

การศึกษาการผลิตไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแบบปรับความเร็วได้ด้วยเครื่อง
กำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่มีการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

STUDY ON VARIABLE SPEED SMALL HYDRO POWER GENERATION USING
PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR WITH MAXIMUM
POWER POINT TRACKING.



ชัชพงศ์ ธนาจิตร

CHATCHAPHONG THANAJITR

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2566

KMITL-2023-EN-M-027-086

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON VARIABLE SPEED SMALL HYDRO POWER GENERATION USING
PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR WITH MAXIMUM
POWER POINT TRACKING.



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023
KMITL-2023-EN-M-027-086

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการผลิตไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแบบปรับความเร็วได้ ด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่มีการติดตาม จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด
นักศึกษา	นายชัชพงศ์ ธนาจิตร
รหัสประจำตัว	63601223
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.สมภพ ผลไม้

บทคัดย่อ

ในโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กอัตราการไหลและความสูงของหัวน้ำมักจะมีผันผวนตามฤดูกาล การผลิตไฟฟ้าพลังน้ำแบบขนานกริดซึ่งมีความถี่คงที่ด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับจึงต้องอาศัยตัวรักษาความเร็วคงที่เพื่อทำให้เทอร์ไบน์หมุนด้วยความเร็วคงที่ตลอดเวลา อย่างไรก็ตามตัวรักษาความเร็วคงที่ที่สามารถทำงานได้ดีในช่วงอัตราการไหลและความสูงของหัวน้ำที่จำกัดทำให้ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ในกรณีที่อัตราการไหลต่ำหรือความสูงของหัวน้ำไม่เหมาะสม นอกจากนี้ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ที่แปรผันตามอัตราการไหลและความสูงของหัวน้ำยังทำให้ความเร็วที่เหมาะสมที่สุดในการหมุนไม่ตรงกับความเร็วซิงโครนัส การผลิตไฟฟ้าพลังน้ำแบบความเร็วคงที่ในโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กจึงมีประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานที่ต่ำกว่าระบบผลิตไฟฟ้าแบบปรับความเร็วรอบได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการควบคุมความเร็วรอบสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่ต่อกับเทอร์ไบน์พลังน้ำร่วมกับเทคนิคการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก ซึ่งจะช่วยให้โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กสามารถผลิตไฟฟ้าได้ในย่านอัตราการไหลและระดับความสูงหัวน้ำที่กว้างขึ้นและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงาน การควบคุมความเร็วรอบใช้หลักการควบคุมแนวเวกเตอร์สนามแม่เหล็กเพื่อการควบคุมที่แม่นยำ ส่วนเทคนิคการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่นำมาใช้นั้นประยุกต์มาจากเทคนิคค่าความนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่ใช้อย่างแพร่หลายในระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาโดยใช้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังน้ำจำลองขนาดเล็กซึ่งใช้มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรขนาดเล็กจำลองเป็นเทอร์ไบน์ที่สามารถควบคุมแรงบิดได้และมีเส้นโค้งแรงบิด-ความเร็วรอบที่ปรับสเกลลงมาจากเทอร์ไบน์ขนาด 100kW และใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรขนาดเล็กที่ต่อเข้ากับอินเวอร์เตอร์ในการผลิตไฟฟ้า โดยจำลองการส่งกำลังไฟฟ้าเข้าระบบไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์ไหลที่ต่อเข้ากับบัสดีซีของอินเวอร์เตอร์ จากผลการจำลองและผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมความเร็วรอบสามารถรักษาความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำ ส่วนระบบติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดก็สามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ตามที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Study on variable speed small hydro power generation using permanent magnet synchronous generator with maximum power point tracking.
Student	Mr.Chatchaphong Thanajitr
Student ID.	63601223
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical and Computer Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Dr.Sompob Polmai

ABSTRACT

In micro and small hydro power plants, the flow and head of the water fluctuate seasonally. Grid-connected hydro power generation by AC generator requires speed governor to keep turbine at a constant rotational speed. However, the speed governor has limited range of operation for flow and head of the water so that the power generation cannot operate in case of low flow and insufficient head. Additionally, the efficiency of hydro turbine that varies with flow and head of the water also causes the optimal operating speed deviating from the synchronous speed. The fixed speed hydro power generation usually has lower annual yield comparing to the variable speed system. This thesis presents a variable speed control for a hydro turbine-connected permanent magnet synchronous generator in conjunction with a maximum power point tracking technique for a small hydro power plant. This will help small hydropower plants produce electricity in a wider range of flow rate and head and optimize energy harvesting. The speed Field-oriented control technique is utilized for precise speed control and the well-known incremental conductance method for PV system is adopted for maximum power point tracking. This study is carried out using simulated hydro power plant system having a torque-controlled small permanent magnet synchronous motor as a hydro turbine with torque-speed curve mimicking the 100kW turbine, and an inverter-controlled small permanent magnet synchronous generator with electronic load connecting to the inverter dc bus to simulate grid power transferring. From the simulation and experimental results, the rotational speed can be precisely controlled, and the maximum power point tracking system can track the maximum power point successfully.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการสนับสนุนและความกรุณาจากท่านอาจารย์ ดร.สมภพ ผลไม้ ทั้งในด้านให้ความปรึกษาความรู้ทั้งด้านทฤษฎีและด้านปฏิบัติ ชี้แนะและช่วยแก้ไขในส่วนผิดพลาด ตลอดจนสนับสนุนค่าใช้จ่ายที่ใช้ในงานวิจัย และให้การดูแลการทำงานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างซึ่งในความรู้และประสบการณ์ที่ท่านมอบให้และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆท่านที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถดำเนินงานวิจัยได้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณสมาชิกทุกคนในห้องปฏิบัติการ Power Electronic Applications and Energy Conversion Research Laboratory (PEARL LAB) ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ รวมถึงให้กำลังใจ สร้างบรรยากาศในการทำงานที่ดี จนงานวิจัยนี้สามารถสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ให้โอกาสข้าพเจ้าได้ร่วมงานด้วย โดยข้าพเจ้าได้รับประสบการณ์และความรู้มากมายจากงานนี้ สามารถนำไปประยุกต์ปรับใช้กับงานวิจัยจนสามารถสำเร็จได้ด้วยดี

ขอบคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนเงินทุน ให้ปริญญา
นิพนธ์นี้ลุล่วงสำเร็จ

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจและผู้อ่านไม่มากนักน้อย หากผิดพลาดและเกิดข้อบกพร่องใดๆ ข้าพเจ้าต้องขอภัยเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ชัชพงศ์ ธนาจิตร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	i
ABSTRACT.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญรูป.....	vi
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 เป้าหมายของการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แนวความคิดการผลิตไฟฟ้าด้วยน้ำ.....	4
2.2 การควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนเชิงโรตอร์แบบแม่เหล็กถาวร.....	6
2.2.1 Space Vector.....	6
2.2.2 Clarke transformation.....	7
2.2.3 Park transformation.....	8
2.2.4 Field Oriented Control.....	9
2.2.5 การควบคุมแบบกระแสแกน d เท่ากับศูนย์.....	10
2.3 Incremental Conductance Method.....	10
บทที่ 3 การจำลองโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก.....	14
3.1 ลักษณะเฉพาะของกังหันน้ำขนาดเล็กและการจำลองกังหันน้ำขนาดเล็ก.....	15
3.2 การจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์แบบแม่เหล็กถาวร.....	21
3.2.1 TMDSHVMTRPFCKIT.....	22
3.2.2 Software.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และทำซ้ำอย่างอื่นถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	31
4.1 การจำลองกังหันน้ำ.....	34
4.2 การจำลองโรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบไม่ต่อเข้ากริด	36
4.2.1 การทดลองในโปรแกรม PSIM.....	36
4.2.2 การทดลองบนชุดทดลอง.....	40
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ.....	44
5.1 สรุปผลการวิจัย	44
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	44
เอกสารอ้างอิง.....	45
ภาคผนวก.....	46
ภาคผนวก ก.....	47
ภาคผนวก ข.....	53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 ชุดคอนเวอร์เตอร์ชนิด Back to Back (B2B Converters).....	2
รูปที่ 2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังน้ำแบบความเร็วคงที่ [2]	4
รูปที่ 2.2 จุดการทำงานแบบความเร็วรอบคงที่ [3]	4
รูปที่ 2.3 การทำงานของกังหันที่อัตราการไหลต่างๆ [4].....	5
รูปที่ 2.4 space vector เจริงซ้อนของกระแสทั้งสามเฟส.....	7
รูปที่ 2.5 space vector ของกระแสในกรอบ a b c และ $\alpha\beta$	7
รูปที่ 2.6 Space vector ในกรอบอ้างอิง dq และ α,β	8
รูปที่ 2.7 ไดอะแกรมของ FOC สำหรับมอเตอร์กระแสสลับ	9
รูปที่ 2.8 จุดการทำงานจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์.....	11
รูปที่ 2.9 flow chart การทำงานของอัลกอริทึม MPPT ในการผลิตไฟฟ้าด้วยแสง	12
รูปที่ 2.10 แผนผังการทำงานของอัลกอริทึม MPPT	13
รูปที่ 3.1 แผนภาพแนวความคิดของการจำลองโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก.....	14
รูปที่ 3.2 มอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	15
รูปที่ 3.3 กังหันน้ำไหลแบบผสมและกราฟแรงบิด-ความเร็วรอบ.....	16
รูปที่ 3.4 สัญญาณ encoder ของมอเตอร์ [10]	17
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างของการใช้ฟังก์ชัน interrupts ในการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์	17
รูปที่ 3.6 แรงดันอ้างอิงของเซอร์โวไดรฟ์ [10]	18
รูปที่ 3.7 ข้อมูลของ mcp4725 [11].....	19
รูปที่ 3.8 วงจรขยาย.....	19
รูปที่ 3.9 วงจรขยายที่ออกแบบได้.....	20
รูปที่ 3.10 แนวความคิดในการจำลองกังหันน้ำ.....	21
รูปที่ 3.11 แผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board) ของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ [12].....	22
รูปที่ 3.12 HV Motor Control and PFC Board Schematic Diagram with C2000 MCU [13]	23
รูปที่ 3.13 วงจรวัดกระแสเฟสที่บอร์ดควบคุม	23
รูปที่ 3.14 การกำหนดค่าฮาร์ดแวร์เพื่อใช้เครื่องมือ SimCoder.....	24
รูปที่ 3.15 การควบคุมอินเวอร์เตอร์ด้วย c code ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม PSIM.....	24
รูปที่ 3.16 PMSM ในโปรแกรม PSIM.....	25
รูปที่ 3.17 การจำลองแรงบิดของกังหันน้ำ.....	26
รูปที่ 3.18 วงจรวัดกระแส.....	27
รูปที่ 3.19 ADC F28335 และกล่องควบคุม.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้กับโรงเรียนเทคโนโลยีการเกษตรและสหกรณ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางวิชาการ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และขโมยอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.20 Speed controller	28
รูปที่ 3.21 Current controller	29
รูปที่ 3.22 การหาตำแหน่งโรเตอร์และความเร็วรอบ	29
รูปที่ 3.23 หน้าต่าง dsp oscilloscope.....	30
รูปที่ 3.24 MPPT algorithm ในโปรแกรม PSIM.....	30
รูปที่ 4.1 ชุดอุปกรณ์ทดลอง.....	31
รูปที่ 4.2 วงจรสร้างแรงดันอ้างอิงเพื่อควบคุมแรงบิดและ Arduino mega	32
รูปที่ 4.3 DC supply (บน) และ DC electronic load (ล่าง).....	32
รูปที่ 4.4 Inverter.....	33
รูปที่ 4.5 Power analyzer.....	33
รูปที่ 4.6 ไดอะแกรมของการศึกษาพฤติกรรมของกังหันน้ำจำลอง	34
รูปที่ 4.7 แสดงความเร็วของ PMSM ที่ความเร็วอ้างอิง 0.3pu (สีแดง), 0.4pu (สีน้ำเงิน), 0.5pu (สีเขียว), 0.6pu (สีม่วง), และ 0.7pu (สีส้ม)	36
รูปที่ 4.8 การใช้กล่องควบคุม Ramp Control เพื่อดีเลย์ความเร็วอ้างอิง.....	37
รูปที่ 4.9 แสดงความเร็วของ PMSM ที่ความเร็วอ้างอิง 0.5pu หลังจากดีเลย์ค่าความเร็วอ้างอิง	38
รูปที่ 4.10 แสดงความเร็วของ PMSM ที่ความเร็วอ้างอิง 0.3pu (สีแดง), 0.4pu (สีน้ำเงิน), 0.5pu (สีเขียว), 0.6pu (สีม่วง), 0.7pu (สีส้ม) และ 0.8pu (สีฟ้า).....	38
รูปที่ 4.11 แสดงการตอบสนองเชิงพลวัตของความเร็วโรเตอร์ (สีแดง) เมื่อค่าความเร็วอ้างอิงเปลี่ยนแบบ step (สีเขียว).....	39
รูปที่ 4.12 แสดงกระแส d-q เมื่อความเร็วโรเตอร์เปลี่ยนแปลง	39
รูปที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดัน กระแส และความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานที่แรงบิดคงที่ 0.4 pu. และความเร็วรอบ 1800 rpm.....	40
รูปที่ 4.14 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานที่แรงบิดคงที่ 0.4 pu. ขณะที่ความเร็วอ้างอิงถูกเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได.....	41
รูปที่ 4.15 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร่วมกับอัลกอริทึม MPPT ร่วมกับกังหันน้ำจำลองที่ความสูงหัวน้ำ 30 เมตร และมุมเปิดไคต์เวท 5 องศา	42
รูปที่ 4.16 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร่วมกับอัลกอริทึม MPPT ร่วมกับกังหันน้ำจำลองที่ความสูงหัวน้ำ 30 เมตร และมุมเปิดไคต์เวท 10 องศา	42
รูปที่ 4.17 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร่วมกับอัลกอริทึม MPPT เมื่อกังหันน้ำจำลองมีการเปลี่ยนแปลง	43

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการสร้างโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่เพื่อเพิ่มความมั่นคงทางพลังงานและรองรับการใช้พลังงานเป็นไปได้อย่างมากขึ้นจากปัจจัยหลายด้าน การพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังน้ำที่ยั่งยืนที่สามารถเดินเครื่องได้รวดเร็วและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่แม้จะลดขนาดของโรงไฟฟ้าเพื่อสามารถติดตั้งในแหล่งน้ำขนาดเล็ก ซึ่งหากเลือกเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าแบบดั้งเดิมหรือแบบความเร็วรอบคงที่ ความถี่คงที่ (Fixed speed, fixed frequency) กำลังผลิตจะถูกจำกัดด้วยปัจจัยความสูงของหัวน้ำที่ต่ำและอัตราการไหลของน้ำที่ผันผวนซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าต่ำ ทำให้ราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยสูงและไม่สามารถดำเนินโครงการได้

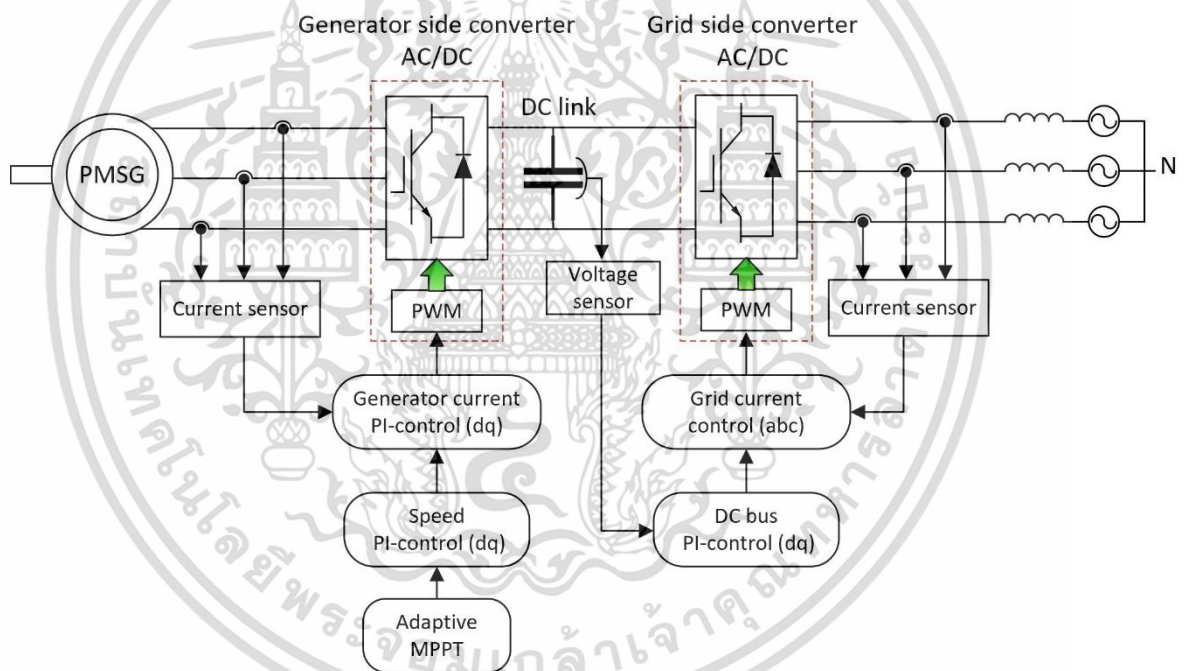
การผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังน้ำจะขึ้นอยู่กับความสูงของหัวน้ำและอัตราการไหล ในการทำงานแบบความเร็วรอบคงที่ความถี่คงที่ เมื่อความสูงของหัวน้ำและอัตราการไหลมีการเปลี่ยนแปลง กำลังการผลิตและประสิทธิภาพของกังหันก็จะลดลง หรือในกรณีที่เลวร้ายที่สุดคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่สามารถทำงานได้ คุณลักษณะนี้ส่งผลให้ช่วงของการทำงาน (ความสูงของส่วนหัวและอัตราการไหล) ของการผลิตไฟฟ้าพลังน้ำถูกจำกัด ในโรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบปรับความเร็วรอบได้ ความเร็วของกังหันสามารถปรับได้เพื่อให้ได้กำลังเชิงกลที่มากขึ้นจากกังหัน โดยการทำงานที่ความเร็วที่เหมาะสมตามสัดส่วนของอัตราการไหลและความสูงของหัวน้ำ เพราะฉะนั้นการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบปรับความเร็วรอบได้จะมีช่วงการทำงานที่กว้างและสามารถทำงานได้ที่กำลังผลิตสูงสุดตลอดเวลาแม้ว่าน้ำจะมีความผันผวน ส่งผลให้มีข้อได้เปรียบมากกว่าแบบความเร็วคงที่[1]

จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงมีแนวคิดนำเทคโนโลยีรุ่นใหม่มาปรับปรุงให้โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กมีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยสามารถผลิตไฟฟ้าได้ในย่านความสูงของหัวน้ำและอัตราการไหลของน้ำที่กว้างขึ้นและมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้น เพื่อลดต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าลง โดยทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยร่วมกับอาจารย์ที่ปรึกษาและผู้เขียนงานวิจัยได้เล็งเห็นประโยชน์ของการพัฒนา “คอนเวอร์เตอร์และระบบควบคุมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Generator : PMSG) ขนาดเล็กที่สามารถปรับความเร็วรอบได้” เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์นี้

โดยจะใช้ชุดคอนเวอร์เตอร์ชนิด Back to Back (B2B Converters) ที่จะทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขนาดและความถี่ไม่คงที่จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้สามารถขนานเข้ากับระบบไฟฟ้าหลักได้ ด้วยการพัฒนาชุดควบคุมที่เหมาะสมจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถผลิตไฟฟ้าได้ในย่านความสูงของหัวน้ำและอัตราการไหลของน้ำที่กว้างขึ้น และสามารถปรับความเร็วรอบของกังหัน

น้ำให้เหมาะสมกับความสูงของหัวน้ำและอัตราการไหลของน้ำซึ่งส่งผลให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของกังหันน้ำให้สูงขึ้นไปด้วย

จากรูปที่ 1.1 จะแสดงถึงไดอะแกรมของระบบผลิตไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรและปรับความเร็วรอบได้ ในโครงการ “พัฒนาคอนเวอร์เตอร์และชุดควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบปรับความเร็วรอบได้สำหรับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก” ซึ่งเป็นโครงการของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยร่วมกับอาจารย์ที่ปรึกษาและผู้เขียนงานวิจัย ซึ่งจะถูกติดตั้งไว้ที่เขื่อนแก่งกระจาน โดยในส่วนของงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงแค่ฝั่งของการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านคอนเวอร์เตอร์ถึงดีซีบัส ซึ่งจะไม่ว่ากล่าวถึงฝั่งคอนเวอร์เตอร์ของโครงข่ายไฟฟ้า โดยจะทำการจำลองในห้องแล็บด้วยแบบจำลองที่ถูกละเลยส่วนลงมา ซึ่งอัลกอริทึมการติดตามจุดกำลังผลิตไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking, MPPT) ก็จะถูกกล่าวถึงด้วยเช่นกัน เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าสามารถผลิตไฟฟ้าได้ในจุดสูงสุดตลอดเวลาแม้ว่าความสูงหัวน้ำและอัตราการไหลจะมีความผันผวนก็ตาม



รูปที่ 1.1 ชุดคอนเวอร์เตอร์ชนิด Back to Back (B2B Converters)

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาเทคโนโลยีคอนเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรขนาดเล็กแบบปรับความเร็วรอบได้
2. ศึกษาอัลกอริทึมการติดตามจุดกำลังผลิตไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking, MPPT)
3. ศึกษาการออกแบบระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรขนาดเล็กแบบปรับความเร็วรอบได้ผ่านโปรแกรม PSIM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ออกแบบและพัฒนาแบบจำลองโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแบบไม่ต่อเข้ากริดโดยใช้อัลกอริทึมการติดตามจุดกำลังผลิตไฟฟ้าสูงสุดมาใช้งานร่วม

1.3 เป้าหมายของการศึกษา

1. มีความรู้ความเข้าใจในเทคโนโลยีคอนเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรขนาดเล็กแบบปรับความเร็วรอบได้
2. มีความรู้ความเข้าใจในอัลกอริทึมการติดตามจุดกำลังผลิตไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking, MPPT)
3. สามารถออกแบบระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรขนาดเล็กแบบปรับความเร็วรอบได้ผ่านโปรแกรม PSIM ได้
4. แบบจำลองโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแบบไม่ต่อเข้ากริดโดยใช้อัลกอริทึมการติดตามจุดกำลังผลิตไฟฟ้าสูงสุดมาใช้งานร่วม

1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

สามารถนำความรู้ที่ได้ไปปรับใช้ในการออกแบบและพัฒนาคอนเวอร์เตอร์ในโครงการ “พัฒนาคอนเวอร์เตอร์และชุดควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบปรับความเร็วรอบได้สำหรับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก” และอาจจะนำไปต่อยอดสำหรับโครงการที่มีกำลังผลิตสูงกว่านี้ได้ในอนาคต

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาเทคโนโลยีคอนเวอร์เตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรขนาดเล็กและโปรแกรม PSIM เพื่อออกแบบวงจรควบคุมคอนเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรขนาดเล็กร่วมกับอัลกอริทึมการติดตามจุดกำลังผลิตไฟฟ้าสูงสุด เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าสามารถผลิตไฟฟ้าได้ในจุดสูงสุดตลอด
2. ศึกษาข้อมูลของกังหันน้ำที่ใช้ในโครงการ เพื่อนำมาจำลองการหมุนของกังหันน้ำในโปรแกรม PSIM และในแบบจำลองในห้องแล็บ
3. แบบจำลองโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแบบไม่ต่อเข้ากริด ซึ่งประกอบไปด้วยเซอร์โวมอเตอร์ 2 ตัว ขนาด 400 วัตต์ต่อคู่ปลั๊กกัน โดยจะจำลองเป็นกังหันน้ำที่ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรขนาดเล็ก ซึ่งอัลกอริทึมการติดตามจุดกำลังผลิตไฟฟ้าสูงสุดจะถูกนำมาใช้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

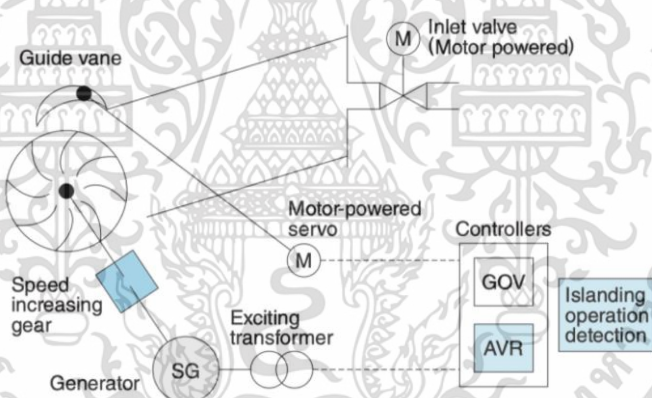
2.1 แนวความคิดการผลิตไฟฟ้าด้วยน้ำ

หลักการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบดั้งเดิมหรือแบบความเร็วคงที่ (fixed speed) คือ การเปลี่ยนพลังงานศักย์เป็นพลังงานจลน์ น้ำจะไหลผ่านเทอร์ไบน์เพื่อเป็นต้นกำลังให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากความสูงของหัวน้ำ (H) และอัตราการไหล (Q) มีการเปลี่ยนแปลงจึงมีระบบ Governor ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบของเทอร์ไบน์ให้คงที่สม่ำเสมอที่ 50 Hz (สำหรับประเทศไทย) และมีระบบ AVR ควบคุมและรักษาแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ หากพิจารณาตามโมเดลแบบเชิงเส้น จะได้ความสัมพันธ์ของกำลังดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

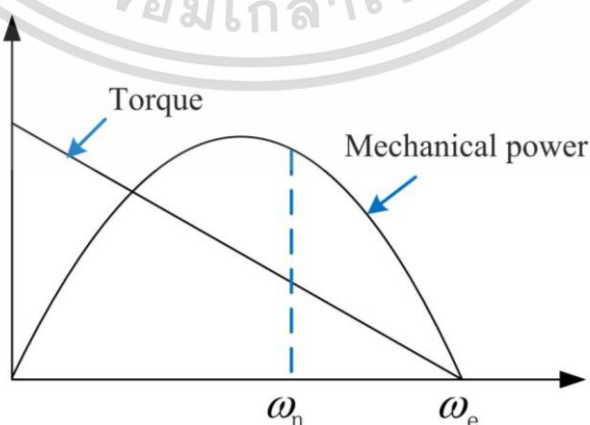
$$P_{\text{hydro}} = \rho g Q H \quad (2.1)$$

$$P_{\text{out}} = P_m = \eta P_{\text{hydro}} \quad (2.2)$$

โดยที่ η คือประสิทธิภาพของกังหันน้ำ ρ และ g เป็นค่าความหนาแน่นของน้ำและค่าความเร่งตามแรงดึงดูดของโลก ตามลำดับ



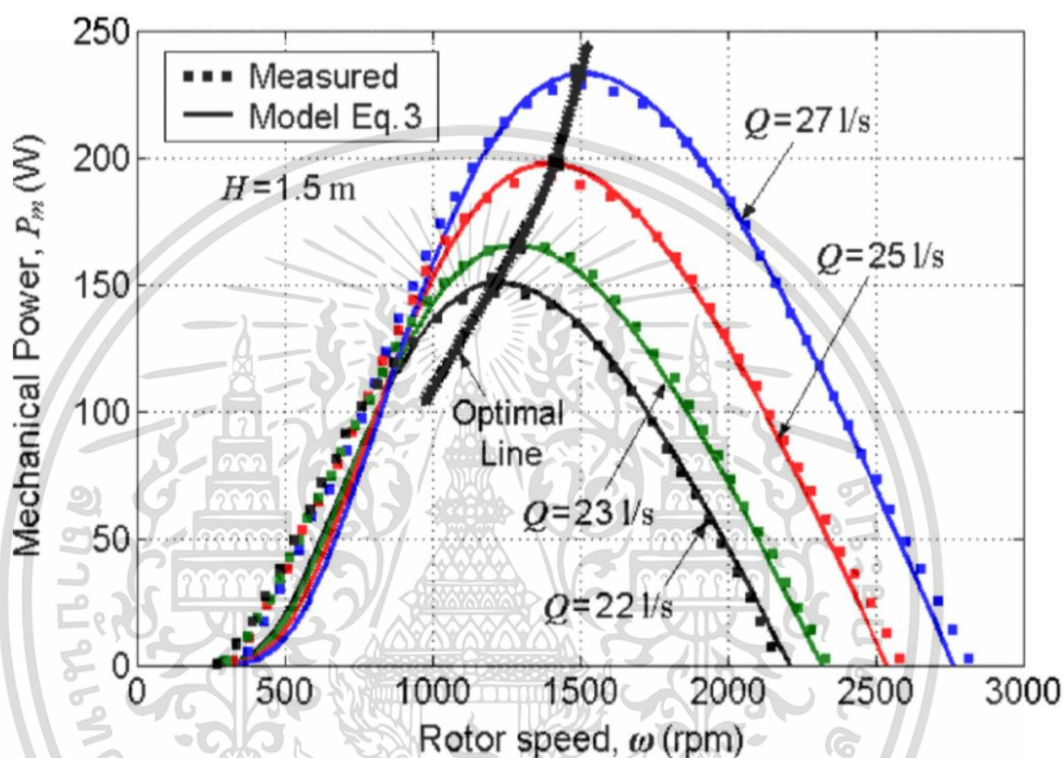
รูปที่ 2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังน้ำแบบความเร็วคงที่ [2]



รูปที่ 2.2 จุดการทำงานแบบความเร็วรอบคงที่ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยถ้าให้ระดับน้ำคงที่ แต่อัตราการไหลเปลี่ยนแปลง จุดการทำงานของกังหันน้ำจะเปลี่ยนไปดังรูปที่ 2.2 โดยในรูปที่ 2.2 จะแสดงถึงโมเดลของกังหันน้ำแบบไม่เชิงเส้นสองมิติ จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราการไหลเปลี่ยนไปแต่ต้องทำงานที่ความเร็วรอบเดิม กำลังทางกลที่ได้จะน้อยกว่ากำลังทางกลสูงสุดในแต่ละอัตราการไหล โดยกังหันส่วนใหญ่จะถูกออกแบบให้เหมาะสมกับอัตราการไหลย่านหนึ่ง ซึ่งถ้าถูกนำไปใช้งานในย่านอื่น ประสิทธิภาพของกังหันก็จะลดลงอย่างมากทำให้ไม่มีความเหมาะสมในการผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 การทำงานของกังหันที่อัตราการไหลต่างๆ [4]

โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กมักอยู่ในพื้นที่ที่ระดับหัวน้ำหรืออัตราการไหลมีความผันผวนสูง การผลิตไฟฟ้าด้วยน้ำในปัจจุบันจึงได้มีการนำเทคโนโลยีใหม่มาใช้ คือการผลิตไฟฟ้าแบบปรับความเร็วรอบได้ (variable speed) ทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากกำลังทางกลของกังหันน้ำได้สูงสุดที่ระดับหัวน้ำและอัตราการไหลต่างๆ ดังแสดงด้วยเส้น Optimal line ในรูปที่ 2.2 ผลการศึกษาใน [1] และ [5] พบว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังน้ำแบบปรับความเร็วรอบได้สามารถให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้ 3-11%

จากที่กล่าวมาจะสามารถสรุปได้เป็นตารางที่ 2.1 โดยจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างข้อดีและจุดอ่อนของการผลิตไฟฟ้าทั้ง 2 แบบ

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อดีและจุดอ่อนของการผลิตไฟฟ้าแบบความเร็วคงที่และแบบปรับความเร็วรอบได้

	ข้อดี	จุดอ่อน
แบบปรับความเร็วรอบได้	-ไม่ต้องมี governor -ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดทุกย่านการทำงาน -มีย่านการทำงานที่กว้างขึ้น (สามารถผลิตไฟฟ้าได้แม้อัตราการใช้หรือระดับหัวน้ำต่ำ)	-ต้นทุนสูง เนื่องจากต้องการคอนเวอร์เตอร์ที่มีกำลังเต็มเท่าพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
แบบความเร็วรอบคงที่	-ความเรียบง่ายและความน่าเชื่อถือ -ต้นทุนต่ำ	-ช่วงการทำงานแคบ -ประสิทธิภาพน้อย

2.2 การควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนเชิงโรตัสแบบแม่เหล็กถาวร

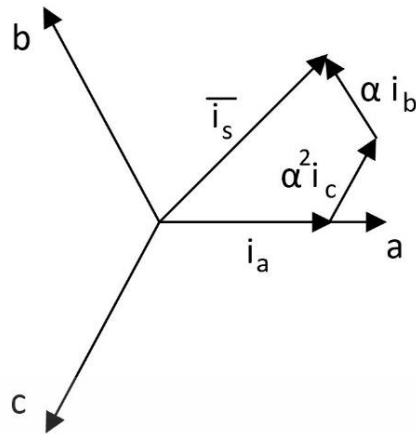
สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ Field Oriented Control หรือ FOC ในการควบคุมการทำงานของ PMSM โดยหลักการของ FOC คือการแปลงกระแสสเตเตอร์สามเฟสจากกรอบอ้างอิงแบบอยู่กับที่ไปเป็นกรอบอ้างอิงแบบหมุนสองแกน โดยที่แกน d อยู่ในแนวเดียวกับเวกเตอร์ฟลักซ์ของโรเตอร์ และแกน q ตั้งฉากกับแกน d

2.2.1 Space Vector

ในทางวิศวกรรมไฟฟ้า สเปซเวกเตอร์คือโครงสร้างทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แทนค่าชั่วขณะของระบบไฟฟ้าสามเฟส สเปซเวกเตอร์เป็นปริมาณเชิงซ้อนที่รวมแรงดันหรือกระแสสามเฟสเข้าด้วยกันเป็นปริมาณเวกเตอร์เดียวในพื้นที่สองมิติ โดยจะยกตัวอย่างระบบไฟฟ้าในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบเอชีสสามเฟส โดยกำหนดให้ i_a , i_b และ i_c คือกระแสสเตเตอร์ ณ ขณะใดขณะหนึ่ง โดยจะสามารถเขียนเวกเตอร์ของกระแสสเตเตอร์ได้ตามสมการที่ 2.3

$$\vec{i} = i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c \quad (2.3)$$

โดยที่ $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ และ $\alpha^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$ เป็นตัวโอเปอเรเตอร์ของตำแหน่งเวกเตอร์ และรูปที่ 2.4 แสดงสเปซเวกเตอร์เชิงซ้อนของกระแสทั้งสามเฟส

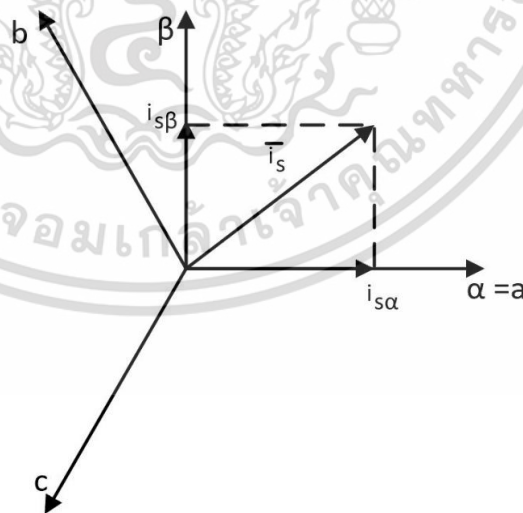


รูปที่ 2.4 space vector เชิงซ้อนของกระแสทั้งสามเฟส

โดยที่ a , b และ c คือแกนของระบบสามเฟสที่เป็นแบบรูปไซน์ ซึ่งในระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุนเอซีสามารถแปลงระบบสามเฟสดังกล่าวให้อยู่ในระบบพิกัดที่เป็นแบบสองแกน (สองตัวแปร) ที่ไม่ขึ้นกับเวลา โดยวิธีการแปลงดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ Clarke transformation และ Park transformation ซึ่งจะถูกรวบรวมในหัวข้อถัดไป

2.2.2 Clarke transformation

Clarke transformation คือเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในวิศวกรรมไฟฟ้าเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งสัญญาณไฟฟ้าเหล่านี้อาจแสดงถึงแรงดันหรือกระแสของระบบไฟฟ้าสามเฟส โดยจะทำการแปลงสัญญาณสามเฟสเป็นสัญญาณสองเฟสในกรอบอ้างอิงแบบอยู่กับที่ ซึ่งเรียกรอบอ้างอิงนี้ว่า $\alpha\beta$ โดยกำหนดให้แกน a กับแกน α อยู่ในตำแหน่งและทิศทางเดียวกัน ตามแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 space vector ของกระแสในกรอบ a b c และ $\alpha\beta$

สมการที่ 2.4 จะแสดงถึงความสัมพันธ์ของกระแสใน Clarke transformation โดยปริมาณสองเฟสบนแกน (α, β) ดังกล่าวยังคงขึ้นอยู่กับเวลาและความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.4.1)$$

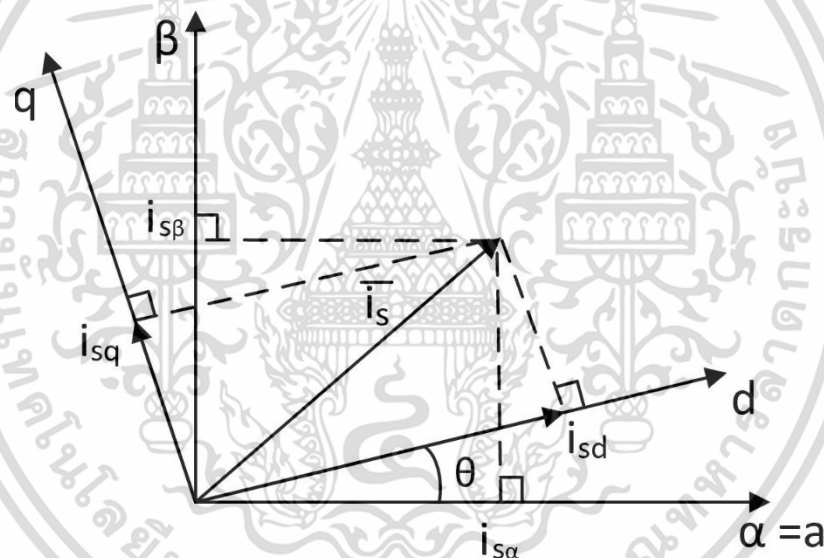
$$i_\alpha = i_a \quad (2.4.2)$$

$$i_\beta = \frac{i_b - i_c}{\sqrt{3}} \quad (2.4.3)$$

2.2.3 Park transformation

Park transformation จะแปลงสัญญาณสามเฟสเป็นสัญญาณสองเฟสในกรอบอ้างอิงแบบหมุน ซึ่งเรียกว่ากรอบ dq โดยให้แกน d นั้นอยู่ในแนวเดียวกันกับแนวเส้นแรงแม่เหล็กของโรเตอร์ และให้ แกน q ทำมุม 90° กับแกน d ซึ่งจะช่วยให้วิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้าและควบคุมพฤติกรรมของเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้ง่ายขึ้น

เนื่องจากโรเตอร์จะหมุนไปด้วยความเร็วเชิงมุมซึ่งเท่ากับความเร็วเชิงโครนัส หรือความเร็วของเส้นแรงแม่เหล็กหมุน ดังนั้นทำให้แกน dq นั้นหมุนไปตามความเร็วของโรเตอร์ด้วย รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงเวกเตอร์ของกระแสไฟฟ้าและความสัมพันธ์ระหว่างแกน dq กับ แกน (α, β)



รูปที่ 2.6 Space vector ในกรอบอ้างอิง dq และ (α, β)

กำหนดให้ θ คือตำแหน่งของเส้นแรงแม่เหล็กของโรเตอร์ องค์ประกอบของเวกเตอร์กระแสในกรอบ dq สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ 2.5

$$i_{sd} = i_{s\alpha} \cos\theta + i_{s\beta} \sin\theta \quad (2.5.1)$$

$$i_{sq} = -i_{s\alpha} \sin\theta + i_{s\beta} \cos\theta \quad (2.5.2)$$

ค่าปริมาณสามเฟสที่เป็นรูปไซน์ที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดตามเวลานั้น จะถูกเปลี่ยนมาเป็นปริมาณดีซี ดังนั้นจึงทำให้การควบคุมแรงบิดในแกน dq นั้นสามารถทำได้ง่ายขึ้น โดยองค์ประกอบของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งอยู่บนแกน d และองค์ประกอบของแรงบิดที่อยู่บนแกน q นั้นสามารถควบคุมแยกกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวใจสำคัญของ FOC อีกประการหนึ่งคือการหาตำแหน่งของเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ เพื่อนำไปใช้ในการ Park Transformation สำหรับในระบบควบคุม PMSM นั้นเนื่องจากว่า PMSM เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบซิงโครนัส ดังนั้นความเร็วของโรเตอร์จึงเท่ากับความเร็วของเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ ทำให้ค่าตำแหน่งของเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์สามารถที่จะวัดได้โดยตรงจากเซนเซอร์วัดตำแหน่ง หรือโดยการอินทิเกรตความเร็วของโรเตอร์ที่วัดได้

2.2.5 การควบคุมแบบกระแสแกน d เท่ากับศูนย์

สมการแรงบิดของแม่เหล็กไฟฟ้าที่ช่องอากาศ (Electromagnetic torque) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.6 [7]

$$T_e = \frac{3P}{2} [\psi_{PM} I_q + (L_d - L_q) I_d I_q] \quad (2.6)$$

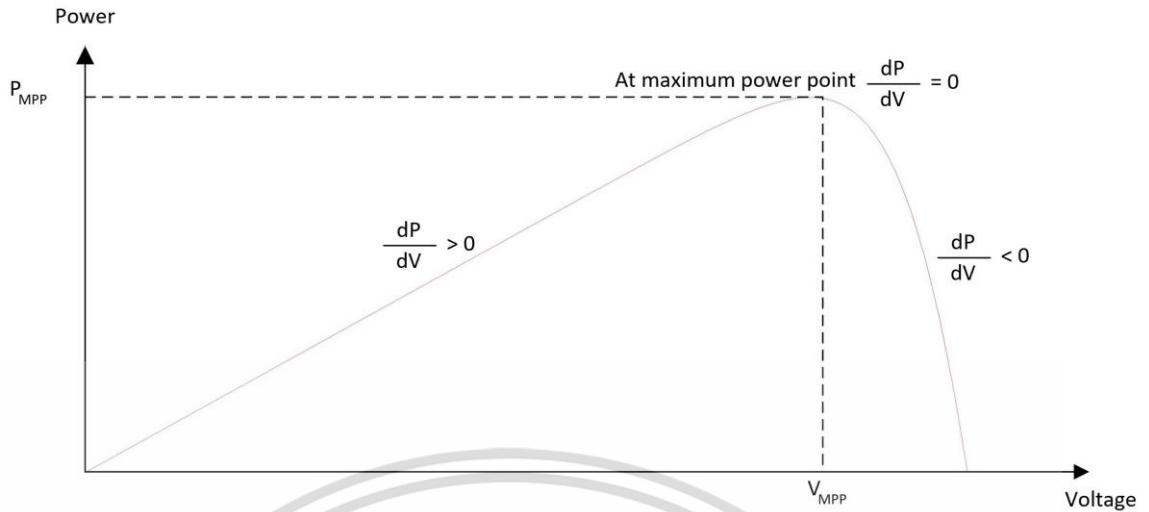
จากสมการข้างต้นพบว่าแรงบิดของ PMSM ประกอบไปด้วยสองส่วน ในส่วนแรกเป็นแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของแม่เหล็กถาวร (Magnet Excitation Torque) ซึ่งประกอบไปด้วยสองเทอมคือกระแสแกน q กับเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคดของแม่เหล็กถาวร ในขณะที่ส่วนที่สองเป็นแรงบิดที่เกิดขึ้นจากผลต่างของค่าความเหนี่ยวนำของแกน d และ q ซึ่งเรียกรวมกันในส่วนนี้ว่าแรงบิดรีลักแตนซ์ (Reluctance Torque) ถ้าแม่เหล็กถาวรถูกติดตั้งบนผิวหน้าด้านนอกของโรเตอร์ (SPM) และภายในส่วนที่เป็นเหล็กของโรเตอร์นั้นมีความสมมาตร พบว่าค่าความเหนี่ยวนำของแกน d และของแกน q นั้นจะมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน จึงทำให้แรงบิดจะเหลือแค่ส่วนของแม่เหล็กถาวรเท่านั้น ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสแกน d หรือ i_d นั้นไม่ได้ส่งผลอะไรกับแรงบิดของมอเตอร์ เพราะฉะนั้นจึงสามารถควบคุมกระแสแกน d ให้เท่ากับศูนย์ได้ เพื่อให้ได้ค่าของแรงบิดสูง ดังนั้นกระแสอ้างอิงของทั้งสองแกนสำหรับการทำ FOC สามารถแสดงได้ในสมการที่ 2.7

$$i_{qref} = \frac{T_{ref}}{\frac{3}{2} P \psi_{PM}} \quad (2.7.1)$$

$$i_{dref} = 0 \quad (2.7.2)$$

2.3 Incremental Conductance Method

Incremental conductance method คืออัลกอริทึมที่ใช้ในการหาจุดการทำงานที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT) โดยเทคนิคนี้นิยมใช้ในการผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ (PV) ซึ่งที่จุดที่ได้กำลังสูงสุด (MPP) จะได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังและแรงดันมีค่าเป็น 0 หลักการของอัลกอริทึมนี้คือจะตรวจสอบว่าจุดการทำงานอยู่ที่จุดสูงสุดหรือไม่ ถ้าจุดการทำงานอยู่ข้างซ้ายของ MPP ระบบควบคุมจะเพิ่มแรงดันของระบบขึ้นเพื่อให้เข้าใกล้จุด MPP มากขึ้น กลับกันถ้าจุดการทำงานอยู่ข้างขวาของ MPP ระบบควบคุมก็จะลดแรงดันของระบบขึ้นเพื่อให้เข้าใกล้จุด MPP มากขึ้น โดยรวมแล้ว วิธี Incremental Conductance เป็นอัลกอริทึม MPPT ที่นิยมใช้ในระบบ PV เนื่องจากมีความแม่นยำสูงและเวลาตอบสนองที่รวดเร็ว



รูปที่ 2.8 จุดการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์

$$\frac{dP}{dv} = \frac{d}{dv} (v \times i) \tag{2.8.1}$$

$$\frac{dP}{dv} = i + \frac{v di}{dv} \tag{2.8.2}$$

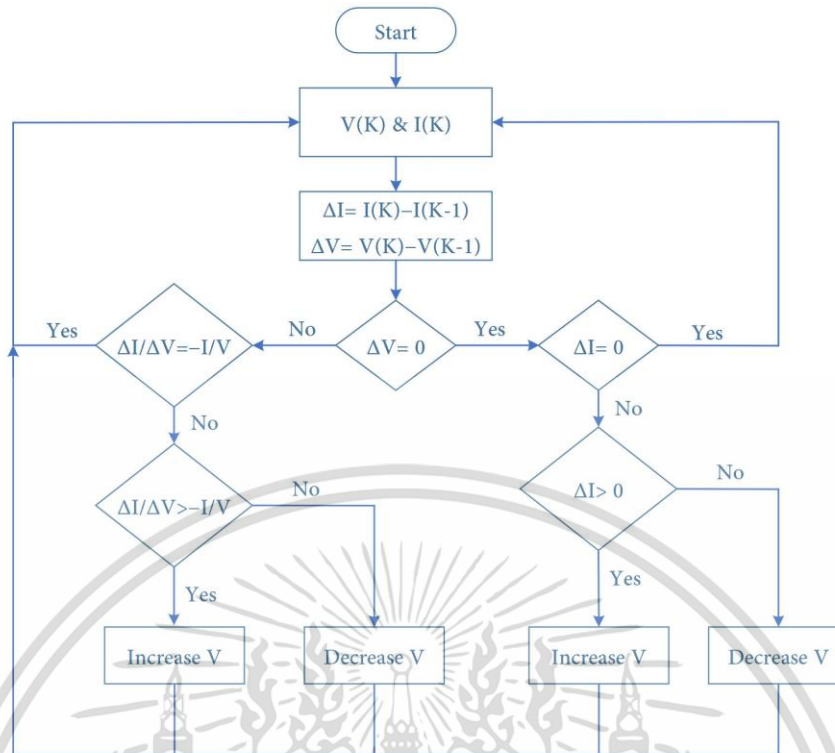
$$\frac{1}{v} \frac{dP}{dv} = \frac{i}{v} + \frac{di}{dv} \tag{2.8.3}$$

At maximum power point ; $\frac{dP}{dv} = 0$ (2.8.4)

$$\therefore 0 = \frac{i}{v} + \frac{di}{dv} \tag{2.8.5}$$

$$\frac{i}{v} = -\frac{\Delta i}{\Delta v} \text{ หรือ } -\frac{i}{v} = \frac{\Delta i}{\Delta v} \tag{2.8.6}$$

จากสมการที่ 2.8 $\frac{i}{v}$ จะถูกเรียกว่า conductance และ $\frac{\Delta i}{\Delta v}$ จะถูกเรียกว่า Incremental conductance จะสามารถออกแบบ flow chart ได้ตามรูปที่ 2.9 โดยจะทำการบวกรวมแรงดันและสังเกตค่า Incremental conductance



รูปที่ 2.9 flow chart การทำงานของอัลกอริทึม MPPT ในการผลิตไฟฟ้าด้วยแสง

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำเสนออัลกอริทึม MPPT ตามวิธี Incremental Conductance [8] โดยนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตไฟฟ้าด้วยน้ำ ในการผลิตไฟฟ้าของPMSGในสภาวะอยู่ตัว ค่าแรงบิดไฟฟ้าเชิงกลจะเป็นสัดส่วนกับกระแสในแกน q ภายใต้การควบคุมแบบ FOC ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ 2.9

$$P = K I_q N, \quad (2.9)$$

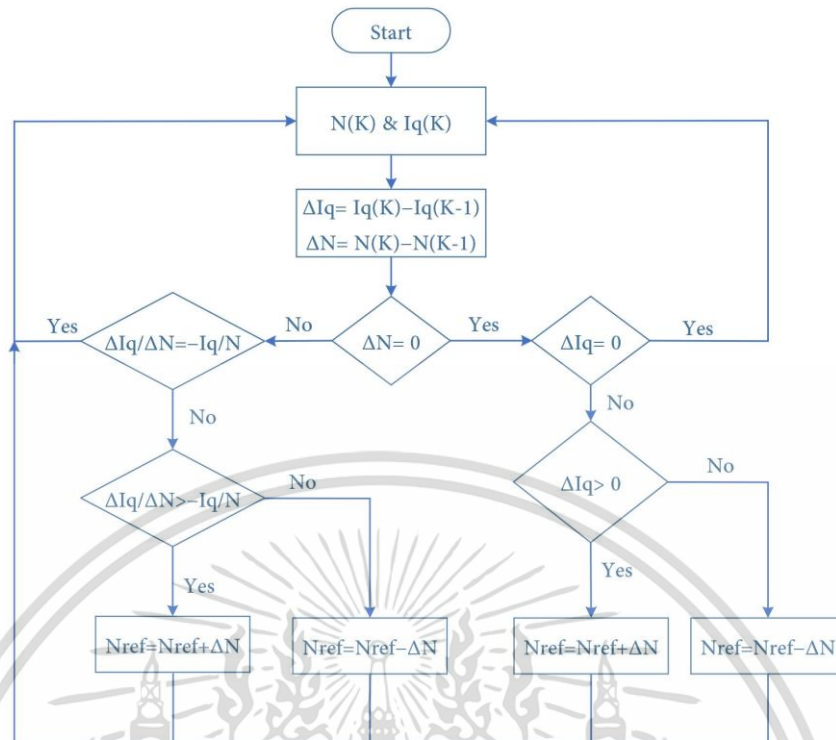
โดยที่ N คือความเร็วรอบในหน่วย rpm, $K = \frac{K_T 2\pi}{60}$, โดยที่ K_T คือ torque constant ซึ่งที่จุด maximum power point จะแสดงด้วยสมการที่ 2.10

$$\frac{dP}{dN} = 0 = I_q + \frac{NdI_q}{dN}, \quad (2.10)$$

หรือ

$$I_q dN + NdI_q = 0. \quad (2.11)$$

ผลลัพธ์ในสมการที่ 2.10 คล้ายกับวิธี Incremental Conductance ที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ โดยแทนที่แรงดันไฟฟ้าด้วยความเร็วรอบ การใช้สมการที่ 2.10 ทำให้สามารถใช้อัลกอริทึม MPPT สำหรับ PMSG ได้โดยไม่ต้องวัดกำลังไฟฟ้าโดยตรง แต่ใช้กระแสจากแกน q ซึ่งวัดได้จากโมเดลคณิตศาสตร์แทน จากรูปที่ 2.10 จะแสดงแผนผังการทำงานของอัลกอริทึม MPPT ในงานวิจัยนี้



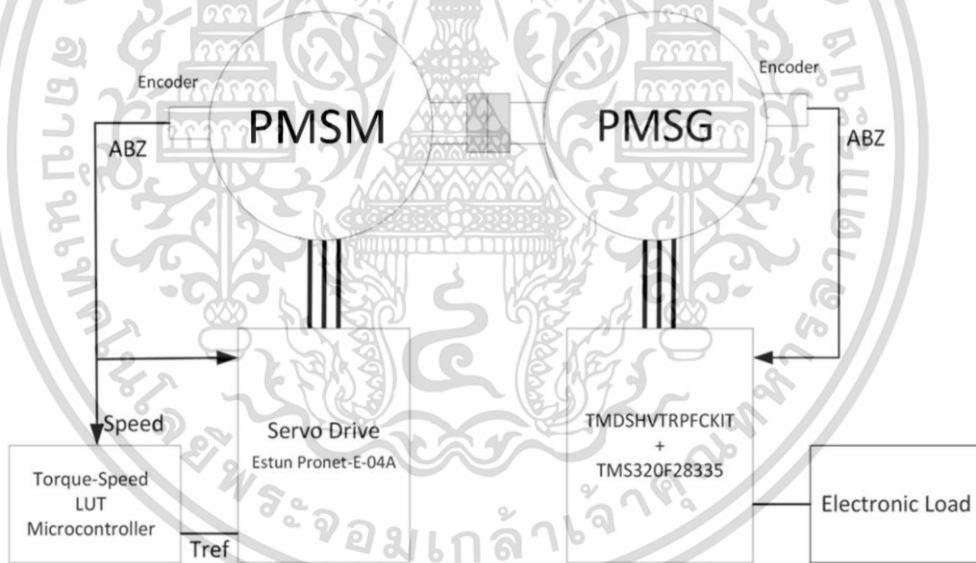
รูปที่ 2.10 แผนผังการทำงานของอัลกอริทึม MPPT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

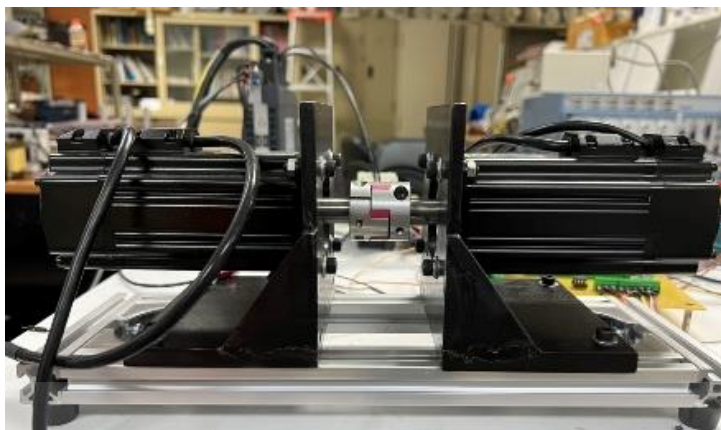
การจำลองโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก

ในงานวิจัยนี้จะทำการจำลองโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก โดยจำลองจากโรงไฟฟ้าในโครงการของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยขนาด 100 กิโลวัตต์ ที่อำเภอแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เซอร์โวมอเตอร์ขนาด 400 วัตต์ 2 ตัว ต่อเข้าด้วยกัน เพื่อจำลองเป็นกังหันน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมอเตอร์ที่จำลองเป็นกังหันน้ำจะถูกควบคุมด้วยเซอร์โวไดร์ฟในระบบควบคุมแรงบิด (Torque control) โดยใช้โปรไฟล์แรงบิดของกังหันน้ำที่ใช้งานจริงที่แก่งกระจาน ซึ่งจะใช้กราฟแรงบิดและความเร็วรอบ (Torque Speed Curve) ที่ได้จากการทดลองจริงในสภาวะต่างๆของน้ำที่จุดทดลองในแก่งกระจาน ส่วนมอเตอร์อีกตัวที่จำลองเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์สำเร็จรูปในระบบควบคุมความเร็ว (Speed control) โดยในรูปที่ 3.1 จะแสดงถึงแผนภาพแนวความคิดของการจำลองโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก ซึ่งอัลกอริทึม MPPT แบบ Incremental Conductance ก็จะถูกใช้ด้วยเช่นกัน เพื่อให้ระบบสามารถทำงานที่กำลังสูงสุดได้ตลอดเวลา แม้ว่าโปรไฟล์ของกังหันน้ำจะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม



รูปที่ 3.1 แผนภาพแนวความคิดของการจำลองโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 มอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

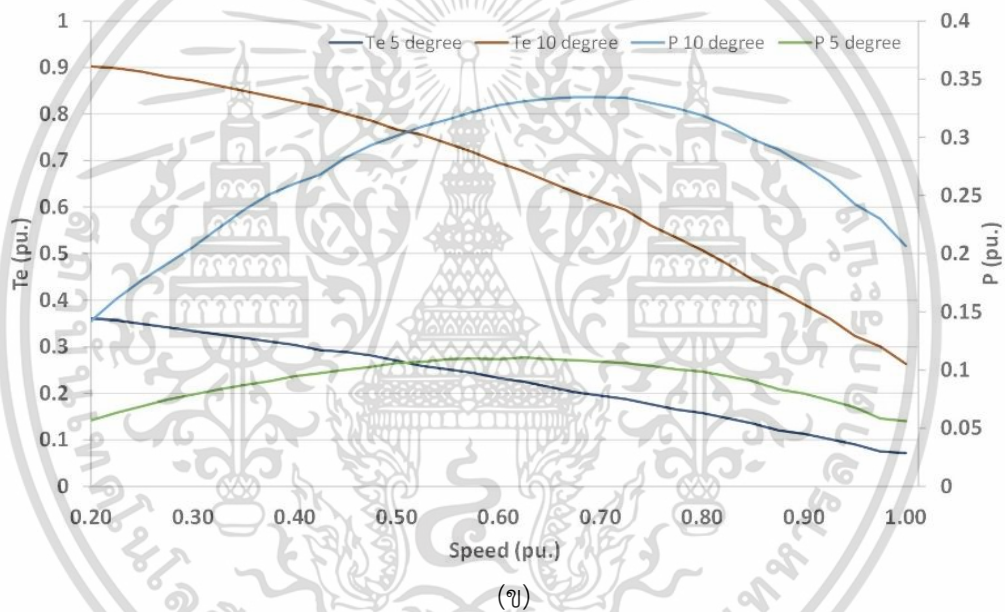
Name	Estun EMJ-04ABP22
Rated power	400 watts
Rated torque	1.27 Nm
Rated speed	3000 rpm
Back emf voltage (line to line)	31.63 V _{peak} /krpm
Poles	8
Stator resistance	4.7 ohms
Stator inductance	0.0133 Hr

3.1 ลักษณะเฉพาะของกังหันน้ำขนาดเล็กและการจำลองกังหันน้ำขนาดเล็ก

กังหันน้ำไหลแบบผสม (Mixed-flow turbine) ขนาด 100 kw ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ก) ถูกออกแบบและพัฒนาโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และได้นำไปติดตั้งที่จุดทดลองในอำเภอแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี รูปที่ 3.3 (ข) แสดงถึงกราฟแรงบิด-ความเร็วรอบของกังหันน้ำที่ได้จากการจำลองและยืนยันอีกทีด้วยการทดลอง โดยในการทดลองนี้จะเลือกมาใช้แค่ 2 โปรไฟล์ คือ ความสูงหัวน้ำ 30 เมตรที่มุมเปิดไกด์เวน 5 องศา และ 10 องศา



(ก)



(ข)

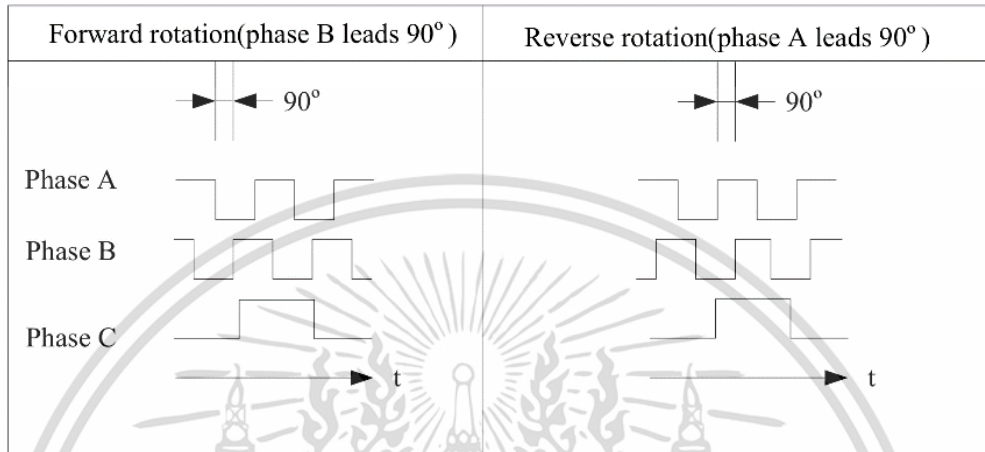
รูปที่ 3.3 กังหันน้ำไหลแบบผสมและกราฟแรงบิด-ความเร็วรอบ

ในการทดลอง จะใช้มอเตอร์แม่เหล็กถาวรแบบซิงโครนัสขนาด 400 วัตต์ จำลองลักษณะแรงบิดและความเร็วรอบของกังหันน้ำ โดยจะใช้เซอร์โวไดรฟ์เป็นตัวควบคุมมอเตอร์โดยควบคุมการทำงานแบบควบคุมแรงบิด (Torque control) ซึ่งจะควบคุมแรงบิดผ่านแรงดันอ้างอิง (Voltage reference) ของเซอร์โวไดรฟ์ ในการทดลองนี้จึงเลือกใช้ MCP4725 ซึ่งเป็นตัวแปลงสัญญาณทางดิจิทัลเป็นอนาล็อกขนาด 12 บิต เป็นตัวควบคุมแรงดันอ้างอิง โดยจะใช้ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่วัดได้จากสัญญาณเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) มาเป็นอินพุตให้ MCP4725 เพื่อจ่ายแรงดันไปควบคุมแรงบิด โดยใช้กราฟแรงบิดและความเร็วรอบจากรูปที่ 1 เป็นค่าอ้างอิง โดยจะเลือกใช้ Arduino Mega เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ในการคำนวณความเร็วรอบจากสัญญาณเอ็นโค้ดเดอร์และควบคุม MCP4725

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.4 แสดงถึงสัญญาณ encoder ของมอเตอร์ โดยจะใช้ฟังก์ชัน Interrupts ในการควบคุม Arduino Mega เพื่อนับจำนวนลูกคลื่นจากสัญญาณ encoder จากนั้นจึงนำจำนวนลูกคลื่นไปคำนวณต่อเป็นความเร็วรอบจากสมการที่ 3.1 โดยมอเตอร์ที่ใช้งานจะมี 2500 ลูกคลื่นต่อการหมุน 1 รอบ (pulse per revolution) [9]

$$\text{rotor speed(rpm)} = \frac{\text{number of pulse} \times 60}{\text{time interrupt(s)} \times \text{pulse per revolution}} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.4 สัญญาณ encoder ของมอเตอร์ [10]

```
volatile int IRQcount;
const int pin = 2;
const int pin_irq = 0; // Interrupt pin for Arduino Mega (interrupt 0)

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pin_irq), IRQcounter, RISING);
}

void IRQcounter() {
  IRQcount++;
}

void loop() {
  noInterrupts();
  int result = IRQcount;
  IRQcount = 0;
  interrupts();

  Serial.print(F("speed = "));
  Serial.println(result * 0.24);

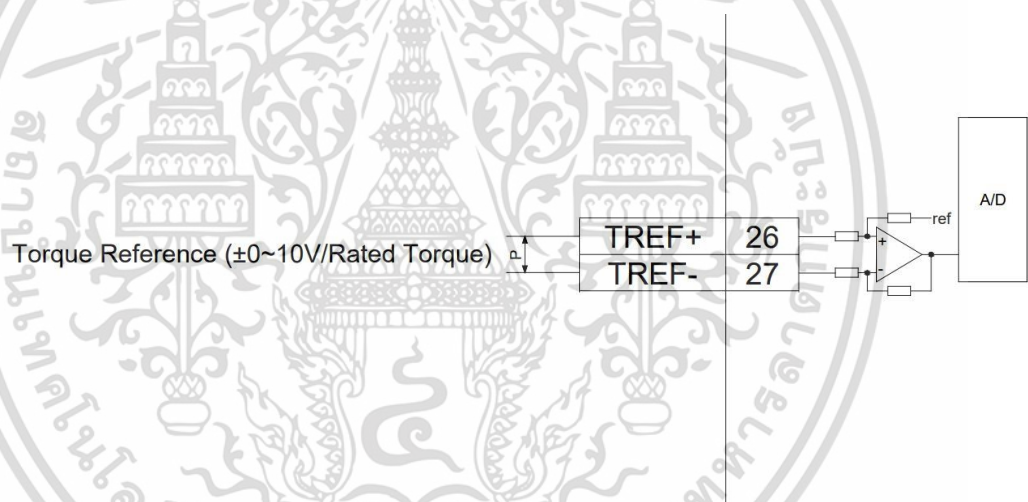
  delay(100);
}
```

รูปที่ 3.5 ตัวอย่างของการใช้ฟังก์ชัน interrupts ในการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์

รูปที่ 3.5 แสดงถึงการใช้ฟังก์ชัน interrupts ในการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยจากรูปจะเป็นการวัดขาขึ้นของลูกคลื่น (rising) โดยจะใช้เวลาของลูป interrupts เท่ากับ 100 ms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.6 แสดงถึงแรงดันอ้างอิงของเซอร์โวไดรฟ์ในการควบคุมแรงบิดในระบบ torque control โดยจากรูปจะเห็นได้ว่าต้องใช้แรงดันอ้างอิงในย่าน -10 ถึง 10 โวลต์ เพื่อควบคุมแรงบิดในย่าน -1 ถึง 1 เพอร์ยูนิต (per unit) เนื่องจากกังหันน้ำหมุนแค่ทิศเดียว จึงเลือกใช้แรงดันอ้างอิงแค่ในช่วง 0 ถึง 10 โวลต์ โดยจะเลือกใช้ mcp4725 ตัวแปลงสัญญาณทางดิจิตอลเป็นอนาล็อก (DAC) ขนาด 12 บิต เป็นตัวควบคุมแรงดัน จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่า mcp4725 มี Operating voltage (V_{DD}) ในช่วง 2.7 – 5.5 โวลต์ โดยในการทดลองนี้จะเลือกใช้เท่ากับ 5 โวลต์ ซึ่งแรงดันขาออกที่ได้จาก mcp4725 จะไม่มากกว่า 5 โวลต์ ซึ่งไม่เพียงพอต่อการใช้ควบคุมแรงดันอ้างอิง จึงต้องออกแบบวงจรขยายเพิ่มเพื่อให้ได้แรงดันอ้างอิง 10 โวลต์ตามต้องการ โดยจะออกแบบโดยใช้ mcp4725 2 ตัว ตัวแรกจะผ่านวงจรขยายเพื่อให้ได้เอาต์พุตออกมาในช่วง -5 ถึง 0 โวลต์ ส่วนตัวที่สองจะผ่านวงจรขยายเพื่อให้ได้เอาต์พุตออกมาในช่วง 5 ถึง 0 โวลต์ จากนั้นจะนำแรงดันขาออกมาต่อเข้ากับขา 26 และ 27 ซึ่งเมื่อนำมาหาผลต่าง (differential) แล้วก็จะได้แรงดันในช่วง 0 ถึง 10 โวลต์ ตามต้องการ



รูปที่ 3.6 แรงดันอ้างอิงของเซอร์โวไดรฟ์ [10]

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

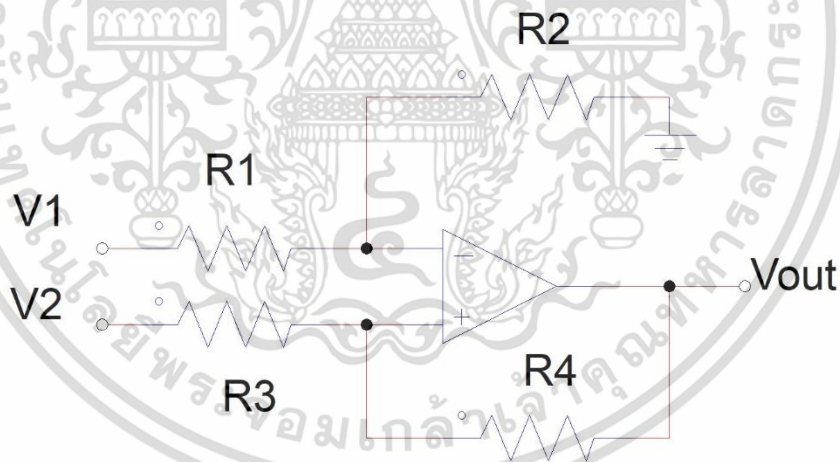
Electrical Specifications: Unless otherwise indicated, all parameters apply at $V_{DD} = +2.7V$ to $5.5V$, $V_{SS} = 0V$, $R_L = 5\text{ k}\Omega$ from V_{OUT} to V_{SS} , $C_L = 100\text{ pF}$, $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$. Typical values are at $+25^\circ\text{C}$.

Parameter	Sym	Min	Typ	Max	Units	Conditions
Power Requirements						
Operating Voltage	V_{DD}	2.7		5.5	V	
Supply Current	I_D	—	210	400	μA	Digital input grounded, output unloaded, code = 000h
Power-Down Current	I_{DDP}	—	0.06	2.0	μA	$V_{DD} = 5.5V$
Power-On-Reset Threshold	V_{POR}	—	2	—	V	
DC Accuracy						
Resolution	n	12	—	—	Bits	Code Range = 000h to FFFh
INL Error	INL	—	± 2	± 14.5	LSB	Note 1
DNL	DNL	-0.75	± 0.2	± 0.75	LSB	Note 1
Offset Error	V_{OS}		0.02	0.75	% of FSR	Code = 000h
Offset Error Drift	$\Delta V_{OS}/^\circ\text{C}$		± 1	—	ppm/ $^\circ\text{C}$	-45 $^\circ\text{C}$ to +25 $^\circ\text{C}$
			± 2	—	ppm/ $^\circ\text{C}$	+25 $^\circ\text{C}$ to +85 $^\circ\text{C}$
Gain Error	G_E	-2	-0.1	2	% of FSR	Code FFFh, not including offset error
Gain Error Drift	$\Delta G_E/^\circ\text{C}$	—	-3	—	ppm/ $^\circ\text{C}$	

Output Amplifier

รูปที่ 3.7 ข้อมูลของ mcp4725 [11]

จากรูปที่ 3.8 แสดงถึงวงจรขยายที่ใช้ในการออกแบบ โดยจะได้ค่าแรงดันขาออกเป็นไปตามสมการที่ 3.2



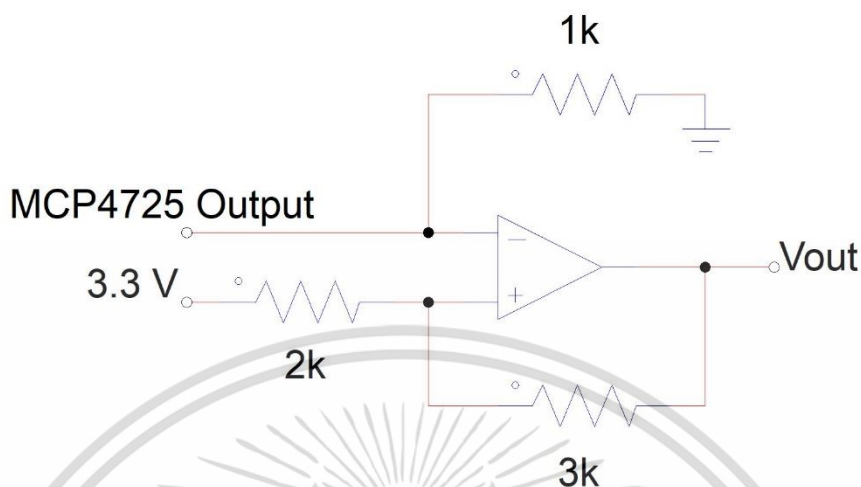
รูปที่ 3.8 วงจรขยาย

$$V_{out} = V_1 \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) - V_2 \times \frac{R_4}{R_3} \tag{3.2}$$

โดยกำหนดให้ V_1 เป็นแรงดันขาออกจาก mcp4725 V_2 คือแรงดันขนาด 3.3 โวลต์ และให้ R_1 มีค่าเป็น 0 เพราะฉะนั้นจะได้วงจรขยายตามรูปที่ 3.9 โดยให้ Operating voltage ของ mcp4725 เป็น 5 โวลต์ เพื่อให้ได้แรงดันขาออกมีค่าตามที่ต้องการ โดยจะใช้ทั้งหมด 2 วงจร วงจรแรก mcp4725 จะจ่ายแรงดันในช่วง 0 ถึง 2 โวลต์ จะได้แรงดันขาออกของวงจรขยายอยู่ในช่วง -5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

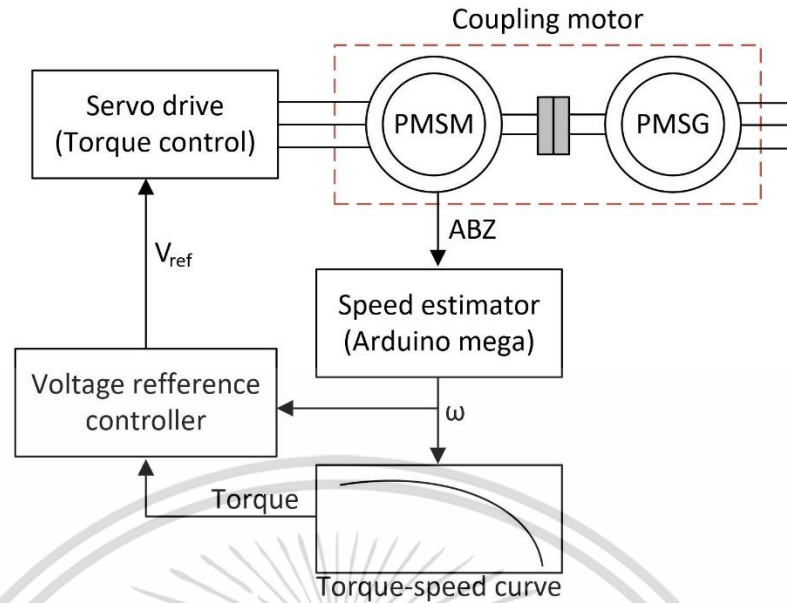
ถึง 0 โวลต์ วงจรที่สอง mcp4725 จะจ่ายแรงดันในช่วง 2 ถึง 4 โวลต์ จะได้แรงดันขาออกของ วงจรขยายอยู่ในช่วง 0 ถึง 5 โวลต์



รูปที่ 3.9 วงจรขยายที่ออกแบบได้

จากรูปที่ 3.10 จะแสดงถึงแนวความคิดในการจำลองกังหันน้ำ โดยจะนำความเร็วรอบที่วัดได้มาเป็นอินพุตในการจ่ายแรงดันเพื่อให้ได้แรงบิดตรงตามกราฟแรงบิดและความเร็วรอบของกังหันน้ำต้นแบบ โดยจะนำข้อมูลกราฟในรูปที่ 3.3 มาแปลงให้อยู่ในสเกลเดียวกับมอเตอร์ที่ใช้งาน จากนั้นจึงนำข้อมูลของแรงบิดและความเร็วรอบป้อนเข้า Arduino Mega ในรูปแบบ array เนื่องจากข้อมูลมีจำนวนมากจึงเก็บข้อมูล array ของแรงบิดและความเร็วรอบใน flash memory ที่มีเนื้อที่จัดเก็บข้อมูลมากกว่า SRAM จากนั้นจะเขียนโค้ดเพื่อให้ Arduino Mega ควบคุม mcp4725 ให้จ่ายแรงดันอ้างอิงเพื่อให้ได้แรงบิดตรงกับค่าความเร็วรอบใน array เพราะฉะนั้นมอเตอร์ตัวนี้ก็สามารถจำลองให้มีลักษณะของแรงบิดและความเร็วรอบเดียวกับกังหันน้ำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

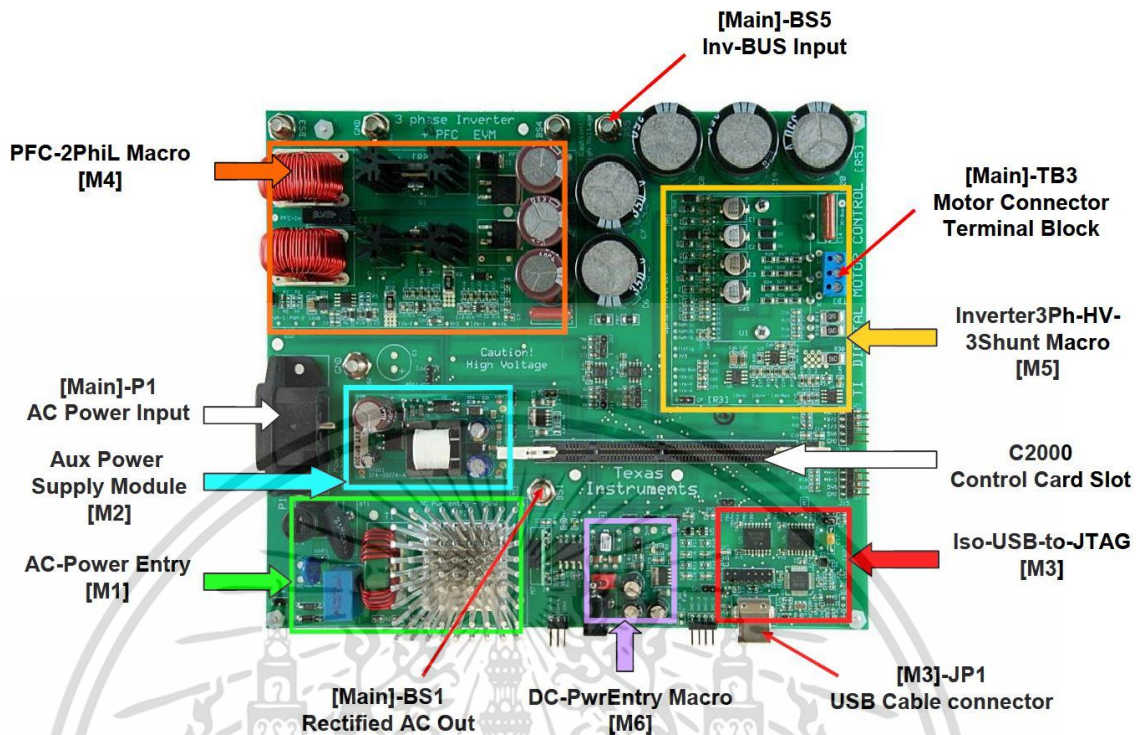


รูปที่ 3.10 แนวความคิดในการจำลองกังหันน้ำ

3.2 การจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์แบบแม่เหล็กถาวร

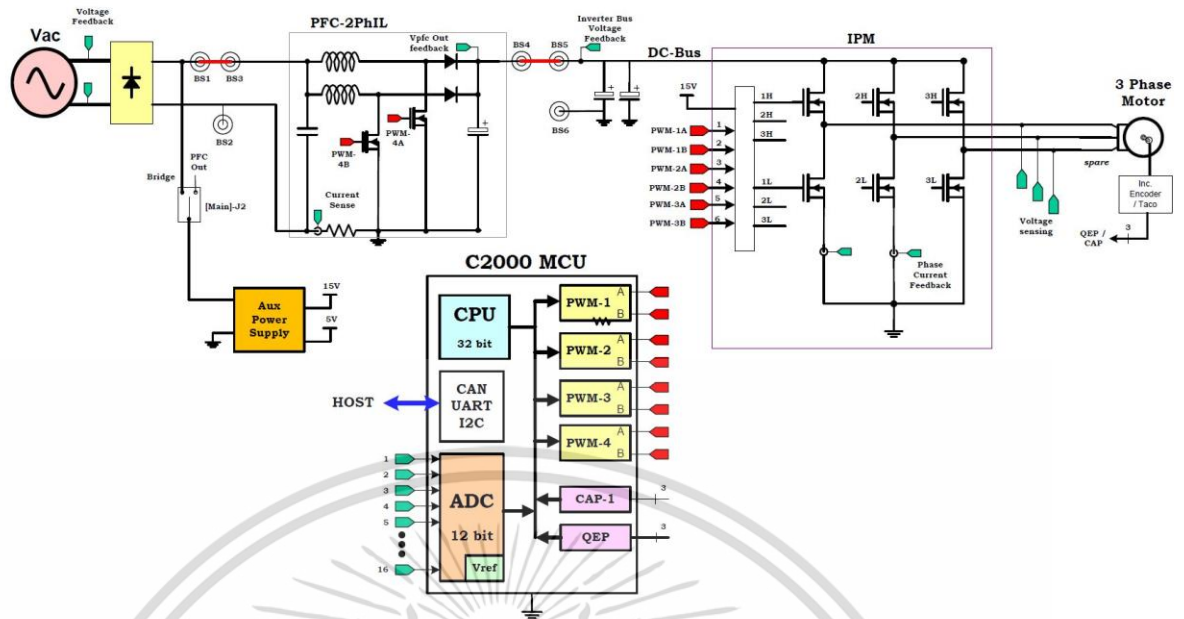
มอเตอร์แม่เหล็กถาวรแบบเชิงโรตอร์อีกตัวจะถูกคัปปลิง (Coupling) เข้ากับกังหันน้ำจำลอง โดยใช้ TMDSHVMTRPFCKIT และ TMS320C28335 สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์และการควบคุม ซึ่ง ดีซีบัส (DC bus) ของอินเวอร์เตอร์จะถูกต่อเข้ากับดีซีอิเล็กทรอนิกส์ไหลขนาด 200 วัตต์ เพื่อทำหน้าที่เป็นโหลดรับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรแบบเชิงโรตอร์จะถูกควบคุมแบบ speed control ด้วย FOC ตามที่ได้กล่าวมา โดยระบบควบคุมจะถูกออกแบบในโปรแกรม PSIM จากนั้นจึงสร้างออกมาเป็นซีโค้ดแล้วอัปโหลดเข้าบอร์ดควบคุม TMS320C28335 ของอินเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมการทำงานให้เป็นไปตามระบบที่ออกแบบไว้

3.2.1 TMDSHVMTRPFCKIT



รูปที่ 3.11 แผงวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board) ของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ [12]

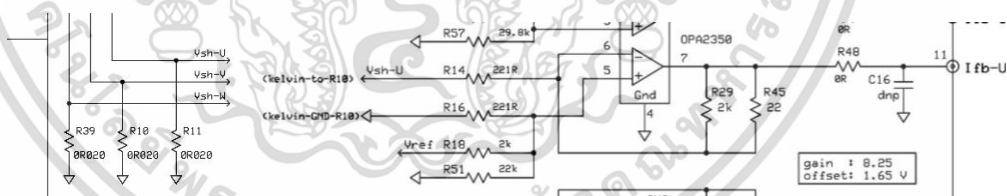
ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ชุดควบคุมมอเตอร์แรงดันสูงและชุดแก้ไขตัวประกอบกำลัง (HVCntrl+PFC) ในการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยเลือกใช้ TMDSHVMTRPFCKIT ที่ออกแบบและพัฒนาโดย Texas Instruments รูปที่ 3.11 จะแสดงถึงแผงวงจรของชุดควบคุมมอเตอร์ที่ใช้ แผ่นผังในรูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่ามีสัญญาณป้อนกลับหลายตัวที่วัดจากเอาต์พุตของตัวแปลงสัญญาณทางอนาล็อกเป็นดิจิตอล (ADC) ของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้สัญญาณป้อนกลับของกระแสสองเฟสเพื่อใช้ในการควบคุมแบบ FOC



รูปที่ 3.12 HV Motor Control and PFC Board Schematic Diagram with C2000 MCU [13]

ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถจับสัญญาณได้ตั้งแต่ 0 ถึง 3 V ดังนั้นวงจรวัดสัญญาณที่ฝังอยู่ในบอร์ด PCB ของชุดควบคุมจึงออกแบบให้ลดทอนสัญญาณแรงดันและกระแสให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.13 สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะเปลี่ยนเป็นปริมาณแรงดันไฟฟ้าซึ่งวัดผ่านตัวต้านทาน 20 มิลลิโอม ซึ่งจะได้ค่ากระแสย้อนกลับดังสมการที่ 3.3

$$I_{fb} = 0.02 \times 8.25 \times I_{sh} + 1.65 \tag{3.3}$$

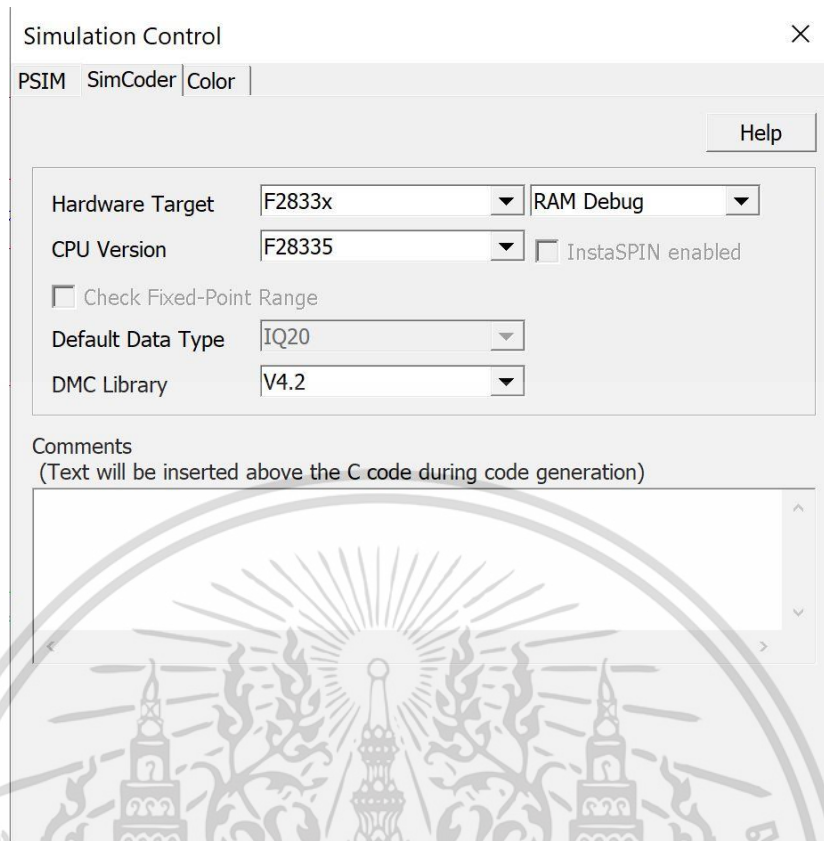


รูปที่ 3.13 วงจรวัดกระแสเฟสที่บอร์ดควบคุม

3.2.2 Software

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ PSIM เป็นอัลกอริทึมในการออกแบบและควบคุมระบบ โดยมี SimCoder เป็นตัวเลือกเสริมของซอฟต์แวร์ PSIM ซึ่งสามารถสร้าง C โค้ดจากวงจรควบคุมที่ออกแบบใน PSIM C โค้ดที่สร้างโดย SimCoder สามารถทำงานโดยตรงบนฮาร์ดแวร์เป้าหมายผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28335 ซึ่งเป็นการ์ดควบคุมงานที่ติดอยู่ในบอร์ดอินเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 3.14 จะแสดงถึงการตั้งค่าฮาร์ดแวร์เป้าหมายเพื่อใช้เครื่องมือ Simcoder

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 การกำหนดค่าฮาร์ดแวร์เพื่อใช้เครื่องมือ SimCoder



รูปที่ 3.15 การควบคุมอินเวอร์เตอร์ด้วย c code ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม PSIM

ระบบควบคุมจะถูกออกแบบในโปรแกรม PSIM จากนั้นจะสร้างเป็น c code แล้วอัปโหลดลง F28335 control card ที่ฝังอยู่ในบอร์ดอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้อินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้ตามระบบควบคุมที่ออกแบบ รูปที่ 3.15 แสดงถึงแนวความคิดการควบคุมอินเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม PSIM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

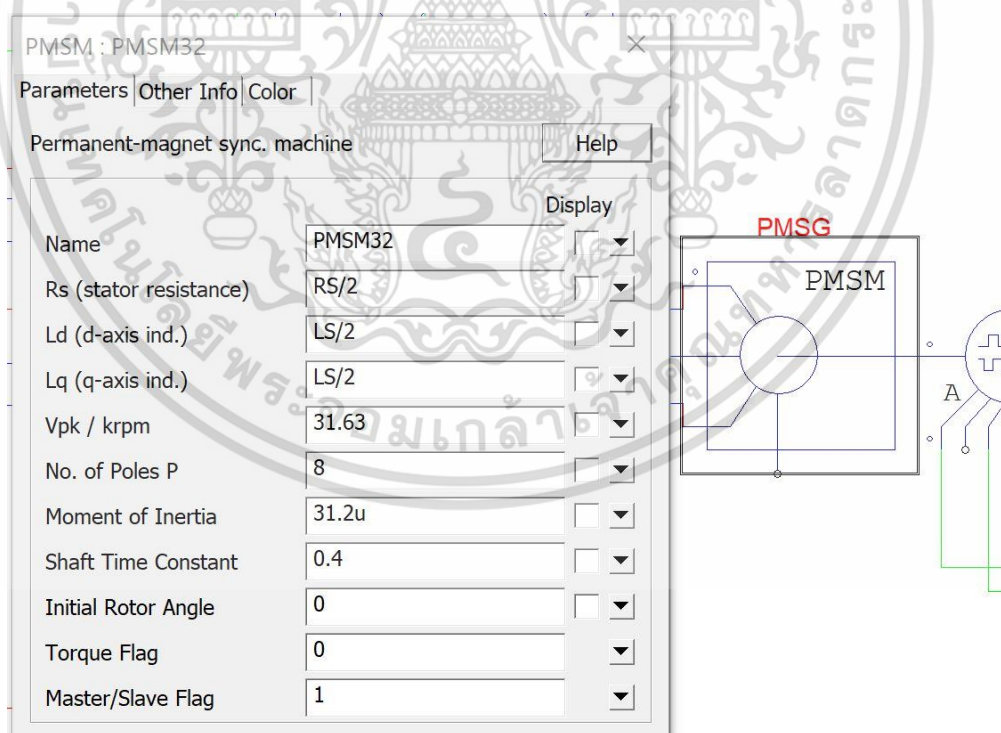
โดยในการออกแบบระบบจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลักสองส่วนคือ ส่วนของ Power และในส่วนของ Control โดยในแต่ละส่วนจะมีองค์ประกอบสำคัญดังต่อไปนี้

Power stage ประกอบไปด้วย

1. PMSM คือแบบจำลองของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบแม่เหล็กถาวร
2. Inverter ประกอบไปด้วยแบบจำลองของ IGBT และตัวเก็บประจุที่ตีซีบัส
3. Current sensor ทำหน้าที่ตรวจวัดกระแสสเตเตอร์ 3 เฟส เพื่อนำไปใช้ในการควบคุม FOC

Control stage ประกอบไปด้วย

1. Encoder ทำหน้าที่วัดความเร็วรอบโรเตอร์และหาตำแหน่งเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์
2. Speed controller เป็นลูควบคุมวงนอก ใช้สำหรับกำหนดค่าอ้างอิงความเร็วการหมุนของโรเตอร์
3. Current controller เป็นลูควบคุมวงใน เพื่อใช้ในการควบคุมกระแสของแกน d-q
4. PWM generator ใช้สำหรับสร้างสัญญาณ PWM เพื่อใช้ในการขับ IGBT
5. MPPT algorithm ใช้เพื่อติดตามจุดการทำงานที่ผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด

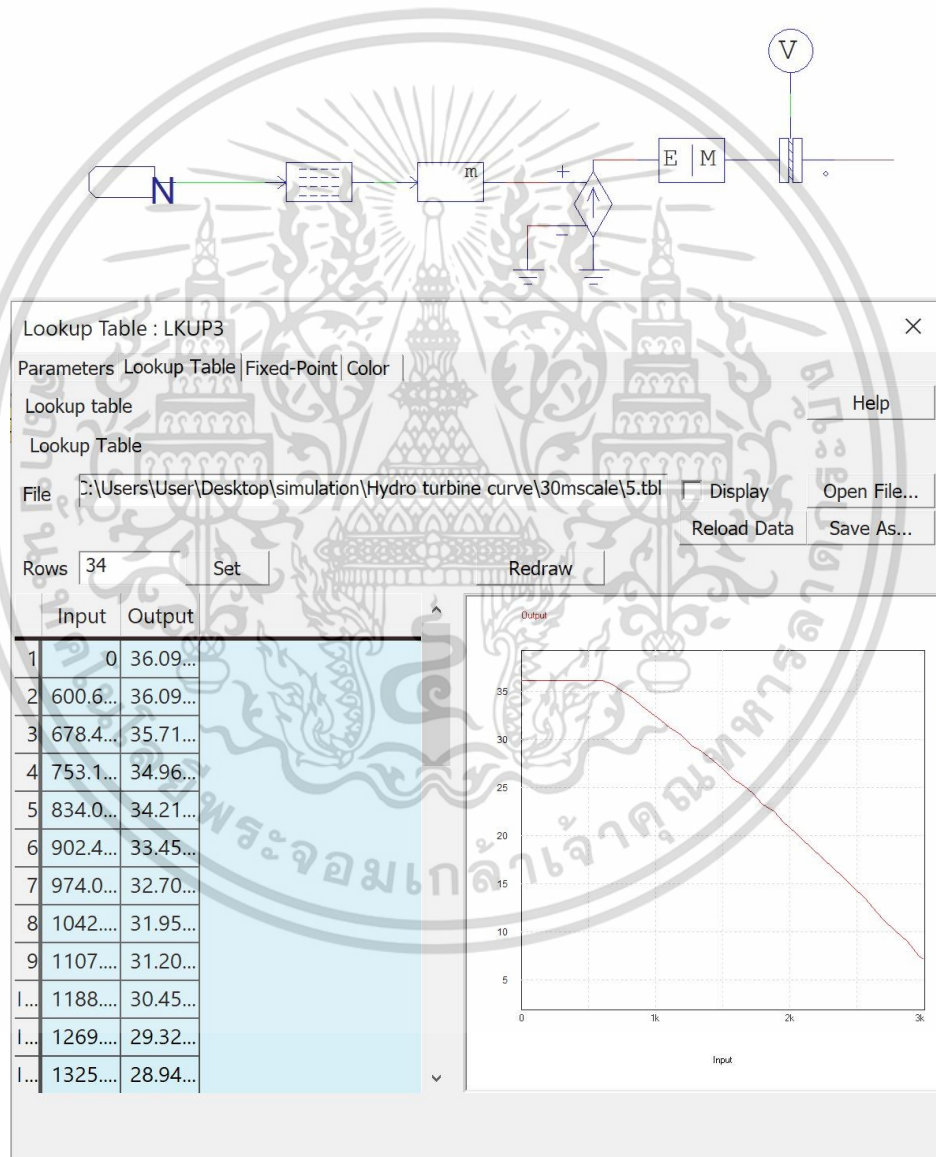


รูปที่ 3.16 PMSM ในโปรแกรม PSIM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

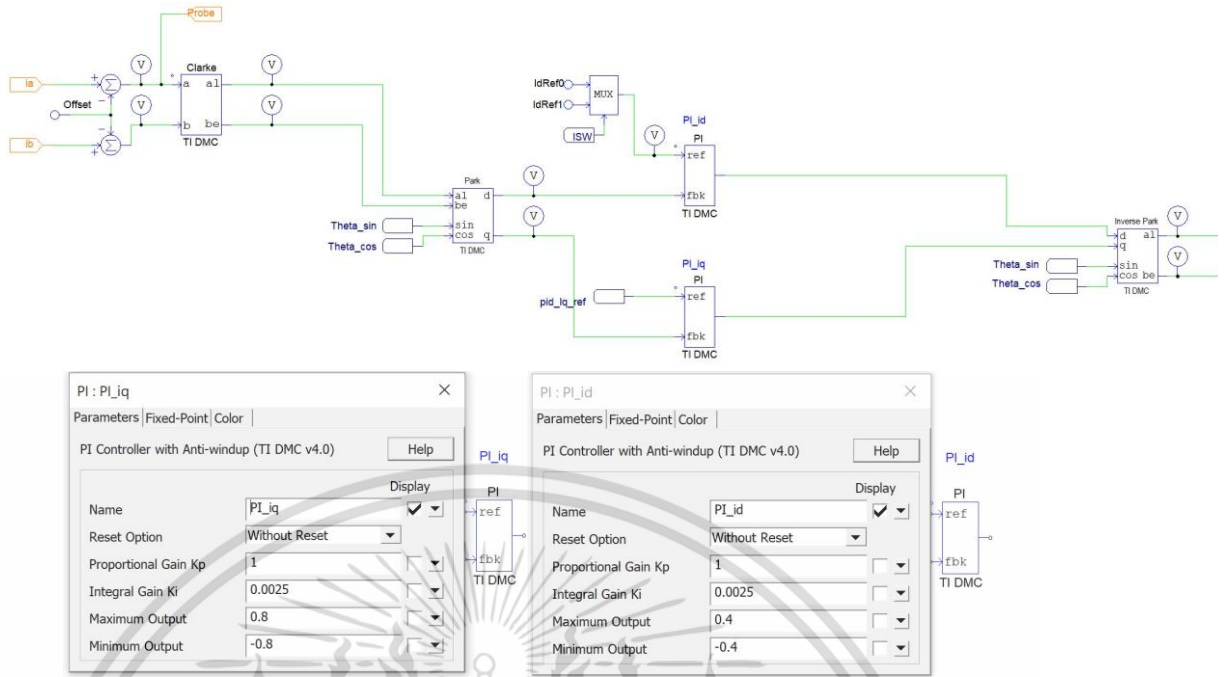
จากรูปที่ 3.16 แสดงถึง PMSM ในโปรแกรม PSIM โดยใส่ค่า parameters ต่างๆของมอเตอร์ตามตารางที่ 3.1

ในส่วนของการจำลองกังหันน้ำจะจำลองตามรูปที่ 3.17 โดยจะใช้ข้อมูลของกังหันน้ำที่ต้องการจำลอง (Torque-speed curve) ในรูปที่ 3.3 ใส่ใน Look up table ในโปรแกรม PSIM ด้านขาเข้าจะเป็นความเร็วรอบของโรเตอร์ (N) ด้านขาออกจะเป็นแรงบิด โดยจะผ่าน math function เพื่อค่าที่ได้อยู่ในสเกลเดียวกันกับมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง จากนั้นจะผ่านกล่องควบคุม Mechanical-electrical interface block ซึ่งทำหน้าที่แปลงค่าทางไฟฟ้า (เส้นสีแดง) เป็นค่าทางกล (เส้นสีน้ำตาล) ซึ่งก็จะได้ค่าเป็นแรงบิดทางกลเพื่อนำไปขับ PMSG ต่อไป



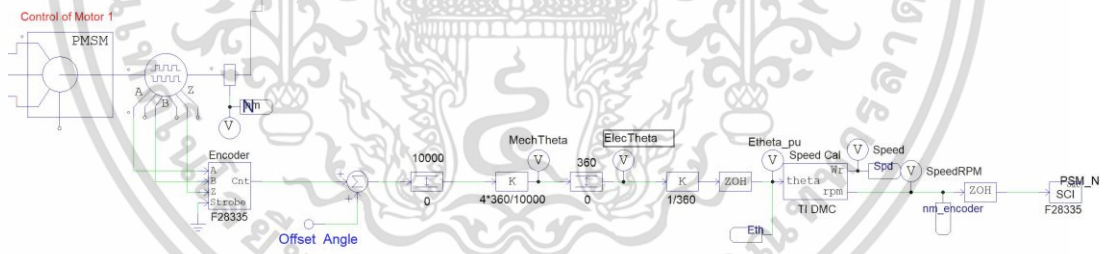
รูปที่ 3.17 การจำลองแรงบิดของกังหันน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 Current controller

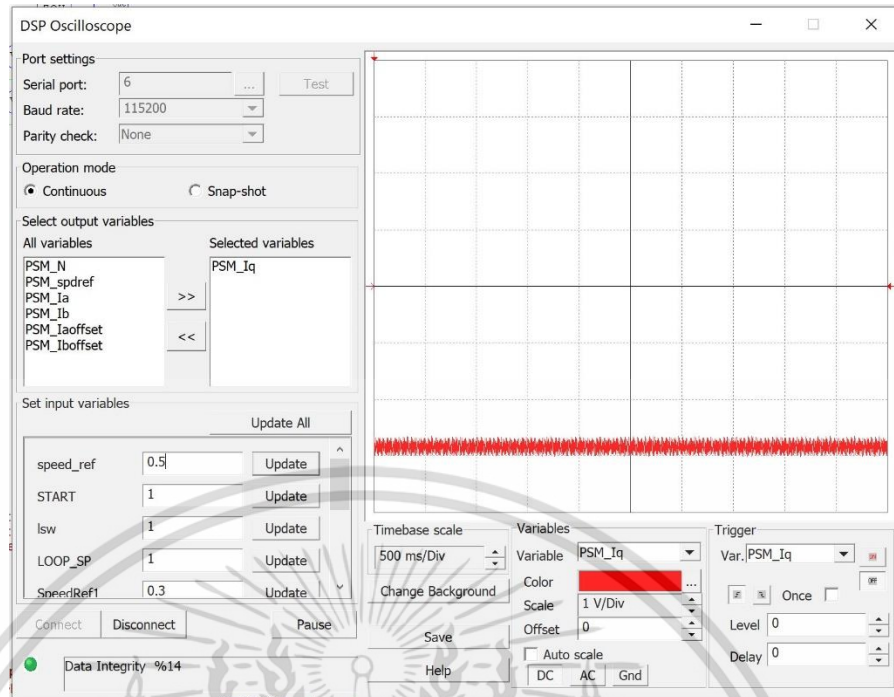
ในส่วนของการหาตำแหน่งโรเตอร์เพื่อใช้ในการแปลงแกน จะใช้สัญญาณจาก encoder มาคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 3.22 ซึ่งสามารถนำไปคำนวณต่อเป็นความเร็วรอบในหน่วยรอบต่อนาทีได้ โดยใช้กล่องควบคุมของ Texas instrument



รูปที่ 3.22 การหาตำแหน่งโรเตอร์และความเร็วรอบ

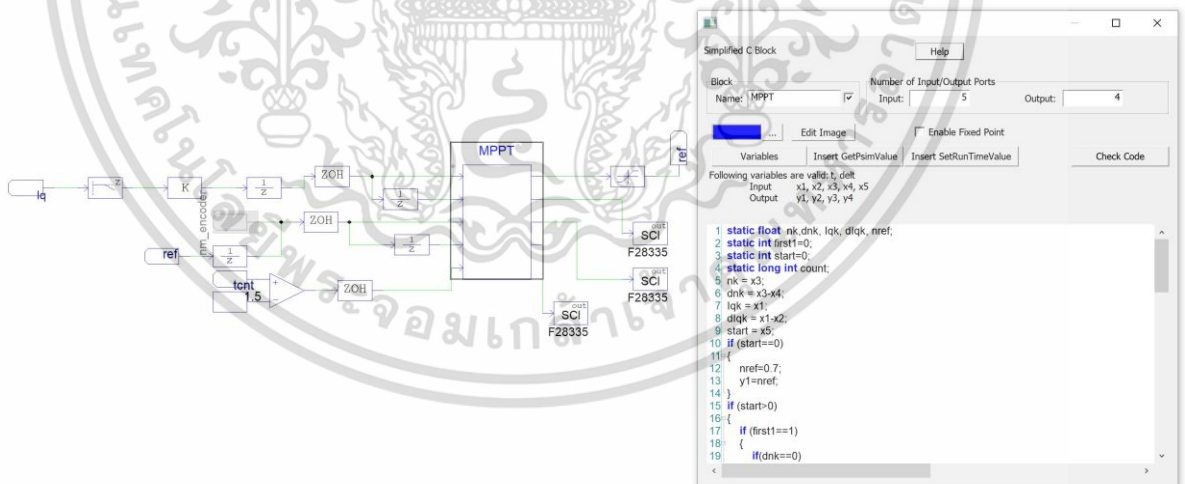
ระบบควบคุมที่ถูกออกแบบในโปรแกรมสามารถแปลงเป็นซีโค้ดเพื่อนำไปควบคุมอินเวอร์เตอร์ผ่าน control card F28335 ที่ฝังอยู่ในชุดควบคุมมอเตอร์ โดยสามารถสั่งการ (ป้อนค่าอ้างอิงต่างๆ) และอ่านค่าข้อมูลได้จาก dsp oscilloscope ในโปรแกรม PSIM จากรูปที่ 3.23 จะแสดงถึงหน้าต่าง dsp oscilloscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 หน้าต่าง dsp oscilloscope

โดยในส่วนของ MPPT algorithm จะออกแบบโดยเขียนภาษาซีให้เงื่อนไขตรงกับ flowchart ในรูปที่ 2.9 โดยจะใช้กล่องเครื่องมือ C block ในโปรแกรม PSIM จากรูปที่ 3.24 จะแสดงถึงการออกแบบ MPPT algorithm ซึ่งจะใช้กระแสไฟฟ้าในแกน α เป็นอินพุต และจะได้รับความเร็วรอบอ้างอิงเป็นเอาต์พุต

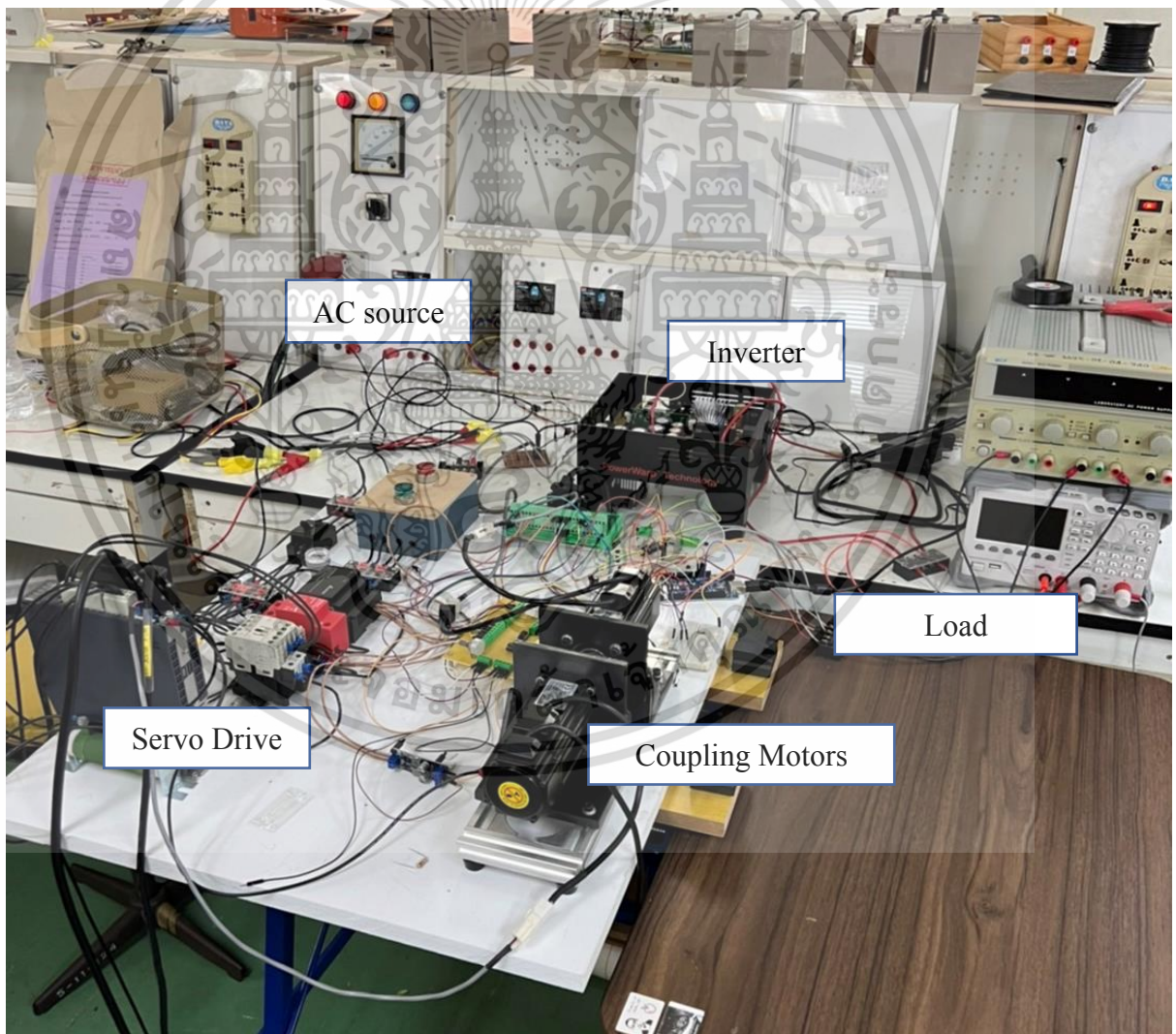


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

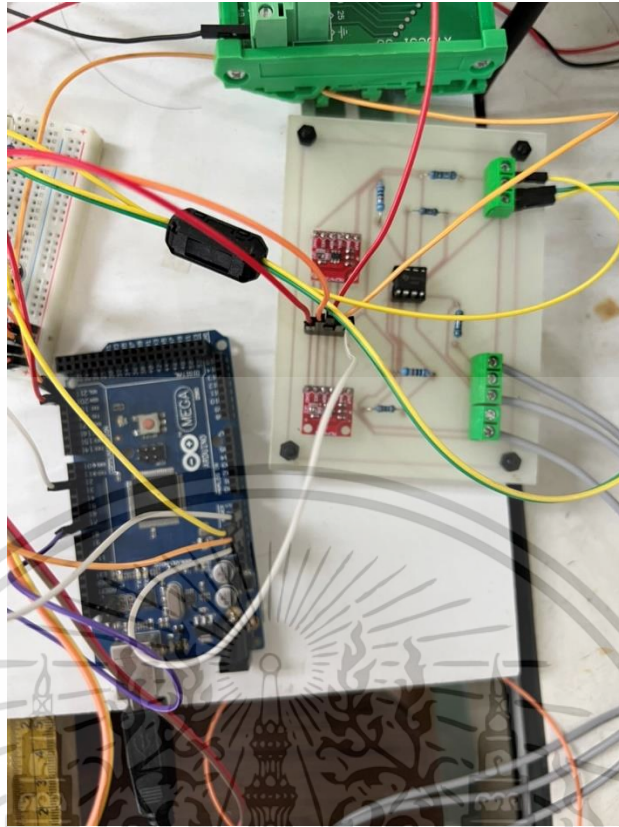
ผลการทดลอง

ในการทดลองนี้จะเป็นการจำลองโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแบบไม่เชื่อมต่อกริด โดยจะใช้มอเตอร์ 2 ตัวต่อกับปลั๊กกันเพื่อจำลองเป็นกังหันน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยตัวที่จำลองเป็นกังหันน้ำจะควบคุมด้วยเซอร์โวไดรฟ์ในโหมดควบคุมแรงบิด โดยจะใช้วงจรสร้างแรงดันอ้างอิงเพื่อควบคุมแรงบิดร่วมกับ Arduino mega ส่วนมอเตอร์ที่จำลองเป็นเครื่องกำเนิดจะควบคุมด้วยชุดอินเวอร์เตอร์สำเร็จรูปในโหมดควบคุมความเร็วรอบร่วมกับอัลกอริทึมการติดตามจุดกำลังผลิตไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking, MPPT) โดยจะต่อดีซีบัสของอินเวอร์เตอร์เข้ากับ DC electronic load ในโหมดแรงดันคงที่ 130 โวลต์เพื่อรองรับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.1-4.5

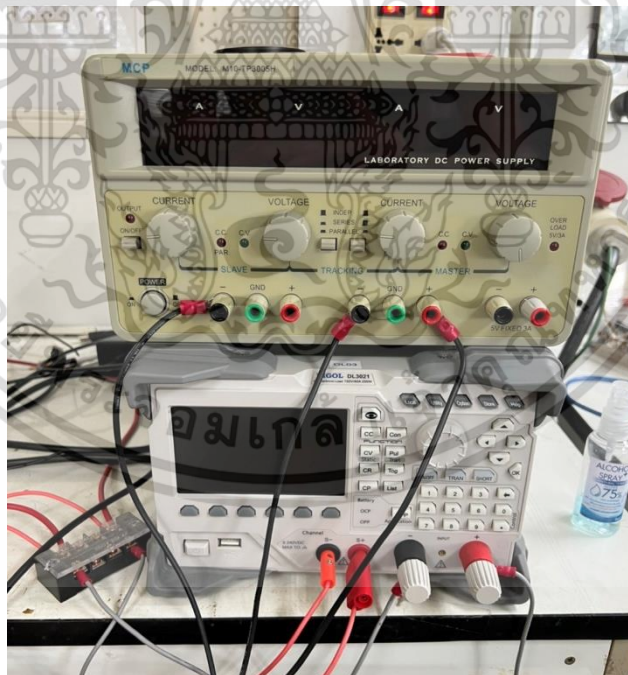


รูปที่ 4.1 ชุดอุปกรณ์ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

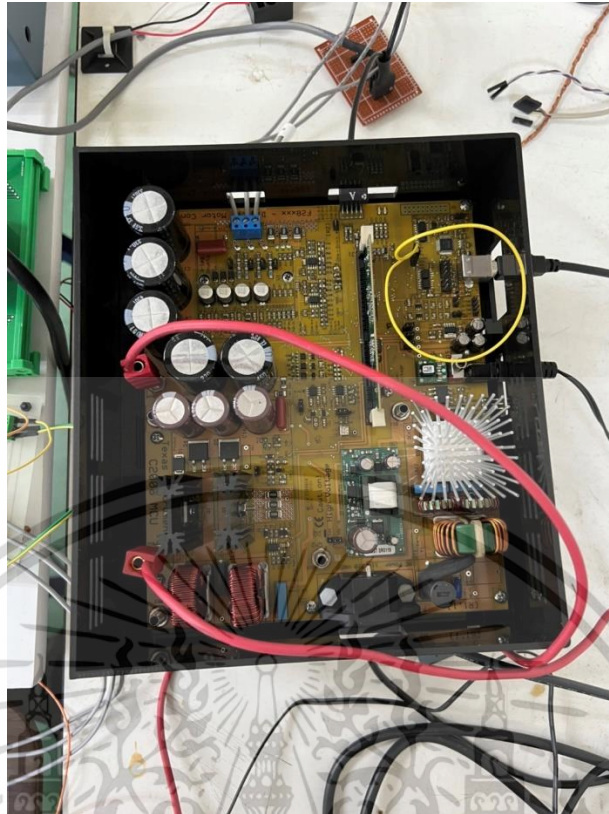


รูปที่ 4.2 วงจรสร้างแรงดันอ้างอิงเพื่อควบคุมแรงบิดและ Arduino mega

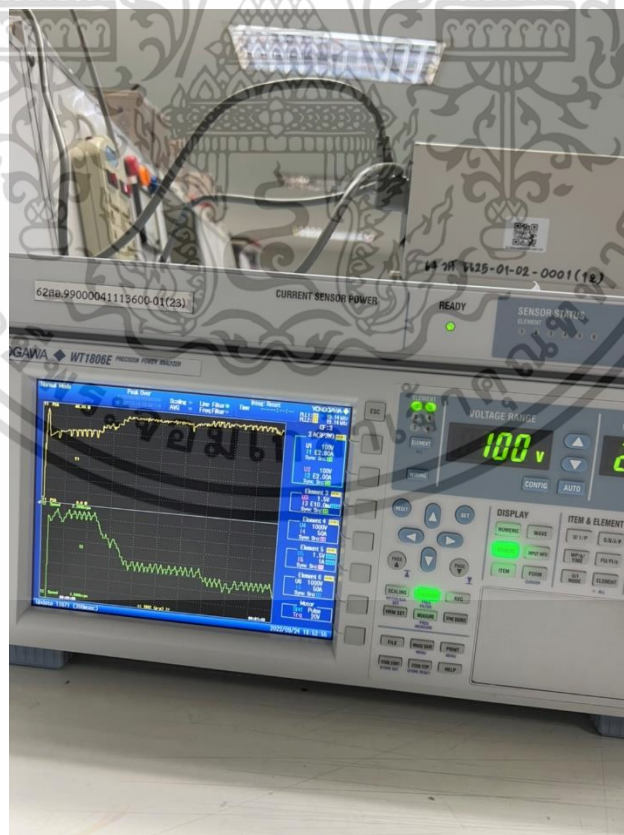


รูปที่ 4.3 DC supply (บน) และ DC electronic load (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 Inverter



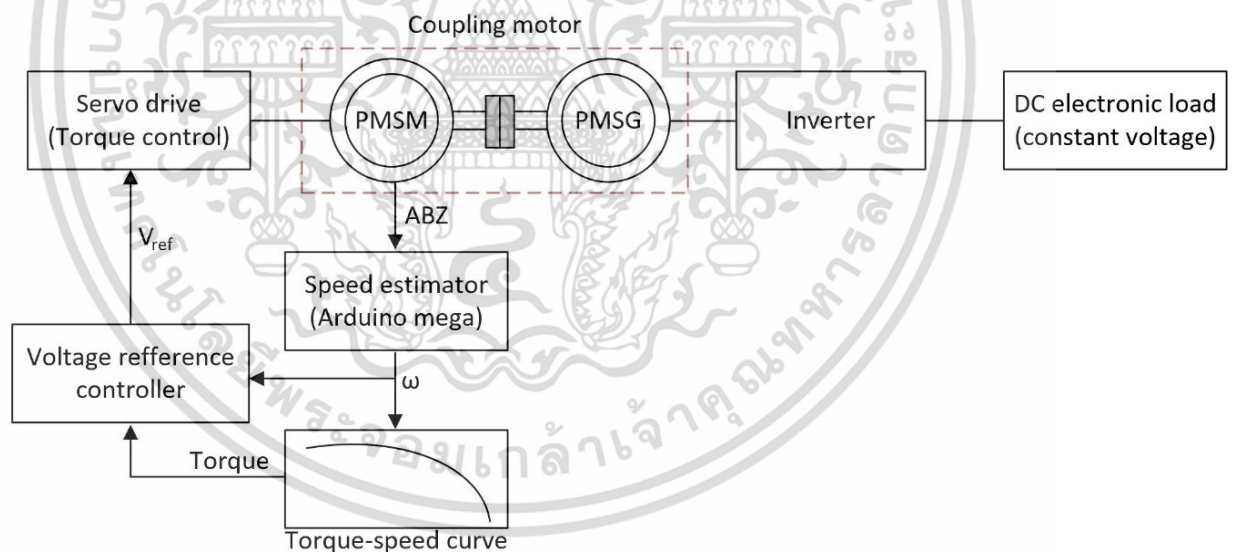
รูปที่ 4.5 Power analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในรูปที่ 4.1 จะแสดงถึงชุดทดลองซึ่งจะประกอบไปด้วยชุดคัปปลิ่งมอเตอร์ ชุดเซอร์โว ไดรฟ์ ชุดอินเวอร์เตอร์ (TMDSHVMTRPFCKIT) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ และชุด load รูปที่ 4.2 จะแสดงถึงวงจรสร้างแรงดันอ้างอิงเพื่อควบคุมแรงบิดให้เซอร์โวไดรฟ์ โดยจะใช้ mcp4725 ทำงานร่วมกับวงจรขยายสัญญาณ ควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega รูปที่ 4.3 แสดงถึง DC supply ที่ใช้จ่ายไฟเลี้ยงให้ตัวขยายสัญญาณ (Operational Amplifiers) ในวงจรสร้างแรงดันอ้างอิง โดยจะทำงานในโหมด series เพื่อจ่ายแรงดันขนาด ± 12 โวลต์ และ DC electronic load ใช้ต่อเข้ากับ dc bus ของอินเวอร์เตอร์ เพื่อรองรับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยจะเลือกให้ทำงานในโหมดแรงดันคงที่ (constant voltage) รูปที่ 4.4 จะแสดงถึงชุดอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ โดยจะใช้ Power analyzer ของ Yagogawa รุ่น WT1806E ในรูปที่ 4.5 เป็นตัวเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ซึ่งการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ตอน คือ ส่วนของการจำลองกังหันน้ำเพื่อศึกษาว่ามอเตอร์มีคุณสมบัติของแรงบิดและความเร็วรอบตรงกับกังหันน้ำต้นแบบที่ต้องการจำลองหรือไม่ และในส่วนของการจำลองโรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบไม่ต่อเข้ากริดเพื่อศึกษาว่าระบบควบคุมสามารถทำงานได้ตามค่าอ้างอิงที่ป้อนได้หรือไม่ และอัลกอริทึมการติดตามจุดกำลังผลิตไฟฟ้าสูงสุดสามารถติดตามการผลิตไฟฟ้าสูงสุดได้ตรงตามทฤษฎีหรือไม่

4.1 การจำลองกังหันน้ำ



รูปที่ 4.6 ไดอะแกรมของการศึกษาพฤติกรรมของกังหันน้ำจำลอง

จำลองการทำงานของกังหันน้ำในชุดทดลองเพื่อศึกษาว่ามีคุณสมบัติของแรงบิดและความเร็วรอบตรงกับกังหันน้ำต้นแบบที่ต้องการจำลองหรือไม่ โดยจะใช้ค่าอ้างอิงจากกราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วรอบในรูปที่ 3.3 การทดลองจะเริ่มจากการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์จากสัญญาณ encoder ด้วย Arduino mega จากนั้นจะนำค่าความเร็วรอบที่วัดได้เป็นอินพุตให้วงจรสร้างแรงดันอ้างอิงเพื่อนำไปควบคุมแรงบิดต่อไป โดยค่าแรงบิดและความเร็วรอบจะถูกป้อนเข้า

Arduino mega ในรูปแบบ array เพื่อให้เป็นค่าอ้างอิงในการสร้างแรงดันอ้างอิง จากนั้นมอเตอร์อีกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดจะถูกต่อเข้ากับอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานเป็นวงจรเรียงกระแส (rectifier) ซึ่งต่อดีซีบัสเข้ากับ DC electronic load ในโหมดแรงดันคงที่ ที่ 130 โวลต์ จากรูปที่ 4.6 จะแสดงถึงไดอะแกรมของการทดลองนี้

เมื่อเริ่มการทดลอง มอเตอร์จะทำงานที่ค่าพิกัดเนื่องจากโหลดยังไม่เกิดการดึงกระแส จากนั้นจะทำการลดแรงดันที่ DC electronic load ส่งผลให้เกิดการดึงกระแส มอเตอร์จะมีความเร็วรอบลดลงจากค่าพิกัด การทดลองจะดำเนินการโดยค่อยๆลดแรงดันที่ DC electronic load ลงเรื่อยๆ จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลของแรงบิดและความเร็วรอบที่จุดต่างๆ และเปรียบเทียบกับค่าของกังหันน้ำ โดยใช้หน่วย per unit

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองจำลองกังหันน้ำที่หัวน้ำ 30 เมตร และมุมเปิดไกวต์เวน 10 องศา

ค่าความเร็วรอบ	แรงบิดกังหันน้ำ	แรงบิดจากการทดลอง	%ความผิดพลาด
1	0.26	0.29	11.5385
0.9	0.39	0.37	5.1282
0.8	0.51	0.49	3.9216
0.7	0.61	0.59	3.2787
0.6	0.70	0.67	4.2857
0.5	0.77	0.73	5.1948
0.4	0.83	0.79	4.8193
0.3	0.87	0.83	4.5977
0.2	0.90	0.87	3.3333

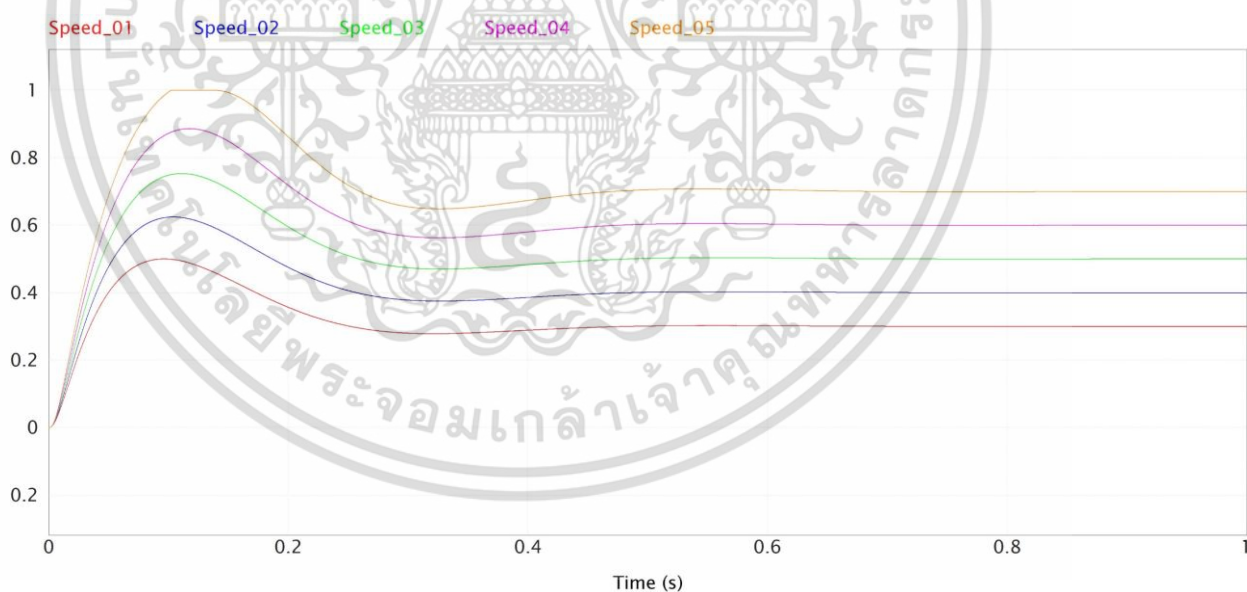
จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่าที่ได้มีความผิดพลาดค่อนข้างมาก โดยผู้ทดลองได้ทำการทดลองโดยไม่ต่อวงจรเข้ากับมอเตอร์ แต่ป้อนค่าความเร็วรอบป้อนกลับ (speed feedback) ผ่าน Serial Communication ใน Arduino Mega พบว่าค่าแรงดันอ้างอิงที่ได้เพื่อนำไปควบคุมแรงบิดมีค่าถูกต้อง แต่เมื่อต่อวงจรเข้ากับมอเตอร์แล้วใช้ค่าความเร็วรอบป้อนกลับของมอเตอร์แล้วค่าแรงดันอ้างอิงที่ได้มีความผิดพลาดเพิ่มขึ้น จึงสันนิษฐานว่าเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากมอเตอร์ จึงนำค่าเอาท์พุทที่ได้จากวงจรสร้างแรงดันอ้างอิงผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ rc โดยเลือกใช้ตัวต้านทานขนาด 1000 โอห์ม และตัวเก็บประจุขนาด 10 ไมโครฟารัด ซึ่งจะมีค่าความถี่ตัดประมาณ 15.92 เฮิรตซ์ และต่อตัวเก็บประจุขนาด 0.001 ไมโครฟารัด เข้าที่ขาไฟเลี้ยงของตัวขยายสัญญาณ (Operational Amplifiers) ในวงจรสร้างแรงดันอ้างอิง โดยตารางที่ 4.2 จะแสดงถึงผลการทดลองหลังจากเพิ่มวงจรกรองความถี่ และตัวเก็บประจุที่ขาไฟเลี้ยงของตัวขยายสัญญาณ พบว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองจำลองกังหันน้ำที่หัวน้ำ 30 เมตร และมุมเปิดไกวด์เวน 10 องศา หลังจากเพิ่มวงจรกรองความถี่ และตัวเก็บประจุที่ขาไฟเลี้ยงของตัวขยายสัญญาณ

ค่าความเร็วรอบ	แรงบิดกังหันน้ำ	แรงบิดจากการทดลอง	%ความผิดพลาด
1	0.26	0.26	0
0.9	0.39	0.39	0
0.8	0.51	0.51	0
0.7	0.61	0.61	0
0.6	0.70	0.70	0
0.5	0.77	0.77	0
0.4	0.83	0.83	0
0.3	0.87	0.87	0
0.2	0.90	0.90	0

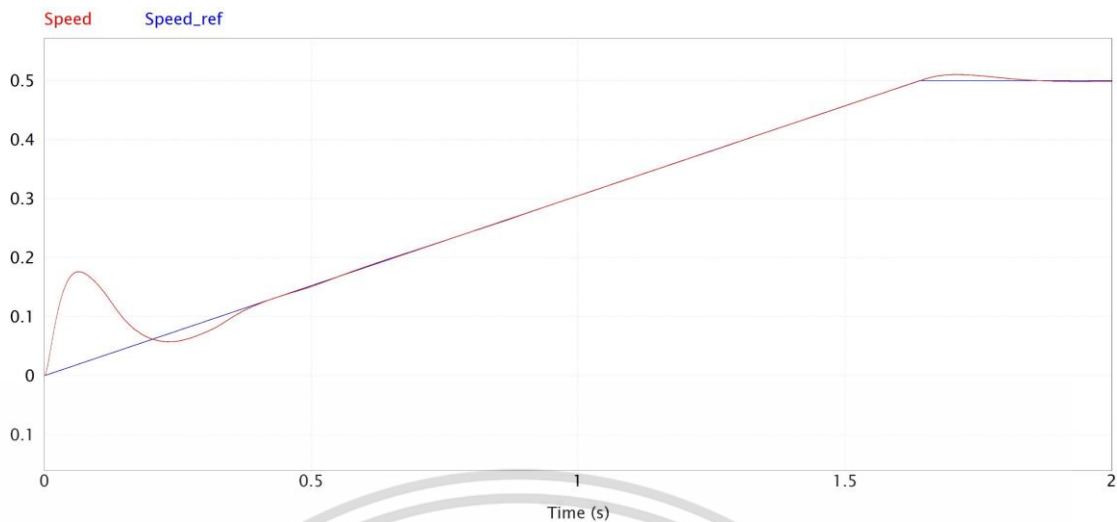
4.2 การจำลองโรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบไม่ต่อเข้ากริด

4.2.1 การทดลองในโปรแกรม PSIM



รูปที่ 4.7 แสดงความเร็วของ PMSM ที่ความเร็วอ้างอิง 0.3pu (สีแดง), 0.4pu (สีน้ำเงิน), 0.5pu (สีเขียว), 0.6pu (สีม่วง), และ 0.7pu (สีส้ม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



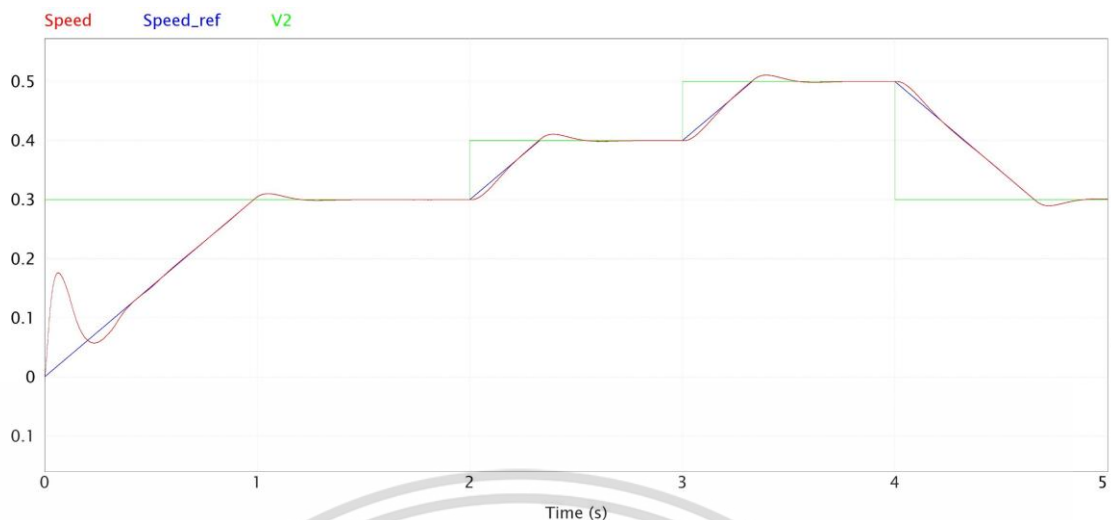
รูปที่ 4.9 แสดงความเร็วของ PMSM ที่ความเร็วอ้างอิง 0.5pu หลังจากดีเลย์ค่าความเร็วอ้างอิง

จากรูปที่ 4.10 เป็นการทดลองทำการ sweep ค่าความเร็วอ้างอิง ด้วยฟังก์ชัน Parameter Sweep ซึ่งจะปรับค่าความเร็วเริ่มต้นที่ 0.3 pu หรือ 900 rpm ไปสิ้นสุดที่ 0.8 pu หรือ 2400 rpm โดยให้ค่า interval เป็น 0.1 pu หรือ 300 rpm พบว่าระบบสามารถทำงานได้ตามค่าอ้างอิงที่ป้อน และมีค่า overshoot เพียงเล็กน้อยตอนเริ่มต้นทำงาน



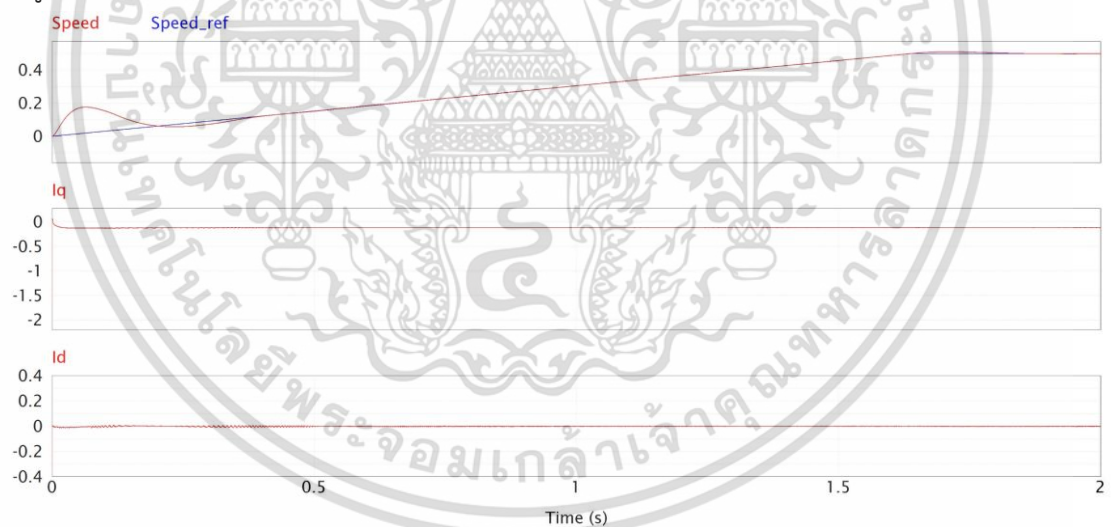
รูปที่ 4.10 แสดงความเร็วของ PMSM ที่ความเร็วอ้างอิง 0.3pu (สีแดง), 0.4pu (สีน้ำเงิน), 0.5pu (สีเขียว), 0.6pu (สีม่วง), 0.7pu (สีส้ม) และ 0.8pu (สีฟ้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงการตอบสนองเชิงพลวัตของความเร็วโรเตอร์ (สีแดง) เมื่อค่าความเร็วอ้างอิงเปลี่ยนแปลงแบบ step (สีเขียว)

จากรูปที่ 4.11 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาว่าชุดควบคุมนั้นสามารถที่จะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วอ้างอิงได้หรือไม่ โดยจะทำการจำลองในรูปแบบขั้นบันได (step) โดยพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนค่าความเร็วอ้างอิงเป็นขั้นบันได ความเร็วของโรเตอร์สามารถติดตามและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้



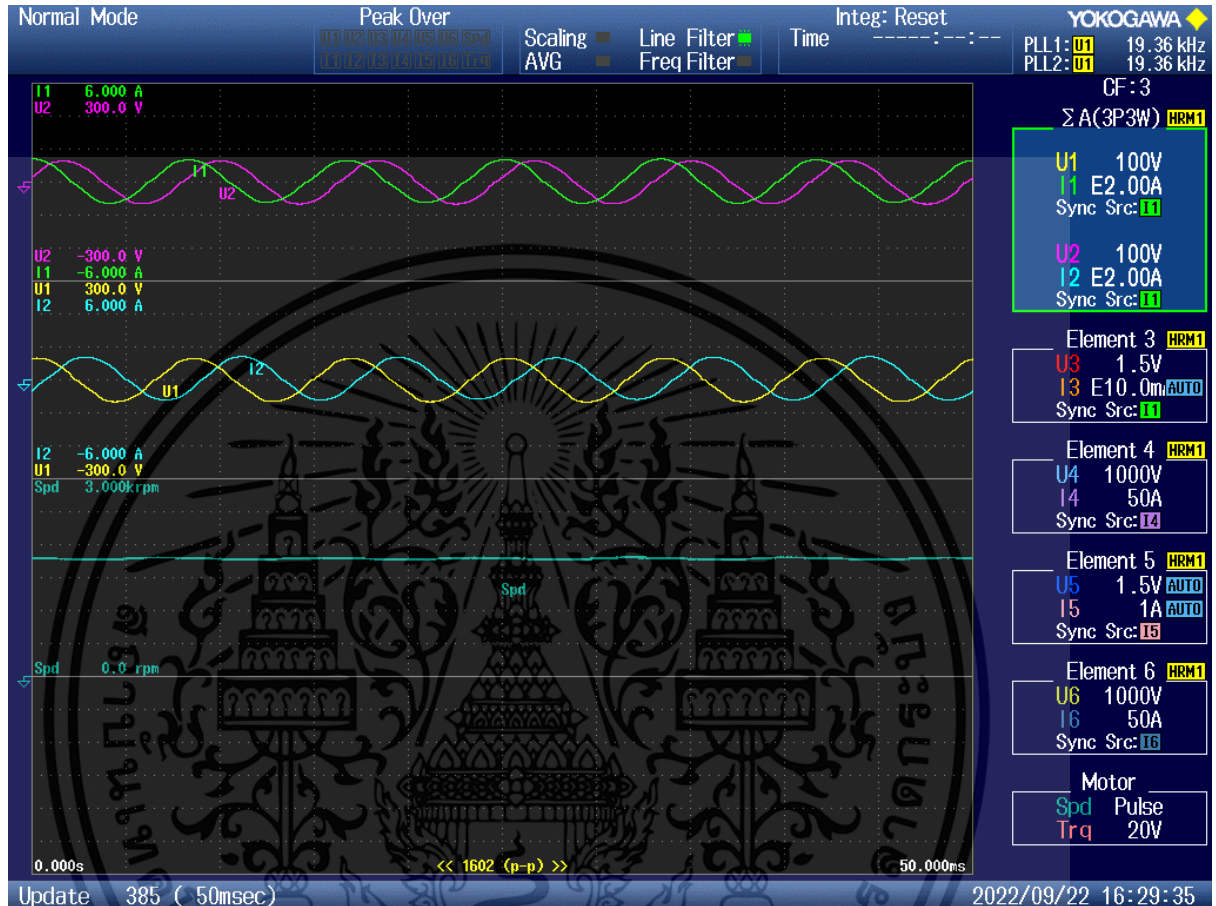
รูปที่ 4.12 แสดงกระแส d-q เมื่อความเร็วโรเตอร์เปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 4.12 เป็นการทดลองเพื่อศึกษากระแสแกน d-q เมื่อความเร็วโรเตอร์เปลี่ยนแปลง โดยจะเห็นได้ว่ากระแสแกน d จะถูกควบคุมให้มีค่าประมาณ 0 ตลอดเวลา ส่วนกระแสแกน q มีค่าเป็นลบ เนื่องจากทำงานเครื่องจักรกลทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และกระแสแกน q จะมีค่าคงที่เนื่องจากจำลองให้แรงบิดที่ใช้ในการขับมีค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

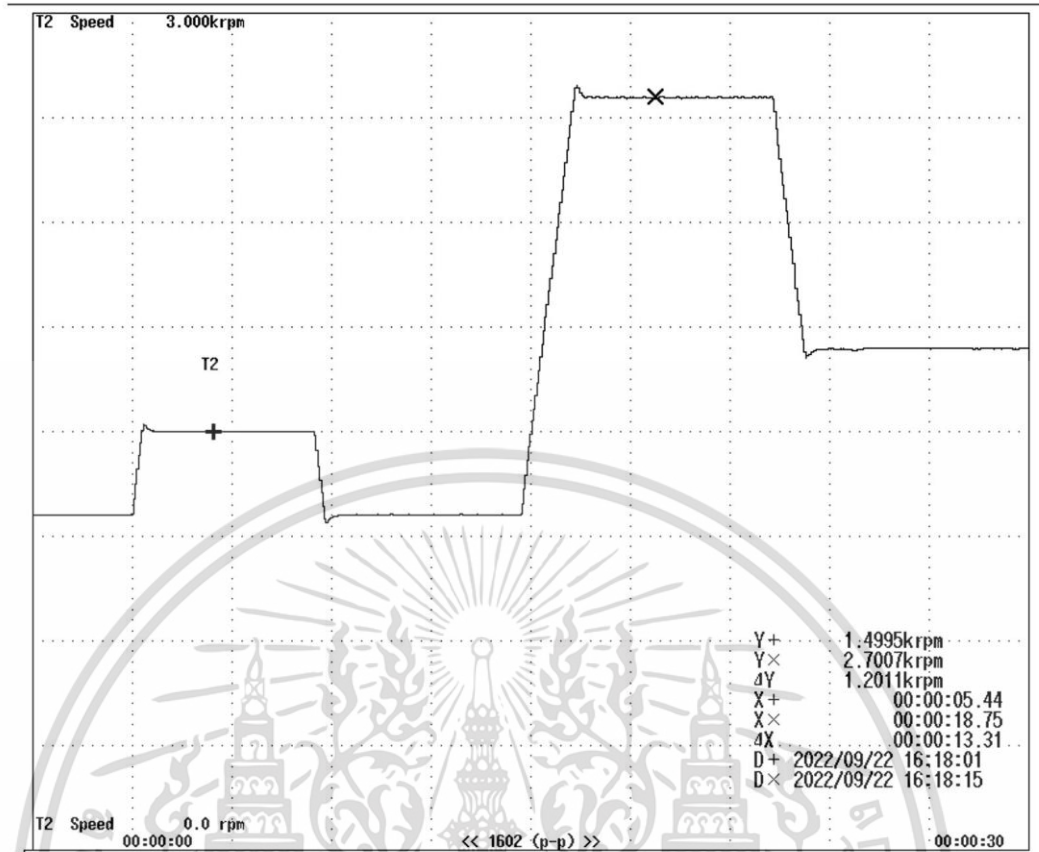
4.2.2 การทดลองบนชุดทดลอง

จำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรบนชุดทดลอง เพื่อศึกษาว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถตอบสนองต่อค่าความเร็วอ้างอิงได้หรือไม่ และเมื่อมีการนำอัลกอริทึม MPPT มาใช้ ระบบจะสามารถติดตามการทำงานในจุดที่ได้กำลังสูงสุดหรือไม่



รูปที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดัน กระแส และความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานที่แรงบิดคงที่ 0.4 pu. และความเร็วรอบ 1800 rpm

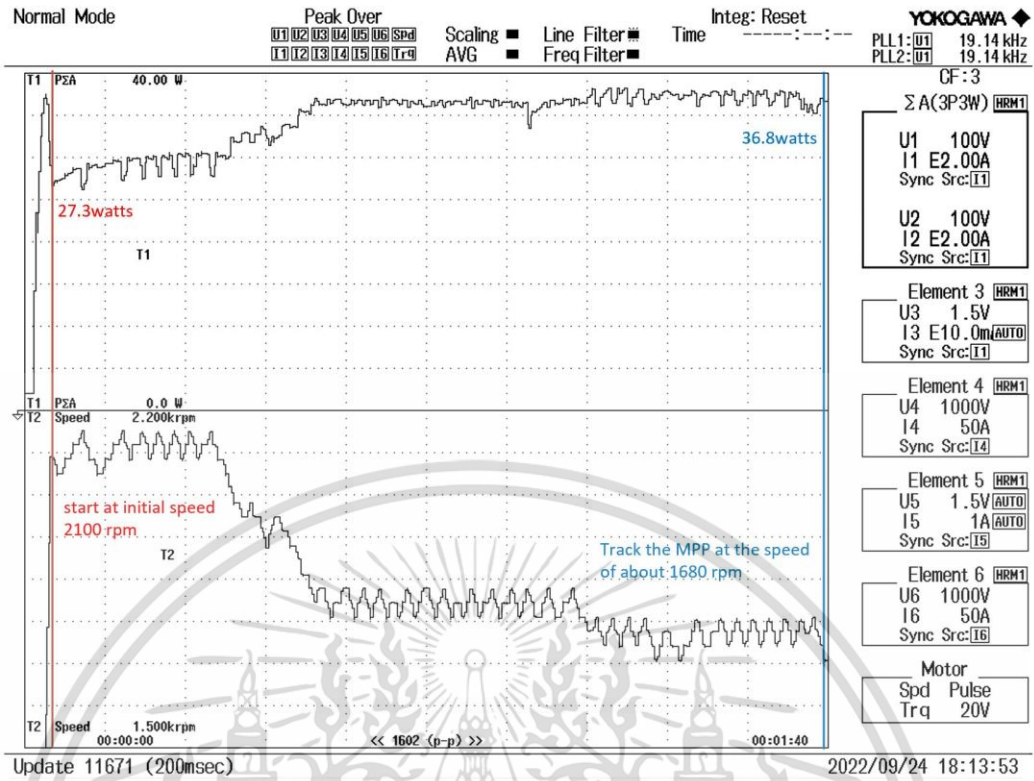
รูปที่ 4.13 แสดงถึงรูปคลื่นของกระแส แรงดัน และความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานที่แรงบิดคงที่ 0.4 pu. และความเร็วรอบ 1800 rpm โดยที่ I1 แสดงกระแสเฟส U, I2 แสดงกระแสเฟส V, U1 แสดงแรงดัน UW, และ U2 คือ แรงดัน VW และรูปที่ 4.14 แสดงถึงการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานที่แรงบิดคงที่ 0.4 pu. ขณะที่ความเร็วอ้างอิงถูกเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได โดยเริ่มต้นการทำงานที่ความเร็วรอบ 1200 rpm และเปลี่ยนเป็น 1500 rpm, 1200 rpm, 2700rpm, และ 1800 rpm ตามลำดับ พบว่าระบบควบคุมสามารถติดตามความเร็วอ้างอิงได้โดยมีข้อผิดพลาดเล็กน้อย



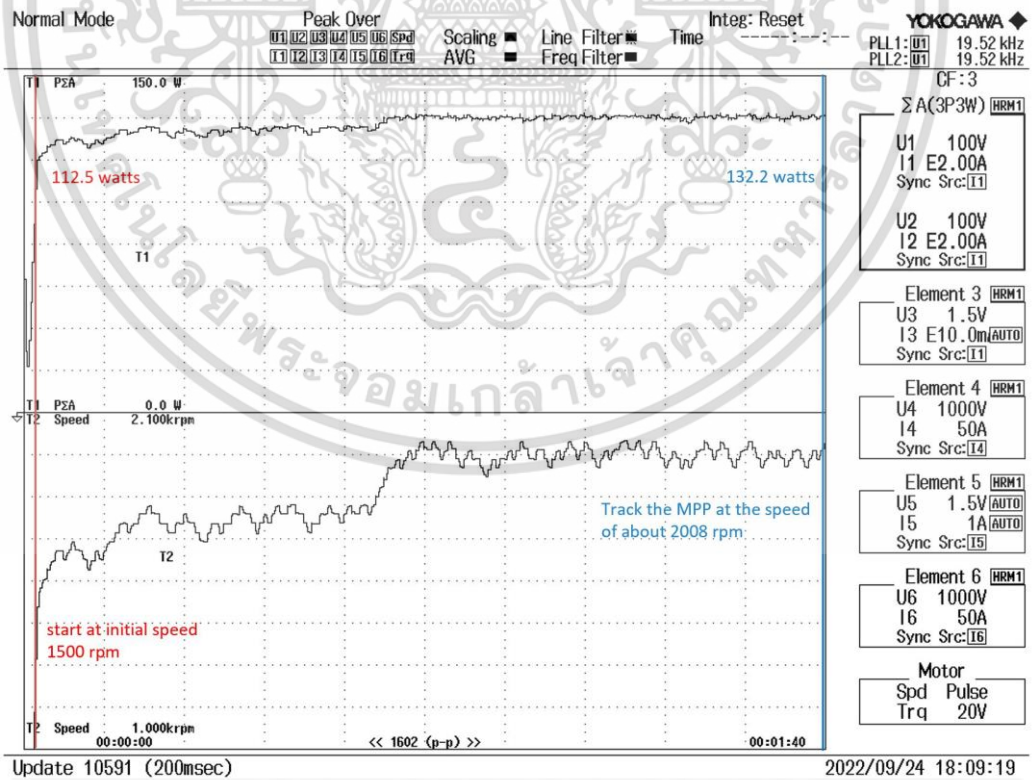
รูปที่ 4.14 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานที่แรงบิดคงที่ 0.4 pu. ขณะที่ความเร็วอ้างอิงถูกเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได

รูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงถึงการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร่วมกับอัลกอริทึม MPPT โดยรูปที่ 4.15 ใช้โปรไฟล์ของกังหันน้ำที่ความสูงหัวน้ำ 30 เมตร มุมเปิดไคด์เวท 5 องศา โดยให้เครื่องกำเนิดเริ่มทำงานที่ความเร็วรอบเริ่มต้น 2100 rpm และให้มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ (perturbation step size) ทีละ 30 rpm หรือ 1% โดยระบบสามารถติดตามกำลังสูงสุดที่ 36.8 watts ที่ความเร็วรอบประมาณ 1680 rpm และรูปที่ 4.16 ใช้โปรไฟล์ของกังหันน้ำที่ความสูงหัวน้ำ 30 เมตร มุมเปิดไคด์เวท 10 องศา โดยให้เครื่องกำเนิดเริ่มทำงานที่ความเร็วรอบเริ่มต้น 1500 rpm และให้มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ (perturbation step size) ทีละ 30 rpm หรือ 1% โดยระบบสามารถติดตามกำลังสูงสุดที่ 132.3 watts ที่ความเร็วรอบประมาณ 2008 rpm ซึ่งจากทั้ง 2 การทดลอง พบว่าจุดการทำงานสูงสุดที่ระบบสามารถติดตามได้จะใกล้เคียงกับจุดตามทฤษฎีในรูปที่ 3.3 โดยจุดการทำงานจากการทดลองจะคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีไปเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากปัจจัยภายนอกหรือค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

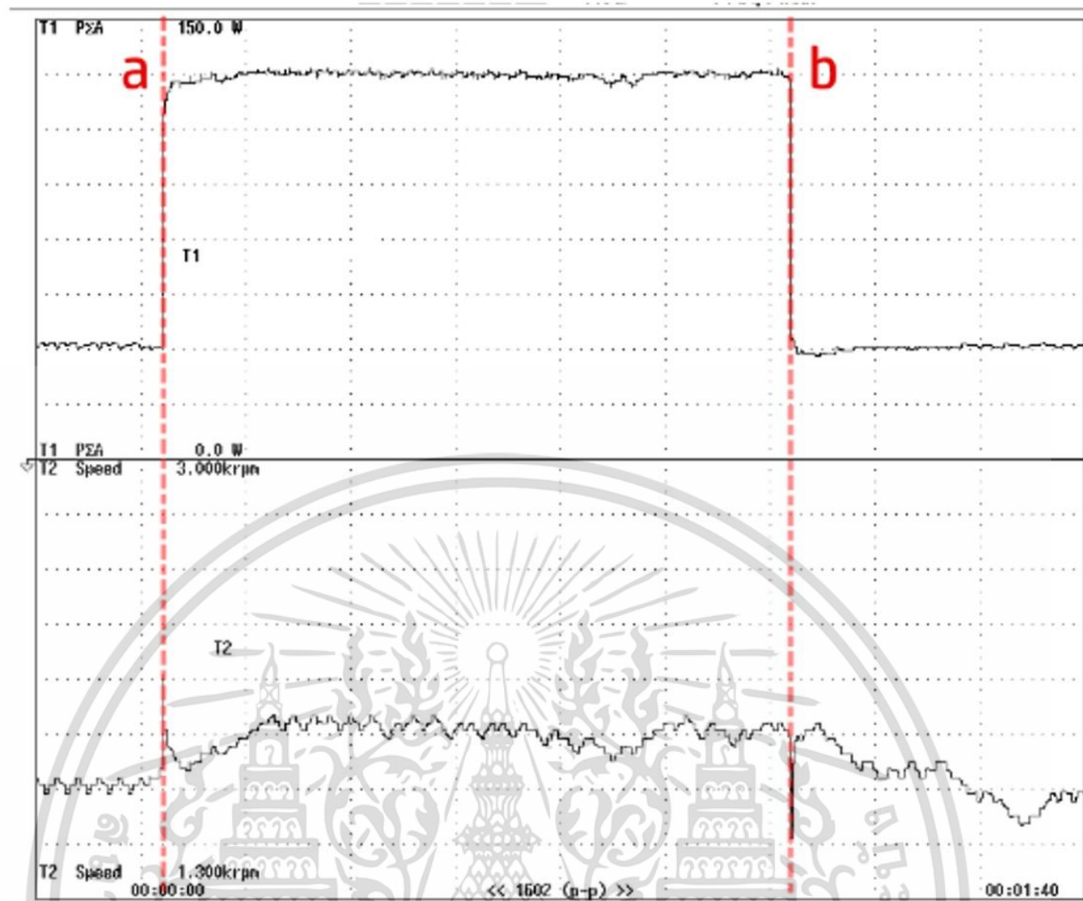


รูปที่ 4.15 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร่วมกับอัลกอริทึม MPPT ร่วมกับกังหันน้ำจำลองที่ความสูงหัวน้ำ 30 เมตร และมุมเปิดโถ่ดเว้น 5 องศา



รูปที่ 4.16 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร่วมกับอัลกอริทึม MPPT ร่วมกับกังหันน้ำจำลองที่ความสูงหัวน้ำ 30 เมตร และมุมเปิดโถ่ดเว้น 10 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร่วมกับอัลกอริทึม MPPT เมื่อกังหันน้ำจำลองมีการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 4.17 แสดงถึงการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร่วมกับอัลกอริทึม MPPT โดยเริ่มต้นการทำงานที่โปรไฟล์ของกังหันน้ำที่ความสูงหัวน้ำ 30 เมตร มุมเปิดไทด์เวน 5 องศา จากนั้นที่จุด a มุมเปิดไทด์เวนจะถูกเปลี่ยนแปลงไปที่ 10 องศา และที่จุด b มุมเปิดไทด์เวนจะถูกเปลี่ยนแปลงกลับมาที่ 5 องศา พบว่าอัลกอริทึมยังคงสามารถติดตามการทำงานที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดอย่างถูกต้อง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอแบบจำลองโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กโดยใช้มอเตอร์ 2 ชุด โดยมอเตอร์ชุดแรกจะถูกควบคุมด้วยเซอร์โวไดรฟ์เพื่อจำลองลักษณะของแรงบิดและความเร็วรอบให้เหมือนกับกังหันน้ำต้นแบบ และมอเตอร์อีกชุดจะจำลองเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้วิธีควบคุมแบบ Field Oriented Control (FOC) เพื่อควบคุมความเร็วรอบโรเตอร์ของเครื่องกำเนิด ซึ่งจะควบคุมร่วมกับอัลกอริทึมการติดตามจุดกำลังผลิตไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking, MPPT) ที่มีลักษณะคล้ายกับวิธี incremental conductance ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ ซึ่งจากการทดลองจะแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้ และอัลกอริทึมการติดตามจุดกำลังผลิตไฟฟ้าสูงสุดสามารถทำงานได้แม้ว่าโปรไฟล์ของกังหันน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงก็ตาม

5.2 ข้อเสนอแนะ

อัลกอริทึมการติดตามจุดกำลังผลิตไฟฟ้าสูงสุดสามารถติดตามจุดการผลิตไฟฟ้าสูงสุดได้ใกล้เคียงกับจุดทางทฤษฎี แต่จากการทดลองพบว่ามีปัญหาเรื่องการกระเพื่อมของความเร็วรอบในอัลกอริทึม MPPT โดยสันนิษฐานว่าอาจมีสาเหตุมาจากปัจจัยภายนอกหรือสัญญาณรบกวนจากมอเตอร์ ซึ่งอาจส่งผลให้สัญญาณที่วัดได้มีความผิดพลาดจึงทำให้ค่าความเร็วรอบมีการแกว่ง

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Fraile-Ardanuy, J.R. Wilhelmi, J.J. Fraile-Mora and J.I. Perez, "Variable-Speed Hydro Generation: Operational Aspects and Control", **IEEE Transactions on Energy Conversion**, vol. 21, 2006, pp. 569-574.
- [2] Hiroyuki Ogura and Hiroaki Fujimori, "Variable Speed Micro Hydropower System", **MEIDEN Review**, Series No. 167 2016 No. 2, pp. 32-36
- [3] Baoling Guo, Seddik Bacha, Mazen Alamir, Amgad Mohamed, "Variable speed micro-hydro power generation system: Review and Experimental results", **SGE 2018**, Jul 2018.
- [4] Marcelo G. Molina and Mario Pacas, "Improved power conditioning system of micro-hydro power plant for distributed generation applications", **2010 IEEE International Conference on Industrial Technology**, 2010.
- [5] M. Valavi and A. Nysveen, "Variable-Speed Operation of Hydropower Plants: A Look at the Past, Present, and Future," **IEEE Industry Applications Magazine**, vol. 24, no. 5, pp. 18-27, Sept.-Oct. 2018.
- [6] C. Busca, A. -I. Stan, T. Stanciu and D. I. Stroe, "Control of Permanent Magnet Synchronous Generator for large wind turbines", **2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, 2010, pp. 3871-3876.
- [7] R. Krishnan, "Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives", 2010.
- [8] Eungkyun Kim, Morgan Warner and Indranil Bhattacharya, "Adaptive Step Size Incremental Conductance Based Maximum Power Point Tracking (MPPT)", **2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)**, 2020
- [9] Anaheim automation, "EMJ-04 Series Servo Motor"
- [10] Anaheim automation, "ProNet Series AC Servo User's Manual"
- [11] Microchip Technology Inc., "MCP4725 Datasheet"
- [12] Texas Instruments, "**High Voltage Digital Motor Control Kit (R1.1) Quick Start Guide**" [Online]. Available : <https://www.ti.com/lit/pdf/sprugu7>
- [13] Texas Instruments, "High Voltage Motor Control and PFC Kit Hardware Reference Guide"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2022
**25th International Conference
 on Electrical Machines
 and Systems**

**ICEMS 2022
 CHIANG MAI**

Organized by:     

Technical Co-Sponsors:  

Hosted by:  

November 29 - December 2, 2022
 Le Méridien Chiang Mai Hotel, Thailand

Committee

<p>Conference Chair Yuttana Kumsuwan Nisai Fuengwarodsakul Uthen Kamnarn Jin Woo Anh</p>	<p>International Steering Athikom Roeksabutr Kosin Chamnongthai Jin Woo Ahn Chang Eob Kim In-Dong Kim Yaohua Li Jian-Xin Shen Zhuo Yan Kan Akatsu Hiroyuki Ohsaki Katsumi Yamazaki Tomy Sebastian Luca Zarri Greg Heins Jian Guo Zhu Uthane Supatti</p>	<p>Advisory Vijiit Kinnares Sompob Polmai Somboon Sangwongwanich Surapong Suwankawin Jutturit Thongpron Kitchar Chaitanu Ronghai Ou Yaohua Li Zhengming Zhao Ichiro Miki Shoji Nishikata Byung Il Kwon Heung-Kyo Shin Geum Bae Cho Gyu Tak Kim Hee Jun Kim Nouredine Takorabet Yacine Amara Youguang Guo</p>	<p>General Secretary Supattana Nirukkanaporn Pratch Piyawongwisal</p> <p>Treasurer Cattareeya Suwanasri</p> <p>Registration Tuanjai Archevapanich Warunee Srisongkram</p> <p>Local Arrangement Somchai Hiranwarodom Dhanavich Chulikavit Pakawadee Wutthiwai</p> <p>Website Arrangement Pratch Piyawongwisal Suthit Ongart Jirapat Sangthong</p>
<p>Technical Program Uthane Supatti Kongpan Areearak Vuttipon Tarateeraseth</p>	<p>Organizing Krisda Yingkayun Peerapol Jirapong Paramet Wirasanti Pollakrit Toonkum</p>	<p>Publication Supakit Kawdungta</p>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Development of Converter and Control System for Variable Speed Permanent Magnet Synchronous Generator in Small Hydro Power Plant Model

Chatchaphong Thanajitr
School of Engineering, King Mongkut's
Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
63601223@kmitl.ac.th

Sompob Polmai
School of Engineering, King Mongkut's
Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
sompob.po@kmitl.ac.th

Supat Kittiratsacha
School of Engineering, King Mongkut's
Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
supat.ki@kmitl.ac.th

Abstract— In micro and small hydro power plants, the flow and head of the water fluctuate seasonally. The torque-speed characteristic of hydro turbine requires variable speed operation of generator to always obtain maximum power generation. This paper presents variable speed control of a permanent magnet synchronous generator and maximum power point tracking for small hydro power plant. The INC-like maximum power point tracking algorithm is proposed and implemented. The experimental results validate the proposed algorithm. However the speed fluctuations are observed and have to be addressed in future study.

Keywords— Micro Hydro Power Plant; PMSG; MPPT; Variable Speed

I. INTRODUCTION

Power generation of a hydro power plant depends on head height and flow rate. In conventional fixed-speed operation, when head height and flow rate vary, the efficiency of the turbine will drop or in the worst case the generator will not be able to operate. This turbine characteristic limits the range of operation (head height and flow rate) of the hydro power generation. In variable-speed hydro power plant, the speed of turbine can be adjusted to achieve greater mechanical power from the turbine by operating at the optimum speed proportional to the flow rate and head level [1].

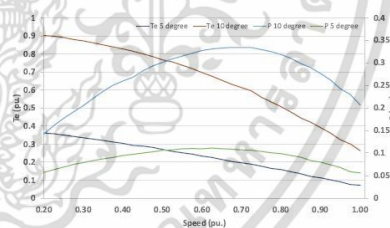
In this paper, permanent magnet synchronous generator and variable-speed control are modelled for micro hydro power generation. The characteristic of a 100-kW mixed flow turbine installed at a demonstration site is investigated and used for model simulation and experiment. The flow rate is controlled by the guide vane open angle. From the obtained experimental data, the existence of maximum power points of the turbine for each guide vane open angle is confirmed.

The maximum power point tracking (MPPT) based on the Incremental Conductance technique widely used in the photovoltaic power generation is adopted to achieve optimal operating point at maximum power.

In this paper, the mixed flow turbine torque-speed characteristic and the realization of the turbine in the experiment setup is firstly explained. The permanent magnet synchronous generator (PMSG) and the variable speed control is presented along with the maximum power point tracking algorithm. The experimental results are presented to



(a) Picture of the installed mixed flow turbine



(b) Torque-speed characteristic

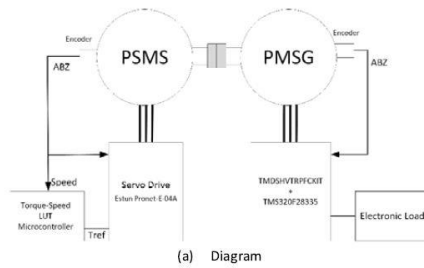
Fig. 1 Mixed flow turbine and its torque-speed characteristic

validate the proposed control technique.

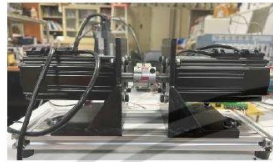
II. EXPERIMENT SETUP

A. Mixed-Flow Micro Hydro Turbine Characteristics and Experimental realization

A mixed flow 100-kW turbine as shown in Fig.1 (a) was designed and developed by Electric Generation Authority



(a) Diagram



(b) PMSM-PMSG Set
Fig. 2. Experiment Setup

Table I Experiment Setup Parameters

Device	Parameters
PMSM, PMSG	Estun EMJ-04ABP22 400 W/1.2 Nm, 3000 rpm, 8 poles, 32.63 V/krpm
Servo Drive	Estun Pronet-E-04A
Inverter	TMDSHVMTRPFCKIT
Controller	TMS320F28335
DC BUS	145V
Switching	10kHz
Frequency	

(EGAT) and has been installed at an experiment site in Kaeng Krachan District, Phetchaburi Province in Thailand. The torque-speed curve of the turbine was obtained from the simulation and confirmed by the experiment as how in Fig. 1 (b). The existence of the maximum power point for each guide vane open angle is clearly showed.

In the laboratory experimental setup, a 400W permanent magnet motor (PMSM) is used to emulate the torque-speed characteristic of the turbine. An industrial servo drive operating in torque control mode is applied. The LUT of normalized torque-speed curve of the turbine is programmed to a microcontroller receiving speed signal from the PMSM encoder. The microcontroller outputs the torque command to the servo drive via DAC in according to the speed input, the sampling interval of the torque-speed command is 100 ms.

B. Permanent Magnet Synchronous Generator and Inverter

Another 400W PMSM is employed as a generator and is coupled directly with the turbine emulator. TMDSHVMTRPFCKIT and TMS320C28335 are used for the inverter circuits and control. The DC bus of the inverter is connected to a DC electronic load controlled in constant voltage (CV) mode to absorb all the generated power. Fig. 2 shows the overall experiment setup. The important experiment setup parameters are listed in Table I.

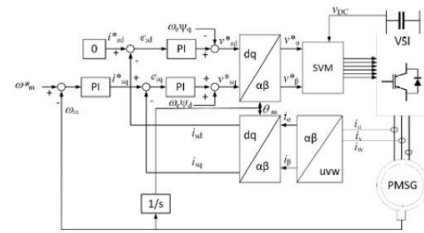


Fig. 3. Speed Control Block Diagram

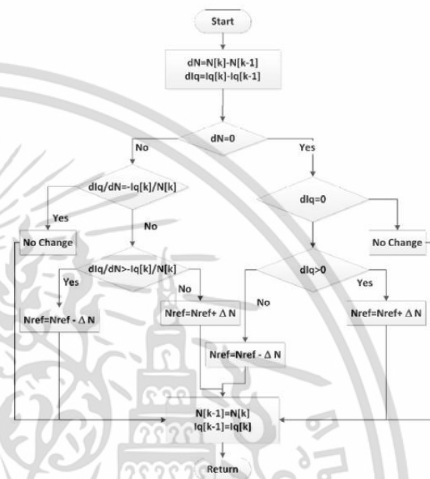


Fig. 4. Proposed MPPT Algorithm

C. Speed Control of the PMSG

In this paper, FOC is implemented for speed control of the PMSG. It is a widely control technique that provides fast dynamic response and control accuracy. Fig. 3 shows the block diagram of the speed control system [2].

III. MPPT ALGORITHM

MPPT is the technique widely used in the PV generation system. Recently, it is also being adopted in the variable speed wind power generation. The propose of the MPPT is to maximize energy extraction when the operating conditions vary. In wind turbine generation, Tip Speed Ratio (TSR) Control, Power Signal Feedback (PSF) Control and Hill Climb Search (HCS) Control were investigated and compared [3]. The adaptive MPPT for variable-speed microhydro power plant has been proposed in [4] based on variable step P&O technique.

In this paper, an MPPT algorithm based on Incremental Conductance method is proposed. The steady-state

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

generating power in the case of PMSG, where the electromechanical torque is proportional to the q-axis current I_q under FOC, can be expressed by (1)

$$P = KI_q N, \quad (1)$$

where N is the rotational speed in rpm, $K = \frac{K_T 2\pi}{60}$, and K_T is the torque constant.

At the maximum power point,

$$\frac{dP}{dN} = 0 = I_q + \frac{NdI_q}{dN}, \quad (2)$$

or

$$I_q dN + NdI_q = 0. \quad (3)$$

On the left-hand side of the MPPT the quantity in (3) is negative and on the right-hand side of the MPPT the quantity in (3) is positive. The result in (3) resembles the derivation of INC method used in the PV system by replace the voltage with speed. Using (3), MPPT for PMSG can be implemented without directly measuring the generating power. Fig. 4 show the flowchart of the MPPT.

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

A. Speed Control

Fig. 5 shows the result of an experimental speed control of the generator with the drive operating in constant torque mode at 0.4 pu. The speed reference is 1800 rpm. U1, U2, I1 and I2 are the v_{u1} , v_{u2} , i_{u1} , and i_{u2} , respectively. The voltage

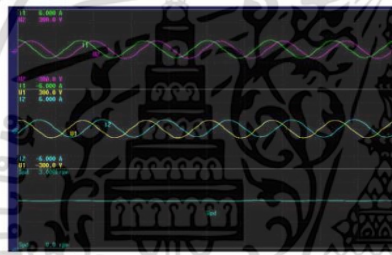


Fig. 5. Waveform of line-line voltages, currents, and speed of generator that operated at 0.4 pu. torque and 1800 rpm speed. - I1(i_{u1}), I2(i_{u2}), U1(v_{u1}), and U2(v_{u2}), time: 5ms/div

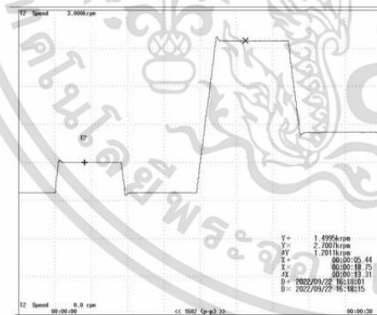


Fig. 6. Dynamic response of the rotor speed when the reference speed is changed

signals are filtered by the instrument with 1kHz cutoff frequency. The generator current is well controlled at 90° phase difference with the line-to-line voltage as expected by FOC.

Fig. 6 shows the result of an experimental speed control of the generator with the drive operating in constant torque mode at 0.4 pu. By changing the reference speed at points. The control system can track the reference without error.

B. MPPT

The PMSG is controlled to simulate the torque-speed curve of the hydro turbine. The PMSG is controlled in speed control with the MPPT generating the speed reference.

Fig. 7 show the result of the proposed MPPT algorithm at the equivalent guide vane open at 5° and the water head of 30 m. The perturbation step size is set to 30 rpm or 1%. The PMSG is set to start running at an initial speed of 2100 rpm. The system can track the MPP to the speed of about 1680 rpm, a power of about 36.8 W, which is nearly at the theoretical MPP according to Fig. 1.

Fig. 8 is the experimental result with guide vane opening at 10°. It is set to start running at an initial speed of 1500 rpm. The system will end at a speed of about 2008 rpm with a

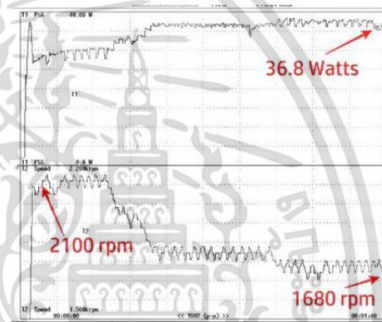


Fig. 7. Result of MPPT with hydro turbine profile with a head height of 30 meters and a guide vane opening angle of 5°

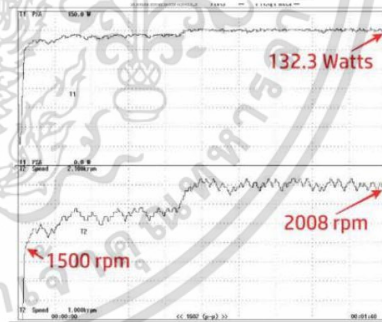


Fig. 8. Result of MPPT with hydro turbine profile with a head height of 30 m and a guide vane opening angle of 10°.

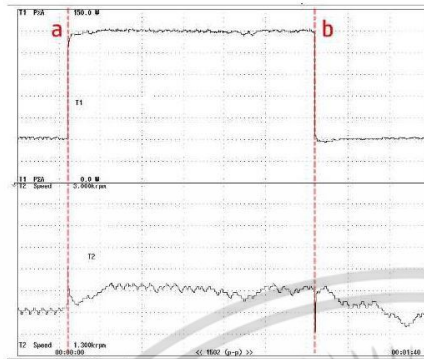


Fig. 9. Result of switching torque-speed profiles.

power of about 132.3 W, which is nearly at the theoretical MPP according to Fig. 1.

Fig. 9 shows the result of switching torque-speed profiles. The turbine starts at guide vane opening at 5° , then switches to 10° at point a, and then switches back to 5° at point b. The algorithm can still track the MPP correctly.

From the experimental results in Fig. 7 to Fig. 9, the speed fluctuations due to the proposed MPPT algorithm are observed. Because the speed fluctuation can cause the vibration of mechanical parts, improvement of the algorithm is needed to reduce or eliminated these fluctuations.

V. CONCLUSION

The variable-speed micro hydro power generation experiment system has been described. The setup uses servo drive controlled PMSM to simulate the turbine torque-speed characteristic. The invertered controlled PMSG with FOC and INC-like MPPT algorithm is implemented and the experiments has been carried out. The experimental results validates the proposed speed control and MPPT algorithm. However, speed fluctuations are obseved and have to be addressed in future study.

REFERENCES

- [1] J. Fraile-Ardanuy, J.R. Wilhelmi, J.J. Fraile-Mora, J.I. Perez. (2006). Variable-Speed Hydro Generation: Operational Aspects and Control. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 21, 569 - 574. doi:10.1109/TEC.2005.858084.
- [2] C. Busca, A. -I. Stan, T. Stanciu and D. I. Stroe, "Control of Permanent Magnet Synchronous Generator for large wind turbines," 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2010, pp. 3871-3876, doi: 10.1109/ISIE.2010.5637628.
- [3] J. Pande, P. Nasikkar, K. Kotecha, V. Varadarajan, "A Review of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Wind Energy Conversion Systems", *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9, 1187. <https://doi.org/10.3390/jmse9111187>
- [4] L. Belhadji, S. Bacha, I. Munteanu, A. Rumeau and D. Roze, "Adaptive MPPT Applied to Variable-Speed Microhydropower Plant," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 28, no. 1, pp. 34-43, March 2013, doi: 10.1109/TEC.2012.2220776.



ภาคผนวก ข.
Schematic ของบอร์ด TMDSHVMTRPFCKIT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้