

ข้อเสนอโครงงานวิศวกรรมไฟฟ้า วิชา 2102499

วงจรแปลงผันสำหรับแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยระบบขับเคลื่อนเครื่องจักร
ไฟฟ้าซิงโครนัส

**A Power Converter for Energy-Harvesting Floor using Synchronous
Machine Drive System**

นายคณิตพันธ์ จันทร์ภักดี เลขประจำตัว 6030062521
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกวิน

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

ในอดีตโครงการแผ่นพื้นเก็บพลังงานมีวัตถุประสงค์ในการนำพลังงานกลซึ่งเกิดจากการกระทำของมนุษย์มาแปรรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านกลไกทางกลและเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ต่อมาจึงมีการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงานผ่านการปรับปรุงกลไกทางกลและองค์ประกอบเชิงไฟฟ้าเพื่อให้พลังงานที่กักเก็บไปยังแบตเตอรี่มีค่าสูงที่สุด โดยในโครงการนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบวงจรแปลงผันสำหรับแผ่นพื้นเก็บพลังงานของระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครนัส ซึ่งวงจรแปลงผันดังกล่าวทำหน้าที่จัดการพลังงานผ่านอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด โดยในช่วงต้นของโครงการจะเป็นการจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อเป็นการตรวจสอบผลลัพธ์ จากนั้นจึงพัฒนาต่อไปยังการทำงานของระบบด้วยอุปกรณ์จริง

คำสำคัญ: แผ่นพื้นเก็บพลังงาน, เครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร, หลักการการติดตามจุดทำงานสูงสุด

Abstract

In the first place, the purpose of Energy-Harvesting Floor project was to generate an electrical energy from a human's step by using Permanent-Magnet Synchronous Machine and some mechanical components. Afterward, the efficiency of Energy-Harvesting Floor was improved by the improvement of mechanical and electrical components to maximize the energy that transfer to a battery. In this project, we designed a power converter for Energy-Harvesting Floor using synchronous machine drive System which was designed based on the Maximum Power Point Tracking algorithm. In the beginning, we simulated the whole system by using MATLAB/Simulink to ensure the result. The system was improved to the real hardware afterward.

Keywords: Energy-Harvesting Floor, Permanent-Magnet Synchronous Machine, The Maximum Power Point Tracking algorithm

สารบัญ

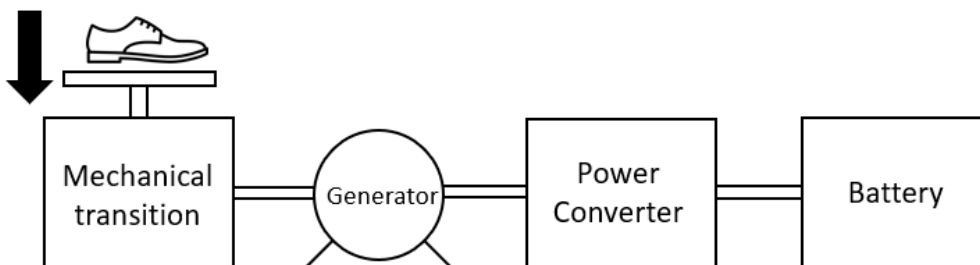
| | |
|--|----|
| บทคัดย่อ | ก |
| Abstract | ก |
| สารบัญ | ข |
| 1. บทนำ | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงงาน | 2 |
| 1.4 ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากโครงงาน | 3 |
| 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน | 3 |
| 2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1 รายละเอียดและหลักการทำงานของแผ่นพื้นที่เก็บพลังงาน | 4 |
| 2.2 หลักการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร | 5 |
| 2.3 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับขั้นตอนวิธีการติดตามจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking; MPPT) สำหรับวงจรการกักเก็บพลังงาน | 8 |
| 2.4 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์ที่ควบคุมสวิตช์ (Pulse Width Modulation) และวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส | 11 |
| 2.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบจริงและข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับ MATLAB/Simulink Embedded Coder และ Texas Instruments C2000 Processors Support Package | 12 |
| 2.6 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับบอร์ด BOOSTXL-3PHGaNIInv | 14 |
| 3. ผลลัพธ์ของโครงงานและการอภิปรายผล | 16 |
| 3.1 การทดลองการจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink (Model-in-Loop; MIL) | 16 |
| 3.2 การทดลองการจำลองการทำงานของระบบเมื่ออัลกอริทึม MPPT ทำงานผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 (Processor-in-Loop; PIL) | 18 |
| 3.3 การทดลองการทำงานของอุปกรณ์ต่อพ่วงที่สำคัญของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ | 19 |
| 3.4 การทดลองการทำงานของบอร์ด BOOSTXL-3PHGaNIInv | 21 |
| 3.4.1 การทำงานของวงจรตรวจวัดแรงดัน | 21 |
| 3.4.2 การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส | 23 |
| 3.4.3 การทำงานของวงจรตรวจวัดกระแส | 24 |
| 4. บทสรุป | 25 |
| 4.1 สรุปผลการดำเนินการ | 25 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.2 | ข้อเสนอแนะ | 26 |
| 5. | กิตติกรรมประกาศ..... | 26 |
| 6. | เอกสารอ้างอิง | 27 |
| 7. | ภาคผนวก..... | 28 |
| 7.1 | ภาคผนวก ก. | 28 |
| 7.2 | ภาคผนวก ข..... | 30 |
| 7.3 | ภาคผนวก ค. | 32 |
| 7.4 | ภาคผนวก ง..... | 34 |
| 7.4.1 | บอร์ด TI BOOSTXL-3PhGaNInv | 34 |
| 7.4.2 | บอร์ด TI C2000 LAUNCHXL-F280049C | 36 |

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

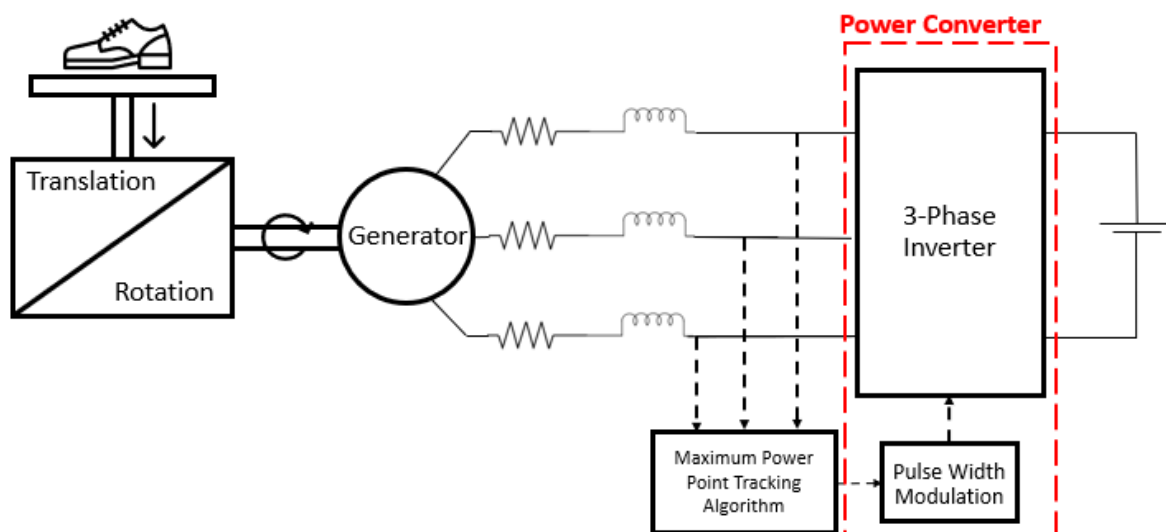
เนื่องจากนวัตกรรมโดยส่วนใหญ่มีความจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำงาน ส่งผลให้ในปัจจุบันมีความต้องการใช้ไฟฟ้าที่สูงขึ้น ซึ่งสะท้อนถึงค่าใช้จ่ายของผู้ใช้งานที่มากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นจึงมีแนวความคิดในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากการแปรรูปพลังงานรูปแบบอื่นๆ ซึ่งเกิดอย่างเป็นประจำและไม่มีค่าใช้จ่าย เช่น พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม เป็นต้น ด้วยแนวความคิดดังกล่าวจึงมีการพัฒนาโครงงานแผ่นพื้นเก็บพลังงานขึ้น ซึ่งเป็นการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยพลังงานกลจากแรงเหยียบของมนุษย์ผ่านกลไกทางกลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แม้ว่าพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณไม่มาก (ประมาณ 350 มิลลิจูล [1]) แต่เพียงพอสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก รวมถึงเป็นการใช้พลังงานจากแรงกระทำของมนุษย์ ซึ่งเกิดขึ้นเป็นปกติให้เกิดประโยชน์มากขึ้น



รูปที่ 1 กลไกการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

โดยการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงานจะประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลักดังแสดงในรูปที่ 1 ได้แก่ กลไกการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่เชิงกล (Mechanical transition), เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator), วงจรแปลงผันเชิงไฟฟ้า (Power converter) และแบตเตอรี่ (Battery) โดยหลักการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงานคือ กลไกการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่เชิงกลจะทำหน้าที่รับแรงจากการเหยียบของมนุษย์ และเปลี่ยนแปลงแนวการเคลื่อนที่จากเชิงเส้นไปสู่เชิงหมุน เพื่อนำแรงดังกล่าวไปขับเคลื่อนกำลัง (Prime mover) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า และมีการจัดการองค์ประกอบเชิงไฟฟ้าให้เหมาะสมด้วยวงจรแปลงผันเชิงไฟฟ้าเพื่อนำพลังงานไฟฟ้าไปกักเก็บยังแบตเตอรี่ต่อไป

และเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงานเพื่อให้พลังงานไฟฟ้าที่กักเก็บไปยังแบตเตอรี่มีค่าสูงที่สุด จึงมีการพัฒนากลไกการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่เชิงกลและการออกแบบวงจรแปลงผันเชิงไฟฟ้าที่เหมาะสม เช่น การเปลี่ยนกลไกแปลงการเคลื่อนที่เชิงเส้นไปสู่เชิงหมุนโดยใช้เกลียวนำ (Lead screw) แทนการใช้เกียร์กับเฟือง (Rack and Pinion) และการพัฒนาวงจรแปลงผันโดยใช้มอสเฟต (MOSFET) แทนสวิตช์กำลังเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียภายในระบบ เป็นต้น และเช่นเดียวกันในโครงงานฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน โดยการออกแบบวงจรแปลงผันเชิงไฟฟ้าซึ่งอาศัยหลักการการติดตามจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking; MPPT) เพื่อสร้างแรงดันขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหมาะสม ซึ่งส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าที่กักเก็บไปยังแบตเตอรี่มีค่าสูงที่สุด



รูปที่ 2 แผนภาพรวมการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงานเมื่อประยุกต์ใช้หลักการ MPPT

เมื่อนำหลักการ MPPT เข้ามาประยุกต์ใช้สำหรับการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน แผนภาพรวมการทำงานของระบบจะเป็นดังรูปที่ 2 ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้ ระบบจะทำการตรวจจับกระแสและนำไปประมวลผลหาค่าแรงดันขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยอาศัยหลักการ MPPT และสร้างแรงดันขาออกดังกล่าวด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสด้วยหลักการควบคุมโดยการปรับความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation; PWM)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสร้างแบบจำลองพลวัตของระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้ก่อนนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์จริง
2. เพื่อพัฒนาและสร้างอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดเพื่อให้กำลังขาออกมีค่าสูงที่สุด
3. เพื่อออกแบบวิธีการสร้างแรงดันขาออกที่ต้องการด้วยการควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสด้วยหลักการควบคุมโดยการปรับความกว้างพัลส์ที่ควบคุมสวิตช์

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. จำลองแบบจำลองการทำงานระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink
2. ทดสอบการทำงานของระบบจริงด้วยการใช้บอร์ด C2000™ Piccolo™ MCU F280049C LaunchPad และ BOOSTXL-3PHGaNIInv
3. ในโครงการฉบับนี้ใช้เครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

1.4 ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากโครงการ

1. พลังงานที่กักเก็บยังแบตเตอรี่มีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังจากการใช้หลักการ MPPT ในการควบคุม วงจรแปลงผัน
2. สามารถประยุกต์ใช้วงจรแปลงผันที่ออกแบบกับระบบการทำงานจริงได้
3. แผ่นพื้นเก็บพลังงานสามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้จริง

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงาน

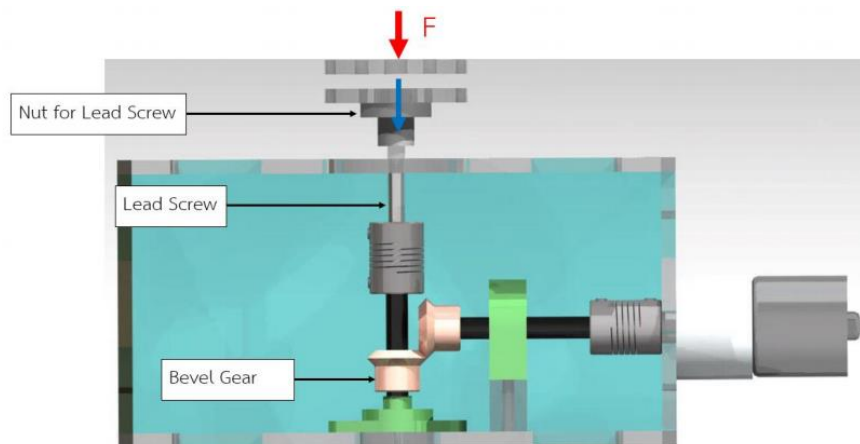
| ขั้นตอนการดำเนินงาน | เดือน | | | | | | | | |
|---|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | ส.ค. | ก.ย. | ต.ค. | พ.ย. | ธ.ค. | ม.ค. | ก.พ. | มี.ค. | เม.ย. |
| 1. ศึกษาความรู้ที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อโครงการ | | | | | | | | | |
| 2. ศึกษา Mechanical Model ของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน (MATLAB Simulink) | | | | | | | | | |
| 3. ศึกษา Synchronous machine dynamic model (MATLAB Simulink) | | | | | | | | | |
| 4. ศึกษาและสร้าง Algorithms ในการจำลองแรงดันเพื่อชดเชยความเหนียวภายในของ machine (MATLAB Simulink) และวิเคราะห์ผลการจำลอง | | | | | | | | | |
| 5. ศึกษา PWM เพื่อควบคุมการทำงานของ inverter ในการสร้างแรงดันจากผลการศึกษาในขั้นตอนที่ 4 | | | | | | | | | |
| 6. ศึกษา Hardware ที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาทดสอบใน Hardware ต่อไป | | | | | | | | | |
| 7. ทดลองประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและวิเคราะห์ผล (ไม่ได้ดำเนินการ) | | | | | | | | | |
| 8. วิเคราะห์และปรับปรุงส่วนต่าง ๆ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้น | | | | | | | | | |
| 9. เขียนรายงาน | | | | | | | | | |

หมายเหตุ สีเทา คือ ความก้าวหน้าที่ยังวางแผนไว้

สีดำ คือ ความก้าวหน้าปัจจุบัน

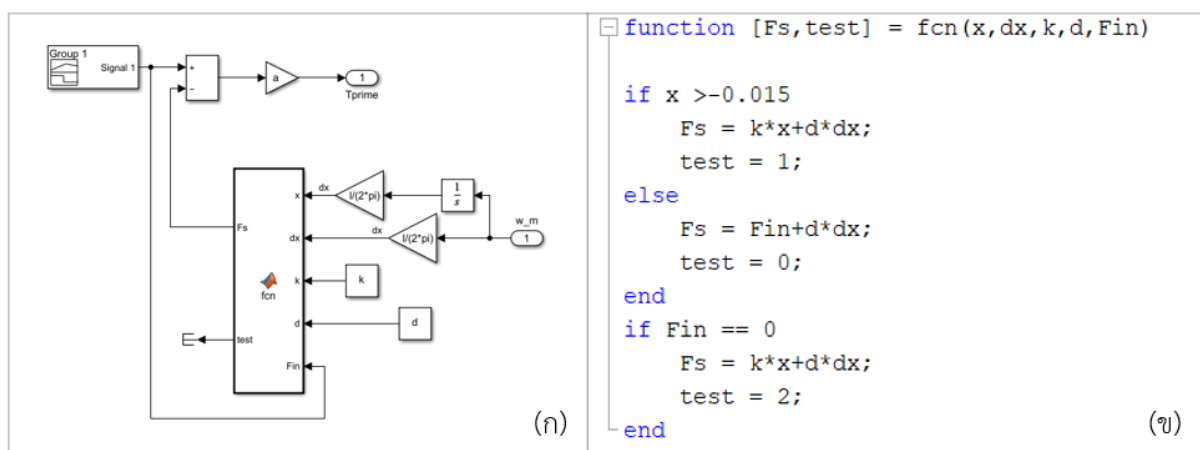
2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 รายละเอียดและหลักการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน



รูปที่ 3 กลไกการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน [1]

กลไกทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงานซึ่งในโครงการฉบับนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 3 โดยมีหลักการการทำงานดังนี้ แรงจากการเหยียบของมนุษย์จะถูกส่งผ่านไปยังเกลียวนำ (Lead screw) เพื่อเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่จากการเคลื่อนที่เชิงเส้นไปยังการเคลื่อนที่เชิงหมุนในแนวตั้งฉากกับพื้นโลก และจากนั้นจะถูกส่งผ่านไปยังเฟืองดอกจอก (Bevel gear) เพื่อเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่เชิงหมุนไปยังแนวขนานกับพื้นโลกเพื่อนำแรงดังกล่าวไปขับเคลื่อนกำลังของเครื่องจักรไฟฟ้าต่อไป และภายหลังจากการเหยียบเสร็จสิ้นกลไกสปริงซึ่งอยู่ทั้งสี่มุมของแผ่นพื้นเก็บพลังงานจะทำหน้าที่ในการสร้างแรงต้านเพื่อให้แผ่นเหยียบกลับคืนสภาพไปยังตำแหน่งเริ่มต้นก่อนเกิดการเหยียบ



รูปที่ 4 (ก) แผนภาพไดอะแกรมการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink (ข) เงื่อนไขของฟังก์ชันการทำงานของแบบจำลอง

เนื่องจากในส่วนของแรกของโครงงานจะเป็นการจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังนั้นในส่วนนี้จะเป็นการข้อมูลเกี่ยวกับแบบจำลองการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน ซึ่งทางผู้จัดทำได้รับความกรุณาจากภาควิศวกรรมเครื่องกลในการส่งแบบจำลองมาให้ปรับใช้

ซึ่งมีแผนภาพไอะแกรมการทำงานบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4(ก) และ 4(ข) โดยแบบจำลองรับสัญญาณขาเข้าเป็นแรงเหวี่ยง ณ เวลาต่างๆ และประมวลผลส่งสัญญาณขาออกเป็นแรงบิดซึ่งจะทำหน้าที่ขับเคลื่อนกำลังของเครื่องจักรไฟฟ้าต่อไป

2.2 หลักการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

เนื่องจากในส่วนแรกของโครงงานฉบับนี้มุ่งเน้นไปเพื่อจำลองผลการทดลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นหลัก ดังนั้นในส่วนถัดไปจะเกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำภายในและฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร มีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่ามุมของโรเตอร์ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการพิจารณาแบบจำลอง จึงใช้แกนอ้างอิงเป็นการอ้างอิงแบบหมุนซึ่งหมุนด้วยความเร็วเดียวกันกับความเร็วโรเตอร์เพื่อให้ค่าต่างๆ ไม่ขึ้นอยู่กัค่ามุมของโรเตอร์ [2] โดยสามารถแปลงภาพระบบไปยังแกนอ้างอิงแบบหมุนได้โดยการใช้วงจรสมมูลสองเฟสดีคิว (Two-phase (d-q) equivalent circuit) โดยเริ่มต้นพิจารณาสมการแรงดันสามเฟสของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรดังสมการที่ 1, 2 และ 3

$$\begin{bmatrix} v_{un} \\ v_{vn} \\ v_{wn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{d}{dt} L_u & \frac{d}{dt} M_{uv} & \frac{d}{dt} M_{wu} \\ \frac{d}{dt} M_{uv} & R_s + \frac{d}{dt} L_v & \frac{d}{dt} M_{vw} \\ \frac{d}{dt} M_{wu} & \frac{d}{dt} M_{vw} & R_s + \frac{d}{dt} L_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_e \lambda' \sin(\theta_e) \\ -\omega_e \lambda' \sin(\theta_e - 120^\circ) \\ -\omega_e \lambda' \sin(\theta_e + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} L_u &= \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos(2\theta_e) \\ L_v &= \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos(2\theta_e + 120^\circ) \\ L_w &= \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos(2\theta_e - 120^\circ) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} M_{uv} &= -\frac{1}{2} \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos(2\theta_e - 120^\circ) \\ M_{wu} &= -\frac{1}{2} \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos(2\theta_e + 120^\circ) \\ M_{vw} &= -\frac{1}{2} \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos(2\theta_e) \end{aligned} \quad (3)$$

เมื่อ

| | |
|--------------------------|--|
| v_{un}, v_{vn}, v_{wn} | คือ แรงดันเฟสขาออกของเฟส u, v และ w ตามลำดับ |
| i_u, i_v, i_w | คือ กระแสของเฟส u, v และ w ตามลำดับ |
| R_s | คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ |
| L_u, L_v, L_w | คือ ค่าความเหนี่ยวนำตนเองของขดลวดสเตเตอร์ในเฟส u, v และ w |
| M_{uv}, M_{vw}, M_{wu} | คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดสเตเตอร์ในเฟส u, v และ w |
| ω_e | คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ |
| θ_e | คือ ตำแหน่งเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์เมื่อเทียบกับแกนของขดลวด |
| λ' | คือ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วของแม่เหล็กถาวร |
| L_d, L_q | คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ในแนวแกน d และ q |

แทนสมการที่ 2 และ 3 ลงในสมการที่ 1 จากนั้นใช้การแปลงของคลาร์ก (Clark's transformation) [3] และการแปลงของปาร์ก (Park's transformation) [3] เพื่อแปลงสมการแรงดันสามเฟสจากสมการที่ 1 เป็นสมการแรงดันสองเฟสบนแกน d-q ซึ่งจะได้ดังสมการที่ 4 [4]

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_e L_q i_q \\ \omega_e L_d i_d + \omega_e \lambda \end{bmatrix} \quad (4)$$

เมื่อ

v_d, v_q คือ แรงดันเฟสสเตเตอร์ในแกน d และ q บนกรอบอ้างอิงโรเตอร์

i_d, i_q คือ กระแสสเตเตอร์ในแกน d และ q บนกรอบอ้างอิงโรเตอร์

λ คือ ค่าคงตัวมีค่าเท่ากับ $\sqrt{\frac{3}{2}} \lambda'$

จากนั้นพิจารณากำลังของระบบจากสมการที่ 5

$$P_{in} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

เมื่อ P_{in} คือ กำลังขาเข้าของเครื่องจักรไฟฟ้า

จากนั้นพิจารณาสมการที่ 4 และ 5 จะได้ดังสมการที่ 6 [4]

$$P_{in} = R(i_d^2 + i_q^2) + \frac{d}{dt} \frac{1}{2} (L_d i_d^2 + L_q i_q^2) + \omega_e (\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (6)$$

ซึ่งจะได้ว่าพจน์สุดท้ายของสมการที่ 6 คือกำลังเชิงกลของเครื่องจักรไฟฟ้า (P_{mech}) ดังสมการที่ 7

$$P_{mech} = \omega_e (\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (7)$$

ดังนั้นจะได้สมการแรงบิดดังสมการที่ 8

$$\tau_e = \frac{P_{mech}}{\omega_e/p} = p(\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q) \quad (8)$$

เมื่อ

τ_e คือ แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque)

p คือ จำนวนคู่ขั้วของเครื่องจักรไฟฟ้า

และสมการเชิงกลของระบบคู่ควบ (Coupling) ระหว่างแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าเป็นดังสมการที่ 9

$$\ddot{\theta}_e = \frac{1}{aJ_{eq}} (\tau_{prime} - \tau_e) \quad (9)$$

เมื่อ

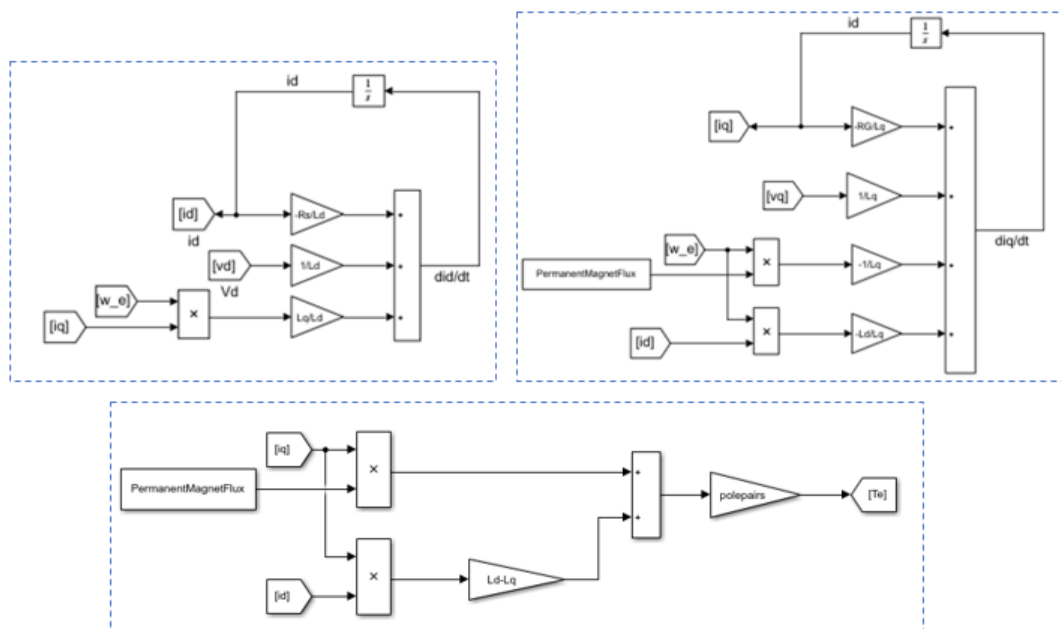
$\ddot{\theta}_e$ คือ อนุพันธ์อันดับสองของมุมโรเตอร์

a คือ ค่าคงตัวเชิงกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

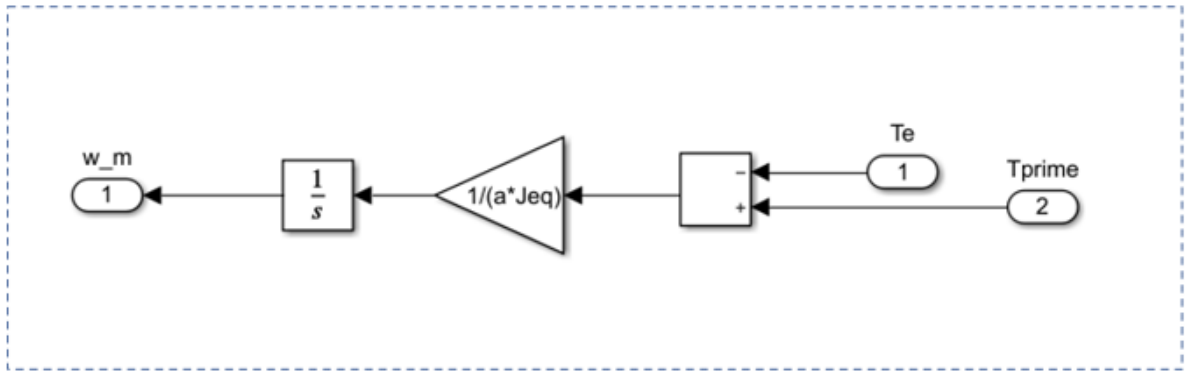
J_{eq} คือ ค่าความเฉื่อยเชิงกลรวมของพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้า

τ_{prime} คือ แรงบิดจากแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

จากนั้นนำสมการที่ 4, 8 และ 9 สร้างเป็นแบบจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 เพื่อใช้ในการจำลองการทำงานของระบบในลำดับต่อไป



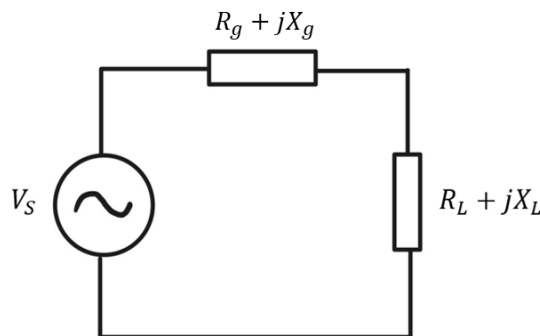
รูปที่ 5 แผนภาพไดอะแกรมของแบบจำลองพลวัตทางไฟฟ้าของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 6 แผนภาพไดอะแกรมของแบบจำลองเชิงกลของของระบบคู่ควบ (Coupling) ระหว่างแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้า

2.3 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับขั้นตอนวิธีการติดตามจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking; MPPT) สำหรับวงจรการกักเก็บพลังงาน

วงจรสมมูลของวงจรการกักเก็บพลังงานสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 7 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันและอิมพีแดนซ์ขาออก โดยจะประกอบไปด้วยค่าความต้านทานสมมูลขาออกและค่าความเหนี่ยวนำสมมูลขาออก



รูปที่ 7 รูปวงจรสมมูลของวงจรการกักเก็บพลังงาน [5]

เมื่อพิจารณากำลังขาออก (P_{out}) โดยใช้ทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Transfer ; MPT) ของวงจรสมมูลดังกล่าวเมื่อโหลดเป็นอิมพีแดนซ์ใด ๆ จะได้ดังสมการที่ 10

$$S = \frac{|V_S|^2}{Z^*} \quad (10)$$

$$S = \frac{|V_S|^2}{(R_g + R_L) - j(X_g + X_L)} \quad (11)$$

$$P_{out} = Re(S) = \frac{|V_S|^2 R_L}{(R_g + R_L)^2 + (X_g + X_L)^2} \quad (12)$$

จากสมการที่ 12 จะเห็นได้ว่าค่า P_{out} จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อพจน์ $(R_g + R_L)^2 + (X_g + X_L)^2$ มีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากค่ารีแอคแทนสามารถมีค่าน้อยกว่าศูนย์ได้จึงพิจารณาให้ $X_L = -X_g$ และพิจารณาสมการที่ 12 ร่วมกับเงื่อนไขข้างต้นจะได้สมการที่ 13

$$P_{out} = \frac{|V_s|^2 R_L}{(R_g + R_L)^2} \quad (13)$$

และจากสมการที่ 13 จะเห็นได้ว่าค่า P_{out} จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อ $\frac{R_L}{(R_g + R_L)^2}$ มีค่าสูงที่สุด ดังนั้นจึงพิจารณาหาค่า R_L ที่ส่งผลให้พจน์ดังกล่าวมีค่าสูงสุดด้วยสมการที่ 14

$$\frac{d}{dR_L} \left(\frac{R_L}{(R_g + R_L)^2} \right) = 0 \quad (14)$$

$$R_L = R_g \quad (15)$$

$$X_L = -X_g \quad (16)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 15 และ 16 จึงสามารถสรุปได้ว่าค่า P_{out} จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อ $R_L = R_g$ และ $X_L = -X_g$ หรือสามารถพิจารณาในรูปของแรงดันได้ว่าค่าความต่างศักย์ตกคร่อมโหลดจะต้องมีค่าเท่ากับสังยุคของค่าแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ภายในของวงจร

ในลำดับถัดมาจะเป็นการขยายขอบเขตจากทฤษฎีการถ่ายโอนพลังงานสูงสุดสู่การติดตามจุดทำงานสูงสุดโดยพิจารณาจุดทำงานจากค่ากระแสที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จากหลักการจากทฤษฎีการถ่ายโอนพลังงานสูงสุดคือ เมื่อ $R_L = R_g$ และ $X_L = -X_g$ แต่เนื่องจาก X_g ต้องพิจารณาผลของความเหนี่ยวนำร่วมด้วย ซึ่งจะสามารถตรวจวัดได้ยาก จึงพิจารณาสมการที่ 1 ด้วยสเปซเวกเตอร์ดังสมการที่ 17 ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำ L_s เป็นค่าความเหนี่ยวนำที่พิจารณาทั้งค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและค่าความเหนี่ยวนำร่วม

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = R_g \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} + L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_e \lambda \cos(\theta_e) \\ -\omega_e \lambda \sin(\theta_e) \end{bmatrix} \quad (17)$$

จากทฤษฎีการถ่ายโอนพลังงานสูงสุดจะได้ว่าเพื่อให้พลังงานที่ถ่ายโอนมายังโหลดมีค่าสูงที่สุด โหลดจะต้องมีลักษณะดังสมการที่ 15 และ 16 แต่เนื่องจากการขยายขอบเขตสู่การติดตามจุดทำงานสูงสุด ลักษณะของโหลดจะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแส ณ เวลานั้นๆ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงลักษณะของโหลดเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ จึงเปลี่ยนการพิจารณาเป็นการพิจารณาแรงดันตกคร่อมโหลดแทน ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาในทางปฏิบัติ ดังนั้นเพื่อให้ลักษณะของโหลดสอดคล้องกับสมการที่ 15 และ 16 แรงดันตกคร่อมโหลดจึงต้องค่าเท่ากับสังยุคของแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ภายในของวงจรสมมูล

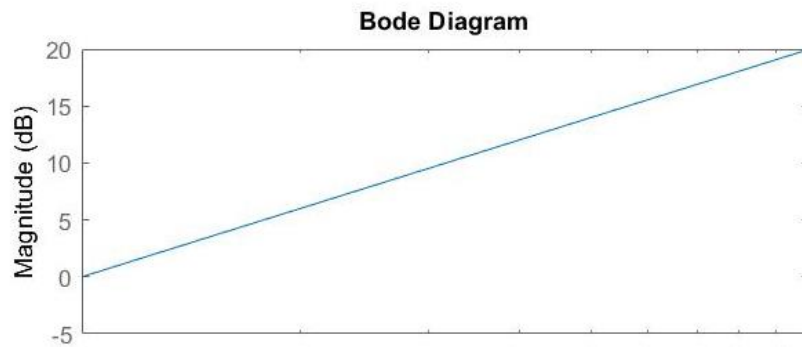
ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 17 สมการแรงดันขาออกที่สอดคล้องกับหลักการการติดตามจุดทำงานจะได้ดังสมการที่ 18 ซึ่งเป็นแรงดันขาออกของเครื่องจักรไฟฟ้าที่เหมาะสม ซึ่งทำให้กำลังขาออกของเครื่องจักรไฟฟ้ามีค่าสูงสุดตามหลักการการติดตามจุดทำงานสูงสุด

$$\begin{bmatrix} v_{ox} \\ v_{oy} \end{bmatrix} = R_g \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} - L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} \quad (18)$$

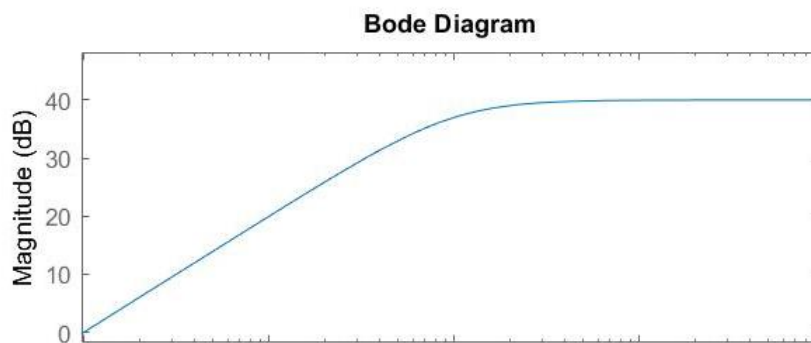
นอกจากนั้นต้องคำนึงถึงข้อควรระวังของการใช้ตัวอนุพันธ์ด้วย อันเนื่องมาจากตัวอนุพันธ์มีกราฟผลการตอบสนองเชิงความถี่ดังรูปที่ 8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวอนุพันธ์จะมีพฤติกรรมเหมือนตัวขยายสัญญาณ ดังนั้นหากมีสัญญาณรบกวนที่มีความถี่สูง ตัวอนุพันธ์อาจทำให้สัญญาณรบกวนดังกล่าวมีขนาดเพิ่มมากขึ้น [5] และทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้ ดังนั้นจึงแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการจำกัดขอบเขตช่วงความถี่ของตัวอนุพันธ์ด้วยตัวปฏิยานุพันธ์ ซึ่งจะมีฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ดังสมการที่ 19 และจะได้กราฟผลตอบสนองเชิงความถี่ที่เปลี่ยนไปดังรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ค่าหนึ่งอัตราขยายจะไม่เพิ่มขึ้น

$$H(s) = \frac{s}{s + \omega_H} \quad (19)$$

โดยที่ ω_H คือ ความถี่ขอบบนที่ต้องการจำกัดอัตราขยายของตัวอนุพันธ์



รูปที่ 8 กราฟผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวอนุพันธ์

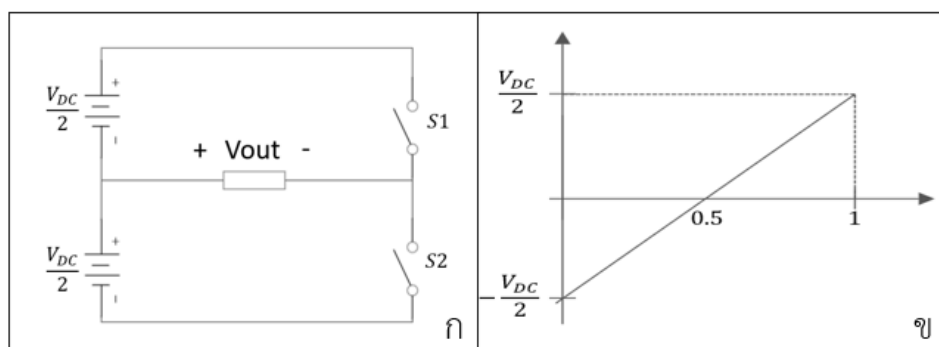


รูปที่ 9 กราฟผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวอนุพันธ์ซึ่งถูกจำกัดขอบเขตความถี่โดยตัวปฏิยานุพันธ์

2.4 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์ที่ควบคุมสวิตช์ (Pulse Width Modulation) และวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส

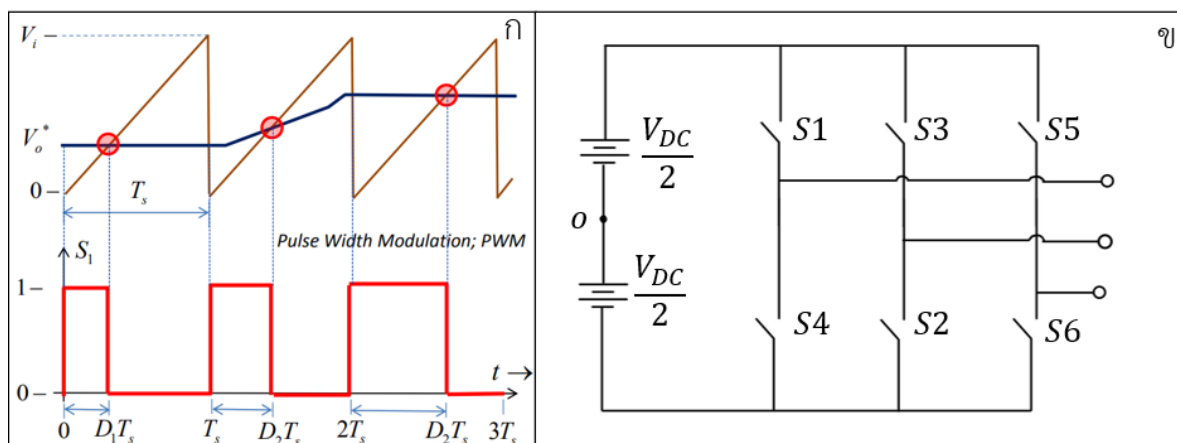
เมื่อทราบค่าแรงดันขาออกที่ทำให้ได้พลังงานขาออกสูงที่สุดจากอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดแล้ว ในส่วนนี้จะเป็นการสร้างแรงดันดังกล่าวโดยควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วยหลักการ PWM

วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter) คือวงจรที่ใช้สำหรับการสร้างแรงดันที่ต้องการจากแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง เมื่อพิจารณาวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวกึ่งบริดจ์ดังรูปที่ 10 หลักการทำงานของวงจรดังกล่าวคือสวิตช์ S1 และ S2 จะสลับกันทำงานสวิตช์ละครึ่งวัฏจักรงาน โดยเมื่อสวิตช์ S1 ปิดวงจรแรงดันขาออกจะมีค่าเท่ากับ $\frac{V_{DC}}{2}$ และเมื่อสวิตช์ S2 ปิดวงจรแรงดันขาออกจะมีค่าเท่ากับ $-\frac{V_{DC}}{2}$ ดังรูปที่ 10ข ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันขาออกที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์จะมีลักษณะรูปคลื่นเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเท่ากัน ดังนั้นจึงมีการนำเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์หรือ PWM เข้ามาทำงานร่วมด้วยเพื่อให้วงจรแปรผันสามารถสร้างสัญญาณที่มีรูปคลื่นใด ๆ ได้



รูปที่ 10 ก)รูปวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวกึ่งบริดจ์ [6] ข)แรงดันขาออกของวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวกึ่งบริดจ์ [6]

เทคนิค PWM คือเทคนิคการสร้างสัญญาณที่ต้องการโดยการควบคุมช่วงเวลาในการเปิด-ปิดสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์โดยสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ดังกล่าวเกิดจากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการและสัญญาณพาหะมีความถี่สูง [6] หากพิจารณาวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวกึ่งบริดจ์ดังรูปที่ 10ก เมื่อสัญญาณพาหะมีค่าสูงกว่าสัญญาณอ้างอิง สวิตช์ S1 จะปิดวงจรและสวิตช์ S2 จะเปิดวงจร และเมื่อสัญญาณพาหะมีค่าต่ำกว่าสัญญาณอ้างอิง สวิตช์ S1 จะเปิดวงจรและสวิตช์ S2 จะปิดวงจร ดังนั้นหากสัญญาณอ้างอิงมีค่าไม่คงที่ สวิตช์ S1 และ S2 จะถูกเปิดและปิดในเวลาที่แตกต่างกันออกไปตามค่าของสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการดังรูปที่ 11ก ซึ่งจะเห็นว่าช่วงเวลาในการทำงานของสวิตช์ทั้งสองแตกต่างกันไปในแต่ละคาบการสวิตช์ตามขนาดของสัญญาณอ้างอิง โดยในโครงงานฉบับนี้ได้มีการนำเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโครนอสเข้าใช้แทนเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงที่ต้องการแรงดันขาออกสามเฟส ดังนั้นจึงต้องใช้วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสในการสร้างสัญญาณที่แรงดันต้องการ โดยมีหลักการเช่นเดียวกันกับวงจรข้างต้น เพียงแต่มีสวิตช์ทั้งหมดสามคู่สำหรับสัญญาณอ้างอิงแต่ละเฟสดังรูปที่ 11ข



รูปที่ 11 ก) รูปการณเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณพาหะ [6]

ข) รูปวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส [6]

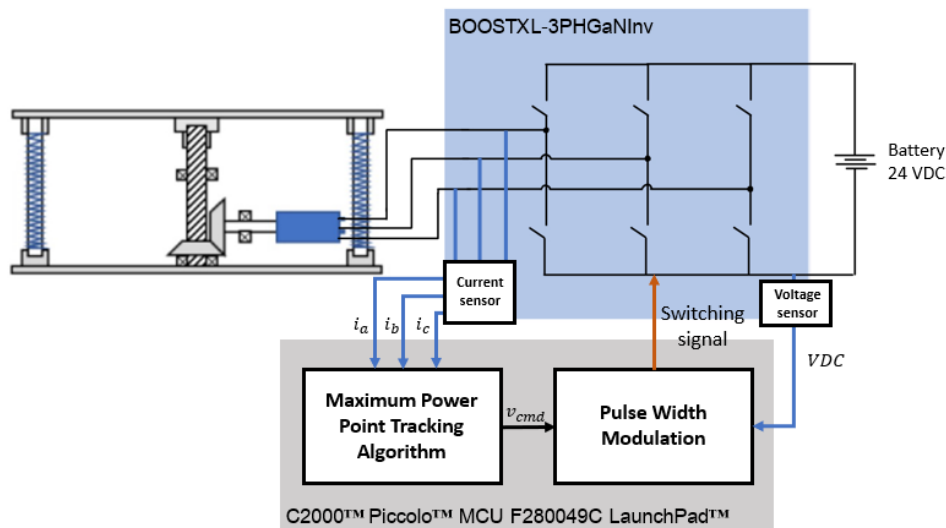
โดยก่อนทำการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณพาหะดังที่กล่าวไปข้างต้น จะต้องมีการสุ่มและคงค่า (sample and hold) ของสัญญาณอ้างอิงด้วยความถี่เดียวกับความถี่ของสัญญาณพาหะ [6] เพื่อให้สัญญาณอ้างอิงมีค่าที่คงที่ในขณะที่ทำการเปรียบเทียบ

2.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบจริงและข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับ MATLAB/Simulink Embedded Coder และ Texas Instruments C2000 Processors Support Package

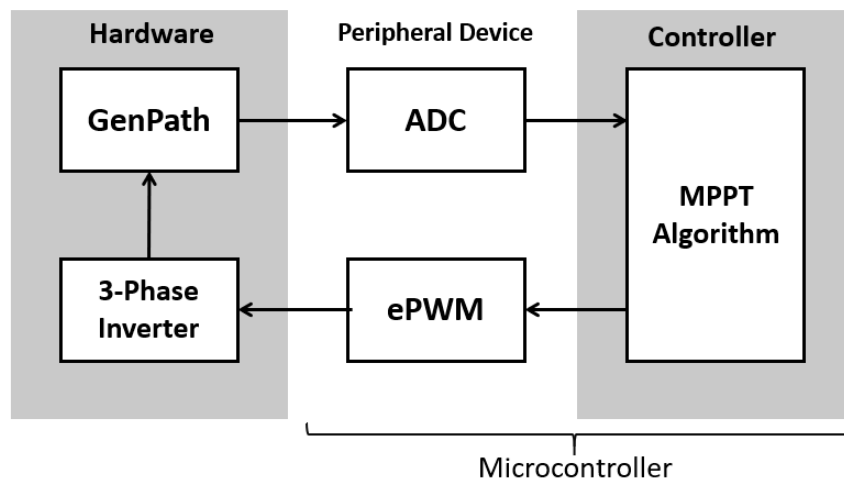
ภายหลังจากการจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อยืนยันผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นแล้ว ขั้นตอนถัดมาจะเป็นการทดลองการทำงานของระบบกับอุปกรณ์จริง ซึ่งอุปกรณ์ต่างๆ จะมีดังนี้

1. แผ่นพื้นที่เก็บพลังงาน ซึ่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบเชิงกลและเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโครนัส ชนิดแม่เหล็กถาวร
2. บอร์ด C2000™ Piccolo™ MCU F280049C LaunchPad™ Development Kit ซึ่งทำหน้าที่เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ (ข้อมูลเพิ่มเติมแสดงในภาคผนวก)
3. บอร์ด BOOSTXL-3PHGaNIInv ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส วงจรตรวจวัด กระแสและวงจรตรวจวัดแรงดัน (ข้อมูลเพิ่มเติมแสดงในภาคผนวก)
4. แบตเตอรี่ 24 โวลต์

ซึ่งภาพรวมการทำงานของระบบแสดงดังรูปที่ 12 และเนื่องจากภายในโครงงานฉบับนี้ ตัวควบคุมถูกพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink แต่ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถทำงานด้วยโค้ดภาษา C หรือ C++ ดังนั้น Embedded coder จึงเข้ามาทำหน้าที่ในการแปลงข้อมูลจากโปรแกรม MATLAB/Simulink ให้อยู่ในรูปของภาษา C หรือ C++ เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานบนไมโครคอนโทรลเลอร์ได้



รูปที่ 12 รูปองค์ประกอบต่างๆ ภายในระบบ



รูปที่ 13 รูปการส่งผ่านข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ภายนอกและไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านอุปกรณ์ต่อพ่วง

โดยการส่งผ่านข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ภายนอก เช่น วงจรตรวจจับกระแสและวงจรมอเตอร์สามเฟส กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถทำได้ผ่านอุปกรณ์ต่อพ่วง (Peripheral devices) ซึ่งมาพร้อมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเมื่ออ้างอิงจากรูปที่ 12 จะสามารถเขียนรูปการส่งผ่านข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ภายนอกและบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านอุปกรณ์ต่อพ่วงได้ดังรูปที่ 13

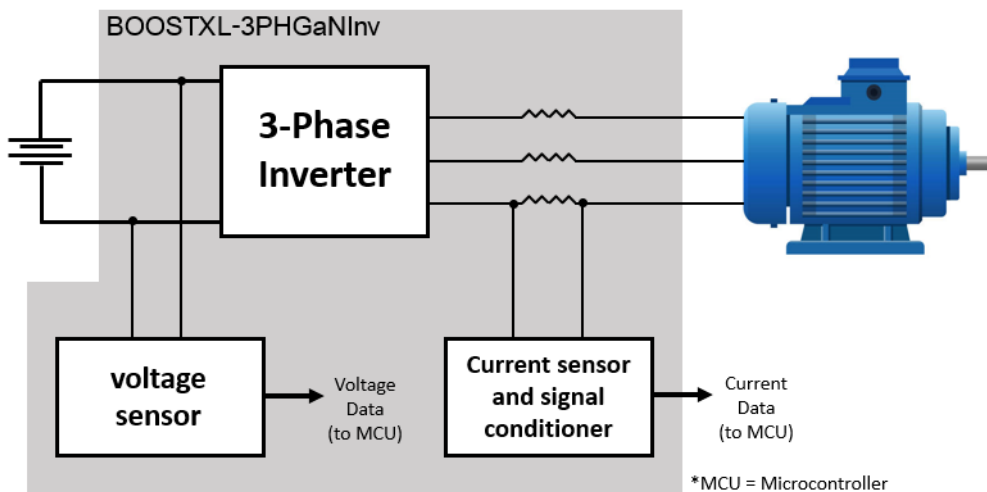
โดยการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่อพ่วงต่างๆ สามารถทำได้โดยใช้ Embedded Coder Support Package for Texas Instrument C2000 Processors ผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งแพ็คเกจที่สำคัญที่ใช้ภายในโครงงานฉบับนี้ ได้แก่

1. ADC (Analog-to-Digital Converter) เป็นอุปกรณ์ต่อพ่วงที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาล็อกจากอุปกรณ์ภายนอกเป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อสามารถนำมาประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ เช่น ในกรณีของโครงงานฉบับนี้ ADC จะทำหน้าที่ในการรับข้อมูลกระแสและแรงดันจากวงจรตรวจวัดกระแสและแรงดัน โดยหลักการทำงานคือจะทำการสุ่มตัวอย่างแรงดันขาเข้าด้วยอัตราที่สามารถปรับค่าได้ และแปลงเป็นค่าทางดิจิทัล 12 บิต ดังสมการที่ 20 โดย $V_{ref} = 3.3\text{ V}$ ดังนั้นค่าทางดิจิทัลจะน้อยที่สุดเมื่อแรงดันขาเข้าเท่ากับ 0- ถึง 1.61-mV และค่าทางดิจิทัลจะมากที่สุดเมื่อแรงดันขาเข้าเท่ากับ 3.298- ถึง 3.3 V จะเห็นได้ว่าแรงดันขาเข้าของ ADC จะมีค่าตั้งแต่ 0- ถึง 3.3-V เท่านั้น [8]

$$\text{Digital output} = 2^{12-1} \times \frac{\text{input}}{V_{ref}} \quad (20)$$

2. ePWM (Enhanced Pulse Width Modulation) ทำหน้าที่ในการคำนวณค่าสัญญาณควบคุมสวิตช์จากสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการตามหลักการ PWM เพื่อนำไปขับนำวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสและสร้างสัญญาณแรงดันที่ต้องการ ซึ่งในกรณีของโครงงานฉบับนี้ ePWM ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์จากสัญญาณแรงดันจากอัลกอริทึม MPPT โดย ePWM จะรับสัญญาณขาเข้าในรูปแบบของค่าร้อยละของขนาดแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง [8] ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจวัดขนาดแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเพื่อใช้ในการคำนวณด้วย

2.6 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับบอร์ด BOOSTXL-3PHGaNIInv



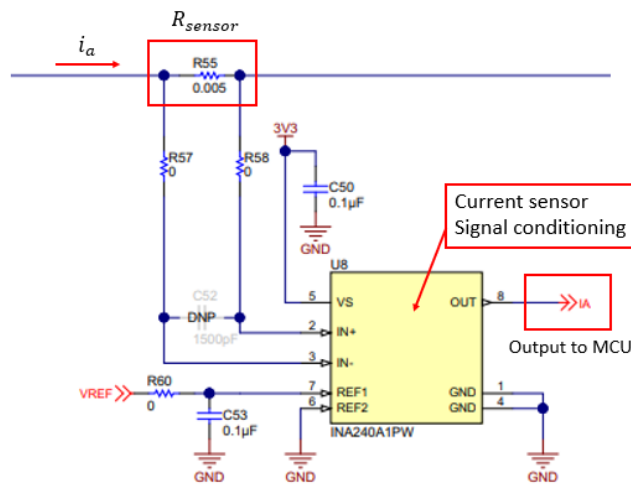
รูปที่ 14 แผนภาพบล็อกไออะแกรมการทำงานของบอร์ด BOOSTXL-3PHGaNIInv

ดังแสดงในรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าภายในโครงงานฉบับนี้ได้ใช้บอร์ด BOOSTXL-3PHGaNIInv ในการทำหน้าที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส นอกจากนี้บอร์ดยังสามารถทำหน้าที่เป็นวงจรตรวจวัดกระแสซึ่งทำหน้าที่ในการตรวจวัดค่ากระแสเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณต่อ และวงจรตรวจวัดแรงดันซึ่งทำหน้าที่ในการตรวจวัดค่าแรงดัน [9] เพื่อนำไปใช้สำหรับการคำนวณสร้างสัญญาณขาเข้าของ ePWM โดยมีแผนภาพไออะแกรมการทำงานโดยรวมดังรูปที่ 14 และมีรายละเอียดดังนี้

1. วงจรตรวจจับสนะแสง มีวงจรการทำงานดังรูปที่ 15 หลักการทำงานคือวงจรจะตรวจจับสนะแสงจากแรงดันตกคร่อม $R_{sen} = 5\text{-m}\Omega$ และส่งค่าแรงดันดังกล่าวไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่าน ADC แต่เนื่องจากดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.5 ว่า แรงดันขาเข้าของ ADC จะมีค่าตั้งแต่ 0- ถึง 3.3-V เท่านั้น ดังนั้นก่อนที่แรงดันจะถูกส่งไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะต้องผ่านตัวปรับปรุงสัญญาณ (Signal conditioner) ดังแสดงในรูปที่ 14 เพื่อปรับปรุงสัญญาณให้เหมาะสมกับ ADC เสียก่อน โดยตัวปรับปรุงสัญญาณมีฟังก์ชันถ่านโหนดดังสมการที่ 21 [9]

$$i_A [V] = (-i_a[A] \times 5\text{m}\Omega) \times 20 \left[\frac{V}{V} \right] + 1.65 V \quad (21)$$

เมื่อ $i_A [V]$ คือ สัญญาณขาออกของวงจรวัดกระแส
 $i_a[A]$ คือ กระแสที่ต้องการตรวจวัด

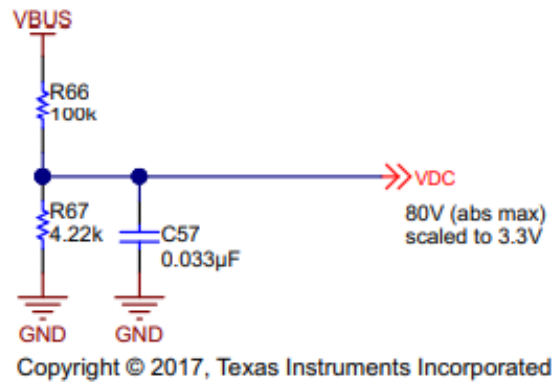


รูปที่ 15 วงจรการทำงานของวงจรตรวจจับสนะแสง [9]

2. วงจรตรวจจับสนะแสง มีวงจรการทำงานดังรูปที่ 16 ดังนั้นจากทฤษฎีการแบ่งแรงดันจะได้ฟังก์ชันถ่านโหนดของวงจรตรวจจับสนะแสงดังสมการที่ 22 [9]

$$VDC = \frac{4.22k}{100k + 4.22k} \times VBUS = \frac{1}{24.7} \times VBUS \quad (22)$$

เมื่อ VDC คือ สัญญาณขาออกของวงจรวัดแรงดัน
 $VBUS$ คือ แรงดันที่ต้องการตรวจวัด



รูปที่ 16 วงจรการทำงานของวงจรตรวจจับแรงดัน [9]

3. ผลลัพธ์ของโครงการและการอภิปรายผล

การทดลองภายในโครงงานฉบับนี้แบ่งออกเป็น 3 หัวข้อหลัก ได้แก่

1. การทดลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink (Model-in-Loop; MIL) (หัวข้อ 3.1)
2. การทดลองการทำงานของระบบเมื่อเมื่ออัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดทำงานผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 (Processor-in-Loop; PIL) (หัวข้อ 3.2)
3. การทดลองการทำงานของระบบจริง (Hardware-in-Loop; HIL) ซึ่งจะประกอบไปด้วยการทดลองการทำงานขององค์ประกอบพื้นฐานต่างๆ ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (หัวข้อ 3.3) และบอร์ด BOOSTXL-3PHGaNIInv (หัวข้อ 3.4) และผลการทดลองการทำงานของระบบจริงแต่อันเนื่องมาจากแผ่นพื้นเก็บพลังงานมีการพัฒนาสำหรับเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้นส่งผลให้ไม่สามารถทำการทดลองการทำงานของระบบจริงได้

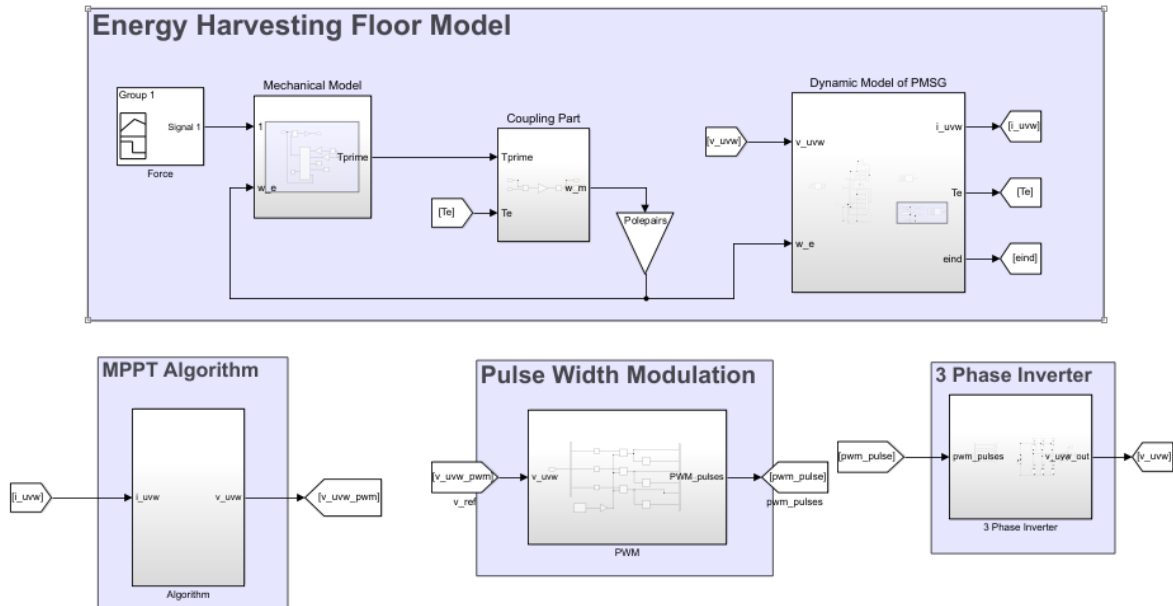
3.1 การทดลองการจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink (Model-in-Loop; MIL)

ในการทดลองการจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink จะเป็นการจำลององค์ประกอบต่างๆ ของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink มีจุดประสงค์เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองว่าเป็นไปตามทฤษฎีที่ตั้งใจไว้หรือไม่ ก่อนพัฒนาต่อไปยังการทดลองด้วยอุปกรณ์จริงต่อไป ซึ่งองค์ประกอบที่สำคัญของระบบมีดังนี้

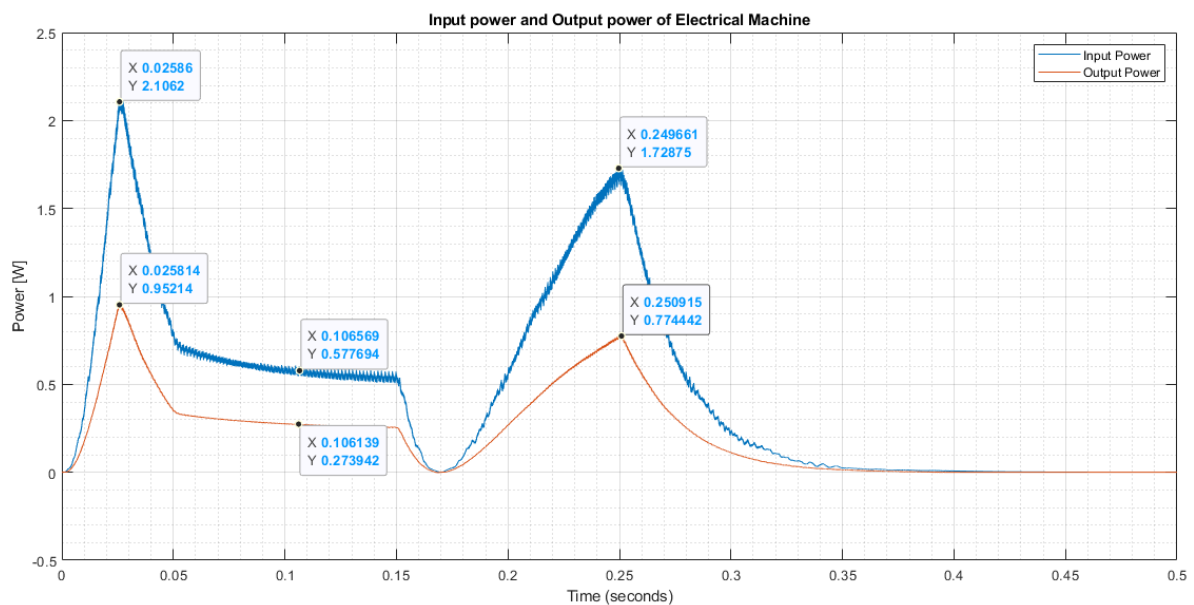
1. แผ่นพื้นเก็บพลังงาน ซึ่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบเชิงกลและเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร โดยแบบจำลองขององค์ประกอบทั้งสองอ้างอิงจากข้อมูลในหัวข้อที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ
2. อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด โดยแบบจำลองขององค์ประกอบนี้อ้างอิงจากข้อมูลในหัวข้อที่ 2.3

3. วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสและตัวคำนวณสัญญาณควบคุมสวิตช์ด้วยหลักการ PWM โดยแบบจำลองขององค์ประกอบทั้งสองอ้างอิงจากข้อมูลในหัวข้อที่ 2.4

โดยภาพรวมแบบจำลองของระบบเป็นดังรูปที่ 17 (ส่วนประกอบภายในบล็อกและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ผู้จัดทำขออนุญาตทำการแสดงในภาคผนวก) และกำลังขาเข้าและกำลังขาออกของเครื่องจักรไฟฟ้าดังรูปที่ 18

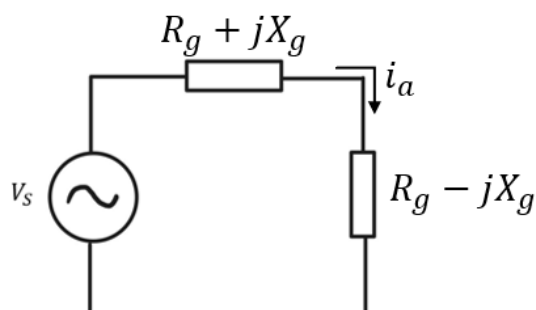


รูปที่ 17 รูปแสดงภาพรวมการทำงานของระบบบนโปรแกรม MATLAB/Simulink



รูปที่ 18 กราฟแสดงกำลังขาเข้า (สีน้ำเงิน) และกำลังขาออก (สีแดง) ของเครื่องจักรไฟฟ้า เมื่อมีการใช้ อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดเข้ามารวมใช้ภายในระบบ

จากรูปที่ 18 จะเห็นได้ว่ากำลังขาออกของเครื่องจักรไฟฟ้ามีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของกำลังขาเข้าของเครื่องจักรไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการถ่ายโอนพลังงานสูงสุด เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลซึ่งมีโหลดที่ส่งผลให้กำลังขาออกมีค่าสูงสุด ดังสมการที่ 15 และ 16 จากหัวข้อ 2.3 จะได้วงจรดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 ภาพวงจรเมื่อพิจารณาโหลดตามทฤษฎีการถ่ายโอนพลังงานสูงสุด

จะได้ว่ากำลังขาเข้าของวงจรดังรูปที่ 19 เป็นดังสมการที่ 23 และกำลังขาออกของวงจรเป็นดังสมการที่ 24 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังขาออกมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังขาเข้าของวงจร ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ดังรูปที่ 18

$$P_{in} = v_s i_a \quad (23)$$

$$P_{out} = Re \left(\frac{R_g - jX_g}{R_g + jX_g + R_g - jX_g} v_s \right) i_a \quad (24)$$

$$P_{out} = \frac{v_s i_a}{2}$$

กำลังขาออกสูงสุดดังกล่าวเป็นการเปรียบเทียบกำลังขาออกทางไฟฟ้ากับกำลังขาเข้าทางไฟฟ้า แต่หากเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังขาเข้าทางกลซึ่งมาจากการเหยียบของมนุษย์ กำลังขาออกดังกล่าวจะไม่ใช่กำลังขาออกที่สูงที่สุด เนื่องจากอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด เพียงแต่ทำการชดเชยกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าให้มิติน้อยที่ ไม่ได้มีการชดเชยกำลังสูญเสียทางกลให้มิติน้อยที่สุด

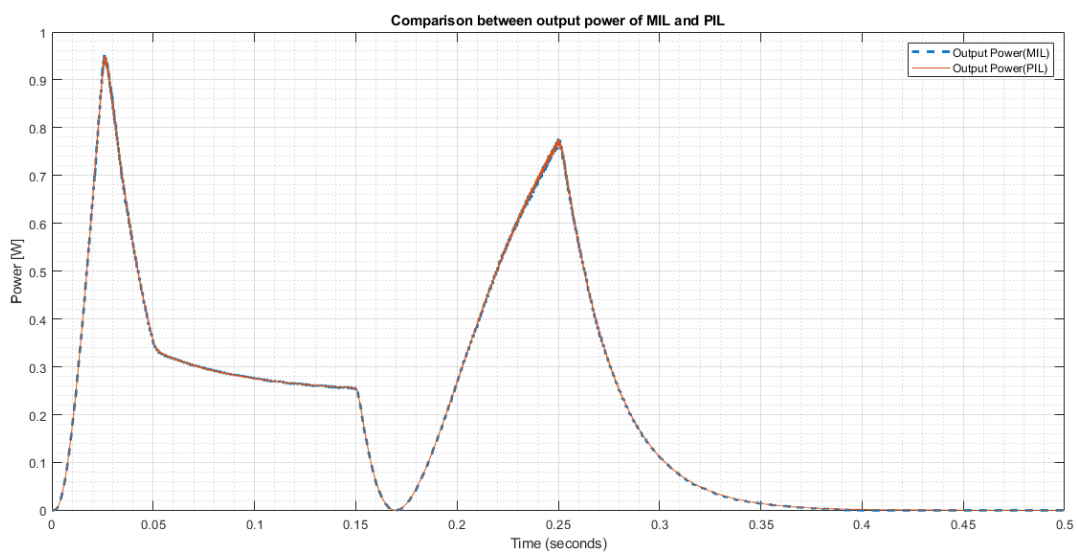
3.2 การทดลองการจำลองการทำงานของระบบเมื่ออัลกอริทึม MPPT ทำงานผ่านบอร์ด

ไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 (Processor-in-Loop; PIL)

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดให้สามารถทำงานบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ โดยลักษณะของอัลกอริทึม MPPT ที่ทำงานบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะแตกต่างจากที่ทำงานบนโปรแกรม MATLAB Simulink เนื่องจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานด้วยข้อมูลประเภทดิจิทัล ดังนั้นอัลกอริทึมจะต้องเป็นชนิดไม่ต่อเนื่องเชิงเวลา ซึ่งจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลาของอัลกอริทึม MPPT เมื่อ $f_{sampling} = 16$ kHz ดังสมการที่ 25

$$H(z) = \frac{-25.13z + 10.09}{z - 0.5335} \quad (25)$$

ซึ่งภาพรวมของระบบบนโปรแกรม MATLAB/Simulink จะคล้ายกับในรูปที่ 17 เพียงแต่ อัลกอริทึม MPPT จะทำงานบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยการใช้ฟังก์ชัน Processor-in-Loop (PIL) ของโปรแกรม MATLAB/Simulink และได้ผลการทดลองดังรูปที่ 20 ซึ่งเป็นกราฟเปรียบเทียบกำลังขาออกของเครื่องจักรไฟฟ้าระหว่างเมื่ออัลกอริทึม MPPT ทำงานบนโปรแกรม MATLAB/Simulink (MIL) และเมื่อทำงานบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (PIL) จะเห็นได้ว่ากำลังขาออกของทั้งสองกรณีมีความใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงสรุปได้สามารถพัฒนาอัลกอริทึม MPPT ให้สามารถทำงานบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้อย่างถูกต้อง

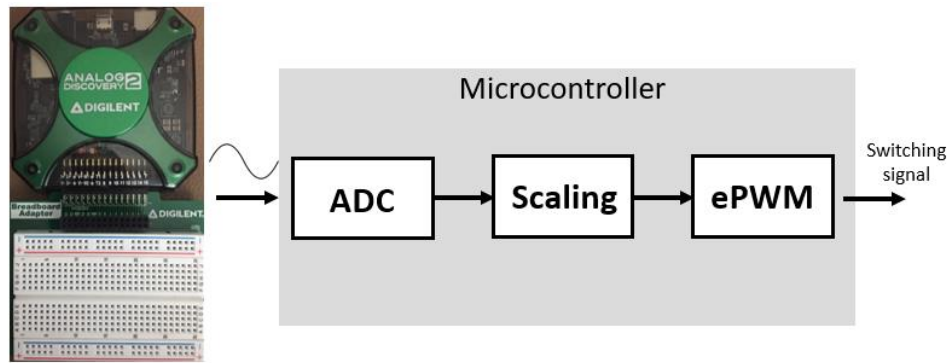


รูปที่ 20 กราฟเปรียบเทียบกำลังขาออกของเครื่องจักรไฟฟ้าระหว่างอัลกอริทึม MPPT ทำงานบนโปรแกรม MATLAB/Simulink (MIL) (เส้นปะ) และทำงานบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (PIL) (เส้นทึบ)

3.3 การทดลองการทำงานของอุปกรณ์ต่อพ่วงที่สำคัญของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

เพื่อพัฒนาการทำงานของระบบไปยังอุปกรณ์จริง (Hardware-in-Loop; HIL) ดังที่กล่าวไปข้างต้นว่าการส่งผ่านข้อมูลระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์ภายนอกสามารถทำได้ผ่านอุปกรณ์ต่อพ่วง (Peripheral devices) ดังนั้นการทดลองนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ต่อพ่วงที่ใช้ในโครงงานฉบับนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย Analog-to-Digital Converter (ADC) และ Enhanced Pulse Width Modulation (ePWM)

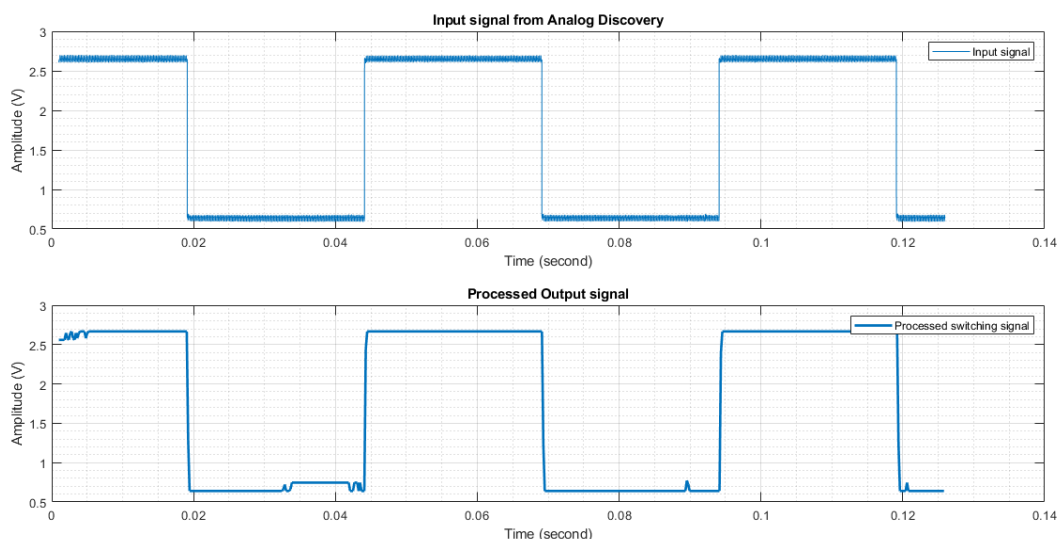
วิธีการทดลองจะเป็นดังรูปที่ 21 โดยหลักการมีดังนี้ เริ่มต้นจากใช้ Analog Discovery ในการสร้างสัญญาณที่ต้องการสร้าง จากนั้น ADC จะทำหน้าที่ในการรับข้อมูลสัญญาณดังกล่าวเข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และส่งสัญญาณดังกล่าวไปยัง ePWM เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ของสัญญาณที่ต้องการ จากนั้นใช้ Analog Discovery ในการตรวจจับสัญญาณดังกล่าวมาเพื่อประมวลผลต่อไป



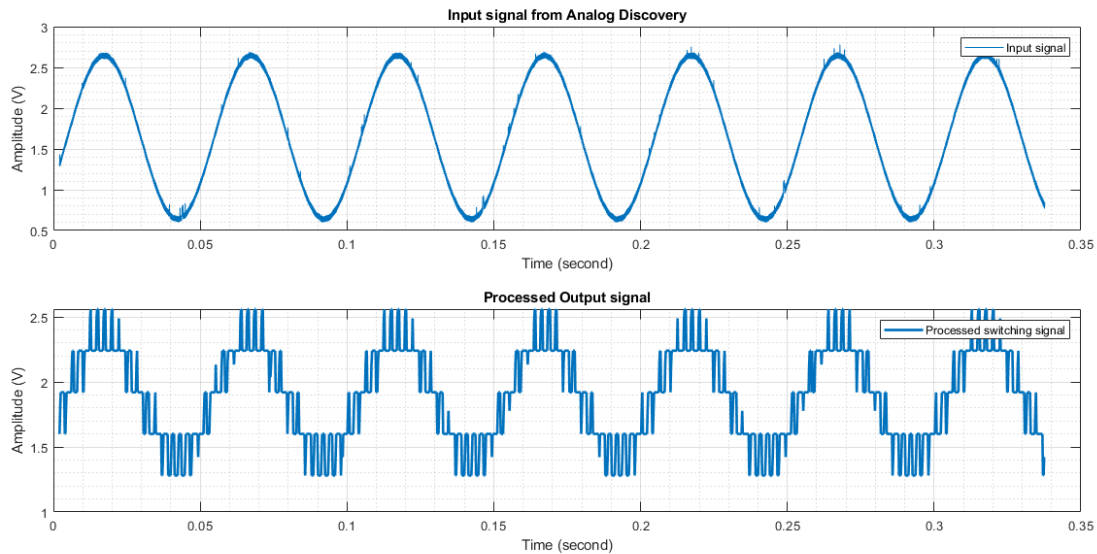
รูปที่ 21 วิธีการทดลองการส่งผ่านข้อมูลระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์ภายนอก

เนื่องจากการสร้างสัญญาณที่ต้องการด้วยหลักการ PWM ดังนั้นสัญญาณควบคุมสวิตช์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นกราฟสี่เหลี่ยมที่มีวัฏจักรงานที่ไม่เท่ากัน ซึ่งไม่สามารถทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ต้องการได้ โดยในทางปฏิบัติจะแก้ไขได้โดยนำสัญญาณควบคุมสวิตช์ที่ได้ดังกล่าวไปผ่านตัวกรองเพื่อให้ได้สัญญาณที่ต้องการ แต่เนื่องจากการระบาดของโรคโควิด-19 ส่งผลให้ผู้จัดทำไม่สามารถเดินทางไปใช้เครื่องมือภายในมหาวิทยาลัยได้ จึงทำการเขียนโปรแกรมเพื่อคำนวณค่าวัฏจักรงานในแต่ละคาบการสวิตช์ เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณ ณ คาบการสวิตช์ต่างๆ (แสดงอยู่ในภาคผนวก)

โดยในการทดลองได้ให้ Analog Discovery สร้างสัญญาณ 2 รูปแบบ ได้แก่ สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมและสัญญาณไซน์ ซึ่งผลการทดลองจะเป็นดังรูปที่ 22 และ 23 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ารูปสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขับนำสวิตช์ที่ผ่านการประมวลผลแล้วมีลักษณะใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า Analog-to-Digital Converter (ADC) และ Enhanced Pulse Width Modulation (ePWM) ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 22 รูปสัญญาณคำสั่งจาก Analog Discovery (รูปด้านบน) และรูปสัญญาณควบคุมสวิตช์ซึ่งผ่านการประมวลผลแล้ว (รูปด้านล่าง)



รูปที่ 23 รูปสัญญาณคำสั่งจาก Analog Discovery (รูปด้านบน) และรูปสัญญาณควบคุมสวิตช์ซึ่งผ่านการประมวลผลแล้ว (รูปด้านล่าง)

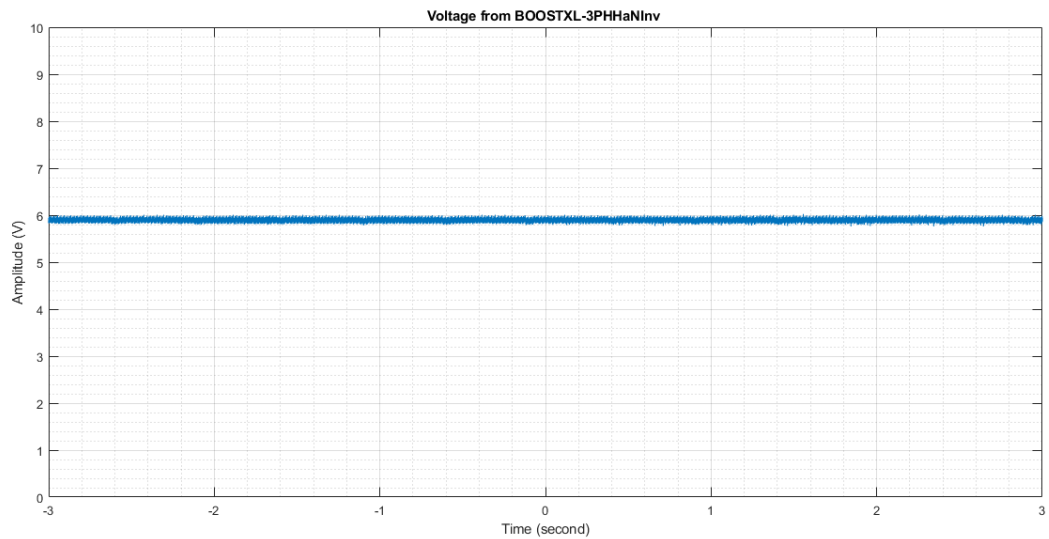
3.4 การทดลองการทำงานของบอร์ด BOOSTXL-3PHaNIInv

เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3 เพื่อพัฒนาการทำงานของระบบไปยังอุปกรณ์จริง (Hardware-in-Loop; HIL) การทดลองในส่วนนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อทดลองตรวจสอบการทำงานต่างๆ ของบอร์ด BOOSTXL-3PHaNIInv ซึ่งทำหน้าที่เป็น วงจรตรวจวัดกระแส วงจรตรวจวัดแรงดันและวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส

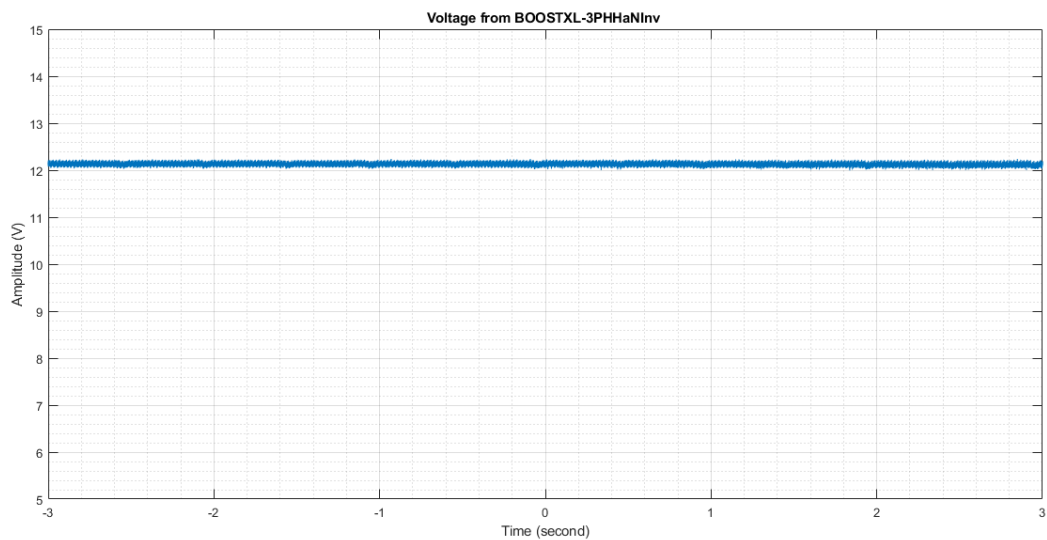
3.4.1 การทำงานของวงจรตรวจวัดแรงดัน

วิธีการทดลองมีดังนี้ ทำการจ่ายแรงดันกระแสตรงให้กับบอร์ด BOOSTXL-3PHaNIInv ด้วยแบตเตอรี่ จากนั้นใช้ Analog Discovery ตรวจวัดค่าที่วงจรตรวจวัดแรงดันตรวจวัดได้ (VDC) ซึ่งผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 24 และ 25 เมื่อจ่ายแรงดันด้วยแบตเตอรี่ 6 โวลต์และ 12 โวลต์ ตามลำดับ จะเห็นว่าแรงดันที่วัดได้เมื่อนำมาพิจารณาตามฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรตรวจวัดแรงดัน (VBUS) ดังสมการที่ 22 มีค่าเท่ากับแรงดันจากแบตเตอรี่ที่จ่ายให้กับบอร์ด

$$VDC = \frac{1}{24.7} \times VBUS \quad (22)$$



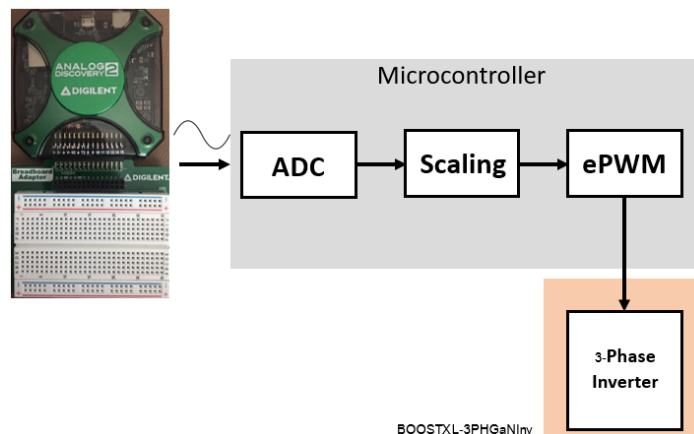
รูปที่ 24 แรงดันขาออกของวงจรตรวจวัดแรงดันคุณค่าคงที่ตามสมการที่ 22 (VBUS) เมื่อแบตเตอรี่เท่ากับ 6 โวลต์



รูปที่ 25 แรงดันขาออกของวงจรตรวจวัดแรงดันคุณค่าคงที่ตามสมการที่ 22 (VBUS) เมื่อแบตเตอรี่เท่ากับ 12 โวลต์

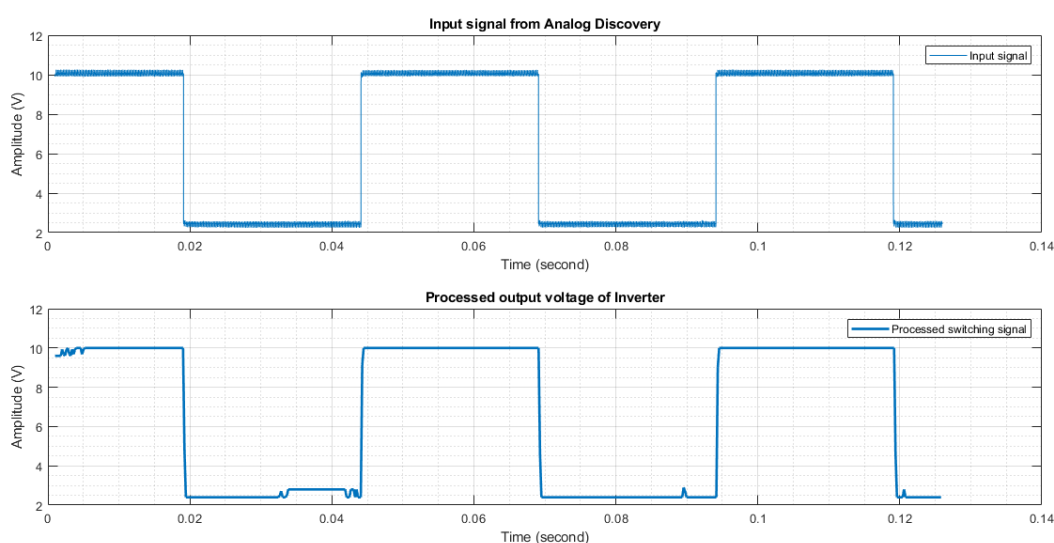
3.4.2 การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส

การทดลองนี้มีขั้นตอนการทำการทดลองคล้ายกับการทดลองในหัวข้อ 3.3 เพียงแต่เมื่อได้สัญญาณควบคุมสวิตช์แล้ว จะส่งสัญญาณควบคุมสวิตช์ไปยังวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส เพื่อขับนำสวิตช์และสร้างแรงดันที่ต้องการ ดังภาพรวมการทดลองแสดงดังรูปที่ 26

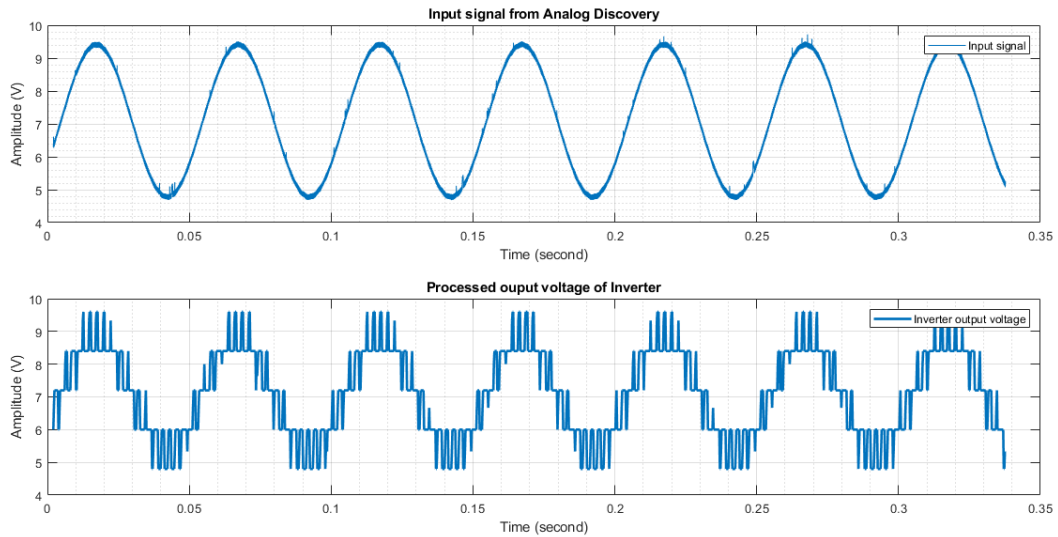


รูปที่ 26 วิธีการทดสอบการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส

จากวิธีการทดลองข้างต้น ทำการทดลองโดยให้ Analog Discovery สร้างสัญญาณ 2 รูปแบบ ได้แก่ สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมและสัญญาณไซน์ และแบตเตอรี่ที่จ่ายแรงดันให้กับบอร์ดมีค่าเท่ากับ 12 โวลต์ (ต้องถูกตรวจวัดด้วยวงจรตรวจวัดแรงดันสำหรับการคำนวณ เนื่องจากสัญญาณขาเข้าของ ePWM ต้องอยู่ในรูปของร้อยละของแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง) ซึ่งผลการทดลองจะเป็นดังรูปที่ 27 และ 28 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ารูปสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขับนำสวิตช์ที่ผ่านการประมวลผลแล้วมีลักษณะใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสของบอร์ด BOOSTXL-3PHHaNIInv สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 27 รูปสัญญาณคำสั่งจาก Analog Discovery (รูปด้านบน) และรูปสัญญาณขาออกของวงจรแปลงผันสามเฟสซึ่งผ่านการประมวลผลแล้ว (รูปด้านล่าง)

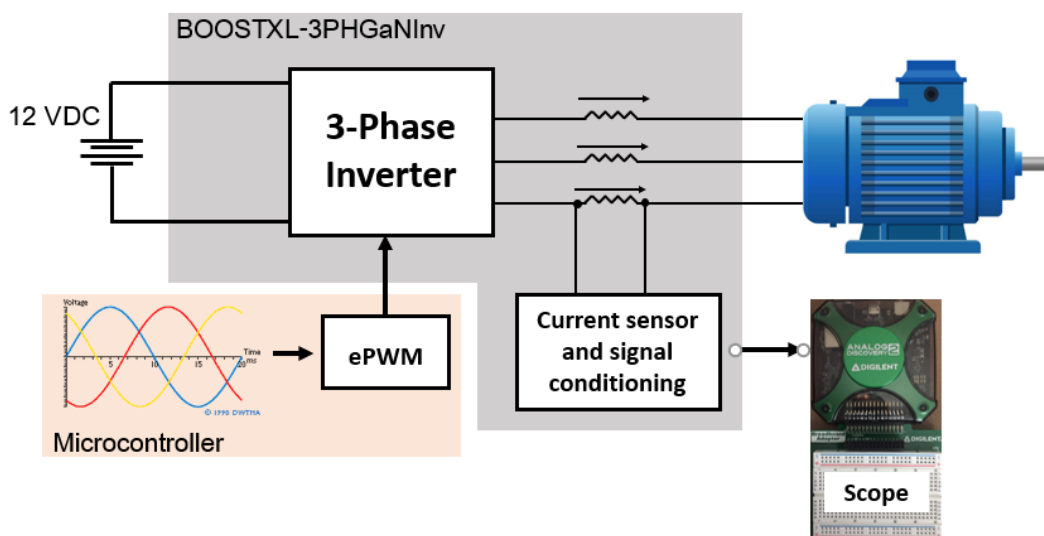


รูปที่ 28 รูปสัญญาณคำสั่งจาก Analog Discovery (รูปด้านบน) และรูปสัญญาณขาออกของวงจรแปลงผันสามเฟสซึ่งผ่านการประมวลผลแล้ว (รูปด้านล่าง)

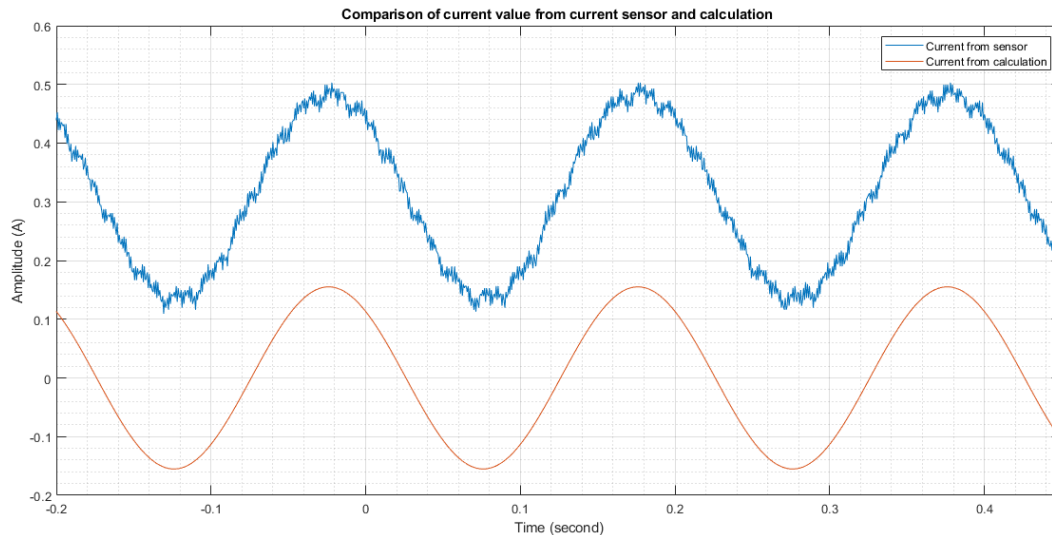
3.4.3 การทำงานของวงจรตรวจวัดกระแส

ภาพรวมวิธีการทดลองการทำงานของวงจรตรวจวัดกระแสเป็นดังรูปที่ 29 โดยเริ่มจากสั่งการทำงานให้วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสสร้างแรงดันสามเฟสจ่ายให้กับเครื่องจักรไฟฟ้า และใช้ Analog Discovery ในการตรวจวัดแรงดันขาออกจากวงจรตรวจวัดกระแสและนำมาประมวลผลกลับผ่านฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรตรวจวัดกระแสดังสมการที่ 21 ($i_a[A]$)

$$i_A [V] = (-i_a[A] \times 5m\Omega) \times 20 \left[\frac{V}{V} \right] + 1.65 V \quad (21)$$



รูปที่ 29 ภาพขั้นตอนการทำการทดสอบวงจรตรวจวัดกระแส



รูปที่ 30 กราฟเปรียบเทียบค่ากระแสที่ได้จากวงจรตรวจวัดกระแส ($i_a [A]$) (สีน้ำเงิน) และค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณ (สีแดง)

ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 30 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสที่ได้จากวงจรตรวจวัดกระแสมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากการคำนวณค่อนข้างมาก อันเนื่องมาจากพจน์ค่าคงที่ $+1.65$ ในสมการที่ 21 มีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อม ณ ขณะทำการทดลอง ดังนั้นเพื่อความแม่นยำมากยิ่งขึ้นในการตรวจวัดกระแส ก่อนการใช้งานจึงควรมีการตรวจจับค่าคงที่ดังกล่าว ณ สภาพแวดล้อมที่ทำการทดลอง (ขณะไม่มีกระแสไหล) เพื่อลดความผิดพลาดจากค่าคงที่ดังกล่าว แต่อันเนื่องมาจากเวลาที่จำกัด ผู้จัดทำจึงยังไม่ได้พัฒนาแก้ไขในประเด็นดังกล่าว ซึ่งหากประเด็นดังกล่าวถูกทำการแก้ไขแล้ววงจรตรวจวัดกระแสจะสามารถทำงานได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

4. บทสรุป

4.1 สรุปผลการดำเนินการ

ในระดับของการจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink (Model-in-Loop; MIL) รวมไปถึงการทำ Processor-in-Loop (PIL) มีผลลัพธ์ตรงไปตามทฤษฎีดังแสดงในหัวข้อ 3.1 และ 3.2 ผู้จัดทำจึงพัฒนาต่อมาสู่การทดลองการทำงานของระบบจริง โดยเริ่มต้นจากการพัฒนาองค์ประกอบพื้นฐานต่างๆ ที่ระบบต้องใช้ในการทำงาน เช่น วงจรตรวจวัดกระแสและแรงดัน วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส เป็นต้น ซึ่งมีผลการทดลองที่สามารถยืนยันได้ว่าองค์ประกอบพื้นฐานต่างๆ สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องดังแสดงในหัวข้อ 3.3 และ 3.4

แต่อันเนื่องมาจากแผ่นพื้นที่เก็บพลังงานมีการพัฒนาสำหรับเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น ส่งผลให้ไม่สามารถทำการทดลองการทำงานของระบบจริงได้ ถึงแม้ว่าวัตถุประสงค์หลักของโครงการจะไม่สามารถประสบความสำเร็จ แต่โครงการนี้ได้พัฒนาและออกแบบองค์ประกอบพื้นฐานต่างๆ ของระบบไว้ทั้งหมด

ดังนั้นผู้จัดทำจึงหวังว่าเมื่อมีการพัฒนาแผ่นพื้นเก็บพลังงานมีการพัฒนาสำหรับเครื่องจักรไฟฟ้า ซึ่งโครนิสชนิดแม่เหล็กถาวรแล้ว โครงการนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาต่อไปในอนาคต

4.2 ข้อเสนอแนะ

จากประเด็นที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1 ในเรื่องหากเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังขาเข้าทางกลซึ่งมาจากแรงจากการเหยียบของมนุษย์ กำลังขาออกดังกล่าวจะไม่ใช้กำลังขาออกที่สูงที่สุด เนื่องจากอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด เพียงแต่ทำการชดเชยกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าให้มีค่าน้อยที่ ไม่ได้มีการชดเชยกำลังสูญเสียทางกลให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเป็นประเด็นที่สามารถพัฒนาต่อไปได้อีกในอนาคต

และจากประเด็นที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.4.3 ในเรื่องของความไม่แน่นอนของค่าคงตัวของวงจรตรวจวัดกระแส ส่งผลให้เกิดค่าความผิดพลาดของกระแสที่ตรวจวัดได้ ดังนั้นในอนาคตหากมีการพัฒนาต่อ จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาเพิ่มเติมในส่วนนี้ โดยการตรวจวัดค่าคงตัวดังกล่าวก่อนที่ระบบจะเริ่มต้นการทำงาน

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จได้ เนื่องจากได้รับความกรุณาจาก รศ. ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการของข้าพเจ้าที่กรุณาให้คำปรึกษา ให้ข้อคิดต่างๆ อันเป็นประโยชน์ในการทำโครงการและการทำงานในอนาคต ส่งผลให้ผู้จัดทำสามารถทำโครงการได้สำเร็จจุลวงได้ จึงต้องขอขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้กรุณาสับสนุนทุนในการทำโครงการฉบับนี้ และอนุญาตให้ใช้อุปกรณ์ รวมไปถึงพื้นที่ในการทำโครงการฉบับนี้เช่นกัน

ขอขอบคุณพีธีนิติปริญาโท นายศตยสาร พิตรพิบูลย์วงศ์ ที่ได้ให้คำแนะนำในส่วนของการทดสอบการทำงานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่าน Embedded Coder Support Package for Texas Instrument C2000 Processors ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ส่งผลให้ผู้จัดทำสามารถทำความเข้าใจการทำงานในส่วนนี้ได้อย่างรวดเร็ว

ขอขอบคุณนิติปริญาตรี นายณัฐวุฒิ คุ่มปานอินทร์ ที่คอยให้คำปรึกษา และช่วยเหลือในการทำโครงการฉบับนี้ ตลอดถึงให้คำชี้แนะในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำโครงการ

นายคณัสนันท์ จันทรภักดี

พฤษภาคม 2564

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ชนุดม อยู่เวียงไชย, พัสกร กริโภาค และพิมพ์ศลิษา เชนฐชาติตรี, “แผ่นพื้นเก็บพลังงาน,” ปรินญา นิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2562.
- [2] Asst. Prof. Surapong Suwankawin, Ph.D. "Chapter 4 Modeling and Control of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor," presented to 2102-543, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. [PowerPoint slides].
- [3] Asst. Prof. Surapong Suwankawin, Ph.D. "Chapter 3 Space Vector Representation," presented to 2102-543, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. [PowerPoint slides].
- [4] S. P. Koko, K. Kusakana, and H. J. Vermaak, "Permanent magnet synchronous generator model," in *Micro-hydrokinetic river system modelling and analysis as compared to wind system for remote rural electrification*. Central University of Technology, [online document], 2015. Available: ScienceDirect, <http://www.sciencedirect.com> [Accessed: Sep 21, 2020].
- [5] K. Tse and H. Chung, "MPPT for Electromagnetic Energy Harvesters Having Nonnegligible Output Reactance Operating Under Slow-Varying Conditions", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 7, pp. 7110-7122, 2020. [Accessed: Sep 25, 2020].
- [6] Asst. Prof. Surapong Suwankawin, Ph.D. "Chapter 3 DC-AC Converter (Inverter)," presented to 2102-446, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. [PowerPoint slides].
- [7] V. Bobek, "PMSM Electrical Parameters Measurement", *Nxp.com*, 2020. [Online]. Available: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN4680.pdf>. [Accessed: Nov 16, 2020].
- [8] Texas Instruments, "TMS320F28004X Real-Time Microcontrollers Technical Reference Manual," Reference Guide SPRUI33D, Nov. 2015 [Revised Sep. 2020].
- [9] Texas Instruments, "48-V, 10-A, High-Frequency PWM, 3-Phase GAN Inverter Reference Design for High-Speed Motor Drive." Reference Guide TIDUCE7B, Nov. 2016 [Revised Apr. 2017].

7. ภาคผนวก

7.1 ภาคผนวก ก.

ในส่วนนี้จะเป็ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรเพื่อใช้ประกอบในการวิเคราะห์แบบจำลอง โดยมีตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ ขั้วของเครื่องจักรไฟฟ้าและรูปคลื่นของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายใน, ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์, สเปซเวกเตอร์ของความเหนี่ยวนำขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงดีคิวและค่าคงตัวของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายใน

1. ขั้วของเครื่องจักรไฟฟ้าและรูปคลื่นของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายใน

สามารถระบุได้โดยตรวจจ็รูปคลื่นแรงดันขาออกระหว่างขั้วขาออกของเครื่องจักรไฟฟ้าในการหมุนตัวต้นกำลัง 1 รอบและนำมาวิเคราะห์ เนื่องจากบริเวณขั้วของแม่เหล็กถาวรจะเป็นบริเวณที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงที่สุด ซึ่งค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายในจะมีค่าสูงสุดด้วยเช่นกัน จึงสามารถตรวจสอบขั้วของเครื่องจักรไฟฟ้าได้จากจำนวนยอดลูกคลื่นของรูปคลื่นแรงดันที่ตรวจวัดได้พร้อมกับสามารถระบุรูปคลื่นของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายในได้เช่นกัน ผลการทดสอบได้ว่าแรงดันมีรูปคลื่นเป็นคลื่นรูปไซน์และมีจุดที่แรงดันมีค่าสูงที่สุดและต่ำที่สุดอยู่ 12 จุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครนัสเครื่องนี้มีจำนวนขั้ว 6 คู่และมีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเป็นคลื่นรูปไซน์

2. ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์

สามารถทำได้โดยวัดค่าความต้านขดลวดสเตเตอร์ระหว่างขั้วขาออกของเครื่องจักรไฟฟ้า และเนื่องจากเป็นความต้านทานที่วัดได้ระหว่างเฟส ดังนั้นค่าที่ได้จึงมีค่าเป็นสองเท่าของความต้านทานขดลวดสเตเตอร์

3. สเปซเวกเตอร์ของความเหนี่ยวนำขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงดีคิว

เนื่องจากค่า L_d และ L_q ประกอบไปด้วยผลของค่าความเหนี่ยวนำสองส่วนได้แก่ ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและค่าความเหนี่ยวนำร่วม ดังนั้นเพื่อพิจารณาผลของค่าความเหนี่ยวนำร่วม จึงทำลัตวงจรระหว่างสองเฟสและทำการวัดใช้มิเตอร์วัดค่า (RLC meter) ทำการวัดระหว่างจุดที่ลัตวงจรดังกล่าวกับอีกหนึ่งเฟสที่เหลืออยู่ และเนื่องจากพิจารณาว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นชนิดโรเตอร์ทรงกระบอก (Non-salient pole) ซึ่งจะมีค่า L_d และ L_q ที่เท่ากัน

4. ค่าคงตัวของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายใน

ผู้จัดทำทำการหาค่าโดยประมาณของค่าคงตัวของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายในของเครื่องจักรไฟฟ้าจากข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากผู้จัดจำหน่าย โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 26

$$K = \frac{V_{out,max,peak}}{\sqrt{3}\omega_{e,max}} \quad (26)$$

และตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแสดงดังตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ตารางแสดงค่าตัวแปรทางกลที่เกี่ยวข้องกับแผ่นพื้นเก็บพลังงาน [1]

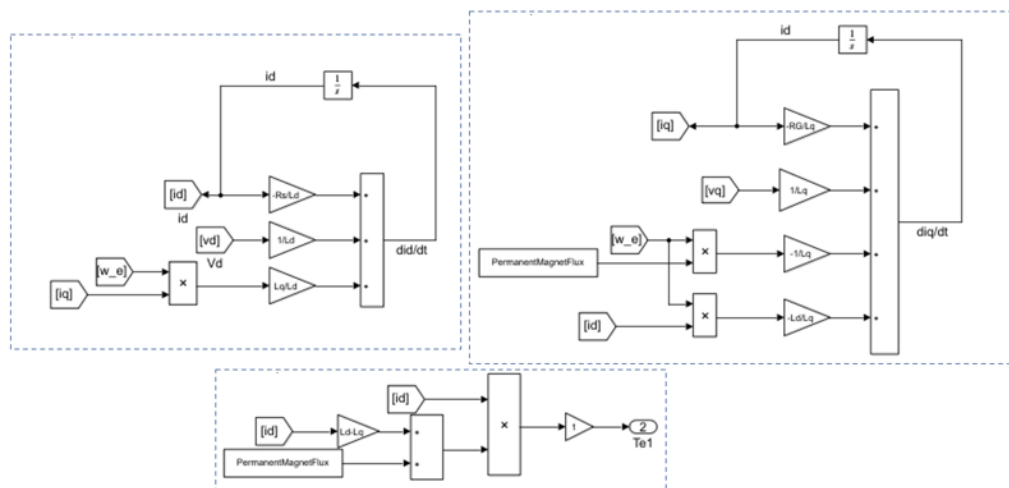
| ตัวแปร | ปริมาณ |
|---|---------------------------------------|
| Thrust Bearing Diameter (D_{thrust}) | 8 mm |
| Lead (l) | 1 cm |
| Mass (m) | 2.16 kg |
| Moment of inertia of bevel gear (1ea) (J_g) | $8.6756 \times 10^{-7} \text{ kgm}^2$ |
| Moment of inertia of lead screw (J_l) | $2.5536 \times 10^{-7} \text{ kgm}^2$ |
| Lead angle | 45 degree |
| Spring Coefficient (k) | 40,000 N/m |
| Damping Coefficient (d) | 2,000 Ns/m |
| Friction Coefficient (μ) | 0.21 |

ตารางที่ 3 ตารางแสดงค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

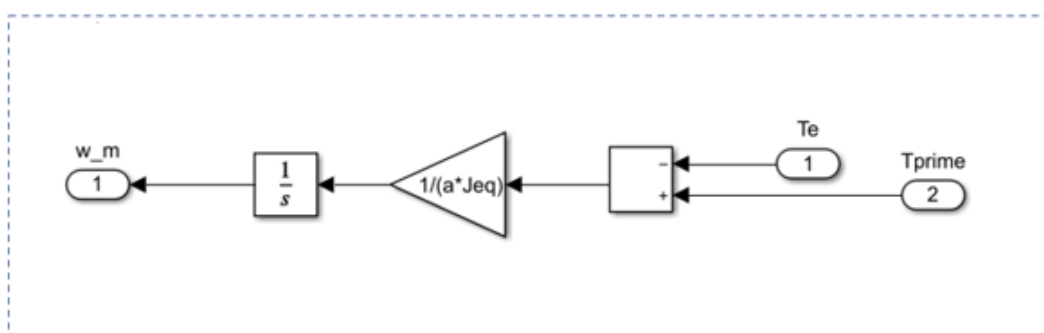
| ตัวแปร | ปริมาณ |
|---|----------------|
| ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (R_s) | 32.23 Ω |
| ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ (L_s) | 11.3 mH |
| ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงดี (L_d) | 16 mH |
| ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงคิว (L_q) | 16 mH |
| ฟลักซ์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร | 0.009 Wb |
| จำนวนคู่ขั้ว | 6 คู่ |

7.2 ภาคผนวก ข.

ในส่วนนี้จะเป็นการแสดงบล็อกไดอะแกรมขององค์ประกอบต่างๆ ภายในแบบจำลองของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

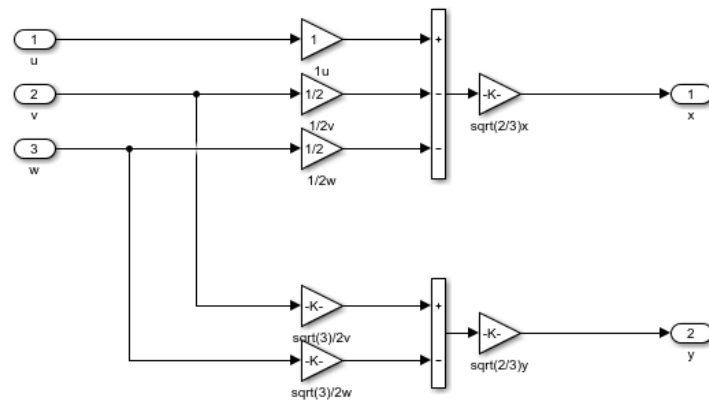


รูปที่ 31 แผนภาพไดอะแกรมของแบบจำลองเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรบนแกนอ้างอิง d-q

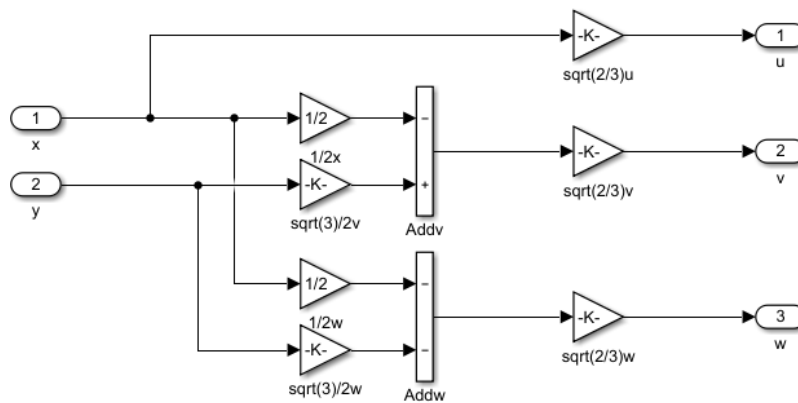


รูปที่ 32 แผนภาพไดอะแกรมของระบบคู่ควบ (Coupling) ระหว่างแผ่นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้า

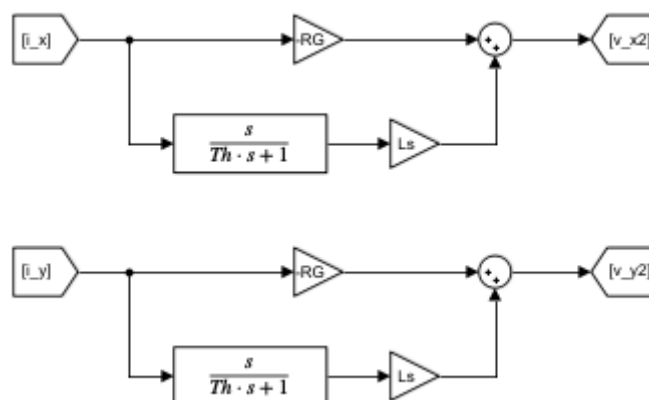
3 / 2 Transformation



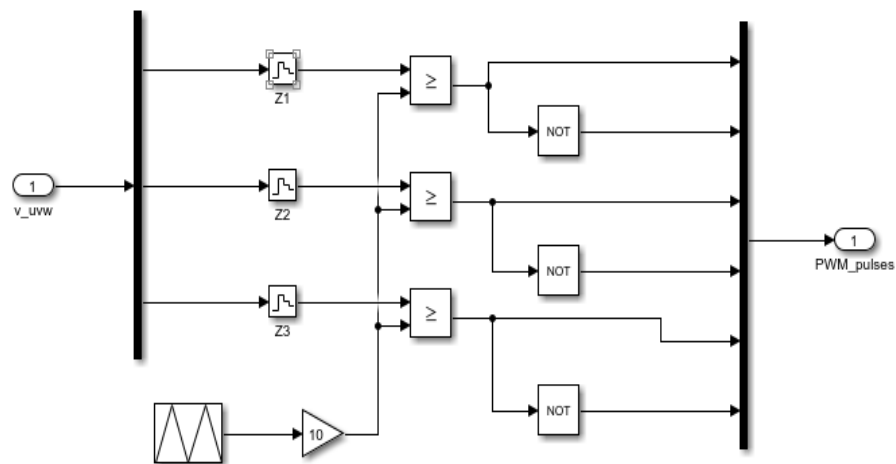
รูปที่ 33 แผนภาพไดอะแกรมของการแปลงภาพของคลาร์กซ์ (Clarke's Transformation)



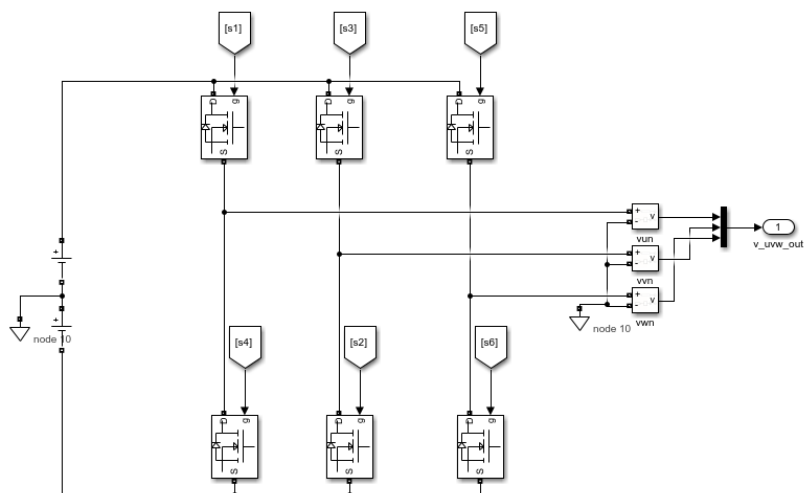
รูปที่ 34 แผนภาพไดอะแกรมของการแปลงภาพผกผันของคลาร์กซ์ (Inverse Clarke's Transformation)



รูปที่ 35 แผนภาพไดอะแกรมของอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด



รูปที่ 36 แผนภาพไดอะแกรมการทำงานของอัลกอริทึมเทคนิคการสร้างสัญญาณโดยการปรับความกว้างพัลส์



รูปที่ 37 แบบจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

7.3 ภาคผนวก ค.

ในส่วนนี้จะเป็นการแสดงโปรแกรมซึ่งทำหน้าที่ในการคำนวณค่าวัฏจักรงานในแต่ละคาบการสวิตช์ซึ่งใช้ในการทดลองหัวข้อ 3.3 และ 3.4.2 โดยโปรแกรมหักด้วยประกอบไปด้วยโค้ด 3 ส่วน ได้แก่

1. Data_preparation.m ซึ่งทำหน้าที่ในการแบ่งช่วงระหว่างช่วงที่สวิตช์เปิดและปิด โค้ด MATLAB แสดงดังรูปที่ 38
2. Dutycycle_calculation.py ซึ่งทำหน้าที่ในการคำนวณวัฏจักรงานของแต่ละคาบการสวิตช์ โค้ด Python แสดงดังรูปที่ 39

3. Data_plot.m ซึ่งทำหน้าที่ในการพล็อตกราฟแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ โค้ด MATLAB แสดงดังรูปที่ 40

```
% File location
location = 'Insert_File_location';
data_file = 'Insert_File_name';

% Data preparation
x = readtable(append(location, data_file));
t = x.('Var1') (131234:151234,:); % time
epwm_result = x.('Var3') (131234:151234,:); % PWM output

% Calculation
epwm_sign = sign(double(int16(epwm_result)));
result = t.*epwm_sign; % ON/OFF time divider

% Import data
fid = fopen(append(location, 'time.txt'),'w');
T = table(result(:,1));
writetable(T, append(location, 'time.txt'), 'WriteVariableNames', 0);
fclose(fid);

fid = fopen(append(location, 'time_default.txt'),'w');
T = table(t(:,1));
writetable(T, append(location, 'time_default.txt'), 'WriteVariableNames', 0);
fclose(fid);
```

รูปที่ 38 โค้ด MATLAB ส่วนของ Data_preparation.m

```
f = open('time.txt','r')
f2 = open('time_default.txt','r')

time = f.read().splitlines()
time_default = f2.read().splitlines()

def find_duty(time, time_default):
    zero_index = time.index('0')
    for i in range(zero_index, len(time)):
        if time[i] != '0':
            nonzero_index = i
            break
    t_on =
float(time_default[zero_index-1])-float(time_default[0])
    t_off =
float(time_default[nonzero_index-1])-float(time_default[zero_index])
    duty_cycle = t_on/(t_on+t_off)
    del time_default[0:nonzero_index]
    del time[0:nonzero_index]
    return (duty_cycle, time_default, time)

while len(time) != 0:
    ans = find_duty(time, time_default)
    time = ans[2]
    time_default = ans[1]
    f3 = open('result.txt','a')
    f3.write(str(ans[0])+'\n')
    f3.close()
```

รูปที่ 39 โค้ด Python ส่วนของ Dutycycle_calculation.py

```

% File location
location = 'Insert_File_location';
data_file = 'Insert_File_name';

% Read data file
x = readtable(append(location, 'result.txt'));
x2 = readtable(append(location, data_file));
x3 = readtable(append(location, 'time_default.txt'));

% Calculation output signal
Vdc = 12; %volt
duty_cycle = x.('Var1');
Amplitude = duty_cycle.*Vdc;

t = x3.('Var1');
t_interval = (t(end)-t(1))/length(duty_cycle);
time_amplitude = t(1) : t_interval : t(end)-t_interval;

% Input signal
input_signal = x2.('Var2') (1:1234:151234,:);
time_input = x2.('Var1') (1:1234:151234,:);

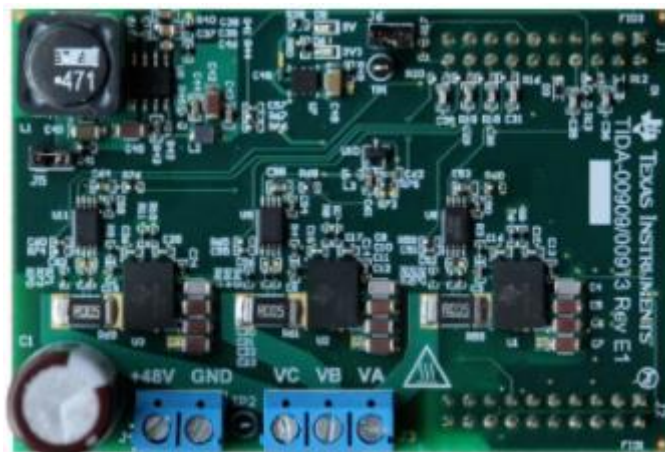
%Comparison plot
figure();
subplot(211);
plot(time_input, input_signal);
legend('Input signal');
%hold on;
subplot(212);
plot(time_amplitude, Amplitude, 'linewidth',2);
legend('Processed switching signal');
ylim([2 12]);

```

รูปที่ 40 โค้ด MATLAB ส่วนของ Data_plot.m

7.4 ภาคผนวก ง.

7.4.1 บอร์ด TI BOOSTXL-3PhGaNIInv



รูปที่ 41 บอร์ด TI BOOSTXL-3PhGaNIInv EVM [9]

เป็นบอร์ดซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส วงจรตรวจจับกระแสและวงจรตรวจจับแรงดันให้กับระบบ ลักษณะของบอร์ดแสดงดังรูปที่ 41 รายละเอียดเบื้องต้นเกี่ยวกับบอร์ดและ Pin labeling แสดงดังตารางที่ 4, 5 และ 6

ตารางที่ 4 ตารางแสดงรายละเอียดเบื้องต้นของบอร์ด TI BOOSTXL-3PhGaNInv EVM [9]

| PARAMETER | TYPICAL VALUE | COMMENTS |
|--|--|---|
| DC input voltage | 48 V (12 to 60 V) | 80-V absolute max |
| Maximum three-phase output current | $7A_{RMS}$ ($10A_{V_{CE,DC}}$) per phase | See Figure 51 for maximum three-phase output current versus ambient temperature with natural convection |
| Maximum input power | 400 W (at 48 V) | — |
| Power FET type | GaN technology | Half-bridge power module with integrated high-side and low-side gate drivers (LMG5200) |
| PWM switching frequency | 40 to 100 kHz | — |
| PWM deadband | 12.5 ns | — |
| Maximum efficiency at 100-kHz PWM | 98.5% | At 400-W input power |
| Phase currents sense and amplifier | 5-mΩ shunt per INA240 | Differential, non-isolated current sense amplifier with 20 V/V and enhanced PWM rejection (INA240) ⁽¹⁾ |
| Phase current maximum range | ±16.5 A | Scaled to 0 to 3.3 V; inverted with 1.65-V bias |
| Phase current accuracy (–25°C to 85°C) | ±0.5% (uncalibrated), ±0.1% (calibrated) | Over nominal range ±10 A; one-time calibration of offset and gain at 25°C |
| EMI input and output filter | External | — |
| PCB layer stack | Four-layer, 70-μm copper | — |
| PCB size | 53.4 mm × 78.9 mm | Dimensions in mil: 2105 mil × 3107 mil |
| Temperature range | –40°C to 85°C | See Figure 51 for maximum three-phase output current versus ambient temperature with natural convection |
| PCB over-temperature alert | > 85°C | Configurable from 70°C to 85°C (TMP302B) |
| Interface-to-host processor | Ti BoosterPack compatible | Refer to Table 2 and Table 3 for pin assignment |
| 3.3-V supply current for LaunchPad | 300 mA or 500 mA (max), see Section 2.1 | Jumper option (J3) to provide 3.3-V supply for C2000™ MCU LaunchPad™ |

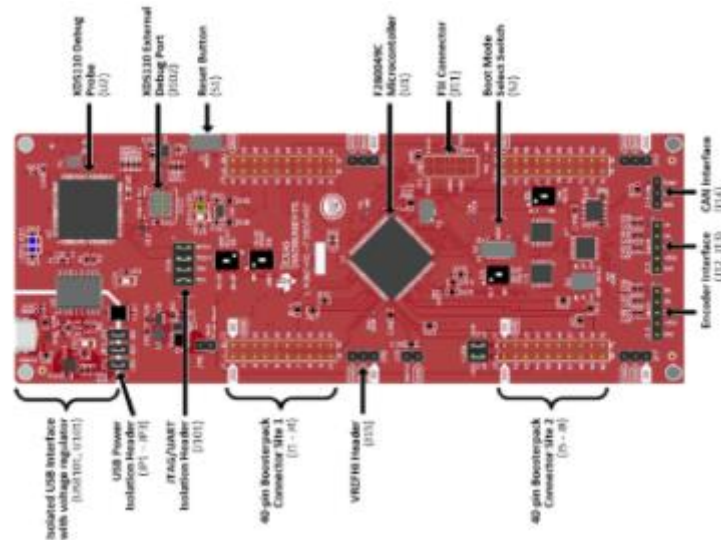
ตารางที่ 5 ตารางแสดง J1 Pin labeling ของบอร์ด TI BOOSTXL-3PhGaNInv EVM [9]

| PIN | SIGNAL | I/O (3.3 V) | PIN | SIGNAL | I/O (3.3 V) |
|-------|-------------------------|-----------------------------|-------|--------|---------------------------------|
| J1-1 | 3.3-V supply (optional) | O or NC (jumper selectable) | J1-2 | NC | — |
| J1-3 | NC | — | J1-4 | GND | GND |
| J1-5 | NC | — | J1-6 | VDC | O (0 to 3.3 V) ⁽¹⁾ |
| J1-7 | NC | — | J1-8 | VA | O (0 to 3.3 V) ⁽¹⁾ |
| J1-9 | NC | — | J1-10 | VB | O (0 to 3.3 V) ⁽¹⁾ |
| J1-11 | VREF | O (3.3 V, 10 ppm) | J1-12 | VC | O (0 V to 3.3 V) ⁽¹⁾ |
| J1-13 | NC | — | J1-14 | IA | O (0 to 3.3 V) |
| J1-15 | NC | — | J1-16 | IB | O (0 to 3.3 V) |
| J1-17 | NC | — | J1-18 | IC | O (0 to 3.3 V) |
| J1-19 | NC | — | J1-20 | VREF | O (3.3 V, 10 ppm/K) |

ตารางที่ 6 ตารางแสดง J1 Pin labeling ของบอร์ด TI BOOSTXL-3PhGaNInv EVM [9]

| PIN | SIGNAL | I/O (3.3 V) | PIN | SIGNAL | I/O (3.3 V) |
|-------|-------------------|------------------------|-------|--------------------------|-------------|
| J2-1 | PWM A (high-side) | I (10k PD) | J2-2 | GND | GND |
| J2-3 | PWM A (low-side) | I (10k PD) | J2-4 | NC | — |
| J2-5 | PWM B (high-side) | I (10k PD) | J2-6 | NC | — |
| J2-7 | PWM B (low-side) | I (10k PD) | J2-8 | NC | — |
| J2-9 | PWM C (high-side) | I (10k PD) | J2-10 | NC | — |
| J2-11 | PWM C (low-side) | I (10k PD) | J2-12 | NC | — |
| J2-13 | /PCB OT alert | O (open drain, 10k PU) | J2-14 | NC | — |
| J2-15 | NC | — | J2-16 | /PWM enable (active low) | I (10k PU) |
| J2-17 | NC | — | J2-18 | NC | — |
| J2-19 | NC | — | J2-20 | NC | — |

7.4.2 บอร์ด TI C2000 LAUNCHXL-F280049C

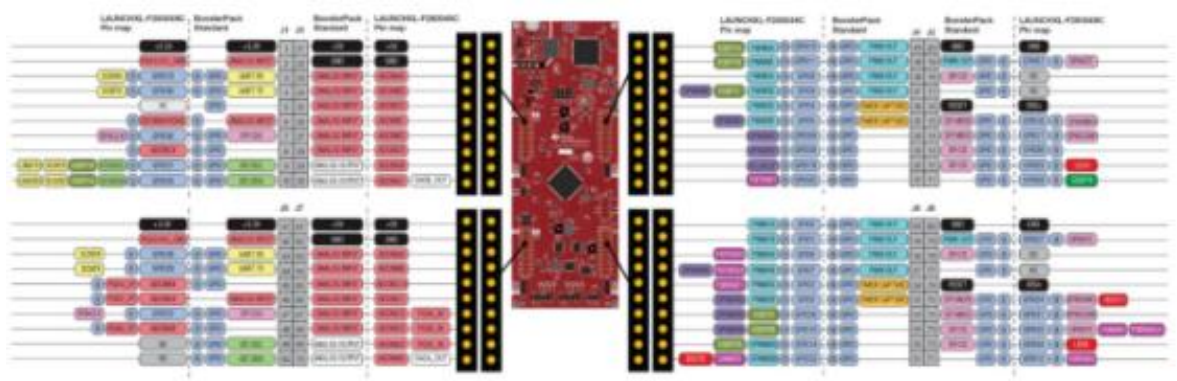


รูปที่ 42 บอร์ด TI C2000 LAUNCHXL-F280049C [8]

เป็นบอร์ดซึ่งทำหน้าที่เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ให้กับระบบแสดงดังรูปที่ 42 โดยสามารถออกแบบการทำงานผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยใช้ Embedded Coder Support Package for Texas Instrument C2000 Processors ในการพัฒนา โดยข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับบอร์ดและ pin labeling แสดงดังตารางที่ 7 และรูปที่ 43 ตามลำดับ

ตารางที่ 7 ตารางแสดงข้อมูลเบื้องต้นของ TI C2000 LAUNCHXL-F280049C [8]

| Parameter | Value |
|------------------------------|---|
| Board Supply Voltage | 5 V _{DC} from one of the following sources: <ul style="list-style-type: none"> • Debug USB (USB101) USB Micro-B cable connected to PC or other compatible power source. • BoosterPack 1 • BoosterPack 2 • Auxiliary power connectors |
| Dimensions | 6.15 in x 2.3 in x .425 in (15.62 cm x 5.84 cm x 10.8 mm) (L x W x H) |
| Break-out Power Output | <ul style="list-style-type: none"> • Optional 5 V_{DC} to BoosterPacks, current limited by LMR62421. Nominal rating 2.1 Amps. Board input power supply limitations may also apply. • 3.3 V_{DC} to BoosterPacks, limited by output of TPS79601 LDO. This 3.3-V plane is shared with on-board components. Total output power limit of TPS79601 is 1 Amp. |
| Assumed Operating Conditions | This kit is assumed to run at standard room conditions. The EVM should run at approximately standard ambient temperature and pressure (SATP) with moderate-to-low humidity. |



รูปที่ 43 ภาพแสดง Pin labeling ของบอร์ด TI C2000 LAUNCHXL-F280049C [8]