

ข้อเสนอโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า วิชา 2102490

อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานชนิดเครื่องจักรกลไฟฟ้า

Power Electronics for Electromechanical Energy-Harvesting System

นายณัฐพล กابแก้ว เลขประจำตัว 6130176521

นายสันติ วงศ์ว่องประเสริฐ เลขประจำตัว 6130553421

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกุhin

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

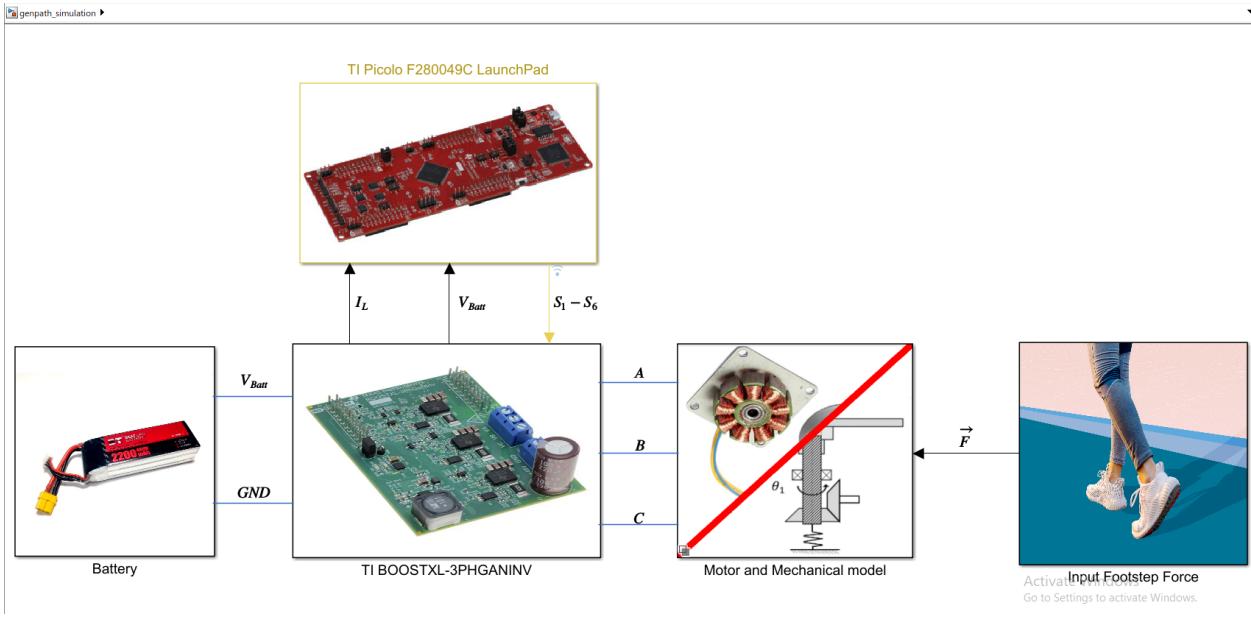
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

สารบัญ

1 บทนำ	1
1.1 บทคัดย่อ	1
1.2 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.4 ขอบเขตของโครงการ	3
1.5 ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากโครงการ	3
2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการmodุเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง (Two Arm Modulation and First Quadrant Tracking Algorithm)	3
2.1.1 การmodุเลตความกว้างพัลส์แบบใช้สัญญาณพาหะ และ อินเวอร์เตอร์โหมดแรงดันแบบสามเฟส	3
2.1.2 กำลังสูญเสียในสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์	4
2.1.3 การนำกระแสในจตุภาคที่ 3 ของทรานซิสเตอร์สามไไฟฟ้าแกลเลียม ในไตรท์	6
2.1.4 การลดกำลังสูญเสียในการmodุเลตแบบใช้สัญญาณพาหะ ด้วยการmodุเลตแบบสองแขน	8
2.1.5 การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการmodุเลตแบบสองแขนด้วยการติดตามการทำงานในจตุภาคที่ 1	8
2.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking Algorithm; MPPT)	12
2.2.1 ข้อมูลรายละเอียดและหลักการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน	12
2.2.2 การเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า (Electrical analogy)	13
2.2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสนิดแม่เหล็กการ	14
2.2.4 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับการติดตามจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking) สำหรับวงจร ก๊อกเก็บพลังงาน	15
3 ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น	17
3.1 การทดสอบอัลกอริทึมการmodุเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง	17
3.1.1 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับความถี่คำสั่งของอินเวอร์เตอร์	18
3.1.2 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับค่าความหนี้น้ำของไฟLED	20
3.1.3 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับค่าขนาดของแรงดันคำสั่งของอินเวอร์เตอร์	21
3.2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสนิดแม่เหล็กการ	23
3.3 ผลการจำลองของแบบจำลองทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสนิดแม่เหล็กไฟฟ้า บนโปรแกรม MATLAB/Simulink	26
4 บทสรุป	31
4.1 สรุปผลการดำเนินการ	31
4.1.1 การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการmodุเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงาน ในจตุภาคที่หนึ่ง	31
4.1.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด	31
4.2 แผนการดำเนินงาน	31
5 เอกสารอ้างอิง	32
6 ภาคผนวก	33
6.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบพลวัตของระบบ	33
6.1.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแบบเตอร์เรี่	33
6.1.2 Simulink Model ในส่วนของการจำลองบอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI BOOSTXL-3PHGANINV	34
6.1.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบเชิงกลและมอเตอร์ซิงโครนัสนิดแม่เหล็กการ	35
6.1.4 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแรงที่ท้าเหยียบแผ่นพื้น	36
6.2 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมที่ทำงานบนระบบฝังตัว TI Picolo F280049C LaunchPad	36
6.2.1 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด	37
6.2.2 Simulink Model ในส่วนของการปรับปรุงสัญญาณ	38

6.2.3	Simulink Model ในส่วนของการจำลองอุปกรณ์รอบข้างของระบบฟังตัว	41
6.3	Simulink model ของการแปลงผกผันของคลาค(Iverse Clarke's Transformation)	42



รูป 1: ภาพรวมของระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานที่ถูกสร้างในรายงานฉบับนี้

1 บทนำ

1.1 บทคัดย่อ

แผ่นพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยมีความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานต่ำได้ โครงการนี้มีจุดประสงค์ในการพัฒนาแผ่นพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้าง ประเภทแม่เหล็กการ (Permanent Magnet Synchronous Motor; PMSM) โดยใช้โปรแกรม MATLAB™/Simulink™ โดยโปรแกรม จะช่วยในการทดสอบ (Test) ทวนสอบ (Verify) ออกแบบให้ได้ผลดีที่สุด (Optimize design) และใช้โปรแกรมในการสร้างโค้ดภาษาซี และซีพีลัสดิลัส ที่ถูกออกแบบสำหรับระบบฝังตัว (Generate C/C++ Code Optimized for Embedded Systems) จากแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ และใช้เทคนิคในการลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ คืออัลกอริทึมในการ modulation แบบสองแขน (Two Arm Modulation Algorithm) และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง (First Quadrant Tracking Algorithm) และได้เพิ่มประสิทธิภาพของระบบโดยรวมด้วยการนำอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking Algorithm; MPPT))

1.2 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

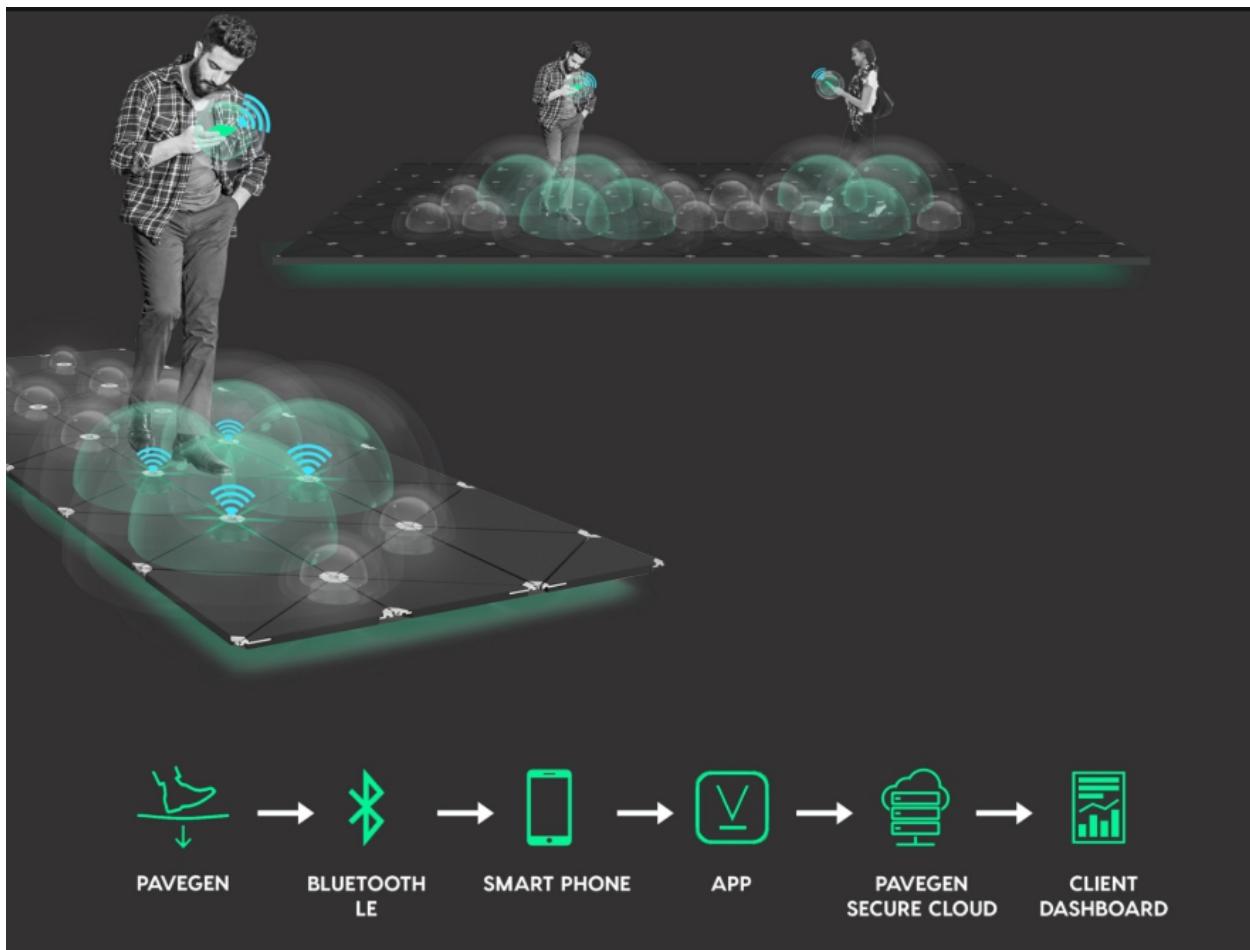
การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวของมนุษย์นั้น เป็นเรื่องที่น่าสนใจ สามารถนำมาทำให้เกิดขึ้นจริงได้ เช่นในกรณีของแผ่นพื้นเก็บพลังงานนั้น ได้ถูกนำมาสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถสร้างรายได้ และได้มีการติดตั้งใช้งานแล้วในหลาย ๆ ที่ เช่นกรณีตัวอย่างของ Pavegen™ Pavegen™ เป็นบริษัท Startup ที่สร้างแผ่นพื้นเก็บพลังงาน เพื่อที่จะจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ขนาดเล็ก เช่น เชนเชอร์ต่างๆ ที่เชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things; IoT) หรืออุปกรณ์ส่องสว่างประเภทหลอด LED หรือก้าบเก็บพลังงานไว้ในแบตเตอรี่

จากค้นคว้าจากการศึกษาในครั้งก่อนๆ [1] [2] ได้ค้นพบว่า พลังงานที่ได้ในแต่ละการเหยียบแต่ละครั้งนั้น มีค่าน้อยมาก นั่นคือประมาณ 1-5 จูล เท่านั้น ดังนั้น ห้ามในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากระบบทดึงกล้าม คือการมีประสิทธิภาพที่ดี จึงจะสามารถเก็บพลังงานได้เพียงพอ กับการใช้งานต่อไป ดังนั้น การศึกษาในโครงการนี้ จึงได้มุ่งเน้นในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบเก็บพลังงานเป็นหลัก

จากโครงการปี 2563 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ได้เป็นค่าสูงสุด โดยจากการทดสอบมีค่าประมาณ หนึ่งในสี่ ของพลังงาน ขาดเข้าที่มาจากการแรงเหยียบของมนุษย์ และไม่ได้มีการลดการกำลังสูญเสียของวงจรแปลงผัน โครงการปี 2564 นี้ มีการพัฒนาการออกแบบทางไฟฟ้าและทางกลเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน โดยมี 2 ส่วน คือ

1. สร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กการ เพื่อทราบเงื่อนไขของแรงต้านของการเดิน

2. การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการ modulation แบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง



รูป 2: โปสเตอร์ของ Pavegen™



รูป 3: สถานที่ที่ได้มีการติดตั้ง Pavegen™

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสร้างแบบจำลองพลวัตของระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยโปรแกรม MATLABTM/SimulinkTM เพื่อตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้ก่อนนำไปใช้กับอุปกรณ์จริง
- เพื่อหาแนวทางในการลดพลังงานสูญเสียในระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างประเภทแม่เหล็กการ ริทึมในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน
- เพื่อสร้างต้นแบบอุปกรณ์แผ่นพื้นเก็บพลังงาน ที่สามารถใช้งานได้จริง

1.4 ขอบเขตของโครงการ

- โครงการฉบับนี้จะใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กการ เป็นตัวดำเนินไฟฟ้า
- โครงการฉบับนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ TITM F280049C ที่อยู่บนชุดทดลอง PicoloTM LaunchPadTM เป็นระบบฝังตัวแกนกลาง ในคำนวนอัลกอริทึมต่างๆ
- โครงการฉบับนี้จะใช้บอร์ดอินเวอร์เตอร์ TITM BOOSTXL-3PHGaNINV เป็นสวิตช์สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์
- โครงการฉบับนี้จะโปรแกรมระบบฝังตัวดังกล่าวผ่านการสร้างโค้ดบนแพลตฟอร์ม SimulinkTM Embedded CoderTM

1.5 ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากโครงการ

- แผ่นพื้นเก็บพลังงานต้นแบบที่มีประสิทธิภาพสูง และสามารถใช้งานได้จริง
- อัลกอริทึมในการลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ที่สามารถนำไปใช้กับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และยังสามารถนำไปใช้กับอินเวอร์เตอร์ใดๆ นอกเหนือจากระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานได้อีกด้วย
- อัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงาน ที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่สามารถนำไปใช้กับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการmodดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาค ที่หนึ่ง (Two Arm Modulation and First Quadrant Tracking Algorithm)

2.1.1 การmodดูเลตความกว้างพัลส์แบบใช้สัญญาณพาหะ และ อินเวอร์เตอร์ใหม่ด้วยต้นแบบสามเฟส

ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยทั่วไปนั้นอาศัยการสร้างสนามแม่เหล็กหมุน มาแทนที่ยาน้ำให้เกิดแรงบิด ซึ่งในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างแบบแม่เหล็กการนั้นอาศัยการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ อินเวอร์เตอร์ จึงเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อ ระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างแบบแม่เหล็กการด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ในโครงการฉบับนี้ได้นำเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างแบบแม่เหล็กการสามเฟส มาเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน โดยจะเก็บพลังงานที่ผลิตได้ไว้กับแบตเตอรี่ ในโครงการฉบับนี้ จึงเลือกใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีพอโลไดต์ตั้งรูปที่ 4

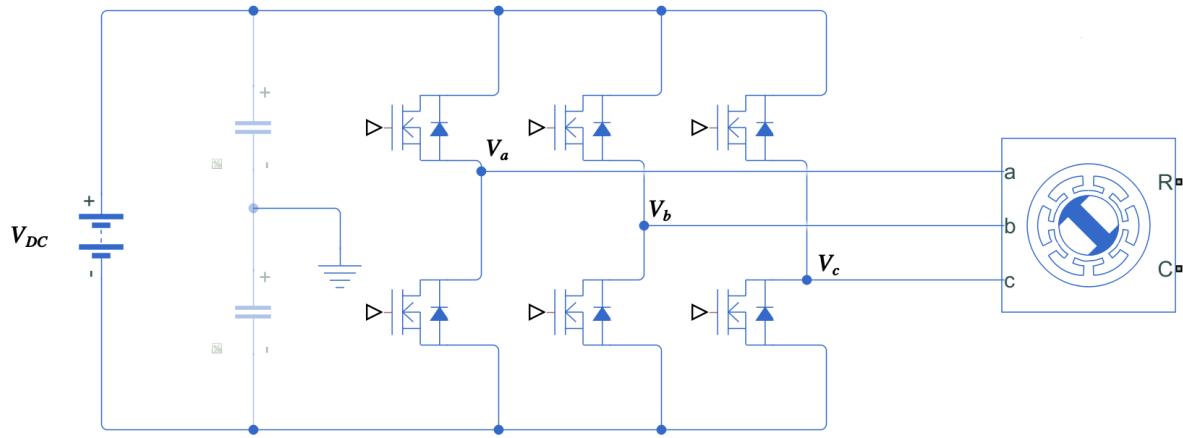
อินเวอร์เตอร์ที่พอลอยีที่ได้นำเสนอมาข้างต้น สามารถสร้างแรงดันออกที่แตกต่างกันได้เพียงแค่ 2 ค่าเท่านั้นคือ

$$V_t = \begin{cases} V_{DC}, & \text{ถ้าสวิตช์ตัวบนเปิด และสวิตช์ตัวล่างเปิด} \\ 0, & \text{ถ้าสวิตช์ตัวบนเปิด และสวิตช์ตัวล่างเปิด} \end{cases} \quad (1)$$

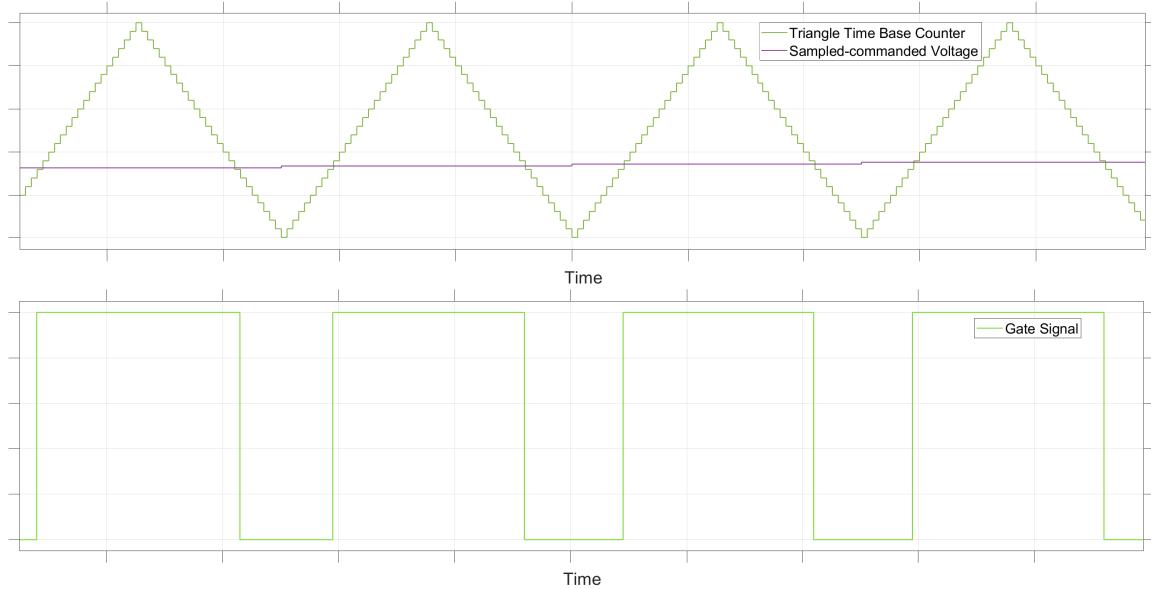
โดยที่ V_t เป็นแรงดันที่ข้ออกของอินเวอร์เตอร์ และถ้าหากพิจารณาให้กึ่งกลางบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นจุดอ้างอิงแรงดัน จะได้ว่า

$$V_{t0} = \begin{cases} V_{DC}/2, & \text{ถ้าสวิตช์ตัวบนเปิด และสวิตช์ตัวล่างเปิด} \\ -V_{DC}/2, & \text{ถ้าสวิตช์ตัวบนเปิด และสวิตช์ตัวล่างเปิด} \end{cases} \quad (2)$$

เนื่องจากการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างสามเฟสประเภทแม่เหล็กการนั้น จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับคลื่นรูปไข่ ดังนั้น เทคนิคการmodดูเลตความกว้างพัลส์โดยใช้สัญญาณพาหะ (Carrier-based Pulse Width Modulation) จึงได้ถูกนำมาใช้ โดยการmodดูเลต ความกว้างพัลส์โดยใช้สัญญาณพาหะมีหลักการในการทำงานคือ นำสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยม มาเปรียบเทียบกับสัญญาณคำสั่ง โดยผลลัพธ์



รูป 4: ทอโพโลยีของอินเวอร์เตอร์สามเฟส



รูป 5: การ模ดูแลตความกว้างพัลส์โดยใช้สัญญาณพาหะ

ของการเปรียบเทียบนั้น จะได้เป็นสัญญาณขั้บนำของสวิตช์ ดังรูปที่ 5 ซึ่งจะส่งผลให้ แรงดันที่ข้าวของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับแรงดันคำสั่ง

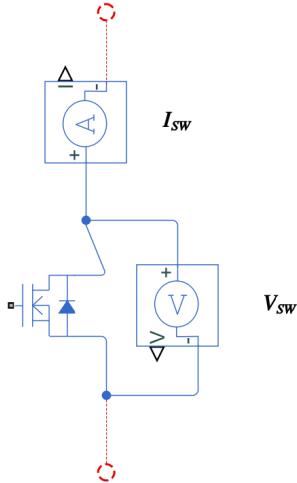
จากรูปข้างต้น จะเห็นได้ว่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณขั้บนำนั้น เปลี่ยนไปตามขนาดของสัญญาณคำสั่ง และสัญญาณที่จะนำมาเปรียบเทียบนั้น จะเป็นสัญญาณที่ถูกสุ่มตัวอย่างแล้วคงค่า (Sample and Hold) เพราะว่า อัลกอริทึมการ模ดูแลตที่เลือกใช้ในโครงการฉบับนี้นั้น เป็นการคำนวนระบบฟังตัว ซึ่งเป็นการประมวลผลในโดเมนดิจิทัล

2.1.2 กำลังสูญเสียในสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

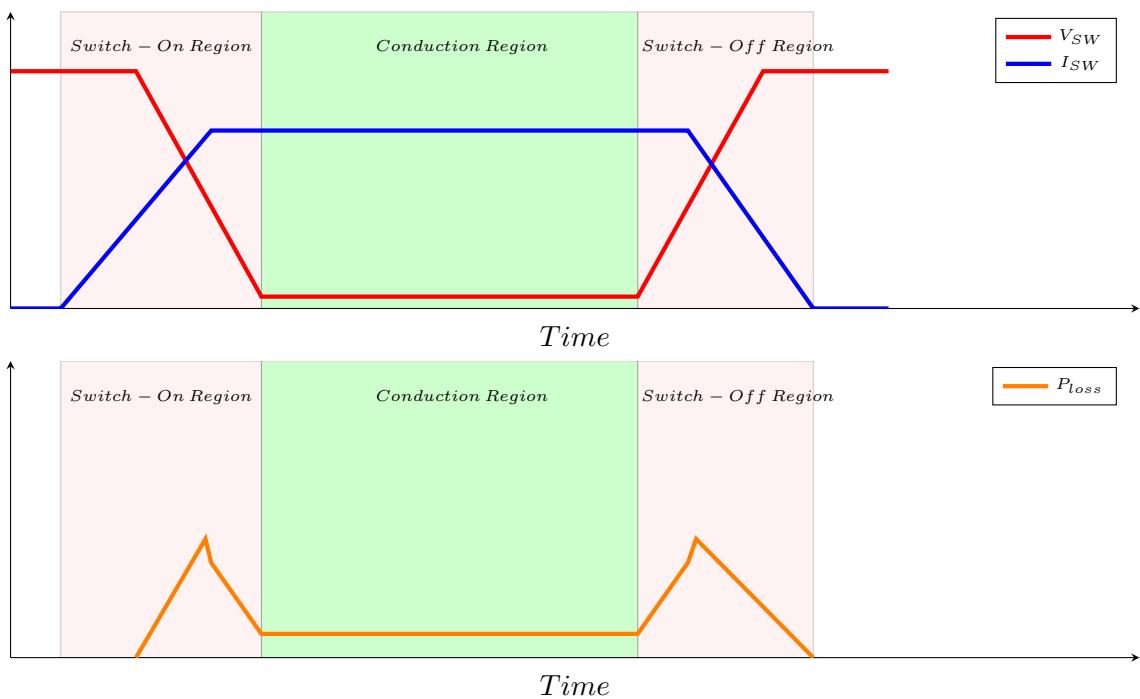
กำลังสูญเสียในสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์มีอยู่ด้วยกันสองประเภท คือ กำลังสูญเสียระหว่างสวิตช์ (Switching Loss) และ กำลังสูญเสียระหว่างนำกระแส (Conduction Loss)

$$P_{loss} = P_{sw} + P_{cond} \quad (3)$$

จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่า ในขณะที่กำลังเปิดสวิตช์ กระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์จะเหลือมกัน ซึ่งเกิดจากโครงสร้างทางกายภาพของ



รูป 6: นิยามของ V_{SW} , I_{SW}



รูป 7: แรงดันต่อกคร่อมสวิตช์ กระแสของสวิตช์ และกำลังสูญเสียในสวิตช์

ทราบซีสเตอร์ จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในขณะสวิตช์ ซึ่งจะคำนวณได้จาก

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

แต่เมื่อพอสวิตช์เปิดเต็มที่แล้ว สวิตช์จะมีแรงดันต่อกคร่อมอยู่เล็กน้อย ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในขณะนำกระแส

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

เมื่อ $v_{sw(on)}$, $i_{sw(on)}$ คือแรงดันต่อกคร่อมสวิตช์ และกระแสที่ไฟผ่านสวิตช์ในขณะนำกระแส ตามลำดับ

กำลังสูญเสียระหว่างสวิตช์นั้น ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะสมบัติของสวิตช์ที่เลือกใช้ และจำนวนครั้งในการสวิตช์ นั้นคือ ถ้าหากสวิตช์ที่เลือกใช้มีคุณลักษณะสมบัติที่ทำให้อยู่ในย่านกำลังสวิตช์นาน หรือมีจำนวนครั้งในการสวิตช์มาก ก็จะทำให้กำลังสูญเสียขณะสวิตช์สูงตามไปด้วย

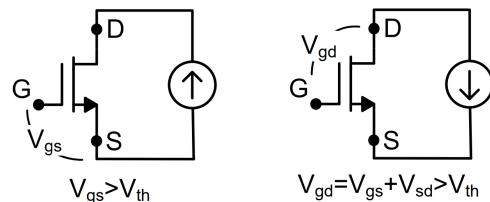
กำลังสูญเสียขณะนำกระแสนั้น ขึ้นอยู่กับว่าในขณะนำกระแสนั้นมีแรงดันต่อกคร่อมสวิตช์มากแค่ไหน ถ้าหากแรงดันต่อกคร่อมสวิตช์มาก ก็จะทำให้กำลังสูญเสียขณะนำกระแสมากขึ้นตามมา

2.1.3 การนำกระแสในจตุภาคที่ 3 ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแกลเลียม ในไตรท์

ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแกลเลียม ในไตรท์ หรือ แกน (Gallium Nitride; GaN) ถือเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับผู้ออกแบบในงานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพราะว่าทรานซิสเตอร์แกน มีข้อดีกว่าทรานซิสเตอร์แบบชิลิค่อนในหลายด้านคือ การไม่มีเบื้องต้นของ reverse recovery loss ในบอดีไดโอด ซึ่งได้ปรับนี้ทำให้ทรานซิสเตอร์แบบแกนมีการกำลังสูงเสียในขณะสวิตช์น้อยกว่าแบบดั้งเดิม ทำให้ทำงานได้ที่ความถี่สูงขึ้น ใช้ทรานซิสเตอร์ตัวเล็กลงได้ และความร้อนน้อยลง ซึ่งในโครงการฉบับนี้ได้เลือกใช้ทรานซิสเตอร์แกนเป็นสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์

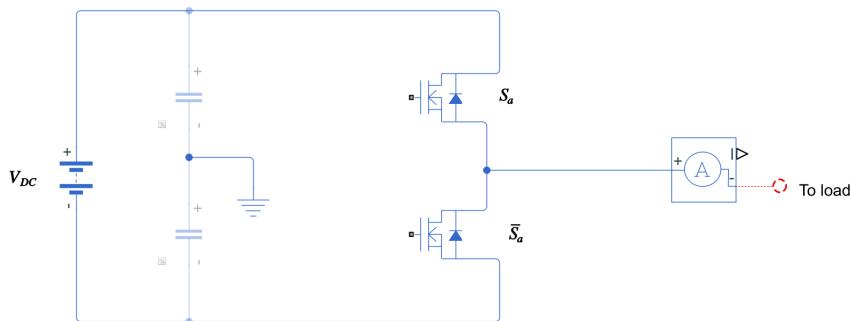
เนื่องจากโครงสร้างที่ไม่เหมือนกันของทรานซิสเตอร์แบบแกน ทำให้การนำกระแสในจตุภาคที่สามของทรานซิสเตอร์แบบแกนนั้นแตกต่างไปจากทรานซิสเตอร์แบบชิลิค่อน [3] คือ การนำกระแสผ่านบอดีไดโอด

เงื่อนไขที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์แกนนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า (Forward) และย้อนกลับ (Reverse) เป็นไปดังรูปที่ 8 คือ



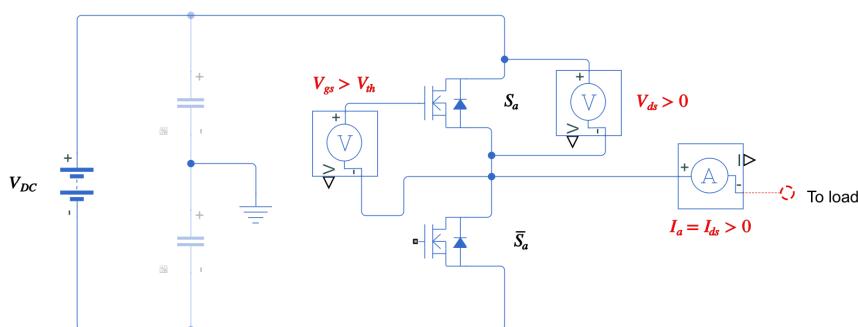
รูป 8: เงื่อนไขที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์แกนนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า และย้อนกลับ

ถ้าหากพิจารณาตัวอย่างที่เกิดขึ้นจริงในอินเวอร์เตอร์เพื่อให้เห็นภาพพจน์ชัดเจนขึ้น ตามรูปวงจรของอินเวอร์เตอร์ ที่ตัดมาพิจารณาเฉพาะหนึ่งเฟส ตามรูปที่ 9



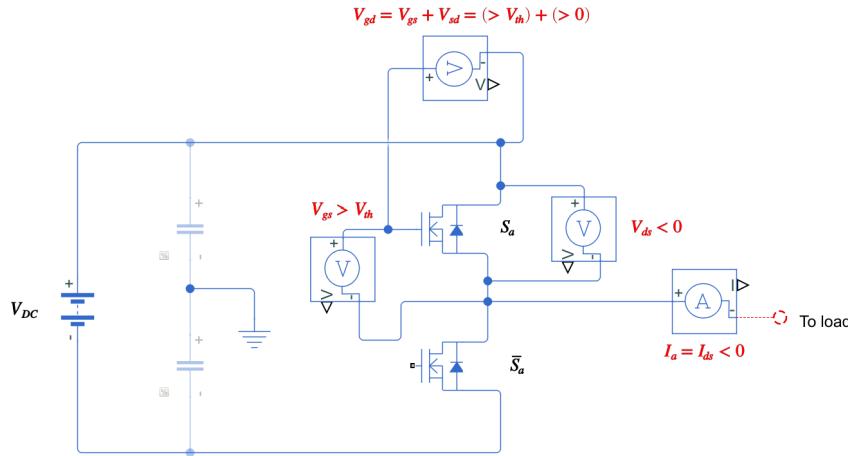
รูป 9: กรณีตัวอย่างการนำกระแสที่เกิดขึ้นจริงในอินเวอร์เตอร์

เรา假定ให้สวิตช์ S_a เป็นสวิตช์ที่เราสนใจ โดยถ้าหากเราขับนำสวิตช์ให้สวิตช์นำกระแส (On) นั่นคือ เราขับนำสัญญาณขา $V_{gs} > V_{th}$ แล้วถ้าหากโหลดที่ต่ออยู่กับขาของสวิตช์ S_a ดึงกระแสออกไปจากอินเวอร์เตอร์ นั่นคือ $I_a > 0$ จะทำให้ แรงดันตกครอมขาเดرنของร่องของสวิตช์ S_a เป็นค่าว่าง นั่นคือ $V_{ds} > 0$ เมื่อจากสวิตช์ S_a กำลังนำกระแสอยู่ ดังนั้นสวิตช์ \bar{S}_a ไม่สามารถนำกระแสพร้อมๆ กับสวิตช์ S_a ได้ เพราะจะลัดวงจร ดังนั้น กระแส I_a ทั้งหมด ก็จะไหลผ่านสวิตช์ S_a ทำให้กระแส $I_{ds} = I_a > 0$ เมื่อจากกระแส $I_{ds} > 0$ 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 ทิศทางการไฟของกระแส นั่นคือ ถ้าหากให้ลดมีการดึงกระแสเข้าอินเวอร์เตอร์ $I_a = I_{sd} > 0$ จะทำให้ แรงดันต่อกคร่อมขาครุณซอร์สของสวิตช์เป็นค่าลบ นั่นคือ $V_{ds} < 0$; $V_{sd} > 0$ เนื่องจาก $V_{gd} = V_{gs} + V_{sd} = (\text{ค่าที่มากกว่า } V_{th}) + \text{ค่าที่เป็นบวก ดังนั้น } V_{gd} > V_{th}$ และ $I_{ds} < 0$ ทำให้สวิตช์นำกระแสเสียย้อนกลับ



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

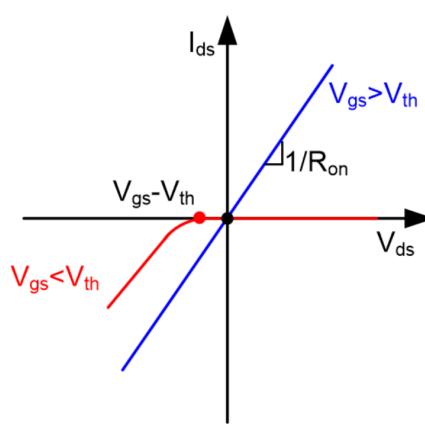
เราจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันขณะนำกระแสไปข้างหน้าได้โดย

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

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

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

ในการนำกระแสเสียย้อนกลับ ข้อมูลต่างๆ จะเป็นทวีลักษณะของข้อมูลในขณะนำกระแสไปข้างหน้าเลยคือ เมื่อแรงดันที่ขาเกตเทียบกับเดรนมากกว่าค่าแรงดันขีดแบ่ง และแรงดันที่ขาซอร์สเทียบกับเดรนเป็นบวก จะทำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแสในจตุภาคที่สาม



รูป 12: พฤติกรรมการนำกระแสในจตุภาคที่หนึ่ง และจตุภาคที่สามของทรานซิสเตอร์แกน

จากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่า แรงดันต่อกคร่อมทรานซิสเตอร์ในจตุภาคที่สาม มากกว่าแรงดันต่อกคร่อมทรานซิสเตอร์ในจตุภาคที่หนึ่งที่ค่ากระแสเท่ากัน ซึ่งทำให้การนำกระแสในจตุภาคที่สามนั้นมีกำลังสูญเสียในขณะนำกระแสมากกว่าการนำกระแสในจตุภาคที่หนึ่ง

2.1.4 การลดกำลังสัญญาณในการมอดูเลตแบบใช้สัญญาณพาหะ ด้วยการมอดูเลตแบบสองแขน

จากที่ได้นำเสนอไปแล้วในส่วนของการมอดูเลตแบบใช้สัญญาณพาหะ ว่า เป็นการมอดูเลตที่มีจำนวนครั้งในการสวิตช์มาก ซึ่งทำให้กำลังสัญญาณในขณะสวิตช์สูง แต่เรามีเทคนิคในการลดกำลังสัญญาณของสวิตช์ในการมอดูเลตแบบใช้สัญญาณพาหะด้วยการลดจำนวนครั้งในการสวิตช์คือ การมอดูเลตแบบสองแขน

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

จากการพิจารณาจะเห็นได้ว่า หากเราต้องการสร้างแรงดันรูปไข่ที่ขั้วของอินเวอร์เตอร์ เราจำเป็นต้องสวิตช์ทั้งสามแขนไปพร้อมๆ กัน แต่ถ้าหากเราพิจารณาความจริงที่ว่า แรงดันที่สร้างกระแสของมอเตอร์ที่ต่อแบบสามเฟสสามสาย เป็นแรงดันระหว่างสาย คือ

$$v_{ab} = v_{a0} - v_{b0} \quad (8)$$

$$v_{bc} = v_{b0} - v_{c0} \quad (9)$$

$$v_{ca} = v_{c0} - v_{a0} \quad (10)$$

และถ้าหากเราเพิ่มแรงดันลำดับศูนย์ (Zero-sequence Offset) ให้กับแรงดันไฟของอินเวอร์เตอร์

$$v_{a0}^* = v_{a0} + v_{N0} \quad (11)$$

$$v_{b0}^* = v_{b0} + v_{N0} \quad (12)$$

$$v_{c0}^* = v_{c0} + v_{N0} \quad (13)$$

แรงดันระหว่างสายของมอเตอร์จะมีค่าเท่าเดิม นั่นคือ

$$v_{ab}^* = v_{a0}^* - v_{b0}^* = v_{a0} + v_{N0} - (v_{b0} + v_{N0}) = v_{ab} \quad (14)$$

$$v_{bc}^* = v_{b0}^* - v_{c0}^* = v_{b0} + v_{N0} - (v_{c0} + v_{N0}) = v_{bc} \quad (15)$$

$$v_{ca}^* = v_{c0}^* - v_{a0}^* = v_{c0} + v_{N0} - (v_{a0} + v_{N0}) = v_{ca} \quad (16)$$

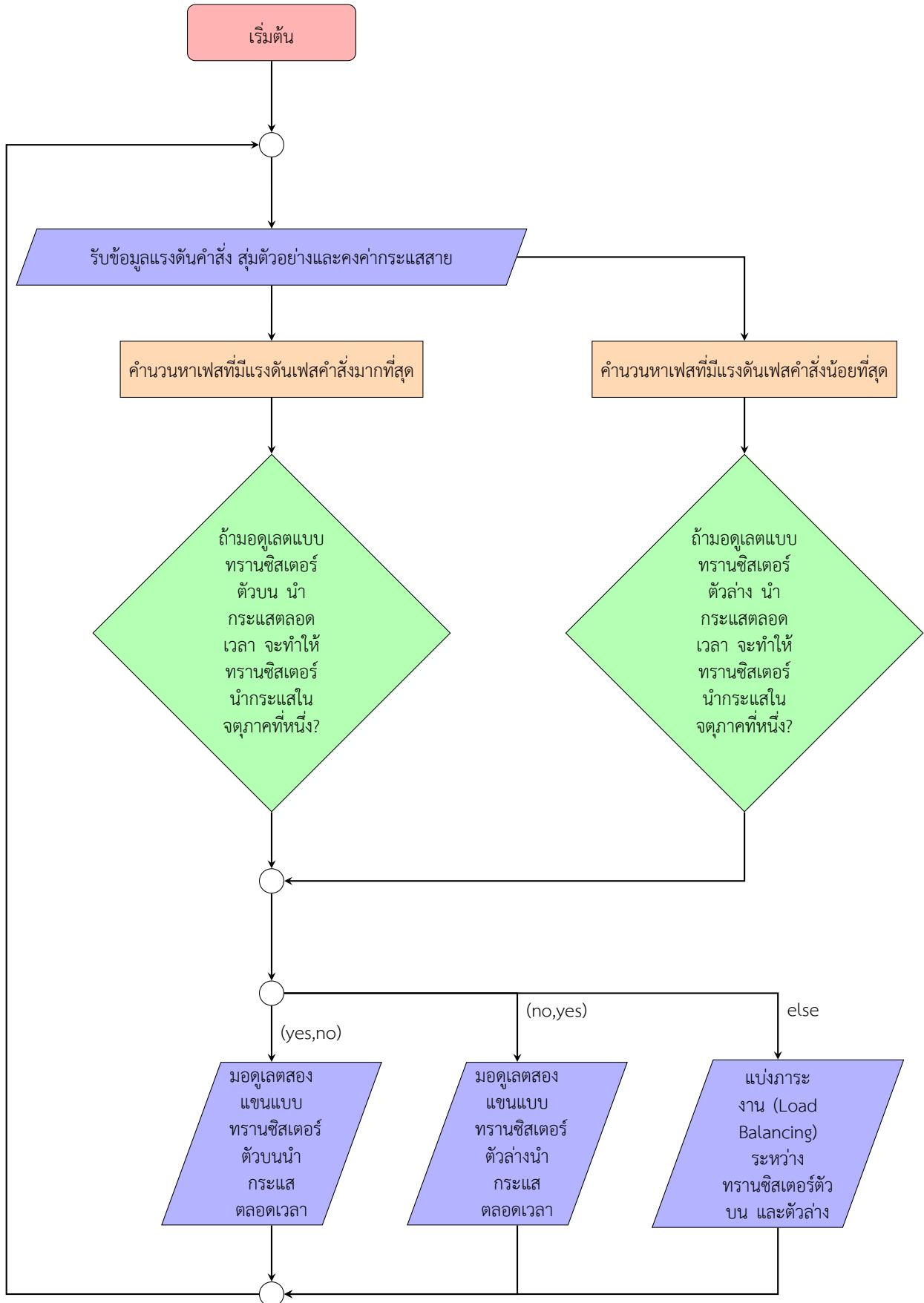
ดังนั้น เรายสามารถเลือกแรงดันลำดับศูนย์ที่จะเพิ่มให้กับแรงดันไฟคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ โดยมีเป้าหมายคือ ทำให้แรงดันคำสั่งในไฟสูงเท่ากับแรงดันของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเท่ากับแรงดันบวก หรือลบทองบัสแรงดันกระแสตรง เพื่อที่จะทำให้แขนของการมอดูเลตแขนนี้ปิด หรือเปิดตลอดเวลา นั่นคือ

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

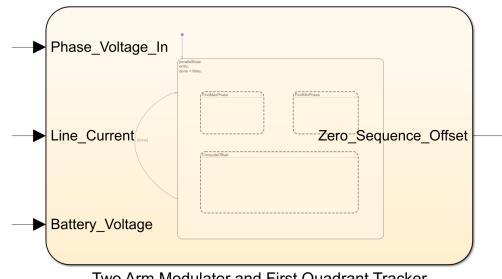
ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ตัวบนกำลังปิดตลอดเวลา ทรานซิสเตอร์ตัวล่าง ก็จะปิดตลอดเวลาด้วย การให้ทรานซิสเตอร์แขนใดแขนหนึ่งเปิด หรือปิดตลอดเวลา จะทำให้ลดจำนวนครั้งในการสวิตช์ให้น้อยลงเท่ากับจำนวนครั้งในการสวิตช์ที่ได้กำหนดไว้ในรูปที่ 13 ซึ่งจากผังงานที่ได้นำเสนอไปข้างต้น เรายังสามารถนำไปสร้างเป็นแพลตฟอร์ม Stateflow™ และ Simulink™ ได้ดังที่แสดงไว้ในรูป

2.1.5 การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการมอดูเลตแบบสองแขนด้วยการติดตามการทำงานในจตุภาคที่ 1

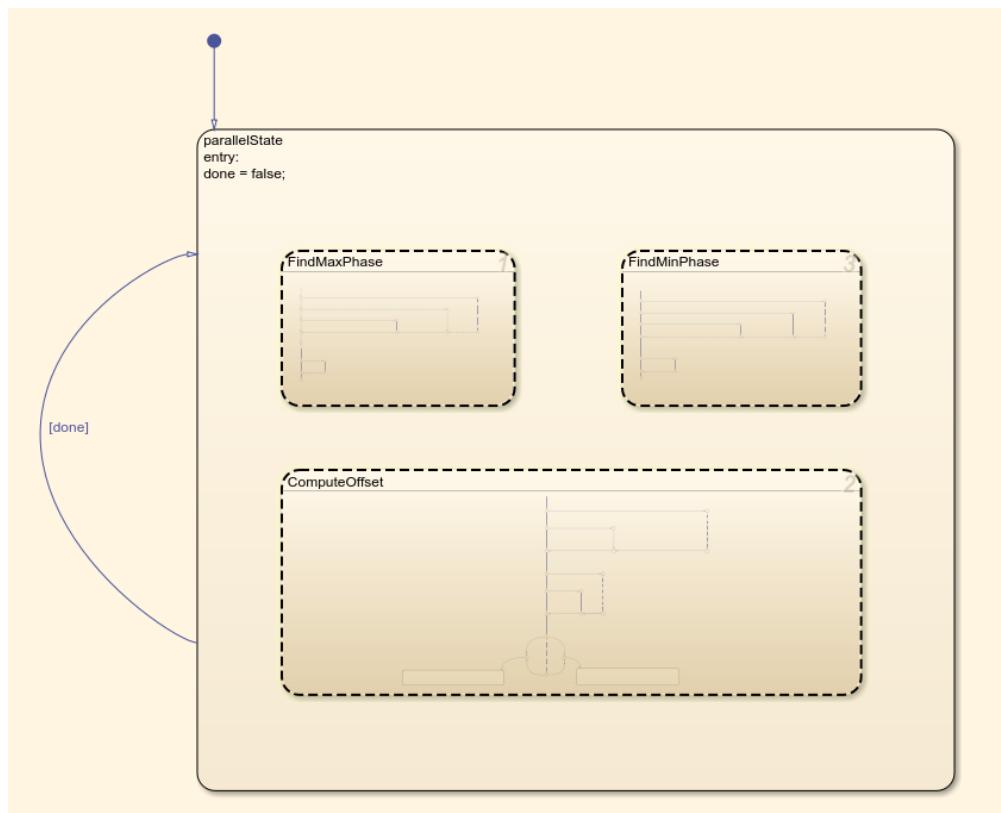
จากผลลัพธ์ที่ได้อภิปรายมาในส่วนที่แล้ว เราได้ทราบว่า เรายังต้องการลดจำนวนครั้งในการสวิตช์ให้ต่ำที่สุด แต่ในขณะเดียวกัน ต้องคงความแม่นยำของแรงดันไฟคำสั่งไว้ได้ ดังนั้น เราจึงต้องหาวิธีการลดจำนวนครั้งในการสวิตช์โดยไม่สacrifice ความแม่นยำของแรงดันไฟคำสั่ง ให้เกิดประสิทธิภาพสูงที่สุด นั่นคือ การหลีกเลี่ยงการทำงานในจตุภาคที่ 3 สำหรับทรานซิสเตอร์ตัวล่างที่จะนำกระแสกระแสต่อเนื่องตลอดเวลา โดยจะมีหลักการในการคำนวณค่าแรงดันไฟคำสั่งที่จะบวกเข้าไป เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ ตามผังงานในรูปที่ 13 ซึ่งจากผังงานที่ได้นำเสนอไปข้างต้น เรายังสามารถนำไปสร้างเป็นแพลตฟอร์ม Stateflow™ และ Simulink™ ได้ดังที่แสดงไว้ในรูป



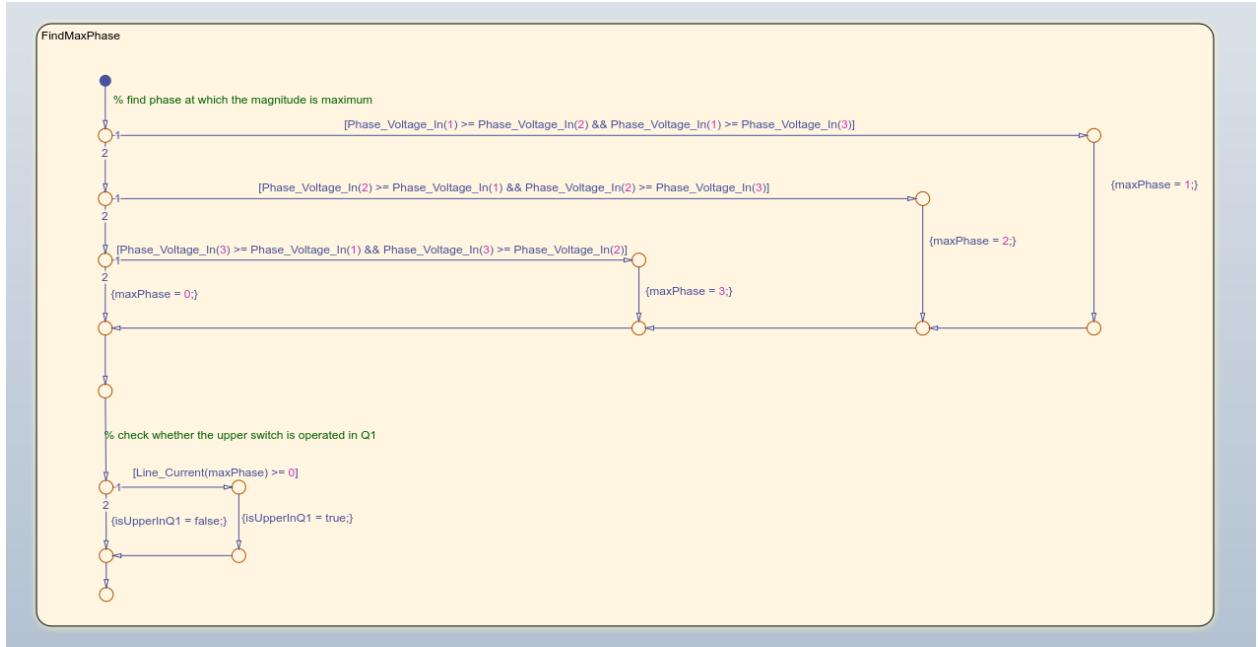
รูป 13: ผังงานของอัลกอริทึมในการคำนวณแรงดันลำดับศูนย์เพื่อติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่งของสวิตช์ที่ถูกมอดูเลตแบบสองแขน



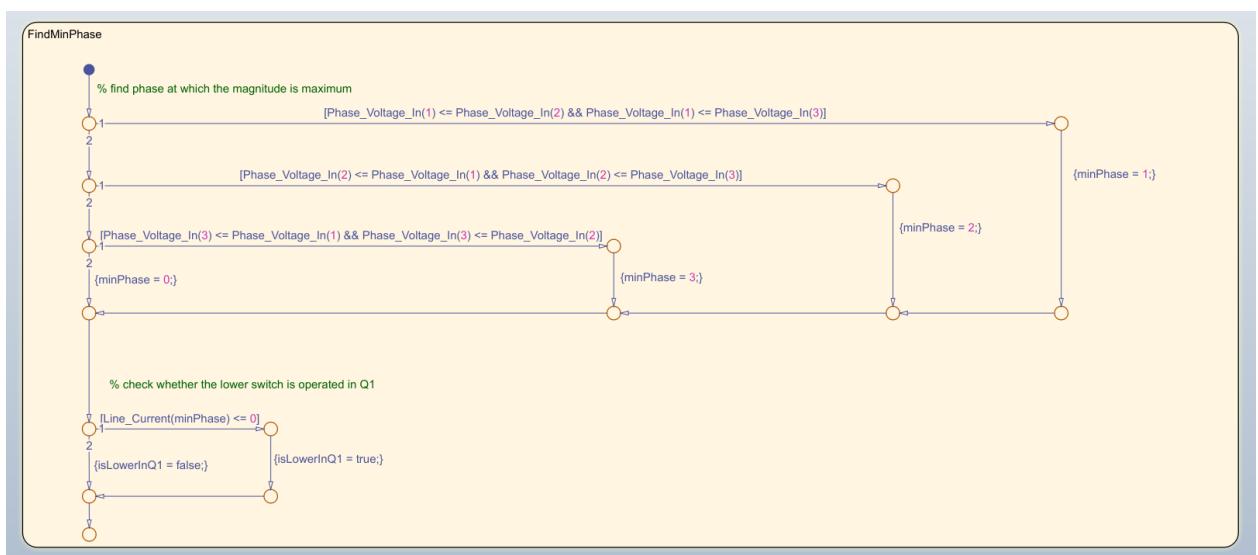
รูป 14: บล็อก Stateflow ของอัลกอริทึมในการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง



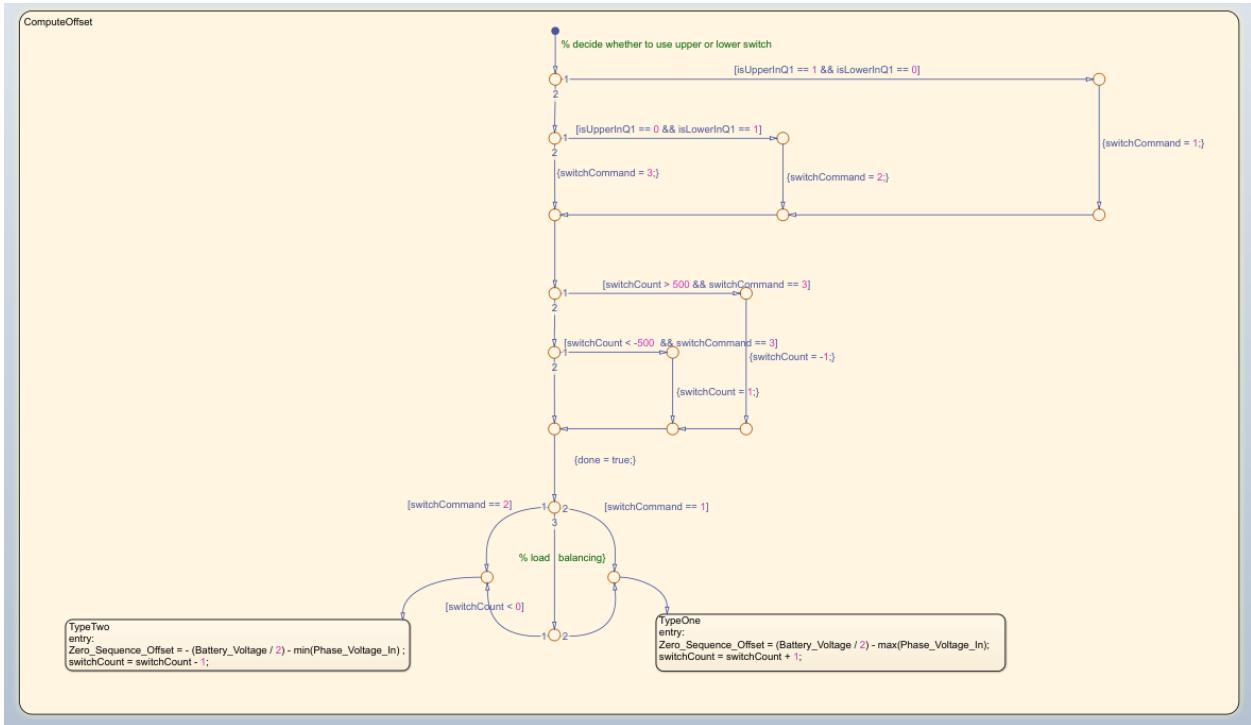
รูป 15: ภาพรวมของ Stateflow chart ของอัลกอริทึมในการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง



รูป 16: Subchart ในส่วนของการหาเฟสที่มีแรงดันค่าสั่งมากที่สุด



รูป 17: Subchart ในส่วนของการหาเฟสที่มีแรงดันค่าสั่งน้อยที่สุด



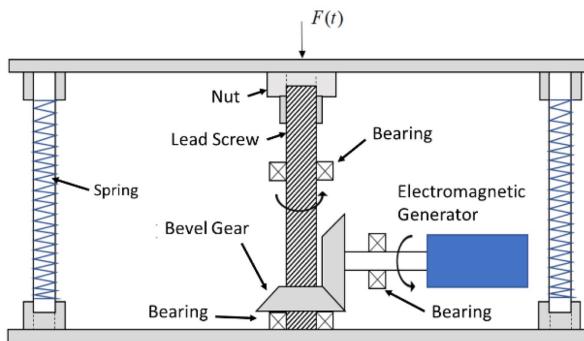
รูป 18: Subchart ในส่วนของการคำนวณแรงดันลำดับศูนย์

2.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking Algorithm; MPPT)

2.2.1 ข้อมูลรายละเอียดและหลักการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

เริ่มแรกต้องศึกษาและเข้าใจหลักการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงานเพื่อทราบความสัมพันธ์ของกลไกและสมการต่างๆ ของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน [2] และเข้าใจผลลัพธ์ของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

แผ่นพื้นเก็บพลังงาน สามารถแปลงพลังงานจนถึงการก้าวเดินของมนุษย์แปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ หลักการทำงาน เริ่มจากการหมุนไขควงแบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานทำให้เกิดการบุบตัวของแผ่นพื้น แบนเกลียว(lead screw)จะขับขันลงไปขับเกลียวนำ(lead screw) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่เชิงเส้นไปยังการเคลื่อนที่เชิงหมุน ให้หมุนรอบแนวแกนตั้ง แล้ว เพื่อถอดออกจาก(bevel gear)ทำหน้าที่เปลี่ยนจากเคลื่อนที่เชิงหมุนแนวแกนตั้งจากเพลาเกลียวนำให้เปลี่ยนทิศทางการหมุนไป 90 องศา หมุนรอบแนวแกนอน เพื่อขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 19



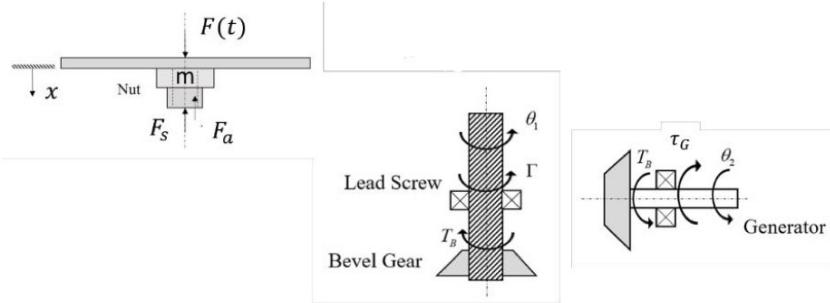
รูป 19: กลไกเกลียวนำ(lead screw) ภายใต้แผ่นพื้นเก็บพลังงาน[2]

จากแผนภาพของวัตถุของระบบทางกล ลีด(lead) และ สกรู(screw) ดังรูปที่ 20 สมการต่างๆ ได้มาจากการข้อที่สองของนิวตันและโมเมนตัม เชิงหมุน ซึ่งอธิบายการเคลื่อนที่ของแบนเกลียว และ การเคลื่อนที่เชิงหมุนของเกลียวนำและโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามลำดับ ได้แก่

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

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

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



รูป 20: แผนภาพของวัตถุของ lead screw

โดยที่

m คือ มวลของแผ่นพื้นและแป้นเกลียว

J_1 คือ โมเมนต์ความเรื่อยของเกลียวนำ

J_G คือ โมเมนต์ความเรื่อยของเพ้อองดอกจาก

x คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นพื้นและแป้นเกลียว

l คือ ระยะห่างระหว่างเกลียวนำ

θ_1 คือ ตำแหน่งเชิงมุมของเกลียวนำ

θ_2 คือ ตำแหน่งเชิงมุมของเพ้อองดอก

$F(t)$ 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

$$T_a = aF_a \quad (21)$$

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

2.2.2 การเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า (Electrical analogy)

ศึกษาหลักการการเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า(electrical analogy) [4] เพื่อเข้าใจความสัมพันธ์ของปริมาณทางกลและทางไฟฟ้า จนนั้น จึงนำไปประยุกต์ใช้สั้งแบบจำลองทางไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

โดยการเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า ของวงจรไฟฟ้าเป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อทำการวิเคราะห์ระบบทางกล บัญหาทางกลบางอย่างสามารถแก้ไขได้ง่ายขึ้นผ่านการเปรียบเทียบทะทางไฟฟ้า โดยความสัมพันธ์ของปริมาณทางกลและทางไฟฟ้า แสดงในตารางที่ 1

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]

2.2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าชิ้งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวร

ศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชิ้งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวร [5] [6] เพื่อเข้าหลักการทำงานและสมการต่างๆที่เกี่ยวข้อง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชิ้งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวร ซึ่งสามารถตั้งมาตรฐานได้ตามที่จะเป็นข้อดีของมอเตอร์ชิ้งโครงสร้างที่สแตเตเตอร์เหมือนกับมอเตอร์เนินี่ยังคงมีค่าคงคลาดสามเฟสพันอยู่ในร่องล็อตที่สแตเตเตอร์ แต่ที่รูเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร ข้อดีของมอเตอร์ชิ้งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวร คือ ไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และขาดลวดสร้างสนามที่ตัวโรเตอร์ ทำให้ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขาดลวด

ค่าความเหนี่ยวนำภายในและฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชิ้งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวร มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมุมของโรเตอร์ จากสมการแรงดันสามเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชิ้งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวร ดังสมการ

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

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

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

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

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

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

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

เมื่อ

v_{un}, v_{vn}, v_{wn} คือ แรงดันไฟฟ้าของเฟส u, v และ w ตามลำดับ

i_u, i_v, i_w คือ กระแสของเฟส u, v และ w ตามลำดับ

R_s คือ ค่าความต้านทานของขาดลวดสแตเตเตอร์

L_u, L_v, L_w คือ ค่าความเหนี่ยวนำต้นของขาดลวดสแตเตเตอร์ในเฟส u, v และ w ตามลำดับ

M_u, M_v, M_w คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขาดลวดสแตเตเตอร์ในเฟส u, v และ w ตามลำดับ

ω_e คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์

θ_e คือ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วของแม่เหล็กถาวร

L_d, L_q คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขาดลวดสแตเตเตอร์ในแนวแกน d และ q

λ' คือ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วของแม่เหล็กถาวร

จากนั้นใช้การแปลงของคลาร์ก(Clark's Transformation) [7] [8] แปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงนิ่ง เพื่อแปลงสมการแรงดันสามเฟสของเครื่องจักรไฟฟ้าชิ้งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวร เป็นสามารถแรงดันบนกรอบอ้างอิงนิ่ง แกน x-y ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำที่พิจารณาทั้งค่าความเหนี่ยวน้ำตัวเองและค่าความเหนี่ยวนำร่วมของขาดลวดสแตเตเตอร์ ดังสมการด้านล่าง

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

เมื่อ

v_x, v_y คือ แรงดันบนกรอบอ้างอิงนิ่ง แกน x,y ตามลำดับ

i_x, i_y คือ กระแสบนกรอบอ้างอิงนิ่ง แกน x,y ตามลำดับ

R_g คือ ค่าความต้านทานของชุดลวดสเตเตเตอร์

L_s คือ ค่าความเหนี่ยววนัดว่องและค่าความเหนี่วนำร่วมของชุดลวดสเตเตเตอร์

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

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

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

เมื่อ

v_d, v_q คือ แรงดันเฟสสเตเตเตอร์ในแกน d และ q บนกรอบอ้างอิงโรเตอร์

i_d, i_q คือ กระแสเฟสสเตเตเตอร์ในแกน d และ q บนกรอบอ้างอิงโรเตอร์

จากพิจารณากำลังขาเข้าของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส

$$P_{in} = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (31)$$

เมื่อ

P_{in} คือ กำลังขาเข้าของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส

จากนั้นพิจารณาสมการ 30 และ 31 จะได้

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

พิจารณาพจน์สุดท้ายของสมการ 32 คือ กำลังเชิงกลของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส ดังสมการที่ 34

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

จึงได้สมการแรงบิด คือ

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

เมื่อ

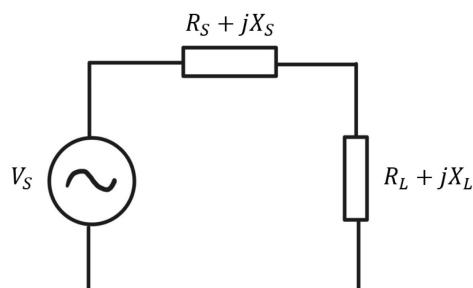
P_{mech} คือ กำลังเชิงกลของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส

T_e คือ แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque)

p คือ จำนวนคูณข้อของเครื่องจักรไฟฟ้า

2.2.4 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับการติดตามจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking) สำหรับวงจรกักเก็บพลังงาน

พิจารณาวงจรสมมูลของวงจรการกักเก็บพลังงานดังรูปที่ 21 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันและอิมพีเดนซ์ขาออก



รูป 21: วงจรสมมูลของวงจรกักเก็บพลังงาน [9]

พิจารณาหลักการแมทซิ่งอิมพีเดนซ์ (Matching impedance) เมื่อพิจารณากำลังออก (P_{out}) โดยใช้หุตถูกวิธีการถ่ายโอนกำลังสูงสุด (Maximum Power Transfer) ของจริงสมมูลตั้งกล่าว เมื่อโหลดเป็นอิมพีเดนซ์ใดๆ โดยพิจารณาในสภาวะคงตัว (steady state)

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

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

เมื่อ

S คือ กำลังประภูมิ

P_{out} คือ กำลังข้าออก

««« HEAD จากสมการที่ (36) จะมีค่าสูงสุดเมื่อพจน์ตัวหารมีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากค่ารีแอคเตนซ์สามารถมีค่าน้อยกว่าศูนย์ได้ จึงพิจารณาให้ $X_L = -X_g$ จึงได้

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

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

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

$$R_L = R_s \quad (39)$$

จึงได้ว่า P_{out} จะมีค่าสูงสุดเมื่อ $R_L = R_s$ และ $j\omega X_L = -j\omega X_S$ ต่อมาจะเป็นจะเป็นการขยายแนวคิดตั้งกล่าว โดยพิจารณา กับสัญญาณกระแส ขณะใดๆ เปลี่ยนแปลงตามเวลา เนื่องจากลักษณะโหลดเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแส เวลาหนึ่ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลง โหลดนั้นทำได้ยากในทางปฏิบัติ ดังนั้น จึงพิจารณาในรูปแรงดันแทน จะได้ว่าแรงดันตัดครึ่งโหลดจะต้องมีค่าเท่ากับสัมยุคของแรงดันตัดครึ่ง อิมพีเดนซ์ของจริงสมมูลข้าออก จะได้ ===== จากสมการที่ 36 จะมีค่าสูงสุดเมื่อพจน์ตัวหารมีค่าต่ำที่สุด จึงได้ว่า P_{out} จะมีค่าสูงสุดเมื่อ $R_L = R_s$ และ $X_L = -X_S$ หรือพิจารณาในรูปแรงดันได้ด้วยแรงดันตัดครึ่งโหลดจะต้องมีค่าเท่ากับสัมยุคของแรงดันตัดครึ่งอิมพีเดนซ์ของจริงสมมูลข้าออก จะได้ »»> b551bf608a2ea44aa249f0deed8bfc1f01d36422

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

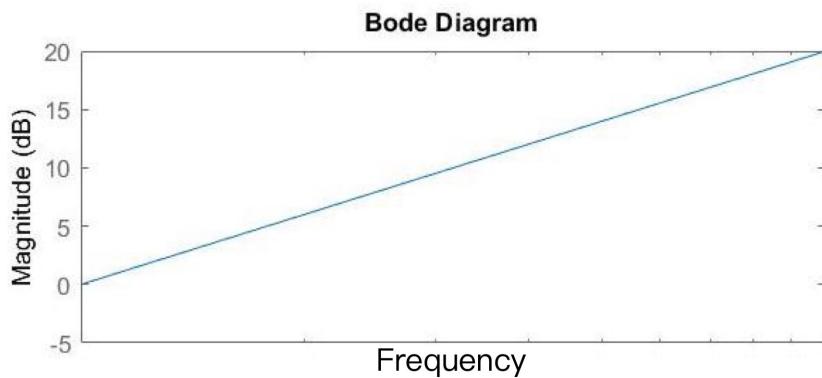
เนื่องจากโหลดที่ต่ออยู่เป็นแบบเตอร์ ถ้าสามารถควบคุมแรงดันขาออก (v_{ter}) ดังสมการที่ (41) จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ชาร์จเข้าแบตเตอรี่มี ค่าสูงสุด

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

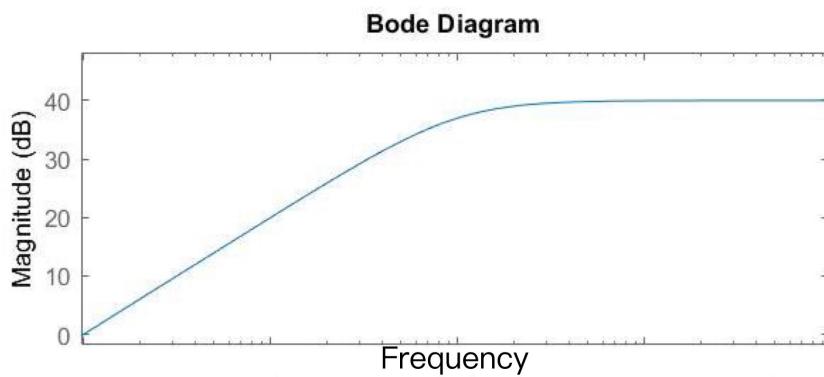
โดยการควบคุมแรงดันขาออกของแบตเตอรี่ให้เป็นไปตามที่ต้องการตามสมการที่ (41) จะใช้งานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ในการแปลงแรงดันไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคการมอดูลัสเลตความกว้างพัลลส์

นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงข้อควรระวังของการใช้ตัวอนุพันธ์ เนื่องจาก Graf ผลตอบสนองเชิงความถี่ตั้งรูปที่ 22 เห็นได้ว่าตัวอนุพันธ์มีพคติกรรمه เมื่อตัวขยายสัญญาณ หากมีสัญญาณรบกวนความถี่สูงเข้ามา อาจทำให้สัญญาณรบกวนถูกขยายขนาดมากขึ้น และอาจส่งผลให้อุปกรณ์เสียหายได้ ดังนั้นการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงต้องมีการจำกัดขอบเขตช่วงความถี่ ของตัวอนุพันธ์ตัวตัวปฏิพันธ์ ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ดังสมการด้านล่าง และจะได้กราฟผลตอบสนองเชิงความถี่เป็นตั้งรูปที่ 23 ซึ่งเมื่อสัญญาณที่ความถี่หนึ่งจะไม่มีอัตราขยายไม่เพิ่มขึ้น

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



รูป 22: กราฟผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวอนุพันธ์



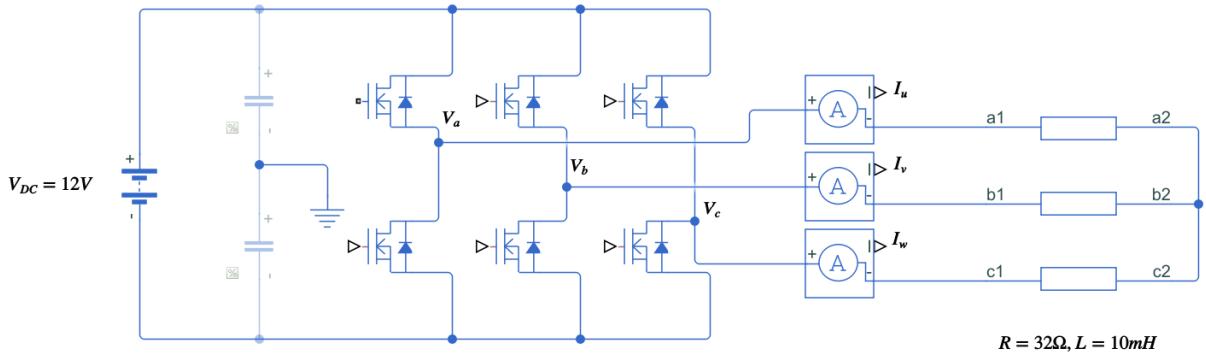
รูป 23: กราฟผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวอนุพันธ์ซึ่งถูกจำกัดขอบเขตโดยตัวปฏิยานุพันธ์

3 ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น

3.1 การทดสอบอัลกอริทึมการmodulateแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง

ในการทดสอบอัลกอริทึมการmodulateแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง จะทำโดยการนำอินเวอร์เตอร์ไปต่อ กับโหลดแบบตัวด้านหน้าและตัวหนีบหน้าสามเฟส โดยเราจะทดลองปรับค่าคำสั่งต่างๆของอินเวอร์เตอร์ และดูว่าระบบให้ผลตอบสนองที่ถูกต้อง หรือไม่ อัลกอริทึมมีการตัดสินใจที่ถูกต้องหรือไม่ โดยมุ่งเน้นการทำงานสอดคล้องกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริงหรือไม่ โดยการประมวลผลที่ได้กล่าวข้างต้น จะต้องมีการวัดและแสดงค่าต่างๆ เหล่านี้คือ

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



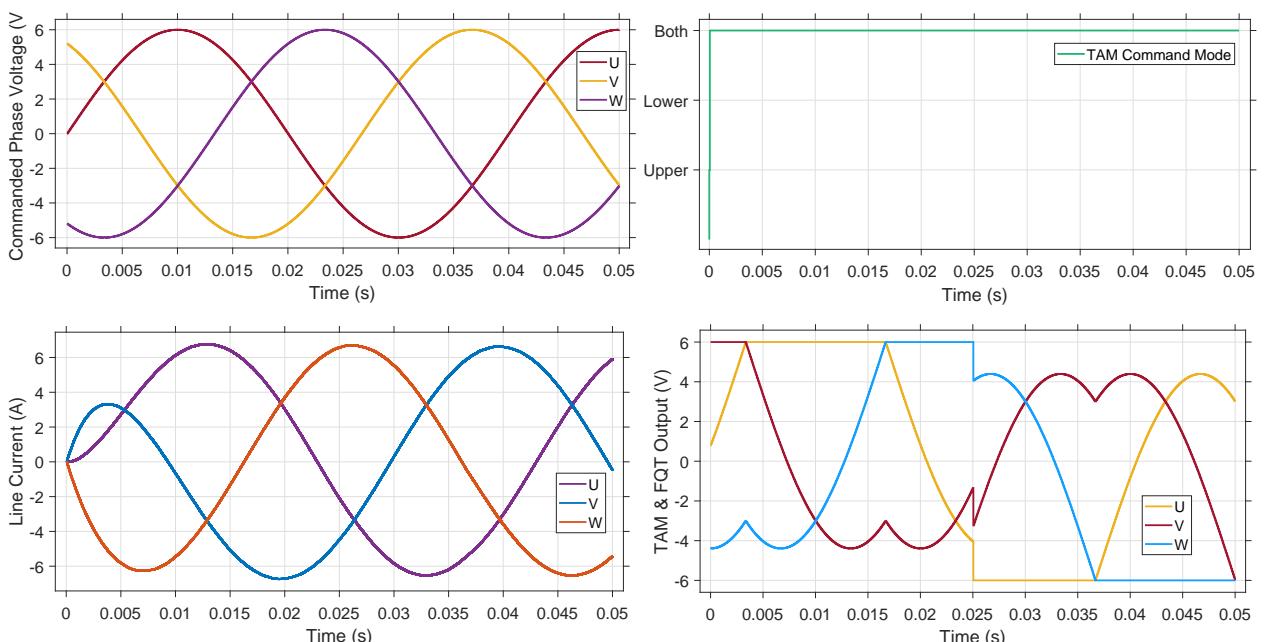
รูป 24: รูปแบบวงจรที่ใช้ทดสอบอัลกอริทึมการรวมอคุเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง

ค่าแรงดันไฟฟ้าสาม相ของอินเวอร์เตอร์ จะเป็นค่าแรงดันที่ป้อนให้กับอัลกอริทึมของอินเวอร์เตอร์ ค่ากระแสสาย จะนิยามตามรูปที่ 24 คือ นิยามให้กระแสที่เหลือออกจากขั้วของอินเวอร์เตอร์เป็นค่าบวก หมายความการรวมอคุเลตแบบสองแขนที่อัลกอริทึมตัดสินใจเลือก จะเป็นโหมดที่ได้กล่าวไว้ในรายละเอียดของการรวมอคุเลตแบบสองแขนคือ

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

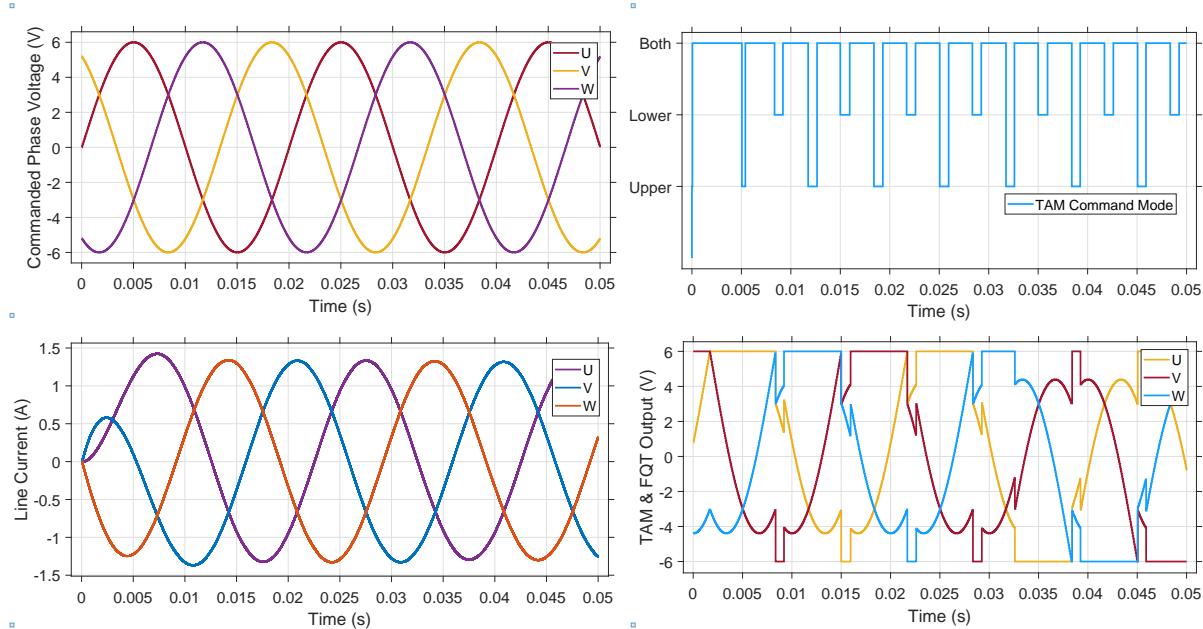
แรงดันคำสั่งที่คำนวนได้จากอัลกอริทึม คือ แรงดันที่คำนวนได้หลังจากการตัดสินใจว่าต้องการรวมอคุเลตสองแขนไปไหน โดยจะทำการเลือกแรงดันลำดับศูนย์เพื่อที่จะบวกเข้าไปในแต่ละเฟส เพื่อให้สวิตช์นำกระแสในแบบที่อัลกอริทึมต้องการ

3.1.1 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับความถี่คำสั่งของอินเวอร์เตอร์



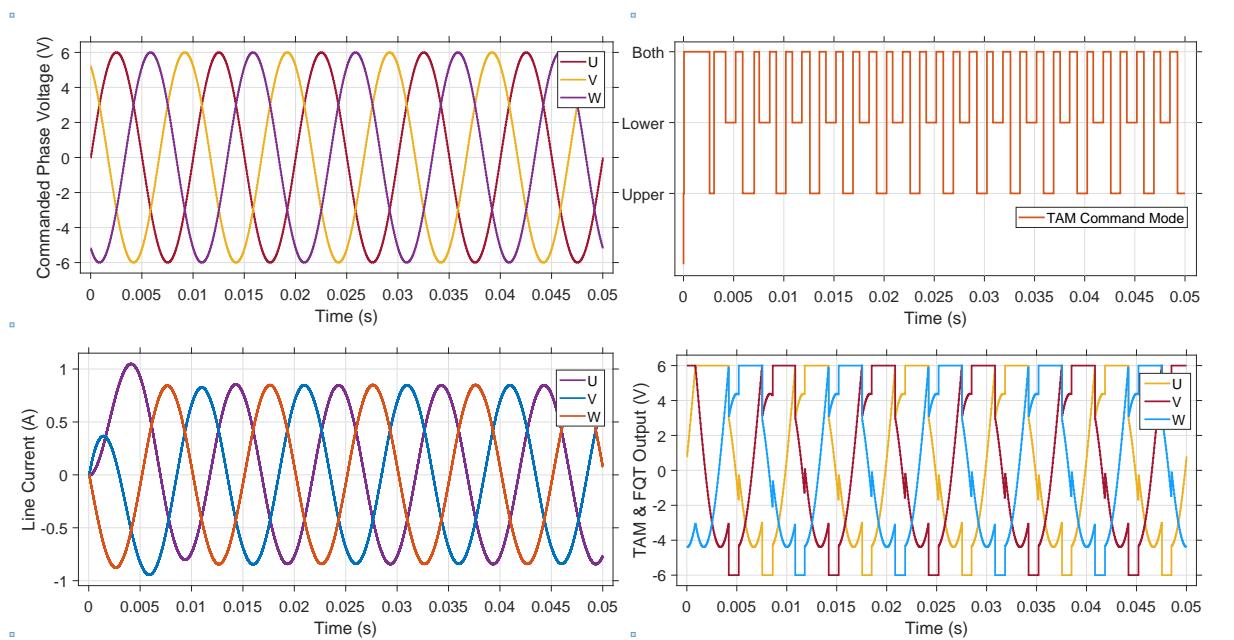
รูป 25: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่คำสั่งเท่ากับ 25Hz

จากรูปที่ 25 จะเห็นได้ว่า การเหลือมกันของกระแสและแรงดันมีค่า้น้อยมาก ซึ่งเวลาที่กระแสและแรงดันเหลือมกันมีค่าต่ำกว่าค่าเวลา การสุ่มและคงค่าของระบบผังตัว ดังนั้นระบบจึงไม่รับรู้ถึงการเหลือมกันของกระแสและแรงดัน ดังนั้น สวิตช์จะทำงานในจุดภาคที่หนึ่งตลอดเวลา ไม่ว่าจะมีความต่อต้านของอินเวอร์เตอร์ อัลกอริทึมจะคิดว่าสามารถที่จะมีความต่อต้านของอินเวอร์เตอร์ได้ ดังนั้น ระบบจะมีความต่อต้านแบบสองชั้นของอินเวอร์เตอร์ อัลกอริทึมจะคิดว่าสามารถที่จะมีความต่อต้านของอินเวอร์เตอร์ได้ ดังนั้น ระบบจะมีความต่อต้านแบบสองชั้นของอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากมุ่งมองของอินเวอร์เตอร์ อัลกอริทึมจะคิดว่าสามารถที่จะมีความต่อต้านของอินเวอร์เตอร์ได้ ดังนั้น ระบบจะมีความต่อต้านแบบสองชั้นของอินเวอร์เตอร์ โดยมีจุดที่แบ่งการทำงานกันระหว่างทรายที่ต่อต้านและตัวล่างอยู่ที่เวลา 0.025 วินาที เพื่อไม่ให้ทรายชีสเตอร์ฟังได้ทำงานหนักเกินไป



รูป 26: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่คำสั่งเท่ากับ 50Hz

จากรูปที่ 26 จะเห็นได้ว่า เมื่อเราเพิ่มความถี่คำสั่งให้กับอินเวอร์เตอร์ จะทำให้ความถี่ไฟฟ้าของแรงดันออกจากรอบอินเวอร์เตอร์มีค่ามากขึ้น ทำให้อร์ค์ประกอบความเรหีวนำของโหลดมีค่ามากขึ้น ทำให้การเหลือมกันของกระแสและแรงดันมากขึ้น จึงมีช่วงจังหวะเวลาที่แรงดันคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ตัดศูนย์ (เปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกเป็นลบ) และเวลาที่ค่ากระแสสายตัดศูนย์ (เปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกเป็นลบ) ในช่วงเวลาดังกล่าว แรงดันไฟฟ้าคำสั่งจะมีค่าเป็นบวก ส่วนค่ากระแสจะมีค่าเป็นลบ ดังนั้น ถ้าหากเรามีความต่อต้านแบบทรายชีสเตอร์ ตัวบันนำกระแสและลดลงเวลา เท่ากับเราบังคับให้กระแสไฟหล่อผ่านทรายชีสเตอร์ตัวบัน ทำให้ทรายชีสเตอร์ตัวบันทำงานในจุดภาคที่สาม ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ เนื่องจากจะมีแรงดันตกคร่อมทรายชีสเตอร์มากกว่า ดังนั้น เราจึงต้องเลือกให้อัลกอริทึมมีความต่อต้านแบบสองชั้นของอินเวอร์เตอร์ แบบทรายชีสเตอร์ตัวล่างนำกระแสและลดลงเวลา ทำให้กระแสไฟหล่อผ่านทรายชีสเตอร์ตัวล่างแบบที่จะทำให้ทรายชีสเตอร์ตัวล่างนำกระแสในจุดภาคที่หนึ่ง ซึ่งมีแรงดันตกคร่อมทรายชีสเตอร์น้อยกว่า กำลังสูญเสียระหว่างนำกระแสและน้อยกว่า ดังที่จะแสดงในกราฟโดยการมองความต่อต้านแบบสองชั้นที่อัลกอริทึมตัดสินใจเลือก จะสังเกตได้ว่า อัลกอริทึมจะเลือกให้อินเวอร์เตอร์มีความต่อต้านแบบ "Lower" เมื่อยุ่งช่วงเวลาระหว่างที่ค่าแรงดันไฟฟ้าคำสั่งเปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกไปลบ และค่าแรงดันสายเปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกไปลบ และอัลกอริทึมจะเลือกความต่อต้านแบบ "Upper" ในช่วงเวลาที่ค่าแรงดันไฟฟ้าคำสั่งเปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกไปลบ และค่ากระแสสายเปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกไปลบ ซึ่งหากพิจารณาจากการจำลองจะพบว่า อัลกอริทึมได้ทำงานอย่างถูกต้อง

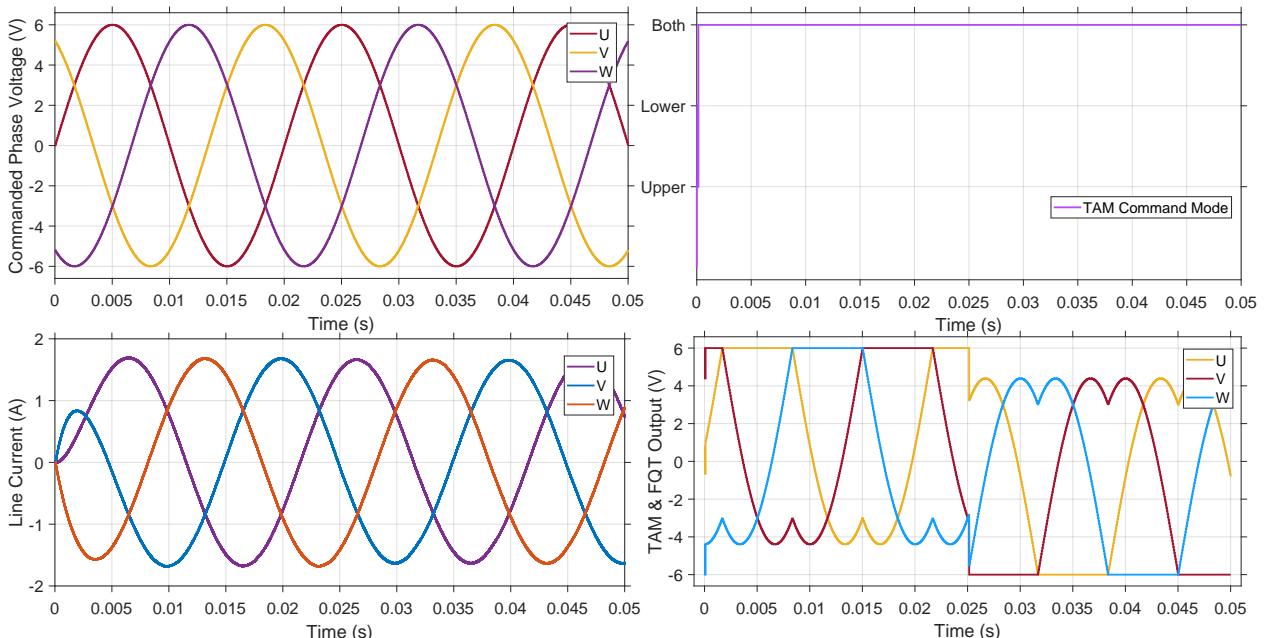


รูป 27: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่คำสั่งเท่ากับ 100Hz

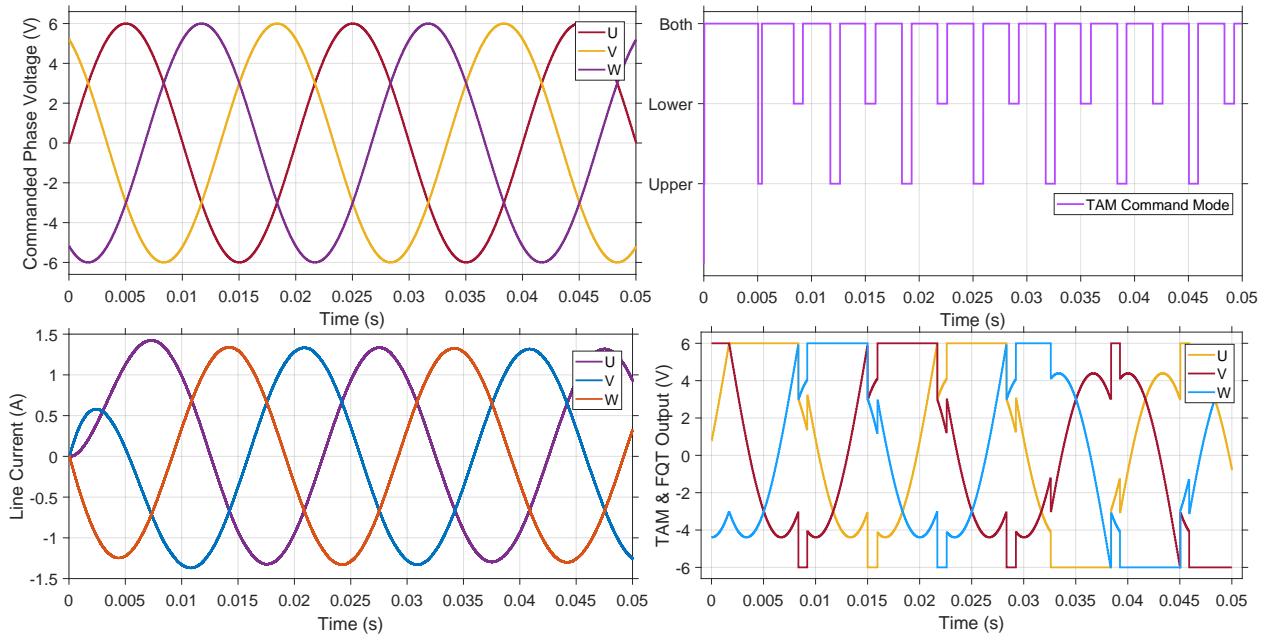
จากรูปที่ 27 จะเห็นได้ว่า เมื่อเราเพิ่มความถี่คำสั่งให้กับอินเวอร์เตอร์ แนวโน้มของการเหลือมกันของกระแสและแรงดันจะมีมากขึ้น ดังนั้น ส่วนแบ่งเวลาที่อัลกอริทึมเลือกมอดูลเดตแบบ "Upper" และ "Lower" จึงมากขึ้น ดังที่จะสะท้อนออกมายังกราฟโดยการลดเวลาแบบสองแขนที่อัลกอริทึมเลือก

3.1.2 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับค่าความหนี้บานของโหลด

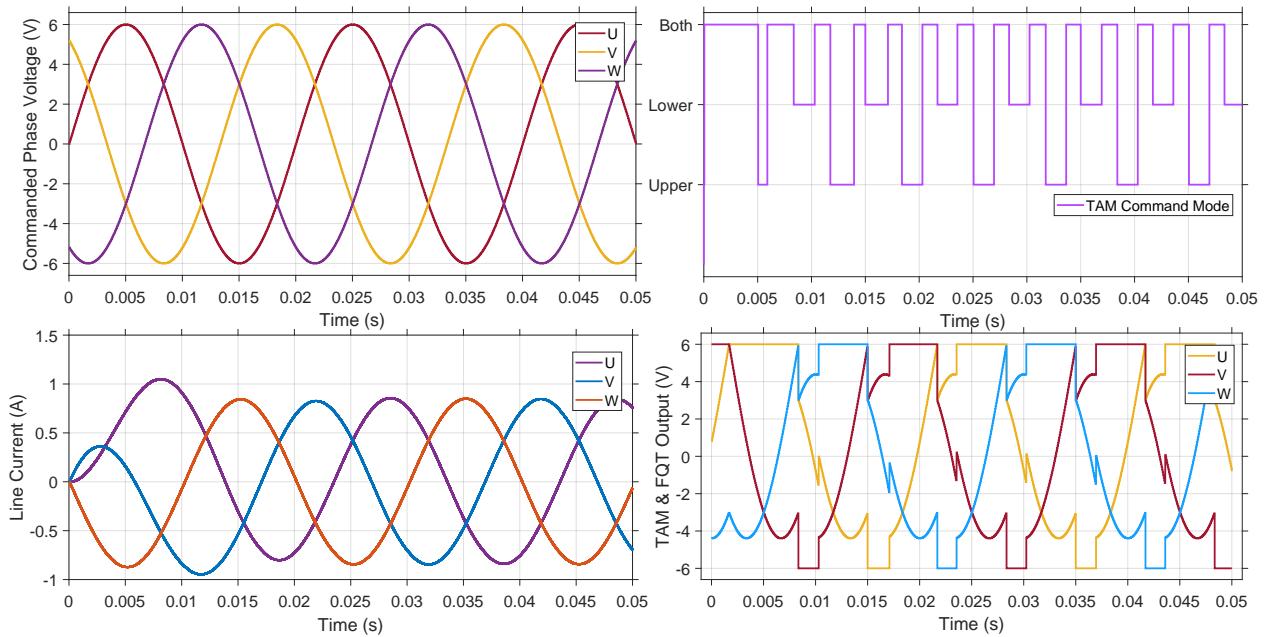
จะเห็นได้ว่าการปรับค่าความหนี้บานของโหลดส่งผลคล้ายกับการปรับค่าความถี่คำสั่งให้กับอินเวอร์เตอร์ เพราะสุดท้ายแล้ว การปรับความถี่คำสั่งของอินเวอร์เตอร์ก็คือการเปลี่ยนค่ารีแอคแทนซ์ของตัวเหนี่ยวนำนั่นเอง จะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องในกรณีการทดสอบต่างๆ



รูป 28: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับความหนี้บานของโหลดให้เท่ากับ 5mH



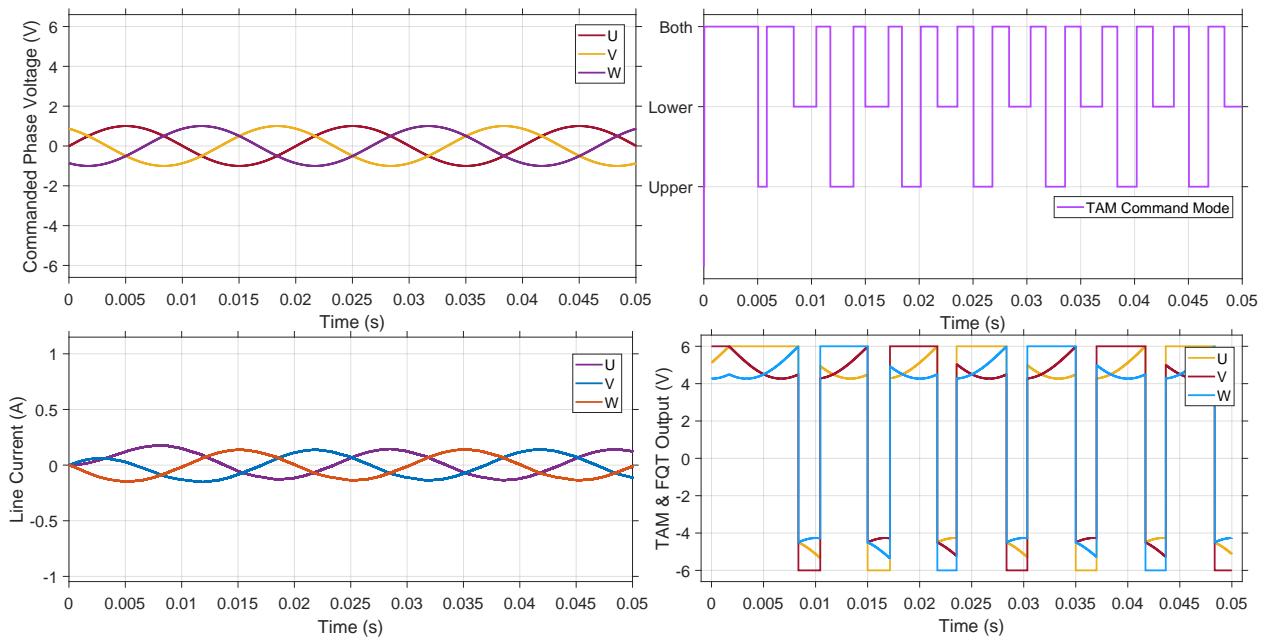
รูป 29: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับความหนี่ยวนำของโหลดให้เท่ากับ 10mH



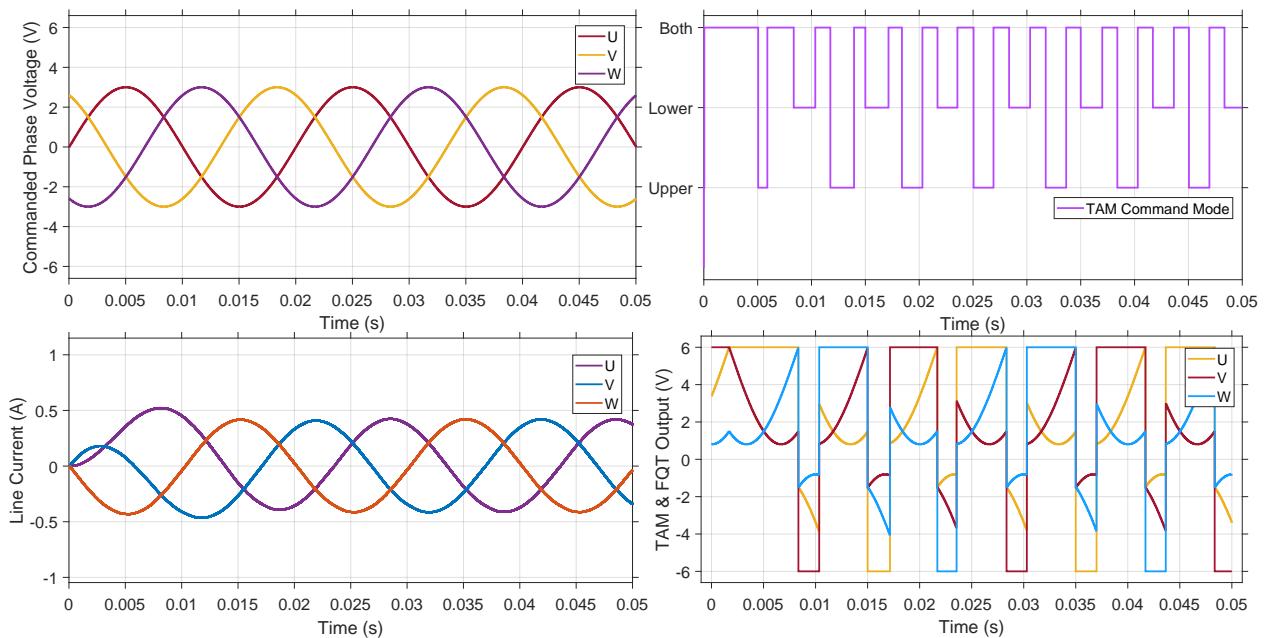
รูป 30: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับความหนี่ยวนำของโหลดให้เท่ากับ 20mH

3.1.3 เจื่อนไสการทดสอบกรณีที่ปรับค่าขนาดของแรงดันคำสั่งของอินเวอร์เตอร์

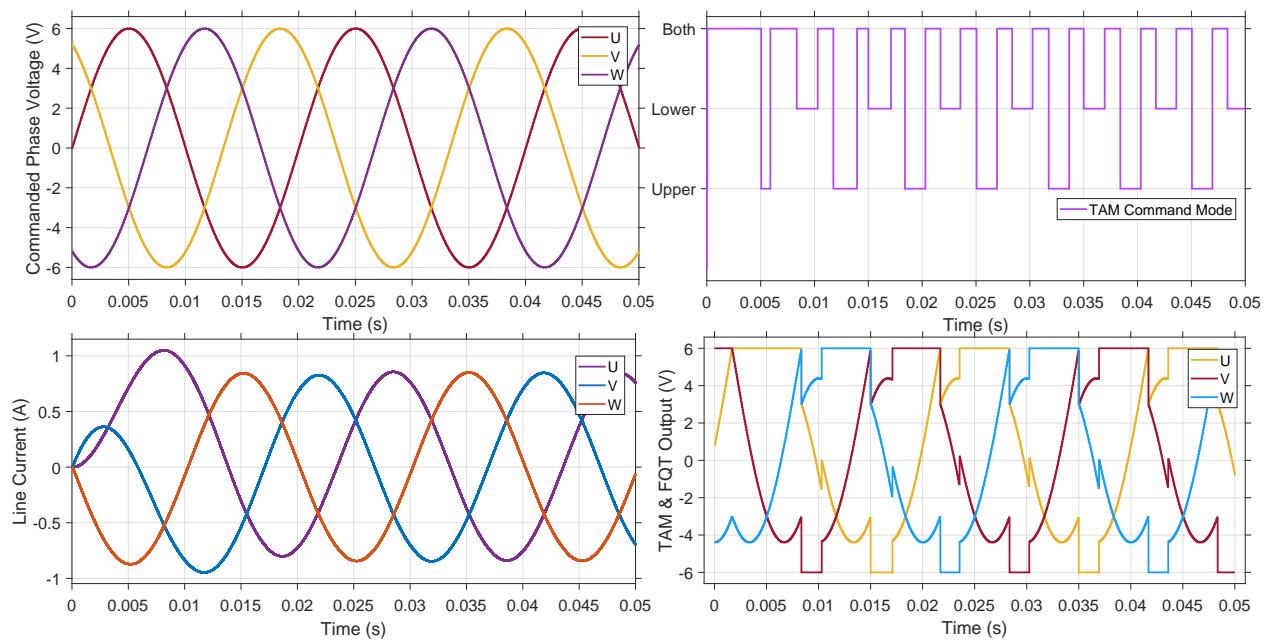
ถ้าหากค่ายอดของแรงดันเฟสคำสั่งถูกปรับ ก็จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อขนาดของกระแสสาย นั่นคือ ค่ากระแสสายจะแปรผันตรงกับขนาดของแรงดันคำสั่ง จะสังเกตุได้ว่า อินเวอร์เตอร์ยังสามารถทำงานได้ถูกต้องเมื่อปรับขนาดของแรงดันคำสั่งเป็นค่าต่างๆ



รูป 31: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับขนาดของค่าจอดของดันไฟสัมประสิทธิ์กับ 1 V



รูป 32: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับขนาดของค่าจอดของดันไฟสัมประสิทธิ์กับ 3 V



รูป 33: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับขนาดของค่ายอดของดันไฟฟ้าสำหรับ 6 V

3.2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิodic แม่เหล็กการ

จากการศึกษาการทำงานของทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และ การเปรียบเทียบเชิงกล - ไฟฟ้า(Electrical analogy) เพื่อแปลงระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้า มีขั้นตอนดังนี้

เนื่องจากอัตราส่วนของเกียร์ของ ชุดโซลูชัน(train gear) และเพ่องดอกจาก(bevel gear) ที่ใช้ในการส่งการเคลื่อนที่เชิงหมุนจากเกลียวนำ(lead screw) ไปยังโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครงสร้าง มีอัตราส่วนเท่ากับ 1:1 จึงได้ความสัมพันธ์

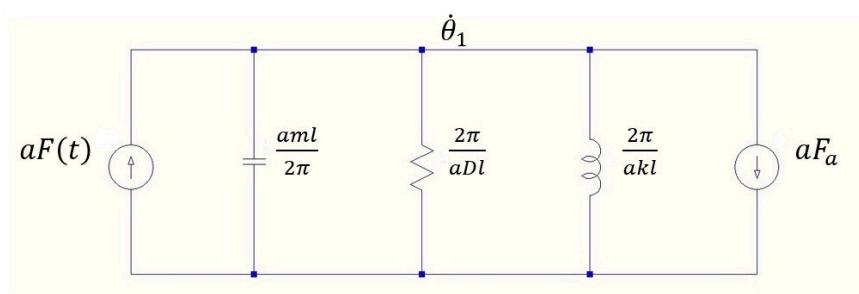
$$x = \frac{l\theta_1}{2\pi} = \frac{l\theta_2}{2\pi} \quad (43)$$

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

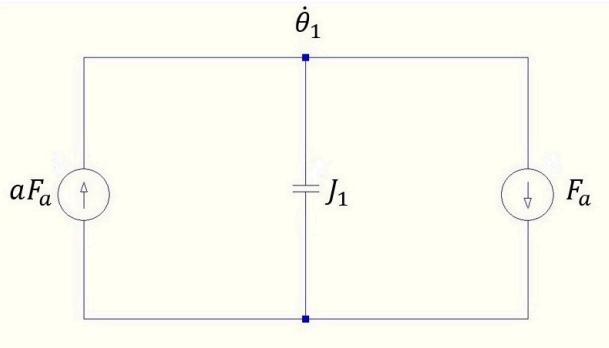
$$\frac{aml}{2\pi} \ddot{\theta}_1 + \frac{aDl}{2\pi} \dot{\theta}_1 + \frac{akl}{2\pi} \theta_1 + aF_a = aF(t) \quad (44)$$

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + T_B = aF_a \quad (45)$$

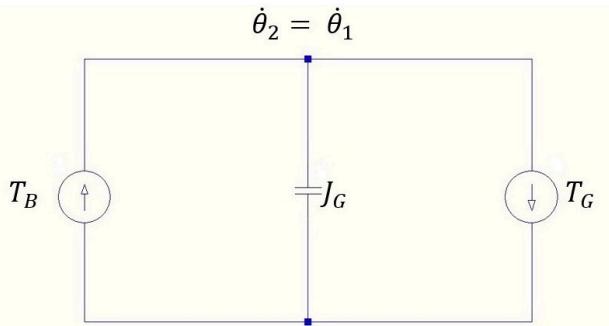
$$J_G \ddot{\theta}_2 + T_G = T_B \quad (46)$$



รูป 34: วงจรไฟฟ้าของการเลื่อนที่ของแผ่นเกลียว(gnut)

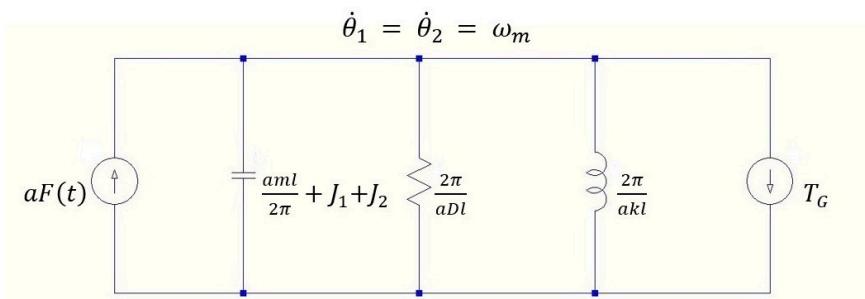


รูป 35: วงจรไฟฟ้าของการเคลื่อนที่เชิงหมุนของเกลียวนำ(lead screw)



รูป 36: วงจรไฟฟ้าของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากร่วมวงจรไฟฟ้าของการเคลื่อนที่ของแป้นเกลียว(gnut) และ การเคลื่อนที่เชิงหมุนของเกลียวนำ(lead screw) และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทั้งสามข้างบน จะได้ วงจรสุมูลทางไฟฟ้าระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน ดังรูปที่ 37



รูป 37: วงจรสุมูลไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

หลังจากได้วงจรสุมูลทางไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน จึงได้ศึกษาเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กการเพื่อเข้าใจหลักการทำงานและสมการความสัมพันธ์ต่างๆ ที่จะสามารถวิเคราะห์ และสร้างวงจรสุมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กทราบ

จากการที่ได้ศึกษาเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กทราบ และได้วงจรสุมูลของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน สามารถรวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กทราบตามขั้นตอน ดังนี้

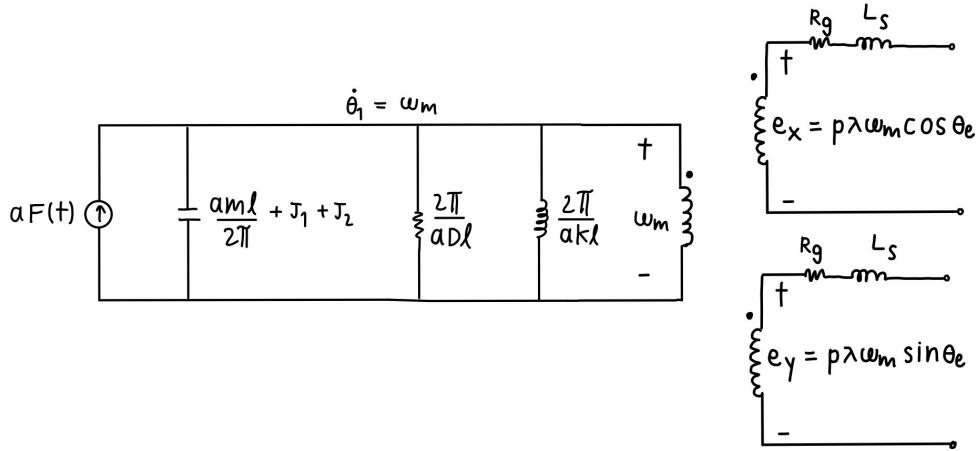
จากสมการที่ (17) แรงดันบนกรอบอ้างอิงนิ่ง แกน x,y ทำให้ทราบความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนเหนี่ยวน้ำภายในของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กทราบ ดังสมการด้านล่าง

$$e_x = p\lambda\omega_m \cos(\theta_e) \quad (47)$$

$$e_x = p\lambda\omega_m \sin(\theta_e) \quad (48)$$

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

วงจรที่ไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นเก็บพลังงานสัมพันธ์กับเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า ความเร็วของโรเตอร์จะหันไปยังขนาดแรงเคลื่อนที่อนหน่วยของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสตามสมการด้านบน จึงได้ความสัมพันธ์แสดงดังรูปวงจรด้านล่าง



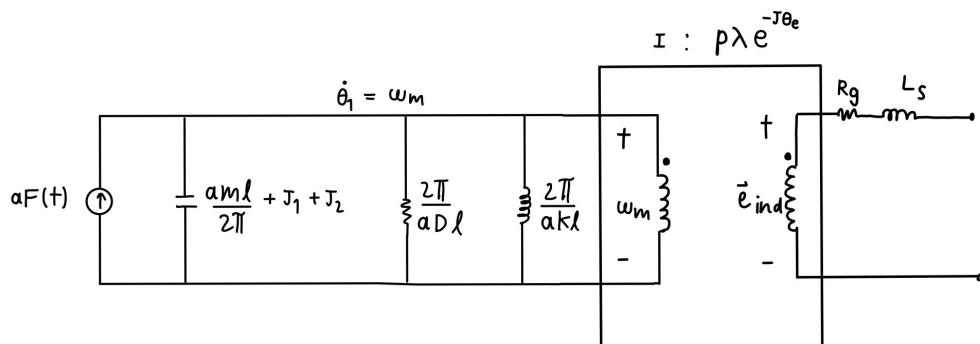
รูป 38: วงจรไฟฟ้าแสดงความสัมพันธ์ระบบทางกลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากนั้นเขียนความสัมพันธ์อยู่ในรูปสเปชเวกเตอร์ของระบบทางกลของแผ่นเก็บพลังงานและ เครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร เพื่อสามารถวิเคราะห์เป็นวงจรไฟฟ้าเพียงวงจรเดียวได้

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

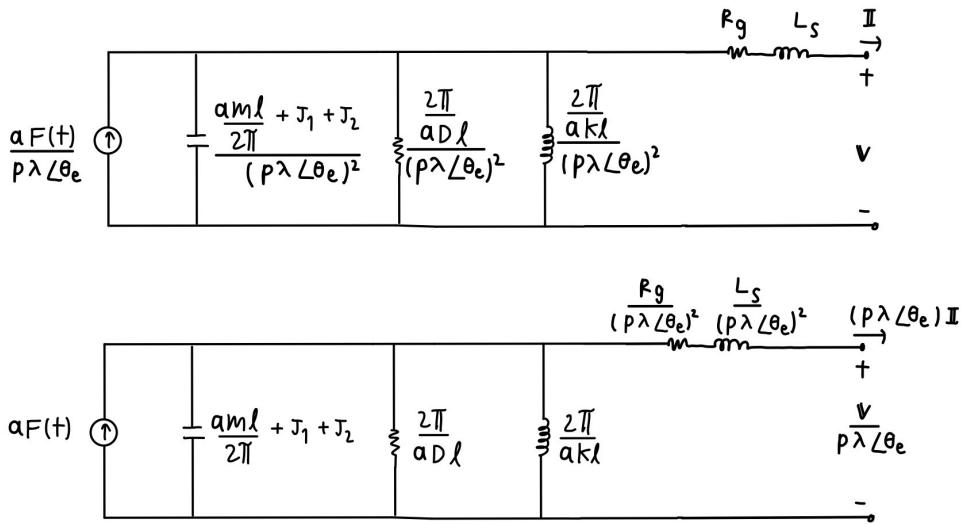
$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = p\lambda e^{-J\theta_e} \begin{bmatrix} \omega_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (51)$$

จึงสามารถมองเป็นวงจรสมมูลที่แสดงความสัมพันธ์เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบเป็นเชิงช้อน ดังรูปที่ 39



รูป 39: วงจรไฟฟ้าแสดงความสัมพันธ์ระบบทางกลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีหม้อแปลงไฟฟ้ามีอัตราส่วนเป็นเชิงช้อน

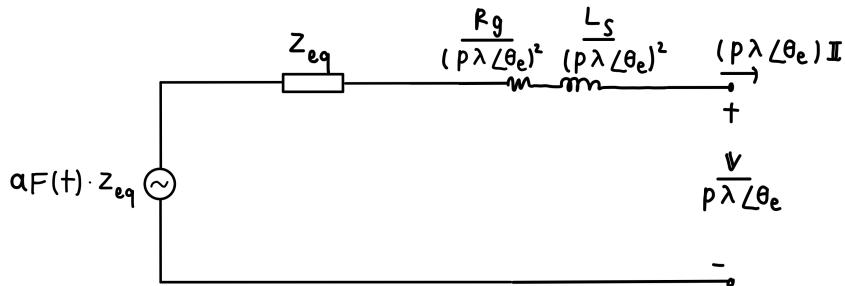
จากนั้นทำการแปลงเป็นวงจรสมมูล โดยอ้างอิงผังทุติยภูมิ(บน)และอ้างอิงผังปฐมภูมิ(ล่าง) แสดงดังรูปที่ 40



รูป 40: วงจรสมมูลไฟฟ้าที่ยังอิงฝั่งทุติยภูมิ(บน)และยังอิงฝั่งปฐมภูมิ(ล่าง)

3.3 ผลการจำลองของแบบจำลองทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กไฟฟ้า บนโปรแกรม MATLAB/Simulink

จากสมการที่ (41) จึงทำการแปลงวงจรสมมูลจากรูป 40 โดยใช้ทฤษฎีเทเวนิน จะได้วงจรสมมูลดังรูปด้านล่าง



รูป 41: แบบจำลองวงจรไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นพลังงานและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้ทฤษฎีเทเวนิน

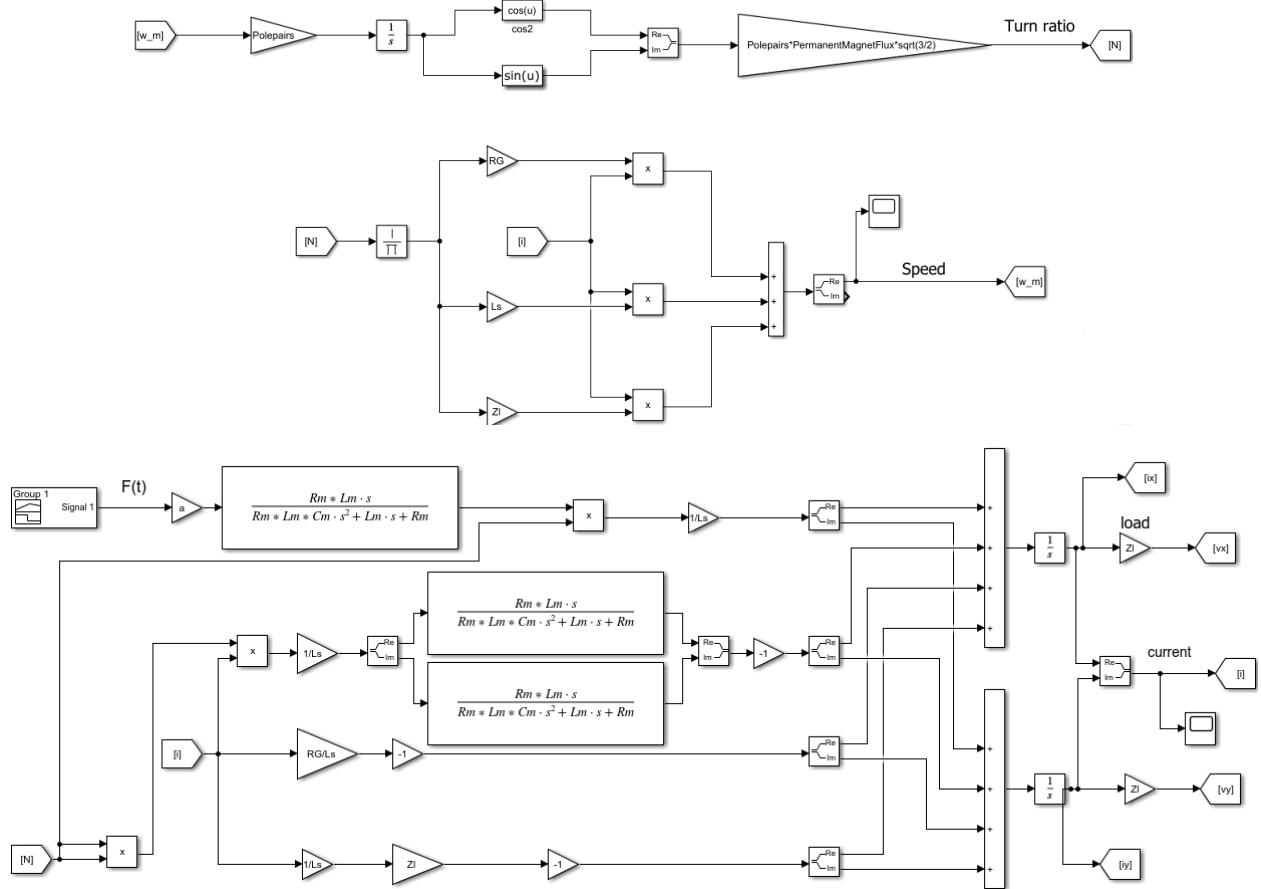
โดย Z_{eq} คือ $\frac{2\pi}{aDl} // s \frac{2\pi}{akl} // \frac{1}{s(\frac{aml}{2\pi} + J_1 + J_2)}$ จากทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังสูงสุด จะได้ว่าโหลดที่นำมาต่อที่ด้านข้าอกของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส จะมีลักษณะตามสมการที่ (52)

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

โดยแรงดันข้าอกที่สอดคล้องกับหลักการติดตามจุดทำงาน ซึ่งทำให้กำลังข้าอกของเครื่องจักรไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเป็นดังสมการที่ (53)

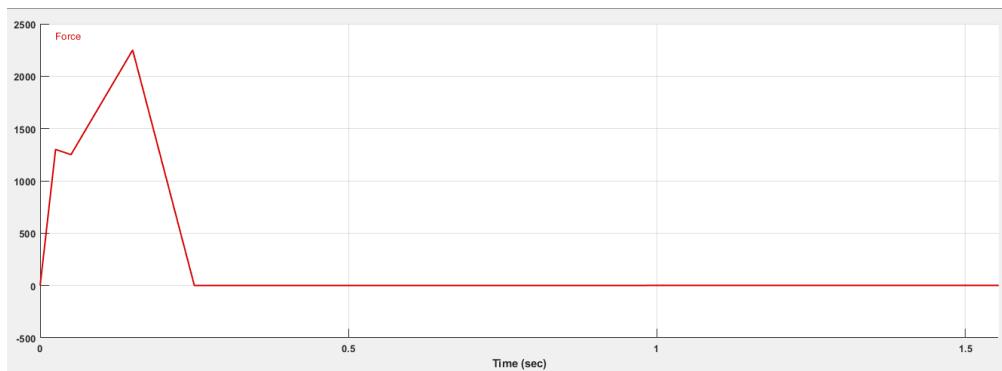
$$v_{out} = \text{conjugate}[z_{eq}I(p\lambda\angle\theta_e)^2 + R_gI + sL_sI] \quad (53)$$

หลังจากที่ได้วงจรสมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสและเงื่อนไขแรงดันข้าอกที่สอดคล้องกับหลักการติดตามจุดทำงานซึ่งทำให้กำลังข้าอกมีค่าสูงสุด จากรูปที่ 41 และสมการต่างๆที่เกี่ยวข้อง มาสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังรูปที่ 42 เพื่อศึกษาการทำงานของแบบจำลองที่ได้



รูป 42: แบบจำลองวงจรสมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแม่พิมพ์พลังงานและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่มีโหลดตัวต้านทาน 32.23 โอห์ม

«««< HEAD แบบจำลองที่ได้ ทดสอบด้วยแรงเหยียบ ดังรูปที่ 42 และใส่โหลดเป็นตัวต้านทานที่ข้ออกของ มีขนาดเท่ากับความต้านทานภายในเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิติแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 32.23 โอห์ม ใช้แรงจากเท้าเหยียบแสดงดังรูปที่ 43 ค่าพารามิเตอร์อื่นที่ใช้ในการทดสอบ [2] และดังตารางที่ 2 และ 3 ===== แบบจำลองที่ได้ ทดสอบด้วยแรงเหยียบ ดังรูปที่ 42 และใส่โหลดเป็นตัวต้านทานที่ข้ออกของ มีขนาดเท่ากับความต้านทานภายในเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิติแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 32.23 โอห์ม ใช้แรงจากเท้าเหยียบแสดงดังรูปที่ 43 ค่าพารามิเตอร์อื่นที่ใช้ในการทดสอบ [2] และดังตารางที่ 2 และ 3 »»> b551bf608a2ea44aa249f0deed8bfc1f01d36422



รูป 43: แบบจำลองวงจรสมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแม่พิมพ์พลังงานและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 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)	$8.6756 \times 10^{-7} \text{ kgm}^2$
Moment of inertia of lead screw(J_l)	$2.5536 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$
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

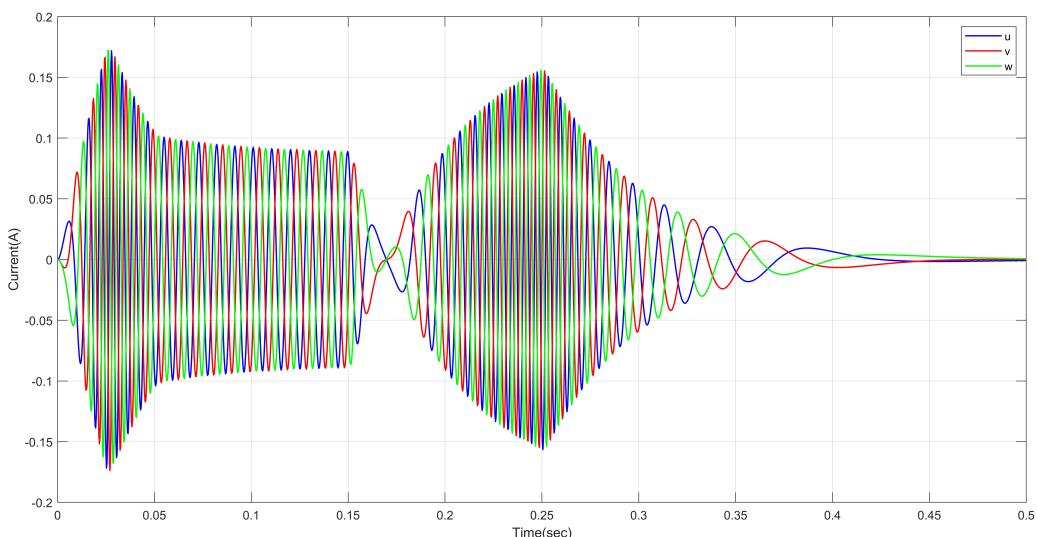
ตาราง 2: ค่าตัวแปรทางกลที่เกี่ยวข้องกับแผ่นพื้นพลังงาน [2]

<<< HEAD ===== >>> b551bf608a2ea44aa249f0deed8bfc1f01d36422

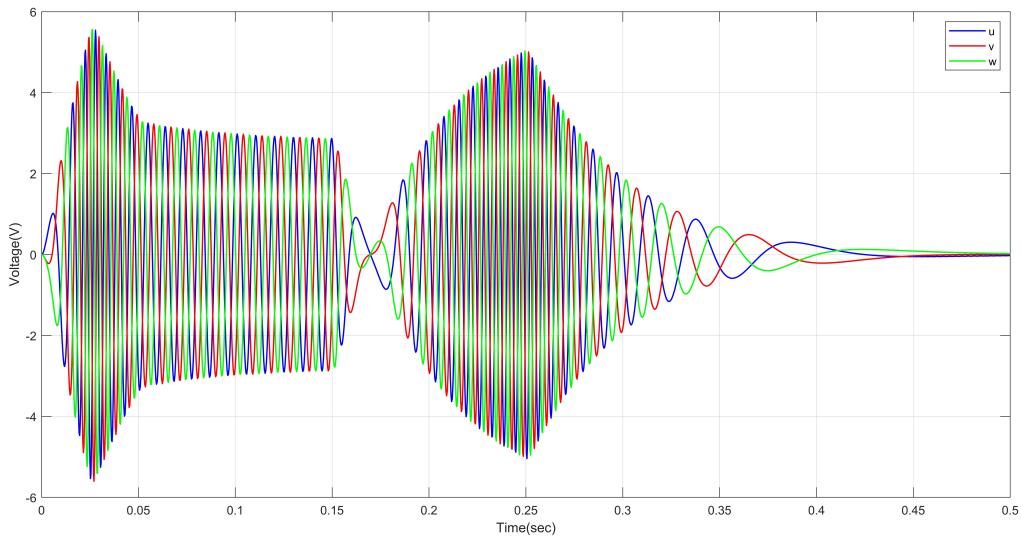
Parameters	Value
ค่าความต้านทานของชุด漉สเตเตอร์(Rs)	32.23Ω
ค่าความเหนี่ยวนำของชุด漉สเตเตอร์(Ls)	11.3 mH
ค่าความเหนี่ยวนำของชุด漉สเตเตอร์ในแนวแกนอ้างอิงดี (Ld)	16 mH
ค่าความเหนี่ยวนำของชุด漉สเตเตอร์ในแนวแกนอ้างอิงคิว (Lq)	16 mH
พลักซ์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร	0.009 Wb
จำนวนคู่ชี้ว	6 คู่

ตาราง 3: ค่าตัวแปรทางกลที่เกี่ยวข้องกับครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร[2]

<<< HEAD ===== >>> b551bf608a2ea44aa249f0deed8bfc1f01d36422



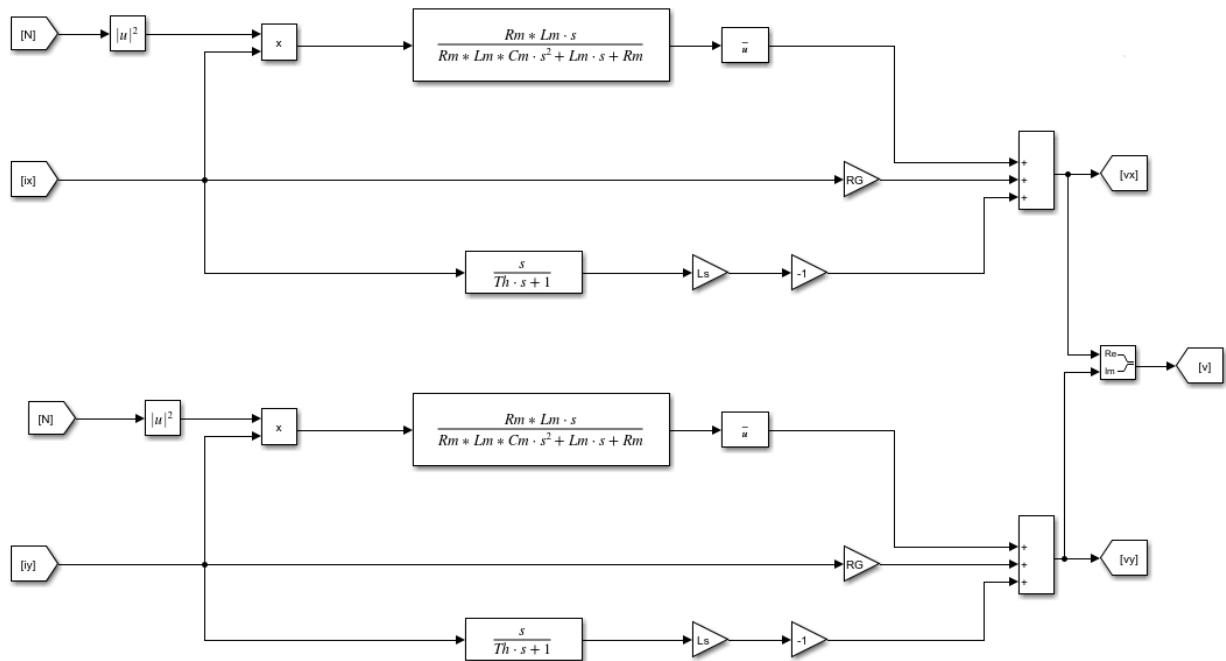
รูป 44: กระแสขาออก เมื่อโหลดตัวต้านทาน 32.23 โอห์ม



รูป 45: แรงดันขาออก เมื่อโหลดตัวต้านทาน 32.23 โอห์ม

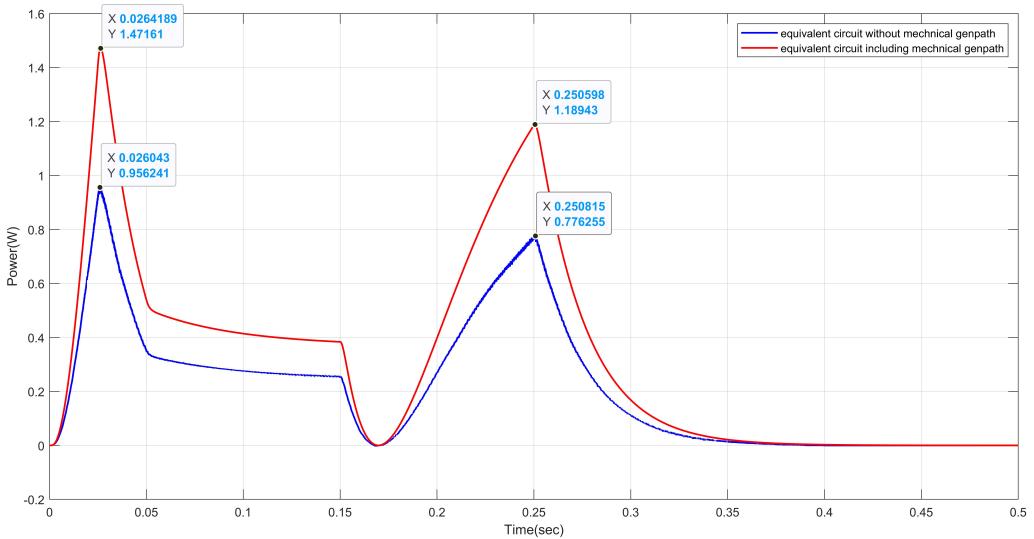
จากกรุ๊ปที่ 44 และ 45 พบว่า แรงดันและกระแสเมลักคลื่นเกิดขึ้นจำนวน 2 ลูก โดยลูกแรกเกิดจากการยุบตัวของแผ่นพื้นเนื่องจากแรงที่เหยียบลงบนแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และลูกที่สองเกิดจากการยุบตัวของแผ่นพื้นเนื่องจากแรงคืนตัวของสปริง

จากสมการที่ (41) เมื่อเปลี่ยนโหลดจากตัวต้านทานเป็นแหล่งจ่ายแรงดันแบบควบคุมได้ สามารถนำมารังเริ่มอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดได้ดังรูปที่ 46 โดยนักระยะเวลาของการคำนวณแบบจำลองมาพิจารณาผ่านอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดเพื่อคำนวนหาเงื่อนไขสัญญาณแรงดันที่เหมาะสมและส่งกลับไปเป็นสัญญาณแรงดันขาออกของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งจะทำให้ได้กำลังขาออกสูงสุด



รูป 46: แผนภาพโดยแกรมของอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดบนแกนอ้างอิงนิ่ง

จากการทดสอบแบบจำลอง จะได้ว่ากำลังขาออกเมื่อมีการใช้อัลกอริทึมการติดตามกำลังสูงสุด ที่มาจากการสมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างมีลักษณะดังรูปที่ 47 และเปรียบเทียบกับกำลังขาออกเมื่อมีการรวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคิดรวมในอัลกอริทึมการติดตามกำลังสูงสุดในปีการศึกษา 2563



รูป 47: กำลังข้าออกเมื่ออัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด กรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณ และกรณีที่ไม่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณ

จากรูป 47 พบร่วมกับกรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณด้วย จะได้กำลังข้าออกที่สูงกว่า กรณีที่ไม่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณ กำลังข้าออกสูงสุดค่าอยอดลูกแรกเพิ่มจาก 0.95 วัตต์ เป็น 1.47 วัตต์ และกำลังข้าออกสูงสุดค่าอยอดลูกที่สองเพิ่มจาก 0.77 วัตต์ เป็น 1.18 วัตต์ จึงสรุปได้ อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด กรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณ สามารถทำให้ได้กำลังข้าออกมีค่าที่สูงขึ้นจริง «< HEAD เนื่องจาก พิจารณาสมการ (52) และ (53) จะมีพจน์อิมพีเดนซ์ Z_{eq} ซึ่งเท่ากับ $\frac{2\pi}{aDl} // s \frac{2\pi}{akl} // \frac{1}{s(\frac{aml}{2\pi} + J_1 + J_2)}$ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มาจากระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานเพิ่มเข้ามา นอกจากหนึ่งจากแคร์อิมพีเดนซ์ของขาด漉ดสเตเดอร์ของเครื่องจักรกลซึ่งโครงน้ำสเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้แบบจำลองมีความสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้ได้กำลังข้าออกสูงขึ้นเมื่อเทียบกับปีการศึกษา 2563

=====

»»> b551bf608a2ea44aa249f0deed8bfc1f01d36422

4 บทสรุป

4.1 สรุปผลการดำเนินการ

4.1.1 การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการมอดูลเตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง

จนถึงปัจจุบัน ได้มีการออกแบบอัลกอริทึมการลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการมอดูลเตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง บน MATLAB™/Simulink™ และได้มีสร้างโมเดลของอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อที่จะทดสอบระบบทั้งหมด นั่นคือ

- โมเดลแบบจำลองของแบตเตอรี่
- โมเดลแบบจำลองของระบบเชิงกล
- โมเดลแบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร
- โมเดลแบบจำลองระบบฝังตัว
- โมเดลแบบจำลองบอร์ดอินเวอร์เตอร์

และได้มีการทดสอบ และทวนสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ และอัลกอริทึมในการลดกำลังสูญเสีย พบร้า สามารถทำงานและตัดสินใจได้ถูกต้อง

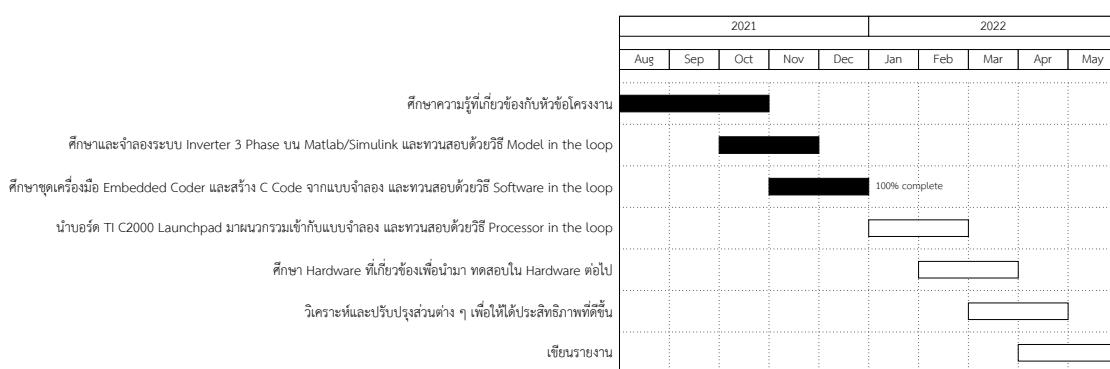
4.1.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด

จากการที่ได้ศึกษาการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน การเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า เครื่องจักรกลซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร และหลักการติดตามจุดทำงานสูงสุด ทำให้ได้ว่าจะรวมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน ใช้อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุดได้ และสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

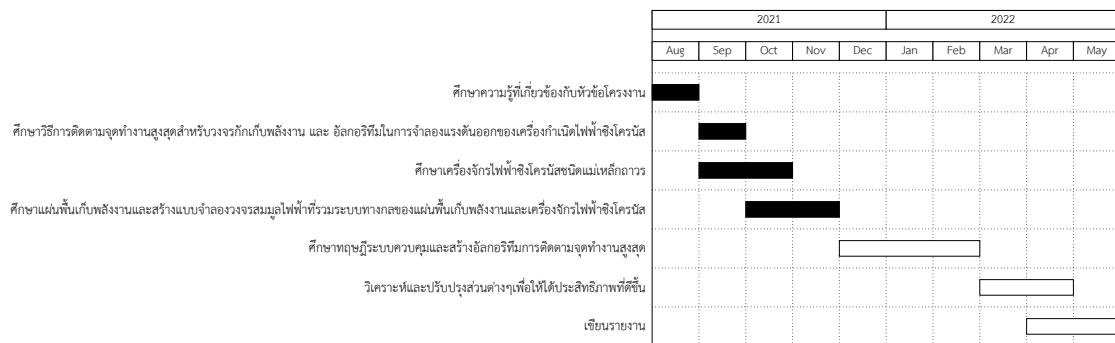
จากการทดสอบอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุดซึ่งมีการรวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink พบร้า กรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณด้วย จะได้กำลังขาออกที่สูงกว่า กรณีที่ไม่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณที่ทำในปีการศึกษา 2563 จึงสรุปได้ อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด กรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณ สามารถทำให้ได้กำลังขาออกมีค่าที่สูงขึ้นจริง

4.2 แผนการดำเนินงาน

ในรายงานฉบับนี้ มีแผนการดำเนินงานแยกเป็นของผู้จัดทำแต่ละคน คือ นายณัฐพล กับแก้ว ซึ่งมีแผนการดำเนินงานดังแสดงในรูปที่ 48 และของนายสันติ ว่องประเสริฐ ซึ่งมีแผนการดำเนินงานดังแสดงในรูปที่ 49



รูป 48: Gantt chart ของนายณัฐพล กับแก้ว



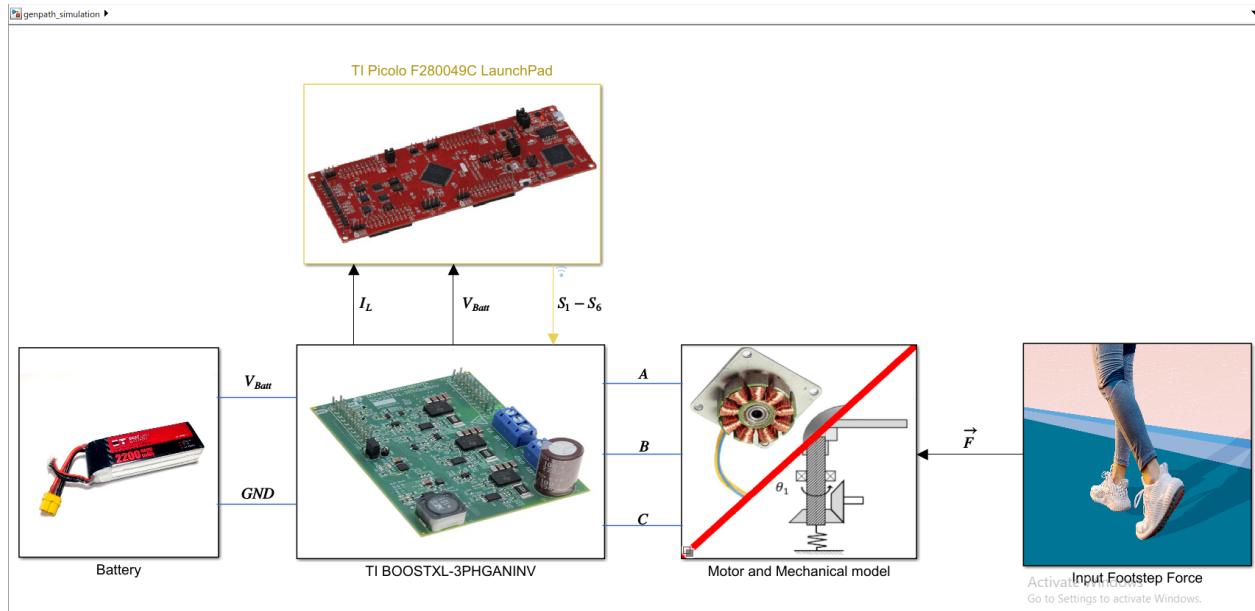
รูป 49: Gantt chart ของนายสันติ ว่องประเสริฐ

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. U-viengchai, “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].

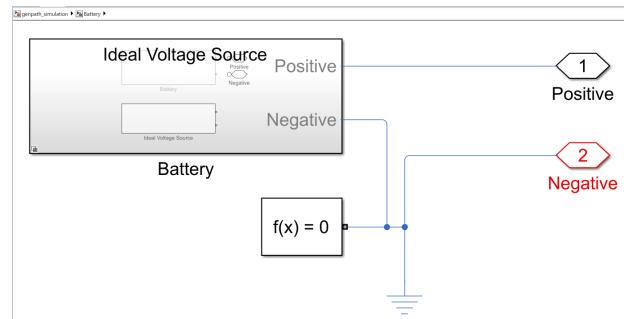
6 ภาคผนวก

6.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบพลวัตของระบบ

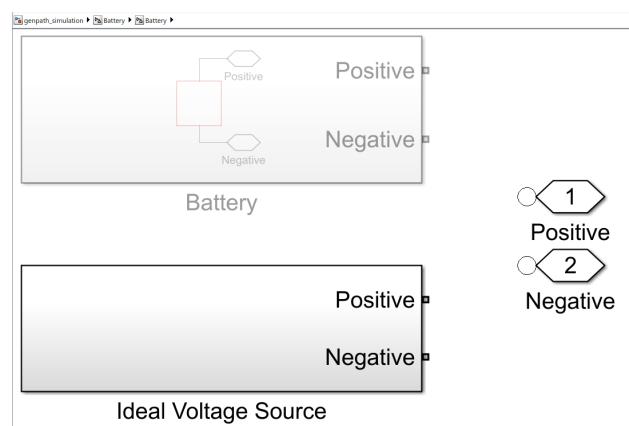


รูป 50: ขั้นที่ 1: ภาพรวมของระบบพลวัตทั้งหมด

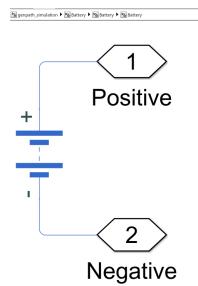
6.1.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแบตเตอรี่



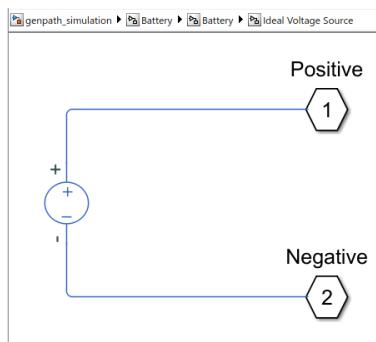
รูป 51: ขั้นที่ 2: แบตเตอรี่ และ Solver Configuration



รูป 52: ขั้นที่ 3: Variant Model ของแบตเตอรี่

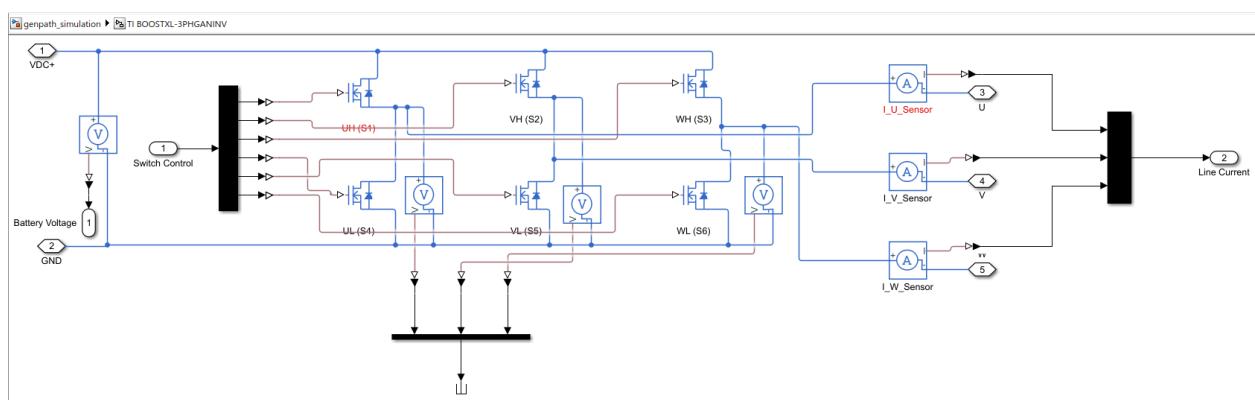


รูป 53: ขั้นที่ 4: ภายใน Variant Model ของแบตเตอรี่



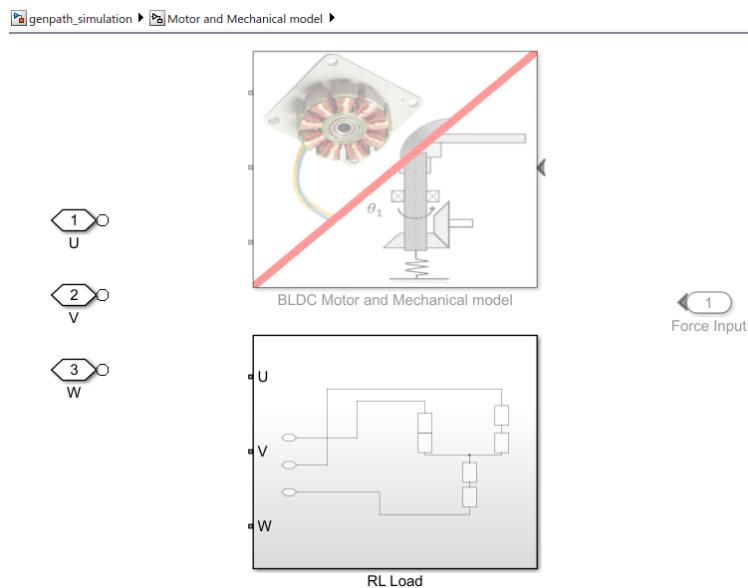
รูป 54: ขั้นที่ 4: ภายใน Variant Model ของแหล่งจ่ายไฟตรงในอุดมคติ

6.1.2 Simulink Model ในส่วนของการจำลองบอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI BOOSTXL-3PHGANINV

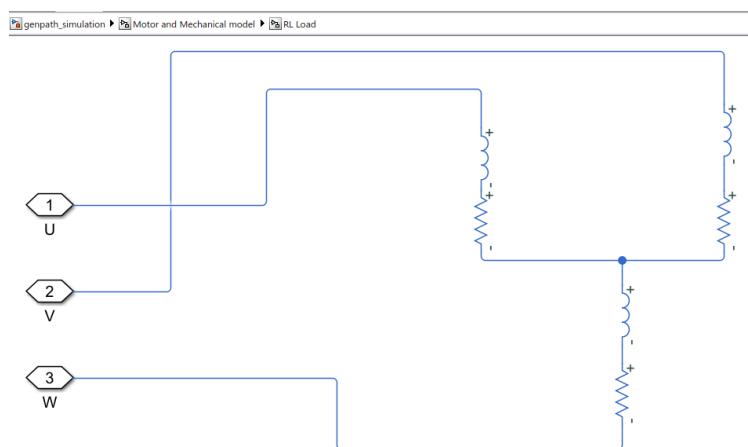


รูป 55: ขั้นที่ 2: บอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI BOOSTXL-3PHGANINV

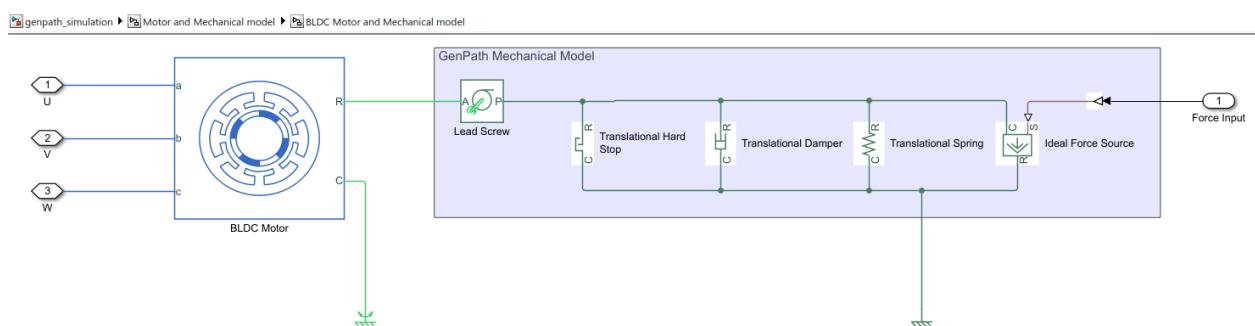
6.1.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบเชิงกลและมอเตอร์ชิ้งโครนัสแม่เหล็กถาวร



รูป 56: ขั้นที่ 2: Variant Model ของมอเตอร์และระบบเชิงกล กับโหลดแบบตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

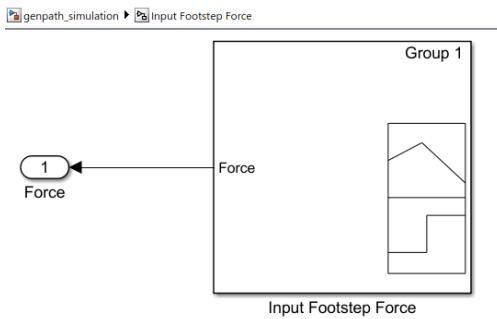


รูป 57: ขั้นที่ 3: ภายใน Variant Model ของโหลดแบบตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

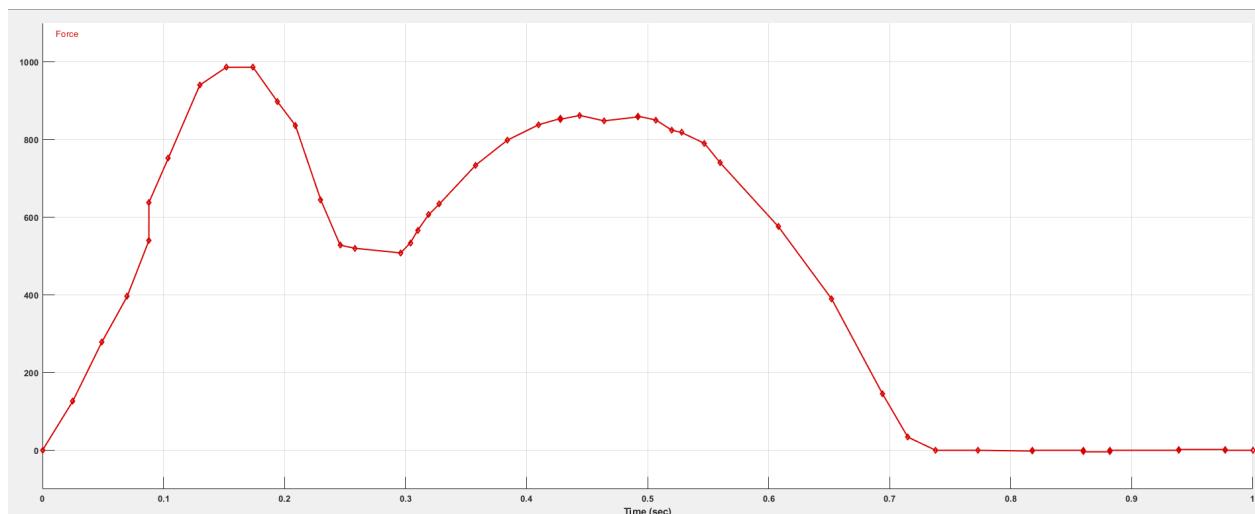


รูป 58: ขั้นที่ 3: ภายใน Variant Model ของระบบเชิงกลและมอเตอร์ชิ้งโครนัสแม่เหล็กถาวร

6.1.4 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแรงที่เท้าเหยียบแผ่นพื้น

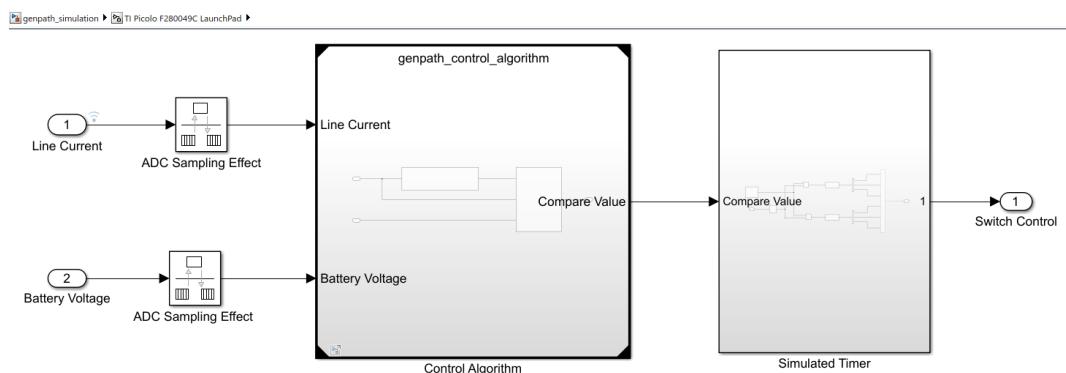


รูป 59: ขั้นที่ 2: แบบจำลองแรงที่มาจากเท้าเหยียบแผ่นพื้น

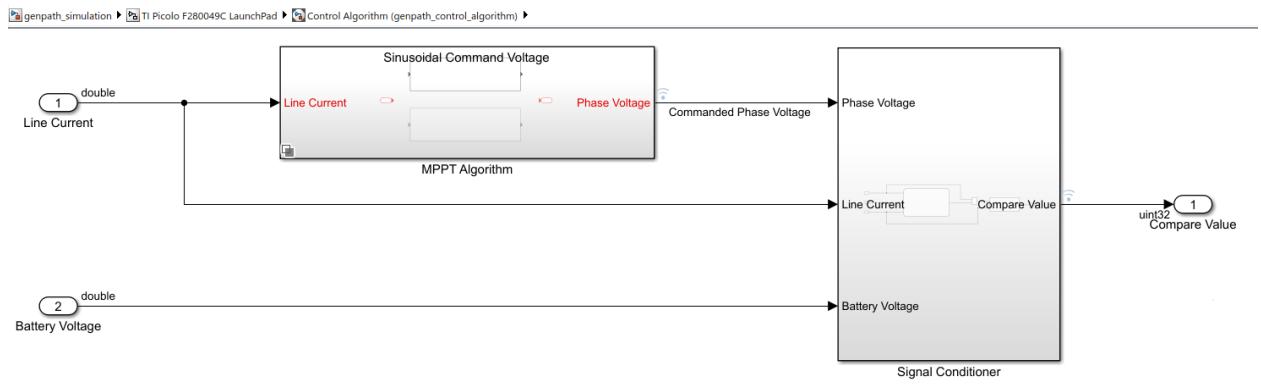


รูป 60: กราฟแสดงสัญญาณแรงที่มาจากเท้าเหยียบ

6.2 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมที่ทำงานบนระบบผังตัว TI Picolo F280049C LaunchPad

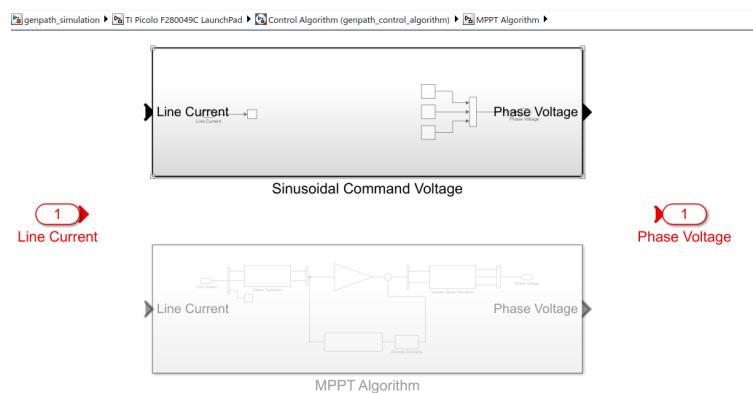


รูป 61: ขั้นที่ 2: ภายใน Subsystem ของแบบจำลองระบบผังตัว

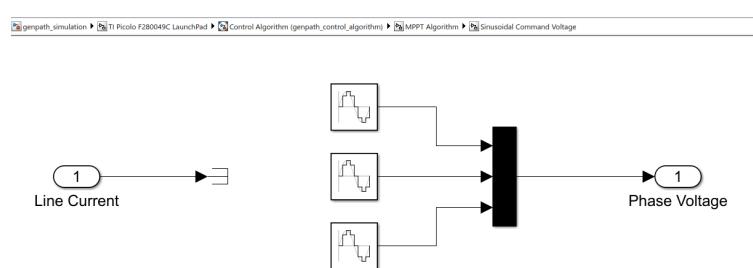


รูป 62: ชั้นที่ 3: ภายใน Subsystem ของอัลกอริทึมที่ทำงานอยู่บนระบบฝังตัว

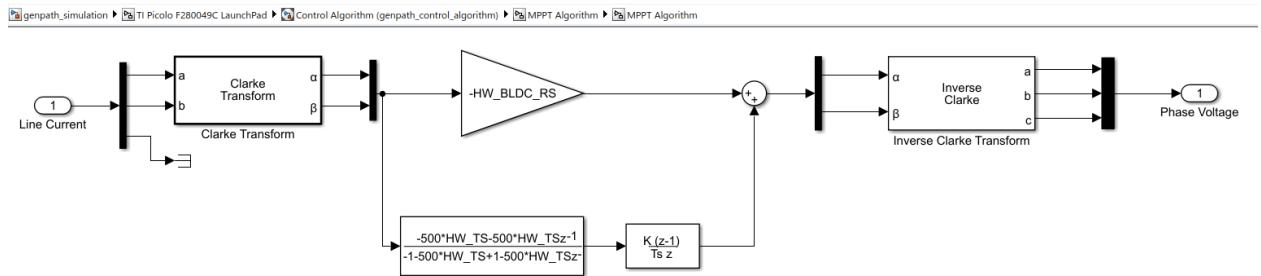
6.2.1 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูป 63: ชั้นที่ 4: Variant Model ของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

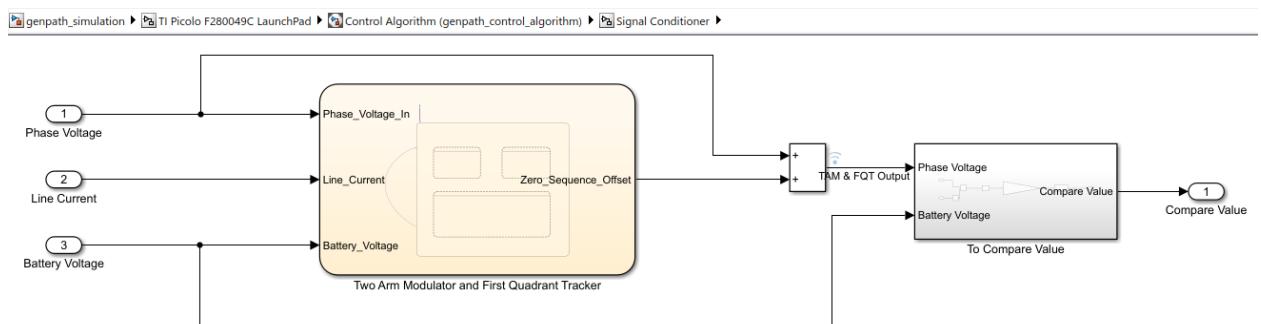


รูป 64: ชั้นที่ 5: ภายใน Variant Model ของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่สร้างสัญญาณคำสั่งแบบไบนารี

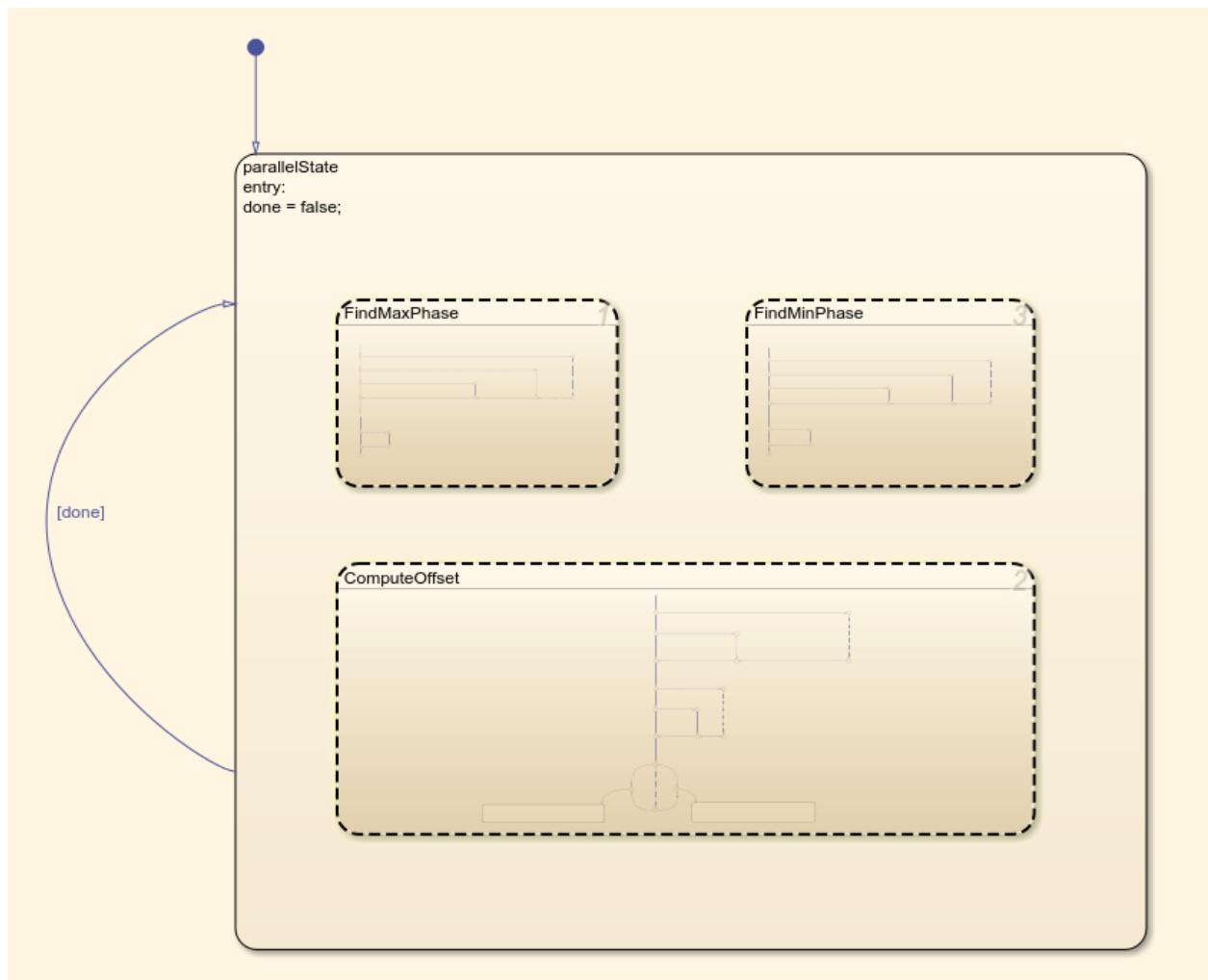


รูป 65: ขั้นที่ 5: อัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

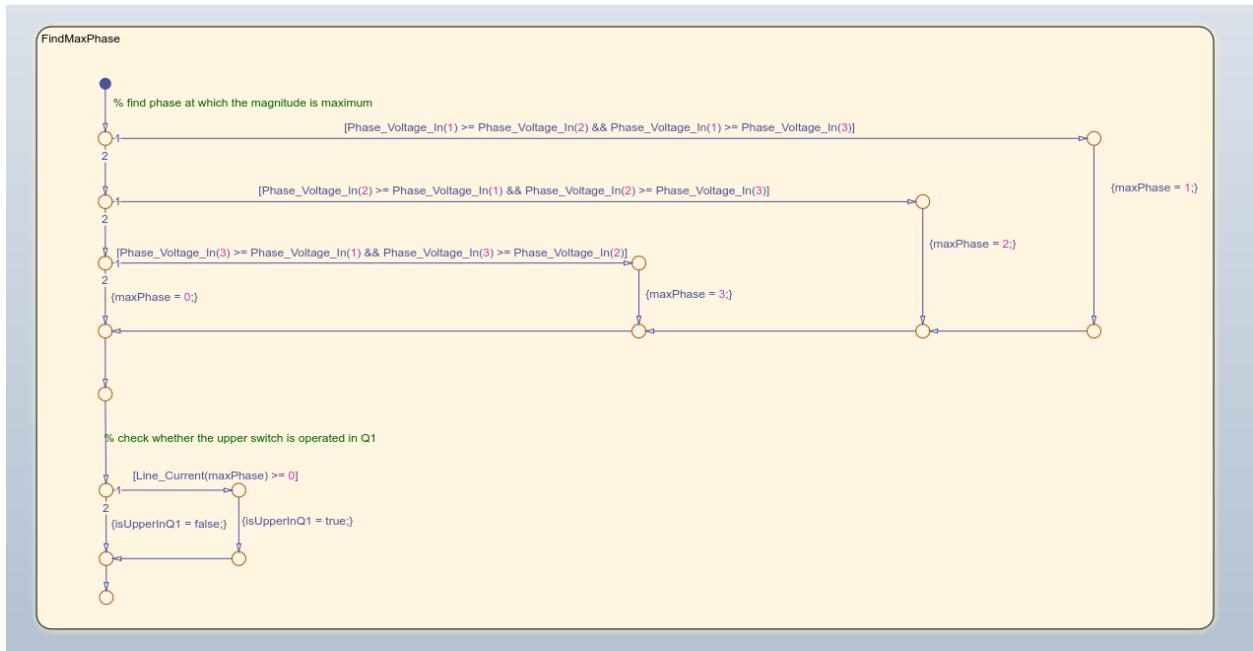
6.2.2 Simulink Model ในส่วนของการปรับปรุงสัญญาณ



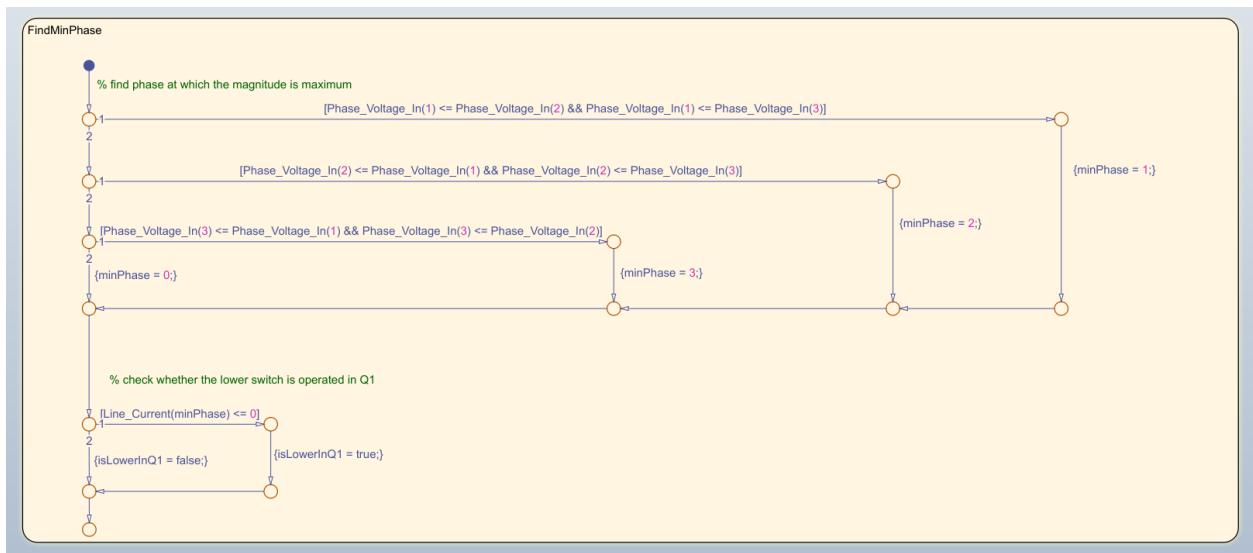
รูป 66: ขั้นที่ 4: ภายใน Subsystem ของระบบปรับปรุงสัญญาณ



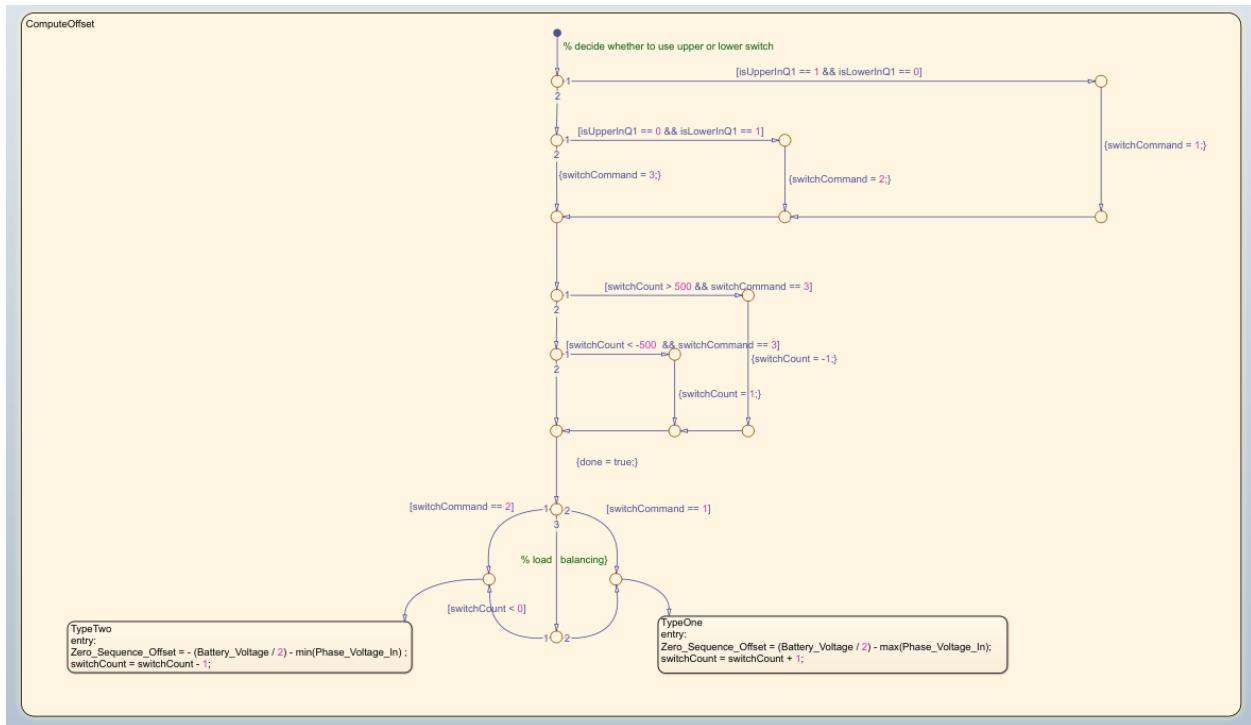
รูป 67: ขั้นที่ 5: ภายใน Stateflow chart ของตัวมอดูลเตตแบบสองแขน และติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง



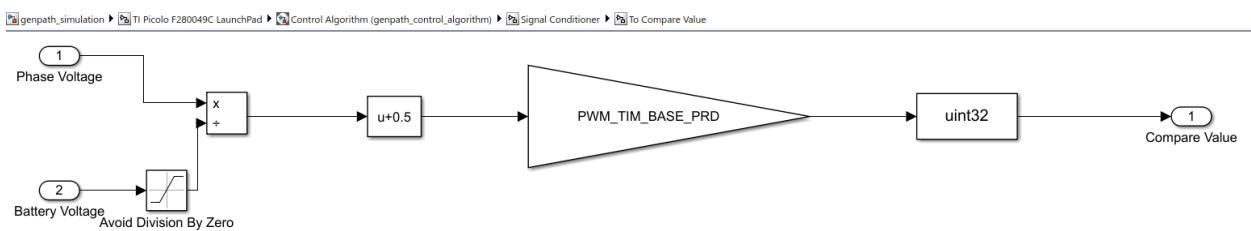
รูป 68: ขั้นที่ 6: ภายใน Subchart ที่ใช้ในการหาเฟสที่มีแรงดันคำสั่งมากที่สุด



รูป 69: ขั้นที่ 6: ภายใน Subchart ที่ใช้ในการหาเฟสที่มีแรงดันคำสั่งน้อยที่สุด

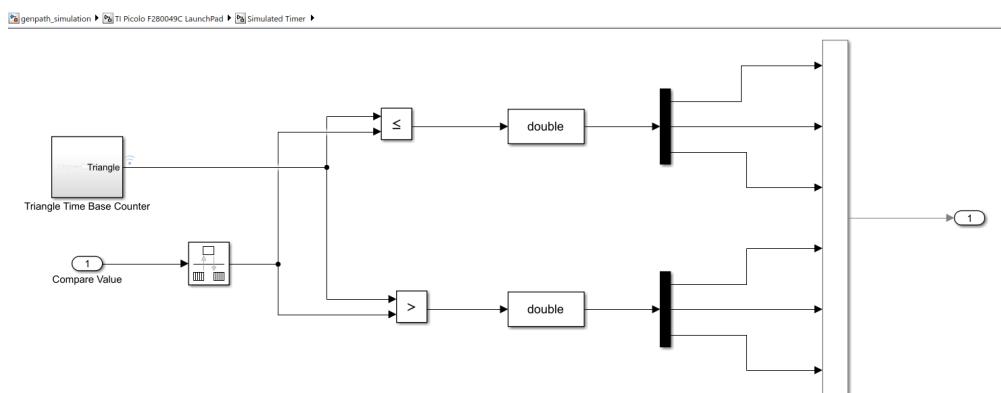


รูป 70: ขั้นที่ 6: ภายใน Subchart ที่ใช้ในการคำนวณแรงดันลำดับศูนย์



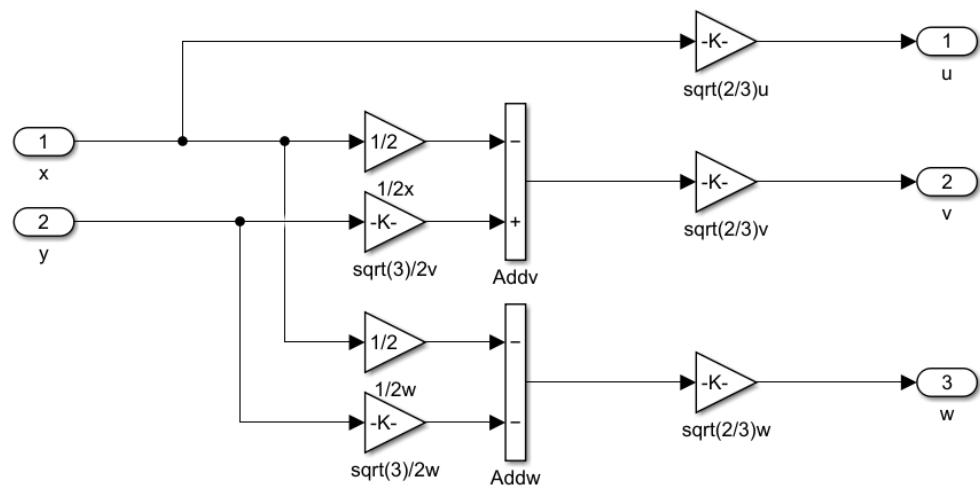
รูป 71: ขั้นที่ 5: ส่วนของการสเกลแรงดันคำสั่งให้เป็นค่าที่ป้อนให้ตัวตั้งเวลาของระบบผังตัว

6.2.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองอุปกรณ์รอบข้างของระบบผังตัว



รูป 72: ขั้นที่ 3: การจำลองตัวตั้งเวลาของระบบผังตัว

6.3 Simulink model ของการแปลงผกผันของคลาร์ก(Inverse Clarke's Transformation)



รูป 73: การแปลงผกผันของคลาร์ก(Inverse Clarke's Transformation)