เนื่องจากขณะที่อยู่ในสภาวะการทำงานอยู่ตัว กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะได้

$$I_L = I_o = \frac{V_o}{R}$$

จากรูป จะสามารถหากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดได้จาก สมการในช่วงที่สวิตช์ไม่นำกระแส ดังนี้

$$\begin{aligned} I_{L,max} &= I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \\ &= \frac{V_o}{R} + \frac{1}{2} \left[ \frac{V_o}{L} (1-D)T \right] \\ &= V_o \left[ \frac{1}{R} + \frac{(1-D)}{2Lf} \right] \end{aligned} \quad (2.11)$$

ดังนั้นกระแสตัวเหนี่ยวนำต่ำสุดคือ

$$\begin{aligned}
 I_{L,\min} &= I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \\
 &= \frac{V_o}{R} - \frac{1}{2} \left[ \frac{V_o}{L} (1-D)T \right] \\
 &= \frac{V_o}{R} - \frac{V_o}{2} \left[ \frac{(1-D)T}{L} \right] \\
 &= V_o \left[ \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right]
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

สำหรับการทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะต้องเป็นบวกเสมอ จากค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดน้อยสุดที่ยังทำให้กระแสไหลผ่านแบบต่อเนื่อง

$$\begin{aligned}
 I_{L,\min} &= V_o \left[ \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right] = 0 \\
 V_o \left[ \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right] &= 0 \\
 \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} &= 0
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \tag{2.14}$$

$$f = \frac{(1-D)R}{2L_{\min}} \tag{2.15}$$

#### 2.4.2 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุต

โดยปกติวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน หรือวงจรกรองแบบ LC ที่อยู่ในวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์จะมีตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ เพื่อรักษาแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ แต่ในทางปฏิบัติจะไม่สามารถเลือกตัวเก็บประจุขนาดใหญ่มากๆ ได้ เนื่องจากมีราคาแพงและใช้พื้นที่มาก จึงควรเลือกใช้ C ที่มีขนาดเหมาะสมและให้ค่าระลอกคลื่นอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ สำหรับการคำนวณหาอัตราระลอกคลื่น (Ripple ratio) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.16

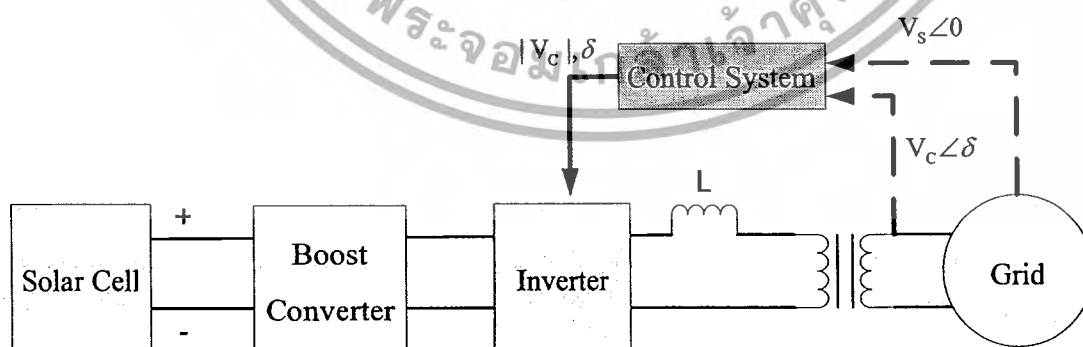
$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf^2} \quad (2.16)$$

## 2.5 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

อินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์กับระบบกริดโดยจะแปลงไฟกระแสตรงที่เกิดจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปเป็นไฟกระแสสลับจ่ายเข้าระบบกริด สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับระบบกริดจะมี 2 ชนิดคือ

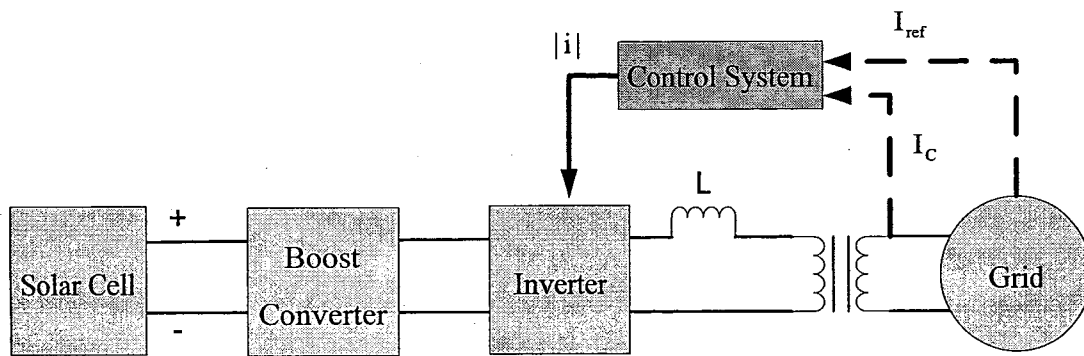
1. อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage-Source Inverter: VSI) จะมีตัวเก็บประจุต่อขนานกับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง
2. อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (Current-Source Inverter: CSI) จะมีตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง

อินเวอร์เตอร์ที่นิยมนำมาใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันถึงแม้ว่าตัวเซลล์แสงอาทิตย์จะทำตัวเป็นแหล่งจ่ายกระแสก็ตาม ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์จะมีอยู่ 2 แบบคือการควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage-Control Inverter: VCI) และการควบคุมด้วยกระแส (Current-Control Inverter: CCI) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ก) และ 2.18 ข) โดยวิธีการควบคุมแรงดันจะควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบกริดด้วยมุมเฟส ( $\delta$ ) ระหว่างแรงดันของอินเวอร์เตอร์กับแรงดันกริด ซึ่งจะทำให้แรงดันของอินเวอร์เตอร์ตามแรงดันกริด ส่วนหลักการควบคุมด้วยกระแสจะเป็นการควบคุมให้กระแสจ่ายเข้ากับระบบกริดมีมุมเฟสเดียวกับแรงดันของระบบกริด



ก) วิธีควบคุมด้วยแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

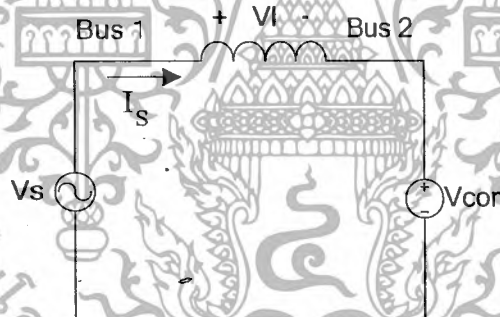


ข) ควบคุมด้วยกระแส

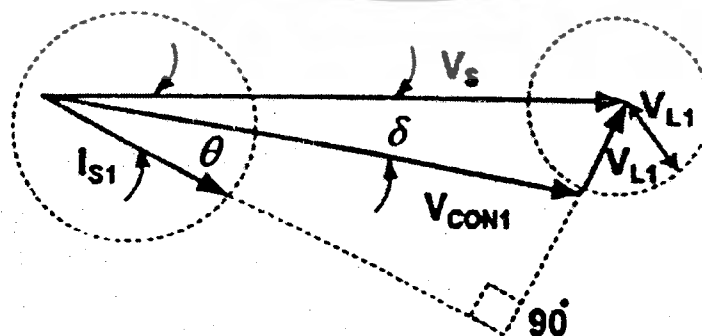
รูปที่ 2.18 อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับกริดแบบแหล่งจ่ายแรงดัน

## 2.6 การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

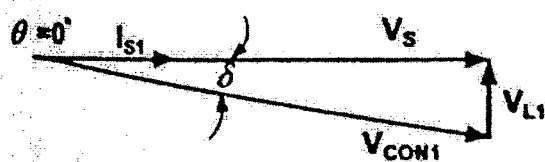
การส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 1 และบัส 2 สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.19 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า  $V_s$  และ  $V_{con}$  และสามารถเขียนเป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.20 (ก), (ข) และ (ค) [10,13]



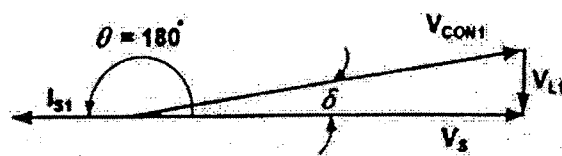
รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 1 และบัส 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.20 (ก) เฟสเซอร์ไดอะแกรมของการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

(ข) เฟสเซอร์ไดอะแกรมโหมตเร็คติไฟเออร์

(ค) เฟสเซอร์ไดอะแกรมโหมตอินเวอร์เตอร์

จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.20 (ก) สามารถหาลำกำลังไฟฟ้าจริง (P) และ  
กำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ที่จ่ายแหล่งจ่าย  $V_s$  ไปยังคอนเวอร์เตอร์  $V_{CON}$  หรือจากบัส 1 ไปยัง  
บัส 2 จากรูปที่ 2.19 พิจารณาตามกฎ KVL จะได้ว่า

$$V_s = V_{con} + V_L \quad (2.17)$$

$$V_L = L_s \frac{di_s}{dt} \quad (2.18)$$

สมมติให้  $V_s$  เป็นรูปไซน์และเป็นองค์ประกอบที่ความถี่มูลฐานของ  $V_{CON}$  และ  $I_s$   
ดังรูปที่ 2.19 ซึ่งสามารถเขียนในรูปเฟสเซอร์  $V_{CON1}$  และ  $I_{s1}$  กำหนดให้  $V_s$  เป็นเฟสเซอร์  
อ้างอิง จะได้ว่า

$$V_s = V_{CON1} + V_{L1} \quad (2.19)$$

$$V_{L1} = j\omega_s I_{s1} L_s \quad (2.20)$$

$$P = V_s I_{s1} \cos\theta = \frac{V_s^2}{\omega L_s} \left( \frac{V_{CON1}}{V_s} \sin\delta \right) \quad (2.21)$$

จากรูปที่ 2.20 (ก) จะได้

$$V_{L1} \cos\theta = \omega L_s I_{s1} \cos\theta = V_{CON1} \sin\delta \quad (2.22)$$

$$Q = V_s I_{s1} \sin\theta = \frac{V_s^2}{\omega L_s} \left( 1 - \frac{V_{CON1}}{V_s} \cos\delta \right) \quad (2.23)$$

จากรูปที่ 2.20 (ข) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

$$V_s - \omega L_s I_{s1} \sin\theta = V_{CON1} \cos\delta \quad (2.24)$$

และ

$$I_{S1} = \frac{V_S - V_{CON1}}{j\omega L_S} \quad (2.25)$$

จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.20 (ค) สามารถกำลังไฟฟ้า และกระแสที่ไหลจากคอนเวอร์เตอร์  $V_{CON}$  ไปยังแหล่งจ่าย  $V_S$  หรือจากบัส 2 ไปยังบัส 1 ได้ดังนี้

$$P_{21} = -P_{12} \quad (2.26)$$

และ

$$I_{S1} = \frac{V_{CON1} - V_S}{j\omega L_S} \quad (2.27)$$

การควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าสามารถควบคุมได้จากมุม  $\delta$  และการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ ทั้งในโหมดเรกติไฟเออร์และโหมดอินเวอร์เตอร์ ในปฏิยานุพันธ์นี้ ใช้วิธีการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ในโหมดอินเวอร์เตอร์ โดยการกำหนดเวกเตอร์ของกระแส  $I_{S1}$  ให้ทำมุม  $180^\circ$  และซิงโครไนส์กับแหล่งจ่าย  $V_S$  ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าจะไหลออกจากคอนเวอร์เตอร์  $V_{CON}$  ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแรงดันได้ดังนี้

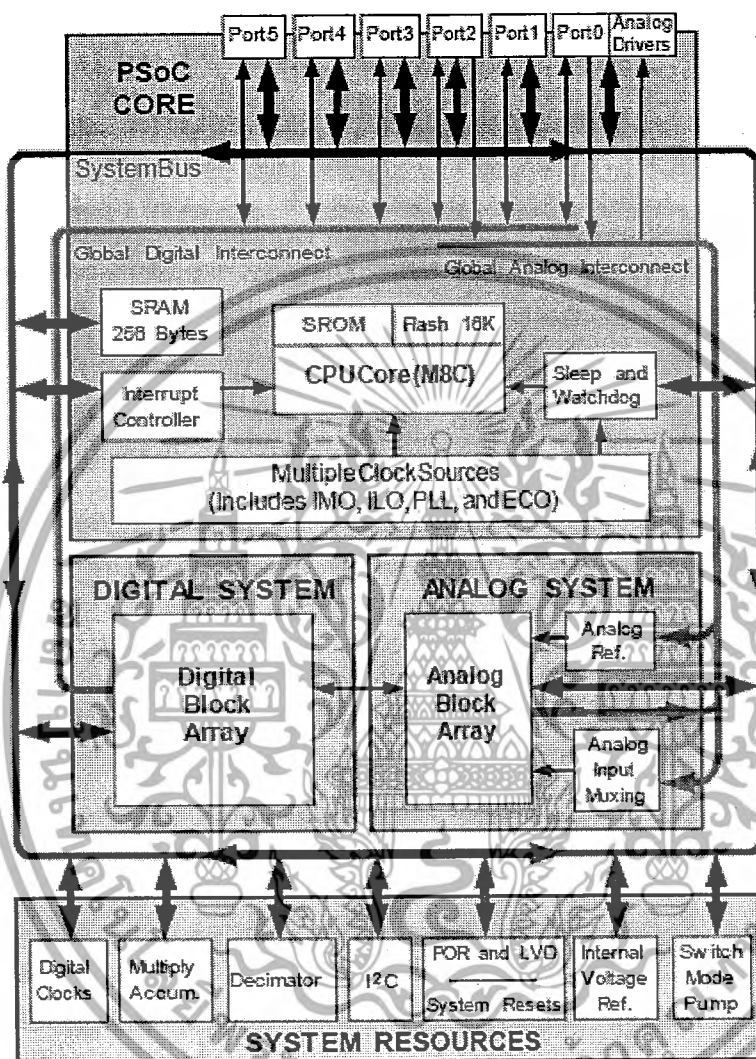
$$V_{CON1} = \sqrt{V_S^2 + (\omega L_S I_{S1})^2} \quad (2.28)$$

ในกรณีที่คอนเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สูงทำให้ขนาดของตัวเหนี่ยวนำมีค่าน้อยลง ดังนั้นจากสมการที่ 2.34 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น  $V_{CON1} \approx V_S$  โดยที่แรงดันไฟตรงทางด้านอินพุตของคอนเวอร์เตอร์ควรมีค่าตามสมการที่ 2.35 ดังนี้

$$V_{dc} > \sqrt{2V_S} \quad (2.29)$$

## 2.7 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (PSoc)

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่ใช้ในปฏิยานิพนธ์นี้จะใช้ชิป PSoc เบอร์ CY8C27643 และเบอร์ CY8C27443 ของ บริษัท Cypress Semiconductor มีสถาปัตยกรรมภายในแสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 โครงสร้างการทำงานของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล PSoc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.1 คุณสมบัติของ CY8C27643

- สถาปัตยกรรมแบบ Harvard Architecture Processor
- ความเร็วของ M8C Processor สูงสุด 24 MHz
- 8×8 Multiply, 32-Bit Accumulate
- Low Power at High Speed
- ทำงานในช่วงแรงดัน 3.0 ถึง 5.25 V
- สามารถทำงานที่แรงดันต่ำสุดที่ 3.0 ถึง 5.25 V
- สามารถทำงานที่แรงดันต่ำสุดที่ 1.0 V โดยใช้วงจร Switch Mode Pump (SMP) ภายในชิพ
- 12 Analog PSoC Blocks รองรับการใช้งานด้านอนาล็อก เช่น
  - ADCs ความละเอียดสูงสุดถึง 14 บิต
  - DACs ความละเอียดสูงสุดถึง 9 บิต
  - วงจรเกนท์การขยาย (Programmable Gain Amplifiers)
  - วงจรฟิลเตอร์ และ วงจรคอมพาราเตอร์ (Programmable Filters and Comparators)
- 8 Digital PSoC Blocks รองรับการใช้งานทางดิจิทัล
  - Timers, Counters และ PWMs ขนาด 8 ถึง 32 บิต
  - CRC และ PRS โมดูล
  - UARTs แบบ Full-Duplex สูงสุด 2 ช่อง
  - SPI โมดูล เป็นได้ทั้งแบบ Master และ Slave
  - ดิจิตอลบล็อกต่างๆ สามารถเชื่อมต่อไปยังขาสัญญาณ GPIO ได้ทุกขาสัญญาณ
- สามารถกำหนดขนาดความถี่ของสัญญาณนาฬิกาภายในได้หลายระดับ
- สัญญาณนาฬิกาภายในขนาด 24/48 MHz ค่าความคลาดเคลื่อน +/-2.5%
- สามารถเลือกแหล่งกำเนิดสัญญาณ 24/48 MHz จากออสซิลเลเตอร์จากภายนอกได้สูงสุด 24 MHz
- มีแหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกาภายในให้กับ Watchdog และ Sleep
- หน่วยความจำโปรแกรมแบบ Flash Memory เฉพาะบางส่วนได้
- สามารถตั้งค่าระบบป้องกันข้อมูลได้ (Flash Security)
- หน่วยความจำ EEPROM (ใช้จาก Flash Memory)
- ขาสัญญาณ GPIO จำนวน 48 ขาสัญญาณ
- สามารถกำหนดคุณสมบัติของขาสัญญาณต่างๆ ได้ (GPIO Pin Configurations)
- GPIO สามารถจ่ายกระแสสูงสุดได้ถึง 25 mA
- สามารถกำหนด Drive Mode ของสัญญาณ GPIO ได้ เช่น Pull up, Pull down, High Z, Strong, หรือ Open Drain
- ขาสัญญาณอินพุตอนาล็อกสูงสุด 12 ขาสัญญาณ (จากขาสัญญาณของ GPIO)

- ขาสัญญาณอนาล็อกเอาพุตสูงสุด 4 ขาสัญญาณ (จากขาสัญญาณของ GPIO) จ่ายกระแสได้ถึง 40 mA
- สามารถกำหนดอินเทอร์รัพท์ได้ทุกขาสัญญาณของ GPIO
- I2C โหมด Slave , Master และ Multi-Master ความเร็วสูงสุด 400 kHz
- Watchdog และ Sleep Timer
- สามารถตั้งค่าระดับการตรวจจับแรงดันต่ำได้ (Low Voltage Detection)
- Integrated Supervisory Circuit
- On-chip Precision Volt Voltage Reference

## 2.8 มาตรฐานคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อระบบโซลาร์เซลล์กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

[14]

การต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยโซลาร์เซลล์เข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อระบบ (Point of Common Coupling; PCC) ได้ ประเทศผู้นำทางเทคโนโลยีนี้ได้จัดทำมาตรฐานเพื่อแนะนำเรื่องการเชื่อมต่อระบบโซลาร์เซลล์กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า และคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อระบบโซลาร์เซลล์กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าในประเทศของตนไว้ เช่น

### 2.8.1 IEEE Std. 929-2000; IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic

Systems เป็นมาตรฐานที่กำหนดขึ้นโดยสถาบัน IEEE ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ให้ข้อกำหนด

คุณภาพกำลังไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อระบบ ดังนี้

- ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ PCC ควรอยู่ในช่วง 88-110% ของแรงดันระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- แรงดันไฟกระพริบ (Voltage Flicker) เป็นผลของการรบกวนทางไฟฟ้าที่มีสาเหตุจากการกระเพื่อมของระดับแรงดันของระบบโซลาร์เซลล์ เวลาที่ควรตัดแรงดันไฟฟ้าออกจากระบบขึ้นกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ PCC แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การตอบสนองแรงดันผิดปกติ (Response to Abnormal Voltages)

| แรงดัน (ที่ PCC)         | เวลามากที่สุดในการตัดออกจากระบบ |
|--------------------------|---------------------------------|
| $V < 50\%$               | 6 cycles                        |
| $50\% \leq V < 88\%$     | 120 cycles                      |
| $88\% \leq V \leq 110\%$ | การทำงานปกติ                    |
| $110\% < V < 137\%$      | 120 cycles                      |
| $V \geq 137\%$           | 2 cycles                        |

- ความถี่ไฟฟ้า ต้องรักษาระดับความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในระดับ  $50 \pm 0.42$  Hz หากไม่สามารถรักษาระดับความถี่นี้ได้ จะต้องมียุกรณ์ตัดตอนอัตโนมัติ ตัดการจ่ายไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าภายใน 6 cycles
- รูปคลื่นผิดเพี้ยน การขนานระบบโซลาร์เซลล์จะต้องไม่ทำให้รูปคลื่นแรงดันและกระแสในระบบจำหน่ายไฟฟ้าผิดเพี้ยนมากเกินไปกว่ามาตรฐานที่กำหนดใน IEEE Std. 519-1992: IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems เป็นมาตรฐานที่แนะนำเรื่องการจัดการและควบคุมฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายไฟฟ้า แนวทางในการป้องกันและแก้ไขปัญหาที่เกิดจากฮาร์มอนิก และมีเนื้อหาครอบคลุมเรื่องค่าขีดจำกัด (Emission Limit) ซึ่งค่าขีดจำกัดที่แสดงในมาตรฐานควรใช้กับระบบที่มีการทำงานในสภาวะปกติ (นานกว่า 1 ชั่วโมง) แต่ถ้าการทำงานที่มีคาบเวลาการทำงานน้อยกว่านี้ ขีดจำกัดสามารถเพิ่มขึ้นจากเดิมได้อีก 50%
- ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ ระบบโซลาร์เซลล์ควรทำงานที่ pf มากกว่า 0.85 (Lagging or Leading) เมื่อเอาท์พุทมากกว่า 10% ของอัตราการผลิตไฟฟ้าของระบบโซลาร์เซลล์

### 2.8.2 JEAG 9701-1993; The Guideline for Grid Connected Dispersed Power Generators

เป็นมาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น ได้ให้ข้อกำหนดคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อระบบ ดังนี้

- แรงดันกระเพื่อม ต้องอยู่ภายในช่วงมาตรฐานของแหล่งจ่ายแรงดันดังนี้ ระบบ 100 V แรงดันต้องอยู่ในช่วง 95 V ถึง 107 V ส่วนระบบ 200 V แรงดันต้องอยู่ในช่วง 182 V ถึง 222 V
- ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ มากกว่า 0.85 (Lagging or Leading) ที่จุด PCC
- ฮาร์มอนิกกระแส น้อยกว่า 5% ของค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแส (THDc) และไม่เกิน 3% ของฮาร์มอนิกแต่ละอันดับ
- สัญญาณรบกวนความถี่สูง ที่เกิดจากการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ต้องน้อยกว่า 36.5dB ที่จุดห่างจากระบบโซลาร์เซลล์ 10 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8.3 ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรมของประเทศไทย โดยกฟผ. กฟน. และกฟภ.

### 2.8.3.1 ขอบเขต

ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฉบับนี้จัดทำ ขึ้นโดยมีขอบเขตดังนี้

2.8.3.1.1 เพื่อเป็นข้อกำหนดกฎเกณฑ์สำหรับขีดจำกัดและวิธีการตรวจสอบฮาร์มอนิก (Harmonics) สำหรับลูกค้าผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม

2.8.3.1.2 เพื่อกำหนดมาตรการให้ผู้ใช้ไฟฟ้าแก้ไขและปรับปรุงวงจรที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิกที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

2.8.3.1.3 ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Load) ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมสำหรับระบบไฟฟ้า ทั้งอุปกรณ์ชนิดเฟสเดียวและสามเฟส

### 2.8.3.2 วัตถุประสงค์

เพื่อกำหนดขีดจำกัดที่ยอมรับได้ของระดับความเพี้ยนของแรงดันที่เกิดจากฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage Distortion) และระดับความเพี้ยนของกระแสที่เกิดจากฮาร์มอนิก (Harmonic Current Distortion) ของอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม

### 2.8.3.3 มาตรฐานอ้างอิง

- Engineering Recommendation G.5/3 September 1976 The Electricity Council Chief Engineer' Conference "Limits for Harmonics in The United Kingdom Electricity Supply System"
- The State Energy Commission of Western Australia (SECWA) Part 2 : Technical Requirement
- IEC 1000 Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 4 : Testing and Measurement Techniques Section 7 : General Guide for Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation for Power Supply Systems and Equipment Connected thereto 1 PRC - PQG - 01 / 1998

### 2.8.3.4 นิยาม

2.8.3.4.1 ฮาร์มอนิก (Harmonic) - ส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency) ตัวอย่างเช่นส่วนประกอบที่มีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่หลักมูล จะเรียกว่า ฮาร์มอนิกที่ 2 (Second Harmonic)

2.8.3.4.2 ความเพี้ยนฮาร์มอนิก (Harmonic Distortion) - การเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นทางไฟฟ้า (Power Waveform) ไปจากรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave) โดยเกิดจากการรวมกันของค่าความถี่หลักมูล (Fundamental) และฮาร์มอนิกอื่นๆ เข้าด้วยกันของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3.4.3 ส่วนประกอบฮาร์โมนิก (Harmonic Component) - ส่วนประกอบของอันดับฮาร์โมนิก ที่มากกว่าหนึ่งของปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งแสดงในรูปของอันดับ (Order) และค่า RMS ของอันดับนั้น

2.8.3.4.4 ปริมาณรวมฮาร์โมนิก (Harmonic Content) - ปริมาณที่ได้จากการหักค่า DC และ ส่วนประกอบความถี่หลักมูลจากปริมาณเป็นคาบที่ไม่อยู่ในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ ( Sine Wave)

2.8.3.4.5 ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกเฉพาะ (Individual Harmonic Distortion ,IHD) หรือ อัตราส่วนฮาร์โมนิก (Harmonic Ratio) - อัตราส่วนระหว่างค่า RMS ของส่วนประกอบฮาร์โมนิก (Harmonic Component) ต่อค่า RMS ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล (Fundamental Component) เทียบเป็นร้อยละ

2.8.3.4.6 ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (Total Harmonic Distortion ,THD) - คืออัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของผลบวกกำลังสอง (Root-Sum-Square) ของค่า RMS ของส่วนประกอบฮาร์โมนิก ( Harmonic Component) กับค่า RMS ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล (Fundamental Component) เทียบเป็นร้อยละดังแสดงในสมการ (2.30) และ (2.31)

$$\text{THD(Voltage)} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots}}{V_1} \quad (2.30)$$

$$\text{THD(Current)} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots}}{I_1} \quad (2.31)$$

2.8.3.4.7 แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag or Voltage Dip) - แรงดันลดลงตั้งแต่ร้อยละ 10 ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ครึ่งไซเคิลจนถึงไม่กี่วินาที โดยเกิดเนื่องจากการเดินเครื่องของมอเตอร์ หรือโหลดขนาดใหญ่ หรือเกิดความผิดปกติ (Fault) ในระบบไฟฟ้า

2.8.3.4.8 จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling , PCC) - ตำแหน่งในระบบของการไฟฟ้าที่อยู่ใกล้กับผู้ใช้ไฟฟ้าที่สุด ซึ่งผู้ใช้ไฟฟ้าย่อยอื่นอาจต่อร่วมได้

2.8.3.4.9 เครื่องมือที่เคลื่อนย้ายได้ (Portable Tool) - อุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถยกหรือจับถือได้ในระหว่างการทำงานปกติ และใช้งานในช่วงเวลาสั้นๆ เท่านั้น ( 2-3 นาที )

2.8.3.4.10 อุปกรณ์สามเฟสสมดุล (Balanced Three-Phase Equipment) - อุปกรณ์ที่มีพิกัดกระแสในสายเส้นไฟ (Line) ของแต่ละเฟสต่างกันไม่เกินร้อยละ 20

### 2.8.3.5 ขีดจำกัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก

ตารางที่ 2.3 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้ารายใด ๆ ที่จุดต่อร่วม \*

| ระดับแรงดันไฟฟ้า<br>ที่จุดต่อร่วม (kV) | อันดับฮาร์มอนิกและขีดจำกัดของกระแส (A rms) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |    |     |    |    |  |
|--|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|----|----|--|
|  | 2  | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15 | 16 | 17  | 18 | 19 |  |
| 0.400                                  | 48   | 34  | 22  | 56  | 11  | 40  | 9   | 8   | 7   | 19  | 6   | 16  | 5   | 5  | 5  | 6   | 4  | 6  |  |
| 11 and 12                              | 13   | 8   | 6   | 10  | 4   | 8   | 3   | 3   | 3   | 7   | 2   | 6   | 2   | 2  | 2  | 1   | 1  |    |  |
| 22 , 24 and 33                         | 11   | 7   | 5   | 9   | 4   | 6   | 3   | 2   | 2   | 6   | 2   | 5   | 2   | 1  | 1  | 2   | 1  | 1  |  |
| 69                                     | 8.8  | 5.9 | 4.3 | 7.3 | 3.3 | 4.9 | 2.3 | 1.6 | 1.6 | 4.9 | 1.6 | 4.3 | 1.6 | 1  | 1  | 1.6 | 1  | 1  |  |
| 115 and above                          | 5  | 4   | 3   | 4   | 2   | 3   | 1   | 1   | 1   | 3   | 1   | 3   | 1   | 1  | 1  | 1   | 1  | 1  |  |

\* : ยอมให้นำค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 10 หรือ 0.5 A (ค่าที่มากกว่าค่าใดค่าหนึ่ง) มาใช้กับขีดจำกัดของกระแสแต่ละอันดับได้ไม่เกิน 2 อันดับ

ตารางที่ 2.4 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันสำหรับผู้ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้ารายใด ๆ ที่จุดต่อร่วม (รวมทั้งระดับความเพี้ยนที่มีอยู่เดิม)

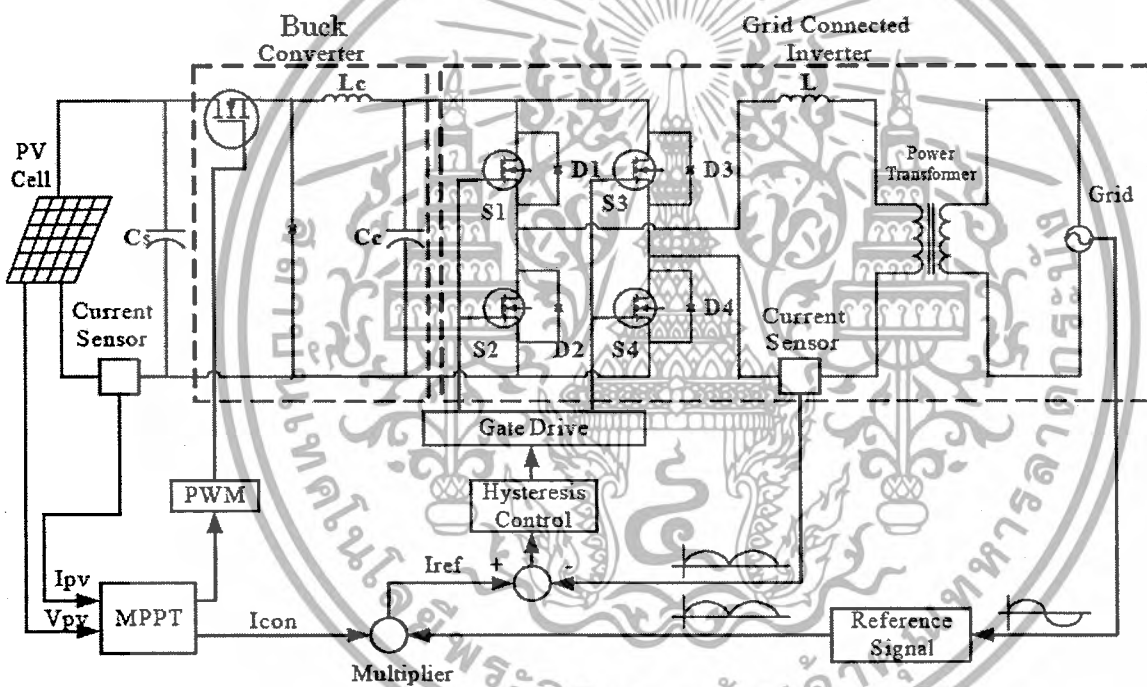
| ระดับแรงดันไฟฟ้า<br>ที่จุดต่อร่วม (kV) | ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม<br>ของแรงดัน (%) | ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดัน<br>แต่ละอันดับ (%) |           |
|--|--|--|-----------|
|  |  | อันดับคู่  | อันดับคี่ |
|  | 0.400                                      | 5  | 4         |
| 11 , 12 , 22 and 24                    | 4  | 3  | 1.75      |
| 33                                     | 3  | 2  | 1         |
| 69                                     | 2.45                                       | 1.63   | 0.82      |
| 115 and above                          | 1.5  | 1  | 0.5       |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนต่างๆ ของงานวิจัยโดยแบ่งเป็น 4 ส่วนคือ การจำลองระบบด้วย MATLAB/SIMULINK การออกแบบฮาร์ดแวร์ และการออกแบบส่วนควบคุม โดยระบบเชื่อมต่อกิตแสดงดังรูปที่ 3.1 การทำงานของระบบเชื่อมต่อกิตจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกจะเป็นส่วนการหาค่ากำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคการเพิ่มค่าความนำไปควบคุม วิศวกรรมการทำงานของสวิตช์ของตัวแปลงผันแบบทอนระดับ และส่วนที่สองจะเป็นส่วนการสร้างกระแสรูปคลื่นไซน์เพื่อจ่ายเข้าระบบกิตโดยใช้การควบคุมแบบฮีสเทอรีซิสไปควบคุมการทำงานของสวิตช์อินเวอร์เตอร์

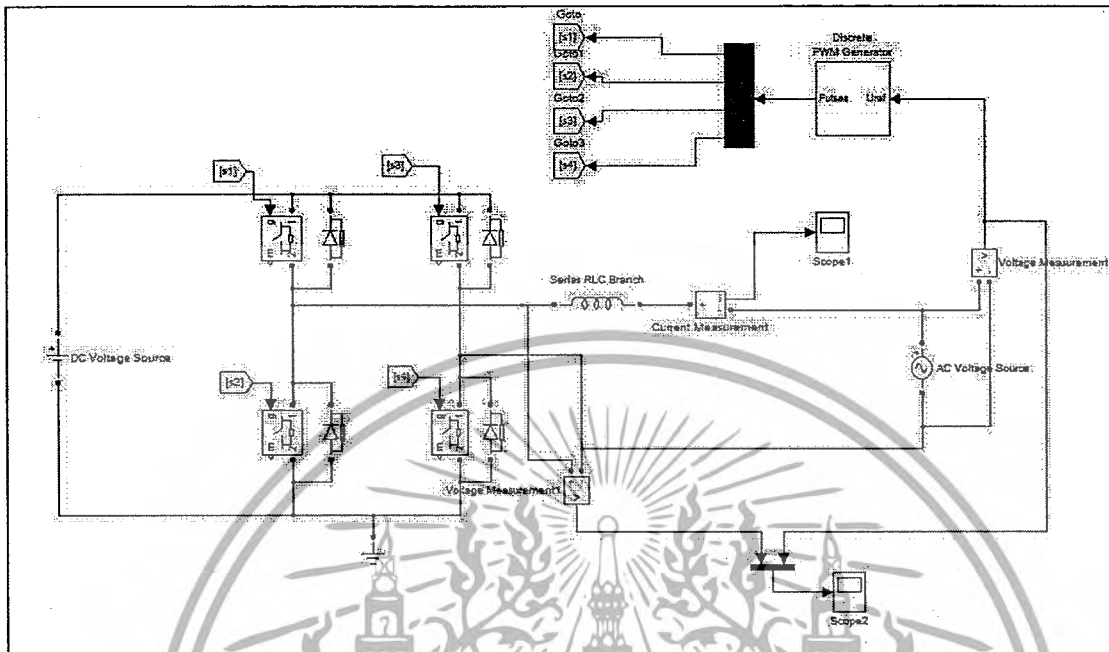


รูปที่ 3.1 ระบบเชื่อมต่อกิต [11]

#### 3.1 แบบจำลองระบบ

แบบจำลองระบบเชื่อมต่อกิตในรูปที่ 3.1 จะใช้โปรแกรม MATLAB SIMULINK ในการจำลองระบบ แสดงดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แบบจำลองระบบเชื่อมต่อกริด

### 3.1.1 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

การจำลองคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้สมการ (2.1), (2.2) และ (2.3) จากสมการพบว่ามีค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าคือค่า Ideality Factor ( $A$ ) ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_r$ ) และกระแสอิ่มตัวย้อนกลับที่อุณหภูมิอ้างอิง ( $I_{r0}$ ) การหาค่าตัวแปรเหล่านี้จะใช้สมการไดโอดในสมการ (3.1) และข้อมูลของเซลล์แสงอาทิตย์คือค่ากระแสลัดวงจร ( $I_{SC}$ ) แรงดันขณะเปิดวงจร ( $V_{OC}$ ) แรงดันและกระแสที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด ( $V_{MAX}, I_{MAX}$ ) โดยค่าที่ใช้จะเป็นค่าต่อเซลล์ จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์เปิดวงจรปริมาณกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์สร้างขึ้นทั้งหมดจะไหลผ่านตัวไดโอดดังสมการ (3.2)

$$I_D = I_r \left[ \exp\left(\frac{qV}{AKT}\right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

$$I_{SC} = I_r \left[ \exp\left(\frac{qV_{OC}}{AKT}\right) - 1 \right] \quad (3.2)$$

ที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดกระแสที่ผ่านไดโอดคือ  $I_D = I_{SC} - I_{MAX}$  จะได้สมการไดโอดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_D = I_r \left[ \exp\left(\frac{qV_{MAX}}{AKT}\right) - 1 \right] \quad (3.3)$$

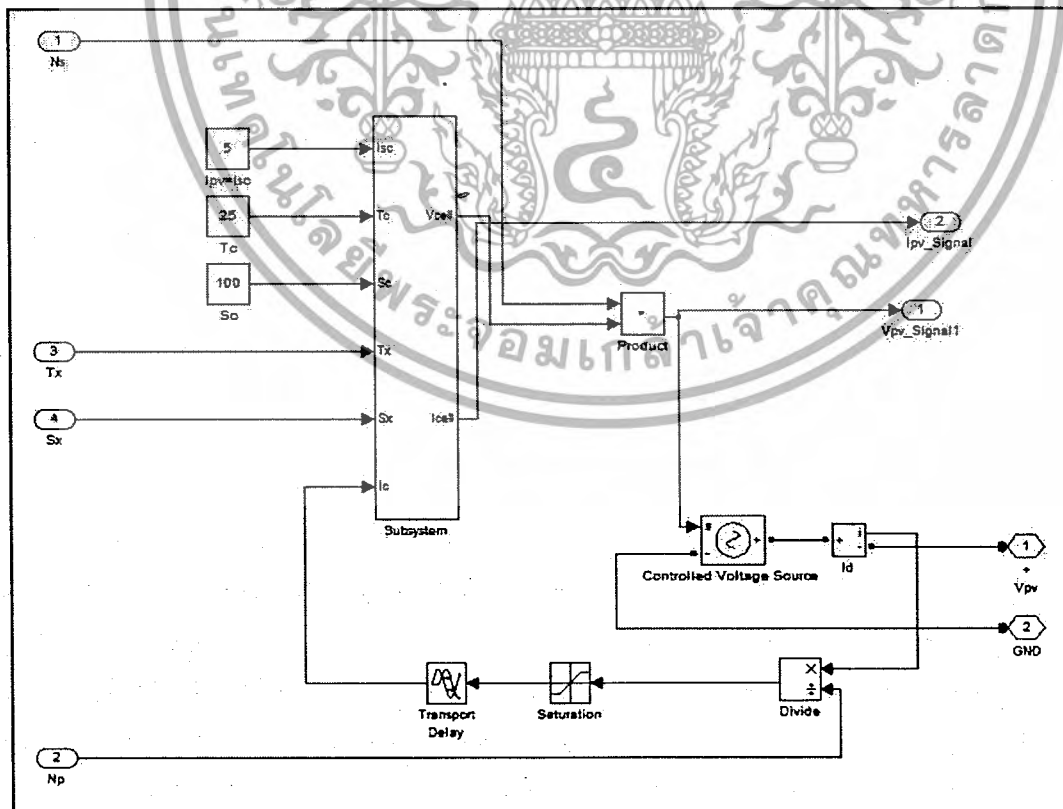
จากสมการ (3.3) จัดสมการใหม่ได้เป็น

$$A = \frac{qV_{MAX}}{KT} \times \frac{1}{\ln\left(\frac{I_D + I_r}{I_r}\right)} \quad (3.4)$$

แทนสมการ (3.4) ในสมการ (3.2) จะได้

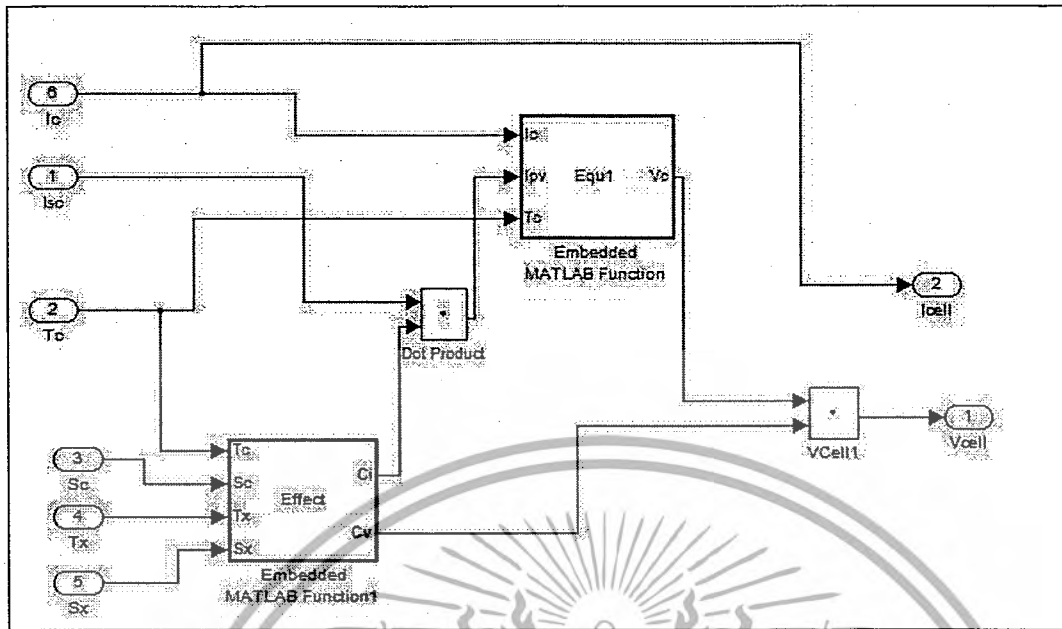
$$I_r \left(\frac{V_{OC}}{V_{MAX}}\right) \times (I_D + I_r) \left(\frac{V_{OC}}{V_{MAX}}\right) - I_{SC} = 0 \quad (3.5)$$

จากนั้นใช้วิธีลองผิดลองถูก (Trial & Error) โดยการแทนค่า  $I_r$  เพื่อแก้สมการ (3.5) เมื่อได้ค่า  $I_r$  นำกลับไปแทนในสมการ (2.2) และ (3.4) เพื่อหาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับที่อุณหภูมิอ้างอิงและค่า Ideality Factor ตามลำดับ จากแบบจำลองที่ได้ ( รูปที่ 3.3 (ก), (ข) ) นำมาพล็อตกราฟกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น BS-40 ดังรูปที่ 3.4



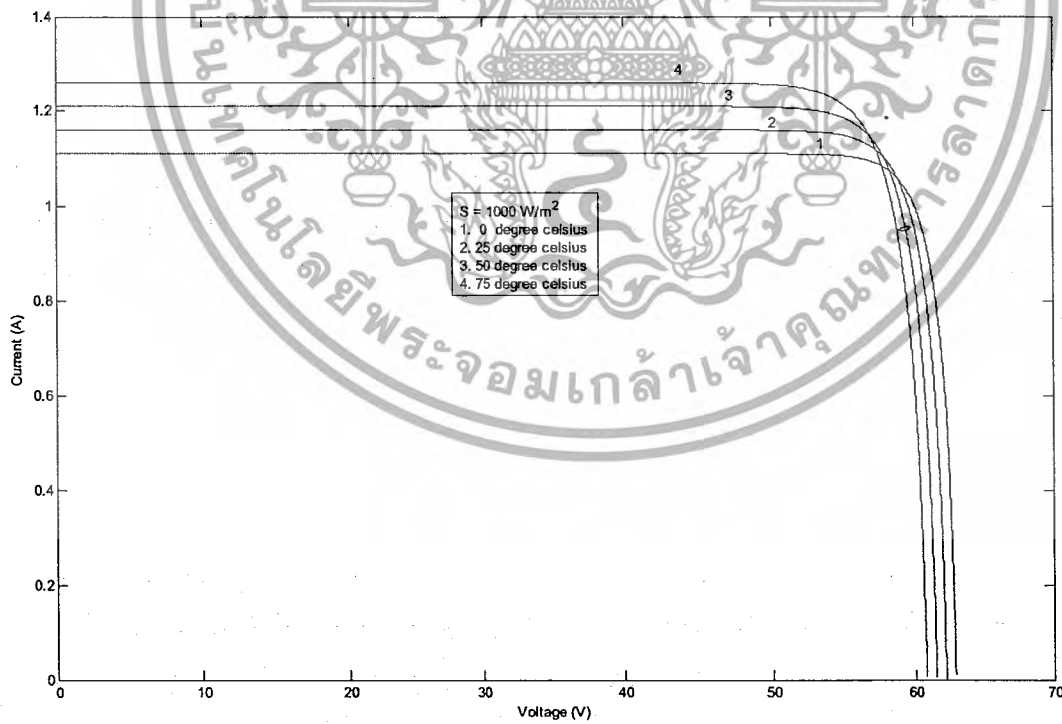
(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 3.3 (ก) และ (ข) แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

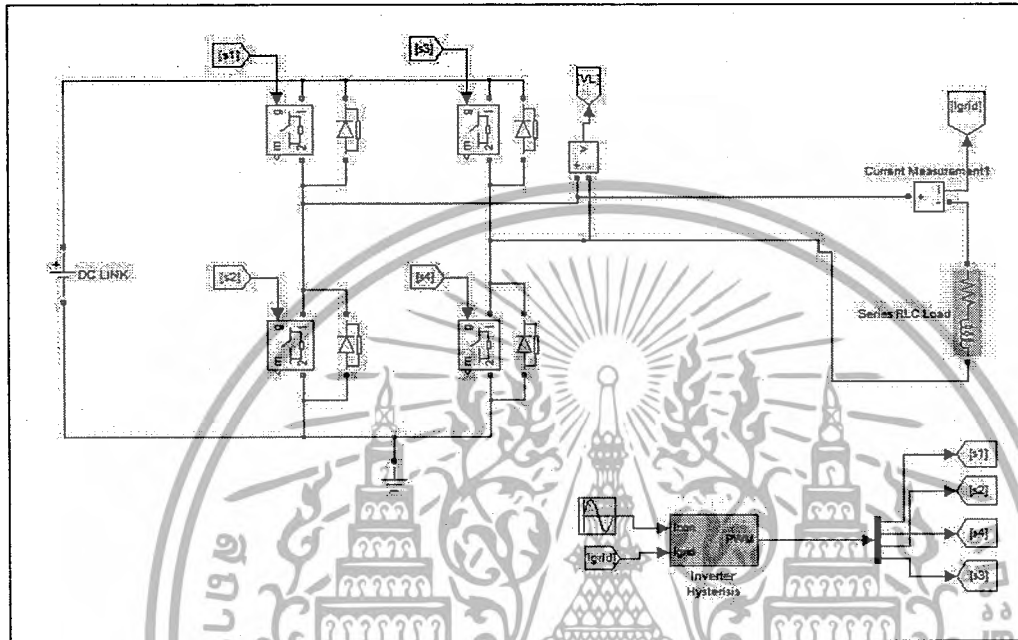


รูปที่ 3.4 กราฟกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น BS-40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์จะใช้สำหรับแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ แบบจำลองแสดงดังรูปที่ 3.5 ในการจำลองการทำงานจะสั่งให้สวิตช์ทำงานเป็นคู่โดยในช่วงแรงดันบวกสวิตช์ S1, S4 ทำงาน ส่วนในช่วงแรงดันลบสวิตช์ S2, S3 ทำงาน เพื่อสร้างกระแสรูปคลื่นไซน์จ่ายเข้าระบบกริด



รูปที่ 3.5 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

## 3.2 การออกแบบฮาร์ดแวร์

### 3.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (PV Cells)

ในปฏิญานิพนธ์นี้จะใช้เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น BS-40 ของบริษัทบางกอกโซลาร์ จำนวน 8 แผง มาเชื่อมต่อกันดังรูปที่ 3.7 โดยแต่ละโมดูลจะมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ปริมาณแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิ  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ดังนี้

|   |        |
|---|--------|
| กำลังสูงสุดที่จ่ายได้ ( $P_{MAX}$ )       | 40 W   |
| แรงดันที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด ( $V_{MAX}$ ) | 44.8 V |
| กระแสที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด ( $I_{MAX}$ )  | 0.9 A  |
| แรงดันขณะเปิดวงจร ( $V_{OC}$ )            | 62.2 V |
| กระแสลัดวงจร ( $I_{SC}$ )                 | 1.16 A |

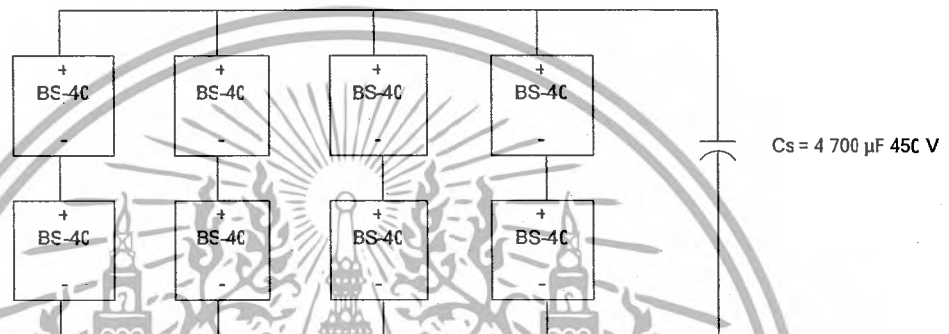
จากข้อมูลของเซลล์แสงอาทิตย์จะได้คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานดังนี้

|   |        |
|---|--------|
| กำลังสูงสุดที่จ่ายได้ ( $P_{MAX}$ )       | 320 W  |
| แรงดันที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด ( $V_{MAX}$ ) | 89.6 V |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|  |         |
|--|---------|
| กระแสที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด ( $I_{MAX}$ ) | 3.6 A   |
| แรงดันขณะเปิดวงจร ( $V_{OC}$ )           | 124.4 V |
| กระแสลัดวงจร ( $I_{SC}$ )                | 4.64 A  |

นำตัวเก็บประจุขนาด 4,700  $\mu\text{F}$  มาต่อขนานกับเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อกรองระลอกคลื่นแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนเข้าตัวแปลงผันแบบทอนระดับดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การต่อเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 320 วัตต์

### 3.2.2 ตัวแปลงผันแบบทอนระดับ [11]

ตัวแปลงผันแบบทอนระดับออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ 20 kHz 320 W แรงดันและกระแสอินพุตมีค่าเท่ากับแรงดันและกระแสที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์คือ 89.6V และ 3.6 A โดยกำหนดแรงดันไฟตรงเอาต์พุตเท่ากับ 80 V เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสเข้ากับระบบกริดที่แรงดันไฟสลับขนาด 220 V ค่าระลอกคลื่นกระแสของตัวเหนี่ยวนำ ( $L_c$ ) เท่ากับ 0.1 A และค่าระลอกคลื่นแรงดันของตัวเก็บประจุ ( $C_c$ ) เท่ากับ 0.1 V จากข้อกำหนดนี้มาคำนวณหาขนาดตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุของตัวแปลงผันแบบทอนระดับได้ดังนี้

1. คำนวณหาวัฏจักรการทำงานของสวิตช์จากสมการ (2.8) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_a = DV_s$$

$$80 = D \times 89.6$$

$$\therefore D = 0.89$$

ในการใช้งานจริงตัวเหนี่ยวนำจะใช้ขนาด 130 mH ตัวเก็บประจุใช้ขนาด 6800  $\mu$ F 450 V เพื่อกรองให้แรงดันเอาต์พุตของตัวแปลงผันแบบทอนระดับเรียบมากขึ้น สำหรับสวิตช์ (SB) จะใช้ MOSFET IRFP460PBF ส่วนไดโอดใช้ MUR860 ซึ่งเป็นไดโอดแบบอุลตราฟาสต์-รีคัฟเวอรี

### 3.2.3 อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส

อินเวอร์เตอร์ 1 เฟสที่ใช้ในปฏิญานินพจน์นี้เป็นอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งประกอบด้วยสวิตช์ 4 ตัว แบ่งเป็น 2 กิ่ง (Branch) โดยแต่ละกิ่งประกอบด้วยสวิตช์ 2 ตัวที่ทำงานไม่พร้อมกันเพื่อป้องกันการเกิดลัดวงจร ในที่นี้จะใช้ไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistor: IGBT) เบอร์ HGTC40N60A4 เป็นสวิตช์โดยต่อความต้านทาน 100 k $\Omega$  คร่อมขาเกตกับขาอีมีตเตอร์เพื่อป้องกันการทำงานของสวิตช์หากยังไม่ได้รับสัญญาณขับเนื่องจากผลของตัวเก็บประจุแฝงที่คร่อมขาเกตกับขาอีมีตเตอร์

### 3.2.4 ตัวแปลงค่าสัญญาณอนาล็อกเป็นค่าสัญญาณดิจิทัล

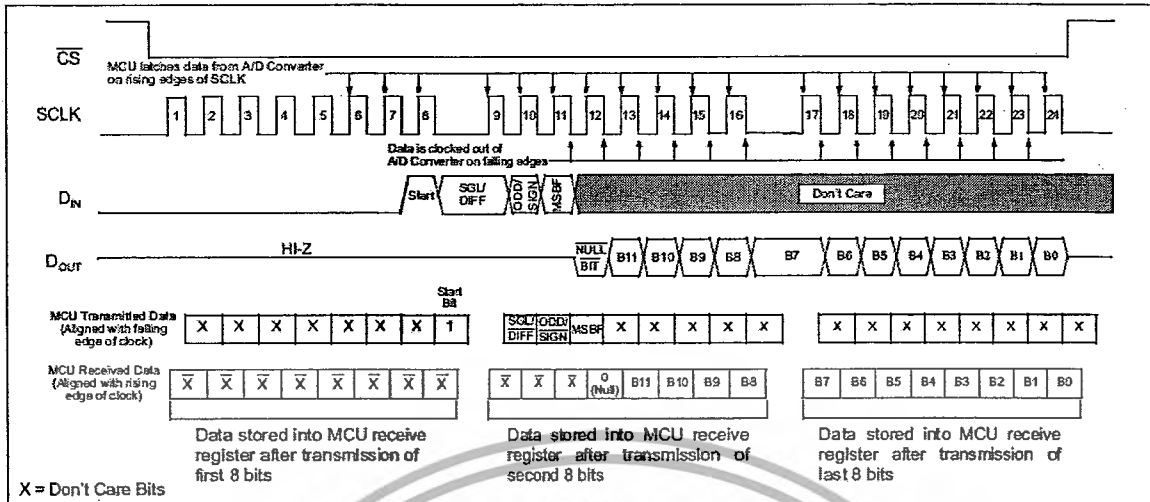
ตัวแปลงค่าสัญญาณอนาล็อกเป็นค่าสัญญาณดิจิทัลที่ใช้ในปฏิญานินพจน์นี้ ใช้ไอซีเบอร์ MCP3202 มีความละเอียดในการแปลงเป็นค่าดิจิทัลขนาด 12 bit มีค่า sampling rate เท่ากับ 100 ksps ที่แรงดัน  $V_{DD}$  เท่ากับ 5V และใช้เวลาในการแปลงสัญญาณ 6.67  $\mu$ s

สามารถโปรแกรมเลือกของสัญญาณได้ มีการ Interface ด้วยการสื่อสารแบบ SPI โครงสร้าง bit สำหรับ MCP3202 ดังตารางที่ 3.1 และมี Timing Diagram ดังรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.1 โครงสร้าง bit สำหรับ MCP3202

|                          | Config Bits |              | Channel Selection |     | GND |
|--------------------------|-------------|--------------|-------------------|-----|-----|
|                          | Sg/<br>Diff | Odd/<br>sign | 0                 | 1   |     |
| Single Ended Mode        | 1           | 0            | +                 | -   | -   |
|                          | 1           | 1            | -                 | +   | -   |
| Pseudo-Differential Mode | 0           | 0            | IN+               | IN- |     |
|                          | 0           | 1            | IN-               | IN+ |     |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### รูปที่ 3.7 การติดต่อแบบ SPI

#### 3.2.5 ตัววัดสัญญาณอนาล็อก (Analog Sensors)

ตัววัดสัญญาณอนาล็อกที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะประกอบด้วย HCPL-788J และ ACS712ELCTR-20A-T

##### 3.2.5.1 HCPL-788J (Isolation Amplifier with Short Circuit and Overload Detection)

[11]

HCPL-788J จะเป็นตัววัดสัญญาณอนาล็อกที่แยกการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของสัญญาณอินพุต และสัญญาณเอาต์พุต โดยมีฟังก์ชันการทำงานดังรูป 3.9 เมื่อได้รับสัญญาณอนาล็อก สัญญาณจะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบซิกมา-เดลต้า ( $\sum \Delta ADC$ )ที่มีความถี่ในการแซมปลิงสัญญาณ 6 ล้านครั้งต่อวินาทีและส่งสัญญาณที่แปลงได้ผ่านตัวเข้ารหัสสัญญาณเพื่อส่งสัญญาณอินพุตผ่าน LED ก่อนจะถอดรหัสเพื่อแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกโดยสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมี 3 แบบคือ

1. สัญญาณ  $V_{out}$  ค่าแรงดันที่ได้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัญญาณอินพุตดังสมการ 3.7

$$V_{out} = \frac{V_{ref} \times (V_{IN+} - V_{IN-})}{504mV} + \frac{V_{ref}}{2} \quad (3.7)$$

จากสมการ (3.7) พบว่า

- ถ้าสัญญาณทางด้านอินพุตมีค่าบวกแรงดันเอาต์พุตจะมีค่ามากกว่า  $\frac{V_{ref}}{2}$
- ถ้าสัญญาณทางด้านอินพุตมีค่าเป็นศูนย์แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับ  $\frac{V_{ref}}{2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ถ้าสัญญาณทางต้านอินพุตมีค่าลบแรงดันเอาต์พุตจะมีน้อยกว่า  $\frac{V_{ref}}{2}$

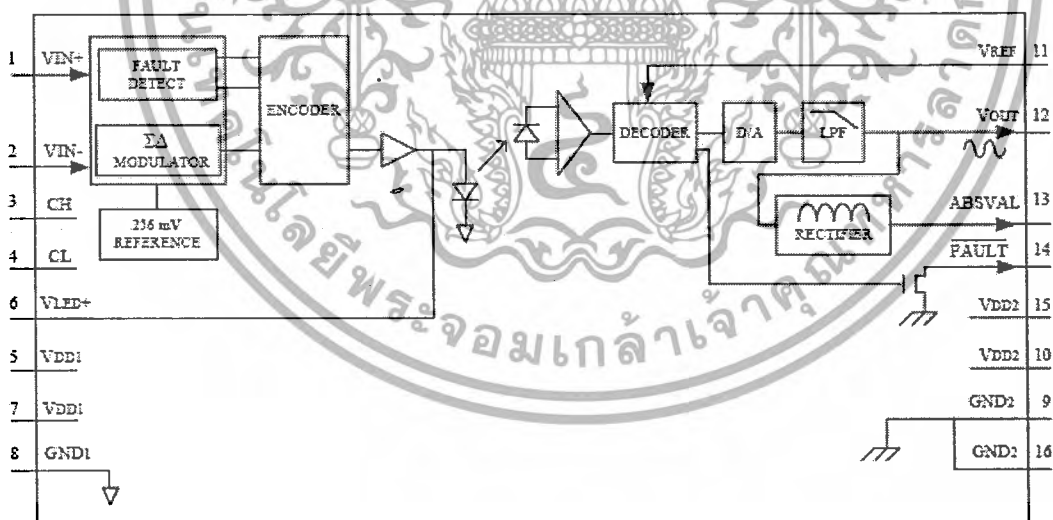
2. สัญญาณ ABSVAL จะแสดงค่าสัมบูรณ์ของสัญญาณอินพุต โดยแรงดันเอาต์พุตหาได้ดังนี้

$$ABSVAL = \frac{2 \times V_{ref} \times (V_{IN+} - V_{IN-})}{504mV} \quad (3.8)$$

จากสมการ 3.8 พบว่าเมื่อสัญญาณอินพุตเท่ากับศูนย์ค่าแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และแรงดันเอาต์พุตจะค่าเพิ่มขึ้นจนเท่ากับแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ  $\pm 256mV$

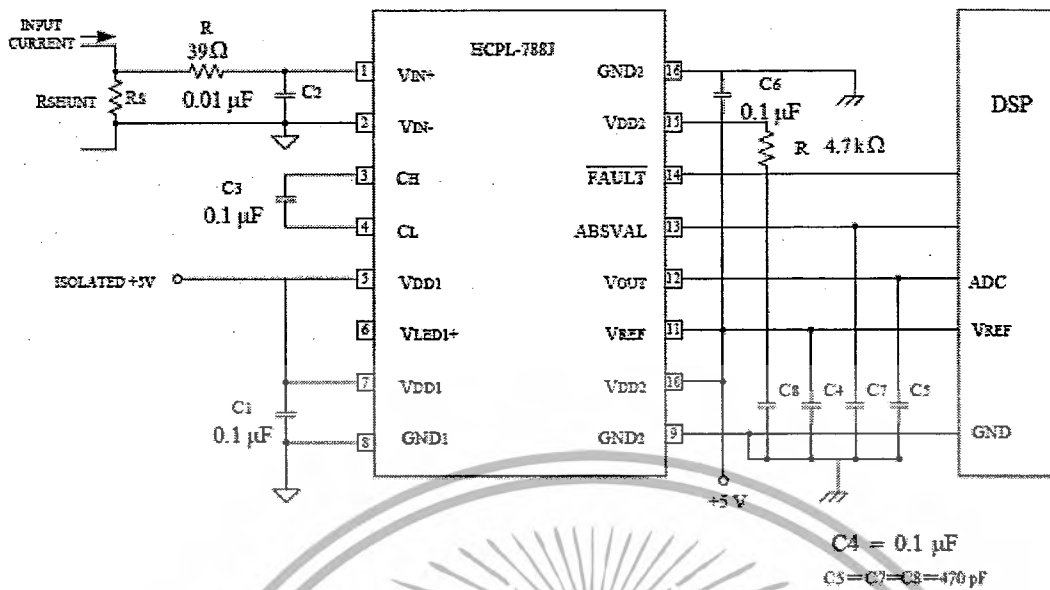
3. สัญญาณ FAULT จะเป็นสัญญาณป้องกันการลัดวงจร โดยจะส่งสัญญาณเมื่อสัญญาณอินพุตมีค่ามากกว่า  $\pm 256mV$

ในปริภูมิงานนี้จะใช้ HCPL-788J วัดค่าแรงดันและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{PV}$  และ  $I_{PV}$ ) ผ่านช่องสัญญาณ  $V_{out}$  โดยใช้แรงดันอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) 5 V ดังวงจรในรูปที่ 3.8 ซึ่งสัญญาณอินพุตจะวัดจากแรงดันตกคร่อม  $R_s$  โดยค่าแรงดันอินพุตที่ HCPL-788J อ่านค่าได้ถูกต้องอย่างเป็นเชิงเส้นจะอยู่ในช่วง  $\pm 200mV$



รูปที่ 3.8 ฟังก์ชันการทำงานของ HCPL-788J

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 วงจรใช้งานของ HCPL-788J

### 1. การวัดแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{PV}$ )

เนื่องจากแรงดันขณะเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่า 248.8 V ในที่นี้จะออกแบบให้ HCPL-788J วัดค่าแรงดันสูงสุดที่ 250 V ซึ่งจะต้องแบ่งแรงดันเพื่อให้แรงดันตกคร่อม R1 ที่ใช้เป็นแรงดันอินพุต ( $V_{sense}$ ) ให้กับ HCPL-788J มีค่าอยู่ในช่วง 0-200 mV โดยตำแหน่งตัวต้านทาน R1 แสดงดังรูปที่ 3.10 โดยตัวต้านทาน R1 สามารถหาค่าได้จากสมการแบ่งแรงดัน

$$V_{sense} = \frac{R1}{R + R1} \times V_{PV}$$

$$200mV = \frac{R1}{R + R1} \times 250 \quad (3.9)$$

เลือก R = 100 kΩ จะได้ R1 = 80 Ω ดังนั้นเลือกใช้ R1 = 80 Ω ซึ่งจะได้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ช่องสัญญาณ  $V_{out}$  อยู่ในช่วงแรงดัน 2.5-4.48 V

### 2. การวัดกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{PV}$ )

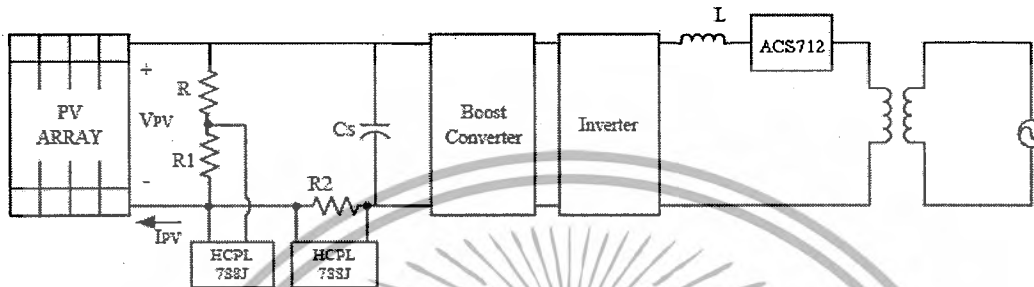
เนื่องจากกระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่า 3.6 A ในที่นี้จะออกแบบให้ HCPL-788J วัดค่ากระแสได้ 10 A ดังนั้นตัวต้านทาน R2 สำหรับวัดกระแสหาได้จาก

$$V_{sense} = I_{PV} \times R2$$

$$200mV = 10 \times R2 \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

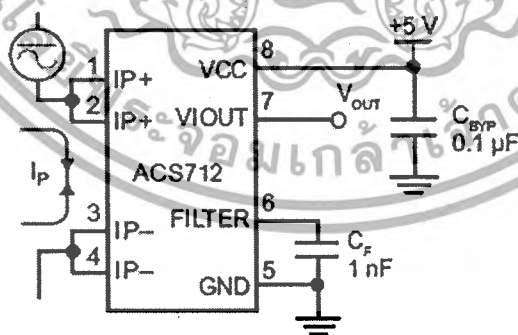
จากสมการ (3.10) จะได้ค่า  $R_2$  เท่ากับ  $0.02 \Omega$  โดยตำแหน่งของ  $R_2$  แสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งจะได้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ของสัญญาณ  $V_{out}$  อยู่ในช่วงแรงดัน 2.5-4.48 V แต่เนื่องจาก  $R_2 = 0.02 \Omega$  หาซื้อไม่ได้ จึงนำตัวต้านทานขนาด  $0.1 \Omega$  มาต่อขนานกัน 5 ตัว ซึ่งสามารถใช้แทนกันได้



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งตัววัดสัญญาณอนาล็อก

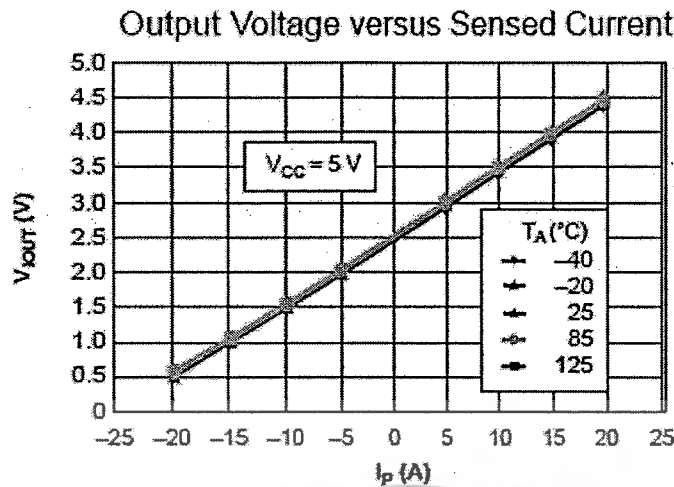
### 3.2.5.2 ACS712ELCTR-20A-T

ACS712ELCTR-20A-T เป็นตัววัดกระแสโดยใช้หลักการ Hall Effect ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ความผิดพลาดในการวัดสัญญาณเท่ากับ 1.5% ที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  สามารถวัดกระแสได้สูงสุด  $\pm 20\text{A}$  ค่ากระแสที่วัดได้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันเอาต์พุตของตัววัด ดังแสดงในกราฟรูปที่ 3.12 โดยค่าแรงดันเอาต์พุตของตัววัดอยู่ที่ 2.5V ซึ่งหมายความว่าค่ากระแสที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 0 A



รูปที่ 3.11 การวัดสัญญาณของ ACS712ELCTR-20A-T

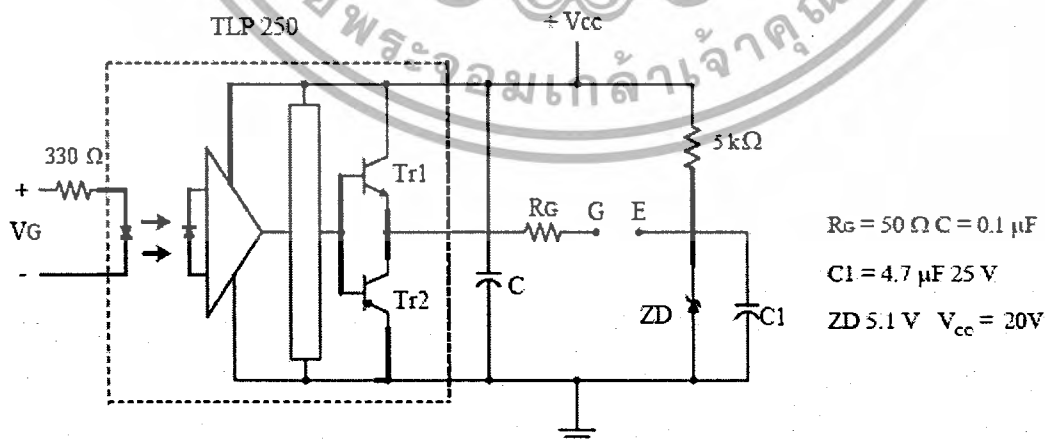
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบค่ากระแสที่วัดได้กับแรงดันเอาต์พุตของตัววัด

### 3.2.6 วงจรขับ (Gate Drive Circuit) [11]

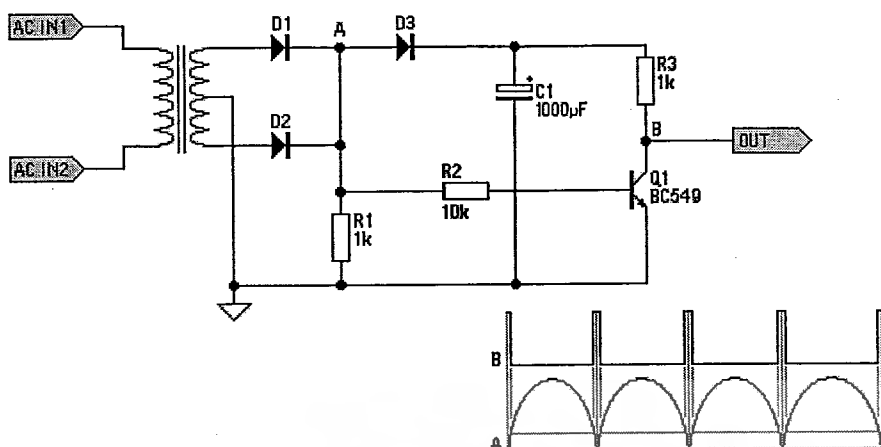
วงจรถับที่ใช้ในปริภูมิงานนี้จะใช้ไอซี TLP250 เป็นไอซีที่แยกส่วนของสัญญาณขับกับส่วนที่ใช้ขับสวิตช์สามารถทำงานที่ความถี่สูงสุด 25 kHz ดังวงจรถับในรูปที่ 3.13 ในส่วนของสัญญาณขับจะรับสัญญาณขนาด 5 V มาจากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลต่อผ่านตัวต้านทานขนาด 330  $\Omega$  เพื่อจำกัดกระแสเข้า TLP250 ในส่วนที่ใช้ขับสวิตช์จะต่อแหล่งจ่ายแรงดันภายนอกขนาด +20 V ผ่านขาคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Tr1 ที่ขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Tr1 จะต่อตัวต้านทานขนาด 50  $\Omega$  เข้ากับขาเกตของมอสเฟต และต่อตัวต้านทานขนาด 10  $\Omega$  สำหรับไอซีบีที เพื่อกำหนดช่วงเวลาต่อวงจร (Turn on time) และช่วงเวลาตัดวงจร (Turn off time) ของไอซีบีที และต่อซีเนอร์ไดโอดเข้าที่ขาอิมิตเตอร์ของไอซีบีที เพื่อสร้างแรงดัน -5 V ในช่วงตัดวงจรของสวิตช์เพื่อช่วยให้สวิตช์หยุดทำงานเร็วขึ้น



รูปที่ 3.13 วงจรถับสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 3.15 วงจร Zero Crossing

### 3.2.8 วงจร Dead Time [12]

เนื่องจากการทำงานของไอจีบีที อาจมีการที่สวิตช์ในกิ่งเดียวกันทำงานพร้อมกัน ส่งผลทำให้เกิดการลัดวงจรภายในกิ่งเดียวกัน และทำให้ไอจีบีทีกิ่งนั้นเสียหายได้ ในปริณญา นิพนธ์นี้ได้ใช้ไอซี Schmitt Trigger NOT gate เบอร์ CD40106 สำหรับการสร้างวงจร Dead Time แสดงไว้ในรูปที่ 3.16

สามารถออกแบบวงจร Dead Time ได้ดังนี้

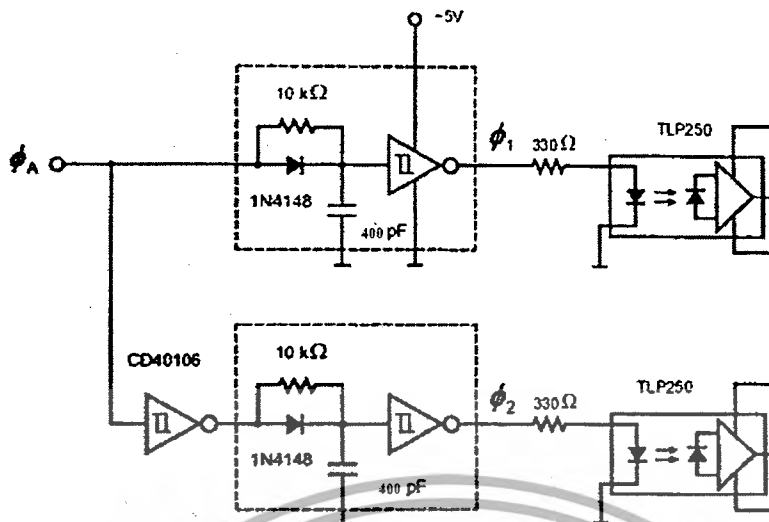
ให้ช่วงเวลา Dead Time (DT) = 4 µs ,  $R_T = 10\text{ k}\Omega$  ,  $V_{T-} = 1.64\text{ V}$  และ  $V_{OH} = 5\text{ V}$  จะได้

$$C_T = \frac{-DT}{R_T \ln\left(\frac{V_{T-}}{V_{OH} - 0.6\text{ V}}\right)} \quad (3.13)$$

$$C_T = \frac{-4 \times 10^{-6}}{10 \times 10^3 \ln\left(\frac{1.64\text{ V}}{5\text{ V} - 0.6\text{ V}}\right)}$$

$$= 400\text{ pF}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

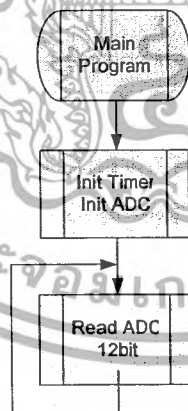


รูปที่ 3.16 วงจรเดดไทม์สำหรับสวิทช์กึ่งเดียวกัน

### 3.3 การควบคุม [6, 8, 9, 11]

โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงานจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

1. โปรแกรมหลัก (Main Program) จะเป็นส่วนกำหนดค่าเริ่มต้นการทำงานของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล กำหนดค่าตัวแปร และเรียกไฟล์ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโปรแกรมใช้งาน ดังแผนภาพ รูปที่ 3.17

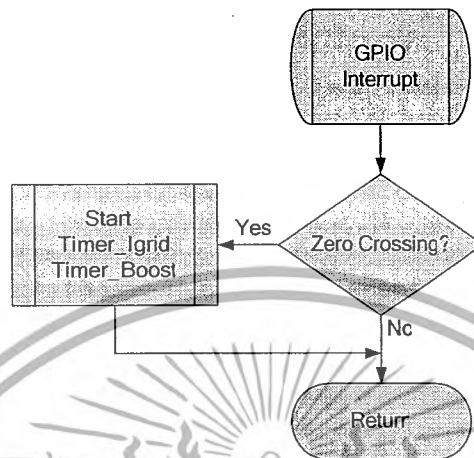


รูปที่ 3.17 โครงสร้างโปรแกรมหลัก

2. โปรแกรมในส่วนการอินเทอร์รัพ (Interrupt Program) จะมีอยู่ 3 ส่วนด้วยกัน ได้แก่

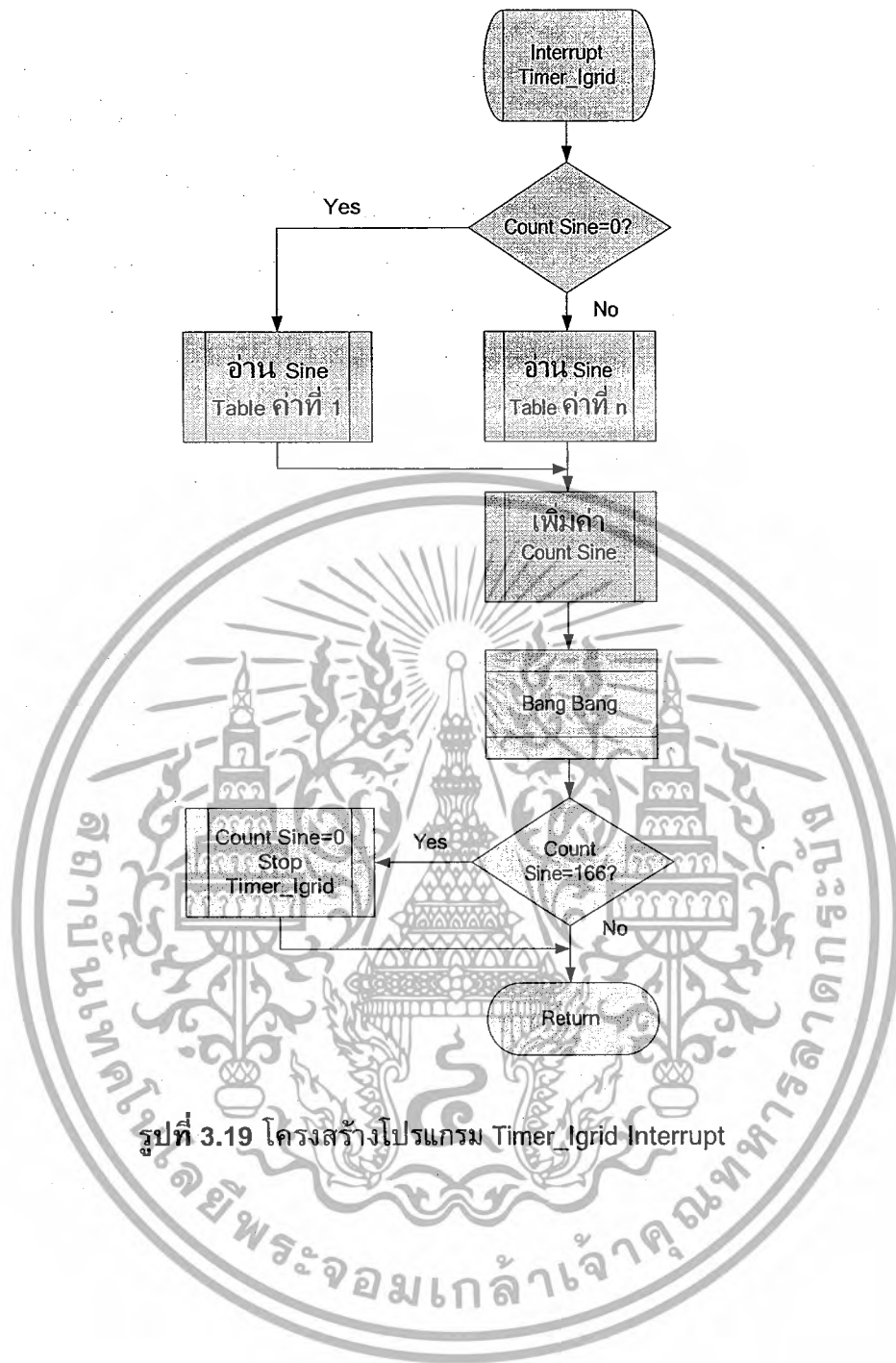
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 GPIO Interrupt เป็นการอินเทอร์รัพของสัญญาณที่มาจากวงจร Zero Crossing ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ระบบสามารถเชื่อมต่อกับกริดของการไฟฟ้าได้ และเป็นตัวสั่งให้ Timer\_Igrid และ Timer\_Boost เริ่มทำงาน ดังแผนภาพ รูปที่ 3.18



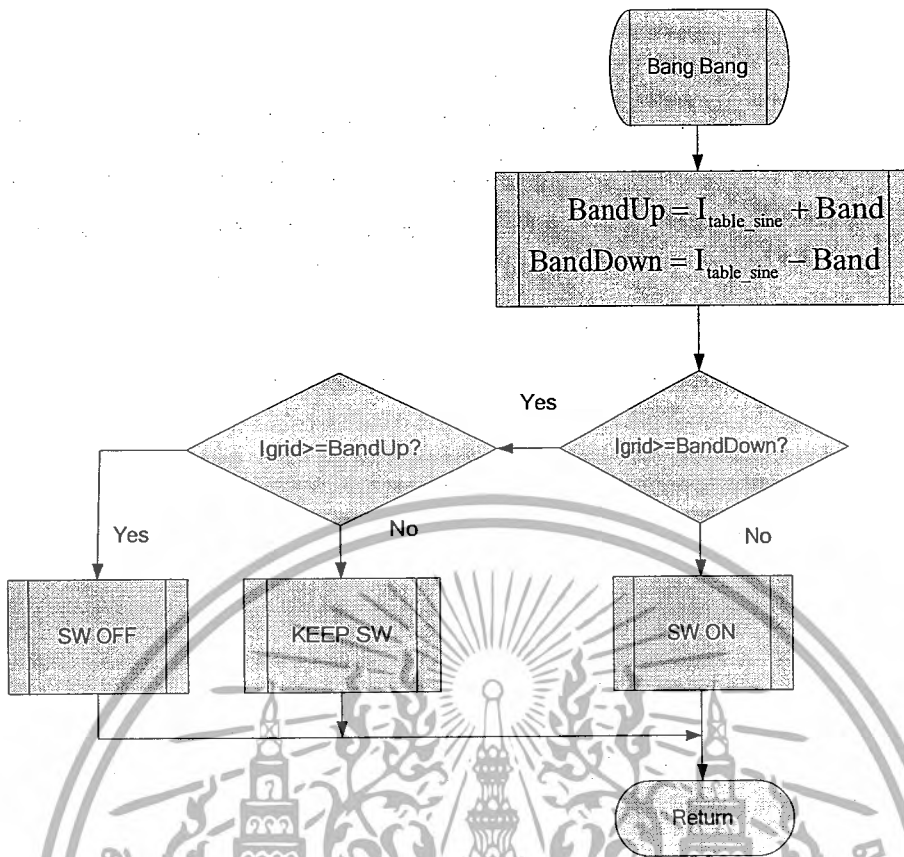
รูปที่ 3.18 โครงสร้างโปรแกรม GPIO Interrupt

2.2 Timer\_Igrid Interrupt เป็นการอินเทอร์รัพของไทเมอร์ทุกๆ 120  $\mu$ s เพื่อสร้างกระแสเอาต์พุตให้เป็นชานส์ ด้วยการเปิดตารางค่าชานส์ ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 - 166 ค่า ดังแผนภาพ รูปที่ 3.19 ซึ่งต้องทำการสวิตซ์ซึ่งที่อินเวอร์เตอร์แบบ Bang-Bang ดังแผนภาพ รูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 โครงสร้างโปรแกรม Timer\_Igrid Interrupt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



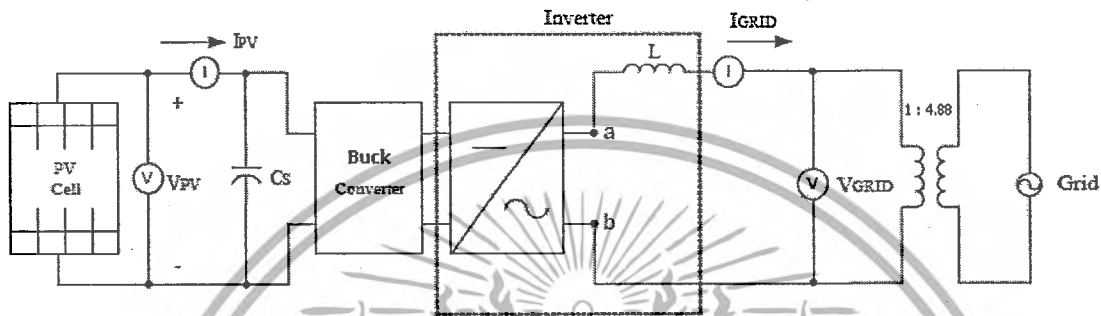
รูปที่ 3.20 โครงสร้างโปรแกรม Bang Bang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึง ผลการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า โดยทำการทดลองในแต่ละช่วงเวลาตั้งแต่ เวลา 11.00 น. ถึง 14.00 น.



รูปที่ 4.1 การวัดแรงดัน และกระแสในระบบเชื่อมต่อกับกริด

#### 4.1 พารามิเตอร์ของระบบ

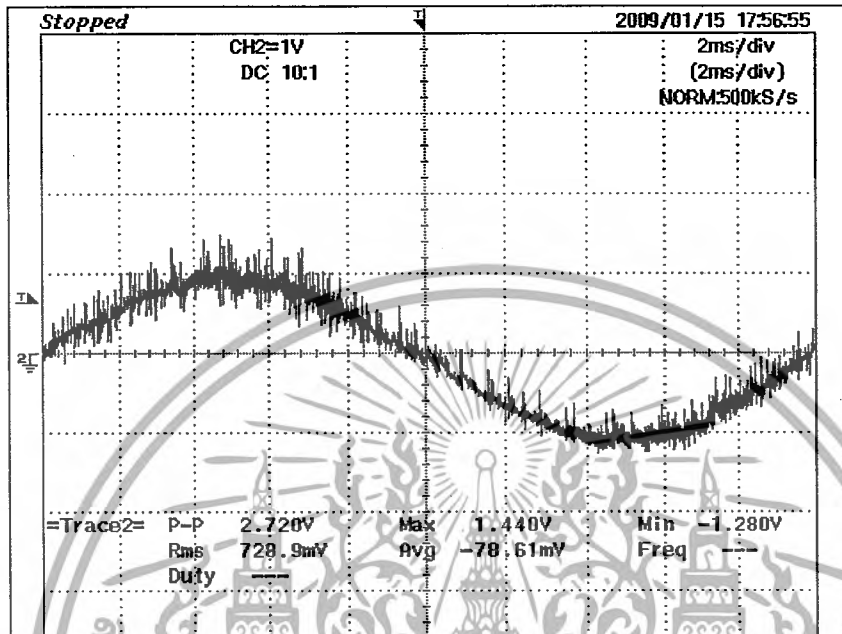
การทดลองจะต้องจรรยาตามรูปที่ 3.1 โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างดังนี้คือ

- เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น BS-40 ของบริษัทบางกอกโซลาร์ จำนวน 8 แผง มาเชื่อมต่อกัน โดยมีคุณลักษณะและวิธีการเชื่อมต่อกันดังหัวข้อ 3.2.1
- ตัวเก็บประจุสำหรับกรองระลอกคลื่นแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $C_s$ )  $6,800 \mu F$  450 V
- วงจร Buck Converter มีค่าตัวเหนี่ยวนำ 120 mH และตัวเก็บประจุ ( $C_c$ )  $4,700 \mu F$  450 V
- ตัวเหนี่ยวนำ (L) ของอินเวอร์เตอร์ขนาด 80 mH
- Variac สำหรับแปลงไฟขึ้นมีอัตราส่วนการแปลงแรงดันเป็น 1:4.88
- แหล่งจ่ายไฟ 220 V 50 Hz

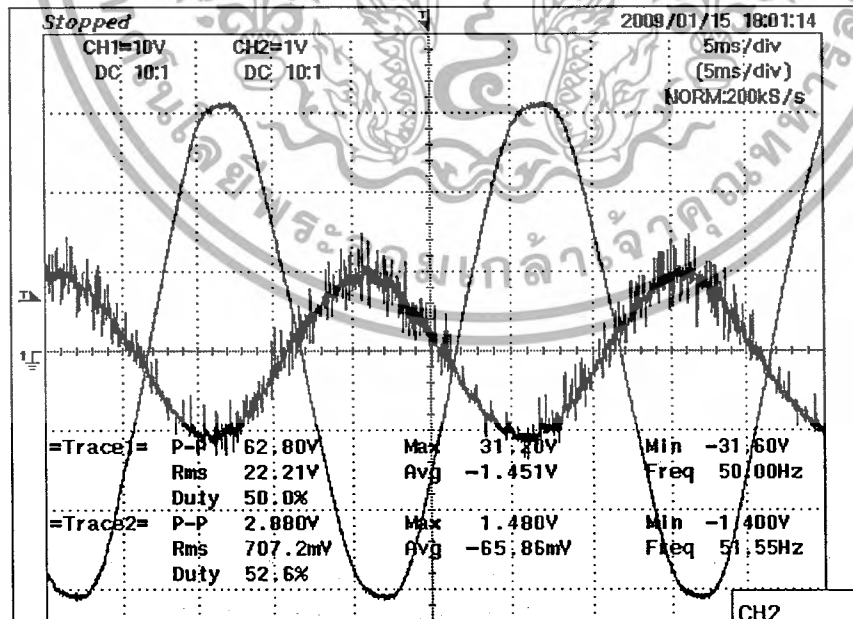
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการทดลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้า

### 4.2.1 ผลการทดลองที่กระแสคำสั่งต่าง ๆ กัน

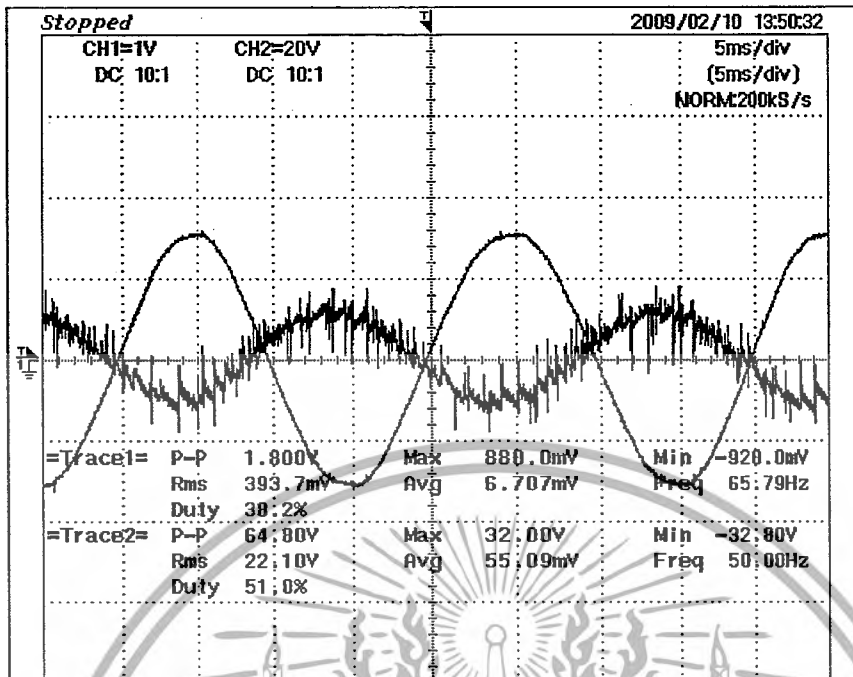


รูปที่ 4.2 รูปคลื่นกระแสที่เชื่อมต่อกับระบบกริด

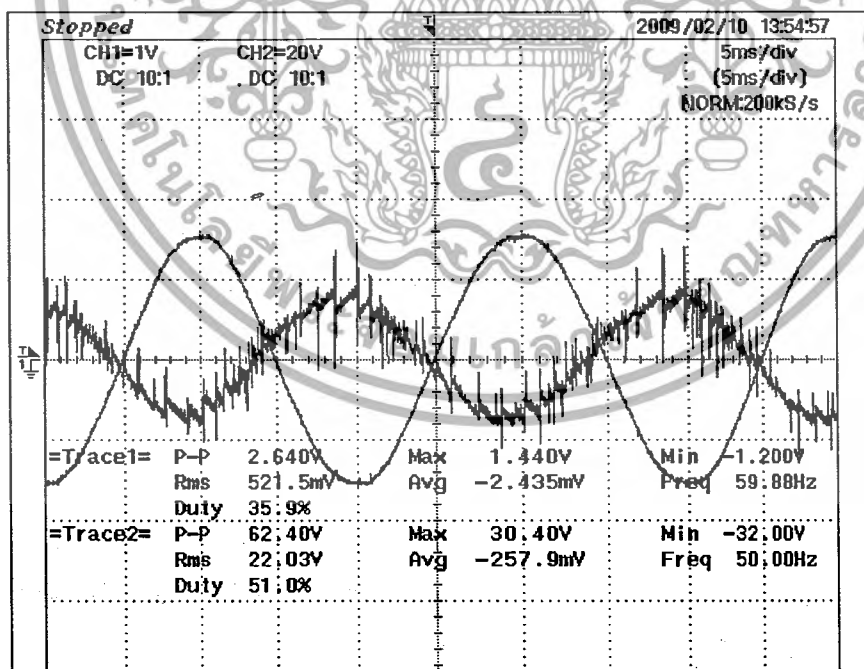


รูปที่ 4.3 รูปคลื่นกระแส และแรงดันที่เชื่อมต่อกับระบบกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

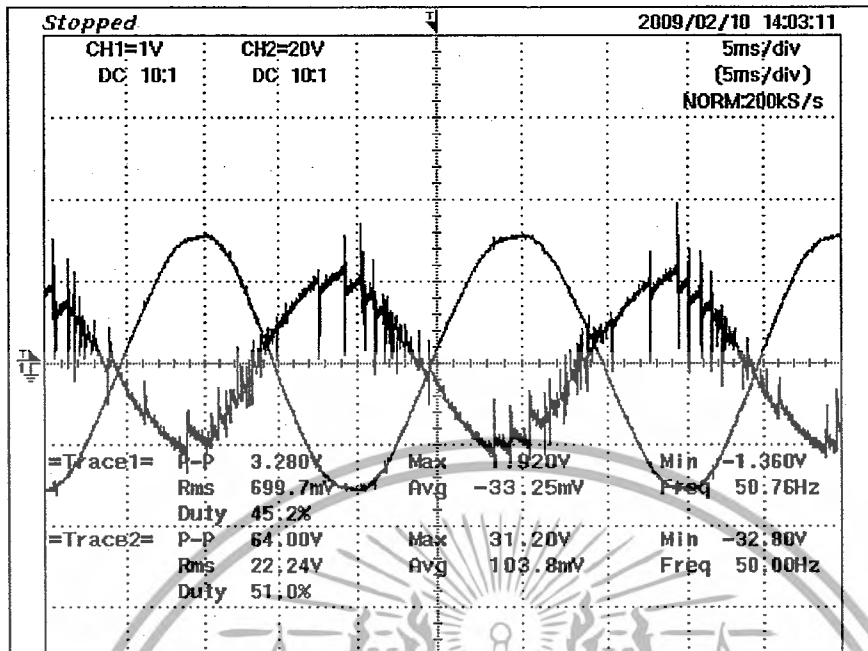


รูปที่ 4.4 รูปคลื่นกระแส และแรงดันที่เชื่อมต่อกับระบบกริด โดยใช้กระแสคำสั่งเท่ากับ 0.4 A

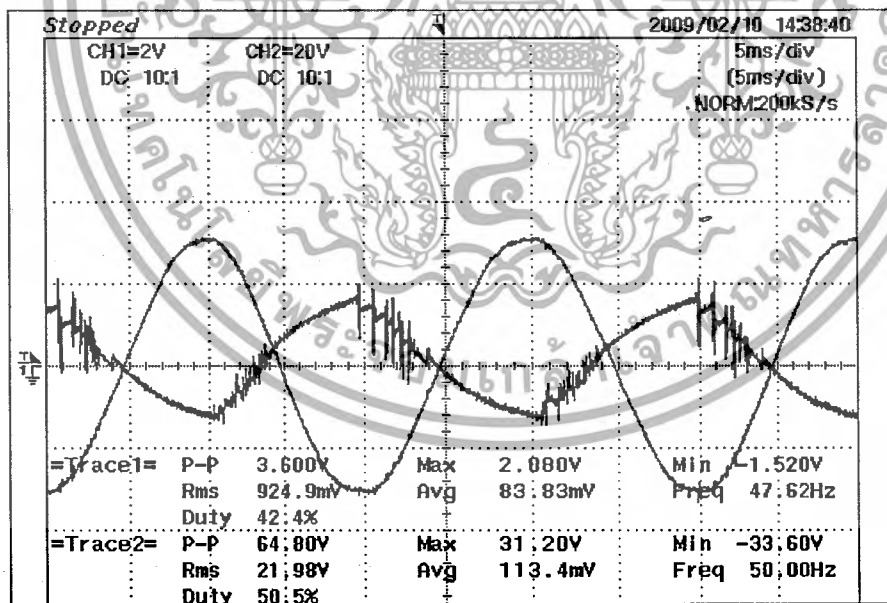


รูปที่ 4.5 รูปคลื่นกระแส และแรงดันที่เชื่อมต่อกับระบบกริด โดยใช้กระแสคำสั่งเท่ากับ 0.6 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 รูปคลื่นกระแส และแรงดันที่เชื่อมต่อกับระบบกริด โดยใช้กระแสคำสั่งเท่ากับ 0.8 A



รูปที่ 4.7 รูปคลื่นกระแส และแรงดันที่เชื่อมต่อกับระบบกริด โดยใช้กระแสคำสั่งเท่ากับ 1 A

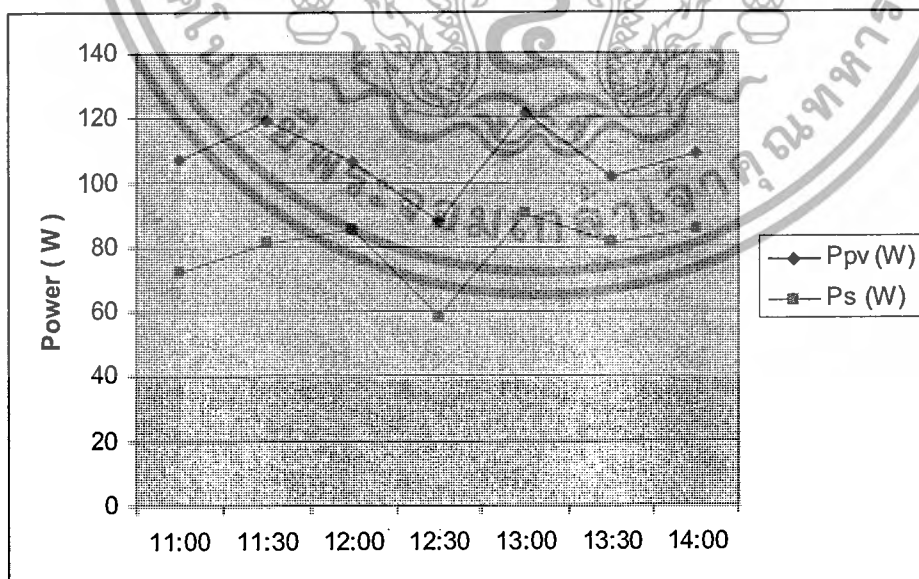
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการทดลองเชื่อมต่อการไฟฟ้า เมื่อวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2552 ตั้งแต่เวลา 11.00 น. ถึง 14.00 น.

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของระบบเชื่อมต่อกิตที่เวลาต่างๆ

| แรงดัน $V_s = 45 V_{rms}$ |                 |                 |                 |              |              |      |      |       |       |
|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|--------------|------|------|-------|-------|
| เวลา                      | $V_{PV}$<br>(V) | $I_{PV}$<br>(A) | $P_{PV}$<br>(W) | $I_s$<br>(A) | $P_s$<br>(W) | PF   | DPF  | %THDv | %THDi |
| 11:00                     | 89.1            | 1.2             | 106.92          | 1.6          | 72           | 0.98 | 0.99 | 1.1   | 11    |
| 11:30                     | 85              | 1.4             | 119             | 1.8          | 81           | 0.97 | 1.00 | 1.2   | 12    |
| 12:00                     | 82              | 1.3             | 106.6           | 1.9          | 85.5         | 0.99 | 0.99 | 1.0   | 7     |
| 12:30                     | 80              | 1.1             | 88              | 1.3          | 58.5         | 0.97 | 0.99 | 1.5   | 18    |
| 13:00                     | 86.5            | 1.4             | 121.1           | 2.0          | 90           | 0.98 | 1.00 | 1.3   | 20    |
| 13:30                     | 84.7            | 1.2             | 101.64          | 1.8          | 81           | 0.99 | 0.98 | 1.0   | 13    |
| 14:00                     | 83.5            | 1.3             | 108.55          | 1.9          | 85.5         | 0.98 | 0.99 | 1.2   | 15    |

จากตารางผลการทดลองสามารถนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับเวลา ได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟกำลังไฟฟ้าที่เวลาใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบได้ โดยการหาประสิทธิภาพการทำงานของตัวแปลงผันแบบทอนระดับและอินเวอร์เตอร์ ( $\% \eta_{con}$ ) ดังสมการที่ 4.1

$$\% \eta_{con} = \frac{P_s}{P_{PV}} \times 100 \quad (4.1)$$

ผลการคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพของระบบเชื่อมต่องริตที่เวลาใดๆ

| เวลา  | $\% \eta_{con}$ |
|-------|-----------------|
| 11:00 | 67.34           |
| 11:30 | 68.07           |
| 12:00 | 80.20           |
| 12:30 | 66.48           |
| 13:00 | 74.32           |
| 13:30 | 79.69           |
| 14:00 | 78.77           |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาเปลี่ยนเป็นรูปพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในการแปลงรูปพลังงานแล้วนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้ส่งให้ระบบการไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้เริ่มจากการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อกับวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์เพื่อทำการหาจุดทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ในจุดที่มีกำลังไฟฟ้ามากที่สุด ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการเพิ่มความนำ หลังจากนั้นก็จะนำไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์มาแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งใช้หลักการควบคุมแบบฮีสเทอรีซิส หลังจากนั้นก็เชื่อมอินเวอร์เตอร์กับระบบการไฟฟ้าเพื่อส่งพลังงานเข้าสู่ระบบการไฟฟ้า ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์สามารถช่วยในการติดตามหาจุดที่มีกำลังสูงสุดได้ และสำหรับในส่วนของอินเวอร์เตอร์ก็สามารถสร้างกระแสรูปคลื่นไซน์ได้ ซึ่งทำให้สามารถส่งพลังงานเข้าสู่ระบบการไฟฟ้าได้

เนื่องจากระบบไม่ได้ควบคุมแรงดันเอาต์พุตของตัวแปลงผันแบบทอนระดับให้มีค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแสงทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมกับอินเวอร์เตอร์มีแรงดันไม่คงที่ จะทำให้แรงดันเอาต์พุตของตัวแปลงผันแบบทอนระดับเกิดระลอกคลื่นขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้เกิดปริมาณฮาร์โมนิกเพิ่มขึ้น

เนื่องจากในระบบวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์มีการสวิตชิง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนขึ้น ทำให้การประมวลผลของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์มีความผิดพลาด ทำให้การติดตามจุดที่มีกำลังสูงสุดเกิดความผิดพลาดขึ้น ส่งผลให้การส่งพลังงานไฟฟ้าสู่ระบบการไฟฟ้าได้ปริมาณน้อยลง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

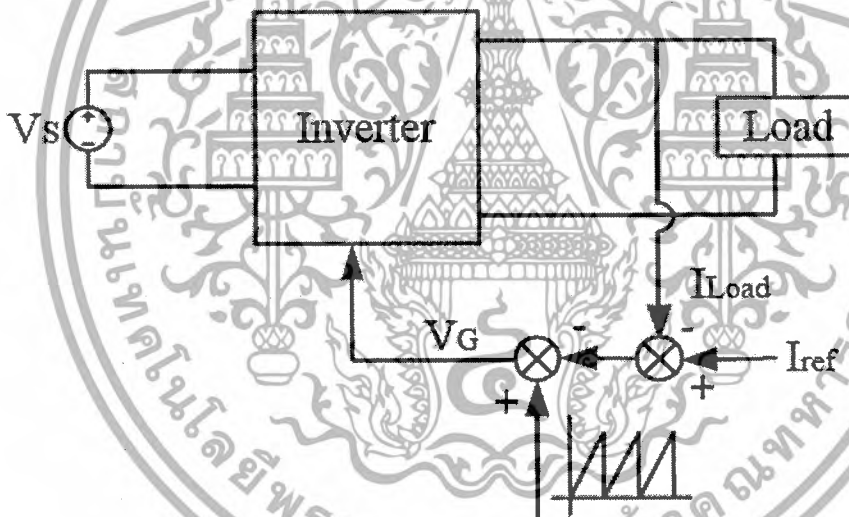
5.2.1 เนื่องจากวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์มีกระบวนการสวิตชิ่งในวงจร จึงทำให้เกิดสัญญาณรบกวนต่อระบบ ซึ่งเราจะต้องมีการออกแบบวงจรที่จะมาใช้ลดสัญญาณรบกวน

5.2.2 เนื่องจากในการวิจัยนั้นบางครั้งก็มีข้อจำกัดในเรื่องของเวลาในการทดลอง เพราะเราสามารถทดลองได้ถ้าไม่มีแสงอาทิตย์ เราจึงควรแก้ไขโดยการมีแหล่งกำเนิดแสงเทียมขึ้นมา

5.2.3 เนื่องจากตัวอินเวอร์เตอร์ใช้การควบคุมกระแสแบบฮีสเตอร์ซิส ซึ่งวิธีการควบคุมแบบนี้ความถี่สวิตชิ่งจะไม่คงที่ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้

5.2.4 เนื่องจากในการหาจุดที่มีกำลังสูงสุดนั้นต้องมีการประมวลผล ซึ่งการประมวลผลนั้นสัญญาณที่เข้ามาต้องไม่มีสัญญาณรบกวนเข้ามา เราจึงออกแบบวงจรที่จะเข้ามาช่วยลดสัญญาณรบกวน

5.2.5 ออกแบบวงจรกรองฮาร์โมนิกเพื่อลดปริมาณฮาร์โมนิกที่จะจ่ายเข้าระบบ



รูปที่ 5.1 การมอดูเลตความกว้างพัลส์ความถี่คงตัวโดยการควบคุมรูปคลื่นของกระแส

## บรรณานุกรม

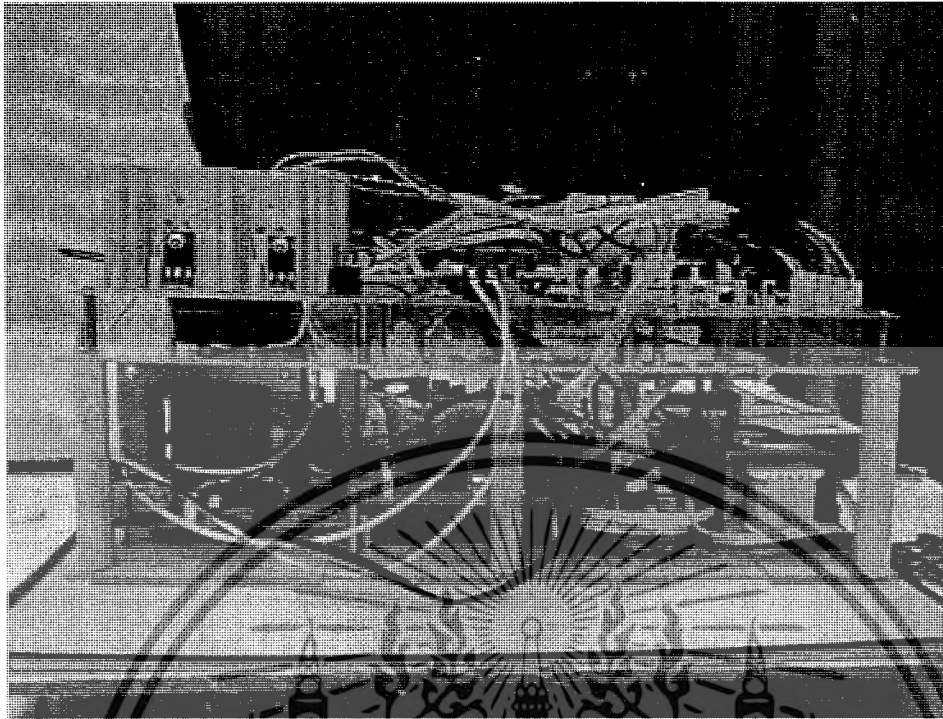
- [1] Langridge, D., Lawrance, W. and Wichert, B., 1994, "High Efficiency Solar Water Pumping System Using BDC Motor", 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 227-230.
- [2] Hua, C., Lin, J. and Shen, C., 1998, "Implementation of a DSP-Controlled Photovoltaic System with Peak Power Tracking", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 45, pp. 99-107.
- [3] Hussein, K.H. and Muta, I., 1995, "Maximum Photovoltaic Power Tracking: an Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions", IEE Proceedings on Generation, Transmission, and Distribution, Vol. 142, No. 1, pp. 59-64.
- [4] Martina, C. and Hartmut, H., 1998 "A Ripple-Based Maximum Power Point Tracking Algorithm for a Single-Phase, Grid-Connected Photovoltaic System", Solar Energy, Vol. 63, No. 5, pp. 277-282.
- [5] Hohm, D.P. and Ropp, M.E., 2000, "Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithm Using an Experimental, Programmable, Maximum Power Point Tracking Test Bed", Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE, 15-22 September 2000, pp. 1699-1702.
- [6] Muhammad, H.R., 2001, Power Electronics Handbook, Academic Press, California, pp. 539-562.
- [7] Premrudeepreechacharn, S. and Poapornsawan, T., 2000 "Fuzzy Logic Control of Predictive Current Control for Grid-Connected Single Phase Inverter", Proceeding of IEEE 28th Photovoltaic Specialist Conference, pp. 1715-1718.
- [8] อุกฤษฏ์ ดันตสุทธานนท์, " การเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ PSoC ด้วยภาษาซี", บริษัท Micro Research Technology Ltd.,Part.
- [9] วัชรินทร์ เถาว์, "เรียนรู้และเข้าใจ PSoC Microcontrollers ด้วยภาษา Assembly และ ภาษา C", บริษัท อีทีที จำกัด
- [10] วิศิษฐ์ ชูรักษ์ , "ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลังด้วยตัวควบคุมสัญญาณดิจิตอล, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,2549

- [11] สินชาย แซ่ตั้ง , "การหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกริด โดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล" ,วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ,2546
- [12] บุญเรือง วังศิลาบัตร , "การขั้บนำอุปกรณ์สวิตซ์กำลังบนกิ่งกระแสเดียวกัน" , เซมิกอนดักเตอร์ ฉบับที่ 312 , หน้า 171-181, 2551
- [13] ดร.ภพ จันท์เจริญสุข , "ตำราต่างประเทศสำหรับอ่านประกอบ วิชา INDUSTRIAL POWER ELECTRONICS" ,2550
- [14] อุมารินทร์ แสงพานิช , "การศึกษาคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบโซล่าเซลล์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์" ,วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ , มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ,2545





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1 ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลอง

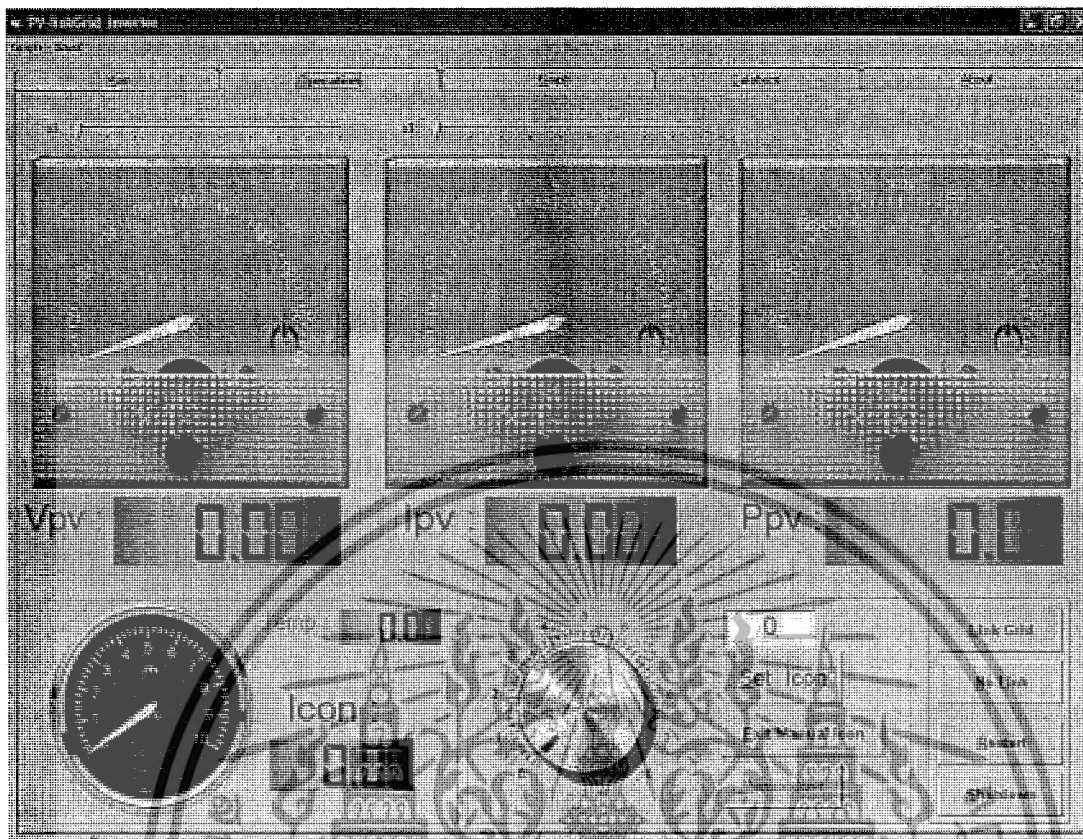


รูปที่ ก.2 การทดสอบการทำงานของฮาร์ดแวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 โปรแกรมสำหรับการควบคุมฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//-----
// Program of PV link grid inverter system control
// Use PSoC CY8C27643 chip
//-----

#include <m8c.h>           // part specific constants and macros
#include "PSoCAPI.h"      // PSoC API definitions for all User Modules
#include "LCDnokia.h"     // include "ioport.h","delay.h","stdlib.h","math.h"
#include "animate.h"      // animation for LCD nokia

#define ADC_DO            Bit0_7
#define CH_Vpv            '0'
#define CH_lpv            '1'
#define DataAmp           PRT1DR //port Icon
#define Relay_ON          SetBit2_1
#define Relay_OFF         ClrBit2_1

void  initSystem(void);
void  DisplayFun(void);
void  MPPT(float V,float I);
unsigned int ReadADC(char CH);
void  ReadVpv(void);
void  Readlpv(void);
void  SendData(void);
void  ReceiveData(void);
void  ReadTemp(void);

float  ADCvolt;
WORD  ReadPV;
const float  constData5V = 4095;
float  Vpv,lpv;
float  V1,I1,V2,I2,dV,dl,err;
int    stat;
char  *datafloat;
BYTE  i;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

BYTE      Rxdata[2];
BOOL      Manual = TRUE;
char      Temp;
BYTE      valueDuty=18;      //Duty = 100%
float     ErrVolt=1,ErrAmp=1;
float     tempVpv,tempIpv;

```

```
void main()
```

```
{
```

```

    PWM8_WritePeriod(18);
    PWM8_WritePulseWidth(valueDuty);
    PWM8_DisableInt();
    PWM8_Start();

    initSystem();
    DisplayFun();

    DigInV_Start();
    UART_CmdReset();
    UART_IntCnt(UART_ENABLE_RX_INT);
    UART_Start(UART_PARITY_NONE);

```

```
M8C_EnableGInt;
```

```
ReadVpv();
```

```
ReadIpv();
```

```
V1 = Vpv;
```

```
I1 = Ipv;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

while(1)
{
    clearram();

    ReadVpv(); //Read 1 st
    ReadIpv();
    tempVpv = Vpv;
    tempIpv = Ipv;
    ReadVpv(); //Read 2 nd
    ReadIpv();

    if ((Vpv*ErrVolt) > tempVpv){Vpv = tempVpv;} //filter error from noise
    else if ((Ipv*ErrAmp) > tempIpv){Ipv = tempIpv;}

    if (Manual == FALSE) //run MPPT
    {
        MPPT(Vpv,Ipv);
    }

    lcd_putstr("Vpv:");
    lcd_putnum(Vpv);
    cursorxy(0,2);
    lcd_putstr("Ipv:");
    lcd_putnum(Ipv);
    cursorxy(0,4);
    //lcd_putstr("err:");
    //lcd_putnum(err);

    if (Manual == FALSE){lcd_putstr("Mode: MPPT");}
    else if (Manual == TRUE){lcd_putstr("Mode: Manual");}

    cursorxy(0,5);
    ReadTemp();
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        SendData();
        ReceiveData();
    }
}

void ReadTemp(void)
{
    if (FlashTemp_flsData()) // check FlashTemp data valid
    {
        Temp = FlashTemp_cGetData(); // get data
        FlashTemp_Start();
    }
}

void DisplayFun(void)
{
    lcd_wrimng(logo,0,0);
    delay1ms(3500);
}

void MPPT(float V,float I)
{
    DataAmp = I * 4.9784; //Convert to Sine Gen

    V2 = V;
    I2 = I;

    dV = V2 - V1;
    dI = I2 - I1;
    err = (I2/V2)+(dI/dV);

    if (err > 0) // left operation
    {
        if(valueDuty < 18) valueDuty++; //Inc V,Dec I
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
else if (err < 0)      // right operation
{
    if(valueDuty > 0) valueDuty--;      //Dec V,Inc I
}
V1 = V2;
I1 = I2;
}

```

```

void ReceiveData(void)
{
    if (UART_bCmdCheck()!=0)
    {
        for (i=0;i<UART_bCmdLength();i++)
        {
            Rxdata[i] = UART_aRxBuffer[i];
        }
        if (Rxdata[0]==0)
        {
            DataAmp = Rxdata[1]-14;
            UART_CPutString("PS3");      //Icon
            datafloat = ftoa(DataAmp,&stat);
            UART_PutString(datafloat);
            UART_CPutString("#");
            UART_PutCRLF();
        }
        else if (Rxdata[0]==1 && Rxdata[1]==11)
        {
            Relay_ON;
        }
        else if (Rxdata[0]==1 && Rxdata[1]==22)
        {
            Relay_OFF;
        }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else if (Rxdata[0]==3) //Buck controller
{
    PWM8_WritePulseWidth(Rxdata[1] -14);
}
else if (Rxdata[0]==9 && Rxdata[1]==11) //MPPT run
{
    Manual = FALSE;
}
else if (Rxdata[0]==9 && Rxdata[1]==22) //Manual run
{
    Manual = TRUE;
}
else if (Rxdata[0]==11 && Rxdata[1]==55) //Start Program
{
    DataAmp = 5; // 5 == 1Amp
}
else if (Rxdata[0]==17 && Rxdata[1]==77) //Restart System
{
    DataAmp = 5; // 5 == 1Amp
    Manual = TRUE;
}
else if (Rxdata[0]==17 && Rxdata[1]==99) //Shutdown System
{
    DataAmp = 0;
    Manual = TRUE;
}
else if (Rxdata[0]==20) //Error Volt
{
    ErrVolt = Rxdata[1];
}
else if (Rxdata[0]==20) //Error Amp
{
    ErrAmp = Rxdata[1];
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        UART_CmdReset();
    }
}

void SendData(void)
{
    UART_CPutString("PS0");           //Vpv
    datafloat = ftoa(Vpv,&stat);
    UART_PutString(datafloat);
    UART_CPutString("#");
    UART_PutCRLF();

    UART_CPutString("PS1");           //Ipv
    datafloat = ftoa(Ipv,&stat);
    UART_PutString(datafloat);
    UART_CPutString("#");
    UART_PutCRLF();

    UART_CPutString("PS2");           //Temp PSoC
    datafloat = ftoa(Temp,&stat);
    UART_PutString(datafloat);
    UART_CPutString("#");
    UART_PutCRLF();

    UART_CPutString("PS3");           //Icon
    datafloat = ftoa(DataAmp,&stat);
    UART_PutString(datafloat);
    UART_CPutString("#");
    UART_PutCRLF();
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
void initSystem(void)
```

```
{
    Relay_OFF;
    initlcd();
    DataAmp = 0;
    ReadVpv();
    ReadIpv();
    FlashTemp_Start();
}
```

```
void ReadVpv(void)
```

```
{
    ReadPV = ReadADC(CH_Vpv); //Read Vpv
    ADCvolt = (ReadPV * 5)/constData5V;
    Vpv = 100.9008 * ADCvolt - 252.252; //Vmax = 200 V
}
```

```
void ReadIpv(void)
```

```
{
    ReadPV = ReadADC(CH_Ipv); //Read Ipv
    ADCvolt = (ReadPV * 5)/constData5V;
    Ipv = 5.04 * ADCvolt - 12.6; //Imax = 10 A
}
```

```
unsigned int ReadADC(char CH)
```

```
{
    BYTE i;
    unsigned int AdcResult; // 12 bit

    asm("and    reg[0x00],253"); // Active chip select
    asm("and    reg[0x00],247"); // make clock low first

    //--- write command 4 bit -----
    asm("or     reg[0x00],32"); //bit Start
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

asm("or      reg[0x00],8");
asm("and     reg[0x00],247");

asm("or      reg[0x00],32");      //bit Sgl/Diff
asm("or      reg[0x00],8");
asm("and     reg[0x00],247");

                                //bit Odd/sign
if(CH=='0')  asm("and     reg[0x00],223");
else if(CH=='1')asm("or      reg[0x00],32");
asm("or      reg[0x00],8");
asm("and     reg[0x00],247");

asm("or      reg[0x00],32");      //bit MSBF
asm("or      reg[0x00],8");
asm("and     reg[0x00],247");

asm("or      reg[0x00],8");      //clk_1
asm("and     reg[0x00],247");    //clk_0

//--- read ADC result 12 bit ---
AdcResult=0;
for(i=0;i<12;i++)
{
    asm("or      reg[0x00],8"); //clk_1
    AdcResult<<=1;
    AdcResult = AdcResult | (ADC_DO & 0x01);
    asm("and     reg[0x00],247");//clk_0
}
asm("or      reg[0x00],2");      // Disable chip select
return(AdcResult);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//-----
// Program of Sine Generator 50 Hz ( Iref )
// Use PSoC CY8C27443 chip
//-----

#include <m8c.h>           // part specific constants and macros
#include "PSoCAPI.h"      // PSoC API definitions for all User Modules
#include "stdlib.h"
#include "ioport.h"

#pragma interrupt_handler GPIO_Interrupt
#pragma interrupt_handler Timer_ISR
#define DataAmp PRT1DR    //Set port1 is input data of Amp 8 bit

const BYTE TableSine[ ] = {
0x03,0x06,0x09,0x0D,0x10,0x13,0x16,0x19,0x1C,0x1F,0x22,0x25,0x28,
0x2B,0x2E,0x31,0x34,0x37,0x3A,0x3D,0x3F,0x42,0x45,0x47,0x4A,0x4D,
0x4F,0x51,0x54,0x56,0x59,0x5B,0x5D,0x5F,0x61,0x63,0x65,0x67,0x69,
0x6B,0x6C,0x6E,0x70,0x71,0x73,0x74,0x75,0x76,0x78,0x79,0x7A,0x7B,
0x7C,0x7C,0x7D,0x7E,0x7E,0x7F,0x7F,0x7F,0x80,0x80,0x80,0x80,0x80,
0x80,0x80,0x7F,0x7F,0x7E,0x7E,0x7D,0x7D,0x7C,0x7B,0x7A,0x79,0x78,
0x77,0x76,0x75,0x73,0x72,0x70,0x6F,0x6D,0x6C,0x6A,0x68,0x66,0x64,
0x62,0x60,0x5E,0x5C,0x5A,0x57,0x55,0x53,0x50,0x4E,0x4B,0x49,0x46,
0x43,0x41,0x3E,0x3B,0x38,0x35,0x33,0x30,0x2D,0x2A,0x27,0x24,0x21,
0x1E,0x1B,0x18,0x14,0x11,0x0E,0x0B,0x08,0x05,0x02,0x02,0x05,0x08,
0x0B,0x0E,0x11,0x14,0x18,0x1B,0x1E,0x21,0x24,0x27,0x2A,0x2D,0x30,
0x33,0x35,0x38,0x3B,0x3E,0x41,0x43,0x46,0x49,0x4B,0x4E,0x50,0x53,
0x55,0x57,0x5A,0x5C,0x5E,0x60,0x62,0x64,0x66,0x68,0x6A,0x6C,0x6D,
0x6F,0x70,0x72,0x73,0x75,0x76,0x77,0x78,0x79,0x7A,0x7B,0x7C,0x7D,
0x7D,0x7E,0x7E,0x7F,0x7F,0x80,0x80,0x80,0x80,0x80,0x80,0x80,0x7F,
0x7F,0x7F,0x7E,0x7E,0x7D,0x7C,0x7C,0x7B,0x7A,0x79,0x78,0x76,0x75,
0x74,0x73,0x71,0x70,0x6E,0x6C,0x6B,0x69,0x67,0x65,0x63,0x61,0x5F,
0x5D,0x5B,0x59,0x56,0x54,0x51,0x4F,0x4D,0x4A,0x47,0x45,0x42,0x3F,
0x3D,0x3A,0x37,0x34,0x31,0x2E,0x2B,0x28,0x25,0x22,0x1F,0x1C,0x19,
0x16,0x13,0x10,0x0D,0x09,0x06,0x03,0x00};

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

BYTE cntSine=0;
WORD mul;
WORD temp;
BYTE DAC;

void main()
{
    Vref_Start(Vref_HIGHPOWER);
    Vref_WriteStall(127);           // Set Vref = 2.5V
    Vsine_Start(Vsine_HIGHPOWER);
    Vsine_WriteStall(127);         // Set 2.5 volt to ref
    Timer8_WritePeriod(117);
    Timer8_Start();
    Timer8_EnableInt();

    // Comparator & filter for Zero-Crossing Signal
    CMPPRG_SetRef(CMPPRG_REF0_750); // Set RefValue
    CMPPRG_Start(CMPPRG_HIGHPOWER); // Set power level
    M8C_EnableGInt;
    GPIO_EnableInt;
    while(1); //infinity loop for wait timer interrupt
}

void Timer_ISR(void)
{
    if(cntSine>254)cntSine=0;
    mul = DataAmp*TableSine[cntSine];
    mul >>=6;
    DAC = mul>>1;
    if (mul&1==1)DAC++;
    if (cntSine<=126)
    {DAC = 127-DAC;}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
else
{DAC = 127+DAC;}
Vsine_WriteStall(DAC);
cntSine++;
}

void GPIO_Interrupt(void)
{
cntSine = 0;
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

---

```
' Program for Control inverter System
' Developed by Visual Basic 6.0 program
```

---

```
Private Declare Sub Sleep Lib "kernel32" (ByVal dwMilliseconds As Long)
```

```
Dim Vpv, Ipv, Ppv
```

```
Dim X As Long
```

```
Private Sub DetectPort()
```

```
On Error Resume Next
```

```
Const numPort = 15
```

```
For i = 1 To numPort
```

```
With com
```

```
.CommPort = i
```

```
.Settings = txtBitSec.Text & ",n,8,1"
```

```
.PortOpen = True
```

```
End With
```

```
If Err = 0 Then
```

```
com.PortOpen = False
```

```
cbPort.AddItem i
```

```
End If
```

```
If Err Then
```

```
com.PortOpen = False
```

```
Err = 0
```

```
End If
```

```
Next i
```

```
com.PortOpen = False
```

```
End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Private Sub cmdConnect_Click()
Dim strPort As String
If cbPort.Text = "Select" Then
    MsgBox "Select Comm Port", vbCritical, "Warning"
    Exit Sub
End If

```

```

With com

```

```

    .CommPort = cbPort.Text
    .Settings = txtBitSec.Text & ",n,8,1"
    .InputLen = 1
    .PortOpen = True
    .RThreshold = 1 'Enable OnComm() Event
    .RTSEnable = True ' Don't forget!
    '.Handshaking = comXOnXoff

```

```

End With

```

```

com.Output = Chr(11) & Chr(55) & vbCrLf 'Start program

```

```

Sleep (120)

```

```

com.Output = Chr(9) & Chr(22) & vbCrLf 'Manual

```

```

cmdConnect.Enabled = False
cmdDisconnect.Enabled = True
cmdManual.Enabled = False
cmdExitManual.Enabled = True
cmdRelayClose.Enabled = True
cmdRelayOpen.Enabled = False

```

```

TimerSaveData.Enabled = True

```

```

End Sub

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

---

```

Private Sub cmdDelAll_Click()
Dim num
DoEvents
probardel.Value = 0
probardel.Caption = probardel.Value & " %"
num = ADO.Recordset.RecordCount

```

```

If num > 0 Then
    ADO.Recordset.MoveFirst
    For i = 1 To num
        ADO.Recordset.Delete
        ADO.Recordset.MoveNext
        probardel.Value = Int((i / num) * 100)
        probardel.Caption = probardel.Value & " %"
        probardel.Refresh
        Sleep (1)
    Next i
Else
    MsgBox "" & "ไม่พบข้อมูล", vbCritical
End If
End Sub

```

---

```

Private Sub cmdDisconnect_Click()
com.PortOpen = False
cmdConnect.Enabled = True
cmdDisconnect.Enabled = False
TimerSaveData.Enabled = False
End Sub

```

---

```

Private Sub cmdExitManual_Click()
com.Output = Chr(9) & Chr(11) & vbCrLf

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
cmdExitManual.Enabled = False
cmdManual.Enabled = True
End Sub
```

---

```
Private Sub cmdManual_Click()
com.Output = Chr(9) & Chr(22) & vbCrLf
cmdManual.Enabled = False
cmdExitManual.Enabled = True
End Sub
```

---

```
Private Sub cmdMoveFirst_Click()
If ADO.Recordset.RecordCount > 0 Then
    ADO.Recordset.MoveFirst
Else
    MsgBox "" & "ไม่พบข้อมูล", vbCritical
End If
End Sub
```

---

```
Private Sub cmdMoveLast_Click()
If ADO.Recordset.RecordCount > 0 Then
    ADO.Recordset.MoveLast
Else
    MsgBox "" & "ไม่พบข้อมูล", vbCritical
End If
End Sub
```

---

```
Private Sub cmdRelayClose_Click()
com.Output = Chr(1) & Chr(11) & vbCrLf
cmdRelayClose.Enabled = False
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
cmdRelayOpen.Enabled = True
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cmdRelayOpen_Click()
```

```
com.Output = Chr(1) & Chr(22) & vbCrLf
```

```
cmdRelayOpen.Enabled = False
```

```
cmdRelayClose.Enabled = True
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cmdRestart_Click()
```

```
com.Output = Chr(17) & Chr(77) & vbCrLf
```

```
cmdExitManual.Enabled = True
```

```
cmdManual.Enabled = False
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cmdSendBuck_Click()
```

```
com.Output = Chr(3) & Chr(UniKnobBuck.Float + 14) & vbCrLf
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cmdSetIcon_Click()
```

```
Dim DataAmp
```

```
DataAmp = (25.4 / 5) * Val(txtSetIcon.Text)
```

```
DataAmp = Int(DataAmp)
```

```
com.Output = Chr(0) & Chr(DataAmp + 14) & vbCrLf
```

```
End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

---

```

Private Sub cmdShutdown_Click()
com.Output = Chr(17) & Chr(99) & vbCrLf
cmdExitManual.Enabled = True
cmdManual.Enabled = False
End Sub

```

---

```

Private Sub Form_Load()

```

```

SSTab1.Tab = 0

```

```

Call DetectPort

```

```

Call InitDatabase

```

```

cmdManual.Enabled = False

```

```

ADO.RecordSource = "SELECT * FROM data_table;"

```

```

ADO.Refresh

```

```

ImgAboutPower.Picture = LoadPicture(App.Path & "power.jpg")

```

```

ImgAboutBandkmitl.Picture = LoadPicture(App.Path & "band_kmitl.jpg")

```

```

TimerSaveData.Enabled = False

```

```

End Sub

```

---

```

Private Sub com_OnComm()

```

```

Dim temp

```

```

Select Case com.CommEvent

```

```

    Case comEvReceive

```

```

        'com.RTSEnable = True

```

```

        Rx.Text = Rx.Text & com.Input

```

```

        If InStr(Rx.Text, "#" & vbCrLf) Then 'Connect Data mode

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
temp = ComDecoder(Rx.Text, "#")
```

```
Rx.Text = ""
```

```
End If
```

```
End Select
```

```
End Sub
```

```
Function ComDecoder(s As String, cCode As String) As String
```

```
Dim temp, a
```

```
Select Case cCode
```

```
Case "#" 'Recieve Data
```

```
For i = 1 To Len(s) 'Filter
```

```
  a = Mid(s, i, 2)
```

```
  If a = "PS" Then
```

```
    s = Right(s, Len(s) - i + 1)
```

```
  Exit For
```

```
End If
```

```
Next i
```

```
If Left(s, 2) = "PS" Then
```

```
  s = Right(s, Len(s) - 2)
```

```
  Select Case Left(s, 1)
```

```
    Case "0" 'Vpv
```

```
      s = Right(s, Len(s) - 1)
```

```
      s = Val(s)
```

```
      GVpv.Float = s
```

```
      LCDVpv.Value = s
```

```
      Vpv = s
```

```
    Case "1" 'lpv
```

```
      s = Right(s, Len(s) - 1)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

s = Val(s)
Glpv.Float = s
LCDIpv.Value = s
Ipv = s

```

```

Case "2" 'Temp PSoC
s = Right(s, Len(s) - 1)
s = Val(s)
LCDtemp.Value = s

```

```

Case "3" 'Icon
s = Right(s, Len(s) - 1)
a = (Val(s) * 5) / 25.4
GIcon.Float = a
LCDIcon.Value = a
End Select

Ppv = LCDVpv.Value * LCDIpv.Value
GPpv.Float = Ppv
LCDPpv.Value = Ppv
temp = plotGraph(Vpv, Ipv, Ppv) 'plot graph
End If
End Select
End Function

```

---

```

Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)
'com.Output = Chr(17) & Chr(99) & vbCrLf 'Shutdown System
ADO.Recordset.Close
End Sub

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

---

```
Private Sub GraphCurrent_Click()
```

```
    PopupMenu mnuGraph
```

```
End Sub
```

---

```
Private Sub GraphPower_Click()
```

```
    PopupMenu mnuGraph
```

```
End Sub
```

---

```
Private Sub GraphVolt_Click()
```

```
    PopupMenu mnuGraph
```

```
End Sub
```

---

```
Private Sub mnuClearAll_Click()
```

```
    GraphVolt.ClearGraph
```

```
    GraphCurrent.ClearGraph
```

```
    GraphPower.ClearGraph
```

```
End Sub
```

---

```
Private Sub mnuClearI_Click()
```

```
    GraphCurrent.ClearGraph
```

```
End Sub
```

---

```
Private Sub mnuClearP_Click()
```

```
    GraphPower.ClearGraph
```

```
End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

---

```
Private Sub mnuClearV_Click()
```

```
GraphVolt.ClearGraph
```

```
End Sub
```

---

```
Private Sub mnuCopyI_Click()
```

```
GraphCurrent.CopyToClipboard
```

```
End Sub
```

---

```
Private Sub mnuCopyP_Click()
```

```
GraphPower.CopyToClipboard
```

```
End Sub
```

---

```
Private Sub mnuCopyV_Click()
```

```
GraphVolt.CopyToClipboard
```

```
End Sub
```

---

```
Private Sub mnuReset_Click()
```

```
Call mnuClearAll_Click
```

```
X = 0
```

```
End Sub
```

---

```
Private Sub SliderErrAmp_Scroll()
```

```
com.Output = Chr(22) & Chr(SliderErrAmp.Value) & vbCrLf
```

```
lbErrAmp.Caption = "x " & SliderErrAmp.Value
```

```
lbErrAmp.Refresh
```

```
End Sub
```

---

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

---

```

Private Sub SliderErrVolt_Scroll()
com.Output = Chr(20) & Chr(SliderErrVolt.Value) & vbCrLf
IbErrVolt.Caption = "x " & SliderErrVolt.Value
IbErrVolt.Refresh

End Sub

```

---

```

Private Sub SSTab1_Click(PreviousTab As Integer)

If SSTab1.Tab = 4 Then 'About
    IbtThank.Left = SSTab1.Width
    timerThank.Enabled = True
Else
    timerThank.Enabled = False
End If

End Sub

```

---

```

Private Sub TimerSaveData_Timer()
ADO.Recordset.AddNew
ADO.Recordset.Fields("id") = ADO.Recordset.RecordCount
ADO.Recordset.Fields("time") = Format(Time, "hh:mm:ss")
ADO.Recordset.Fields("volt") = LCDVpv.Value
ADO.Recordset.Fields("current") = LCDIpv.Value
ADO.Recordset.Fields("power") = Ppv
ADO.Recordset.Fields("temperature") = LCDtemp.Value
ADO.Recordset.Update

End Sub

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Private Sub timerThank_Timer()
lbThank.Left = lbThank.Left - 15
If lbThank.Left < -lbThank.Width Then
    lbThank.Left = SStab1.Width

End If
End Sub

```

```

Private Sub txtSetlcon_Change()
volumelcon.Float = Val(txtSetlcon.Text)
End Sub

```

```

Private Sub volumelcon_OnChanging(ByVal Value As Single, ByVal Index As Long)
txtSetlcon = Round(Value, 2)
End Sub

```

```

Function plotGraph(ByVal voltPV, ByVal AmpPv, ByVal PowerPV)
X = X + 1

```

```

With GraphVolt
    .PlotAreaColor = vbBlack
    .FrameStyle = Frame
    .Caption = ""
    .XLabel = "Time"
    .YLabel = "Voltage (V)"
    .Caption = "Voltage PV"
    .YGridNumber = 10

    .ElementLineColor = vbYellow
    .AddElement ' Add second elements

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.PlotY voltPV, 0
.SetRange 0, X, 0, 250
```

End With

With GraphCurrent

```
.PlotAreaColor = vbBlack
.FrameStyle = Frame
.Caption = ""
.XLabel = "Time"
.YLabel = "Current (A)"
.Caption = "Current (Icon = yellow ,Ipv = blue)"
.YGridNumber = 5
```

```
.ElementLineColor = vbYellow
.AddElement ' Add Icon
.PlotY LCDIcon.Value, 0
.SetRange 0, X, 0, 15
```

```
.ElementLineColor = vbBlue
.AddElement ' Add Ipv
.PlotY AmpPv, 1
.SetRange 0, X, 0, 15
```

End With

With GraphPower

```
.PlotAreaColor = vbBlack
.FrameStyle = Frame
.Caption = ""
.XLabel = "Time"
.YLabel = "Power (W)"
.Caption = "Power PV"
.YGridNumber = 10
.ElementLineColor = vbRed
.AddElement ' Add Power PV
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
.PlotY PowerPV, 2
.SetRange 0, X, 0, 750
```

```
End With
```

```
End Function
```

```
Sub InitDatabase()
```

```
Dim strConnect As String
```

```
Dim strProvider As String
```

```
Dim strDataSource As String
```

```
Dim strDataBaseName As String
```

```
Dim dbPathStr, dbConnStr
```

```
strProvider = "Provider= Microsoft.Jet.OLEDB.4.0;"
```

```
strDataSource = App.Path
```

```
strDataBaseName = "\data.mdb;"
```

```
strDataSource = "Data Source=" & strDataSource & strDataBaseName
```

```
strConnect = strProvider & strDataSource
```

```
dbPathStr = "Data Source=" & App.Path & "\data.mdb;"
```

```
dbConnStr = "Provider=Microsoft.Jet.OLEDB.4.0;" & dbPathStr & "Persist Security
```

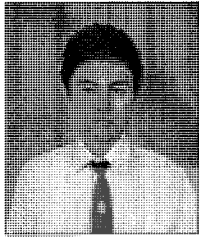
```
Info=False"
```

```
ADO.ConnectionString = strConnect
```

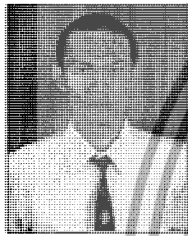
```
End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



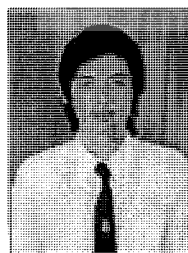
ชื่อ - นามสกุล นายชริวิชญ์ ศรีจันทร์  
 วัน เดือน ปีเกิด 21 สิงหาคม 2529  
 ที่อยู่ 2 หมู่ 11 ต.บ้านแดง อ.พิบูลรักษ์  
 จ.อุดรธานี 41130  
 ประวัติการศึกษา มัธยมปลาย โรงเรียนอุดรพิทยานุกูล



ชื่อ - นามสกุล นายวรพงษ์ ทานะ  
 วัน เดือน ปีเกิด 25 มิถุนายน 2529  
 ที่อยู่ 38/2 หมู่ 10 ต.อายนาโหลย อ.เวียงสา  
 จ.น่าน 55110  
 ประวัติการศึกษา มัธยมปลาย โรงเรียนสา



ชื่อ - นามสกุล นายวิทยา มูลดี  
 วัน เดือน ปีเกิด 26 พฤศจิกายน 2529  
 ที่อยู่ 31 หมู่ 1 ต.ทุ่งรวงทอง อ.แม่วาง  
 จ.เชียงใหม่ 50360  
 ประวัติการศึกษา มัธยมปลาย โรงเรียนสันป่าตองวิทยาคม



ชื่อ - นามสกุล นายศรัญญู เหมหงษ์  
 วัน เดือน ปีเกิด 28 มกราคม 2530  
 ที่อยู่ 99/1126 หมู่ 1 ต.พรหมณี อ.เมือง  
 จ.นครนายก 26001  
 ประวัติการศึกษา มัธยมปลาย โรงเรียนนครนายกวิทยาคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้