



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

### แผนงานวิจัยเรื่อง

การพัฒนางจรแปลงผันพลังงานแบบสามระดับที่เหมาะสมสำหรับแหล่งกำเนิด  
พลังงานทดแทนในประเทศไทย

Development of Optimal Three-Level Power Converter for Renewable Energy  
Source in Thailand

สนับสนุนโดย

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

|                          |                    |
|--------------------------|--------------------|
| กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ | สุรินทร์ แหวมงาม   |
| นิติพงศ์ ปานกลาง         | สมชาย เปียนสูงเนิน |
| บุญยัง ปลั่งกลาง         | ณัฐภัทร พันธุ์คง   |
| วันชัย ทรัพย์สิงห์       | สมชัย หิรัญวโรดม   |

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ประจำปี 2554



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

### แผนงานวิจัยเรื่อง

การพัฒนาวจรแปลงผันพลังงานแบบสามระดับที่เหมาะสมสำหรับแหล่งกำเนิดพลังงาน  
ทดแทนในประเทศไทย

Development of Optimal Three-Level Power Converter for Renewable Energy Source  
in Thailand

### สนับสนุนโดย

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์

นิติพงศ์ ปานกลาง

บุญยัง ปลั่งกลาง

วันชัย ทรัพย์สิงห์

สุรินทร์ แหวมงาม

สมชาย เปียนสูงเนิน

ณัฐภัทร พันธุ์คง

สมชัย หิรัญวโรดม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ประจำปี 2554



## สารบัญ

|                                                                                                                                | หน้า  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| สารบัญ                                                                                                                         | ก     |
| สารบัญตาราง                                                                                                                    | ง     |
| สารบัญรูป                                                                                                                      | จ     |
| <br>บทที่ 1 บทนำ                                                                                                               | <br>1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา                                                                                             | 1     |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย                                                                                                    | 3     |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย                                                                                                          | 3     |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                                                                                                  | 4     |
| 1.5 ระยะเวลาทำการวิจัยและแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย                                                                       | 4     |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                                                                                          | 5     |
| 2.1 แหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน                                                                                                    | 7     |
| 2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้า<br>กระแสตรงสามระดับแบบพีดับบลิวเอ็ม (Three-Level PWM Rectifier) | 12    |
| 2.3 วงจรทบระดับแรงดัน                                                                                                          | 16    |
| 2.4 อินเวอร์เตอร์สามระดับ                                                                                                      | 18    |
| 2.5 โครงสร้างและการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้า<br>กระแสสลับ                                                     | 23    |
| 2.6 อุปกรณ์อื่นๆ                                                                                                               | 27    |
| บทที่ 3 การออกแบบ                                                                                                              | 33    |
| 3.1 แหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน                                                                                                    | 33    |
| 3.2 การออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสาม<br>ระดับ                                                         | 42    |
| 3.3 การออกแบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง                                                                             | 47    |
| 3.4 การออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสาม<br>ระดับ                                                         | 55    |
| 3.5 การออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสาม<br>ระดับ                                                        | 63    |



## สารบัญ (ต่อ)

|                                                                               | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------|------|
| บทที่ 4 ผลการทดลอง                                                            | 68   |
| 4.1 แหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน                                                   | 68   |
| 4.2 การทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบสามระดับกระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง  | 77   |
| 4.3 การจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง              | 81   |
| 4.4 การทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ  | 87   |
| 4.5 การจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ | 98   |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ                                           | 103  |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย                                                            | 103  |
| 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ                                                        | 106  |
| เอกสารอ้างอิง                                                                 | 109  |
| ภาคผนวก                                                                       | 111  |



## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |                                                                              | หน้า |
|----------|------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1      | ชนิดของแผงเซลล์แบ่งตามวัสดุและประสิทธิภาพการใช้งานในห้องทดลองและใช้ในงานจริง | 10   |
| 2.2      | ขนาดของกังหันลม                                                              | 11   |
| 2.3      | สถานะการสวิตช์ในแต่ละเฟส                                                     | 19   |
| 3.1      | ค่าพารามิเตอร์ของลมในประเทศไทย                                               | 37   |
| 3.2      | ค่าพารามิเตอร์ของใบพัดกังหันลม                                               | 38   |
| 3.3      | ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร                  | 39   |
| 3.4      | กลุ่มเวกเตอร์แรงดัน                                                          | 67   |
| 4.1      | รายละเอียดของวงจรการจำลองการทำงาน                                            | 78   |
| 4.2      | ค่าพารามิเตอร์การจำลองการทำงานใน MATLAB/SIMULINK                             | 82   |
| 4.3      | ผลการทดสอบที่สภาวะแรงดันต่างๆของวงจรทบระดับแรงดัน                            | 86   |
| 4.4      | รายละเอียดของระบบในการจำลองการทำงาน                                          | 90   |
| 4.5      | พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน                                          | 98   |



## สารบัญรูป

| รูปที่ |                                                                                                                                                               | หน้า |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1    | ตัวอย่างระบบพลังงานทดแทนที่ใช้วงจรแปลงผันพลังงาน                                                                                                              | 2    |
| 1.2    | แผนผังการควบคุมวงจรแปลงผันพลังงาน                                                                                                                             | 2    |
| 2.1    | วงจรแปลงพลังงานและวงจรควบคุมแบบง่าย                                                                                                                           | 5    |
| 2.2    | แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า                                                                                                                                       | 6    |
| 2.3    | กราฟแสดงเป้าหมายของยุทธศาสตร์พลังงานทดแทนของประเทศไทย                                                                                                         | 7    |
| 2.4    | แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลมในประเทศไทย                                                                                                        | 8    |
| 2.5    | Solar Cell                                                                                                                                                    | 9    |
| 2.6    | โครงสร้างของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสามระดับแบบพีคดับลิวเอ็ม (Three-Level PWM Rectifier)                                                    | 13   |
| 2.7    | แผนภูมิการไหลของกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสามระดับแบบพีคดับลิวเอ็ม                                                               | 16   |
| 2.8    | วงจรแปลงผันแบบทบระดับแรงดัน                                                                                                                                   | 16   |
| 2.9    | วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส                                                                                                                                   | 17   |
| 2.10   | วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส                                                                                                                                | 17   |
| 2.11   | วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับ                                                                                                                                     | 18   |
| 2.12   | สัญญาณสวิตชิงในแต่ละกลุ่ม                                                                                                                                     | 20   |
| 2.13   | หลักการสร้างรูปแบบพีคดับเบิลยูเอ็มแบบ SPWM                                                                                                                    | 20   |
| 2.14   | รูปคลื่นพีคดับเบิลยูเอ็มแบบเทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์                                                                                                          | 21   |
| 2.15   | การสวิตช์แบบดิสคอนทินูอัสพีคดับเบิลยูเอ็ม 120 องศาที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์เท่ากับ 0.8 ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง = 50 Hz ความถี่สัญญาณแคเรียร์ = 1 kHz           | 21   |
| 2.16   | การสวิตช์แบบเจนเนอเรชันดิสคอนทินูอัสพีคดับเบิลยูเอ็ม 30 องศาที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์เท่ากับ 0.8 ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง = 50 Hz ความถี่สัญญาณแคเรียร์ = 1 kHz | 22   |
| 2.17   | ลักษณะการสวิตช์แบบสเปซเวกเตอร์พีคดับเบิลยูเอ็ม ที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์เท่ากับ 0.8 ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง = 50 Hz และความถี่สัญญาณแคเรียร์ = 1 kHz           | 22   |
| 2.18   | โครงสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ                                                                                               | 23   |



## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |                                                                                  | หน้า |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.19   | วงจรสมมูลในอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในอุดมคติ                             | 25   |
| 2.20   | พิกัดกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและการประยุกต์ใช้งาน           | 25   |
| 2.21   | สัญลักษณ์ของไอจีบีทีและโครงสร้างไอจีบีที                                         | 26   |
| 2.22   | (ก) คุณสมบัติระหว่างกระแสและแรงดันของ IGBT<br>(ข) ลักษณะสมบัติการถ่ายโอนของ IGBT | 26   |
| 2.23   | Front Panel และ Block Diagram                                                    | 27   |
| 2.24   | Data Acquisition รุ่น NI USB-6008                                                | 28   |
| 2.25   | โครงสร้างของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ADMCF326BST                            | 30   |
| 2.26   | สถาปัตยกรรมของตัวประมวลผลหลักของ ADMCF326BST                                     | 30   |
| 2.27   | บอร์ด eZdsp TMS 320F2812                                                         | 30   |
| 2.28   | การเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลกับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล               | 31   |
| 3.1    | ปริมาณแสงอาทิตย์ในระยะเวลา 1 วัน                                                 | 33   |
| 3.2    | ไพแรนอมิเตอร์บนคาบฟ้าอาคาร                                                       | 34   |
| 3.3    | วงจรขยายสัญญาณ                                                                   | 34   |
| 3.4    | การเลือกชนิดของข้อมูลและช่องสัญญาณต่อไพแรนอมิเตอร์ที่รับเข้า<br>NI USB-6008      | 35   |
| 3.5    | ลักษณะการทำงานของโปรแกรม                                                         | 35   |
| 3.6    | Source Code ของโปรแกรม LabVIEW                                                   | 36   |
| 3.7    | การจำลองโมเดลของลม                                                               | 37   |
| 3.8    | จำลองความเร็วลมที่ความเร็วลมต่างกัน                                              | 37   |
| 3.9    | การจำลองโมเดลการทำงานของใบพัดกังหันลม                                            | 38   |
| 3.10   | ทอร์กของใบพัดกังหันลม                                                            | 38   |
| 3.11   | การจำลองเพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส<br>แม่เหล็กถาวร      | 39   |
| 3.12   | การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรในสถานะ cut in              | 39   |
| 3.13   | การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรในสถานะปกติ                 | 40   |
| 3.14   | การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรในสถานะ cut out             | 40   |



## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |                                                                        | หน้า |
|--------|------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.15   | แบบจำลองของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ       | 42   |
| 3.16   | ระบบควบคุมของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสามระดับแบบ VOC | 44   |
| 3.17   | ส่วนการควบคุมวงจรแปลงผันแบบ VOC ในโปรแกรม MATLAB/Simulink              | 44   |
| 3.18   | ส่วนการตรวจจับมุมเฟสของแรงดัน                                          | 45   |
| 3.19   | ส่วนการแปลงแกนจาก 3 เฟส abc เป็น d-q                                   | 45   |
| 3.20   | ส่วนการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง                                      | 46   |
| 3.21   | ส่วนการปรับค่ากระแส                                                    | 46   |
| 3.22   | วงจรทบระดับแรงดัน                                                      | 47   |
| 3.23   | บล็อกฟังก์ชัน โอนย้าย Transfer Function ตัวควบคุมชนิด PI               | 48   |
| 3.24   | กราฟแสดง Step Response จากการสุ่มค่าเริ่มต้น                           | 49   |
| 3.25   | กราฟแสดง Step Response ที่ได้จากกฎของ Ziegler-Nichols                  | 49   |
| 3.26   | โครงสร้างพื้นฐานและส่วนประกอบของวงจรพุก-พูลคอนเวอร์เตอร์               | 50   |
| 3.27   | ขาต่างๆภายในตัวไอซี                                                    | 50   |
| 3.28   | วงจรขับเคลื่อนสำหรับวงจรทบระดับและวงจรพุก-พูลคอนเวอร์เตอร์             | 54   |
| 3.29   | วงจรการตรวจจับสัญญาณแรงดัน                                             | 54   |
| 3.30   | วงจรภาคจ่ายไฟวงจรกำลัง                                                 | 55   |
| 3.31   | ดีซีลิงค์ (DC Link)                                                    | 55   |
| 3.32   | โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ SKM75GB063D                                   | 57   |
| 3.33   | วงจรอินเวอร์เตอร์                                                      | 57   |
| 3.34   | วงจรสมมูลของวงจรรองที่ใช้ในการออกแบบ                                   | 58   |
| 3.35   | ตัวประมวลเชิงดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812                                  | 61   |
| 3.36   | โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ CMOS Hex Buffer/Converters # CD4050B          | 61   |
| 3.37   | SKHI 22B board                                                         | 62   |
| 3.38   | วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง                             | 63   |
| 3.39   | วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ                             | 65   |





## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า                                                                   |
|--------|------------------------------------------------------------------------|
| 3.40   | แบบจำลองอย่างง่ายของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ         |
| 3.41   | สถานะสวิตช์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบสามระดับ                              |
| 4.1    | การทดสอบการวัดและบันทึกข้อมูลรังสีจากดวงอาทิตย์                        |
| 4.2    | ตำแหน่งการแสดงผลของโปรแกรม                                             |
| 4.3    | ค่าที่ได้จากการวัดด้วย data logger กับจำลองจากโปรแกรม LabVIEW วันที่ 1 |
| 4.4    | ค่าที่ได้จากการวัดด้วย data logger กับจำลองจากโปรแกรม LabVIEW วันที่ 2 |
| 4.5    | ค่าที่ได้จากการวัดด้วย data logger กับจำลองจากโปรแกรม LabVIEW วันที่ 3 |
| 4.6    | ความเร็วลมและความเร็วรอบ                                               |
| 4.7    | ความเร็วลมและแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายโหลด                                    |
| 4.8    | ความเร็วลมและกระแสไฟฟ้าขณะจ่ายโหลด                                     |
| 4.9    | ความเร็วลมและกำลังเอาต์พุตขณะจ่ายโหลด                                  |
| 4.10   | กระแสไฟฟ้าและแรงดันขณะจ่ายโหลด                                         |
| 4.11   | กระแสไฟฟ้าและกำลังเอาต์พุตขณะจ่ายโหลด                                  |
| 4.12   | การปรับโหลดและกำลังเอาต์พุตที่จ่ายโหลดที่ 14 m/s                       |
| 4.13   | การปรับโหลดและกำลังเอาต์พุตที่จ่ายโหลดที่ 21 m/s                       |
| 4.14   | การปรับโหลดและกำลังเอาต์พุตที่จ่ายโหลดที่ 25 m/s                       |
| 4.15   | เปรียบเทียบการปรับ โหลดและกำลังเอาต์พุตที่จ่ายโหลด                     |
| 4.16   | การจำลองการทำงานของกังหันลมด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK                 |
| 4.17   | ความเร็วลมที่ความเร็วเริ่มทำงาน Cut in 2 m/s                           |
| 4.18   | แรงบิดที่สถานะเริ่มทำงาน Cut in 2 m/s                                  |
| 4.19   | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่สถานะเริ่มทำงาน Cut in 2 m/s                      |
| 4.20   | รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสถานะเริ่มทำงาน Cut in 2 m/s                        |
| 4.21   | ความเร็วลมที่ความเร็วทำงานปกติ Normal 9 m/s                            |
| 4.22   | แรงบิดที่สถานะทำงานปกติ Normal 9 m/s                                   |
| 4.23   | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่สถานะทำงานปกติ Normal 9 m/s                       |
| 4.24   | รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่สถานะทำงานปกติ Normal 9 m/s                      |
| 4.25   | ความเร็วลมที่ความเร็วในช่วง Cut out 35 m/s                             |



## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |                                                                                       | หน้า |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.26   | แรงบิดที่สภาวะทำงาน Cut out 35 m/s                                                    | 76   |
| 4.27   | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่สภาวะทำงาน Cut out 35 m/s                                        | 77   |
| 4.28   | รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะทำงาน Cut out 35 m/s                                       | 77   |
| 4.29   | วงจรจำลองการทำงานของระบบ                                                              | 77   |
| 4.30   | แรงดันแหล่งจ่ายในวงจรแปลงผันฯแบบสามระดับ                                              | 78   |
| 4.31   | แรงดันของตัวเก็บประจุ C1 ของวงจรแปลงผันฯแบบสามระดับ                                   | 78   |
| 4.32   | แรงดันของตัวเก็บประจุ C2 ของวงจรแปลงผันฯแบบสามระดับ                                   | 79   |
| 4.33   | แรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันฯแบบสามระดับ                                               | 79   |
| 4.34   | แรงดันตกคร่อมที่ตัวอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ (IGBT) ในวงจรแปลงผันฯแบบสามระดับ       | 79   |
| 4.35   | แรงดันแหล่งจ่ายในวงจรแปลงผันฯแบบสองระดับ                                              | 80   |
| 4.36   | แรงดันของตัวเก็บประจุ C หรือแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันฯแบบสองระดับ                   | 80   |
| 4.37   | แรงดันตกคร่อมที่ตัวอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ (IGBT) ในวงจรแปลงผันฯแบบสองระดับ       | 80   |
| 4.38   | วงจรการจำลองของวงจรทระดับแรงดันใน MATLAB/SIMULINK                                     | 81   |
| 4.39   | การจำลองแรงดันที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แรงดัน 48 V คงที่                         | 82   |
| 4.40   | การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรเรียงกระแส                                                 | 82   |
| 4.41   | การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรทระดับแรงดัน                                               | 83   |
| 4.42   | การจำลองแรงดันที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สภาวะแรงดันเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน | 83   |
| 4.43   | การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรเรียงกระแส                                                 | 83   |
| 4.44   | การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรทระดับแรงดัน                                               | 83   |
| 4.45   | สัญญาณที่ใช้ขับสวิตช์ Mosfet ของวงจรทระดับแรงดัน                                      | 84   |
| 4.46   | สัญญาณที่ใช้ขับสวิตช์ Mosfet ของวงจรพืช-พูลคอนเวอร์เตอร์                              | 85   |
| 4.47   | แรงดันของวงจรเรียงกระแสและวงจรทระดับแรงดันเมื่อสภาวะแรงดันคงที่                       | 85   |
| 4.48   | แรงดันของวงจรเรียงกระแสและวงจรทระดับแรงดันเมื่อสภาวะแรงดันเกิดการเปลี่ยนแปลง          | 86   |



## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า                                                                                        |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4.49   | ภาพรวมวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับ                                                             |
| 4.50   | รูปคลื่นแรงดันทางด้านขาออก ezDSP TMS320F2812                                                |
| 4.51   | รูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าทางด้านขาออกของวงจรขับเคลื่อน                                            |
| 4.52   | ค่าแรงดันที่ผ่านวงจรเรียงกระแส 3 เฟส                                                        |
| 4.53   | ค่าแรงดันเมื่อต่อคาปาซิเตอร์                                                                |
| 4.54   | สัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มในเฟส A                                                               |
| 4.55   | สัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มในเฟส B                                                               |
| 4.56   | สัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มในเฟส C                                                               |
| 4.57   | สัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มรวมเฟส A, B, C                                                        |
| 4.58   | รูปคลื่นแรงดัน $V_{ab}$ ที่โหลดความต้านทาน 1 kW 200 โอห์ม แรงดัน 600V                       |
| 4.59   | รูปคลื่นแรงดัน $V_{bc}$ ที่โหลดความต้านทาน 1 kW 200 โอห์ม แรงดัน 600V                       |
| 4.60   | รูปคลื่นแรงดัน $V_{ca}$ ที่โหลดความต้านทาน 1 kW 200 โอห์ม แรงดัน 600V                       |
| 4.61   | รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ารวม $V_{ab}$ , $V_{bc}$ , $V_{ca}$ แรงดัน 600 V                          |
| 4.62   | กระแสในสาย $I_a$ ของวงจรอินเวอร์เตอร์                                                       |
| 4.63   | กระแสในสาย $I_b$ ของวงจรอินเวอร์เตอร์                                                       |
| 4.64   | กระแสในสาย $I_c$ ของวงจรอินเวอร์เตอร์                                                       |
| 4.65   | แรงดันเฟส $V_{an}$ ของวงจรอินเวอร์เตอร์                                                     |
| 4.66   | แรงดันเฟส $V_{bn}$ ของวงจรอินเวอร์เตอร์                                                     |
| 4.67   | แรงดันเฟส $V_{cn}$ ของวงจรอินเวอร์เตอร์                                                     |
| 4.68   | วัดแรงดัน $V_{ab}$ , $V_{bc}$ , $V_{ca}$ เมื่อต่อโหลดขนาด 1 กิโลวัตต์                       |
| 4.69   | สัญญาณขา G1 กับ G3 เฟส A                                                                    |
| 4.70   | สัญญาณขา G2 กับ G4 เฟส A                                                                    |
| 4.71   | สัญญาณขา G1 กับ G2 เฟส B                                                                    |
| 4.72   | เปรียบเทียบสัญญาณ G1 เฟส A กับ สัญญาณ G1 เฟส B                                              |
| 4.73   | วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK             |
| 4.74   | บล็อกควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier) ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK |



## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |                                              | หน้า |
|--------|----------------------------------------------|------|
| 4.75   | กระแสด้านเข้าที่ได้รับจากแหล่งกำเนิดพลังงาน  | 99   |
| 4.76   | กระแสด้านเข้าของเฟส A                        | 100  |
| 4.77   | กระแสด้านเข้าของเฟส B                        | 100  |
| 4.78   | กระแสด้านเข้าของเฟส C                        | 100  |
| 4.79   | แรงดันด้านเข้าที่ได้รับจากแหล่งกำเนิดพลังงาน | 101  |
| 4.80   | แรงดันที่ DC-Link                            | 101  |
| 4.81   | แรงดันที่ตัวเก็บประจุตัวที่ 1                | 101  |
| 4.82   | แรงดันที่ตัวเก็บประจุตัวที่ 2                | 102  |
| 4.83   | กระแสด้านออกที่ผ่านวงจรแปลงผันฯ              | 102  |
| 4.84   | แรงดันด้านออกที่ผ่านวงจรแปลงผันฯ             | 102  |



## สารบัญรูป

| รูปที่ |                                                                                                                                                                | หน้า |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1    | ตัวอย่างระบบพลังงานทดแทนที่ใช้วงจรแปลงผันพลังงาน                                                                                                               | 2    |
| 1.2    | แผนผังการควบคุมวงจรแปลงผันพลังงาน                                                                                                                              | 2    |
| 2.1    | วงจรแปลงพลังงานและวงจรควบคุมแบบง่าย                                                                                                                            | 5    |
| 2.2    | แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า                                                                                                                                        | 6    |
| 2.3    | กราฟแสดงเป้าหมายของยุทธศาสตร์พลังงานทดแทนของประเทศไทย                                                                                                          | 7    |
| 2.4    | แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลมในประเทศไทย                                                                                                         | 8    |
| 2.5    | Solar Cell                                                                                                                                                     | 9    |
| 2.6    | โครงสร้างของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสามระดับแบบพีคดับลิวเอ็ม (Three-Level PWM Rectifier)                                                     | 13   |
| 2.7    | แผนภูมิการไหลของกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสามระดับแบบพีคดับลิวเอ็ม                                                                | 16   |
| 2.8    | วงจรแปลงผันแบบทบระดับแรงดัน                                                                                                                                    | 16   |
| 2.9    | วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส                                                                                                                                    | 17   |
| 2.10   | วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส                                                                                                                                 | 17   |
| 2.11   | วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับ                                                                                                                                      | 18   |
| 2.12   | สัญญาณสวิตชิงในแต่ละกลุ่ม                                                                                                                                      | 20   |
| 2.13   | หลักการสร้างรูปแบบพีคดับเบิลยูเอ็มแบบ SPWM                                                                                                                     | 20   |
| 2.14   | รูปคลื่นพีคดับเบิลยูเอ็มแบบเทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์                                                                                                           | 21   |
| 2.15   | การสวิตช์แบบคิสคอนทิวอัสพีคดับเบิลยูเอ็ม 120 องศาที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์เท่ากับ 0.8 ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง = 50 Hz ความถี่สัญญาณแคเรียร์ = 1 kHz             | 21   |
| 2.16   | การสวิตช์แบบเจนเนอไรเซชันคิสคอนทิวอัสพีคดับเบิลยูเอ็ม 30 องศาที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์เท่ากับ 0.8 ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง = 50 Hz ความถี่สัญญาณแคเรียร์ = 1 kHz | 22   |
| 2.17   | ลักษณะการสวิตช์แบบสเปซเวกเตอร์พีคดับเบิลยูเอ็ม ที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์เท่ากับ 0.8 ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง = 50 Hz และความถี่สัญญาณแคเรียร์ = 1 kHz            | 22   |
| 2.18   | โครงสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ                                                                                                | 23   |



## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |                                                                                  | หน้า |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.19   | วงจรสมมูลในอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในอุดมคติ                             | 25   |
| 2.20   | พิกัดกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและการประยุกต์ใช้งาน           | 25   |
| 2.21   | สัญลักษณ์ของไอจีบีทีและโครงสร้างไอจีบีที                                         | 26   |
| 2.22   | (ก) คุณสมบัติระหว่างกระแสและแรงดันของ IGBT<br>(ข) ลักษณะสมบัติการถ่ายโอนของ IGBT | 26   |
| 2.23   | Front Panel และ Block Diagram                                                    | 27   |
| 2.24   | Data Acquisition รุ่น NI USB-6008                                                | 28   |
| 2.25   | โครงสร้างของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ADMCF326BST                            | 30   |
| 2.26   | สถาปัตยกรรมของตัวประมวลผลหลักของ ADMCF326BST                                     | 30   |
| 2.27   | บอร์ด eZdsp TMS 320F2812                                                         | 30   |
| 2.28   | การเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลกับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล               | 31   |
| 3.1    | ปริมาณแสงอาทิตย์ในระยะเวลา 1 วัน                                                 | 33   |
| 3.2    | ไพแรนอมิเตอร์บนคาบฟ้าอาคาร                                                       | 34   |
| 3.3    | วงจรขยายสัญญาณ                                                                   | 34   |
| 3.4    | การเลือกชนิดของข้อมูลและช่องสัญญาณต่อไพแรนอมิเตอร์ที่รับเข้า<br>NI USB-6008      | 35   |
| 3.5    | ลักษณะการทำงานของโปรแกรม                                                         | 35   |
| 3.6    | Source Code ของโปรแกรม LabVIEW                                                   | 36   |
| 3.7    | การจำลองโมเดลของลม                                                               | 37   |
| 3.8    | จำลองความเร็วลมที่ความเร็วลมต่างกัน                                              | 37   |
| 3.9    | การจำลองโมเดลการทำงานของใบพัดกังหันลม                                            | 38   |
| 3.10   | ทอร์กของใบพัดกังหันลม                                                            | 38   |
| 3.11   | การจำลองเพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส<br>แม่เหล็กถาวร      | 39   |
| 3.12   | การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรในสถานะ cut in              | 39   |
| 3.13   | การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรในสถานะปกติ                 | 40   |
| 3.14   | การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรในสถานะ cut out             | 40   |



## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |                                                                        | หน้า |
|--------|------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.15   | แบบจำลองของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ       | 42   |
| 3.16   | ระบบควบคุมของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสามระดับแบบ VOC | 44   |
| 3.17   | ส่วนการควบคุมวงจรแปลงผันแบบ VOC ในโปรแกรม MATLAB/Simulink              | 44   |
| 3.18   | ส่วนการตรวจจับมุมเฟสของแรงดัน                                          | 45   |
| 3.19   | ส่วนการแปลงแกนจาก 3 เฟส abc เป็น d-q                                   | 45   |
| 3.20   | ส่วนการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง                                      | 46   |
| 3.21   | ส่วนการปรับค่ากระแส                                                    | 46   |
| 3.22   | วงจรทบระดับแรงดัน                                                      | 47   |
| 3.23   | บล็อกฟังก์ชัน โอนย้าย Transfer Function ตัวควบคุมชนิด PI               | 48   |
| 3.24   | กราฟแสดง Step Response จากการสุ่มค่าเริ่มต้น                           | 49   |
| 3.25   | กราฟแสดง Step Response ที่ได้จากกฎของ Ziegler-Nichols                  | 49   |
| 3.26   | โครงสร้างพื้นฐานและส่วนประกอบของวงจรพุก-พูลคอนเวอร์เตอร์               | 50   |
| 3.27   | ขาต่างๆภายในตัวไอซี                                                    | 50   |
| 3.28   | วงจรขับเคลื่อนสำหรับวงจรทบระดับและวงจรพุก-พูลคอนเวอร์เตอร์             | 54   |
| 3.29   | วงจรการตรวจจับสัญญาณแรงดัน                                             | 54   |
| 3.30   | วงจรภาคจ่ายไฟวงจรกำลัง                                                 | 55   |
| 3.31   | ดีซีลิงค์ (DC Link)                                                    | 55   |
| 3.32   | โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ SKM75GB063D                                   | 57   |
| 3.33   | วงจรอินเวอร์เตอร์                                                      | 57   |
| 3.34   | วงจรสมมูลของวงจรรองที่ใช้ในการออกแบบ                                   | 58   |
| 3.35   | ตัวประมวลเชิงดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812                                  | 61   |
| 3.36   | โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ CMOS Hex Buffer/Converters # CD4050B          | 61   |
| 3.37   | SKHI 22B board                                                         | 62   |
| 3.38   | วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง                             | 63   |
| 3.39   | วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ                             | 65   |



## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า                                                                   |
|--------|------------------------------------------------------------------------|
| 3.40   | แบบจำลองอย่างง่ายของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ         |
| 3.41   | สถานะสวิตช์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบสามระดับ                              |
| 4.1    | การทดสอบการวัดและบันทึกข้อมูลรังสีจากดวงอาทิตย์                        |
| 4.2    | ตำแหน่งการแสดงผลของโปรแกรม                                             |
| 4.3    | ค่าที่ได้จากการวัดด้วย data logger กับจำลองจากโปรแกรม LabVIEW วันที่ 1 |
| 4.4    | ค่าที่ได้จากการวัดด้วย data logger กับจำลองจากโปรแกรม LabVIEW วันที่ 2 |
| 4.5    | ค่าที่ได้จากการวัดด้วย data logger กับจำลองจากโปรแกรม LabVIEW วันที่ 3 |
| 4.6    | ความเร็วลมและความเร็วรอบ                                               |
| 4.7    | ความเร็วลมและแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายโหลด                                    |
| 4.8    | ความเร็วลมและกระแสไฟฟ้าขณะจ่ายโหลด                                     |
| 4.9    | ความเร็วลมและกำลังเอาต์พุตขณะจ่ายโหลด                                  |
| 4.10   | กระแสไฟฟ้าและแรงดันขณะจ่ายโหลด                                         |
| 4.11   | กระแสไฟฟ้าและกำลังเอาต์พุตขณะจ่ายโหลด                                  |
| 4.12   | การปรับโหลดและกำลังเอาต์พุตที่จ่ายโหลดที่ 14 m/s                       |
| 4.13   | การปรับโหลดและกำลังเอาต์พุตที่จ่ายโหลดที่ 21 m/s                       |
| 4.14   | การปรับโหลดและกำลังเอาต์พุตที่จ่ายโหลดที่ 25 m/s                       |
| 4.15   | เปรียบเทียบการปรับ โหลดและกำลังเอาต์พุตที่จ่ายโหลด                     |
| 4.16   | การจำลองการทำงานของกังหันลมด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK                 |
| 4.17   | ความเร็วลมที่ความเร็วเริ่มทำงาน Cut in 2 m/s                           |
| 4.18   | แรงบิดที่สถานะเริ่มทำงาน Cut in 2 m/s                                  |
| 4.19   | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่สถานะเริ่มทำงาน Cut in 2 m/s                      |
| 4.20   | รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสถานะเริ่มทำงาน Cut in 2 m/s                        |
| 4.21   | ความเร็วลมที่ความเร็วทำงานปกติ Normal 9 m/s                            |
| 4.22   | แรงบิดที่สถานะทำงานปกติ Normal 9 m/s                                   |
| 4.23   | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่สถานะทำงานปกติ Normal 9 m/s                       |
| 4.24   | รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่สถานะทำงานปกติ Normal 9 m/s                      |
| 4.25   | ความเร็วลมที่ความเร็วในช่วง Cut out 35 m/s                             |





## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |                                                                                       | หน้า |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.26   | แรงบิดที่สภาวะทำงาน Cut out 35 m/s                                                    | 76   |
| 4.27   | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่สภาวะทำงาน Cut out 35 m/s                                        | 77   |
| 4.28   | รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะทำงาน Cut out 35 m/s                                       | 77   |
| 4.29   | วงจรจำลองการทำงานของระบบ                                                              | 77   |
| 4.30   | แรงดันแหล่งจ่ายในวงจรแปลงผันฯแบบสามระดับ                                              | 78   |
| 4.31   | แรงดันของตัวเก็บประจุ C1 ของวงจรแปลงผันฯแบบสามระดับ                                   | 78   |
| 4.32   | แรงดันของตัวเก็บประจุ C2 ของวงจรแปลงผันฯแบบสามระดับ                                   | 79   |
| 4.33   | แรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันฯแบบสามระดับ                                               | 79   |
| 4.34   | แรงดันตกคร่อมที่ตัวอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ (IGBT) ในวงจรแปลงผันฯแบบสามระดับ       | 79   |
| 4.35   | แรงดันแหล่งจ่ายในวงจรแปลงผันฯแบบสองระดับ                                              | 80   |
| 4.36   | แรงดันของตัวเก็บประจุ C หรือแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันฯแบบสองระดับ                   | 80   |
| 4.37   | แรงดันตกคร่อมที่ตัวอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ (IGBT) ในวงจรแปลงผันฯแบบสองระดับ       | 80   |
| 4.38   | วงจรการจำลองของวงจรทระดับแรงดันใน MATLAB/SIMULINK                                     | 81   |
| 4.39   | การจำลองแรงดันที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แรงดัน 48 V คงที่                         | 82   |
| 4.40   | การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรเรียงกระแส                                                 | 82   |
| 4.41   | การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรวงจรทระดับแรงดัน                                           | 83   |
| 4.42   | การจำลองแรงดันที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สภาวะแรงดันเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน | 83   |
| 4.43   | การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรเรียงกระแส                                                 | 83   |
| 4.44   | การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรวงจรทระดับแรงดัน                                           | 83   |
| 4.45   | สัญญาณที่ใช้ขับสวิตช์ Mosfet ของวงจรทระดับแรงดัน                                      | 84   |
| 4.46   | สัญญาณที่ใช้ขับสวิตช์ Mosfet ของวงจรพืซ-พูลคอนเวอร์เตอร์                              | 85   |
| 4.47   | แรงดันของวงจรเรียงกระแสและวงจรทระดับแรงดันเมื่อสภาวะแรงดันคงที่                       | 85   |
| 4.48   | แรงดันของวงจรเรียงกระแสและวงจรทระดับแรงดันเมื่อสภาวะแรงดันเกิดการเปลี่ยนแปลง          | 86   |



## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า                                                                                        |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4.49   | ภาพรวมวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับ                                                             |
| 4.50   | รูปคลื่นแรงดันทางด้านขาออก ezDSP TMS320F2812                                                |
| 4.51   | รูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าทางด้านขาออกของวงจรขับเคลื่อน                                            |
| 4.52   | ค่าแรงดันที่ผ่านวงจรเรียงกระแส 3 เฟส                                                        |
| 4.53   | ค่าแรงดันเมื่อต่อคาปาซิเตอร์                                                                |
| 4.54   | สัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มในเฟส A                                                               |
| 4.55   | สัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มในเฟส B                                                               |
| 4.56   | สัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มในเฟส C                                                               |
| 4.57   | สัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มรวมเฟส A, B, C                                                        |
| 4.58   | รูปคลื่นแรงดัน $V_{ab}$ ที่โหลดความต้านทาน 1 kW 200 โอห์ม แรงดัน 600V                       |
| 4.59   | รูปคลื่นแรงดัน $V_{bc}$ ที่โหลดความต้านทาน 1 kW 200 โอห์ม แรงดัน 600V                       |
| 4.60   | รูปคลื่นแรงดัน $V_{ca}$ ที่โหลดความต้านทาน 1 kW 200 โอห์ม แรงดัน 600V                       |
| 4.61   | รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ารวม $V_{ab}$ , $V_{bc}$ , $V_{ca}$ แรงดัน 600 V                          |
| 4.62   | กระแสในสาย $I_a$ ของวงจรอินเวอร์เตอร์                                                       |
| 4.63   | กระแสในสาย $I_b$ ของวงจรอินเวอร์เตอร์                                                       |
| 4.64   | กระแสในสาย $I_c$ ของวงจรอินเวอร์เตอร์                                                       |
| 4.65   | แรงดันเฟส $V_{an}$ ของวงจรอินเวอร์เตอร์                                                     |
| 4.66   | แรงดันเฟส $V_{bn}$ ของวงจรอินเวอร์เตอร์                                                     |
| 4.67   | แรงดันเฟส $V_{cn}$ ของวงจรอินเวอร์เตอร์                                                     |
| 4.68   | วัดแรงดัน $V_{ab}$ , $V_{bc}$ , $V_{ca}$ เมื่อต่อโหลดขนาด 1 กิโลวัตต์                       |
| 4.69   | สัญญาณขา G1 กับ G3 เฟส A                                                                    |
| 4.70   | สัญญาณขา G2 กับ G4 เฟส A                                                                    |
| 4.71   | สัญญาณขา G1 กับ G2 เฟส B                                                                    |
| 4.72   | เปรียบเทียบสัญญาณ G1 เฟส A กับ สัญญาณ G1 เฟส B                                              |
| 4.73   | วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK             |
| 4.74   | บล็อกควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier) ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK |



## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |                                              | หน้า |
|--------|----------------------------------------------|------|
| 4.75   | กระแสด้านเข้าที่ได้รับจากแหล่งกำเนิดพลังงาน  | 99   |
| 4.76   | กระแสด้านเข้าของเฟส A                        | 100  |
| 4.77   | กระแสด้านเข้าของเฟส B                        | 100  |
| 4.78   | กระแสด้านเข้าของเฟส C                        | 100  |
| 4.79   | แรงดันด้านเข้าที่ได้รับจากแหล่งกำเนิดพลังงาน | 101  |
| 4.80   | แรงดันที่ DC-Link                            | 101  |
| 4.81   | แรงดันที่ตัวเก็บประจุตัวที่ 1                | 101  |
| 4.82   | แรงดันที่ตัวเก็บประจุตัวที่ 2                | 102  |
| 4.83   | กระแสด้านออกที่ผ่านวงจรแปลงผันฯ              | 102  |
| 4.84   | แรงดันด้านออกที่ผ่านวงจรแปลงผันฯ             | 102  |



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากสถานการณ์ราคาน้ำมันที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว รวมถึงการผลิตน้ำมันของแหล่งน้ำมันโลกมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ประเทศต่างๆ ต้องค้นหาทางออกตามสภาพกำลังความสามารถของตน ปัจจุบันประเทศไทยต้องนำเข้าพลังงานคิดเป็นมูลค่าประมาณสี่แสนล้านบาทต่อปี ประกอบกับการใช้พลังงานเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ซึ่งค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานเหล่านี้มีแนวโน้มสูงขึ้นในอนาคต อันทำให้ระบบเศรษฐกิจอยู่บนรากฐานความไม่ยั่งยืนจากการศึกษากิจกรรมด้านการพลังงานตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 9 และ 10 รัฐบาลได้วางยุทธศาสตร์ที่สำคัญเกี่ยวกับพลังงาน โดยมีแนวทางการพัฒนาที่สำคัญ สรุปได้ดังนี้

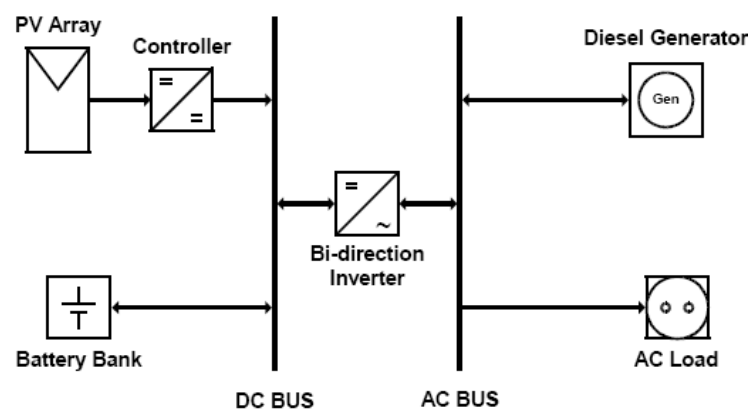
1. ส่งเสริมให้มีการอนุรักษ์และใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและประหยัด
2. จัดหาพลังงานให้เพียงพอกับความต้องการอย่างมีคุณภาพ
3. การวิจัยสาขาพลังงานมุ่งเน้นการพึ่งตนเองโดยส่งเสริมการวิจัย การประหยัดพลังงาน และพัฒนาระบบโครงสร้างพลังงานหมุนเวียนและพลังงานทดแทนประเภทต่างๆ

เหตุผลดังกล่าวการพัฒนาพลังงานทดแทนแบบต่างๆ จะได้เกิดขึ้น และมีโอกาสที่จะเจริญเติบโตมาในอนาคต พลังงานทดแทนในประเทศไทยที่สามารถพัฒนาเพื่อความยั่งยืนมีดังต่อไปนี้ คือ ชีวมวล พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และอื่นๆ ตามสภาพภูมิประเทศ แต่อุปกรณ์และเทคโนโลยีการผลิตส่วนมากต้องมีการนำเข้ามากกว่าร้อยละ 60 จากต่างประเทศ ทำให้ประเทศไทยเสียดุลการค้าเป็นจำนวนมากมหาศาล เทคโนโลยีของพลังงานทดแทนสามารถแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้ คือ เทคโนโลยีแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน, เทคโนโลยีแปลงผันพลังงานทดแทน, เทคโนโลยีเก็บสะสมพลังงานทดแทน และเทคโนโลยีส่งจ่ายพลังงานทดแทน

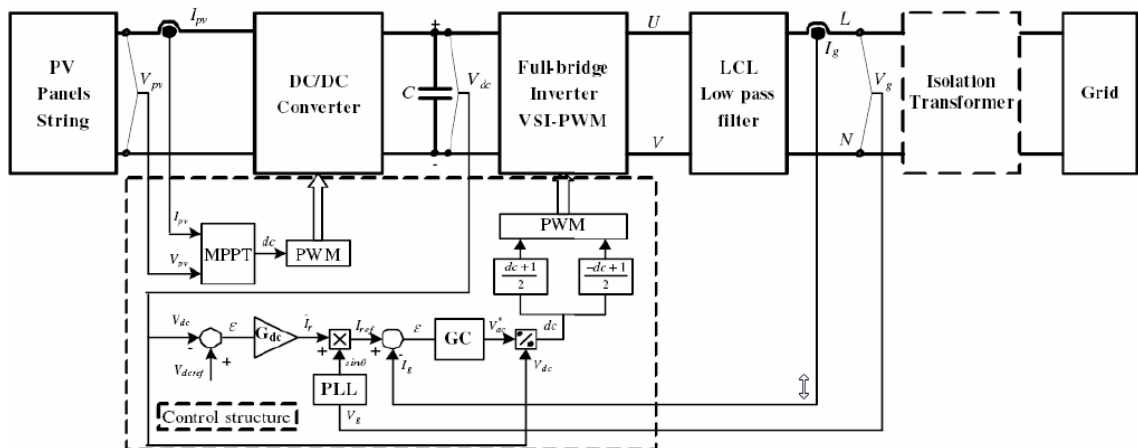
ในแผนการวิจัยครั้งนี้ มุ่งเน้นไปที่การสร้างต้นแบบราคาประหยัดของ เทคโนโลยีแปลงผันพลังงานทดแทน ที่ใช้วัสดุส่วนมากในเมืองไทย เพื่อลดการนำเข้า วงจรแปลงผันพลังงานสำหรับพลังงานทดแทนแบ่งออกได้ 4 โครงสร้างหลัก ดังนี้

1. วงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit)
2. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC-to-DC Converter)
3. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter)
4. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Back-to-Back Converter)

วงจรแปลงผันไฟฟ้าในปัจจุบันมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการคิดค้นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีขนาดเล็กและมีความเชื่อถือได้สูงได้ และสามารถตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมด้านการควบคุมกระบวนการผลิตได้ดี หน้าที่อีกอย่างที่สำคัญคือ การนำมาใช้เป็นอุปกรณ์แปลงผันพลังงานให้กับโหลด การแปลงผันพลังงานเช่นนี้จะมีประสิทธิภาพสูง เพราะกำลังสูญเสียในสวิตช์มีค่าต่ำ รูปที่ 1.1 แสดงตัวอย่างระบบพลังงานทดแทนที่ใช้วงจรแปลงผันพลังงานที่ใช้วงจรแปลงผันพลังงาน 2 ชนิดคือ วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีแหล่งจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์และชีวมวล



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างระบบพลังงานทดแทนที่ใช้วงจรแปลงผันพลังงาน



รูปที่ 1.2 แผนผังการควบคุมวงจรแปลงผันพลังงาน

รูปที่ 1.2 แสดงวงจรควบคุมพลังงานทดแทนจากแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนแสงอาทิตย์ ซึ่งจำเป็นต้องมีการควบคุมแรงดันและกระแสเพื่อต่อเข้ากับกริด ดังนั้นโครงข่ายวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นถึงการศึกษาและวิจัยโครงสร้างของวงแปลงพลังงานอย่างเป็นระบบและเหมาะสมสำหรับพลังงานทดแทนที่มีขนาดเล็กและราคาถูกลง โดยอาศัยวัสดุอุปกรณ์จากประเทศไทยทั้งหมด



## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาแบบจำลองของแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนเพื่อทดสอบวงจรแปลงพลังงานไฟฟ้าสามระดับ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาวจรแปลงผันไฟฟ้าแบบสามระดับกระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาวจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน
- 1.2.4 เพื่อศึกษาวจรแปลงผันไฟฟ้าแบบสามระดับกระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน
- 1.2.5 เพื่อศึกษาวจรแปลงผันไฟฟ้าแบบสามระดับกระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

### 1.3.1 โครงการวิจัยที่ 1

- 1.3.1.1 พัฒนาแบบจำลองแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์
- 1.3.1.2 พัฒนาแบบจำลองแหล่งพลังงานกังหันลม
- 1.3.1.3 พัฒนาแบบจำลองแหล่งพลังงานเซลล์เชื้อเพลิง

### 1.3.2 โครงการวิจัยที่ 2

- 1.3.2.1 พัฒนาวจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสามระดับกับแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานกังหันลม และเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 100 kW

### 1.3.3 โครงการวิจัยที่ 3

- 1.3.3.1 พัฒนาวจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงกับแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานกังหันลม และเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1 kW

### 1.3.4 โครงการวิจัยที่ 4

- 1.3.3.1 สามารถออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับกับแหล่งพลังงานทดแทนขนาด 1 kW
- 1.3.3.2 สร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับกับแหล่งพลังงานทดแทนขนาด 1 kW

### 1.3.5 โครงการวิจัยที่ 5

- 1.3.5.1 ออกแบบและจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามระดับกับแหล่งพลังงานลม
- 1.3.5.2 พัฒนาวจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามระดับกับแหล่งพลังงานลมขนาด 1 kW



#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เมื่อทำการวิจัยเสร็จสิ้นคาดว่าจะได้รับประโยชน์ดังนี้

1. ได้ทราบถึงระบบที่ทำให้มีประสิทธิภาพการใช้วงจรแปลงผันพลังงานแบบต่างๆ
2. การปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้วงจรแปลงผันพลังงานแบบต่างๆ
3. ผู้ผลิตไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถเพิ่มศักยภาพทางการแข่งขันได้
4. ผู้ประกอบการทางด้านพลังงานทดแทนจะได้ใช้เทคโนโลยีคนไทย
5. การเผยแพร่ผลการวิจัยในการประชุมวิชาการ และวารสารด้านพลังงานทดแทน
6. ส่งเสริมการสร้างความมั่นคงของระบบไฟฟ้าโดยรวมของประเทศ

โดยผู้ที่สามารถนำผลจากการวิจัยไปใช้ประโยชน์ดังนี้

1. หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับรับผิดชอบด้านพลังงานทดแทน
2. นักศึกษา นักวิชาการในสถานศึกษา

#### 1.5 ระยะเวลาทำการวิจัยและแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

| การดำเนินงานวิจัย                 | ระยะเวลา (เดือน) |     |     |     |      |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------|------------------|-----|-----|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                   | 1-2              | 3-4 | 5-6 | 7-8 | 9-10 | 11-12 | 13-14 | 15-16 | 17-18 | 19-20 | 21-22 | 23-24 |
| ศึกษาและรวบรวมข้อมูลระบบ          |                  |     |     |     |      |       |       |       |       |       |       |       |
| จัดซื้ออุปกรณ์เพื่อทำการวิเคราะห์ |                  |     |     |     |      |       |       |       |       |       |       |       |
| โครงการวิจัยย่อยที่ 1             |                  |     |     |     |      |       |       |       |       |       |       |       |
| โครงการวิจัยย่อยที่ 2             |                  |     |     |     |      |       |       |       |       |       |       |       |
| โครงการวิจัยย่อยที่ 3             |                  |     |     |     |      |       |       |       |       |       |       |       |
| โครงการวิจัยย่อยที่ 4             |                  |     |     |     |      |       |       |       |       |       |       |       |
| โครงการวิจัยย่อยที่ 5             |                  |     |     |     |      |       |       |       |       |       |       |       |
| จัดทำรายงานการวิจัยและสรุปผล      |                  |     |     |     |      |       |       |       |       |       |       |       |

## บทที่ 2

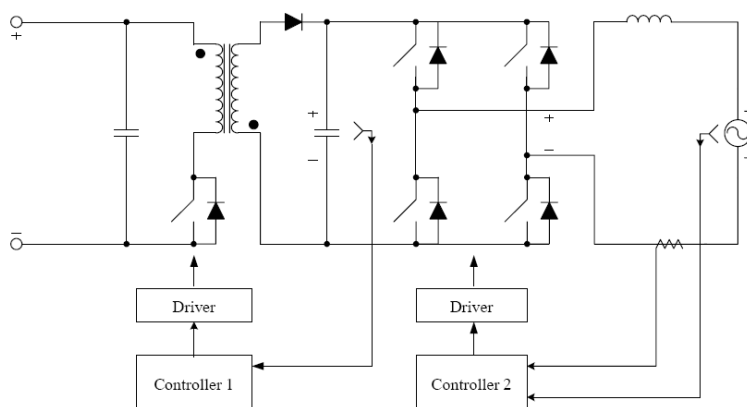
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันได้มีการนำพลังงานทดแทนมาใช้ เพื่อทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงที่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ระบบไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนหลายแบบขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนและภูมิประเทศ ตัวอย่างเช่นการแปลงพลังงานไฟฟ้าได้จากพลังงานทดแทนแสงอาทิตย์จ่ายให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน เมื่อพลังงานที่ได้รับมากเกินขนาดพิกัดของโหลด พลังงานไฟฟ้าส่วนที่เหลือใช้จะถูกจ่ายคืนให้กับระบบของการไฟฟ้าหรือเก็บสะสมในรูปของแบตเตอรี่ ซึ่งระบบนี้จะมีเสถียรภาพที่ดี วงจรคอนเวอร์เตอร์เป็นรูปแบบที่ใช้งานกันทั่วไป มีลักษณะของวงจรที่ง่าย และราคาถูก ในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์และออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้าสำหรับพลังงานทดแทนแบบเชื่อมต่อกับระบบของการไฟฟ้า และการควบคุมแรงดันและกระแสอย่างแม่นยำ

ในแผนการวิจัยครั้งนี้ มุ่งเน้นที่การสร้างต้นแบบวงจรแปลงผันพลังงานจากพลังงานทดแทนราคาประหยัด ที่ใช้วัสดุส่วนมากในเมืองไทย เพื่อลดการนำเข้าแบ่งออกได้ 4 โครงสร้างหลัก ดังนี้

1. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (AC-to-DC Converter)
2. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC-to-DC Converter)
3. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (DC-to-AC Converter)
4. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC-to-AC Converter)

รูปที่ 2.1 แสดงวงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟสลับแบบเชื่อมต่อกับระบบของระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เป็นวงจรแปลงผันพลังงานที่ได้มาจากพลังงานทดแทนเพื่อนำไปใช้งาน โดยเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงและผ่านเข้าสู่วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายพลังงานกลับคืนให้กับระบบของการไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 วงจรแปลงพลังงานและวงจรควบคุมแบบง่าย



กรอบแนวความคิดของแผนงานวิจัยคือ จากโครงสร้างการทำงานของระบบพลังงานทดแทน แนวทางในการทำวิจัยจะมุ่งเน้นไปที่การสร้างระบบพลังงานทดแทนขึ้นมา ที่สามารถจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อแหล่งพลังงานส่วนใดมีใช้จะนำมาใช้และเก็บประจุไว้ที่ตัวเก็บไฟฟ้า จากแนวความคิดของการวิจัยนี้จะทำให้สามารถสร้างวงจรแปลงผันระบบพลังงานทดแทนได้อย่างต่อเนื่องโดยมีระบบการจัดการพลังงานแบบผสมผสานที่มีประสิทธิภาพเพื่อนำพลังงานไปใช้อย่างสูงสุด องค์ประกอบหลักที่นำมาใช้งานวิจัยนี้คือ

1. ชุดพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ประกอบด้วย
  - 1.1 ทฤษฎีการประจุพลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่ (Battery Charger)
  - 1.2 ทฤษฎีการแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter)
  - 1.3 ทฤษฎีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC Regulator)
  - 1.4 ทฤษฎีการติดตามหาจุดทำงานสูงสุดของแบตเตอรี่ (Maximum Power Point)
  - 1.5 ทฤษฎีการเชื่อมต่อไฟฟ้าเข้ากับระบบอื่น (Grid-connected System)
2. ชุดพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลม ประกอบด้วย
  - 2.1 ทฤษฎีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก
  - 2.2 ทฤษฎีการรักษาความเร็วรอบของกังหันลม
  - 2.3 ทฤษฎีการรักษากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
  - 2.4 ทฤษฎีการเชื่อมต่อไฟฟ้าเข้ากับระบบอื่น
3. ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล
  - 3.1 การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากเครื่องยนต์ขนาดเล็ก
  - 3.2 การควบคุมการปิดเปิดเครื่องกำเนิดแบบทันทีทันใด
  - 3.3 ทฤษฎีการเชื่อมต่อไฟฟ้าเข้ากับระบบอื่น



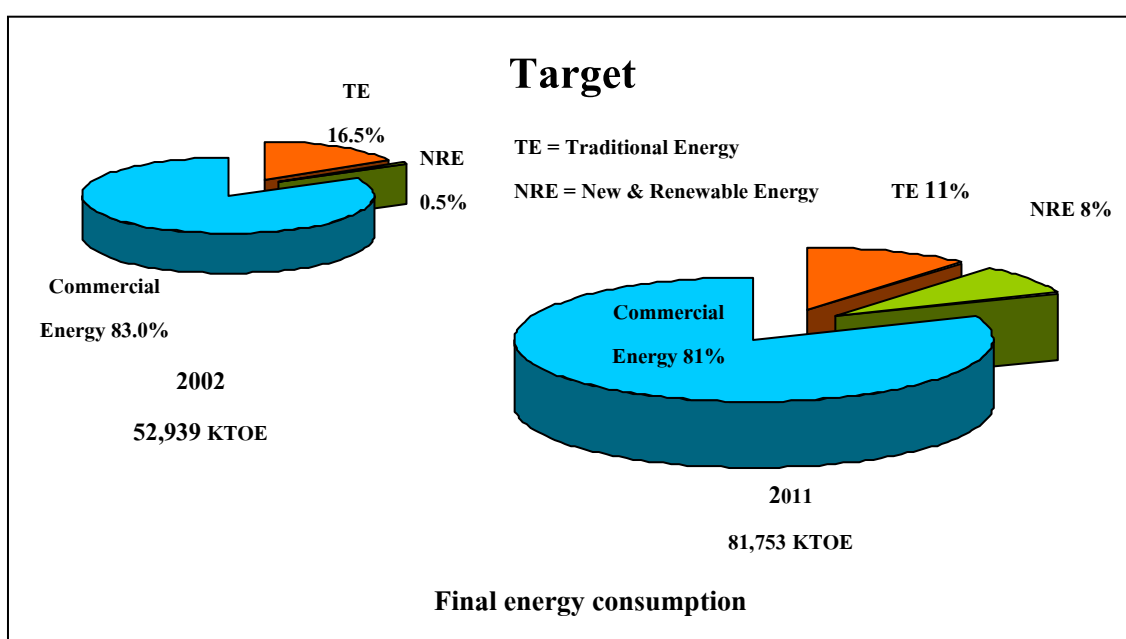
รูปที่ 2.2 แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า

## 2.1 แหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน

งานวิจัยนี้ได้มีการค้นคว้าและศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับชุดพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ชุดพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลม และชุดพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อศึกษาพลังงานไฟฟ้าที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดทั้ง 3 ชนิด

1. ชุดพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์
2. ชุดพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลม
3. ชุดพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานเซลล์เชื้อเพลิง

พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลมและพลังงานเซลล์เชื้อเพลิง เป็นพลังงานทดแทนที่น่าสนใจมาก เพราะในประเทศไทย มีการวิจัยและจัดทำข้อมูลศักยภาพของพลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลมไว้เมื่อปี 2546 โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.)

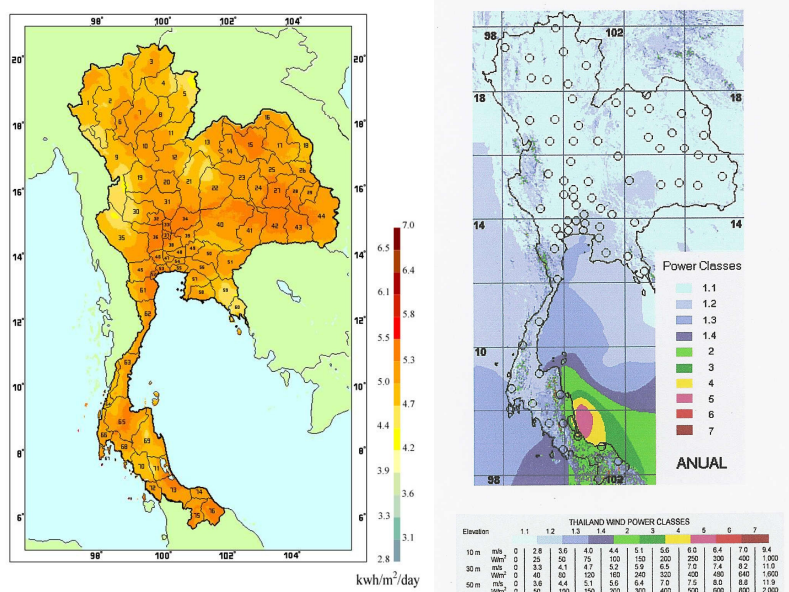


รูปที่ 2.3 กราฟแสดงเป้าหมายของยุทธศาสตร์พลังงานทดแทนของประเทศไทย [1]

จากแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2542) โดยกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานและคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พบว่าการกระจายของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ตามบริเวณต่างๆ ทั่วทั้งประเทศ และพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุด ระหว่างเดือนเมษายนและพฤษภาคม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 20 ถึง 24 MJ/m<sup>2</sup>-day เมื่อพิจารณาแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปี พบว่าบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดเฉลี่ยทั้งปีอยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยครอบคลุมบางส่วนของจังหวัดนครราชสีมา บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ ร้อยเอ็ด ยโสธร อุบลราชธานี และอุดรธานี และบางส่วนของภาคกลางที่จังหวัด

สุพรรณบุรี ชัยนาท อุทัย และลพบุรี โดยได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี 19 ถึง 20 MJ/m<sup>2</sup>-day พื้นที่ดังกล่าวคิดเป็น 14.3% ของพื้นที่ทั้งหมดของประเทศ นอกจากนี้ยังพบว่า 50.2% ของพื้นที่ทั้งหมดได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี ในช่วง 18-19 MJ/m<sup>2</sup>-day จากการคำนวณรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศ พบว่ามีค่าเท่ากับ 18.2 MJ/m<sup>2</sup>-d จากผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง

สำหรับศักยภาพของพลังงานลมในประเทศไทยนั้น พบว่าแหล่งพลังงานลมที่ดีอยู่บริเวณชายทะเลตะวันออกของจังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา ปัตตานี และพังงา และเขตภาคเหนือที่คอดยอินทนนท์ และจังหวัดตาก และบริเวณภาคกลาง คือ จังหวัดเพชรบุรี กาญจนบุรี มีกำลังลมเฉลี่ยทั้งปี ตั้งแต่ระดับ 1.3 ถึง ระดับ 2 (Class 1.3 – Class 2) ความเร็ว 4.4 เมตร/วินาที คือที่จังหวัดเพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์ ชุมพร สุราษฎร์ธานี เชียงใหม่ เพชรบูรณ์ เลย จันทบุรี และระยอง นั้นหมายความว่าศักยภาพของพลังงานลมในประเทศไทยมีสูงพอที่จะนำระบบผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม (Wind turbine generator) มาใช้ได้เป็นอย่างดี



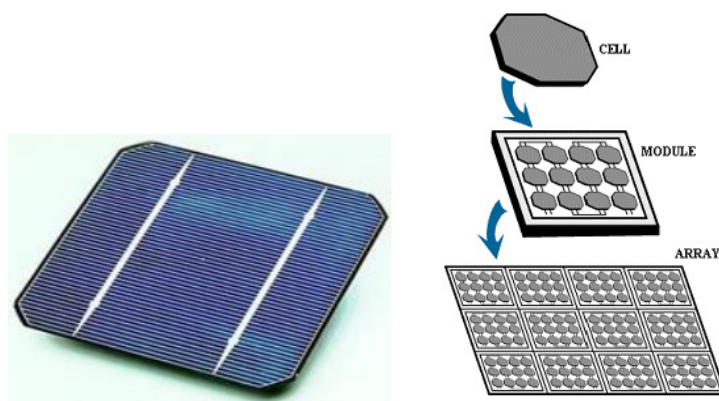
รูปที่ 2.4 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลมในประเทศไทย

สำหรับจังหวัดนนทบุรี และจังหวัดอื่นๆ ในภาคกลาง เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.2 จะพบว่าศักยภาพของพลังงานลมในจังหวัดนนทบุรี มีค่าอยู่ในระดับที่ 1.2 ถึง 1.3 (Class 1.2 – Class 1.3) ซึ่งมีความเร็วลมเฉลี่ย 3.6 เมตร/วินาที ถึง 5.1 เมตร/วินาที ที่ความสูง 50 เมตร ซึ่งสามารถติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าได้เช่นกัน

### 2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก

แผงโซลาร์เซลล์ (Photovoltaic Cell: PV) เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นให้เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกโดย แชปปีน (Chapin) ฟูลเลอร์ (Fuller) และเพียร์สัน (Pearson) ในปี ค.ศ. 1954 ซึ่งทำงานที่บริษัท เบลเทเลโฟน (Bell Telephone) ซึ่งได้ค้นพบเทคโนโลยี การสร้างรอยต่อ P-N ของผลึกซิลิคอน จนได้เซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมาเป็นครั้งแรกในโลก ซึ่งมีประสิทธิภาพเพียง 6 % โดยในระยะเวลาต่อมาได้มีการพัฒนามาขึ้นมากกว่า 15 % ในระยะแรกเริ่มมีการนำไปใช้งานในการผลิตพลังงาน ไฟฟ้าทางด้านอวกาศ ดาวเทียม ระบบสื่อสารต่างๆ จนในปัจจุบันมีการผลิตใช้งานอย่างแพร่หลาย มีราคาถูกลง และมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.5 Solar Cell [2]

เซลล์แสงอาทิตย์ทำจากซิลิคอนที่ใช้วัสดุเช่นเดียวกัน ทรานซิสเตอร์ และวงจรรวม (Integrated Circuit :IC) โดยผลึกซิลิคอนจะถูกทำให้ไม่บริสุทธิ์ โดยการเติมธาตุที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุดในกลุ่ม 3 และ 5 ซึ่งจะได้ผลึกซิลิคอนที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างกัน (P-Type และ N-type) เมื่อนำมาต่อเชื่อมกันด้วยกรรมวิธีการแพร่ สารระหว่างผลึกทำให้ระหว่างรอยต่อมีสถานะที่เป็นกลาง (Depletion Region) ผลึกซิลิคอนจะวางซ้อนกันเป็นชั้น บาง (Layer) เมื่อมีอนุภาคโฟตอน (Photon) มาตกกระทบแผ่นชั้นซิลิคอน อิเล็กตรอนที่ได้รับจะทำให้แผ่นธาตุ ซิลิคอนมีอิเล็กตรอนที่มีอยู่ไม่สมดุลกันระหว่างชั้นเซลล์ เมื่อมีการต่อเชื่อมขั้วไฟฟ้าออกไปก็จะเกิดการความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วไฟฟ้านั้น เมื่อนำมาต่อเชื่อมกันเป็นวงจรไฟฟ้าก็จะเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างขั้ว เกิดมี กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าขึ้นมาได้

แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งตามวัสดุที่ใช้ผลิตได้ 3 ชนิด คือ และแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพการใช้งานในห้องทดลองและใช้งานจริงแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1



ตารางที่ 2.1 ชนิดของแผงเซลล์แบ่งตามวัสดุและประสิทธิภาพการใช้งานในห้องทดลองและใช้งานจริง [3]

| วัสดุ                   | ประสิทธิภาพการใช้งานในห้องทดลอง (%) | ประสิทธิภาพการใช้งานในงานจริง (%) |
|-------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Monocrystalline Silicon | 24                                  | 14-17                             |
| Polycrystalline Silicon | 18                                  | 13-15                             |
| Amorphous Silicon       | 13                                  | 5-7                               |

### 2.1.2 กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมมีต้นทุนต่ำลงมากในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา พลังงานลมจึงเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ขยายตัวเร็วที่สุดในโลก

#### 2.1.2.1 ชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีกังหันลมเพื่อใช้สำหรับผลิตไฟฟ้าได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง หลายประเทศทั่วโลกได้ให้ความสนใจ โดยเฉพาะในทวีปยุโรป เช่น ประเทศเดนมาร์ก กังหันลมที่ได้มีการพัฒนาขึ้นมานั้นจะมีลักษณะและรูปร่างแตกต่างกันออกไป แต่ถ้าจำแนกตามลักษณะแนวแกนหมุนของกังหันจะได้ 2 แบบ คือ

1. กังหันลมแบบแนวนอน (Horizontal Axis Wind Turbine) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับทิศทางของลมโดยมีใบพัดเป็นตัวตั้งฉากกับแรงลม มีอุปกรณ์ควบคุมกังหันให้หันไปตามทิศทางของกระแสลม เรียกว่า หางเสือ และมีอุปกรณ์ป้องกันกังหันชำรุดเสียหายขณะเกิดลมพัดแรง

2. กังหันลมแนวแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine) มีข้อดีกว่าแบบแนวนอนคือ ในแบบแนวแกนตั้งนั้นไม่ว่าลมจะเข้ามาทิศไหนก็ยังหมุนได้ โดยไม่ต้องมีอุปกรณ์ควบคุมให้กังหันหันหน้าเข้าหาลม นอกจากนี้แล้วแบบแนวแกนตั้งนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบการส่งกำลังวางไว้ใกล้พื้นดินมากกว่าแบบแนวนอน เวลาเกิดปัญหาแก้ไขง่ายกว่าแบบแนวนอนที่ติดตั้งบนหอคอยสูง

#### 2.1.2.2 ส่วนประกอบของกังหันลมในการผลิตกระแสไฟฟ้า

ขนาดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้มีความสามารถในการผลิตไฟฟ้าได้ตามความต้องการใช้งาน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า (Capacity) เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด (Rotor Diameter) และพื้นที่กวาดของใบพัด (Swept Area) ของกังหันลมผลิตไฟฟ้ารุ่นนั้น ๆ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ขนาดของกังหันลม

| ขนาดของกังหันลม                       | ขนาดกำลังผลิต<br>(kW) | เส้นผ่านศูนย์กลาง<br>(m) | พื้นที่กวาด<br>(m <sup>2</sup> ) |
|---------------------------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------------|
| ขนาดเล็ก (Micro Wind Turbine)         | < 1.5                 | < 3                      | < 7                              |
| ขนาดเล็ก (Small Wind Turbine)         | 1.5-2.0               | 3-10                     | 7-80                             |
| ขนาดกลาง (Medium Wind Turbine)        | 20-200                | 10-25                    | 80 - 500                         |
| ขนาดใหญ่ (Large Wind Turbine)         | 200-1,500             | 25-70                    | 50-3,850                         |
| ขนาดใหญ่มาก (Very Large Wind Turbine) | > 1,500               | > 70                     | > 3,850                          |

### 2.1.3 เซลล์เชื้อเพลิง

#### 2.1.3.1 ส่วนประกอบของระบบเซลล์เชื้อเพลิง

การออกแบบระบบเซลล์เชื้อเพลิง สามารถที่จะปรับเปลี่ยนได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงและการนำไปใช้งาน ระบบเซลล์เชื้อเพลิงนี้จะประกอบด้วยชิ้นส่วนพื้นฐาน 4 อย่างด้วยกันคือ Fuel Cell Stack, Fuel Cell Processor, ตัวแปลงกระแส (Current Converter) และระบบชดเชยความร้อน (Heat Recovery System)

1. Fuel Cell Stack หน้าที่หลักคือการก่อให้เกิดไฟฟ้าขึ้น โดยจะอยู่ในรูปแบบของกระแสตรง (DC) จากปฏิกิริยาทางเคมีที่ถูกบรรจุอยู่ในเซลล์เชื้อเพลิง
2. Fuel Processor ทำหน้าที่แปลงเชื้อเพลิงให้เข้าสู่รูปแบบที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถนำไปใช้ได้
3. ตัวแปลงกระแสและตัวปรับสภาพ (Current Inverters and Conditioners) จะทำการแปลงกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานโดยทั่วไป
4. ระบบชดเชยความร้อน (Heat Recovery System)

#### 2.1.3.2 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงถูกจำแนกแยกแยะตามชนิดของอิเล็กโตรไลต์ที่ใช้ การกำหนดนี้จะแยกตามชนิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ถูกใส่ในเซลล์ ตามชนิดความต้องการของสารเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ย่านของอุณหภูมิในขณะที่เซลล์ทำงาน ความต้องการของเชื้อเพลิง และปัจจัยอื่นๆ ด้วยคุณลักษณะเช่นนี้ บางครั้งการนำไปใช้งานจะต้องคำนึงถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นด้วย จะต้องมีความเหมาะสมที่สุด

1. เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid) ใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารอิเล็กโตรไลต์



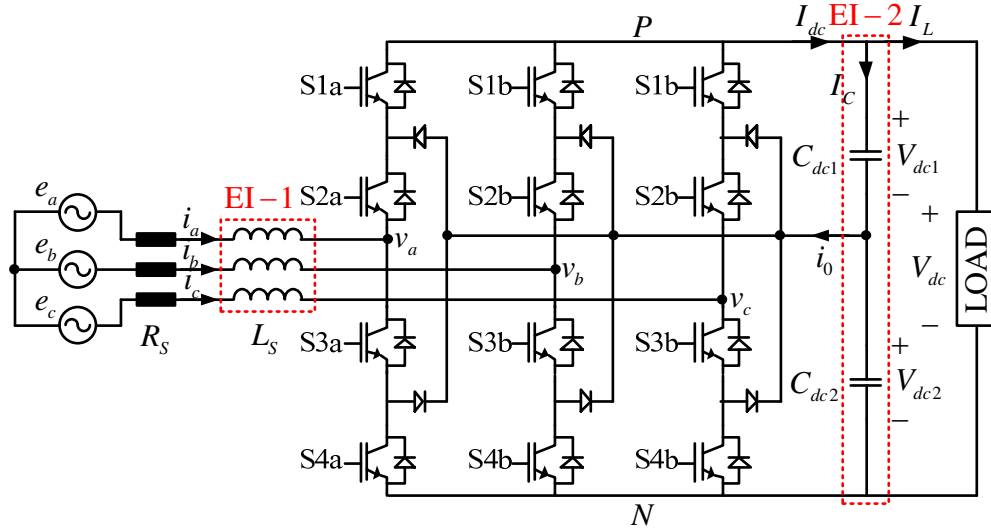


2. เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane - PEM) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ในรูปแบบแผ่นโพลิเมอร์บาง
  3. เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide) เซลล์ชนิดนี้ใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็งทำจากสารประกอบเซรามิก เช่น เซอร์โคเนียมออกไซด์ เป็นต้น
  4. เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline) ใช้สารอิเล็กโทรไลต์ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น
  5. เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้สารลิเทียมคาร์บอเนต หรือโซเดียมคาร์บอเนต หรือโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่หลอมเหลวเป็นสารอิเล็กโทรไลต์
  6. เซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรง (Direct Methanol) เป็นเซลล์ที่เพิ่งถูกพัฒนาขึ้นมาจากแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน
  7. เซลล์เชื้อเพลิงแบบระบบหมุนเวียนน้ำ (Regenerative) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานแบบหมุนเวียนน้ำในระบบ
  8. เซลล์เชื้อเพลิงแบบสังกะสี-อากาศ (Zinc-Air) เซลล์เชื้อเพลิงสังกะสี-อากาศใช้โลหะสังกะสีเป็นขั้วแอโนด เชื้อเพลิงที่ใช้คือ ก๊าซไฮโดรเจนหรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอน
- เซลล์เชื้อเพลิงต้องการออกซิเจนและไฮโดรเจนในการผลิตไฟฟ้า โดยปกติออกซิเจนจะได้มาจากอากาศประมาณ 20% ซึ่งต่างจากไฮโดรเจนที่มีข้อจำกัดในเรื่องของการกักเก็บและการขนส่ง จากเหตุผลดังกล่าวทำให้มีการศึกษาและวิจัยการใช้เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ทดแทนการใช้ไฮโดรเจนโดยตรง เช่น แอลกอฮอล์ และสารไฮโดรคาร์บอนต่างๆ ซึ่งปัจจุบันได้เริ่มมีการนำมาใช้งานแล้ว แต่การใช้เชื้อเพลิงในลักษณะนี้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์เปลี่ยนรูป (reformer) เชื้อเพลิงเหล่านั้นให้เป็ไฮโดรเจนเพื่อป้อนให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงบางตัวทำให้เกิดปัญหาในเรื่องของการจัดการอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte management) เช่น อิเล็กโทรไลต์แบบของเหลวมีปัญหาเรื่องการกัดกร่อน อิเล็กโทรไลต์แบบของแข็งบางชนิดมีราคาที่สูงมาก เช่น แพลทินัมในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC อิเล็กโทรไลต์บางประเภทต้องการอุณหภูมิทำงานที่สูงมาก เช่น SOFC และ Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)

## 2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสามระดับแบบพีดับเบิลเอ็ม (Three-Level PWM Rectifier)

โครงสร้างของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสามระดับแบบพีดับเบิลเอ็มแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 โดยที่  $S_{ni}$  ( $n = 1, 2, 3, 4$  และ  $i = a, b, c$ ) คืออุปกรณ์สวิตซ์ของวงจรแปลงผันจำนวน 12 ตัว,  $L_s$  และ  $R_s$  คือค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าและวงจรแปลงผัน,  $C_{dc1}$  และ  $C_{dc2}$  คือค่าตัวเก็บประจุสไฟตรง (dc-link),  $V_{dc1}$

และ  $V_{dc2}$  คือแรงดันของตัวเก็บประจุสัไฟฟ้าตรงทั้ง 2 ตัว,  $V_{dc}$  คือผลรวมของ  $V_{dc1}$  และ  $V_{dc2}$ ,  $I_L$  คือกระแสที่โหลด,  $I_0$  คือกระแสที่ไหลจากจุดกลาง (neutral point) ของบัสไฟตรง,  $e_i$ ,  $i_i$  และ  $v_i$  ( $i = a, b, c$ ) คือแรงดันของแหล่งจ่าย 3 เฟส, กระแสของแหล่งจ่ายและแรงดันฝั่งด้านไฟฟ้ากระแสสลับของวงจรแปลงผันฯ ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสามระดับแบบพีดับบลิวเอ็ม (Three-Level PWM Rectifier) [4]

กำหนดให้แรงดันแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้า 3 เฟสเป็นรูปคลื่นไซน์และสมมูลทั้ง 3 เฟสมุมเฟสของแรงดัน  $e_a$  คือ  $\theta$  ดังนั้นแรงดันของแหล่งจ่ายสามารถหาได้จาก

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \sqrt{2}E \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 120^\circ) \\ \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $E$  คือค่า rms ของแรงดันแหล่งจ่าย

การแปลงแกนจาก 3 เฟส  $abc$  ไปยังแกนนิ่ง  $\alpha - \beta$  และเป็นแกนหมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส  $d - q$  ได้ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $x \in e, i, v$





จากสมการที่ (2.2) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสามระดับแบบพีคดับลิวเอ็มในแกนนิ่ง  $\alpha - \beta$  สามารถหาได้จากแกน  $abc$  ดังสมการ [5]

$$L_s \frac{di_\alpha}{dt} = -R_s i_\alpha - v_\alpha + e_\alpha \quad (2.4a)$$

$$L_s \frac{di_\beta}{dt} = -R_s i_\beta - v_\beta + e_\beta \quad (2.4b)$$

$$C_{dc1} \frac{dV_{dc1}}{dt} = s_{\alpha p} i_\alpha + s_{\beta p} i_\beta - I_L \quad (2.4c)$$

$$C_{dc2} \frac{dV_{dc2}}{dt} = -s_{\alpha n} i_\alpha - s_{\beta n} i_\beta - I_L \quad (2.4d)$$

เมื่อ  $s_{\alpha p}$ ,  $s_{\beta p}$ ,  $s_{\alpha n}$  และ  $s_{\beta n}$  คือฟังก์ชันการสวิตชิงในแกน  $\alpha - \beta$

ในทำนองเดียวกัน จากสมการที่ (2.3) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสามระดับแบบพีคดับลิวเอ็มในแกนหมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัสสามารถหาได้จาก

$$L_s \frac{di_d}{dt} = -R_s i_d + \omega L_s i_q - v_d + e_d \quad (2.5a)$$

$$L_s \frac{di_q}{dt} = -R_s i_q - \omega L_s i_d - v_q + e_q \quad (2.5b)$$

$$C_{dc1} \frac{dV_{dc1}}{dt} = s_{dp} i_d + s_{qp} i_q - I_L \quad (2.5c)$$

$$C_{dc2} \frac{dV_{dc2}}{dt} = -s_{dn} i_d - s_{qn} i_q - I_L \quad (2.5d)$$

เมื่อ  $s_{dp}$ ,  $s_{qp}$ ,  $s_{dn}$  และ  $s_{qn}$  คือฟังก์ชันการสวิตชิงในแกน  $d - q$

$$\omega = d\theta/dt$$

ความสัมพันธ์ระหว่างฝั่งทางด้านแรงดันกระแสสลับ (ac-side) และแรงดันบัสไฟตรง (dc-link) ในแกน  $\alpha - \beta$  และแกน  $d - q$  สามารถหาได้จาก

$$v_\alpha = s_{\alpha p} V_{dc1} - s_{\alpha n} V_{dc2} \quad (2.6a)$$

$$v_\beta = s_{\beta p} V_{dc1} - s_{\beta n} V_{dc2} \quad (2.6b)$$

$$v_d = s_{dp} V_{dc1} - s_{dn} V_{dc2} \quad (2.7a)$$

$$v_q = s_{qp} V_{dc1} - s_{qn} V_{dc2} \quad (2.7b)$$



จะสังเกตว่าในแกน  $d-q$  ที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส เวกเตอร์ของแรงดันแหล่งจ่าย (grid-source voltage)  $e$  จะอยู่ในแกน  $d$  ซึ่งจะได้ว่า

$$e_d = \sqrt{3}E \quad (2.8a)$$

$$e_q = 0 \quad (2.8b)$$

นำสมการที่ (2.4a) และ (2.4b) มารวมกัน สมการกำลังไฟฟ้าของ EI-1 สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{EI-1:} \quad \frac{dW_{EI-1}}{dt} &= \frac{d \left[ \frac{1}{2} L_s (i_\alpha^2 + i_\beta^2) \right]}{dt} \\ &= (e_\alpha i_\alpha + e_\beta i_\beta) - (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) - R_s (i_\alpha^2 + i_\beta^2) \end{aligned} \quad (2.9a)$$

จากสมการ (2.4d) และ (2.4c) สมการกำลังไฟฟ้าของ EI-2 สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{EI-2:} \quad \frac{dW_{EI-2}}{dt} &= \frac{d \left[ \frac{1}{2} C_{dc1} V_{dc1}^2 + \frac{1}{2} C_{dc2} V_{dc2}^2 \right]}{dt} \\ &= (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) - V_{dc} I_L \end{aligned} \quad (2.9b)$$

ในสมการ (2.9a) และ (2.9b),  $W_{EI-1}$  และ  $W_{EI-2}$  คือพลังงานที่เก็บใน EI-1 และ EI-2 ตามลำดับ

ตามทฤษฎีกำลังไฟฟ้าทันทีทันใด (instantaneous power theory) [6] กำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟด้านเข้าของวงจรแปลงผันฯ สามารถคำนวณในแกน  $\alpha-\beta$  ได้ดังสมการ

$$p_{in} = e_\alpha i_\alpha + e_\beta i_\beta \quad (2.10a)$$

$$q_{in} = e_\beta i_\alpha - e_\alpha i_\beta \quad (2.10b)$$

และในแกน  $d-q$  เมื่อแทนค่าสมการ (2.8a) และ (2.8b) ลงไปจะได้

$$p_{in} = e_d i_d + e_q i_q = \sqrt{3} E I_d \quad (2.11a)$$

$$q_{in} = e_q i_d - e_d i_q = -\sqrt{3} E I_q \quad (2.11b)$$

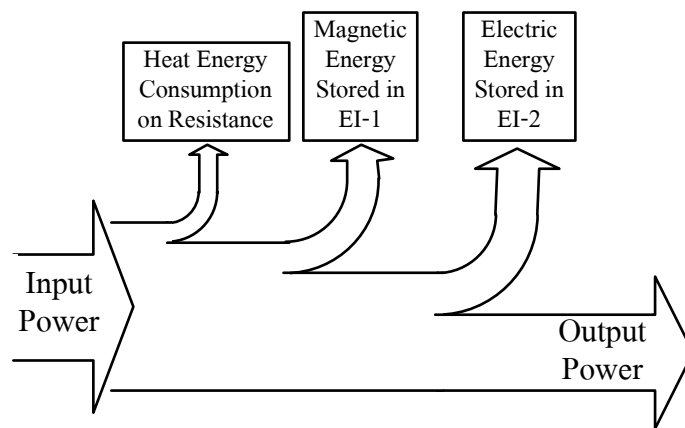
กำลังไฟฟ้าด้านออกของวงจรแปลงผันคือ

$$P_{out} = V_{dc} I_L \quad (2.12)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออกของวงจรแปลงผันฯแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} p_{in} - p_{out} &= (e_{\alpha} i_{\alpha} + e_{\beta} i_{\beta}) - V_{dc} I_L \\ &= R_S (i_{\alpha}^2 + i_{\beta}^2) + \Delta W_{EI-1}/T_S + \Delta W_{EI-2}/T_S \end{aligned} \quad (2.13)$$

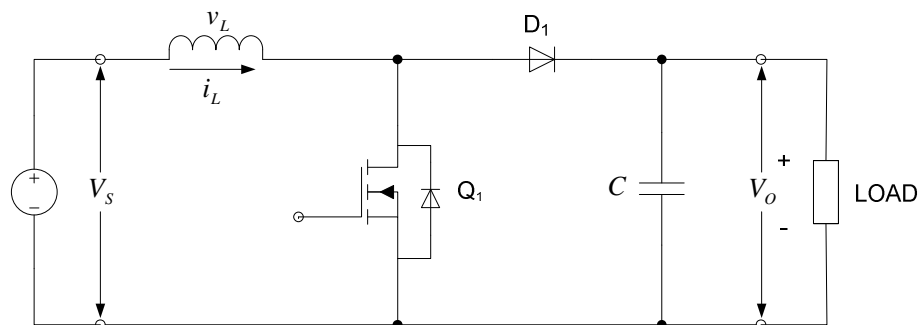
เมื่อ  $\Delta W_{EI-1}$  และ  $\Delta W_{EI-2}$  คือเป็นการเพิ่มขึ้นของพลังงานที่เก็บไว้ใน EI-1 และ EI-2 ในช่วงระยะเวลา  $T_S$  จากสมการที่ (2.13) จะเห็นได้ว่าความแตกต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและกำลังไฟฟ้าด้านออกของวงจรแปลงผันฯจะประกอบไปด้วยการใช้พลังงานของตัวต้านทานและอัตราการเปลี่ยนแปลงของส่วนที่เก็บพลังงานที่ใช้ในการเชื่อมต่อ แผนภูมิการไหลของกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันฯแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภูมิการไหลของกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสามระดับแบบฟีดแบคฟูล

### 2.3 วงจรทบทระดับแรงดัน [7]

ตัวแปลงผันแบบทบทระดับเป็นวงจรแปลงผันไฟตรง (DC-DC Converter) ชนิดหนึ่งที่จะทำให้แรงดัน ทางด้านเอาต์พุตมีค่ามากกว่าแรงดันทางด้านอินพุตดังวงจรในรูปที่ 2.8 การทำงานจะแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบกระแสต่อเนื่องและแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง

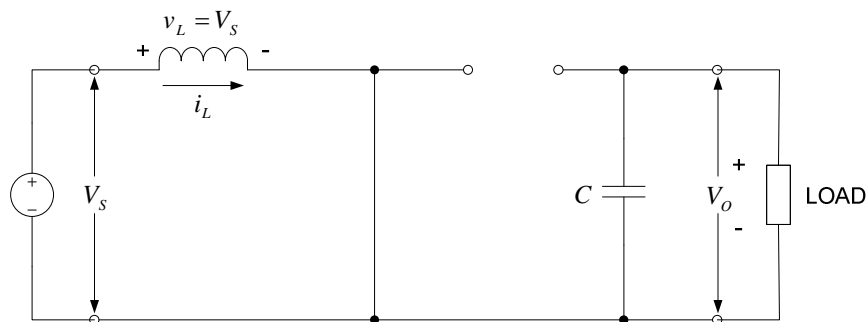


รูปที่ 2.8 วงจรแปลงผันแบบทบทระดับแรงดัน

หลักการทำงานของวงจรทบระดับแรงดันเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกตามต้องการ จะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ และสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้โดยวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด

### 2.3.1 ขณะสวิตช์นำกระแส

จากรูป 2.8 กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ โดยผ่านสวิตช์ ขณะเดียวกันไดโอดจะถูกไบอัสย้อนกลับทำให้ไม่สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ดังรูป 2.9 จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการแรงดันไฟฟ้าดังนี้



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส

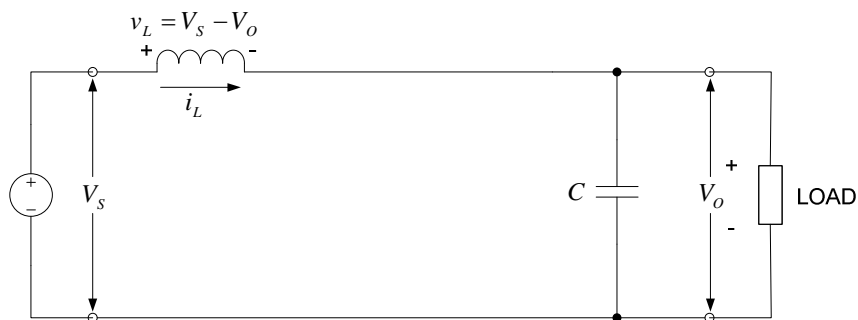
ขณะที่สวิตช์นำกระแส  $dt = DT$  เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสคงที่ อาจจะถือว่าการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{Dt} = \frac{V_s}{L} \quad (2.14)$$

$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_s DT}{L} \quad (2.15)$$

$\Delta i_{L,on}$  หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำขณะนำกระแส

### 2.3.2 ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส  $dt = (1-D)T$  อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่และอาจจะถือว่าการลดลงของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta i_{L,off} = \left( \frac{V_s - V_o}{L} \right) (1-D)T \quad (2.16)$$

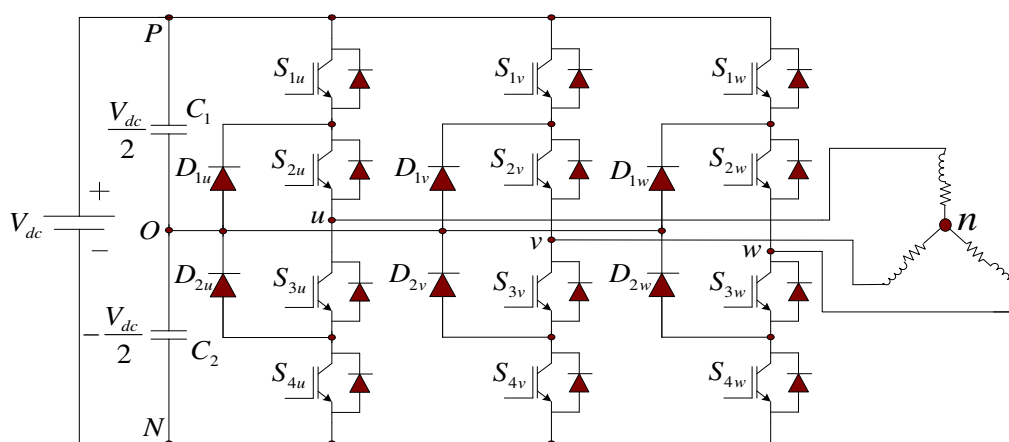
ที่สภาวะคงตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้ว่า

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (2.17)$$

## 2.4 อินเวอร์เตอร์สามระดับ

### 2.4.1 โครงสร้างพื้นฐานของวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับ

วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับจะแตกต่างจากวงจรอินเวอร์เตอร์สองระดับคือ มีอุปกรณ์ในการสวิตช์เพิ่มจากหกตัวเป็นสิบสองตัวดังรูปที่ 2.11 และมีการใช้แรงดันไฟตรงเป็นสามระดับ ซึ่งได้จากการนำตัวเก็บประจุสองตัวต่ออนุกรมกันเพื่อแบ่งแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟตรง วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับมีข้อดีกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์สองระดับคือ มีระดับแรงดันที่เพิ่มขึ้น ทำให้กระแสเอาต์พุตมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อย และช่วยลดค่ากระแสพุ่งเข้า (Inrush Current) ที่มีต่ออุปกรณ์สวิตช์เช่น มอสเฟต (Metal-Oxide-Semiconductor-Field Effect Transistor, MOSFET) ไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistors, IGBT) เมื่อเรานำมาเปรียบกับวงจรอินเวอร์เตอร์สองระดับที่มีการใช้แรงดันดีซีลิงก์ (DC-Link) เท่ากัน เพราะวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับมีการใช้อุปกรณ์สวิตช์มาต่ออนุกรมทำให้ได้รับแรงดันน้อยลง



รูปที่ 2.11 วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับ



วงจรสมมูลของวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับเป็นดังรูปที่ 2.11 แต่ละเฟสนั้นประกอบด้วย ฟรีวิลลิงไดโอด (Free-Wheeling Diode) สี่ตัว แคลมป์ไดโอด (Clamping Diodes) สองตัวต่ออยู่กับจุดนิวทรัลพอยต์ (Neutral Point (O)) เมื่อให้แรงดันทั้งสามจุด (PON) เทียบกับจุดอ้างอิงจุด O จะได้แรงดัน 3 ระดับ ดังนี้

- แรงดัน P ( $V_{PO}$ ) เป็นแรงดันบัสไฟตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_1$
- แรงดัน O ( $V_{OO}$ ) เป็นแรงดันที่จุดอ้างอิง
- แรงดัน N ( $V_{NO}$ ) เป็นแรงดันบัสไฟตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_2$

สถานะการสวิตช์ในแต่ละเฟสของวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับสรุปได้ดังตาราง 2.3

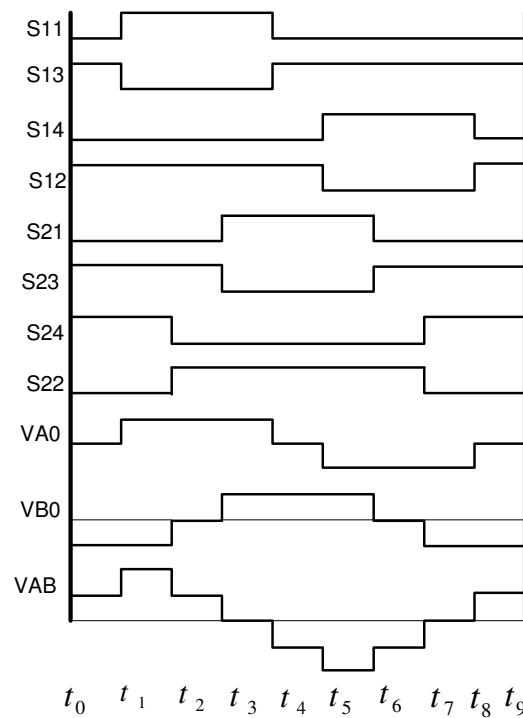
ตารางที่ 2.3 สถานะการสวิตช์ในแต่ละเฟส

| Terminal<br>Symbols | Switch State |          |          |          | Terminal<br>Voltage |
|---------------------|--------------|----------|----------|----------|---------------------|
|                     | $S_{1x}$     | $S_{2x}$ | $S_{3x}$ | $S_{4x}$ |                     |
| P                   | ON           | ON       | OFF      | OFF      | $V_{dc} / 2$        |
| O                   | OFF          | ON       | ON       | OFF      | 0                   |
| N                   | OFF          | OFF      | ON       | ON       | $-V_{dc} / 2$       |

เมื่อ  $x = u, v, w$

#### 2.4.2 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

จากรูปที่ 2.11 จะเห็นว่าในแต่ละกิ่งของอินเวอร์เตอร์สามระดับจะประกอบด้วยสวิตช์หลัก  $S_{11}$  กับ  $S_{14}$  ทำหน้าที่เหมือนในวงจรอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ ส่วนสวิตช์ช่วย  $S_{12}$  กับ  $S_{13}$  ทำหน้าที่แคลมป์แรงดันเทียบกับจุดนิวทรัลที่ชั่วเอาท์พุทร่วมกับไดโอดช่วย  $D_{11}$  กับ  $D_{12}$  ส่วนแหล่งจ่ายไฟตรงเกิดจากตัวเก็บประจุทั้งสองตัว แบ่งแรงดันบัสตรงตัวละครึ่งสัญญาณ PWM ที่ใช้ควบคุมแต่ละตัวในหนึ่งกิ่งสามารถแสดงได้ดังรูป ซึ่งสามารถแบ่งโหมดการทำงานในหนึ่งไซเคิลของแรงดัน  $V_{ab}$  ออกเป็น 9 โหมดดังแสดงดังรูปที่ 2.12

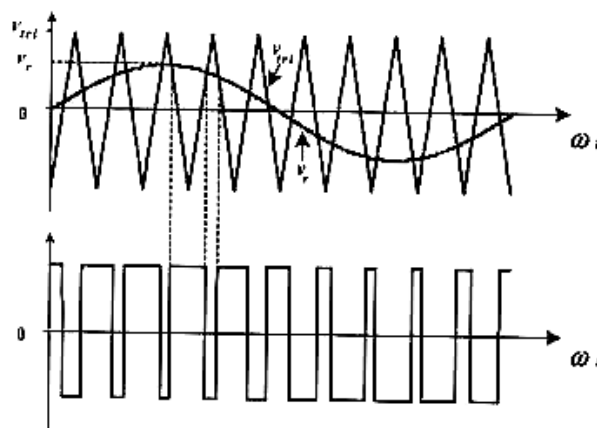


รูปที่ 2.12 สัญญาณสวิตชิงในแต่ละกลุ่ม

### 2.4.3 เทคนิคการสร้างสัญญาณควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับ

#### 2.4.3.1 เทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม (Sinusoidal Pulse Width Modulation : SPWM)

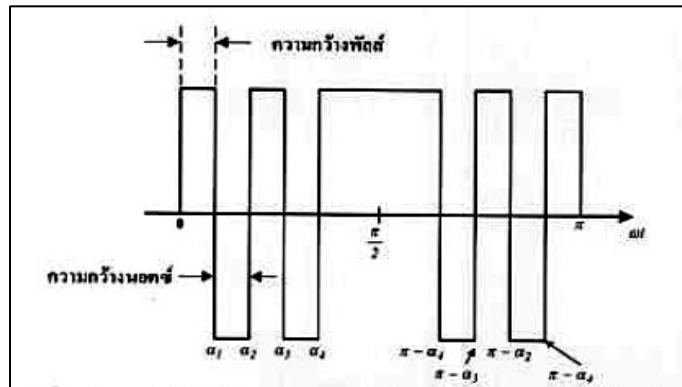
เทคนิคนี้จะใช้หลักการโดยการนำรูปคลื่นไซน์เป็นสัญญาณอ้างอิงที่มีความถี่เท่ากับ ความถี่มูลฐานที่ต้องการออกแบบมาเปรียบเทียบกับคลื่นพาหนะ โดยทั่วไปจะเป็นรูปคลื่นสัญญาณ สามเหลี่ยมที่มีความถี่เท่ากับความถี่การสวิตช์ที่ออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 หลักการสร้างรูปแบบพีดับเบิลยูเอ็มแบบ SPWM

#### 2.4.3.2 เทคนิคพีดับยูเอ็มแบบกำจัดฮาร์โมนิกส์ ( Harmonic Elimination Method )

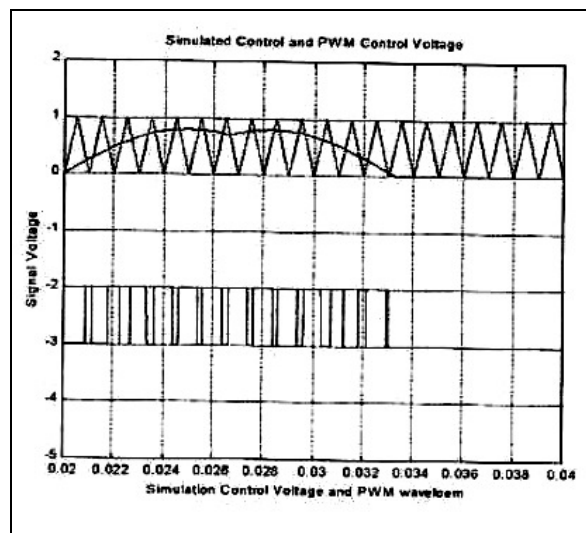
รูปคลื่นของเทคนิคนี้จากทฤษฎีการวิเคราะห์รูปคลื่นด้วยอนุกรมฟูเรียร์พบว่าหากมีการกำหนดมุม  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  ให้เหมาะสมจะสามารถกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่ต้องการรวมถึงสามารถควบคุมแรงดันมูลฐานได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 รูปคลื่นพีดับยูเอ็มแบบเทคนิคการกำจัดฮาร์โมนิกส์

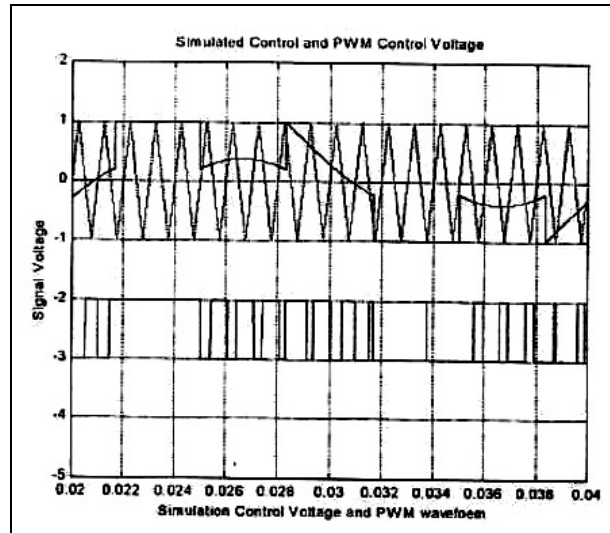
#### 2.4.3.3 เทคนิคแบบดิสคอนทิวอิอัสพีดับบลิวเอ็ม (Discontinuous PWM)

เทคนิคการสวิตช์นี้จะมีช่วงหนึ่งของสัญญาณที่มีระดับสัญญาณเป็นศูนย์ หรือเท่ากับระดับของสัญญาณแคเรียร์ที่นำมาเปรียบเทียบ ทำให้มีช่วงหนึ่งใน 1 รอบของคาบเวลาความถี่มูลฐานไม่มีการสวิตช์ โดยเทคนิคการสวิตช์แบบนี้จะมีรูปแบบอยู่ สองแบบคือ เทคนิคดิสคอนทิวอิอัสพีดับยูเอ็ม 120 องศาและเทคนิคแบบเจนเนอไรเซชันดิสคอนทิวอิอัสพีดับบลิวเอ็ม ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.16 ตามลำดับ



รูปที่ 2.15 การสวิตช์แบบดิสคอนทิวอิอัสพีดับยูเอ็ม120 องศาที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์เท่ากับ 0.8 ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง =50 HZความถี่สัญญาณแคเรียร์=1kHz



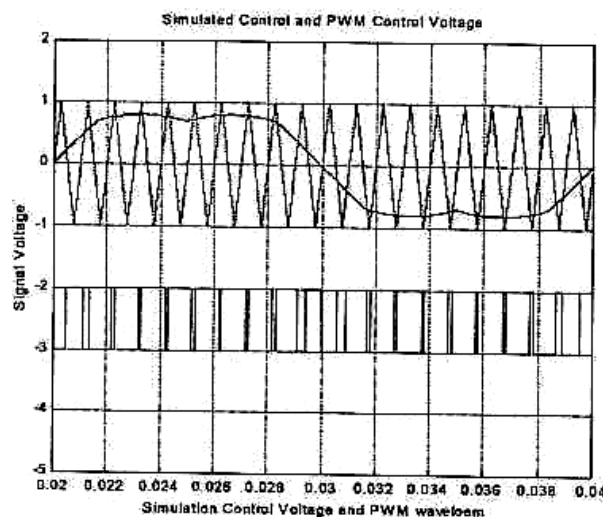


รูปที่ 2.16 การสวิตช์แบบเจนเนอไรเซอร์ชั้นดิสคอนทิวอัสฟิดับเบิลยูเอ็ม30 องศาที่ค่ามอดูเลชั่นอินเด็กซ์เท่ากับ 0.8 ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง =50 Hz ความถี่สัญญาณแคเรียร์=1kHz

#### 2.4.3.4 เทคนิคฟิดับเบิลยูเอ็มแบบสเปซเวกเตอร์ (Space Vector PWM, SVPWM)

เทคนิคนี้จะใช้หลักการสวิตช์ที่วิเคราะห์จากสภาวะการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่มีการวิเคราะห์และการสร้างขึ้นโดยแรงดันควบคุมของเทคนิคนี้สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 2.18

$$V_{control,a} = \sin(\omega t) + \frac{1}{\sqrt{3\pi}} \sum_{r=0}^{\alpha} \frac{(-1)^r}{\left[(2r+1) - \frac{2}{s}\right] \left[(2r+1) + \frac{2}{s}\right]} \sin[(2r+1)3\omega t] \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.17 ลักษณะการสวิตช์แบบสเปซเวกเตอร์ฟิดับเบิลยูเอ็ม ที่ค่ามอดูเลชั่นอินเด็กซ์เท่ากับ 0.8 ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง =50 Hz และความถี่สัญญาณแคเรียร์=1kHz

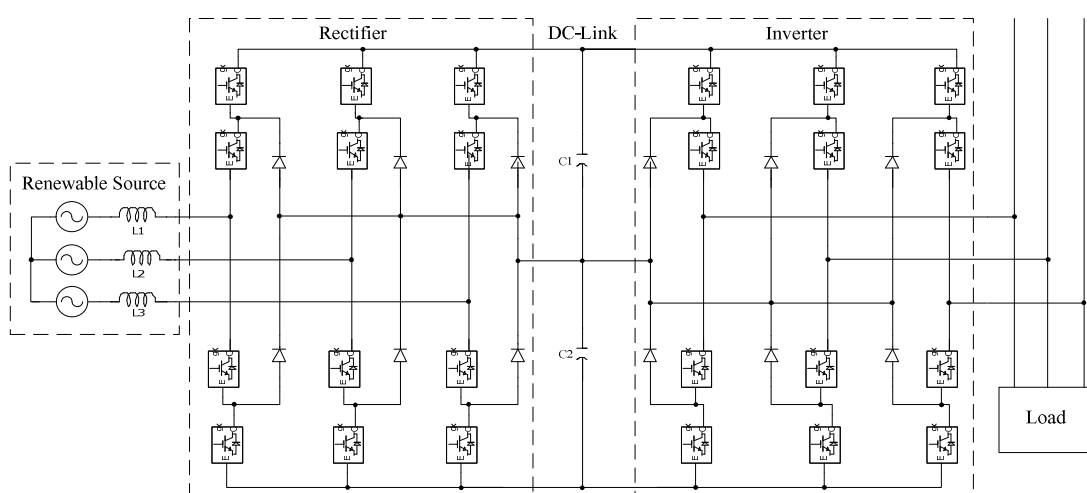
โดยเทคนิคนี้จะเหมาะสมสำหรับการสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็มด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เพราะมีความเหมาะสมของสมการที่ใช้คำนวณ และจะมีย่านเชิงเส้นของการมอดูเลตสูงกว่า SPWM ประมาณ 15% รูปคลื่นสมมูลของเทคนิคนี้สามารถสร้างด้วยวงจรทางอนาล็อกซึ่งทำได้โดยการผสมสัญญาณไซน์อ้างอิงกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่เป็น 3 เท่าของสัญญาณไซน์อ้างอิงด้วยขนาด 25% ของสัญญาณอ้างอิง

#### 2.4.4 วงจรกรองความถี่ (Filter Circuit)

วงจรกรองความถี่สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล (Digital Filter) และวงจรกรองความถี่แบบแอนะล็อก (Analog Filter) โดยวงจรกรองความถี่แบบแอนะล็อกนั้น ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบด้วยกันคือ วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ (Passive Filter) ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ที่สร้างจากอุปกรณ์จำพวกพาสซีฟเท่านั้น เช่น สร้างจากขดลวด ตัวนำกับตัวต้านทานหรือสร้างจากตัวเก็บประจุกับตัวต้านทาน และวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ (Active Filter) จะสร้างจากอุปกรณ์ประเภทแอคทีฟ เช่น ทรานซิสเตอร์ ออปแอมป์ มาต่อทำงานร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟ

### 2.5 โครงสร้างและการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

โครงสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับนี้ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน (Renewable source) และโหลด (Load) อย่างละ 1 ชุด และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งในที่นี้ใช้ไอจีบีทีจำนวน 24 ตัว โดยแบ่งออกเป็น 12 ชุดๆ ละ 12 ตัว ซึ่งแต่ละชุดจะแบ่งทำหน้าที่เป็นวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier) และวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter) นอกจากนี้ก็มีตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $C_2$  ซึ่งอยู่บริเวณที่เรียกว่า DC-Link



รูปที่ 2.18 โครงสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ



การทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับนี้ เริ่มจากรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน เช่น พลังงานจากกังหันลม เป็นต้น ส่งเข้าวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งทำหน้าที่ปรับรูปคลื่นแรงดันกระแสและความถี่ที่ออกจากแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อนำแรงดันและกระแสไปป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์ต่อไป โดยมีตัวเก็บประจุบริเวณ DC-Link เพื่อรักษาระดับแรงดันให้คงที่ หลังจากนั้นพลังงานที่ได้จากแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนได้ปรับเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแล้วนั้น จะถูกส่งไปยังวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อปรับเปลี่ยนรูปคลื่นและความถี่ให้ใกล้เคียงกับระบบไฟฟ้ากำลังก่อนเชื่อมต่อเข้ากับระบบกริดของระบบไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามารถปรับเปลี่ยนแรงดัน กระแส และความถี่ให้เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าได้และอีกประการหนึ่ง ข้อดีของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับนี้ คือเมื่อมีระดับแรงดันที่เพิ่มขึ้นทำให้กระแสเอาต์พุตมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยลง และช่วยลดค่ากระแสพุ่งเข้า (Inrush current) ที่มีผลต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น MOSFET, IGBT เป็นต้น น้อยลง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแบบสองระดับที่มีการใช้แรงดันที่ DC-Link เท่ากัน

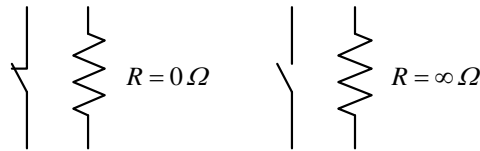
### 2.5.1 อุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

อุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทั่วไป ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวจะทำงานใน 2 สถานะคือ สถานะนำกระแส และสถานะหยุดนำกระแส ทั้งนี้ในเชิงทฤษฎี อุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์จะถูกสมมติให้เป็นสวิตช์อุดมคติ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์วงจร อย่างไรก็ตามความเข้าใจคุณลักษณะแรงดัน-กระแสของอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละชนิดมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

อุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังควรมีคุณลักษณะทางอุดมคติดังนี้

1. สามารถทนแรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) ได้สูง ซึ่งขึ้นอยู่กับพิกัดแรงดันใช้งาน
2. มีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำทำให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำ
3. มีความเร็วสูงในการเปลี่ยนสถานะการทำงาน
4. ทนต่ออุณหภูมิสูงขณะใช้งาน
5. ควบคุมได้ง่าย

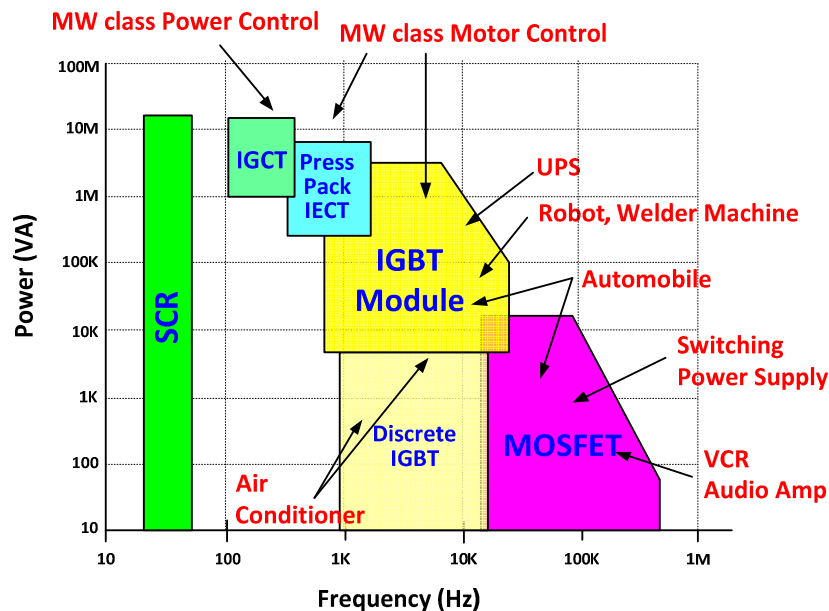
โดยทั่วไปอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจะทำงานเป็นสวิตช์ในวงจร ซึ่งขณะนำกระแส ค่าความต้านทานของอุปกรณ์จะต่ำมาก (ใกล้เคียงศูนย์) และขณะหยุดนำกระแส ค่าความต้านทานของอุปกรณ์จะสูงมาก (ใกล้เคียงค่าอนันต์) ดังวงจรสมมูลในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลในอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในอุดมคติ

ขณะอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเปลี่ยนสถานะทำงาน จะเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าประสิทธิภาพของวงจรโดยรวม ทั้งนี้ช่วงเวลาในการทำงานของสวิตช์ และกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการทำงานทั้ง 2 สถานะ

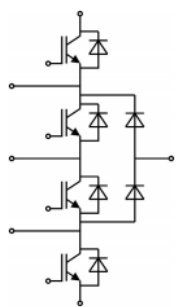
การพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันสามารถพัฒนาไปที่พิกัดสูงขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 2.20 สำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเลือกใช้ IGBT เป็นอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.20 พิกัดกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและการประยุกต์ใช้งาน

### 2.5.2 ไอจีบีที (Insulate Gate Bipolar Transistor)

ไอจีบีทีเป็นอุปกรณ์สวิตช์ที่มีข้อดีในด้านความเร็วในการสวิตช์ที่สูงเกือบเท่า MOSFET และมีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสที่ต่ำเหมือนกับทรานซิสเตอร์ ทำให้สามารถขับไอจีบีทีที่มีความถี่สูงและเกิดความร้อนน้อยในการใช้งานเนื่องมาจากกำลังการสูญเสียที่ตกคร่อมบนตัวไอจีบีทีมีค่าต่ำ ในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้ไอจีบีทีแบบโมดูลดังรูปที่ 2.21 ซึ่งทำให้สะดวกต่อการติดตั้งและนำไปใช้ในวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับนั่นเอง



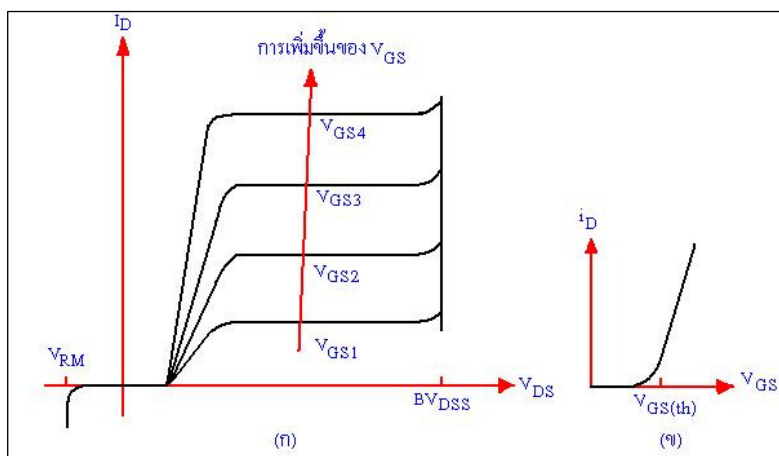
ก) สัญลักษณ์ไอจีบีที



ข) โครงสร้าง

รูปที่ 2.21 สัญลักษณ์ของไอจีบีทีและ โครงสร้างไอจีบีที

โครงสร้างของไอจีบีทีส่วนมากจะมีลักษณะเหมือนมอสเฟตจะแตกต่างตรงที่ไอจีบีทีจะมีชั้น P+ หรือชั้นอิงเจกต์ติ้ง (injecting) ต่ออยู่ระหว่างขาเดรน ซึ่งใน MOSFET จะไม่มี จากการที่ขาเกตถูกกั้นด้วยชั้นของซิลิคอนออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นผลทำให้ความต้านทานอินพุตที่ขาเกตมีค่าสูงมากเหมือนกับเพาเวอร์มอสเฟต โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ช่วง 10 จิกะโอห์ม จากผลดังกล่าวทำให้ลักษณะของกราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของไอจีบีทีมีลักษณะคล้ายกับกราฟของทรานซิสเตอร์ แต่การควบคุมกระแสเดรนจะอาศัยการควบคุมแรงดันระหว่างขาเกตและขาซอร์สมากกว่าการควบคุมกระแสที่ขาเกตเหมือนทรานซิสเตอร์ ซึ่งกราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของ IGBT แสดงดังรูปที่ 2.22 ซึ่งเป็นกราฟคุณสมบัติการถ่ายโอนกระแสและแรงดัน



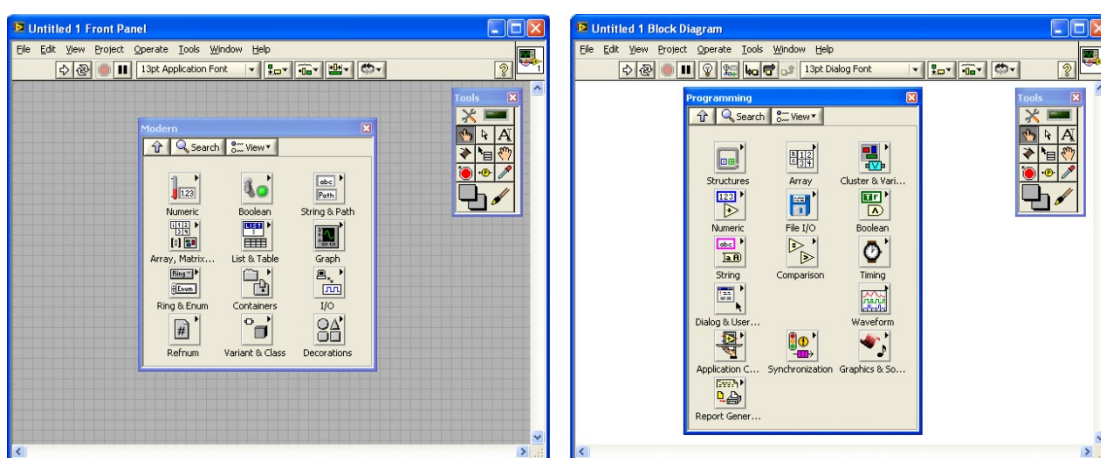
รูปที่ 2.22 (ก) คุณสมบัติระหว่างกระแสและแรงดันของ IGBT

(ข) ลักษณะสมบัติการถ่ายโอนของ IGBT

## 2.6 อุปกรณ์อื่นๆ

### 2.6.1 โปรแกรม LabVIEW

LabVIEW เป็นโปรแกรมที่ใช้เพื่อสร้างโปรแกรมสำหรับการเก็บข้อมูล การเชื่อมต่อกับอุปกรณ์หรือเครื่องมือวัดและการควบคุมระบบต่างๆ LabVIEW จะใช้ภาษากาฟฟิคในการสร้างโปรแกรม ซึ่งแตกต่างจากโปรแกรมอื่นที่ใช้ตัวอักษรเพื่อสร้างโปรแกรม เช่น C/C++, Visual C++, Visual Basic เป็นต้น โปรแกรม มีฟังก์ชันและเครื่องมือดังรูปที่ 2.23 เพื่อช่วยให้ผู้ใช้สามารถนำมาสร้างโปรแกรมสำหรับงานประยุกต์ต่างๆ โปรแกรม LabVIEW โดยปกติจะเรียกว่า Virtual Instrument (VI) ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนคือ Front Panel และ Block Diagram ดังรูปที่ 2.23 โดยแต่ละส่วนจะใช้สำหรับวัตถุประสงค์ที่ต่างกัน



รูปที่ 2.23 Front Panel และ Block Diagram [8]

#### 2.6.1.1 Front Panel

เป็นส่วนที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน สำหรับใส่ค่าและแสดงผลของตัวโปรแกรมที่สร้างขึ้นมา โดยส่วนของการใส่ค่าจะเรียกว่า “Control” ส่วนการแสดงผลจะเรียกว่า “Indicator” ที่ถูกนำมาใช้ใน Front Panel ซึ่งจะมีจุดต่อเชื่อมอยู่ที่ Block Diagram เมื่อโปรแกรมเริ่มทำงานตัว Control ที่ Front Panel จะทำการส่งข้อมูลผ่านไปยัง Block Diagram และตัวแสดงผลจะส่งค่าจาก Block Diagram กลับมาแสดงผลที่ Front Panel ผ่านตัว Indicator ที่กำหนดไว้

#### 2.6.1.2 Block Diagram

เป็นส่วนที่เก็บ Source code ของโปรแกรม LabVIEW ซึ่งตัวโปรแกรม LabVIEW จะเรียกว่า “VT” ตัว Code ในโปรแกรม LabVIEW เป็นกราฟฟิคที่เรียกกันว่า Graphical Programming หลักการของโปรแกรมจะเชื่อมต่อตัวจุดเชื่อมต่างๆ เข้าด้วยกันแทนที่จะเขียนโดยใช้คำสั่งต่างๆ ดังที่ใช่ทั่วไปในโปรแกรมอื่นๆ เช่น C/C++, Visual C++ ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่า LabVIEW ใช้หลักการเดียวกับการเขียน Flow chart

### 2.6.1.3 ฟังก์ชันอื่นๆ

โปรแกรม LabVIEW มีฟังก์ชันต่างๆ ที่ใช้ช่วยในการพัฒนาโปรแกรมที่มีความซับซ้อน เช่น Operation (+, -, \*, /, ^) ค่าคงที่ ( $\pi$ , e, ln2, lne, log10) ฟังก์ชันตรีโกณมิติ (sin, cos, tan) Loop & Case Structure (While Loop, For Loop, Case) และฟังก์ชัน File Input/Output (File I/O) เป็นต้น

### 2.6.2 อุปกรณ์เชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ Data Acquisition

Data Acquisition หรือ DAQ คือกระบวนการอ่านค่าสัญญาณทางไฟฟ้าแบบแอนะล็อก แล้วนำมาเก็บไว้บนคอมพิวเตอร์เพื่อการวัด วิเคราะห์ จัดเก็บหรือแสดงผลด้วยซอฟต์แวร์ โดย DAQ แบบพื้นฐานจะสามารถทำหน้าที่ได้หลายหน้าที่พร้อมกัน โดยมีหน้าที่หลักคือ

Analog Input สำหรับรับสัญญาณอนาล็อก ใช้วัดค่าสัญญาณแรงดันจากเซนเซอร์ต่างๆ

Analog Output สำหรับสร้างสัญญาณอนาล็อกทั้งแบบ DC และ AC ที่เป็น Waveform

Digital I/O ใช้ในการรับหรือสร้างสัญญาณดิจิทัล เพื่อทำงานร่วมกับอุปกรณ์ภายนอก

Counter I/O ทำหน้าที่วัดสัญญาณจาก Encoder หรือสร้างสัญญาณ Pulse



รูปที่ 2.24 Data Acquisition รุ่น NI USB-6008 [9]

### 2.6.3 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล [10]

การพัฒนาด้านการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ที่มีความเร็วสูง ทำให้มีการคิดค้นประดิษฐ์ตัวประมวลผลที่ใช้สำหรับการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่าตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล หรือที่เรียกว่า ดีเอสพี (DSP) โดยตัวประมวลผลดังกล่าวจะเน้นที่ความเร็วของคำสั่งทางคณิตศาสตร์ ในปัจจุบันที่บริษัทผู้ผลิตชิปดีเอสพีอยู่หลายบริษัทและชิปของแต่ละบริษัทยังแบ่งตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันไป



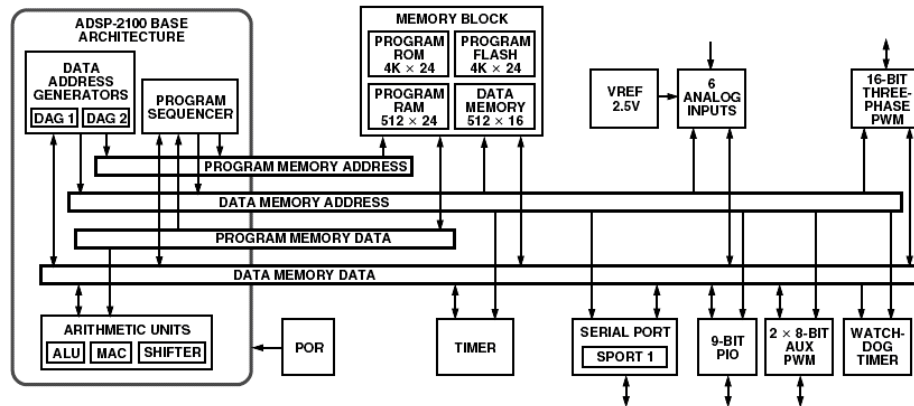


ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ADMCF326BST ของบริษัท Analog Device มีโครงสร้างของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเป็นแบบจุดทศนิยมคงที่ขนาด 16 บิต (16 bit fixed-point digital signal processing) โดยมีคุณสมบัติดังนี้

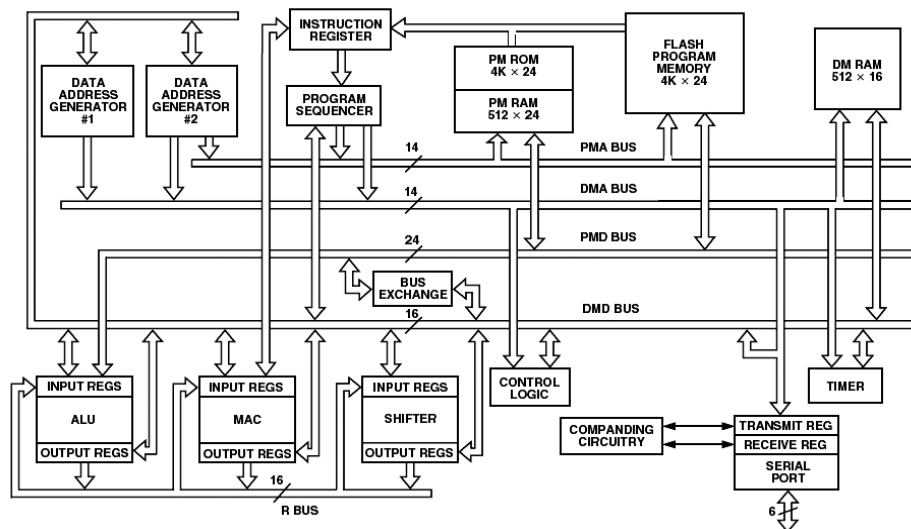
- เป็นตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลขนาด 16 บิต ใช้แรงดันไฟเลี้ยง 5 โวลต์
- ความเร็วในการประมวลผล 20 MIPS (ล้านคำสั่งในหนึ่งวินาที) ต่อ 1 แมกซีนไซเคิล
- ฮาร์ดแวร์การคูณแบบขนานขนาด 16 บิต มีผลลัพธ์เป็น 32 บิต
- มี Accumulator ขนาด 32 บิต และ Arithmetic logic unit ขนาด 32 บิต
- มีพอร์ตอินพุต/เอาต์พุตขนาด 24 บิต
- หน่วยความจำโปรแกรมแบบแรม ขนาด 512 x 24 บิต แบบรอม ขนาด 4k x 24 บิต
- หน่วยความจำข้อมูลแบบแรม ขนาด 512 x 16 บิต
- หน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช ขนาด 4k x 24 บิต
- ตัวสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม (Pluse width modulation, PWM) ขนาด 16 บิต
- ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 12 บิต จำนวน 7 ช่อง รับค่าอนาล็อกได้ 4 ช่องในเวลาเดียวกัน
- มีตัวโปรแกรมการประวิงเวลา (Dead time) และตัวยกเลิกพัลส์ที่แคบ (Narrow Pulse Deletion)
- มีขาทรูปของพีดับบลิวเอ็มจากภายนอก (External PWM Trip)
- มีย่านอุณหภูมิการใช้งานตั้งแต่ -40 ถึง 85 องศาเซลเซียส
- มีปริโปรแกรมฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์
- ติดต่อกับดีบั๊กเจอร์ (Debugger) ผ่านทางพอร์ตอนุกรมด้วยบอด (Baud) แบบอัตโนมัติ

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ADMCF326BST จะประกอบไปด้วยระบบประมวลผลอิสระ 3 ชุดคือ ส่วนประมวลผลทางคณิตศาสตร์ (Arithmetic and Logic Unit : ALU) ฮาร์ดแวร์การคูณ และฮาร์ดแวร์การบวก (Multiplier/Accumulator : MAC) และฮาร์ดแวร์การชิฟท์ (Shift) โดยกระบวนการประมวลผลจะเป็นแบบ 16 บิต โดยมีหน่วยความจำทั้งแบบรอม แบบแรม และแบบแฟลชติดต่อกับดีบั๊กเจอร์ (Debugger) ผ่านพอร์ตอนุกรม





รูปที่ 2.25 โครงสร้างของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ADMCF326BST



รูปที่ 2.26 สถาปัตยกรรมของตัวประมวลผลหลักของ ADMCF326BST

## 2.6.4 ตัวประมวลผลเชิงดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812

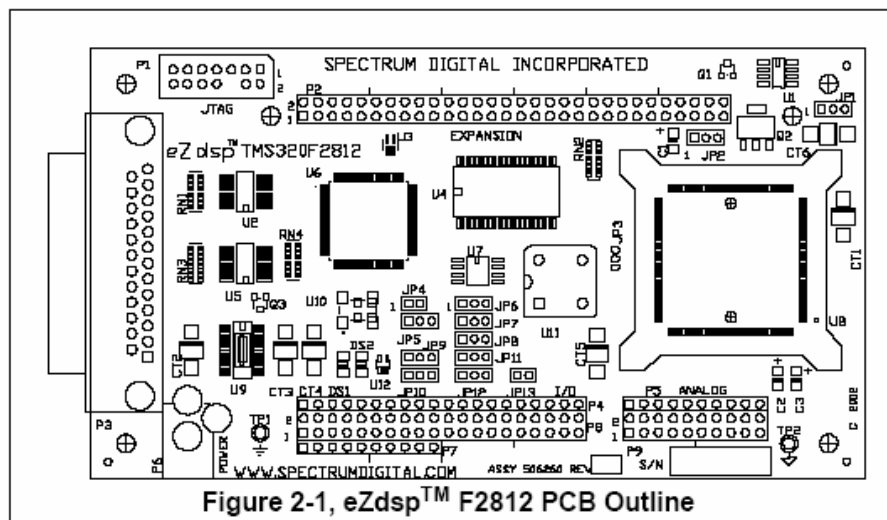
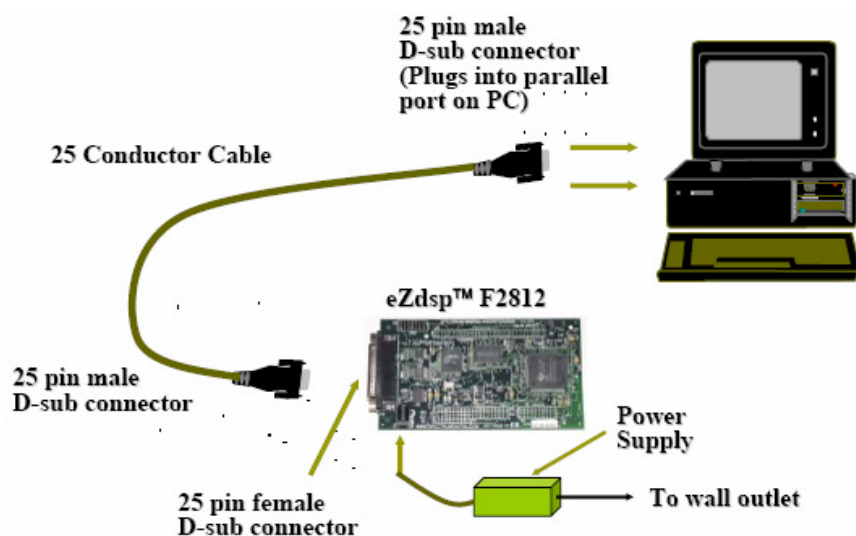


Figure 2-1, eZdsp™ F2812 PCB Outline

รูปที่ 2.27 บอร์ด eZdsp TMS 320F2812

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812 เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทเทกซัส อินสตรูเมนต์ (Texas Instruments) ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในงานควบคุมมอเตอร์โดยเฉพาะเนื่องจาก โครงสร้างภายในมีความยืดหยุ่นเหมาะสำหรับประยุกต์ ใช้ในงานควบคุมมอเตอร์หลายชนิดเช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ, มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน, ซิงโครนัสมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรและ รีแอกแตนซ์มอเตอร์ เป็นต้น

อุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล กับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลต่อ ผ่านทางช่องสัญญาณเครื่องพิมพ์ (Printer Port)



รูปที่ 2.28 การเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลกับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

#### 2.6.4.1 คุณสมบัติของ eZdsp TMS32F2812

- 150 MIPS operating speed
- 18K words on-chip RAM
- 128K words on-chip Flash memory
- 18K words on-chip RAM
- 128K words on-chip Flash memory
- 64K words off-chip SRAM memory
- 30 MHz. clock
- 2 Expansion Connectors (analog, I/O)
- Onboard IEEE 1149.1 JTAG Controller
- 5-volt only operation with supplied AC adapter
- TI F28xx Code Composer Studio tools driver
- On board IEEE 1149.1 JTAG emulation connector



จากข้อมูลที่กล่าวมาในตอนต้นจะเห็นว่าบอร์ด eZdsp TMS 320F2812 มีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะใช้ในการออกแบบโปรแกรมควบคุมอินเวอร์เตอร์สามระดับ เนื่องจากสามารถสร้างสัญญาณพัลส์ได้ 12 พัลส์โดยใช้ Event Manager EVA และ EVB จากคุณสมบัติข้างต้นสามารถสรุปเหตุผลในการเลือกใช้ตัวประมวลผลเชิงดิจิทัล (DSP) ในงานควบคุมได้ดังนี้

1. การใช้ DSP สามารถใช้การโปรแกรมการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนได้ และสามารถคำนวณแบบเวลาจริง (real-time) ได้ และปัจจุบันความเร็วในการประมวลผลสัญญาณอยู่ในระดับ 40 ถึง 150 ล้านคำสั่งต่อวินาที ซึ่งเป็นผลดีต่อการตอบสนองต่ออินพุตทำให้การควบคุมถูกต้องและแม่นยำ
2. ประสิทธิภาพของ DSP ในปัจจุบันสามารถที่จะรวมเอาวงจรต่างๆเข้าไปไว้ในชิพเดียวกัน เช่น วงจรจับ PWM, วงจรสื่อสารแบบอนุกรม, วงจรถอดรหัส เป็นต้น
3. ในการกำหนดคุณสมบัติการทำงานจะใช้โปรแกรม ทำให้ DSP มีความยืดหยุ่นในการแก้ไขหรือเพิ่มเติมอัลกอริทึม ดังนั้นการใช้ DSP จะช่วยลดเวลาในการพัฒนาระบบได้
4. การใช้ DSP จะมีความถูกต้องแม่นยำสูง ซึ่งความแม่นยำในการประมวลผลนั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนบิตที่ใช้แทนสัญญาณและพารามิเตอร์ต่างๆ

### บทที่ 3

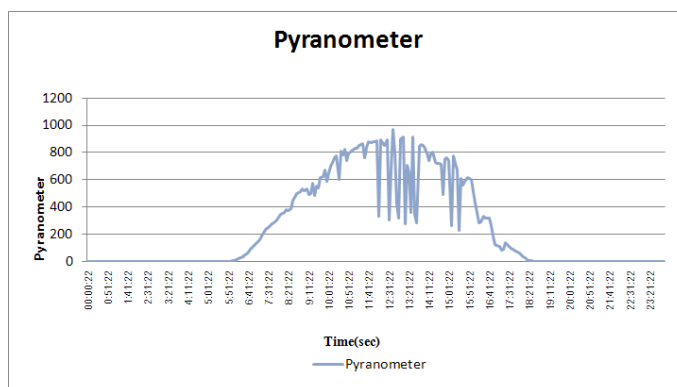
#### การออกแบบ

ในงานวิจัยนี้จะเน้นการออกแบบแบบจำลองของแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน: แสงอาทิตย์, กังหันลม, และเซลล์เชื้อเพลิง วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบสามระดับกระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับและวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ โดยสร้างแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์แต่ละชนิดดังนี้

#### 3.1 แหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน

##### 3.1.1 การออกแบบแบบจำลองของแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนพลังงานแสงอาทิตย์

งานวิจัยนี้ทำการวัดและบันทึกข้อมูลรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ได้จากไพรานอมิเตอร์ โดยจะทำการวัดและบันทึกข้อมูลรังสีจากดวงอาทิตย์เป็นระยะเวลาหนึ่งและจะนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ตามขั้นตอนการทำงาน จากข้อมูลในรูปที่ 3.1 พบว่าปริมาณแสงอาทิตย์ที่วัดค่าได้จากไพรานอมิเตอร์ ในระยะเวลา 1 วัน ช่วงระยะเวลาที่ได้ประสิทธิภาพสูงสุดคือ ประมาณ 10.00 น. ถึง 15.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ปริมาณแสงอาทิตย์ในระยะเวลา 1 วัน

##### 3.1.1.2 การออกแบบฮาร์ดแวร์

การวัดและบันทึกข้อมูลรังสีจากดวงอาทิตย์นั้น มีการรับข้อมูลจากไพรานอมิเตอร์ในรูปแบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยในการออกแบบฮาร์ดแวร์จะมีการแบ่งเป็นส่วนๆ เพื่อให้ง่ายต่อการทำงานและจัดการข้อมูล มีส่วนประกอบดังนี้

1. ไพรานอมิเตอร์ที่ใช้สำหรับวัดรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ของ KIPP & ZONEN รุ่น CMP 3

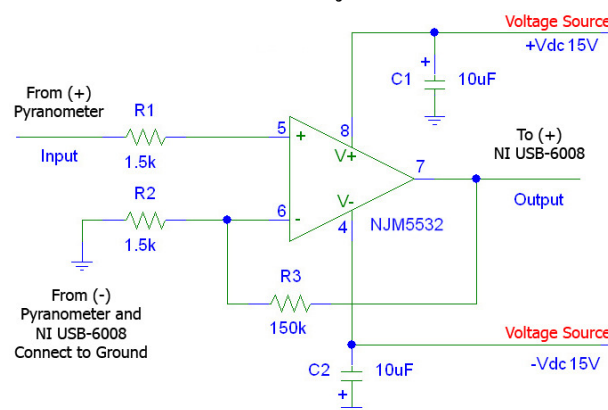


รูปที่ 3.2 ไพรานอมิเตอร์บนดาดฟ้าอาคาร

2. วงจรขยายสัญญาณเนื่องจากอุปกรณ์ NI USB-6008 นั้นไม่สามารถรับแรงดันไฟฟ้าในระดับมิลลิโวลต์ได้ จึงจำเป็นต้องทำการขยายแรงดันไฟฟ้าที่มาจากไพรานอมิเตอร์ขึ้นมา โดยใช้อปแอมป์รหัส NJM5532 ของ JRC ในการขยายสัญญาณ โดยอัตราการขยายสัญญาณ (AV) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} AV &= 1 + \left( \frac{R3}{R2} \right) \\ &= 1 + \left( \frac{150k\Omega}{1.5k\Omega} \right) \\ &\cong 100 \text{ เท่า} \end{aligned} \quad (3.1)$$

ในการต่อจะให้ขั้วบวกของไพรานอมิเตอร์ต่อเข้าฝั่งอินพุตของวงจรและเอาต์พุตของวงจรจะต่อเข้าขั้วบวกในช่อง AI0 ของ NI USB-6008 ส่วนขั้วลบของไพรานอมิเตอร์และช่อง AI0 จะต่อเข้ากับกราวด์ร่วมของวงจร ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรขยายสัญญาณ

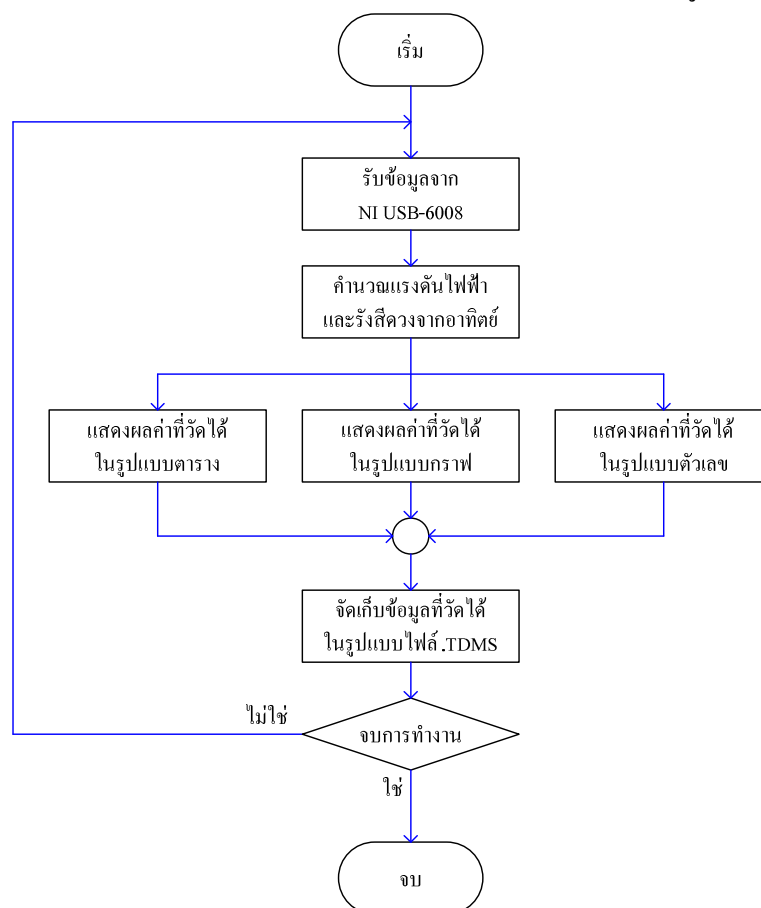
3. Data Acquisition รุ่น NI USB-6008 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้รับและส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.4 การเลือกชนิดของข้อมูลและช่องสัญญาณต่อไพรมอนิเตอร์ที่รับเข้า NI USB-6008

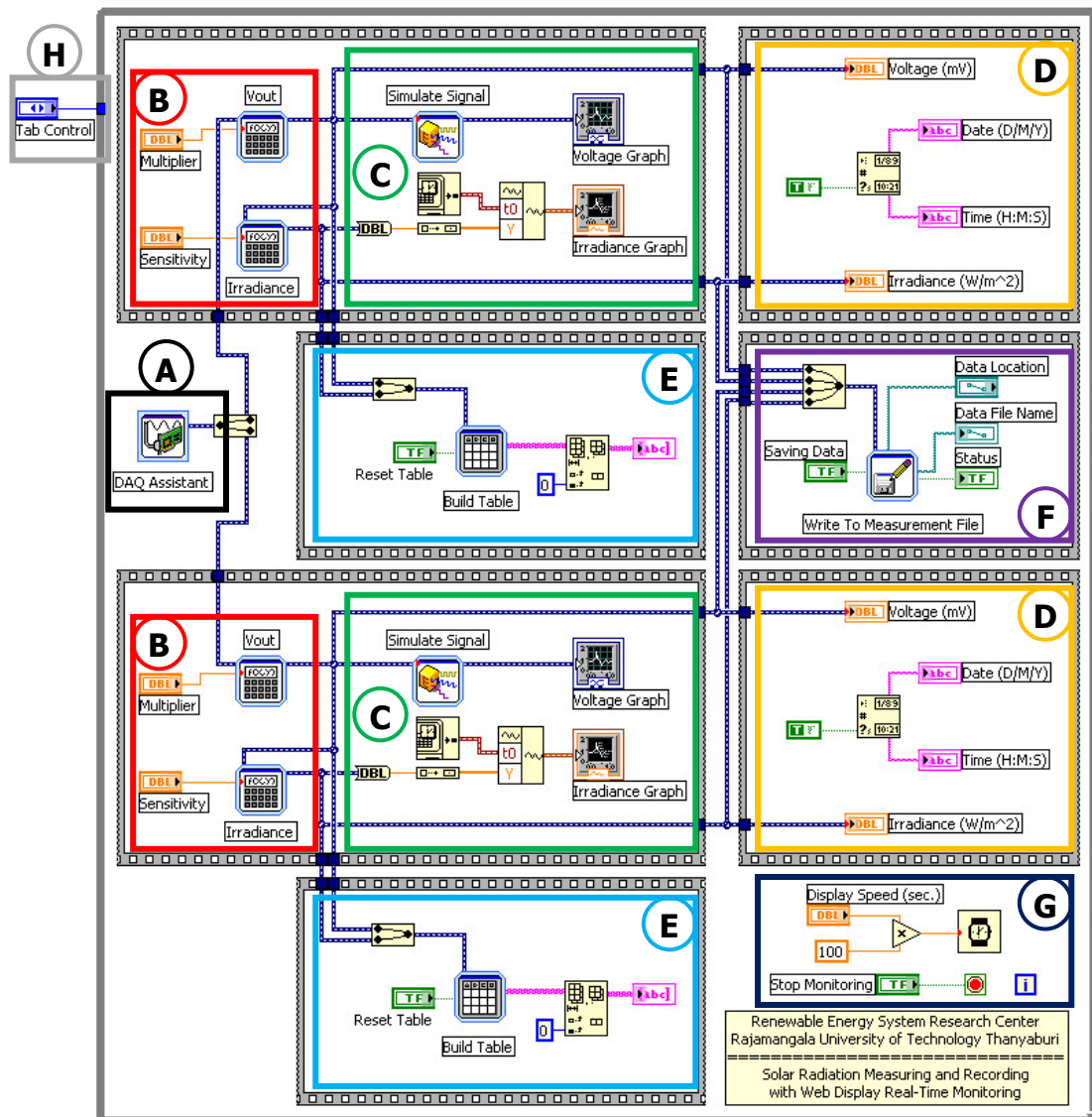
### 3.1.1.3 การออกแบบซอฟต์แวร์

การออกแบบซอฟต์แวร์ ต้องคำนึงถึงความสะดวกในการใช้โปรแกรม ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบโปรแกรมในการวัดและบันทึกข้อมูลรังสีจากดวงอาทิตย์ ด้วยโปรแกรม LabVIEW ในการแสดงผลต่างๆ ซึ่งลักษณะการทำงานของโปรแกรมสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะการทำงานของโปรแกรม

Source Code ของโปรแกรม LabVIEW สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 Source Code ของโปรแกรม LabVIEW

### 3.1.2 การออกแบบแบบจำลองของแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนพลังงานกังหันลม

#### 3.1.2.1 การจำลองโมเดลกังลมผลิตไฟฟ้า

ส่วนประกอบของโมเดลการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบ่งเป็น 3 ส่วนหลักๆ

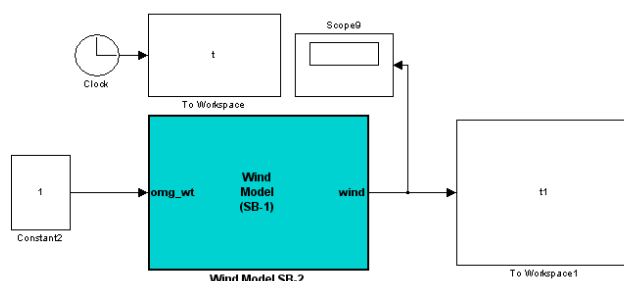
- โมเดลของลมในประเทศไทย
- โมเดลของใบพัดกังหันลม
- โมเดลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร

## 1. จำลองการทำงานของความเร็วลมในประเทศไทย

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของลมในประเทศไทย

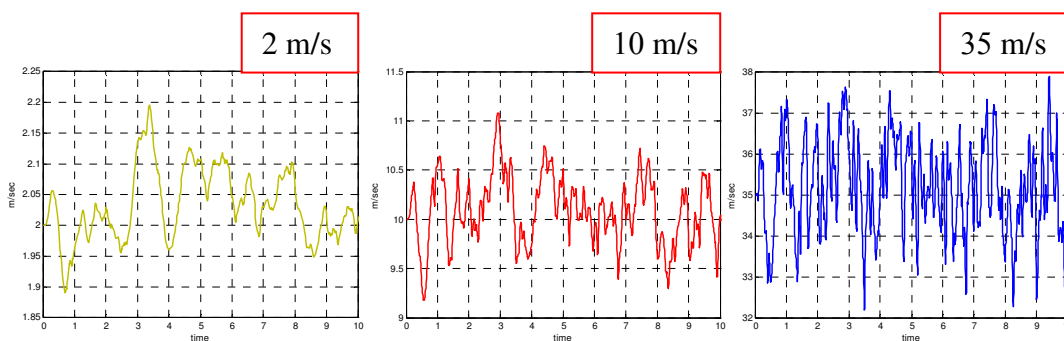
| Parameter                  | Set parameter |
|----------------------------|---------------|
| Rotor Diameter [m]         | 2.7           |
| Average Wind speed [m/sec] | 2,10,35       |
| Length scale [m]           | 1             |
| Turbulence intensity [%]   | 12            |
| Simple time [sec]          | 0.05          |

หมายเหตุ การset ค่า parameter สามารถปรับเปลี่ยนตามขนาดของกังหันลมขนาดต่างๆได้



รูปที่ 3.7 การจำลองโมเดลของลม

การทดสอบลมที่ความเร็วที่ค่าความเร็วต่างๆ ในสภาพภูมิอากาศในประเทศไทย ได้แบ่งการจำลองออกเป็น 3 ความเร็วลมคือ 2 m/s 10 m/s 35m/s ที่ความเร็วลมที่ต่างกันจะเห็นได้ว่าค่าความถี่ของพลังงานจะมีค่าต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.8



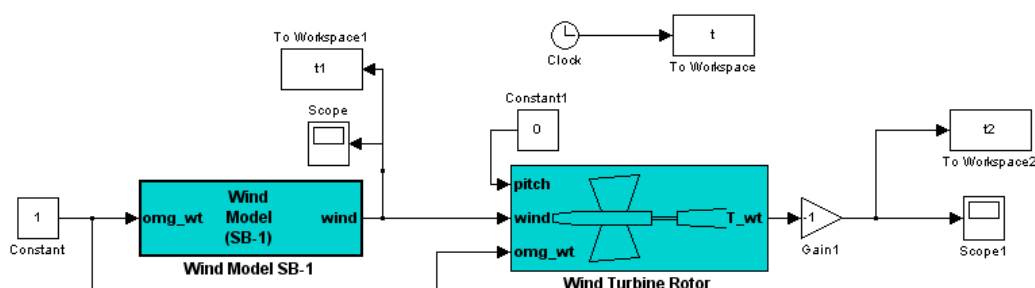
รูปที่ 3.8 จำลองความเร็วลมที่ความเร็วลมต่างกัน



## 2. โมเดลใบพัดของกังหันลม

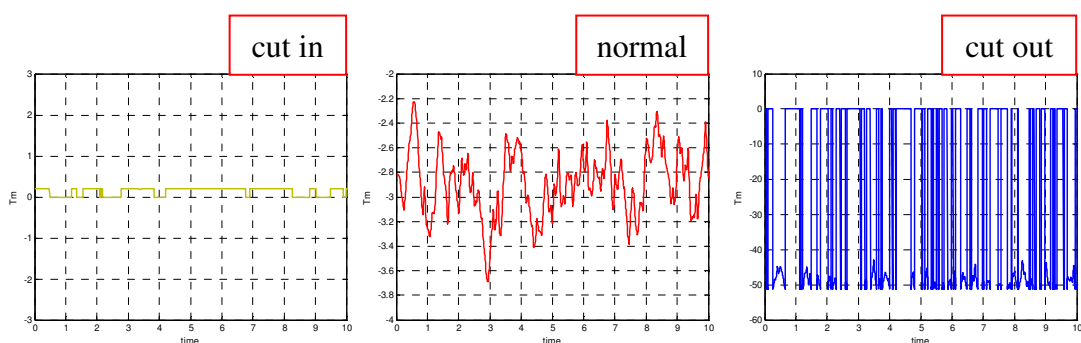
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของใบพัดกังหันลม

| Parameter                              | Set parameter |
|----------------------------------------|---------------|
| Blade radius [m]                       | 1.35          |
| Air density [ $\text{kgm}^{-3}$ ]      | 1.225         |
| Cut in speed [m/sec]                   | 2             |
| Cut out speed [m/sec]                  | 35            |
| Time constant for pitch actuator [sec] | 0             |



รูปที่ 3.9 การจำลองโมเดลการทำงานของใบพัดกังหันลม

การทดสอบ โมเดลของใบพัดกังหันลม โดยรับอินพุตลมมาจากโมเดลของลมในประเทศไทยที่สภาวะการทำงาน cut in ที่ 2 m/sec cut out ที่ 35 m/sec และเพื่อศึกษาการทำงานของใบพัดของกังหันลมในช่วงการทำงานต่างๆโดยเอาที่พุดที่ออกมาอยู่ในรูปของแรงบิดเพื่อไปควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อไป

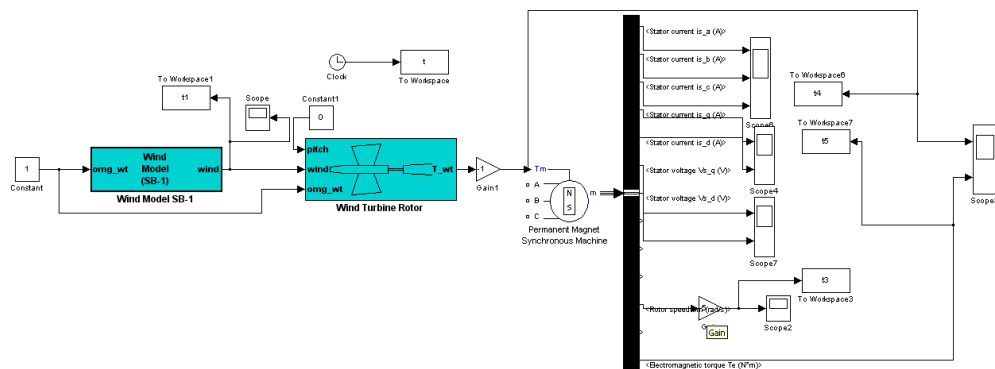


รูปที่ 3.10 ทอร์กของใบพัดกังหันลม

### 3. โมเดลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร

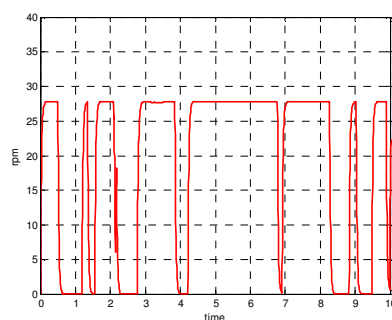
ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร

| Parameter                                                                         | Set parameter           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Flux distribution : Sinusoidal<br>: trapezoidal                                   | Sinusoidal              |
| Mechanical input : Torque $T_m$<br>: Speed $w$                                    | Torque $T_m$            |
| Preset model :                                                                    | No                      |
| Stator resistance [ohm]                                                           | 2.8750                  |
| Inductances [ $L_d(H)$ , $L_q(H)$ ]                                               | [ $8.5e-3$ , $8.5e-3$ ] |
| Flux induced by magnets [Wb]                                                      | 0.175                   |
| Inertia, friction factor and pairs [ $J(kg\cdot m^2)$ , $F(N\cdot m\cdot s)p()$ ] | [ $1e-3$ , 0, 8 ]       |

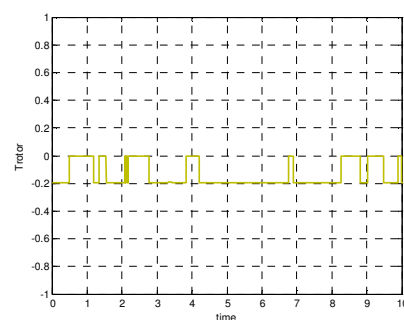


รูปที่ 3.11 การจำลองเพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร

การทดสอบ โมเดลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร โดยรับอินพุตจากกั้นหนดรูปที่ 3.12 เพื่อศึกษาการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรในสภาวะลมต่างๆ

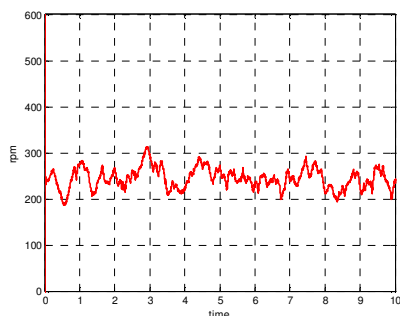


ก) ความเร็วลมในสภาวะ Cut in

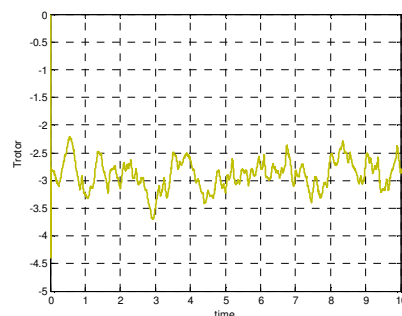


ข) ทอร์กในสภาวะ Cut in

รูปที่ 3.12 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรในสภาวะ Cut in

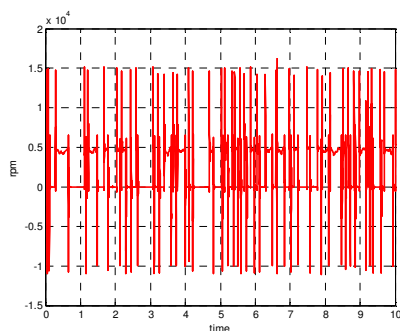


ก) ความเร็วลมในสภาวะปกติ

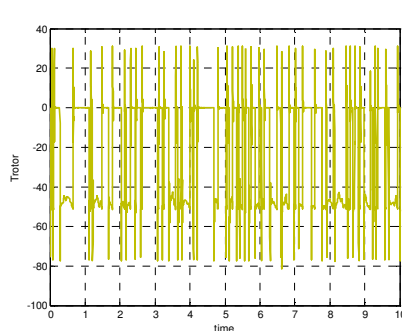


ข) ทอร์กในสภาวะปกติ

รูปที่ 3.13 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรในสภาวะปกติ



ก) ความเร็วลมในสภาวะ Cut Out



ข) ทอร์กในสภาวะ Cut Out

รูปที่ 3.14 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรในสภาวะ Cut Out

พลังงานที่ผลิตได้จากกังหันลมจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความเร็วลมแต่ความสัมพันธ์นี้ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรง ที่ความเร็วลมต่ำ (1 - 3 เมตร/วินาที) กังหันลมจะยังไม่ทำงาน ในช่วงความเร็วลมนี้กังหันลมจะยังไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ที่ความเร็วลมระหว่าง 1 - 1.9 เมตร/วินาที กังหันลมจะเริ่มทำงานเรียกช่วงนี้ว่า "cut in wind speed" ที่ความเร็วลมช่วงประมาณ 2 เมตร/วินาที เป็นช่วงที่เรียกว่า "nominal หรือ rate wind speed" ซึ่งเป็นช่วงที่กังหันลมทำงานอยู่บนพิกัดกำลังสูงสุดของตนเองค่าความเร็วลมที่แน่นอนขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อพื้นที่หน้าตัดของใบพัดและการออกแบบที่จุดต่ำกว่า nominal คือ "maximum rotor efficiency" ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับ "tip speed ratio" (Siegfried, 1998) ในช่วงความเร็วลมที่สูงกว่า 35 เมตร/วินาที กังหันลมจะหยุดทำงานเนื่องจากความเร็วลมที่สูงเกินไป จนอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อกลไกของกังหันลมได้

### 3.1.3 การออกแบบแบบจำลองของแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนเซลล์เชื้อเพลิง

การออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงนั้นวัตถุประสงค์สำคัญคือการจัดการจัดการน้ำเป็นปัญหาสำคัญใน Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) ซึ่งเชื้อเพลิงต้องชุ่มน้ำอยู่ตลอดเวลา ทำให้น้ำที่ระเหยออกไปต้องเท่ากับน้ำที่ผลิตขึ้นมา ถ้าน้ำระเหยเร็วเกินไป น้ำจะแห้งจากเชื้อเพลิงและทำ

ให้ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และเยือกแข็งจะแตกออก ทำให้เกิดการลัดวงจรของก๊าซ ซึ่งไฮโดรเจนและออกซิเจนจะรวมกันโดยตรง ทำให้เกิดความร้อนสูง ทำลายเซลล์ไปได้ แต่ถ้าน้ำระเหยออกช้าเกินไป ขั้วไฟฟ้าจะถูกน้ำท่วมทำให้สารตั้งต้นไม่อาจเข้าทำปฏิกิริยากับตัวเร่งได้และทำให้ปฏิกิริยาลึกลับ และปัจจัยอื่นๆ ก็มีความสำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิตลอดทั้งเซลล์ ซึ่งบางครั้งอาจเปลี่ยนแปลงและทำลายเซลล์ได้ สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ในลำดับต่างๆ ของเซลล์แต่ละชนิด การเลือกวัสดุต้องพิจารณาปัจจัยหลายอย่างประกอบกัน ทั้งนี้ไม่มีวัสดุใดที่จะให้ผลดี 100% พร้อมกันในทุกๆ ด้าน นอกจากนี้สำหรับเซลล์บางประเภทจะเน้นที่ความทนทานและอายุการใช้งาน สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงไม่มีปัญหาการทำงานในที่อุณหภูมิสูงแต่ในที่อุณหภูมิต่ำ

### 3.1.3.1 เทคโนโลยีของเซลล์เชื้อเพลิง

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงไม่ได้ถูกจำกัดด้วยประสิทธิภาพในระบบของวัฏจักรคาร์โนต์ เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงไม่ได้มีการทำงานเป็นวัฏจักรที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงจึงสามารถมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สูงมากได้ เช่นเซลล์เชื้อเพลิงแบบ hydrogen/oxygen proton-exchange membrane หรือ polymer electrolyte (PEMFC) พอลิเมอร์ที่ให้โปรตอนผ่านได้จะแยกฝั่งแอโนดและแคโทดออกจากกัน แต่ละด้านจะมีขั้วไฟฟ้าของตัวเอง ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นแผ่นคาร์บอนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม ในด้านของแอโนดไฮโดรเจนจะแพร่เข้าสู่ตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแอโนด ทำให้มันแตกตัวออกเป็นโปรตอนและอิเล็กตรอน โปรตอนจะวิ่งผ่านเยือกแข็งไปที่แคโทด ในขณะที่อิเล็กตรอนจะถูกบังคับให้วิ่งเข้าสู่วงจรไฟฟ้าภายนอก (ให้พลังงานออกมา) เพราะว่าเยือกแข็งนั้นไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ ในด้านของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แคโทด โมเลกุลของออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอน ซึ่งวิ่งมาจากแอโนดผ่านวงจรภายนอก และมาพบกับออกซิเจนและโปรตอนที่ด้านนี้กลายเป็นน้ำ

เซลล์เชื้อเพลิงไม่สามารถเก็บพลังงานได้เหมือนกับแบตเตอรี่ แต่ในบางสถานการณ์เช่นเดียวกับ โรงไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับแหล่งพลังงานที่ไม่ต่อเนื่อง (แสงอาทิตย์ ลม) มันสามารถทำงานร่วมกับ electrolyzer และระบบเก็บสะสมพลังงานเพื่อเก็บพลังงานไว้ได้ ประสิทธิภาพโดยรวมจากไฟฟ้าเป็นไฮโดรเจนและกลับมาสู่ไฟฟ้าอีกสำหรับโรงไฟฟ้าแบบนี้อยู่ที่ 30-40%

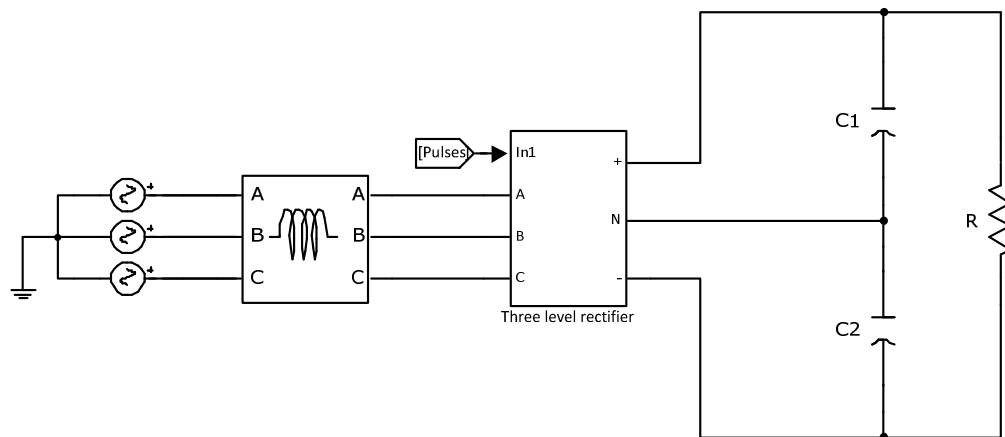
### 3.1.3.2 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงโดยทั่วไปสามารถแปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ถึงราว 50% ประสิทธิภาพนี้ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านเซลล์ ยิ่งกระแสสูงยิ่งประสิทธิภาพก็ลดลงมาก ดังนั้นการสูญเสียที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต ขนส่งและจัดเก็บมาพิจารณาด้วย รอยนดที่ขับเคลื่อนด้วยเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ไฮโดรเจนอาจมีประสิทธิภาพจากแหล่งพลังงานไปสู่การขับเคลื่อนอยู่ที่ 22% ถ้าไฮโดรเจนถูกเก็บอยู่ในรูปก๊าซความดันสูง และ 17% ถ้าไฮโดรเจนถูกเก็บอยู่ในรูปก๊าซเหลว การใช้เซลล์เชื้อเพลิงให้พลังงานไฟฟ้าและความร้อนไปพร้อมกัน ประสิทธิภาพในระบบนี้เกิดการแปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องสูงมากนัก ปกติแล้วอยู่ที่ 15-

20% เนื่องจากความร้อนก็สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ความร้อนบางส่วนสูญเสียไปกับก๊าซที่ปล่อยออกจากระบบเช่นเดียวกับระบบที่มีการเผาไหม้ทั่วไป ดังนั้นในระบบนี้ประสิทธิภาพโดยรวมจึงยังไม่ใช่ 100% แต่อยู่ที่ราว 80%

### 3.2 การออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ

การจำลองการทำงานของระบบจะจำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังรูปที่ 3.15 โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนที่จ่ายไฟออกมาในรูปแบบของไฟฟ้ากระแสสลับ จากนั้นแรงดันที่ได้จากแหล่งกำเนิดก็จะนำไปเข้าวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแล้วนำไปใช้งานในส่วนอื่นต่อไป



รูปที่ 3.15 แบบจำลองของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ

#### 3.2.1 การออกแบบส่วนของวงจรกำลัง

ดีซีลิงค์ ( DC Link )  $C_1$  และ  $C_2$  หรือวงจรเชื่อมโยงทางดีซี ดังรูปที่ 3.15 ประกอบด้วยตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับให้เรียบยิ่งขึ้น และทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า โดยแรงดันที่ได้จะนำไปใช้งานในส่วนอื่นต่อไป ซึ่งจะมีอยู่ 3 ขั้วคือ  $+V_{dc}$  ,  $-V_{dc}$  และ  $V_{dc}/2$

จากสมการแรงดันเฉลี่ยขาออกของวงจรแปลงผัน 3 เฟสคือ

$$V_{dc} = V_{o,av} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{m,Line} \cos \alpha \quad (3.2)$$

เมื่อ  $V_{m,Line}$  คือค่าสูงสุดของกระแสไลน์

$$0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$$



ดังนั้นเราต้องการแรงดัน  $V_{dc} = 600 \text{ V}$  จะได้

$$600 = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \times 537 \cos \alpha$$

$$\alpha = 47.5^\circ$$

$$\begin{aligned} V_{\text{ripple, p-p}} &= V_{\text{peak}} \times 0.05 \\ &= 600 \times 0.05 \\ &= 30 \text{ V} \end{aligned} \quad (3.3)$$

ประจุไฟฟ้าที่คายจากตัวเก็บประจุในช่วงเวลา

$$t = \frac{t_{\text{rate}}}{6} = \frac{1}{50 \times 6} = 3.333 \text{ ms} \quad (3.4)$$

$$I_L = \frac{P}{V_{dc}} = \frac{100000}{600} = 166.67 \text{ A} \quad (3.5)$$

$$C = \frac{I_{dc} \times t}{V_{\text{ripple}}} = \frac{166.67 \times 3.333 \times 10^{-3}}{30} = 18,500 \text{ } \mu\text{F} \quad (3.6)$$

เพราะฉะนั้นจึงเลือกคาปาซิเตอร์ขนาด  $37000 \text{ } \mu\text{F}$  2 ตัว ต่ออนุกรมกันซึ่งจะได้ค่าความจุรวมเท่ากับ  $18500 \text{ } \mu\text{F}$

### 3.2.2 การออกแบบส่วนของวงจรควบคุม

สำหรับวิธีการควบคุม ในงานวิจัยนี้จะเลือกวิธีการควบคุมแบบ VOC เพราะเป็นวิธีการควบคุมที่ง่ายและสะดวก ไม่ยุ่งยากซับซ้อนอีกทั้งยังสามารถใช้งานได้ดีอีกด้วย

#### 3.2.2.1 ระบบควบคุมวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบ VOC

ลักษณะการควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบ VOC ตามรูปที่ 3.2 คล้ายๆกับการควบคุมอินดักชันมอเตอร์ (Induction Motor) แบบ Field Oriented Control : FOC ซึ่งมีลักษณะพื้นฐานที่เหมือนกันในเรื่องของการแปลงแกน นั่นคือการแปลงจากระบบสามแกน abc เป็นแกนนิ่ง  $\alpha - \beta$  (Stationary  $\alpha - \beta$ ) และแปลงจากแกนนิ่ง  $\alpha - \beta$  เป็นแกนหมุน  $d - q$  (Rotating  $d - q$ ) [11]

ลักษณะการควบคุมแบบนี้มีข้อดีคือ

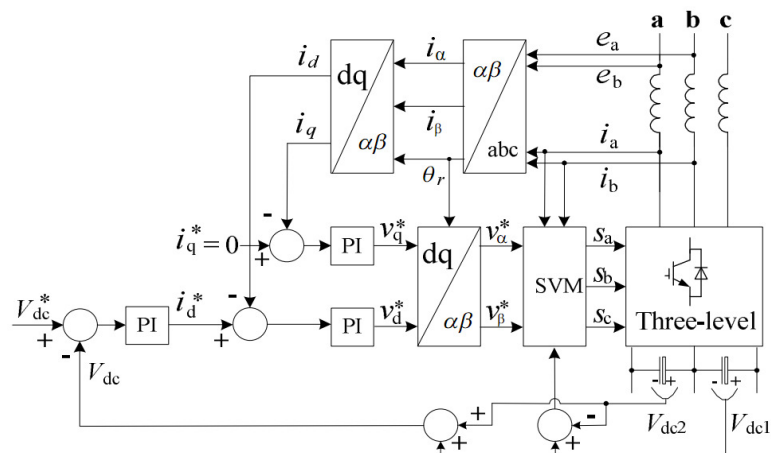
1. ทำให้กระแสด้านเข้าใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์
2. ตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง

### 3.2.2.2 ลักษณะทั่วไปของระบบควบคุม

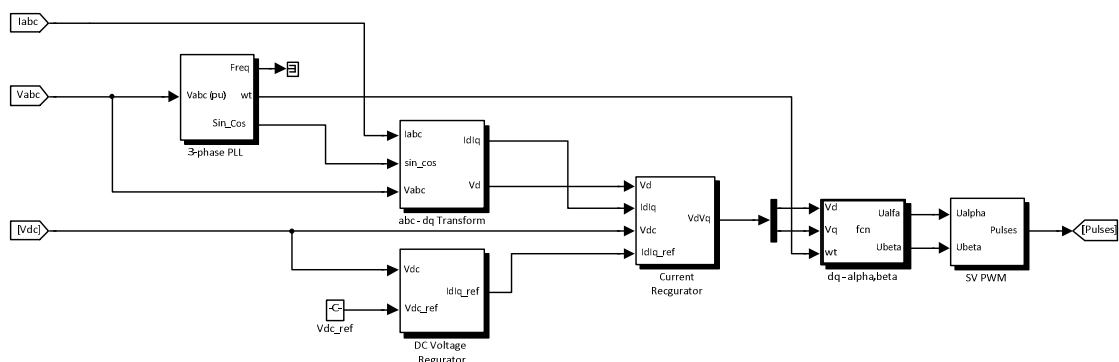
จากรูปที่ 3.16 กระแสในระบบสามเฟส ( $i_a, i_b, i_c$ ) จะถูกแปลงเป็นกระแสในแกนนิ่ง  $\alpha-\beta$  ( $i_\alpha, i_\beta$ ) จากนั้นก็จะถูกแปลงเป็นกระแสในแกนหมุน  $d-q$  ( $i_d, i_q$ ) กระแสในแกนหมุน  $i_d, i_q$  ที่ได้จะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพี-ไอ (P-I Controller) ซึ่งมีลักษณะที่เหมือนกันโดยกระแสอ้างอิงของ  $i_d$  ( $i_d^*$ ) ได้จากการนำแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ ) มาผ่านตัวควบคุมแบบพี-ไอ (P-I Controller) ส่วนกระแสอ้างอิงของ  $i_q$  ( $i_q^*$ ) ถูกตั้งค่าไว้ให้เท่ากับศูนย์ เพื่อให้ได้ตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง

กระแส  $i_d$  และ  $i_q$  ที่ถูกควบคุมแล้วจะได้เป็นแรงดันในแกนหมุน ( $v_d, v_q$ ) และผ่านการแปลงแกนกลับเป็นแรงดันในแกนนิ่ง ( $v_\alpha, v_\beta$ ) เพื่อนำไปแปลงเป็นฟังก์ชันการสวิตช์ที่ตัวมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ (Space Vector Modulator) ต่อไป

สำหรับแรงดันในระบบสามเฟส ( $e_a, e_b, e_c$ ) จะถูกแปลงเป็นแรงดันในแกนนิ่ง  $\alpha-\beta$  ( $e_\alpha, e_\beta$ ) จากนั้นนำไปสร้างสัญญาณ  $\sin(\omega t)$  และ  $\cos(\omega t)$  เพื่อนำไปอ้างอิงสองส่วนคือในการแปลงแกนนิ่ง  $\alpha-\beta$  เป็น แกนหมุน  $d-q$  และ แปลงกลับจากแกนหมุน  $d-q$  เป็นแกนนิ่ง  $\alpha-\beta$



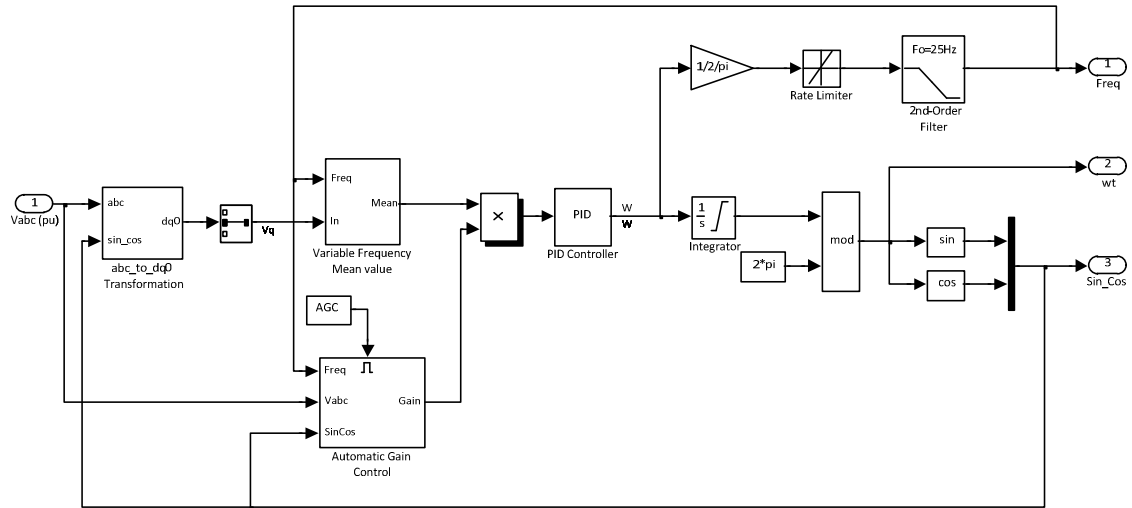
รูปที่ 3.16 ระบบควบคุมของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสกลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสามระดับแบบ VOC



รูปที่ 3.17 ส่วนการควบคุมวงจรแปลงผันแบบ VOC ในโปรแกรม MATLAB/Simulink

### 3.2.2.3 ส่วนการตรวจจับมุมเฟสของแรงดัน

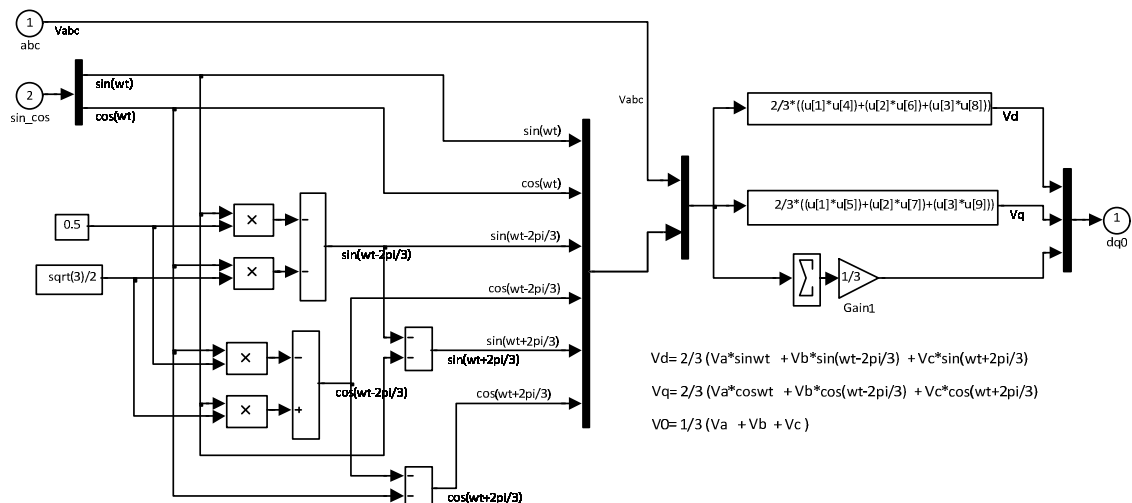
ส่วนนี้จะทำการวัดแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย  $e_a$ ,  $e_b$  และ  $e_c$  เพื่อที่จะนำค่ามุม  $\theta$  มาใช้ในการแปลงแกน (Park และ Inverse Park Transformation) ดังแสดงในรูปที่ 3.18 หรือที่เรียกกันว่าวงจรเฟสล็อกลูป (Phase-Lock-Loop : PLL) นั่นเอง



รูปที่ 3.18 ส่วนการตรวจจับมุมเฟสของแรงดัน

### 3.2.2.4 ส่วนการแปลงแกนจาก 3 เฟส abc เป็น $d-q$

ส่วนนี้เป็นส่วนที่ใช้สำหรับแปลงแกนจากแกน 3 เฟส abc เป็นแกนนิ่ง  $d-q$  โดยจะใช้มุมที่ได้จากส่วนการตรวจจับมุมเฟสมาช่วยในการแปลงแกนดังรูปที่ 3.19

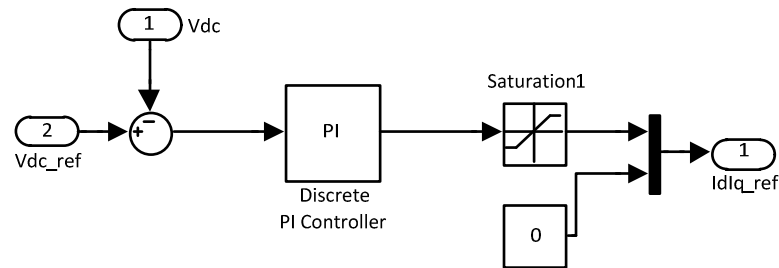


รูปที่ 3.19 ส่วนการแปลงแกนจาก 3 เฟส abc เป็น d-q



### 3.2.2.5 ส่วนการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

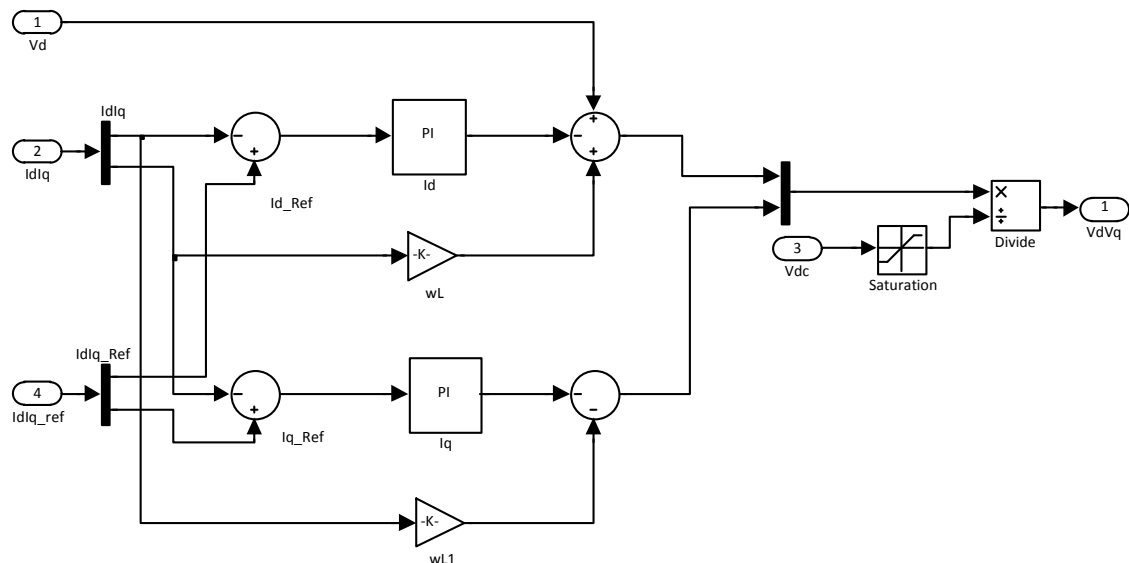
ส่วนนี้จะทำหน้าที่ปรับค่าแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันฯตามค่าที่เราต้องการ ซึ่งจะถูควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI โดยจะได้เป็นกระแสอ้างอิงของวงจรควบคุม ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ส่วนการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

### 3.2.2.6 ส่วนการปรับค่ากระแส

การทำงานในส่วนนี้จะนำกระแสที่วัดได้จากการใช้งานจริงมาเปรียบเทียบกับกระแสอ้างอิงที่ได้จากส่วนการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงผ่านตัวควบคุมแบบ PI จากนั้นก็จะได้แรงดันในแกน  $d-q$  ( $v_d$ ,  $v_q$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.21

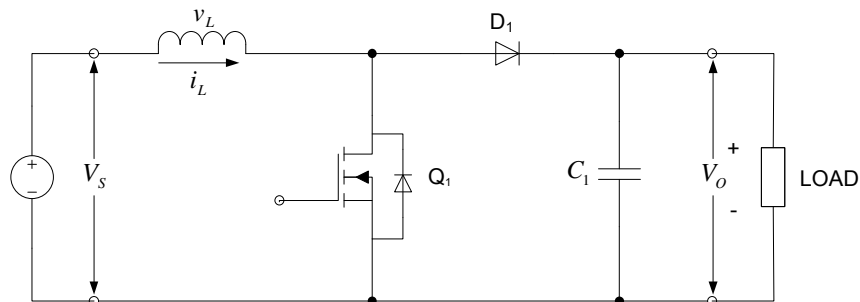


รูปที่ 3.21 ส่วนการปรับค่ากระแส

เมื่อได้แรงดัน  $v_d$ ,  $v_q$  จากส่วนนี้แล้วก็จะนำไปแปลงให้อยู่ในแกน  $\alpha-\beta$  จะได้แรงดัน  $v_\alpha, v_\beta$  ออกมา จากนั้นก็จะนำแรงดัน  $v_\alpha, v_\beta$  ไปเข้าสู่กระบวนการ SVM และนำสัญญาณที่ได้จาก SVM นี้ไปขับนำสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ

### 3.3 การออกแบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

ในการออกแบบวงจรทระดับแรงดันในงานวิจัยนี้จะกำหนดแรงดันด้านเข้าของวงจรทระดับมีค่าเท่ากับ 48 โวลต์ และแรงดันด้านออกของวงจรทระดับมีค่าเท่ากับ 100 โวลต์ ที่ความถี่สวิตช์ 10 kHz โดยในงานวิจัยนี้ใช้ออสเฟตเบอร์ IRFP 250 ซึ่งมีอัตราทนแรงดันเท่ากับ 200 โวลต์ กระแส 33A จากค่าต่าง ๆ ที่กำหนดนี้สามารถนำมาหาค่าตัวเหนี่ยวนำ และค่าตัวเก็บประจุของวงจรทระดับแรงดันได้ดังนี้



รูปที่ 3.22 วงจรทระดับแรงดัน

1. หาค่า Duty Cycle จากสมการ

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D}$$

$$\frac{100}{48} = \frac{1}{1-D}$$

$$1 - D = \frac{48}{100} = 0.48$$

$$D = 0.52$$

หาขนาดตัวเหนี่ยวนำ (L) สามารถคำนวณจากสมการ

$$L_{min1} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f}$$

$$L_{min1} = \frac{0.52(1-0.52)^2 \times 10}{2(10 \times 10^3)}$$

$$= 60 \mu H$$



2. หาขนาดตัวเก็บประจุค่าระลอกคลื่นแรงดันของตัวเก็บประจุเท่ากับ 10 เพอร์เซ็นต์จาก  
สมการ

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf}$$

จะได้

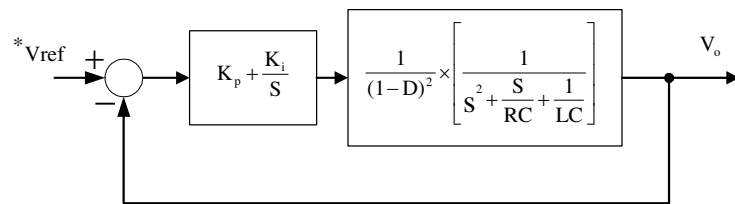
$$C_I = \frac{D}{Rf \frac{\Delta V_o}{V_o}}$$

$$C_I = \frac{0.52}{10 \times (10 \times 10^3) \times 0.1}$$

$$= 52 \mu F$$

### 3.3.1 การจำลองตัวควบคุมชนิด PI ด้วย Ziegler-Nichols

เป็นการออกแบบตัวควบคุมชนิด PI ด้วย Ziegler-Nichols เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ ที่ทำให้ระบบมีความ ผิดพลาด (Error) น้อยที่สุด ที่สภาวะคงตัว (Steady State) และมีผลต่อการตอบสนองที่รวดเร็ว จึงสามารถออกแบบหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวงจรได้รูปที่ 3.23



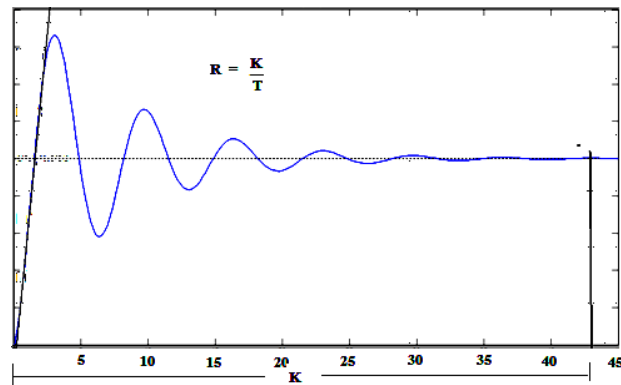
รูปที่ 3.23 บล็อกฟังก์ชันโอนย้าย Transfer Function ตัวควบคุมชนิด PI

ลำดับขั้นตอนการหาค่า  $K_p$   $K_i$  ด้วย Ziegler-Nichols

1. ทำการหาค่า  $K_p$   $K_i$  ขึ้นมาเพื่อทำการหา Step Response

```
kp = 10;
ki = 15;
L = 60e6;
C = 52e-6;
R = 10;
Num = [kp ki];
Den = [1 1/(R*C) 1/(L*C) 0];
Sys = tf(num,den);
sys1 = feedback(sys,1);
step(sys1)
```

จะได้กราฟ Step Response ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 กราฟแสดง Step Response จากการสุ่มค่าเริ่มต้น

จากรูปที่ 3.24 จะได้ค่าดังนี้

$$L = 0.2$$

$$R = 1/43.5 = 0.02298$$

ต้องการควบคุมแบบ PI controller

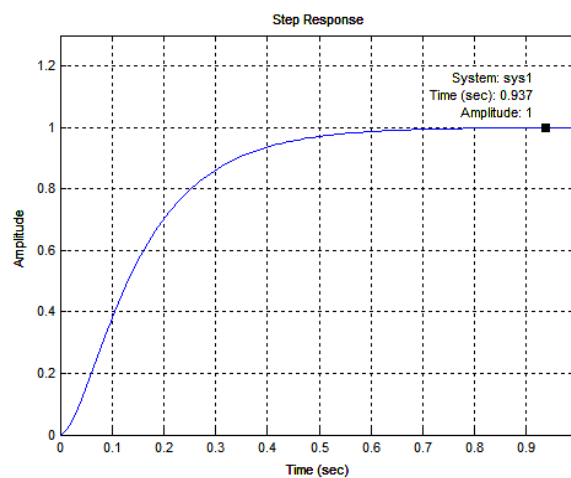
$$K_p = 0.9/R.L = 0.9/0.2 \times 0.02298 = 195.822$$

$$K_i = L/0.3 = 0.2/0.3 = 0.666666$$

2. นำค่าที่ได้มาคำนวณการควบคุมแบบ PI controller ตามกฎของ Ziegler -Nichols และนำค่าที่ได้จากการมาคำนวณหา Step Response อีกครั้ง ได้ดังภาพที่ 3.25

$$K_p = 0.9T/L = 0.9 \times 0.54/0.12 = 4.05$$

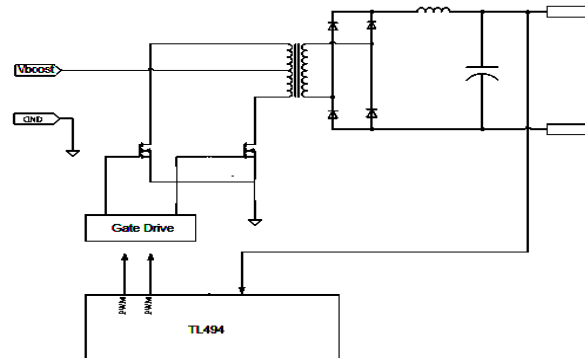
$$K_i = L/0.3 = 0.12/0.3 = 0.4$$



รูปที่ 3.25 กราฟแสดง Step Response ที่ได้จากกฎของ Ziegler-Nichols

### 3.3.2 การออกแบบวงจรพุก-พูลคอนเวอร์เตอร์

ในการออกแบบวงจรพุก-พูล คอนเวอร์เตอร์นี้จะใช้ IC TL494 เป็นตัวสร้างสัญญาณ PWM เพื่อไปควบคุมการขับของสวิตช์ MOSFET ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เบอร์ IRFP 460 มีคุณสมบัติในการทนแรงดันได้ 500V ทนกระแสได้ 20A



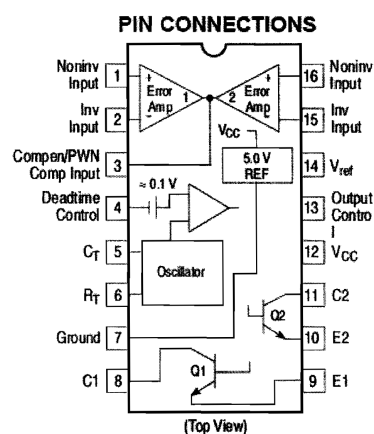
รูปที่ 3.26 โครงสร้างพื้นฐานและส่วนประกอบของวงจรพุก-พูลคอนเวอร์เตอร์

#### 3.3.2.1 ข้อพิจารณาในการออกแบบวงจรควบคุม

การออกแบบวงจรควบคุมเป็นการออกแบบสัญญาณ เพื่อไปควบคุมการขับสวิตช์ MOSFET ออกแบบให้วงจรทำงานที่ภาคขับกำลังแบบ Push-Pull converter จึงต้องออกแบบให้สัญญาณเอาต์พุตคู่ และมีการแยกกราวด์ของชุดวงจรควบคุมออกจากภาคกำลัง ด้วยวิธีการเชื่อมโยงสัญญาณทางแสงเพื่อให้ความปลอดภัยในการใช้งานโดยใช้ HCPL 3120 และปรับความกว้างพัลส์และความถี่ให้ได้ตามที่ต้องการด้วยความต้านทานปรับค่าได้

#### 3.3.2.2 การออกแบบวงจรควบคุม

วงจรควบคุมเลือกใช้ไอซี TL494 เนื่องจากไอซีเบอร์นี้สามารถใช้ในการควบคุมวงจรพุก-พูล คอนเวอร์เตอร์และสามารถควบคุม PWM ของวงจรควบคุม โดยภายในตัวไอซีซึ่งมีแรงดันอ้างอิง, และวงจรเปรียบเทียบ 2 วงจร, วงจรผลิตความถี่, PWM, flip flop และมีสัญญาณเอาต์พุตสองสัญญาณเพื่อไปขับสวิตช์ MOSFET



รูปที่ 3.27 ขาต่างๆภายในตัวไอซี



คำนวณหาความถี่ที่ใช้

$$f_{osc} \approx \frac{1.1}{R_T C_T} \quad (3.7)$$

แต่จาก Data sheet ของ TL494 การใช้เอาต์พุตของไอซีเพื่อขับวงจร ให้ทำงานแบบ push-pull ความถี่

$$\frac{f_{out}}{f_{osc}} = 0.5$$

ดังนั้นสูตรที่ใช้ในการคำนวณหาความถี่เอาต์พุตจึงเท่ากับ

$$f_{out} = \frac{f_{osc}}{2} \quad (3.8)$$

ดังนั้นความถี่เอาต์พุตเท่ากับ

$$f_{out} = \frac{1.1}{2R_T C_T} \quad (3.9)$$

ในการออกแบบเลือกความถี่ในการทำงานเท่ากับ 10 kHz และเลือกค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 1nF การหาค่าความต้านทาน  $R_T$  จึงเท่ากับ

$$R_T = \frac{1.1}{2C_T f_{out}} \quad (3.10)$$

$$R_T = \frac{1.1}{2 \times 1 \times 10^{-9} \times 10 \times 10^3} \quad (3.11)$$

$$R_T = 55k\Omega$$

### 3.3.2.3 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับวงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์

แรงดันด้านเข้า ( $V_{in}$ ) 100 V

กระแสด้านออก ( $I_o$ ) 2 A

ความถี่สวิตชิง ( $f_s$ ) 10 kHz

แรงดันด้านออก ( $V_o$ ) 537 V  $\pm 10\%$

ก. หาค่ากำลังไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ

$$P_{o2} = (V_o + V_{r1} + V_{D1}) \cdot I_o = (537 + (537 \cdot 10\%) + 1.5) \cdot 2 = 1184W$$



ข. การเลือกขนาดของแกนแม่เหล็ก

$$A_p = A_c A_w \frac{\sqrt{2} \cdot P_{o2} \cdot \left(1 + \frac{1}{\eta}\right)}{4 J K_w B_w f_s} \quad (3.12)$$

เลือกค่าที่ออกแบบหม้อแปลงปลอดภัย

$$\eta = 0.8$$

$$J = 3 \text{ A/mm}^2$$

$$K_w = 0.4$$

$$B_m = 0.2 \text{ T}$$

แทนค่าในสูตร

$$A_p = \frac{\sqrt{2} \times 882 \times \left(1 + \frac{1}{0.8}\right)}{4 \times 3 \times 0.4 \times 0.2 \times 35 \times 10^3} \quad (3.13)$$

$$A_p = 0.083526.9 \text{ m}^2$$

$$A_p = 83,526.9 \text{ mm}^4$$

ทำการเลือกแกนแม่เหล็กจากตาราง โดยต้องเลือก  $A_p$  ในตารางให้มีความมากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ ดังนั้นทำการเลือกแกนแม่เหล็กเบอร์ E65 / 32 / 13

$$A_p = 142,840 \text{ mm}^4, A_w = 537 \text{ mm}^2, A_c = 266 \text{ mm}^2$$

ค. หาจำนวนรอบของหม้อแปลง

จำนวนรอบด้านปฐมภูมิ

$$N_1 = \frac{V_{in,max}}{4 A_c B_m f_s} \quad (3.14)$$

$$N_1 = \frac{100 + (100 \times 10\%)}{4 \times 266 \times 10^{-6} \times 0.2 \times 10 \times 10^3}$$

$$N_2 = 51 \text{ รอบ}$$

เลือก  $N_2 = 51$  รอบ

$$n = \frac{N_2}{N_1} = \frac{V_o'}{V_{in,min} (2D_{max})} \quad (3.15)$$

เลือกใช้  $D_{max} = 0.45$



$$\eta = \frac{573}{(100 - (100 \times 10\%)) \times 2 \times 0.45}$$

$$\eta = 5.1$$

$$N_2 = \eta N_1$$

$$N_2 = 5.1 \times 55 = 273 \text{ รอบ}$$

เลือก  $N_2 = 273$  รอบ

### ง. การเลือกขนาดลวดตัวนำ

ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสจะมีค่าเท่ากับ

$$I_2 = I_o \sqrt{D_{max}} \quad (3.16)$$

$$I_2 = 2 \times \sqrt{0.45} = 1.35 \text{ A}$$

$$I_1 = n I_2$$

$$I_1 = 5.1 \times 1.34 = 6.38 \text{ A}$$

คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของขดลวดดังนี้

$$a_1 = \frac{I_1}{J} \quad (3.17)$$

$$a_1 = \frac{6.83 \text{ A}}{3 \text{ A/mm}^2} = 2.27 \text{ mm}^2$$

$$a_2 = \frac{I_2}{J}$$

$$a_2 = \frac{1.5 \text{ A}}{3 \text{ A/mm}^2} = 0.45 \text{ mm}^2$$

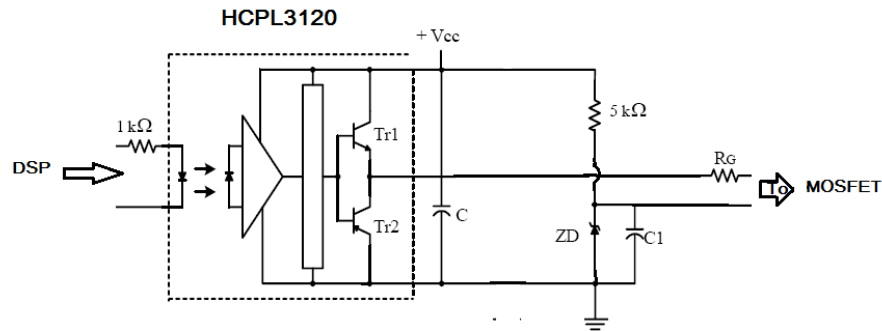
จากตาราง ทำการเลือกขนาดขดลวดที่มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจะได้ขดลวด  $a_1$  เบอร์ SWG15 ( $2.54 \text{ mm}^2$ ) และขดลวด  $a_2$  เบอร์ SWG20 ( $0.65 \text{ mm}^2$ )

### 3.3.3 วงจรขับนำ และตรวจจับสัญญาณแรงดัน

#### 3.3.3.1 วงจรขับนำสัญญาณของวงจรทระดับแรงดัน และวงจรพux-พุลคอนเวอร์เตอร์

การควบคุมการทำงานของสวิตซ์จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่ทำการแยกระหว่างขาเกตกับสัญญาณควบคุมที่ถูกสร้างขึ้นจากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรอันเกิดจากการใช้กราวด์เดียว อุปกรณ์ที่ใช้แยกกราวด์จะเลือกใช้ไอซีแยกระบบด้วยแสง (Opto Coupler) เบอร์ HCPL 3120 ตัวสำหรับวงจรทระดับแรงดันซึ่งสามารถใช้ไฟฟ้าเลี้ยงวงจรขนาด 15 โวลต์ โดยแสดงวงจรดังรูปที่ 3.28





รูปที่ 3.28 วงจรขับเคลื่อนสำหรับวงจรทบระดับและวงจรพุ่ม-พุ่มคอนเวอร์เตอร์

### 3.3.3.2 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน

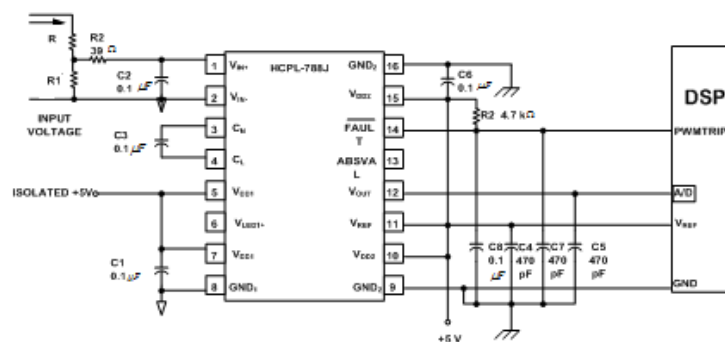
การตรวจจับสัญญาณแรงดันของงานวิจัยนี้จะตรวจจับแรงดันด้านออกของวงจรทบระดับที่ 110 V จะใช้วงจรแบ่งแรงดัน และกำหนดค่า R เพื่อใช้เป็นแรงดันอินพุตให้กับไอซีเบอร์ HCPL-788J มีค่าอยู่ช่วง 0-200 mV โดยกำหนดค่า R ที่ใช้วงจรแบ่งแรงดันตกคร่อมให้เป็นแรงดันอินพุตให้กับตัวจับสัญญาณเป็นค่า R1 ดังสมการที่ (3.18)

$$V_{sense} = \frac{R_I}{R+R_I} + V_{boost} \quad (3.18)$$

$$200mV = \frac{R_I}{R+R_I} + 110$$

$$\text{เลือก } R = 100 \text{ k}\Omega \text{ จะได้ } R_I = \frac{200 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^3}{100} = 181.81 \Omega$$

ดังนั้นเลือกใช้ R1 = 180 Ω



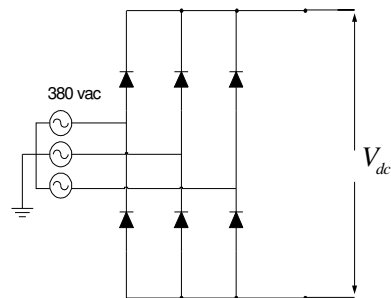
รูปที่ 3.29 วงจรการตรวจจับสัญญาณแรงดัน

### 3.4 การออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ

#### 3.4.1 การออกแบบส่วนของวงจรกำลัง

##### 1. วงจรเรียงกระแส (rectifier)

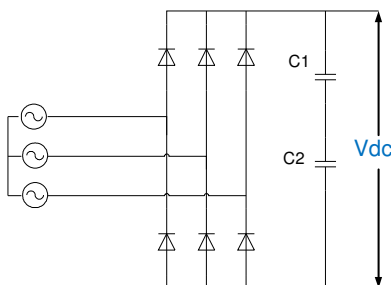
วงจรเรกติไฟเออร์หรือวงจรเรียงกระแส ดังรูปที่ 3.30 ทำหน้าที่แปลงผันหรือเปลี่ยนจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรประกอบด้วยเพาเวอร์ไดโอด 6 ตัว สำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับจะใช้ ไดโอดทำหน้าที่เป็นวงจรเรกติไฟเออร์ซึ่งทำให้สามารถควบคุมระดับแรงดันในวงจรดีซีลิงก์ได้โดยแรงดันที่ผ่านวงจรเรกติไฟเออร์หาได้จากสมการดังนี้



รูปที่ 3.30 วงจรภาคจ่ายไฟวงจรกำลัง

##### 2. ดีซีลิงค์ (DC Link)

ดีซีลิงค์ ( DC Link ) หรือวงจรเชื่อมโยงทางดีซี ดังรูปที่ 3.31 คือวงจรเชื่อมโยงระหว่างวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะประกอบด้วยคาปาซิเตอร์ที่มีขนาดใหญ่พิกัดแรงดันไฟฟ้า 800 VDC ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสเรกติไฟเออร์ให้เรียบยิ่งขึ้น และทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า โดยแรงดันที่ออกจากดีซีลิงค์เพื่อจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์จะมี 3 ขั้ว คือ  $+V_{dc}$  ,  $-V_{dc}$  และ  $V_{dc}/2$



รูปที่ 3.31 ดีซีลิงค์ (DC Link)



สำหรับการกำหนดค่าของตัวเก็บประจุมีสามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$\begin{aligned} V_{ripple,p-p} &= V_{peak} \times 0.05 \\ &= 537 \times 0.05 \\ &= 26.85 \text{ V} \end{aligned} \quad (3.19)$$

ประจุไฟฟ้าที่คายจากตัวเก็บประจุในช่วงเวลา  $t = \frac{t_{rate}}{6}$

$$I_{dc} = \frac{P}{V_{dc}} = \frac{1000}{537} = 1.86 \text{ A}$$

$$t = \frac{1}{50 \times 6} = 3.333 \text{ ms}$$

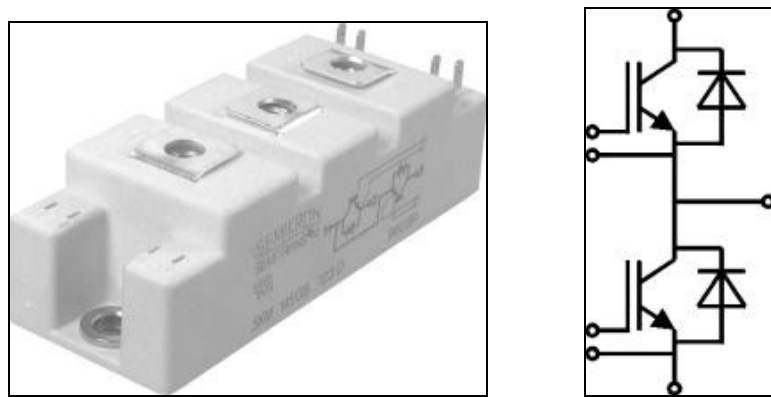
$$C = \frac{I_{dc} \times t}{V_{ripple}} = \frac{1.86 \times 3.333 \times 10^{-3}}{26.85} = 240 \text{ } \mu\text{F}$$

เพราะฉะนั้นจึงเลือก คาปาซิเตอร์ขนาด 2200  $\mu\text{F}$  450 V 2 ตัว ต่ออนุกรมกันได้ค่าความจุ 1100  $\mu\text{F}$  เพื่อให้แรงดันเรียบขึ้น

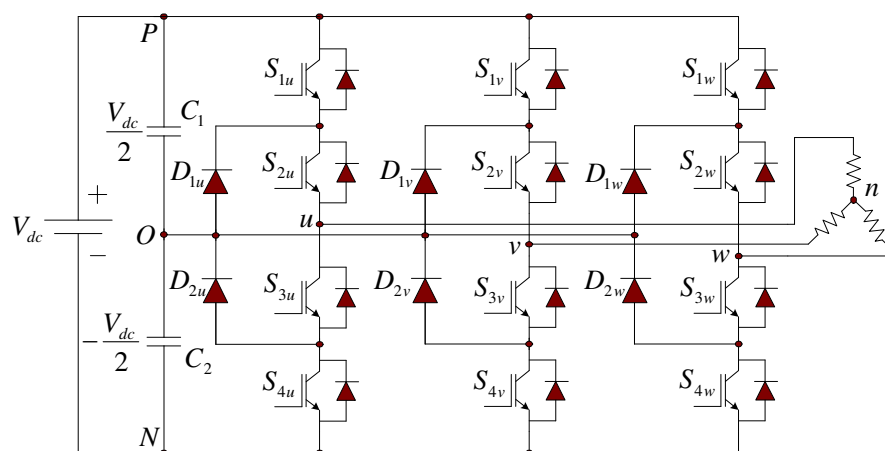
### 3.4.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ (Equivalent Inverter)

วงจรอินเวอร์เตอร์ คือส่วนที่ทำหน้าที่แปลงผันจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ผ่านการกรองจากวงจรดีซีลิงค์เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับวงจรจะประกอบด้วยเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์กำลัง 6 ชุด ซึ่งในที่นี้จะใช้ IGBT ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแสไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอาศัยเทคนิคที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ PWM (Pulse Width Modulation) เนื่องจากไอจีบีทีมีข้อดีในด้านความเร็วในการสวิตช์ที่สูงเกือบเท่ามอสเฟตและมีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสที่ต่ำเหมือนกับทรานซิสเตอร์ ทำให้สามารถขับไอจีบีทีที่ความถี่สูงและเกิดความร้อนน้อยในการใช้งานเนื่องมาจากกำลังการสูญเสียที่ตกคร่อมบนตัวไอจีบีทีมีค่าต่ำ

ในส่วนของวงจรที่แปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับนั้นใช้อุปกรณ์สวิตชิงซึ่งในวงจรนี้เลือกใช้ไอจีบีทีโมดูลของเซมิคอน SKM75GB063D มีขนาด 600 V, 50 A เป็นอุปกรณ์สวิตชิงซึ่งไอจีบีทีซึ่งใช้ 6 ตัว โดยในหนึ่งโมดูลนั้นประกอบด้วยไอจีบีที 2 ตัว ดังนั้นในวงจรจึงมีไอจีบีทีทั้งหมด 12 ตัวดังรูปที่ 3.33 ซึ่งมีในแต่ละตัวฟริวลิ้งไดโอดประกอบอยู่ในตัวแล้วดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.2 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ SKM75GB063D



รูปที่ 3.33 วงจรอินเวอร์เตอร์

### 3.4.3 วงจรกรองสัญญาณ (LC filter)

#### 3.4.3.1 การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่ใช้เก็บพลังงาน

เนื่องจากตัวเก็บประจุเป็นที่เก็บพลังงานที่มีความจำกัด ดังนั้นจึงต้องกำหนดขอบเขตความสามารถในการชดเชยแรงดันแต่ก็ยังมีข้อกำหนดอื่น ๆ ร่วมด้วยซึ่งข้อกำหนดทั้งหมดในการออกแบบขนาดของตัวเก็บประจุมีดังนี้

สามารถชดเชยแรงดันตกชั่วขณะได้สูงสุดเท่ากับ 110 V ( 50% ของแรงดันปกติ ) ที่กระแส 5 A ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ( Unity ) และเป็นการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแบบปกติกรณีชดเชยตรงเฟสกับแรงดันตกชั่วขณะซึ่งเป็นกรณีที่ใช้กำลังจริงมากที่สุด เป็นระยะเวลา 0.1 วินาที โดยมีแรงดันที่บัสไฟตรงมีค่าเท่ากับ 600 V เนื่องจากขณะทำการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแรงดันที่บัสไฟตรงจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ จึงต้องกำหนดค่าแรงดันต่ำสุดที่บัสไฟตรงที่สามารถสร้างแรงดันชดเชยได้อย่างสมบูรณ์ โดยพิจารณาแรงดันสูงสุดที่ต้องการชดเชยได้นั้นคือ 110 V ซึ่งมีค่ายอดแรงดันเท่ากับ 156 V และเพื่อค่าแรงดันที่ลดลงเนื่องจากความสูญเสียต่างๆ ในระบบ ดังนั้นจึงกำหนดให้แรงดันต่ำสุดที่บัสไฟตรงมีค่าเท่ากับ 200 V จากข้อกำหนดข้างต้นสามารถหาขนาดตัวเก็บประจุได้จากสมการที่ (3.20)

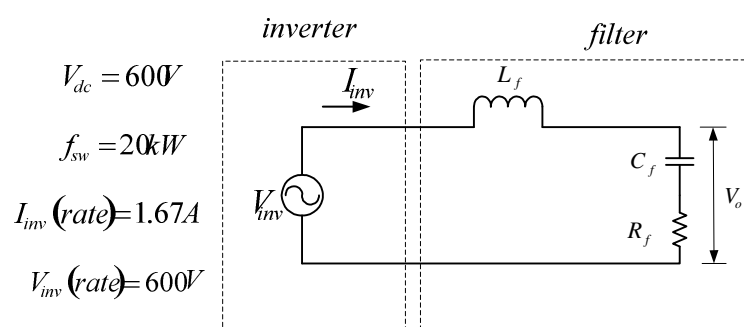
$$C_{bus} = \frac{2V_{com(max)}I_{com(max)}t_{com(max)}}{(V_{bus(max)}^2 - V_{bus(min)}^2)} \quad (3.20)$$

ดังนั้นเราจะทำการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่ใช้เก็บพลังงานได้ดังนี้

$$C_{bus} = \frac{2 \times 110 \times 5 \times 0.1}{(600^2 - 200^2)} = 343 \mu F$$

#### 3.4.3.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

เนื่องจากแรงดันที่อินเวอร์เตอร์สร้างไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องต่อวงจรกรองที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เพื่อกรองความถี่ที่ไม่ต้องการไม่ให้เข้าไปในระบบไฟฟ้ามากเกินไป โดยในการออกแบบจะละเลยผลกระทบของโหลดและแรงดันในระบบไฟฟ้าเพื่อให้ง่ายในการออกแบบและสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.34 ซึ่งการออกแบบมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.34 วงจรสมมูลของวงจรกรองที่ใช้ในการออกแบบ



กำหนดให้แรงดันความถี่หลักมูลที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอมมีค่าไม่เกิน 5% ของแรงดันในระบบไฟฟ้าปกติซึ่งเป็นข้อกำหนดในการเลือกตัวเหนี่ยวนำค่ามากที่สุดที่สามารถใช้งานได้สามารถหาได้จากสมการที่ (3.21)

$$L \leq \frac{0.05V_{normal}}{2\pi f_{inv}} \quad (3.21)$$

$$\leq \frac{0.05 \times 220}{2\pi \times 50 \times 1.67} = 20.96mH$$

กำหนดให้ค่ายอดของกระแสกระเพื่อมสูงสุดที่ผ่านวงจรกรอมมีค่าไม่เกิน 15% ของพิกัดอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการเลือกตัวเหนี่ยวนำค่าน้อยที่สุดที่สามารถใช้งานได้สามารถหาได้จากสมการที่ (3.22) โดยพิจารณาจากแรงดันขณะที่วัฏจักรงาน (Duty cycle) 50% ซึ่งจะมีค่ายอดของกระแสกระเพื่อมสูงสุด

$$L \geq \frac{V_{Lf}}{2\Delta I_{inv} f_h} \quad (3.22)$$

$$\geq \frac{600}{2 \times 0.15 \times 1.67 \sqrt{2} \times 20 \times 10^3} = 42.34mH$$

กำหนดค่ากระแสกระเพื่อมที่โหลดไม่ให้เกิน 5% ของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุวงจรกรอม ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการเลือกตัวเก็บประจุค่าน้อยที่สุดที่สามารถใช้งานได้โดยพิจารณาการแบ่งไหลของกระแสกระเพื่อมจากอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุกับโหลดโดยโหลดจะคิดที่กรณีที่แย่ที่สุดคือมีเพียงตัวต้านทานที่พิกัดเดียว สามารถหาได้จากสมการ

$$C = \frac{20}{2\pi f_h R_{rate}} \quad (3.23)$$

$$= \frac{20}{2\pi \times 20 \times 10^3 \times 1k\Omega} = 0.159\mu F$$

กำหนดค่า damping factor เท่ากับ 1 สามารถเขียนอัตราส่วนระหว่างแรงดันด้านออกกับแรงดันที่อินเวอร์เตอร์สร้างได้ดังสมการที่ (3.24)

$$\frac{V_o}{V_{inv}} = \frac{C_f R_f s + 1}{C_f L_f s^2 + C_f R_f s + 1} \quad (3.24)$$



จากสมการที่ (3.24) สามารถหาค่า damping factor ได้ดังสมการที่ (3.25) เราจะใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำจากสมการที่ (3.26)

$$R_f = 2\sqrt{\frac{L_f}{C_f}} = 2\sqrt{\frac{42.34mH}{0.159\mu F}} = 1.03k\Omega \quad (3.25)$$

$$\xi_f = \frac{R_f}{2} \sqrt{\frac{C_f}{L_f}} = \frac{1.03k\Omega}{2} \sqrt{\frac{0.159\mu F}{42.34mH}} = 263.83 \quad (3.26)$$

กำหนดการลดทอนแรงดันกระแสเพื่อไม่ให้มีค่าไม่น้อยกว่า 15 เท่าที่ฮาร์มอนิก  $20kHz$  และเมื่อแทนค่า  $R_f$  สมการที่ (3.25) ลงในสมการที่ (3.24) จะได้สมการที่ (3.27)

$$\frac{V_o}{V_{inv}} = \frac{2\sqrt{C_f L_f s} + 1}{C_f L_f s^2 + 2\sqrt{C_f L_f s} + 1} \quad (3.27)$$

เราสามารถที่จะคำนวณหาค่าต่างๆ ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้โดยจะทำการกำหนดค่า ตัวเก็บประจุให้เท่ากับ  $0.159\mu F$  ความถี่ที่ใช้ในการคัตออฟเท่ากับ  $50Hz$  และค่าอัตรา การหน่วงเท่ากับ 263.83 และค่าตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ  $42.34mH$  ดังนั้นเราจึงนำค่าตัวแปรที่ได้นำมา คำนวณในฟังก์ชันถ่ายโอนจะได้ค่าในฟังก์ชันเป็นดังนี้คือ

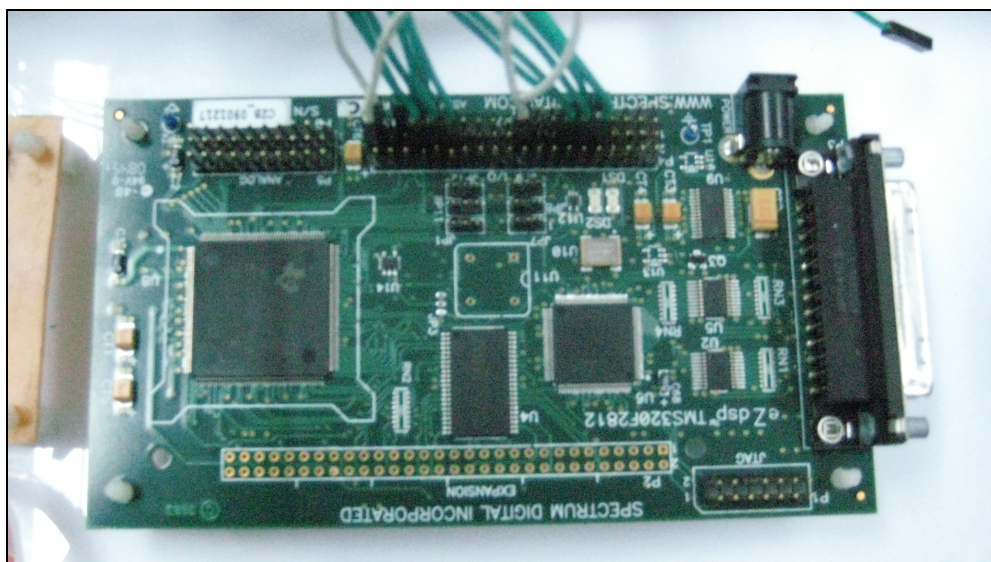
$$\begin{aligned} \frac{V_o}{V_{inv}} &= \frac{2\sqrt{0.159\mu F \times 42.34mH} s + 1}{(0.159\mu F \times 42.34mH) s^2 + 2\sqrt{(0.159\mu F \times 42.34mH)} s + 1} \\ \therefore \frac{V_o}{V_{inv}} &= \frac{0.164 \times 10^{-3} s + 1}{6.73 \times 10^{-9} s^2 + 0.164 \times 10^{-3} s + 1} \\ Q_{factor} &= \frac{1}{2\zeta} = \frac{1}{2 \times 263.83} = 1.895 \times 10^{-3} \text{ Var} \end{aligned}$$

### 3.4.4 การออกแบบส่วนของวงจรควบคุม

#### 3.4.4.1 ตัวประมวลเชิงดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812

ตัวประมวลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812 ดังแสดงในรูปที่ 3.35 ผลิตภัณฑ์ของบริษัท Texas Instrument ซึ่งเป็นตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP Controller) ที่เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้ในงานควบคุมมอเตอร์โดยเฉพาะเนื่องจากโครงสร้างภายในมีความอ่อนตัว เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานควบคุมมอเตอร์หลายชนิด เช่นมอเตอร์เหนี่ยวนำ, มอเตอร์ กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน, ชิงโครนัสมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรและรีแอคแตนซ์มอเตอร์ เป็นต้น

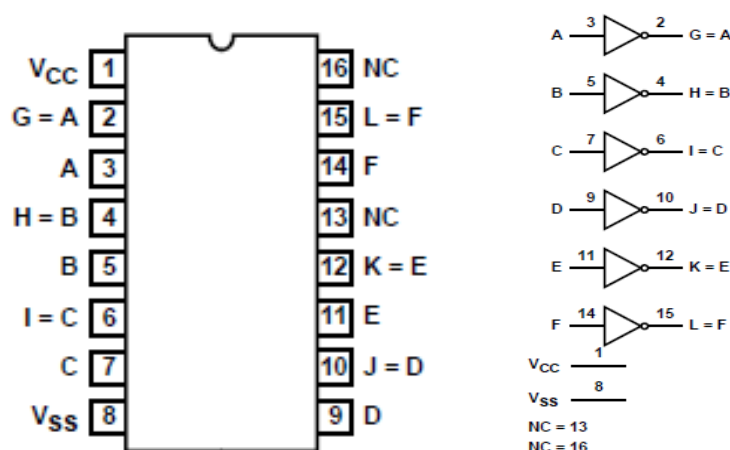




รูปที่ 3.35 ตัวประมวลเชิงดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812

#### 3.4.4.2 HEX BUFFER (OPEN DRAIN)

สัญญาณที่ออกจาก ezDSP TMS320F2812 มีแรงดันออก 3.3 V ซึ่งเมื่อจ่ายสัญญาณเข้าวงจรขับ เกต SKHI 22B ของ Semikron สัญญาณออกมาไม่สามารถนำไปขับจากเกตได้ จึงต้องใช้ CD4050B ดังแสดงดังรูปที่ 3.36 ช่วยในการเพิ่มสัญญาณด้านเข้า SKHI 22B ของ Semikron หลักการทำงานคือ เมื่อสัญญาณจาก DSP ส่งมาในสภาวะเป็นลอจิก 1 แรงดัน 3.3 โวลต์ สัญญาณที่ออกไปจาก CD4050B ก็จะมีค่า ประมาณ 5 โวลต์ และ ในสภาวะเป็นลอจิก 0 แรงดัน 0 โวลต์ สัญญาณที่ออกไปจาก CD4050B ก็จะมีค่า ประมาณ 0 โวลต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าสวิตชิ่งในขณะนั้น และแรงดันที่ออกมาจาก DSP ด้วย อีกทั้งยังมีข้อดี คือยังเป็นบัฟเฟอร์ (BUFFER) ได้อีก



รูปที่ 3.36 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ CMOS Hex Buffer/Converters # CD4050B