ข้อเสนอโครงงานวิศวกรรมไฟฟ้า วิชา 2102490

อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานชนิดเครื่องจักรกลไฟฟ้า

Power Electronics for Electromechanical Energy-Harvesting System

นายณัฐพล กาบแก้ว เลขประจำตัว 6130176521

นายสันติ ว่องประเสริฐ เลขประจำตัว 6130553421

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกวิน

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

สารบัญ

1 บทนำ **1**

1.1 บทคัดย่อ 1

1.2 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน 1

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 3

1.4 ขอบเขตของโครงงาน 3

1.5 ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากโครงงาน 3

2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง **4**

2.1 การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง (Two Arm Modulation and First Quadrant Tracking Algorithm) 4

2.1.1 การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบใช้สัญญาณพาหะ และ อินเวอร์เตอร์โหมดแรงดันแบบสามเฟส 4

2.1.2 กำลังสูญเสียในสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 5

2.1.3 การนำกระแสในจตุภาคที่ 3 ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแกลเลียม ไนไตรท์ . 6

2.1.4 การลดกำลังสูญเสียในการมอดูเลตแบบใช้สัญญาณพาหะ ด้วยการมอดูเลตแบบสองแขน 9

2.1.5 การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการมอดูเลตแบบสองแขนด้วยการติดตามการทำงานในจตุภาคที่ 1 9

2.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking Algorithm; MPPT) 10

2.2.1 ข้อมูลรายละเอียดและหลักการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน 10

2.2.2 การเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า (Electrical analogy) 10

2.2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร 11

2.2.4 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับการติดตามจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking) สำหรับวงจรกักเก็บพลังงาน 13

3 ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น **15**

3.1 การทดสอบอัลกอริทึมการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง 15

3.1.1 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับความถี่คำสั่งของอินเวอร์เตอร์ 16

3.1.2 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับค่าความเหนี่ยวนำของโหลด 18

3.1.3 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับค่าขนาดของแรงดันคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ . . . 19

3.2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร 21

3.3 ผลการจำลองของแบบจำลองทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กไฟฟ้า บนโปรแกรม MATLAB/Simulink 24

4 บทสรุป **29**

4.1 สรุปผลการดำเนินการ 29

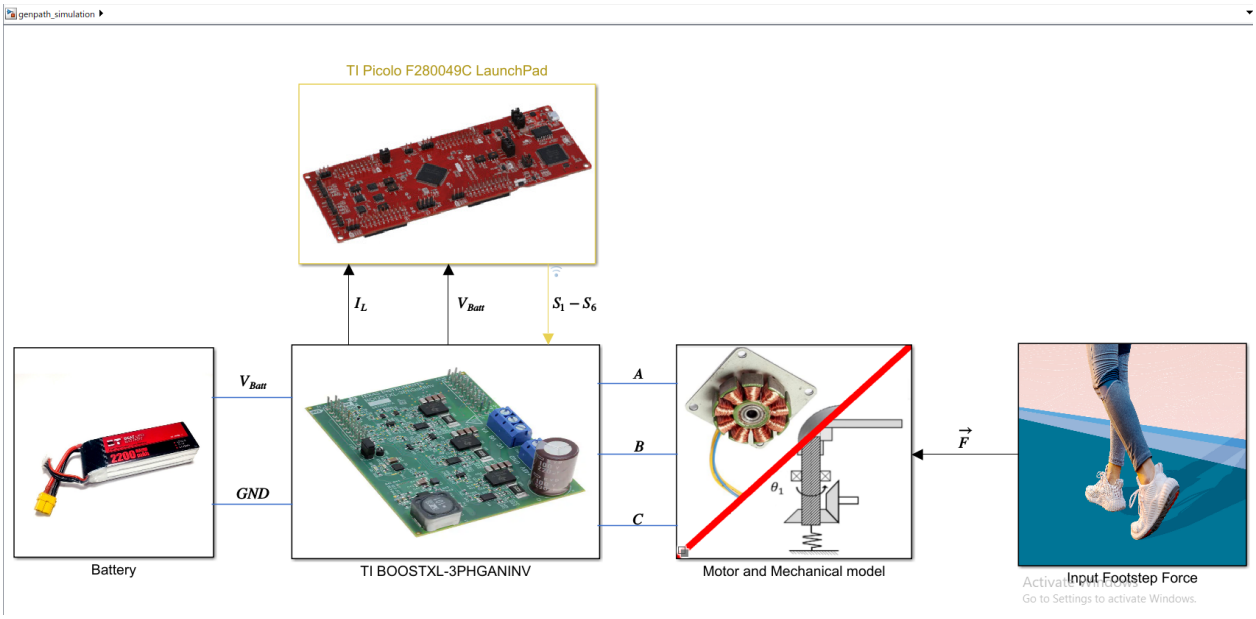
4.1.1 การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการมอดูเลตแบบสองแขนและการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง 29

4.1.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด 29

4.2 แผนการดำเนินงาน 29

5 เอกสารอ้างอิง **30**

6 ภาคผนวก **31**
6.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบพลวัตของระบบ 31
6.1.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแบตเตอร์รี 31
6.1.2 Simulink Model ในส่วนของการจำลองบอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI BOOSTXL-3PHGANINV 33
6.1.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบเชิงกลและมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร 33
6.1.4 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแรงที่เท้าเหยียบแผ่นพื้น 34
6.2 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมที่ทำงานบนระบบฝังตัว TI Picolo F280049C LaunchPad 35
6.2.1 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 36
6.2.2 Simulink Model ในส่วนของการปรับปรุงสัญญาณ 37
6.2.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองอุปกรณ์รอบข้างของระบบฝังตัว . . . 39
6.3 Simulink model ของการแปลงผกผันของคลาก(Inverse Clarke’s Transformation) . . 40



รูป 1: ภาพรวมของระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานที่ถูกสร้างในรายงานฉบับนี้

1 บทนำ

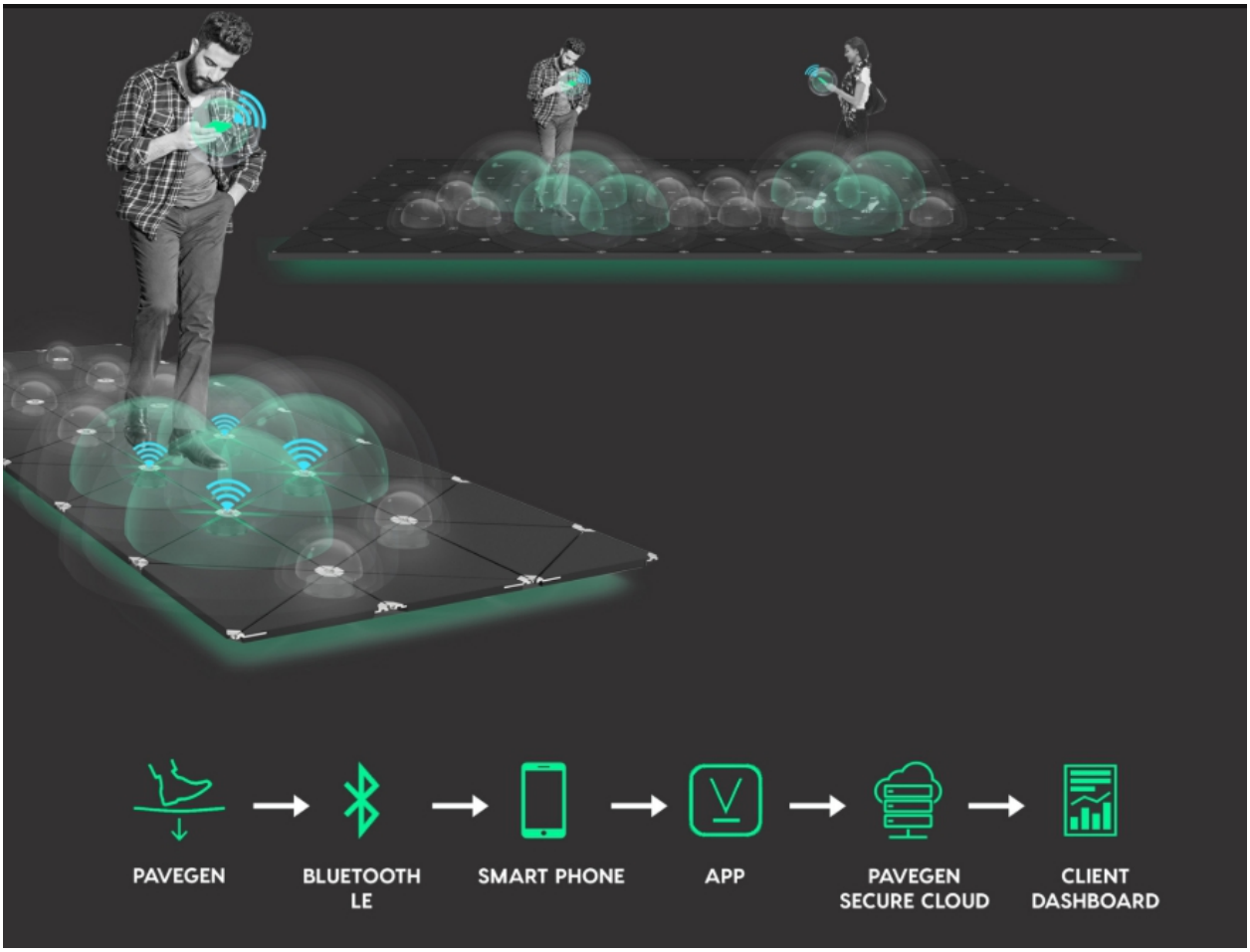
1.1 บทคัดย่อ

แผ่นพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยมีความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานต่ำได้ โครงงานฉบับนี้ มีจุดประสงค์ในการพัฒนาแผ่นพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ประเภทแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Motor; PMSM) โดยใช้โปรแกรม MATLAB™/ Simulink™ โดยโปรแกรม จะช่วยในการทดสอบ (Test) ทวนสอบ (Verify) ออกแบบให้ได้ผลดีที่สุด (Optimize design) และใช้โปรแกรมในการสร้างโค๊ดภาษาซี และซีพลัสพลัส ที่ถูกออกแบบสำหรับระบบฝังตัว (Generate C/ C++ Code Optimized for Embedded Systems) จากแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ และใช้เทคนิคในการลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ คืออัลกอริทึมในการมอดูเลตแบบสองแขน (Two Arm Modulation Algorithm) และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง (First Quadrant Tracking Algorithm) และได้เพิ่มประสิทธิภาพของระบบโดยรวมด้วยการนำอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking Algorithm; MPPT)

1.2 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวของมนุษย์นั้น เป็นเรื่องที่น่าสนใจ สามารถนำมาทำให้เกิดขึ้นจริงได้ เช่น ในกรณีของแผ่นพื้นเก็บพลังงานนั้น ได้ถูกนำมาสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถสร้างรายได้ และได้มีการติดตั้งใช้งานแล้วในหลายๆ ที่ เช่นกรณีตัวอย่างของ Pavegen™ Pavegen™ เป็นบริษัท Startup ที่สร้างแผ่นพื้นเก็บพลังงาน เพื่อที่จะจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ขนาดเล็ก เช่น เซนเซอร์ต่างๆ ที่เชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things; IoT) หรืออุปกรณ์ส่องสว่างประเภทหลอด LED หรือกักเก็บพลังงานไว้ในแบตเตอร์รี

จากค้นคว้าจากการศึกษาในครั้งก่อนๆ [1] [2] ได้ค้นพบว่า พลังงานที่ได้ในแต่ละการเหยียบแต่ละครั้งนั้น มีค่าน้อยมาก นั่นคือประมาณ 1-5 จูล เท่านั้น ดังนั้น หัวใจในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากระบบดังกล่าว คือการมีประสิทธิภาพที่ดี จึงจะสามารถเก็บพลังงานได้เพียงพอกับการใช้งานต่อไป ดังนั้น การศึกษาในโครงงานฉบับนี้ จึงได้มุ่งเน้นในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบเก็บพลังงานเป็นหลัก



รูป 2: โปสเตอร์ของ Pavegen™

รูป 3: สถานที่ที่ได้มีการติดตั้ง Pavegen™

จากโครงงานปี 2563 กำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ได้เป็นค่าสูงสุด โดยจากการทดสอบมีค่าประมาณหนึ่งในสี่ ของพลังงานขาเข้าที่มาจากแรงเท้าเหยียบของมนุษย์ และไม่ได้มีการลดการกำลังสูญเสียของวงจรแปลงผัน โครงงานปี 2564 นี้ มีการพัฒนาการออกแบบทางไฟฟ้าและทางกลเพื่อประปรุงประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน โดยมี 2 ส่วน คือ

1.สร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร เพื่อทราบเงื่อนไขของแรงดันออกตามหลักการติดตามจุดทำงานสูงสุด

2.การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอรึทึมการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสร้างแบบจำลองพลวัตของระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยโปรแกรม MATLAB™/Simulink™ เพื่อตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้ก่อนนำไปใช้กับอุปกรณ์จริง
2. เพื่อหาแนวทางในการลดพลังงานสูญเสียในระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสประเภทแม่เหล็กถาวร และพัฒนาชุดอัลกอริทึมในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน
3. เพื่อสร้างต้นแบบอุปกรณ์ แผ่นพื้นเก็บพลังงาน ที่สามารถใช้งานได้จริง

1.4 ขอบเขตของโครงงาน

1. โครงงานฉบับนี้จะใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร เป็นตัวกำเนิดไฟฟ้า
2. โครงงานฉบับนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ TI™ F280049C ที่อยู่บนชุดทดลอง Picolo™ LaunchPad™ เป็นระบบฝังตัวแกนกลางในคำนวนอัลกอริทึมต่างๆ
3. โครงงานฉบับนี้จะใช้บอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI™ BOOSTXL-3PHGaNINV เป็นสวิตช์สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์
4. โครงงานฉบับนี้จะโปรแกรมระบบฝังตัวดังกล่าวผ่านการสร้างโค๊ดบนแพลตฟอร์ม Simulink™ Embedded Coder™

1.5 ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากโครงงาน

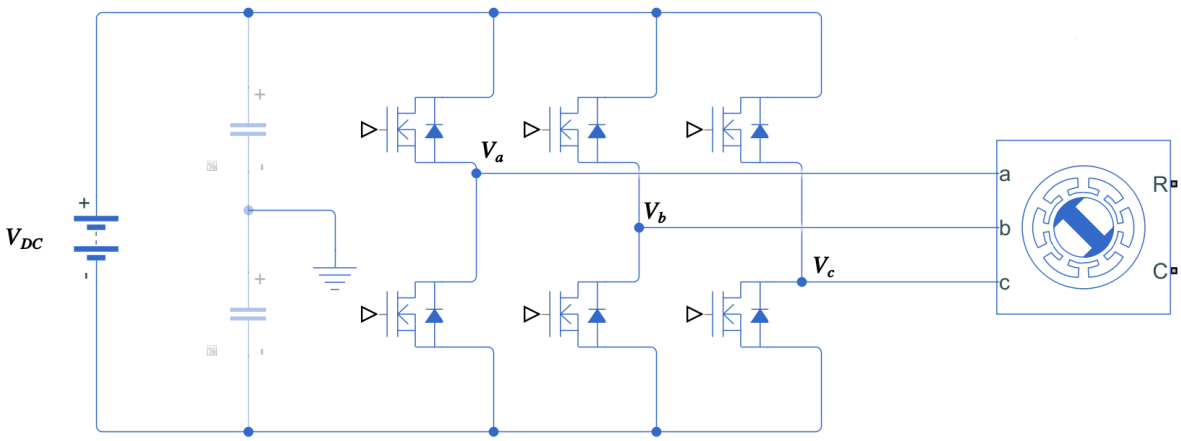
1. แผ่นพื้นเก็บพลังงานต้นแบบที่มีประสิทธิภาพสูง และสามารถใช้งานได้จริง
2. อัลกอริทึมในการลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ที่สามารถนำไปใช้กับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และยังสามารถนำไปใช้กับอินเวอร์เตอร์ใดๆ นอกเหนือจากระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานได้อีกด้วย
3. อัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงาน ที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่สามารถนำไปใช้กับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง (Two Arm Modulation and First Quadrant Tracking Algorithm)

2.1.1 การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบใช้สัญญาณพาหะ และ อินเวอร์เตอร์โหมดแรงดันแบบสามเฟส

ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยทั่วไปนั้นอาศัยการสร้างสนามแม่เหล็กหมุน มาเหนี่ยวนำให้เกิดแรงบิด ซึ่งในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรนั้นอาศัยการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ อินเวอร์เตอร์ จึงเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ในโครงงานฉบับนี้ ได้นำเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรสามเฟส มาเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน โดยจะเก็บพลังงานที่ผลิตได้ไว้กับแบตเตอร์รี ในโครงงานฉบับนี้ จึงเลือกใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีทอพอโลยีดังรูปที่ 4



รูป 4: ทอพอโลยีของอินเวอร์เตอร์สามเฟส

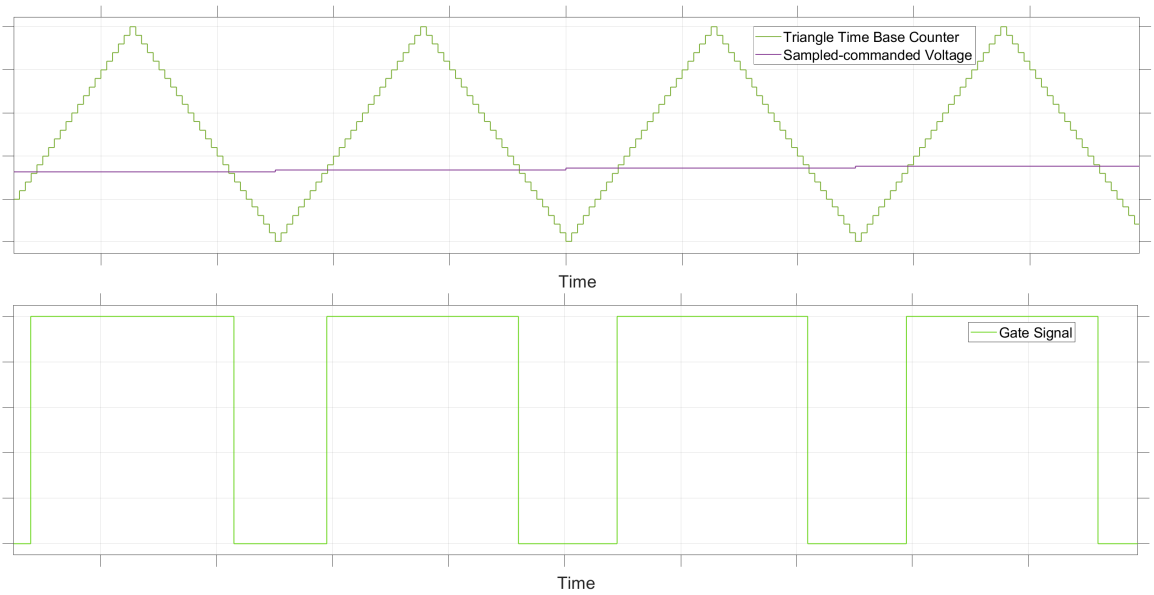
อินเวอร์เตอร์ทอพอโลยีที่ได้นำเสนอมาข้างต้น สามารถสร้างแรงดันออกที่แต่ละขั้วทั้งสามได้เพียงแค่ 2 ค่าเท่านั้น คือ

$$V_t = \begin{cases} V_{DC}, & \text{ถ้าสวิตช์ตัวบนปิด และสวิตช์ตัวล่างเปิด} \\ 0, & \text{ถ้าสวิตช์ตัวบนปิด และสวิตช์ตัวล่างเปิด} \end{cases} \tag{1}$$

โดยที่ V_t เป็นแรงดันที่ขั้วออกของอินเวอร์เตอร์ และถ้าหากพิจารณาให้กึ่งกลางบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นจุดอ้างอิงแรงดัน จะได้ว่า

$$V_{t0} = \begin{cases} V_{DC}/2, & \text{ถ้าสวิตช์ตัวบนปิด และสวิตช์ตัวล่างเปิด} \\ -V_{DC}/2, & \text{ถ้าสวิตช์ตัวบนปิด และสวิตช์ตัวล่างเปิด} \end{cases} \tag{2}$$

เนื่องจากกระขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสสามเฟสประเภทแม่เหล็กถาวรนั้น จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับคลื่นรูปไซน์ ดังนั้น เทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยใช้สัญญาณพาหะ (Carrier-based Pulse Width Modulation) จึงได้ถูกนำมาใช้ โดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยใช้สัญญาณพาหะมีหลักการในการทำงานคือ นำสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยม มาเปรียบเทียบกับสัญญาณคำสั่ง โดยผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบนั้น จะได้เป็นสัญญาณขับนำของสวิตช์ ดังรูปที่ 5 ซึ่งจะส่งผลให้ แรงดันที่ขั้วของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับแรงดันคำสั่ง



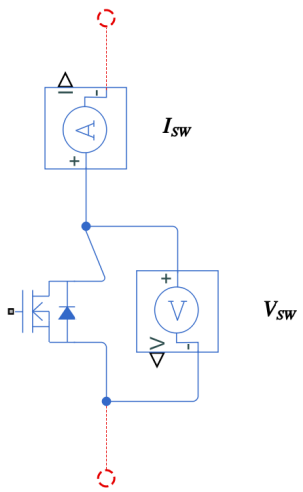
รูป 5: การมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยใช้สัญญาณพาหะ

จากรูปข้างต้น จะเห็นได้ว่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณขับนำนั้น เปลี่ยนไปตามขนาดของสัญญาณคำสั่ง และสัญญาณที่จะนำมาเปรียบเทียบนั้น จะเป็นสัญญาณที่ถูกสุ่มตัวอย่างแล้วคงค่า (Sample and Hold) เพราะว่า อัลกอริทึมการมอดูเลตที่เลือกใช้ในโครงงานฉบับนี้นั้น เป็นการคำนวนบนระบบฝังตัว ซึ่งเป็นการประมวลผลในโดเมนดิจิทัล

2.1.2 กำลังสูญเสียในสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

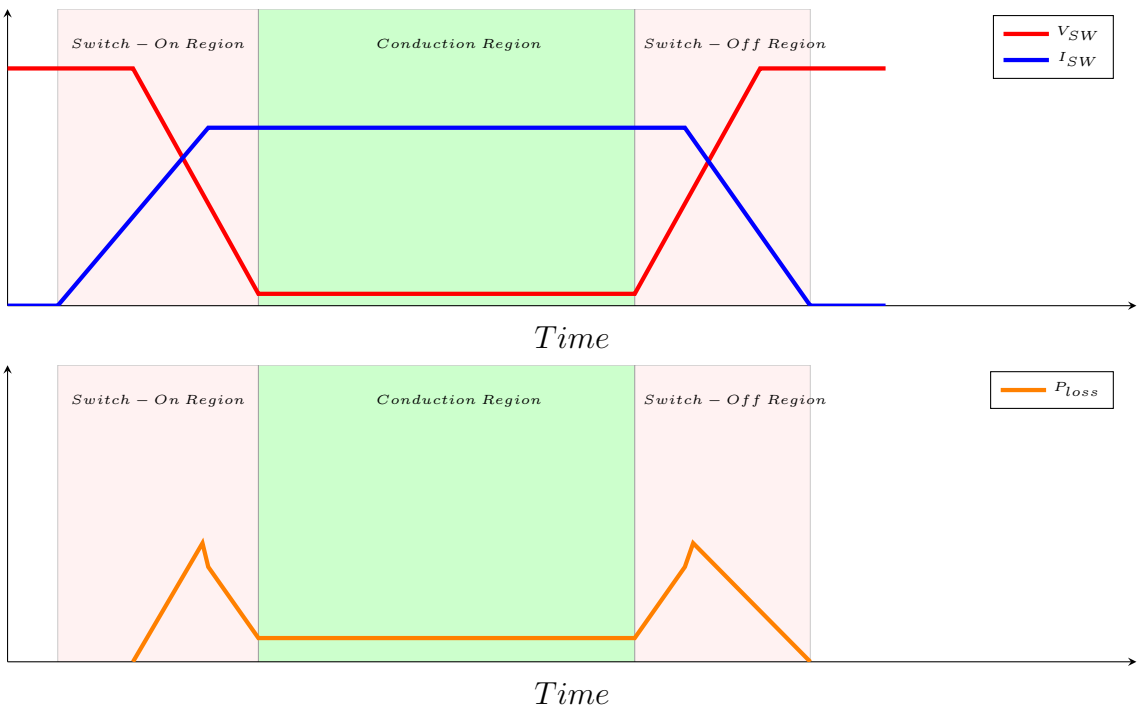
กำลังสูญเสียในสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์มีอยู่ด้วยกันสองประเภท คือ กำลังสูญเสียระหว่างสวิตช์ (Switching Loss) และกำลังสูญเสียระหว่างนำกระแส (Conduction Loss)

$$P_{loss} = P_{sw} + P_{cond} \tag{3}$$



รูป 6: นิยามของ V_{SW}, I_{SW}

จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่า ในขณะที่กำลังเปิดสวิตช์ กระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์จะเหลื่อมกัน ซึ่งเกิดจากโครงสร้างทางกายภาพของทรานซิสเตอร์ จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในขณะสวิตช์ ซึ่งจะคำนวณได้จาก



รูป 7: แรงดันตกคร่อมสวิตช์ กระแสของสวิตช์ และกำลังสูญเสียในสวิตช์

$$P_{sw} = \frac{1}{T_{sw}} \int_{T_{sw}} v_{sw}(t) i_{sw}(t) dt \text{ เมื่อ } T_{sw} \text{ คือเวลาที่สวิตช์อยู่ในช่วงกำลังสวิตช์} \tag{4}$$

แต่เมื่อพอสวิตช์เปิดเต็มที่แล้ว สวิตช์จะมีแรงดันตกคร่อมอยู่เล็กน้อย ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในขณะนำกระแส

$$P_{cond} = v_{sw(on)} i_{sw(on)} \tag{5}$$

เมื่อ $v_{sw(on)}, i_{sw(on)}$ คือแรงดันตกคร่อมสวิตช์ และกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ในขณะนำกระแส ตามลำดับ

กำลังสูญเสียระหว่างสวิตช์นั้น ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะสมบัติของสวิตช์ที่เลือกใช้ และจำนวนครั้งในการสวิตช์ นั้น คือ ถ้าหากสวิตช์ที่เลือกใช้มีคุณลักษณะสมบัติที่ทำให้อยู่ในย่านกำลังสวิตช์นาน หรือมีจำนวนครั้งในการสวิตช์มาก ก็จะทำให้กำลังสูญเสียขณะสวิตช์สูงตามไปด้วย

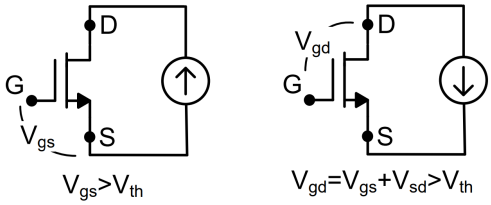
กำลังสูญเสียขณะนำกระแสนั้น ขึ้นอยู่กับว่าในขณะนำกระแสนั้นมีแรงดันตกคร่อมสวิตช์มากแค่ไหน ถ้าหากแรงดันตกคร่อมสวิตช์มาก ก็จะทำให้กำลังสูญเสียขณะนำกระแสมากขึ้นตามมา

2.1.3 การนำกระแสในจตุภาคที่ 3 ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแกลเลียม ไนไตรท์

ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแกลเลียม ไนไตรท์ หรือ แกน (Gallium Nitride; GaN) ถือเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับผู้ออกแบบในงานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพราะว่าทรานซิสเตอร์แกน มีข้อดีกว่าทรานซิสเตอร์แบบซิลิคอนในหลายด้าน คือ การไม่มีบอดีไดโอด ซึ่งทำให้ไม่มี reverse recovery loss ในบอดีไดโอด ข้อได้เปรียบนี้ทำให้ทรานซิสเตอร์แบบแกนมีการกำลังสูญเสียในขณะสวิตช์น้อยกว่าแบบดั้งเดิม ทำให้ทำงานได้ที่ความถี่สูงขึ้น ใช้ทรานซิสเตอร์ตัวเล็กลงได้ และความร้อนน้อยลง ซึ่งในโครงงานฉบับนี้ ได้เลือกใช้ทรานซิสเตอร์แกนเป็นสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์

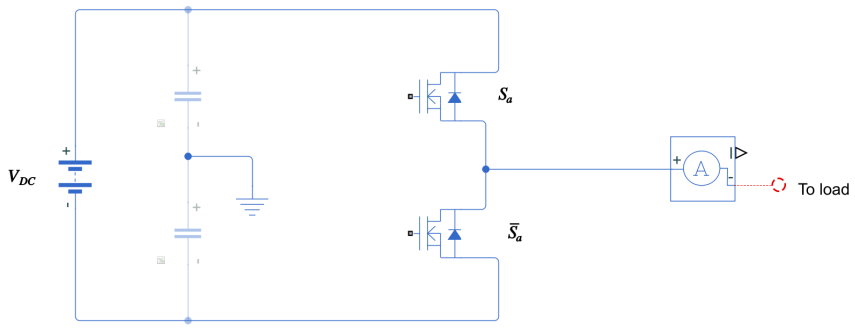
เนื่องจากโครงสร้างที่ไม่เหมือนกันของทรานซิสเตอร์แบบแกน ทำให้การนำกระแสในจตุภาคที่สามของทรานซิสเตอร์แบบแกนนั้นแตกต่างไปจากทรานซิสเตอร์แบบซิลิคอน [3] คือ การนำกระแสผ่านบอดีไดโอด

เงื่อนไขที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์แกนนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า (Forward) และย้อนกลับ (Reverse) เป็นไปดังรูปที่ 8 คือ



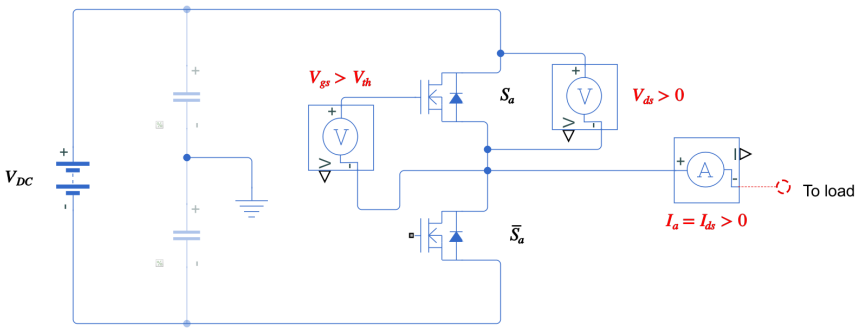
รูป 8: เงื่อนไขที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์แกนนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า และย้อนกลับ

ถ้าหากพิจารณาตัวอย่างที่เกิดขึ้นจริงในอินเวอร์เตอร์เพื่อให้เห็นภาพพจน์ชัดเจนขึ้น ตามรูปวงจรของอินเวอร์เตอร์ที่ตัดมาพิจารณาเฉพาะหนึ่งเฟส ตามรูปที่ 9



รูป 9: กรณีตัวอย่างการนำกระแสที่เกิดขึ้นจริงในอินเวอร์เตอร์

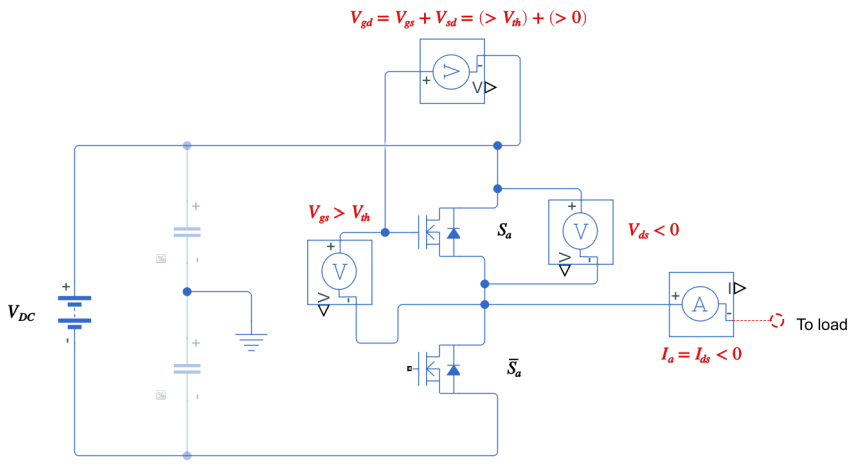
เรากำหนดให้สวิตช์ S_a เป็นสวิตช์ที่เราสนใจ โดยถ้าหากเราขับนำสวิตช์ให้สวิตช์นำกระแส (On) นั่นคือ เราขับนำสัญญาณขา $V_{gs} > V_{th}$ แล้วถ้าหากโหลดที่ต่ออยู่กับขาซอร์สของสวิตช์ S_a ดึงกระแสออกไปจากอินเวอร์เตอร์ นั่นคือ $I_a > 0$ จะทำให้ แรงดันตกคร่อมขาเดรนซอร์สของสวิตช์ S_a เป็นค่าบวก นั่นคือ $V_{ds} > 0$ เนื่องจากสวิตช์ S_a กำลังนำกระแสอยู่ ดังนั้นสวิตช์ $\bar{S}_a$ ไม่สามารถนำกระแสพร้อมๆ กับสวิตช์ S_a ได้ เพราะจะลัดวงจร ดังนั้นกระแส I_a ทั้งหมด ก็จะไหลผ่านสวิตช์ S_a ทำให้กระแส $I_{ds} = I_a > 0$ เนื่องจากกระแส $I_{ds} > 0$ และ $V_{ds} > 0$ ดังนั้น สวิตช์จะนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า จุดทำงานที่กล่าวถึงข้างต้นจะแสดงในรูป 10



รูป 10: กรณีตัวอย่างการนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า: $V_{gs} > V_{th}$, $I_{ds} > 0$

ถ้าหากพิจารณากรณีถัดไปคือการขับนำสวิตช์ในลักษณะเดิมคือ การขับสัญญาณขา $V_{gs} > V_{th}$ แต่มีสิ่งที่เปลี่ยนไปคือ ทิศทางการไหลของกระแส นั่นคือ ถ้าหากโหลดมีการดึงกระแสเข้าอินเวอร์เตอร์ $I_a = I_{sd} > 0$ จะทำให้ แรงดันตกคร่อมขาเดรนซอร์สของสวิตช์เป็นค่าลบ นั่นคือ $V_{ds} < 0; V_{sd} > 0$ เนื่องจาก $V_{gd} = V_{gs} + V_{sd} =$ (ค่าที่มากกว่า V_{th})+ ค่าที่เป็นบวก ดังนั้น $V_{gd} > V_{th}$ และ $I_{ds} < 0$ ทำให้สวิตช์นำกระแสย้อนกลับ

เราจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันขณะนำกระแสไปข้างหน้าได้โดย



รูป 11: กรณีตัวอย่างการนำกระแสในทิศทางย้อนกลับ: $V_{gd} > V_{th}$, $I_{ds} < 0$

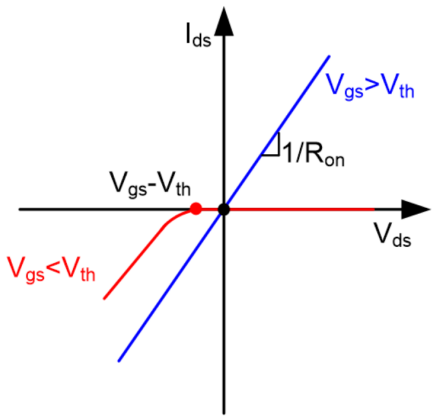
$$V_{ds} = I_{ds} R_{ds(on)} \tag{6}$$

เมื่อแรงดันที่ขาเกตเทียบกับซอร์สของทรานซิสเตอร์ มากกว่าค่าแรงดันขีดแบ่ง และแรงดันที่ขาเดรนเทียบซอร์สเป็นบวก จะทำให้แกนนำกระแสในจตุภาคที่หนึ่ง โดยที่เรานิยาม $R_{ds(on)}$ เป็นความต้านทานสมมูลของทรานซิสเตอร์ในขณะที่กำลังทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง

และเราก็สามารถเขียนคามสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันขณะนำกระแสย้อนกลับได้โดย

$$V_{sd} = I_{sd} R_{sd(on)} \tag{7}$$

ในการนำกระแสย้อนกลับ ข้อมูลต่างๆ จะเป็นทวิลักษณ์ของข้อมูลในขณะนำกระแสไปข้างหน้าเลยคือ เมื่อแรงดันที่ขาเกตเทียบกับเดรน มากกว่าค่าแรงดันขีดแบ่ง และแรงดันที่ขาซอร์สเทียบกับเดรนเป็นบวก จะทำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแสในจตุภาคที่สาม



รูป 12: พฤติกรรมการนำกระแสในจตุภาคที่หนึ่ง และจตุภาคที่สามของทรานซิสเตอร์แกน

จากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่า แรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ในจตุภาคที่สาม จะมากกว่าแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ในจตุภาคที่หนึ่งที่ค่ากระแสเท่ากัน ซึ่งทำให้การนำกระแสในจตุภาคที่สามนั้นมีกำลังสูญเสียในขณะนำกระแสมากกว่าการนำกระแสในจตุภาคที่หนึ่ง

2.1.4 การลดกำลังสูญเสียในการมอดูเลตแบบใช้สัญญาณพาหะ ด้วยการมอดูเลตแบบสองแขน

จากที่ได้นำเสนอไปแล้วในส่วนของการมอดูเลตแบบใช้สัญญาณพาหะ ว่า เป็นการมอดูเลตที่มีจำนวนครั้งในการสวิตช์มาก ซึ่งทำให้กำลังสูญเสียในขณะสวิตช์สูง แต่เรามีเทคนิคในการลดกำลังสูญเสียขณะสวิตช์ในการมอดูเลตแบบใช้สัญญาณพาหะด้วยการลดจำนวนครั้งในการสวิตช์คือ การมอดูเลตแบบสองแขน

แขนของการมอดูเลต คือ คู่ของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแรงดันออกที่ขั้วของอินเวอร์เตอร์ จะประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ตัวบน ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ที่ต่ออยู่กับบัสแรงดันไฟตรงที่ขั้วบวก และทรานซิสเตอร์ตัวล่าง ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ที่ต่ออยู่กับบัสแรงดันไฟตรงที่ขั้วลบ จากทอพอโลยีของอินเวอร์เตอร์ที่เราเลือกใช้ในโครงงานฉบับนี้ ซึ่งแสดงไว้ ณ รูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า จะมีแขนของการมอดูเลตทั้งหมดสามแขน

จากการพิจารณาจะเห็นได้ว่า หากเราต้องการสร้างแรงดันรูปไซน์ที่ขั้วของอินเวอร์เตอร์ เราจำเป็นต้องสวิตช์ทั้งสามแขนไปพร้อมๆ กัน แต่ถ้าหากเราพิจารณาความจริงที่ว่า แรงดันที่สร้างกระแสของมอเตอร์ที่ต่อแบบสามเฟสสามสาย เป็นแรงดันระหว่างสาย คือ

$$v_{ab} = v_{a0} - v_{b0} \tag{8}$$
$$v_{bc} = v_{b0} - v_{c0} \tag{9}$$
$$v_{ca} = v_{c0} - v_{a0} \tag{10}$$

และถ้าหากเราเพิ่มแรงดันลำดับศูนย์ (Zero-sequence Offset) ให้กับแรงดันเฟสของอินเวอร์เตอร์

$$v^*_{a0} = v_{a0} + v_{N0} \tag{11}$$
$$v^*_{b0} = v_{b0} + v_{N0} \tag{12}$$
$$v^*_{c0} = v_{c0} + v_{N0} \tag{13}$$

แรงดันระหว่างสายของมอเตอร์จะมีค่าเท่าเดิม นั่นคือ

$$v^*_{ab} = v^*_{a0} - v^*_{b0} = v_{a0} + v_{N0} - (v_{b0} + v_{N0}) = v_{ab} \tag{14}$$
$$v^*_{bc} = v^*_{b0} - v^*_{c0} = v_{b0} + v_{N0} - (v_{c0} + v_{N0}) = v_{bc} \tag{15}$$
$$v^*_{ca} = v^*_{c0} - v^*_{a0} = v_{c0} + v_{N0} - (v_{a0} + v_{N0}) = v_{ca} \tag{16}$$

ดังนั้น เราสามารถเลือกแรงดันลำดับศูนย์ที่จะเพิ่มให้กับแรงดันเฟสคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ โดยมีเป้าหมายคือ ทำให้แรงดันคำสั่งในเฟสใดเฟสหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเท่ากับแรงดันบวก หรือลบของบัสแรงดันกระแสตรง เพื่อที่จะทำให้แขนของการมอดูเลตแขนนั้น ปิด หรือ เปิดตลอดเวลา นั่นคือ

$$v_{N0} = \begin{cases} \frac{V_{DC}}{2} - max(v_{a0}, v_{b0}, v_{c0}); \text{ทรานซิสเตอร์ตัวบน on ตลอด} \\ \frac{-V_{DC}}{2} - min(v_{a0}, v_{b0}, v_{c0}); \text{ทรานซิสเตอร์ตัวล่าง on ตลอด} \end{cases} \tag{17}$$

ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ตัวบนกำลังเปิดตลอดเวลา ทรานซิสเตอร์ตัวล่าง ก็จะปิดตลอดเวลาด้วย การให้ทรานซิสเตอร์แขนใดแขนหนึ่งเปิด หรือปิดตลอดเวลา จะทำให้ลดจำนวนครั้งในการสวิตช์ได้หนึ่งในสามเท่า ก็จะช่วยลดกำลังสูญเสียในขณะสวิตช์ได้

2.1.5 การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการมอดูเลตแบบสองแขนด้วยการติดตามการทำงานในจตุภาคที่ 1

จากผลลัพธ์ที่ได้อภิปรายมาในส่วนที่แล้ว เราได้ทราบว่า เรามีอิสระในเลือกการมอดูเลตสองแขนได้สองประเภท คือ แบบทรานซิสเตอร์ตัวบนนำกระแสตลอด และทรานซิสเตอร์ตัวล่างนำกระแสตลอด ดังนั้น เราจะใช้ข้อได้เปรียบนี้ ในการเลือกรูปแบบการมอดูเลตแบบสองแขนให้เกิดประสิทธิภาพสูงที่สุด นั่นคือ การหลีกเลี่ยงการทำงานในจตุภาคที่ 3 สำหรับทรานซิสเตอร์ตัวที่จะนำกระแสตลอดเวลา โดยจะมีหลักการในการคำนวนค่าแรงดันเฟสลำดับศูนย์ที่จะบวกเข้าไป เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ ตามผังงานในรูปที่ 13 ซึ่งจากผังงานที่ได้นำเสนอไปข้างต้น เราสามารถนำไปสร้างเป็นแผนภาพการเปลี่ยนสถานะ บน Simulink™/Stateflow™ ได้ดังที่แสดงไว้ในรูป

2.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking Algorithm; MPPT)

2.2.1 ข้อมูลรายละเอียดและหลักการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

เริ่มแรกต้องศึกษาและเข้าใจหลักการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงานเพื่อทราบความสัมพันธ์ของกลไกและสมการต่างๆของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน [2] และเข้าใจพลวัตของระบบทางกลของของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

แผ่นพื้นเก็บพลังงาน สามารถแปลงพลังงานจลน์จากการก้าวเดินของมนุษย์แปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ หลักการทำงาน เริ่มจากการเหยียบของมนุษย์ลงบนแผ่นพื้นเก็บพลังงานทำให้เกิดการยุบตัวลงของแผ่นพื้นแป้นเกลียว(nut)จะขยับขึ้นลงไปขับเกลียวนำ(lead screw) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่เชิงเส้นไปยังการเคลื่อนที่เชิงหมุน ให้หมุนรอบแนวแกนตั้ง และ เฟืองดอกจอก(bevel gear)ทำหน้าที่เปลี่ยนจากเคลื่อนที่เชิงหมุนแนวแกนตั้งจากเพลาเกลียวนำให้เปลี่ยนทิศทางการหมุนไป 90 องศา หมุนรอบแนวนอน เพื่อขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 19

จากแผนภาพของวัตถุของระบบทางกล ลีด(lead) และ สกรู(screw) ดังรูปที่ 20 สมการต่างๆ ได้มาจากกฎข้อที่สองของนิวตันและโมเมนตัมเชิงหมุน ซึ่งอธิบายการเลื่อนที่ของแป้นเกลียว และ การเคลื่อนที่เชิงหมุนของเกลียวนำและโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามลำดับ ได้แก่

$$m\ddot{x} = F(t) - F_a - F_s \tag{18}$$

$$J_1\ddot{\theta}_1 = \frac{2\pi J_1}{l}\ddot{x} = T_a - T_B \tag{19}$$

$$J_G\ddot{\theta}_2 = \frac{2\pi J_G}{l}\ddot{x} = T_B - T_G \tag{20}$$

โดยที่
m คือ มวลของแผ่นพื้นและแป้นเกลียว
J_1 คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของเกลียวนำ
J_G คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของเฟืองดอกจอก
x คือ ระยะกระจัดของแผ่นพื้นและแป้นเกลียว
l คือ ระยะห่างระหว่างเกลียวของเกลียวนำ
θ_1 คือ ตำแหน่งเชิงมุมของเกลียวนำ
θ_2 คือ ตำแหน่งเชิงมุมของเฟืองดอกจอก
$F(t)$ คือ แรงกดลงบนแผ่นพื้นที่เวลาใดๆ
F_s คือ แรงสปริง
F_a คือ แรงเสียดทานระหว่างแป้นเกลียวและเกลียวนำ
T_B คือ แรงบิดเสียดทานระหว่างแป้นเกลียวและเกลียวนำ
T_G คือ แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque)
T_a คือ แรงบิดส่งผ่านจากแป้นเกลียว ไปยัง เกลียวนำ ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ F_a ดังนี้

$$T_a = aF_a \tag{21}$$

ค่าคงที่ a = $\frac{l}{2\pi\eta_{tread}\eta_{thrust}}$ เมื่อ η_{tread} คือ ประสิทธิภาพของตลับลูกปืนคลัตซ์ และ η_{trhust} คือ ประสิทธิภาพของเกลียว

2.2.2 การเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า (Electrical analogy)

ศึกษาหลักการการเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า(electrical analogy) [4] เพื่อเข้าใจความสัมพันธ์ของปริมาณทางกลและทางไฟฟ้า จากนั้นจึงนำไปประยุกต์ใช้สร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

Mechanical system	Electrical system
Torque (T)	Current (i)
Angular speed (ω_m)	Voltage (v)
Angular displacement (θ)	Flux linkage (ψ)
Moment of inertia (J)	Capacitance (C)
Spring constant (K)	1/Inductance ($1/L$)
Damping coefficient (B)	1/Resistance ($1/R$)
Coupling ratio (n_M/n_L)	Transformer ratio (n_L/n_M)

ตาราง 1: ความสัมพันธ์ของปริมาณทางกลและไฟฟ้า[4]

โดยการเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า ของวงจรไฟฟ้าเป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อทำการวิเคราะห์ระบบทางกล ปัญหาทางกลบางอย่างสามารถแก้ไขได้ง่ายขึ้นผ่านการเปรียบเทียบทางไฟฟ้า โดยความสัมพันธ์ของปริมาณทางกลและทางไฟฟ้า แสดงในตารางที่ 1

2.2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

ศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร [5] [6] เพื่อเข้าหลักการทำงานและสมการต่างๆที่เกี่ยวข้อง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ซึ่งสนามกระตุ้นมาจากแม่เหล็กถาวรแทนที่จะเป็นขดลวด มีโครงสร้างที่สเตเตอร์เหมือนกับมอเตอร์เหนี่ยวนำคือมีขดลวดสามเฟสพันอยู่ในร่องสล็อตที่สเตเตอร์ แต่ที่โรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร ข้อดีของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร คือ ไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และขดลวดสร้างสนามที่ตัวโรเตอร์ ทำให้ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด

ค่าความเหนี่ยวนำภายในและฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมุมของโรเตอร์ จากสมการแรงดันสามเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} v_{un} \\ v_{vn} \\ v_{wn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{d}{dt}L_u & \frac{d}{dt}M_{uv} & \frac{d}{dt}M_{wu} \\ \frac{d}{dt}M_{uv} & R_s + \frac{d}{dt}L_v & \frac{d}{dt}M_{vw} \\ \frac{d}{dt}M_{uv} & \frac{d}{dt}M_{vw} & R_s + \frac{d}{dt}L_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_e\lambda' sin(\theta_e) \\ -\omega_e\lambda' sin(\theta_e - 120^0) \\ -\omega_e\lambda' sin(\theta_e + 120^0) \end{bmatrix} \tag{22}$$

$$L_u = \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} cos(2\theta_e) \tag{23}$$

$$L_v = \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} cos(2\theta_e + 120^0) \tag{24}$$

$$L_w = \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} cos(2\theta_e - 120^0) \tag{25}$$

$$M_{uv} = -\frac{1}{2}\frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} cos(2\theta_e - 120^0) \tag{26}$$

$$M_{wu} = -\frac{1}{2}\frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} cos(2\theta_e + 120^0) \tag{27}$$

$$M_{vw} = -\frac{1}{2}\frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} cos(2\theta_e) \tag{28}$$

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 ตามลำดับ
M_u, M_v, M_w คือ ค่าความเหนี่ยวร่วมของขดลวดสเตเตอร์ในเฟส u, v และ w ตามลำดับ
ω_e คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์

θ_e คือ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วของแม่เหล็กถาวร

L_d, L_q คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ในแนวแกน d และ q

λ' คือ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วของแม่เหล็กถาวร

จากนั้นใช้การแปลงของคลาก(Clark's Transformation) [7] [8] แปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงนิ่ง เพื่อแปลงสมการแรงดันสามเฟสของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร เป็นสามารถแรงดันบนกรอบอ้างอิงนิ่ง แกน x-y ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำที่พิจารณาทั้งค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและค่าความเหนี่วนำร่วมของขดลวดสเตเตอร์ ดังสมการด้านล่าง

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = R_g \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} + L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_e \lambda cos(\theta_e) \\ -\omega_e \lambda sin(\theta_e \end{bmatrix} \tag{29}$$

เมื่อ

v_x, v_y คือ แรงดันบนกรอบอ้างอิงนิ่ง แกน x,y ตามลำดับ

i_x, i_y คือ กระแสบนกรอบอ้างอิงนิ่ง แกน x,y ตามลำดับ

R_g คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

L_s คือ ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและค่าความเหนี่วนำร่วมของขดลวดสเตเตอร์

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

และจากการแปลงของปาร์ก (Park's transformation) [7] [8] เพื่อแปลงแรงดันสองเฟสบนแกน d-q จะได้ดังสมการ 30

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_e L_q i_q \\ \omega_e L_d i_d + \omega_e \lambda \end{bmatrix} \tag{30}$$

เมื่อ

v_d, v_q คือ แรงดันเฟสสเตเตอร์ในแกน d และ q บนกรอบอ้างอิงโรเตอร์

i_d, i_q คือ กระแสเฟสสเตเตอร์ในแกน d และ q บนกรอบอ้างอิงโรเตอร์

จากพิจารณากำลังขาเข้าของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส

$$P_{in} = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \tag{31}$$

เมื่อ

P_{in} คือ กำลังขาเข้าของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส

จากนั้นพิจารณาสมการ 30 และ 31 จะได้

$$P_{in} = R(i_d^2 + i_q^2) + \frac{d}{dt}\frac{1}{2}(L_d i_d^2 + L_q i_q^2) + \omega_e(\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \tag{32}$$

พิจารณาพจน์สุดท้ายของสมการ 32 คือ กำลังเชิงกลของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส ดังสมการที่ 34

$$P_{mech} = \omega_e(\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \tag{33}$$

จึงได้สมการแรงบิด คือ

$$T_e = \frac{P_{mech}}{\omega_e / p} = p(\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \tag{34}$$

เมื่อ

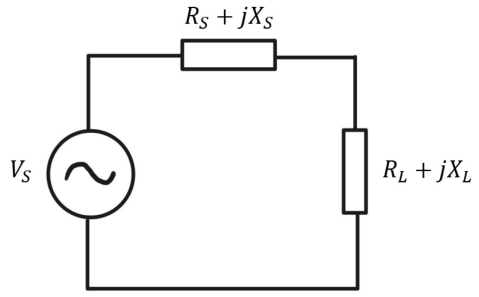
P_{mech} คือ กำลังเชิงกลของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส

T_e คือ แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromanetic torque)

p คือ จำนวนคู่ขั้วของเครื่องจักรไฟฟ้า

2.2.4 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับการติดตามจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking) สำหรับวงจรกักเก็บพลังงาน

พิจารณาวงจรสมมูลของวงจรการกักเก็บพลังงานดังรูปที่ 21 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันและอิมพีแดนซ์ขาออก



รูป 21: วงจรสมมูลของวงจรกักเก็บพลังงาน [9]

พิจารณาหลักการแมทชิงอิมพีแดนซ์ (Matching impedance) เมื่อพิจารณากำลังออก(P_{out}) โดยใช้ทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังสูงสุด (Maximum Power Transfer) ของวงจรสมมูลดังกล่าว เมื่อโหลดเป็นอิมพีแดนซ์ใดๆ โดยพิจารณาในสภาวะคงตัว (steady state)

$$S = \frac{|V_s|^2}{Z^*} = \frac{|V_s|^2}{(R_s + R_L) - j(X_s + X_L)} \tag{35}$$

$$P_{out} = Re(S) = \frac{|V_s|^2 R_L}{(R_s + R_L)^2 + (X_s + X_L)^2} \tag{36}$$

เมื่อ

S คือ กำลังปรากฏ

P_{out} คือ กำลังขาออก

จากสมการที่ (36) จะมีค่าสูงสุดเมื่อพจน์ตัวหารมีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากค่ารีแอคแตนซ์สามารถมีค่าน้อยกว่าศูนย์ได้จึงพิจารณาให้ $X_L = -X_g$ จึงได้

$$P_{out} = \frac{|V_s|^2 R_L}{(R_s + R_L)^2} \tag{37}$$

และจะได้ว่า P_{out} จะมีค่าสูงสุดเมื่อ $\frac{R_L}{(R_s+R_L)^2}$ มีค่าสูงสุด จากนั้นพิจารณาค่า R_L ที่ส่งผลให้พจน์ดังกล่าวมีค่าสูงสุดด้วยสมการที่ (38)

$$\frac{d}{dt}\frac{R_L}{(R_s + R_L)^2} = 0 \tag{38}$$

$$R_L = R_s \tag{39}$$

จึงได้ว่า P_{out} จะมีค่าสูงสุดเมื่อ $R_L = R_S$ และ $j\omega X_L = -j\omega X_S$ ต่อมาจะเป็นจะเป็นการขยายแนวคิดดังกล่าว โดยพิจารณากับสัญญาณกระแส ณ ขณะใดๆ เปลี่ยนแปลงตามเวลา เนื่องจากลักษณะโหลดเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแส ณ เวลานั้นๆ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโหลดนั้นทำได้ยากในทางปฏิบัติ ดังนั้น จึงพิจารณาในรูปแรงดันแทน จะได้ว่าแรงดันตกคร่อมโหลดจะต้องมีค่าเท่ากับสังยุคของแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์วงจรสมมูลขาออก จะได้

$$\vec{v}_{load} = R_g \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} - L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} \tag{40}$$

เนื่องจากโหลดที่ต่ออยู่เป็นแบตเตอรี ถ้าสามารถควบคุมแรงดันขาออก(v_{ter}) ดังสมการที่ (41) จะทำให้กำลังไปไฟฟ้าที่ชาร์จเข้าแบตเตอรีมีค่าสูงสุด

$$\vec{v}_{ter} = \begin{bmatrix} v_{ox} \\ v_{oy} \end{bmatrix} = R_g \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} - L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} \tag{41}$$

โดยการควบคุมแรงดันขาออกของแบตเตอรีให้เป็นไปตามที่ต้องการตามสมการที่ (41) จะใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ในการแปลงแรงดันไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคการมอดูเลเลตความกว้างพัลส์

นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงข้อควรระวังของการใช้ตัวอนุพันธ์ เนื่องจากราฟผลตอบสนองเชิงความถี่ดังรูปที่ 22 เห็นได้ว่าตัวอนุพันธ์มีพฤติกรรมเหมือนตัวขยายสัญญาณ หากมีสัญญาณรบกวนความถี่สูงเข้ามา อาจทำให้สัญญาณรบกวนถูกขยายขนาดมากขึ้น และอาจส่งผลให้อุปกรณ์เสียหายได้ ดังนั้นการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงต้องมีการจำกัดขอบเขตช่วงความถี่ ของตัวอนุพันธ์ด้วยตัวปฏิพันธ์ ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอน(Tranfer function) ดังสมการด้านล่าง และจะได้กราฟผลตอบสนองเชิงความถี่เป็นดังรูปที่ 23 ซึ่งเมื่อสัญญาณที่ความถี่หนึ่งจะไม่มีอัตราขยายไม่เพิ่มขึ้น

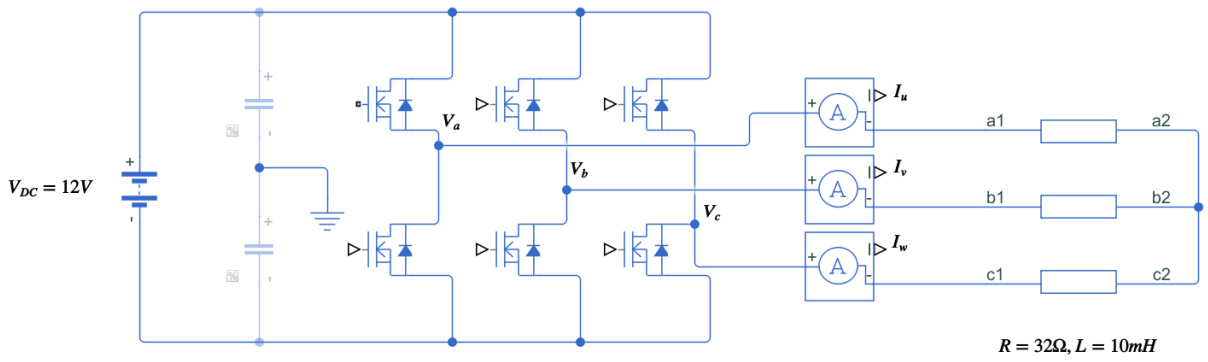
$$H(s) = \frac{s}{\frac{s}{\omega_H} + 1} \tag{42}$$

3 ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น

3.1 การทดสอบอัลกอริทึมการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง

ในการทดสอบอัลกอริทึมการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง จะทำโดยการนำอินเวอร์เตอร์ไปต่อกับโหลดแบบตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำสามเฟส โดยเราจะทดลองปรับค่าคำสั่งต่างๆของอินเวอร์เตอร์ และดูว่าระบบให้ผลตอบสนองที่ถูกต้องหรือไม่ อัลกอริทึมมีการตัดสินใจที่ถูกต้องหรือไม่ โหมดในการทำงานสอดคล้องกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริงหรือไม่ โดยการประเมินผลที่ได้กล่าวข้างต้น จะต้องมีการวัดและแสดงค่าต่างๆ เหล่านี้ คือ

- ค่าแรงดันเฟสคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ (Commanded Phase Voltage)
- กระแสสายของอินเวอร์เตอร์ที่วัดได้ (Line Current)
- โหมดการมอดูเลตแบบสองแขนที่อัลกอริทึมตัดสินใจเลือก (Two Arm Modulator Command Mode; TAM Command Mode)
- แรงดันคำสั่งที่คำนวนได้จากอัลกอริทึม (Two Arm modulator and First Quadrant Tracker Output; TAM & FQT Output)



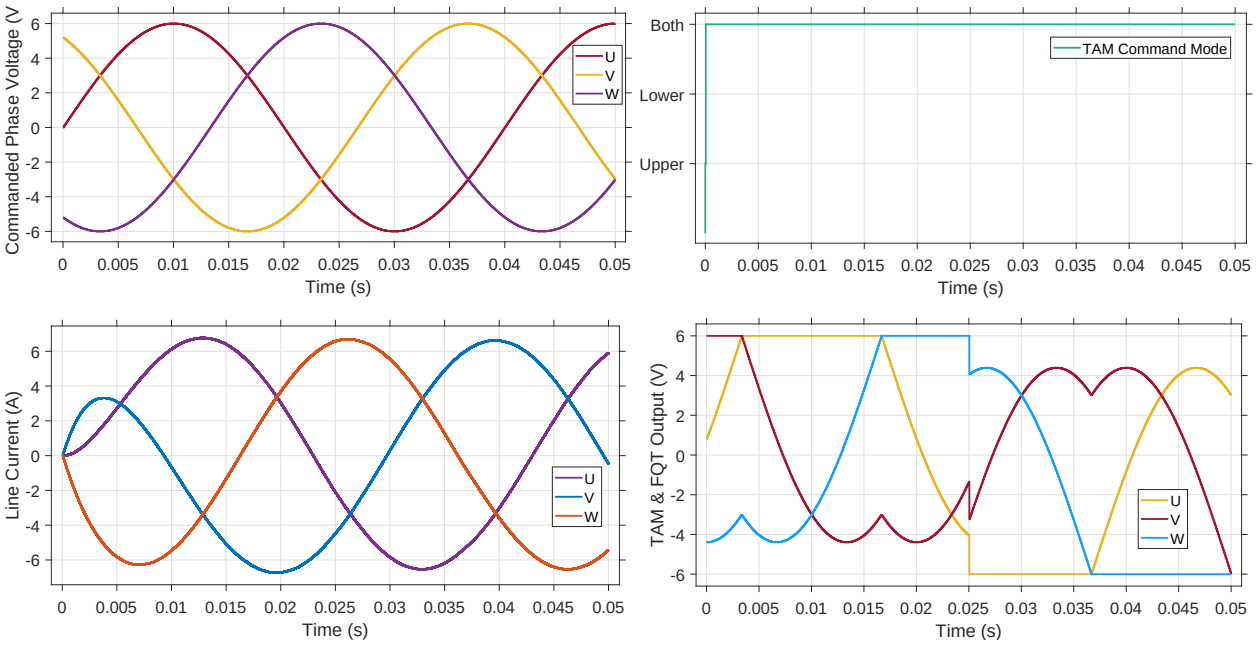
รูป 24: รูปแบบวงจรที่ใช้ทดสอบอัลกอริทึมการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง

ค่าแรงดันเฟสคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ จะเป็นค่าแรงดันที่ป้อนให้กับอัลกอริทึมของอินเวอร์เตอร์ ค่ากระแสสาย จะนิยามตามรูปที่ 24 คือ นิยามให้กระแสที่ไหลออกจากขั้วของอินเวอร์เตอร์เป็นค่าบวก โหมดการมอดูเลตแบบสองแขนที่อัลกอริทึมตัดสินใจเลือก จะเป็นโหมดที่ได้กล่าวไว้ในรายละเอียดของการมอดูเลตแบบสองแขนคือ

- Upper จะเป็นโหมดที่เลือกให้สวิตช์ตัวที่นำกระแสตลอดเวลาเป็นทรานซิสเตอร์ตัวบน
- Lower จะเป็นโหมดที่เลือกให้สวิตช์ตัวที่นำกระแสตลอดเวลาเป็นทรานซิสเตอร์ตัวล่าง
- Both จะเป็นโหมดที่เลือกให้ทรานซิสเตอร์ตัวบน หรือตัวล่างนำกระแสตลอดเวลาก็ได้ ขึ้นกับว่าทรานซิสเตอร์ตัวไหนทำงานหนักกว่า โดยจะแบ่งงานกันทำระหว่างทรานซิสเตอร์ตัวบนและตัวล่าง

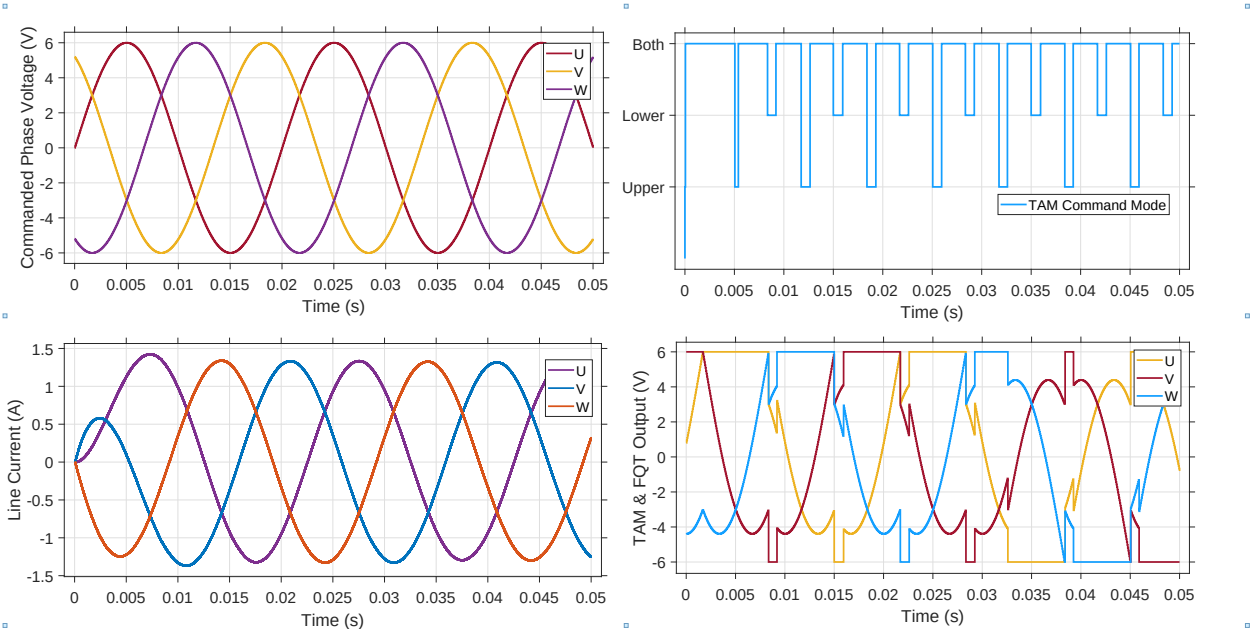
แรงดันคำสั่งที่คำนวนได้จากอัลกอริทึม คือ แรงดันที่คำนวนได้หลังจากการตัดสินใจว่าต้องการมอดูเลตสองแขนแบบไหน โดยจะทำการเลือกแรงดันลำดับศูนย์เพื่อที่จะบวกเข้าไปในแต่ละเฟส เพื่อให้สวิตช์นำกระแสในแบบที่อัลกอริทึมต้องการ

3.1.1 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับความถี่คำสั่งของอินเวอร์เตอร์



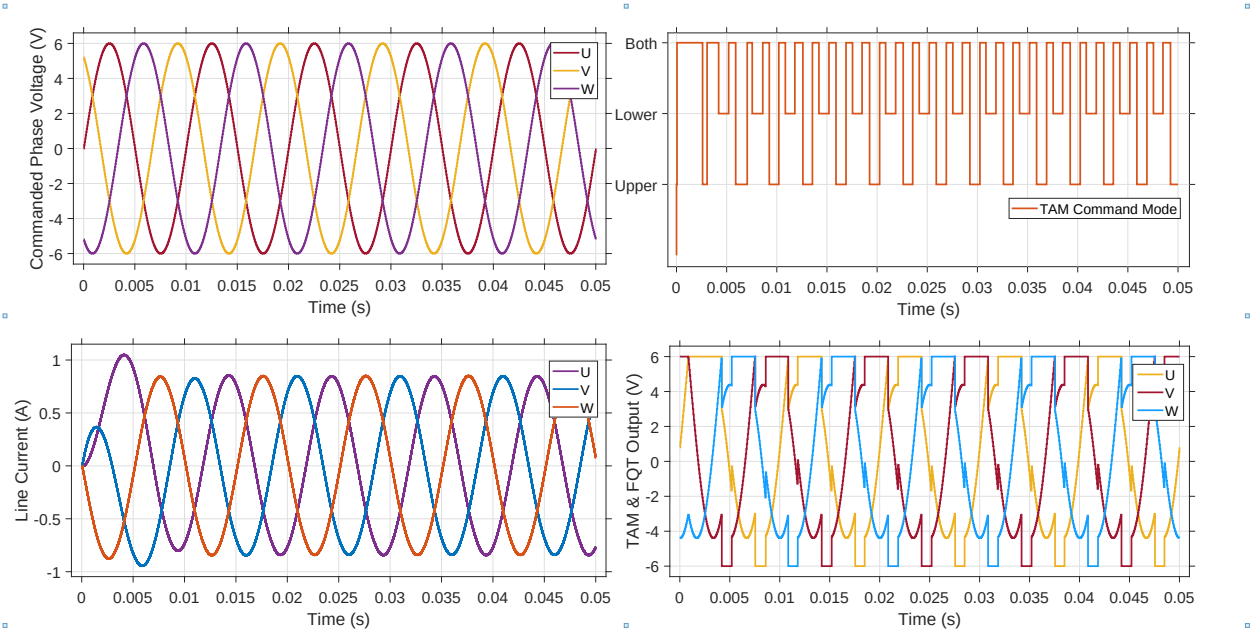
รูป 25: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่คำสั่งเท่ากับ 25Hz

จากรูปที่ 25 จะเห็นได้ว่า การเหลื่อมกันของกระแสและแรงดันมีค่าน้อยมาก ซึ่งเวลาที่กระแสและแรงดันเหลื่อมกันมีค่าต่ำกว่าคาบเวลาการสุ่มและคงค่าของระบบฝังตัว ดังนั้นระบบจึงไม่รับรู้ถึงการเหลื่อมกันของกระแสและแรงดัน ดังนั้น สวิตช์จะทำงานในจุดภาคที่หนึ่งตลอดเวลา ไม่ว่าจะมอดูเลตแบบสองแขนแบบใดก็ตาม ดังที่แสดงในกราฟโหมดการมอดูเลตแบบสองแขนที่อัลกอริทึมตัดสินใจเลือก จึงเป็นแบบ Both ตลอดเวลา เพราะจากมุมมองของอินเวอร์เตอร์ อัลกอริทึมจะคิดว่าสามารถที่จะมอดูเลตสองแขนแบบใดก็ได้ ดังนั้น ระบบจะมอดูเลตแบบสองแขนสลับกันระหว่างตัวบนนำกระแสตลอด และตัวล่างนำกระแสตลอด โดยมีจุดที่แบ่งการทำงานกันระหว่างทรานซิสเตอร์ตัวบนและตัวล่างอยู่ที่เวลา 0.025 วินาที เพื่อไม่ให้ทรานซิสเตอร์ฝั่งใดทำงานหนักเกินไป



รูป 26: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่คำสั่งเท่ากับ 50Hz

จากรูปที่ 26 จะเห็นได้ว่า เมื่อเราเพิ่มความถี่คำสั่งให้กับอินเวอร์เตอร์ จะทำให้ความถี่ไฟฟ้าของแรงดันออกจากอินเวอร์เตอร์มีค่ามากขึ้น ทำให้องค์ประกอบความเหนี่ยวนำของโหลดมีค่ามากขึ้น ทำให้การเหลื่อมกันของกระแสและแรงดันมากขึ้น จึงมีช่วงจังหวะเวลาระหว่างที่แรงดันคำเฟสคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ตัดศูนย์ (เปลี่ยนเครื่องหมายจากลบเป็นบวก) และเวลาที่ค่ากระแสสายตัดศูนย์ (เปลี่ยนเครื่องหมายจากลบเป็นบวก) ในช่วงเวลาดังกล่าว แรงดันเฟสคำสั่งจะมีค่าเป็นบวก ส่วนค่ากระแสจะมีค่าเป็นลบ ดังนั้น ถ้าหากเรามอดูเลตแบบทรานซิสเตอร์ตัวบนนำกระแสตลอดเวลา เท่ากับเราบังคับให้กระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์ตัวบน ทำให้ทรานซิสเตอร์ตัวบนทำงานในจตุภาคที่สาม ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ เนื่องจากจะมีแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์มากกว่า ดังนั้น เราจึงต้องเลือกให้อัลกอริทึมมอดูเลตแบบสองแขนเลือกมอดูเลตแบบทรานซิสเตอร์ตัวล่างนำกระแสตลอดเวลา ทำให้กระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์ตัวล่างแบบที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ตัวล่างนำกระแสในจตุภาคที่หนึ่ง ซึ่งมีแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์น้อยกว่า กำลังสูญเสียระหว่างนำกระแสน้อยกว่า ดังที่จะสะท้อนออกมาในกราฟโหมดการมอดูเลตแบบสองแขนที่อัลกอริทึมตัดสินใจเลือก จะสังเกตุได้ว่า อัลกอริทึมจะเลือกให้อินเวอร์เตอร์มอดูเลตแบบ ”Lower” เมื่ออยู่ในช่วงเวลาระหว่างที่ค่าแรงดันเฟสคำสั่งเปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกไปลบ และค่าแรงดันสายเปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกไปลบ และอัลกอริทึมจะเลือกมอดูเลตแบบ ”Upper” ในช่วงเวลาระหว่างที่ค่าแรงดันเฟสคำสั่งเปลี่ยนเครื่องหมายจากลบไปบวก และค่ากระแสสายเปลี่ยนเครื่องหมายจากลบไปบวก ซึ่งหากพิจารณาจากผลการจำลองจะพบว่า อัลกอริทึมได้ทำงานอย่างถูกต้อง

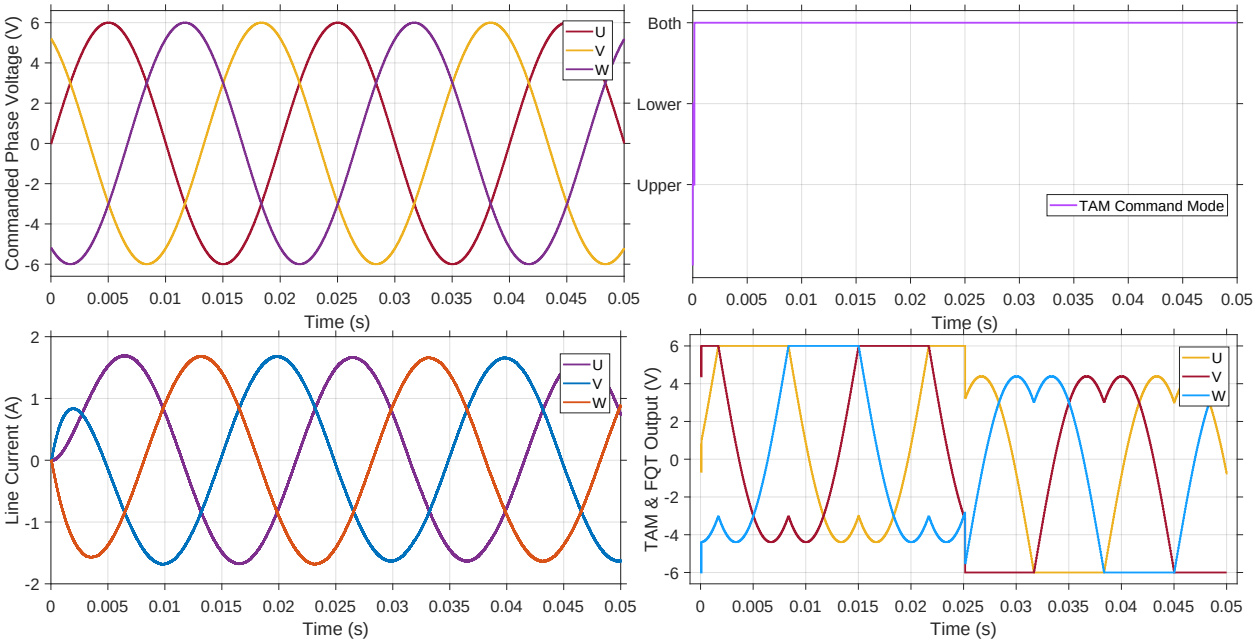


รูป 27: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่คำสั่งเท่ากับ 100Hz

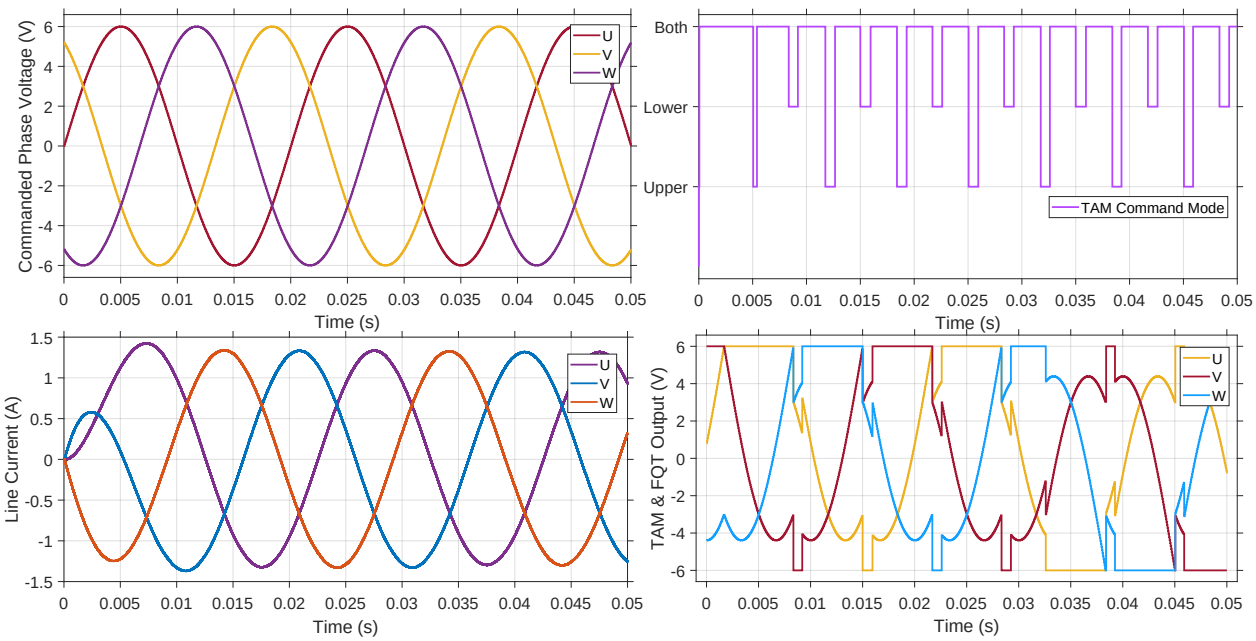
จากรูปที่ 27 จะเห็นได้ว่า เมื่อเราเพิ่มความถี่คำสั่งให้กับอินเวอร์เตอร์ แนวโน้มของการเหลื่อมกันของกระแสและแรงดันจะมีมากขึ้น ดังนั้น ส่วนแบ่งเวลาที่อัลกอริทึมเลือกมอดูเลตแบบ "Upper" และ "Lower" จึงมีมากขึ้น ดังที่จะสะท้อนออกมาในกราฟโหมดการมอดูเลตแบบสองแขนที่อัลกอริทึมเลือก

3.1.2 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับค่าความเหนี่ยวนำของโหลด

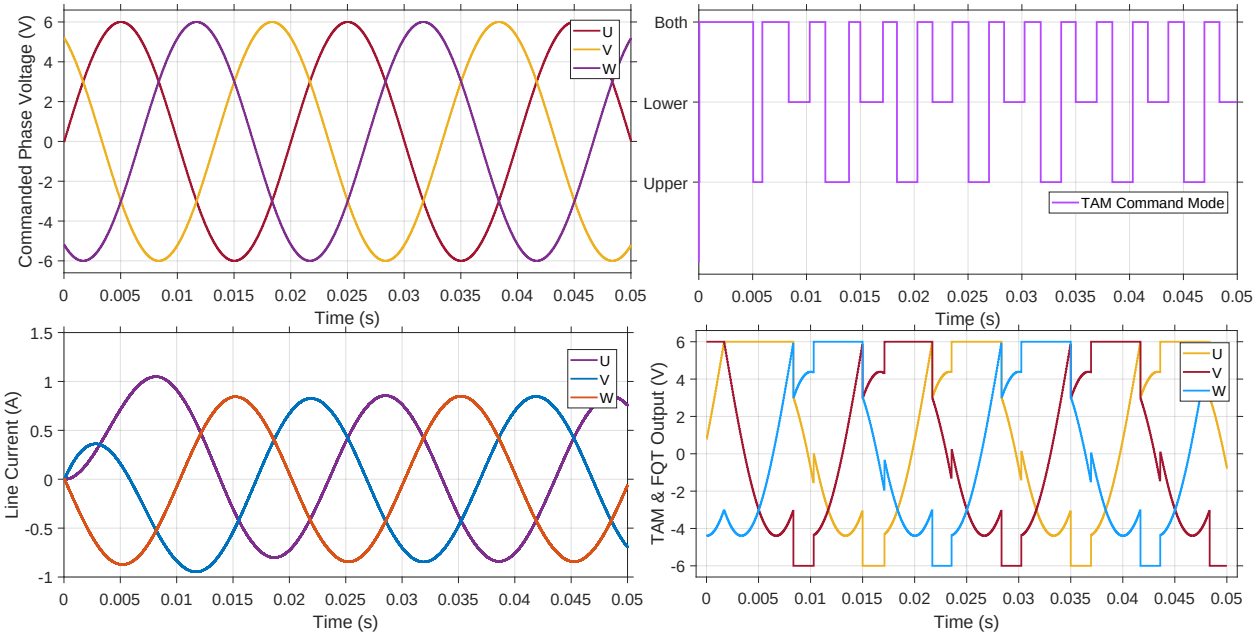
จะเห็นได้ว่าการปรับค่าความเหนี่ยวนำของโหลดส่งผลคล้ายกับการปรับค่าความถี่คำสั่งให้กับอินเวอร์เตอร์ เพราะสุดท้ายแล้ว การปรับความถี่คำสั่งของอินเวอร์เตอร์ก็คือการเปลี่ยนค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำนั่นเอง จะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องในกรณีการทดสอบต่างๆ



รูป 28: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับความเหนี่ยวนำของโหลดให้เท่ากับ 5mH



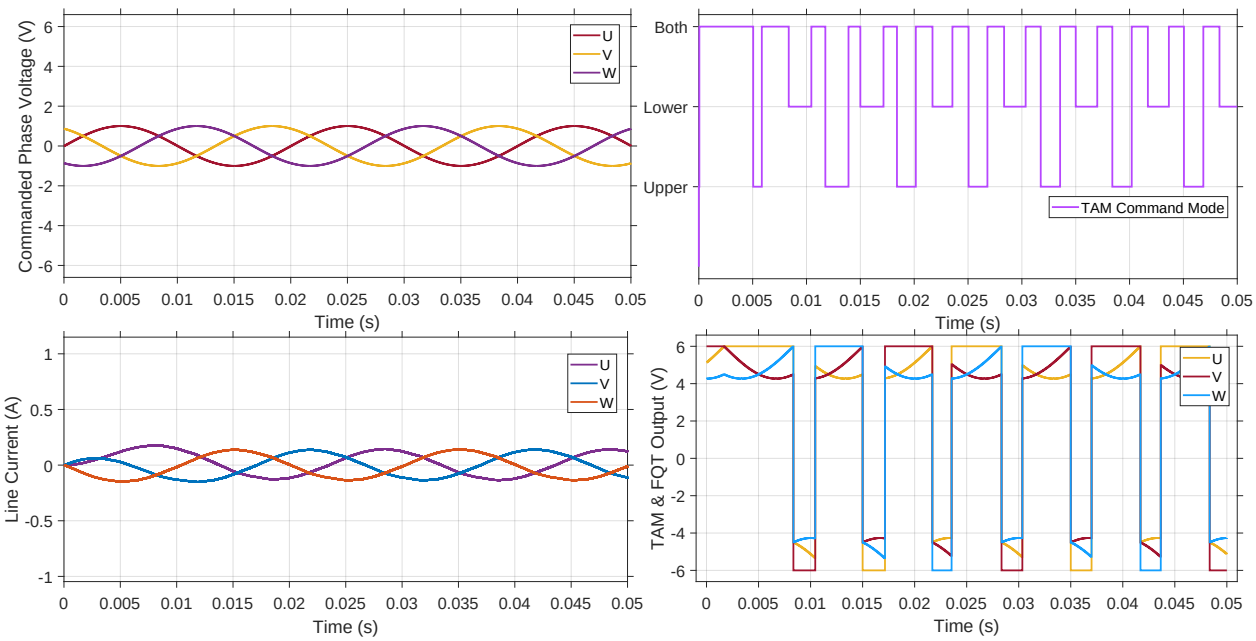
รูป 29: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับความเหนี่ยวนำของโหลดให้เท่ากับ 10mH



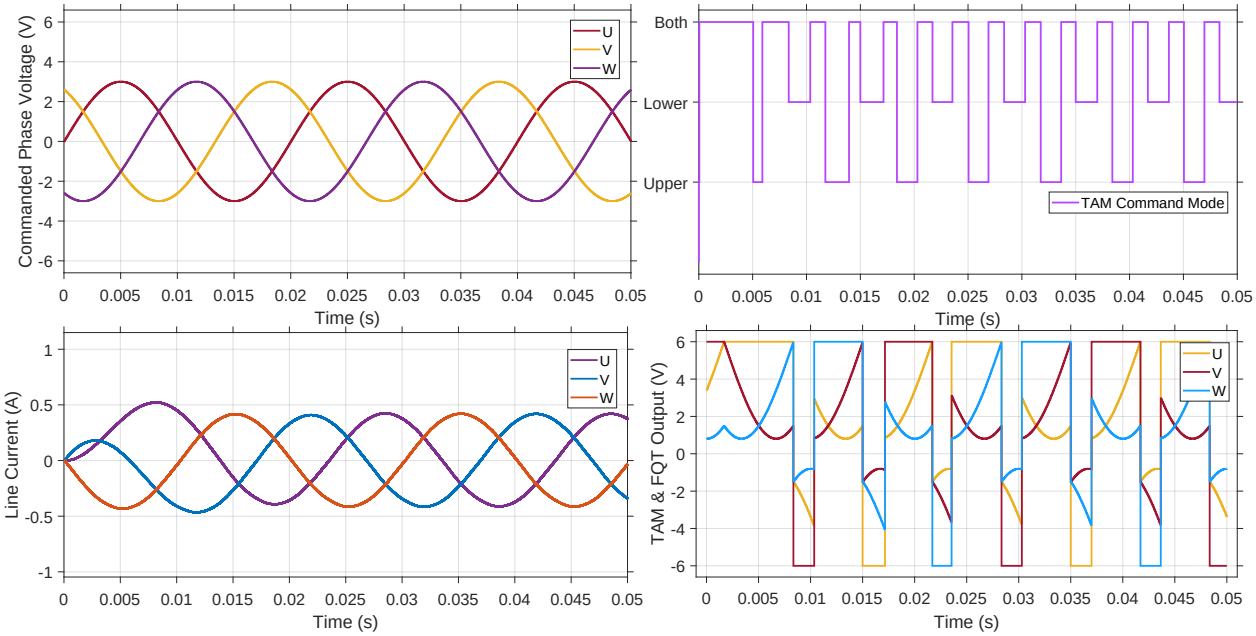
รูป 30: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับความเหนี่ยวนำของโหลดให้เท่ากับ 20mH

3.1.3 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับค่าขนาดของแรงดันคำสั่งของอินเวอร์เตอร์

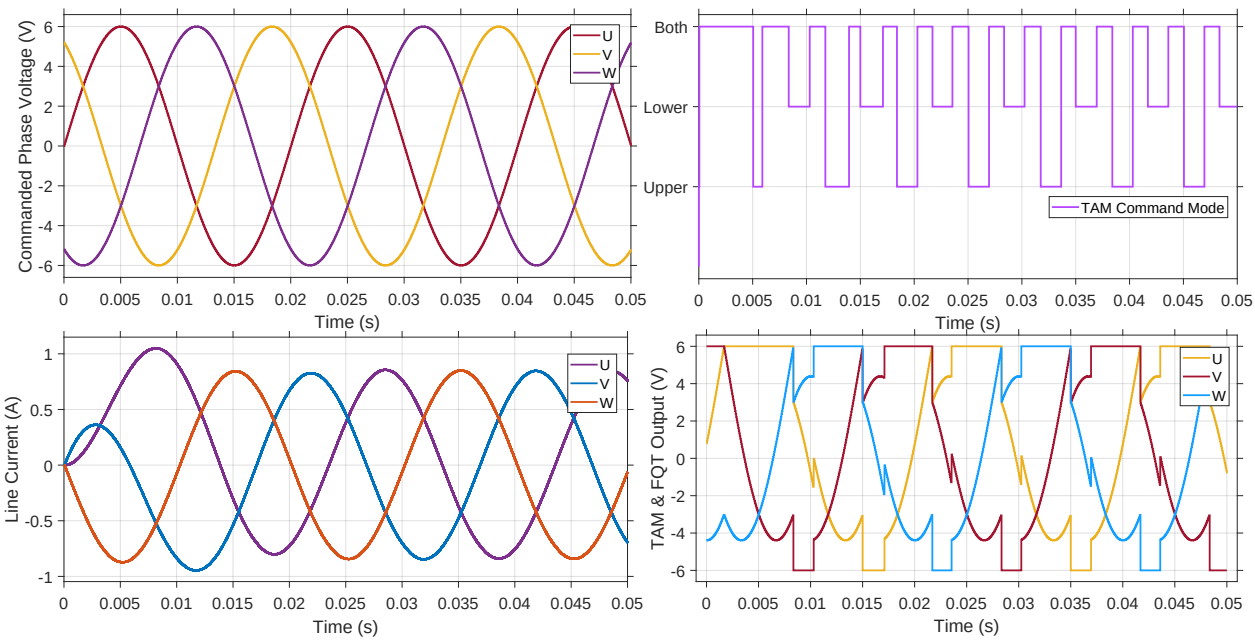
ถ้าหากค่ายอดของแรงดันเฟสคำสั่งถูกปรับ ก็จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อขนาดของกระแสสาย นั่นคือ ค่ากระแสสายจะแปรผันตรงกับขนาดของแรงดันคำสั่ง จะสังเกตุได้ว่า อินเวอร์เตอร์ยังสามารถทำงานได้ถูกต้องเมื่อปรับขนาดของแรงดันคำสั่งเป็นค่าต่างๆ



รูป 31: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับขนาดของค่ายอดของดันเฟสคำสั่งเท่ากับ 1 V



รูป 32: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับขนาดของค่ายอดของดันเฟสคำสั่งเท่ากับ 3 V



รูป 33: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับขนาดของค่ายอดของดันเฟสคำสั่งเท่ากับ 6 V

3.2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

จากการศึกษาการทำงานของทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และ การเปรียบเทียบเชิงกล - ไฟฟ้า(Electrical analogy) เพื่อแปลงระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้า มีขั้นตอนดังนี้

เนื่องจากอัตราส่วนของเกียร์ของ ขบวนเฟือง(gear train) และเฟืองดอกจอก(bevel gear) ที่ใช้ในการส่งการเคลื่อนที่เชิงหมุนจากเกลียวนำ(lead screw) ไปยังโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส มีอัตราส่วนเท่ากับ 1:1 จึงได้ความสัมพันธ์

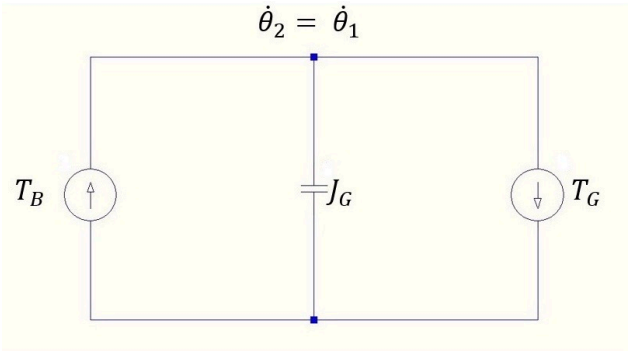
$$x = \frac{l\theta_1}{2\pi} = \frac{l\theta_2}{2\pi} \tag{43}$$

จากสมการที่ (18)-(20) จะพิจารณจากแนวการเคลื่อนที่เชิงเส้นไปยังการเคลื่อนที่เชิงหมุนโดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ (43) และใช้ความสัมพันธ์ของปริมาณทางกลและไฟฟ้าจากตารางที่ 1

$$\frac{aml}{2\pi}\ddot{\theta}_1 + \frac{aDl}{2\pi}\dot{\theta}_1 + \frac{akl}{2\pi}\theta_1 + aF_a = aF_(t) \tag{44}$$

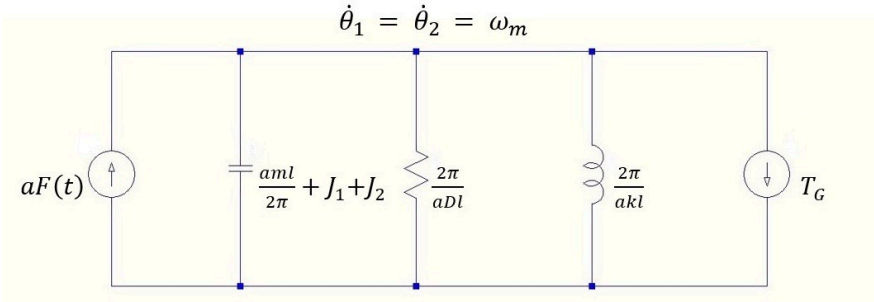
$$J_1\ddot{\theta}_1 + T_B = aF_a \tag{45}$$

$$J_G\ddot{\theta}_2 + T_G = T_B \tag{46}$$



รูป 36: วงจรไฟฟ้าของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากรวมวงจรไฟฟ้าของการเลื่อนที่ของแป้นเกลียว(nut) และ การเคลื่อนที่เชิงหมุนของเกลียวนำ(lead screw) และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทั้งสามข้างบน จะได้ วงจรสมมูลทางไฟฟ้าระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน ดังรูปที่ 37



รูป 37: วงจรสมมูลไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

หลังจากได้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน จึงได้ศึกษาเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรเพื่อเข้าใจหลักกรทำงานและสมการความสัมพันธ์ต่างๆ ที่จะสามารถวิเคราะห์ และสร้างวงจรสมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

จากการที่ได้ศึกษาเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร และได้วงจรมูลของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน สามารถรวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรตามขั้นตอน ดังนี้

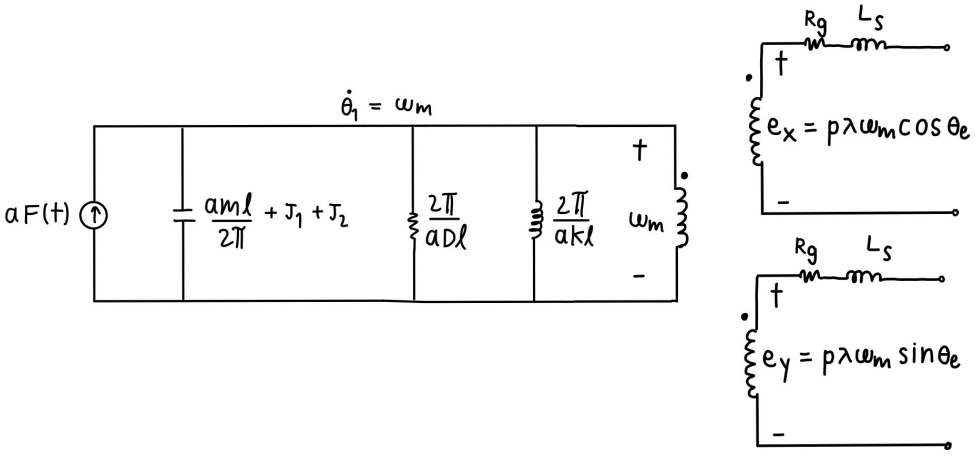
จากสมการถที่ (17) แรงดันบนกรอบอ้างอิงนิ่ง แกน x,y ทำให้ทราบความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายในของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ดังสมการด้านล่าง

$$e_x = p\lambda\omega_m cos(\theta_e) \tag{47}$$

$$e_x = p\lambda\omega_m sin(\theta_e) \tag{48}$$

$$\vec{e}_{ind} = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} cos(\theta_e) \\ sin(\theta_e) \end{bmatrix} = p\lambda\omega_m \begin{bmatrix} cos(\theta_e) \\ sin(\theta_e) \end{bmatrix} = p\lambda e^{j\theta_e} \tag{49}$$

วงจรที่ไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานสัมพันธ์กับเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า ความเร็วของโรเตอร์สะท้อนไปยังขนาดแรงเคลื่อนเหนี่ยวของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสตามสมการด้านบน จึงได้ความสัมพันธ์แสดงดังรูปวงจรด้านล่าง



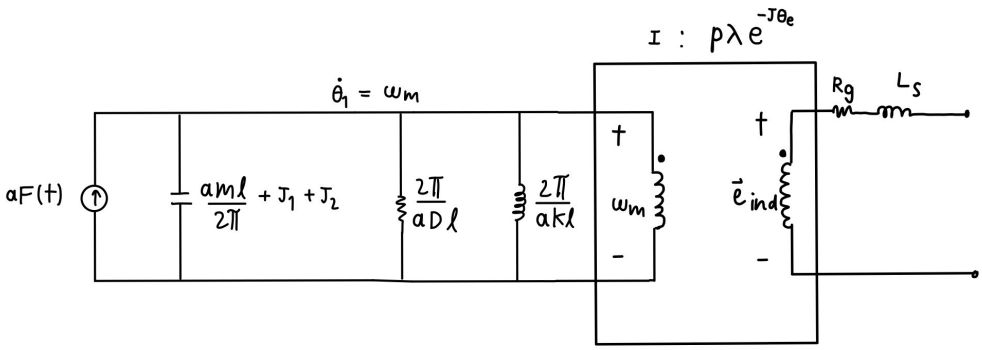
รูป 38: วงจรไฟฟ้าแสดงความสัมพันธ์ระบบทางกลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากนั้นเขียนความสัมพันธ์อยู่ในรูปสเปซเวกเตอร์ของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและ เครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร เพื่อสามารถวิเคราะห์เป็นวงจรไฟฟ้าเพียงวงจรเดียวได้

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = p\lambda \begin{bmatrix} cos(\theta_e) & -sin(\theta_e) \\ sin(\theta_e) & cos(\theta_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_m \\ 0 \end{bmatrix} \tag{50}$$

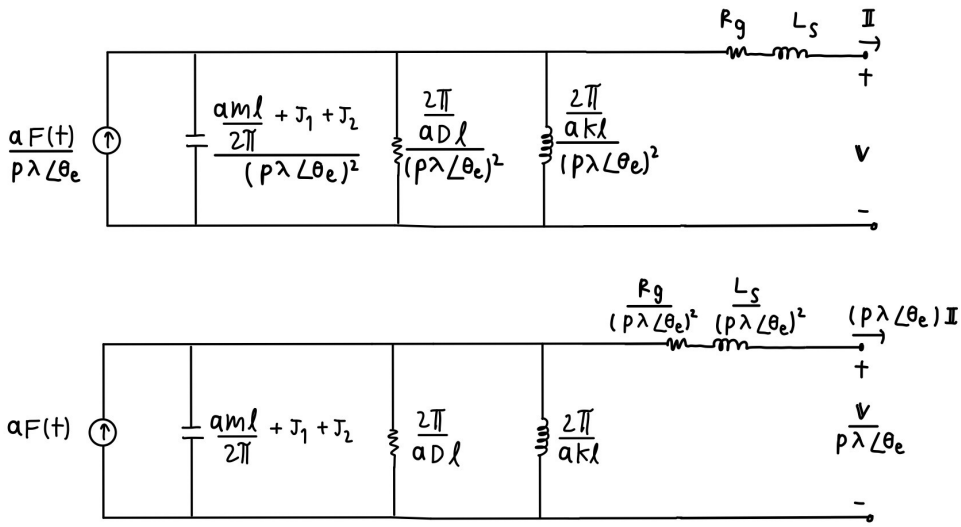
$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = p\lambda e^{-J\theta_e} \begin{bmatrix} \omega_m \\ 0 \end{bmatrix} \tag{51}$$

จึงสามารถมองเป็นวงจรสมมูลที่แสดงความสัมพันธ์เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบเป็นเชิงซ้อน ดังรูปที่ 39



รูป 39: วงจรไฟฟ้าแสดงความสัมพันธ์ระบบทางกลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีหม้อแปลงไฟฟ้ามีอัตราส่วนเป็นเชิงซ้อน

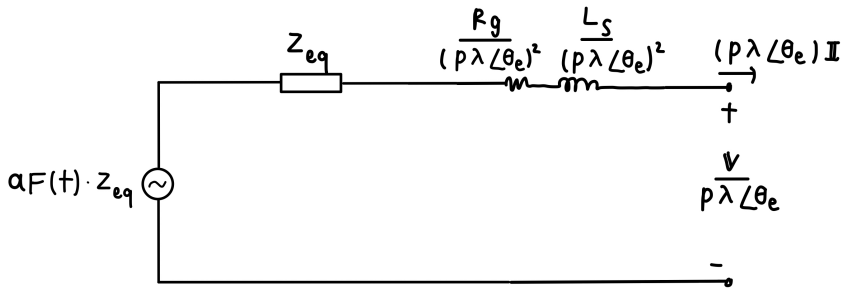
จากนั้นทำการแปลงเป็นวงจรสมมูล โดยอ้างอิงฝั่งทุติยภูมิ(บน)และอ้างอิงฝั่งปฐมภูมิ(ล่าง) แสดงดังรูปที่ 40



รูป 40: วงจรสมมูลไฟฟ้าที่อ้างอิงฝั่งทุติยภูมิ(บน)และอ้างอิงฝั่งปฐมภูมิ(ล่าง)

3.3 ผลการจำลองของแบบจำลองทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กไฟฟ้า บนโปรแกรม MATLAB/Simulink

จากสมการที่ (41) จึงทำการแปลงวงจรสมมูลจากรูป 40 โดยใช้ทฤษฎีเทเวนิน จะได้วงจรสมมูลดังรูปด้านล่าง



รูป 41: แบบจำลองวงจรไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นพลังงานและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้ทฤษฎีเทเวนิน

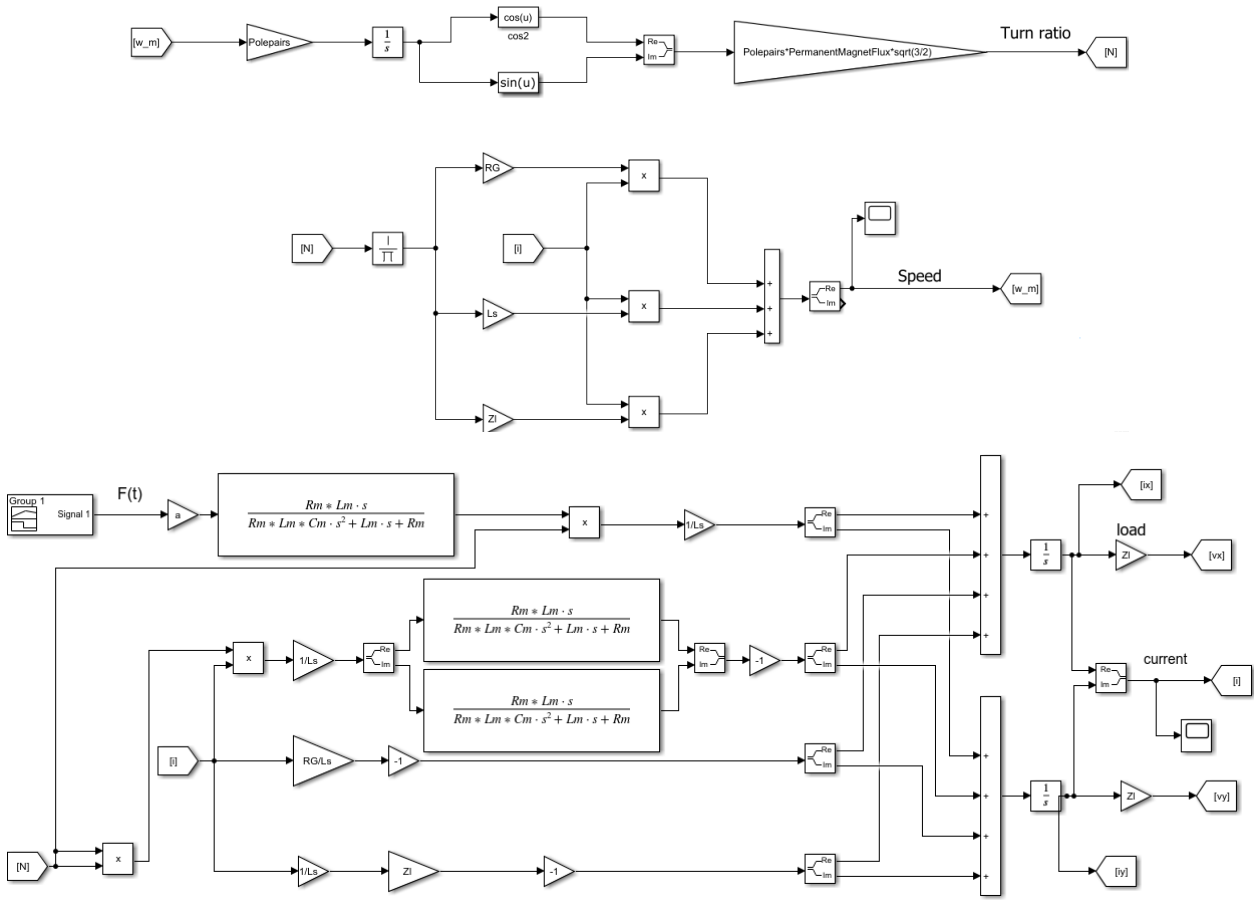
โดย Z_{eq} คือ $\frac{2\pi}{aDl}//s\frac{2\pi}{akl}//\frac{1}{s(\frac{aml}{2\pi}+J_1+J_2)}$ จากทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังสูงสุด จะได้ว่าโหลดที่นำมาต่อที่ด้านขาออกของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส จะมีลักษณะตามสมการที่ (52)

$$z_{load} = conjugate[z_{eq}(p\lambda\angle\theta_e)^2 + R_g + sL_s] \tag{52}$$

โดยแรงดันขาออกที่สอดคล้องกับหลักการติดตามจุดทำงาน ซึ่งทำให้กำลังขาออกของเครื่องจักรไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเป็นดังสมการที่ (53)

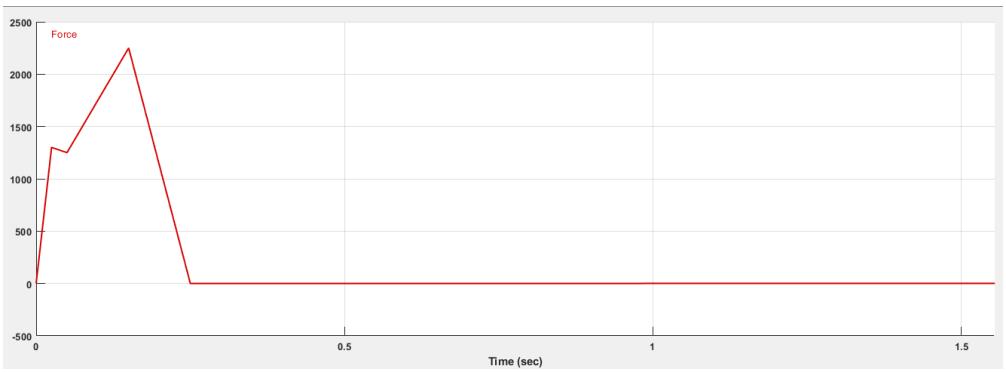
$$v_{out} = conjugate[z_{eq}I(p\lambda\angle\theta_e)^2 + R_gI + sL_sI] \tag{53}$$

หลังจากที่ได้วงจรสมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสและเงื่อนไขแรงดันขาออกที่สอดคล้องกับหลักการติดตามจุดทำงานซึ่งทำให้กำลังขาออกมีค่าสูงสุด จากรูปที่ 41 และสมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง มาสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังรูปที่ 42 เพื่อศึกษาการทำงานของแบบจำลองที่ได้



รูป 42: แบบจำลองวงจรสมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นพลังงานและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่มีโหลดตัวต้านทาน 32.23 โอห์ม

แบบจำลองที่ได้ ทดสอบด้วยแรงเหยียบ ดังรูปที่ 42 และใส่โหลดเป็นตัวต้านทานที่ขาออกของ มีขนาดเท่ากับความต้านทานภายในเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 32.23 โอห์ม ใช้แรงจากเท้าเหยียบแสดงดังรูปที่ 43 ค่าพารามิเตอร์อื่นที่ใช้ในการทดสอบ [2] แสดงดังตารางที่ 2 และ 3



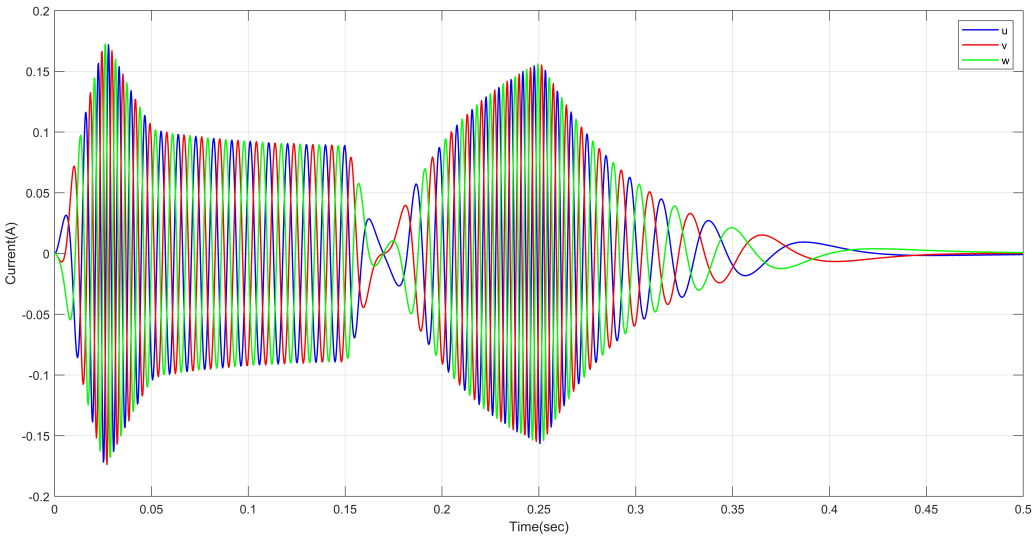
รูป 43: แบบจำลองวงจรสมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นพลังงานและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่มีโหลดตัวต้านทาน 32.23 โอห์ม

Parameters	Value
Pitch of lead screw	8 mm
lead(l)	0.015 m
Mass of nut and plate(m)	2.16 kg
Moment of inertia of bevel gear(J_G)	8.6756 x $10^{-}7$ kgm^2
Moment of inertia of lead screw(J_l)	2.5536 x $10^{-}6$ kgm^2
lead angle	45 degree
Spring coefficient(k)	40000 N/m
Damping coefficient(D)	2000 Ns/m
Friction coefficient(μ)	0.21
Efficient of thrust bearing	1.00
Efficient of thread	0.8

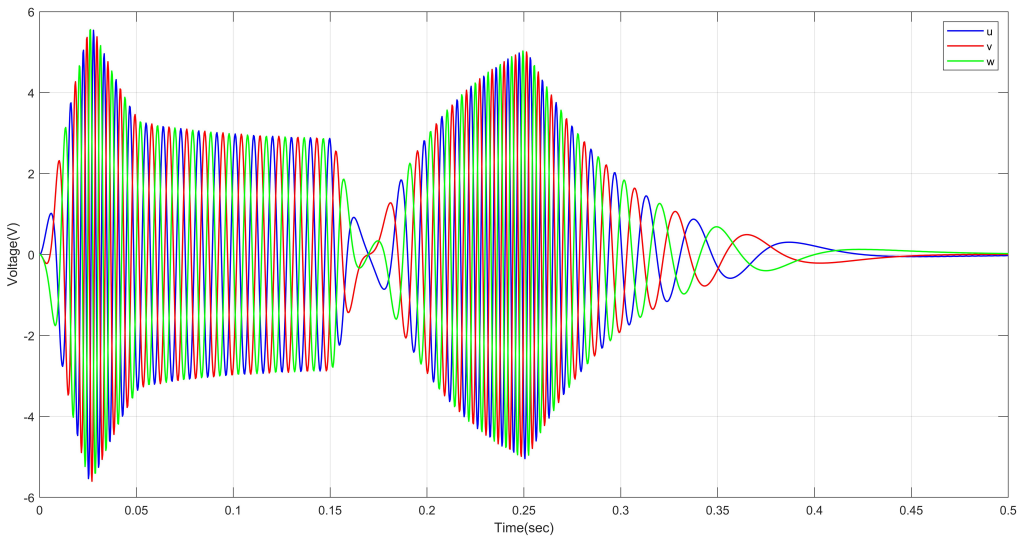
ตาราง 2: ค่าตัวแปรทางกลที่เกี่ยวข้องกับแผ่นพื้นพลังงาน [2]

Parameters	Value
ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์(Rs)	32.23 Ω
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์(Ls)	11.3 mH
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ในแนวแกนอ้างอิงดี (Ld)	16 mH
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ในแนวแกนอ้างอิงคิว (Lq)	16 mH
ฟลักซ์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร	0.009 Wb
จำนวนคู่ขั้ว	6 คู่

ตาราง 3: ค่าตัวแปรทางกลที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร[2]



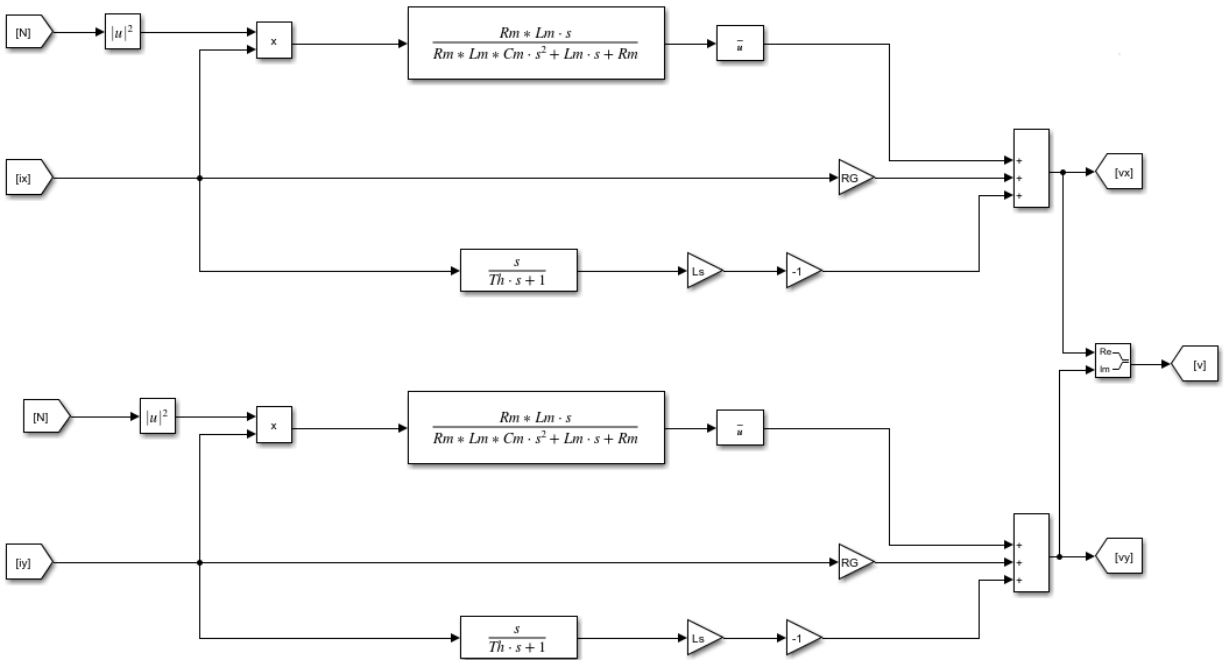
รูป 44: กระแสขาออก เมื่อโหลดตัวต้านทาน 32.23 โอห์ม



รูป 45: แรงดันขาออก เมื่อโหลดตัวต้านทาน 32.23 โอห์ม

จากรูปที่ 44 และ 45 พบว่า แรงดันและกระแสมีลูกคลื่นเกิดขึ้นจำนวน 2 ลูก โดยลูกแรกเกิดจากการยุบตัวของแผ่นพื้นเนื่องจากแรงที่เหยียบลงบนแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และลูกที่สองเกิดจากการยุบตัวของแผ่นพื้นเนื่องจากแรงคืนตัวของสปริง

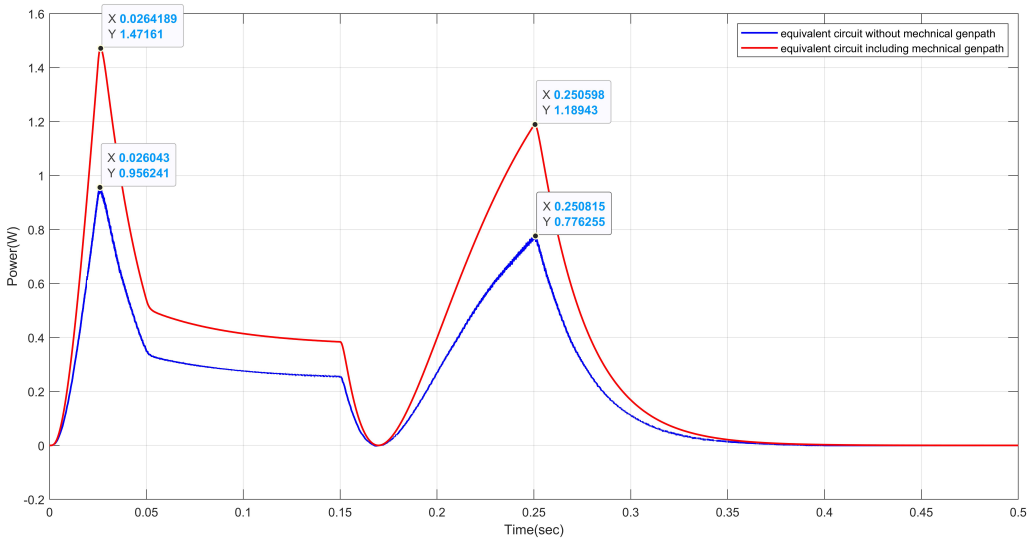
จากสมการที่ (41) เมื่อเปลี่ยนโหลดจากตัวต้านทานเป็นแหล่งจ่ายแรงดันแบบควบคุมได้ สามารถนำมาสร้างเป็นอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดได้ดังรูปที่ 46 โดยนำกระแสขาออกของแบบจำลองมาพิจารณาผ่านอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดเพื่อคำนวณหาเงื่อนไขสัญญาณแรงดันที่เหมาะสมและส่งกลับไปเป็นสัญญาณแรงดันขาออกของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งจะทำให้ได้กำลังขาออกสูงสุด



รูป 46: แผนภาพไดอะแกรมของอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดบนแกนอ้างอิงนิ่ง

จากผลการทดสอบแบบจำลอง จะได้ว่ากำลังขาออกเมื่อมีการใช้อัลกอริทึมการติตามกำลังสูงสุด ที่มาจากวงจรสมมูล

ไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสมีลักษณะดังรูปที่ 47 และเปรียบเทียบกำลังขาออกเมื่อไม่มีการรวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคิดรวมในอัลกอริทึมการติดตามกำลังสูงสุดในปีการศึกษา 2563



รูป 47: กำลังขาออกเมื่ออัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด กรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณ และกรณีที่ไม่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณ

จากรูป 47 พบว่ากรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณด้วย จะได้กำลังขาออกที่สูงกว่า กรณีที่ไม่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณ กำลังขาออกสูงสุดค่ายอดลูกแรกเพิ่มจาก 0.95 วัตต์ เป็น 1.47 วัตต์ และกำลังขาออกสูงสุดค่ายอดลูกที่สองเพิ่มจาก 0.77 วัตต์ เป็น 1.18 วัตต์ จึงสรุปได้ อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด กรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณ สามารถทำให้ได้กำลังขาออกมีค่าที่สูงขึ้นจริง เนื่องจาก พิจารณาสมการ (52) และ (53) จะมีพจน์อิมพีแดนซ์ Z_{eq} ซึ่งเท่ากับ $\frac{2\pi}{aDl}//s\frac{2\pi}{akl}//\frac{1}{s(\frac{aml}{2\pi}+J_1+J_2)}$ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มาจากระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานเพิ่มเข้ามา นอกเหนือจากแค่อิมพีแดนซ์ของขวดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนัสเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้แบบจำลองมีความสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้ได้กำลังขาออกสูงขึ้นเมื่อเทียบกับปีการศึกษา 2563

4 บทสรุป

4.1 สรุปผลการดำเนินการ

4.1.1 การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง

จนถึงปัจจุบัน ได้มีการออกแบบอัลกอริทึมการลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง บน MATLAB^{TM}/Simulink^{TM} และได้มีสร้างโมเดลของอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อที่จะทดสอบระบบทั้งหมด นั่นคือ

- โมเดลแบบจำลองของแบตเตอร์รี
- โมเดลแบบจำลองของระบบเชิงกล
- โมเดลแบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร
- โมเดลแบบจำลองระบบฝังตัว
- โมเดลแบบจำลองบอร์ดอินเวอร์เตอร์

และได้มีการทดสอบ และทวนสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ และอัลกอริทึมในการลดกำลังสูญเสีย พบว่า สามารถทำงานและตัดสินใจได้ถูกต้อง

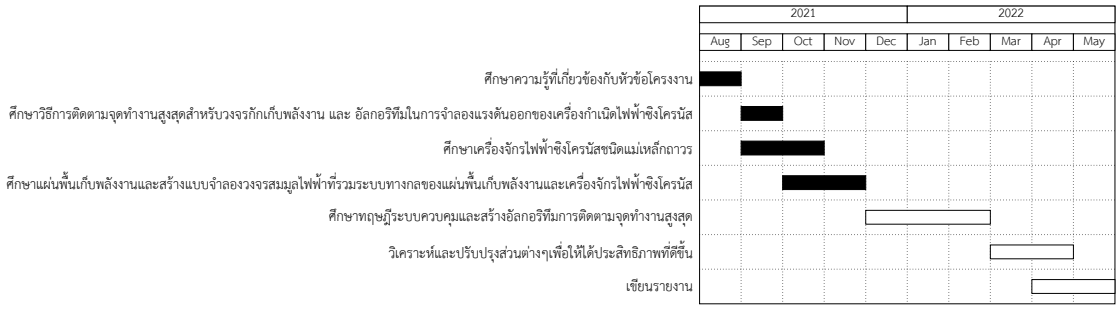
4.1.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด

จากการที่ได้ไปศึกษาการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน การเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า เครื่องจักรกลซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร และหลักการติดตามจุดทำงานสูงสุด ทำให้ได้วงจรสมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน ใช้หาอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุดได้ และสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

จากผลการทดสอบอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุดซึ่งมีการรวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink พบว่า กรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณด้วย จะได้กำลังขาออกที่สูงกว่า กรณีที่ไม่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณที่ทำในปีการศึกษา 2563 จึงสรุปได้ อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด กรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณ สามารถทำให้ได้กำลังขาออกมีค่าที่สูงขึ้นจริง

4.2 แผนการดำเนินงาน

ในรายงานฉบับนี้ มีแผนการดำเนินงานแยกเป็นของผู้จัดทำแต่ละคน คือ ของนายณัฐพล กาบแก้ว ซึ่งมีแผนการดำเนินงานดังแสดงในรูปที่ 48 และของนายสันติ ว่องประเสริฐ ซึ่งมีแผนการดำเนินงานดังแสดงในรูปที่ 49



รูป 49: Gantt chart ของนายสันติ ว่องประเสริฐ

5 เอกสารอ้างอิง

[1] R. Riemer and A. Shapiro, "Biomechanical energy harvesting from human motion: theory, state of the art,design guidelines, and future directions." https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21521509/, 2011.

[2] T. Jintanawan, G. Phanomchoeng, S. Suwankawin, P. Kreepoke, P. Chetchatree, and C. Uviengchai, "Design of kinetic-energy harvesting floors." https://doi.org/10.3390/en13205419, 2020.

[3] B. Sun, "Does gan have a body diode? - understanding the third quadrant operation of gan," *Texas Instruments Application Report*, no. SNOAA36, 2019.

[4] N. Mohan and S. Raju, *Analysis and Control of Electric Drives: Simulations and Laboratory Implementation*. Wiley, 2020.

[5] Asst. Prof. Surapong Suwankawin, "Chapter 4 modeling and control of surface permanent magnet synchronous motor." presented to 2102-543, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. [PowerPoint slides].

[6] 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].

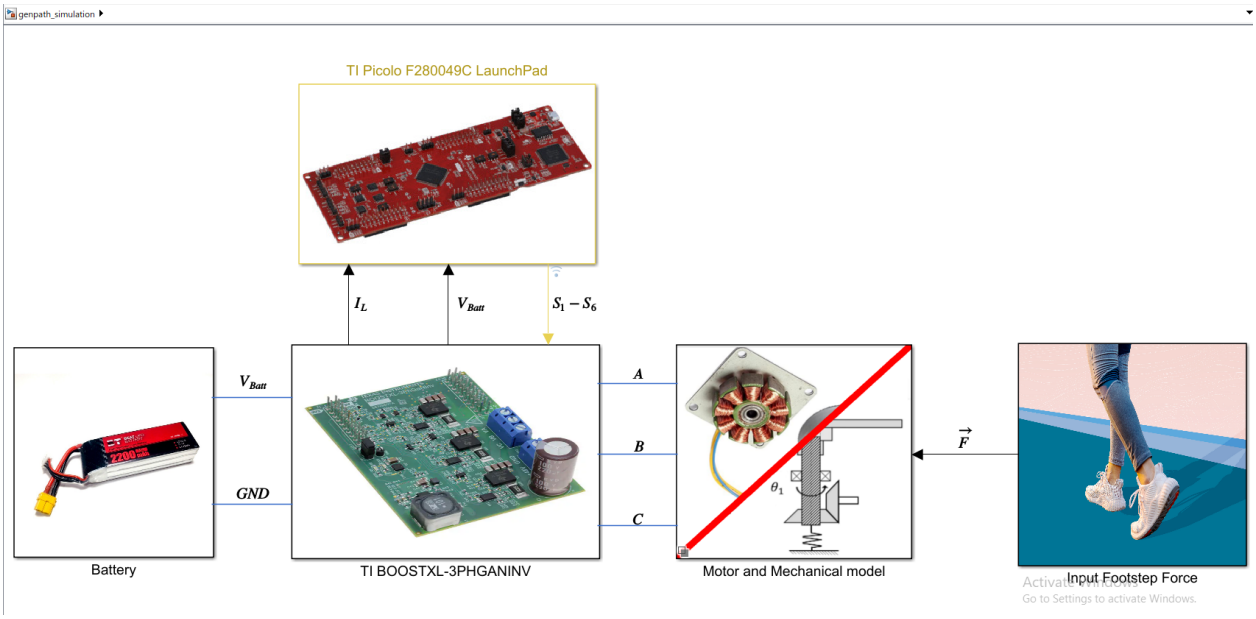
[7] Asst. Prof. Surapong Suwankawin, "Chapter 3 space vector representation." presented to 2102-543, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. [PowerPoint slides].

[8] O'Rourke and Colm J. et al., "A geometric interpretation of reference frames and transformations: dq0, clarke, and park." IEEE Transactions on Energy Conversion 34, 4 (December 2019): 2070 - 2083 © 2019 IEEE.

[9] 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].

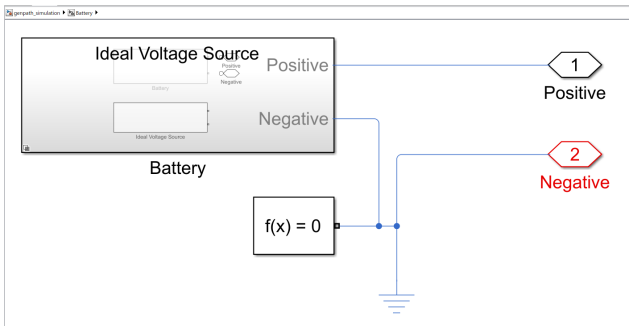
6 ภาคผนวก

6.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบพลวัตของระบบ

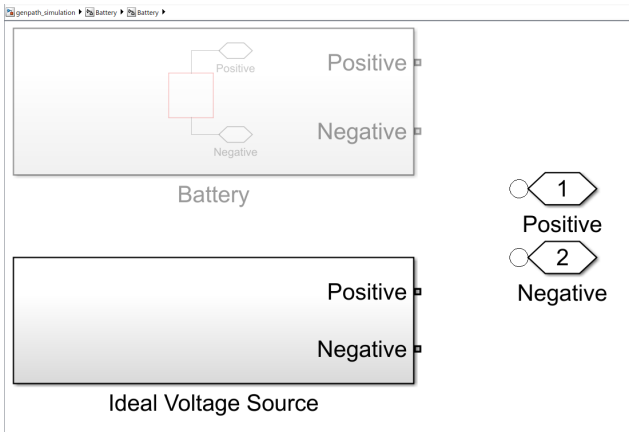


รูป 50: ชั้นที่ 1: ภาพรวมของระบบพลวัตทั้งหมด

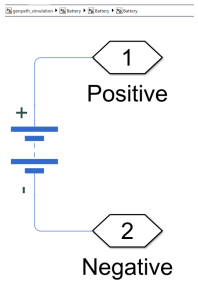
6.1.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแบตเตอร์รี



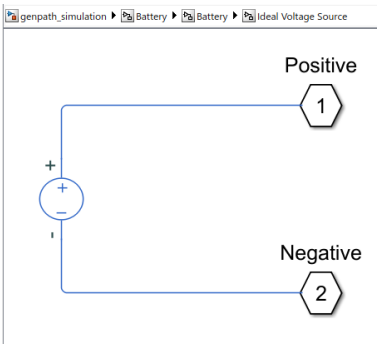
รูป 51: ชั้นที่ 2: แบตเตอร์รี และ Solver Configuration



รูป 52: ขั้นที่ 3: Variant Model ของแบตเตอร์รี

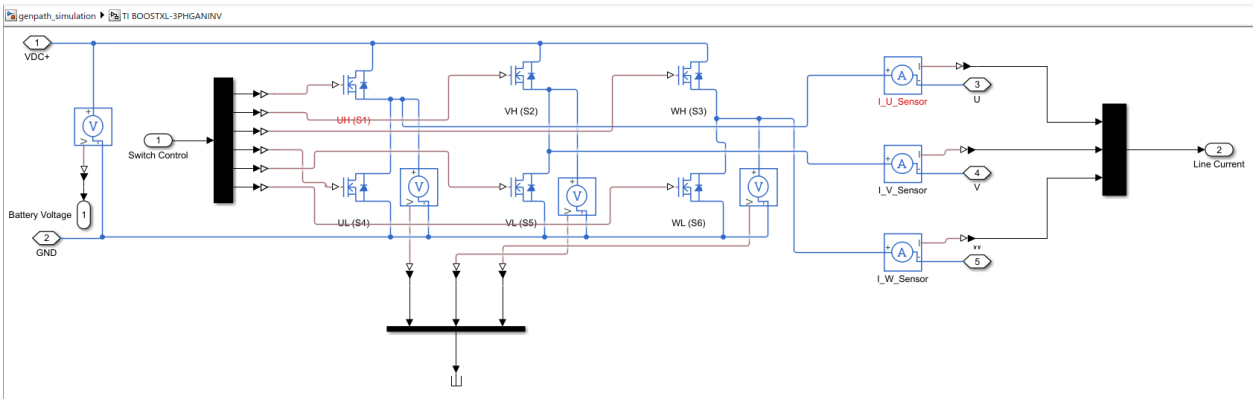


รูป 53: ชั้นที่ 4: ภายใน Variant Model ของแบตเตอร์รี



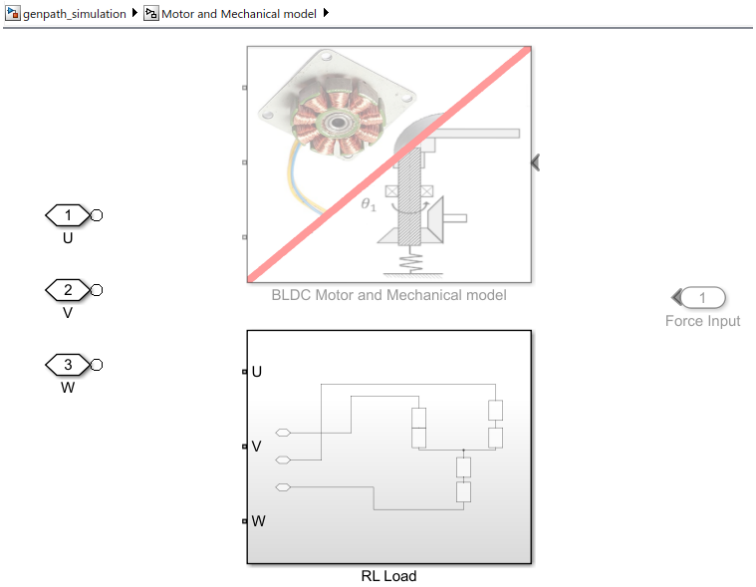
รูป 54: ชั้นที่ 4: ภายใน Variant Model ของแหล่งจ่ายไฟตรงในอุดมคติ

6.1.2 Simulink Model ในส่วนของการจำลองบอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI BOOSTXL-3PHGANINV

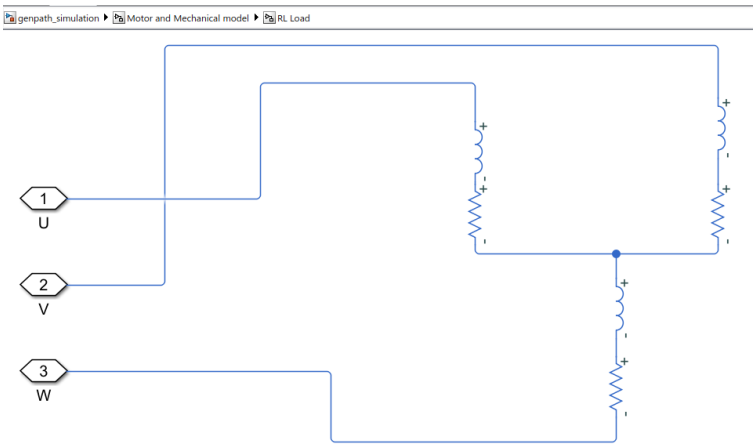


รูป 55: ชั้นที่ 2: บอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI BOOSTXL-3PHGANINV

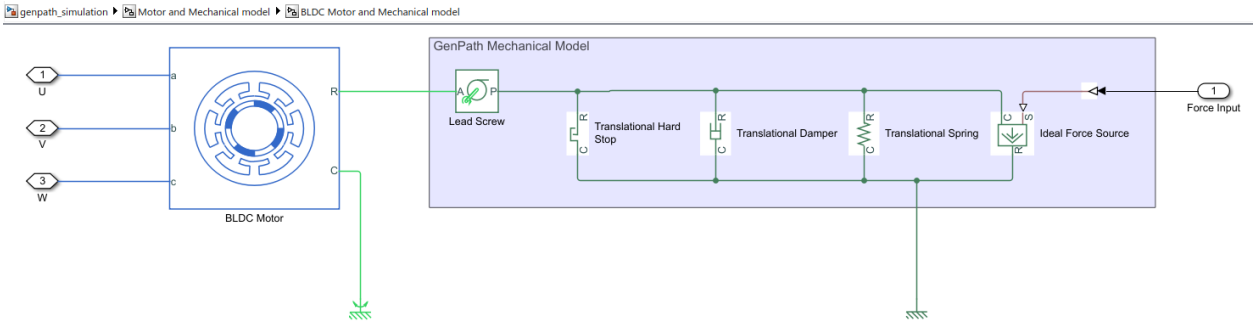
6.1.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบเชิงกลและมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร



รูป 56: ชั้นที่ 2: Variant Model ของมอเตอร์และระบบเชิงกล กับโหลดแบบตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

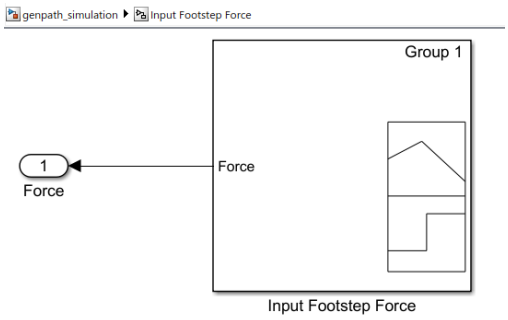


รูป 57: ชั้นที่ 3: ภายใน Variant Model ของโหลดแบบตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

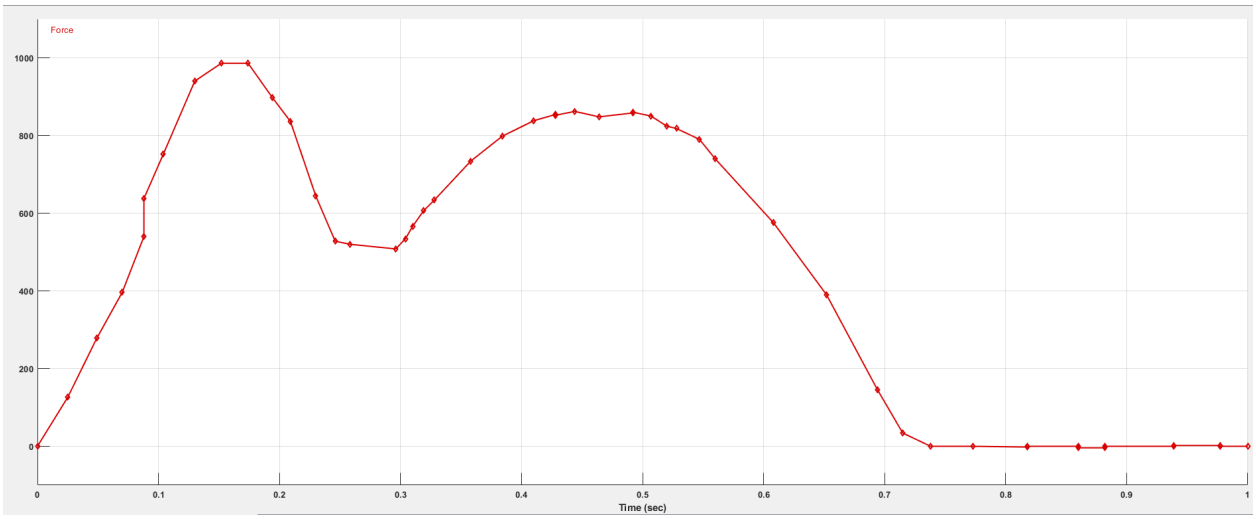


รูป 58: ชั้นที่ 3: ภายใน Variant Model ของระบบเชิงกลและมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร

6.1.4 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแรงที่เท้าเหยียบแผ่นพื้น

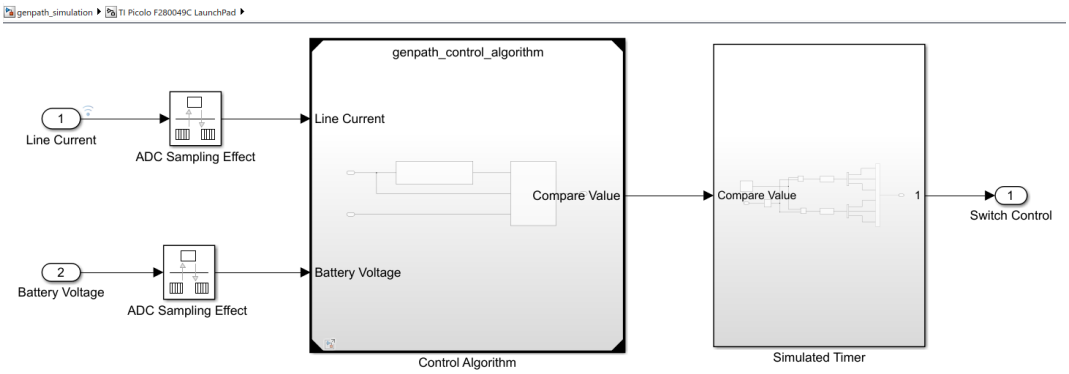


รูป 59: ชั้นที่ 2: แบบจำลองแรงที่มาจากเท้าเหยียบแผ่นพื้น

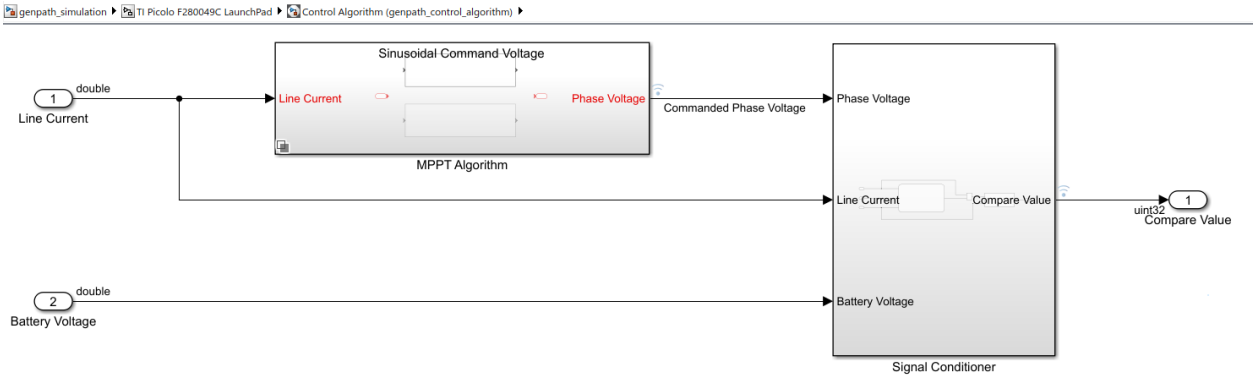


รูป 60: กราฟแสดงสัญญาณแรงที่มาจากเท้าเหยียบ

6.2 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมที่ทำงานบนระบบฝังตัว TI Picolo F280049C LaunchPad

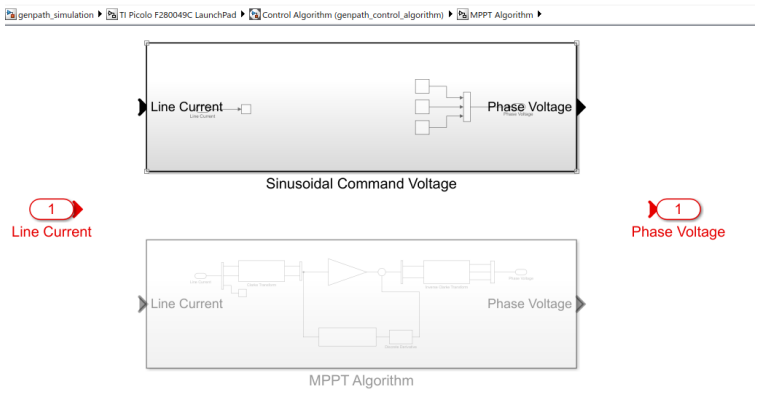


รูป 61: ชั้นที่ 2: ภายใน Subsystem ของแบบจำลองระบบฝังตัว

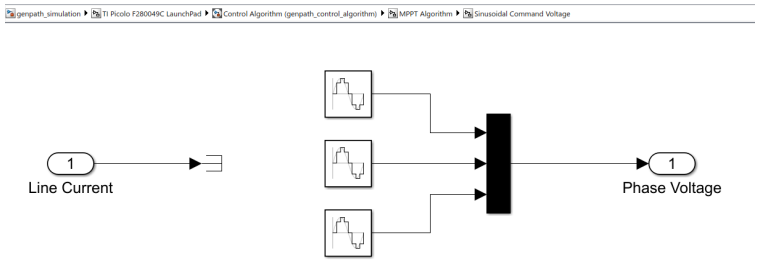


รูป 62: ชั้นที่ 3: ภายใน Subsystem ของอัลกอริทึมที่ทำงานอยู่บนระบบฝังตัว

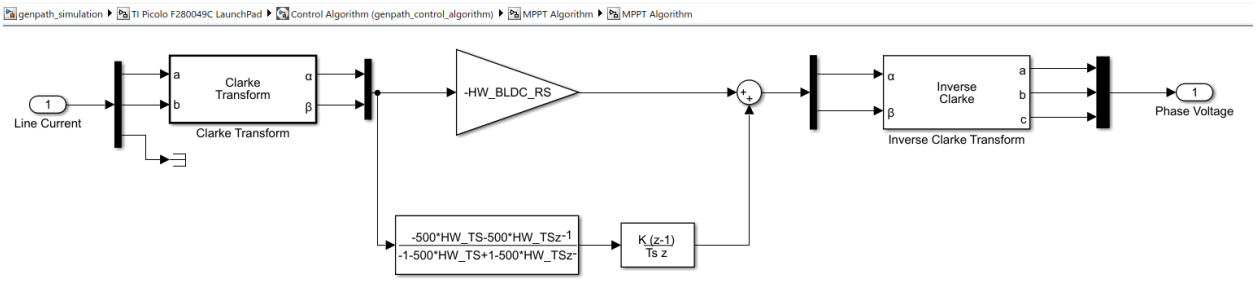
6.2.1 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูป 63: ชั้นที่ 4: Variant Model ของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

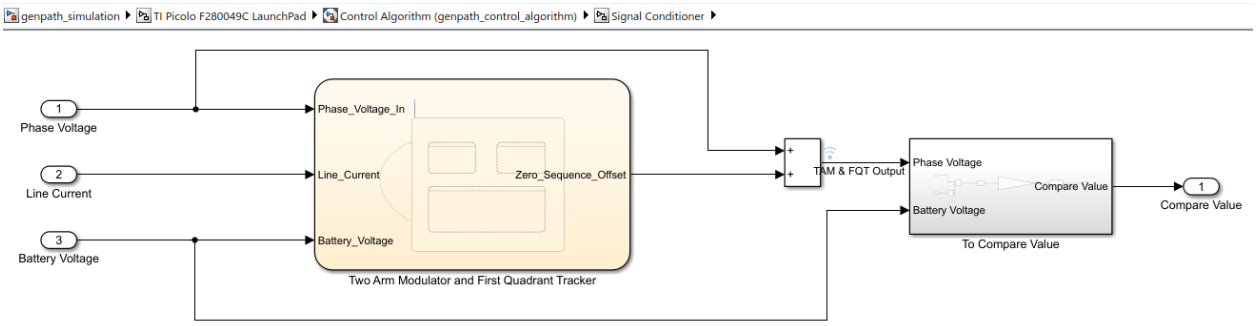


รูป 64: ชั้นที่ 5: ภายใน Variant Model ของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่สร้างสัญญาณคำสั่งแบบไซน์

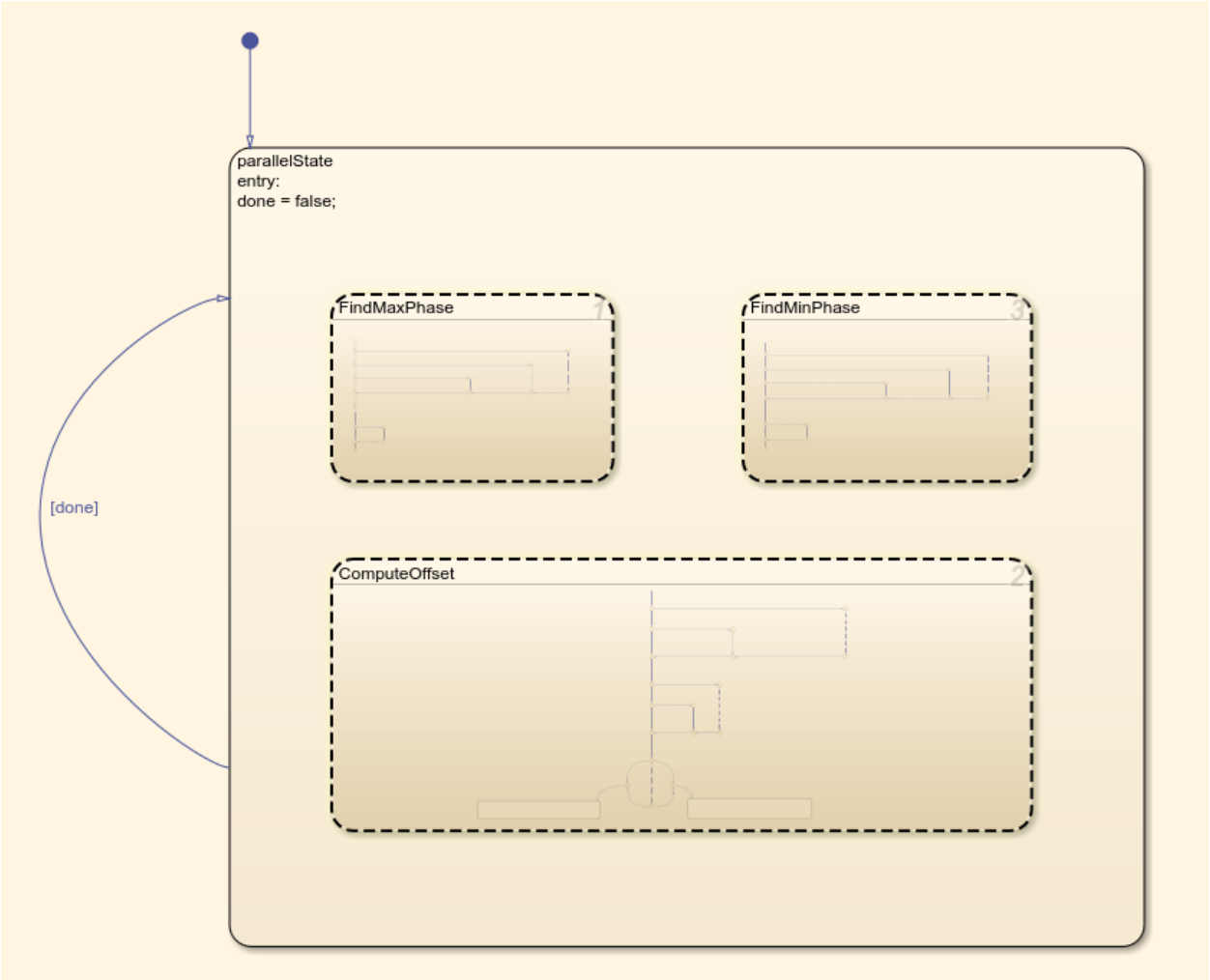


รูป 65: ชั้นที่ 5: อัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

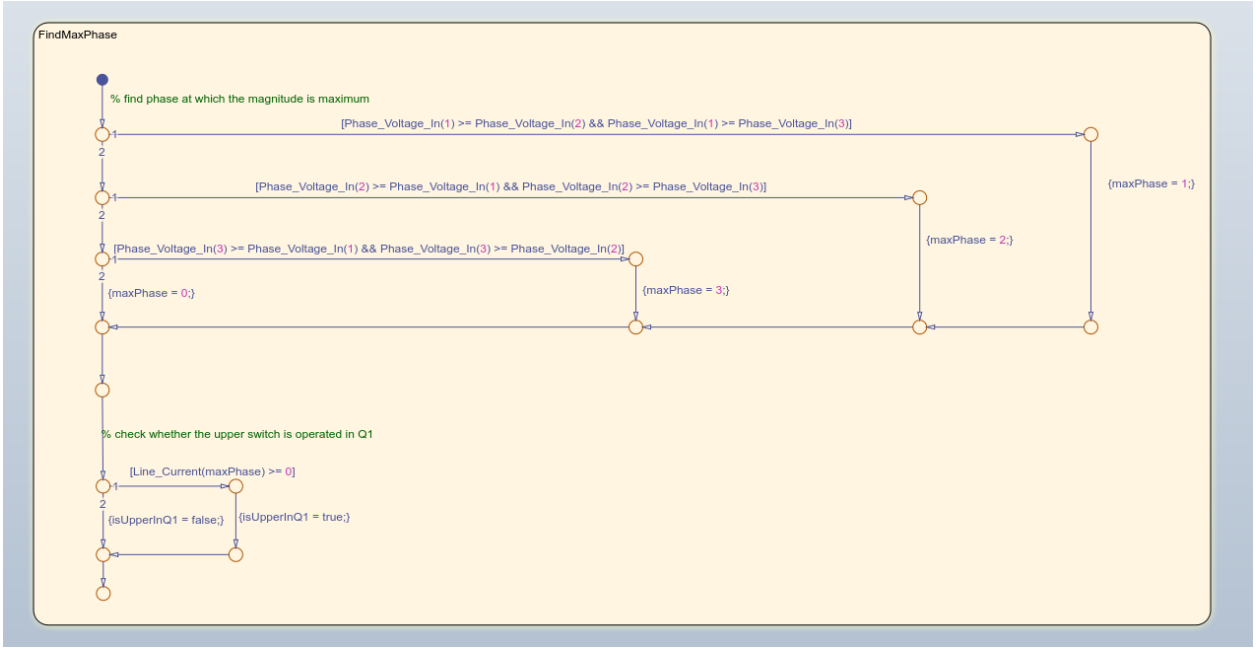
6.2.2 Simulink Model ในส่วนของการปรับปรุงสัญญาณ



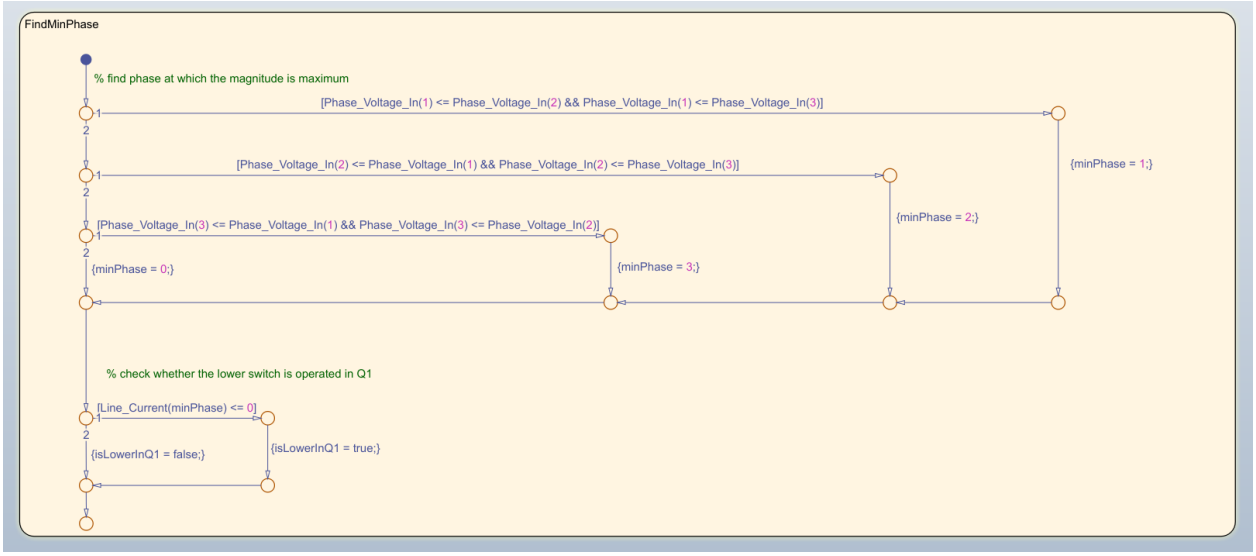
รูป 66: ชั้นที่ 4: ภายใน Subsystem ของระบบปรับปรุงสัญญาณ



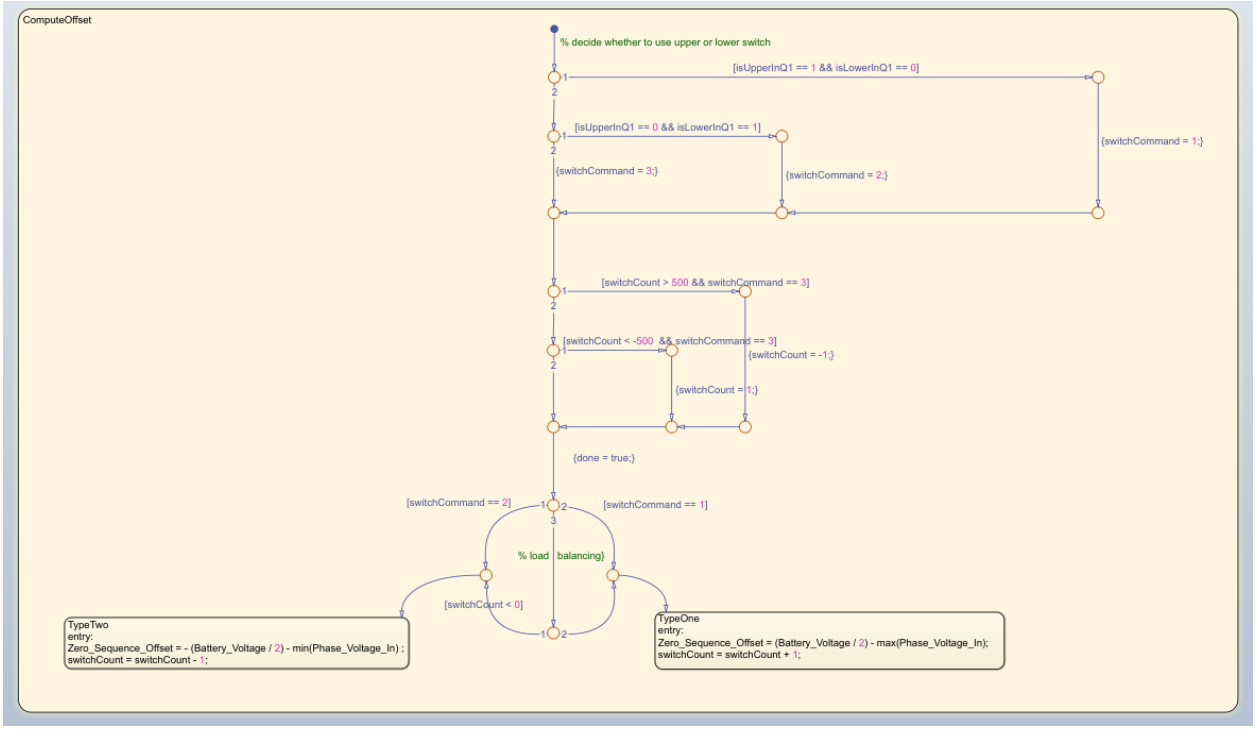
รูป 67: ชั้นที่ 5: ภายใน Stateflow chart ของตัวมอดูเลตแบบสองแขน และติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง



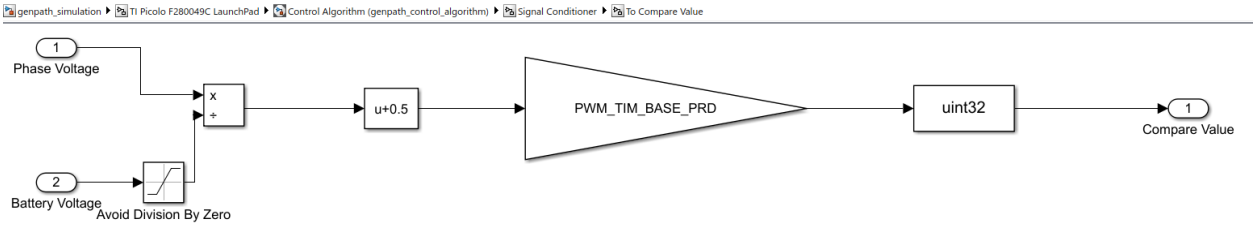
รูป 68: ชั้นที่ 6: ภายใน Subchart ที่ใช้ในการหาเฟสที่มีแรงดันคำสั่งมากที่สุด



รูป 69: ชั้นที่ 6: ภายใน Subchart ที่ใช้ในการหาเฟสที่มีแรงดันคำสั่งน้อยที่สุด

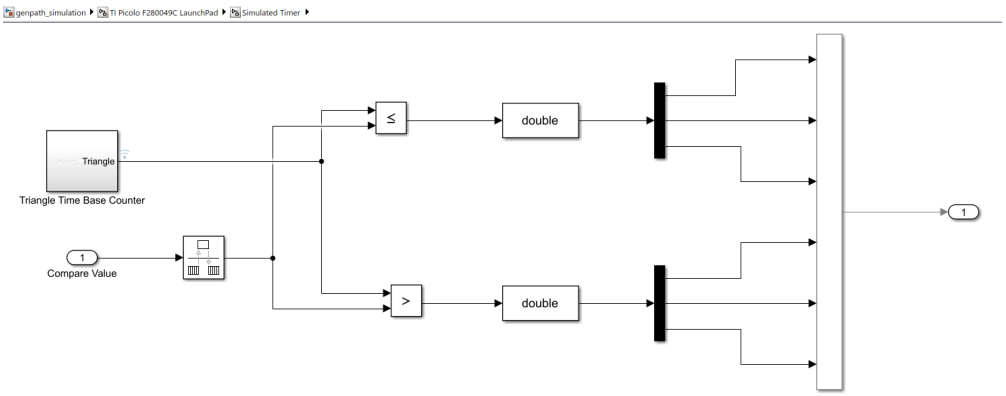


รูป 70: ชั้นที่ 6: ภายใน Subchart ที่ใช้ในการคำนวนแรงดันลำดับศูนย์



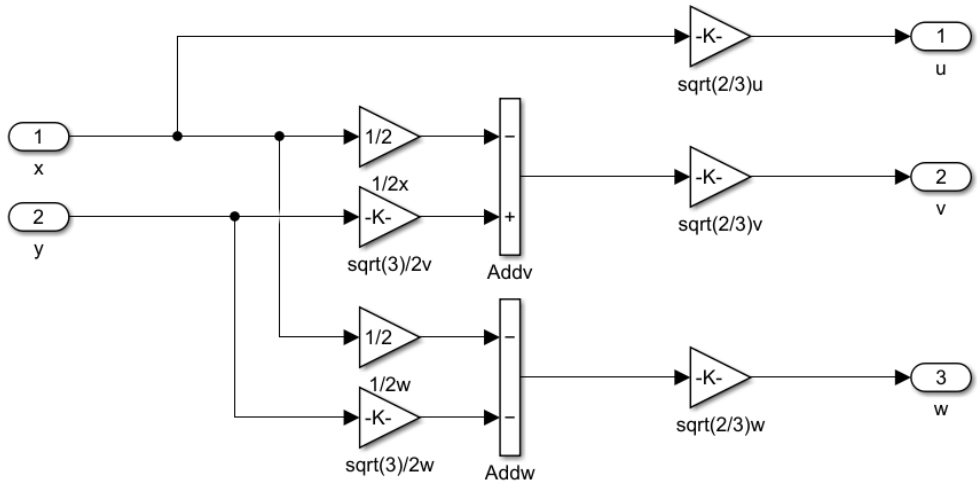
รูป 71: ชั้นที่ 5: ส่วนของการสเกลแรงดันคำสั่งให้เป็นค่าที่ป้อนให้ตัวตั้งเวลาของระบบฝังตัว

6.2.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองอุปกรณ์รอบข้างของระบบฝังตัว

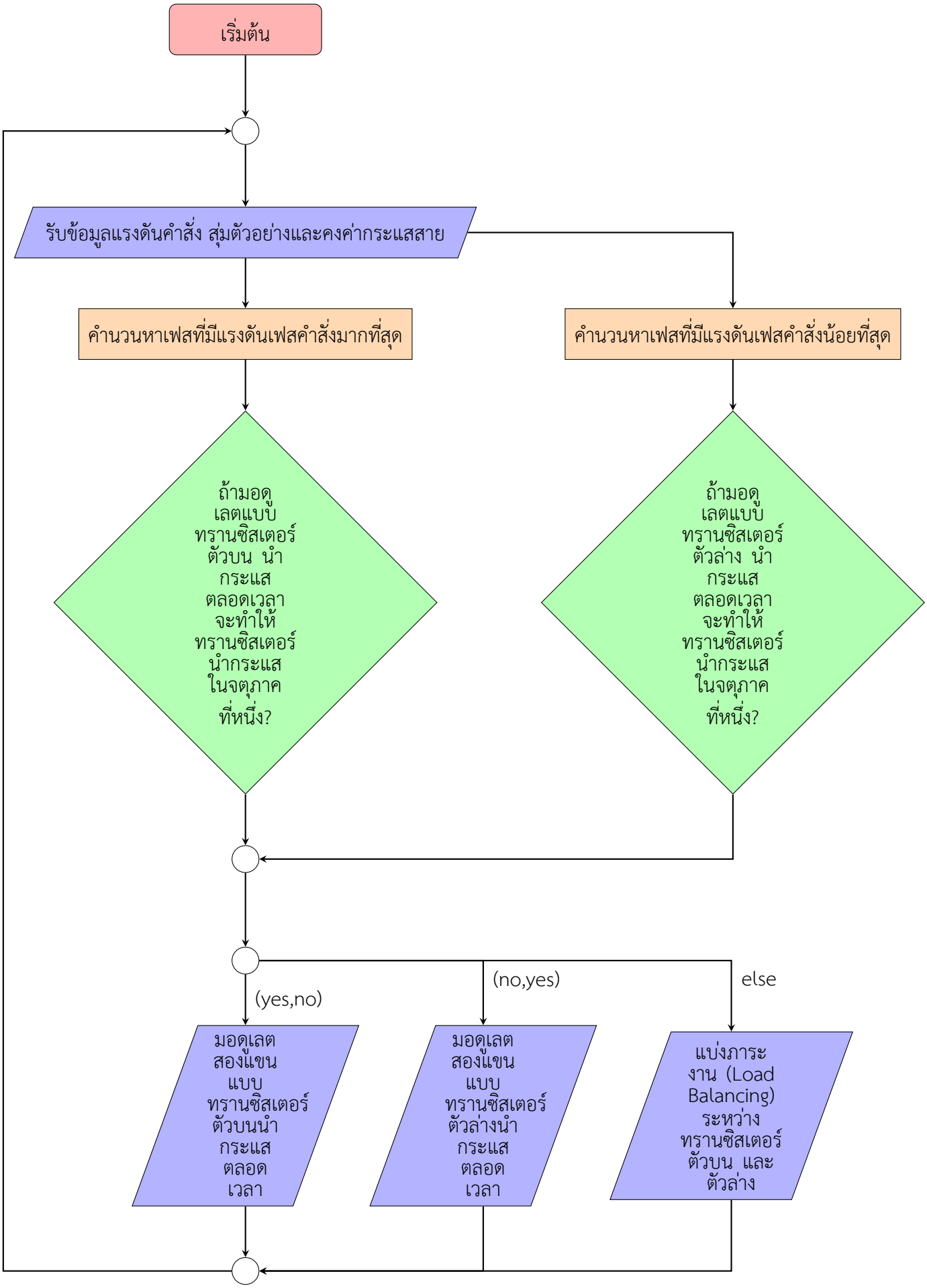


รูป 72: ชั้นที่ 3: การจำลองตัวตั้งเวลาของระบบฝังตัว

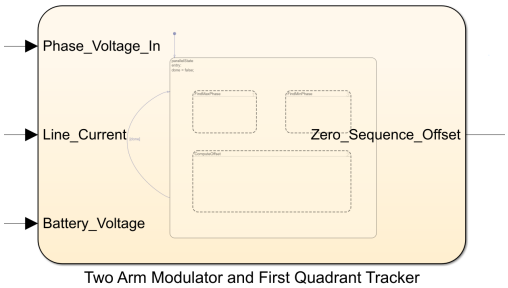
6.3 Simulink model ของการแปลงผกผันของคลาก(Inverse Clarke's Transformation)



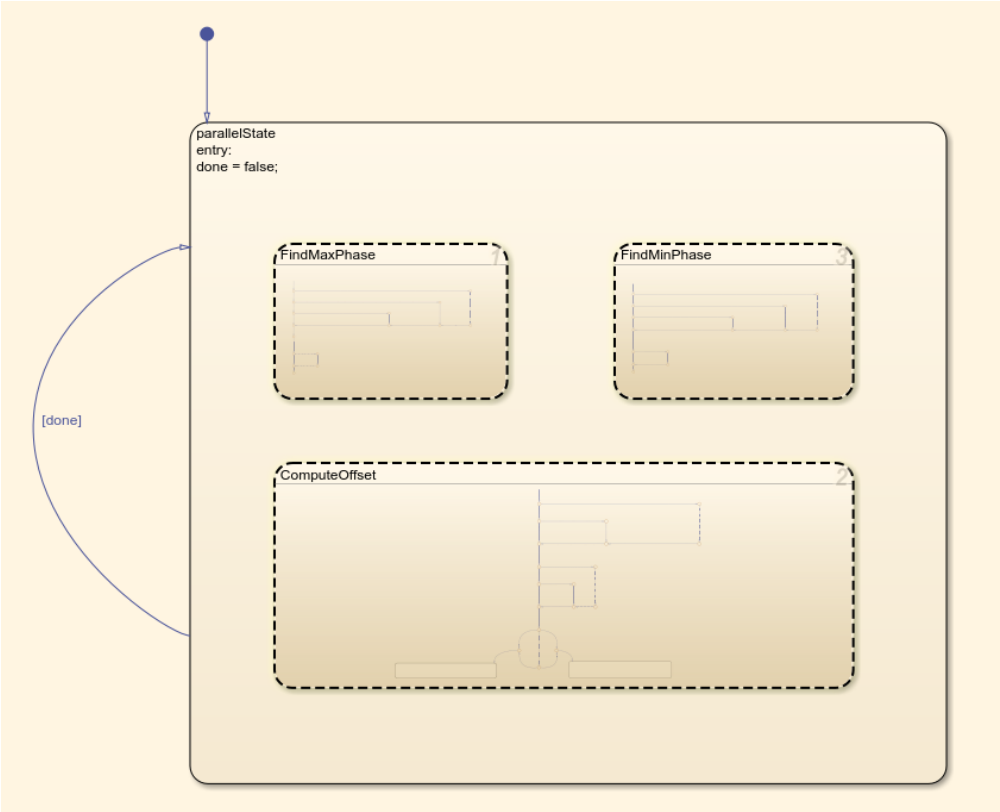
รูป 73: การแปลงผกผันของคลาก(Inverse Clarke's Transformation)



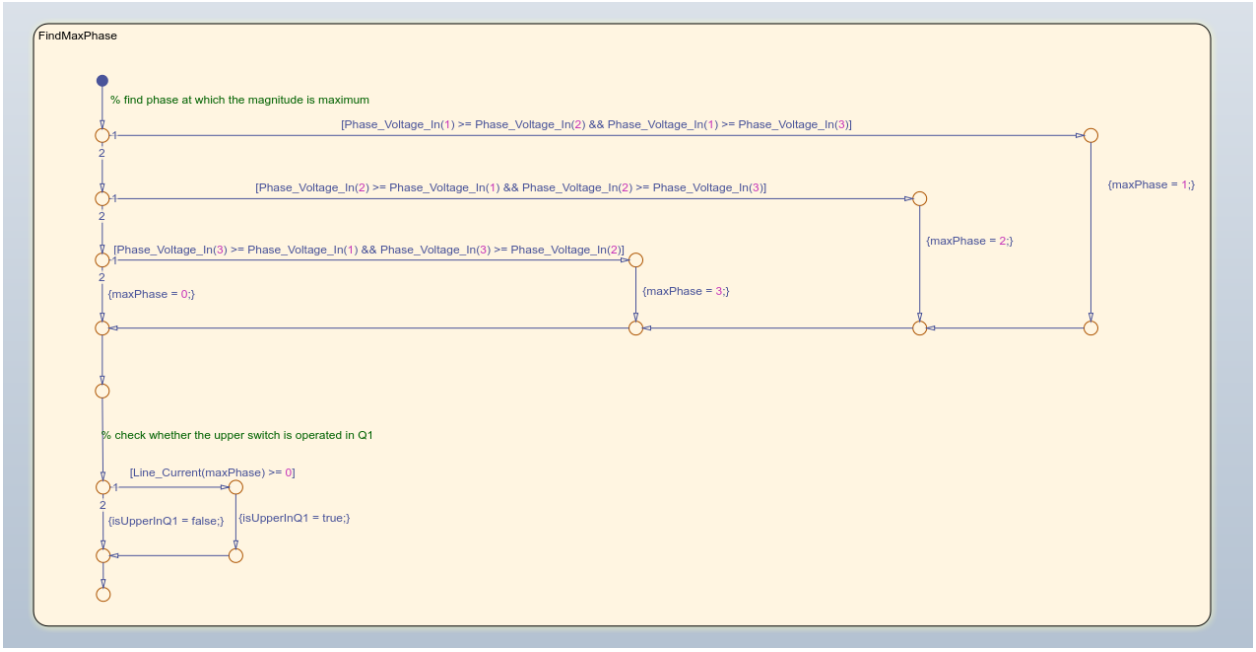
รูป 13: ผังงานของอัลกอริทึมในการคำนวณแรงดันลำดับศูนย์เพื่อติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่งของสวิตช์ที่ถูกมอดูเลตแบบสองแขน



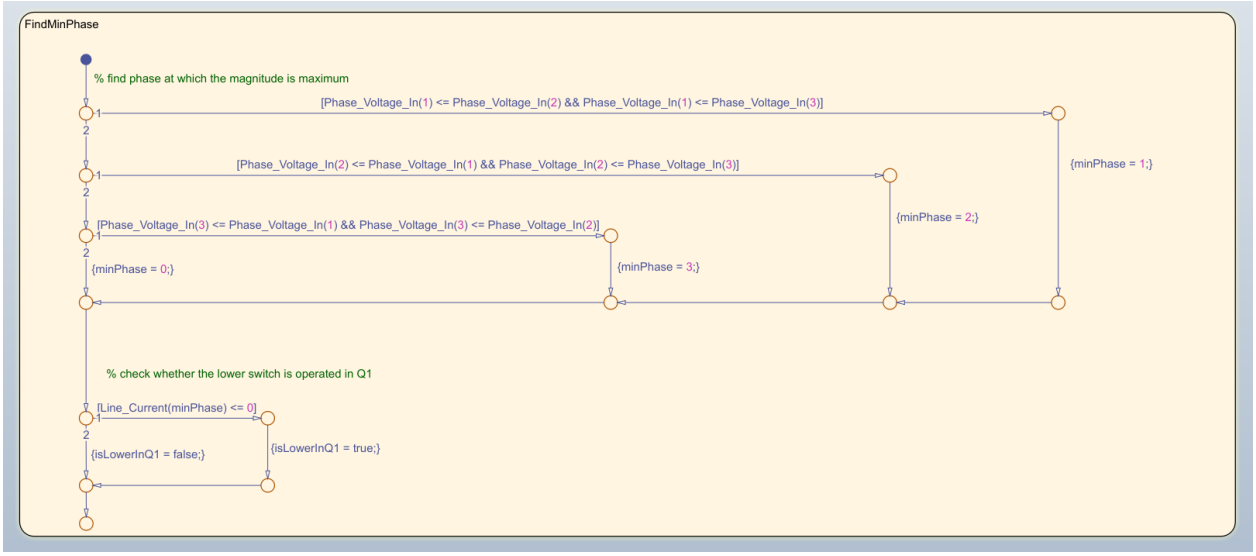
รูป 14: บล็อก Stateflow ของอัลกอริทึมในการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง



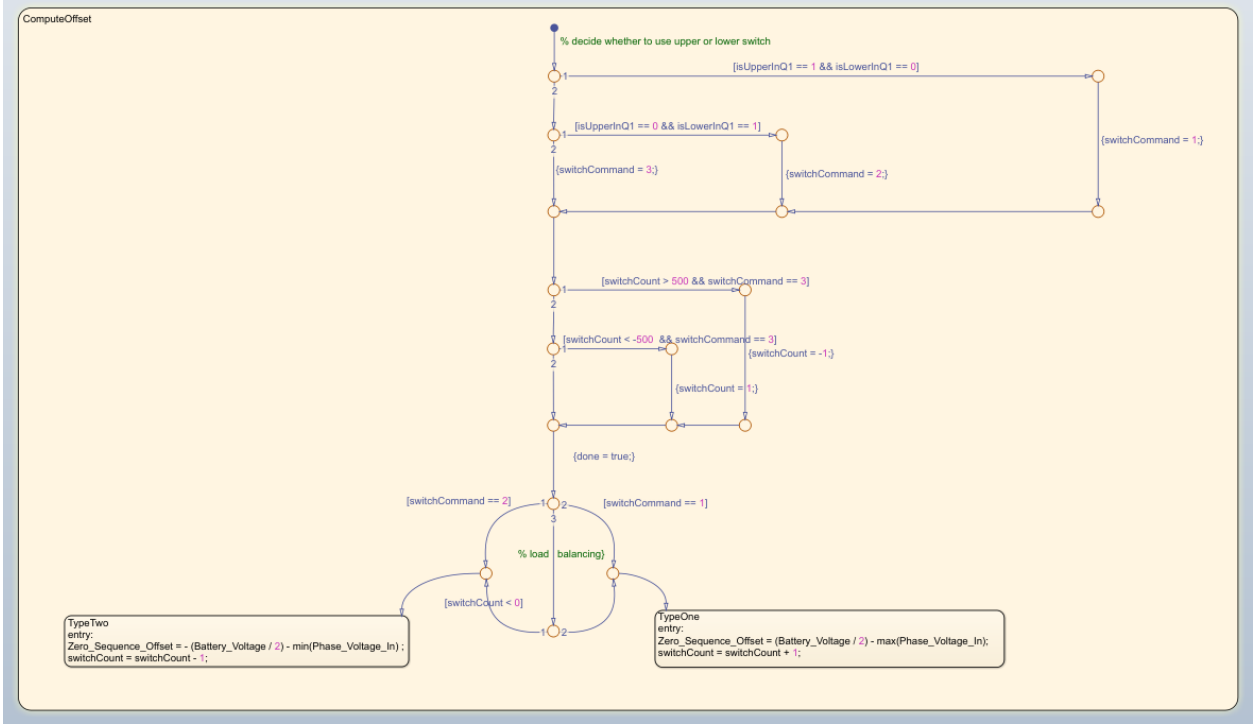
รูป 15: ภาพรวมของ Stateflow chart ของอัลกอริทึมในการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง



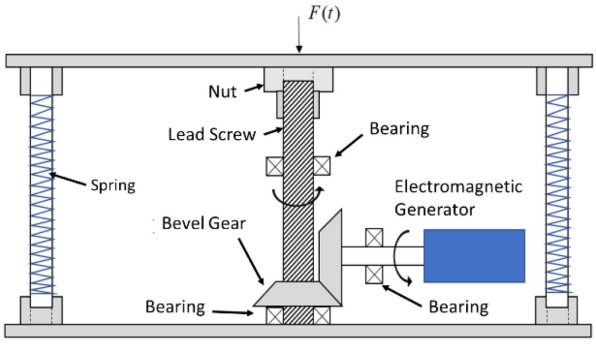
รูป 16: Subchart ในส่วนของการหาเฟสที่มีแรงดันคำสั่งมากที่สุด



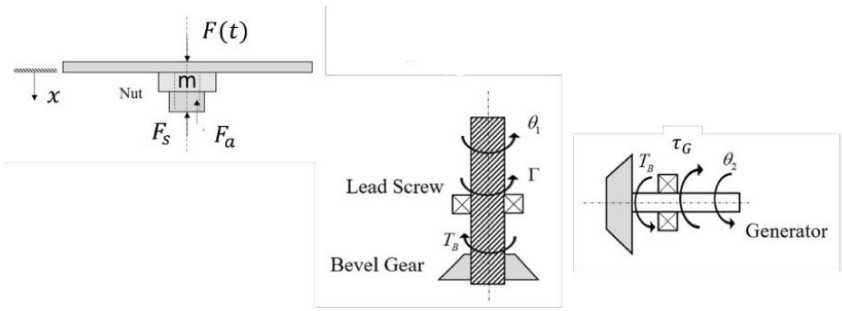
รูป 17: Subchart ในส่วนของการหาเฟสที่มีแรงดันคำสั่งน้อยที่สุด



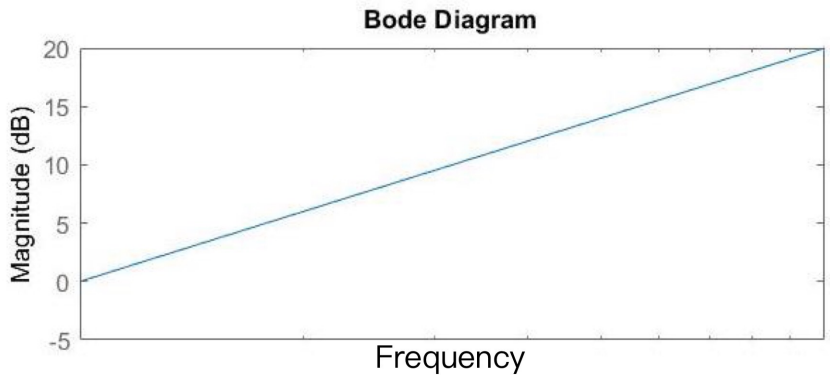
รูป 18: Subchart ในส่วนของการคำนวนแรงดันลำดับศูนย์



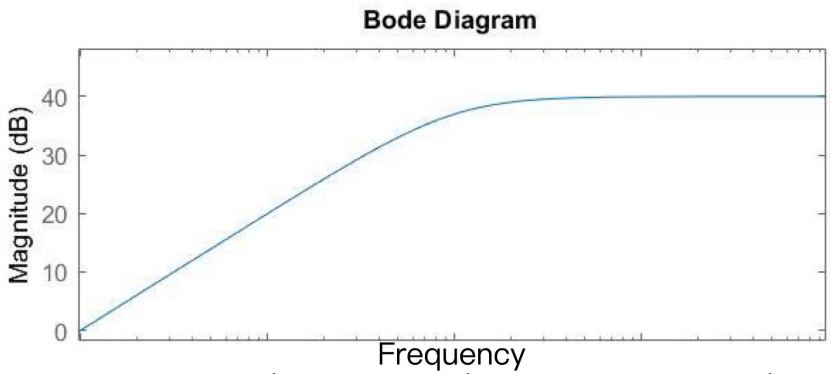
รูป 19: กลไกเกลียวนำ(lead screw) ภายใต้แผ่นเก็บพลังงาน[2]



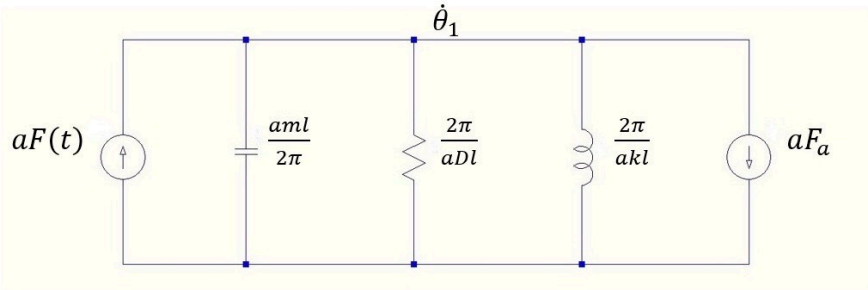
รูป 20: แผนภาพของวัตถุของ lead screw



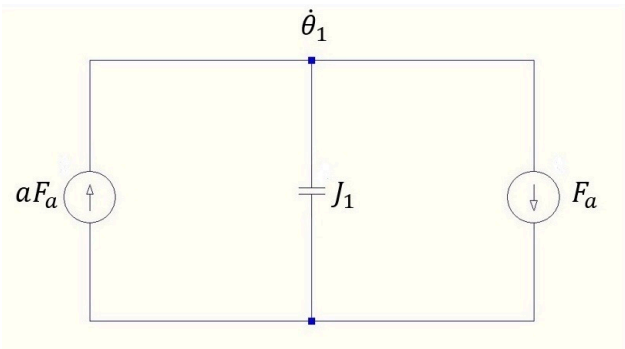
รูป 22: กราฟผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวอนุพันธ์



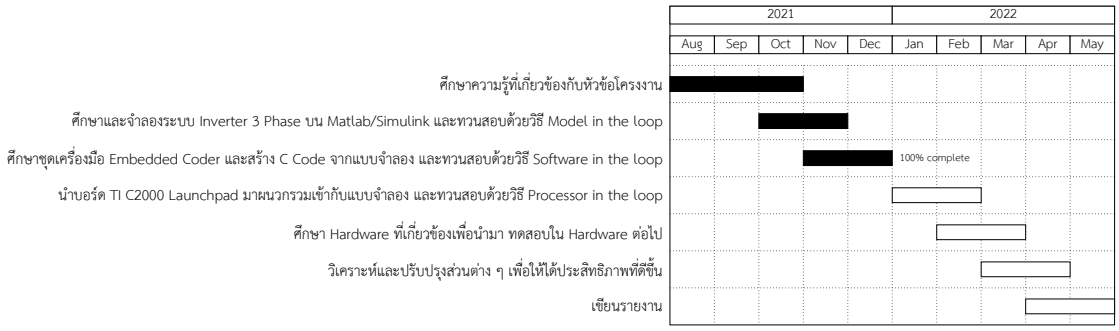
รูป 23: กราฟผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวอนุพันธ์ซึ่งถูกจำกัดขอบเขตโดยตัวปฏิยานุพันธ์



รูป 34: วงจรไฟฟ้าของการเลื่อนที่ของแป้นเกลียว(nut)



รูป 35: วงจรไฟฟ้าของการเคลื่อนที่เชิงหมุนของเกลียวนำ(lead screw)



รูป 48: Gantt chart ของนายณัฐพล กาบแก้ว