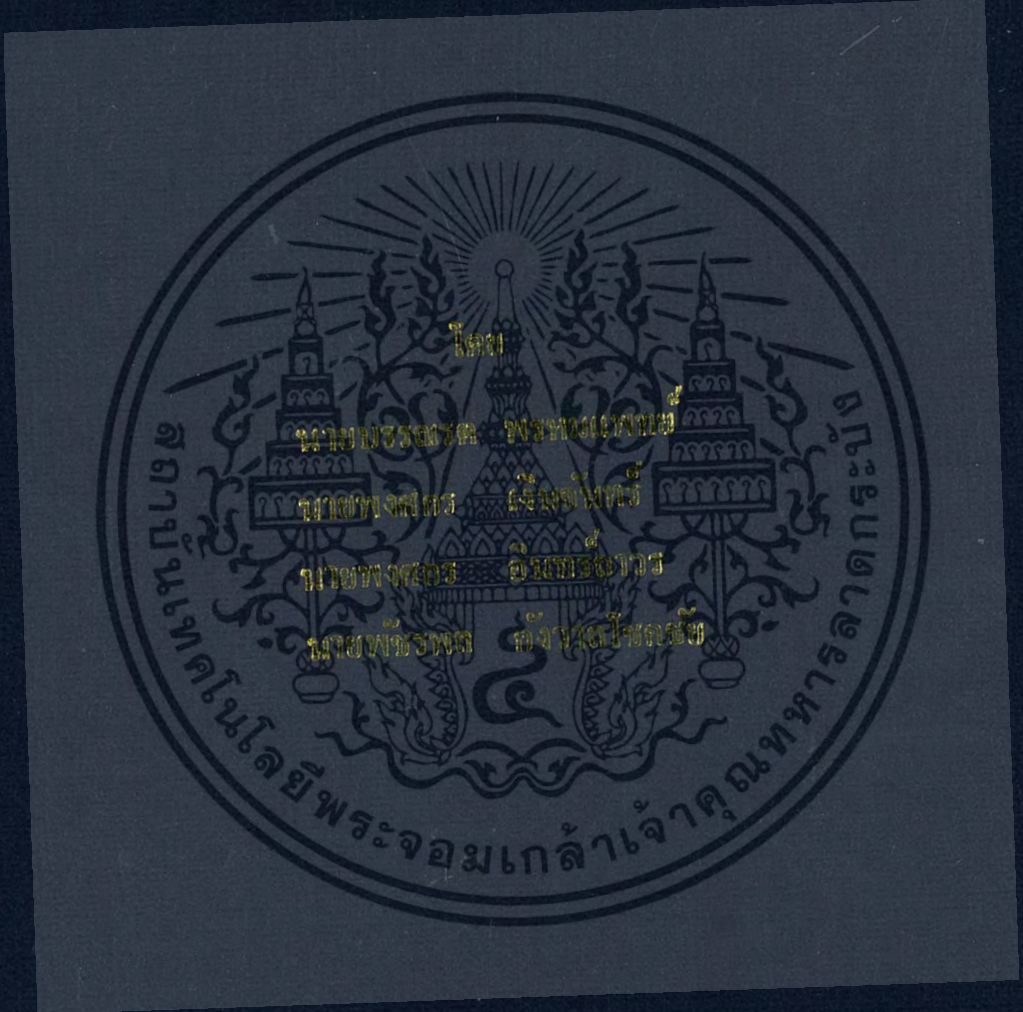


การศึกษาการควบคุมชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรภายในสถานีประจุ  
แบตเตอรี่ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังทดแทนพลังงานแบบไฮบริด

A STUDY OF IPMSG GENERATOR-SET CONTROL FOR CHARGING BATTERY IN  
THE HYBRID RENEWABLE POWER GENERATOR SYSTEM



ปริญญาโท เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา ๒๕๖๐

A STUDY OF IPMSG GENERATOR-SET CONTROL FOR CHARGING BATTERY IN THE  
HYBRID RENEWABLE POWER GENERATOR SYSTEM



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  
2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2560

การศึกษาการควบคุมชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรภายในสำหรับประจุแบตเตอรี่  
ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแบบไฮบริด

A STUDY OF IPMSG GENERATOR-SET CONTROL FOR CHARGING BATTERY IN THE  
HYBRID RENEWABLE POWER GENERATOR SYSTEM



อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์พิชิต ล้ายอง

ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกษ์พฤษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการควบคุมชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรภายในสำหรับประจุแบตเตอรี่ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแบบไฮบริด

ผู้จัดทำ

1. นายบรรณรัตน์ พรหมแพทย์
2. นายพงศกร เงินจันทร์
3. นายพงศกร อินทร์ถาวร
4. นายพีชรพล กังวาลโชคชัย



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

( รองศาสตราจารย์ พิเชิต ล้ายอง )



..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

( ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกษ์พฤษ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการควบคุมชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรภายในสำหรับประจุ  
แบตเตอรี่ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแบบไฮบริด

นายบรรณรัตน์	พรหมแพทย์
นายพงศกร	เงินจันทร์
นายพงศกร	อินทร์ถาวร
นายพัชรพล	กังวาลโชคชัย
รศ.พิชิต	ลำยอง อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.เปี่ยมภูมิ	สฤกษ์ อธิการบดี

ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ปฏิญานี้พจน์นี้นำเสนอการศึกษาการควบคุมชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับประจุ  
แบตเตอรี่ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแบบไฮบริด ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้ประกอบด้วย  
เครื่องยนต์ดีเซลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายใน โดยเริ่มต้นจะทำการศึกษา  
หลักการทำงานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การศึกษาพฤติกรรมการประจุแบตเตอรี่ การทำงานของเครื่องยนต์  
ดีเซลที่มีความสัมพันธ์กับการควบคุมการจ่ายน้ำมันของโกฟเวอร์เนอร์ (Governor) การทำงานของโกฟ  
เวอร์เนอร์ที่มีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า การทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดัน หลังจากนั้น  
จะนำการศึกษาข้างต้นมาประยุกต์สำหรับการควบคุมการประจุแบตเตอรี่โดยการใช้การควบคุมป้อนกลับ  
แบบพีไอดี โดยการตรวจจับค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้ได้ระดับกระแสไฟฟ้าและ  
แรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามพฤติกรรมการประจุแบตเตอรี่ สุดท้ายแล้วระบบการประจุแบตเตอรี่ที่นำเสนอจะ  
สามารถนำมาใช้สำหรับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแบบไฮบริด  
ในพื้นที่ห่างไกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# A STUDY OF IPMSG GENERATOR-SET CONTROL FOR CHARGING BATTERY IN THE HYBRID RENEWABLE POWER GENERATOR SYSTEM

Mr.Bannarot	Prompte	
Mr.Pongsakorn	Ngeonjun	
Mr.Pongsakorn	Intavorn	
Mr.Patcharapon	Kangwarnchokchai	
Assoc.Prof.Pichit	Lumyoung	Advisor
Dr.Piampoom	Sarikprueck	Co-advisor

2017

## ABSTRACT

This thesis presents a study of generator-set control for charging battery in the hybrid renewable power generation system which the generator-set is consisted of a diesel engine and an interior permanent magnet synchronous generator (IPMSG). First of all, the related principle operations are studied including the battery charging behavior, the relation between diesel engine operation and fuel injection control by governor, the relation between governor operation and input voltage, and the buck converter operation. After that, all abovementioned studies are implemented to control the battery charging operation using PID feedback control. Charging voltage and current are detected and sent back to the PID feedback control in order to control the battery charging based on the battery characteristics. Finally, the proposed battery charging system can be effectively used for the generator-set in the stand-alone hybrid renewable power generation system in remote area.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงด้วยดีไปไม่ได้ถ้าขาดความช่วยเหลือจากหลายๆท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ที่ปรึกษาทั้งสองท่าน รศ.พิชิต ล้ายอง และ ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ ที่ได้กรุณาให้การสนับสนุนในด้านต่างๆทั้งในเรื่องงบประมาณ อุปกรณ์ต่างๆที่เอื้ออำนวยต่อการดำเนินงาน นอกจากนี้ ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาโดยตลอดทั้งในเรื่องการทดลองและแนวทางต่างๆ

ขอขอบคุณบริษัทน้ำแสง เอ็นจิเนียริง ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยในด้านชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้เกิดความสะดวกในการทดลองชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและศึกษาได้อย่างเต็มความสามารถจนบรรลุจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบริษัท Meidensha ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยในเรื่องของงบประมาณที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างมากทำให้สามารถทำงานวิจัยนี้ได้อย่างเต็มความสามารถและสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณนายพรท กลั่นวิชิต และนายชาญปกรณ์ ณ นิโรจน์ นักศึกษาปริญญาโท ที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาเป็นอย่างมาก โครงการนี้จะสำเร็จลุล่วงไปไม่ได้เลยหากขาดความช่วยเหลือจากพี่ๆทั้งสองท่าน ทางคณะผู้จัดทำซาบซึ้งใจเป็นอย่างมากและหวังเป็นอย่างยิ่งว่าพี่ทั้งสองท่านจะพบเจอแต่สิ่งดีๆในอนาคต

ขอขอบคุณนายพร้อมรบ คำธาร พนักงานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่คอยให้คำแนะนำและคอยให้ความช่วยเหลือตลอดมาทั้งในเรื่องของอุปกรณ์และความรู้ทางวิชาการต่าง ๆ มากมาย

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องจักรกลไฟฟ้าทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและมีน้ำใจต่อกันมาโดยตลอด ให้ข้อคิดเห็นและข้อแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวซึ่งคอยให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษาและคอยให้กำลังใจเสมอมา

คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	5
2.1.1 เครื่องยนต์ดีเซล	5
2.1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	5
2.1.3 ขนาดพิกัดชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	6
2.1.4 การหาขนาดของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	6
2.2 เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส	7
2.2.1 เครื่องจักรกลซิงโครนัสสามเฟส	7
2.2.2 วงจรสมมูลของเครื่องจักรกลซิงโครนัส	10
2.2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายใน	15
2.3 ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์	19
2.3.1 หลักการของระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์	20
2.4 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด	24
2.4.1 แบตเตอรี่ที่ถูกประจุจนเต็ม	24
2.4.2 สถานภาพทางเคมีของการคายประจุ	24

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 คุณสมบัติทางเคมีของแบตเตอรี่ระหว่างการคายประจุ	25
2.5 วงจรทอนระดับแรงดัน	28
2.5.1 เส้นใยการทำงานของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์	28
2.5.2 หลักการทำงานของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์	29
2.5.3 การหาค่าอัตราขยายแรงดันของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์	31
2.5.4 การสร้างสัญญาณ PWM	32
2.6 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	33
2.6.1 จุดเด่นที่ทำให้บอร์ด Arduino เป็นที่นิยม	33
2.6.2 รูปแบบการเขียนโปรแกรมบน Arduino	34
2.6.3 หน้าที่ของอุปกรณ์ต่าง ๆ บนบอร์ด Arduino	35
2.6.4 ตัวอย่าง Arduino Board ที่นำมาใช้งาน	36
<b>บทที่ 3 วิธีการทดลอง</b>	37
3.1 บทนำ	37
3.2 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณ (Operational Amplifier)	37
3.3 การออกแบบวงจรวัดความเร็วรอบ (Tachometer)	39
3.4 การออกแบบวงจรลดทอนระดับแรงดัน (Buck Converter)	40
3.5 การออกแบบวงจรควบคุมการประจุแบตเตอรี่ด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร	42
<b>ภายใน</b>	
3.6 ออกแบบ PID Tuning Parameter เพื่อให้ระบบการประจุแบตเตอรี่ทำงานได้อย่างเหมาะสม	43
3.7 ออกแบบการทำงานของ Arduino ร่วมกับ Generator-set เพื่อประจุแบตเตอรี่	45
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	47
4.1 การทดสอบวงจรขยายสัญญาณ (Operational Amplifier)	47
4.1.1 จุดประสงค์การทดลอง	47
4.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ	47
4.1.3 วิธีการทดลอง	48
4.1.4 ผลการทดลอง	48
4.2 การทดสอบวงจรวัดความเร็วรอบ (Tachometer)	50

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 จุดประสงค์การทดลอง	50
4.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ	51
4.2.3 วิธีการทดลอง	51
4.2.4 ผลการทดลอง	51
4.3 ทดสอบ Governor ด้วย Buck Converter โดยใช้สัญญาณ PWM จาก Arduino	53
4.3.1 จุดประสงค์การทดลอง	53
4.3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ	54
4.3.3 วิธีการทดลอง	54
4.3.4 ผลการทดลอง	55
4.4 การทดสอบการควบคุมกระแสและแรงดันให้เป็นไปตามข้อมูลการชาร์จ	57
4.4.1 จุดประสงค์การทดลอง	57
4.4.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ	58
4.4.3 วิธีการทดลอง	58
4.4.4 ผลการทดลอง	59
4.5 การทดสอบการควบคุมกระแสโหลดที่ค่าต่างๆของพิกัดชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	65
4.5.1 จุดประสงค์การทดลอง	65
4.5.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	66
4.5.3 วิธีการทดลอง	66
4.5.4 ผลการทดลอง	67
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>	70
<b>ภาคผนวก</b>	73
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	98
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	99

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างโรเตอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนัส	7
2.2 คุณลักษณะแรงบิดและมุมของแรงบิดของเครื่องจักรกลซิงโครนัส	9
2.3 โครงสร้างพื้นฐานเครื่องจักรกลซิงโครนัสสามเฟส 2 ขั้วแม่เหล็ก	10
2.4 วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องจักรกลซิงโครนัส	13
2.5 เฟสเซอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนัสต่อเฟส	14
2.6 เส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสของแม่เหล็ก	15
2.7 เส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสของวัสดุแม่เหล็กถาวร	15
2.8 วงจรแม่เหล็กถาวรและแกนเหล็กทั่วไป	16
2.9 โครงสร้างของโรเตอร์แม่เหล็กถาวร	17
2.10 โครงสร้างของโรเตอร์แม่เหล็กถาวรภายใน	17
2.11 ผลของการพันขดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์	18
2.12 วงจรสมมูลเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายใน	18
2.13 กราฟแรงบิดของโรเตอร์แม่เหล็กถาวรภายใน	19
2.14 ตัวควบคุมแบบพี	20
2.15 ตัวควบคุมแบบไอ	21
2.16 ตัวควบคุมแบบดี	22
2.17 ผลตอบสนองจากการนำเอาตัวควบคุมพีไอดีแบบต่างๆไปใช้กับระบบหลายๆแบบ	23
2.18 ส่วนประกอบของเบตเตอร์ชนิดตะกั่วกรด	24
2.19 คุณสมบัติทางเคมีระหว่างการคายประจุ	25
2.20 ปฏิกิริยาเคมีของแผ่นบวกในระหว่างการคายประจุ	26
2.21 ปฏิกิริยาเคมีของแผ่นลบในระหว่างการคายประจุ	26
2.22 วัฏจักรการชาร์จไฟ 3 ขั้นตอน	27
2.23 วัฏจักรการชาร์จไฟ 4 ขั้นตอน	28
2.24 วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์	29
2.25 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส	29
2.26 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส	30
2.27 สัญญาณ PWM ของแต่ละ Duty Cycle	32

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28 Arduino UNO R3 Board	33
2.29 รูปแบบการเขียนโปรแกรมบน Arduino	34
2.30 หน้าที่ของอุปกรณ์ต่าง ๆ บนบอร์ด Arduino	35
2.31 Arduino Nano	36
3.1 ออกแบบวงจรถยายสัญญาณ	38
3.2 วงจรถยายสัญญาณ	38
3.3 Magnetic Pick Up	39
3.4 ออกแบบวงจรวัดความเร็วรอบ	40
3.5 วงจรวัดความเร็วรอบ	40
3.6 ออกแบบวงจรถอนระดับแรงดัน	41
3.7 ลายวงจรถอนระดับแรงดัน	41
3.8 ลายวงจรถอบคุมการประจุแบตเตอรี่	42
3.9 การตอบสนองของสัญญาณต่อการปรับค่า $K_p$	43
3.10 การตอบสนองของสัญญาณต่อการปรับค่า $K_p$ และ $K_I$	44
3.11 การตอบสนองของสัญญาณต่อการปรับค่า $K_p$ , $K_I$ และ $K_d$	45
3.12 Voltage Sensor Module	46
3.13 DC Current Shunt Resistor	46
3.14 Tachometer	46
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขาเข้าและขาออกของวงจรถยายสัญญาณ	49
4.2 ลักษณะสัญญาณของแรงดัน Input และ Output ของวงจรถยายสัญญาณ	50
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขาเข้าและขาออกของวงจรวัดความเร็วรอบ	52
4.4 ลักษณะสัญญาณของแรงดัน Input และ Output ของวงจรวัดความเร็วรอบ	53
4.5 Block Diagram การต่อวงจรถดสอบ Governor ด้วย Buck Converter	54
4.6 การทดสอบ Governor ด้วย DC Power Supply และ Buck Converter	56
4.7 การประจุแบตเตอรี่ตามข้อมูลการชาร์จสำหรับกรณีที่หนึ่ง	60
4.8 ตัวอย่างกราฟการควบคุมใน Bulk Mode สำหรับกรณีที่หนึ่ง	60
4.9 ตัวอย่างกราฟการควบคุมใน Absorption Mode สำหรับกรณีที่หนึ่ง	61
4.10 ตัวอย่างกราฟการควบคุมใน Float Mode สำหรับกรณีที่หนึ่ง	61

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 การประจุแบตเตอรี่ตามข้อมูลการชาร์จสำหรับกรณีที่สอง	63
4.12 ตัวอย่างกราฟการควบคุมใน Bulk Mode สำหรับกรณีที่สอง	63
4.13 ตัวอย่างกราฟการควบคุมใน Absorption Mode สำหรับกรณีที่สอง	64
4.14 ตัวอย่างกราฟการควบคุมใน Float Mode สำหรับกรณีที่สอง	64
4.15 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสโหลดที่ 25% ของพิกัดชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	67
4.16 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสโหลดที่ 50% ของพิกัดชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	68
4.17 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสโหลดที่ 75% ของพิกัดชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	68
4.18 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสโหลดที่ 100% ของพิกัดชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	69



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินโครงการ	3
4.1 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างขาเข้าและขาออกของวงจรขยายสัญญาณ	48
4.2 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างขาเข้าและขาออกของวงจรวัดความเร็วรอบ	51
4.3 การทดสอบ Governor ด้วย DC Power Supply	55
4.4 การทดสอบ Governor ด้วย Buck Converter	55
4.5 การทดสอบการควบคุมการประจุแบตเตอรี่สำหรับกรณีที่หนึ่ง	59
4.6 การทดสอบการควบคุมการประจุแบตเตอรี่สำหรับกรณีที่สอง	62
4.7 ตารางแสดงค่าแรงดันและกระแสไหลดที่พิกัดต่างๆที่ควบคุมได้	67



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการนำเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Machine) มาใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อให้มนุษย์มีสิ่งอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวัน ในที่นี้จะกล่าวถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous generators) แบบแม่เหล็กถาวร (PMSG) มาใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับนั้นจะมีความเร็วและประสิทธิภาพที่ดีกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง และการที่ใช้แม่เหล็กถาวรมันทำให้ไม่ต้องจ่ายไฟกระแสตรงเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก การทำงานของการประจุแบตเตอรี่ด้วยชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator-set) จะประกอบไปด้วย Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) ซึ่งต่อร่วมกับเครื่องยนต์ (Diesel Engine)

การนำพลังงานที่ประจุได้ในแบตเตอรี่ไปใช้งานต่อไปนั้นจำเป็นต้องมีการควบคุมการประจุให้เกิดประสิทธิภาพและความเสถียรในการทำงานให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด จึงได้เกิดโครงการวิจัยนี้ขึ้นมาเพื่อศึกษาการควบคุมการประจุแบตเตอรี่ที่สถานะต่างๆได้อย่างเหมาะสมที่สุดเพื่อศึกษาให้เข้าใจอย่างลึกซึ้งเกี่ยวกับหลักการการประจุแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด การทำงานของ Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) และการควบคุมระบบของการชาร์จแบตเตอรี่นี้ จำเป็นต้องมีความเข้าใจในเนื้อหาความรู้ สิ่งที่จะต้องที่จะต้องศึกษาควบคู่ไปด้วยได้แก่ PID controller, วงจร Buck converter, Diesel Engine ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับขับเคลื่อนการทำงานของ Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG), โดยมีการใช้งาน Microcontroller มาใช้ควบคุมการทำงานหลักของระบบ

### 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจในหลักการการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Generator: PMSG)

1.2.2 เพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจในการประจุแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดที่สถานะต่าง ๆ และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมการประจุแบตเตอรี่ต่อไปได้

1.2.3 เพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจในการเขียนคำสั่งให้ Microcontroller ด้วยภาษา C++ เพื่อสามารถนำไปใช้งานในการควบคุมระบบการประจุแบตเตอรี่ได้

1.2.4 เพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจในการออกแบบระบบการทำงานของเครื่องประจุแบตเตอรี่ด้วยชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย Diesel engine และ PMSG

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1.3.1 ศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีชนิดแม่เหล็กถาวรภายในและการประจุแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

1.3.2 ออกแบบการควบคุมการชาร์จของระบบด้วย Microcontroller ซึ่งใช้ Arduino เป็นอุปกรณ์สำหรับการควบคุม

1.3.3 ศึกษารูปแบบการประจุของแบตเตอรี่และพฤติกรรมของแบตเตอรี่ เช่น แสดงการชาร์จ ควรจะชาร์จที่แรงดันเท่าไร เหลือแบตเตอรี่กี่เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น

1.3.4 ศึกษาเกี่ยวกับ PID control และนำไปใช้ในการควบคุมระบบซึ่งจะใช้ในรูปแบบการเขียนโค้ดโปรแกรมคำสั่งลงบน Arduino

1.3.5 นำอุปกรณ์การชาร์จแบตเตอรี่ที่ได้ทำการออกแบบไปประยุกต์ใช้จริงสำหรับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ Diesel engine และ PMSG

### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีชนิดแม่เหล็กถาวรและแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด การควบคุมระบบโดยใช้ Microcontroller

1.4.2 ทดสอบเครื่องควบคุมความเร็วของเครื่องยนต์ (Governor) ที่ใช้สำหรับควบคุมเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Engine) ว่าสภาพการทำงานเป็นอย่างไรเมื่อจ่ายที่แรงดัน และกระแสนั้น ๆ

1.4.3 ทำวงจร Buck Converter เพื่อนำไปใช้สำหรับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่นำไปใช้กับเครื่องควบคุมความเร็วของเครื่องยนต์ (Governor)

1.4.4 ทดสอบวงจร Buck Converter และสัญญาณ PWM จาก Arduino เพื่อนำไปขับวงจรกิจักของวงจร Buck Converter

1.4.5 เขียนโปรแกรมการทำงานของระบบลงบน Arduino ให้เกิดการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) โดยใช้ PID control

1.4.6 ทดสอบระบบการชาร์จของแบตเตอรี่ทั้งระบบ และบันทึกผลหาความเหมาะสมให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

## 1.5 แผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ

วิธีการดำเนินการ	ปีการศึกษา 2560									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ PMSG และ Generator-set										
ศึกษาพฤติกรรมชาร์จของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด										
ศึกษาการเขียนโปรแกรม Arduino IDE										
ศึกษาคุณลักษณะ Governor										
ศึกษาวงจร Buck Converter										
ออกแบบและทดสอบวงจร Buck Converter กับ Governor โดยใช้สัญญาณ PWM จาก Arduino										
เขียนโปรแกรมสร้างระบบควบคุมลงบน Arduino										
ทดสอบการทำงานของ Arduino ร่วมกับ Generator-set เพื่อประจุแบตเตอรี่										
ออกแบบ PID Control เพื่อให้ระบบการประจุแบตเตอรี่ทำงานได้อย่างเหมาะสม										
รวบรวมข้อมูลและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1.6.1 สามารถเข้าใจหลักการการทำงานของเครื่องจักรกลเชิงโรคน์สชนิดแม่เหล็กถาวร
- 1.6.2 มีความรู้ความเข้าใจในการประจุแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดที่สภาวะต่าง ๆ และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมการประจุแบตเตอรี่ต่อไปได้
- 1.6.3 สามารถเขียนคำสั่งให้ Microcontroller ด้วยภาษา C++ ได้ และมีความรู้ความเข้าใจการทำงานของ Arduino
- 1.6.4 สามารถออกแบบระบบควบคุมการประจุแบตเตอรี่ด้วยชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย Diesel engine และ PMSG ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.6.5 สามารถนำความรู้ที่ได้รับไปใช้ในการพัฒนาวิชาชีพด้านวิศวกรรมไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator-set)

ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญคือ เครื่องต้นกำลัง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า แผงควบคุม และสวิตช์สับเปลี่ยน โดยเครื่องต้นกำลังประกอบไปด้วย เครื่องยนต์ดีเซล เครื่องกังหันแก๊ส เครื่องกังหันไอน้ำและเครื่องกังหันน้ำ โดยตัวอย่างชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นดังต่อไปนี้

##### 2.1.1 เครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Engine)

เครื่องยนต์ดีเซลในเครื่องต้นกำลังมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ระบบเชื้อเพลิงระบบระบายความร้อน ระบบไอเสีย ระบบเริ่มเดินเครื่อง โดยเครื่องยนต์ดีเซลนั้นเป็นเครื่องยนต์แบบสันดาปภายใน มีระบบ 2 จังหวะ และ 4 จังหวะ ซึ่งเครื่องยนต์ 4 จังหวะมีข้อดีกว่า 2 จังหวะ เพราะประสิทธิภาพดีกว่า วาล์ว, ลูกสูบ และแหวนจะมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น เพราะมันสามารถกระจายความร้อนได้ดี ขนาดพิกัดตามจำนวนลูกสูบ 4, 6 หรือ 12 ลูกสูบ พิกัดสูงอาจมี Turbocharge มีการนำเอาพลังงานไอเสียมาขับวงล้อเทอร์โบไบน์เพื่อไปหมุนเครื่องผลึกอากาศแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifugal Air Impeller) ทำให้ภายในลูกสูบมีอากาศมากขึ้นส่งผลให้เครื่องยนต์มีกำลังมากขึ้น การใช้งานจะติดตั้งตามแนว (In Line) หรือ รูปตัว V เครื่องยนต์ดีเซลถูกใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุดชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่ควบคุมเชื้อเพลิงเพื่อควบคุมความเร็วของรอบเครื่องยนต์ ต้องใช้ซึ่งเรียกว่า “กัฟเวอร์เนอร์ (Governor)” ในการควบคุมเชื้อเพลิง

##### 2.1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ โรเตอร์, สเตเตอร์ และ Brushless Rotating Exciter โดยแต่ละส่วนประกอบจะมีคุณสมบัติ ดังนี้

2.1.2.1 โรเตอร์ (Rotor) โรเตอร์ประกอบไปด้วยส่วนที่หมุนได้ ซึ่งมีขั้วแม่เหล็กพร้อมขดลวดพันรอบและสร้างสนามแม่เหล็กหมุน

2.1.2.2 สเตเตอร์ (Stator) สเตเตอร์ประกอบไปด้วยส่วนที่อยู่กับที่ ซึ่งมีขดลวด Armature และสนามแม่เหล็กจะตัดขดลวด Armature สร้างแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นและจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลด

2.1.2.3 AC Exciter ประกอบไปด้วยชุดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น โดยจะจ่ายกระแสตรงให้ขดสนามซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า AC ตัวเล็กๆติดตั้งบนเพลาดียวกับโรเตอร์ มี Full-Wave Rectifier เพื่อแปลงไฟ AC เป็น DC เรียกว่า Brushless Rotating Exciter

### 2.1.3 ขนาดพิกัดชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยตัวต้นกำลัง (Prime Mover) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) โดยการกำหนดพิกัดจะต้องคำนึงถึงทั้ง 2 ส่วน ดังนี้

2.1.3.2 ตัวต้นกำลังต้องกำหนดตามกำลังไฟฟ้าจริง (kW) ที่สามารถจ่ายได้

2.1.3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ต้องสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน (kVA) สูงสุดได้ โดยสำหรับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะกำหนดที่ตัวประกอบกำลัง 80 % Lagging ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอาจแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

- Prime Power Rating คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องยนต์สามารถจ่ายได้อย่างปลอดภัยจะคิดตาม Fuel Stop Power ตามมาตรฐาน ISO หรือ BS โดยทั่วไปพิกัดนี้จะใช้กับงานที่ Load Factor ไม่เกิน 60 % หรือใช้ไม่เกิน 500 ชั่วโมงต่อปี

- Standby Power Rating พิกัดนี้จะใช้งานสูงกว่า Prime Power Rating 10 % โดยใช้กับงานอาคารที่มี Load Factor < 60 % และใช้ไม่เกิน 100 ชั่วโมงต่อปี

- Continuous Power Rating คือ พิกัดของเครื่องซึ่งใช้โหลดเกือบคงที่ (Near Constant Load) สำหรับเวลาไม่จำกัด ซึ่งพิกัดนี้โดยทั่วไปมี Load Factor 70-100 % และใช้เป็น Base Load

### 2.1.4 การหาขนาดของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ต้องทำการวิเคราะห์โหลด โดยโหลดแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ โหลดสถานะอยู่ตัว (Steady State Loading) และโหลดสถานะชั่วคราว (Transient State Loading)

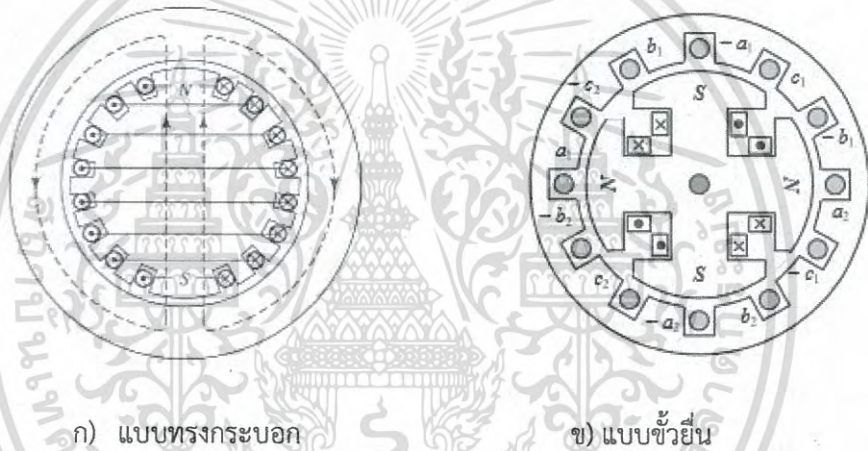
2.1.4.1 โหลดสถานะอยู่ตัว มีกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากกว่าหรือเท่ากับโหลดทั้งหมด ถ้า P.F. มากกว่า 80% ให้ใช้ค่ากำลังไฟฟ้าจริง แต่ถ้า P.F. น้อยกว่า 80% ให้ใช้ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ

2.1.4.2 โหลดสถานะชั่วคราว สามารถหากำลังไฟฟ้าเสมือนเริ่มต้น (kVAR) ของโหลดทั้งหมดแล้วนำไปหา kVA สำหรับ Voltage Dip ที่ต้องการ โดย Voltage Dip ของโหลดคอมพิวเตอร์เท่ากับ 10% ของโหลดในโรงงานอุตสาหกรรมเท่ากับ 15-25 % และของโหลดไฟฟ้า+โหลดทั่วไปเท่ากับ 30%

## 2.2 เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส Synchronous Machine

### 2.2.1 เครื่องจักรกลซิงโครนัสสามเฟส (Three-phase Synchronous Machines)

เครื่องจักรกลซิงโครนัสเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมีความเร็วในสภาวะคงตัวแปรผันตรงกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature winding) ที่สเตเตอร์ (Stator) และที่โรเตอร์ (Rotor) มีสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นโดยการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับขดลวดสนาม (Field winding) โรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากการมีกระแสไฟฟ้าสามเฟสในขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟส โครงสร้างเครื่องจักรกลซิงโครนัสสามเฟสประกอบไปด้วยส่วนของสเตเตอร์และโรเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.1 ส่วนโรเตอร์จะมีโครงสร้างเป็น 2 ลักษณะ คือ แบบทรงกระบอก (Cylindrical Rotor) และแบบขั้วยื่น (Salient-pole rotor)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโรเตอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนัส

โครงสร้างโรเตอร์ขั้วยื่นมีลักษณะที่สามารถสร้างให้มีขั้วแม่เหล็กจำนวนมากได้ ในขณะที่โรเตอร์แบบทรงกระบอกจะมี จำนวนขั้วแม่เหล็กได้น้อย ซึ่งจำนวนขั้วแม่เหล็กจะมีผลต่อค่าความเร็วซิงโครนัสดังนี้

$$f = \frac{P n_s}{2 \cdot 60} \quad (2-1)$$

ในกรณีที่เครื่องจักรทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous generator) ถ้าต้องการให้ได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่ค่าเดียวกันจากโรเตอร์ทั้งสองแบบ ค่าผลคูณ  $Pn_s$  จะต้องมีค่าคงที่ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า

2.2.1.1 ถ้าต้นกำลังทางกลมีความเร็วรอบสูง (High speed  $n_s$  สูง) จะต้องใช้โรเตอร์แบบทรงกระบอกซึ่งมีจำนวนขั้วแม่เหล็ก  $P$  น้อย

2.2.1.2 ถ้าต้นกำลังทางกลมีความเร็วรอบต่ำ (Low speed  $n_s$  ต่ำ) จะต้องใช้โรเตอร์แบบขั้วยื่นซึ่งมีจำนวนขั้วแม่เหล็ก  $P$  มาก

โดยทั่วไปแล้วเครื่องจักรกลซิงโครนัสส่วนใหญ่จะมีขดลวดอาร์มาเจอร์อยู่บนสเตเตอร์และขดลวดสนามอยู่ที่โรเตอร์ ในการสร้างสนามแม่เหล็กจะจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Excitation) ให้กับขดลวดสนามซึ่งทำได้ 2 ลักษณะคือ ถ้าเป็นเครื่องจักรกลรุ่นเก่าจะใช้ชุดกระตุ้น (Exciter) ที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีโรเตอร์ต่อรวมเพลลาเดียวกันกับโรเตอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนัส จ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขดลวดสนามโดยผ่านวงแหวนสลิป (Slip rings) และแปรงถ่าน สำหรับเครื่องจักรรุ่นใหม่จะใช้ชุดกระตุ้นเป็นไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกับชุดเรียงกระแส (Rectifier) ซึ่งติดตั้งอยู่บนเพลลาเดียวกันกับโรเตอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนัส จะเห็นได้ว่าลักษณะนี้ไม่จำเป็นต้องใช้แปรงถ่าน (Brushless Excitation) และวงแหวนสลิป (Slip rings) ในการอธิบายการทำงานและพฤติกรรมของเครื่องจักรกลซิงโครนัสจะเริ่มต้นจากการวิเคราะห์เครื่องจักรที่ต่ออยู่กับบัสอนันต์ (Infinite bus) ซึ่งกำหนดว่าเป็นแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่มีแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการจ่ายค่ากระแส เช่น ระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้า พฤติกรรมในสภาวะคงตัวของเครื่องจักรกลซิงโครนัสจะพิจารณาจากแรงบิด โดยกำหนดให้สนามแม่เหล็ก  $B$  มีการกระจายเป็นฟังก์ชันรูปไซน์ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กลัพท์ต่อขั้วจะมีค่า

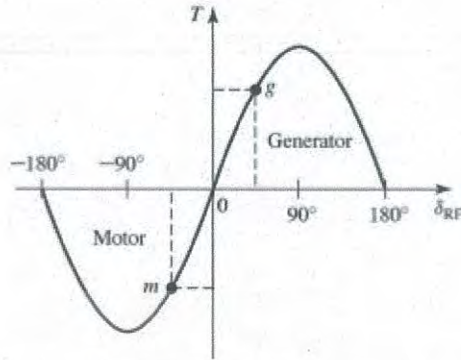
$$\phi_{sr} = (\text{Average value of } B \text{ over a pole})(\text{Pole area}) \quad (2-2)$$

$$\phi_{sr} = \frac{2}{\pi} B_{sr} \left( \frac{\pi D l}{P} \right) = \left( \frac{2 D l}{P} \right) B_{sr} \quad (2-3)$$

กำหนดให้  $\phi_{sr} = \phi_R$  และ  $F_r = F_f$  จะได้ว่า

$$T_{fd} = \frac{\pi}{2} \left( \frac{P}{2} \right)^2 \phi_R F_f \sin \delta_{RF} \quad (2-4)$$

เมื่อ  $\phi_R$  เป็นเส้นแรงแม่เหล็กลัพท์ในช่องอากาศต่อขั้ว  $F_f$  เป็นแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากขดลวดสนาม และ  $\delta_{RF}$  เป็นมุมทางไฟฟ้าระหว่างแนวแกน  $\phi_R$  และ  $F_f$



รูปที่ 2.2 คุณสมบัติแรงบิดและมุมของแรงบิดของเครื่องจักรกลซิงโครนัส

เครื่องหมายลบไม่ปรากฏในสมการที่ (2-4) เพื่อให้เข้าใจตรงกันว่าแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะต้องมีทิศทางที่จะทำให้ สนามแม่เหล็กที่กระทำกันมาอยู่ในแนวเดียวกันเสมอ (Alignment) การทำงานในสภาวะคงตัวแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะสมดุลกับแรงบิดทางกลที่เพลาสวม (แรงเสียดทานและแรงต้านลมมีค่าน้อยมาก) ในกรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แรงบิดของต้นกำลังทางกล (Prime-mover) จะกระทำในทิศทางเดียวกับการหมุนของโรเตอร์มีผลทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กของโรเตอร์จะนำหน้าสนามแม่เหล็ก ลัทธิ ดังนั้นแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีทิศทางต้านการหมุน ในทางตรงกันข้ามแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ซิงโครนัสจะมีทิศทางเดียวกับการหมุนซึ่งจะไปต้านกับแรงบิดของภาระทางกลที่เพลาสวม จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมของแรงบิด  $\delta_{RF}$  เป็นไปตามสมการที่ (2-4) ดังรูปที่ 2.2 แรงบิดมีค่าเป็นบวกเมื่อเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเกิดจากมุม  $\delta_{RF}$  เป็นบวก ในขณะที่แรงบิดจากต้นกำลังทางกลเพิ่มขึ้นขนาด ของมุม  $\delta_{RF}$  ก็จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับแรงบิดจากต้นกำลัง การเปลี่ยนมุม  $\delta_{RF}$  นี้เป็นกระบวนการแบบพลวัต (Dynamic) ซึ่งต้องมีการเปลี่ยนความเร็วของโรเตอร์ ความเร็วชั่วครู่ของโรเตอร์จะไม่เท่ากับความเร็วซิงโครนัสทำให้เกิดการแกว่งของโรเตอร์ (Damped mechanical oscillation) รอบ ๆ มุม  $\delta_{RF}$  เพื่อหา มุมของแรงบิดในสภาวะคงตัวใหม่ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเกิดสภาวะชั่วครู่ฮันติง (Hunting) การลดผลกระทบนี้สามารถกระทำได้ในโรเตอร์แบบทรงกระบอก จะทำด้วยเหล็กตัน และในโรเตอร์แบบขั้วยื่น จะเพิ่มขดลวดแดมเปอร์ (Damper winding) อยู่บนหน้าขั้วแม่เหล็ก จากการวิเคราะห์สมการที่ (2-4) และรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเมื่อแรงบิดจากต้นกำลังทาง กลเพิ่มขึ้นจะทำให้

มุม  $\delta_{RF}$  เพิ่มขึ้น และแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดเมื่อมุม  $\delta_{RF}$  มีค่า 90 เรียกว่าแรงบิดดึงออก (Pull-out torque) ถ้าแรงบิดจากต้นกำลังทางกลเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โรเตอร์จะมีความเร่งทำให้ความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครนัส เรียกว่าเกิดสภาวะแยกออกจากกัน (Loss of synchronism, pulling out of step) ในกรณีมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อแรงบิดของภาระทางกลมากกว่าแรงบิดดึงออกโรเตอร์จะมีความหน่วงทำให้ความเร็วของโรเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส และจะตกลงเรื่อย ๆ จนเกิดสภาวะแยกออกจากกัน

### 2.2.2 วงจรสมมูลของเครื่องจักรกลซิงโครนัส (Equivalent Circuit of Synchronous Machine)

จากรูปที่ 2.3 แสดงส่วนสเตเตอร์ที่มีขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟส (a, b, c) และส่วนโรเตอร์แบบทรงกระบอกมีขดลวดสนาม ( $f$ ) ชนิด 2 ขั้วแม่เหล็ก โดยกำหนดให้โรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว  $\omega$  และให้แนวแกนสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ทำมุม  $\theta_m = \omega t + \delta_0$  กับแนวแกนสนามแม่เหล็กของขดลวดเฟส a เมื่อมีกระแสไฟฟ้าสามเฟสเกิดขึ้นที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ ( $i_a, i_b, i_c$ ) และที่ขดลวดสนาม ( $i_f$ ) จะทำให้เกิดค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (Flux linkage) ในแต่ละขดลวดดังนี้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างพื้นฐานเครื่องจักรกลซิงโครนัสสามเฟส 2 ขั้วแม่เหล็กชนิดโรเตอร์แบบทรงกระบอก

$$\lambda_a = L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c + L_{af}i_f \quad (2-5)$$

$$\lambda_b = L_{ba}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c + L_{bf}i_f \quad (2-6)$$

$$\lambda_c = L_{ca}i_a + L_{cb}i_b + L_{cc}i_c + L_{cf}i_f \quad (2-7)$$

$$\lambda_f = L_{fa}i_a + L_{fb}i_b + L_{fc}i_c + L_{ff}i_f \quad (2-8)$$

จะเห็นได้ว่าค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องจะเป็นฟังก์ชันของค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและค่าความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวด ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของโรเตอร์  $L_{ff}$  (Rotor self-inductance) จะไม่ขึ้นอยู่กับมุม  $\theta_m$  หรือตำแหน่งของโรเตอร์

$$\bar{L}_{ff} = L_{ff} = L_{ff0} + L_{fl} \quad (2-9)$$

เมื่อ  $L_{ff0}$  และ  $L_{fl}$  เป็นค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าตัวเองของขดลวดสนามจากส่วนประกอบมูลฐานของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศ (Air-gap flux space-fundamental) และเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว (Leakage flux component) ตามลำดับ ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมของสเตเตอร์กับโรเตอร์ (Stator-to-rotor mutual inductances) จะขึ้นกับมุม  $\theta_{me}$  (ไฟฟ้า) เมื่อ กำหนดให้สัญญาณการกระจายสนามแม่เหล็กในช่องอากาศเป็นรูปไซน์ จะได้ว่า

$$\text{เฟส a} \quad \bar{L}_{af}(\theta_{me}) = L_{af} \cos(\theta_{me}) = \bar{L}_{fa}(\theta_{me}) \quad (2-10)$$

$$\text{เฟส b} \quad \bar{L}_{bf}(\theta_{me}) = L_{bf} \cos(\theta_{me} - 120^\circ) = \bar{L}_{fb}(\theta_{me}) \quad (2-11)$$

$$\text{เฟส c} \quad \bar{L}_{cf}(\theta_{me}) = L_{cf} \cos(\theta_{me} + 120^\circ) = \bar{L}_{fc}(\theta_{me}) \quad (2-12)$$

โดย  $L_{af} = L_{bf} = L_{cf}$  จากรูปที่ 2.3 ถ้าโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส  $\omega = \omega_s$  ( $\theta_m = \omega_s t + \delta_0$ ) จากสมการที่ (2-10) ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมของเฟส a และขดลวดสนามมีค่าเท่ากับ

$$\bar{L}_{af}(\theta_{me}) = L_{af} \cos(\omega_e t + \delta_{e0}) = \bar{L}_{fa}(\theta_{me}) \quad (2-13)$$

ในทำนองเดียวกันกับความเหนี่ยวนำตัวเองของโรเตอร์ ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ (Stator self-inductance) จะไม่ขึ้นอยู่กับมุม  $\theta_m$  เช่นกัน  $\bar{L}_{aa} = \bar{L}_{bb} = \bar{L}_{cc}$  มีค่าคงที่

$$\bar{L}_{aa} = \bar{L}_{bb} = \bar{L}_{cc} = L_{aa} = L_{aa0} + L_{al} \quad (2-14)$$

เมื่อ  $L_{aa0}$  และ  $L_{al}$  เป็นค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าตัวเองของขดลวดอาร์มาเจอร์เฟส a จากส่วนประกอบมูลฐานของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศ และเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว ตามลำดับความเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมของขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature phase-to-phase mutual inductances) โดยคิดเฉพาะผลที่เกิดจากส่วนประกอบมูลฐานของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศเท่านั้น

$$L_{ab} = L_{ba} = L_{bc} = L_{cb} = L_{ca} = L_{ac} = -\frac{1}{2} L_{aa0} \quad (2-15)$$

จากสมการที่ 2-5 ค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องทั้งหมดของเฟส a มีค่าเท่ากับ

$$\lambda_a = (L_{aa0} + L_{al})i_a - \frac{1}{2} L_{aa0}(i_b + i_c) + L_{af}i_f \quad (2-16)$$

เมื่อกระแสอาร์มาเจอร์สามเฟสสมดุล (Balanced three-phase armature current)

$$i_a + i_b + i_c = 0, \quad i_b + i_c = -i_a \quad (2-17)$$

แทนค่าในสมการที่ (2-16)

$$\begin{aligned} \lambda_a &= (L_{aa0} + L_{al})i_a + \frac{1}{2}L_{aa0}i_a + L_{af}i_f \\ &= \left(\frac{3}{2}L_{aa0} + L_{al}\right)i_a + L_{af}i_f \end{aligned} \quad (2-18)$$

ดังนั้นสามารถกำหนดให้มีค่าความเหนี่ยวนำซิงโครนัส (Synchronous Inductance)

$$L_s = \frac{3}{2}L_{aa0} + L_{al} \quad (2-19)$$

จะเห็นได้ว่าค่า  $L_s$  เป็นค่าความเหนี่ยวนำที่รวมผลของ  $L_{aa0}$  และ  $L_{al}$  ที่เกิดจากกระแสในเฟส a และ  $\frac{1}{2}L_{aa0}$  ที่เกิดจากกระแสในเฟส b และ c ค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องทั้งหมดของเฟส a จะแสดงใหม่ได้ดังนี้

$$\lambda_a = L_a i_a + L_{af} i_f \quad (2-20)$$

จากรูปที่ 2.3 เมื่อพิจารณาการทำงานเป็นมอเตอร์ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเฟส a จะเป็นผลรวมของแรงดันไฟฟ้าในส่วนความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดอาร์มาเจอร์เฟส a ( $R_a$ ) และแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น ดังนี้

$$V_{ia} = R_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} = R_a i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + e_{af} \quad (2-21)$$

โดยที่  $e_{af}$  เป็นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดอาร์มาเจอร์เฟส a จากสนามแม่เหล็กของขดลวดสนามเพียงอย่างเดียว

$$e_{af} = \frac{d\lambda_{af}}{dt} = \frac{d(L_{af}i_f)}{dt} = -\omega_e L_{af} I_f \sin(\omega_e t + \delta_{e0}) \quad (2-22)$$

ค่าประสิทธิผลของ  $e_{af}$  จะมีค่า

$$E_{af} = \frac{\omega_e L_{af} I_f}{\sqrt{2}} = 4.44 f_e k_w N_{ph} \phi_{af} \quad (2-23)$$

เมื่อ  $\phi_{af}$  เป็นค่าเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วจากขดลวดสนามและ  $k_w$  เป็นค่าตัวคูณของการพันขดลวด จะเห็นได้ว่า  $E_{af}$  จะแสดงในรูปเฟสเซอร์ได้ดังนี้

$$V_{ia} = R_a I_a + jX_a I_a + E_{afm} \quad (2-24)$$

กำหนดให้  $X_s = \omega_e L_s$  เป็นค่าความต้านทานเสมือนซิงโครนัส (Synchronous reactance) จากสมการที่ (2-24) เมื่อทำงานเป็นมอเตอร์สามารถแสดงเป็นวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์ซิงโครนัสได้ดังรูปที่ 2.4 ก) และถ้าทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้างดังรูปที่ 2.4 ข) สมการที่ (2-24) จะเขียนใหม่ได้ว่า

$$V_{ta} = -R_a I_a - jX_s I_a + E_{afg} \tag{2-25}$$

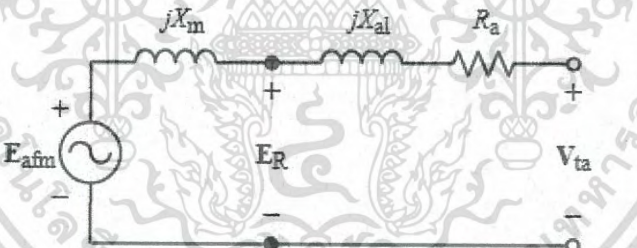


$$E_{afm} = V_{ta} - R_a I_a - jX_s I_a$$

$$E_{afg} = V_{ta} + R_a I_a + jX_s I_a$$

ก) มอเตอร์

ข) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



ค) ส่วนประกอบความต้านทานเสมือนซิงโครนัส

รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องจักรกลซิงโครนัส

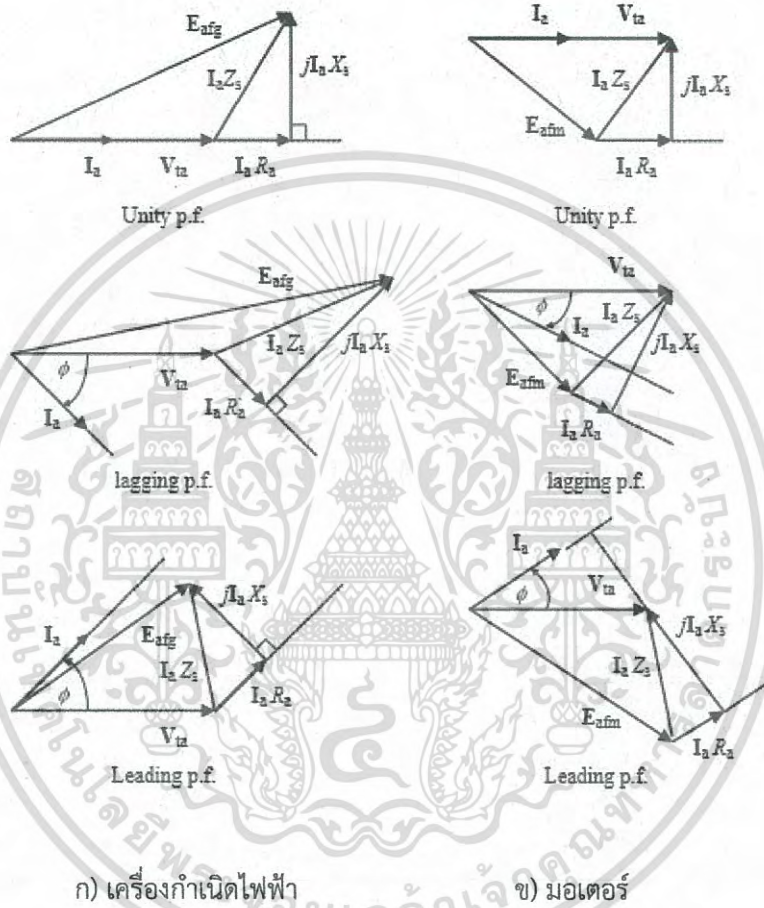
จากค่าความเหนี่ยวนำซิงโครนัสในสมการที่ (2-19) แสดงให้เห็นว่า  $X_s$  สามารถพิจารณาว่าประกอบด้วย

$$X_s = \omega_e L_s = \frac{3}{2} \omega_e L_{aa0} + \omega_e L_{al}$$

$$X_s = X_m + X_{al} \tag{2-26}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $X_m$  เป็นค่าประสิทธิผลความต้านทานเสมือนสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetizing reactance) และ  $X_{\sigma}$  เป็นค่าความต้านทานเสมือนเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว (Leakage reactance) ของขดลวดอาร์มาเจอร์ในสภาวะสมดุลสามเฟสแสดงดังรูปที่ 2.4 ค)



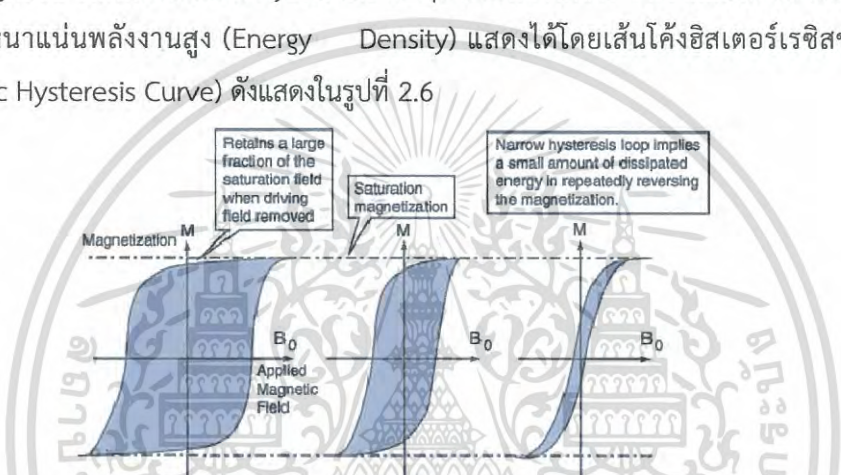
รูปที่ 2.5 เฟสเซอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนัสต่อเฟส (โรเตอร์ทรงกระบอก)

จากวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเครื่องจักรซิงโครนัสรูปที่ 2.4 และสมการที่ 2-24 และ 2-25 สามารถแสดงความสัมพันธ์ ในรูปของเฟสเซอร์ได้ดังรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าในกรณีที่เครื่องจักรกลซิงโครนัสทำงานในลักษณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $E_{afm}$  จะมีเฟสหน้าหน้า  $V_{ta}$  เสมอไม่ว่าจะจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าที่มีค่าตัวประกอบกำลังต่าง ๆ และในกรณีที่ทำงานในลักษณะ มอเตอร์  $E_{afm}$  จะมีเฟสตามหลัง  $V_{ta}$  เสมอไม่ว่าเครื่องจักรจะมีสภาพเป็นภาระไฟฟ้าที่มีค่าตัวประกอบกำลังต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

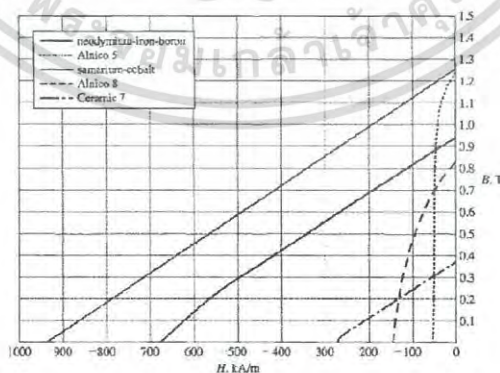
### 2.2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายใน (Interior Permanent Magnet Synchronous Machine)

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายใน (Interior Permanent Magnet Synchronous Generator) หรือมีชื่อย่อว่า IPMSG เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับซิงโครนัสชนิดหนึ่งที่มีการนำวัสดุที่เป็นแม่เหล็กถาวรมาประยุกต์ใช้ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้แม่เหล็กถาวรแบบ Rare Earth คือ Neodymium-Iron-Boron ( $\text{Ne}_2\text{Fe}_{14}\text{B} - 38 \text{UH}$ ) ซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวรแบบ Hard Magnetic ชนิดหนึ่งนั้นมี Hysteresis Loop ที่ค่อนข้างกว้าง ซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวรประเภทนี้จะให้ความหนาแน่นพลังงานสูง (Energy Density) แสดงได้โดยเส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสของแม่เหล็ก (Magnetic Hysteresis Curve) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสของแม่เหล็ก (Magnetic Hysteresis Curve)

โดยเส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสของแม่เหล็กของ Neodymium-Iron-Boron จะมีขนาดที่กว้างกว่าแม่เหล็กชนิดอื่น ๆ เช่น Alnico 5, Samarium-Cobalt, Alnico 8, Ceramic 7 ดังแสดงในรูปที่ 2.7

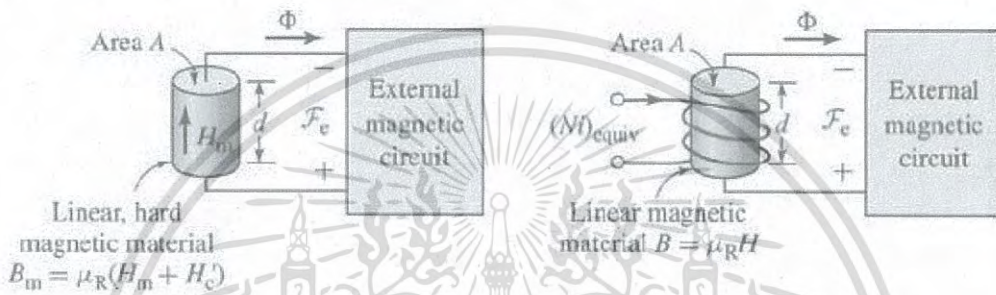


รูปที่ 2.7 เส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสของวัสดุแม่เหล็กถาวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีการใช้งาน Rare Earth จะเป็นวัสดุแม่เหล็กถาวรที่มักจะไม่เกิด Recoil Line เนื่องจากเป็นวัสดุแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นพลังงานสูงทำให้ไม่เกิด Recoil Line ซึ่งก็คือฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง (Remanence Flux Density : B<sub>r</sub>) ยังคงเท่าเดิมเมื่อมีการใช้งาน ทำให้ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กจะแสดงดังสมการที่ 2-27

$$B = \mu_R (H_m - H'_c) = B_r + \mu_R H \tag{2-27}$$



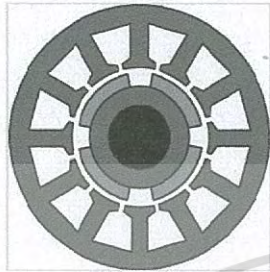
รูปที่ 2.8 วงจรแม่เหล็กถาวรและแกนเหล็กทั่วไป

จากรูปที่ 2.8 เนื่องจากความเป็นแม่เหล็กถาวรทำให้ไม่มีความต้องการกระแสสำหรับการสร้างสนามแม่เหล็กจากเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux) แต่อย่างไรก็ตามสามารถนิยามการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรนี้ได้จากการสมมติการจ่ายกระแสผ่านขดลวดเพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กและเกิดเส้นแรงแม่เหล็กได้เหมือนวงจรแม่เหล็กทั่วไปจากสมการต่อไปนี้

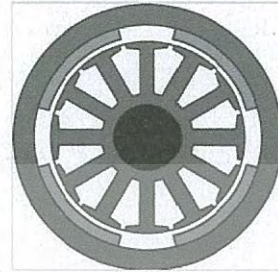
$$\begin{aligned} \phi &= \mu_R A \left( -H'_c - \frac{F_e}{d} \right) \\ \phi &= \mu_R A \left( \frac{(Ni)_{equiv}}{d} - \frac{F_e}{d} \right) \\ \therefore (Ni)_{equiv} &= -H'_c d \end{aligned} \tag{2-28}$$

สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร (IPMSM) สามารถแบ่งออกเป็นโรเตอร์อยู่ด้านใน (Inner rotor) และ โรเตอร์อยู่ด้านนอก (Outer rotor) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน เช่น โรเตอร์ด้านในจะมีจำนวนขั้วแม่เหล็กน้อยกว่าโรเตอร์ด้านนอกแต่อย่างไรก็ตามขดลวดจะสามารถระบายความร้อนได้ดีกว่าโรเตอร์ด้านนอก แต่อย่างไรก็ตามโรเตอร์ด้านนอกจะมีข้อดีคือสามารถระบาย

ความร้อนของแม่เหล็กถาวรได้ดีกว่า จึงช่วยลดการเกิด Demagnetization ของแม่เหล็กถาวรได้ ซึ่งความเป็นแม่เหล็กถาวรจะหมดไปเมื่ออุณหภูมิถึง Curie Temperature



ก) Inner Rotor



ข) Outer Rotor

### รูปที่ 2.9 โครงสร้างของโรเตอร์แม่เหล็กถาวร

สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้แบบโรเตอร์ด้านใน (Inner Rotor) และโรเตอร์ด้านในจะสามารถแบ่งออกได้เป็นแบบการติดตั้งแม่เหล็กถาวรบนผิว (Surface Mounted) และแบบการติดตั้งแม่เหล็กถาวรภายใน (Interior) โดยการติดตั้งแม่เหล็กถาวรภายในให้ความแข็งแรงมากกว่าการติดตั้งบนผิวดังนั้นจึงเลือกใช้แบบการติดตั้งแม่เหล็กถาวรภายใน



ก) Surface Mounted



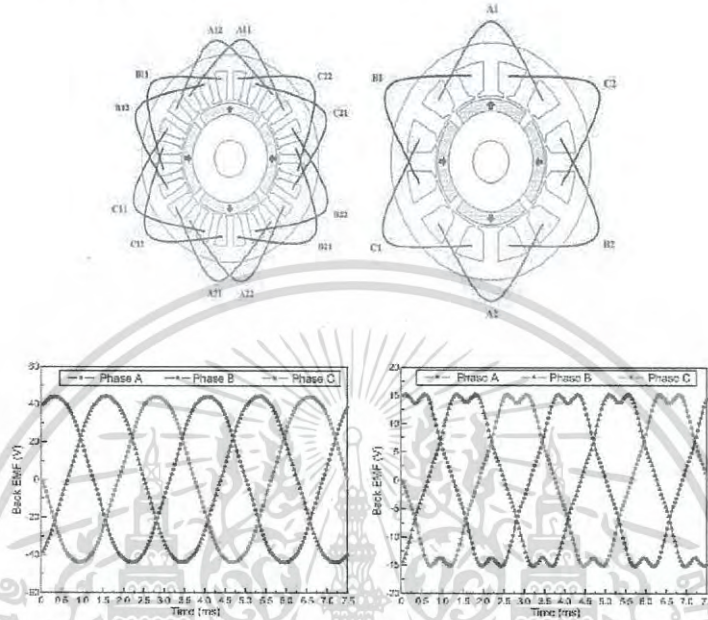
ข) Interior

### รูปที่ 2.10 โครงสร้างของโรเตอร์แม่เหล็กถาวรภายใน

ในส่วนของสเตเตอร์นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการพันขดลวดซึ่งลักษณะของการพันขดลวดจะส่งผลถึงสัญญาณแรงดันที่เข้ามายังสเตเตอร์หากสัญญาณมีความเป็นไซน์มากเพียงใดจะสามารถลดความสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

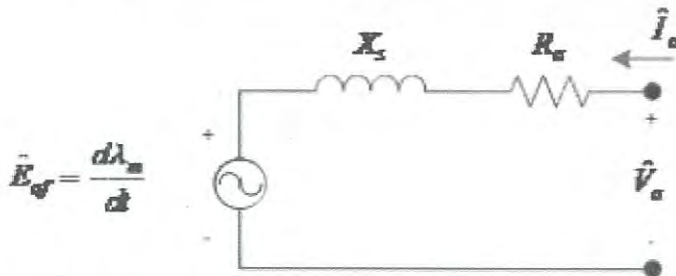
ไปได้มากขึ้นโดยลักษณะการพันขดลวดแบ่งออกเป็น การพันขดลวดแบบกระจาย (Distributed winding) และ การพันขดลวดแบบกลุ่ม (Concentrated winding) ดังแสดงในรูป



ก) Distribution Winding ข) Concentrate Winding

รูปที่ 2.11 ผลของการพันขดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์

สำหรับวงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายใน (Interior Permanent Synchronous Machine) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส (AC Synchronous Machine) แต่แตกต่างกันที่แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสร้างจากสนามแม่เหล็กถาวรซึ่งไม่ต้องการไฟฟ้า กระแสตรงกระตุ้น ดังแสดงในรูป

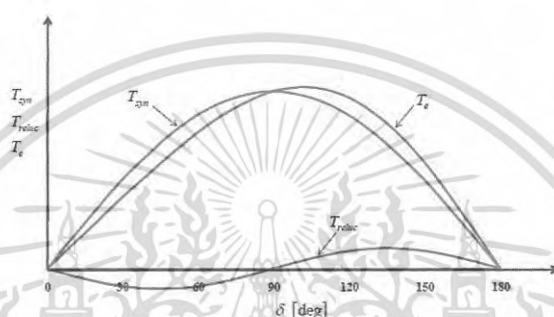


รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเนื่องจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่เลือกใช้สำหรับงานวิจัยนี้เป็นเครื่องจักรไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรภายในซึ่งมีการจัดเรียงแท่งแม่เหล็กที่ทำให้เกิดผลลักษณะเดียวกันกับโรเตอร์แบบ Salient Pole นั่นคือจะทำให้ได้แรงบิดสูงที่สุดมากกว่าโรเตอร์แบบ Surface Mounted เนื่องจากมีผลของแรงบิดเนื่องจากรีลักซ์แทนซ์ไม่เท่ากัน แสดงได้ดังสมการและรูปดังต่อไปนี้

$$T_e = \frac{3P}{2} [\lambda_{af} I_m \sin \delta + (L_d - L_q) I_m^2 \sin 2\delta] \quad (2-29)$$



รูปที่ 2.13 กราฟแรงบิดของโรเตอร์แม่เหล็กถาวรภายใน

### 2.3 ระบบควบคุมแบบสัดส่วน - ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID Controller)

ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ หรือ PID Controller เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบวิธีคำนวณของ PID ขึ้นอยู่กับสามตัวแปรคือค่าสัดส่วน, ปริพันธ์ และ อนุพันธ์ ค่าสัดส่วนกำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน, ค่าปริพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่ซึ่งพ่วงผ่านไป, และค่าอนุพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด นำหนักที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสามนี้จะใช้ในการปรับกระบวนการโดยการปรับค่าคงที่ใน PID ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะสมกับที่กระบวนการต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความผิดพลาด ค่าโอเวอร์ชูต (overshoots) และ ค่าแกว่งของระบบ (oscillation) วิธี PID ไม่รับประกันได้ว่าจะเป็นระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุดหรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรแน่นอนการประยุกต์ใช้งานบางครั้งอาจใช้

เพียงหนึ่งถึงสองรูปแบบ ขึ้นอยู่กับกระบวนการเป็นสำคัญ พีไอดีบางครั้งจะถูกเรียกว่าการควบคุมแบบ PI, PD, P หรือ I ขึ้นอยู่กับว่าใช้รูปแบบใดบ้าง

### 2.3.1 หลักการของระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์

การควบคุมแบบ PID ได้ชื่อตามการรวมกันของเทอมของตัวแปรทั้งสามสามารถแสดงได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้คือ

$$MV(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out} \quad (2-30)$$

เมื่อ  $P_{out}$ ,  $I_{out}$  และ  $D_{out}$  เป็นผลของสัญญาณขอออกจากระบบควบคุม PID จากแต่ละเทอมซึ่งนิยามตามรายละเอียดด้านล่าง

2.3.1.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน หรือตัวควบคุมแบบพี ตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอาสัญญาณค่าความผิดพลาดระหว่าง สัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการขยายสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าวด้วยค่าเกน (Gain) ของตัวควบคุม โดยเทอมของสัดส่วนจะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (2-31)$$

เมื่อ

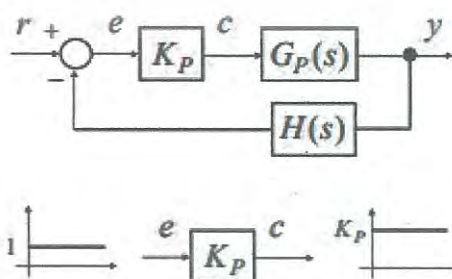
$P_{out}$ : สัญญาณขอออกของเทอมสัดส่วน

$K_p$ : อัตราสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่าได้

$e$ : ค่าความผิดพลาด =  $SP - PV$

$t$ : เวลาที่เปลี่ยนแปลงไป

ผลอัตราขยายสัดส่วนที่สูง ค่าความผิดพลาดก็จะเปลี่ยนแปลงมากเช่นกันแต่ถ้าสูงเกินไประบบจะไม่เสถียรได้ ในทางตรงกันข้าม ผลอัตราขยายสัดส่วนที่ต่ำ ระบบควบคุมจะมีผลตอบสนองต่อกระบวนการน้อยตามไปด้วย บล็อกไดอะแกรมของระบบและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณสามารถแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ตัวควบคุมแบบพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือ การปรับค่าเกนให้สูงขึ้นจะมีผลทำให้ ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น ปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในการนำไปใช้งานก็คือ ถ้านำไปใช้กับระบบชนิด 0 (System type 0) ตัวควบคุมแบบนี้จะไม่สามารถจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้ แต่ก็สามารถทำให้ค่าความผิดพลาดดังกล่าวมีค่าน้อยลงได้ด้วยการปรับค่าเกนให้สูง ซึ่งในทางปฏิบัติแล้ว การปรับค่าเกนให้สูงมากขนาดไหนเอาต์พุตที่ออกจริงๆ จากตัวควบคุมก็มีค่าจำกัด และการปรับเกน ให้มีค่าสูงสำหรับระบบที่มีอันดับสูง อาจจะทำได้ผลตอบสนองที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์ เช่นการปรับเกนให้สูงขึ้นสำหรับระบบอันดับสอง ผลที่ตามมาก็คือค่าพุงเกินก็จะสูงขึ้นตามด้วย ซึ่งอาจจะทำให้เป็นอันตรายต่อระบบได้

2.3.1.2 ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ หรือ ตัวควบคุมแบบไอ ตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอาสัญญาณความผิดพลาดระหว่าง สัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการอินทิเกรตสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าวแล้วคูณด้วยค่าเกนของตัวควบคุม โดยเทอมปริพันธ์จะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2-32)$$

เมื่อ

$I_{out}$  : สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์

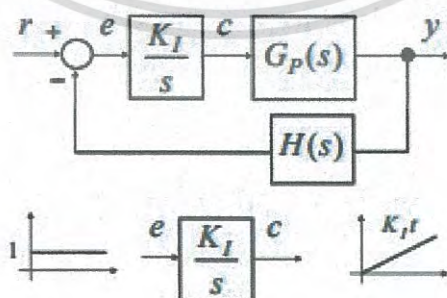
$K_i$  : อัตราขยายปริพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้

$e$  : ความผิดพลาด = SP-PV

$t$  : เวลาที่เปลี่ยนแปลงไป

$\tau$  : ตัวแปรปริพันธ์หุน

เทอมปริพันธ์ (เมื่อรวมกับเทอมสัดส่วน) จะเร่งกระบวนการให้เข้าสู่จุดที่ต้องการและขจัดความผิดพลาดที่เหลืออยู่ที่เกิดจากการใช้เพียงเทอมสัดส่วน แต่อย่างไรก็ตาม เทอมปริพันธ์เป็นการตอบสนองต่อความผิดพลาดสะสมในอดีต จึงสามารถทำให้เกิดโอเวอร์ชูตได้ (ข้ามจุดที่ต้องการและเกิดการหันเหไปทางทิศทางอื่น) โดยบล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ตัวควบคุมแบบไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือ ถ้านำไปใช้กับระบบชนิด 0 (System type 0) ตัวควบคุมแบบนี้จะสามารถจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้ ข้อดีที่อาจจะเกิดขึ้น ในการนำไปใช้งานก็คือ ตัวควบคุมแบบนี้ไม่สามารถลดผลของการพุ่งเกินของผลตอบสนองได้และการปรับเกนให้มีค่าสูง อาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์เช่นการปรับเกนให้สูงขึ้น อาจจะมีผลทำให้ผลตอบสนองของระบบเกิดการแกว่งตัวได้

2.3.1.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ หรือตัวควบคุมแบบดี ตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอาสัญญาณความผิดพลาดระหว่าง สัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้าง สัญญาณเอาต์พุตด้วยการอนุพันธ์สัญญาณความผิดพลาดดังกล่าว แล้วคูณด้วยค่าเกนของตัวควบคุม โดยเทอมอนุพันธ์เป็นไปตามสมการ

$$D_{out} = K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{2-33}$$

เมื่อ

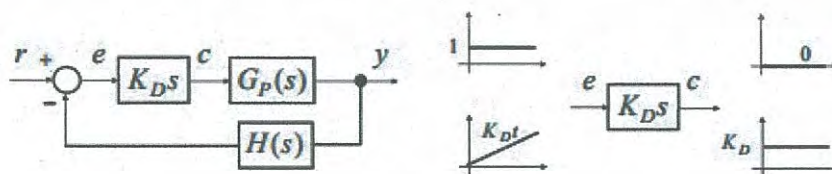
$D_{out}$  : สัญญาณขาออกของเทอมอนุพันธ์

$K_d$  : อัตราขยายอนุพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้

$e$  : ความผิดพลาด = SP-PV

$t$  : เวลาที่เปลี่ยนแปลงไป

เทอมอนุพันธ์จะชะลออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาออกของระบบควบคุมและด้วยผลนี้จะช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่จุดที่ต้องการ ดังนั้นเทอมอนุพันธ์จะใช้ในการลดขนาดของโอเวอร์ชูตที่เกิดจากเทอมปริพันธ์และทำให้เสถียรภาพของการรวมกันของระบบควบคุมดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอนุพันธ์ของสัญญาณรบกวนที่ถูกขยายในระบบควบคุมจะไวมากต่อการรบกวนในเทอมของความผิดพลาดและสามารถทำให้กระบวนการไม่เสถียรได้ถ้าสัญญาณรบกวนและอัตราขยายอนุพันธ์มีขนาดใหญ่เพียงพอ บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังรูปที่ 2.16



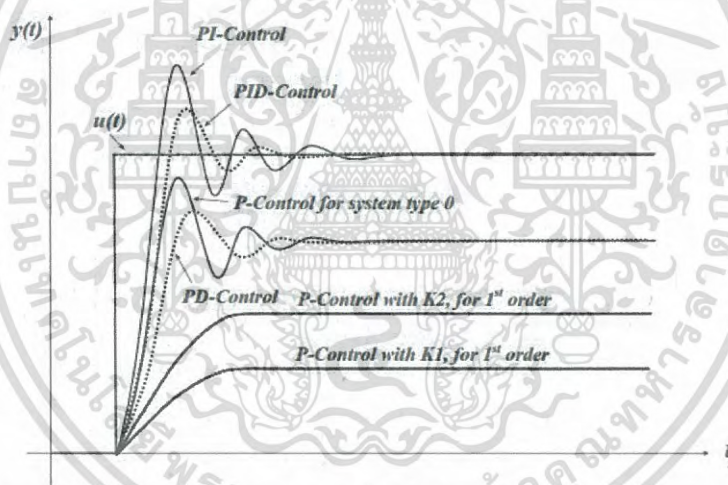
รูปที่ 2.16 ตัวควบคุมแบบดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนเมื่อนำไปใช้งานก็คือตัวควบคุมแบบนี้ใช้สำหรับลดผลของการพุ่งเกินของผลตอบสนองได้ลดผลตอบสนองที่มีการเปลี่ยนแปลงไปมาได้แต่ต้องปรับค่าเกณฑ์ให้เหมาะสมด้วยไม่เช่นนั้นอาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในการนำเอาตัวควบคุมนี้ไปใช้งานก็คือตัวควบคุมแบบนี้จะไม่สามารถขจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้ และการใช้ตัวควบคุมนี้อาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ช้าลงได้จากทั้ง 3 สมการจะได้ผลรวมของแต่ละเทอม เทอมสัดส่วน, ปริพันธ์, และอนุพันธ์ จะนำมารวมกันเป็นสัญญาณขาออกของการควบคุมแบบ PID กำหนดให้  $u(t)$  เป็นสัญญาณขาออก โดยได้สมการผลลัพธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2-34)$$

ตัวอย่างผลตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดของระบบต่างๆ ด้วยการใช้งานระบบควบคุมพีไอดีในลักษณะต่างๆกัน เป็นดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ผลตอบสนองจากการนำเอาตัวควบคุมพีไอดีแบบต่างๆไปใช้กับระบบหลายๆแบบ

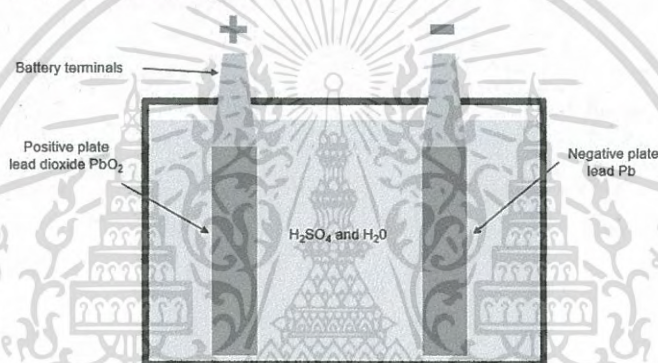
จากรูปที่ 2.17 จะเห็นว่าถ้าหากนำตัวควบคุมแบบพีไอไปใช้ ใช้กับระบบที่เป็นอันดับหนึ่ง ผลตอบสนองที่ได้จะมีค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว ซึ่งสามารถลดผลกระทบได้ด้วยการเพิ่มค่า เกณฑ์ของตัวควบคุมให้สูงขึ้น สำหรับการนำไปใช้กับระบบที่มีอันดับสูงกว่านั้นและเป็นระบบชนิด 0 ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวก็ยังคงมีค่าอยู่และการลดผลกระทบด้วยการปรับค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอให้สูงขึ้นอาจจะส่งผลให้การพุ่งเกินมีค่าสูงขึ้นได้ถ้าหากใช้ตัวควบคุมร่วมกันระหว่างพีกับไอหรือตัวควบคุมแบบพีไอกับระบบนี้แล้วตัวควบคุมแบบไอก็จะช่วยขจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวแต่ผลตอบสนองที่ได้จะยังมีค่าพุ่งเกินเหมือนเดิม ถ้าหากใช้ตัวควบคุมร่วมกันระหว่างพีกับดีหรือตัวควบคุมแบบพีดีกับ

ระบบนี้แล้วการพุ่งเกินของผลตอบสนองก็จะลดลงแต่ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวก็ยังคงอยู่ดังนั้น ถ้าหากใช้ตัวควบคุมรวมกันระหว่างพีโอและดีด้วยการปรับค่าเกณฑ์ให้เหมาะสมกับระบบนั้นๆ ก็จะได้ผลตอบสนองแบบหน่วงต่ำกว่าวิกฤตที่มีค่าพุ่งเกินเหมาะสมกับระบบนั้นๆ

## 2.4 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (Lead-Acid Battery)

### 2.4.1 แบตเตอรี่ที่ถูกประจุจนเต็ม (Fully charged battery)

สถานะทางเคมีของแบตเตอรี่ที่การประจุจนเต็ม ซึ่งแผ่นบวกประกอบด้วยตะกั่วไดออกไซด์ ( $PbO_2$ ) แผ่นลบประกอบด้วยตะกั่ว ( $Pb$ ) และสารละลายในน้ำประกอบด้วยกรดซัลฟิวริกไฮโดร ( $H_2SO_4$ ) และน้ำ ( $H_2O$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

(ที่มา: <http://www.chargetek.com/images/pdfs/equal.pdf>)

### 2.4.2 สถานภาพทางเคมีของการคายประจุ (the chemistry of discharge)

2.4.2.1 แผ่นประจุบวกประกอบด้วยตะกั่วไดออกไซด์ ( $PbO_2$ ) และค่อยๆ เปลี่ยนเป็นซัลเฟตตะกั่ว ( $PbSO_4$ ) ระหว่างการคายประจุ

2.4.2.2 แผ่นประจุลบประกอบด้วยตะกั่ว และค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสารตะกั่วซัลเฟต ( $PbSO_4$ ) อย่างช้าๆ ในระหว่างการคายประจุ

2.4.2.3 ในช่วงสุดท้ายของการคายประจุ ตามปกติซัลเฟตที่เกิดจากแผ่นบวกและลบจะประกอบด้วยผลึกตะกั่วที่มีผลึกซัลเฟต ( $PbSO_4$ ) มาก

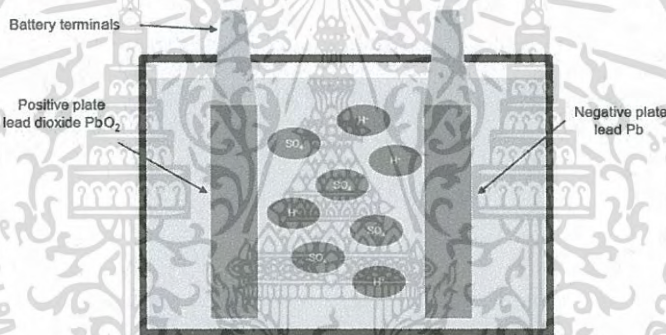
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.4 การที่มีซัลเฟตเป็นส่วนประกอบเล็กๆของกระบวนการการคายประจุเป็นเรื่องปกติของกระบวนการนี้

2.4.2.5 ซัลเฟตจะถูกกำจัดด้วย 3 ขั้นตอนในการชาร์จประจุ

### 2.4.3 คุณสมบัติทางเคมีของแบตเตอรี่ระหว่างการคายประจุ (Battery chemistry during discharge)

ในระหว่างการคายประจุกรดซัลฟิวริกจะแยกออกเป็นไอออน  $SO_4$  และ  $H^+$  ซึ่งโมเลกุลของ  $SO_4$  รวมทั้งแผ่นบวกและแผ่นลบสร้างสารตะกั่วซัลเฟต  $PbSO_4$  ในระหว่างการคายประจุซึ่งอิเล็กตรอนที่คายออกมาจากโมเลกุลของไฮโดรเจนในกรดซัลฟิวริกจะสร้างประจุไฟฟ้าที่จำเป็นสำหรับกระแสไฟฟ้าดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 คุณสมบัติทางเคมีระหว่างการคายประจุ

(ที่มา: <http://www.chargetek.com/images/pdfs/equal.pdf>)

ปฏิกิริยาเคมีของแผ่นบวกในระหว่างการคายประจุแสดงดังรูปที่ 2.20

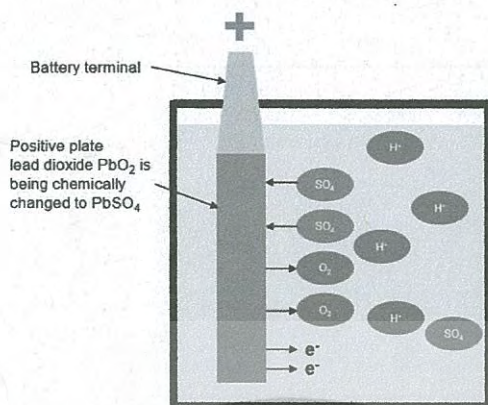
2.4.3.1 ในระหว่างการคายประจุ แผ่นบวกจะค่อยๆเปลี่ยนเป็น  $PbSO_4$  ขณะที่กรดถูกทำลายและรวมกับแผ่นบวก

2.4.3.2 โมเลกุลไฮโดรเจนกำลังปลดปล่อยอิเล็กตรอนเพื่อให้กระแสไฟฟ้า โดยโมเลกุลของ  $Pb$  ที่เกิดขึ้นรวมกับโมเลกุลของ  $SO_4$  อิสระเพื่อผลิตตะกั่วซัลเฟต  $PbSO_4$

2.4.3.3 โมเลกุล  $O_2$  อิสระรวมกับไอออนไฮโดรเจนอิสระ  $H^+$  เพื่อผลิตน้ำ

2.4.3.4 ในกระบวนการนี้มีการผลิตอิเล็กตรอนอิสระ 2 ตัว ซึ่งเกิดจากอะตอมของ  $H_2$

2.4.3.5 สารละลายนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นน้ำเนื่องจากกรดซัลฟิวริกถูกแยกออกจากกัน

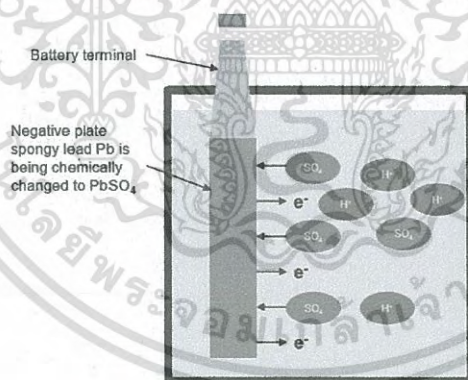


รูปที่ 2.20 ปฏิกิริยาเคมีของแผ่นบวกในระหว่างการคายประจุ  
(ที่มา: <http://www.chargetek.com/images/pdfs/equal.pdf>)

ปฏิกิริยาเคมีของแผ่นลบในระหว่างการคายประจุแสดงดังรูปที่ 2.21

2.4.3.6 ในระหว่างการคายประจุ โมเลกุลของ  $Pb$  รวมกับโมเลกุลของ  $SO_4$  เพื่อสร้าง  $PbSO_4$  เกิดไอออนบวกสองตัวของไฮโดรเจน  $H^+$  อิเล็กตรอนอิสระสองตัว

2.4.3.7 สารละลายนี้ถูกเปลี่ยนเป็นน้ำเนื่องจากมีการแยกออกของซัลฟิวริก



รูปที่ 2.21 ปฏิกิริยาเคมีของแผ่นลบในระหว่างการคายประจุ  
(ที่มา: <http://www.chargetek.com/images/pdfs/equal.pdf>)

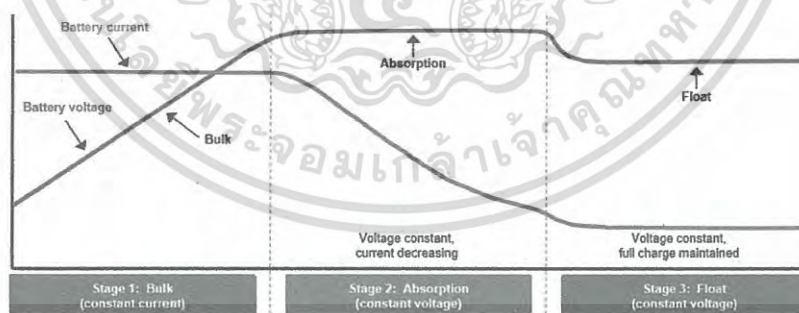
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3.8 ขั้นตอนการประจุแบตเตอรี่วัฏจักรการชาร์จไฟ 3 ขั้นตอน (Three stage charging algorithm) การชาร์จสามขั้นตอนเป็นวิธีที่บริษัทผู้ผลิตแบตเตอรี่ตะกั่วกรดส่วนใหญ่แนะนำให้เป็นวิธีที่ดีที่สุดและมีประสิทธิภาพมากที่สุดในการคืนความจุเต็มรูปแบบให้กับแบตเตอรี่และยืดอายุการใช้งานแสดงดังรูปที่ 2.22

- ขั้นที่ 1 : การชาร์จกระแสไฟฟ้าคงที่หรือโหมดชาร์จเต็มความจุ (Constant current mode) สมมติว่าแบตเตอรี่เริ่มทำงานในสถานะคายประจุซึ่งเครื่องชาร์จไฟกำลังทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าคงที่โดยที่เครื่องชาร์จรักษากระแสไฟฟ้าให้คงที่ และแรงดันแบตเตอรี่กำลังเพิ่มขึ้นเนื่องจากการชาร์จใหม่โดยที่ประมาณ 80% ของความจุแบตเตอรี่นั้นถูกกลับคืน

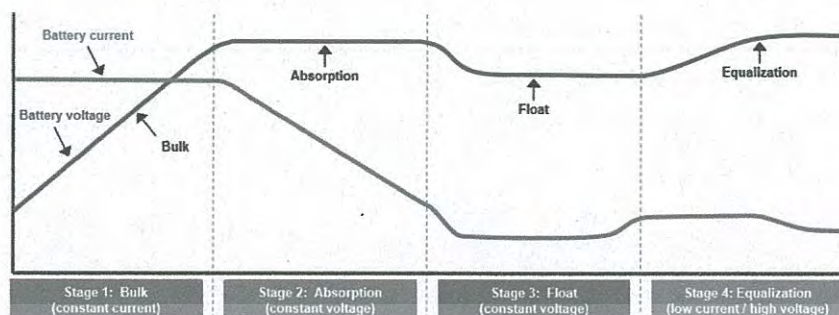
- ขั้นที่ 2 : โหมดดูดซับ (absorption mode) เมื่อแรงดันแบตเตอรี่เข้าสู่ค่าประมาณ 2.4 โวลต์ต่อเซลล์ แรงดันไฟฟ้าของเครื่องชาร์จไฟจะคงที่ที่ระดับนี้ และกระแสไฟฟ้าแบตเตอรี่จะลดลงซึ่งมันเป็นขอบเขตที่มีการคืนความจุของแบตเตอรี่ 20% สุดท้ายซึ่งที่ระดับแรงดันนี้ถูกรักษาจนกระทั่งกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลดลงประมาณ C/50 ถึง C/100 โดยที่ C คือ แอมป์ชั่วโมงของแบตเตอรี่ ตัวอย่างเช่น ถ้ามีแบตเตอรี่ 100 แอมป์ชั่วโมงแรงดันไฟฟ้าควรจะถูกรักษาไว้ที่ 2.5 โวลต์ต่อเซลล์จนกระทั่งกระแสไฟฟ้าลดลง 1-2 แอมป์ ทั้งนี้จำนวนที่ถูกต้องยังไม่มีแน่นอน

- ขั้นที่ 3 : โหมดลอยตัว (Float Mode) จุดที่กระแสไฟฟาลดลงเป็น C/50 ถึง C/100 เครื่องชาร์จแบตเตอรี่จะมีการเข้าสู่โหมดลอยตัว โดยที่โหมดลอยตัวคือจุดที่แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่อยู่ที่ประมาณ 2.25 โวลต์ต่อเซลล์ ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้จะรักษาเงื่อนไขการชาร์จไฟเต็มในแบตเตอรี่โดยปราศจากอิเล็กทรอนิกส์ที่ร้อนจัดหรือการชาร์จแบตเตอรี่มากเกินไป



รูปที่ 2.22 วัฏจักรการชาร์จไฟ 3 ขั้นตอน (Three stage equalization algorithm)

(ที่มา: <http://www.chargetek.com/images/pdfs/equal.pdf>)



รูปที่ 2.23 วัฏจักรการชาร์จไฟ 4 ขั้นตอน (Four stage equalization algorithm)

(ที่มา: <http://www.chargetek.com/images/pdfs/equal.pdf>)

จากรูปจะเห็นได้ว่าการชาร์จ 3 ขั้นตอนแรกจะเหมือนกันกับ วัฏจักรการชาร์จไฟ 3 ขั้นตอน ซึ่งในขั้นตอนที่ 4 นั้นจะเป็น Equalization mode แสดงดังรูปที่ 2.23 จุดประสงค์ คือ การนำซิลเฟตออกจากแผ่นตะกั่วและกำจัดการแบ่งชั้นของอิเล็กโทรไลต์ โดยที่ประมาณ 2.5-2.6 โวลต์ต่อเซลล์จะถูกใช้กับแบตเตอรี่ที่มีกระแสไฟฟ้าตั้งไว้ที่ค่าต่ำมาก โดยทั่วไปต่ำกว่า 0.5 แอมป์โหมดการทำให้เท่าเทียมกันอาจใช้งานได้ทุกที่ตั้งแต่ไม่กี่ชั่วโมงไปจนถึง 24 ชั่วโมงขึ้นอยู่กับสถานการณ์

## 2.5 วงจรทอนระดับแรงดัน (Buck Converter)

วงจรทอนระดับแรงดันหรือวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ คือ วงจรที่ทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า และเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกที่มีกระแสตรงมากๆ จะนิยมใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) ซึ่งโดยมากจะเลือกใช้วงจรกรองแบบ LC เพราะมีอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการ ผกผันกับกำลังสองของความถี่

### 2.5.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ ในช่วงที่เป็นสภาวะอยู่ตัว (steady state) จะมี การกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ดังนี้

2.5.1.1 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากัน

$$i_L(t+T) = i_L(t) \quad (2-35)$$

หมายถึง กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากัน ณ ตำแหน่งเดียวกันในทุกคาบเวลา

2.5.1.2 แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกรวมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_L(\lambda) d\lambda = 0 \quad (2-36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.3 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวเก็บประจุในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$I_c = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_c(t) dt = 0 \quad (2-37)$$

หมายถึงประจุที่ถูกเก็บ (charged) และที่คาย (discharged) ในแต่ละคาบเวลาจะต้องเท่ากัน

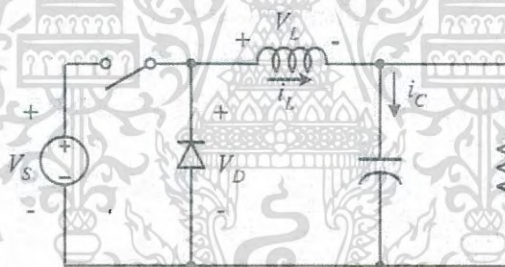
2.5.1.4 กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก

$$P_s = P_o \quad (2-38)$$

กรณีนี้กำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้ไม่มีการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจร ประสิทธิภาพของวงจรจึงเท่ากับร้อยเปอร์เซ็นต์

## 2.5.2 หลักการทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์

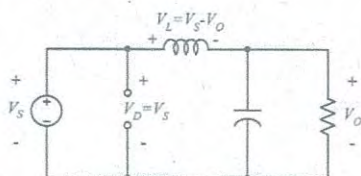
จากรูปที่ 2.24 วงจรบักคอนเวอร์เตอร์ เพื่อจะออกแบบให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกตามที่ต้องการ คือ ต้องเริ่มจากเงื่อนไขที่ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ในแต่ละคาบเวลามีค่าเท่ากับศูนย์ จากนั้นก็จะสามารถหากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้ตั้งสมการที่ (2-42) การวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ ในแต่ละโหมตจะต้องวิเคราะห์ในสภาวะอยู่ตัว ดังนี้



รูปที่ 2.24 วงจรบักคอนเวอร์เตอร์

### 2.5.2.1 ขณะสวิตช์นำกระแส

จากรูปที่ 2.25 กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านสวิตช์ ผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังโหลด โดยที่กระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะไปเก็บที่ตัวเก็บประจุ จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์สามารถเขียนเป็นสมการของแรงดันไฟฟ้าดังนี้



รูปที่ 2.25 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-V_s + V_L + V_o = 0$$

$$V_L = V_s - V_o \quad (2-39)$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2-40)$$

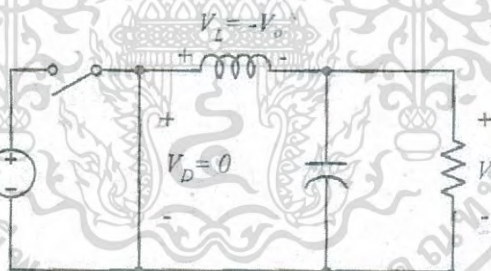
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2-41)$$

$dt$  ในกรณีอยู่ในช่วงเวลานำกระแส คือ  $dt = DT$

$$\Delta i_{L,on} = \left( \frac{V_s - V_o}{L} \right) DT \quad (2-42)$$

### 2.5.2.2 ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส

จากรูปที่ 2.26 เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส ไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้า (Forward bias) ให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดการไหลอย่างต่อเนื่อง และจากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้สมการแรงดันไฟฟ้าดังนี้



รูปที่ 2.26 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส

$$V_L = -V_o \quad (2-43)$$

$$V_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2-44)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_{L,off}}{\Delta t} = -\frac{V_o}{L} \quad (2-45)$$

ความหมายของสมการที่ (2-45) คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะค่อยๆ มีค่าลดลง เพราะการเปลี่ยนแปลงกระแสตัวเหนี่ยวนำต่อเวลามีค่าเป็นลบ  $dt$  ในกรณีอยู่ในช่วงเวลาหยุดนำกระแส คือ  $dt = (1 - D)T$  ดังนั้นสมการที่ (2-45) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\Delta i_{L,off} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T \quad (2-46)$$

### 2.5.3 การหาค่าอัตราขยายแรงดันของวงจรบ็ีกคอนเวอร์เตอร์

จากเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในสมการที่ (2-37) กล่าวคือ ในช่วงสภาวะอยู่ตัวการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะที่สวิตช์นำกระแส จะมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้น เท่ากับการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะที่สวิตช์ไม่นำกระแส หรือ อาจจะกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ (2-42) กับสมการที่ (2-46) จะได้ว่า

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad (2-47)$$

$$\left(\frac{V_s - V_o}{L}\right)DT + \left(-\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)\right)T = 0 \quad (2-48)$$

$$(V_s - V_o)D - V_o(1-D) = 0$$

$$V_s D - V_o D - V_o + V_o D = 0$$

$$\left(\frac{V_o}{V_s}\right) = D \quad (2-49)$$

ในสมการที่ (2-49) อัตราขยายแรงดันจะมีค่าสูงสุดไม่เกิน 100% ตามค่า  $D$  วงจรบ็ีกคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่า  $D$  โดยการปรับค่า  $D$  สามารถปรับได้ตั้งแต่ศูนย์ถึงหนึ่ง เช่น แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับ 100 โวลต์ ซึ่งในทางทฤษฎี วงจรบ็ีกคอนเวอร์เตอร์ก็จะสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าด้านออกได้ตั้งแต่ศูนย์โวลต์ถึงหนึ่งร้อยโวลต์ แต่ในทางปฏิบัติจะไม่สามารถปรับได้ถึง 100 โวลต์ เพราะเกิดแรงดันตกคร่อม สวิตช์ และตัวเหนี่ยวนำทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกที่ได้จริงมีค่าน้อยกว่า 100 โวลต์เล็กน้อยจากการหาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าหรือที่เรียกว่าอัตราขยายแรงดัน (voltage gain) สามารถหาได้อีกวิธีหนึ่งโดยการใช้สมการแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ (2-35) จะได้

$$V_{L,av} = V_{L,on}(t_{on}) + V_{L,off} = 0 \quad (2-50)$$

$$V_{L,av} = (V_s - V_o)(t_{on}) + (-V_o)(t_{off}) = 0 \quad (2-51)$$

$$(V_s - V_o)DT - V_o(1-D)T = 0$$

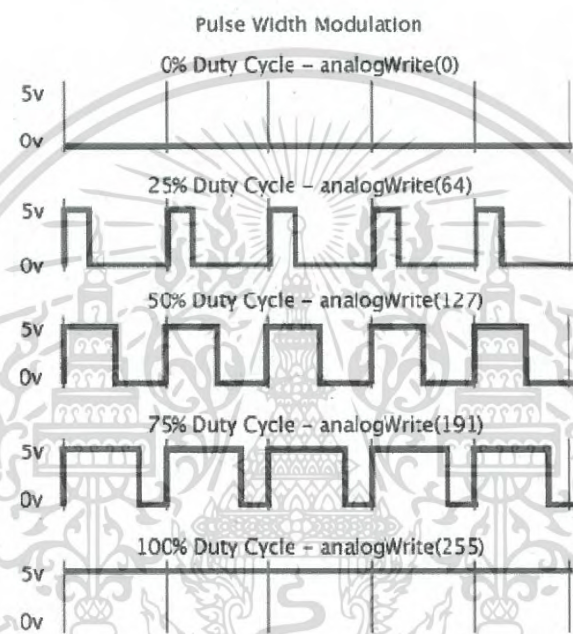
$$\left(\frac{V_o}{V_s}\right) = D$$

เมื่อ  $V_{L,on}$  คือ แรงดันเฉลี่ยตกคล่อมตัวเหนี่ยวนำ

$V_{L,on}$  คือ แรงดันเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแส

$V_{L,off}$  คือ แรงดันเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์ไม่นำกระแส

## 2.5.4 การสร้างสัญญาณ PWM



รูปที่ 2.27 สัญญาณ PWM ของแต่ละ Duty Cycle

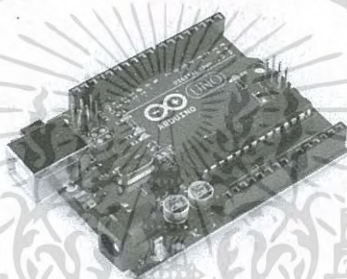
(ที่มา: <https://www.arduino.cc>)

จากรูปที่ 2.27 ความกว้างของพัลส์ซึ่งควบคุมโดยการมอดูเลชัน PWM (Pulse Width Modulation) เป็นการสร้างรูปคลื่นสี่เหลี่ยมโดยกำหนดคาบของสัญญาณหรือความกว้างของพัลส์ ซึ่งความกว้างของสัญญาณพัลส์ และการปรับเปลี่ยนที่สัดส่วนจะถูกปรับเปลี่ยนโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความถี่ของสัญญาณพัลส์ หรือก็คือค่าของดิวตี้ไซเคิลที่ถูกปรับเปลี่ยนนั่นเอง ซึ่งค่าของดิวตี้ไซเคิล คือ ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่มีลอจิกสูง โดยความกว้างของสัญญาณพัลส์ถูกคิดสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ สัญญาณ PWM ที่ใช้ใน Arduino มีแรงดันระหว่าง 0 และ 5 โวลต์ ถ้าดิวตี้ไซเคิลมีค่าน้อยจะทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกเฉลี่ยมีค่าน้อย แต่ถ้าดิวตี้ไซเคิลมีค่ามากก็จะทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกเฉลี่ยที่ออกมา

มีค่ามากเช่นกัน ซึ่งค่าของตัวที่ไซเคิลสามารถหาได้โดยนำช่วงความกว้างของสัญญาณพัลส์หารด้วย คาบเวลาของสัญญาณทั้งหมด แล้วคูณด้วย 100%

## 2.6 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller Board)

Arduino อ่านว่า (อา-ดู-อี-โน้ หรือ อาดูยโน้) เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source ดังแสดงในรูปที่ 2.28 คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software ตัว บอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา ทั้งนี้ ผู้ใช้ยังสามารถดัดแปลงเพิ่มเติมพัฒนาต่อยอดทั้งตัวบอร์ดหรือโปรแกรมต่อได้อีกด้วย



รูปที่ 2.28 Arduino UNO R3 Board

(ที่มา: <http://www.thaieasyelec.com>)

ความง่ายของบอร์ด Arduino ในการต่ออุปกรณ์เสริมต่างๆ คือผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ดหรือเพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (Arduino Shield) ประเภทต่างๆ เช่น Arduino XBee Shield, Arduino Music Shield, Arduino Relay Shield, Arduino Wireless Shield, Arduino GPRS Shield เป็นต้น มาเสียบกับบอร์ดบนบอร์ด Arduino แล้วเขียนโปรแกรมพัฒนาต่อได้เลย

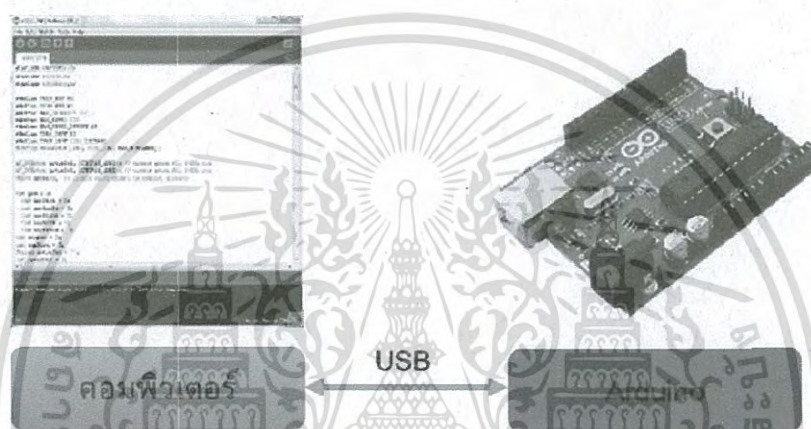
### 2.6.1 จุดเด่นที่ทำให้บอร์ด Arduino เป็นที่นิยม

- 2.6.1.1 ง่ายต่อการพัฒนา มีรูปแบบคำสั่งพื้นฐาน ไม่ซับซ้อนเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น
- 2.6.1.2 มี Arduino Community กลุ่มคนที่ร่วมกันพัฒนาที่แข็งแกร่ง
- 2.6.1.3 Open Hardware ทำให้ผู้ใช้สามารถนำบอร์ดไปต่อยอดใช้งานได้หลายด้าน
- 2.6.1.4 Cross Platform สามารถพัฒนาโปรแกรมบน OS ใดก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 รูปแบบการเขียนโปรแกรมบน Arduino

รูปแบบการเขียนโปรแกรมบน Arduino นั้นจะใช้ซอฟต์แวร์เฉพาะที่ทาง Arduino ได้มีการพัฒนาขึ้นซึ่งลักษณะของภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมจะเป็นภาษา C เนื่องจากเป็นคำสั่งที่ Arduino ได้มีการพัฒนาขึ้นมาจึงทำให้ลักษณะของคำสั่งมีความแตกต่างจากโปรแกรมภาษา C ทั่วไปทั้งนี้เพื่อความง่ายและสะดวกในการนำไปใช้งานทำให้รูปแบบของการเขียนโปรแกรมบน Arduino ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการใช้งานดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 รูปแบบการเขียนโปรแกรมบน Arduino

(ที่มา: <http://www.thaieasyelec.com>)

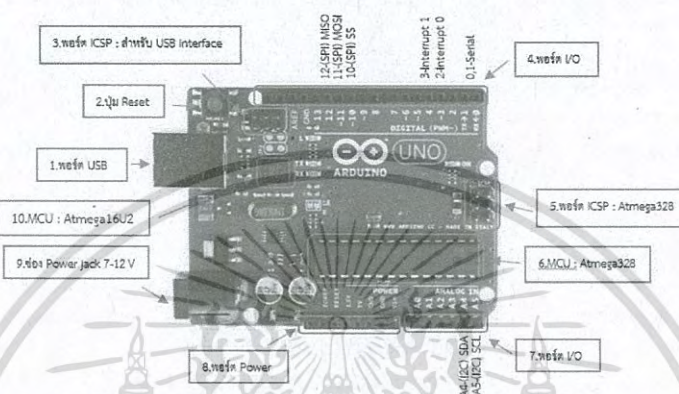
2.6.2.1 เขียนโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ผ่านทางโปรแกรม ArduinoIDE ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก [Arduino.cc/en/main/software](http://Arduino.cc/en/main/software)

2.6.2.2 หลังจากที่ได้เขียนโค้ดโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ให้ผู้ใช้งานเลือกรุ่นบอร์ด Arduino ที่ใช้และหมายเลข Com port

2.6.2.3 กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและ Compile โค้ดโปรแกรม จากนั้น กดปุ่ม Upload โค้ด โปรแกรมไปยังบอร์ด Arduino ผ่านทางสาย USB เมื่ออัปโหลดเรียบร้อยแล้ว จะแสดงข้อความแถบข้างล่าง “Done uploading” และบอร์ดจะเริ่มทำงานตามที่เขียนโปรแกรมไว้ได้ทันที

### 2.6.3 หน้าที่ของอุปกรณ์ต่าง ๆ บนบอร์ด Arduino

จากรูปที่ รูปที่ 2.30 แสดงรายละเอียดหน้าที่ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีการจัดวางอยู่บนบอร์ด Arduino เพื่อให้ผู้ใช้งานได้มีความเข้าใจหน้าที่ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ก่อนนำไปใช้งานโดยมีอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.30 หน้าที่ของอุปกรณ์ต่าง ๆ บนบอร์ด Arduino

(ที่มา: <http://www.thaieasyelec.com>)

2.6.3.1 USBPort: ใช้สำหรับต่อกับ Computer เพื่อโปรแกรมและจ่ายไฟให้กับบอร์ด

2.6.3.2 Reset Button: เป็นปุ่ม Reset ใช้กดเมื่อต้องการให้ MCU เริ่มการทำงานใหม่

2.6.3.3 ICSP Port ของ Atmega16U2: เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Visual Comport

2.6.3.4 I/OPort:Digital I/O ตั้งแต่ขา D0 ถึง D13 นอกจากนี้ บาง Pin จะทำหน้าที่

อื่นๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น Pin0,1 เป็นขา Tx,Rx Serial, Pin3,5,6,9,10 และ 11 เป็นขา PWM

2.6.3.5 ICSP Port: Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Bootloader

2.6.3.6 MCU: Atmega328 เป็น MCU ที่ใช้บนบอร์ด Arduino

2.6.3.7 I/OPort: นอกจากจะเป็น Digital I/O แล้ว ยังเปลี่ยนเป็น ช่องรับสัญญาณ

อนาล็อก ตั้งแต่ขา A0-A5

2.6.3.8 Power Port: ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อต้องการจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอก ประกอบด้วยขาไฟเลี้ยง +3.3 V, +5V, GND,  $V_{in}$

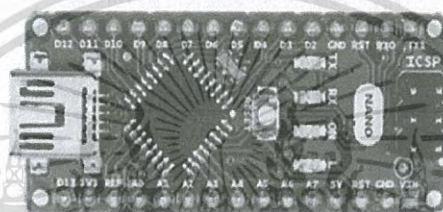
2.6.3.9 Power Jack: รับไฟจาก Adapter โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V

2.6.3.10 MCU ของ Atmega16U2 เป็น MCU ที่ทำหน้าที่เป็น USB Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับ Computer ผ่าน Atmega 16U2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.6.4 ตัวอย่าง Arduino Board ที่นำมาใช้งาน

Arduino Nano เป็นบอร์ด Arduino ที่ออกแบบมาสำหรับการใช้งานขนาดย่อม โดยระบบนั้นมีจำนวนตัวแปรที่สั่งการค่อนข้างน้อย ซึ่งเป็นเหตุผลให้ไม่จำเป็นต้องใช้งาน Arduino ที่มีขนาดใหญ่ เพราะมีราคาแพงกว่าค่อนข้างมาก และ option ต่างๆของ Arduino Nano ก็เพียงพอต่อการทำงานในระบบนี้แล้ว การเลือกใช้ Arduino Nano จึงส่งผลให้วงจรควบคุมนี้ขนาดเล็กลงและมีต้นทุนที่ต่ำลงเป็นอย่างมากอีกด้วย



รูปที่ 2.31 Arduino Nano  
(ที่มา: <https://store.arduino.cc>)

## บทที่ 3

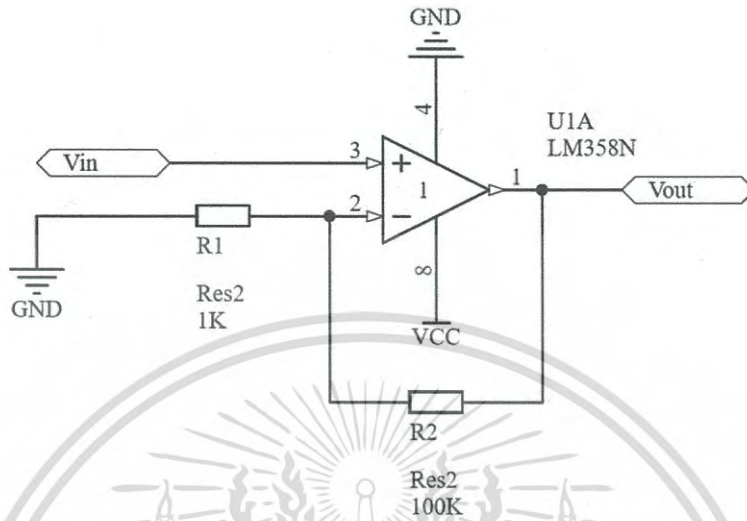
### ออกแบบและประกอบสร้าง

#### 3.1 บทนำ

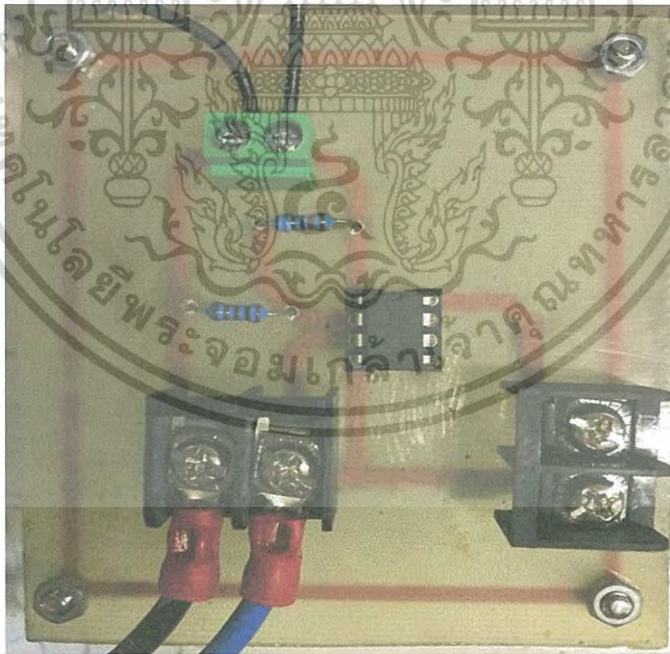
บทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีขั้นพื้นฐานที่สำคัญของสำหรับการทำงานวิจัยนี้ ในบทนี้จะนำทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ เหล่านั้นมาประยุกต์ใช้การออกแบบและทดสอบ เช่น ทดสอบ Governor โดยใช้สัญญาณ PWM จาก Arduino, ทดสอบการทำงานของ Arduino ร่วมกับ Generator-set เพื่อประจุแบตเตอรี่, ออกแบบ PID Control เพื่อให้ระบบการประจุแบตเตอรี่ทำงานได้อย่างเหมาะสม, ทดสอบระบบป้องกันอุปกรณ์ และอุปกรณ์แสดงผล โดยจะแสดงรายละเอียดวิธีการทดลองทั้งหมดดังต่อไปนี้

#### 3.2 การออกแบบวงจรมหาขยายสัญญาณ (Operational Amplifier)

วงจรมหาขยายสัญญาณเป็นอุปกรณ์หรือวงจรรวมที่ช่วยเพิ่มขนาดหรือกำลังของสัญญาณ โดยการรับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟและการควบคุมสัญญาณเอาต์พุตให้มีรูปร่างเหมือนสัญญาณอินพุต แต่มีขนาดมากกว่า ซึ่งโครงงานนี้ใช้วงจรมหาขยายสัญญาณเพื่อขยายแรงดันขาเข้าจาก DC Current Shunt Resistor และนำสัญญาณเข้า Arduino เพื่อใช้งานเป็น Feedback ในการควบคุมต่อไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทดสอบวงจรมหาขยายสัญญาณนี้ว่ามีความเป็นเชิงเส้นกันระหว่างสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออกหรือไม่ เพื่อแสดงให้เห็นว่าวงจรมหาขยายสัญญาณนี้มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการทำงานตลอดช่วงการทำงานเพื่อที่จะได้นำค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดมาได้มาใช้ได้อย่างถูกต้องซึ่งออกแบบวงจรมหาขยายสัญญาณได้ 100 เท่าของสัญญาณขาเข้า เนื่องจาก DC Current Shunt Resistor ที่นำมาใช้มีขนาด 300A/75 mV และใช้กระแสสูงสุดประมาณ 167 A ซึ่งทำให้แรงดันจาก DC Current Shunt Resistor มีขนาด 41.75 mV และเมื่อทำการขยายสัญญาณไป 100 เท่า จะทำให้แรงดันมีขนาดเท่ากับ 4.175 V ซึ่งไม่เกินค่าพิคกิ้งของ Arduino pin ที่มีค่า 5 V และอยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการอ่านค่าโดยวงจรมีลักษณะดังรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 ออกแบบวงจรขยายสัญญาณ (Operational Amplifier Schematic)

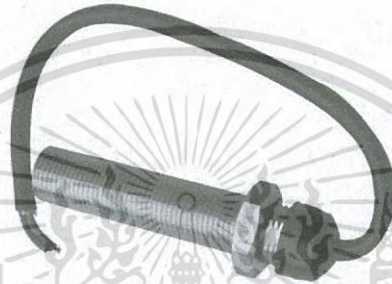


รูปที่ 3.2 วงจรขยายสัญญาณ (Operational Amplifier)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบวงจรวัดความเร็วรอบ (Tachometer)

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรภายในที่ได้นำมาทดสอบได้มีการติดตั้งเครื่องวัดสัญญาณความเร็วคือ Magnetic Pick Up ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นเครื่องวัดสัญญาณที่ออกแบบให้สามารถตรวจจับเฟืองโดยเฉพาะ ความละเอียดขึ้นกับจำนวนเฟือง ซึ่งนิยมใช้กับงานที่มีความเร็วรอบสูงๆ ซึ่งสัญญาณที่ Magnetic Pick Up ส่งออกจะเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Wave)



รูปที่ 3.3 Magnetic Pick Up

(ที่มา : <https://www.alibaba.com>)

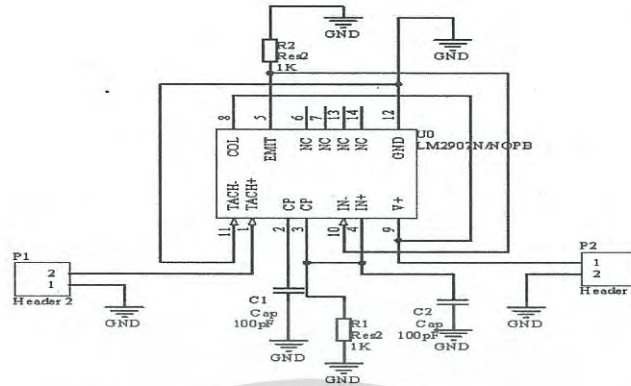
เนื่องจากสัญญาณที่เข้า Arduino จะต้องเป็นสัญญาณกระแสตรงและมีย่านแรงดันใช้งานไม่เกิน 5 Vdc ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการออกแบบให้สัญญาณไซน์ให้กลายเป็นสัญญาณกระแสตรงและมีขนาดไม่เกิน 5 Vdc หรือ F/V Converter จากสมการที่ (3-1) เป็นสมการแปลงความถี่เป็นแรงดัน เพื่อหาค่าตัวเก็บประจุ และ ค่าความต้านทานที่เหมาะสม

$$V_o = R_1 \times C_1 \times V_{cc} \times f \quad (3-1)$$

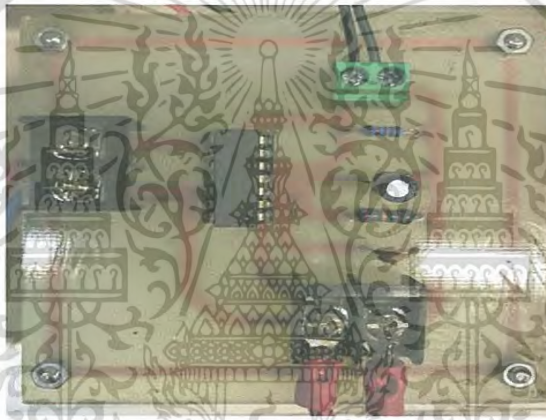
เมื่อ  $C_1 = 1000 \text{ pF}$  และ  $R_1 = 130 \text{ k}\Omega$

ดังนั้นจะได้ว่า  $V_o = 3.5 \text{ V}$

จากการออกแบบข้างต้นสามารถนำมาออกแบบวงจรด้วยโปรแกรม Altium Designer ซึ่งได้มีการออกแบบวงจรวัดความเร็วรอบดังแสดงในรูปที่ 3.4 และ 3.5



รูปที่ 3.4 ออกแบบวงจรวัดความเร็วรอบ (Tachometer Schematic)

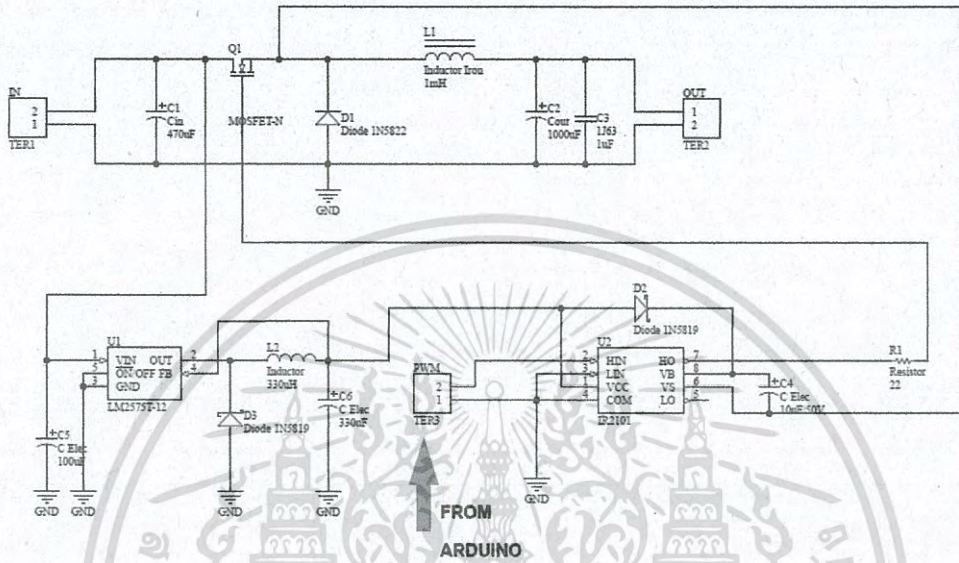


รูปที่ 3.5 วงจรวัดความเร็วรอบ (Tachometer)

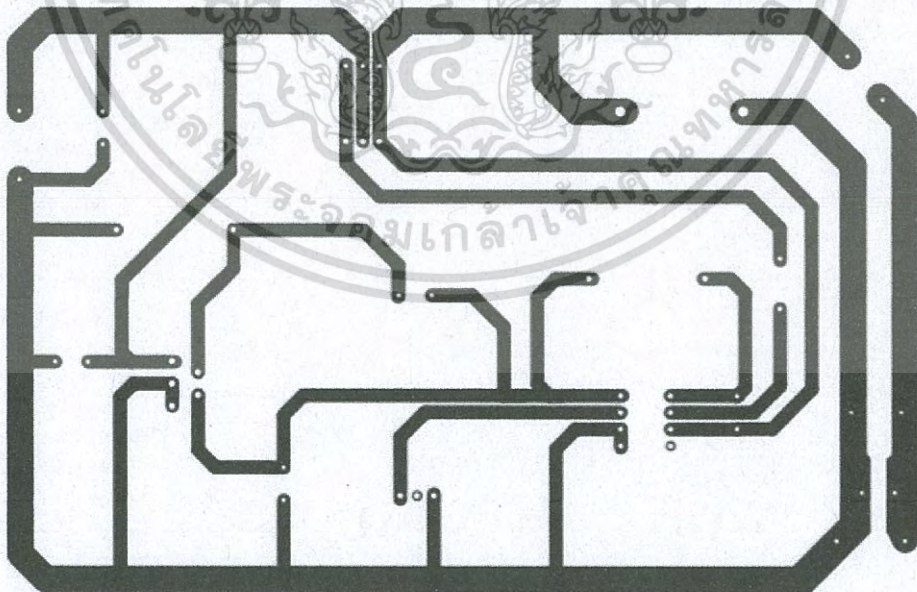
### 3.4 การออกแบบวงจรลดทอนระดับแรงดัน (Buck Converter)

สำหรับการควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อที่จะนำไปใช้ในการควบคุมความเร็ว แรงดัน และกระแส สามารถทำได้ด้วยการควบคุมการจ่ายแรงดัน หรือ PWM ให้กับ Governor โดยอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ในการจ่ายแรงดัน หรือทำหน้าที่เป็นวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ (Motor Drive) คือวงจรลดทอนระดับแรงดัน (Buck Converter) ที่รับสัญญาณ PWM จาก Arduino ซึ่งสัญญาณที่ใช้จะเป็นสัญญาณความถี่ 25kHz เพื่อให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในวงจรมีขนาดเล็ก และสัญญาณแรงดันขาเข้ามีค่าเท่ากับ 12V ดังนั้นจึงสามารถออกแบบวงจรลดทอนระดับแรงดันโดยใช้ความรู้ความเข้าใจทฤษฎีในบทที่ 2 สามารถนำมาคำนวณหาค่าของอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จะหาค่าที่น้อยที่สุดที่จะได้ทำสัญญาณกระแส

ยังคงต่อเนื่องแต่มีริบเปิ้ล (Ripple) ไม่เกิน 1 % และเลือกใช้ขนาดของค่าต่าง ๆ ตามที่สามารถหาซื้อได้ง่าย ซึ่งสามารถออกแบบวงจรได้ตามรูปที่ 3.6 และลายวงจรแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 ออกแบบวงจรลดทอนระดับแรงดัน (Buck Converter)

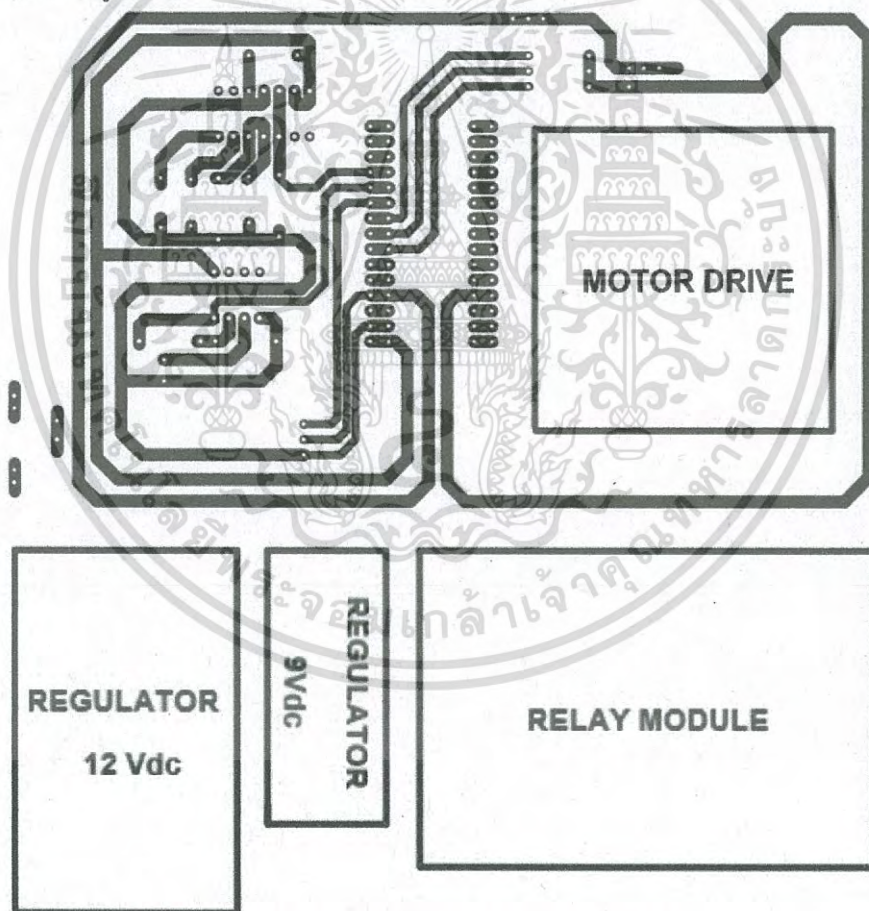


รูปที่ 3.7 ลายวงจรลดทอนระดับแรงดัน (Buck Converter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การออกแบบวงจรควบคุมการประจุแบตเตอรี่ด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรภายใน

วงจรควบคุมนี้เป็นที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้ระบบควบคุมป้อนกลับแบบ PID โดยใช้ Arduino เพื่อทำการควบคุมการประจุแบตเตอรี่ที่ตามรูปแบบการประจุแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดได้อย่างเหมาะสม โดยการควบคุมจำเป็นต้องมีสัญญาณป้อนกลับที่รับเข้ามาเพื่อใช้ในการควบคุมต่อไป จากการออกแบบหัวข้อที่ผ่านมาจึงได้นำการวงจรที่ได้ออกแบบไว้ทั้งหมดมารวมกันให้อยู่ในแผ่นวงจรเดียวกันทั้งนี้เพื่อให้มีขนาดเล็กลงและลดการต่อสายซึ่งจะทำให้เกิดความน่าเชื่อถือกับวงจรควบคุมอีกด้วย ซึ่งประกอบไปด้วย วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน, วงจรขยายสัญญาณสำหรับวัดกระแส, เซนเซอร์วัดระดับแรงดัน, วงจรรักษาระดับแรงดัน, ชุดรีเลย์ป้องกัน และวงจรขับมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



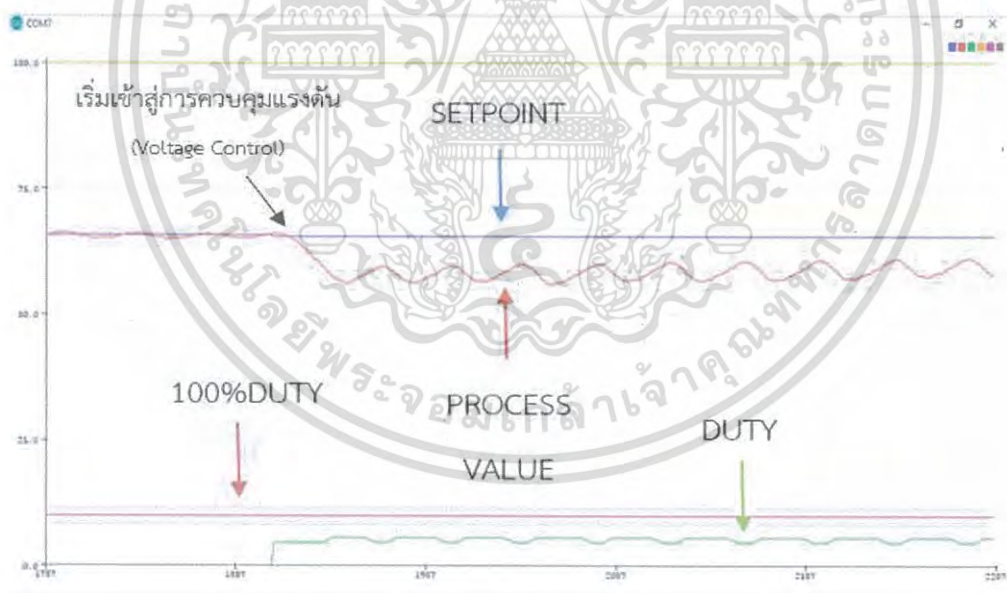
รูปที่ 3.8 ลายวงจรควบคุมการประจุแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 ออกแบบ PID Tuning Parameter เพื่อให้ระบบการประจุแบตเตอรี่ทำงานได้อย่างเหมาะสม

การจากทดสอบการทำงานของ Arduino ร่วมกับ Generator-set เพื่อประจุแบตเตอรี่ ในหัวข้อก่อนหน้านี้ ทำให้สามารถนำผลจากการทดลองมาทำการปรับปรุงระบบควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อให้ระบบการประจุแบตเตอรี่ทำงานได้อย่างเหมาะสม จากทฤษฎีพื้นฐานจะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบป้อนกลับด้วย PID Control จะต้องมีการหาค่า gain คือ  $K_p, K_I, K_D$  เพื่อให้ได้การควบคุมที่เหมาะสม คือมีความเร็วในการตอบสนองที่เหมาะสม มีโอเวอร์ชูดที่เหมาะสม และมีเวลาที่เข้าสู่เสถียรภาพ (Settling Time) ที่เหมาะสมโดยวิธีการทดสอบระบบเพื่อหาค่า gain ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่จะนำมาใช้คือวิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error Tuning) การทดสอบวิธีนี้มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ปรับค่า  $K_p$  โดยจะทำให้มีการตอบสนองต่อค่าความผิดพลาดระหว่างค่า Setpoint และ Process Value เมื่อมีค่า  $K_p$  มากขึ้นจะทำให้มีการตอบสนองต่อสัญญาณได้เร็วขึ้นแต่อย่างไรก็ตามจะทำให้โอเวอร์ชูดมากขึ้นด้วย ซึ่งจะทำให้การปรับค่า  $K_p$  ไปจนกระทั่งการตอบสนองเร็วตามที่ต้องการ และมีรูปแบบของสัญญาณ Process Value เป็นรูปแบบเดิมซ้ำ ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 เมื่อกำหนดให้เส้นสีน้ำเงินแสดงถึง Setpoint และเส้นสีแดงแสดงถึง Process Value



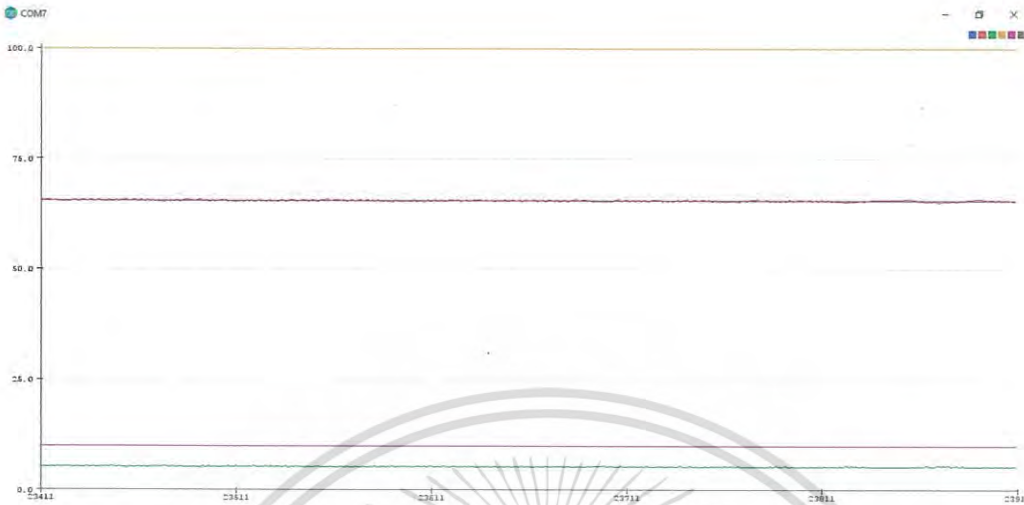
รูปที่ 3.9 การตอบสนองของสัญญาณต่อการปรับค่า  $K_p$

ปรับค่า  $K_I$  โดยจะทำให้มีการตอบสนองต่อผลรวมของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น เมื่อ  $K_I$  มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลการตอบสนองจากการปรับ  $K_p$  เข้าสู่ Setpoint มากขึ้นแต่อย่างไรก็ตามจะทำให้โอเวอร์ชูต (Overshoot) และช่วงเวลาในการเข้าสู่ Setpoint (Settling Time) นานขึ้น ซึ่งจะทำให้การปรับค่า  $K_I$  ไปจนกระทั่งความเร็วในการเข้าสู่ Setpoint ตามต้องการและมีรูปแบบของสัญญาณ Process Value เปลี่ยนแปลงรอบ Setpoint และมีแอมพลิจูดของสัญญาณเพียงเล็กน้อย เพื่อที่จะทำห้ค่าความผิดพลาดเท่ากับศูนย์เมื่อปรับค่า  $K_I$  ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การตอบสนองของสัญญาณต่อการปรับค่า  $K_p$  และ  $K_I$

ปรับค่า  $K_d$  โดยจะทำให้มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น เมื่อ  $K_d$  มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลการตอบสนองจากการปรับค่า  $K_I$  เข้าสู่ Setpoint โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 2% หรือ 5% นอกจากนี้ยังทำให้เวลาให้การเข้าสู่ Setpoint (Settling Time) น้อยลง และมีโอเวอร์ชูต (Overshoot) ต่ำลงอีกด้วยซึ่งจะทำการปรับค่า  $K_d$  ไปจนกระทั่งค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 2% หรือ 5% ตามที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 3.11

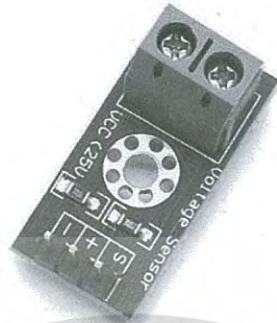


รูปที่ 3.11 การตอบสนองของสัญญาณต่อการปรับค่า  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_d$

### 3.7 ออกแบบการทำงานของ Arduino ร่วมกับ Generator-set เพื่อประจุแบตเตอรี่

ทำการเขียนโปรแกรมระบบควบคุมการประจุแบตเตอรี่ลงบน Arduino ผ่านโปรแกรม Arduino IDE ซึ่งโปรแกรมที่เขียนนั้นจะเป็นการออกแบบระบบควบคุมโดยใช้ทฤษฎีพื้นฐานในเรื่องของการควบคุมแบบป้อนกลับด้วย PID Control ซึ่งมีการทำงานร่วมกันระหว่าง Arduino กับ เซนเซอร์ต่าง ๆ เช่น Voltage Sensor, DC Current Shunt Resistor และ Tachometer ดังแสดงในรูปที่ 3.12, 3.13 และ 3.14 ตามลำดับซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับผลการตอบสนองเพื่อป้อนกลับไปยัง Arduino เพื่อใช้ในการคำนวณสำหรับการควบคุมแบบ PID ต่อไป โดยการทำงานของ Arduino ร่วมกับ Generator-set เพื่อประจุแบตเตอรี่นั้นมีการออกแบบไว้คือทำการสตาร์ทเครื่องยนต์ดีเซลด้วยการควบคุมความเร็วรอบขณะไม่มีโหลด (No-load) ไว้ที่ 1,000 RPM ซึ่งจะมีแรงดันอยู่ที่ประมาณ 6.0 Vdc หลังจากนั้นจะทำการจ่ายโหลดและเริ่มทำการควบคุมกระแสให้คงที่ซึ่งจะอยู่ในโหมดกระแสคงที่ (Constant Current) หรือ โหมด Bulk โดยขนาดกระแสที่จะใช้จะขึ้นอยู่กับอัตราการประจุ (C Rate) ต่อมาเมื่อแรงดันมีการเพิ่มขึ้นถึง 2.4 ถึง 2.45 volts per cell จะเข้าสู่โหมดแรงดันคงที่ (Constant Voltage) หรือโหมด Absorption โดยจะทำการรักษาระดับแรงดันให้คงที่จนกระทั่งระดับกระแสลดลงจนถึง C/50 หรือ C/100 จะทำการควบคุมระดับแรงดันให้คงที่โดยอยู่ในระดับที่ลดลงซึ่งจะอยู่ที่ 2.25 volts per cell เมื่อทำการควบคุมการประจุมาจนถึงโหมดนี้จะทำให้แบตเตอรี่เต็มเรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นจะทำการหยุดจ่ายโหลด และหยุดการควบคุมการประจุแบตเตอรี่ จากนั้นควบคุมให้ความเร็วไปอยู่ที่ 1,000 RPM เพื่อทำการปรับสภาวะต่างๆ ของเครื่องยนต์ให้อยู่ในสภาวะปกติ (Cooling down) เป็นเวลา 30 วินาที หลังจากนั้นสั่งหยุดจ่ายแรงดัน PWM ไปยัง Governor เพื่อเป็นการหยุดการทำงานของเครื่องยนต์

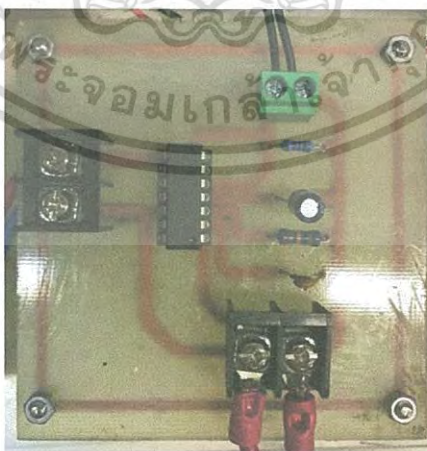
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 Voltage Sensor Module  
(ที่มา: <http://www.thaieasyelec.com>)



รูปที่ 3.13 DC Current Shunt Resistor  
(ที่มา: <http://www.thaieasyelec.com>)



รูปที่ 3.14 Tachometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 การทดสอบวงจรมายสัญญาณ (Operational Amplifier)

การทดลองนี้เป็นการทดสอบการตอบสนองของสัญญาณขาออกต่อขาเข้าของวงจรมายสัญญาณว่าเป็นเชิงเส้นหรือไม่ โดยนำสัญญาณขาออกเทียบกับสัญญาณขาเข้าของวงจรมายสัญญาณที่สามารถนำมาใช้งานในการขยายสัญญาณจาก DC Current Shunt Resistor ในช่วงขนาดกระแสประจุแบตเตอรี่ที่ต้องการได้ ซึ่งจะนำสัญญาณนี้มาตรวจจับกระแสที่ใช้ในการประจุแบตเตอรี่เพื่อใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับ (Feedback) ของระบบเพื่อใช้ในการคำนวณสำหรับการควบคุมด้วย PID ต่อไป

##### 4.1.1 จุดประสงค์การทดลอง

4.1.1.1 เพื่อทราบถึงการตอบสนองของสัญญาณขาออกต่อขาเข้าของวงจรมายสัญญาณว่าเป็นเชิงเส้นมากหรือน้อยเพียงใด และค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ

4.1.1.2 เพื่อออกแบบวงจรมายสัญญาณได้อย่างถูกต้องเหมาะสม

4.1.1.3 เพื่อขยายแรงดันขาออกของวงจรมายสัญญาณให้ไม่เกินแรงดันของพอร์ต Arduino

##### 4.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

4.1.2.1 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

4.1.2.2 มัลติมิเตอร์ (Multimeter)

4.1.2.3 แหล่งไฟกระแสตรง (DC Power Supply)

4.1.2.4 Non-Inverting Operational Amplifier (วงจรมายสัญญาณที่จัดทำขึ้น)

### 4.1.3 วิธีการทดลอง

4.1.3.1 จ่ายไฟเลี้ยงวงจรขยายสัญญาณขนาด 9 V ด้วย DC Power Supply ใน Chanel หนึ่ง ๆ ส่วนอีก Chanel หนึ่งของ DC Power Supply ให้จ่ายไฟเพื่อเป็นสัญญาณขาเข้าของวงจรขยายสัญญาณ ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นสัญญาณแรงดันที่รับมาจาก DC Current Shunt Resistor

4.1.3.2 ต่อออสซิลโลสโคปเพื่อวัดแรงดันที่ Input และ Output ของวงจร

4.1.3.3 ปรับแรงดัน Input ที่ DC Supply ให้แรงดันเริ่มต้นจาก 0 ถึง 50 mV

4.1.3.4 บันทึกค่าแรงดันของ Input และ Output ตลอดช่วงแรงดันทดสอบ

4.1.3.5 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Output และ Input เพื่อตรวจสอบความชันของกราฟว่ามีลักษณะเป็นเชิงเส้นมากน้อยเพียงใดและความคลาดเคลื่อนที่ได้เป็นอย่างไร

### 4.1.4 ผลการทดลอง

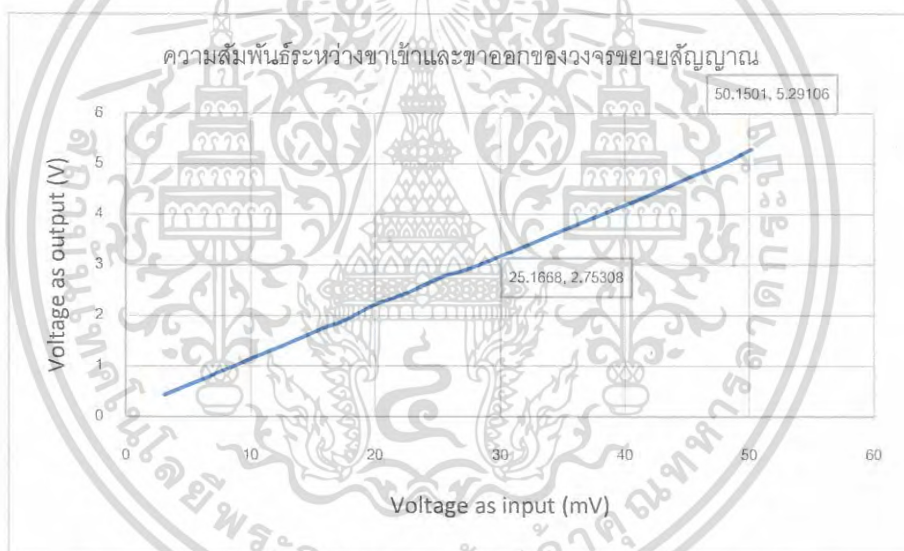
ตารางที่ 4.1 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างขาเข้าและขาออกของวงจรขยายสัญญาณ

Input Voltage (mV)	Output Voltage (V)	Slope
3.091	0.435	0.141
6.126	0.744	0.121
9.054	1.045	0.115
10.088	1.158	0.115
12.347	1.381	0.112
15.848	1.748	0.110
17.627	1.916	0.109
20.014	2.222	0.111
22.687	2.459	0.108
25.167	2.753	0.109
27.349	2.917	0.107
30.300	3.206	0.106
32.878	3.466	0.105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างขาเข้าและขาออกของวงจรขยายสัญญาณ (ต่อ)

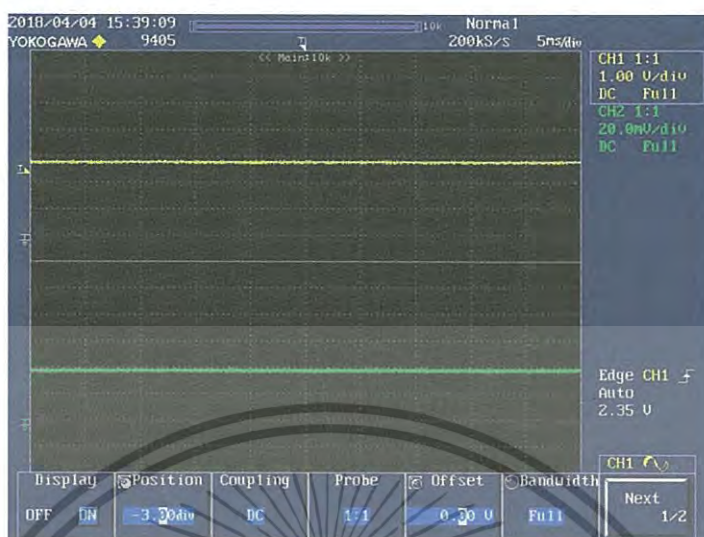
Input Voltage (mV)	Output Voltage (V)	Slope
35.131	3.698	0.105
37.316	3.919	0.105
40.498	4.235	0.105
42.864	4.484	0.105
45.044	4.721	0.105
47.987	5.017	0.105
50.150	5.291	0.106



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขาเข้าและขาออกของวงจรขยายสัญญาณ

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่ากราฟค่อนข้างมีความเป็นเชิงเส้น และเมื่อดูตารางที่ 4.1 ประกอบจะเห็นได้ว่าความชันมีค่าใกล้เคียงกันเกือบทุกช่วง เว้นแต่ช่วงที่แรงดันขาเข้าที่มีค่าต่ำๆจะมีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงแต่เมื่อลองทำการแปลค่าเป็นกระแสแล้วจะคลาดเคลื่อนเพียงแค่ 3-4A ซึ่งสามารถยอมรับได้ดังนั้นวงจรนี้จึงสามารถนำมาใช้ได้ โดยรูปสัญญาณมีลักษณะตามรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ลักษณะสัญญาณของแรงดัน Input และ Output ของวงจรถ่ายสัญญาณ

## 4.2 การทดสอบวงจรวัดความเร็วรอบ (Tachometer)

การทดลองนี้เป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของสัญญาณขาเข้าและขาออกของวงจรวัดความเร็วรอบโดยนำสัญญาณขาออกเทียบกับสัญญาณขาเข้าของวงจรเพื่อให้ทราบว่าวงจรมีความเป็นเชิงเส้นมากน้อยเพียงใด และสามารถนำมาใช้งานในการวัดความเร็วรอบในขอบเขตการทำงานที่ต้องการได้ ซึ่งใช้วงจรนี้มาตรวจจับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับ (Feedback) ของระบบ ซึ่งจะนำไปใช้สำหรับการคำนวณเพื่อควบคุมการประจุแบตเตอรี่ด้วย PID ต่อไป

### 4.2.1 จุดประสงค์การทดลอง

4.2.1.1 เพื่อทราบถึงการตอบสนองของสัญญาณขาออกต่อขาเข้าของวงจรมีความเป็นเชิงเส้นมากหรือน้อยเพียงใด และค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ

4.2.1.2 เพื่อออกแบบวงจรวัดความเร็วรอบได้อย่างถูกต้องเหมาะสม

4.2.1.3 เพื่อขยายแรงดันขาออกของวงจรให้ไม่เกินแรงดันของพอร์ต Arduino

## 4.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ

4.2.2.1 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

4.2.2.2 มัลติมิเตอร์ (Multimeter)

4.2.2.3 เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function Generator)

4.2.2.4 แหล่งไฟกระแสตรง (DC Power Supply)

4.2.2.5 วงจรวัดความเร็วรอบ (Tachometer) (วงจรวัดความเร็วรอบที่จัดทำขึ้น)

## 4.2.3 วิธีการทดลอง

4.2.3.1 จ่ายไฟเลี้ยงวงจรวัดความเร็วรอบขนาด 9 Vdc ด้วย DC Power Supply

4.2.3.2 จ่ายสัญญาณความถี่รูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal) ด้วย Function Generator เพื่อเป็นสัญญาณขาเข้าของวงจรวัดความเร็วรอบ

4.2.3.3 ปรับความถี่เพิ่มขึ้นโดยเริ่มต้นตั้งแต่ 300 - 3000 Hz เพิ่มขึ้นทีละ 300Hz

4.2.3.4 บันทึกค่า Input และ Output ตลอดช่วง 300 Hz ถึง 3000 Hz

4.2.3.5 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Output และ Input เพื่อตรวจสอบความชันของกราฟว่ามีลักษณะเป็นเชิงเส้นมากน้อยเพียงใด และค่าความคลาดเคลื่อนเป็นอย่างไร

## 4.2.4 ผลการทดลอง

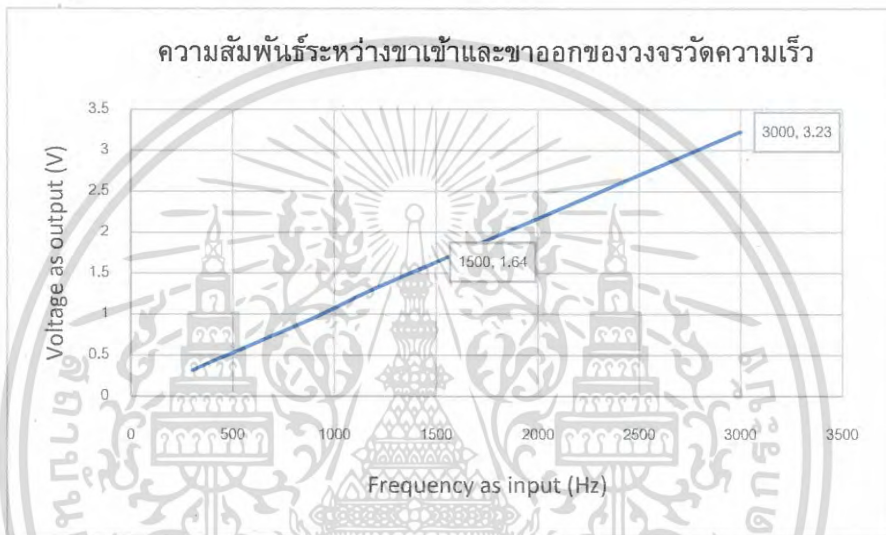
ตารางที่ 4.2 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างขาเข้าและขาออกของวงจรวัดความเร็วรอบ

Input Frequency (Hz)	Output Voltage (V)	Slope
300	0.32	0.00107
600	0.64	0.00107
900	0.96	0.00107
1200	1.32	0.00110
1500	1.64	0.00109
1800	1.96	0.00109
2100	2.28	0.00109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

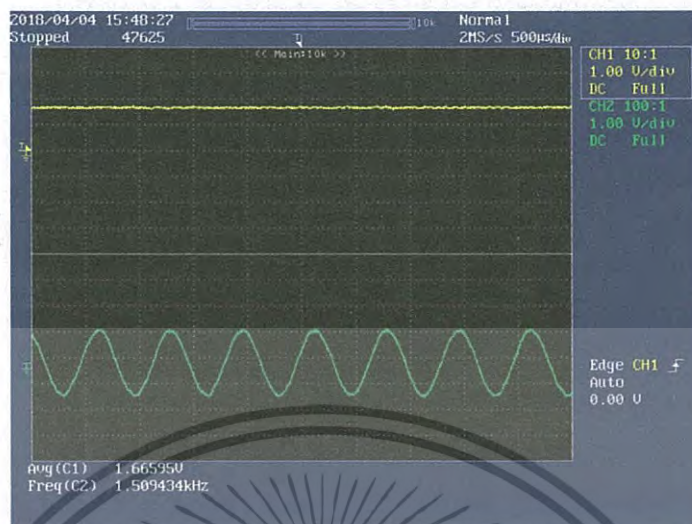
ตารางที่ 4.2 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างขาเข้าและขาออกของวงจรวัดความเร็วรอบ (ต่อ)

Input Frequency (Hz)	Output Voltage (V)	Slope
2400	2.6	0.00108
2700	2.915	0.00108
3000	3.23	0.00108



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขาเข้าและขาออกของวงจรวัดความเร็วรอบ

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่ากราฟค่อนข้างมีความเป็นเชิงเส้น และเมื่อดูตารางที่ 4.2 ประกอบจะเห็นได้ว่าความชันมีค่าใกล้เคียงกันเกือบทุกช่วงมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยมากๆ จึงไม่มีปัญหากับการใช้งานในเรื่องความแม่นยำของการรับค่าสัญญาณดังนั้นวงจรมีจึงสามารถนำมาใช้ได้ โดยรูปสัญญาณมีลักษณะตามรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ลักษณะสัญญาณของแรงดัน Input และ Output ของวงจรความถี่รอบ

#### 4.3 ทดสอบ Governor ด้วย Buck Converter โดยใช้สัญญาณ PWM จาก Arduino

การทดลองนี้เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของ Governor ซึ่งเป็นอีกหนึ่งทดลองที่มีความสำคัญ เนื่องจาก Governor ที่ถูกติดตั้งอยู่กับเครื่องยนต์ดีเซลนั้นมีหน้าที่สำหรับควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิง เพื่อจุดประสงค์ต่าง ๆ เช่น เพื่อเพิ่มความเร็ว หรือ เพื่อเพิ่มแรงบิด เป็นต้น ซึ่งมีพิกัดแรงดันอยู่ที่ 12 Vdc โดยการทดสอบนี้จะใช้วงจรลดทอนระดับแรงดันที่ได้ออกแบบไว้มาเป็นวงจรขับมอเตอร์มาใช้ในการทดสอบโดยใช้สัญญาณ PWM จาก Arduino โดยจะผ่านวงจรขับเกต (Gate Drive) ก่อนเข้าไปยังขาเกตของมอสเฟต (Mosfet) เพื่อเพิ่มกำลังให้การขับขาเกตและลดการสูญเสียขณะสวิตซ์ซึ่งการทดสอบจะทำการทดสอบผลเทียบกับการใช้ DC Power Supply แทน Buck Converter

##### 4.3.1 จุดประสงค์การทดลอง

4.3.1.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงดันของ Governor

4.2.1.2 เพื่อทดสอบ Buck Converter ที่ได้ออกแบบไว้เมื่อใช้งานกับ Governor

4.2.1.3 เพื่อให้ทราบว่า Buck Converter ที่ได้ออกแบบไว้ให้ผลใกล้เคียงกับการใช้

DC Power Supply มากน้อยเพียงใด และความคลาดเคลื่อนที่ได้ออมรับได้หรือไม่

### 4.3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ

4.3.2.1 แหล่งไฟกระแสตรง (DC Power Supply)

4.3.2.2 เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Caliper)

4.3.2.3 AC/DC Adapter 15 V 5 A

4.3.2.4 Arduino Mega 2560 Board

4.3.2.5 Diesel Engine Governor

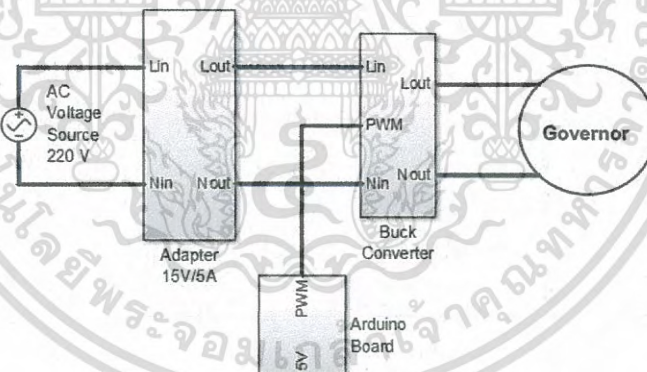
4.3.2.6 วงจรลดทอนระดับแรงดัน (วงจรที่ได้จัดทำขึ้น)

### 4.3.3 วิธีการทดลอง

4.3.3.1 จ่ายไฟแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วย DC Power Supply เข้าไปยัง Governor โดยเริ่มจ่ายแรงดันตั้งแต่ 0 – 15 Vdc โดยเพิ่มทีละ 1 Vdc

4.3.3.2 บันทึกระยะยึดของโกเปิดวาล์วด้วยเวอร์เนีย คาลิปเปอร์

4.3.3.3 ต่อยังวงจรลดทอนแรงดันแทน DC Power Supply ตามรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 Block Diagram การต่อยังวงจรทดสอบ Governor ด้วย Buck Converter

4.3.3.4 จ่ายแรงดันตั้งแต่ 0 – 15 Vdc โดยเพิ่มทีละ 1 Vdc

4.3.3.5 บันทึกระยะยึดของโกเปิดวาล์วด้วยเวอร์เนีย คาลิปเปอร์

4.3.3.6 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Output และ Input ทั้งที่ใช้ DC Power

Supply และ ที่ใช้ Buck Converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.3 การทดสอบGovernor ด้วย DC Power Supply

Voltage (V)	Current (C)	Displacement (cm)
0	0	0
1	0.22	0
2	0.45	0
3	0.68	0
4	0.91	0
5	1.11	0.18
6	1.33	0.25
7	1.55	0.47
8	1.75	0.83
9	1.98	1.25
10	2.16	1.62
11	2.36	1.71
12	2.52	1.8
13	2.72	1.8
14	2.94	1.8
15	3.26	1.8

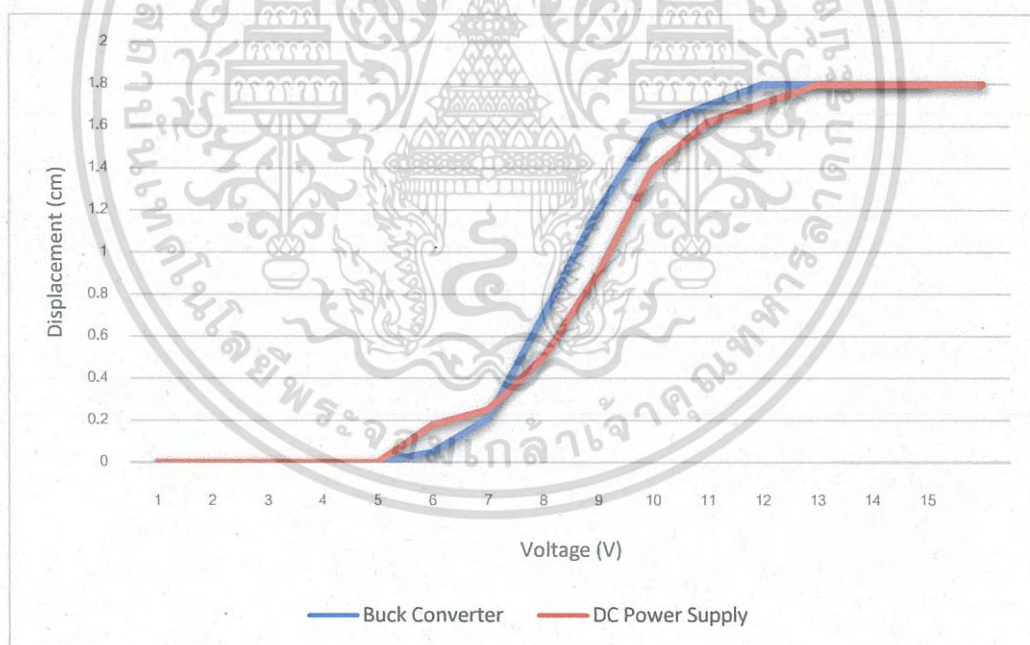
ตารางที่ 4.4 การทดสอบGovernor ด้วย Buck Converter

Voltage (V)	Current (C)	Displacement (cm)	Duty ( % )
1	0.03	0	8.13
2	0.07	0	14.69
3	0.15	0	21.25
4	0.25	0	27.81
5	0.38	0	34.69
6	0.5	0.05	40.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 การทดสอบ Governor ด้วย Buck Converter (ต่อ)

Voltage (V)	Current (C)	Displacement (cm)	Duty ( % )
7	0.69	0.21	48.13
8	1.1	0.7	54.69
9	1.36	1.2	61.25
10	1.62	1.6	67.81
11	1.88	1.7	74.38
12	2.16	1.8	81.25
13	2.45	1.8	87.81
14	2.76	1.8	95
15	3.01	1.8	100



รูปที่ 4.6 การทดสอบ Governor ด้วย DC Power Supply และ Buck Converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางการทดลองที่ 4.3 และ 4.4 ซึ่งเป็นการทดสอบ Governor ด้วย DC Power Supply และ Buck Converter ตามลำดับ ซึ่งได้มีการบันทึกแรงดันที่ใช้จ่ายให้กับ Governor และบันทึกผลการตอบสนองของ Governor ซึ่งจะเป็นระยะยืดของไคเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลสามารถนำมาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองระหว่างการใช้ DC Power Supply และ Buck Converter ในการจ่ายแรงดันให้ Governor ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าวงจรลดทอนระดับแรงดันที่ได้ออกแบบนั้นให้ผลการตอบสนองที่ใกล้เคียงกับ DC Power Supply และในช่วงแรงดันระหว่าง 5 Vdc – 7 Vdc ซึ่งเป็นช่วงที่ใช้ในการควบคุมให้ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ในสภาวะเสถียรภาพจะสังเกตเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงช้า ซึ่งจะเป็นผลทำให้สามารถควบคุมชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เข้าสู่เสถียรภาพได้ง่ายขึ้น

#### 4.4 การทดสอบการควบคุมกระแสและแรงดันให้เป็นไปตามข้อมูลการชาร์จ

การทดลองนี้เป็นการทดสอบการควบคุมการประจุแบตเตอรี่ให้เป็นไปตามข้อมูลการชาร์จจากที่ได้ทำการออกแบบวงจรต่างๆ เช่น วงจรขยายสัญญาณ และ วงจรวัดความเร็วรอบ เพื่อที่จะนำมาใช้ในการรับสัญญาณป้อนกลับ (Feedback) รวมทั้ง Voltage Sensor, DC Current Shunt Resistor มาคิดคำนวณ PID ด้วย Arduino เพื่อควบคุมกระแสและแรงดันให้เป็นไปตามข้อมูลการชาร์จด้วยการควบคุมปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์ดีเซล โดยจะทำการทดสอบการควบคุมเบื้องต้นการประจุที่กระแสต่ำ โดยการประจุที่กระแสพิคัดจะทำเพียงชั่วคราว เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบเบื้องต้น แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมการประจุที่กระแสสูงจะถูกกล่าวในหัวข้อถัดไป สำหรับการทดสอบจะแบ่งออกเป็นสองกรณีโดยกรณีแรกจะเป็นการทดสอบโดยใช้กระแสชาร์จที่ 5 A ส่วนในกรณีที่สองจะเป็นการทดสอบโดยใช้กระแสชาร์จที่ 10 A ทั้งนี้เพื่อแสดงให้เห็นว่าวงจรควบคุมนี้สามารถควบคุมการประจุแบตเตอรี่ให้เป็นไปตามข้อมูลการชาร์จที่กระแสชาร์จแตกต่างกันได้

##### 4.4.1 จุดประสงค์การทดลอง

4.4.1.1 เพื่อให้ทราบว่าการออกแบบอุปกรณ์ต่างๆ และโปรแกรมที่ได้ออกแบบไว้นั้นสามารถควบคุมกระแสและแรงดันได้

4.4.1.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของระบบและนำมาปรับปรุงแก้ไขให้มีการควบคุมการประจุแบตเตอรี่ให้เป็นไปตามข้อมูลการชาร์จได้ดีขึ้น

4.4.1.3 เพื่อออกแบบอุปกรณ์ป้องกันสำหรับชุดควบคุมและชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เหมาะสม และมีความน่าเชื่อถือ

#### 4.4.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ

- 4.4.2.1 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)
- 4.4.2.2 มัลติมิเตอร์ (Multimeter)
- 4.4.2.3 โพรบกระแส (Current Probe)
- 4.4.2.4 โพรบแรงดัน (Voltage Probe)
- 4.4.2.5 Three phase bridge rectifier
- 4.4.2.6 วงจรควบคุมชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (วงจรควบคุมที่ได้จัดทำขึ้น)
- 4.4.2.7 โหลดตัวต้านทานปรับค่าได้ (Rheostat)

#### 4.4.3 วิธีการทดลอง

- 4.4.3.1 ต่อสัญญาณป้อนกลับต่าง ๆ เข้ากับเซนเซอร์ เช่น แรงดันที่ขั้วโหลดเข้ากับ Voltage Sensor, ต่อสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อม DC Current Shunt Resistor เข้ากับวงจรขยายสัญญาณและต่อสัญญาณจาก Magnetic Pick Up เข้ากับวงจรวัดความเร็วรอบ
- 4.4.3.2 จ่ายไฟเลี้ยงวงจรควบคุมโดยรับไฟจากแบตเตอรี่ของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 4.4.3.3 ต่อโหลดตัวต้านทานปรับค่าได้เข้ากับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 4.4.3.4 สตาร์ท Gen-set โดยควบคุมความเร็วคงที่ขณะไม่มีโหลดที่ 1,000 RPM
- 4.4.3.5 เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ และ เริ่มต้นการประจุแบตเตอรี่ด้วยการควบคุมกระแสให้คงที่ที่ 10 A ซึ่งขั้นตอนนี้จะอยู่ในโหมดแรกของการประจุแบตเตอรี่ คือ Bulk mode
- 4.4.3.6 ทำการปรับความต้านขึ้นเพิ่มขึ้นเพื่อให้แรงดันเพิ่มขึ้นจนถึง 2.4 V/cell
- 4.4.3.7 บันทึกแรงดันและกระแสเมื่อแรงดันเปลี่ยนไปจนถึง 2.4 V/cell
- 4.4.3.8 หลังจากนั้นจะเข้าสู่โหมดควบคุมให้แรงดันคงที่ (Constant Voltage) ที่ 2.4 V/cell ซึ่งจะอยู่ในโหมดที่สอง คือ Absorption mode
- 4.4.3.9 ทำการปรับความต้านขึ้นเพิ่มขึ้นเพื่อให้กระแสลดลงจนกระทั่งถึง C/50
- 4.4.3.10 บันทึกแรงดันและกระแสในแต่ละค่าของกระแสที่เปลี่ยนไปจนถึง C/50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3.11 หลังจากนั้นจะเข้าสู่โหมดควบคุมให้แรงดันคงที่ (Constant Voltage) ที่ 2.25 V/cell ซึ่งจะอยู่ในโหมดที่สาม คือ Float mode

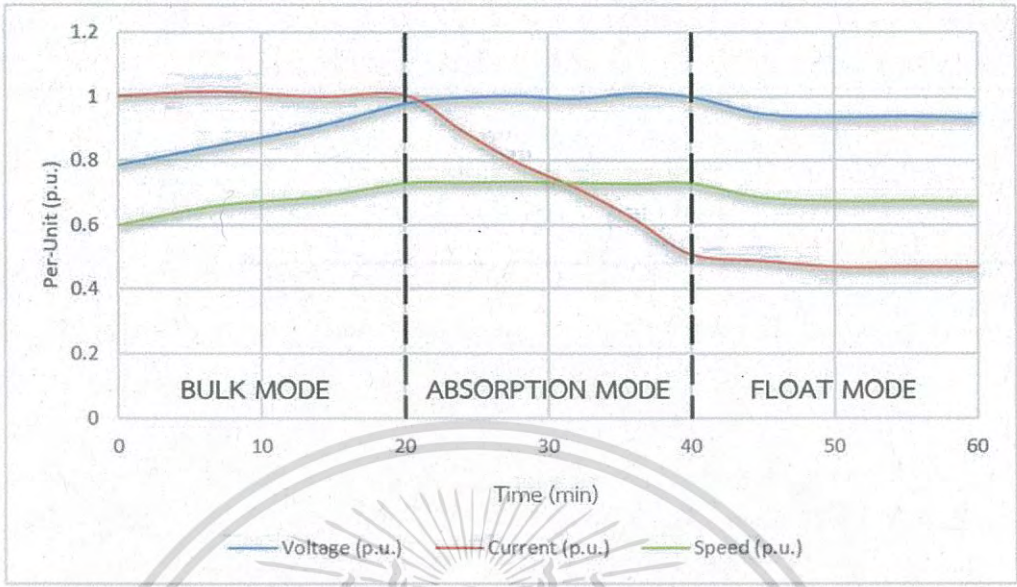
4.4.3.12 บันทึกค่าแรงดันและกระแสที่เปลี่ยนแปลงไป

#### 4.4.4 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.5 การทดสอบการควบคุมการประจุแบตเตอรี่สำหรับกรณีทีหนึ่ง

Voltage (V)	Current (A)	RPM
45.236	5.0125	900
48.697	5.081	990
52.118	4.998	1030
56.126	5.026	1093
57.210	4.469	1096
57.464	3.954	1100
57.010	3.567	1094
57.983	3.092	1091
57.329	2.538	1092
54.295	2.433	1026
54.305	2.444	1011
54.283	2.412	1012
54.292	2.431	1010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

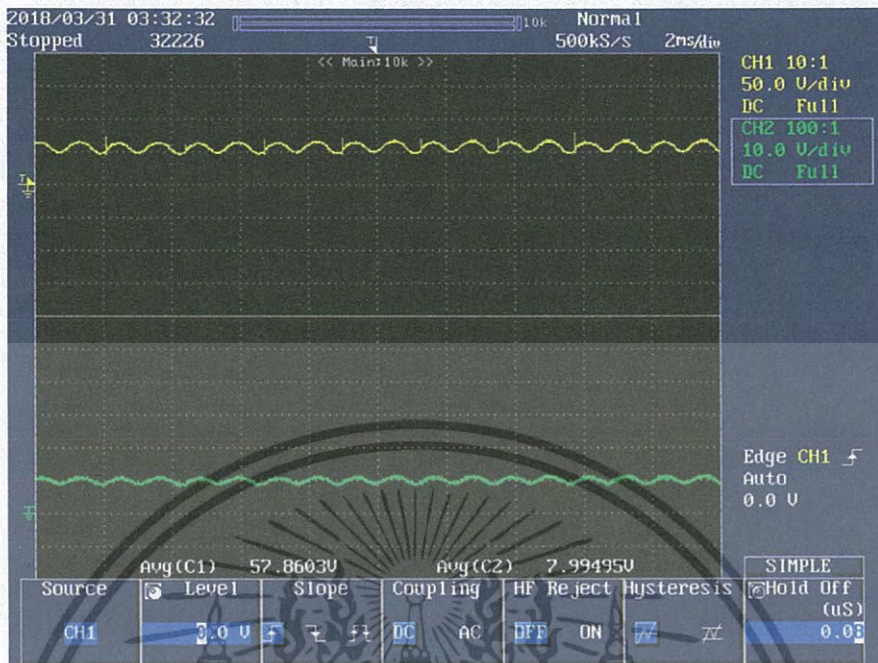


รูปที่ 4.7 การปรับจูนแบตเตอรี่ตามข้อมูลการชาร์จสำหรับกรณีทีหนึ่ง

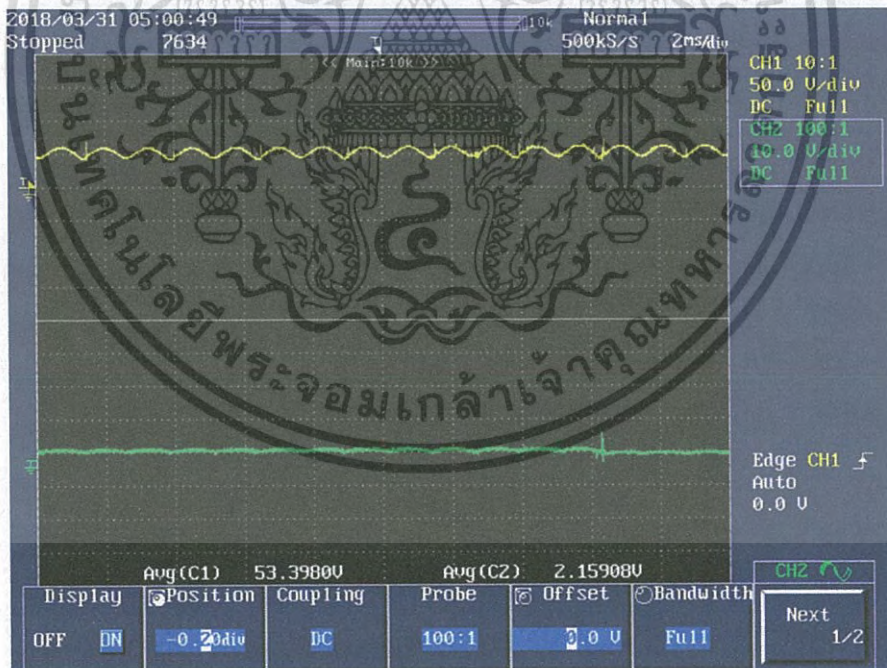


รูปที่ 4.8 ตัวอย่างกราฟการควบคุมใน Bulk Mode สำหรับกรณีทีหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างกราฟการควบคุมใน Absorption Mode สำหรับกรณีทีหนึ่ง



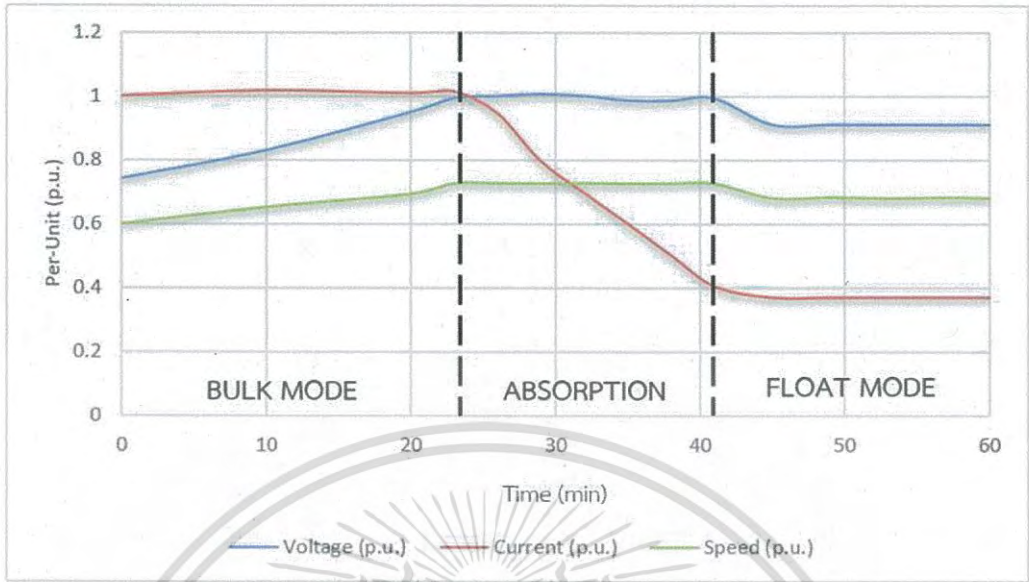
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างกราฟการควบคุมใน Float Mode สำหรับกรณีทีหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 ได้บันทึกค่าแรงดัน, กระแส และ ความเร็ว และนำมาสร้างกราฟ แสดงการควบคุมการประจุแบตเตอรี่ดังแสดงในรูปที่ 4.7 จากรูปกราฟการทดลองจะสังเกตเห็นว่ามี ครบทั้งหมด 3 สถานะคือ Bulk, Absorption และ Float Mode โดยในสถานะแรก หรือ Bulk Mode ทำการควบคุมกระแสให้คงที่ 5A ซึ่งเป็นค่ากระแสชาร์จแสดงเป็นเส้นสีแดง ต่อมาทำการเพิ่มความต้านทาน จากกฎของโอห์ม เมื่อกระแสคงที่ และค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้า มีขนาดเพิ่มขึ้นด้วย ตัวอย่างกราฟสำหรับ Bulk Mode แสดงในรูปที่ 4.8 เมื่อ Channel 1 (C1) แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า และ Channel 2 (C2) แสดงค่ากระแสไฟฟ้าต่อมาในสถานะที่สอง หรือ Absorption Mode จะควบคุมให้แรงดันคงที่ที่ 2.4 V/cell เมื่อเพิ่มความต้านทานโดยที่แรงดันคงที่ จะทำให้กระแสไฟฟ้าลดลง ตัวอย่างกราฟสำหรับ Absorption Mode แสดงในรูปที่ 4.9 เมื่อ กระแสไฟฟ้าลดลงจนกระทั่งถึง C/50 จะทำให้เกิดการควบคุมแรงดันคงที่ที่ระดับต่ำลงคือที่ 2.25 V/cell ซึ่งจะอยู่ในสถานะที่สามคือ Float Mode ตัวอย่างกราฟสำหรับ Float Mode แสดงในรูปที่ 4.10 ส่วนความเร็วนั้นจะสูงสุดที่ประมาณ 1,000 RPM โดยมีพฤติกรรมเป็นไปตามสัญญาณแรงดัน

ตารางที่ 4.6 การทดสอบการควบคุมการประจุแบตเตอรี่สำหรับกรณีที่สอง

Voltage (V)	Current (A)	RPM
42.681	10.032	900
47.745	10.205	980
54.609	10.122	1043
57.114	10.176	1093
57.524	9.490	1094
57.860	7.994	1093
57.530	6.997	1095
56.730	6.036	1093
56.697	5.054	1094
57.116	4.083	1093
52.397	3.738	1024
52.387	3.736	1028
52.365	3.736	1023
52.374	3.738	1027
52.377	3.737	1024

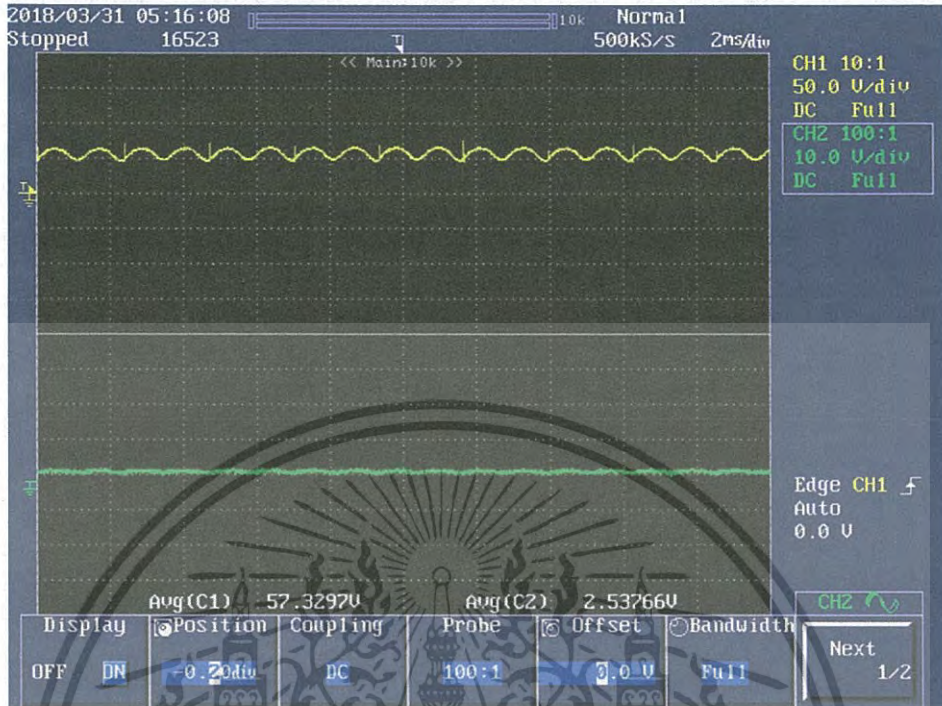


รูปที่ 4.11 การประจุแบตเตอรี่ตามข้อมูลการชาร์จสำหรับกรณีที่สอง

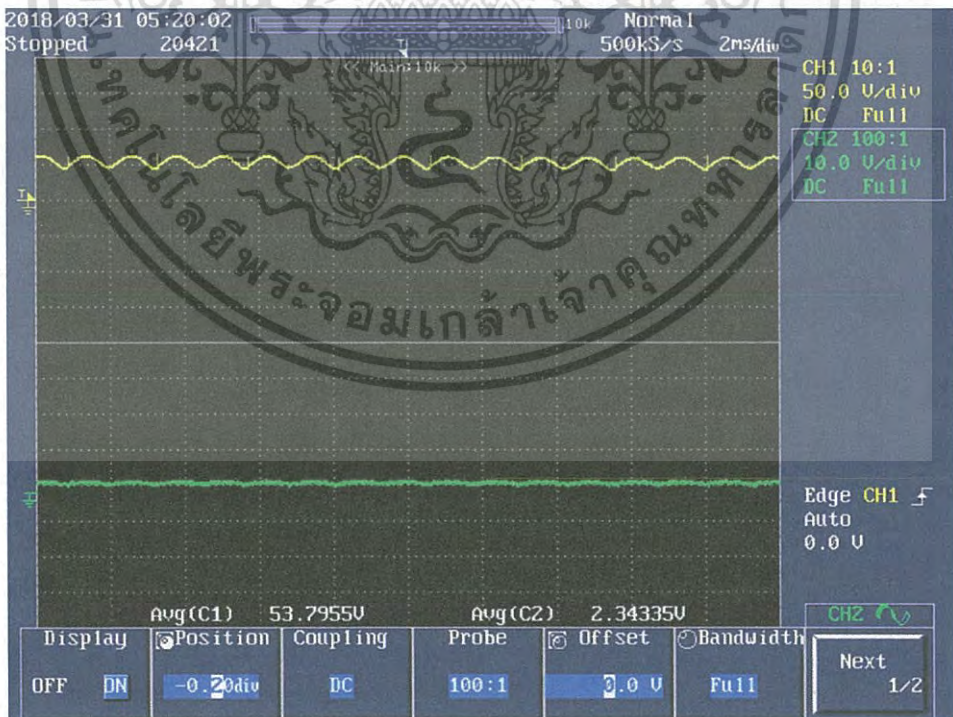


รูปที่ 4.12 ตัวอย่างกราฟการควบคุมใน Bulk Mode สำหรับกรณีที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ตัวอย่างกราฟการควบคุมใน Absorption Mode สำหรับกรณีที่สอง



รูปที่ 4.14 ตัวอย่างกราฟการควบคุมใน Float Mode สำหรับกรณีที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.6 ได้บันทึกค่าแรงดัน,กระแส และ ความเร็ว และนำมาสร้างกราฟแสดงการควบคุมการประจุแบตเตอรี่ดังแสดงในรูปที่ 4.11 จากรูปกราฟการทดลองจะสังเกตเห็นว่ามีครบทั้งหมด 3 สถานะคือ Bulk, Absorption และ Float Mode โดยในสถานะแรก หรือ Bulk Mode ทำการควบคุมกระแสให้คงที่ 10A ซึ่งเป็นค่ากระแสชาร์จแสดงเป็นเส้นสีแดง ต่อมาทำการเพิ่มความต้านทาน จากกฎของโอห์ม เมื่อกระแสคงที่ และค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นด้วย ตัวอย่างกราฟสำหรับ Bulk Mode แสดงในรูปที่ 4.12 เมื่อ Chanel 1 (C1) แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า และ Chanel 2 (C2) แสดงค่ากระแสไฟฟ้าต่อมาในสถานะที่สอง หรือ Absorption Mode จะควบคุมให้แรงดันคงที่ที่ 2.4 V/cell เมื่อเพิ่มความต้านทานโดยที่แรงดันคงที่จะทำให้กระแสไฟฟ้าลดลง ตัวอย่างกราฟสำหรับ Absorption Mode แสดงในรูปที่ 4.13 เมื่อกระแสไฟฟ้าลดลงจนกระทั่งถึง C/50 จะทำให้เกิดการควบคุมแรงดันคงที่ที่ระดับต่ำลงคือที่ 2.25 V/cell ซึ่งจะอยู่ในสถานะที่สามคือ Float Mode ตัวอย่างกราฟสำหรับ Float Mode แสดงในรูปที่ 4.14 ส่วนความเร็วนั้นจะสูงสุดที่ประมาณ 1,000 RPM และความเร็วจะมีพฤติกรรมเปลี่ยนไปตามแรงดันที่เปลี่ยนไป เนื่องจากค่าแรงดันไฟฟ้าและความเร็วรอบมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันตรง

#### 4.5 การทดสอบการควบคุมกระแสโหลดที่ค่าต่างๆของพิกัดชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การทดลองนี้เป็นการทดสอบเพื่อพิจารณาความสามารถของวงจรในการควบคุมการประจุแบตเตอรี่ตะกั่ว – กรดตามพฤติกรรมกรรมการประจุแบตเตอรี่ด้วยกระแสโหลดที่ค่าต่าง ๆ ของพิกัดชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ว่าสามารถควบคุมที่กระแสโหลดต่าง ๆ ของพิกัดชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้หรือไม่ โดยทำการทดลองด้วยการใช้ตัวต้านทานเป็นอุปกรณ์ทำการทดสอบ ทั้งนี้จะทำการทดสอบเป็นช่วงเวลาสั้นๆ จนถึงพิกัดของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบเบื้องต้นนี้

##### 4.5.1 จุดประสงค์การทดลอง

4.5.1.1 เพื่อให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมการประจุแบตเตอรี่ด้วยชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้วงจรควบคุมชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้ออกแบบไว้

4.5.1.2 เพื่อศึกษาการตอบสนองของการควบคุมและนำมาปรับปรุงแก้ไขให้ดีขึ้น

4.5.1.3 เพื่อศึกษาวิธีการป้องกันวงจรควบคุมและชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อให้ความปลอดภัยและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

#### 4.5.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

4.5.2.1 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

4.5.2.2 มัลติมิเตอร์ (Multimeter)

4.5.2.3 โพรบกระแส (Current Probe)

4.5.2.4 โพรบแรงดัน (Voltage Probe)

4.5.2.5 Three phase bridge rectifier

4.5.2.6 วงจรควบคุมชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (วงจรควบคุมที่ได้จัดทำขึ้น)

4.5.2.7 โหลดตัวต้านทาน

#### 4.5.3 วิธีการทดลอง

4.5.3.1 ต่อวงจรควบคุมชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

4.5.3.2 จ่ายไฟเลี้ยงวงจรควบคุมโดยรับไฟจากแบตเตอรี่ของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

4.5.3.3 ต่อโหลดตัวต้านทานเข้ากับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

4.5.3.4 ต่อ Oscilloscope โดยกำหนดให้ Probe Channel 1 ใช้สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วโหลด และ Probe Channel 2 วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม DC Current Shunt Resistor

4.5.3.5 สตาร์ทชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล จากนั้นจึงเปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังโหลด โดยจะเริ่มทดสอบกระแสโหลดที่ 25% ของพิกัดชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

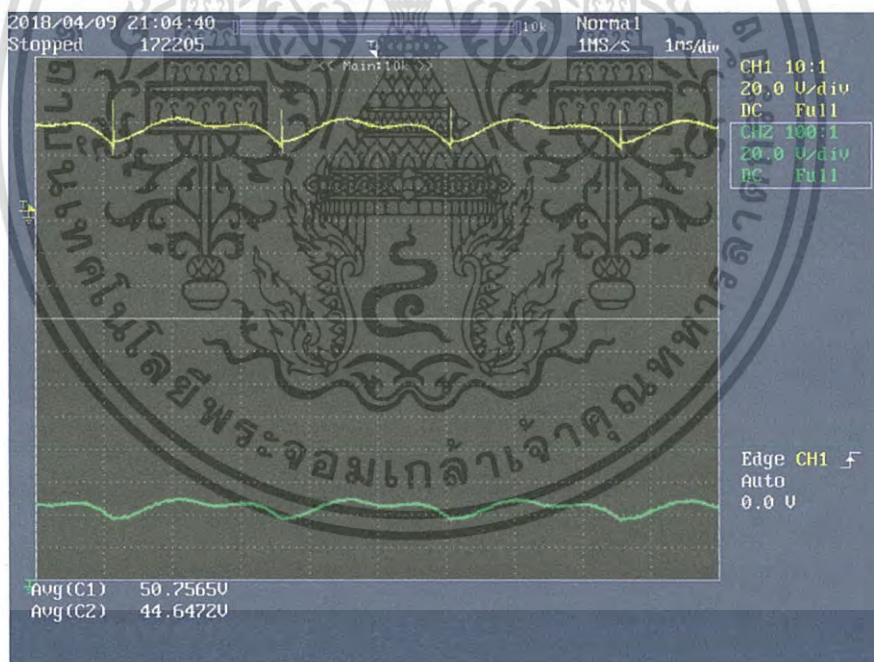
4.5.3.6 บันทึกค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าจาก Oscilloscope

4.5.3.7 ทำซ้ำตามข้อ 5 และ 6 โดยเปลี่ยนกระแสโหลดเป็น 50% 75% และ 100% ของพิกัดชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามลำดับ

#### 4.5.4 ผลการทดลอง

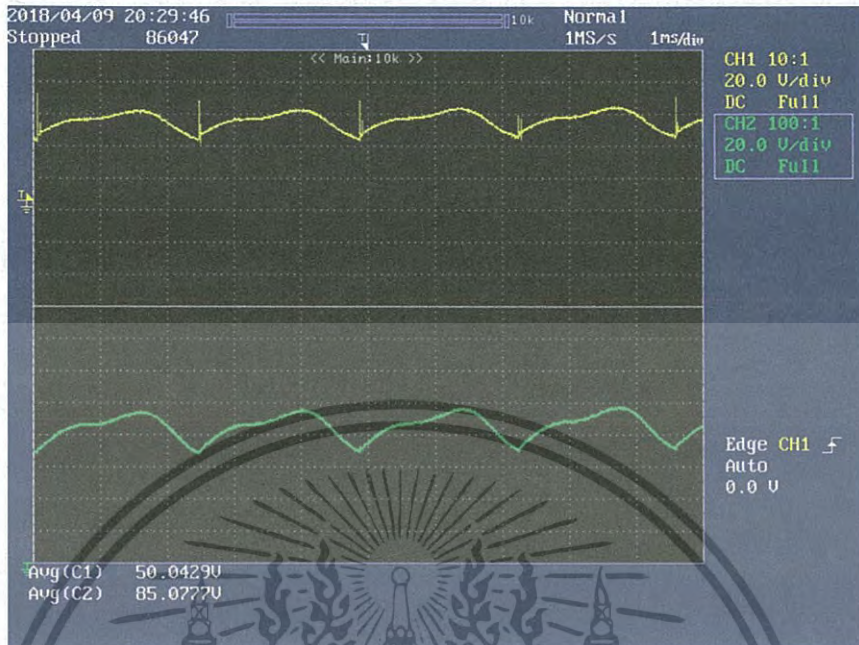
ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าแรงดันและกระแสไหลที่พิกัดต่างๆที่ควบคุมได้

เปอร์เซ็นต์กระแสไหล	Voltage (V)	Current (A)
25%	50.757	44.647
50%	50.043	85.078
75%	52.585	125.791
100%	63.420	168.800

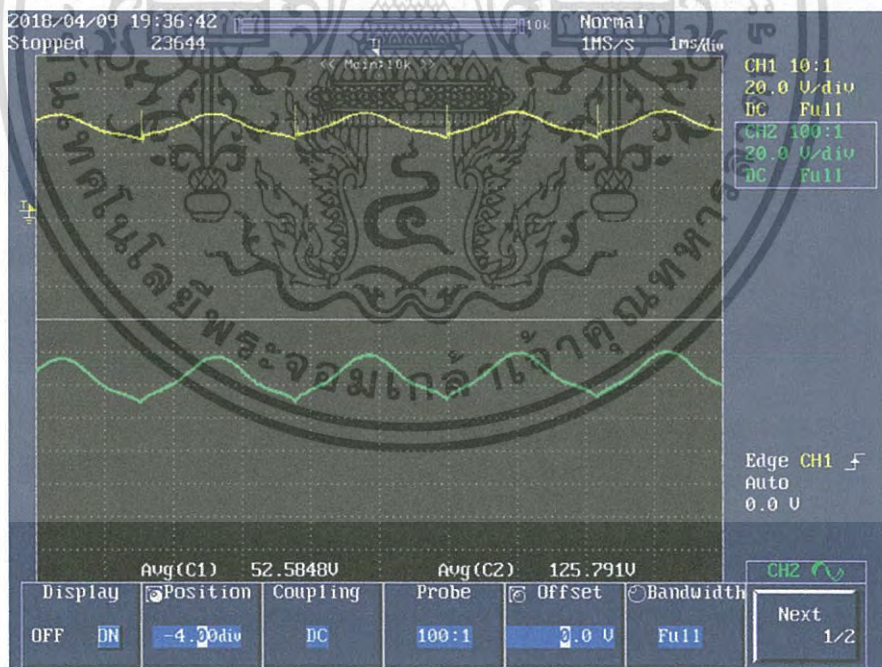


รูปที่ 4.15 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสไหลที่ 25% ของพิกัดชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

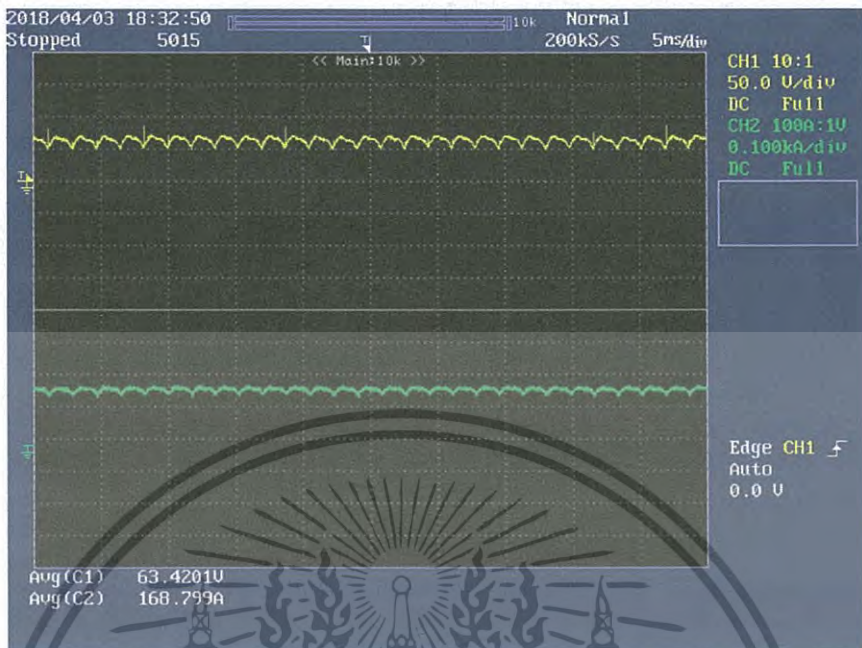


รูปที่ 4.16 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสโหลดที่ 50% ของพิกัดชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 4.17 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสโหลดที่ 75% ของพิกัดชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสโหลดที่ 100% ของพิกัดชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากตารางที่ 4.7 แสดงการทดสอบการควบคุมการจ่ายกระแสโหลดที่ 25% 50% 75% และ 100% ของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งสามารถหาได้จาก  $\frac{10\text{kVA}}{60\text{V}} \times I_{\text{charged}}\%$  เมื่อพิกัดกำลังไฟฟ้าของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่ากับ 10 kVA และแรงดันสูงสุดที่ใช้ในการประจุแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดขนาด 48V คือ 58.8 V หรือประมาณ 60 V ซึ่งที่แรงดันนี้จะมีความเร็วอยู่ที่ประมาณ 1,000 RPM ซึ่งอยู่ในระดับความเร็วที่เหมาะสม เนื่องจากที่ความเร็วต่ำกว่านี้จะทำให้ควบคุมได้ยากขึ้น และที่ความเร็วสูงกว่านี้จะทำให้แรงดันที่ได้มากกว่า 60 V และสำหรับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายในนี้มีกระแสพิกัดอยู่ที่ 172 A จากรูปที่ 4.15 แสดงการทดสอบการควบคุมกระแสโหลดที่ 25% ของพิกัดกระแสชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเห็นได้ว่าสามารถที่จะควบคุมได้แต่อย่างไรก็ตามค่าแรงดันที่ได้นั้นจะต่ำกว่า 60 V ซึ่งจะทำให้ความเร็วที่กำลังควบคุมอยู่นั้นต่ำกว่า 1,000 RPM ซึ่งแรงดันนี้ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่ได้ออกแบบไว้ ส่วนการควบคุมกระแสโหลดที่ 50% และ 70% แสดงดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ สำหรับการควบคุมที่ 100% หรือเท่ากับ 167 A แสดงดังรูปที่ 4.18 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมกระแสที่มีค่าใกล้เคียงกับค่ากระแสพิกัดของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

สำหรับการประจุแบตเตอรี่จำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงเรื่องความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับแบตเตอรี่ซึ่งจะนำมาสู่การเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ เป็นเหตุให้มีอายุการใช้งานสั้นลงกว่าอายุการใช้งานได้จริงของแบตเตอรี่ จึงได้มีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาการประจุแบตเตอรี่ให้เหมาะสม อีกทั้งยังมีอุปกรณ์สำหรับการประจุแบตเตอรี่มาวางจำหน่ายด้วย เช่น วงจรลดทอนระดับแรงดันสำหรับการประจุแบตเตอรี่ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามในการประจุแบตเตอรี่ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแบบไฮบริด หรือ ใช้งานด้านอื่น ๆ ที่แบตเตอรี่มีขนาดใหญ่ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้กระแสและแรงดันที่สูงขึ้นในการประจุ จึงทำให้ไม่สามารถใช้วงจรลดทอนระดับแรงดันในการประจุแบตเตอรี่ได้ ดังนั้นจึงได้นำชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรภายในมาใช้ในการประจุแบตเตอรี่ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแบบไฮบริด

ในการทดลองได้ใช้ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรภายใน ซึ่งมีการทำงานร่วมกันระหว่าง เครื่องยนต์ดีเซล และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายใน ดังนั้นก่อนที่จะเริ่มต้นเข้าสู่การควบคุมกระแสและแรงดันให้เป็นไปตามข้อมูลการประจุ (Charging Information) จำเป็นที่จะต้องสตาร์ทเครื่องยนต์ดีเซลให้อยู่ที่ความเร็วรอบต่ำ ๆ เสียก่อน สำหรับงานวิจัยนี้จะควบคุมความเร็วที่ 1,000 RPM ซึ่งเป็นความเร็วก่อนที่จะเริ่มต้นการควบคุมต่อไป สำหรับการสตาร์ทที่ได้ออกแบบไว้คือให้มอเตอร์สตาร์ท (Starter Motor) ช่วยหมุนเครื่องยนต์ดีเซลเริ่มหมุนที่ความเร็ว 300 RPM ก่อนที่จะจ่ายเชื้อเพลิงเข้าไป หลังจากนั้นให้จ่ายแรงดันให้กับ Actuator ซึ่งจะจ่ายเชื้อเพลิงเข้าไปเพื่อทำให้เครื่องยนต์ดีเซลหมุนที่ความเร็วประมาณ 800 RPM ซึ่งเป็นความเร็วที่ทำให้เครื่องยนต์ดีเซลสตาร์ทติดได้ หลังจากนั้นจึงเข้าสู่การควบคุมความเร็วรอบด้วยการควบคุมแบบ PID ไปที่ 1,000 RPM ก่อนที่จะเข้าสู่การควบคุมการประจุแบตเตอรี่ต่อไป

สำหรับการควบคุมการประจุแบตเตอรี่ให้เป็นไปตามข้อมูลการประจุด้วยชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยวิธีการควบคุมแบบ PID ซึ่งโดยทั่วไปการประจุแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดนั้นจะแบ่งการควบคุมการประจุแบตเตอรี่ออกเป็น 3 สถานะ คือ Bulk, Absorption, Float mode ซึ่งในสถานะแรกนั้นจะควบคุมให้กระแสคงที่ โดยขนาดกระแสที่คงที่นี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของแบตเตอรี่,

อัตราการประจุ (C rate) ที่ต้องการประจุ และต้องพิจารณาถึงกระแสพิกต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย จากนั้นทำการปรับความต้านทานให้เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อเลียนแบบพฤติกรรมของแบตเตอรี่ ซึ่งจะทำให้แรงดันเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงระดับแรงดันในสถานะที่สองและทำการควบคุมแรงดันนั้นให้คงที่ที่ 2.4 ถึง 2.45 Volts per cell ซึ่งขนาดแรงดันที่จะควบคุมนั้นจะขึ้นอยู่กับแรงดันแบตเตอรี่ เช่น แบตเตอรี่ 12V, 24V, 36V, 48V เป็นต้น จากนั้นทำการปรับความต้านทานให้เพิ่มขึ้นอีกเรื่อย ๆ ซึ่งจะทำให้กระแสลดลง จะเห็นว่าพฤติกรรมของกระแสและแรงดันในสถานะนี้เป็นไปตามข้อมูลการประจุ โดยจะเพิ่มความต้านทานจนทำให้กระแสลดลงไปจนกระทั่ง C/50 หรือ C/100 ซึ่งเมื่อถึงจุดนี้แบตเตอรี่จะถูกประจุจนเต็มเรียบร้อยแล้ว แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมแรงดันไว้ที่ระดับ 2.4 Volts per cell นั้นเป็นแรงดันที่สูงเกินไปสำหรับแบตเตอรี่ที่เต็มแล้ว จากนั้นจึงทำการลดระดับแรงดันลงมาที่ระดับ 2.25 Volts per cell ซึ่งจะทำให้กระแสลดลงเล็กน้อยด้วย ทั้งนี้เพื่อลดความเสียหายที่จะส่งผลให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพและมีอายุการใช้งานสั้นลง

จากกราฟและตารางการทดลองต่าง ๆ ทั้งที่ระดับกระแสประจุต่ำและกระแสประจุสูงทำให้ทราบว่าจากการออกแบบการควบคุมด้วย PID โดยการเขียนโปรแกรมลงบน Arduino นั้นที่นำเสนอในปริญญานิพนธ์นี้สามารถนำไปใช้ในการควบคุมการประจุแบตเตอรี่ด้วยชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เป็นไปตามข้อมูลการประจุแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพ

#### ข้อเสนอแนะ

1. การใช้วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์เป็นวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ซึ่งจะให้สัญญาณกระแสตรงออกมา แต่จะทำให้ระบบมีค่าคงที่เวลา (Time Constant) เพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อให้มีค่าคงที่เวลาเฉพาะที่ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่านั้น จึงควรใช้วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ที่จ่ายเป็นสัญญาณ PWM ออกมาแทนการจ่ายเป็นสัญญาณกระแสตรง
2. สำหรับการทดสอบที่กระแสประจุสูงสามารถทำได้เพียงให้ทราบว่าระบบที่ออกแบบนั้นสามารถควบคุมที่กระแสสูงได้เท่านั้น ไม่ได้ทดสอบครบทั้ง 3 สถานะ เนื่องจากจะทำให้เกิดอุณหภูมิสูงกับอุปกรณ์ทดสอบ
3. การควบคุมความเร็วเริ่มต้นที่ 850 RPM จะทำให้ควบคุมได้ยากเนื่องจากเป็นจุดที่ทำให้เครื่องยนต์สตาร์ทติดพอดี ดังนั้นจึงเลือกควบคุมที่ 1,000 RPM เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถสตาร์ทเครื่องยนต์ให้ติดได้ทุกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. วงจรการควบคุมการประจุแบตเตอรี่นี้สามารถนำไปใช้ในการจ่ายโหลดได้หลายรูปแบบเช่นสามารถใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองในระบบไฟฟ้าของอาคารได้ เนื่องจากสามารถควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าให้คงที่ได้ อีกทั้งยังสามารถทำการประจุแบตเตอรี่ให้ได้ปริมาณกระแสไฟฟ้ามากขึ้นโดยใช้เวลาน้อยลง (Quick Charge) เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#define PIN_OUTPUT 6

#define RELAY1 1

#define RELAY2 2

#define RELAY3 3

#define RELAY4 4

unsigned long lastTime;

double Feedback, Output, Setpoint, OutputT;

double errSum, lastErr;

double ITerm, lastInput;

double kp, ki, kd;

boolean OFFButton = LOW;

boolean STARTButton = LOW;

boolean CHARGEButton = LOW;

boolean RESETButton = LOW;

double Count_Time = 0;

int Delta=1;

int addPWM=0;

int Speed;

int Count_Stage;

void setup()

{

    Serial.begin(19200);//initialize the serial link with serial plotter

    pinMode(5, OUTPUT);//PWM Motor Driver

    pinMode(6, OUTPUT);//PWM Motor Driver

    pinMode(A0, INPUT);//Speed

    pinMode(A1, INPUT);//Current

    pinMode(A2, INPUT);//Voltage

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

pinMode(A3, INPUT);//OFF Key
pinMode(A4, INPUT);//START Key
pinMode(A5, INPUT);//CHARGE Key
pinMode(A6, INPUT);//RESET Button
digitalWrite(RELAY1,LOW);//ATS SWITCH
digitalWrite(RELAY2,LOW);//ACTUATOR
}
void loop()
{
STARTButton = digitalRead(A4);
OFFButton = digitalRead(A3);
RESETButton = digitalRead(A6);
if(STARTButton == HIGH && Count_Time == 0)
{
Count_Time == 1;
digitalWrite(RELAY1,HIGH);//ATS SWITCH
digitalWrite(RELAY2,HIGH);//ACTUATOR
delay(1000);
}
if(analogRead(A0) >= 120) Count_Time = 3;
if(STARTButton == HIGH && Count_Time == 1)
{
Setpoint = 450;
Feedback = analogRead(A0);
analogWrite(PIN_OUTPUT,200);
Plot();
if(analogRead(A2)>= 335)Count_Time = 2;
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(analogRead(A2)>= 800)
{
  do
  {
    digitalWrite(RELAY2,LOW);
    analogWrite(PIN_OUTPUT,0);
    Setpoint = 0;
    Feedback = analogRead(A0);
    Plot();
  }while(OFFButton == HIGH);
}
}
if(Count_Time == 2)
{
  Setpoint = 450;
  Feedback = analogRead(A0);
  analogWrite(PIN_OUTPUT, 120 );//Supplies 5 V
  Plot();
  if(analogRead(A2) < 345 ) Count_Time = 3;
  if(analogRead(A2)>= 800)
  {
    do
    {
      digitalWrite(RELAY2,LOW);
      analogWrite(PIN_OUTPUT,0);
      Setpoint = 0;
      Feedback = analogRead(A0);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        Plot();
    }while(OFFButton == HIGH);
}
}
if(Count_Time == 3)
{
    Setpoint = 150;
    Feedback = analogRead(A0);
    analogWrite(PIN_OUTPUT, 170 ); //Supplies 10 V
    Plot();
    if(analogRead(A2) >= 380) Count_Time = 4;
    if(analogRead(A2)>= 800)
    {
        do
        {
            digitalWrite(RELAY2,LOW);
            analogWrite(PIN_OUTPUT,0);
            Setpoint = 0;
            Feedback = analogRead(A0);
            Plot();
        }while(OFFButton == HIGH);
    }
}
if(Count_Time == 4)
{
    Setpoint = 450;
    Feedback = analogRead(A0);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Plot();
Drive_Start(450,A5);
addPWM = 10;
Speed = analogRead(A0);
Count_Time = 5;
goto CHARGE1;
if(analogRead(A0)>= 800)
{
do
{
digitalWrite(RELAY2,LOW);
analogWrite(PIN_OUTPUT,0);
Setpoint = 0;
Feedback = analogRead(A0);
Plot();
}while(OFFButton == HIGH);
}
}
if(Count_Time == 5)
{
CHARGE1:
addPWM = 10;
Speed = analogRead(A0);
while(1)
{
Current_Control(300);
if(analogRead(A2)>= 435) Count_Stage++;
}
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(Count_Stage>=500)
{
    Count_Time == 6;
    goto CHARGE2;
}
if(analogRead(A0)>= 800)
{
    do
    {
        digitalWrite(RELAY2,LOW);
        analogWrite(PIN_OUTPUT,0);
        Setpoint = 0;
        Feedback = analogRead(A0);
        Plot();
    }while(OFFButton == HIGH);
}
}
}
if(Count_Time == 6)
{
    CHARGE2:
    addPWM = 10;
    Speed = analogRead(A0);
    Count_Stage=0;
    while(1)
    {
        Voltage_Control(435);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(analogRead(A1)<= 540) Count_Stage++;
if(Count_Stage>=500)
{
    Count_Time == 7;
    goto CHARGE3;
}
if(analogRead(A0)>= 800)
{
    do
    {
        digitalWrite(RELAY2,LOW);
        analogWrite(PIN_OUTPUT,0);
        Setpoint = 0;
        Feedback = analogRead(A0);
        Plot();
    }while(OFFButton == HIGH);
}
}
}
if(Count_Time == 7)
{
    CHARGE3:
    addPWM = 10;
    Speed = analogRead(A0);
    while(1)
    {
        Voltage_Control(410);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(OFFButton == HIGH)
{
    Count_Time = 8;
    goto STOP;
}
if(analogRead(A0)>= 800)
{
    do
    {
        digitalWrite(RELAY2,LOW);
        analogWrite(PIN_OUTPUT,0);
        Setpoint = 0;
        Feedback = analogRead(A0);
        Plot();
    }while(OFFButton == HIGH);
}
}
}
if(Count_Time == 8)
{
    STOP:
    Setpoint = 450;
    Feedback = analogRead(A0);
    Plot();
    Drive_Speed(450,30000); //Cooling Time
    if(analogRead(A0)>= 800)
    {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

do
{
    digitalWrite(RELAY1,LOW);
    digitalWrite(RELAY2,LOW);
    analogWrite(PIN_OUTPUT,0);
    Setpoint = 0;
    Feedback = analogRead(A0);
    Plot();
}while(OFFButton == HIGH);
}
while(1)
{
    analogWrite(PIN_OUTPUT,0);
    Setpoint = 0;
    Feedback = analogRead(A0);
    Plot();
}
}
if(OFFButton == HIGH)
{
    digitalWrite(RELAY1,LOW);
    digitalWrite(RELAY2,LOW);
    analogWrite(PIN_OUTPUT,0);
    Setpoint = 0;
    Feedback = analogRead(A0);
    Plot();
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}

void Compute()
{
    unsigned long now = millis();
    double timeChange = (double)(now - lastTime);
    double error = Setpoint - Feedback;
    errSum += (error * timeChange);
    ITerm = ki * errSum;
    if(ITerm < -255)errSum = (ITerm / ki)-(error * timeChange);
    if(ITerm > 255)errSum = (ITerm / ki)-(error * timeChange);
    double dInput = (error - lastErr);
    Output = kp * error + ITerm + kd * dInput;
    if(Output < 120)Output = 120;
    if(Output > 155 + addPWM)Output = 155 + addPWM;
    analogWrite(PIN_OUTPUT, Output);
    lastErr = error;
    lastTime = now;
}

void SetTunings(double Kp, double Ki, double Kd)
{
    kp = Kp;
    ki = Ki;
    kd = Kd;
}

void Plot()
{
    Serial.print("\n");

```

```

Serial.print((Setpoint/1023)*100);
Serial.print("\t");
Serial.print((Feedback/1023)*100);
Serial.print("\t");
Serial.print((Output/255)*10);
Serial.print("\t");
Serial.print( 100);
Serial.print("\t");
Serial.print( 10);
Serial.print("\t");
Serial.print( 0);
}
void Drive_Start(int Command,int Pin)
{
while(1)
{
CHARGEButton == digitalRead(Pin);
if(CHARGEButton == HIGH)
{
break;
}
if(Setpoint > Command)
{
Setpoint = Setpoint - Delta;
}
else if(Setpoint < Command)
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    Setpoint = Setpoint+Delta;
}else
{
    Setpoint = Setpoint;
}

    Feedback = analogRead(A0);
    SetTunings(0.8,0.0008,0.8);//0.8
    Compute();
    Plot();
    if(analogRead(A0)>= 800)
    {
        do
        {
            analogWrite(PIN_OUTPUT,0);
            Setpoint = 0;
            Feedback = analogRead(A0);
            Plot();
        }while(OFFButton == HIGH);
    }
}
}

void Drive_Speed(int Command,int Time)
{
    int Time1 = millis(),Time2;
    while(1)
    {
        Time2 = millis();

```

```

if(Time2 - Time1 >= Time)
{
    break;
}
if(Setpoint > Command)
{
    Setpoint = Setpoint - Delta;
}
else if(Setpoint < Command)
{
    Setpoint = Setpoint+Delta;
}
else
{
    Setpoint = Setpoint;
}
Feedback = analogRead(A0);
SetTunings(0.8,0.0008,0.8);//0.8
Compute();
Plot();
if(analogRead(A0)>= 800)
{
    do
    {
        analogWrite(PIN_OUTPUT,0);
        Setpoint = 0;
        Feedback = analogRead(A0);
        Plot();
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        }while(OFFButton == HIGH);
    }
}

void Drive_Voltage(int Command,int Time)
{
    int Time1 = millis(),Time2;
    while(1){
        Time2 = millis();
        if(Time2 - Time1 >= Time)
        {
            break;
        }
        if(Setpoint > Command)
        {
            Setpoint = Setpoint - Delta;
        }
        else if(Setpoint < Command)
        {
            Setpoint = Setpoint + Delta;
        }
        else
        {
            Setpoint = Setpoint;
        }

        Feedback = analogRead(A0);
        SetTunings(0.5,0.0008,0.8);//0.8
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Compute();
Plot();
if(analogRead(A0) >= 800)
{
do
{
analogWrite(PIN_OUTPUT,0);
Setpoint = 0;
Feedback = analogRead(A0);
Plot();
}while(OFFButton == HIGH);
}
}
void Drive_Current(int Command,int Time)
{
int Time1 = millis(),Time2;
while(1)
{
Time2 = millis();
if(Time2 - Time1 >= Time1)
{
break;
}
if(Setpoint > Command)
{
Setpoint = Setpoint - Delta;
}
}
}

```

```

}
else if(Setpoint < Command)
{
    Setpoint = Setpoint + Delta;
}
else
{
    Setpoint = Setpoint;
}

Feedback = analogRead(A0);
SetTunings(0.4,0.0005,0.8); //0.5,0.0006 For 75%,100%
Compute();
Plot();
if(analogRead(A0)>= 800)
{
    do
    {
        analogWrite(PIN_OUTPUT,0);
        Setpoint = 0;
        Feedback = analogRead(A0);
        Plot();
    }while(OFFButton == HIGH);
}
}
}

void Current_Control(double Value1)
{

```

```
Drive_Current(Speed,10);
if(analogRead(A1) < Value1)
{
    Speed = Speed + 1;
}
else if(analogRead(A1) > Value1)
{
    Speed = Speed - 1;
}
}
void Voltage_Control(double Value2)
{
    Drive_Voltage(Speed,10);
    if(analogRead(A2) < Value2)
    {
        Speed = Speed + 1;
    }
    else if (analogRead(A2) > Value2)
    {
        Speed = Speed - 1;
    }
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## LM358, LM258, LM158, LM2904 Dual Operational Amplifiers

### 1 Features

- Wide Supply Ranges
  - Single Supply: 3 V to 32 V (28 V for LM2904)
  - Dual Supplies:  $\pm 1.5$  V to  $\pm 16$  V ( $\pm 13$  V for LM2904)
- Low Supply-Current Drain, Independent of Supply Voltage: 0.7 mA Typical
- Wide Unity Gain Bandwidth: 0.7 MHz
- Common-Mode Input Voltage Range Includes Ground, Allowing Direct Sensing Near Ground
- Low Input Bias and Offset Parameters
  - Input Offset Voltage: 3 mV Typical  
A Versions: 2 mV Typical
  - Input Offset Current: 2 nA Typical
  - Input Bias Current: 20 nA Typical  
A Versions: 15 nA Typical
- Differential Input Voltage Range Equal to Maximum-Rated Supply Voltage: 32 V (28 V for LM2904)
- Open-Loop Differential Voltage Gain: 100 dB Typical
- Internal Frequency Compensation
- On Products Compliant to MIL-PRF-38535, All Parameters are Tested Unless Otherwise Noted. On All Other Products, Production Processing Does Not Necessarily Include Testing of All Parameters.

### 2 Applications

- Blu-ray Players and Home Theaters
- Chemical and Gas Sensors
- DVD Recorder and Players
- Digital Multimeter: Bench and Systems
- Digital Multimeter: Handhelds
- Field Transmitter: Temperature Sensors
- Motor Control: AC Induction, Brushed DC, Brushless DC, High-Voltage, Low-Voltage, Permanent Magnet, and Stepper Motor
- Oscilloscopes
- TV: LCD and Digital
- Temperature Sensors or Controllers Using Modbus
- Weigh Scales

### 3 Description

These devices consist of two independent, high-gain frequency-compensated operational amplifiers designed to operate from a single supply or split supply over a wide range of voltages.

Device Information<sup>(1)</sup>

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LMx58, LMx58x, LM2904, LM2904V	VSSOP (8)	3.00 mm × 3.00 mm
	SOIC (8)	4.90 mm × 3.90 mm
	SO (8)	5.20 mm × 5.30 mm
	TSSOP (8)	3.00 mm × 4.40 mm
	PDIP (8)	9.81 mm × 6.35 mm
LMx58, LMx58x, LM2904V	QDIP (8)	9.60 mm × 6.67 mm
	LCCC (20)	8.89 mm × 8.89 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

Symbol (Each Amplifier)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## LM2907 and LM2917 Frequency to Voltage Converter

### 1 Features

- Ground Referenced Tachometer Input Interfaces Directly With Variable Reluctance Magnetic Pickups
- Op Amp Has Floating Transistor Output
- 50-mA Sink or Source to Operate Relays, Solenoids, Meters, or LEDs
- Frequency Doubling For Low Ripple
- Tachometer Has Built-In Hysteresis With Either Differential Input or Ground Referenced Input
- $\pm 0.3\%$  Linearity (Typical)
- Ground-Referenced Tachometer is Fully Protected From Damage Due to Swings Above  $V_{CC}$  and Below Ground
- Output Swings to Ground For Zero Frequency Input
- Easy to Use:  $V_{OUT} = f_{IN} \times V_{CC} \times R1 \times C1$
- Zener Regulator on Chip allows Accurate and Stable Frequency to Voltage or Current Conversion (LM2917)

### 2 Applications

- Over- and Under-Speed Sensing
- Frequency-to-Voltage Conversion (Tachometer)
- Speedometers
- Breaker Point Dwell Meters
- Hand-Held Tachometers
- Speed Governors
- Cruise Control
- Automotive Door Lock Control
- Clutch Control
- Horn Control
- Touch or Sound Switches

### 3 Description

The LM2907 and LM2917 devices are monolithic frequency-to-voltage converters with a high gain op amp designed to operate a relay, lamp, or other load when the input frequency reaches or exceeds a selected rate. The tachometer uses a charge pump technique and offers frequency doubling for low-ripple, full-input protection in two versions (8-pin LM2907 and LM2917), and its output swings to ground for a zero frequency input.

The op amp is fully compatible with the tachometer and has a floating transistor as its output. This feature allows either a ground or supply referred load of up to 50 mA. The collector may be taken above  $V_{CC}$  up to a maximum  $V_{CE}$  of 28 V.

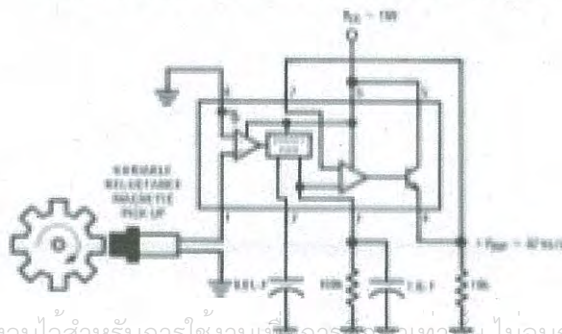
The two basic configurations offered include an 8-pin device with a ground-referenced tachometer input and an internal connection between the tachometer output and the op amp noninverting input. This version is well suited for single speed or frequency switching or fully buffered frequency-to-voltage conversion applications.

#### Device Information<sup>(1)</sup>

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LM2907-N, LM2917-N	PDIP (8)	6.35 mm × 9.81 mm
	PDIP (14)	6.35 mm × 19.177 mm
	SOIC (8)	3.91 mm × 4.90 mm
	SOIC (14)	3.91 mm × 8.85 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

#### Minimum Component Tachometer Diagram



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเชิงพาณิชย์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**IR2101(s)/IR2102(s) & (PbF)**

**HIGH AND LOW SIDE DRIVER**  
Product Summary

**Features**

- Floating channel designed for bootstrap operation Fully operational to +600V Tolerant to negative transient voltage dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout
- 3.3V, 5V, and 15V logic input compatible
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase with inputs (IR2101) or out of phase with inputs (IR2102)
- Also available LEAD-FREE

V <sub>OFFSET</sub>	600V max.
I <sub>O</sub> +/-	130 mA / 270 mA
V <sub>OUT</sub>	10 - 20V
t <sub>on/off</sub> (typ.)	160 & 150 ns
Delay Matching	50 ns

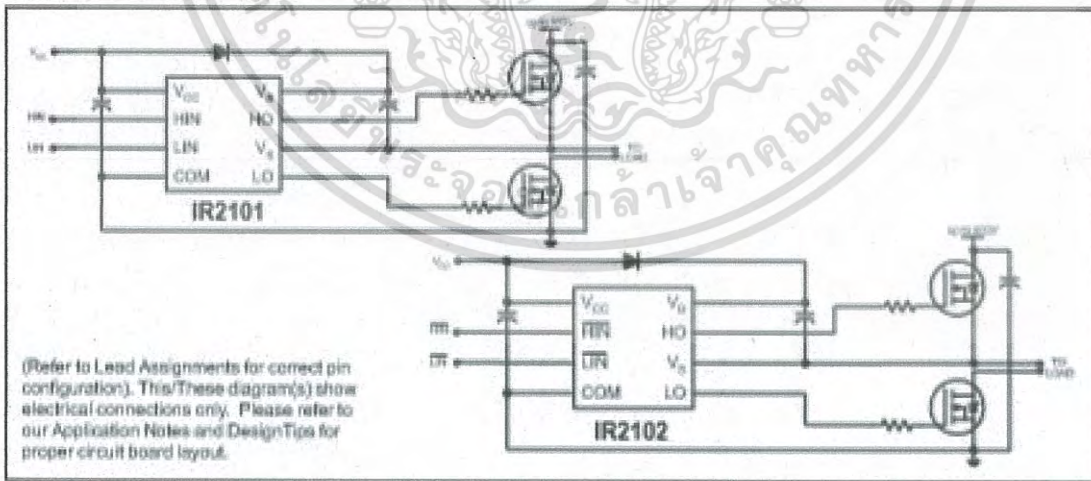
**Description**

The IR2101(S)/IR2102(S) are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with independent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. The logic input is compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 600 volts.

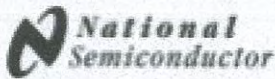
**Packages**



**Typical Connection**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



August 2004

## LM1575/LM2575/LM2575HV SIMPLE SWITCHER® 1A Step-Down Voltage Regulator

### General Description

The LM2575 series of regulators are monolithic integrated circuits that provide all the active functions for a step-down (buck) switching regulator, capable of driving a 1A load with excellent line and load regulation. These devices are available in fixed output voltages of 3.3V, 5V, 12V, 15V, and an adjustable output version.

Requiring a minimum number of external components, these regulators are simple to use and include internal frequency compensation and a fixed-frequency oscillator.

The LM2575 series offers a high-efficiency replacement for popular three-terminal linear regulators. It substantially reduces the size of the heat sink, and in many cases no heat sink is required.

A standard series of inductors optimized for use with the LM2575 are available from several different manufacturers. This feature greatly simplifies the design of switch-mode power supplies.

Other features include a guaranteed  $\pm 4\%$  tolerance on output voltage within specified input voltages and output load conditions, and  $\pm 10\%$  on the oscillator frequency. External shutdown is included, featuring 50  $\mu\text{A}$  (typical) standby current. The output switch includes cycle-by-cycle current limiting, as well as thermal shutdown for full protection under fault conditions.

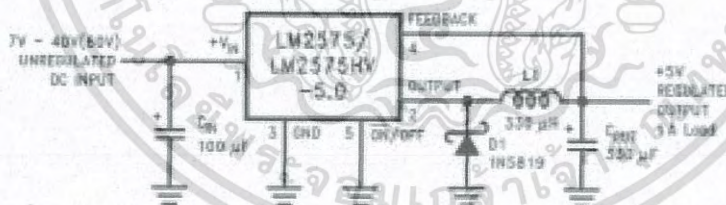
### Features

- 3.3V, 5V, 12V, 15V, and adjustable output versions
- Adjustable version output voltage range, 1.25V to 37V (57V for HV version)  $\pm 4\%$  max over line and load conditions
- Guaranteed 1A output current
- Wide input voltage range, 40V up to 60V for HV version
- Requires only 4 external components
- 52 kHz fixed frequency internal oscillator
- TTL shutdown capability, low power standby mode
- High efficiency
- Uses readily available standard inductors
- Thermal shutdown and current limit protection
- P+ Product Enhancement tested

### Applications

- Simple high-efficiency step-down (buck) regulator
- Efficient pre-regulator for linear regulators
- On-card switching regulators
- Positive to negative converter (Buck-Boost)

### Typical Application (Fixed Output Voltage Versions)



Note: Pin numbers are for the TO-220 package.

0102041

SIMPLE SWITCHER® is a registered trademark of National Semiconductor Corporation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์, “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง,” พิมพ์ครั้งที่ 14 กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์ ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง, 2557.
- [2] ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย, “เครื่องจักรกลเชิงโครนัส,” เอกสารประกอบการสอน, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558.
- [3] เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์, “เทคโนโลยีเครื่องจักรกลไฟฟ้าสมัยใหม่,” เอกสารประกอบการสอน, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2560.
- [4] สุชาติ จันทร์จรมานิตย์. “ระบบควบคุม Control Systems,” เอกสารประกอบการสอน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตภาคพายัพ.
- [5] มนตรี เงามเดช, “ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.” เอกสารประกอบการสอน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตภาคพายัพ.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นายบรรณรต พรหมแพทย์ เกิดวันที่ 20 กันยายน 2538  
 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนพิบูลวิทยาลัย  
 ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายพงศกร เงินจันทร์ เกิดวันที่ 20 กันยายน 2538  
 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ สตรีวิทยา 2  
 ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายพงศกร อินทร์ถาวร เกิดวันที่ 23 พฤศจิกายน 2538  
 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนบางปะอิน "ราชานุเคราะห์ 1"  
 ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายพีชรพล กังวาลโชคชัย เกิดวันที่ 27 กรกฎาคม 2538  
 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนชลราชกุลอำรุง  
 ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การศึกษาการควบคุมชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรภายในสำหรับประจุแบตเตอรี่ในระบบผลิตไฟฟ้า

## พลังงานหมุนเวียนแบบไฮบริด

### A STUDY OF IPMSG GENERATOR-SET CONTROL FOR CHARGING BATTERY IN THE HYBRID RENEWABLE POWER GENERATOR SYSTEM

บรรณกร พนมแพทย์ พงศกร เงินจันทร์ พงศกร อินทร์ถาวร พัชรพล กังวาล โชคชัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 094-479-9652 E-Mail: emrlproject101@gmail.com

#### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาการควบคุมชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับประจุแบตเตอรี่ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแบบไฮบริด ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้ประกอบด้วยเครื่องยนต์ดีเซลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายใน โดยเริ่มต้นจะทำการศึกษาลักษณะการทำงานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การศึกษาพฤติกรรมการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลที่มีความสัมพันธ์กับการควบคุมการจ่ายน้ำมันของโกฟเวอร์เนอร์ (Governor) การทำงานของโกฟเวอร์เนอร์ที่มีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า การทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดัน หลังจากนั้นจะนำการศึกษาข้างต้นมาประยุกต์สำหรับการควบคุมการประจุแบตเตอรี่โดยการใช้อุปกรณ์ควบคุมป้อนกลับแบบพีไอดี โดยการตรวจจับค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้ได้ระดับกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามพฤติกรรมการประจุแบตเตอรี่ สุดท้ายแล้วระบบการประจุแบตเตอรี่ที่นำเสนอจะสามารถนำมาใช้สำหรับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแบบไฮบริดในพื้นที่ห่างไกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### ABSTRACT

This thesis presents a study of generator-set control for charging battery in the hybrid renewable power generation system which the generator-set is consisted of a diesel engine and an interior permanent magnet synchronous generator (IPMSG). First of all, the related principle operations are studied including the battery charging behavior, the relation between diesel engine operation and fuel injection control by governor, the relation between governor operation and input voltage, and the buck converter operation. After that, all abovementioned studies are implemented to control the battery charging operation using PID feedback control. Charging voltage and current are detected and sent back to the

PID feedback control in order to control the battery charging based on the battery characteristics. Finally, the proposed battery charging system can be effectively used for the generator-set in the stand-alone hybrid renewable power generation system in remote area.

#### 1. บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการนำเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Machine) มาใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อให้มนุษย์เรามีสิ่งอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวัน ในที่นี้จะกล่าวถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous generators) แบบแม่เหล็กถาวร (PMSG) มาใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับนั้นจะมีความเร็วและประสิทธิภาพที่ดีกว่า เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง และการที่ใช้แม่เหล็กถาวรนั้นทำให้ไม่ต้องจ่ายไฟกระแสตรงเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก การทำงานของการประจุแบตเตอรี่ด้วยชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator-set) จะประกอบไปด้วย Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) ซึ่งต้องร่วมกับเครื่องยนต์ (Diesel Engine)

การนำพลังงานที่ประจุได้ในแบตเตอรี่ไปใช้งานต่อไปนั้น จำเป็นต้องมีการควบคุมการประจุให้เกิดประสิทธิภาพและความเสถียรในการทำงานให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด จึงได้เกิดโครงงานวิจัยนี้ขึ้นมาเพื่อศึกษาการควบคุมการประจุแบตเตอรี่ที่สถานะต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมที่สุด

#### 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1 ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator-set)

ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญคือ เครื่องยนต์กำลังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แผงควบคุม และสวิตช์สับเปลี่ยน โดยเครื่องต้นกำลังมีหลายชนิด เช่น เครื่องยนต์ดีเซล เครื่องกังหันแก๊ส เครื่องกังหันไอน้ำ และเครื่องกังหันน้ำ ทั้งนี้เราจะใช้เครื่องต้นกำลังชนิดเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งจะใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิพนธ์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

“Governor” ในการควบคุมเชื้อเพลิงโดยการจ่ายสัญญาณพัลส์จากแผงควบคุมไปยังการ



รูปที่ 2.1 รูปตัวอย่างของ Governor

## 2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

### 2.2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายใน



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของโรเตอร์แม่เหล็กถาวรภายในแบบ Interior

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายใน

(Interior Permanent Magnet Synchronous Generator) หรือมีชื่อย่อว่า IPMSG เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับซิงโครนัสชนิดหนึ่งที่มีการนำวัสดุที่เป็นแม่เหล็กถาวรมาประยุกต์ใช้ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้แม่เหล็กถาวรแบบ Rare Earth คือ Neodymium-Iron-Boron ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B} - 38 \text{UH}$ ) ซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวรแบบ Hard Magnetic ชนิดหนึ่งนั้นคือมี Hysteresis Loop ที่ค่อนข้างกว้าง ซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวรประเภทนี้จะให้ความหนาแน่นพลังงานสูง (Energy Density)

### 2.3 ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์

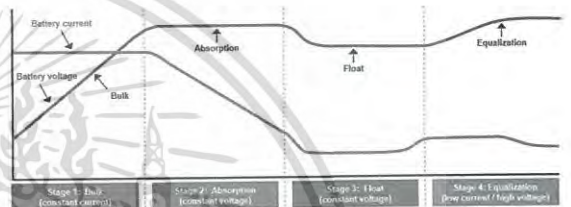
ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ หรือ PID Controller เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ

## 2.4 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

### 2.4.3 คุณสมบัติทางเคมีของแบตเตอรี่ระหว่างการคายประจุ

#### 2.4.3.8 ขั้นตอนการประจุแบตเตอรี่

อัลกอริทึมการชาร์จไฟ (Stage charging algorithm) เป็นวิธีที่บริษัทผู้ผลิตแบตเตอรี่ตะกั่วกรดส่วนใหญ่แนะนำให้เป็นวิธีที่ดีที่สุดและมีประสิทธิภาพมากที่สุดในกรณีการคืนความจุเต็มรูปแบบให้กับแบตเตอรี่และยืดอายุการใช้งานซึ่งเราได้นำหลักการนี้มาเป็นหัวใจหลักในการประจุแบตเตอรี่เพื่อให้ทำงานอย่างเหมาะสม และช่วยในการประหยัดเชื้อเพลิงอีกด้วยเนื่องจากเครื่องยนต์ไม่จำเป็นต้องทำงานที่ความเร็วรอบเต็มตลอดเวลา อัลกอริทึมการชาร์จนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 อัลกอริทึมการชาร์จไฟ 4 ขั้นตอน

(ที่มา: <http://www.chargetek.com/images/pdfs/Equal.pdf>)

### 2.6 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller Board)

เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Sourceก็มีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software ตัวบอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา ทั้งนี้ผู้ใช้ยังสามารถดัดแปลงเพิ่มเติมพัฒนาต่อฮาร์ดแวร์หรือโปรแกรมก็ได้อีกด้วย

#### 2.6.4 ตัวอย่าง Arduino Board ที่นำมาใช้งาน

Arduino Nano เป็นบอร์ด Arduino ที่ออกแบบมาสำหรับการใช้งานขนาดเล็ก โดยระบบของเรานั้นมีจำนวนตัวแปรที่สั่งการค่อนข้างน้อย ซึ่งเป็นเหตุผลให้เราไม่จำเป็นต้องใช้งาน Arduino ที่มีขนาดใหญ่ เพราะมีราคาแพงกว่าค่อนข้างมาก และ option ต่างๆของ Arduino Nano ก็เพียงพอต่อการทำงานในระบบนี้แล้ว การเลือกใช้ Arduino Nano จึงส่งผลให้วงจรควบคุมของเรานั้นขนาดเล็กและมีต้นทุนที่ต่ำลงเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.4 Arduino Nano

(ที่มา: <https://store.arduino.cc>)

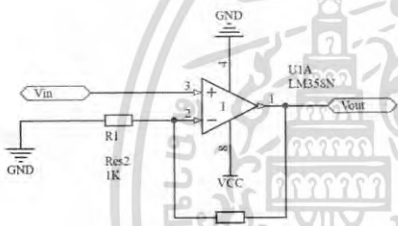
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. การออกแบบ

วงจรที่เราใช้มาเป็นส่วนประกอบของวงจรควบคุมการประจุแบตเตอรี่ด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรภายใน ประกอบด้วย วงจรขยายสัญญาณ (Operational Amplifier), วงจรวัดความเร็วรอบ (Tachometer) และส่วนประกอบอื่นๆ นอกจากนี้มีการออกแบบ PID Tuning Parameter เพื่อให้ระบบการประจุแบตเตอรี่ทำงานได้อย่างเหมาะสม และการออกแบบการทำงานของ Arduino ร่วมกับ Generator-set เพื่อประจุแบตเตอรี่

#### 3.2 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณ (Operational Amplifier)

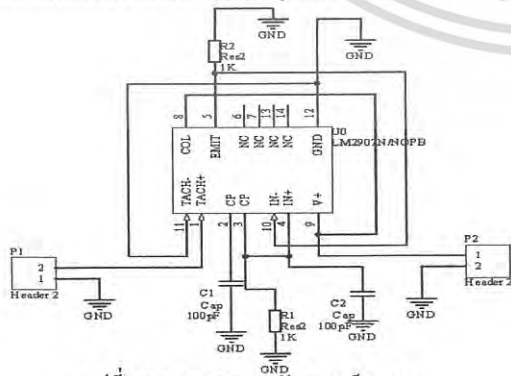
วงจรขยายสัญญาณ ถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณ แรงดันจาก DC Current Shunt Resistor เพื่อรับค่าแรงดันที่ขยายเข้า Arduino และใช้เป็น Feedback ในส่วนของวงจรตรวจจับสนายไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ โดยรูปแบบวงจรมีลักษณะดังรูปที่ 3.1 ซึ่งมีอัตราขยาย 100 เท่า



รูปที่ 3.1 ออกแบบวงจรขยายสัญญาณ (Operational Amplifier)

#### 3.3 การออกแบบวงจรวัดความเร็วรอบ (Tachometer)

วงจรวัดความเร็วรอบ ถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนายสัญญาณ ความถี่ของ Engine Diesel ซึ่งจะแสดงถึงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ และเราจะใช้ความเร็วรอบที่ได้นี้มาเป็น Feedback ในการควบคุม Speed ต่อไป โดยลักษณะการออกแบบวงจรเป็นไปตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ออกแบบวงจรวัดความเร็วรอบ

### 3.5 การออกแบบวงจรควบคุมการประจุแบตเตอรี่ด้วยเครื่อง

#### กำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรภายใน

วงจรควบคุมนี้เป็นวงจรที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้ระบบควบคุมป้อนกลับแบบ PID โดยใช้ Arduino เพื่อทำการควบคุมการประจุแบตเตอรี่ในรูปแบบการประจุแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดได้อย่างเหมาะสม โดยการควบคุมจำเป็นต้องมีสัญญาณป้อนกลับที่รับเข้ามาเพื่อใช้ในการควบคุมต่อไป เราได้นำการวงจรที่ได้ออกแบบไว้ทั้งหมดมารวมกันให้อยู่ในแผ่นวงจรเดียวกันทั้งนี้เพื่อให้มีขนาดเล็กและลดการต่อสายซึ่งจะทำให้เกิดความน่าเชื่อถือกับวงจรควบคุม ซึ่งประกอบไปด้วย วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน , วงจรขยายสัญญาณสำหรับวัดกระแส , เซนเซอร์วัดระดับแรงดัน , วงจรรักษาระดับแรงดัน , ชุดรีเลย์ ป้อนกัน และวงจรขั้วมอเตอร์

#### 3.6 ออกแบบ PID Tuning Parameter เพื่อให้ระบบการประจุแบตเตอรี่ทำงานได้อย่างเหมาะสม

จากทฤษฎีพื้นฐานการควบคุมแบบป้อนกลับด้วย PID Control จะต้องมีการหาค่า gain คือ  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  เพื่อให้ได้การควบคุมที่เหมาะสมคือมีความเร็วในการตอบสนองที่เหมาะสม มีโอเวอร์ชูตที่เหมาะสม และมีเวลาที่เข้าสู่เสถียรภาพ (Settling Time) ที่เหมาะสม โดยวิธีการทดสอบระบบเพื่อหาค่า gain ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่เราได้นำมาใช้คือวิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error Tuning )

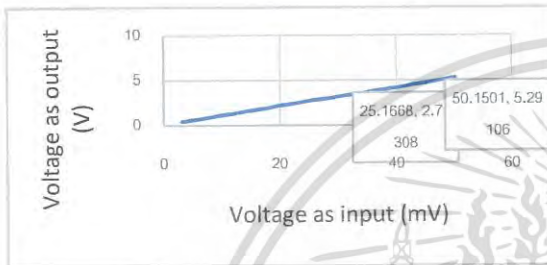
#### 3.7 ออกแบบการทำงานของ Arduino ร่วมกับ Generator-set เพื่อประจุแบตเตอรี่

ทำการเขียนโปรแกรมระบบควบคุมการประจุแบตเตอรี่ลงบน Arduino ซึ่งโปรแกรมที่เขียนนั้นจะเป็นการออกแบบระบบควบคุมโดยใช้ทฤษฎีพื้นฐานในเรื่องของการควบคุมแบบป้อนกลับด้วย PID Control ซึ่งมีการทำงานร่วมกันระหว่าง Arduino กับ เซนเซอร์ต่าง ๆ เช่น Voltage Sensor , DC Current Shunt Resistor และ Tachometer ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับผลการตอบสนองเพื่อป้อนกลับไปยัง Arduino เพื่อใช้ในการคำนวณสำหรับการควบคุมแบบ PID

#### 4. ผลการทดลอง

##### 4.1 การทดสอบวงจรมอเตอร์ขยายสัญญาณ

การทดลองนี้เป็นการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจร โดยนำสัญญาณขาออกที่เทียบกับสัญญาณขาเข้าของวงจรเพื่อให้ทราบว่าการขยายสัญญาณสามารถนำมาใช้งานในการขยายสัญญาณจาก DC Current Shunt Resistor ในขอบเขตการทำงานที่เราต้องการ ซึ่งจะนำสัญญาณนี้มาตรวจจับกระแสของมอเตอร์เพื่อใช้เป็น Feedback ของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

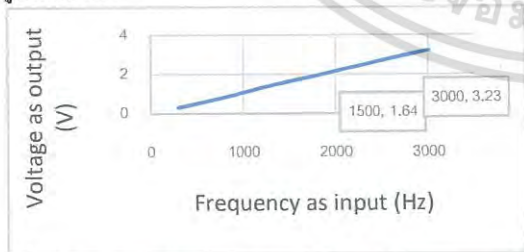


รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขาเข้าและขาออกของวงจรมอเตอร์ขยายสัญญาณ

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่ากราฟก่อนข้างมีความเป็นเชิงเส้น จึงสามารถนำมาใช้ได้

##### 4.2 การทดสอบวงจรมอเตอร์วัดความเร็วรอบ

การทดลองนี้เป็นการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจร โดยนำสัญญาณขาออกที่เทียบกับสัญญาณขาเข้าของวงจรเพื่อให้ทราบว่าการขยายสัญญาณสามารถนำมาใช้งานในการแปลงความถี่เป็นแรงดัน ในขอบเขตการทำงานที่เราต้องการ ซึ่งเราใช้วงจรนี้มาตรวจจับความเร็วที่ Engine Diesel เพื่อใช้เป็น Feedback ของระบบ และสามารถควบคุมความเร็วของเครื่องยนต์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ



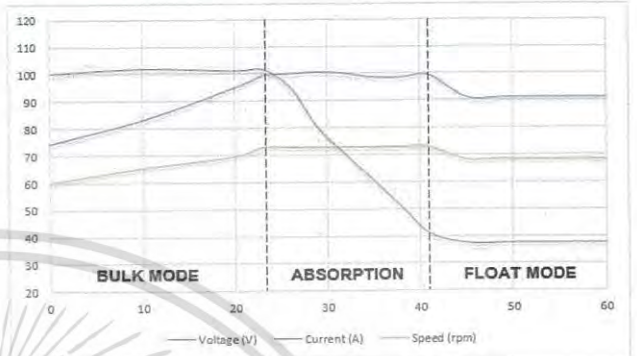
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขาเข้าและขาออกของวงจรมอเตอร์วัดความเร็วรอบ

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่ากราฟก่อนข้างมีความเป็นเชิงเส้น จึงสามารถนำมาใช้ได้

#### 4.4 การทดสอบการควบคุมกระแสและแรงดันให้เป็นไปตาม

##### ข้อมูลการชาร์จ

##### 4.4.4 ผลการทดลอง



รูปที่ 4.4 การประจุแบตเตอรี่ตามข้อมูลการชาร์จสำหรับกรณี 10 A

จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าเราสามารถควบคุมให้เป็นไปตามพฤติกรรมการชาร์จ ซึ่งจะมี 3 สถานะในการควบคุม Bulk Mode, Absorption Mode, และ Float Mode ซึ่งในโหมดสุดท้ายจะเป็นการทำให้สายงานเพียงเท่านั้นเราจึงไม่นำมาทดสอบ

#### 4.5 การทดสอบการควบคุมกระแสที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ

##### 4.5.4 ผลการทดลอง

เปอร์เซ็นต์โหลดของกระแสฟัด	Voltage (V)	Current (A)
25%	50.757	44.647
50%	50.043	85.078
75%	52.585	125.791
100%	63.420	168.800

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าโหลดที่ฟัดค์ต่างๆ

จากการทดลองที่ 25% 50% 75% และ 100% มีความเร็วรอบของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 900-1100 Rpm ซึ่งอยู่ในช่วงที่พอเหมาะแก่การทำงาน และจากตารางที่ 4.1 ได้ค่าแรงดันและกระแสที่จ่ายให้โหลดเป็นไปตามที่ต้องการซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ดังนั้นจากข้อมูลที่กล่าวมาทำให้สรุปได้ว่าวงจรควบคุมที่ได้จัดทำขึ้นนั้นสามารถนำมาใช้งานในทุกช่วงการทำงานจนถึงฟัดค์ของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.สรุป

จงรควบคุมของเรานั้นสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้สามารถทำการชาร์จแบตเตอรี่ได้อย่างเหมาะสมตาม stage charging algorithm ซึ่งจะช่วยให้การถนอมแบตเตอรี่ให้มีอายุการใช้งานมากขึ้นและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการคืนประจุให้กับแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังช่วยลดต้นทุนของเชื้อเพลิงที่ใช้กับเครื่องยนต์เนื่องจากเมื่อเราชาร์จแบตเตอรี่ด้วยวิธีนี้แล้วจะทำให้เครื่องยนต์ไม่จำเป็นต้องทำงานในช่วงความเร็วเต็มตลอด จะมีการปรับเปลี่ยนความเร็วอย่างเหมาะสมซึ่งสัมพันธ์กันกับสถานะของแบตเตอรี่ในช่วงเวลานั้นๆ



นายบรรณรด พรหมแพทย เกิดวันที่ 20 กันยายน 2538  
ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนพิบูลวิทยาลัย  
ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายพงศกร เงินจันทร์ เกิดวันที่ 20 กันยายน 2538  
ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ ศตรีวิทยา 2  
ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## 6.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาทั้งสองท่าน รศ.พิชิต ถ้ายอง และ ดร.เปี่ยมภูมิ สฤตพฤกษ์ ที่ได้กรุณาให้ความสนับสนุน ข้อเสนอแนะ และข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการเสมอมา

ทั้งนี้ขอขอบคุณนายพรท กิ่งนวิจิต และนายชาญปกรณ์ ณ นิโรจน์ นักศึกษาปริญญาโท ซึ่งให้ข้อเสนอแนะและความช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำโครงการขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนและให้กำลังใจมาโดยตลอด



นายพงศกร อินทร์ถาวร เกิดวันที่ 23 พฤศจิกายน 2538  
ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนบางปะอิน"ราชานุเคราะห์ ๑"  
ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายพัชรพล กังวาลโชคชัย เกิดวันที่ 27 กรกฎาคม 2538  
ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนชลราษฎรอำรุง  
ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระเชษฐ ชันเงิน และ วุฒิพล ทราชาติธรรม. "อิเล็กทรอนิกส์กำลัง," พิมพ์ครั้งที่ 14 กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์ ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ.พรินต์ติ้ง, 2557.
- [2] ชัยวุฒิ นัตถฤทัย. "เครื่องจักรกลเชิงโรตารี," เอกสารประกอบการสอน, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558.
- [3] เปี่ยมภูมิ สฤตพฤกษ์, "เทคโนโลยีเครื่องจักรกลไฟฟ้าสมัยใหม่," เอกสารประกอบการสอน, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2560.
- [4] สุชาติ จันทร์จรมานิตย์. "ระบบควบคุม Control Systems," เอกสารประกอบการสอน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตภาคพายัพ.
- [5] มนต์รี เมาเดช, "ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า," เอกสารประกอบการสอน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตภาคพายัพ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้