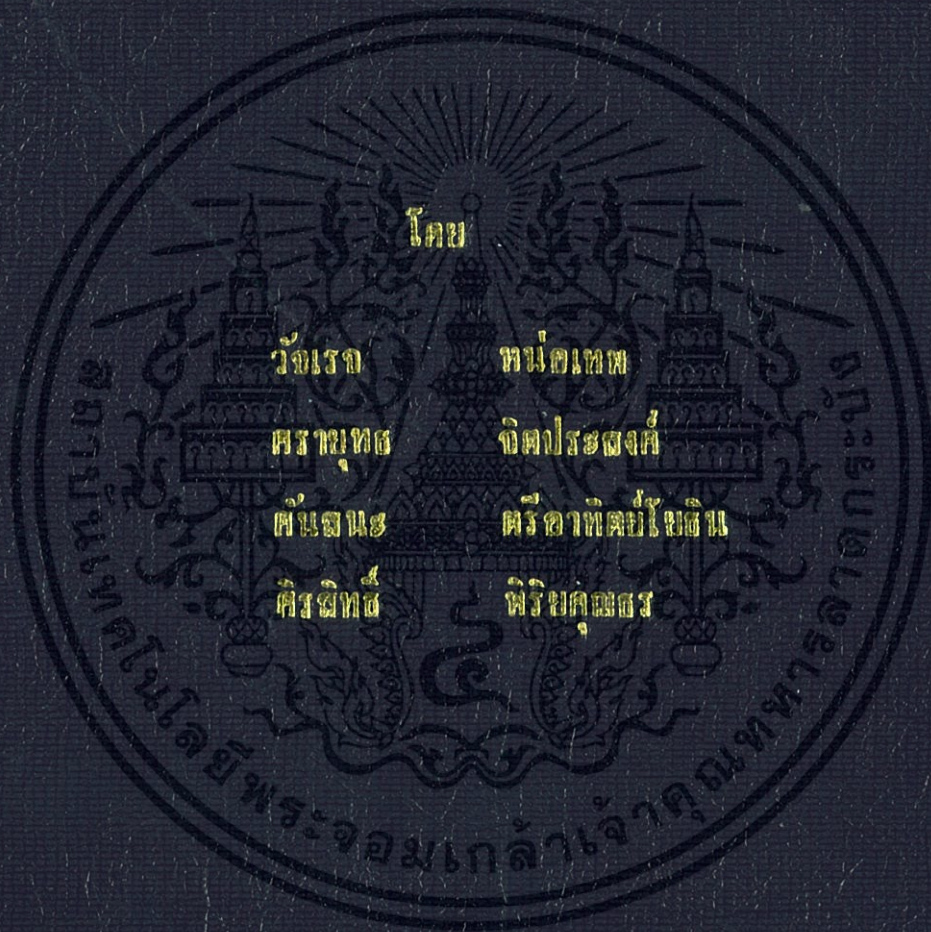


ชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน  
RENEWABLE POWER GENERATION SIMULATOR



ปฏิญานี้แสดงให้เห็นเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

ชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน  
RENEWABLE POWER GENERATION SIMULATOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# RENEWABLE POWER GENERATION SIMULATOR



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556  
ชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน  
RENEWABLE POWER GENERATION SIMULATOR



อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.สมภพ ผลไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

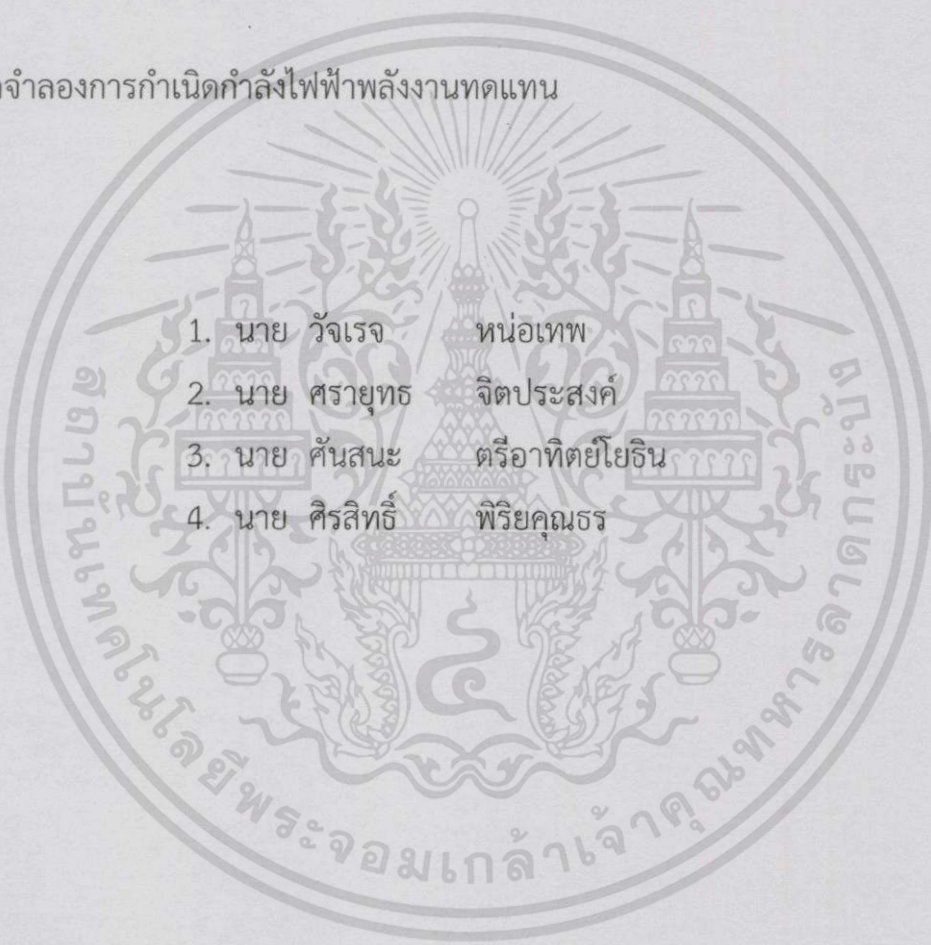
ปริญญาโทปีการศึกษา 2556

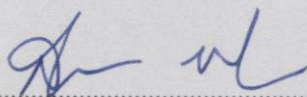
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน

ผู้จัดทำ

- 
1. นาย วัจเรจ หน่อเทพ
  2. นาย ศรายุทธ จิตประสงค์
  3. นาย คັນสนะ ตริอาทิตยโยธิน
  4. นาย ศิรสิทธิ พิริยคุณธร



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. สมภพ ผลไม้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน

นายวัจเรจ	หน่อเทพ
นายศรายุทธ	จิตประสงค์
นายคันสนะ	ตรีอาทิตย์โยธิน
นายศิริสิทธิ์	พิริยคุณธร
ดร.สมภพ	ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษา

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการจำลองการกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทนสำหรับใช้ในการศึกษาและ จำลองระบบการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทนแบบต่างๆกับระบบไฟฟ้าเพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพและวิเคราะห์ผลกระทบต่างๆ เมื่อเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทนเข้าสู่ระบบไฟฟ้าโดยไม่ต้องมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้านั้นจริง มาเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาและจำลองระบบควบคุมแบบป้อนกลับ เพื่อให้ได้สัญญาณที่เชื่อมต่อกับระบบแล้วจึงขยายสัญญาณเอาต์พุตด้วยอุปกรณ์ขยายกำลังขนาด 2kVA นอกจากนี้ยังสามารถสั่งการทางเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมของชุดจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทนได้

## RENEWABLE POWER GENERATION SIMULATOR

Mr.WATCHARET   NORTHEP  
Mr.SARAYUT     JITPRASONG  
Mr.SANSANA     TRIARTHITYOTHIN  
Mr.SIRASITH     PIRIYAKOONTORN  
Dr.SOMPOB      POLMAI      Supervisor

Year 2013

### Abstract

This paper presents experimental results of Renewable Power Generation Simulator for studying and model connection of renewable energy source into utility grid. Without actual renewable energy source This Renewable Power Generation Simulator can be used instead. This can analyze the effects and performance before actual renewable energy source connected. Negative feed back control is used in this paper. The output signal from controller is amplify by a 2 KVA Power Amplifier (inverter). In addition, it can be controlled power output by computer

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยคำแนะนำจาก ดร. สมภพ ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณและความกรุณาจากท่านอาจารย์เป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกๆท่านที่ได้ให้ความรู้แก่ผู้จัดทำตลอดการศึกษาในระดับปริญญาตรี ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของปริญญาานิพนธ์

ขอขอบคุณพี่ๆ และ เพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการ Power Electronic Applications and Energy Conversion Research Laboratory (PEARL LAB) ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ร่วมทุกข์ ร่วมสุข เป็นกำลังใจให้กันและกันในตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ผู้จัดทำสามารถทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี กลุ่มผู้จัดทำขอถือโอกาสอันดีมอบคุณงามความดีและประโยชน์ที่ได้จากปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ ให้แก่ผู้มีพระคุณของผู้จัดทำทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	1
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 แนวทางการแก้ไขปัญหาที่จะดำเนินการ.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
1.7 ขั้นตอนในการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทน.....	5
2.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	5
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม 2.1.2 [2].....	14
2.2 เฟสล็อกกลุป [1].....	17
2.2.1 หลักการทำงานของเฟสล็อกกลุป.....	17
2.2.2 ตัวควบคุมอัตโนมัติ.....	19
2.2.3 Three-Phase Phase-Lock Loop [4].....	21
2.3 สเปนเซอร์และทฤษฎีกรอบอ้างอิง [5].....	25
2.3.1 สเปนเซอร์ (Space Vector).....	25

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3.2 ทฤษฎีกรอบอ้างอิง (Reference Frame Theory).....	28
บทที่ 3 การออกแบบระบบควบคุมและ การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/SIMULINK.....	33
3.1 วงจร Phase-Lock Loop .....	33
3.3 ระบบควบคุมกระแส.....	40
3.3.1 ระบบการแปลงแกน.....	40
3.3.2 ระบบควบคุมกระแส.....	45
3.3.3 การแปลงจากกรอบอ้างอิงหมุนไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง.....	47
3.4 การจำลองชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน.....	50
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง .....	62
4.1 ผลการทดลองการเชื่อมต่อการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	69
4.2 ผลการทดลองการเชื่อมต่อการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานลม.....	71
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	75
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	75
5.2 อุปสรรคและข้อเสนอแนะ.....	75
5.2.1 อุปสรรค.....	75
5.2.2 แนวทางแก้ไข.....	76
เอกสารอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก.....	78
ภาคผนวก ก บทความวิชาการ.....	79
ประวัติผู้เขียน.....	84

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 Renewable Power Generation Simulator.....	2
2.1 การกำเนิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลจากพลังงานแสง.....	7
2.2 การเคลื่อนที่อิสระของอิเล็กตรอนก่อนที่จะรวมตัวกับโฮล.....	8
2.3 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะจ่ายโหลด.....	8
2.4 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบไดโอดเดี่ยว.....	9
2.5 I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	10
2.6 รูปแบบของเซลล์แสงอาทิตย์.....	12
2.7 MATLAB I-V Curve ที่ $T_p=25^{\circ}\text{C}$ , $G=1000; 800; 600; 400; 200 \text{ W/m}^2$ .....	13
2.8 MATLAB P-V Curve ภายใต้เงื่อนไข $G=1000 \text{ W/m}^2$ และ $T_p=25^{\circ}\text{C}$ .....	13
2.9 MATLAB P-V Curve ภายใต้เงื่อนไข $G=1000 \text{ W/m}^2$ และ $T_p=50^{\circ}\text{C}$ .....	14
2.10 กังหันลมชนิดแนวแกนนอน.....	15
2.11 Power Curve ของกังหันลม.....	16
2.12 วงจร Phase-Lock Loop เบื้องต้น.....	17
2.13 การจับสัญญาณ (Capture Process) ของเฟสล็อกลูป.....	18
2.14 เปรียบเทียบผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบต่างๆ.....	19
2.15 Block Diagram ของ PI Controller.....	20
2.16 Block Diagram ของวงจร Three-Phase Phase-Lock Loop.....	21
2.17 ระบบเชิงเส้นของ PLL.....	23
2.18 การจำลองผลลัพธ์ของ Three-Phase PLL ( $\zeta = 0.707, \omega_n = 628 \text{ rad/sec}$ ) (a) ตำแหน่งเชิงมุม (b) แรงดันแกน q (c) ฟังก์ชัน sin ใช้ค่าของ $\theta$ และ $\hat{\theta}$ .....	24
2.19 สัญญาณโคไซน์.....	25
2.20 สเปซเวกเตอร์.....	26
2.21 สเปซเวกเตอร์.....	27
2.22 รูปคลื่นของตัวแปรสมมูลในกรอบอ้างอิงสามเฟส.....	28
2.23 การแปลงสำหรับสเปซเวกเตอร์ไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง.....	29
2.24 เมทริกซ์การแปลงระบบ dq0.....	30
2.25 เมทริกซ์การแปลงระบบ qd0.....	31

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26 การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงใดๆในระบบ (a) $dq0$ และ (b) $qd0$ .....	31
3.1 Block Diagram ที่ใช้ในการออกแบบการทำงานของPLL	33
3.2 วงจรยกระดับสัญญาณของวงจรตรวจวัดแรงดันที่ออกแบบแล้ว .....	35
3.3 วงจรขยายสัญญาณแรงดันที่ออกแบบแล้ว .....	35
3.4 Current Transducer LA 25-NP .....	35
3.5 วงจรยกระดับสัญญาณของวงจรตรวจวัดกระแสที่ออกแบบแล้ว.....	36
3.6 วงจรขยายผลต่าง .....	36
3.7 วงจรขยายกลับเฟส .....	37
3.8 วงจรตามแรงดัน หรือวงจรบัฟเฟอร์ .....	38
3.9 วงจรลดทอนสัญญาณ.....	39
3.10 วงจรขยายสัญญาณ.....	39
3.11 วงจรตรวจวัดกระแส .....	40
3.12 บล็อกไดอะแกรมของการแปลงแกน.....	41
3.13 บล็อกไดอะแกรมวิธีการแปลงแกนค่ากระแสของระบบควบคุม .....	41
3.14 ฟังก์ชันในการแปลงแกนในแนวแกน d.....	43
3. 15 ฟังก์ชันในการแปลงแกนในแนวแกน q.....	43
3.16 บล็อกไดอะแกรมวิธีการแปลงแกนค่าแรงดันของระบบไฟฟ้า .....	44
3.17 การเชื่อมต่อเข้าระบบไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า.....	45
3.18 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม.....	46
3.19 บล็อกไดอะแกรมการแปลงจากกรอบอ้างอิงหมุนไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง.....	48
3.20 ฟังก์ชันการแปลงแกนจากกรอบอ้างอิงหมุนไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งในแนวแกน d.....	49
3. 21 ฟังก์ชันการแปลงแกนจากกรอบอ้างอิงหมุนไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งในแนวแกน q.....	49
3.22 แบบจำลองทางไฟฟ้าของชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน .....	50
3.23 แบบจำลองระบบควบคุมของชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน .....	51
3. 24 แบบจำลองระบบควบคุมของชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน(dq-control) .....	51
3.25 การจำลองคุณลักษณะของแอมพลิฟายเออร์กำลัง .....	52
3.26 วงจรในโปรแกรม MATLAB/Simulink .....	53
3.27 กรณีที่ 1 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าของระบบ(สีดำ).....	54
3.28 กรณีที่ 2 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าของระบบ(สีดำ).....	54

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.29 กรณีที่ 3 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าของระบบ(สีดำ).....	55
3.30 กรณีที่ 1 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบ(สีดำ).....	55
3.31 กรณีที่ 2 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบ(สีดำ).....	56
3.32 กรณีที่ 3 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบ(สีดำ).....	56
3.33 กรณีที่ 1 เปรียบเทียบค่ากระแสคำสั่ง(สีดำ)และค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนกลับ(สีชมพู).....	57
3.34 กรณีที่ 2 เปรียบเทียบค่ากระแสคำสั่ง(สีดำ)และค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนกลับ(สีชมพู).....	57
3.35 กรณีที่ 3 เปรียบเทียบค่ากระแสคำสั่ง(สีดำ)และค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนกลับ(สีชมพู).....	58
3.36 กรณีที่ 1 รูปคลื่นแรงดันระบบ(บน),แรงดันจากอินเวอร์เตอร์(กลาง).....	58
3.37 กรณีที่ 2 รูปคลื่นแรงดันระบบ(บน),แรงดันจากอินเวอร์เตอร์(กลาง).....	59
3.38 กรณีที่ 3 รูปคลื่นแรงดันระบบ(บน),แรงดันจากอินเวอร์เตอร์(กลาง).....	59
3.39 องค์ประกอบฮาร์มอนิกและค่า%THDในกรณีที่ 1.....	60
3.40 องค์ประกอบฮาร์มอนิกและค่า%THDในกรณีที่ 2.....	60
3.41 องค์ประกอบฮาร์มอนิกและค่า%THDในกรณีที่ 3.....	61
4.1 ชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน.....	62
4.2 แรงดัน 1 เฟสจากระบบ.....	63
4.3 สัญญาณแรงดันขาออกของวงจรถอดทอนแรงดัน.....	63
4.4 Digital to Analog Converter.....	64
4.5 สัญญาณขาเข้าของวงจรถยายสัญญาณ.....	64
4.6 สัญญาณขาออกของวงจรถยายสัญญาณ (สัญญาณสีฟ้า)และ สัญญาณขาเข้าเทียบกับสัญญาณขาออกของอินเวอร์เตอร์(สัญญาณสีชมพู).....	65
4.7 แรงดันขาออกจากอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันของระบบ.....	65
4.8 แรงดันของระบบ, แรงดันอินเวอร์เตอร์ และ กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ.....	66
4.9 แรงดันของระบบ, แรงดันอินเวอร์เตอร์ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ.....	66
4.10 แรงดันของระบบ, แรงดันอินเวอร์เตอร์ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ.....	67
4.11 แรงดันของระบบ, แรงดันอินเวอร์เตอร์ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ.....	67
4.12 แรงดันของระบบ, แรงดันอินเวอร์เตอร์ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ.....	68
4.13 แรงดันของระบบ, แรงดันอินเวอร์เตอร์ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ.....	68
4.14 คุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์.....	70
4.15 โปรแกรมสั่งการที่ใช้บนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โหมด PV.....	70

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 กราฟแสดงค่ากระแสและแรงดันเมื่อจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	71
4.17 การจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	71
4.18 คุณลักษณะของกังหันลม.....	72
4. 19 โปรแกรมสั่งการที่ใช้บนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลโหมด Wind Generator .....	73
4.20 กราฟแสดงค่ากระแสและแรงดันเมื่อจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า .....	74
4.21 กำลังไฟฟ้าการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า.....	74



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากปัจจุบันมีการใช้พลังงานทดแทนอยู่มากมายและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะเป็นพลังงานที่สะอาดและช่วยลดต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีราคาสูงในปัจจุบัน ทำให้มีการเชื่อมต่อแหล่งพลังงานทดแทนต่างๆ เข้าสู่ระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายพลังงานเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า จึงต้องทำการจำลองการเชื่อมต่อแหล่งพลังงานทดแทนเข้ากับระบบไฟฟ้าก่อนการเชื่อมต่อจริง เพื่อจำลองสถานการณ์ที่อาจจะเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้า ซึ่งการจำลองการเชื่อมต่อของแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนมีประโยชน์คือสามารถนำผลการจำลองไปวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นและหาแนวทางในการแก้ไขต่อไป

เนื่องด้วยประโยชน์ของการทำการจำลองการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าจริงตามที่กล่าวไว้ข้างต้น เราจึงได้นำปริญญาณิพนธ์เรื่อง “ชุดจำลองการกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทน” สำหรับใช้ในการศึกษาและจำลองระบบการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทนแบบต่างๆ กับระบบไฟฟ้านำมาศึกษาและพัฒนา จากการศึกษาในขั้นต้นเราพบปัญหาของชุดจำลองนี้ได้แก่

1. การควบคุมกระแสไม่เป็นคลื่นรูปไซน์ เนื่องจาก แรงดันในระบบไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกและหม้อแปลงตรวจจับแรงดันมีความผิดเพี้ยนทางรูปคลื่นสูงเนื่องจากการอิ่มตัวของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก เนื่องจากใช้หม้อแปลงทั่วไปที่ไม่ได้ออกแบบมาโดยเฉพาะ

2. ปัญหาความผิดพลาดในการควบคุมกำลังไฟฟ้า หรือ ความผิดพลาดของการควบคุมขนาดของกระแส เนื่องจากการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ไม่เหมาะสม

จากปัญหาต่างๆข้างต้นอาจทำให้ชุดจำลองทำงานผิดพลาด โดยจำลองกำลังไฟฟ้าออกมาไม่ตรงตามที่ต้องการ และเมื่อนำแหล่งพลังงานทดแทนมาเชื่อมต่อจริงอาจมีปัญหาก่อเกิดขึ้น

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1. เพื่อใช้ในการจำลองแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทน (Renewable Generator) สำหรับใช้ในการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อความเร็วสูงสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดเล็ก

2. เพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานของระบบไมโครกริดสาดิตในด้านการรักษาเสถียรภาพด้านแรงดันและความถี่ในสภาวะแยกโดด (Islanding Mode)

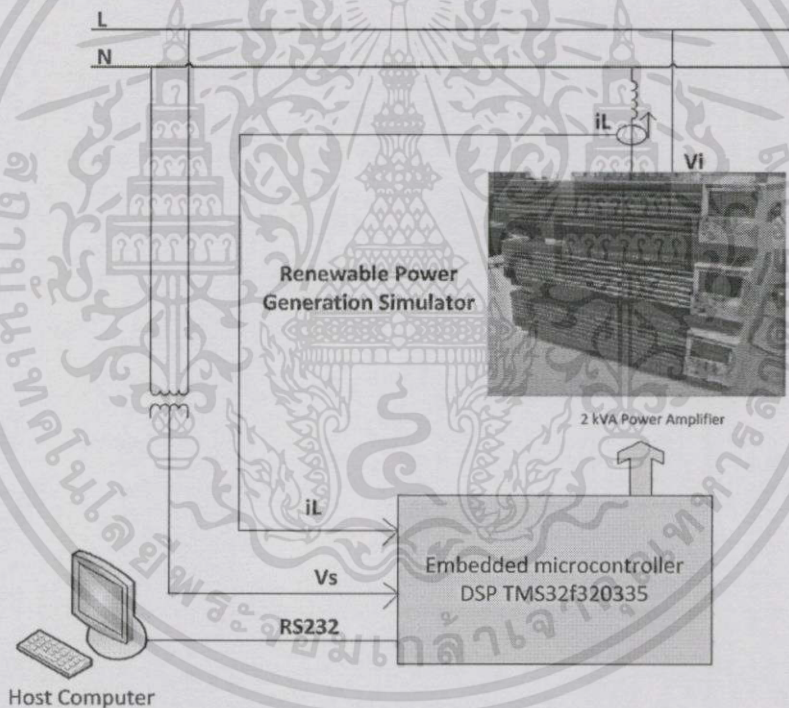
3. เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของชุดจำลองการกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทนให้ดีขึ้น

4. สามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้ในการจำลองขั้นสูงในระบบ Real-Time System Simulator

### 1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ชุดจำลองแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทนประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่โปรแกรมได้ พิกัด 2 KVA จำนวน 3 ตัวซึ่งสามารถนำมาสร้างเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเฟสเดียวหรือสามเฟสก็ได้ ชุดควบคุมดิจิทัล และโปรแกรมติดต่อผู้ใช้งานและแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ดังแสดงดังรูปที่ 1.1

การกำหนดรูปแบบและสภาวะการทำงานของชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน เช่น โปรไฟล์ของกำลังไฟฟ้า-เวลา หรือแรงดันไฟฟ้า-เวลา จะถูกกำหนดโดยผู้ใช้งานโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์หลังจากนั้นข้อมูลจะถูกส่งไปยังส่วนควบคุมดิจิทัลผ่านทางวิธีการสื่อสารอนุกรม ตัวควบคุมดิจิทัลซึ่งมีอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสขาออกของแหล่งจ่ายจะทำการควบคุมกระแสหรือแรงดันของแหล่งจ่ายให้ได้ตามโปรไฟล์ที่ได้รับมาและสามารถส่งข้อมูลการทำงานกลับไปแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ได้



รูปที่ 1.1 Renewable Power Generation Simulator

### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. สร้างแบบจำลองของ Phase-Lock Loop บนโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อศึกษาการทำงานของวงจร Phase-Lock Loop

2. เขียนโปรแกรมลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์จำลองวงจร โดยใช้ Function/Arbitrary Waveform Generator กำเนิดสัญญาณขาเข้าให้แก่ DSP TMS320F28335

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ออกแบบระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทนจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

4. ทำการเชื่อมต่อชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทนเข้ากับระบบไฟฟ้า

5. เขียนโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมสำหรับ Host Computer เพื่อใช้ในการส่งค่าให้กับชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน

#### 1.5 แนวทางการแก้ไขปัญหาที่จะดำเนินการ

1. การแก้ไขปัญหาการควบคุมกระแสที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

- ออกแบบหม้อแปลงตรวจจับแรงดันใหม่
- เพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อ

2. การแก้ไขปัญหาความผิดพลาดของระบบควบคุม

- เปลี่ยนเป็นการควบคุมแบบเวกเตอร์
- กำหนดพารามิเตอร์ของตัวควบคุมใหม่

3. การแก้ไขปรับปรุงฮาร์ดแวร์

- ปรับปรุงให้มีความกะทัดรัดและสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกยิ่งขึ้น

#### 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. เข้าใจทฤษฎีและหลักการทำงานของวงจร Phase-Lock Loop

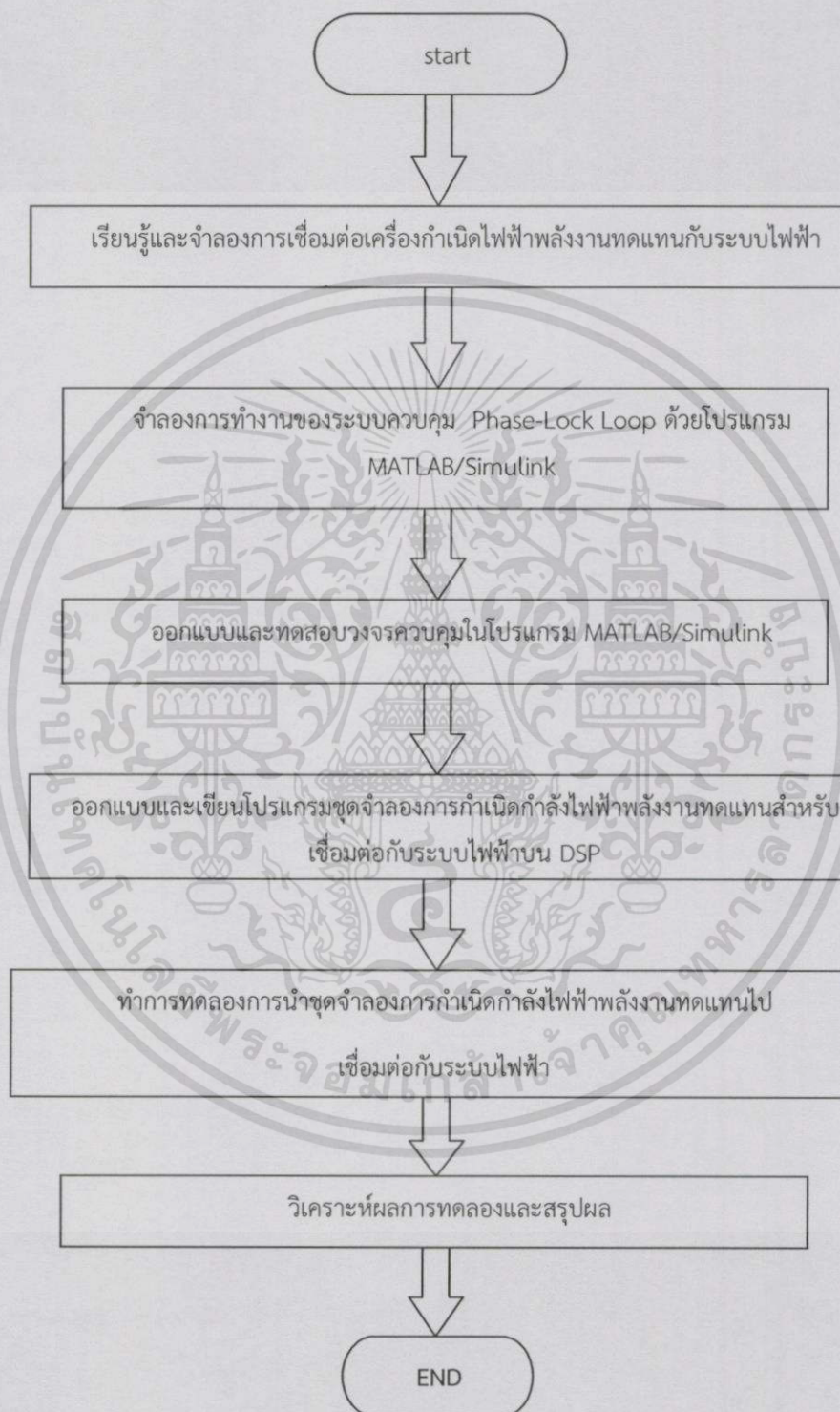
2. เข้าใจหลักการทำงานของระบบควบคุมและการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน(P), แบบปริพันธ์(I) และแบบอนุพันธ์(D)

3. เข้าใจหลักการแปลง Digital to Analog และ Analog to Digital

4. เข้าใจหลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control)

5. สามารถนำหลักการทางทฤษฎีไปเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทนกับระบบไฟฟ้าที่ใช้จริง

## 1.7 ขั้นตอนในการศึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทน

ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เป็นแหล่งพลังงานที่มีความสำคัญและมีบทบาทต่อสังคมมนุษย์เป็นอย่างยิ่ง ทั้งในด้านการคมนาคมขนส่ง การผลิตไฟฟ้า และในกระบวนการอุตสาหกรรมต่างๆ แต่เนื่องจากในสถานะของโลกในปัจจุบันเริ่มประสบกับปัญหาการขาดแคลนกำลังไฟฟ้าซึ่งผลิตได้จากถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เพราะทรัพยากรเหล่านี้เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไปตามกาลเวลา รวมทั้งราคาต่อหน่วย และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนเช่น แสงอาทิตย์ ลม และน้ำ ได้รับความสนใจและมีการกล่าวถึงเป็นจำนวนมากในปัจจุบัน ซึ่งจะนำพลังงานทดแทนเหล่านี้มาทดแทนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ อย่างไรก็ตามการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนยังคงมีอุปสรรคในด้านต้นทุนการก่อสร้างที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับพลังงานรูปอื่นๆที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งต้นทุนของเซลล์แสงอาทิตย์กำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทนขึ้นอยู่กับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี วัสดุดิบ รวมถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของพลังงานทดแทนนั้นด้วย

##### 2.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

“แสงอาทิตย์” เป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีขนาดใหญ่ที่สุดเป็นพลังงานสะอาดและมีอยู่ทั่วไปแต่การนำมาใช้ประโยชน์อาจยังมีข้อจำกัดอยู่บ้างเนื่องจากแสงอาทิตย์มีเฉพาะในตอนกลางวันตลอดจนมีความเข้มของแสงที่ไม่แน่นอนเพราะขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและฤดูกาลที่เปลี่ยนไปแสงอาทิตย์เกิดจากปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ในดวงอาทิตย์เมื่อแสงอาทิตย์เดินทางมาถึงนอกชั้นบรรยากาศของโลกจะมีความเข้มของแสงโดยเฉลี่ยประมาณ 1,350 วัตต์/ตารางเมตรแต่ถ้าจะลงมาถึงพื้นโลกพลังงานบางส่วนต้องสูญเสียไปเมื่อผ่านชั้นบรรยากาศต่างๆที่ห่อหุ้มโลกเช่นชั้นโอโซนชั้นไอน้ำชั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้ความเข้มของแสงลดลงเหลือประมาณ 1,000 วัตต์/ตารางเมตร (หรือประมาณร้อยละ 70)

ปริมาณแสงอาทิตย์ที่ได้รับบนพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งจะมีปริมาณสูงสุดเมื่อพื้นที่นั้นทำมุมตั้งฉากกับแสงอาทิตย์ดังนั้นหากต้องการให้พื้นที่ได้รับแสงอาทิตย์ได้มากที่สุดต่อวันก็จะต้องปรับพื้นที่รับแสงนั้นๆตามการเคลื่อนที่ของแสงอาทิตย์ซึ่งจะเคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปสู่ทิศตะวันตกเสมอนอกจากนั้นจากการที่โลกเอียงทำให้ซีกโลกเหนือหันหน้าเข้าหาดวงอาทิตย์ในฤดูร้อนและเอียงซีกโลกใต้หันหน้าเข้าหาดวงอาทิตย์ในฤดูหนาวดังนั้นเราจึงต้องปรับมุมพื้นที่รับแสงนั้นๆในแนวเหนือใต้ (มุมก้มและมุมเงย) ให้สอดคล้องตามฤดูกาลด้วยเพื่อให้พื้นที่นั้นๆรับแสงอาทิตย์ได้มากที่สุดตลอดทั้งปี

ในประเทศไทยมีการให้ความสนใจกับพลังงานจากแสงอาทิตย์กันมาก เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศในเขตเส้นศูนย์สูตรซึ่งได้รับแสงอาทิตย์ยาวนานตลอดทั้งปี โดยในปัจจุบันได้มีการผลิตอุปกรณ์ที่ใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ออกมามากมาย เช่น เครื่องคิดเลข เครื่องกรองน้ำ เครื่องทำความร้อน เครื่องอบผลผลิตทางการเกษตร เป็นต้น

“เซลล์แสงอาทิตย์” เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการนำสารกึ่งตัวนำเช่นซิลิคอนซึ่งมีราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนพื้นโลกนำมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ผลิตให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์และในทันทีที่มีแสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบที่เรียกว่า Photon จะถ่ายเทพลังงานให้กับ Electron ในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของ Atom และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระดังนั้นเมื่อ Electron มีการเคลื่อนที่ครบวงจรก็จะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น

องค์ประกอบหลักของ“เซลล์แสงอาทิตย์” คือสารกึ่งตัวนำ (Semi Conductors) 2 ชนิดมาต่อกันซึ่งเรียกว่า P-N Junction เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะถ่ายพลังงานให้อะตอมของสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดอิเล็กตรอนส์และโฮลส์อิสระไปรออยู่ที่ขั้วต่อดังนั้นเมื่อมีการเชื่อมกับวงจรภายนอกเช่นเอาหลอดไฟฟ้ามาต่อक्रमขั้วต่อก็เกิดการไหลของอิเล็กตรอนส์/โฮลส์ที่ให้พลังงานไฟฟ้ากระแสตรงกับวงจรภายนอกได้และจะให้พลังงานไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องครบเท่าที่ยังมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันทีหรือนำไปกักเก็บไว้ในแบตเตอรี่เพื่อใช้งานภายหลังได้ ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยส่วนมากจะนำซิลิกอนมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่พบได้มากบนโลก โดยแบ่ง ได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. แบบผลึกเดี่ยว (Single Crystal)

ประสิทธิภาพประมาณ 15-24% และตอบสนองต่อแสงในแถบความยาวคลื่นกว้าง โดยมีประสิทธิภาพดีในช่วงความยาวคลื่นยาว

2. แบบผลึกรวม (Poly Crystal)

ประสิทธิภาพประมาณ 10-17% และตอบสนองต่อแสงแถบความยาวคลื่นกว้าง

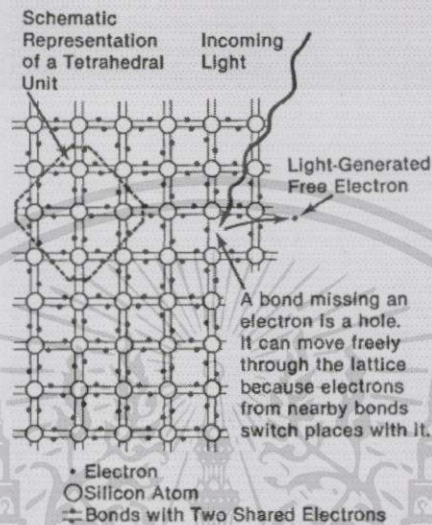
3. แบบอะมอร์ฟัส (Amorphous)

ประสิทธิภาพประมาณ 8-13% และตอบสนองต่อแสงในแถบความยาวคลื่นสั้น

หลักการการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ [1]

เมื่อแสงตกกระทบผลึกซิลิกอนแล้ว อาจจะสะท้อนกลับ ดูดซับ หรือทะลุลงไปก็ได้ แสงที่มีพลังงานต่ำจะไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า เพียงแต่จะทำให้เกิดความร้อนเท่านั้นเนื่องจากอะตอมเกิดการสั่นและมีการบิดตัว แสงที่มีพลังงานมากเพียงพอจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า เมื่อโฟตอนตกกระทบผลึกซิลิกอน อิเล็กตรอนจะได้รับการถ่ายเทพลังงานจากโฟตอน ซึ่งมากพอที่จะทำให้

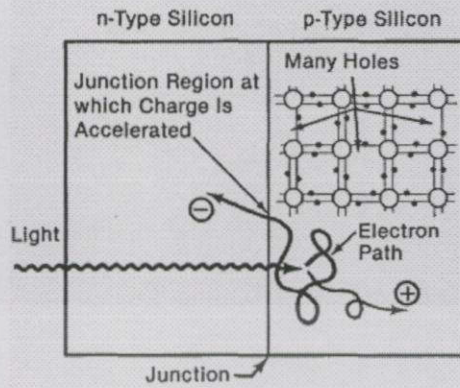
อิเล็กตรอนหลุดออกจากพันธะ และวิ่งอย่างอิสระไปรอบๆ ผลึกซึ่งเรียกว่าฟรีอิเล็กตรอน(free electron) สำหรับพันธะที่หลุดมาและไม่มีอิเล็กตรอนเกาะอยู่จะเรียกว่าโฮส (hole) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การกำเนิดคู่อิเล็กตรอน-โฮสจากพลังงานแสง

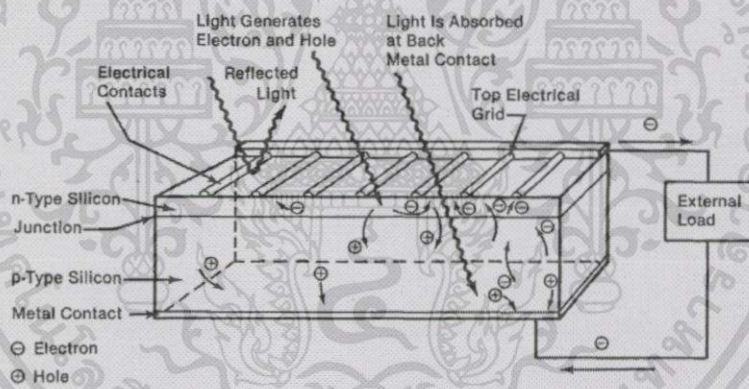
ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า การกำเนิดคู่อิเล็กตรอน-โฮสจากแสง(Light-Generated electron-hole pairs) องค์ประกอบภายในผลึกซิลิกอนประกอบด้วย n-type และ p-type ขบวนการข้างต้นเกิดขึ้นใน p-type อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกเร่งเพื่อให้ข้ามรอยต่อระหว่างพี-เอ็น (p-n junction) และวิ่งมาอยู่ในส่วน n-type เมื่อพิจารณาในด้าน n-type จึงเสมือนกับว่าโฮสได้วิ่งจาก n-type ไปยัง p-type

โฮสในผลึกซิลิกอนจะมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับอิเล็กตรอน สามารถเคลื่อนที่ไปรอบๆ ผลึกซิลิกอน เพราะฉะนั้นอิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณข้างเคียงก็สามารถมาจับกับโฮสที่ว่างอยู่ได้ซึ่งการจับคู่กันนี้เป็นแบบสุ่ม ไม่มีแบบแผนที่แน่นอน



รูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่อิสระของอิเล็กตรอนก่อนที่จะรวมตัวกับโฮล

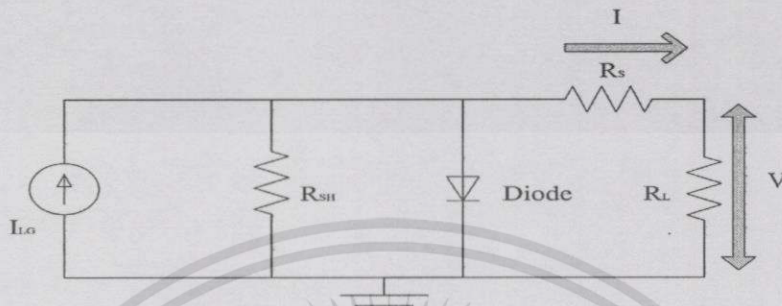
เมื่อมีการต่อ n-type กับ p-type ไปยังวงจรไฟฟ้าด้านนอก อิเล็กตรอนที่อยู่ในส่วน n-type จะวิ่งไปยังโหนดและกลับมาพบกับโฮลในส่วน p-type



รูปที่ 2.3 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะจ่ายโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบไดโอดเดี่ยว

มีตัวแปรอยู่ 2 ตัวที่มักจะใช้ในการบอกถึงคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ทำได้โดยการลัดวงจรขาเข้าของเซลล์แสงอาทิตย์เข้าด้วยกันกระแสที่วัดได้จากการผลิตด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นี้คือกระแสลัดวงจร (Short-circuit Current,  $I_{sc}$ ) ดังนั้น  $I_{LG} = I_{sc}$  เมื่อไม่มีการเชื่อมต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ (Open-circuit) แล้วกระแสที่ผลิตจากโฟตอนจะผ่าน p-n junction diode ซึ่งจะได้แรงดันวงจรเปิด (Open-circuit Voltage,  $V_{oc}$ ) [2]

สมการเอ็กซีโพเนนเชียลสำหรับวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่แสดงในรูปที่ 2.4 :

ความเข้มแสง และ อุณหภูมิของแผงเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการกำเนิดกำลังไฟฟ้าซึ่งเราจะนำมาพิจารณาด้วยการจำลองบนMATLAB/Simulink [2]

$$I = I_{LG} - I_{OS} [e^{\frac{q}{nkT_p}(V+I_{RS})} - 1] - \frac{V + I_{RS}}{R_{SH}} \tag{2.1}$$

$$I_{OS} = I_{OR} \left(\frac{T_p}{T_R}\right)^3 e^{\left[\frac{qE_{GO}}{Ak} \left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T}\right)\right]} \tag{2.2}$$

$$I_{LG} = [I_{SCR} + K(T_p - 25)] \frac{C}{100} \tag{2.3}$$

k - ค่าคงที่ของแก๊สของBoltmann's gas =  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K

$T_R$  - อุณหภูมิอ้างอิงของเซลล์แสงอาทิตย์ 300 K

$T_p$  - อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

$e$  - ประจุอิเล็กตรอน =  $1.602 \times 10^{-19}$  J/V

$V$  - แรงดันตกคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์(V)

$I_{SCR}$  - กระแสลัดวงจร

I-V - กระแสและแรงดันขาออกของแผง

$I_{OS}$  - กระแสมีด้อมตัวของแผง ซึ่ง ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิเป็นอย่างมาก (A)

$I_{OR}$  - กระแสมีด้อมตัวของแผง ซึ่ง ขึ้นอยู่กับค่า TR

$K$  - สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิลัดวงจร =  $0.0017$  (A/°C)

$C$  - ความเข้มแสง ( $W/m^2$ )

$I_{LG}$  - กระแสที่ผลิตจากแสงอาทิตย์

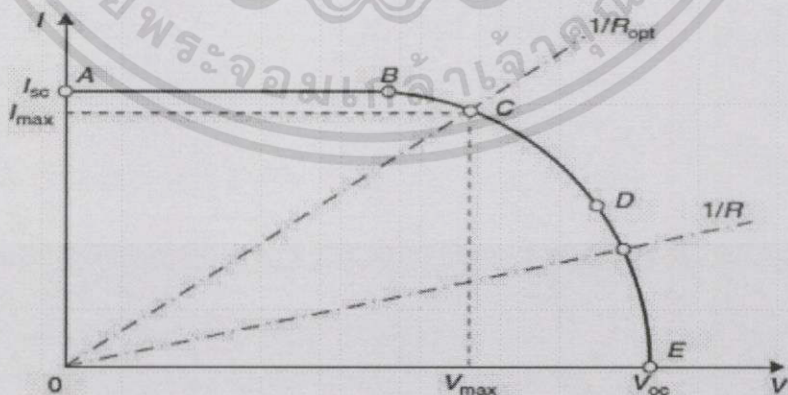
$E_{GO}$  - Band Gap Voltage = 1.1 eVสำหรับ Si

$A$  - ตัวประกอบคุณภาพไดโอด = 1.92

$R_s$  - ความต้านทานในการต่ออนุกรมกันของเซลล์แสงอาทิตย์ (Ohm)

$R_{SH}$  - Shunt Resistance ของเซลล์แสงอาทิตย์ (Ohm)

เมื่อลัดวงจรเซลล์แสงอาทิตย์กระแสจะมีค่าสูงสุดนั่นคือ  $I_{sc}$  ส่วนแรงดันตกคร่อมจะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อทำการเปิดวงจรเซลล์แสงอาทิตย์แรงดันจะมีค่าสูงสุดนั่นคือ  $V_{oc}$  ส่วนกระแสจะมีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 2.5 I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อกับความต้านทานปรับค่าได้, R จุดตัดของ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์กับ I-V ของโหลดจะเป็นจุดปฏิบัติการดังรูปที่ 2.5 กราฟของโหลดจะมีความชัน 1/R ถ้าโหลดมีค่าน้อยมากๆเซลล์แสงอาทิตย์จะทำงานในช่วงของ AB ซึ่งจะทำหน้าที่เหมือนกับแหล่งกำเนิดกระแสคงที่ที่เกือบจะเป็นกระแสลัดวงจร ในทางกลับกันถ้าโหลดมีค่ามากๆเซลล์แสงอาทิตย์จะทำงานในช่วงของ DE ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์จะทำหน้าที่เหมือนกับแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ที่เกือบจะเป็นแรงดันวงจรเปิด จุด C ในรูปที่ 2.5 เรียกว่าจุดกำลังสูงสุด ซึ่งเป็นจุดปฏิบัติการที่กำลังขาออกมีค่าสูงที่สุด ( $P_{max}$ ) [2]

$$P_{max} = I_{max} V_{max} \tag{2.4}$$

$$P_{max} = I_{sc} V_{oc} FF \tag{2.5}$$

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} V_{oc}} \tag{2.6}$$

แรงดันวงจรเปิดแรงดันที่ตกลงตกคร่อมไดโอดซึ่งถูกขวางด้วยกระแส  $I_{LG}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $I_{os}$  เมื่อกระแสที่ผลิตได้มีค่า  $I=0$  จะได้  $V_{oc}$  ว่า

$$V_{oc} = \frac{kT_R}{e} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_o} + 1\right) = V_t \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_o} + 1\right) \tag{2.7}$$

ซึ่ง  $V_t$  - แรงดันเนื่องจากอุณหภูมิจำกัด (V)

$$V_t = \frac{kT_R}{e} \tag{2.8}$$

ค่าคงที่ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในสมการข้างต้นสามารถหาได้จากการทดสอบอัตราการผลิตของเซลล์แสงอาทิตย์หรือการวัดค่า I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์

คุณลักษณะ I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงจากค่าความเข้มแสง  $G$  ( $W/m^2$ ) และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์  $t$  ( $^{\circ}C$ ) นั่นคือ  $I=f(V,G,t)$

ความสัมพันธ์ความเสื่อมถอยที่เป็นเชิงเส้นจากข้อมูลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ของ  $V_{oc}$  เนื่องจาก  $T_p$  จะได้ว่า

$$V_{oc} = 22.384 - 0.0627T_p \tag{2.9}$$

โดยที่  $T_p$  เป็น  $^{\circ}C$

ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มแสง ( $G$ ) และกระแสลัดวงจร ( $I_{SC}$ ) จะได้ว่า

$$I_{SC} = 0.0967 + 0.0032G \quad (2.10)$$

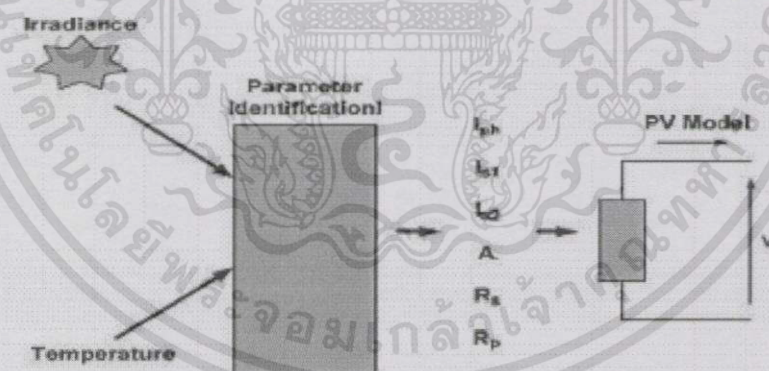
โดยที่  $G$  มีหน่วยเป็น  $W/m^2$

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเซลล์ด้วยอุณหภูมิล้อมรอบสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นได้ว่า

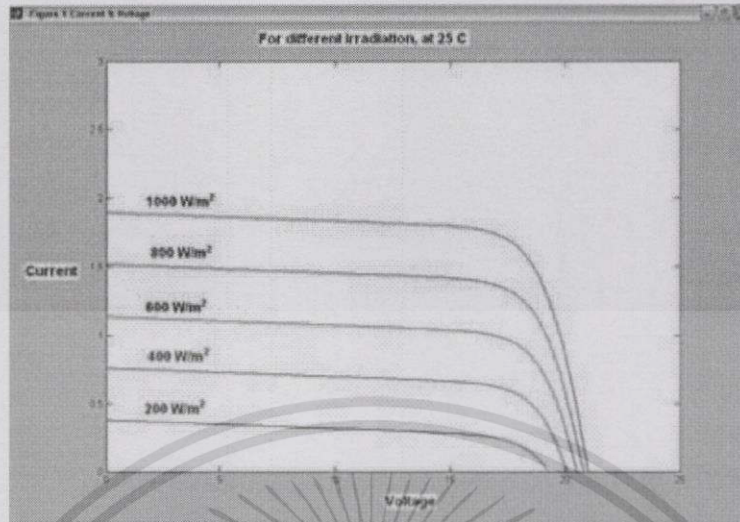
$$T_P = T_A + \left( \frac{T_P - T_A}{G} \right)_{standard} \times G \quad (2.11)$$

ค่าในวงเล็บนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้แบบใด ในที่นี้จะพบว่ามีค่า  $0.022^\circ C m^2 / W$  จากการทดสอบที่การทำงานปกติ หากใช้วิธีลดความร้อนลงด้วยน้ำค่าในวงเล็บจะมีค่า  $0.006^\circ C m^2 / W$

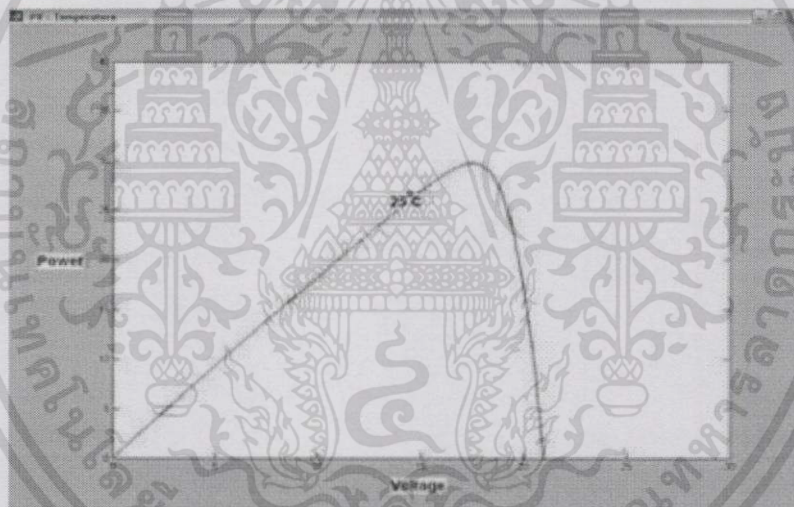
ความเข้มแสงจะมีผลกระทบมากกว่าอุณหภูมิ โดยปกติแล้วแรงดันจะลดลงจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ผลคือกำลังจะลดลง ตัวอย่างการทดลองของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหลายผลึกทำงานที่  $45^\circ C$  จะผลิตกำลังได้ต่ำลงไป 10% จากที่คาดคะเนไว้ที่อัตราเงื่อนไขทดสอบปกติ [2]



รูปที่ 2.6 รูปแบบของเซลล์แสงอาทิตย์

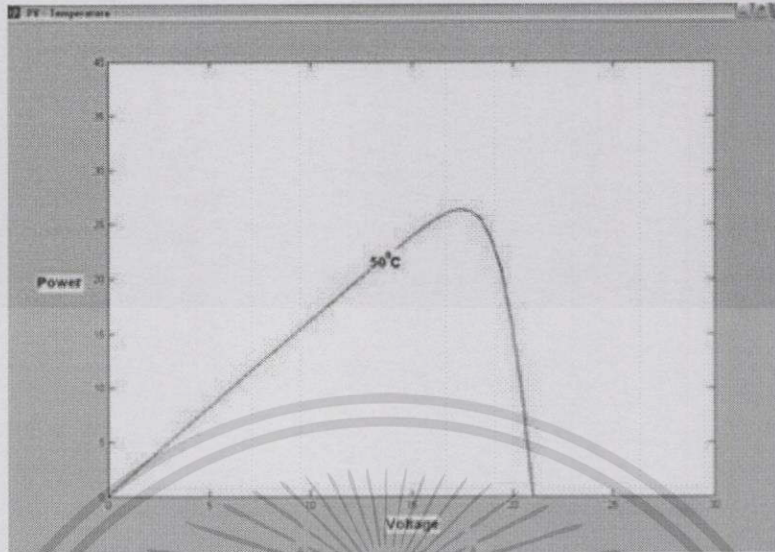


รูปที่ 2.7 MATLAB I-V Curve ที่  $T_p=25^\circ\text{C}$ ,  $G=1000; 800; 600; 400; 200 \text{ W/m}^2$



รูปที่ 2.8 MATLAB P-V Curve ภายใต้เงื่อนไข  $G=1000 \text{ W/m}^2$  และ  $T_p=25^\circ\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 MATLAB P-V Curve ภายใต้เงื่อนไข  $G=1000 \text{ W/m}^2$  และ  $T_p=50^\circ\text{C}$

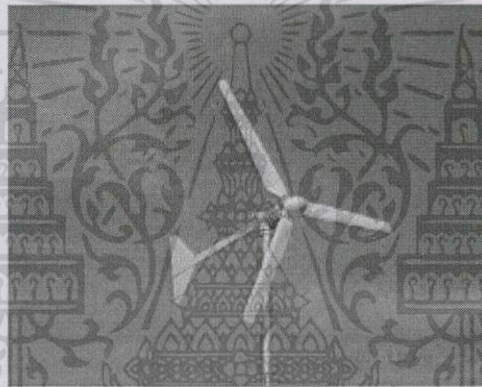
จากการจำลองในรูปที่ 2.6 บอกถึงค่าพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ตัวแปรขาเข้าที่สำคัญสำหรับการจำลองนี้คือ ความเข้มของแสงอาทิตย์และ อุณหภูมิของแผงเซลล์ รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงค่าของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของเซลล์แสงอาทิตย์แปรผันตามความเข้มแสงที่แผงเซลล์ได้รับ รูปที่ 2.8 เมื่อทำการจำลอง ภายใต้เงื่อนไข  $G=1000 \text{ W/m}^2$  และ  $T_p=25^\circ\text{C}$  จะได้ผลของกำลังไฟฟ้าตามรูปที่ 2.8 และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุด คือ  $30 \text{ W}$  เมื่อ  $V_{oc}=20.81$  รูปที่ 2.9 แสดงกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์ผลิตได้ ภายใต้เงื่อนไข  $G=1000 \text{ W/m}^2$  และ  $T_p=50^\circ\text{C}$  กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุด คือ  $26.62 \text{ W}$  เมื่อ  $V_{oc}=19.24 \text{ V}$  รูปที่ 2.7 และสมการที่ 2.9 แสดงถึงว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แผงเซลล์ผลิตได้แปรผกผันกับอุณหภูมิของแผงเซลล์

### 2.1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม[2]

ลมเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติโดยการเกิดลมและการเคลื่อนที่ของลมเป็นผลมาจากความแตกต่างของความกดอากาศซึ่งสามารถอธิบายได้โดยทฤษฎีทางฟิสิกส์ นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับ ความทรงตัวของสภาพอากาศ ความแตกต่างของอุณหภูมิ สิ่งกีดขวาง และสภาพความขรุขระของผิวพื้น ฯลฯ ซึ่งเหล่านี้เป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเร็วลม และกำลังลม ซึ่งลมสามารถแปรรูปเป็นพลังงานที่ใช้ทดแทนพลังงานทดแทนอื่นได้ ลมจึงกลายมาเป็นพลังงานทดแทนที่ได้รับความสนใจ และนำประโยชน์จากพลังงานลมมาใช้มากขึ้น เนื่องจากพลังงานลมเป็นพลังงานสะอาด ไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนแวดล้อม ปัจจุบันจึงสามารถพบเห็นโรงไฟฟ้าพลังงานลมได้มากโดยจะนำลมมาผลิตไฟฟ้าจ่ายให้กับชุมชนและประเทศ

กังหันลมผลิตไฟฟ้า (Wind turbine) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยน พลังงานลมให้เป็น พลังงานไฟฟ้า โดยผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า(Generator) ที่อยู่ภายในกังหันลมผลิตไฟฟ้า ซึ่งไฟฟ้าที่ได้จาก กังหันลมนั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง จะผ่านเครื่องประจุกระแสไฟฟ้า (Wind turbine charge control) ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุม การชาร์จไฟฟ้า จากกังหันลมลงสู่แบตเตอรี่ แบตเตอรี่จะทำหน้าที่เก็บพลังงาน ทั้งหมดไว้ ในการใช้งานนั้นส่วนใหญ่เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้นั้นจะเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ จึงต้องใช้ อินเวอร์เตอร์(Inverter) เพื่อแปลงกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 220V เพื่อให้ใช้งาน กับเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆได้

กังหันลมที่ใช้ผลิตไฟฟ้าเป็นกังหันลมชนิดแนวแกนนอนดังรูปที่ 2.10 ซึ่งมีแกนหมุนขนานกับ ทิศทางลม มีใบพัดเป็นตัวตั้งฉากกับแรงลม มีทางเสื่อควบคุมกังหันให้เป็นที่ไปตามทิศทางของกระแสลม



รูปที่ 2.10 กังหันลมชนิดแนวแกนนอน

วิธีการคัดเลือกกังหันลมและการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันผลิตได้

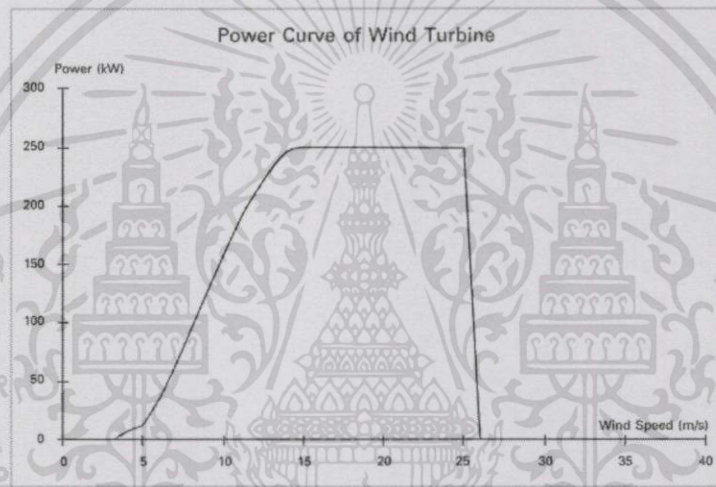
1. กำหนดตำแหน่งที่จะติดตั้งกังหันลม และตรวจสอบความเร็วลมเฉลี่ยจากตาราง Wind Power Class ในแผนที่ศักยภาพพลังงานลม
2. เลือกขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมจากข้อมูลของผู้ผลิตซึ่งจะมี Power Curve มาให้ด้วย
3. คำนวณพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ในรอบปีโดยใช้ Rayleigh Distribution ( $K=2$ ) หาค่าความถี่ของลมที่เกิดขึ้นในรอบปี (8,760 ชั่วโมง) จากสมการ

$$\text{Accumulative time at } U \text{ or below} = 1 - e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{U_a}\right)^2} \quad (2.12)$$

โดยที่  $U$  คือ Bin Speed ตั้งแต่ 1-25 m/s

$U_a$  คือ ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งปีที่ Lower Limit จากตาราง Wind Power Class

การประมาณการพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เมื่อแปลงข้อมูลความเร็วลมใน Wind Speed Frequency Distribution ที่ได้จากการตรวจวัดตลอดเวลา 1 ปี แล้ว จึงนำไปประมาณการพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยคำนวณจาก Power Curve ของกังหันลม ซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะของกังหันลมแต่ละยี่ห้อ และรุ่นที่กำหนดไว้ ตัวอย่างเช่น รูปที่ 2.13 เป็น Power Curve ของกังหันลม แสดงลักษณะการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมตัวนี้



รูปที่ 2.11 Power Curve ของกังหันลม

จากรูปที่ 2.11 จะมีช่วงที่กำลังไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ไม่เท่ากันซึ่งขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของกังหันลมแต่ละรุ่น แต่ละยี่ห้อ ว่ามีการตั้งค่าการทำงานไว้อย่างไรดังจะได้อธิบายต่อไปนี้

- Cut In Speed คือ ความเร็วลมที่ต่ำที่สุดที่กังหันลมสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ โดยจากรูปที่ 2.11 จะมี Cut In Speed ประมาณ 3 m/s หากความเร็วลมต่ำกว่าค่านี้กังหันลมจะไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้
- Rated Speed คือ ความเร็วลมที่กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงที่สุด จากรูปที่ 2.11 จะเห็นว่าเมื่อความเร็วลมสูงกว่า Cut In Speed กังหันลมจะเริ่มผลิตกำลังไฟฟ้า (Production Capacity) และกำลังผลิตจะเพิ่มสูงขึ้นไปเรื่อยๆตามความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น จนเมื่อความเร็วลมถึงระดับของ Rated Speed ของกังหันลม คือ ประมาณ 14 m/s กังหันลมจะผลิตกำลังไฟฟ้าที่คงที่แม้ว่าความเร็วลมจะสูงขึ้นและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตนั้นจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

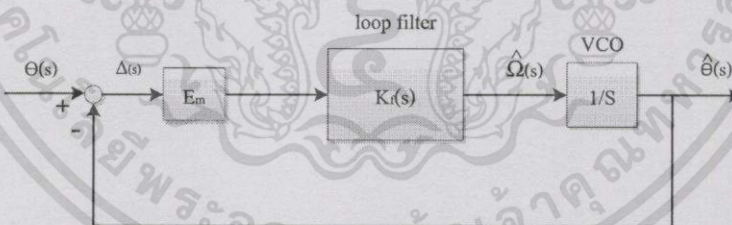
เป็นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่กังหันลมสามารถผลิตได้ ซึ่งจากรูปที่ 2.11 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ของกังหันลมตัวอย่างนี้อยู่ที่ 250 kW

- Cut Out Speed คือ ความเร็วลมที่กังหันจะหยุดการทำงาน เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับโครงสร้างของกังหันลม จากรูปที่ 2.11 ที่ความเร็วลมที่มากกว่า 25 m/s กำลังไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด นั่นคือกังหันลมหยุดการทำงานในระดับความเร็วลมนี้

ในการประมาณกำลังไฟฟ้า (kWh) ที่ผลิตได้ของกังหันลมสามารถประมาณได้จากการนำผลของค่าการกระจายของความเร็วลม (Speed Frequency Distribution:hour) คูณกับ กำลังไฟฟ้าจาก Power Curve (kw) แต่ค่าที่ทำได้นี้ยังไม่รวมค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ (ค่าความสูญเสียใน Generator, Mechanical part, Aerodynamic part, ระบบการส่งจ่ายไฟฟ้า รวมทั้งระบบควบคุม และความแปรปรวนของอากาศ) ดังนั้น หากต้องการหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตออกมาได้จริง ต้องคูณด้วย Efficiency factor ของกังหันลมเข้าไปด้วย

## 2.2 เฟสล็อกลูป [1]

เฟสล็อกลูป (Phase-Lock Loop) เป็นระบบควบคุมความถี่โดยใช้วิธีเปรียบเทียบเฟส (Phase) ของความถี่ทางด้านเอาต์พุตกับเฟสของความถี่อ้างอิง (Reference Frequency) ซึ่งถูกป้อนเข้าทางด้านอินพุตของระบบ ในรูปที่ 2.12 เป็นแผนผังของ PLL เบื้องต้น



รูปที่ 2.12 วงจร Phase-Lock Loop เบื้องต้น

### 2.2.1 หลักการทำงานของเฟสล็อกลูป

- วงจรตรวจจับเฟส/ความถี่ (Phase Detector) ทำหน้าที่ เปรียบเทียบความแตกต่างของเฟส ( $\theta_e$ ) หรือ ความถี่ ระหว่างสัญญาณอินพุต ( $V_{in}$ ) และสัญญาณจากวงจรรอสซิลเลเตอร์ ( $V_{osc}$ ) โดยมีสัญญาณเอาต์พุต คือ สัญญาณผิดพลาด (Error Signal)
- วงจรกรอง (Loop Filter) ทำหน้าที่กำจัดองค์ประกอบความถี่สูงที่รวมมากับสัญญาณผิดพลาด (Error Signal)

- วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมโดยแรงดัน (Voltage-Controlled Oscillator, VCO) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณเอาต์พุตไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต ( $V_{in}$ ) โดยความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเปลี่ยนไปตามแรงดัน  $U_0$

- PLL อยู่ในสภาวะล็อก เมื่อความถี่ของ VCO มีค่าเท่ากับความถี่เฉลี่ยของสัญญาณอินพุต

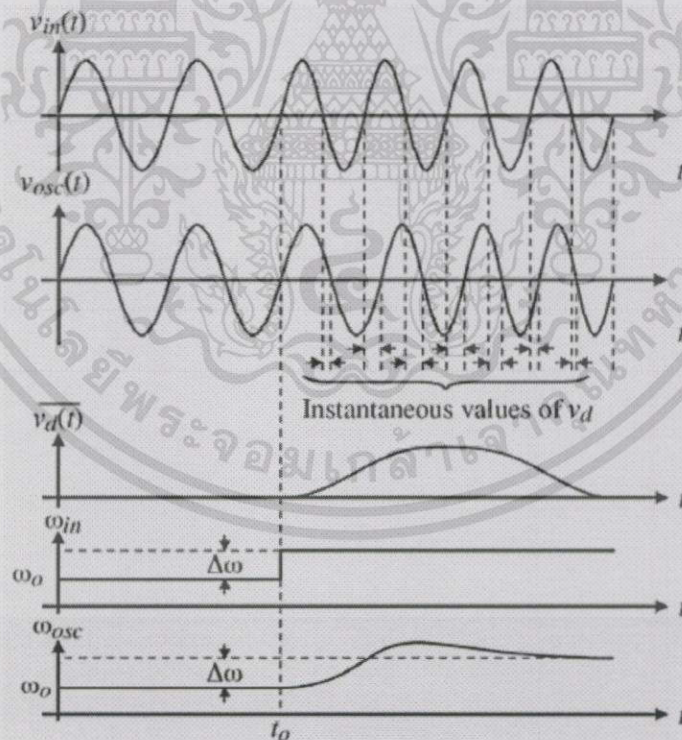
- PLL ในสภาวะไม่ล็อก จะมีความถี่ของ VCO มีค่าเท่ากับความถี่วงอิสระ

- กระบวนการจับ (Capture Process) คือการที่ PLL เปลี่ยนจากสภาวะไม่ล็อกเป็นสภาวะล็อก

- ในสภาวะล็อก ค่าความต่างเฟสอาจมีค่าเป็นศูนย์ หรือมีค่าคงที่ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวงจรกรอง

- จากรูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างสัญญาณใน PLL ขณะที่เกิดการจับสัญญาณ เมื่อ  $\omega_{in}$  เพิ่มขึ้น  $\Delta\omega$  ณ เวลา  $t_0$

-  $V_{in}$  จะมีเฟสหน้า  $V_{osc}$  ทำให้  $V_d$  มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านระยะเวลาหน่วงโดยวงจรกรอง ความถี่ของ VCO จะสูงขึ้นทำให้ความต่างเฟสของ  $V_{in}$  และ  $V_{osc}$  ลดลงจน PLL เข้าสู่สภาวะล็อก



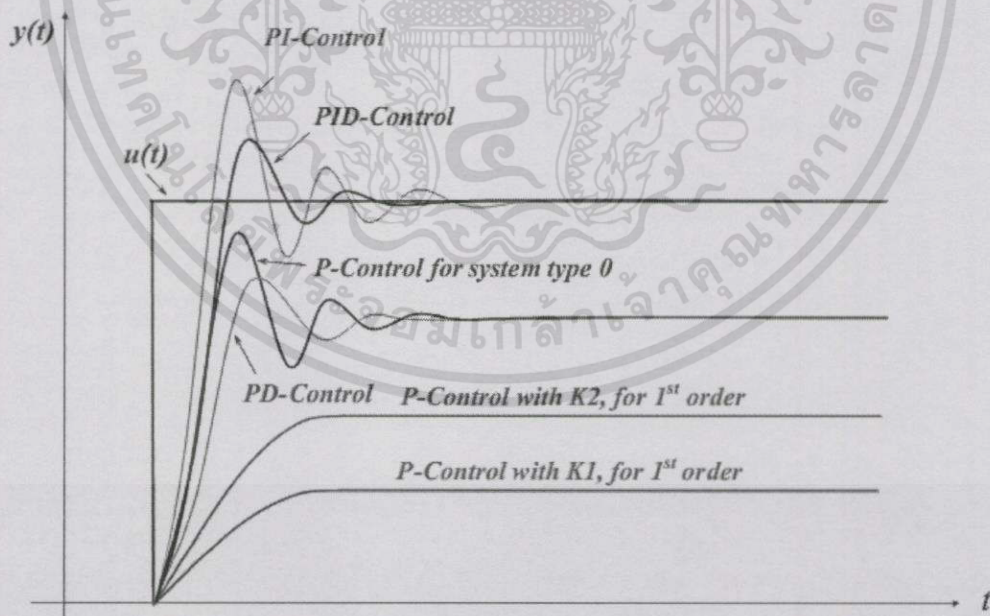
รูปที่ 2.13 การจับสัญญาณ (Capture Process) ของเฟสล็อก

รูปที่ 2.13 นี้แสดงให้เห็นการจับสัญญาณของเฟสล็อกกลุของสัญญาณเมื่อมีการเปลี่ยนมุมเฟสของสัญญาณขาเข้า สัญญาณขาออกก็จะมีกรปรับเฟสด้วยการทำงานของเฟสล็อกกลุจนสุดท้ายมีมุมเฟสที่ตรงกันกับมุมเฟสของสัญญาณขาเข้า

## 2.2.2 ตัวควบคุมอัตโนมัติ

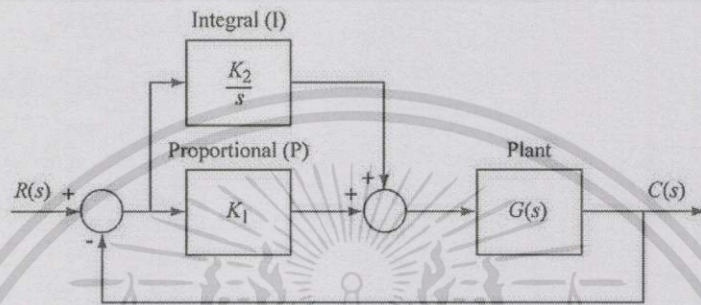
ตัวควบคุมอัตโนมัติ ทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณทางออก (Output) ของระบบกับสัญญาณทางเข้า (Input) หรือค่าอ้างอิง (Reference) ค่าคงที่ของระบบ ผลของการเปรียบเทียบที่ได้คือค่าเบี่ยงเบนหรือค่าผิดพลาด (Error) หลังจากนั้นตัวควบคุมอัตโนมัติจะนำค่าเบี่ยงเบนไปสร้างเป็นสัญญาณขึ้นมาใหม่ เพื่อควบคุมให้ระบบลดการเบี่ยงเบนหรือลดค่าผิดพลาดลง [3] ซึ่งสามารถแบ่งตัวควบคุมอัตโนมัติออกเป็นแบบต่างๆ ได้ดังนี้

1. ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Controller หรือ P Controller)
2. ตัวควบคุมแบบสัดส่วน ร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย (PI Controller)
3. ตัวควบคุมแบบสัดส่วน ร่วมกับแบบอนุพันธ์ (PD Controller)
4. ตัวควบคุมแบบสัดส่วน ร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย ร่วมกับแบบอนุพันธ์ (Proportional plus Integral plus Derivative Controller หรือ PID Controller)



รูปที่ 2.14 เปรียบเทียบผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบต่างๆ

จากรูปที่ 2.14 แสดงผลตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดที่ต่างกันโดยตัวควบคุมแบบสัดส่วน ร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย (PI Controller) เป็นตัวควบคุมที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่มีคุณลักษณะของตัวควบคุมเหมาะสมกับหลายๆระบบ มีสมรรถนะที่ดีและไม่ซับซ้อนมากนัก



รูปที่ 2.15 Block Diagram ของ PI Controller

ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Controller หรือ P Controller)

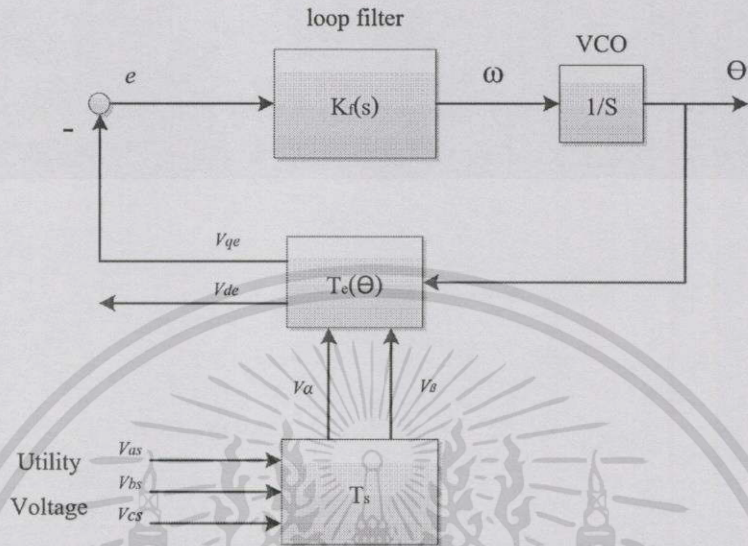
- เพิ่มความเร็วในการตอบสนองของระบบ
- ลดค่าความผิดพลาดที่สภาวะอยู่ตัวของระบบ

ตัวควบคุมแบบบูรณาการรวมหน่วย (Integral Controller หรือ I Controller)

- ลดค่าความผิดพลาดที่สภาวะอยู่ตัวของระบบให้น้อยลงจนหมดไป
- มีผลให้ความเร็วในการตอบสนองของระบบลดลง

ค่าผิดพลาด (Error) จะไปบังคับให้ระบบ (G(s)) สร้างสัญญาณขึ้นมาใหม่ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง (R(s)) ไปเรื่อยๆจนค่าผิดพลาดลดลงเป็นศูนย์หรือน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

2.2.3 Three-Phase Phase-Lock Loop [4]



รูปที่ 2.16 Block Diagram ของวงจร Three-Phase Phase-Lock Loop

จากรูปที่ 2.16 แสดงถึงการใช้ Phase-Lock Loop ในการควบคุมแรงดัน 3 เฟส โดยแรงดันของทั้ง 3 เฟสแสดงได้ดังสมการที่ (2.13)

$$v_{acb} = V_m \cdot \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \tag{2.13}$$

สมการที่ (2.13) เป็นค่าของแรงดันสามเฟสสมมูลสามารถแปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งได้โดยสมการที่ (2.15)

$$v_{\alpha\beta} = T_s \cdot v_{abc} \tag{2.14}$$

โดย  $v_{\alpha\beta} = [v_\alpha \ v_\beta]^T$  และ  $T_s$  กำหนดในรูปของเมตริกซ์ได้ว่า

$$T_s = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \tag{2.15}$$

สามารถเขียนใหม่ในรูปกรอบอ้างอิงซิงโครนัสโดยใช้ด้านออกของ PLL  $\hat{\theta}$

$$v_{qde} = Te(\hat{\theta}) \cdot v_{\alpha\beta} \quad (2.16)$$

โดย  $v_{qde} = [v_{qe} \ v_{de}]^T$  และ  $Te(\hat{\theta})$  เขียนในรูปเมตริกซ์หมุนโดย

$$Te(\hat{\theta}) = \begin{pmatrix} \cos \hat{\theta} & -\sin \hat{\theta} \\ \sin \hat{\theta} & \cos \hat{\theta} \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.13) ถึง (2.17) จะได้

$$v_{qe} = E_m \sin \delta = e \quad (2.18)$$

$E_m = -V_m$  และ  $\delta = \theta - \hat{\theta}$  ความถี่เชิงมุมของระบบ PLL ก็คือ

$$\hat{\omega} = \frac{d\hat{\theta}}{dt} = K_f(s) \cdot e \quad (2.19)$$

$K_f$  คือ ตัวขยาย (Gain) ของวงจรรอง (Loop Filter) ถ้าสมมติว่ามุมต่างเฟส  $\delta$  มีขนาดเล็กมากสมการที่ (2.15) จะได้ว่า

$$e \cong E_m \delta \quad (2.20)$$

ทำให้ความถี่  $\hat{\omega}$  และมุมเฟส  $\hat{\theta}$  สามารถติดตามความถี่  $\omega$  และมุมเฟส  $\theta$  ของระบบได้ โดยการออกแบบ Loop Filter ที่เหมาะสม สำหรับ Proportional-integral (PI) Filter สำหรับ Second order loop สามารถเขียนเป็นกรณีบนช่วงเวลาต่อเนื่อง (Continuous-Time Domain)

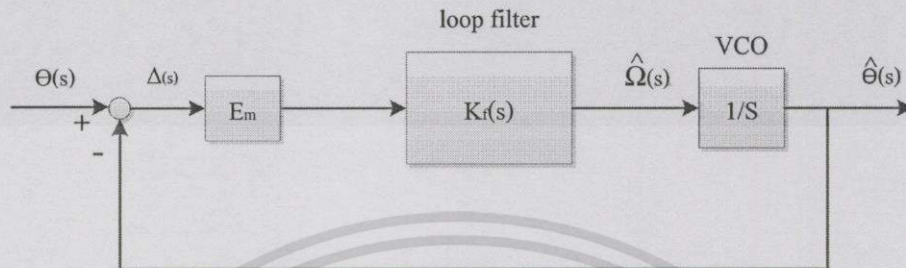
$$K_f(s) = K_p \cdot \left( \frac{1+sT}{sT} \right) \quad (2.21)$$

โดยที่  $K_p$  และ  $T$  คือ ตัวขยายของ PI Filter ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของวงรอบปิดสามารถเขียนใหม่ในรูปทั่วไปของ Second order Loop ได้ว่า

$$Hc(s) = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.22)$$

$$Hc(s) = \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.23)$$

ค่าที่คำนวณได้นี้สามารถนำมาเขียนเป็น Block Diagram ได้ดังรูปที่ 2.17 แสดงการทำงานของ Phase-Lock Loop



รูปที่ 2.17 ระบบเชิงเส้นของ PLL

กรณีช่วงเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete-Time Domain)

$$Kd(z) = Kp \frac{z(z-\alpha)}{(z-1)^2} \quad (2.24)$$

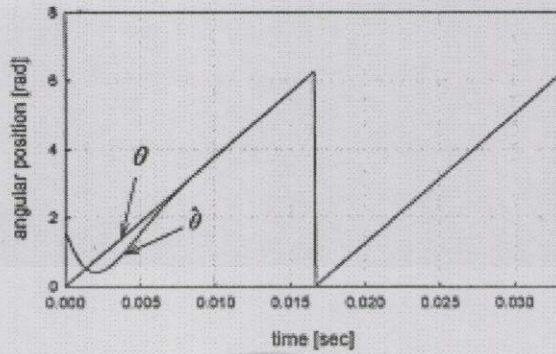
โดยที่  $\alpha = 1-T/T$  และ  $T$  คือ Sampling period ของระบบดิจิทัล และ  $\alpha$  คือ smoothing factor มีค่า  $0 \leq \alpha \leq 1$  ของระบบปิดบนช่วงเวลาไม่ต่อเนื่องสามารถเขียนได้ว่า

$$H_c(z) = H_{cm} \frac{z(z-\alpha)}{z^2 - az + b} \quad (2.25)$$

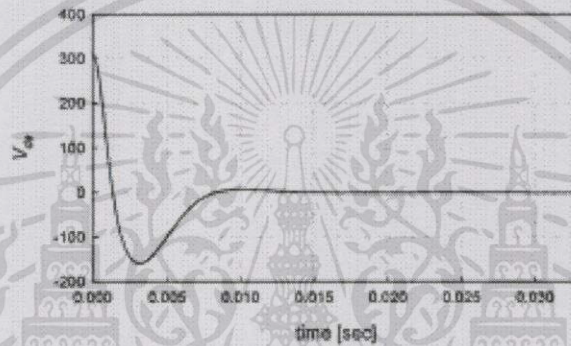
โดยที่

$$H_{cm} = \frac{E_m K_p}{1 + E_m K_p}, \quad a = \frac{2 + E_m K_p \alpha}{1 + E_m K_p}, \quad b = \frac{1}{1 + E_m K_p} \quad (2.26)$$

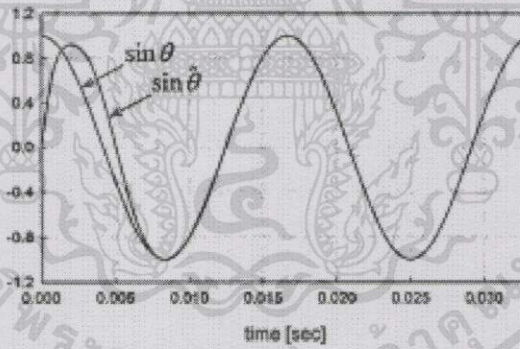
การจำลองการทำงานของ Phase-Lock Loop สามารถเก็บผลได้ดังแสดงดังรูปที่ 2.18 รูปที่ 2.18(a) แสดงมุมของที่ออกจาก Phase-Lock Loop เพื่อนำไปใช้ในการสร้างสัญญาณให้มีเฟสตรงกับสัญญาณอ้างอิงขาเข้า รูปที่ 2.18(b) แสดงแรงดันแกน  $q$  ใน Phase-Lock Loop รูปที่ 2.18(c) แสดงสัญญาณที่นำมุม THETA ที่ได้จาก Phase-Lock Loop มาสร้างสัญญาณนั้นเทียบกับสัญญาณอ้างอิงขาเข้า Phase-Lock Loop



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 2.18 การจำลองผลลัพธ์ของ Three-Phase PLL ( $\zeta = 0.707, \omega_n = 628 \text{ rad/sec}$ )  
 (a) ตำแหน่งเชิงมุม (b) แรงดันแกน dq (c) ฟังก์ชัน sin ใช้ค่าของ  $\theta$  และ  $\hat{\theta}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 สเปซเวกเตอร์และทฤษฎีกรอบอ้างอิง [5]

### 2.3.1 สเปซเวกเตอร์ (Space Vector)

พิจารณาสัญญาณของตัวแปรหนึ่งเฟสซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันโคไซน์และมีความถี่เท่ากับ  $f$  ซึ่งเมื่อคำนวณค่าความถี่ในรูปของ rad/s จะได้ค่าความถี่เท่ากับ  $\omega_{ef}$  ดังนั้นสมการของตัวแปรเป็นดังสมการ

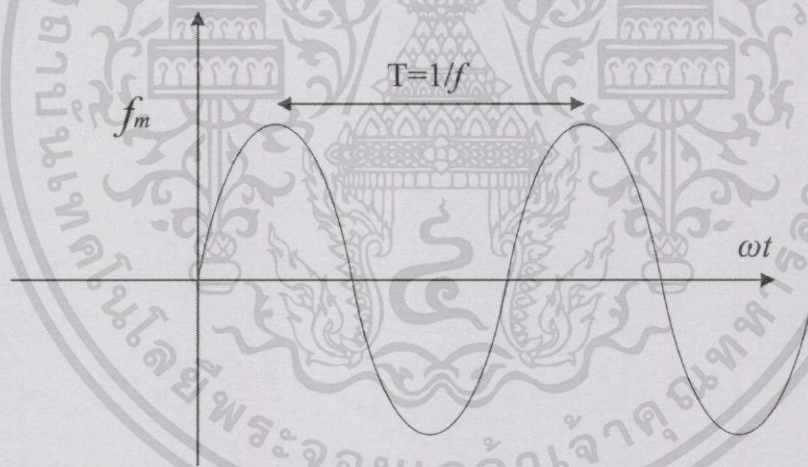
$$f_{sa}(t) = f_m \cos(\omega_{ef}t) \quad (2.27)$$

โดยที่

$f_m$  แทนค่าแอมพลิจูดของตัวแปร  $f$

$\omega_{ef}$  แทนค่าความเร็วเชิงมุมหรือความถี่ในหน่วย rad/s

ซึ่งรูปคลื่นของสมการดังกล่าวเป็นไปดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 สัญญาณโคไซน์

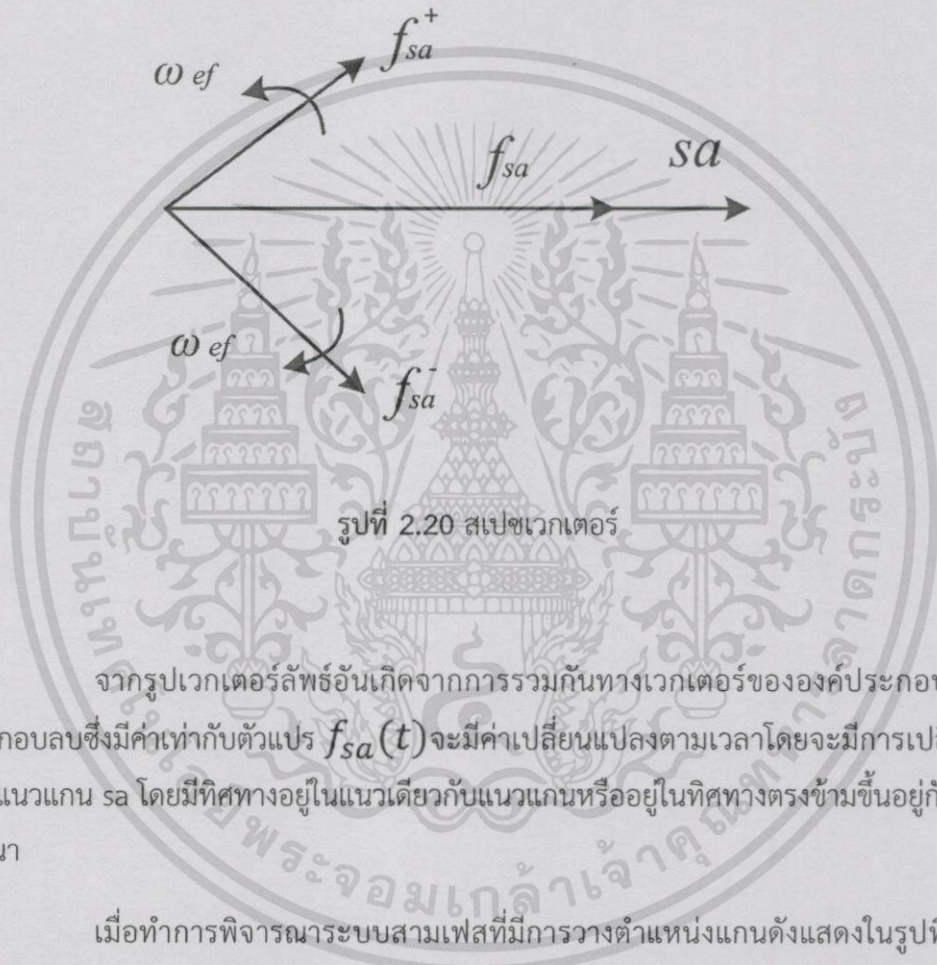
จากสูตรของออยเลอร์(Euler's formula) เมื่อทำการแปลงสมการโคไซน์ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลจะได้

$$f_{sa}(t) = f_m \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2} \quad (2.28)$$

$$f_{sa}(t) = f_{sa}^+ + f_{sa}^- \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะพบว่าสามารถแบ่งออกได้เป็นสององค์ประกอบโดยองค์ประกอบที่มีขนาดเท่ากัน แต่มีทิศทางในการหมุนแตกต่างกันโดยองค์ประกอบบวกจะหมุนทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และองค์ประกอบลบจะหมุนตามเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 สเปซเวกเตอร์

จากรูปเวกเตอร์ลัพธ์อันเกิดจากการรวมกันทางเวกเตอร์ขององค์ประกอบบวกและองค์ประกอบลบซึ่งมีค่าเท่ากับตัวแปร  $f_{sa}(t)$  จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดในแนวแกน sa โดยมีทิศทางอยู่ในแนวเดียวกับแนวแกนหรืออยู่ในทิศทางตรงข้ามขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่พิจารณา

เมื่อทำการพิจารณาระบบสามเฟสที่มีการวางตำแหน่งแกนดังแสดงในรูปที่ 2.21 จะพบว่า แกน b จะนำหน้าแกน a เป็นมุม  $120^\circ$  และแกน c จะตามหลังแกน a เป็นมุม  $120^\circ$  และในกรณีดังกล่าวตัวแปรในแต่ละแกนจะเป็นไปตามสมการที่ 2.29-2.31

$$f_{sa}(t) = f_m \cos \omega_{ef} t = \frac{1}{2} f_m (e^{j\omega_{ef} t} + e^{-j\omega_{ef} t}) \quad (2.29)$$

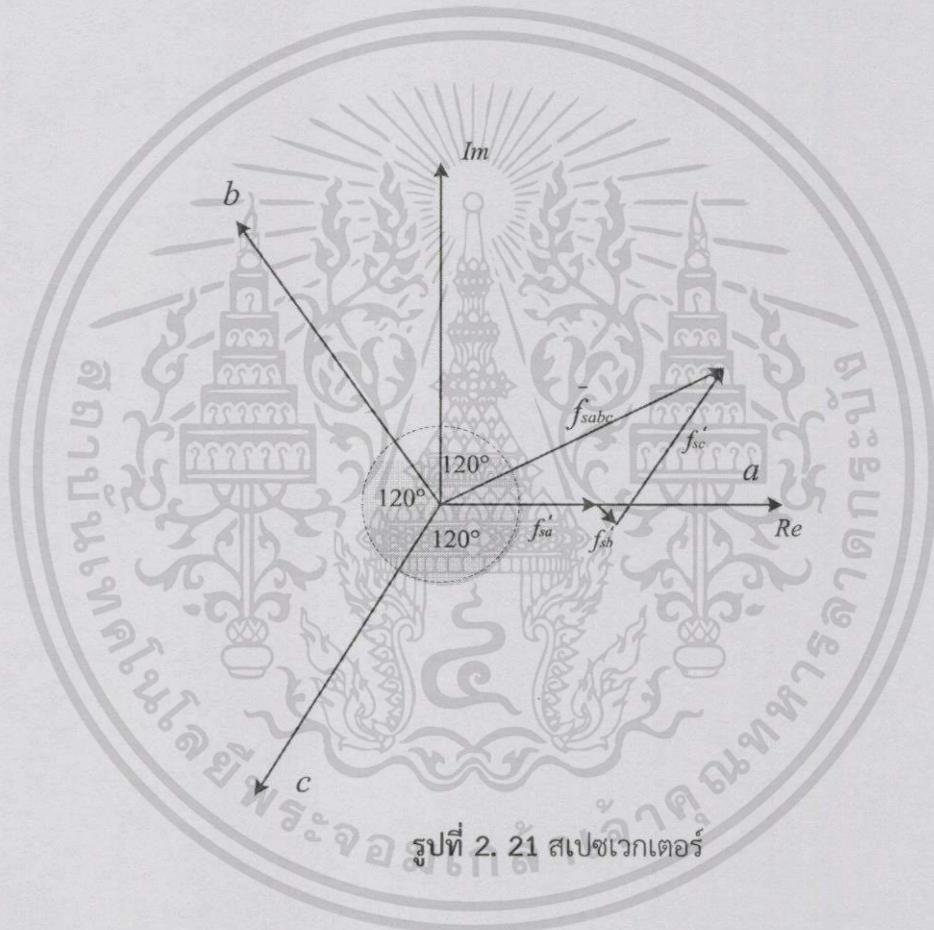
$$f_{sb}(t) = f_m \cos(\omega_{ef} t - \frac{2\pi}{3}) = \frac{1}{2} f_m (e^{j(\omega_{ef} t - \frac{2\pi}{3})} + e^{-j(\omega_{ef} t - \frac{2\pi}{3})}) \quad (2.30)$$

$$f_{sc}(t) = f_m \cos(\omega_{ef} t - \frac{4\pi}{3}) = \frac{1}{2} f_m (e^{j(\omega_{ef} t - \frac{4\pi}{3})} + e^{-j(\omega_{ef} t - \frac{4\pi}{3})}) \quad (2.31)$$

จากสมการที่ 2.29-2.31 เมื่อนำตัวแปรแต่ละตัวมารวมกันทางเวกเตอร์จะได้สเปซเวกเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งสมการของสเปซเวกเตอร์ เป็นไปดังสมการที่ 2.21

$$\vec{f}_{sabc}(t) = f_{sabc}(t)e^{j\omega_e t} = \frac{2}{3}(f_{sa}(t) + \vec{a}f_{sb}(t) + \vec{a}^2 f_{sc}(t)) \quad (2.32)$$

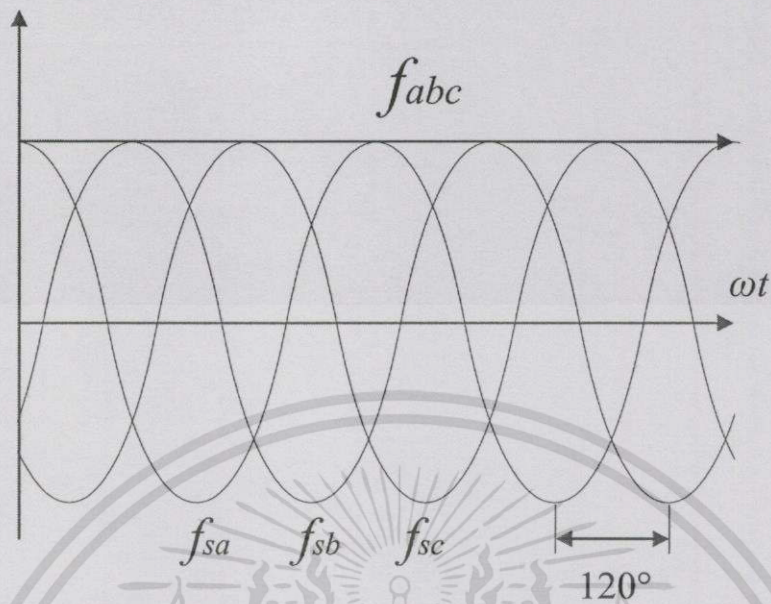
โดยที่  $\vec{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$  และ  $f$  แทนตัวแปรใดๆ ได้แก่ แรงดัน กระแส ฟลักซ์เกี่ยวกับคล็อง และประจุ



รูปที่ 2. 21 สเปซเวกเตอร์

โดยที่  $f_{sj} = \frac{2}{3} f_{sj}$  และ  $j = a, b$  หรือ  $c$

พิจารณาสเปซเวกเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.21 เกิดจากการรวมกันทางเวกเตอร์ของเวกเตอร์ของตัวแปรที่สมดุลกันในแนวแกน  $a$ ,  $b$  และ  $c$  โดยที่ค่าของตัวแปรในแต่ละแนวแกนนั้นจะมีความอยู่ในการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรูปแบบไซน์ซอไซด์ ซึ่งโดยทิศทางของเวกเตอร์ในแต่ละแนวแกนนั้นจะมีทิศทางไปในทางเดียวกับแนวแกนหรือกลับทิศขึ้นอยู่กับมุมเวกเตอร์ที่กวาดไป และขนาดจะเปลี่ยนแปลงตามมุมของเวกเตอร์เช่นกัน รูปคลื่นของตัวแปรสามเฟสสมดุลย์เป็นไปดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 รูปคลื่นของตัวแปรสมมูลในกรอบอ้างอิงสามเฟส

เวกเตอร์ดังกล่าวจะหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากับ  $\omega_{ef}$  ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา โดยความเร็วเชิงมุมดังกล่าวขึ้นอยู่กับความถี่ของตัวแปรที่พิจารณา โดยภายใต้สภาวะคงตัวเวกเตอร์ดังกล่าวจะมีขนาดคงที่ตลอด

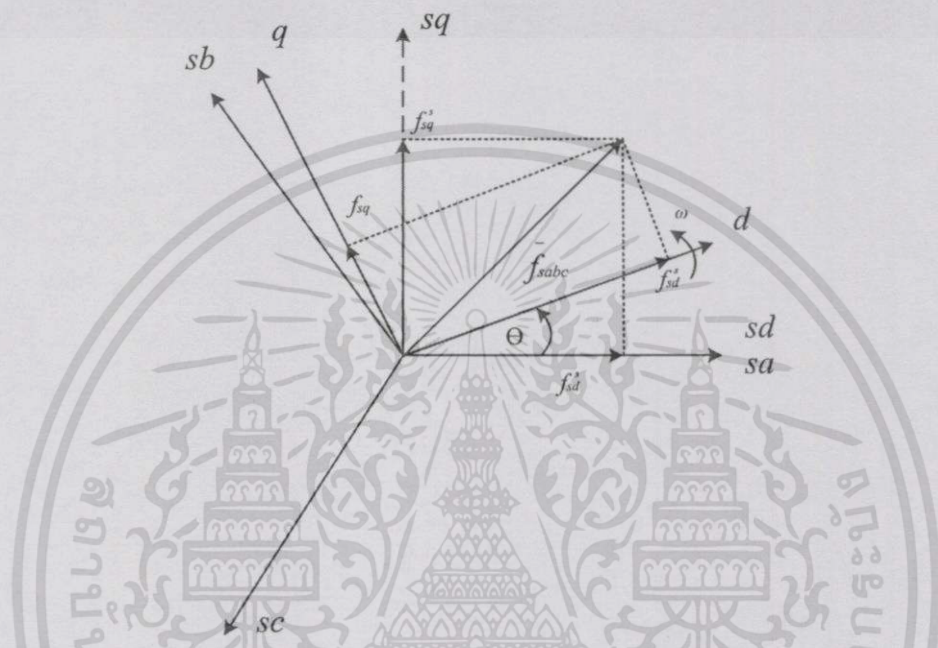
### 2.3.2 ทฤษฎีกรอบอ้างอิง (Reference Frame Theory)

การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟส abc เป็นกรอบอ้างอิงใดๆในระบบ dq0  
(Transformation from Three-Phase Reference Frame to Arbitrary Reference Frame)

ทฤษฎีนี้อาศัยความรู้เกี่ยวกับสเปซเวกเตอร์มาช่วยในการอธิบายกรอบอ้างอิง ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทได้แก่

1. กรอบอ้างอิงสามเฟส (Three-phase reference frame) ซึ่งเป็นกรอบอ้างอิงปกติของตัวแปรสามเฟสใดๆ
2. กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง (Stationary reference frame) ซึ่งเป็นกรอบอ้างอิงสองเฟสซึ่งได้จากการแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งสองเฟส ซึ่งจะหยุดนิ่งเมื่ออ้างอิงกับกรอบอ้างอิงสามเฟส
3. กรอบอ้างอิงใดๆ (Arbitrary reference frame) ซึ่งเป็นกรอบอ้างอิงสองเฟสเช่นกัน แต่จะหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมใดๆเมื่ออ้างอิงกับกรอบอ้างอิงสามเฟส

โดยที่ตัวแปรต่างๆจะมี subscript อยู่ที่ตัวแปรแต่ละตัวเพื่อความเข้าใจในการใช้งาน โดยใช้  $s$  สำหรับกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง และ  $e$  สำหรับกรอบอ้างอิงหมุนใดๆ การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งและกรอบอ้างอิงใดๆ สามารถแสดงในรูปแบบของรูปภาพดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.23 การแปลงสำหรับสเปซเวกเตอร์ไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง และกรอบอ้างอิงใดๆในระบบ dq0

รูปที่ 2.23 แสดงเวกเตอร์ของตัวแปรใดๆ ณ ขณะใดขณะหนึ่ง โดยที่ในกรอบอ้างอิงใดๆ กำลังหมุนด้วยความเร็ว  $\omega$  และทำมุมกับกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นมุม  $\theta$

ดังนั้นจากรูปที่ 2.23 สมการที่ใช้แทนเวกเตอร์ในกรอบอ้างอิงใดๆ ในรูปแบบสมการเอกซ์โพเนนเชียลนั้นเป็นไปดังแสดงในสมการที่ 2.33

$$\vec{f}_{sabc}(t)e^{-j\theta} = \frac{2}{3}(f_{sa}(t) + \vec{a}f_{sb} + \vec{a}^2f_{sc}(t))e^{-j\theta} \quad (2.33)$$

จัดรูปสมการที่ 2.39 ให้อยู่ในองค์ประกอบในฟังก์ชันโคไซน์และไซน์ จะได้สมการที่ 2.34

$$\vec{f}_{sabc} e^{-j\theta} = \frac{2}{3}((f_{sa} \cos \theta + f_{sb} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + f_{sc} \cos(\theta - \frac{4\pi}{3})) + j(-f_{sa} \sin \theta - f_{sb}(\theta - \frac{2\pi}{3}) - f_{sc} \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}))) \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.33 เทอมแรกเป็นเทอมที่อยู่ในแนวแกนของเฟส a (direct axis , d-axis) ในขณะที่เทอมหลังเป็นเทอมที่ตั้งฉากกับแกนของเฟส a (quadrature axis , q-axis) และมีมุมนำหน้าแกน d เป็นมุม  $90^\circ$  จากนิยามดังกล่าวสามารถจัดรูปสมการในระบบแกน dq ได้ดังนี้

$$\vec{f}_{sabc} e^{-j\theta} = \vec{f}_{sdq} = f_{sd} + jf_{sq} \quad (2.35)$$

โดยที่

$$f_{sd} = \frac{2}{3} (f_{sa} \cos \theta + f_{sb} \cos (\theta - \frac{2\pi}{3}) + f_{sc} \cos (\theta - \frac{4\pi}{3})) \quad (2.36)$$

$$f_{sq} = \frac{2}{3} (-f_{sa} \sin \theta - f_{sb} \sin (\theta - \frac{2\pi}{3}) - f_{sc} \sin (\theta - \frac{4\pi}{3})) \quad (2.37)$$

ในกรณีมีการต่อสายนิวทรัลเข้ากับนิวทรัลของระบบ ซึ่งส่งผลให้เกิดทางเดินของลำดับศูนย์ ดังนั้นตัวแปรในลำดับศูนย์สามารถคำนวณได้จาก

$$f_{s0} = \frac{1}{3} (f_{sa} + f_{sb} + f_{sc}) \quad (2.38)$$

กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งนั้นสามารถจำแนกออกได้เป็นสองระบบได้แก่ dq0 ซึ่งมีแกน d อยู่ในแนวเดียวกันกับเฟส a ดังแสดงในรูปที่ 2.26a และสำหรับระบบ qd0 ซึ่งมีแกน q อยู่ในแนวเดียวกับกับแกนของเฟส a ดังแสดงในรูป 2.26b ซึ่งสมการเมทริกซ์และสมการเวกเตอร์ที่ใช้ในการแปลงแสดงในรูปที่ 2.24 และ 2.25 ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} f_{sd}^s \\ f_{sq}^s \\ f_{s0}^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sa} \\ f_{sb} \\ f_{sc} \end{bmatrix}$$

รูปที่ 2. 24 เมทริกซ์การแปลงระบบ dq0

$$\begin{bmatrix} f_{sq}^s \\ f_{sd}^s \\ f_{s0}^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sa} \\ f_{sb} \\ f_{sc} \end{bmatrix}$$

รูปที่ 2.25 เมทริกซ์การแปลงระบบ qd0

โดยจะมีสมการแสดงความสัมพันธ์ของระบบแกน dq0 ดังนี้

$$\vec{f}_{sdq}^s = \frac{2}{3} (f_{sd}^s + j f_{sq}^s) \quad (2.39)$$

$$f_{s0}^s = \frac{1}{3} (f_{sa} + f_{sb} + f_{sc}) \quad (2.40)$$

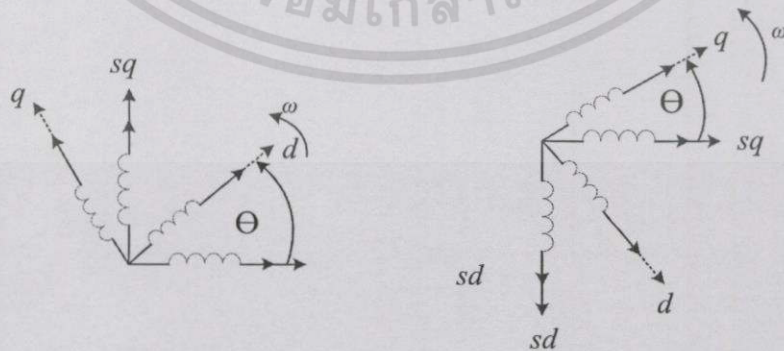
และระบบแกน qd0 ตามสมการที่ (2-41) และ (2-42)

$$\vec{f}_{sqd}^s = f_{sq}^s - j f_{sd}^s \quad (2.41)$$

$$f_{s0}^s = \frac{1}{3} (f_{sa} + f_{sb} + f_{sc}) \quad (2.42)$$

การแปลงจากแกนหยุดนิ่งเป็นแกนอ้างอิงหมุน

การแปลงจากแกนหยุดนิ่งเป็นแกนที่หมุนด้วยความเร็ว  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$  โดยอะแกรมแสดงการแปลงแกนจาก  $sdq$  ไปสู่  $dq$  หรือจาก  $sdq$  ไปสู่  $qd$  ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.26 การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงใดๆในระบบ (a) dq0 และ (b) qd0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถเขียนในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} f_{sd} \\ f_{qd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sd}^s \\ f_{sq}^s \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

$$\vec{f}_{sdq}^s = \vec{f}_{sabc} e^{-j\theta} \quad (2.44)$$

ระบบแกน dq0

$$\begin{bmatrix} f_{sq} \\ f_{sd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sq}^s \\ f_{sd}^s \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

$$\vec{f}_{qds}^s = \vec{f}_{abc} e^{-j\theta} \quad (2.46)$$

ระบบแกน qd0

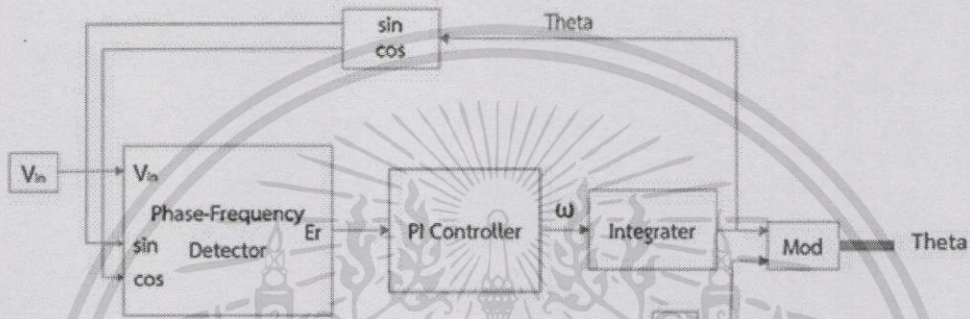
ในส่วนของสัญญาณตัวแปรที่สมดุลเมื่อถูกแปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงใดๆ ถ้าหากว่าความเร็วเชิงมุมของกรอบอ้างอิงใดๆมีค่าเท่ากับความเร็วเชิงมุมของสเปซเวกเตอร์ ตัวแปรในกรอบอ้างอิงใดๆจะมีค่าคงที่ และถ้าหากมุมระหว่างสเปซเวกเตอร์และกรอบอ้างอิงใดๆ มีค่าเท่ากับ 0 แล้วตัวแปรในกรอบอ้างอิงใดๆจะมีค่าคล้ายลักษณะของระบบไฟฟ้ากระแสตรง

### บทที่ 3

#### การออกแบบระบบควบคุมและ

#### การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/SIMULINK

##### 3.1 วงจร Phase-Lock Loop



รูปที่ 3.1 Block Diagram ที่ใช้ในการออกแบบการทำงานของ PLL

1. ทำการป้อนแรงดันอ้างอิงจากระบบไฟฟ้าเข้า Phase-Frequency Detector
2. Phase-Frequency Detector รับสัญญาณแรงดันที่เป็นรูปคลื่น sine และ cosine จาก VCO เพื่อหาค่า Error ของเฟสของแรงดัน  $V_m$  กับแรงดัน sine และ cosine ซึ่งเมื่อค่า Error ของเฟสนี้มีค่าน้อยมากจะเขียนได้เป็น  $Error = \sin(Error)$  แล้วจึงนำไปป้อนให้กับ PI Controller ต่อไป
3. PI Controller (Second order Loop Filter)  $K_p=0.005$ ,  $K_i=0.001$  ใช้ค่านี้ในการออกแบบ PI Controller ได้ค่ามุม  $\omega$
4. VCO (Integrator) Integrate ค่าของความถี่เชิงมุมที่ได้จาก PI Controller แล้วจะได้ มุมเฟส (Theta) เพื่อป้อนกลับให้กับ Phase-Frequency Detector ต่อไป
5. เมื่อได้ค่า Theta ที่เหมาะสมจะถูกทำการ Mod เทียบกับค่าคงที่  $2\pi$  จากนั้นจะได้สัญญาณฟันเลื่อย (Saw tooth) เพื่อไปใช้ต่อไป

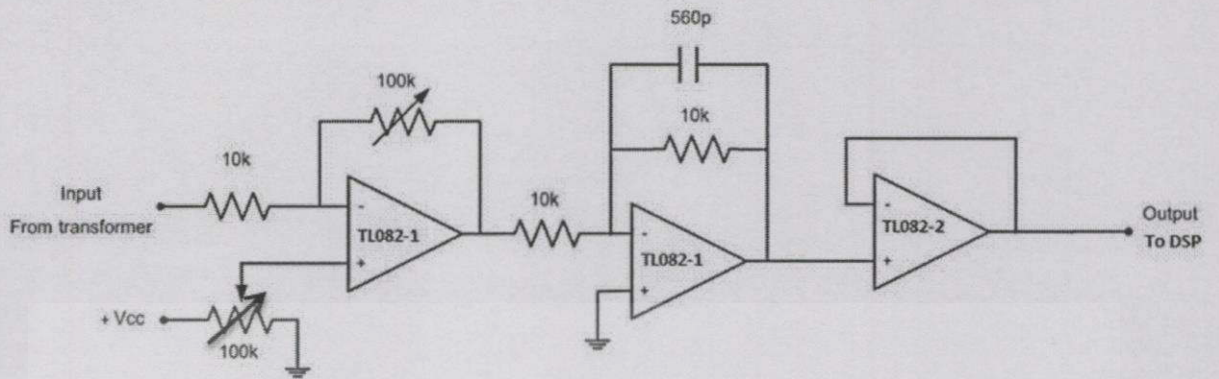
### 3.2 วงจรตรวจวัดกระแส, วงจรลดทอนสัญญาณ และ วงจรขยายสัญญาณ

การนำสัญญาณแรงดันระบบและกระแสอินเวอร์เตอร์เพื่อส่งไปประมวลผลในการป้อนกลับสำหรับระบบควบคุมแบบวงรอบปิดนั้นจะใช้ DSP TMS320F28335 ในการคำนวณและต้องรับสัญญาณแรงดันและกระแสนาฬิกาเข้ามาคำนวณและข้อจำกัดของการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC: Analog-to-Digital Converter) ของ DSP จะต้องมีค่าระหว่าง 0-3V ซึ่งจะพบว่าจะได้สัญญาณเฉพาะช่วงบวกเท่านั้นแต่สัญญาณกระแสและแรงดันที่วัดมานั้นเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ซึ่งมีทั้งช่วงบวกและลบดังนั้นจึงต้องทำการปรับระดับแรงดันของสัญญาณให้อยู่ในช่วง -1.65V ถึง 1.65V และยกระดับสัญญาณขึ้นจะทำให้แรงดันอยู่ในช่วงบวกทั้งหมดเพื่อให้ DSP สามารถแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลได้

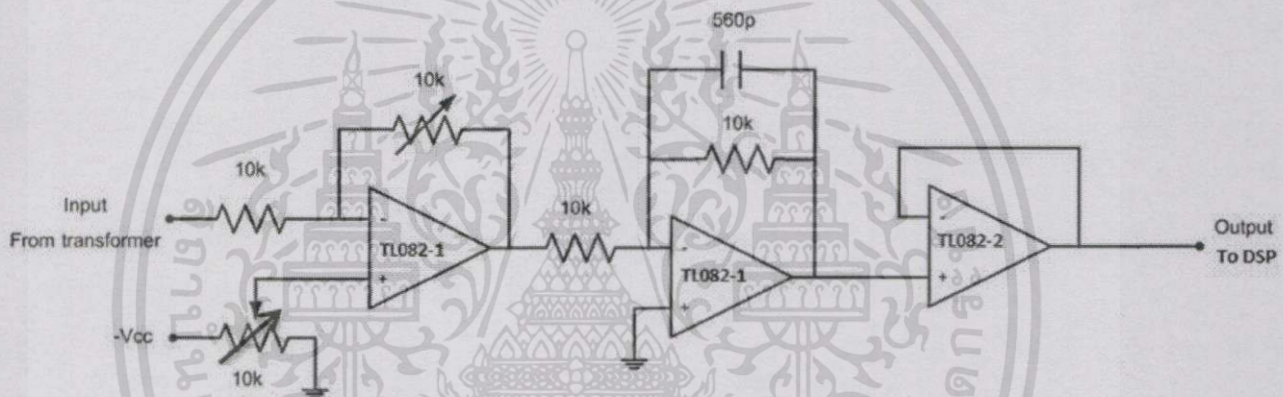
ในการออกแบบวงจรจะใช้วงจรรายกระดับสัญญาณซึ่งประกอบด้วยวงจขยายผลต่าง (U1:A) วงจร ขยายแบบกลับเฟส (U1:B) วงจรบัฟเฟอร์ (U2) โดยนำสัญญาณอินพุตมาจากแรงดันเฟสของระบบที่ใช้หม้อแปลงลดแรงดันทั้งสามเฟสจาก 220Vrms เป็น 3Vrms วงจรรายกระดับสัญญาณของวงจรตรวจวัดแรงดันที่ออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.2

การส่งสัญญาณแรงดันที่ได้มาจาก DSP เพื่อส่งไปยังอินเวอร์เตอร์ โดยแรงดันที่ออกจาก D2A ที่แปลงค่าสัญญาณจาก DSP มาจะมีค่า 0-3.3V ต้องการที่จะทำการแปลงแรงดันเป็น -10V ถึง 10V หลักการทำงานของวงจขยายแรงดันนี้จะนำสัญญาณ 0-3.3V มาปรับเป็น -1.65V ถึง 1.65V แล้วจึงขยายสัญญาณเป็น -10V ถึง 10V เพื่อส่งสัญญาณนี้ให้กับอินเวอร์เตอร์โดยวงจขยายสัญญาณที่ออกแบบแล้วแสดงดังรูปที่ 3.3

ในการวัดค่ากระแสที่ส่งผ่านตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ ) ซึ่งเป็นกระแสที่ส่งให้แกระบบไฟฟ้าจะใช้ Current Transducer เบอร์ LEM LA 25-NP โดยมีอัตราส่วนและรูปแบบของอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อกรูปไซน์ ดังนั้นเราต้องทำการแปลงให้สัญญาณให้อยู่ในซีกบวกก่อนส่งสัญญาณไปให้ DSP ใช้ในการคำนวณต่อไป โดยในการปรับค่าของตัวต้านทานปรับค่าได้จะใช้ตัวต้านทานแบบทริมพอต (Trim pot) ในการปรับค่า วงจรรายกระดับสัญญาณของวงจรตรวจวัดกระแสที่ออกแบบแล้ว แสดงดังรูปที่ 3.5

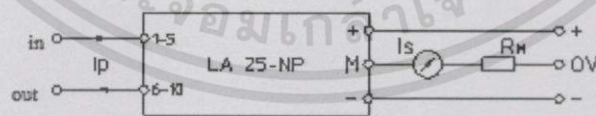


รูปที่ 3.2 วงจรยกระดับสัญญาณของวงจรตรวจวัดแรงดันที่ออกแบบแล้ว



รูปที่ 3.3 วงจรขยายสัญญาณแรงดันที่ออกแบบแล้ว

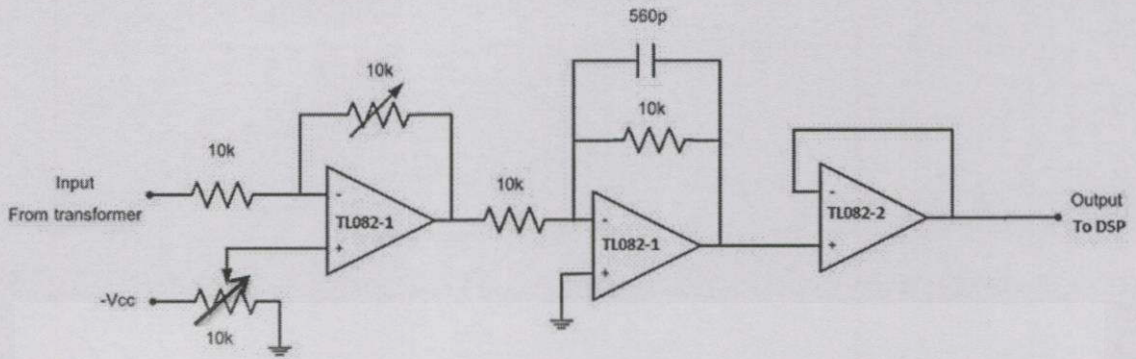
รูปที่ 3.3



Primary current		Nominal output current $I_{SN}$ [mA]	Turns ratio $K_N$	Primary resistance $R_P$ [ $m\Omega$ ]	Primary insertion inductance $L_P$ [ $\mu H$ ]	Recommended connections
nominal $I_{PN}$ [A]	maximum $I_P$ [A]					
25	36	25	1/1000	0.3	0.023	5 4 3 2 1 IN  0 0 0 0 0 OUT 6 7 8 9 10

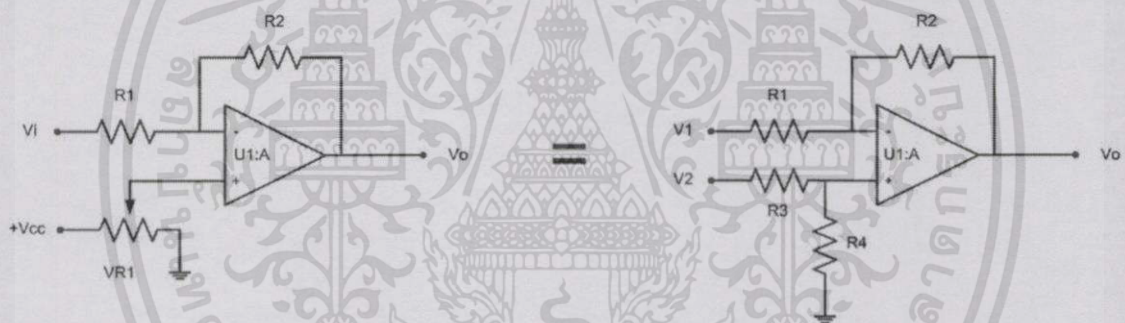
รูปที่ 3.4 Current Transducer LA 25-NP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 วงจรยกระดับสัญญาณของวงจรตรวจวัดกระแสที่ออกแบบแล้ว

3.2.1 วงจรขยายผลต่าง



รูปที่ 3.6 วงจรขยายผลต่าง

จากรูปที่ 3.6 แสดงวงจรขยายผลต่างคือ วงจรออปแอมป์ที่ทำหน้าที่ขยายผลต่างของแรงดันทั้งสองทางด้านอินพุต จากจุด  $V_1$  และ  $V_2$  ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนกับอินพุตผลต่างของออปแอมป์มาตรฐาน แต่ต่างกันที่วงจรขยายผลต่างมีการป้อนกลับทางลบเพื่อควบคุมอัตราขยายของวงจรตามต้องการ พิจารณาให้  $V_2 = 0$  ดังนั้นจึงเหลือแค่  $V_1$  ตัวเดียวที่ผ่านทางออปแอมป์เข้าทางขาอินพุตลบจะได้เอาท์พุตดังสมการที่ (3.1)

$$\frac{V_1}{R_1} = \frac{-V_o}{R_2}$$

$$V_o = -\frac{(V_1)(R_2)}{R_1} \tag{3.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาให้  $V_1 = 0$  ดังนั้นจึงเหลือแค่  $V_2$  ตัวเดียวที่ผ่านทางออปแอมป์เข้าทางขา อินพุตบวกจะได้เอาต์พุตดังสมการ (3.2)

$$\frac{(V_2)(R_4)}{R_3 + R_4} = \frac{(V_0)(R_1)}{R_1 + R_2}$$

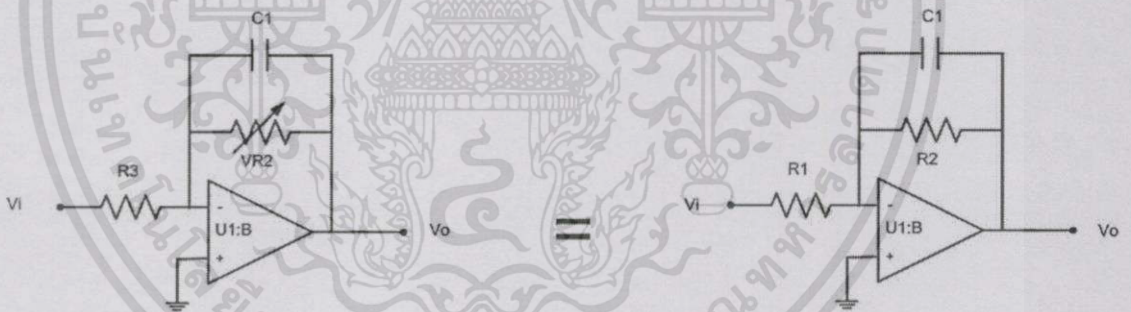
$$V_0'' = \frac{(V_2)(R_4)}{R_3 + R_4} \times \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (3.2)$$

ผลรวมของ  $V_0'$  และ  $V_0''$  จากสมการ (3.1) และ (3.2) จะได้

$$V_0 = V_0' + V_0''$$

$$\therefore V_0 = \frac{(V_0)(R_1)}{R_1 + R_2} - \frac{(V_1)(R_2)}{R_1} \quad (3.3)$$

### 3.2.2 วงจรขยายกลับเฟส



รูปที่ 3.7 วงจรขยายกลับเฟส

วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส เป็นการจัดวงจรขยายที่สัญญาณอินพุตกับสัญญาณ เอาต์พุตมีเฟสต่างกัน  $180^\circ$  สัญญาณอินพุตถูกป้อนให้ขาอินเวอร์ตซึ่งลักษณะวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสแสดงดังรูปที่ 3.7

จากรูปที่ 3.7 แสดงวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสสัญญาณอินพุต  $V_i$  ถูกป้อนเข้าที่ขาอินเวอร์ต  $-R_1$  เป็นตัวต้านทานกำหนดขนาดของสัญญาณอินพุตมี  $R_2$  เป็นตัวต้านทานกำหนด อัตราการป้อนกลับถ้าสัญญาณอินพุตซึ่งบวกเข้ามาผ่านออปแอมป์ขยายออกเอาต์พุตเป็นซีกลบและ

สัญญาณอินพุตซึ่งกลบเข้ามาผ่านออปแอมป์ขยายออกเอาต์พุตเป็นซีกบวก อัตราการขยายของวงจรหาได้ดังสมการ (3.4)

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i \quad (3.4)$$

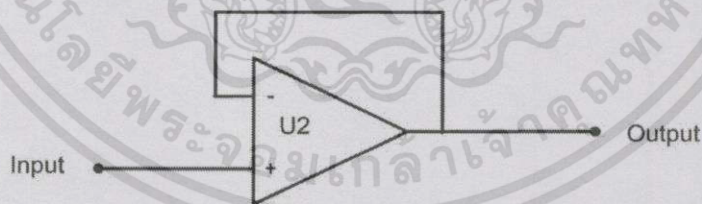
เครื่องหมายลบในสมการแสดงว่า สัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุตมีมุมต่างเฟสกัน  $180^\circ$  อัตราขยายสัญญาณของออปแอมป์ตามสมการที่ (3.4) พบว่าสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน  $R_2$  และ  $R_1$  การกำหนดอัตราส่วนของ  $R_2$  และ  $R_1$  แตกต่างกัน ทำให้อัตราขยายสัญญาณของวงจรแตกต่างกันด้วย

ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ที่ต่อคร่อม  $R_2$  อยู่เป็นส่วนประกอบของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Active Low-pass Filter) ซึ่งจะได้ความถี่คัตออฟ (Cut-off Frequency,  $f_c$ ) ดังสมการ (3.5)

$$f_c = \frac{1}{2\pi(R_2)(C_1)} \quad (3.5)$$

อัตราขยายของช่วงผ่าน (Pass Band) เป็น  $-R_2/R_1$  และช่วงลัดทอน (Stop Band) หดลงที่  $-6\text{dB/octave}$  เนื่องจากเป็นตัวกรอง first-order

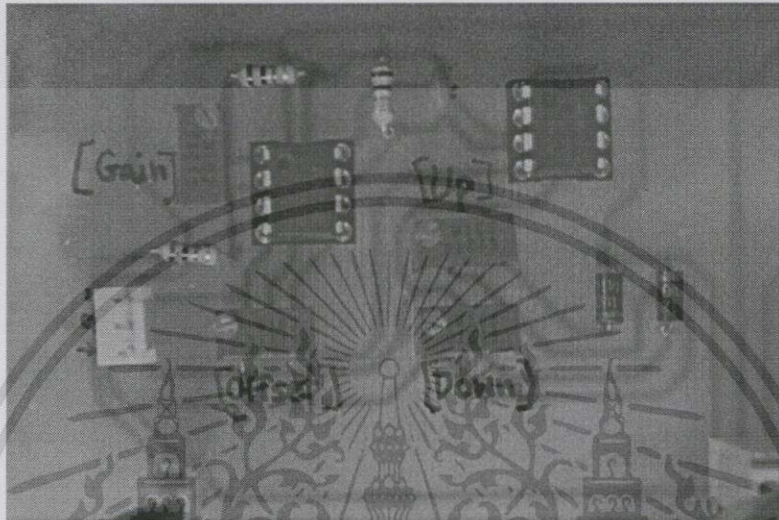
### 3.2.3 วงจรตามแรงดัน หรือวงจรบัฟเฟอร์



รูปที่ 3.8 วงจรตามแรงดัน หรือวงจรบัฟเฟอร์

รูปที่ 3.8 แสดงวงจรตามแรงดัน หรือวงจรบัฟเฟอร์ หรือ Isolation Amplifier เป็นวงจรที่ใช้เชื่อมวงจรสองวงจรเข้าด้วยกัน เช่นระบบไอซีที่ต่างตระกูลกันหรือทรานซิสเตอร์ที่ไม่แมชชิงอิมพีแดนซ์กัน จึงจำเป็นต้องใช้บัฟเฟอร์เพราะคุณสมบัติของออปแอมป์ทางอินพุตอิมพีแดนซ์สูงมาก ทำให้ดึงกระแสจากอินพุตต่ำมากเมื่อเชื่อมต่อกับวงจรอื่นแล้วจะไม่ทำให้วงจรอื่นมีผลแตกต่างไปจากเดิม

เป็นวงจรที่นำออปแอมป์มาต่อแล้วทำให้อัตราขยายแรงดันเท่ากับหนึ่ง และสัญญาณเอาต์พุตไม่มีการกลับเฟสหรือกลับขั้วกับสัญญาณอินพุตจะได้  $V_o = V_i$

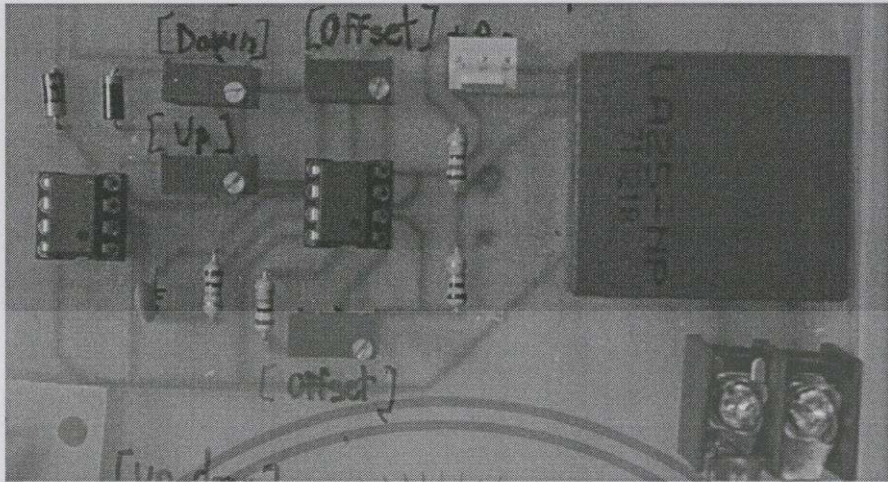


รูปที่ 3.9 วงจรลดทอนสัญญาณ



รูปที่ 3.10 วงจรขยายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 วงจรตรวจวัดกระแส

รูปที่ 3.9, 3.10 และ 3.11 เป็นรูปของวงจรที่ใช้ในการทำงานของการลดทอนสัญญาณ, ขยายสัญญาณ และ ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าตามลำดับเพื่อใช้งานในชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทนโดยจัดทำขึ้นอย่างละ 3 ชุด เพื่อประยุกต์ใช้กับการเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟสแบบแยกอิสระ

### 3.3 ระบบควบคุมกระแส

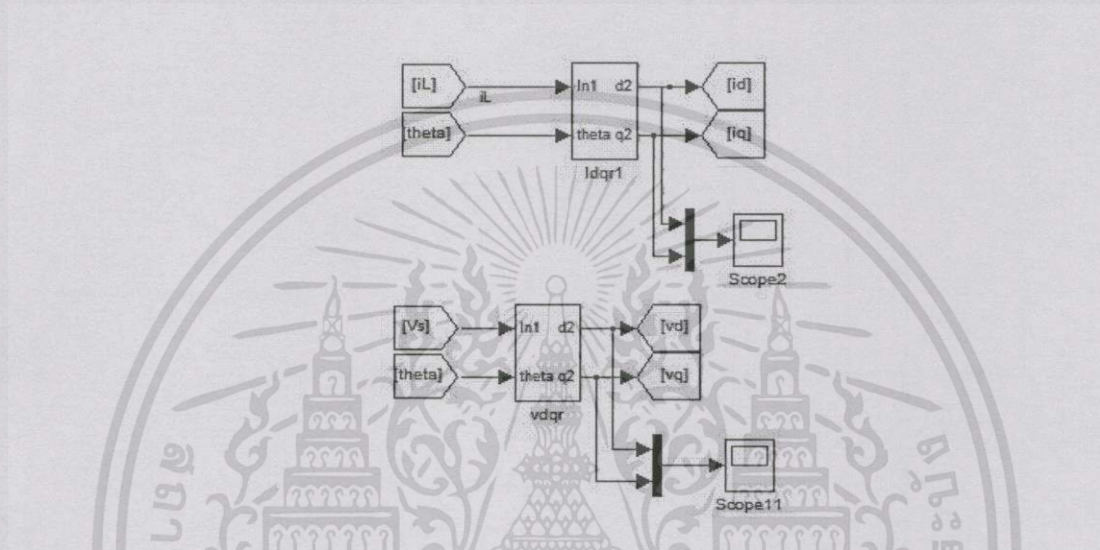
#### 3.3.1 ระบบการแปลงแกน

การควบคุมสัญญาณกระแสเพื่อนำไปสร้างสัญญาณแรงดันให้กับอินเวอร์เตอร์ ต้องทำการควบคุมค่าความผิดปกติของแรงดันเนื่องจากแรงดันที่ได้จากแอมพลิฟายเออร์นั้นมีแอมพลิจูดที่สูงกว่าค่าแรงดันจากระบบไฟฟ้า ส่งผลให้การจ่ายไฟฟ้าร่วมกันเกิดปัญหาและจะส่งผลกับเสถียรภาพของการจ่ายไฟฟ้าด้วย

ระบบการแปลงแกนเป็นระบบที่เปลี่ยนแปลงสัญญาณที่นำมาแปลงแกน โดยแยกองค์ประกอบของสัญญาณออกเป็น 2 แนวแกน คือ แนวแกน Direct (d-axis) และ แนวแกน Quadrature (q-axis) ซึ่งผลจากการแปลงแกนนั้นจะสามารถลดองค์ประกอบของสัญญาณที่นำมาแปลงแกนและสามารถทำการควบคุมสัญญาณได้ง่ายขึ้น โดยเมื่อทำการแปลงแกนไปยังกรอบอ้างอิงที่เหมาะสมกับสัญญาณที่นำมาแปลงแกนแล้ว การวิเคราะห์ระบบสามารถทำได้เช่นเดียวกับระบบไฟฟ้ากระแสตรง

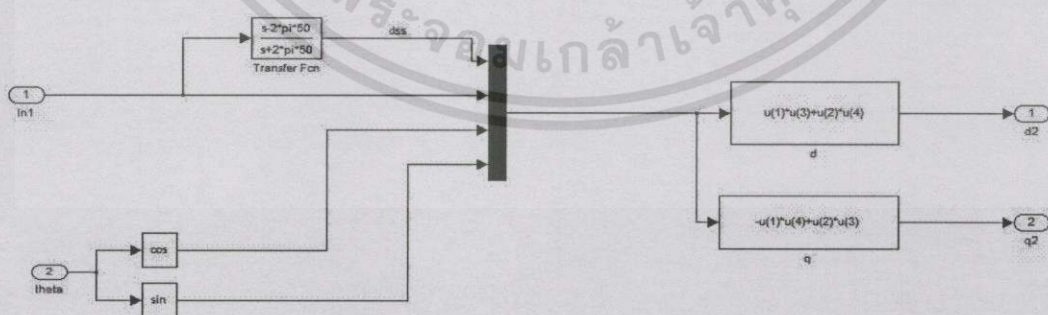
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการแปลงแกนในแบบจำลองระบบควบคุมของชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้า พลังงานทดแทนจะใช้เพื่อควบคุมสัญญาณของแรงดันขาออกที่นำไปจ่ายกำลังไฟฟาร่วมกับกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าให้มีแอมพลิจูดเท่ากับสัญญาณแรงดันอ้างอิง (แรงดันจากระบบไฟฟ้า) ซึ่งจะมีลักษณะการต่อวงจรดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมของการแปลงแกน

จากบล็อกไดอะแกรมจะทำการแปลงแกนค่ากระแสจากการป้อนกลับของระบบควบคุม และค่าแรงดันจากระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถแปลงได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 บล็อกไดอะแกรมวิธีการแปลงแกนค่ากระแสของระบบควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแปลงแกนค่ากระแสจากการป้อนกลับของระบบควบคุมนั้นจะเริ่มจากการนำค่าสัญญาณกระแสจากการป้อนกลับของระบบควบคุมมาสัญญาณและค่ามุม Theta จาก Phase-Lock Loop มาทำการสร้างสัญญาณเพื่อทำการแปลงแกนออกเป็น 4 สัญญาณดังนี้

1. ค่าสัญญาณกระแสจากการป้อนกลับของระบบควบคุม (องค์ประกอบฟังก์ชัน Sine)
2. ค่าสัญญาณกระแสจากการป้อนกลับของระบบควบคุม (องค์ประกอบฟังก์ชัน Cosine) ซึ่งจะนำสัญญาณจากข้อ 1 มาทำการผ่านฟังก์ชันถ่ายโอน
3. ค่าสัญญาณที่สร้างจากมุม Theta (องค์ประกอบฟังก์ชัน Sine) ซึ่งจะนำค่ามุม Theta จากวงจร Phase-Lock Loop มาทำการผ่านฟังก์ชัน Sine
4. ค่าสัญญาณที่สร้างจากมุม Theta (องค์ประกอบฟังก์ชัน Cosine) ซึ่งจะนำค่ามุม Theta จากวงจร Phase-Lock Loop มาทำการผ่านฟังก์ชัน Cosine

จากนั้นนำค่าสัญญาณทั้ง 4 สัญญาณมาทำการแปลงแกนโดยกำหนดให้มีตัวแปรดังนี้

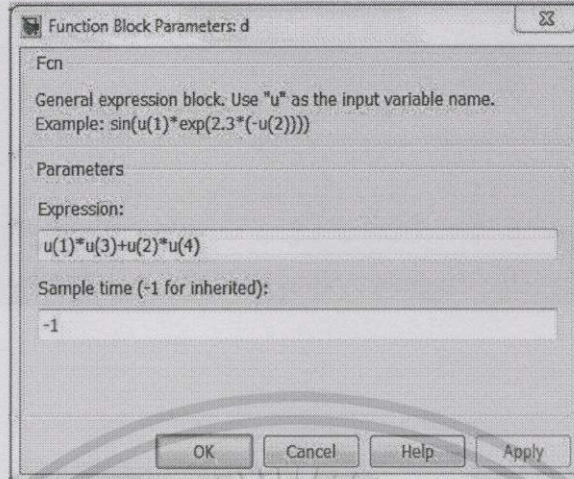
u(1) คือ ค่าสัญญาณกระแสจากการป้อนกลับของระบบควบคุม (องค์ประกอบฟังก์ชัน Cosine)

u(2) คือ ค่าสัญญาณกระแสจากการป้อนกลับของระบบควบคุม (องค์ประกอบฟังก์ชัน Sine)

u(3) คือ ค่าสัญญาณที่สร้างจากมุม Theta (องค์ประกอบฟังก์ชัน Cosine)

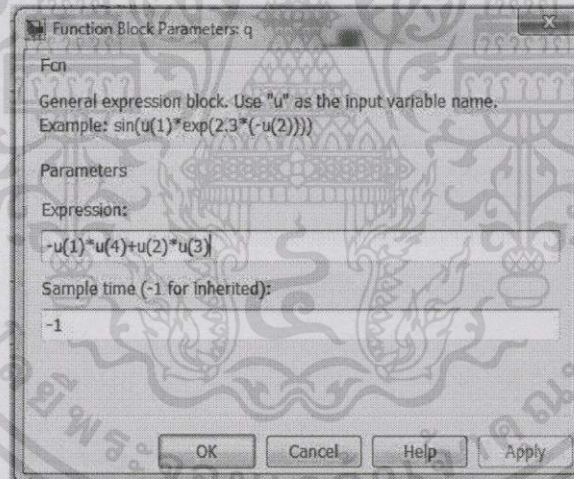
u(4) คือ ค่าสัญญาณที่สร้างจากมุม theta (องค์ประกอบฟังก์ชัน Sine)

นำค่าสัญญาณ u(1), u(2), u(3) และ u(4) มาทำการแปลงแกนเป็น 2 แกนตามบล็อกไดอะแกรม โดยในแนวแกน d จะทำการแปลงตามฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ฟังก์ชันในการแปลงแกนในแนวแกน d

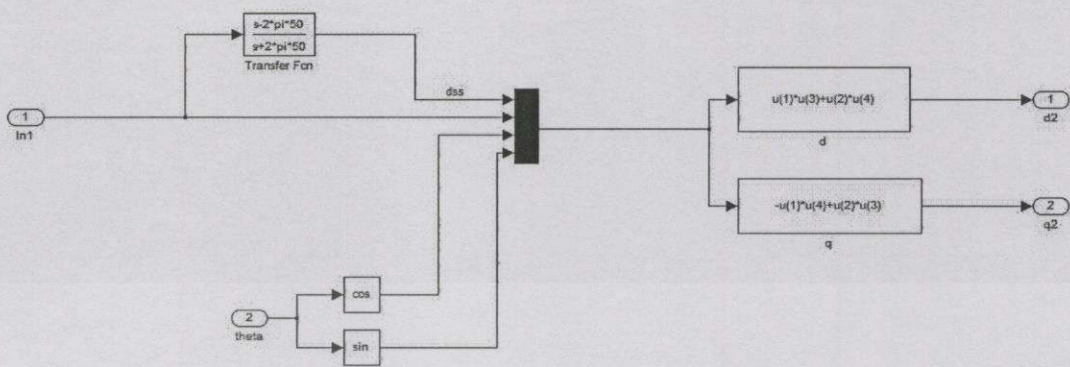
ในแนวแกน q ทำการแปลงตามฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ฟังก์ชันในการแปลงแกนในแนวแกน q

จากนั้นทำการแปลงสัญญาณแรงดันที่ได้จากระบบไฟฟ้าและค่ามุม Theta ที่ได้จาก Phase-Lock Loop มาทำการสร้างสัญญาณเพื่อทำการแปลงแกนออกเป็น 2 แนวแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 บล็อกไดอะแกรมวิธีการแปลงแกนค่าแรงดันของระบบไฟฟ้า

ในการแปลงแกนค่าแรงดันของระบบไฟฟ้านั้นมีลักษณะเช่นเดียวกับค่ากระแสที่ของระบบควบคุม ซึ่งมีสัญญาณที่ใช้ในการแปลงแกน 4 สัญญาณดังนี้

1. ค่าสัญญาณแรงดันจากระบบไฟฟ้า (องค์ประกอบฟังก์ชัน Sine)
2. ค่าสัญญาณแรงดันจากระบบไฟฟ้า (องค์ประกอบฟังก์ชัน Cosine) ซึ่งจะนำสัญญาณจากข้อ 1 มาทำการผ่านฟังก์ชันถ่ายโอน
3. ค่าสัญญาณที่สร้างจากมุม Theta (องค์ประกอบฟังก์ชัน Sine) ซึ่งจะนำค่ามุม Theta จากวงจร Phase-Lock Loop มาทำการผ่านฟังก์ชัน Sine
4. ค่าสัญญาณที่สร้างจากมุม Theta (องค์ประกอบฟังก์ชัน Cosine) ซึ่งจะนำค่ามุม Theta จากวงจร Phase-Lock Loop มาทำการผ่านฟังก์ชัน Cosine

จากนั้นนำค่าสัญญาณทั้ง 4 สัญญาณมาทำการแปลงแกนโดยกำหนดให้มีตัวแปรดังนี้

$u(1)$  คือ ค่าสัญญาณกระแสจากระบบไฟฟ้า (องค์ประกอบฟังก์ชัน Cosine)

$u(2)$  คือ ค่าสัญญาณกระแสจากระบบไฟฟ้า (องค์ประกอบฟังก์ชัน Sine)

$u(3)$  คือ ค่าสัญญาณที่สร้างจากมุม Theta (องค์ประกอบฟังก์ชัน Cosine)

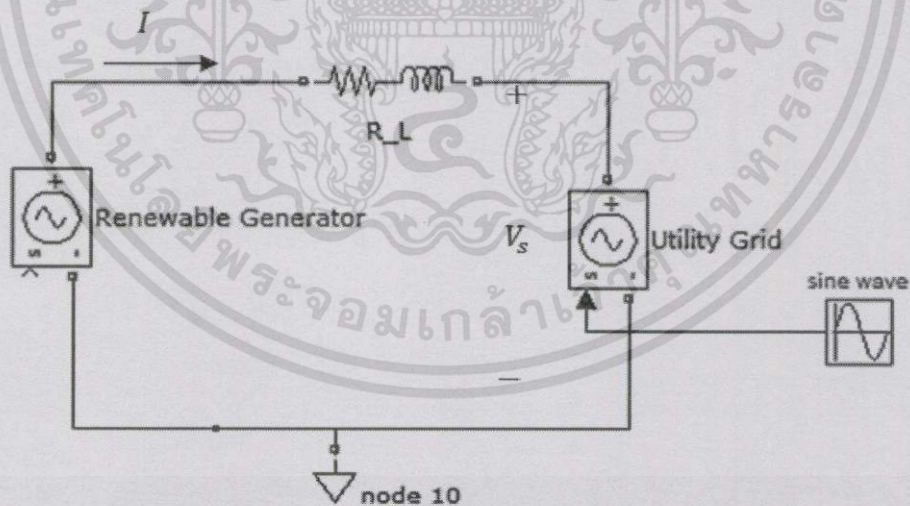
$u(4)$  คือ ค่าสัญญาณที่สร้างจากมุม Theta (องค์ประกอบฟังก์ชัน Sine)

นำค่าสัญญาณ  $u(1)$ ,  $u(2)$ ,  $u(3)$  และ  $u(4)$  มาทำการแปลงแกนเป็น 2 แกนตามบล็อกไดอะแกรม โดยในแนวแกน  $d$  จะทำการแปลงตามฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปที่ 3.14 และในแนวแกน  $q$  ตามฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปที่ 3.15

### 3.3.2 ระบบควบคุมกระแส

การส่งสัญญาณแรงดันให้กับอินเวอร์เตอร์จะใช้การควบคุมด้วยระบบควบคุมป้อนกลับกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำในระบบทางไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ซึ่งระบบควบคุมจะเป็นแบบ Negative Feedback Control Loop โดยควบคุมด้วย PI Controller ระบบควบคุมวงรอบปิดนี้จะช่วยควบคุมกระแสคำสั่งที่ผ่านการแปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงที่เหมาะสม แล้วระบบควบคุมจะเปลี่ยนค่ากระแสเป็นแรงดัน จากนั้นจะนำแรงดันที่ได้ไปเป็นสัญญาณแรงดันส่งให้กับอินเวอร์เตอร์

กระแสคำสั่งในแนวแกน  $d$  และแกน  $q$  สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (3.12) และ (3.13) ซึ่งควบคุมกระแสคำสั่งด้วย PI Controller จากการป้อนกลับด้วยกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำแรงดันที่ส่งให้อินเวอร์เตอร์ได้มาจากการนำค่าความต้านทานและค่าเหนี่ยวนำมาใช้ในการคำนวณจะได้ค่าของสัญญาณแรงดันที่จะป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.17 การเชื่อมต่อเข้าระบบไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า

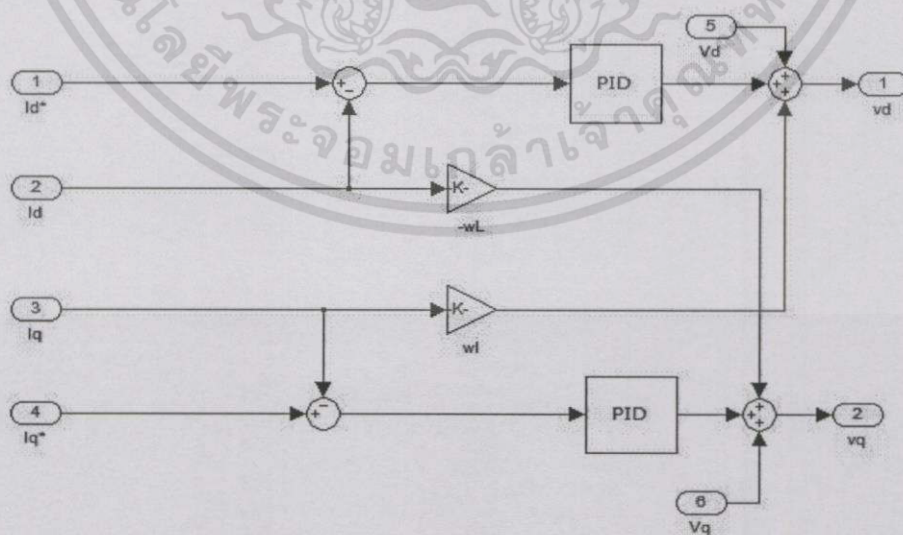
เมื่อเราหากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนจะได้ตั้งสมการที่ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับโดยการกำหนดขนาดของ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พลังงานทดแทน จะสามารถคำนวณขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ตั้งสมการที่ (3.3) และ (3.4)

$$P = \frac{V_M I_d}{2} \tag{3.1}$$

$$Q = \frac{V_M I_q}{2} \tag{3.2}$$

$$I_d = \frac{2P}{V_M} \tag{3.3}$$

$$I_q = \frac{2Q}{V_M} \tag{3.4}$$



รูปที่ 3.18 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.18 เป็นบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม สัญญาณที่นำมาเข้าระบบควบคุมมีอยู่ 4 สัญญาณ คือ สัญญาณกระแสอ้างอิงในแนวแกน d สัญญาณกระแสอ้างอิงในแนวแกน q สัญญาณกระแสที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ในแนวแกน d และ สัญญาณกระแสที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ในแนวแกน q โดยนำสัญญาณมาควบคุมในระบบควบคุมวงรอบปิดแล้วนำไปแปลงเป็นแรงดันขาเข้าให้กับอินเวอร์เตอร์ แต่สัญญาณที่ออกมายังเป็นแรงดันที่อยู่ในกรอบอ้างอิงหมุน ก่อนนำไปต่อเข้าอินเวอร์เตอร์ ต้องทำการแปลงแรงดันนี้ให้อยู่ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเสียก่อน ซึ่งมีความสัมพันธ์กันตามสมการดังต่อไปนี้

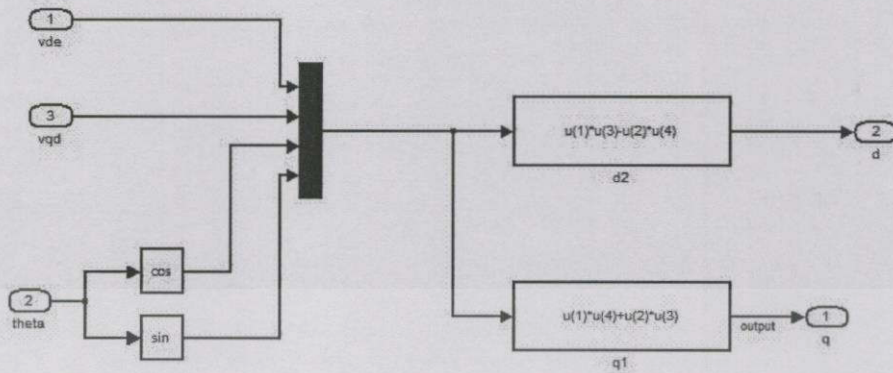
$$V_d^* = V_d + \left( K_P + \frac{K_i}{s} \right) (I_d^* - I_d) + \omega L I_q \quad (3.5)$$

$$V_q^* = V_q + \left( K_P + \frac{K_i}{s} \right) (I_q^* - I_q) - \omega L I_d \quad (3.6)$$

สมการที่ (3.5) และ (3.6) เป็นสมการแสดงการแปลงกระแสที่ควบคุมแล้วเป็นแรงดันขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ในกรอบอ้างอิงหมุน

### 3.3.3 การแปลงจากกรอบอ้างอิงหมุนไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

ในการแปลงแกนจากกรอบอ้างอิงหมุนให้กลับไปอยู่ในกรอบนิ่งนั้นทำเพื่อนำค่าที่ได้จากระบบควบคุมซึ่งอยู่ในกรอบอ้างอิงหมุนนั้นมาแปลงแกนกลับมาใช้งานต่อไปในแบบจำลอง โดยต้องการแปลงแกนในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งนั้นมีหลักการแปลงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 บล็อกไดอะแกรมการแปลงจากกรอบอ้างอิงหมุนไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

จากบล็อกไดอะแกรมสัญญาณที่ได้จากระบบควบคุมนั้นจะเป็นสัญญาณแรงดัน โดยในการแปลงแกนกลั่นนั้นจะต้องสร้างสัญญาณในการแปลง 4 สัญญาณดังนี้

1. ค่าสัญญาณแรงดันในแนวแกน d (กรอบอ้างอิงหมุน)
2. ค่าสัญญาณแรงดันในแนวแกน q (กรอบอ้างอิงหมุน)
3. ค่าสัญญาณที่สร้างจากมุม Theta (องค์ประกอบฟังก์ชัน Sine) ซึ่งจะนำค่ามุม Theta จากวงจร Phase-Lock Loop มาทำการผ่านฟังก์ชัน Sine
4. ค่าสัญญาณที่สร้างจากมุม Theta (องค์ประกอบฟังก์ชัน Cosine) ซึ่งจะนำค่ามุม Theta จากวงจร Phase-Lock Loop มาทำการผ่านฟังก์ชัน Cosine

จากนั้นนำค่าสัญญาณทั้ง 4 สัญญาณมาทำการแปลงแกนโดยกำหนดให้มีตัวแปรดังนี้

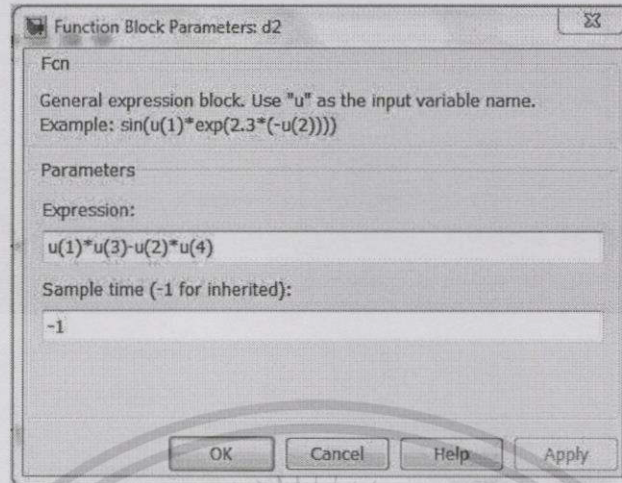
$u(1)$  คือ ค่าสัญญาณแรงดันในแนวแกน d (กรอบอ้างอิงหมุน)

$u(2)$  คือ ค่าสัญญาณแรงดันในแนวแกน q (กรอบอ้างอิงหมุน)

$u(3)$  คือ ค่าสัญญาณที่สร้างจากมุม Theta (องค์ประกอบฟังก์ชัน Cosine)

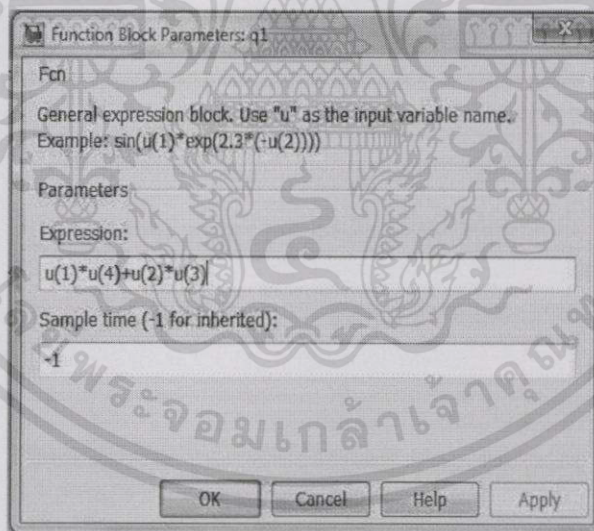
$u(4)$  คือ ค่าสัญญาณที่สร้างจากมุม Theta (องค์ประกอบฟังก์ชัน Sine)

นำค่าสัญญาณ  $u(1)$ ,  $u(2)$ ,  $u(3)$  และ  $u(4)$  มาทำการแปลงแกนเป็น ให้อยู่ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งตามบล็อกไดอะแกรม โดยในแนวแกน d จะทำการแปลงตามฟังก์ชันรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ฟังก์ชันการแปลงแกนจากกรอบอ้างอิงหมุนไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดหนึ่งในแนวแกน d

และในแนวแกน ตามรูปที่ 3.21



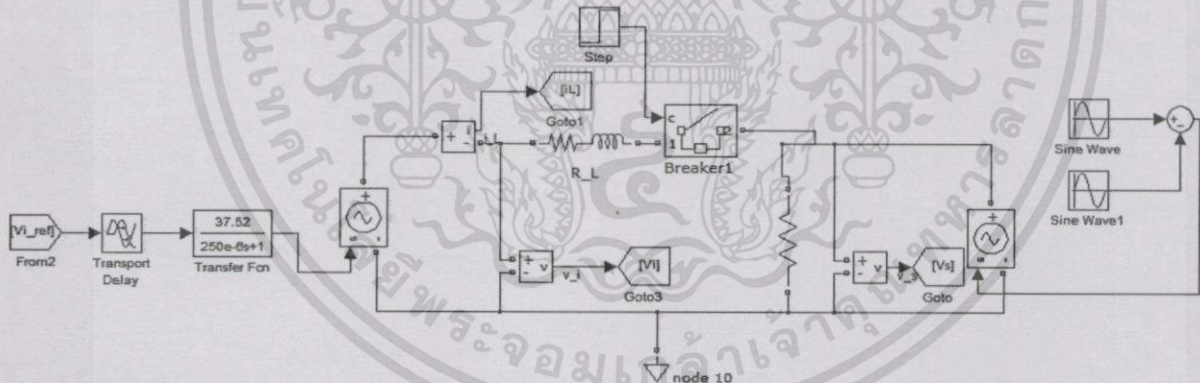
รูปที่ 3. 21 ฟังก์ชันการแปลงแกนจากกรอบอ้างอิงหมุนไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดหนึ่งในแนวแกน q

จะได้ค่าองค์ประกอบของสัญญาณแรงดันในกรอบอ้างอิงหมุนในแนวแกน dq ซึ่งจะนำไปใช้ในการควบคุมการจ่ายแรงดันของแอมพลิฟายเออร์ต่อไป

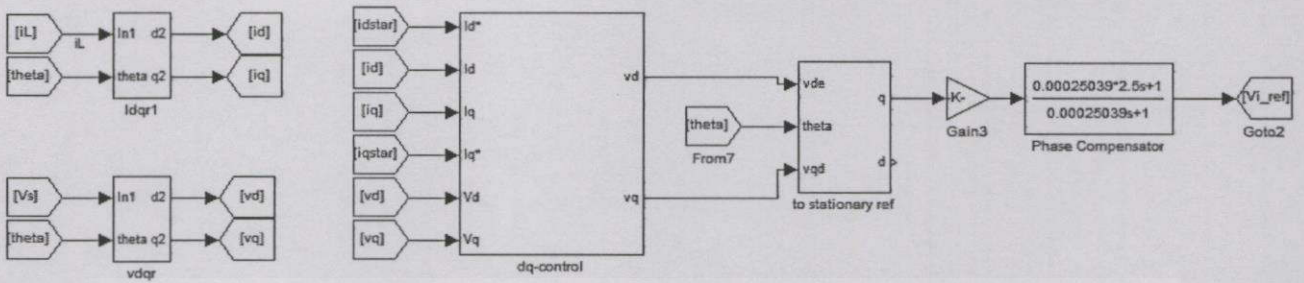
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การจำลองชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน

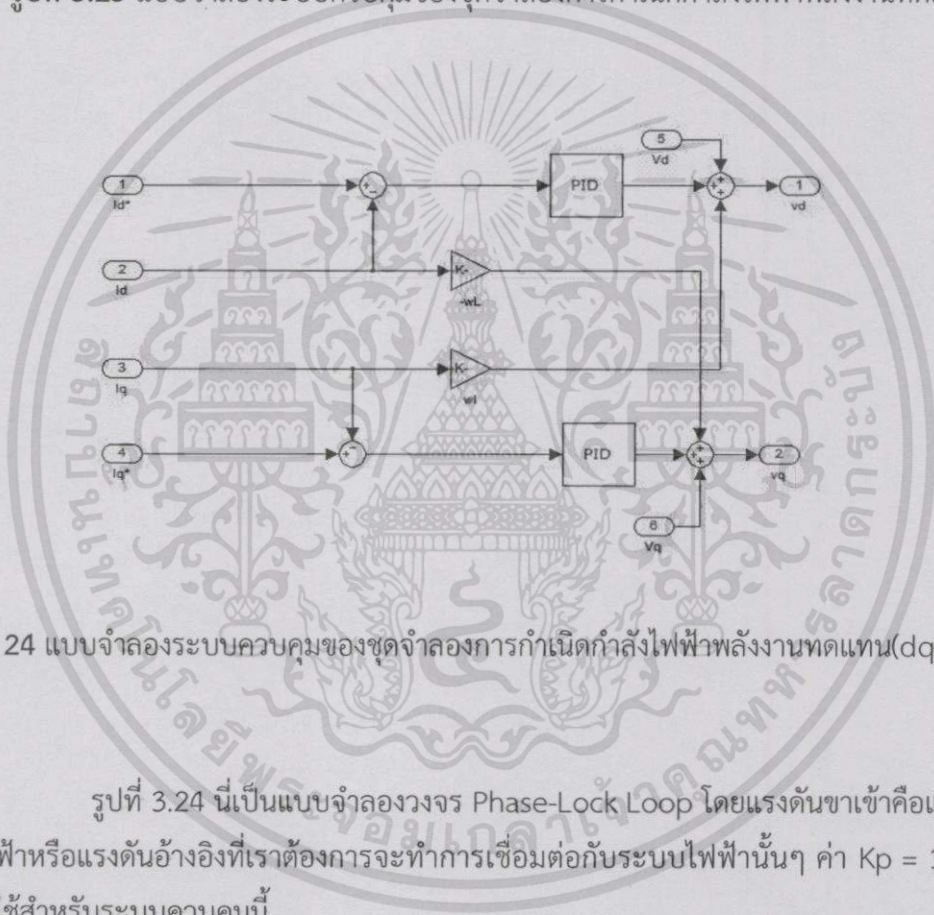
การสร้างแบบจำลองชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทนโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ดังรูปที่ 3.22 และ 3.23 การจำลองโดยทำการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าตามเงื่อนไข การเชื่อมต่อด้วยวงจรควบคุมวงปิด Phase-Lock Loop ทำการติดตามมุมเฟสให้กับสัญญาณแรงดันที่จะ ส่งให้กับอินเวอร์เตอร์ และมีระบบควบคุมที่ใช้ PI Controller ควบคุมกระแสคำสั่งที่จะส่งให้กับ อินเวอร์เตอร์โดยค่าตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองนี้มีค่า 4.633 mH และความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำ รวมกับความต้านทานของอุปกรณ์ตัดต่อวงจรที่ใช้มีค่า 0.1466  $\Omega$  นำมาคูณกับกระแส ได้เป็นสัญญาณ แรงดันที่ส่งไปยังอินเวอร์เตอร์ที่มามีการทำงานโดยใช้แอมพลิฟายเออร์กำลังจากนั้นแรงดันจาก อินเวอร์เตอร์จะถูกส่งไปยังแหล่งกำเนิดควบคุมกระแสด้วยแรงดันและวัดค่ากระแสซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าที่ ผ่านตัวเหนี่ยวนำและอุปกรณ์ตัดต่อวงจรแล้วป้อนกลับกระแสไปยังระบบควบคุมวงรอบปิดและฉีด กระแสไปยังระบบไฟฟ้าเป็นการเชื่อมต่อชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทนนี้เข้ากับระบบ ไฟฟ้า



รูปที่ 3.22 แบบจำลองทางไฟฟ้าของชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน



รูปที่ 3.23 แบบจำลองระบบควบคุมของชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน



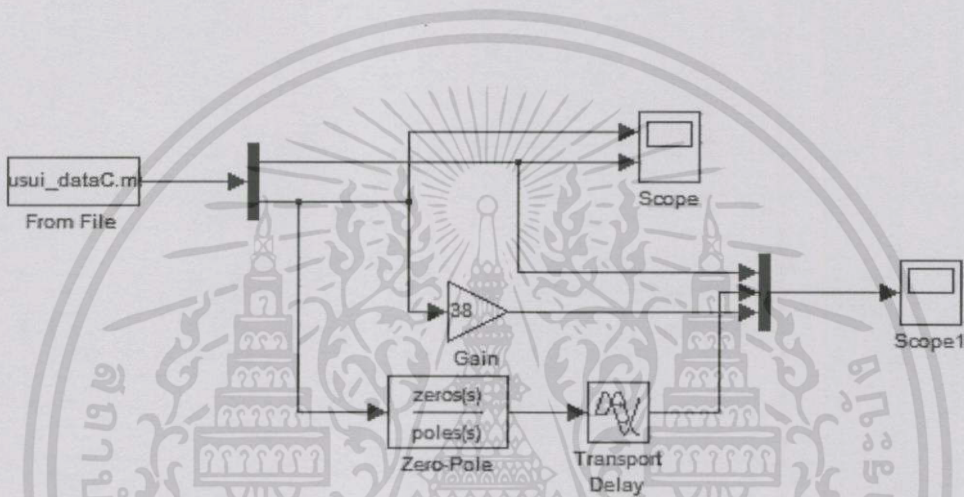
รูปที่ 3. 24 แบบจำลองระบบควบคุมของชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน(dq-control)

รูปที่ 3.24 นี้เป็นแบบจำลองวงจร Phase-Lock Loop โดยแรงดันขาเข้าคือแรงดันจากระบบไฟฟ้าหรือแรงดันอ้างอิงที่เราต้องการจะทำการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้านั้นๆ ค่า  $K_p = 1$ ,  $K_i = 30$  เป็นค่าที่ใช้สำหรับระบบควบคุมนี้

จะได้มุมเฟส Theta ออกมาเป็นมุมเฟสที่ป้อนต่อให้ฟังก์ชัน Sine และ Cosine ของระบบควบคุมป้อนกลับ โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI ใช้ค่า  $K_p = 11$ ,  $K_i = 30$  ระบบควบคุมกระแสจะได้กระแสคำสั่งออกมาก่อนที่จะปรับเป็นแรงดันส่งให้กับอินเวอร์เตอร์ต่อไป โดยกระแสคำสั่งจะอยู่ในกรอบอ้างอิงหมุนในแนวแกน d และ q แรงดันนี้จะเป็นแรงดันอ้างอิงให้กับอินเวอร์เตอร์บังคับว่าจะได้แรงดันออกมาเท่าไร

เนื่องด้วยการทดลองใช้งานแอมพลิฟายเออร์กำลังที่ใช้งานจริง เมื่อทำการเปรียบเทียบสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออกของแอมพลิฟายเออร์พบว่าสัญญาณขาออกมีเฟสเลื่อนไปจากสัญญาณขาเข้า ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนของคุณลักษณะของแอมพลิฟายเออร์กำลังคือ

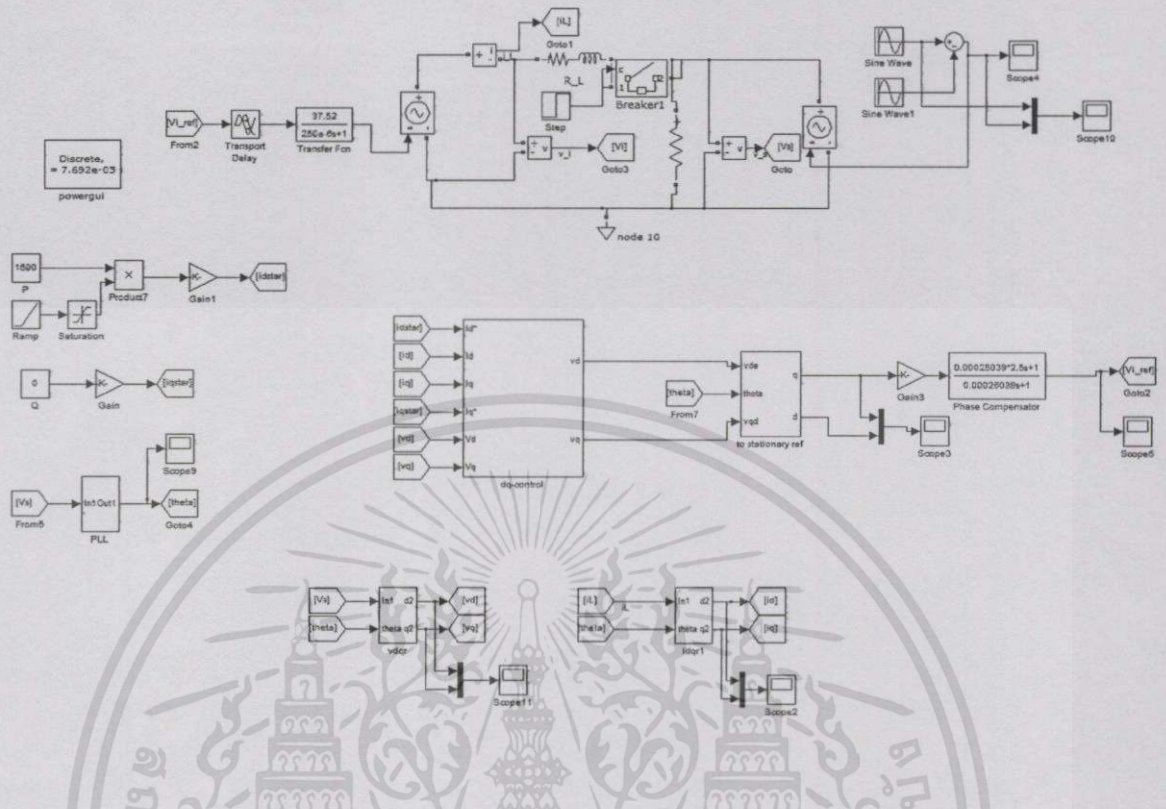
$$G(s) = \frac{37.52}{250 \times 10^{-6} s + 1} e^{-130 \times 10^{-6} t} \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.25 การจำลองคุณลักษณะของแอมพลิฟายเออร์กำลัง

ผลการทดลองชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทนในโปรแกรม MATLAB/Simulink

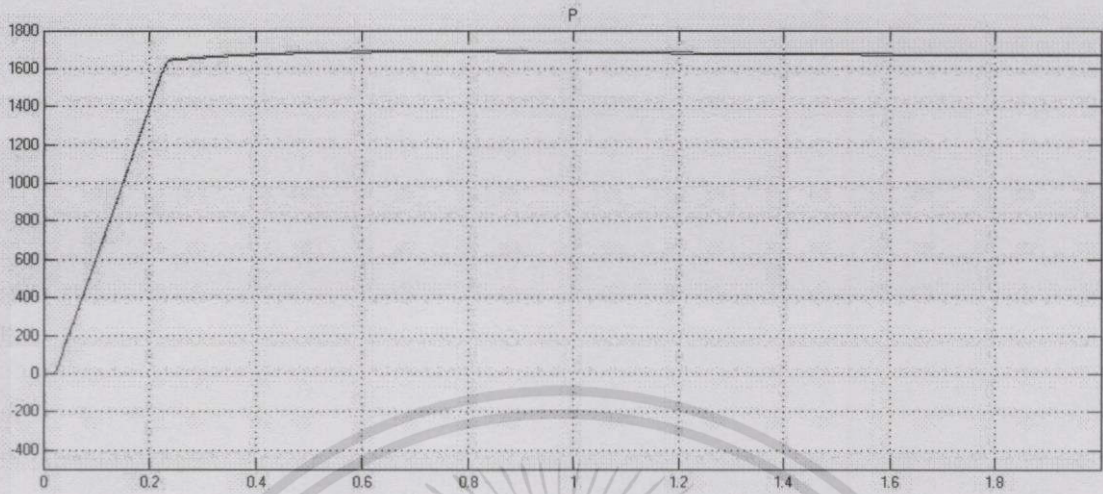
การทดลองนี้เป็นการจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink ตามรูปที่ 3.26 โดยเป็นการทดสอบระบบควบคุมที่จะนำไปใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากอินเวอร์เตอร์ ซึ่งใช้การควบคุมแบบป้อนกลับโดยป้อนกลับค่ากระแสที่ขาออกของอินเวอร์เตอร์เข้าไปในระบบควบคุม ซึ่งระบบควบคุมนี้ใช้ตัวควบคุมแบบ PI



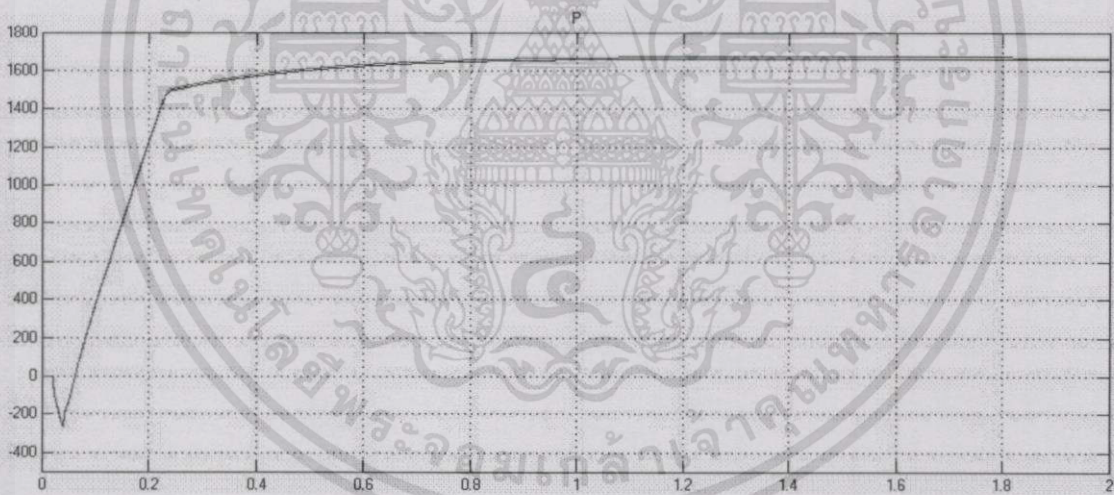
รูปที่ 3.26 วงจรในโปรแกรม MATLAB/Simulink

ทำการกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าเป็น 3 กรณี ซึ่งกำลังไฟฟ้าอ้างอิงเหล่านี้เป็นกำลังไฟฟ้าที่เข้าระบบ ณ จุดเชื่อมต่อ เนื่องจากใช้แรงดันของระบบในการคำนวณ

- กรณีแรก กำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 1600 W
- กรณีที่ 2 กำหนดค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 1600 W กำลังไฟฟ้าเสมือนเท่ากับ 900 VAR
- กรณีที่ 3 กำหนดค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนเท่ากับ 900 VAR

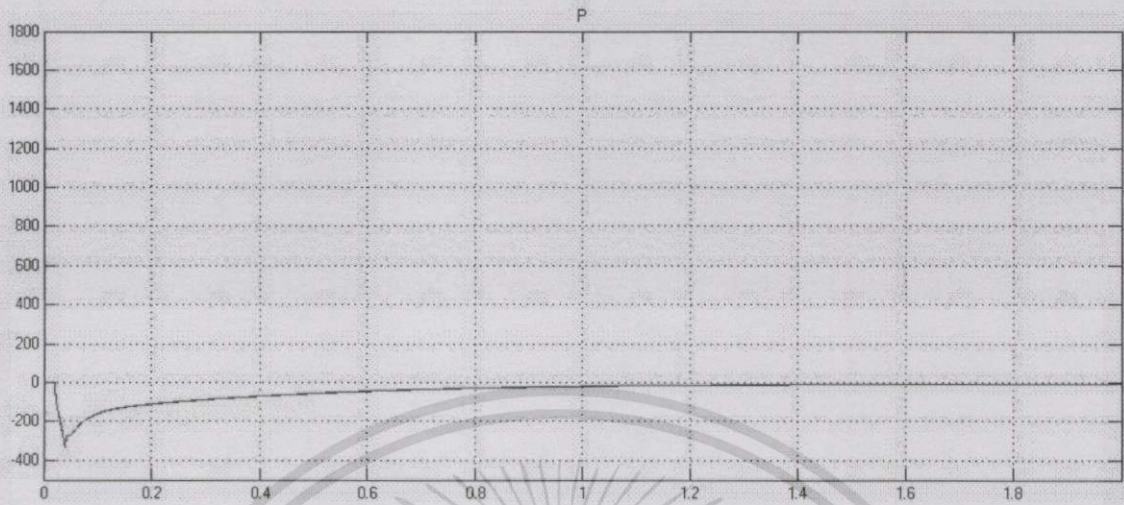


รูปที่ 3.27 กรณีที่ 1 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าของระบบ(สีดำ)  
และค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์(สีชมพู)

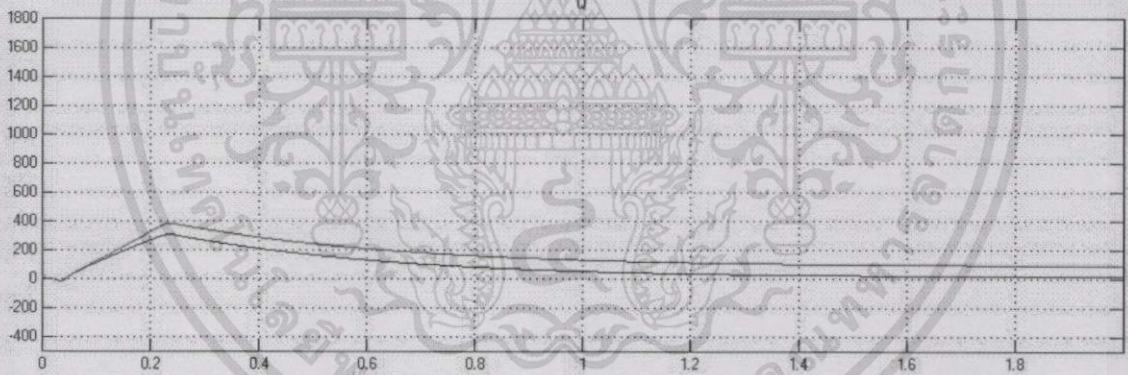


รูปที่ 3.28 กรณีที่ 2 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าของระบบ(สีดำ)  
และค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์(สีชมพู)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

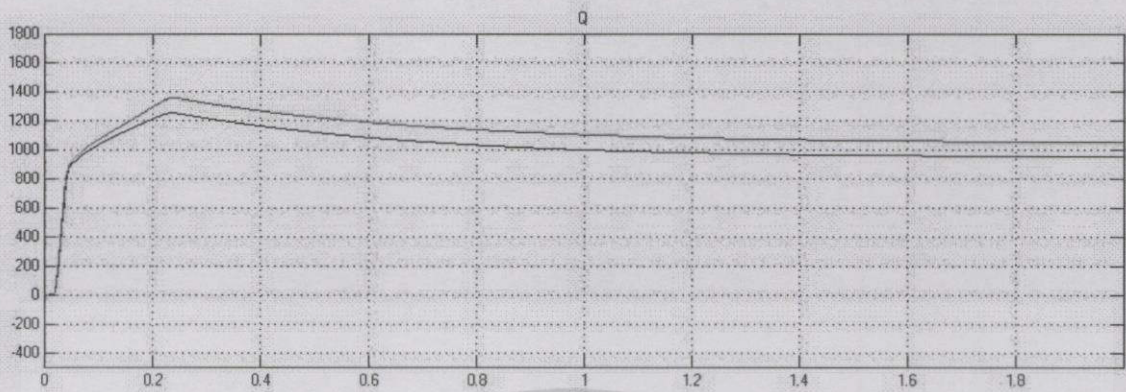


รูปที่ 3.29 กรณีที่ 3 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าของระบบ(สีดำ)  
และค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์(สีชมพู)

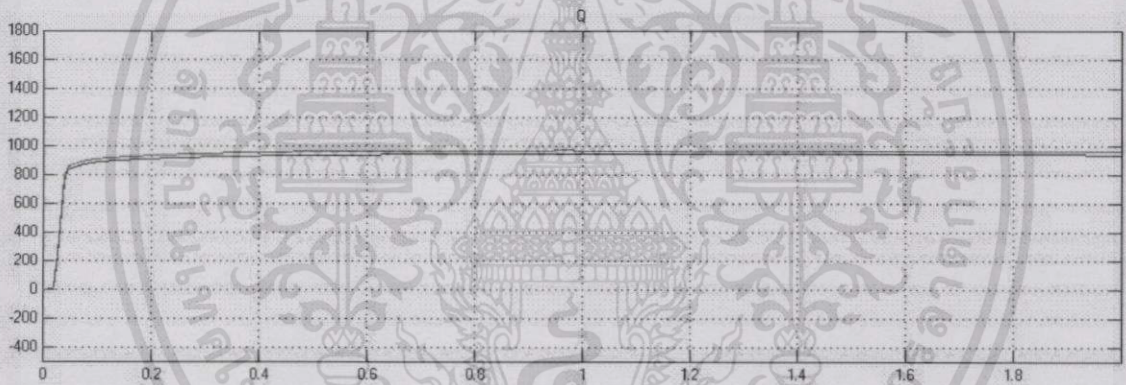


รูปที่ 3.30 กรณีที่ 1 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบ(สีดำ)  
และค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของอินเวอร์เตอร์(สีชมพู)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.31 กรณีที่ 2 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบ(สีดำ)  
และค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของอินเวอร์เตอร์(สีชมพู)

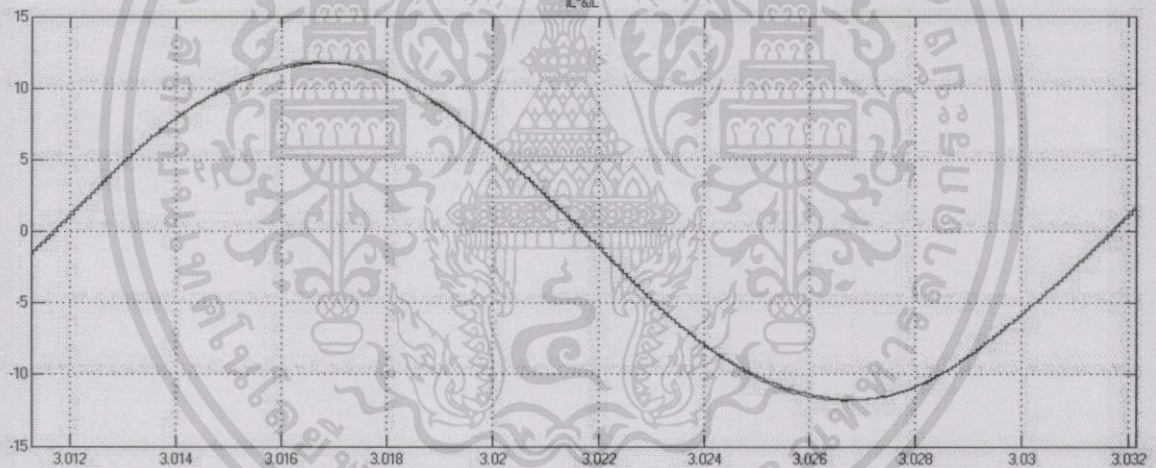


รูปที่ 3.32 กรณีที่ 3 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบ(สีดำ)  
และค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของอินเวอร์เตอร์(สีชมพู)

ระบบควบคุมที่ใช้เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน ( $K_p$ ) และตัวควบคุมแบบปริพันธ์ ( $K_i$ ) ซึ่งได้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 11 และ 30 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่ากระแสคำสั่งและกระแสที่ป้อนกลับได้ผลดังรูปที่ 3.33-3.35



รูปที่ 3.33 กรณีที่ 1 เปรียบเทียบค่ากระแสคำสั่ง(สีดำ)และค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนกลับ(สีชมพู)

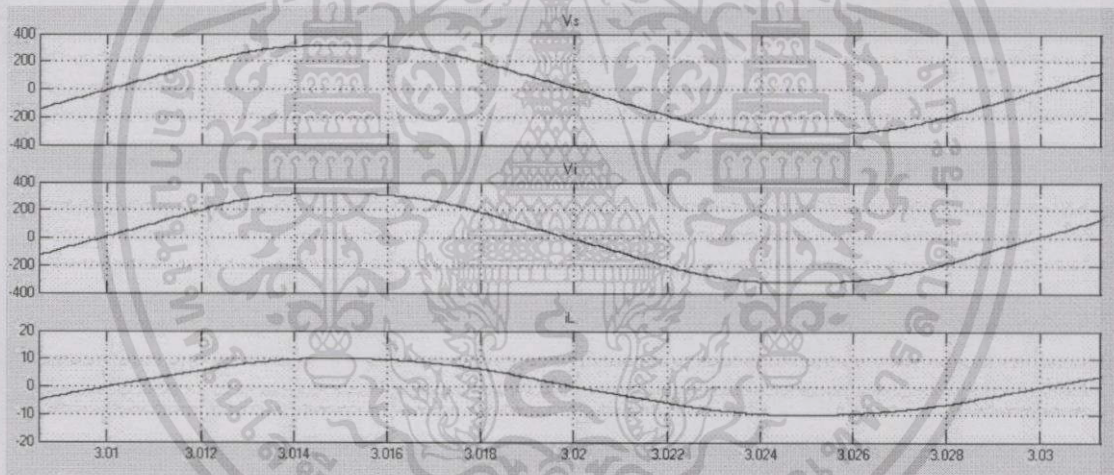


รูปที่ 3.34 กรณีที่ 2 เปรียบเทียบค่ากระแสคำสั่ง(สีดำ)และค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนกลับ(สีชมพู)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

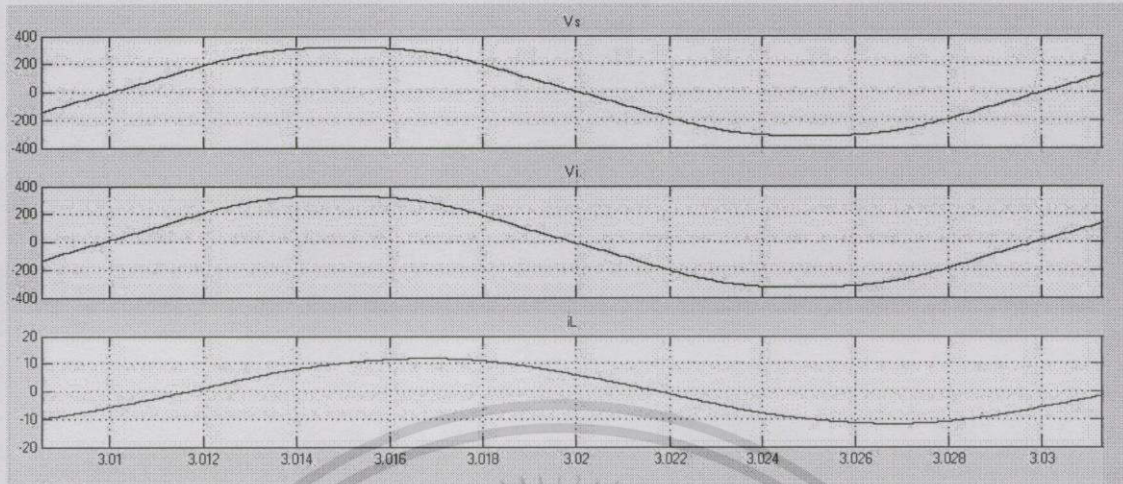


รูปที่ 3.35 กรณีที่ 3 เปรียบเทียบค่ากระแสค่าสั่ง(สีดำ)และค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนกลับ(สีชมพู)

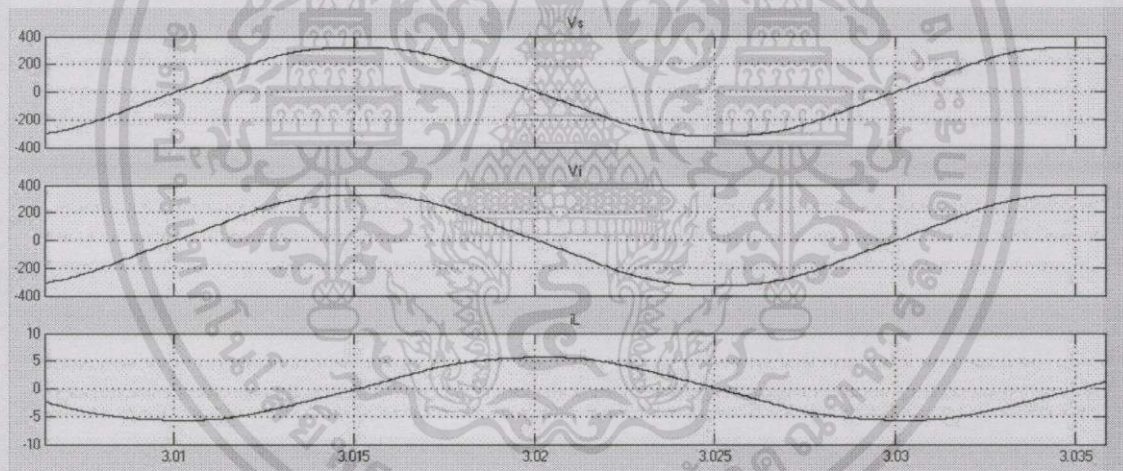


รูปที่ 3.36 กรณีที่ 1 รูปคลื่นแรงดันระบบ(บน),แรงดันจากอินเวอร์เตอร์(กลาง)  
และกระแสที่ไหลเข้าสู่ระบบ(กลาง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



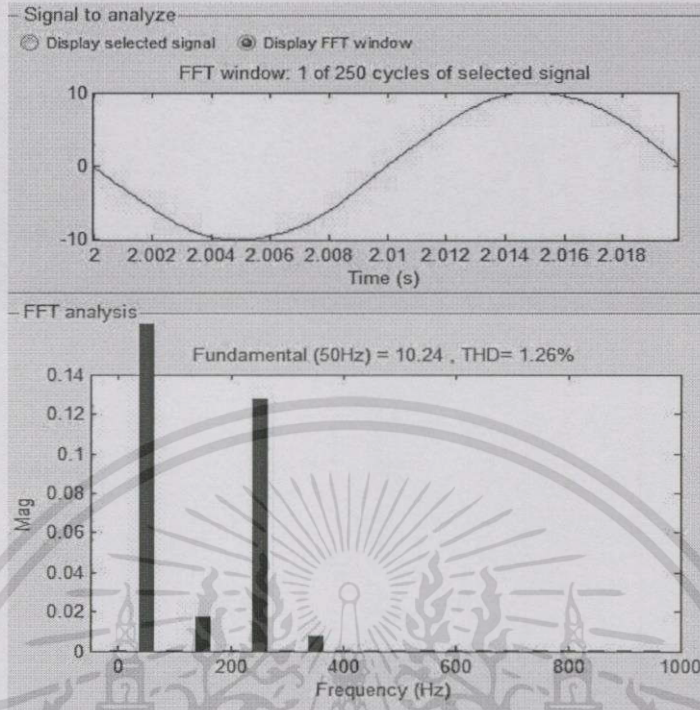
รูปที่ 3.37 กรณีที่ 2 รูปคลื่นแรงดันระบบ(บน),แรงดันจากอินเวอร์เตอร์(กลาง)  
และกระแสที่ไหลเข้าสู่ระบบ(กลาง)



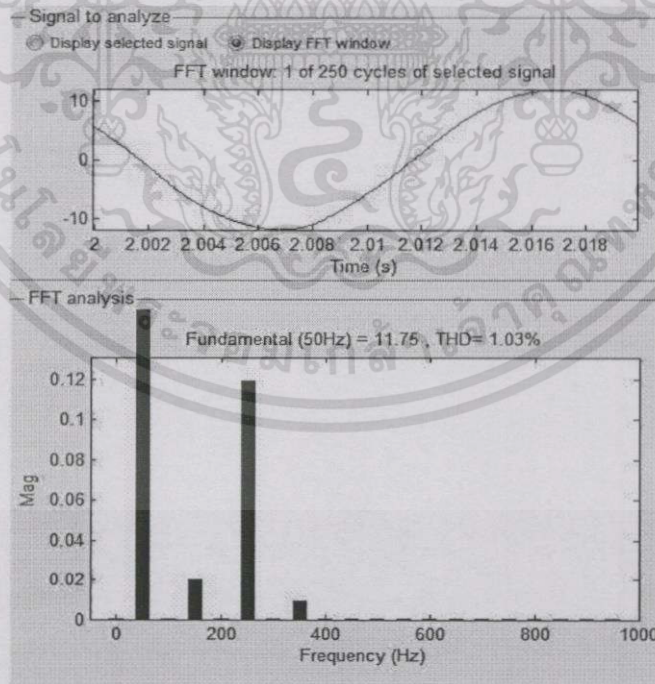
รูปที่ 3.38 กรณีที่ 3 รูปคลื่นแรงดันระบบ(บน),แรงดันจากอินเวอร์เตอร์(กลาง)  
และกระแสที่ไหลเข้าสู่ระบบ(กลาง)

ซึ่งค่ากระแสที่ออกมาจะมีฮาร์มอนิกส์ปนออกมาด้วย เมื่อทำการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกและดูค่า %THD ด้วยฟังก์ชัน FFT ใน Power GUI ได้ผลดังรูปที่ 3.39-3.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

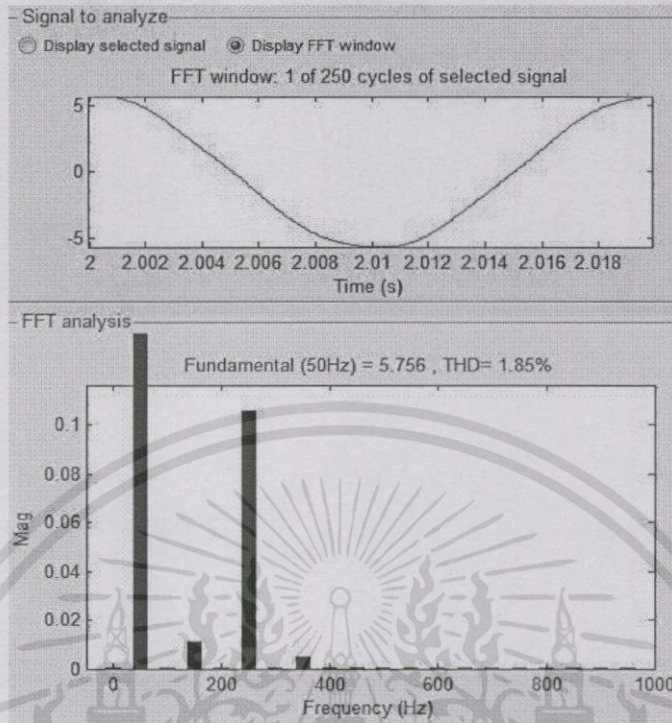


รูปที่ 3.39 องค์ประกอบฮาร์มอนิกและค่า%THDในกรณีที่ 1



รูปที่ 3.40 องค์ประกอบฮาร์มอนิกและค่า%THDในกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.41 องค์ประกอบฮาร์มอนิกและค่า%THDในกรณีที่ 3

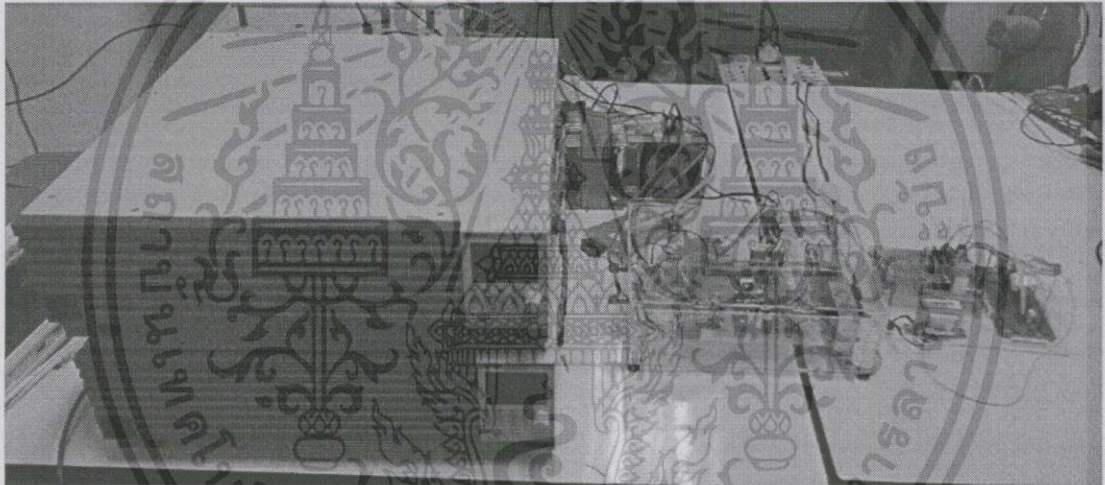
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

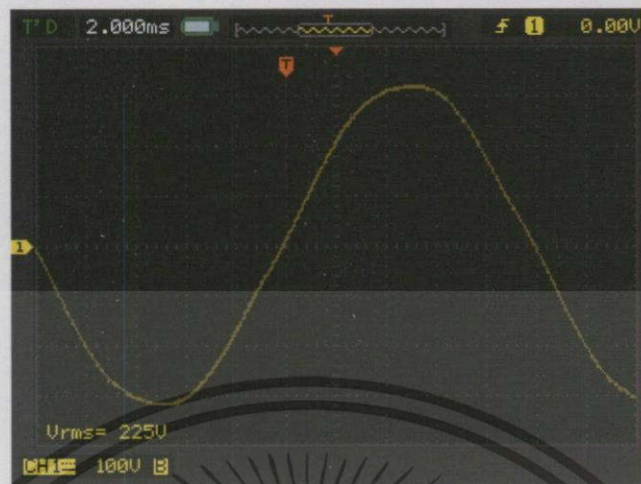
#### ผลการทดลองของชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน

จากโปรแกรมที่เขียนไว้ข้างต้นและสั่งการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์โดยระบบรวมของชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทนโดยใช้ชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทนทำงานเปรียบเสมือนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทนที่ผ่านระบบควบคุมซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 4.1



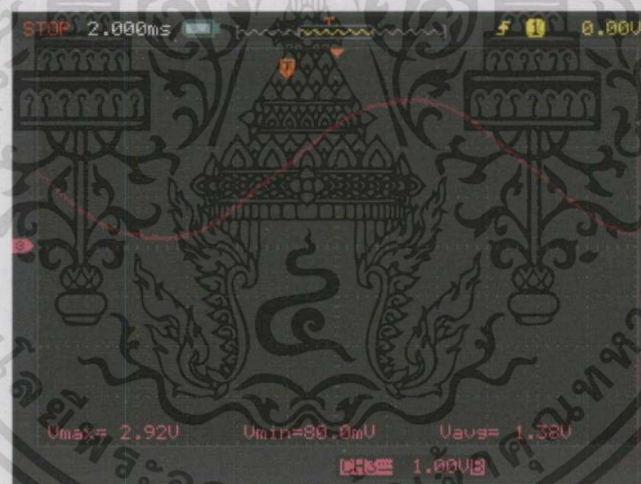
รูปที่ 4.1 ชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน

เริ่มด้วยแรงดันอ้างอิงจากระบบนั้นมีลักษณะดังรูปที่ 4.2 เป็นแรงดัน 1 เฟสที่นำมาใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงแต่ก่อนอื่นต้องนำมาแปลงเป็นสัญญาณที่สามารถส่งให้กับ DSP TMS320F28335 ได้ โดยนำมาผ่านวงจรลดทอนแรงดัน โดยวงจรลดทอนแรงดันปรับสัญญาณที่จะส่งให้กับ DSP ซึ่งจะได้แรงดัน 0-3V โดยวงจรลดทอนแรงดัน



รูปที่ 4.2 แรงดัน 1 เฟสจากระบบ

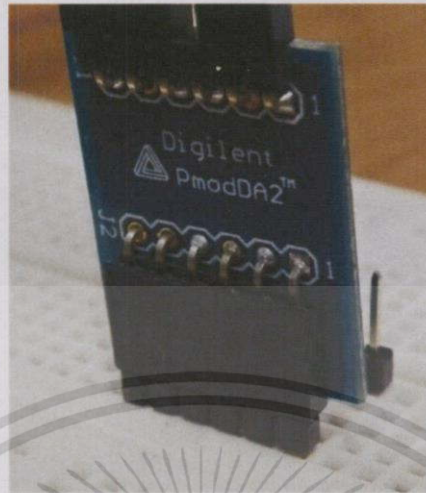
เมื่อผ่านสัญญาณไปยังวงจรลดทอนแรงดันจะได้สัญญาณขาออกดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 สัญญาณแรงดันขาออกของวงจรลดทอนแรงดัน

DSP จะรับสัญญาณในรูปที่ 4.3 นี้เป็นสัญญาณอ้างอิงสำหรับควบคุมแรงดันที่จะส่งให้กับอินเวอร์เตอร์โดยส่งไปเป็นสัญญาณแรงดัน แต่เนื่องด้วยสัญญาณที่ออกจาก DSP ยังเป็นสัญญาณดิจิทัลจากการแปลงเป็น Analog to Digital เพื่อใช้สัญญาณ Digital นี้ในการคำนวณ ดังนั้นในการส่งสัญญาณเป็นสัญญาณ Analog จะใช้อุปกรณ์ Digital to Analog Converter (DAC) โดยอุปกรณ์ DAC ที่ใช้คือ Digilent PmodDA2 แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 เพื่อส่งสัญญาณ Analog ที่ได้นี้ให้กับอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



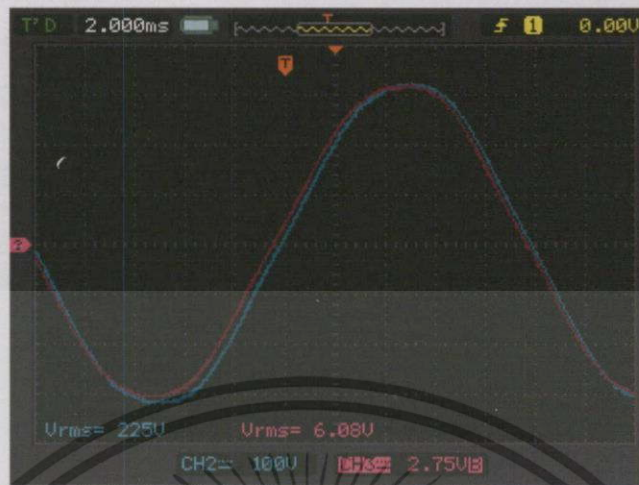
รูปที่ 4.4 Digital to Analog Converter

ซึ่งสัญญาณที่ได้จาก DAC นั้นเป็นแรงดันที่มีขนาด 0-3V แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ก่อนที่จะส่งสัญญาณนี้ให้กับอินเวอร์เตอร์เราต้องทำการปรับขยายสัญญาณให้เป็น -10V ถึง 10V โดยวงจรขยายสัญญาณ และรูปสัญญาณที่ขาออกของวงจรขยายสัญญาณแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 สัญญาณขาเข้าของวงจรขยายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 สัญญาณขาออกของวงจรขยายสัญญาณ (สัญญาณสี่เหลี่ยม) และ สัญญาณขาเข้าเทียบกับสัญญาณขาออกของอินเวอร์เตอร์ (สัญญาณสี่เหลี่ยม)

รูปที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบสัญญาณขาเข้าของอินเวอร์เตอร์กับสัญญาณขาออกของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะขยายสัญญาณขึ้นก่อนส่งให้กับระบบโดยการเชื่อมต่อเข้ากับระบบนั้นเราจะใช้วิธีการ ฉีดกระแสและนำกระแสไปป้อนกลับเข้ากับระบบควบคุมที่เขียนโปรแกรมไว้บน DSP เป็นการควบคุมแบบวงรอบปิด ก่อนทำการเชื่อมต่อเราจะต้องตรวจดูเงื่อนไขของการเชื่อมต่อดังรูปที่ 4.7

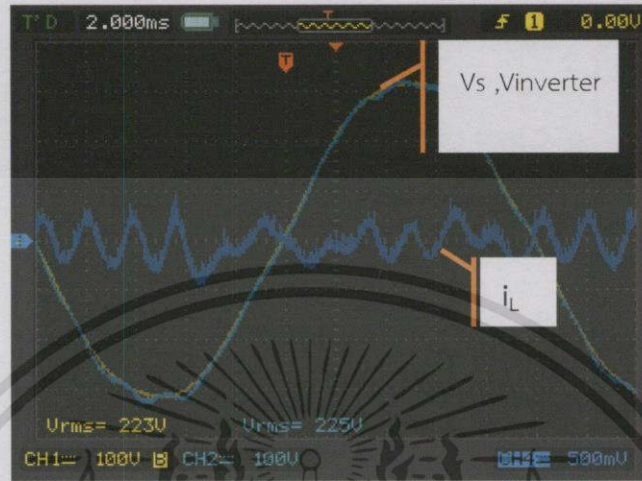


รูปที่ 4.7 แรงดันขาออกจากอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันของระบบ

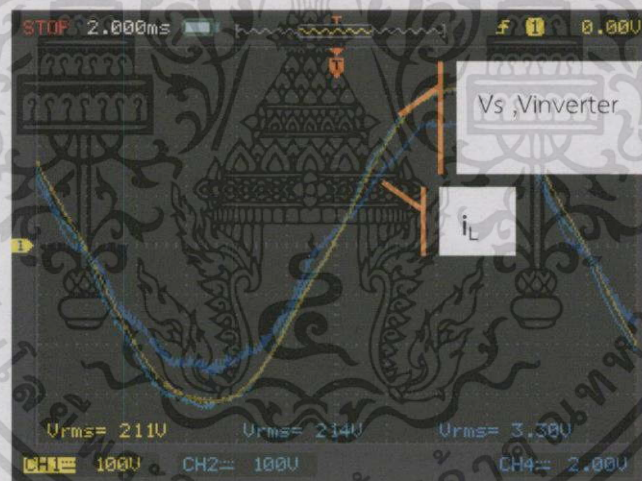
จากนั้นจึงสั่งการจากคอมพิวเตอร์ให้ทำการเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าที่ใช้และสามารถส่งจ่ายกำลังจริงและกำลังเสมือนให้กับระบบได้ โดยในรูปที่ 4.8 เป็นการส่งกำลังจริง 0W ให้กับระบบ จากนั้นรูปที่ 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, และ 4.13 เป็นผลการทดลองส่งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าต่างๆให้กับระบบ

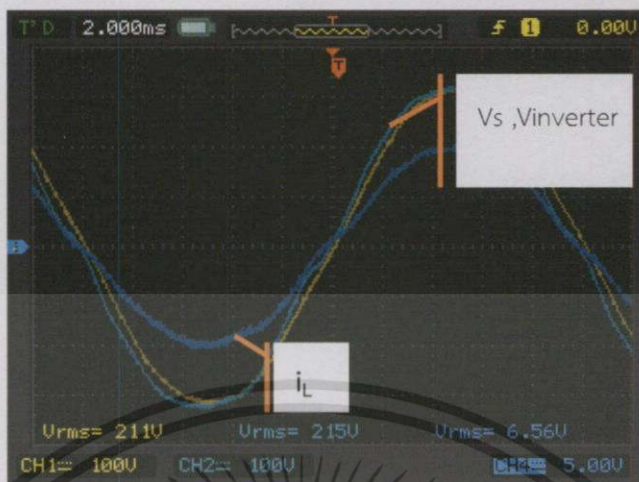


รูปที่ 4.8 แรงดันของระบบ, แรงดันอินเวอร์เตอร์ และ กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ

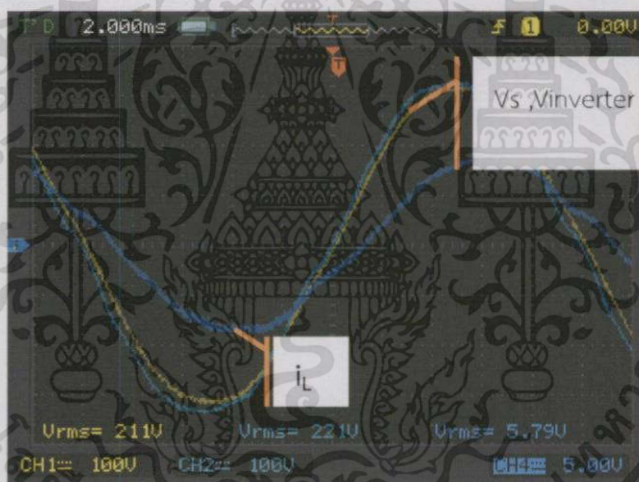


รูปที่ 4.9 แรงดันของระบบ, แรงดันอินเวอร์เตอร์ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ  
ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง 750W

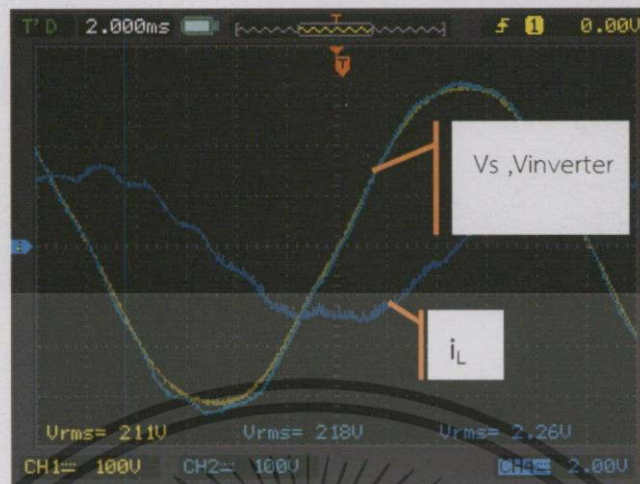
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



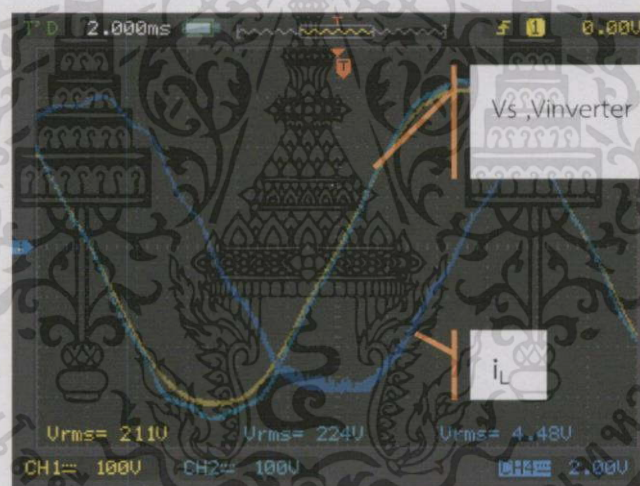
รูปที่ 4.10 แรงดันของระบบ, แรงดันอินเวอร์เตอร์ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ  
ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง 1500W



รูปที่ 4.11 แรงดันของระบบ, แรงดันอินเวอร์เตอร์ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ  
ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง 1200W กำลังไฟฟ้าเสมือน 900 Var



รูปที่ 4.12 แรงดันของระบบ, แรงดันอินเวอร์เตอร์ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ ขณะจ่ายเฉพาะกำลังเสมือน 450 Var



รูปที่ 4.13 แรงดันของระบบ, แรงดันอินเวอร์เตอร์ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ ขณะจ่ายเฉพาะกำลังเสมือน 900 Var

ผลการทดลองพบว่าชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทนสามารถส่งกำลังไฟฟ้าจริงให้กับระบบไฟฟ้าได้จริง แต่รูปสัญญาณที่เห็นจากรูปที่ 4.9 และ 4.10 ที่มีเพียงการส่งกำลังจริงเท่านั้นมีรูปคลื่นที่มีสัญญาณรบกวนไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ทั้งแรงดันอินเวอร์เตอร์และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำและยังจ่ายค่ากำลังจริงที่สูงขึ้นก็จะมีแรงดันกระแสเฟืองของแรงดันอินเวอร์เตอร์ที่มากขึ้นตามรูปที่ 4.11 เมื่อมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีเฟสที่เลื่อนไปในลักษณะตามหลังแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันอินเวอร์เตอร์มีการสั่นที่มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

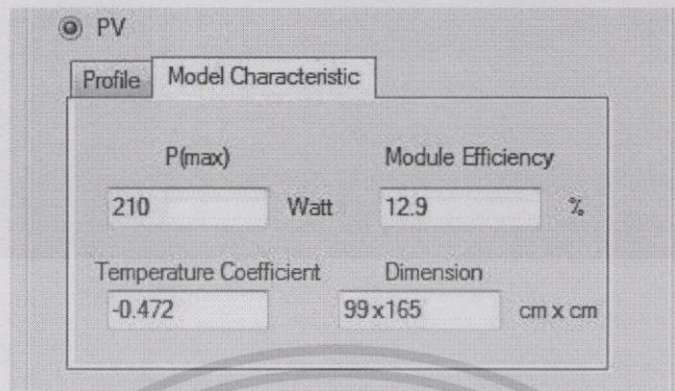
รูปที่ 4.12 และ 4.13 เป็นการจ่ายเพียงแต่กำลังไฟฟ้าเสมือนซึ่งจะเห็นว่ากระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำมีเฟสล่าหลังแรงดันอินเวอร์เตอร์และเมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนที่มากขึ้นแรงดันอินเวอร์เตอร์จะมีการกระเพื่อมที่มากขึ้น

รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองที่ไม่เป็นไซน์สมบูรณ์นั้นเนื่องจากแหล่งจ่ายไฟของระบบมีฮาร์มอนิกส์ของแรงดันปรากฏอยู่ด้วยดังจะเห็นได้จากรูปคลื่นของแรงดันที่วัดได้ในรูปที่ 4.6 แต่เนื่องจากในการออกแบบระบบควบคุมของกระแสไฟฟ้าได้ออกแบบให้สามารถชดเชยผลของฮาร์มอนิกส์แรงดันของระบบจึงทำให้กระแสที่ได้ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์สมบูรณ์

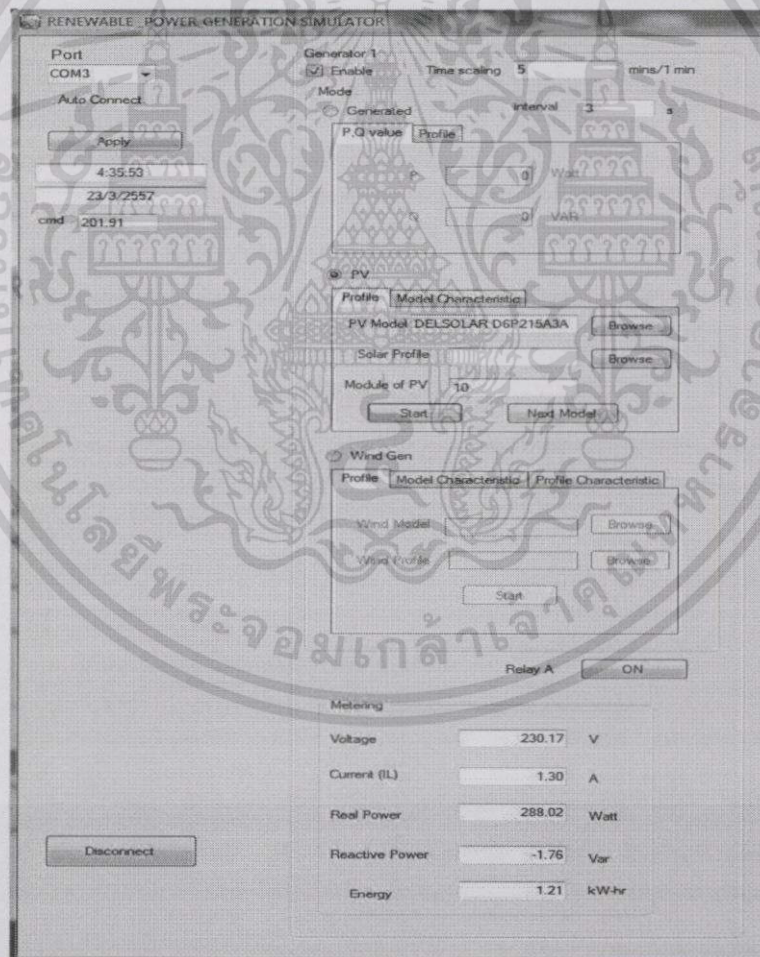
นอกจากการกำหนดค่ากำลังที่ต้องการได้แล้วยังสามารถป้อนค่าโปรไฟล์พลังงานตลอดทั้งวันให้กับโปรแกรมได้ โดยในโปรแกรมนี้สามารถรับค่าโปรไฟล์จากอินเวอร์เตอร์ของ ABB Solar Inverter PVS300-TL-3300W-2

#### 4.1 ผลการทดลองการเชื่อมต่อการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ผลการทดลองการจำลองการจ่ายกำลังของกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัทต่างๆ โดยในปริทัศน์ฉบับนี้จะทำการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท DELSOLAR รุ่น D6P210A35 โดยมีคุณลักษณะดังนี้พิกัดกำลัง 210 W ประสิทธิภาพอยู่ที่ 12.9 % สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ -4.372 ขนาด 99x165 ตารางเซนติเมตร โดยมีการปรับค่าของความเข้มแสงและอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากโปรไฟล์ความเข้มแสงและอุณหภูมิจากสถานที่ต่างๆที่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์โดยในที่นี้จะใช้โปรไฟล์จากรัฐ North Carolina ประเทศสหรัฐอเมริกา (Latitude : 35.643000 N ,Longitude : -82.161000 W , Elevation : 434 meters) แล้วให้โปรแกรมที่เขียนขึ้นในคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลคำนวณและส่งค่าที่คำนวณได้ให้ DSP นำไปประมวลผล โดยโปรแกรมสามารถทำการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ 1 แผงหรือหลายๆแผงพร้อมกัน โดยทุกแผงต้องมีคุณลักษณะเหมือนกัน นอกจากนั้นยังสามารถย่อเวลาจำลองการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ทำให้ใช้เวลาในการจำลองได้เร็วขึ้น เช่น สามารถจำลองการผลิตกำลังไฟฟ้าตลอดทั้งวันได้ภายใน 2 ชั่วโมงได้ รูปที่ 4.16 แสดงผลการทดลองโดยแสดงรูปคลื่นแรงดันของระบบไฟฟ้า, แรงดันของอินเวอร์เตอร์, และ กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ และรูปที่ 4.17 แสดงกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายให้กับระบบไฟฟ้า

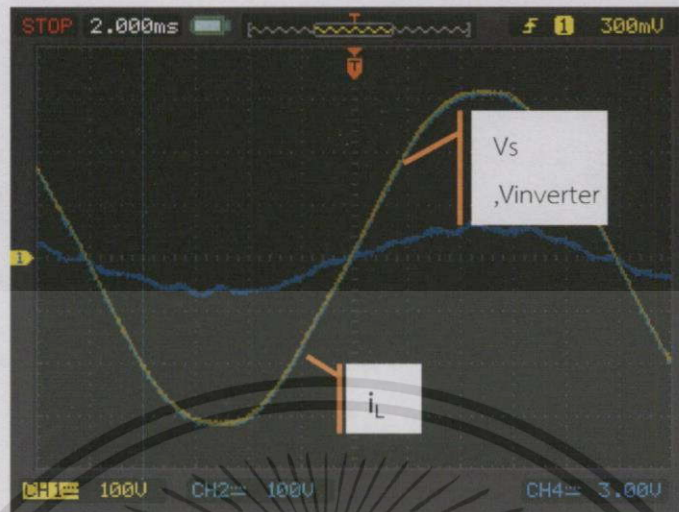


รูปที่ 4.14 คุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.15 โปรแกรมสั่งการที่ใช้บนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โหมด PV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่ากระแสและแรงดันเมื่อจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์



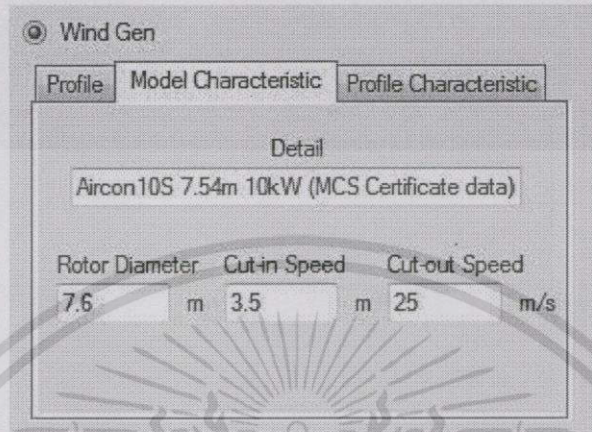
รูปที่ 4.17 การจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

#### 4.2 ผลการทดลองการเชื่อมต่อการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานลม

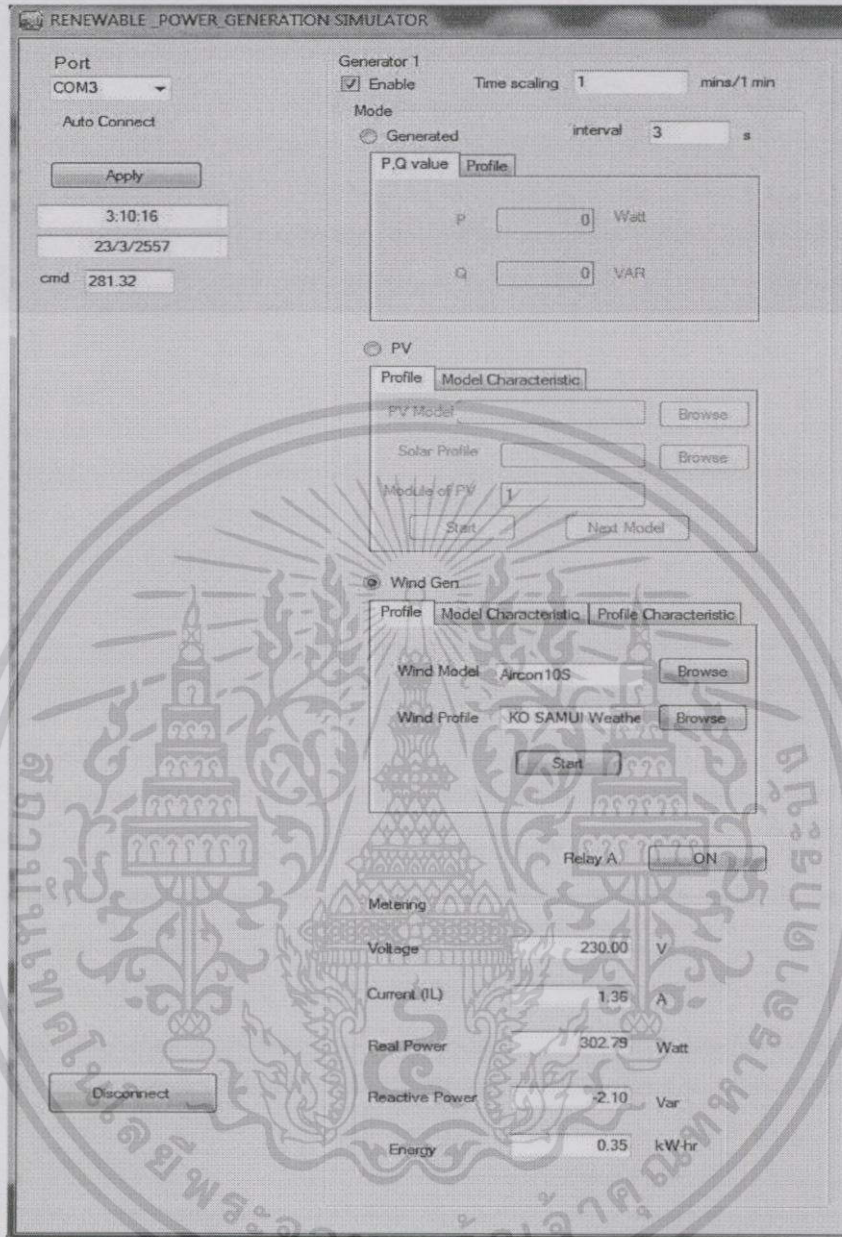
ผลการทดลองการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการผลิตกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าของบริษัท Aircon 10S ซึ่งมีคุณลักษณะดังรูปที่ 4.18 โดย มีความสูง 7.54 เมตร กำลังการผลิตที่พิกัด 10 kW เส้นผ่านศูนย์กลางโรเตอร์ 7.6 เมตร คัทอินสปีดที่ 3.5 เมตรต่อวินาที คัทเอาทสปีดที่ 25 เมตรต่อวินาที โดยมีตัวแปรสำคัญในการคำนวณกำลังไฟฟ้าคือ power curve ของกังหันลมตัวนั้นๆ และโปรไฟล์ความเร็วลมในแต่ละพื้นที่ ซึ่งในปฏิญญาฉบับนี้ใช้โปรไฟล์ความเร็วลมจากเกาะสมุย จังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยไม่โครคอนโทรลเลอร์รับค่าตัวแปรจากคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลผ่านโปรแกรมสั่งการดังแสดงดังรูปที่ 4.19 นอกจากนั้นยังสามารถย่อเวลาจำลองการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ทำให้ใช้เวลาใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองได้เร็วขึ้น เช่น สามารถจำลองการผลิตกำลังไฟฟ้าตลอดทั้งวันได้ภายใน 2 ชั่วโมงได้ มีผลการทดลองแสดงรูปคลื่นแรงดันของระบบไฟฟ้า, แรงดันของอินเวอร์เตอร์, และ กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ แสดงดังรูปที่ 4.20

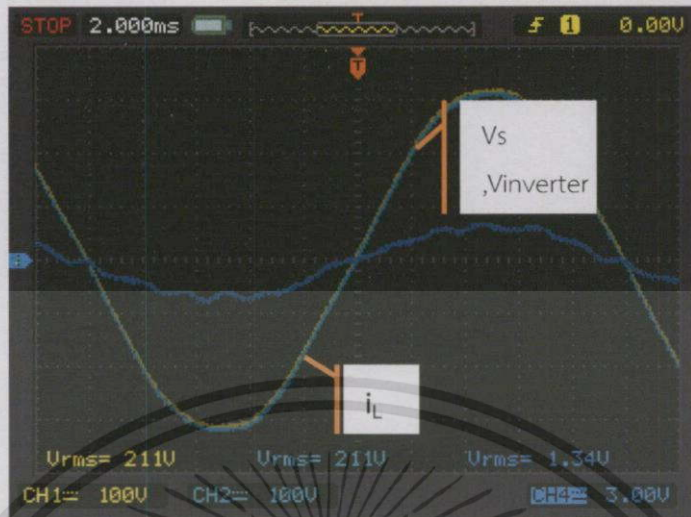


รูปที่ 4.18 คุณลักษณะของกังหันลม



รูปที่ 4.19 โปรแกรมสั่งการที่ใช้บนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลโหมด Wind Generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่ากระแสและแรงดันเมื่อจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 4.21 กำลังไฟฟ้าการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทนโดยมีการเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าที่ใช้ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับระบบได้จากผลการทดลองที่ได้ทำการทดลองแล้ว โดยมีการควบคุมเฟสและควบคุมกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำด้วยโปรแกรมที่เขียนบนไมโครคอนโทรลเลอร์ และสามารถสั่งการทำงานได้จากคอมพิวเตอร์ที่เขียนโปรแกรมให้สามารถสั่งการไปให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้

ในระบบของชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทนนี้ใช้ Power Amplifier Kikusui ทำหน้าที่เป็นอินเวอร์เตอร์ให้กับระบบสามารถขยายสัญญาณแรงดันที่ส่งให้ได้จากนั้นจึงส่งต่อให้กับระบบที่ทำการเชื่อมต่อได้โดยสามารถจ่ายได้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนโดยกำลังไฟฟ้าจริงจะพิกัดไว้ที่ 1600 W ส่วนกำลังไฟฟ้าเสมือนจะพิกัดไว้ที่ 900 Var เนื่องจากเป็นพิกัดที่ Power Amplifier ตัวนี้รองรับได้ จากผลการทดลองในบทที่ 4 จะเห็นว่าชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทนสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนพร้อมกันและจ่ายให้กับระบบไฟฟ้าที่ใช้ได้จริง นอกจากนี้ยังสามารถแยกจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงหรือกำลังไฟฟ้าเสมือนได้

ผลจากการทดลองนั้นจะนำเสนอเพียงเฟสเดียวเท่านั้น ในการจ่ายกำลังทั้ง 3 เฟสก็สามารทำได้ด้วยการจ่ายแบบแยกอิสระทั้ง 3 เฟสได้ตามรูปแบบของตัวอย่าง 1 เฟสที่ทำการทดลองโดยมีหลักการทำงานที่เหมือนกันแต่แยกจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนให้ทั้ง 3 เฟสพร้อมกัน

#### 5.2 อุปสรรคและข้อเสนอแนะ

##### 5.2.1 อุปสรรค

สำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลอง

มีแรงดันตกคร่อมที่โซลิตสเตตรีเลย์ เมื่อที่แรงดันต่ำๆทำให้ไม่มีกระแสไหล ทำให้รูปคลื่นกระแสผิดเพี้ยน เมื่อรูปคลื่นกระแสผิดเพี้ยนทำให้การควบคุมมีความผิดพลาด

การปรับความเหมาะสมของอุปกรณ์ที่ใช้ในชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน

ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าแรกเริ่มหากจ่ายกำลังที่สูงตั้งแต่เริ่มจะมีกระแสไฟฟ้าสภาวะชั่วขณะในตอนแรกที่สูงอาจทำให้รีเลย์ทำการเปิดวงจรก่อนได้

เมื่อทำการแยกจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนค่ามากๆ จะทำให้กำลังไฟฟ้าจริงมีค่าเป็นลบ หรือ Power Amplifier Kikusui ได้รับกำลังไฟฟ้าจริงจากกริด

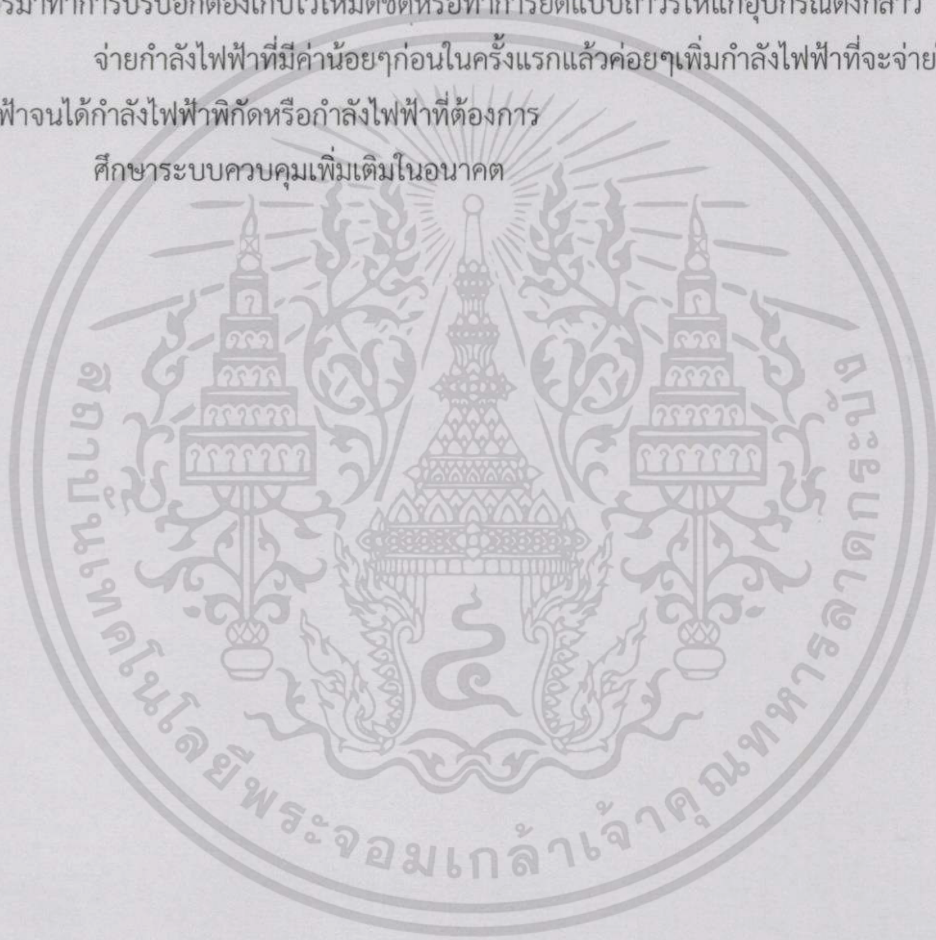
### 5.2.2 แนวทางแก้ไข

ทำการเปลี่ยนโซลิตเซตตรีเลย์ตัวใหม่ ที่ไม่มีแรงดันตกคร่อม

หลังจากที่ทำการปรับค่าความต้านทานที่ใช้ในวงจรถดทอน/ขยายสัญญาณต้องระวังไม่ให้มีใครมาทำการปรับอีกต้องเก็บไว้ให้มิดชิดหรือทำการยึดแบบถาวรให้แก่อุปกรณ์ดังกล่าว

จ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีค่าน้อยๆก่อนในครั้งแรกแล้วค่อยๆเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่จะจ่ายให้กับระบบไฟฟ้าจนได้กำลังไฟฟ้าพิกัดหรือกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ

ศึกษาระบบควบคุมเพิ่มเติมในอนาคต



## เอกสารอ้างอิง

- [1] ธนกฤต กิตติวรารัตน์, ปณต เขิดชูเหล่า, พัฒนธิต ชูติกุล, “ชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน”, ปรียญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555
- [2] นายสมชาย ภูวงศ์ไพบูลย์, “ทฤษฎีการเกิดลมและการเคลื่อนที่ของลม”, แผนที่ยศกยภาพพลังงานลมของประเทศไทย, กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, 2544
- [3] ผศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล, “ไดอะแกรมระบบควบคุมและการวิเคราะห์เสถียรภาพ”, ระบบควบคุม, พฤศจิกายน 2554
- [4] Se-Kyo Chung, Member, IEEE, “A Phase Tracking System for Three Phase Utility Interface Inverters”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.15, No.3, MAY 2000
- [5] ดร.วรชาติ แซ่ก๊ก, “สเปซเวกเตอร์และทฤษฎีกรอบอ้างอิง”, เอกสารประกอบการสอนวิชา Electrical Machine Drives and System สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน

### RENEWABLE POWER GENERATION SIMULATOR

วังเจจ หน่อเทพ, สราษุทธ จิตประสงศ์, ศันสนะ ตรีอาทิตย์โยธิน และ ศิริสิทธิ์ พิริยะคุณธร  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
1 ซอยฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925

#### บทคัดย่อ

ปฏิญานิทรรศการนี้ นำเสนอการจำลองการกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทนสำหรับใช้ในการศึกษาและ จำลองระบบการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทนแบบต่างๆกับระบบไฟฟ้าเพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพและวิเคราะห์ผลกระทบต่างๆ เมื่อเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทนเข้าสู่ระบบไฟฟ้าโดยไม่ต้องมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้านั้นจริง มาเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ในปฏิญานิทรรศการนี้ได้ทำการศึกษาและจำลองระบบควบคุมแบบบ่อนกลับ เพื่อให้ได้สัญญาณที่เชื่อมต่อกับระบบแล้วจึงขยายสัญญาณเอาท์พุทด้วยอุปกรณ์ขยายกำลังขนาด 2kVA นอกจากนี้ยังสามารถสั่งการทางเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมของชุดจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทนได้

#### Abstract

This paper presents experimental results of Renewable Power Generation Simulator for studying and model connection of renewable energy source into utility grid. Without actual renewable energy source This Renewable Power Generation Simulator can be used instead. This can analyze the effects and performance before actual renewable energy source connected. Negative feed back control is used in this paper. The output signal from controller is amplify by a 2 kVA Power Amplifier (inverter). In addition, it can be controlled power output by computer

#### 1. บทนำ

การทำกรจำลองการเชื่อมต่อของแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนกับระบบไฟฟ้าจริงนั้นมีประโยชน์อย่างมาก เราจึงได้นำปฏิญานิทรรศการเรื่อง

“ชุดจำลองการกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทน” สำหรับใช้ในการศึกษาและจำลองระบบการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทนแบบต่างๆกับระบบไฟฟ้า นำมาศึกษาและพัฒนา จากการศึกษาในขั้นต้นเราพบปัญหาของชุดจำลองนี้ได้แก่

- 1.การควบคุมกระแสไม่เป็นคลื่นรูปไซน์ เนื่องจากแรงดันในระบบไฟฟ้ามีฮาร์มอนิก
- 2.หม้อแปลงตรวจจับแรงดันมีความผิดเพี้ยนทางรูปคลื่นสูงเนื่องจากการอิ่มตัวของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก เนื่องจากใช้หม้อแปลงทั่วไปที่ไม่ได้ออกแบบมาโดยเฉพาะ
- 3.ปัญหาความผิดพลาดในการควบคุมกำลังไฟฟ้า หรือ ความผิดพลาดของการควบคุมขนาดของกระแส เนื่องจากการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ไม่เหมาะสม

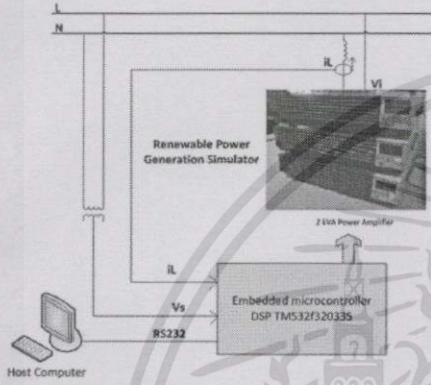
จากรูปที่แสดงชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน 1 โดยชุดจำลองนี้สามารถจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม ได้ตาม โปรแกรมที่ติดตั้งไว้ในคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและตัวควบคุม TMS320F28335 ทำหน้าที่ในการควบคุมกำลังขาออกจากอุปกรณ์ขยายกำลังขนาด 2kVA ก่อนที่จะจำหน่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับ

ระบบควบคุมนี้จะใช้หลักการทำงานของ Phase-Lock Loop และการควบคุมกระแส เพื่อที่จะสามารถซิงโครไนซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทนเข้ากับระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับได้

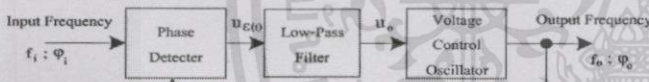
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2. เฟสล็อกลูป (Phase-Lock Loop) [3]

เฟสล็อกลูป (Phase-Lock Loop) เป็นระบบควบคุมความถี่โดยใช้วิธีเปรียบเทียบเฟส (Phase) ของความถี่ทางด้านเอาต์พุตกับเฟสของความถี่อ้างอิง (Reference Frequency) ซึ่งถูกป้อนเข้าทางด้านอินพุตของระบบ ในรูปที่ 1 เป็นแผนผังของ 2PLLเบื้องต้น



รูปที่ 1 Renewable Power Generation Simulator



รูปที่ 2 วงจร Phase-Lock Loop เบื้องต้น

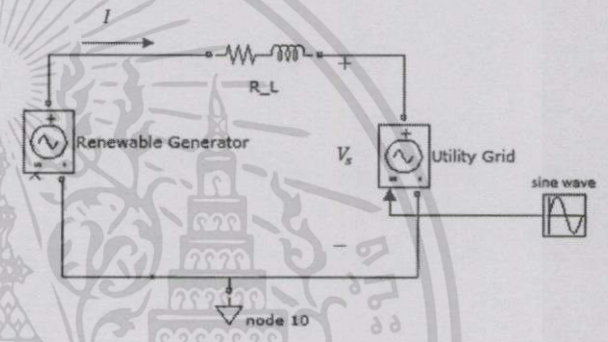
วงจรตรวจจับเฟส/ความถี่ (Phase Detector) ทำหน้าที่เปรียบเทียบความแตกต่างของเฟส ( $\theta_e$ ) ระหว่างสัญญาณอินพุต ( $V_{in}$ ) และสัญญาณจากวงจรรอสซิลเลเตอร์ ( $V_{osc}$ ) โดยมีสัญญาณเอาต์พุต คือ สัญญาณผิดพลาด (Error Signal)

วงจรรอง (Loop Filter) ทำหน้าที่กำจัดองค์ประกอบความถี่สูงที่ปะปนมากับสัญญาณผิดพลาด (Error Signal)

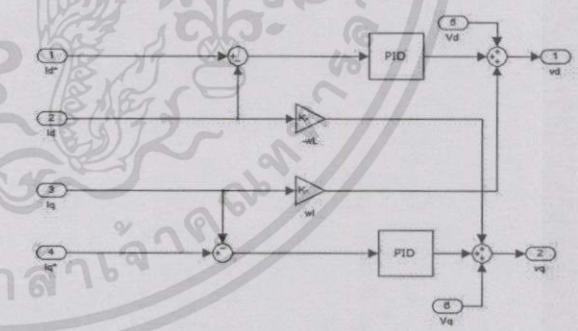
วงจรรอสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมโดยแรงดัน (Voltage-Controlled Oscillator, VCO) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณเอาต์พุตไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต ( $V_{in}$ ) โดยความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเปลี่ยนไปตามแรงดัน  $U_e$

### 3. ระบบควบคุมกระแส

การส่งสัญญาณแรงดันให้กับอินเวอร์เตอร์จะใช้การควบคุมด้วยระบบควบคุมป้อนกลับกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำในระบบทางไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ซึ่งระบบควบคุมจะเป็นแบบ Negative Feedback Control Loop โดยควบคุมด้วย PI Controller ระบบควบคุมวงรอบปิดนี้จะช่วยควบคุมกระแสคำสั่งซึ่งมาจากการป้อนค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการและแปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงหมุน จากนั้นระบบควบคุมจะเปลี่ยนค่ากระแสเป็นแรงดัน แล้วนำแรงดันที่ได้ไปเป็นสัญญาณแรงดันส่งให้กับอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3 การเชื่อมต่อเข้าระบบไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม

จากรูปที่ 4 เป็นบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม สัญญาณที่นำมาเข้าระบบควบคุมมีอยู่ 4 สัญญาณ คือ สัญญาณกระแสอ้างอิงในแนวแกน d สัญญาณกระแสอ้างอิงในแนวแกน q สัญญาณกระแสที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ในแนวแกน d และ สัญญาณกระแสที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ในแนวแกน q โดยนำสัญญาณมาควบคุมในระบบควบคุมวงรอบปิดแล้วนำไปแปลงเป็นแรงดันขาเข้าให้กับอินเวอร์เตอร์ แต่สัญญาณที่ออกมายังเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันที่อยู่ในกรอบอ้างอิงหมุน ก่อนนำไปต่อเข้าอินเวอร์เตอร์ต้องทำการแปลงแรงดันนี้ให้อยู่ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเสียก่อน ซึ่งมีความสัมพันธ์กันตามสมการดังต่อไปนี้

$$V_d^* = V_d + \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) (I_d^* - I_d) + \omega L I_q \quad (3.1)$$

$$V_q^* = V_q + \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) (I_q^* - I_q) - \omega L I_d \quad (3.2)$$

สมการที่ (3.1) และ (3.2) เป็นสมการแสดงการแปลงกระแสที่ควบคุมแล้วเป็นแรงดันขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ในกรอบอ้างอิงหมุน

#### 4. การทดลองและผลการทดลองชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน

จากโปรแกรมที่เขียนไว้ข้างต้นและสั่งการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ โดยระบบรวมของชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน โดยใช้ชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทนทำงานเปรียบเสมือนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทนที่ผ่านระบบควบคุมจึงเป็นไปตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 ชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน

เริ่มด้วยแรงดันอ้างอิงจากระบบเป็นแรงดัน 1 เฟสที่นำมาใช้เป็นสัญญาณอ้างอิง โดยจะสามารถส่งให้กับ DSP โดยต้องผ่านวงจรลดทอนแรงดันก่อน จากนั้น DSP จะแปลงสัญญาณแรงดันที่วัดได้เป็นสัญญาณ Digital เพื่อใช้ในการคำนวณ หลังจากคำนวณเสร็จ DSP จะส่งค่าที่คำนวณได้ออกมาเป็นสัญญาณ Digital ดังนั้นจึงต้องใช้อุปกรณ์ Digital to Analog Converter (DAC) แปลงสัญญาณ Inverter เพื่อส่งให้กับ Analog เป็น Digital สัญญาณที่ได้จาก DAC มีขนาด จึงนำไปผ่านวงจรขยายสัญญาณเพื่อ .V 3-0 ปรับสัญญาณให้มีค่า -10 V. ถึง 10 V. แล้วส่งให้ Inverter สร้างแรงดันดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แรงดันขาออกจากอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันของระบบ

จากนั้นทำการทดลองจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงที่ 1500 W ได้แรงดันที่ Inverter และ กระแสที่ไหลเข้า Grid ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แรงดันของระบบ, แรงดันอินเวอร์เตอร์ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำขณะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง 1500W

จากนั้นทำการทดลองจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงที่ 1200 W และกำลังไฟฟ้าเสมือน 900 Var ได้แรงดันที่ Inverter และ กระแสที่ไหลเข้า Grid ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แรงดันของระบบ, แรงดันอินเวอร์เตอร์ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำขณะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง 1200W กำลังไฟฟ้าเสมือน 900Var

#### 5 สรุปผลการวิจัย

ปัญญานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทนโดยมีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าที่ใช้ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับระบบได้ โดยมีการควบคุมเฟสและควบคุมกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำด้วยโปรแกรมที่เขียนบนไมโครคอนโทรลเลอร์ และสามารถสั่งการทำงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคอมพิวเตอร์ที่เขียน โปรแกรมให้สามารถส่งการไปให้กับ ไมโครคอนโทรเลอร์ได้

ในระบบของชุดจำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทนนี้ใช้ Power Amplifier Kikusui ทำหน้าที่เป็นอินเวอร์เตอร์ให้กับระบบสามารถ ขยายสัญญาณแรงดันที่ส่งให้ได้จากนั้นจึงส่งต่อให้กับระบบที่ทำการเชื่อม ได้โดยสามารถจ่ายได้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือน ซึ่งชุด จำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทนสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนพร้อมกันและจ่ายให้กับระบบ ไฟฟ้าที่ใช้ได้จริง นอกจากนี้ยังสามารถแยกจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงหรือกำลังไฟฟ้าเสมือนได้

สำหรับการทดลองนั้นจะนำเสนอเพียงเฟสเดียวเท่านั้น ในการจ่าย กำลังทั้ง 3 เฟสก็สามารถทำได้ด้วยการจ่ายแบบแยกอิสระทั้ง 3 เฟสได้ตาม รูปแบบของตัวอย่าง 1 เฟสที่ทำการทดลองโดยมีหลักการทำงานที่ เหมือนกันแต่แยกจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนให้ทั้ง 3 เฟส พร้อมกัน

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] ธนกฤต กิตติวารัตน์, ปณต เชิดชูเหล่า, ทัศนริช ชูติกุล, “ชุด จำลองการกำเนิดกำลังไฟฟ้าพลังงานทดแทน”, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรม ไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555
- [2] นายสมชาย กุพงษ์สีบุญสง, “ทฤษฎีการเกิดลมและการเคลื่อนที่ของ ลม”, แผนกศึกษภาพพลังงานลมของประเทศไทย, กรมพัฒนาและส่งเสริม พลังงาน, 2544
- [3] ผศสมย.ดร.ศ เกียรติวินชวีไล, “โคอะแกรมระบบควบคุมและการ วิเคราะห์เสถียรภาพ”, ระบบควบคุม, พุทธจักยาน 2554
- [4] Se-Kyo Chung, Member, IEEE, “A Phase Tracking System for Three Phase Utility Interface Inverters”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.15, No.3, MAY 2000
- [5] ดรกวรชาติ แซ่กั., “สเปซเวกเตอร์และทฤษฎีกรอบอ้างอิง”, เอกสาร ประกอบการสอนวิชา Electrical Machine Drives and System สาขา วิศวกรรม ไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553

#### ประวัติผู้เขียน

นาย วังเจง นอ่เทพ

วัน/เดือน/ปีเกิด 7 ตุลาคม 2534

ที่อยู่ 54 หมู่ 12 ตำบล แม่แฝกใหม่ อำเภอ สัน

ทราย จังหวัด เชียงใหม่ 50290

E-mail: w.northep@gmail.com



นาย สรายุทธ จิตประสงค์

วัน/เดือน/ปีเกิด 28 ตุลาคม 2534

ที่อยู่ 108/2 หมู่ 2 ถนน สองแสน ตำบล ไม้

เรียง อำเภอ ฉวาง จังหวัด นครศรีธรรมราช

80260

E-mail: sarayut1535@gmail.com



นาย สันชนะ ศรีวาทิโยธิน

วัน/เดือน/ปีเกิด 27 ธันวาคม 2534

ที่อยู่ 280/35 ถนน ท่าเมือง ตำบล เขานิวศน์

อำเภอ เมือง จังหวัด ระนอง 85000

E-mail: plugy\_kmitl@hotmail.com



นาย ศิริสิทธิ์ พิริยคุณธร

วัน/เดือน/ปีเกิด 28 กุมภาพันธ์ 2535

ที่อยู่ 15 ถนน กาญจนวนิชย์ อำเภอ หาดใหญ่

จังหวัด สงขลา 90112

E-mail: sirasith\_1st@hotmail.com



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นาย วังเรจ หน่อเทพ

วัน/เดือน/ปีเกิด 7 ตุลาคม 2534

ที่อยู่ 54 หมู่ 12 ตำบล แม่แฝกใหม่ อำเภอ สันทราย จังหวัด เชียงใหม่ 50290

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนมงฟอร์ตวิทยาลัย

E-mail: w.northepeg@gmail.com



นาย ศรายุทธ จิตประสงค์

วัน/เดือน/ปีเกิด 28 ตุลาคม 2534

ที่อยู่ 108/2 หมู่ 2 ถนน สองแสน ตำบล ไม้เรียง อำเภอ ฉวาง จังหวัด นครศรีธรรมราช 80260

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนฉวางรัชดาภิเษก

E-mail:sarayut1535@gmail.com



นาย ศันสนะ ตริอาททยโยธิน

วัน/เดือน/ปีเกิด 27 ธันวาคม 2534

ที่อยู่ 280/35 ถนน ท่าเมือง ตำบล เขานเวศน์ อำเภอ เมือง จังหวัด ระนอง 85000

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพิชัยรัตนาคาร

E-mail: plugy\_kmitl@hotmail.com



นาย ศิรสัทธี พิริยคุณธร

วัน/เดือน/ปีเกิด 28 กุมภาพันธ์ 2535

ที่อยู่ 15 ถนน กาญจนวนิชย์ อำเภอ หาดใหญ่ จังหวัด สงขลา 90112

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนแสงทองวิทยา

E-mail: sirasith\_1st@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้