



### บทที่ 3

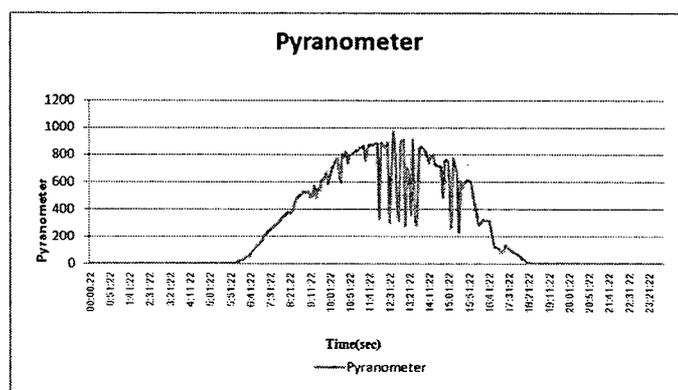
#### การออกแบบ

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

#### 3.1 แหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน

##### 3.1.1 การออกแบบแบบจำลองของแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนพลังงานแสงอาทิตย์

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



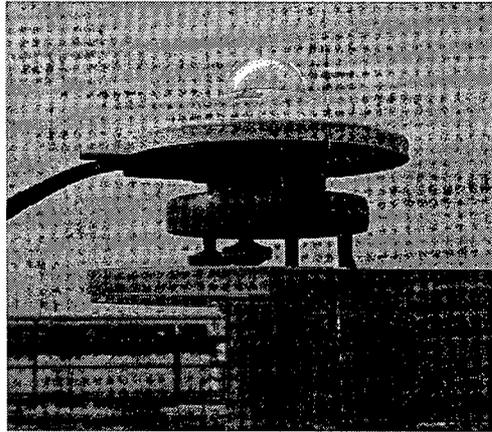
รูปที่ 3.1 ปริมาณแสงอาทิตย์ในระยะเวลา 1 วัน

##### 3.1.1.2 การออกแบบฮาร์ดแวร์

การวัดและบันทึกข้อมูลรังสีจากดวงอาทิตย์นั้น มีการรับข้อมูลจากไพรานอมิเตอร์ในรูปแบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยในการออกแบบฮาร์ดแวร์จะมีการแบ่งเป็นส่วนๆ เพื่อให้ง่ายต่อการทำงานและจัดการข้อมูล มีส่วนประกอบดังนี้



1. ไพรานอมิเตอร์ที่ใช้สำหรับวัดรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ของ KIPP & ZONEN รุ่น CMP 3

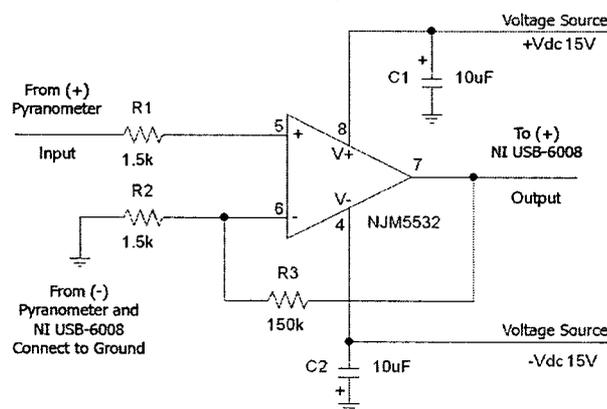


รูปที่ 3.2 ไพรานอมิเตอร์บนดาดฟ้าอาคาร

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

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

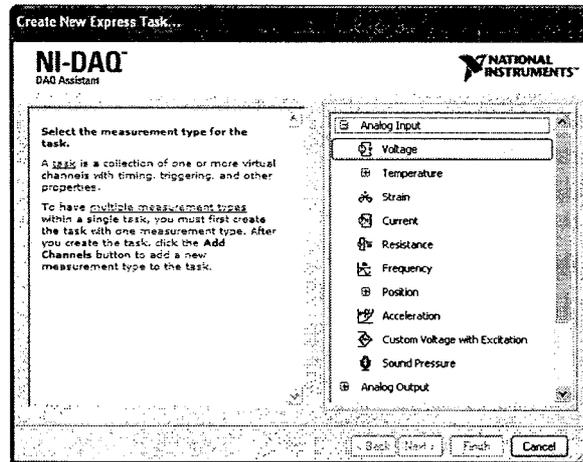
ในการต่อจะให้ขั้วบวกของไพรานอมิเตอร์ต่อเข้าฝั่งอินพุทของวงจรและเอาท์พุทของวงจรจะต่อเข้าขั้วบวกในช่อง AIO ของ NI USB-6008 ส่วนขั้วลบของไพรานอมิเตอร์และช่อง AIO จะต่อเข้ากับกราวด์ร่วมของวงจร ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรขยายสัญญาณ



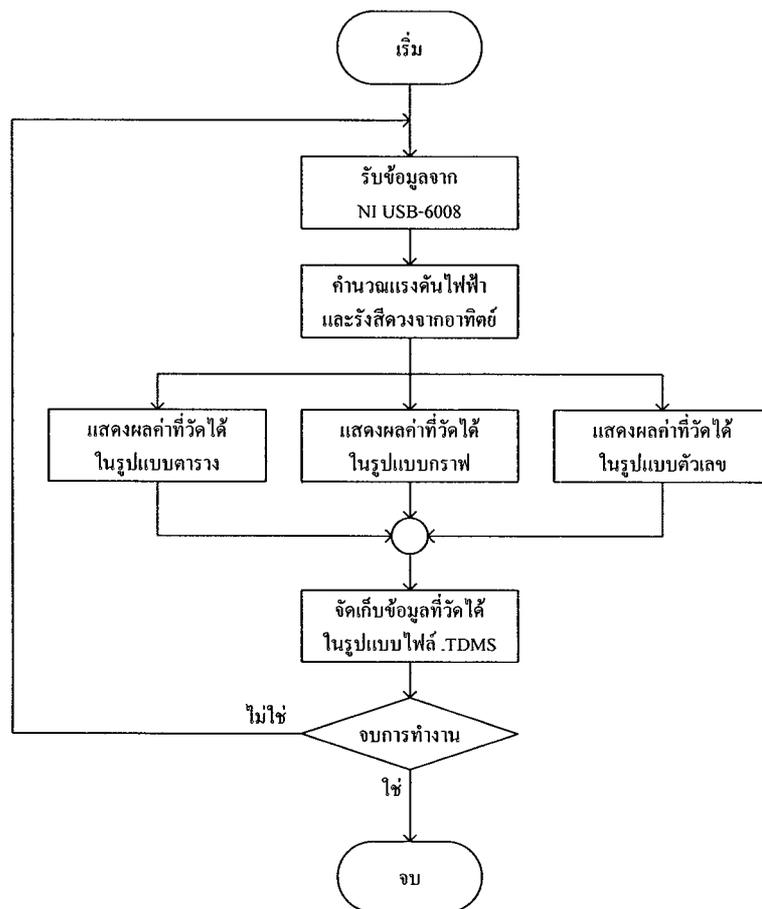
### 3. Data Acquisition รุ่น NI USB-6008 เป็นอุปกรณ์ที่รับและส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.4 การเลือกชนิดของข้อมูลและช่องสัญญาณต่อไพรมอนิเตอร์ที่รับเข้า NI USB-6008

#### 3.1.1.3 การออกแบบซอฟต์แวร์

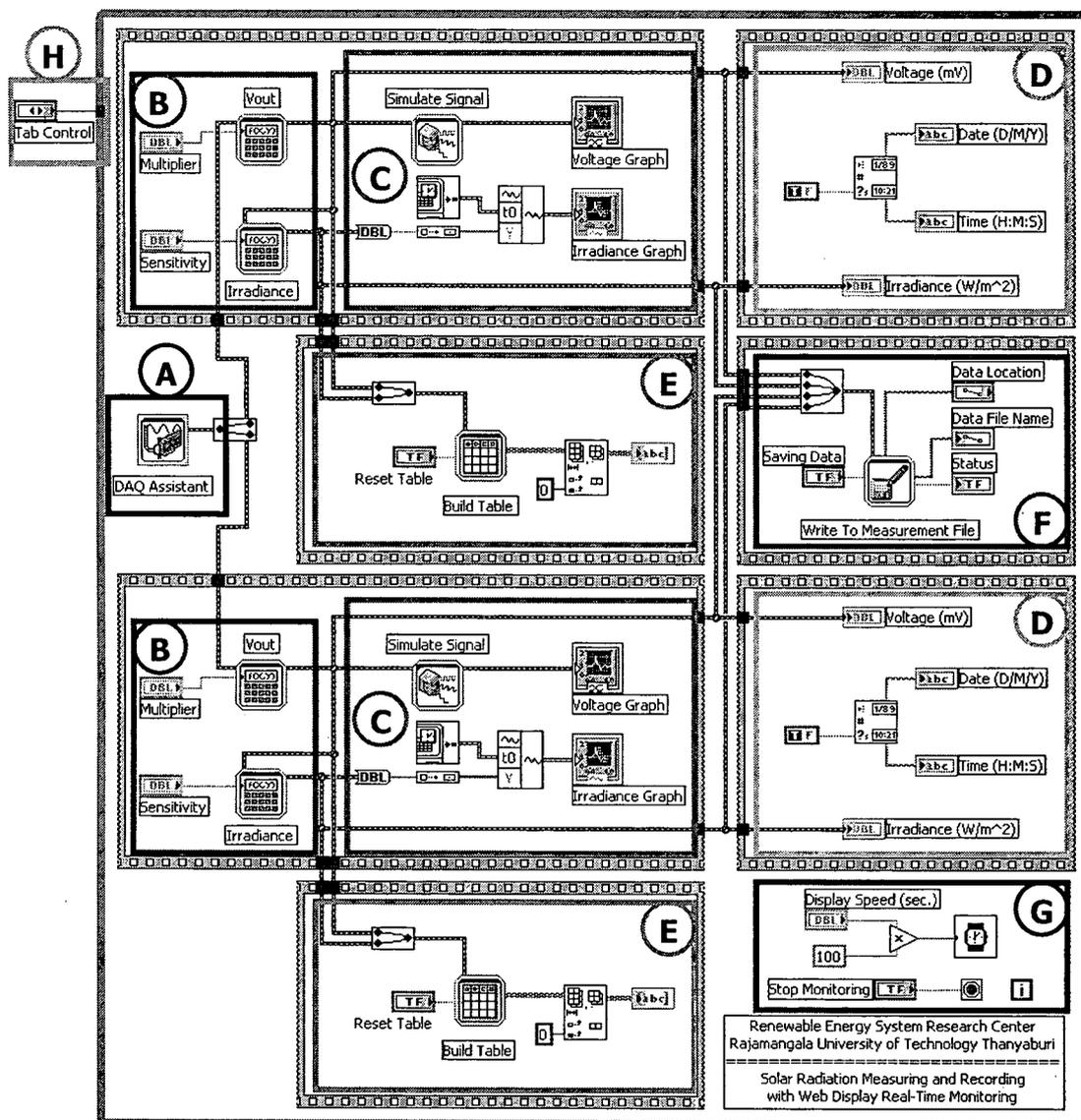
การออกแบบซอฟต์แวร์ ต้องคำนึงถึงความสะดวกในการใช้โปรแกรม ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบโปรแกรมในการวัดและบันทึกข้อมูลรังสีจากดวงอาทิตย์ ด้วยโปรแกรม LabVIEW ในการแสดงผลต่างๆ ซึ่งลักษณะการทำงานของโปรแกรมสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.5



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

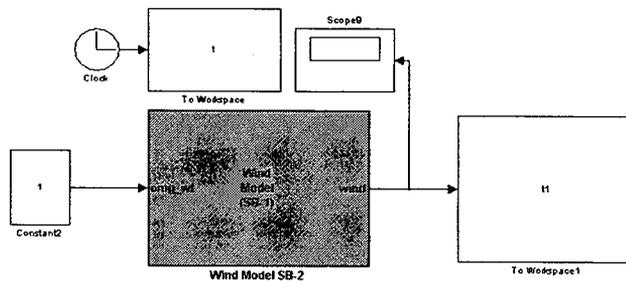


### 1. จำลองการทำงานของความเร็วลมในประเทศไทย

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของลมในประเทศไทย

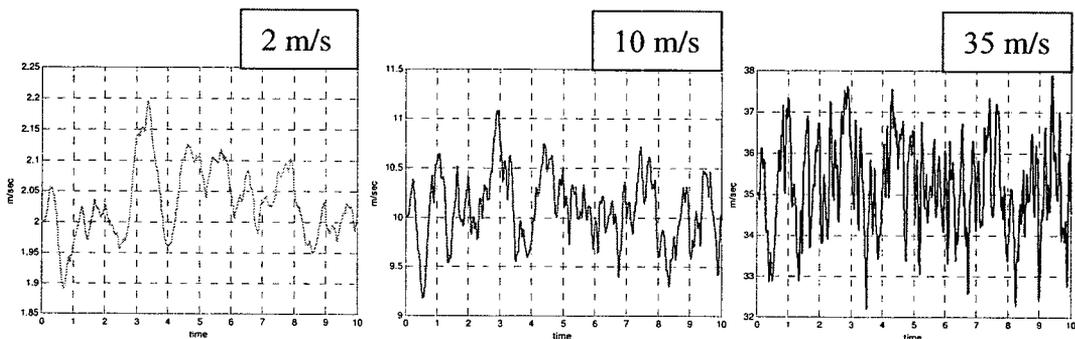
Parameter	Set parameter
Rotor Diameter [m]	2.7
Average Wind speed [m/sec]	2,10,35
Length scale [m]	1
Turbulence intensity [%]	12
Simple time [sec]	0.05

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



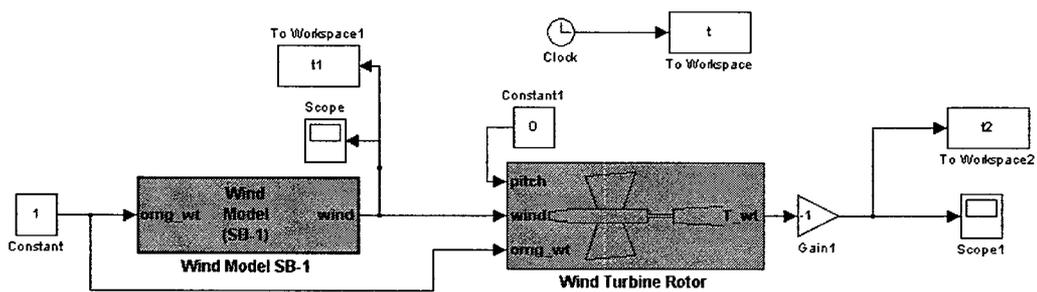
รูปที่ 3.8 จำลองความเร็วลมที่ความเร็วลมต่างกัน



## 2. โมเดลใบพัดของกังหันลม

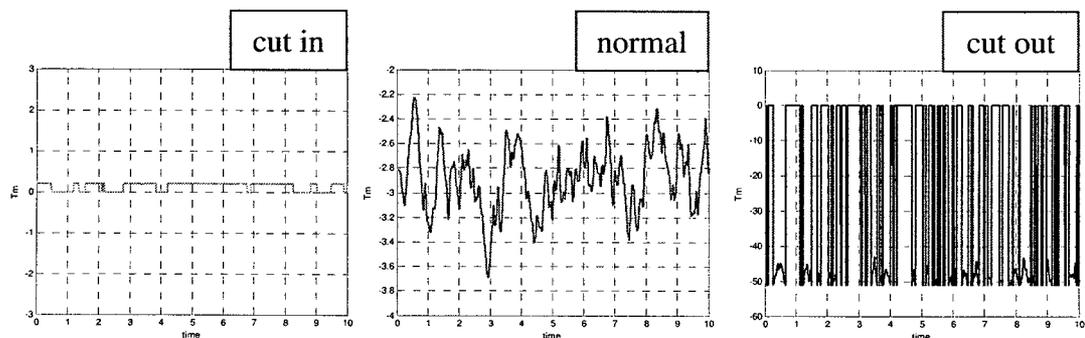
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของใบพัดกังหันลม

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 และเพื่อศึกษาการทำงานของใบพัดของกังหันลมในช่วงการทำงานต่างๆ โดยเอาท์พุทที่ออกมาอยู่ในรูปของแรงบิดเพื่อไปควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อไป



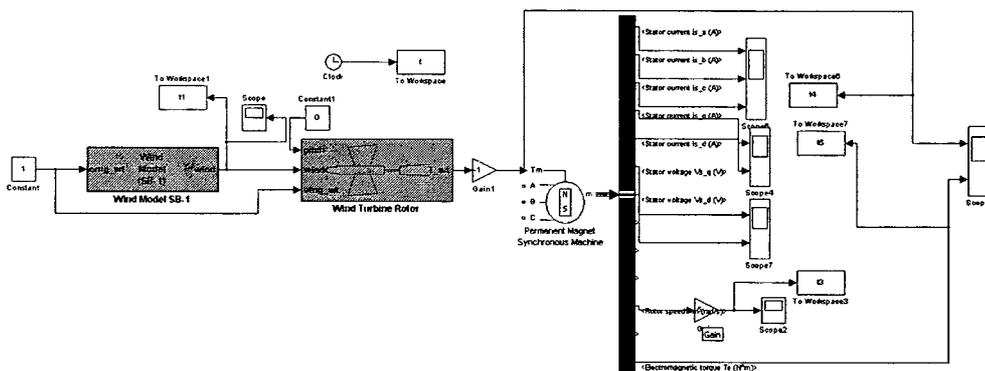
รูปที่ 3.10 ทอร์กของใบพัดกังหันลม



### 3. โมเดลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร

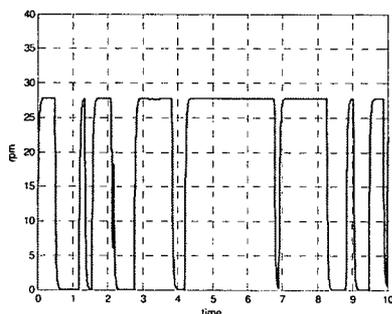
ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร

Parameter	Set parameter
Flux distribution : Sinusoidal : trapezoidal	Sinusoidal
Mechanical input : Torque Tm : Speed w	Torque Tm
Preset model :	No
Stator resistance [ohm]	2.8750
Inductances [Ld(H),Lq(H)]	[8.5e-3, 8.5e-3]
Flux induced by magnets [Wb]	0.175
Inertia, friction factor and pairs[J(kgm <sup>2</sup> ),F(N.m.s)p()	[ 1e-3, 0, 8]

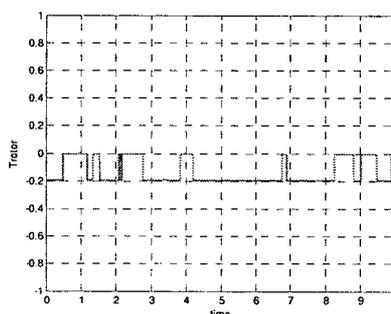


รูปที่ 3.11 การจำลองเพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร

การทดสอบ โมเดลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร โดยรับอินพุตจากกั้นหนดังรูปที่ 3.12 เพื่อศึกษาการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรในสภาวะลมต่างๆ

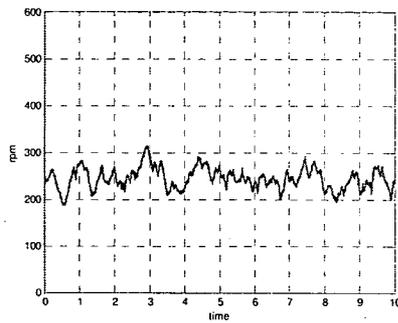


ก) ความเร็วลมในสภาวะ Cut in

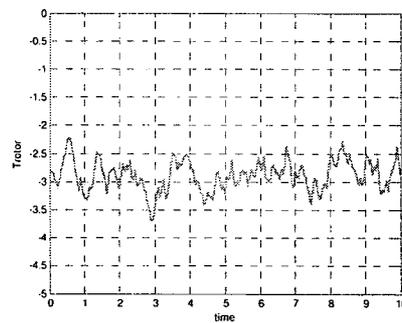


ข) ทอร์คในสภาวะ Cut in

รูปที่ 3.12 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรในสภาวะ Cut in

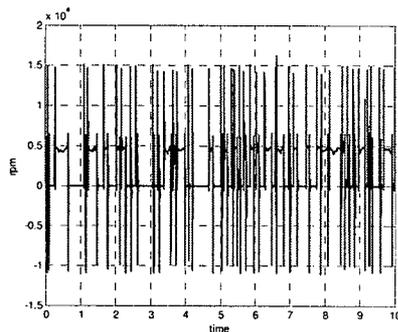


ก) ความเร็วลมในสภาวะปกติ

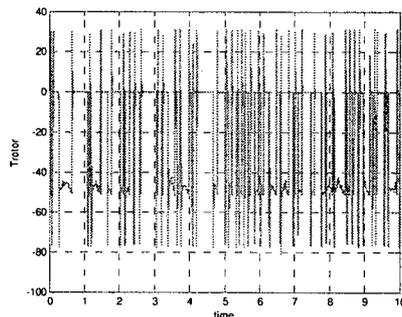


ข) ทอร์กในสภาวะปกติ

รูปที่ 3.13 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรในสภาวะปกติ



ก) ความเร็วลมในสภาวะCut Out



ข) ทอร์กในสภาวะCut 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) ซึ่งเยื่อกันต้องชุ่มน้ำอยู่ตลอดเวลา ทำให้น้ำที่ระเหยออกไปต้องเท่ากับน้ำที่ผลิตขึ้นมา ถ้าน้ำระเหยเร็วเกินไป น้ำจะแห้งจากเยื่อกันและทำ



ให้ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และเยื่อกันจะแตกออก ทำให้เกิดการลัดวงจรของก๊าซ ซึ่งไฮโดรเจนและออกซิเจนจะรวมกันโดยตรง ทำให้เกิดความร้อนสูง ทำลายเซลล์ไปได้ แต่ถ้านำระเหยออกข้างเกินไป 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 โปรตอนจะวิ่งผ่านเยื่อกันไปที่แคโทด ในขณะที่อิเล็กตรอนจะถูกบังคับให้วิ่งเข้าสู่วงจรไฟฟ้าภายนอก (ให้พลังงานออกมา) เพราะว่าเยื่อกันนั้นไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ ในด้านของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แคโทด โมเลกุลของออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอน ซึ่งวิ่งมาจากแอโนดผ่านวงจรภายนอก และมาพบกับออกซิเจนและโปรตอนที่ด้านนี้กลายเป็นน้ำ

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

### 3.1.3.2 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

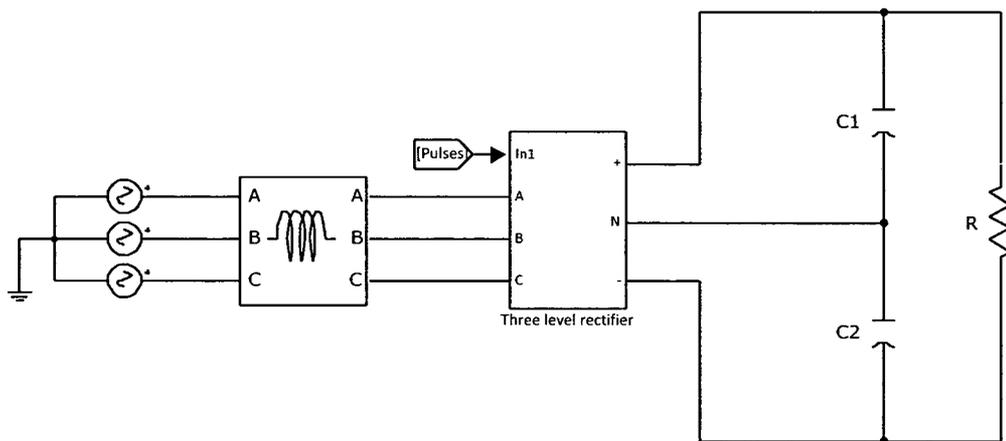
เซลล์เชื้อเพลิงโดยทั่วไปสามารถแปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ถึงราว 50% ประสิทธิภาพนี้ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านเซลล์ ยิ่งกระแสถูกดึงไปมากประสิทธิภาพก็ลดลงมาก ดังนั้นการสูญเสียที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต ขนส่งและจัดเก็บมาพิจารณาด้วย รถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ไฮโดรเจนอาจมีประสิทธิภาพจากแหล่งพลังงานไปสู่การขับเคลื่อนอยู่ที่ 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  $V_{dc}/2$

จากสมการแรงดันเฉลี่ยขาออกของวงจรแปลงผันฯ 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

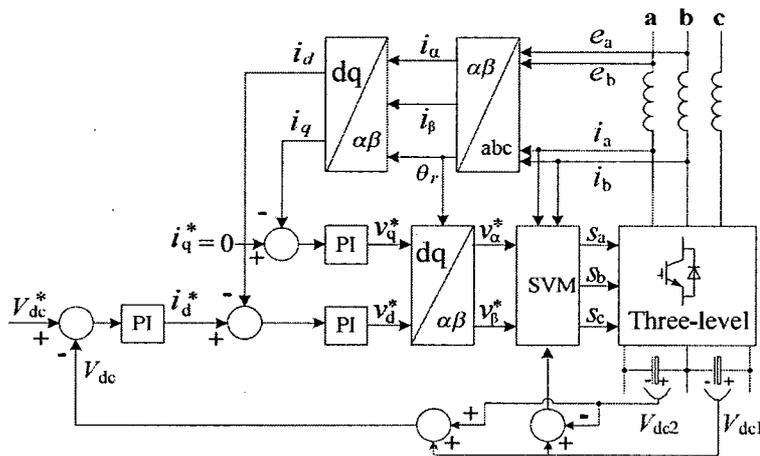


### 3.2.2.2 ลักษณะทั่วไปของระบบควบคุม

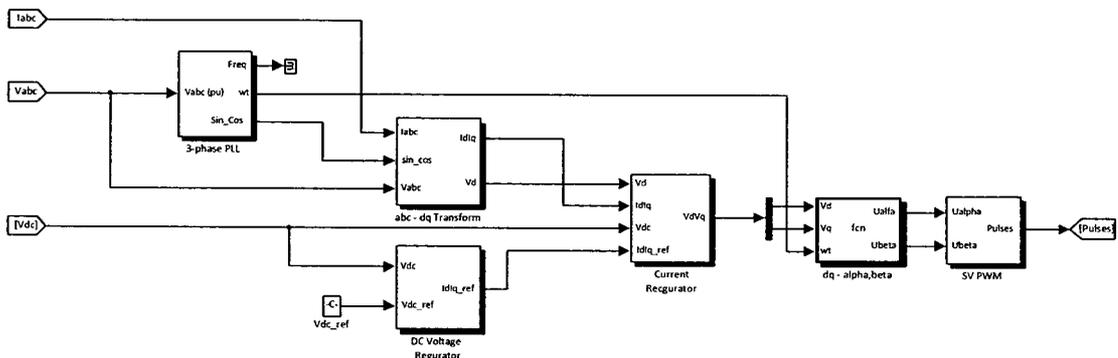
จากรูปที่ 3.16 กระแสในระบบสามเฟส ( $i_a, i_b, i_c$ ) จะถูกแปลงเป็นกระแสในแกนนิ่ง  $\alpha - \beta$  ( $i_\alpha, i_\beta$ ) จากนั้นก็จะถูกแปลงเป็นกระแสในแกนหมุน  $d - q$  ( $i_d, i_q$ ) กระแสในแกนหมุน  $i_d, i_q$  ที่ได้จะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพี-ไอ (P-I Controller) ซึ่งมีลักษณะที่เหมือนกันโดยกระแสอ้างอิงของ  $i_d$  ( $i_d^*$ ) 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 ( $v_\alpha, v_\beta$ ) เพื่อนำไปแปลงเป็นฟังก์ชันการสวิตช์ที่ตัวมอดคูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ (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 ระบบควบคุมของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสามระดับแบบ VOC



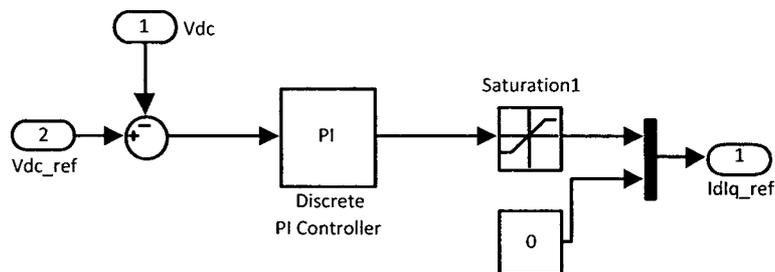
รูปที่ 3.17 ส่วนการควบคุมวงจรแปลงผันฯแบบ VOC ในโปรแกรม MATLAB/Simulink





### 3.2.2.5 ส่วนการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

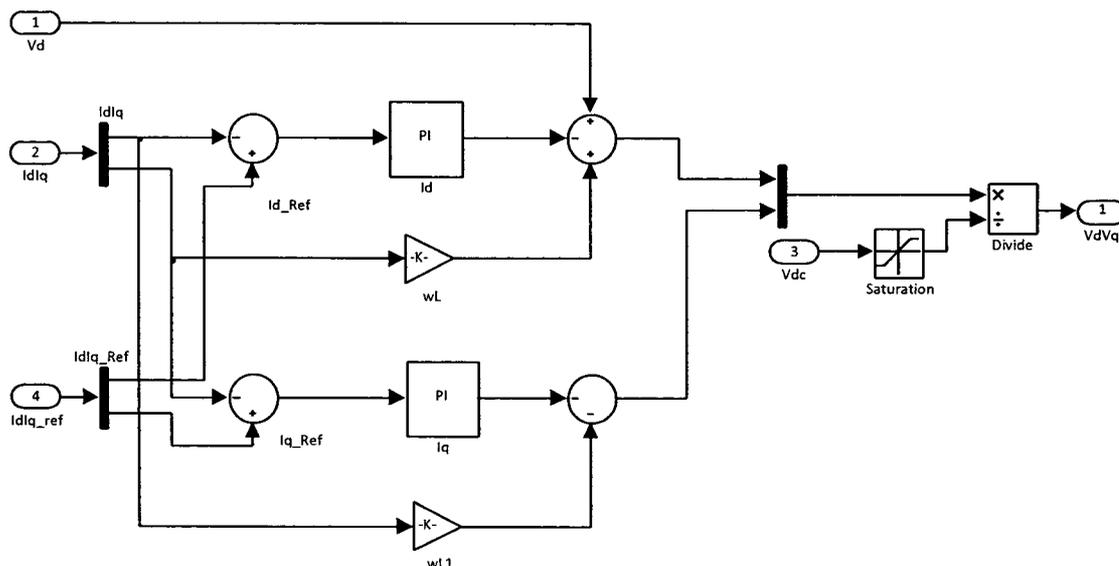
ส่วนนี้จะทำหน้าที่ปรับค่าแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันตามค่าที่เราต้องการ ซึ่งจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI โดยจะได้เป็นกระแสอ้างอิงของวงจรควบคุม ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ส่วนการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

### 3.2.2.6 ส่วนการปรับค่ากระแส

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



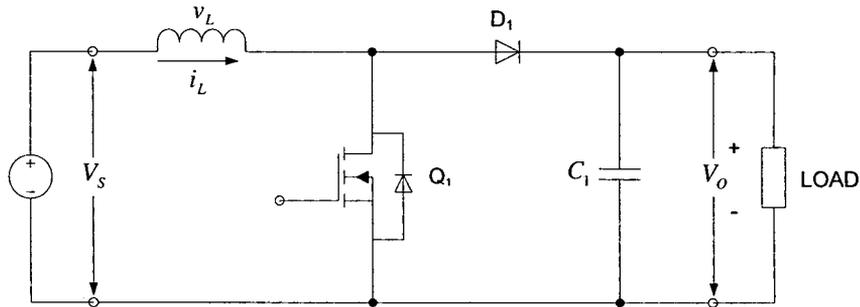
รูปที่ 3.21 ส่วนการปรับค่ากระแส

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



### 3.3 การออกแบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

ในการออกแบบวงจรทระดับแรงดันในงานวิจัยนี้จะกำหนดแรงดันด้านเข้าของวงจรทระดับมีค่าเท่ากับ 48 โวลต์ และแรงดันด้านออกของวงจรทระดับมีค่าเท่ากับ 100 โวลต์ ที่ความถี่สวิตช์ 10 kHz โดยในงานวิจัยนี้ใช้มอสเฟตเบอร์ IRFP 250 ซึ่งมีอัตราทแรงดันเท่ากับ 200 โวลต์ กระแส 33A จากค่าต่าง ๆ ที่กำหนดนี้สามารถนำมาหาค่าตัวเหนี่ยวนำ และค่าตัวเก็บประจุของวงจรทระดับแรงดัน ได้ดังนี้



รูปที่ 3.22 วงจรทระดับแรงดัน

1. หาค่า Dudy 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 เปรอร์เซ็นต์จาก  
สมการ

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

จะได้

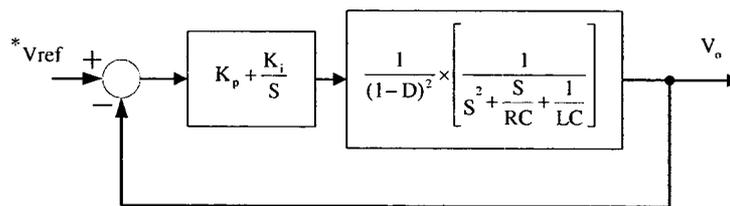
$$C_1 = \frac{D}{Rf \frac{\Delta V_o}{V_o}}$$

$$C_1 = \frac{0.52}{10 \times (10 \times 10^3) \times 0.1}$$

$$= 52 \mu F$$

### 3.3.1 การจำลองตัวควบคุมชนิด PI ด้วย Ziegler-Nichols

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



รูปที่ 3.23 บล็อกฟังก์ชัน โอนย้าย Transfer Function ตัวควบคุมชนิด PI

ลำดับขั้นตอนการหาค่า Kp Ki ด้วย Ziegler-Nichols

1. ทำการหาค่า Kp Ki ขึ้นมาเพื่อทำการหา Step Response

$$k_p = 10;$$

$$k_i = 15;$$

$$L = 60e6;$$

$$C = 52e-6;$$

$$R = 10;$$

$$\text{Num} = [k_p \ k_i];$$

$$\text{Den} = [1 \ 1/(R*C) \ 1/(L*C) \ 0];$$

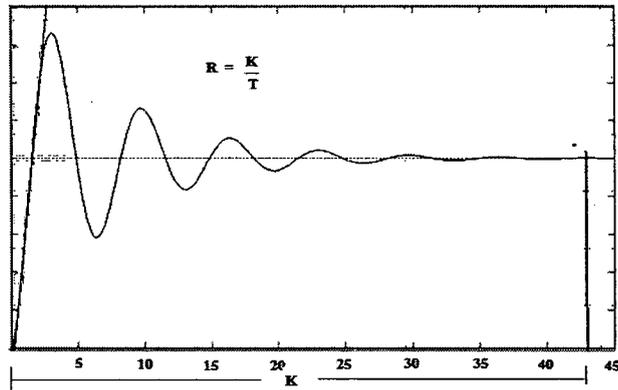
$$\text{Sys} = \text{tf}(\text{num}, \text{den});$$

$$\text{sys1} = \text{feedback}(\text{sys}, 1);$$

$$\text{step}(\text{sys1})$$



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

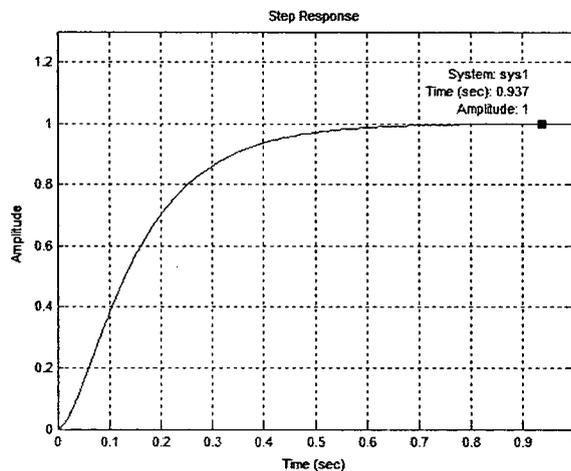
$$K_p = 0.9/R.L = 0.9/0.2 \times 0.02298 = 195.822$$

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

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

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

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

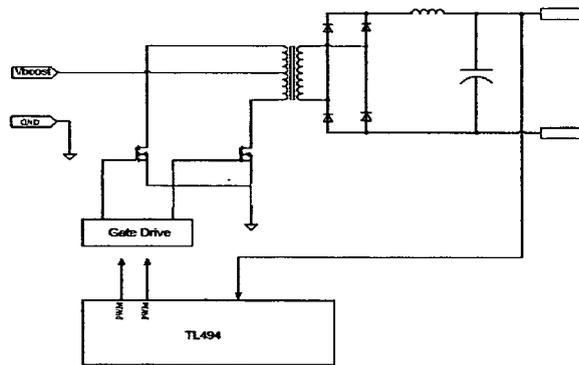


รูปที่ 3.25 กราฟแสดง Step Response ที่ได้จากกฎของ Ziegler-Nichols



### 3.3.2 การออกแบบวงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์

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



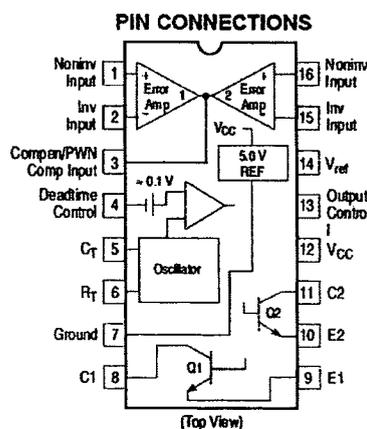
รูปที่ 3.26 โครงสร้างพื้นฐานและส่วนประกอบของวงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์

#### 3.3.2.1 ข้อพิจารณาในการออกแบบวงจรควบคุม

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

#### 3.3.2.2 การออกแบบวงจรควบคุม

วงจรควบคุมเลือกใช้ไอซี TL494 เนื่องจากไอซีเบอร์นี้สามารถใช้ในการควบคุม วงจรพุก-พุล คอนเวอร์เตอร์และสามารถควบคุม PWM ของวงจรควบคุม โดยภายในตัวไอซีจะมี แรงดันอ้างอิง, และวงจรเปรียบเทียบ 2 วงจร, วงจรผลิตความถี่, PWM, flip flop และมีสัญญาณ เอาต์พุตสองสัญญาณเพื่อไปขับสวิตช์ MOSFET



รูปที่ 3.27 ขาต่างๆภายในตัวไอซี



คำนวณหาความถี่ที่ใช้

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

แต่จาก Data sheet ของ TL494 การใช้เอาต์พุตของ ไอซีเพื่อขับวงจร 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 1mF 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. หาค่าล้งไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ

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



ข. การเลือกขนาดของแกนแม่เหล็ก

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

เลือกค่าที่ออกแบบหม้อแปลงปลอดภัย

$$\eta = 0.8$$

$$J = 3A / mm^2$$

$$K_w = 0.4$$

$$B_m = 0.2T$$

แทนค่าในสูตร

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

$$A_p = 0.083526.9m^2$$

$$A_p = 83,526.9mm^4$$

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

$$A_p = 142,840mm^4, A_w = 537mm^2, A_c = 266mm^2$$

ค. หาจำนวนรอบของหม้อแปลง

จำนวนรอบด้านปฐมภูมิ

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

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

$$N_2 = 51 \text{ รอบ}$$

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

ค่าราคากำลังสองเฉลี่ยของกระแสจะมีค่าเท่ากับ

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

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

$$I_1 = n I_2$$

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

คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของขดลวดดังนี้

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

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

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

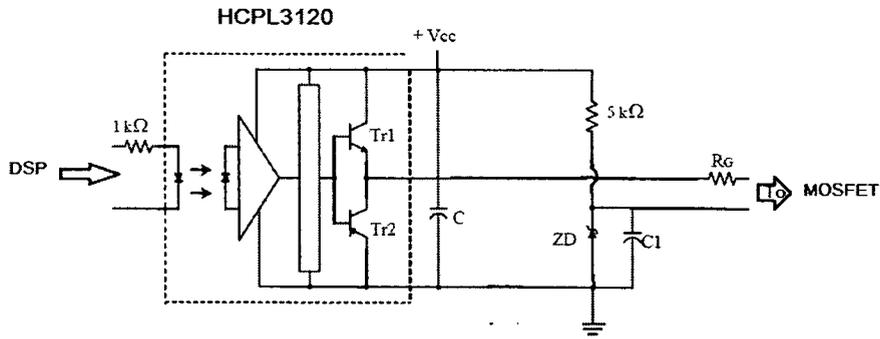
$$a_2 = \frac{1.5 \text{ A}}{3 \text{ A/mm}^2} = 0.45 \text{ mm}^2$$

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 วงจรขับนำสัญญาณของวงจรทบระดับแรงดัน และวงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์

การควบคุมการทำงานของสวิตช์จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่ทำการแยกระหว่างขาเกตกับสัญญาณควบคุมที่ถูกสร้างขึ้นจากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรอันเกิดจากการใช้กราวด์เดี่ยว อุปกรณ์ที่ใช้แยกกราวด์จะเลือกใช้ไอซีแยกระบบด้วยแสง (Opto Coupler) เบอร์ HCPL 3120 ตัวสำหรับวงจรทบระดับแรงดันซึ่งสามารถใช้ไฟฟ้าเลี้ยงวงจรขนาด 15 โวลต์ โดยแสดงวงจรดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 วงจรขั้วเกิดสำหรับวงจรทระดับและวงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์

### 3.3.3.2 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน

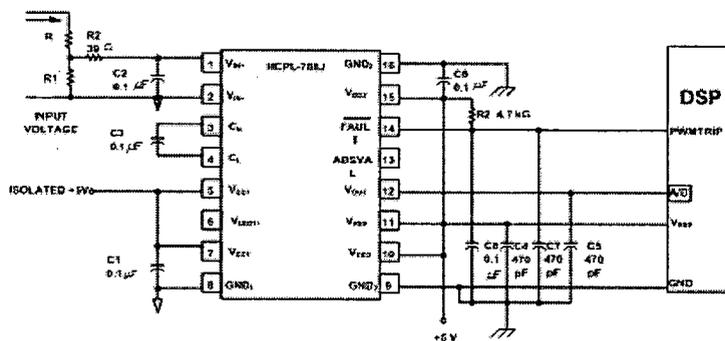
การตรวจจับสัญญาณแรงดันของงานวิจัยนี้จะตรวจจับแรงดันด้านออกของวงจรทระดับที่ 110 V จะใช้วงจรแบ่งแรงดัน และกำหนดค่า R เพื่อใช้เป็นแรงดันอินพุตให้กับไอซีเบอร์ HCPL-788J มีค่าอยู่ช่วง 0-200 mV โดยกำหนดค่า R ที่ใช้วงจรแบ่งแรงดันตกร้อมให้เป็นแรงดันอินพุตให้กับตัวจับสัญญาณเป็นค่า R1 ดังสมการที่ (3.18)

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

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

เลือก R = 100 kΩ 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

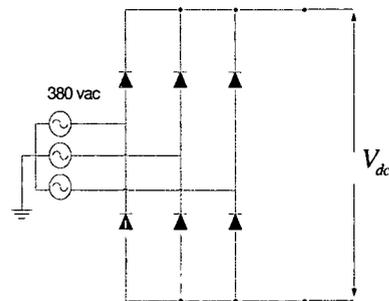
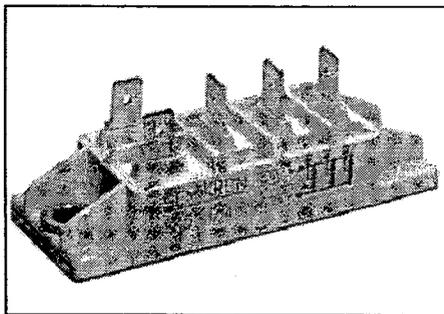


### 3.4 การออกแบบจอร์แปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ

#### 3.4.1 การออกแบบส่วนของจอร์กำลัง

##### 1. วงจรเรียงกระแส (rectifier)

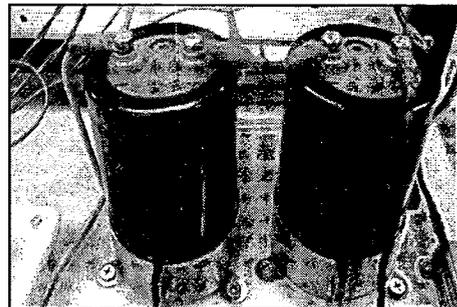
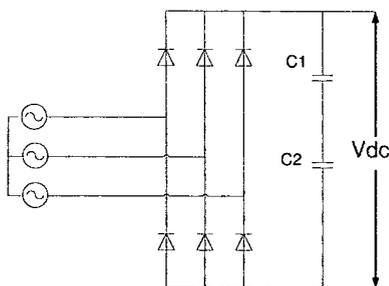
วงจรเรกติไฟเออร์หรือวงจรเรียงกระแส ดังรูปที่ 3.30 ทำหน้าที่แปลงผันหรือเปลี่ยนจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรประกอบด้วยเพาเวอร์ไดโอด 6 ตัว สำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับจะใช้ ไดโอดทำหน้าที่เป็นวงจรเรกติไฟเออร์ซึ่งทำให้สามารถควบคุมระดับแรงดันในวงจรดีซีลิงค์ได้โดยแรงดันที่ผ่านวงจรเรกติไฟเออร์หาได้จากสมการดังนี้



รูปที่ 3.30 วงจรภาคจ่ายไฟจอร์กำลัง

##### 2. ดีซีลิงค์ (DC Link)

ดีซีลิงค์ ( DC Link ) หรือวงจรเชื่อมโยงทางดีซี ดังรูปที่ 3.31 คือวงจรเชื่อมโยงระหว่างวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะประกอบด้วยคาปาซิเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ที่กักแรงดันไฟฟ้า 800 VDC ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสเรกติไฟเออร์ให้เรียบยิ่งขึ้น และทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า โดยแรงดันที่ออกจากดีซีลิงค์เพื่อจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์จะมี 3 ขั้ว คือ + Vdc , -Vdc และ Vdc/2



รูปที่ 3.31 ดีซีลิงค์ (DC Link)



สำหรับการกำหนดค่าของตัวเก็บประจุสามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

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

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

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

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

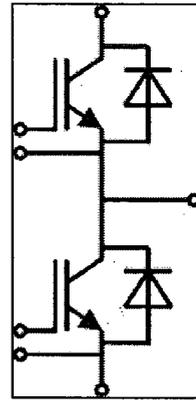
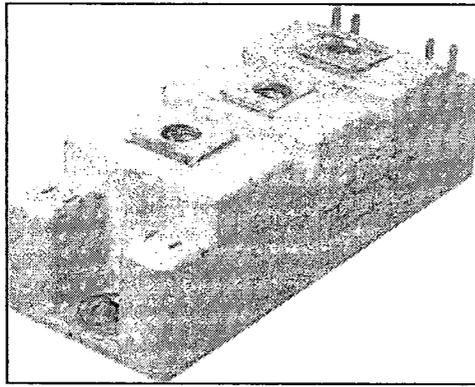
$$C = \frac{I_{dc} \times t}{V_{ripple}} = \frac{1.86 \times 3.333 \times 10^{-3}}{26.85} = 240 \text{ } \mu\text{F}$$

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

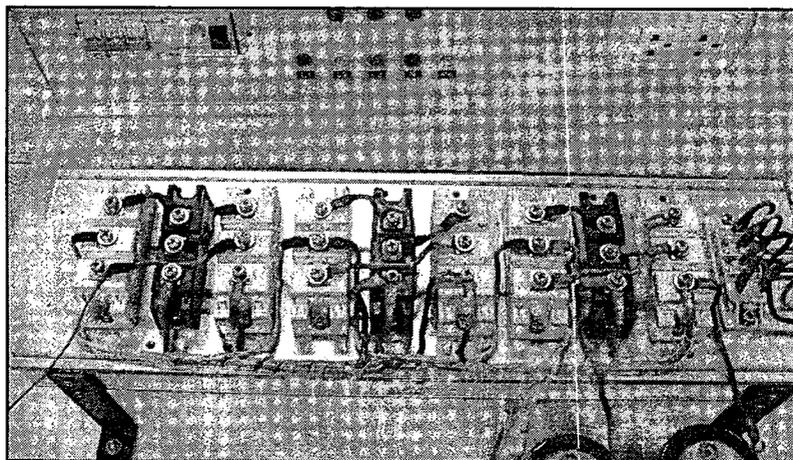
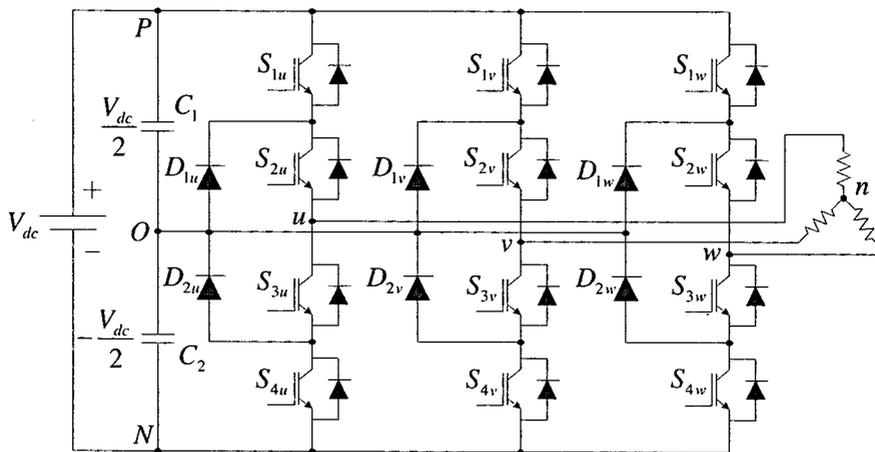
### 3.4.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ (Equivalent Inverter)

วงจรอินเวอร์เตอร์ คือส่วนที่ทำหน้าที่แปลงผันจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ผ่านการกรองจากวงจรดีซีลิงค์เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับวงจรจะประกอบด้วยเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์กำลัง 6 ชุด ซึ่งในที่นี้จะใช้ IGBT ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแสไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอาศัยเทคนิคที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ PWM (Pulse Width Modulation) เนื่องจากไอจีบีทีมีข้อดีในด้านความเร็วในการสวิตช์ที่สูงเกือบเท่ามอสเฟตและมีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสที่ต่ำเหมือนกับทรานซิสเตอร์ ทำให้สามารถขับ ไอจีบีทีที่ความถี่สูงและเกิดความร้อนน้อยในการใช้งานเนื่องมาจากกำลังการสูญเสียที่ตกคร่อมบนตัว ไอจีบีทีมีค่าต่ำ

ในส่วนของวงจรที่แปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับนั้นใช้อุปกรณ์สวิตชิงซึ่งในวงจรนี้เลือกใช้ไอจีบีทีโมดูลของเซมิคอน SKM75GB063D มีขนาด 600 V, 50 A เป็นอุปกรณ์สวิตชิงซึ่งไอจีบีทีซึ่งใช้ 6 ตัว โดยในหนึ่ง โมดูลนั้นประกอบด้วย ไอจีบีที 2 ตัว ดังนั้นในวงจรจึงมีไอจีบีทีทั้งหมด 12 ตัวดังรูปที่ 3.33 ซึ่งมีในแต่ละตัวฟรีวีลลิ่งไดโอดประกอบอยู่ในตัวแล้ว ดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.2 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ SKM75GB063D



รูปที่ 3.3 วงจรอินเวอร์เตอร์



### 3.4.3 วงจรกรองสัญญาณ (LC filter)

#### 3.4.3.1 การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่ใช้เก็บพลังงาน

เนื่องจากตัวเก็บประจุเป็นที่เก็บพลังงานที่มีความจำกัด ดังนั้นจึงต้องกำหนดขอบเขตความสามารถในการชดเชยแรงดันแต่ก็ยังคงต้องมีข้อกำหนดอื่นๆร่วมด้วยซึ่งข้อกำหนดทั้งหมดในการออกแบบขนาดของตัวเก็บประจุมีดังนี้

สามารถชดเชยแรงดันตกชั่วขณะได้สูงสุดเท่ากับ 110 V ( 50% ของแรงดันปกติ ) ที่กระแส 5 A ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ( Unity ) และเป็นการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแบบปกติ กรณีชดเชยตรงเฟสกับแรงดันตกชั่วขณะซึ่งเป็นกรณีที่ใช้กำลังจริงมากที่สุด เป็นระยะเวลา 0.1 วินาที โดยมีแรงดันที่บัสไฟตรงมีค่าเท่ากับ 600 V เนื่องจากขณะทำการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแรงดันที่บัสไฟตรงจะมีค่าลดลงเรื่อยๆจึงต้องกำหนดค่าแรงดันต่ำสุดที่บัสไฟตรงที่สามารถสร้างแรงดันชดเชยได้อย่างสมบูรณ์ โดยพิจารณาแรงดันสูงสุดที่ต้องการชดเชยได้นั้นคือ 110 V ซึ่งมีค่ายอดแรงดันเท่ากับ 156 V และเพื่อค่าแรงดันที่ลดลงเนื่องจากความสูญเสียต่างๆในระบบ ดังนั้นจึงกำหนดให้แรงดันต่ำสุดที่บัสไฟตรงมีค่าเท่ากับ 200 V จากข้อกำหนดข้างต้นสามารถหาขนาดตัวเก็บประจุได้จากสมการที่ (3.20)

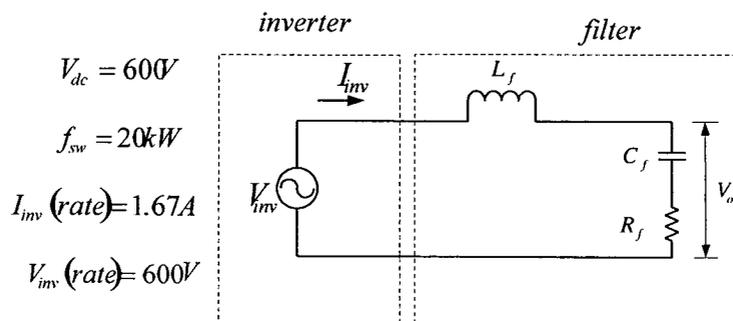
$$C_{bus} = \frac{2V_{com(max)}I_{com(max)}t_{com(max)}}{(V_{bus(max)}^2 - V_{bus(min)}^2)} \quad (3.20)$$

ดังนั้นเราจะทำการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่ใช้เก็บพลังงานได้ดังนี้

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

#### 3.4.3.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

เนื่องจากแรงดันที่อินเวอร์เตอร์สร้างไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ดังนั้นจึงจำเป็นต้องต่อวงจรกรองที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เพื่อกรองความถี่ที่ไม่ต้องการไม่ให้เข้าไปในระบบไฟฟ้ามากเกินไป โดยในการออกแบบจะละเลยผลกระทบของโหลดและแรงดันในระบบไฟฟ้าเพื่อให้ง่ายในการออกแบบและสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.34 ซึ่งการออกแบบมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.34 วงจรสมมูลของวงจรกรองที่ใช้ในการออกแบบ



กำหนดให้แรงดันความถี่หลักมูลที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรองมีค่าไม่เกิน 5% ของแรงดันในระบบไฟฟ้าปกติซึ่งเป็นข้อกำหนดในการเลือกตัวเหนี่ยวนำค่ามากที่สุดที่สามารถใช้งานได้สามารถหาได้จากสมการที่ (3.21)

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

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

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

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

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

กำหนดค่ากระแสกระเพื่อมที่ไหลกลับไม่เกิน 5% ของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุวงจรอง ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการเลือกตัวเก็บประจุค่าน้อยที่สุดที่สามารถใช้งานได้ โดยพิจารณาการแบ่งไหลของกระแสกระเพื่อมจากอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุกับโหลด โดยโหลดจะคิดที่กรณีที่ย่ำที่สุดคือมีเพียงตัวต้านทานที่พิกัดเดียว 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)

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

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

กำหนดการลดทอนแรงดันกระแสเพื่อให้มีค่าไม่น้อยกว่า 15 เท่าที่ฮาร์โมนิก  $20kHz_z$  และเมื่อแทนค่า  $R_f$  สมการที่ (3.25) ลงในสมการที่ (3.24) จะได้สมการที่ (3.27)

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

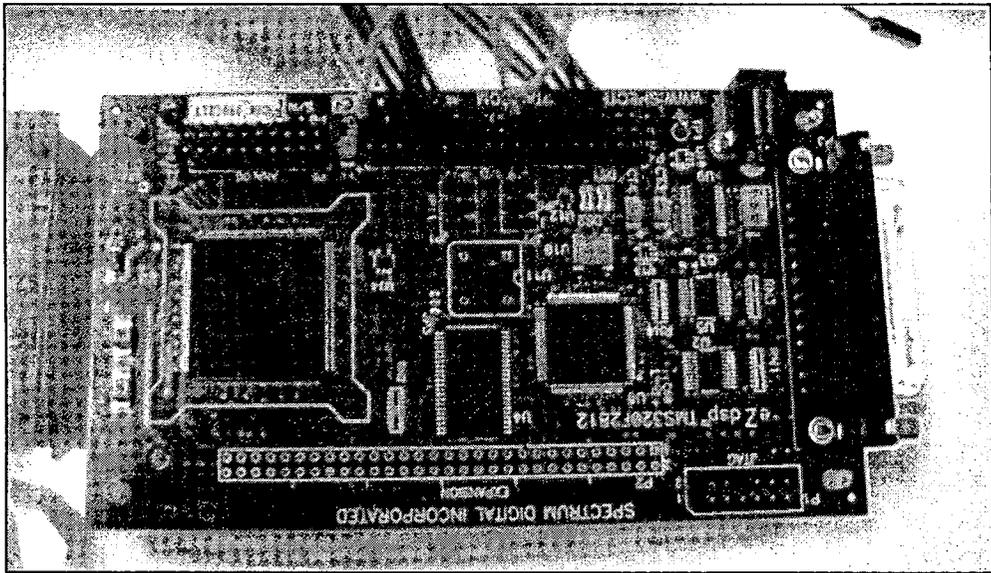
เราสามารถที่จะคำนวณหาค่าต่างๆ ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้โดยจะทำการกำหนดค่า ตัวเก็บประจุให้เท่ากับ  $0.159\mu F$  ความถี่ที่ใช้ในการตัดออฟเท่ากับ  $50Hz$  และค่าอัตราการหน่วงเท่ากับ 263.83 และค่าตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ  $42.34mH$  ดังนั้นเราจึงนำค่าตัวแปรที่ได้นำมาคำนวณในฟังก์ชันถ่ายโอนจะได้ค่าในฟังก์ชันเป็นดังนี้คือ

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

### 3.4.4 การออกแบบส่วนของวงจรควบคุม

#### 3.4.4.1 ตัวประมวลเชิงดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812

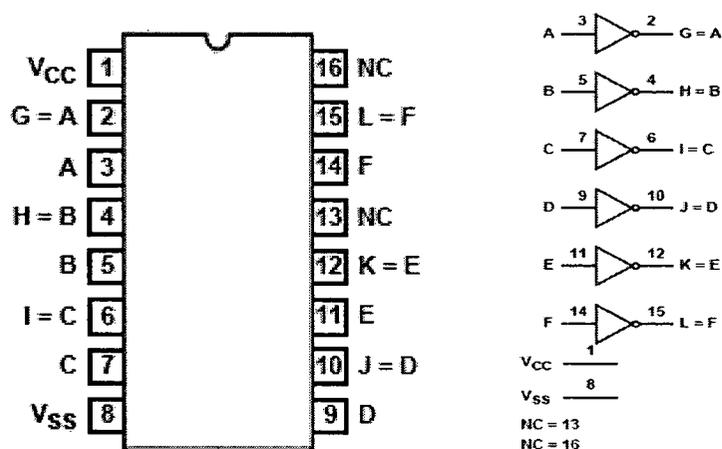
ตัวประมวลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812 ดังแสดงในรูปที่ 3.35 ผลิตภัณฑ์ของบริษัท Texas Instrument ซึ่งเป็นตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP Controller) ที่เหมาะสำหรับประยุกต์ใช้ในงานควบคุมมอเตอร์โดยเฉพาะเนื่องจากโครงสร้างภายในมีความอ่อนตัวเหมาะสำหรับประยุกต์ใช้ในงานควบคุมมอเตอร์หลายชนิด เช่นมอเตอร์เหนี่ยวนำ, มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน, ซิงโครนัสมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรและรีแอคแตนซ์มอเตอร์ 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 สัญญาณออกมาไม่สามารถนำไปขับขาเกตได้ 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 ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าลักษณะในขณะนั้น และแรงดันที่ออกมาจาก DSP ด้วย อีกทั้งยังมีข้อดี คือยังเป็นบัฟเฟอร์ (BUFFER) ได้อีก



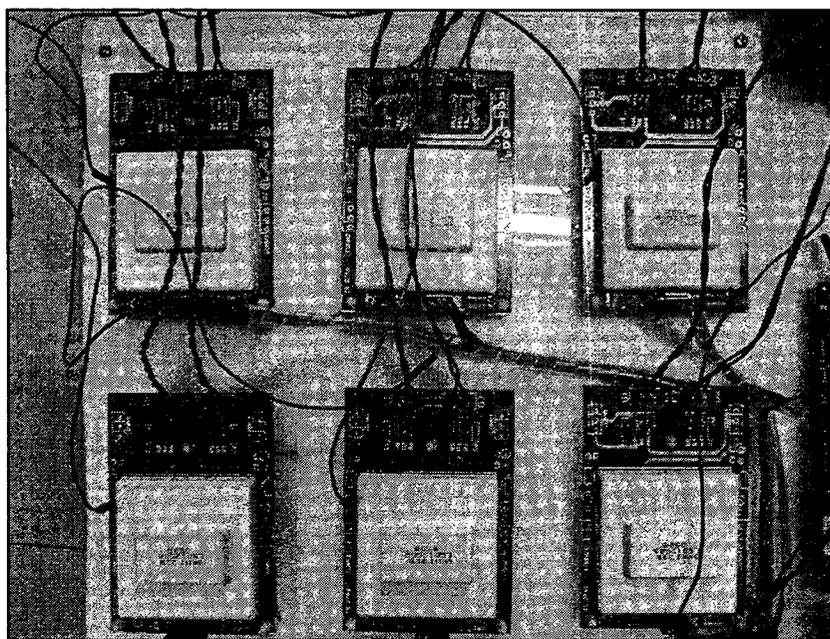
รูปที่ 3.36 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ CMOS Hex Buffer/Converters # CD4050B

### 3.4.4.3 วงจรขับเคลื่อนของไอจีบีที

ชุดขับเคลื่อนของวงจร ไอจีบีทีทั้ง 12 ตัวนั้น ได้ใช้ชุดขับเคลื่อนของเซมิคอน (SKHI 22B) เป็นจำนวน 6 ชุดดังแสดงในรูปที่ 3.37 โดยที่ 1 ตัวสามารถขับเคลื่อนได้ 2 ตัว คู่บนและคู่ล่าง ซึ่งคุณลักษณะเฉพาะของชุดขับเคลื่อนของไอจีบีทีที่มีลักษณะดังนี้

1. ป้องกัน ไอจีบีทีจากการลัดวงจร โดยวงแรงดันที่ขาคอลเลกเตอร์และเอมิเตอร์ ซึ่งถ้าเกิดการลัดวงจรจะสั่งให้ ไอจีบีทีเปิดวงจรออก
2. การขับเคลื่อนอินเตอร์ล๊อคระหว่าง ไอจีบีทีที่ตัวบนและตัวล่าง
3. มีหม้อแปลงความถี่สูงแยกกราวด์ (Ground) ภายใน
4. สร้างเวลาหน่วง (Delay Time) ระหว่าง ไอจีบีทีที่ตัวบนและตัวล่าง
5. รับสัญญาณขับเคลื่อนของ ไอจีบีที โดยจะปิดสวิตช์ถ้าแรงดันจุดชนวนมากกว่า 12.9 โวลต์ (ไม่เกิน 15.6 โวลต์) และเปิดสวิตช์ถ้าแรงดันจุดชนวนน้อยกว่า 2.1 โวลต์
6. แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง 15 โวลต์ บวกลบ 0.6 โวลต์
7. สามารถจ่ายกระแสได้ สูงสุด 8 A

เมื่อใช้วงจรขับเคลื่อน SKHI 22B ดังแสดงดังรูปที่ 3.37 ไปขับ ไอจีบีทีที่พิกัดแรงดัน 1700 V จะต้องต่อค่าความต้านทาน 1 กิโลโอห์ม ต่ออนุกรมที่ระหว่างขาคอลเลกเตอร์และเอมิเตอร์ และขาคอลเลกเตอร์ของ ไอจีบีทีจะต้องต่อเข้ากับขั้ว VCE ของชุดวงจรขับเคลื่อนเพื่อป้องกันการลัดวงจรของตัว ไอจีบีที

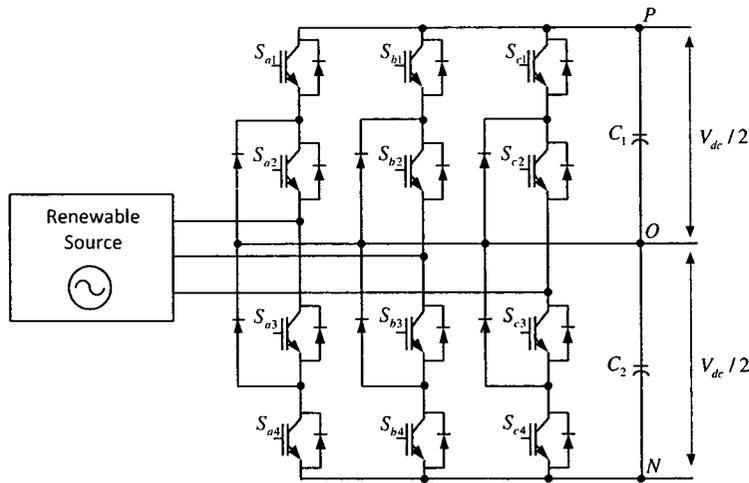


รูปที่ 3.37 SKHI 22B board



### 3.5 การออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ

#### 3.5.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier) [12]



รูปที่ 3.38 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับประกอบด้วยไอจีบีที (IGBT) ไคโอด และตัวเก็บประจุ  $C_1, C_2$  ที่ DC-Link ดังรูปที่ 3.38

โดยทั่วไปแล้ววงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับจะมีรูปคลื่นเป็นรูปคลื่นไซน์ โดยใช้ไอจีบีทีเป็นอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งเพื่อกำหนดสถานะในแต่ละกึ่งเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ซึ่งทั้งสามกึ่งจะได้รับแรงดันเท่ากับจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ พลังงานไฟฟ้าจากกริดจะไหลไปทางด้านโหลด ในขณะที่พลังงานไฟฟ้าจะไหลย้อนกลับจากทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงไปที่กริดเพื่อช่วยให้สถานะของการทำงานเหมือนกับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

สมการ (3.28) และ (3.29) คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการหมุนของแกนหมุนอ้างอิง (แกน d-q) ตามโครงสร้างของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & \omega \\ -\omega & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$\frac{3}{2} (e_d i_d + e_q i_q) = v_{dc} i_{dc} \quad (3.29)$$

เมื่อ  $e_d, e_q$  คือเวกเตอร์ของแรงดันกริด และ  $e_a, e_b, e_c$  คือส่วนประกอบเวกเตอร์ d-q ของ  $E_{dq}$  หลังจากมีการแปลงแกน  $V_d, V_q$  จะได้ส่วนประกอบเวกเตอร์แรงดันของ  $V_{dq}$  ที่ด้านไฟฟ้ากระแสสลับของวงจรแปลงผันไฟฟ้าสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง



แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แกนหมุน d-q ของวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเป็นการแสดงส่วนประกอบกระแสของแกน d-q ( $i_d$  และ  $i_q$ ) ที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาในการออกแบบตัวควบคุมกระแส บทความนี้จึงแนะนำให้  $i_d$  และ  $i_q$  ใช้การป้อนไปข้างหน้าด้วยตัวควบคุมที่แยกออกจากกลุ่มกระแสของ  $i_d$  และ  $i_q$  โดยใช้ตัวควบคุม PI ซึ่งโครงสร้างแรงดันของตัวควบคุมกระแสในแกนหมุนอ้างอิง (แกน d-q) คือ

$$\begin{cases} v_d^* = -\left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right)(i_d^* - i_d) + \omega Li_q + e_d \\ v_q^* = -\left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right)(i_q^* - i_q) + \omega Li_d + e_q \end{cases} \quad (3.30)$$

เมื่อ  $K_{ip}, K_{il}$  คือสัดส่วนของค่าสัมประสิทธิ์ และเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่สำคัญในรูปกระแส  $i_d^*, i_q^*$  ที่เป็นพฤติกรรมของกระแส  $i_d, i_q$  ดังแสดงในสมการ (3.31)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left[R - \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right)\right] / L & 0 \\ 0 & -\left[R - \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right)\right] / L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right) \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

วงจรทั้งหมดประกอบด้วยรูปควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง รูปควบคุมกระแสแกน d-q และส่วนของการมอดูเลตสัญญาณพีดีบีลิวเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์ ซึ่งสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและตัวประกอบกำลังของกริดให้มีเสถียรภาพตามความต้องการได้นอกจากนี้ระบบจะเพิ่มสถานะกระแสไหลย้อนกลับและค่าชดเชยการไหลไปข้างหน้าของแรงดันที่ผิดเพี้ยนที่กริด ซึ่งทำให้สามารถควบคุมแรงดันได้สมบูรณ์ เมื่อแรงดันในสัญญาณสวิตช์เปลี่ยนแปลงโดยการมอดูเลตสัญญาณพีดีบีลิวเอ็มที่ป้อนให้กับวงจรหลักเป็นการช่วยเสริมการควบคุมแรงดันทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับตามที่ต้องการ

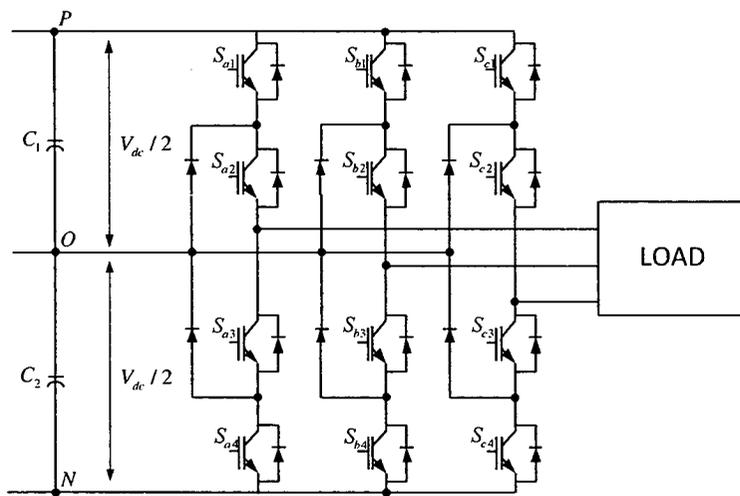
### 3.5.2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter) [13]

การคล้ายกันของนิยามฟังก์ชันสวิตช์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสองระดับกับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับก็เป็นเช่นเดียวกัน ในการวิเคราะห์จะง่ายขึ้นเมื่อทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมดเป็นสวิตช์ในอุดมคติ ทำให้แรงดันทั้งสามเฟสเท่ากันที่ทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ฟังก์ชันสวิตช์สำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับคือ

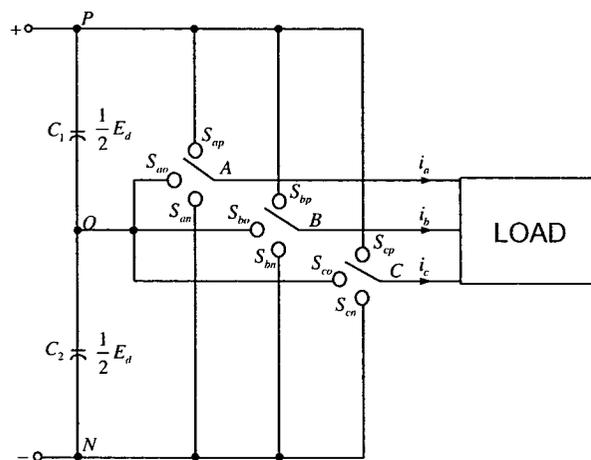


$$s_i = \begin{cases} 1 & \left(u_i = \frac{1}{2} E_d\right) \\ 0 & (u_i = 0) \\ -1 & \left(u_i = -\frac{1}{2} E_d\right) \end{cases} \quad (i = a, b, c) \quad (3.32)$$

นอกจากนี้แต่ละกิ่งสามารถเปลี่ยนสถานะโดยใช้สวิตช์ เพราะฉะนั้นแบบจำลองอย่างง่ายของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสองระดับ(รวมทั้งโหลด) ดังแสดงในรูปที่ 3.40 และฟังก์ชันสวิตซ์  $s_i$  จะแบ่งออกเป็น  $S_{ip}$ ,  $S_{io}$  และ  $S_{in}$  เมื่อเปิดแต่ละอันค่าของอันแรกจะเท่ากับหนึ่ง และเมื่อปิดมันก็จะเป็นศูนย์เพราะว่าสองสวิตซ์ที่แต่ละเฟสไม่สามารถเปิดและปิดที่เวลาเดียวกันได้ ดังนั้น  $S_{ip}, S_{io}, S_{in}$  จะได้ว่า  $S_{ip} + S_{io} + S_{in} = 0$



รูปที่ 3.39 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 3.40 แบบจำลองอย่างง่ายของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ



จากรูปที่ 3.40 จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของวงจรสามเฟสคือ

$$\begin{cases} u_{AN'} = Ri_a + L \frac{d}{dt} i_a + E_a \\ u_{BN'} = Ri_b + L \frac{d}{dt} i_b + E_b \\ u_{CN'} = Ri_c + L \frac{d}{dt} i_c + E_c \end{cases} \quad (3.33)$$

เขียนในรูปเมตริกซ์ดังสมการ (3.34)

$$\begin{bmatrix} u_{AN} \\ u_{BN} \\ u_{CN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_a \\ \frac{d}{dt} i_b \\ \frac{d}{dt} i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างเฟสที่ไหลและแรงดันของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาออกจะสามารถหาได้จาก

$$\begin{bmatrix} u_{AN'} \\ u_{BN'} \\ u_{CN'} \end{bmatrix} = \frac{1}{6} E_d \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

ดังนั้นเมื่อนำสมการ (3.35) แทนในสมการ (3.34) ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้คือ

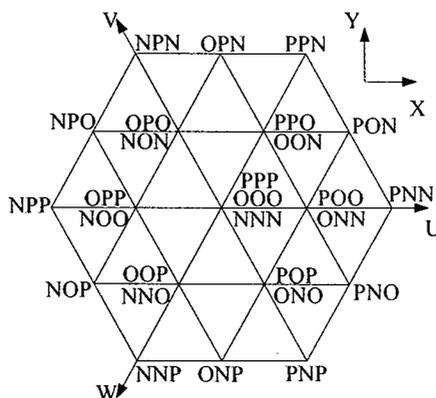
$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_a \\ \frac{d}{dt} i_b \\ \frac{d}{dt} i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E_d}{6L} \times (3S_a - S^*) - \frac{E_a}{L} \\ \frac{E_d}{6L} \times (3S_b - S^*) - \frac{E_b}{L} \\ \frac{E_d}{6L} \times (3S_c - S^*) - \frac{E_c}{L} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

เมื่อ  $S^* = S_a + S_b + S_c$



### 3.5.3 การมอดูเลตสัญญาณที่ดับลิเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์ (SVPWM)[13],[14],[15]

แต่ละเฟสของวงจรสามระดับมีสถานะของสวิตช์อยู่สามสถานะ ดังนั้นวงจรแบบสามระดับจึงสามารถสร้างเวกเตอร์แรงดันได้ทั้งหมด 27 สถานะ ( $3^3$ ) โดยแสดงในแต่ละสถานะการณีสวิตช์บนรูปหกเหลี่ยมได้ดังรูปที่ 3.41



รูปที่ 3.41 สถานะสวิตช์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบสามระดับ [13], [14], [15]

จากรูปที่ 3.41 สามารถแบ่งเวกเตอร์ออกเป็น 5 กลุ่มและสรุปในตารางที่ 3.4 ดังต่อไปนี้

- เวกเตอร์ศูนย์ Zero Voltage Vector (ZVV)
- เวกเตอร์ขนาดกลาง Medium Voltage Vector (MVV)
- เวกเตอร์ขนาดใหญ่ Large Voltage Vector (LVV)
- เวกเตอร์ขนาดเล็กด้านบน Upper Small Voltage Vector (USVV)
- เวกเตอร์ขนาดเล็กด้านล่าง Lower Small Voltage Vector (LSVV)

ตารางที่ 3.4 กลุ่มเวกเตอร์แรงดัน

Voltage Vector	Symbols
ZVV	(PPP), (OOO), (NNN)
MVV	(PON), (ONP), (NPO) (NOP), (ONP), (PNO)
LVV	(PNN), (PPN), (NPN) (NPP), (NNP), (PNP)
USVV	(POO), (PPO), (OPO) (OPP), (OOP), (POP)
LSVV	(ONN), (OON), (NON) (NOO), (NNO), (ONO)