

ข้อเสนอโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า วิชา 2102490

อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานชนิดเครื่องจักรกลไฟฟ้า

Power Electronics for Electromechanical Energy-Harvesting System

นายณัฐพล กابแก้ว เลขประจำตัว 6130176521

นายสันติ วงศ์ว่องประเสริฐ เลขประจำตัว 6130553421

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกุhin

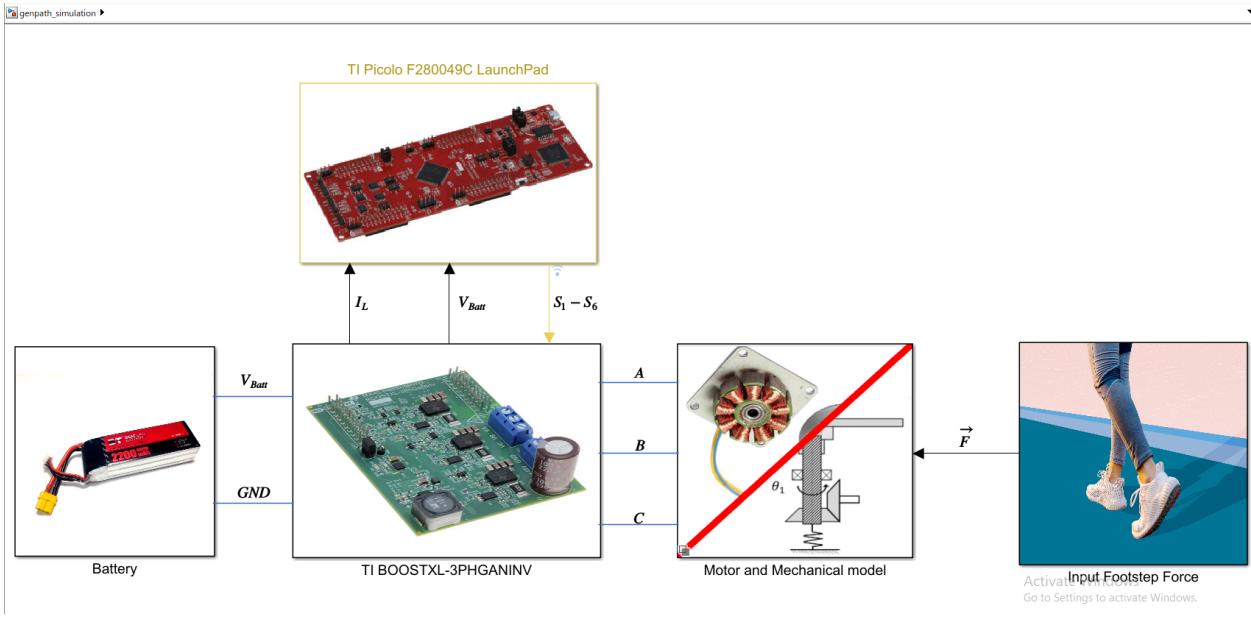
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

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 การmodุเลตความกว้างพัลซ์แบบใช้สัญญาณพาหะ และ อินเวอร์เตอร์โหมดแรงดันแบบสามเฟส	3
2.1.2 กำลังสูญเสียในสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์	4
2.1.3 การนำกระแสงในจตุภาคที่ 3 ของทรานซิสเตอร์นานไฟฟ้าแกลเลียม 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	16
3 ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น	19
3.1 การทดสอบอัลกอริทึมการmodุเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง	19
3.1.1 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับความถี่คำสั่งของอินเวอร์เตอร์	20
3.1.2 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับค่าความหนี้น้ำของไฟLED	21
3.1.3 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับค่าขนาดของแรงดันคำสั่งของอินเวอร์เตอร์	23
3.2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้า	24
3.3 ผลการจำลองของแบบจำลองทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้า บนโปรแกรม MATLAB/Simulink	27
4 บทสรุป	35
4.1 สรุปผลการดำเนินการ	35
4.2 แผนการดำเนินงาน	35
4.3 ข้อเสนอแนะ	36
5 เอกสารอ้างอิง	36
6 ภาคผนวก	37
6.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบพลังงาน	37
6.1.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแบบเตอร์รี	37
6.1.2 Simulink Model ในส่วนของการจำลองบอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI BOOSTXL-3PHGANINV	39
6.1.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบเชิงกลและมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กการ	39
6.1.4 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแรงที่ท้า夷ียบแผ่นพื้น	40
6.2 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมที่ทำงานบนระบบฝึกหัด TI Picolo F280049C LaunchPad	41
6.2.1 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด	42
6.2.2 Simulink Model ในส่วนของการปรับปรุงสัญญาณ	43
6.2.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองอุปกรณ์รอบข้างของระบบฝึกหัด	45
6.3 Simulink model ของแบบจำลองของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และอัลกอริทึมการติดตามจุดสูงสุด	46



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

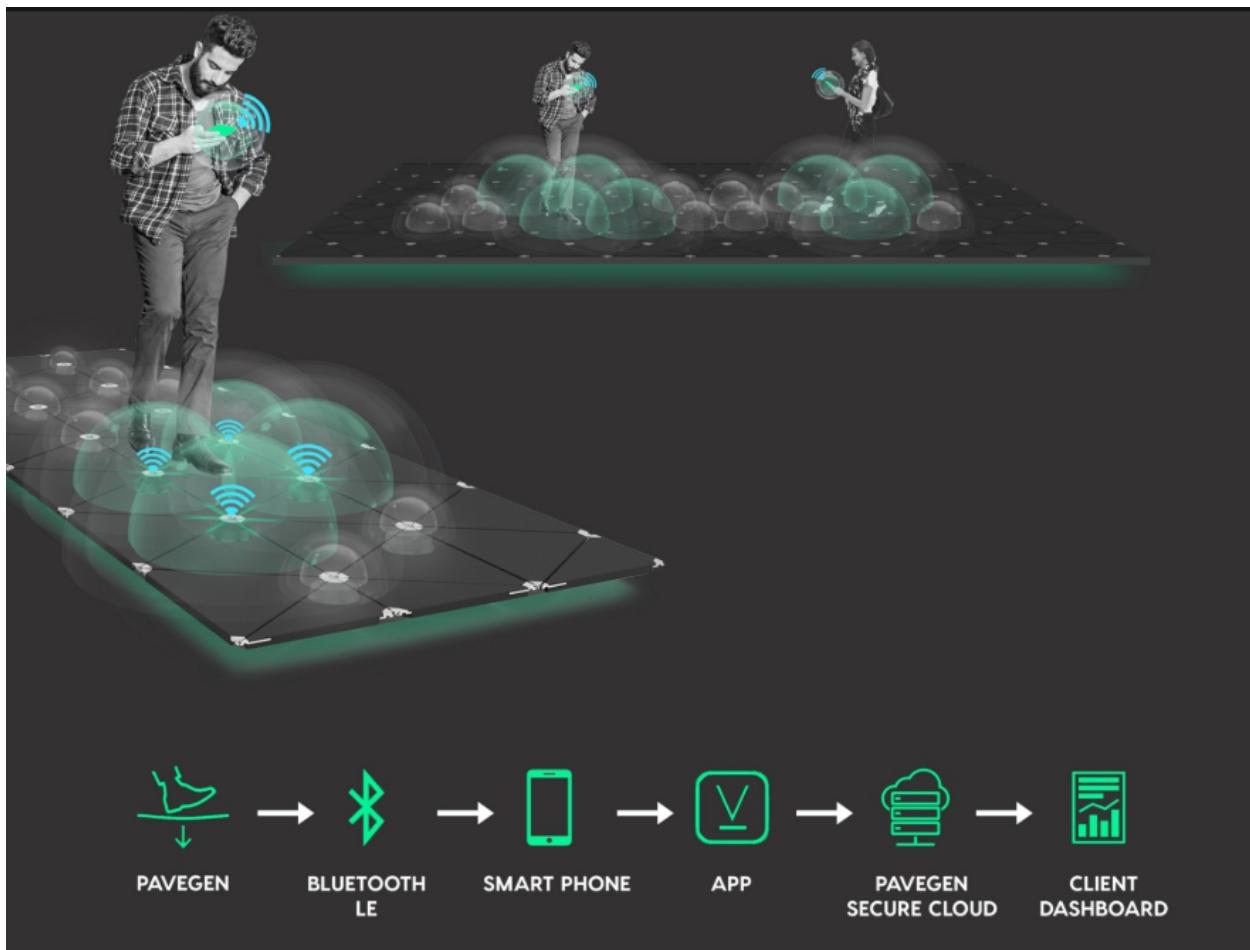
การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวของมนุษย์นั้น เป็นเรื่องที่น่าสนใจ สามารถนำมาทำให้เกิดขึ้นจริงได้ เช่นในกรณีของแผ่นพื้นเก็บพลังงานนั้น ได้ถูกนำมาสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถสร้างรายได้ และได้มีการติดตั้งใช้งานแล้วในหลาย ๆ ที่ เช่นกรณีตัวอย่างของ Pavegen™ Pavegen™ เป็นบริษัท Startup ที่สร้างแผ่นพื้นเก็บพลังงาน 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

- เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสร้างแบบจำลองผลลัพธ์ของระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยโปรแกรม 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 ซึ่งในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างแบบแม่เหล็กการนั้นอาศัยการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนโดยไฟฟ้ากระแสสลับ อินเวอร์เตอร์ จึงเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างแบบแม่เหล็กการด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับในโครงงานฉบับนี้ได้นำเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างแบบแม่เหล็กการสามเฟส มาเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน โดยจะเก็บพลังงานที่ผลิตได้ไว้กับแบตเตอรี่ ในโครงงานฉบับนี้ จึงเลือกใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีพอโลไดต์ตั้งรูปที่ 4

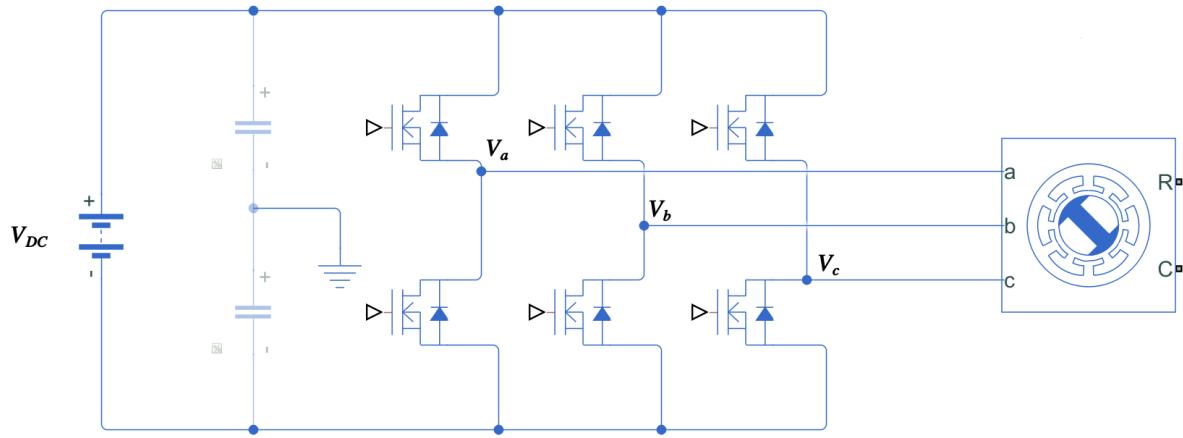
อินเวอร์เตอร์ที่พอลอยีที่ได้นำเสนอมาข้างต้น สามารถสร้างแรงดันออกที่แตกต่างกันได้เพียงแค่ 2 ค่าเท่านั้นคือ

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

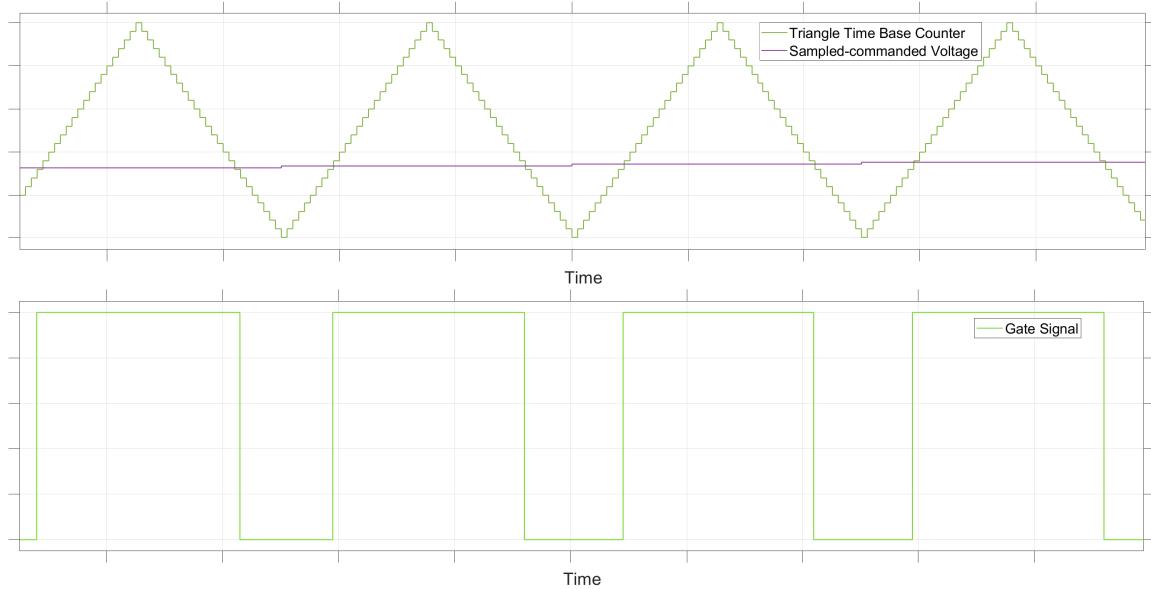
โดยที่ V_t เป็นแรงดันที่ข้ออกของอินเวอร์เตอร์ และถ้าหากพิจารณาให้กับกลางบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นจุดอ้างอิงแรงดัน จะได้ว่า

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

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

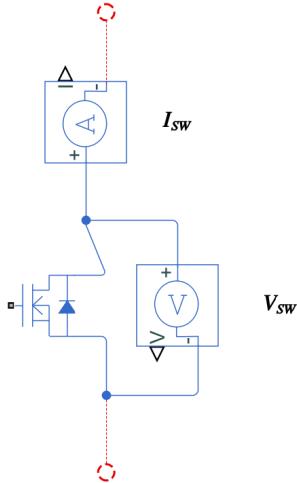
จากรูปข้างต้น จะเห็นได้ว่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณขั้บนำนั้น เปลี่ยนไปตามขนาดของสัญญาณคำสั่ง และสัญญาณที่จะนำมาเปรียบเทียบนั้น จะเป็นสัญญาณที่ถูกสุ่มตัวอย่างแล้วคงค่า (Sample and Hold) เพราะว่า อัลกอริทึมการ模ดูแลตที่เลือกใช้ในโครงการฉบับนี้นั้น เป็นการคำนวนระบบฟังตัว ซึ่งเป็นการประมวลผลในโดเมนดิจิทัล

2.1.2 กำลังสูญเสียในสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

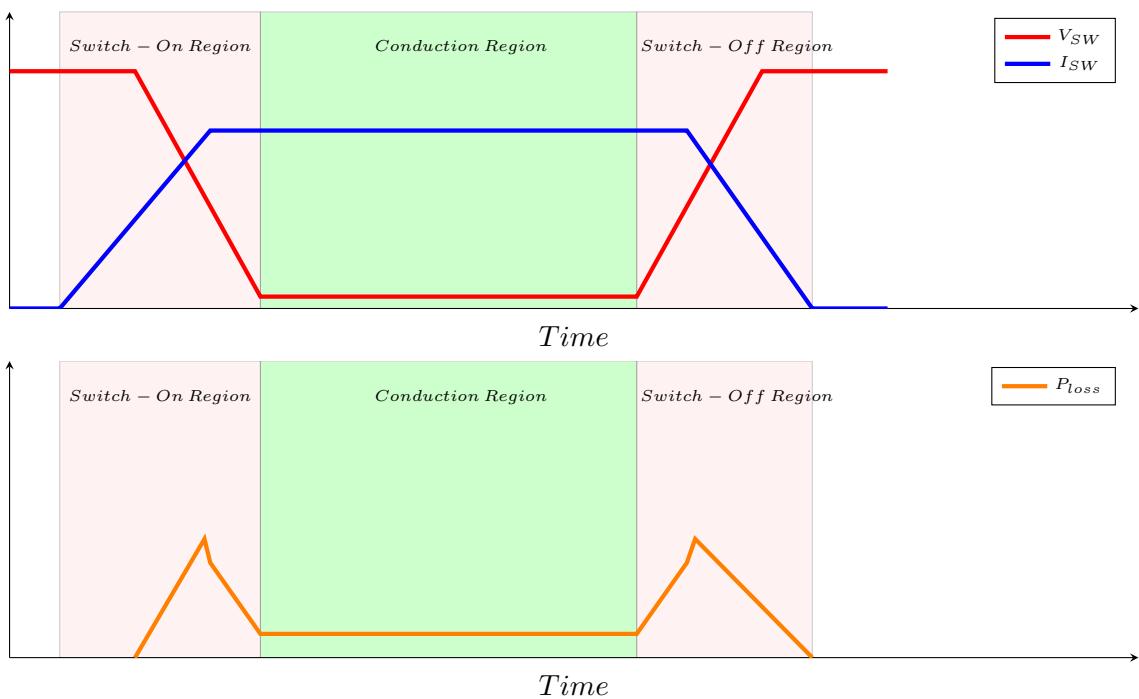
กำลังสูญเสียในสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์มีอยู่ด้วยกันสองประเภท คือ กำลังสูญเสียระหว่างสวิตช์ (Switching Loss) และกำลังสูญเสียระหว่างนำกระแส (Conduction Loss)

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

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

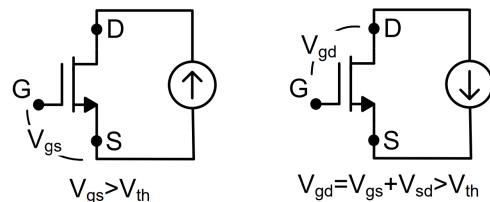
กำลังสูญเสียขณะนำกระแสนั้น ขึ้นอยู่กับว่าในขณะนำกระแสนั้นมีแรงดันต่อกคร่อมสวิตช์มากแค่ไหน ถ้าหากแรงดันต่อกคร่อมสวิตช์มาก ก็จะทำให้กำลังสูญเสียขณะนำกระแสมากขึ้นตามมา

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

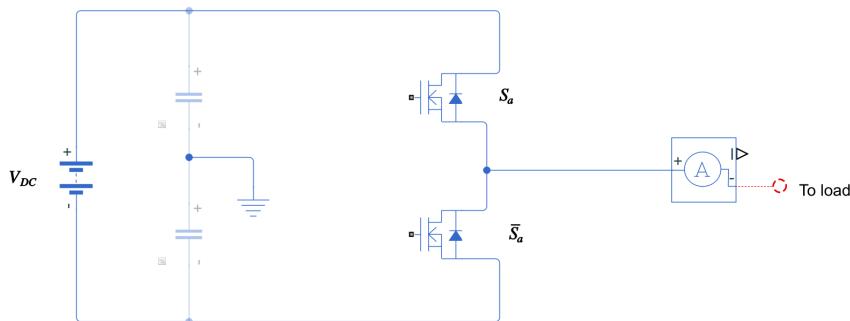
เนื่องจากโครงสร้างที่ไม่เหมือนกันของทรานซิสเตอร์แบบแกน ทำให้การนำกระแสในจตุภาคที่สามของทรานซิสเตอร์แบบแกนนั้นแตกต่างไปจากทรานซิสเตอร์แบบชิลิค่อน [3] คือ การนำกระแสผ่านบอดีไดโอด

เงื่อนไขที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์แกนนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า (Forward) และย้อนกลับ (Reverse) เป็นไปดังรูปที่ 8 คือ



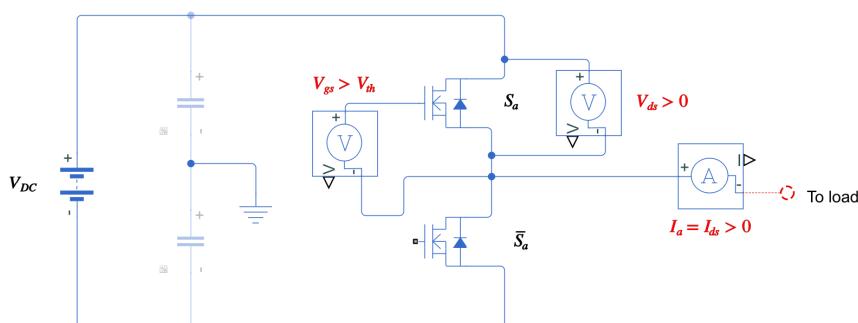
รูป 8: เงื่อนไขที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์แกนนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า และย้อนกลับ

ถ้าหากพิจารณาตัวอย่างที่เกิดขึ้นจริงในอินเวอร์เตอร์เพื่อให้เห็นภาพพจน์ชัดเจนขึ้น ตามรูปวงจรของอินเวอร์เตอร์ ที่ตัดมาพิจารณาเฉพาะหนึ่งเฟส ตามรูปที่ 9



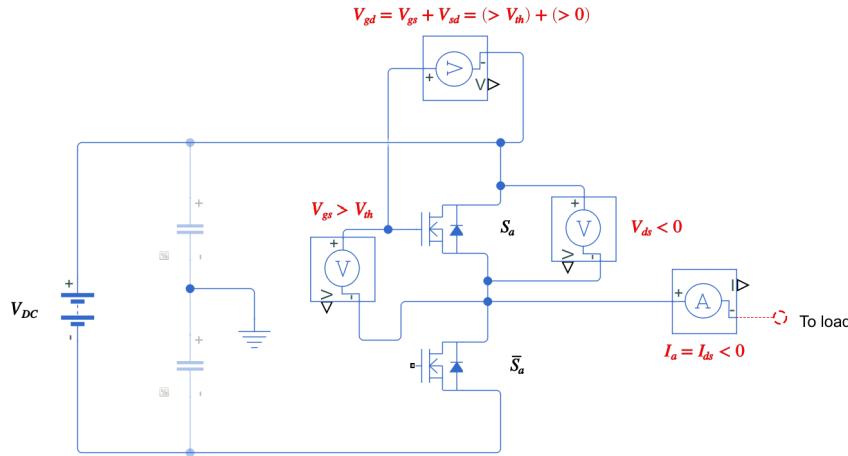
รูป 9: กรณีตัวอย่างการนำกระแสที่เกิดขึ้นจริงในอินเวอร์เตอร์

เรา假定ให้สวิตช์ S_a เป็นสวิตช์ที่เราสนใจ โดยถ้าหากเราขับนำสวิตช์ให้สวิตช์นำกระแส (On) นั่นคือ เราขับนำสัญญาณขา $V_{gs} > V_{th}$ แล้วถ้าหากโหลดที่ต่ออยู่กับขาอิอร์สของสวิตช์ S_a ดึงกระแสออกไปจากอินเวอร์เตอร์ นั่นคือ $I_a > 0$ จะทำให้ แรงดันตกครอมขาเดرنของสวิตช์ 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: $V_{gd} > V_{th}, I_{ds} < 0$

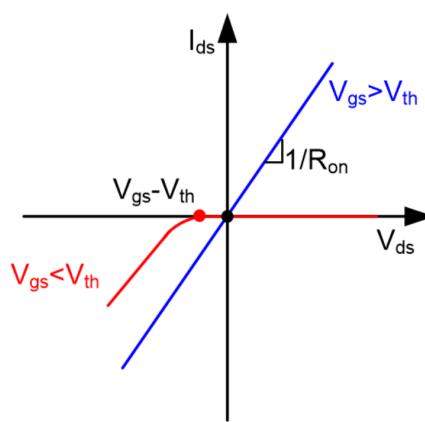
เราจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันขณะนำกระแสไปข้างหน้าได้โดย

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

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 ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ที่ต่ออยู่กับบัสแรงดันไฟตรงที่ขั้วนลจากพอโลลีบีของอินเวอร์เตอร์ที่เราเลือกໃใช้ในโครงงานฉบับนี้ 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

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

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

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

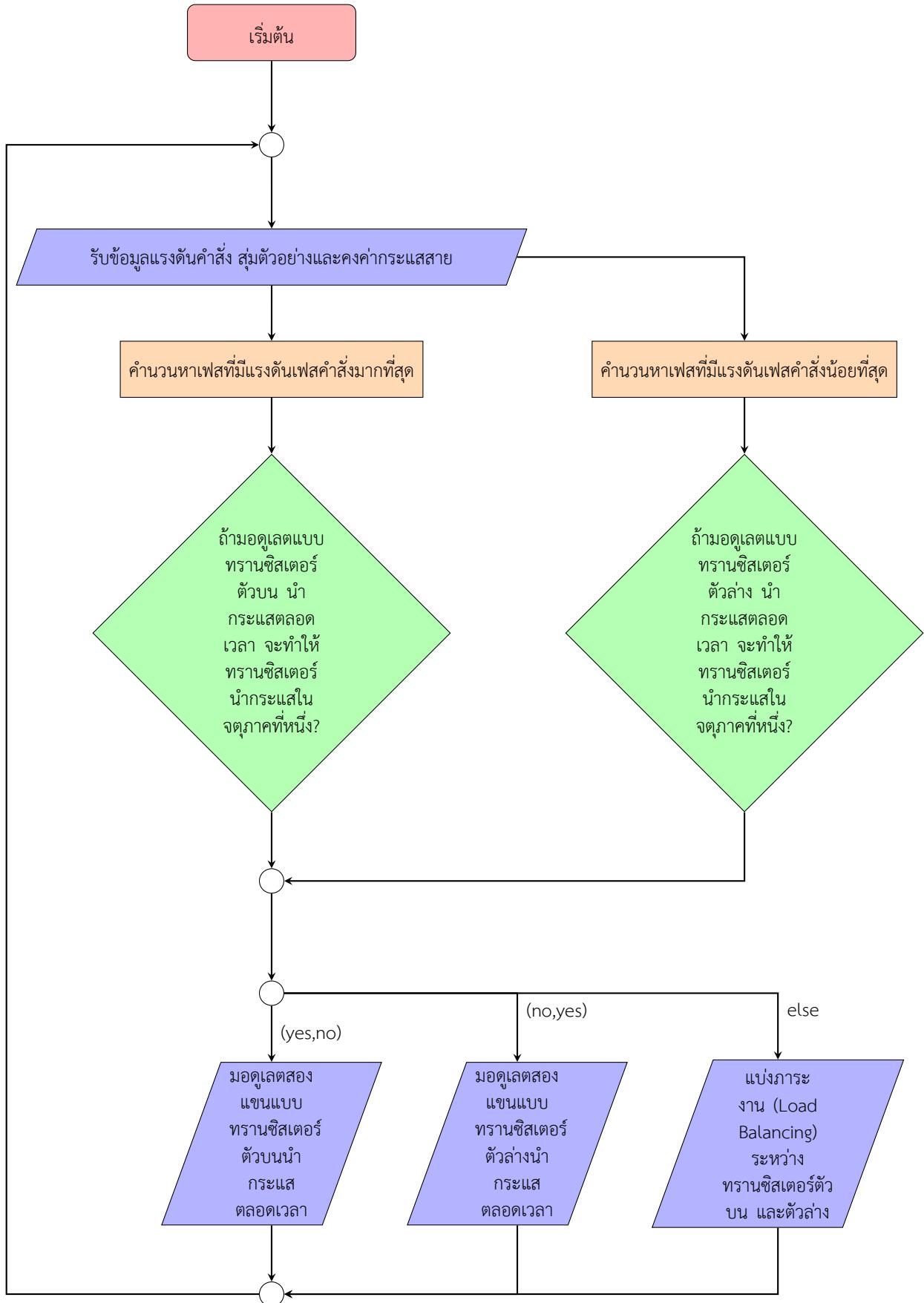
ดังนั้น เรายสามารถเลือกแรงดันลำดับศูนย์ที่จะเพิ่มให้กับแรงดันไฟคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ โดยมีเป้าหมายคือ ทำให้แรงดันคำสั่งในไฟสูงเท่ากับแรงดันของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเท่ากับแรงดันบวก หรือลบทองบัสแรงดันกระแสตรง เพื่อที่จะทำให้แขนของการมอดูเลตแขนนี้ปิด หรือเปิดตลอดเวลา นั่นคือ

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

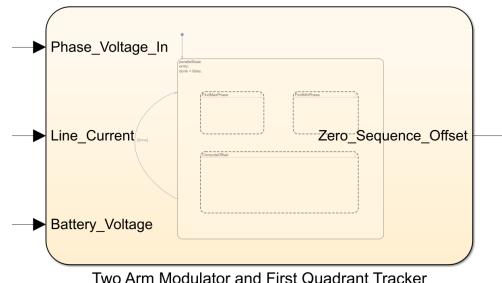
ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ตัวบนกำลังปิดตลอดเวลา ทรานซิสเตอร์ตัวล่าง ก็จะปิดตลอดเวลาด้วย การให้ทรานซิสเตอร์แขนใดแขนหนึ่งเปิด หรือปิดตลอดเวลา จะทำให้ลดจำนวนครั้งในการสวิตช์ให้น้อยลงเท่ากับจำนวนครั้งในการสวิตช์ที่ได้กำหนดไว้ในรูปที่ 13 ซึ่งจากผังงานที่ได้นำเสนอไปข้างต้น เรายังสามารถนำไปสร้างเป็นแพลตฟอร์ม Stateflow™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

2.1.5 การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการมอดูเลตแบบสองแขนด้วยการติดตามการทำงานในจตุภาคที่ 1

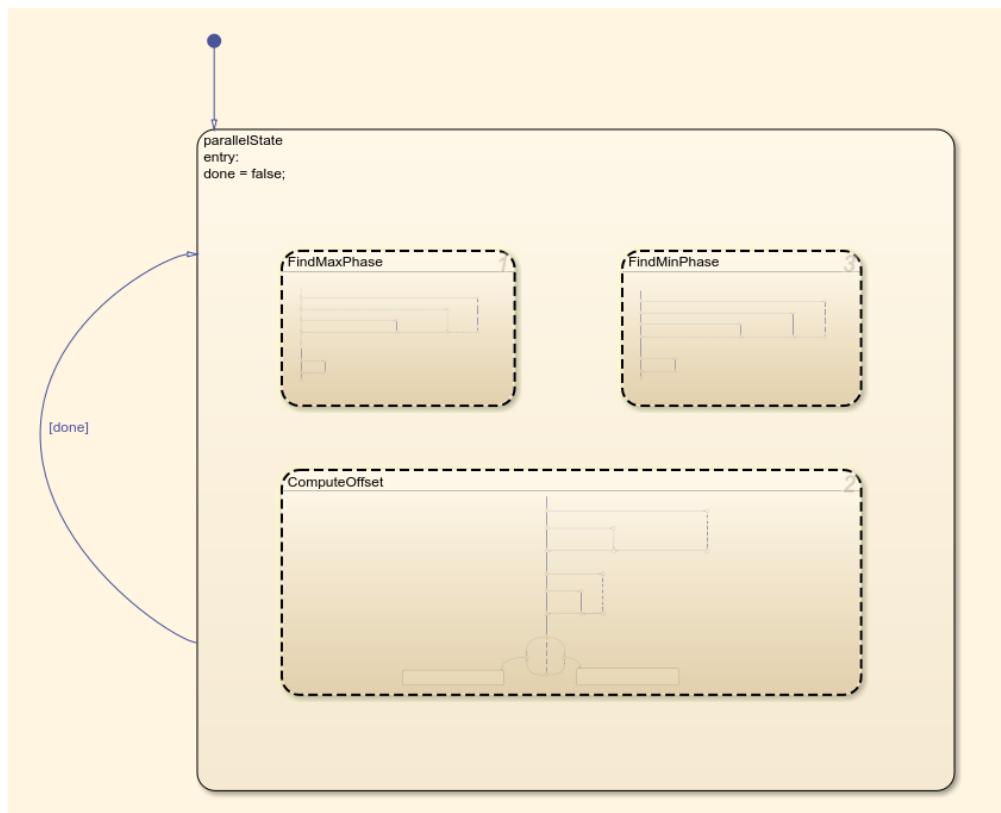
จากผลลัพธ์ที่ได้อภิปรายมาในส่วนที่แล้ว เราได้ทราบว่า เรายังต้องการลดจำนวนครั้งในการสวิตช์ให้ต่ำที่สุด แต่ในขณะเดียวกัน ต้องคงความแม่นยำของแรงดันไฟคำสั่งไว้ได้ ดังนั้น เราจึงต้องหาวิธีที่จะลดจำนวนครั้งในการสวิตช์โดยไม่สacrifice ความแม่นยำของแรงดันไฟคำสั่ง ให้ได้มากที่สุด นั่นคือ การหลีกเลี่ยงการทำงานในจตุภาคที่ 3 สำหรับทรานซิสเตอร์ตัวล่างที่จะนำกระแสกระแสตรงตลอดเวลา โดยจะมีหลักการในการคำนวณค่าแรงดันไฟคำสั่งที่จะบวกเข้าไป เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ ตามผังงานในรูปที่ 13 ซึ่งจากผังงานที่ได้นำเสนอไปข้างต้น เรายังสามารถนำไปสร้างเป็นแพลตฟอร์ม Stateflow™ และ Simulink™ ได้ดังที่แสดงไว้ในรูป



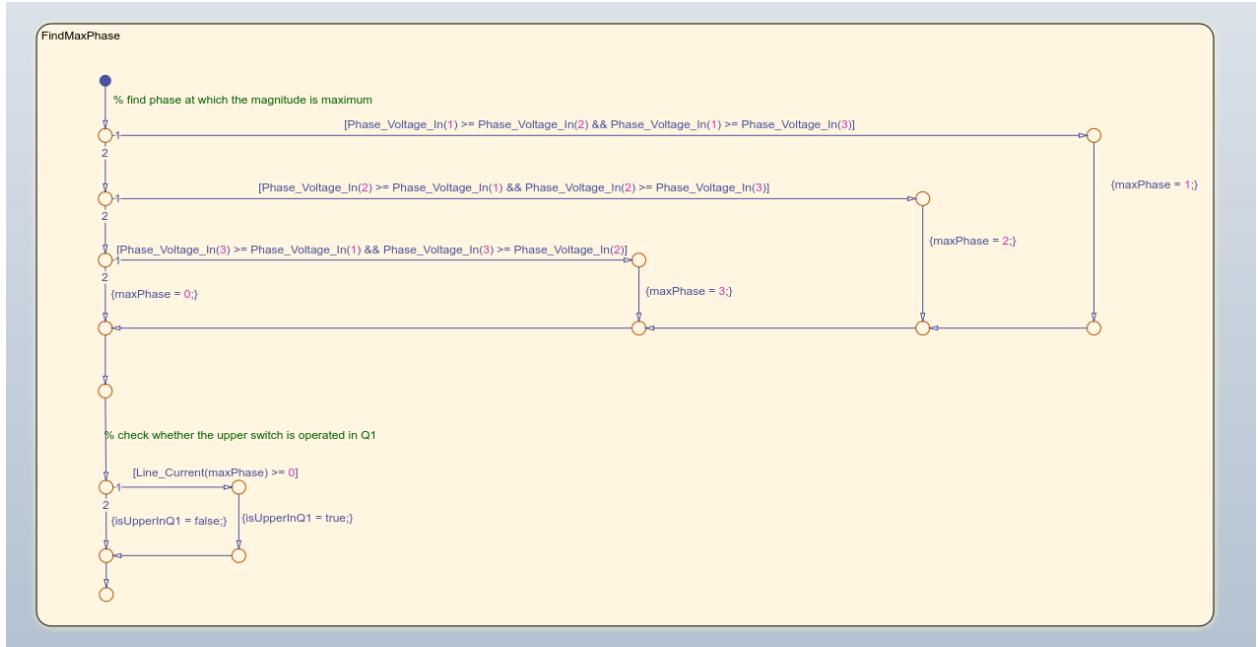
รูป 13: ผังงานของอัลกอริทึมในการคำนวณแรงดันลำดับศูนย์เพื่อติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่งของสวิตช์ที่ถูกมอดูเลตแบบสองแขน



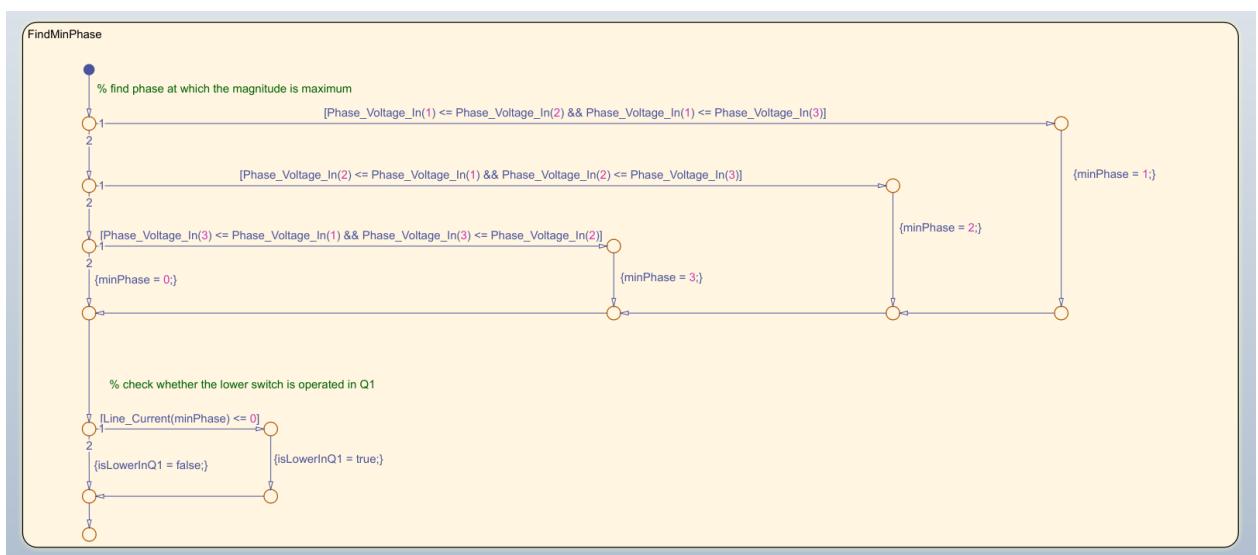
รูป 14: บล็อก Stateflow ของอัลกอริทึมในการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง



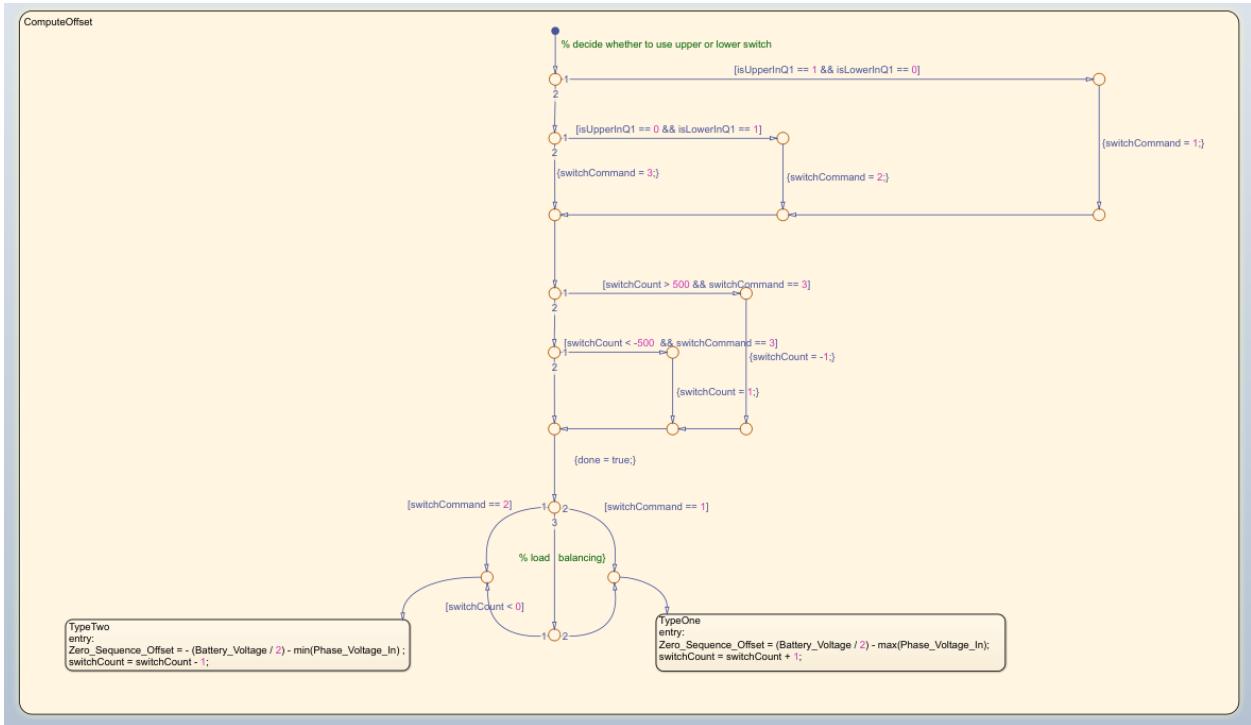
รูป 15: ภาพรวมของ Stateflow chart ของอัลกอริทึมในการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง



รูป 16: Subchart ในส่วนของการหาเฟสที่มีแรงดันค่าสั่งมากที่สุด



รูป 17: Subchart ในส่วนของการหาเฟสที่มีแรงดันค่าสั่งน้อยที่สุด



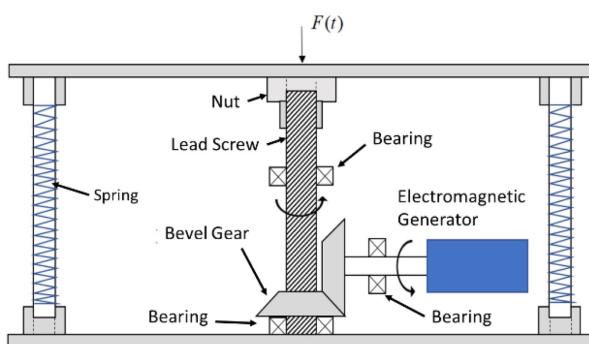
รูป 18: Subchart ในส่วนของการคำนวณแรงดันลำดับศูนย์

2.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking Algorithm; MPPT)

2.2.1 ข้อมูลรายละเอียดและหลักการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

เริ่มแรกต้องศึกษาและเข้าใจหลักการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงานเพื่อทราบความสัมพันธ์ของกลไกและสมการต่างๆ ของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน [2] และเข้าใจผลลัพธ์ของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

แผ่นพื้นเก็บพลังงาน สามารถแปลงพลังงานจนถึงการก้าวเดินของมนุษย์แปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ หลักการทำงาน เริ่มจากการหมุนลูกศรลงบนแผ่นพื้นเก็บพลังงานทำให้เกิดการบุบตัวของแผ่นพื้น แบบเกลี้ยง(nut)จะบีบอัดขึ้นลงไปขับเคลื่อนนำ(lead screw) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่เชิงเส้นไปยังการเคลื่อนที่เชิงหมุน ให้หมุนรอบแนวแกนตั้ง แล้ว เพื่องดออกจาก(bevel gear)ทำหน้าที่เปลี่ยนจากเคลื่อนที่เชิงหมุนแนวแกนตั้งจากเพลาเกลียวนำให้เปลี่ยนทิศทางการหมุนไป 90 องศา หมุนรอบแนวแกน ก่อน เพื่อขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 19



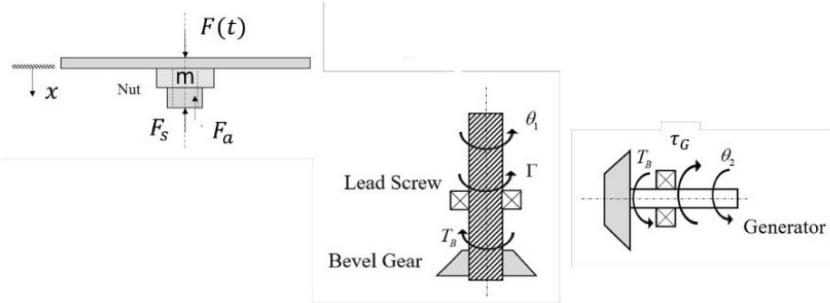
รูป 19: กลไกเกลียวนำ(lead screw) ภายใต้แผ่นเก็บพลังงาน[2]

จากแผนภาพของวัตถุของระบบทางกล ลิต(lit) และ สกรู(screw) ดังรูปที่ 20 สมการต่างๆ ได้มาจากการข้อที่สองของนิวตันและโมเมนตัม เชิงหมุน ซึ่งอธิบายการเคลื่อนที่ของแบบเกลียว 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 โมเมนต์ความเฉื่อยของเกลียวนำ

J_G คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของเพ้อองดอกจาก

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]

อัตราส่วนของเกียร์ของขบวนเพื่อง (gear train) และเพื่องดออกจอก (bevel gear) ที่ใช้ในการส่งการเคลื่อนที่เชิงหมุนจากเกลียวนำ (lead screw) ไปยังโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชิ้งโครนัส มีอัตราส่วนเท่ากับ 1:1 จึงได้ความสัมพันธ์

$$x = \frac{l\theta_1}{2\pi} = \frac{l\theta_2}{2\pi} \quad (22)$$

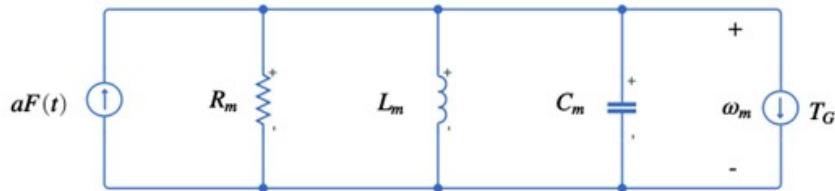
จากรูปที่ (18)-(20) จะพิจารณาจากการเคลื่อนที่เชิงเส้นไปยังการเคลื่อนที่เชิงหมุนโดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ (22) และใช้ความสัมพันธ์ของปริมาณทางกลและไฟฟ้าจากตารางที่ 1 จึงได้สมการดังแสดงด้านล่าง

$$\frac{aml}{2\pi}\ddot{\theta}_1 + \frac{aDl}{2\pi}\dot{\theta}_1 + \frac{akl}{2\pi}\theta_1 + aF_a = aF(t) \quad (23)$$

$$J_1\ddot{\theta}_1 + T_B = aF_a \quad (24)$$

$$J_G\ddot{\theta}_2 + T_G = T_B \quad (25)$$

จากนั้นแปลงระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้า



รูป 21: วงจรไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

โดยที่

$$R_m = \frac{2\pi}{aDl}$$

$$L_m = \frac{2\pi}{akl}$$

$$C_m = \frac{aml}{2\pi} + J_1 + J_2$$

2.2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าชิ้งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

ศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชิ้งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร [5] [6] เพื่อเข้าใจถูกต้องการทำงานและสมการต่างๆที่เกี่ยวข้อง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชิ้งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ซึ่งสามารถนำค่าคงที่ของแรงดึงดูดแม่เหล็กถาวรที่จะเป็นผลลัพธ์ของการสร้างแม่เหล็กชิ้งโครนัสที่สูงกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชิ้งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่ตั้งมาจากการออกแบบที่ต่ำกว่า แต่ต้องตัดต่อแม่เหล็กชิ้งโครนัสที่ต่ำกว่าเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต่ำกว่า

คือ ไม่ต้องใช้แม่เหล็กชิ้งโครนัสที่ต่ำกว่าเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต่ำกว่า แต่ต้องตัดต่อแม่เหล็กชิ้งโครนัสที่ต่ำกว่าเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต่ำกว่า

ค่าความหนาแน่นของแม่เหล็กชิ้งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมุมของโรเตอร์ จำกสมการแรงดันสามเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชิ้งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} v_{un} \\ v_{vn} \\ v_{wn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{d}{dt}L_u & \frac{d}{dt}M_{uv} & \frac{d}{dt}M_{wu} \\ \frac{d}{dt}M_{uv} & R_s + \frac{d}{dt}L_v & \frac{d}{dt}M_{vw} \\ \frac{d}{dt}M_{uw} & \frac{d}{dt}M_{vw} & R_s + \frac{d}{dt}L_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_e \lambda' \sin(\theta_e) \\ -\omega_e \lambda' \sin(\theta_e - 120^\circ) \\ -\omega_e \lambda' \sin(\theta_e + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$L_u = \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos(2\theta_e) \quad (27)$$

$$L_v = \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos(2\theta_e + 120^\circ) \quad (28)$$

$$L_w = \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos(2\theta_e - 120^\circ) \quad (29)$$

$$M_{uv} = -\frac{1}{2} \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos(2\theta_e - 120^\circ) \quad (30)$$

$$M_{wu} = -\frac{1}{2} \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos(2\theta_e + 120^\circ) \quad (31)$$

$$M_{vw} = -\frac{1}{2} \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos(2\theta_e) \quad (32)$$

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 ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

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

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

ω_e คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์

θ_e คือ ตำแหน่งเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์เมื่อเทียบกับแกนของขดลวดสเตเตอร์

L_d, L_q คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ในแนวแกน d และ q

λ' คือ ค่าพลังแม่เหล็กต่อชั้วของแม่เหล็กถาวร

จากนั้นใช้การแปลงของคลาค(Clark's Transformation) [7] [8] แปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงนิ่ง เพื่อแปลงสมการแรงดันสามไฟฟ้าของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวร เป็นสามารถแรงดันบนกรอบอ้างอิงนิ่ง แกน x-y ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำที่พิจารณาทั้งค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและค่าความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดสเตเตอร์ ดังสมการด้านล่าง

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = R_g \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} + L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_e \lambda \cos(\theta_e) \\ -\omega_e \lambda \sin(\theta_e) \end{bmatrix} \quad (33)$$

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 ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและค่าความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดสเตเตอร์

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

และจากการแปลงของパーค(Park's transformation) [7] [8] เพื่อแปลงแรงดันสองไฟฟ้าบนแกน d-q จะได้ดังสมการ 34

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_e L_q i_q \\ \omega_e L_d i_d + \omega_e \lambda \end{bmatrix} \quad (34)$$

เมื่อ

v_d, v_q คือ แรงดันไฟลัสดเตเตอร์ในแกน d และ q บนกรอบอ้างอิงโรเตอร์

i_d, i_q คือ กระแสไฟลัสดเตเตอร์ในแกน d และ q บนกรอบอ้างอิงโรเตอร์

จากพิจารณาคำลังขาเข้าของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้าง

$$P_{in} = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (35)$$

เมื่อ

P_{in} คือ กำลังขาเข้าของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส
จากนั้นพิจารณาสมการ 34 และ 35 จะได้

$$P_{in} = R(i_d^2 + i_q^2) + \frac{d}{dt} \frac{1}{2} (L_d i_d^2 + L_q i_q^2) + \omega_e (\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (36)$$

พิจารณาพจน์สุดท้ายของสมการ 36 คือ กำลังเชิงกลของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส ดังสมการที่ 38

$$P_{mech} = \omega_e (\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (37)$$

จึงได้สมการแรงบิด คือ

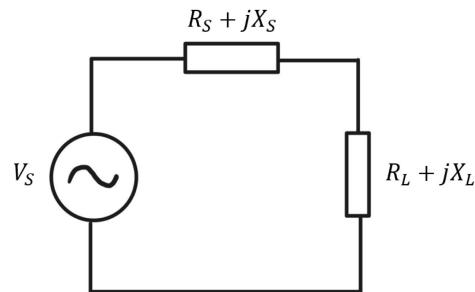
$$T_e = \frac{P_{mech}}{\omega_e / p} = p(\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (38)$$

เมื่อ

P_{mech} คือ กำลังเชิงกลของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส
 T_e คือ แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque)
 p คือ จำนวนคุณภาพของเครื่องจักรไฟฟ้า

2.2.4 หลักการเบี้ยงตันเกี่ยวกับการติดตามจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking) สำหรับวงจรกักเก็บพลังงาน

พิจารณาวงจรสมมูลของวงจรการกักเก็บพลังงานดังรูปที่ 22 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันและอิมพีเดนซ์ขาออก



รูป 22: วงจรสมมูลของวงจรกักเก็บพลังงาน [9]

พิจารณาหลักการแมทซิ่งอิมพีเดนซ์ (Matching impedance) เมื่อพิจารณากำลังออก (P_{out}) โดยใช้ทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังสูงสุด (Maximum Power Transfer Theorem, MPPT) ของวงจรสมมูลตั้งกล่าว เมื่อโหลดเป็นอิมพีเดนซ์ใดๆ โดยพิจารณาในสภาวะคงตัว (steady state)

$$S = \frac{|V_s|^2}{Z^*} = \frac{|V_s|^2}{(R_s + R_L) - j(X_s + X_L)} \quad (39)$$

$$P_{out} = Re(S) = \frac{|V_s|^2 R_L}{(R_s + R_L)^2 + (X_s + X_L)^2} \quad (40)$$

เมื่อ

S คือ กำลังปรากฏ

P_{out} คือ กำลังขาออก

จากสมการที่ (40) จะมีค่าสูงสุดเมื่อพจน์ตัวหารมีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากค่ารีแอคเตนซ์สามารถมีค่าน้อยกว่าศูนย์ได้จึงพิจารณาให้ $X_L = -X_q$ จึงได้

$$P_{out} = \frac{|V_s|^2 R_L}{(R_s + R_L)^2} \quad (41)$$

และจะได้ว่า P_{out} จะมีค่าสูงสุดเมื่อ $\frac{R_L}{(R_s+R_L)^2}$ มีค่าสูงสุด จากนั้นพิจารณาค่า R_L ที่ส่งผลให้พจน์ตังกล่าวมีค่าสูงสุดด้วยสมการที่ (42)

$$\frac{d}{dt} \frac{R_L}{(R_s + R_L)^2} = 0 \quad (42)$$

$$R_L = R_s \quad (43)$$

จึงได้ว่า P_{out} จะมีค่าสูงสุดเมื่อ $R_L = R_s$ และ $j\omega X_L = -j\omega X_S$ สรุปได้ว่า ในกรณีที่ระบบอยู่ในสถานะอยู่ตัวไข่น้ำขอร์ดจากทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังสูงสุด (MPPT) จะได้ว่าการดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากวงจร เมื่อแอมป์เดนซ์โหลดที่นำมานั่ต่อ ($Z_{load}(j\omega)$) มีค่าเท่ากับสัญคูเชิงซ้อน (complex conjugate) ของแอมป์เดนซ์ขาออกของวงจรกับเก็บพลังงาน ดังแสดงในสมการที่ (44)

$$Z_{load}(j\omega) = \text{conj}[Z_{eq}(j\omega)] \quad (44)$$

ต่อมาจะเป็นการขยายแนวคิดดังกล่าว โดยพิจารณาบันสัญญาณกระแส ณ ขณะใดๆ เปลี่ยนแปลงตามเวลา เนื่องจากลักษณะ โหลดเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแส ณ เวลานั้นๆ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโหลดนั้นทำได้ยากในทางปฏิบัติ ดังนั้น จึงพิจารณาในรูปแรงดันแทน

กรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสนิดแม่เหล็กถาวร จะได้ว่าแรงดันต้นต่อกคร่อมโหลดจะต้องมีค่าเท่ากับสัญคูของแรงดันต้นต่อกคร่อมอิมป์เดนซ์รวมจะสมมูลขาออก จะได้

$$\vec{v}_{load} = R_g \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} - L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} \quad (45)$$

แต่เนื่องจากโหลดที่ต่ออยู่เป็นแบบเตอร์ ถ้าสามารถควบคุมแรงดันขาออก (v_{ter}) ดังสมการที่ (46) จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ชาร์จเข้าแบตเตอร์ มีค่าสูงสุด

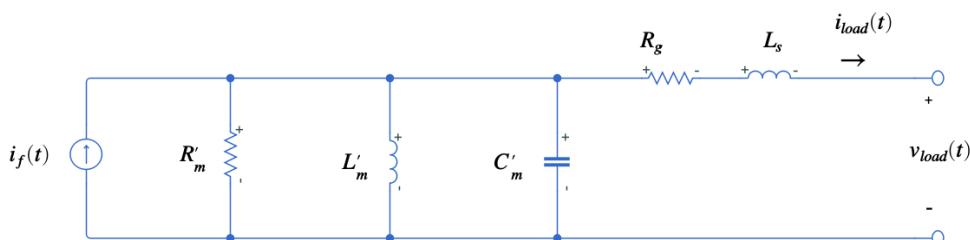
$$\vec{v}_{ter} = \begin{bmatrix} v_{ox} \\ v_{oy} \end{bmatrix} = R_g \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} - L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} \quad (46)$$

โดยการควบคุมแรงดันขาออกของแบตเตอร์ให้เป็นไปตามที่ต้องการตามสมการที่ (46) จะใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ในการแปลงแรงดันไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคการอุดตู้เลตความกว้างพัลลส์

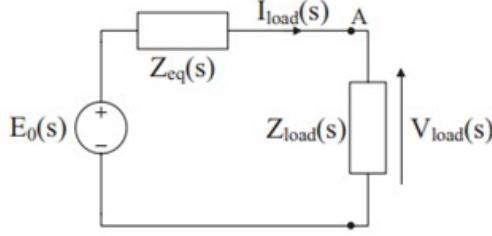
นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงข้อควรระวังของการใช้ตัวอนุพันธ์ เนื่องจากตัวอนุพันธ์มีพฤติกรรมเหมือนตัวขยายสัญญาณ หากมีสัญญาณรบกวนความถี่สูงเข้ามา อาจทำให้สัญญาณรบกวนถูกขยายขนาดมากขึ้น และอาจส่งผลให้อุปกรณ์เสียหายได้ ดังนั้นการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงต้องมีการจำกัดขอบเขตช่วงความถี่ ของตัวอนุพันธ์ด้วยตัวปฏิพันธ์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ดังสมการด้านล่าง

$$H(s) = \frac{s}{\frac{s}{\omega_H} + 1} \quad (47)$$

เนื่องจากสัญญาณของระบบมาจากเท้าเหยียบของมนุษย์ ซึ่งเป็นสัญญาณที่ไม่เป็นรายคาบ และแปรเปลี่ยนไปตามเวลา การดึงกำลังสูงสุด จากรัฐพิจารณาทฤษฎีกำลังถ่ายโอนสูงสุดของระบบพลวัตไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Dynamic Maximum Power Transfer Theorem, ND-MPTT) ซึ่งเป็นทฤษฎีที่พิจารณากรณีที่ไฟฟ้าทุกตัว ถูกต้องตามกฎ การถ่ายโอนกำลังสูงสุด (Maximum Power Transfer Theorem, MPTT) โดยวงจรแผ่นพื้นเก็บพลังงาน แสดงในรูปที่ 23 และในลาปลาสโดยเมนตั้งรูปที่ 24 ที่ได้จากการใช้ทฤษฎีของเทเวนินในการแปลงวงจร



รูป 23: วงจรสมมูลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน



รูป 24: วงจรสมมูลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานในลาปลาสโดยเมน

$$Z_{eq} = R_g + sL_s + \frac{sR'_m L'_m}{s^2 R'_m L'_m C'_m + sL'_m + R'_m} \quad (48)$$

โดยที่

R_g คือ ความต้านทานของชุดลวดสเตเตอร์

L_s คือ ความเหนี่ยวนำของชุดลวดสเตเตอร์

$R'_m = R_m N^2$, $L'_m = L_m N^2$, และ $C'_m = C_m N^2$

N คือ ค่าคู่ความทางกลไฟฟ้า (electromechanical coupling coefficient)

$$E_0 = V_{load}(s)|_{I_{load}(s)=0} = -I_f(s) \cdot \frac{sR'_m L'_m}{s^2 R'_m L'_m C'_m + sL'_m + R'_m}$$

$$E_0 = -F(s) \cdot aN \cdot \frac{sR'_m L'_m}{s^2 R'_m L'_m C'_m + sL'_m + R'_m} \quad (49)$$

ทฤษฎีกำลังถ่ายโอนสูงสุดของระบบพลังไม่เป็นเชิงเส้น กล่าวว่า กำลังที่ดึงได้สูงสุดจากวงจรแผ่นพื้นเก็บพลังงาน เมื่อสัญญาณขาเข้าเป็นสัญญาณได้ จะได้ว่า อิมพีเดนซ์ที่เหมาะสมของอิมพีเดนซ์ของโหลด คือ $Z_{opt}(s) = Z_{eq}(-s)$

ข้อสังเกต

หากสัญญาณขาเข้าเป็นสัญญาณเป็นไซนุชอยด์ที่ความถี่ $\omega = \omega_{res} = \frac{1}{\sqrt{L'_m C'_m}}$ แล้ว ค่า L'_m และ C'_m จะถูกชดเชียวยอย่าง

สมบูรณ์ จึงไม่เป็นพลังงานมาสามกับองค์ประกอบทั้งสอง และพิจารณาจรวจที่เบ็ดอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 23 จะเห็นว่าความต้านทาน R'_m ทำให้มีตัวประกอบกำลังมีค่าเท่ากับ 1 ส่งผลให้กำลังที่ถ่ายโอนข้ามไปยังเครื่องจักรกลไฟฟ้ามีค่าสูงสุด ดังนั้น จากสมการ 48 และ 49 จะได้

$$Z_{eq}|_{s=j\omega_{res}} = (R_g + sL_s)|_{s=j\omega_{res}} + \frac{\left(\frac{j}{\sqrt{L'_m C'_m}}\right) R'_m L'_m}{\left(\frac{j}{\sqrt{L'_m C'_m}}\right)^2 R'_m L'_m C'_m + \left(\frac{j}{\sqrt{L'_m C'_m}}\right) L'_m + R'_m} = (R_g + sL_s + R'_m)|_{s=j\omega_{res}} \quad (50)$$

$$E_0|_{s=j\omega_{res}} = -F(s) \cdot aN \cdot R'_m \quad (51)$$

ดังนั้น การประยุกต์ใช้งาน ND-MPPT ในสัญญาณไซนุชอยด์ ที่ความถี่เรโซแนนท์ $\omega = \omega_{res}$ จะได้ผลลัพธ์ คือ

$$Z_{opt}|_{s=j\omega_{res}} = Z_{eq}(-s)|_{s=j\omega_{res}} = -F(s) \cdot aN \cdot R'_m|_{s=j\omega_{res}} = \text{conj}[Z_{eq}(j\omega_{res})] \quad (52)$$

จากสมการนั้นหมายความว่าในกรณีสัญญาณไซนุชอยด์ ที่ความถี่เรโซแนนท์ จะทำให้ได้เงื่อนไขโหลดของทั้ง ND-MPPT และ MPPT จะเหมือนกัน

หากระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานได้รับการออกแบบอย่างดีให้มี quality factor สูง จะทำให้แคน 3dB นั้นแคบ และสัญญาณขาเข้าของระบบไม่เป็นสัญญาณไซน์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะทำให้ได้แรงดันเบิดวงจร E_0 จะมีสัญญาณที่ใกล้เคียงสัญญาณไซน์ที่ความถี่ $\omega = \omega_{res}$ ดังนั้น ระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานที่มี quality factor สูง ส่งผลให้ MPPT และ ND-MPPT ได้เงื่อนไขโหลดที่เหมาะสมเหมือนกัน คือ

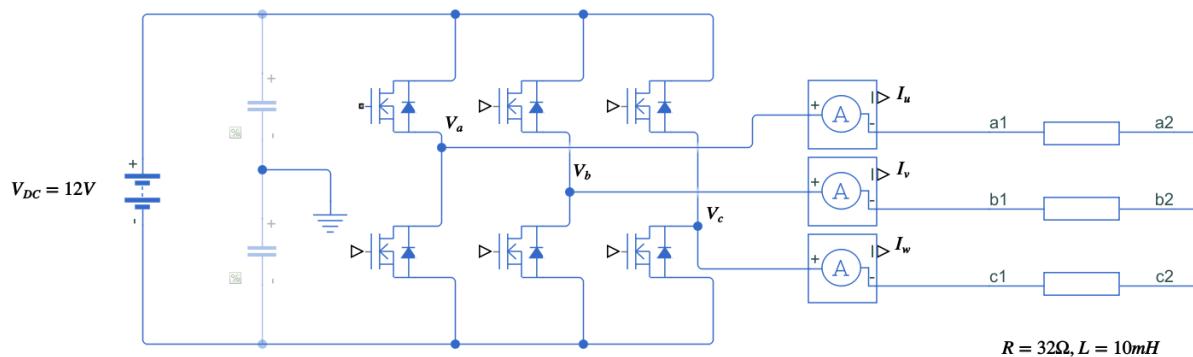
$$Z_{opt}(s) = Z_{eq}(-s) \cong R_g - sL_s + R'_m \quad (53)$$

3 ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น

3.1 การทดสอบอัลกอริทึมการmodulateแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง

ในการทดสอบอัลกอริทึมการmodulateแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง จะทำโดยการนำอินเวอร์เตอร์ไปต่อ กับ โหลดแบบตัวด้านหน้าและตัวหนีบ ยาน้ำสามเฟส โดยเราจะทดลองปรับค่าคำสั่งต่างๆของอินเวอร์เตอร์ และดูว่าระบบให้ผลตอบสนองที่ถูกต้อง หรือไม่ อัลกอริทึมมีการตัดสินใจที่ถูกต้องหรือไม่ โดยมีข้อดีของการทำงานสองแขนคือ สามารถตัดสินใจได้เร็วและแม่นยำ แต่ต้องมีการวัดและแสดงค่าต่างๆ 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)



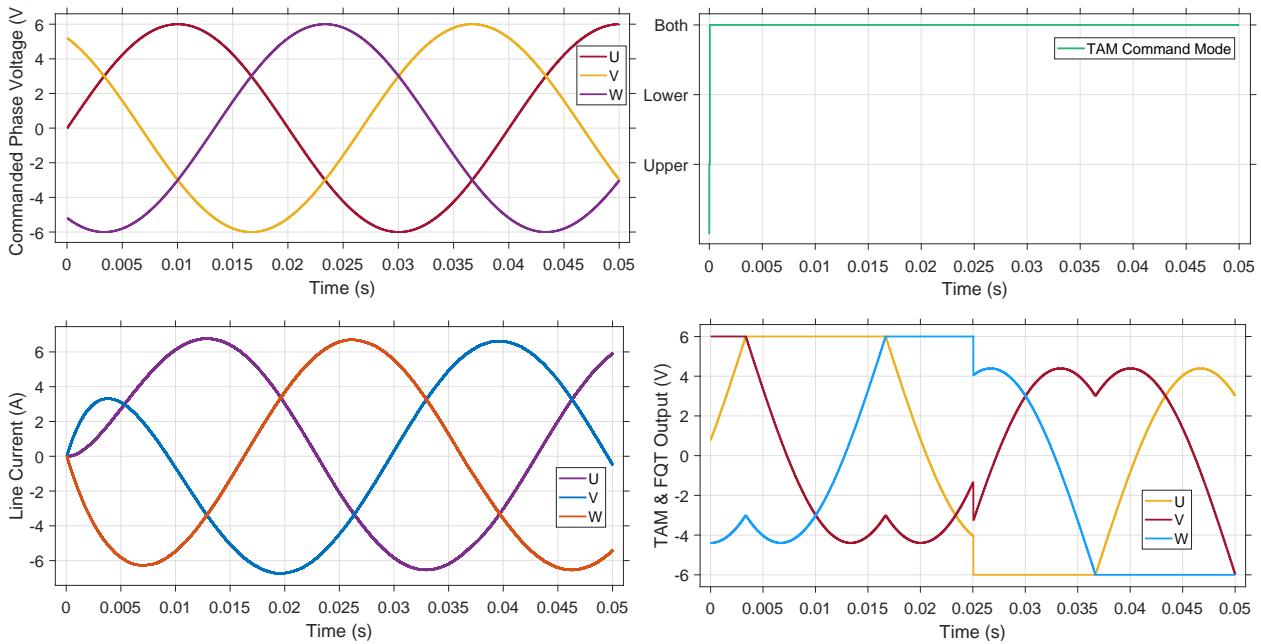
รูป 25: รูปแบบวงจรที่ใช้ทดสอบอัลกอริทึมการmodulateแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง

ค่าแรงดันไฟฟ้าคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ จะเป็นค่าแรงดันที่ป้อนให้กับอัลกอริทึมของอินเวอร์เตอร์ ค่ากระแสสาย จะนิยามตามรูปที่ 25 คือ นิยามให้กระแสที่เหลือออกจากข้าของอินเวอร์เตอร์เป็นค่าบวก โหมดการmodulateแบบสองแขนที่อัลกอริทึมตัดสินใจเลือก จะเป็นโหมดที่ได้กล่าวไว้ในรายละเอียดของการmodulateแบบสองแขนคือ

- Upper จะเป็นโหมดที่เลือกให้สวิตซ์ตัวที่นำกระแสตลอดเวลาเป็นทรานซิสเตอร์ตัวบน
- Lower จะเป็นโหมดที่เลือกให้สวิตซ์ตัวที่นำกระแสตลอดเวลาเป็นทรานซิสเตอร์ตัวล่าง
- Both จะเป็นโหมดที่เลือกให้ทรานซิสเตอร์ตัวบน หรือตัวล่างนำกระแสตลอดเวลา去ได้ ขึ้นกับว่าทรานซิสเตอร์ตัวไหนทำงานหนักกว่า โดยจะแบ่งงานกันระหว่างทรานซิสเตอร์ตัวบนและตัวล่าง

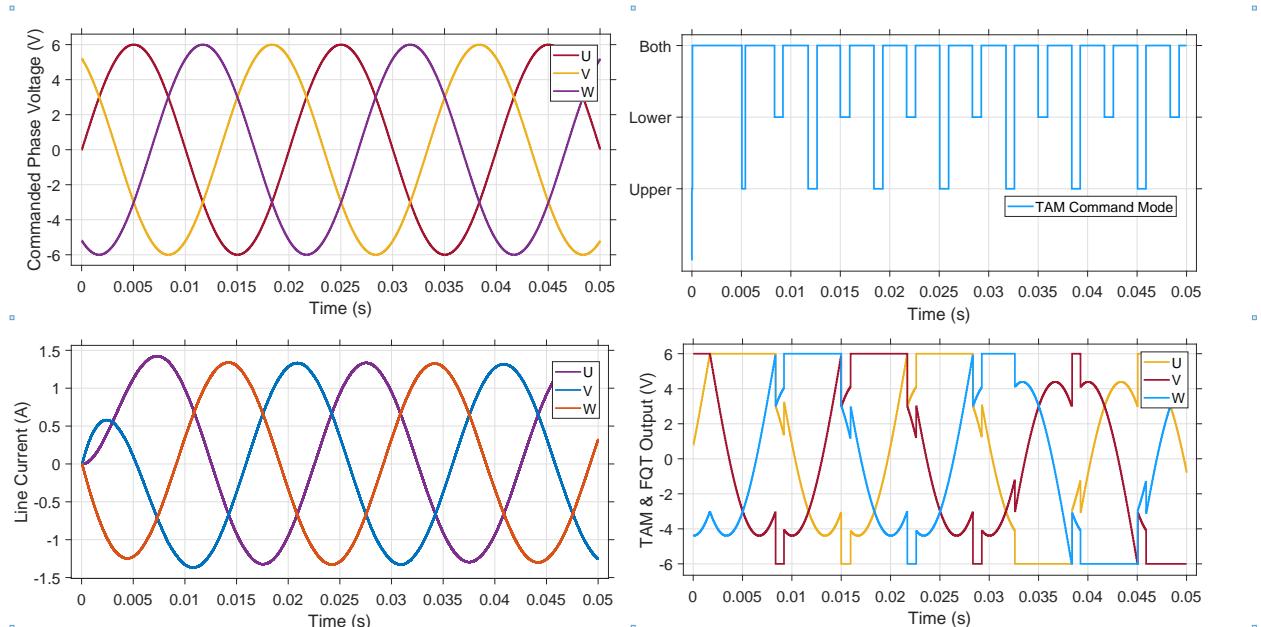
แรงดันคำสั่งที่คำนวนได้จากอัลกอริทึม คือ แรงดันที่คำนวนได้หลังจากการตัดสินใจว่าต้องการmodulateสองแขนแบบไหน โดยจะทำการเลือกแรงดันกำดับศูนย์เพื่อที่จะบอกเข้าไปในแต่ละเฟส เพื่อให้สวิตซ์นำกระแสในแบบที่อัลกอริทึมต้องการ

3.1.1 เจื่อนไสการทดสอบกรณีที่ปรับความถี่กำลังของอินเวอร์เตอร์



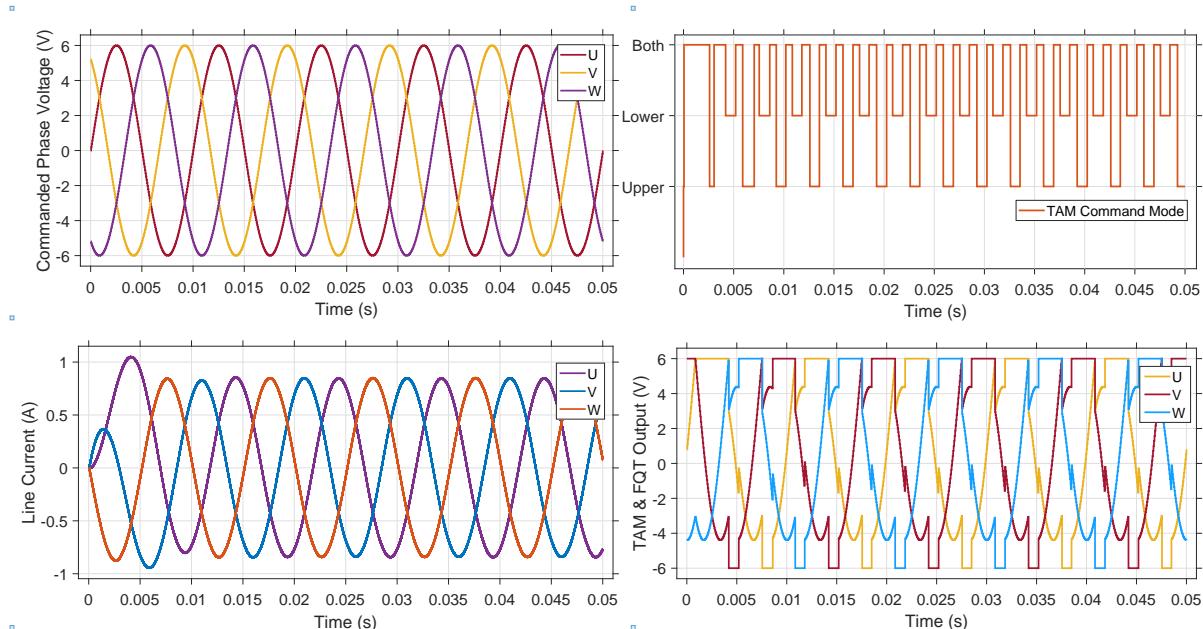
รูป 26: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่กำลังเท่ากับ 25Hz

จากรูปที่ 26 จะเห็นได้ว่า การเหลือมกันของกระแสและแรงดันมีค่าน้อยมาก ซึ่งเวลาที่กระแสและแรงดันเหลือมกันมีค่าต่ำกว่าค่าเวลา การสุ่มและคงค่าของระบบผู้ตัว ดังนั้นระบบจึงไม่รับรู้ถึงการเหลือมกันของกระแสและแรงดัน ดังนั้น สวิตช์จะทำงานในจุดภาคที่หนึ่งตลอดเวลา ไม่ว่าจะมอดูเลตแบบสองแขนแบบใดก็ตาม ดังที่แสดงในกราฟ โดยมีการมอดูเลตแบบสองแขนที่อัลกอริทึมตัดสินใจเลือก จึงเป็นแบบ Both ตลอดเวลา เพราะจากมุมมองของอินเวอร์เตอร์ อัลกอริทึมจะคิดว่าสามารถที่จะมอดูเลตสองแขนแบบได้ก็ได้ ดังนั้น ระบบจะมอดูเลตแบบสองแขนสลับกันระหว่างตัววนนำกระแสตลอด และตัวล่างนำกระแสตลอด โดยมีจุดที่แบ่งการทำงานกันระหว่างทารานชิสเตอร์ตัวบนและตัวล่างอยู่ที่เวลา 0.025 วินาที เพื่อไม่ให้ทราบชิสเตอร์ผู้่งได้ทำงานหนักเกินไป



รูป 27: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่กำลังเท่ากับ 50Hz

จากรูปที่ 27 จะเห็นได้ว่า เมื่อเราเพิ่มความถี่คำสั่งให้กับอินเวอร์เตอร์ จะทำให้ความถี่ไฟฟ้าของแรงดันออกจากอินเวอร์เตอร์มีค่ามากขึ้น ทำให้องค์ประกอบความหนี้ยานำของโหลดมีค่ามากขึ้น ทำให้การเหลือมกันของการแสและแรงดันมากขึ้น จึงมีช่วงจังหวะเวลาระหว่างที่แรงดันคำเฟสคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ตัดศูนย์ (เปลี่ยนเครื่องหมายจากลบเป็นบวก) และเวลาที่ค่ากระแสสายสาม相ตัดศูนย์ (เปลี่ยนเครื่องหมายจากลบเป็นบวก) ในช่วงเวลาดังกล่าว แรงดันเฟสคำสั่งจะมีค่าเป็นบวก ส่วนค่ากระแสจะมีค่าเป็นลบ ดังนั้น ถ้าหากเรามอดูล็อตแบบทรานซิสเตอร์ตัวบนนำกระแสลดลงเวลา เท่ากับเราบังคับให้กระแสไฟหล่อพ่านทรานซิสเตอร์ตัวบน ทำให้ทรานซิสเตอร์ตัวบนทำงานในจุดภาคที่สาม ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ เนื่องจากจะมีแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์มากกว่า ดังนั้น เราจึงต้องเลือกให้อัลกอริทึมมอดูล็อตแบบสองแขนเลือกมอดูล็อตแบบทรานซิสเตอร์ตัวล่างนำกระแสลดลงเวลา ทำให้กระแสไฟหล่อพ่านทรานซิสเตอร์ตัวล่างแบบที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ตัวล่างนำกระแสในจุดภาคที่หนึ่ง ซึ่งมีแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์น้อยกว่า กำลังสูญเสียระหว่างนำกระแสแสลงน้อยกว่า ดังที่จะสะท้อนออกมาในกราฟใหม่ของการมอดูล็อตแบบสองแขนที่อัลกอริทึมตัดสินใจเลือก จะสังเกตุได้ว่า อัลกอริทึมจะเลือกให้อินเวอร์เตอร์มอดูล็อตแบบ "Lower" เมื่อยุ่งช่วงเวลาระหว่างที่ค่าแรงดันเฟสคำสั่งเปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกไปลบ และค่าแรงดันสายเปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกไปลบ และอัลกอริทึมจะเลือกมอดูล็อตแบบ "Upper" ในช่วงเวลาระหว่างที่ค่าแรงดันเฟสคำสั่งเปลี่ยนเครื่องหมายจากลบไปบวก และค่ากระแสสายเปลี่ยนเครื่องหมายจากลบไปบวก ซึ่งหากพิจารณาจากการจำลองจะพบว่า อัลกอริทึมได้ทำงานอย่างถูกต้อง

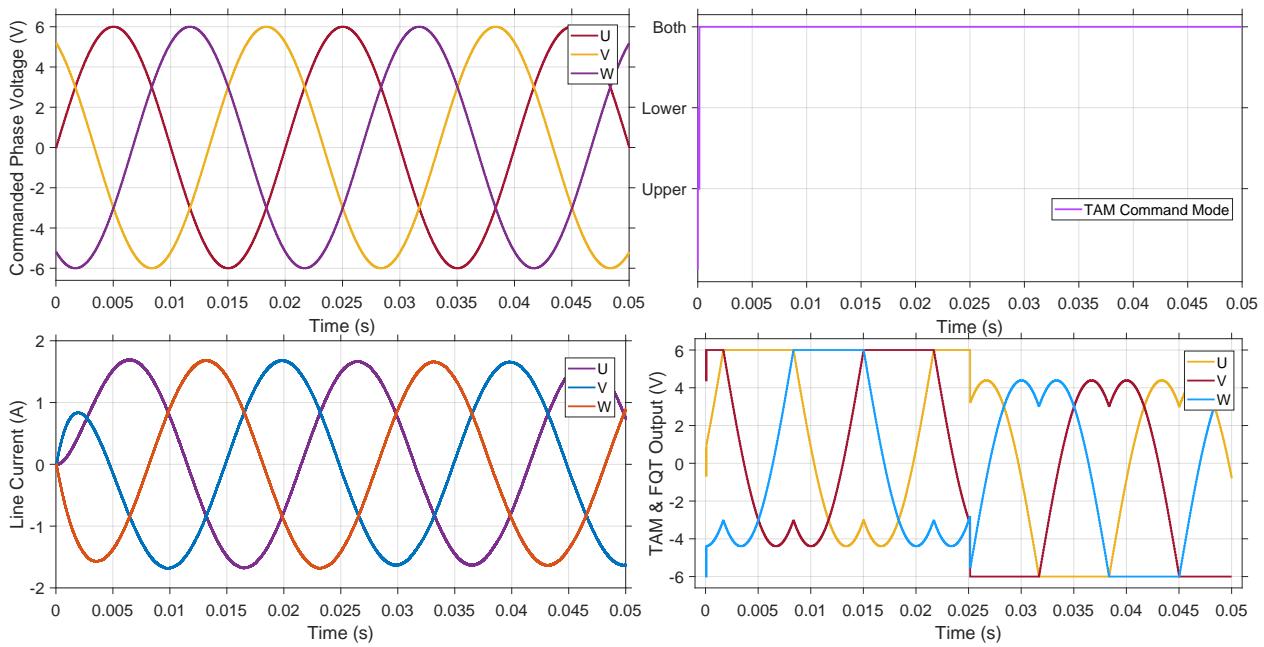


รูป 28: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่คำสั่งเท่ากับ 100Hz

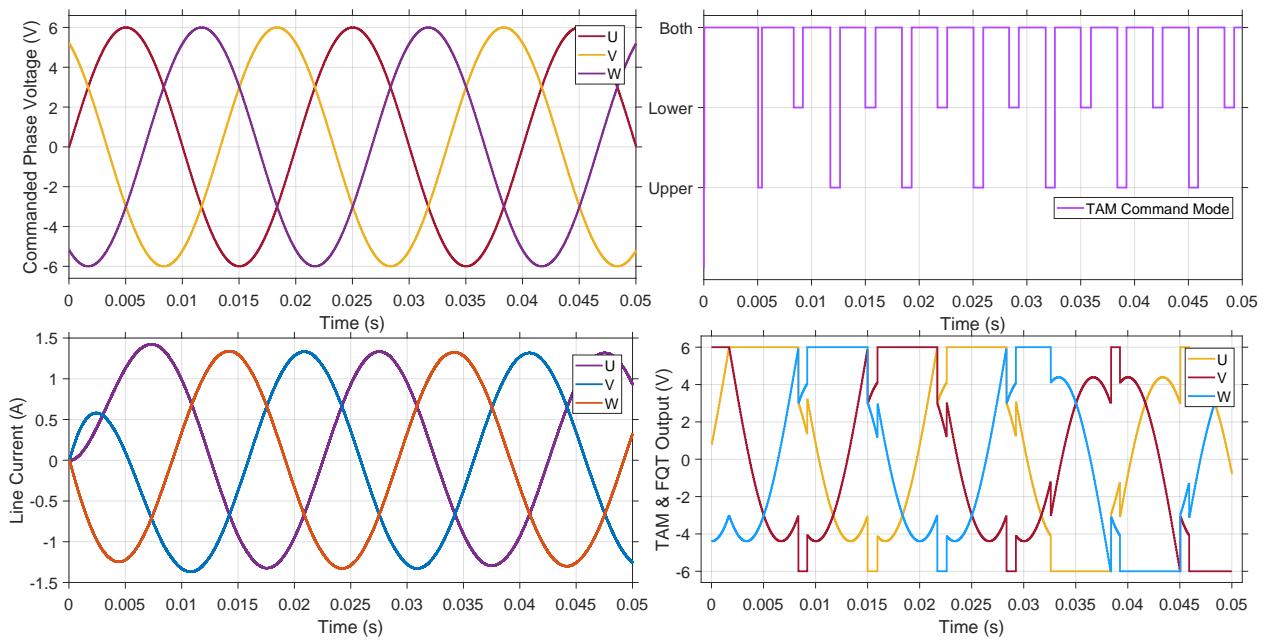
จากรูปที่ 28 จะเห็นได้ว่า เมื่อเราเพิ่มความถี่คำสั่งให้กับอินเวอร์เตอร์ แนวโน้มของการเหลือมกันของการแสและแรงดันจะมีมากขึ้น ดังนั้น ส่วนแบ่งเวลาที่อัลกอริทึมเลือกมอดูล็อตแบบ "Upper" และ "Lower" จึงมีมากขึ้น ดังที่จะสะท้อนออกมาในกราฟใหม่ของการมอดูล็อตแบบสองแขนที่อัลกอริทึมเลือก

3.1.2 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับค่าความหนี้ยานำของโหลด

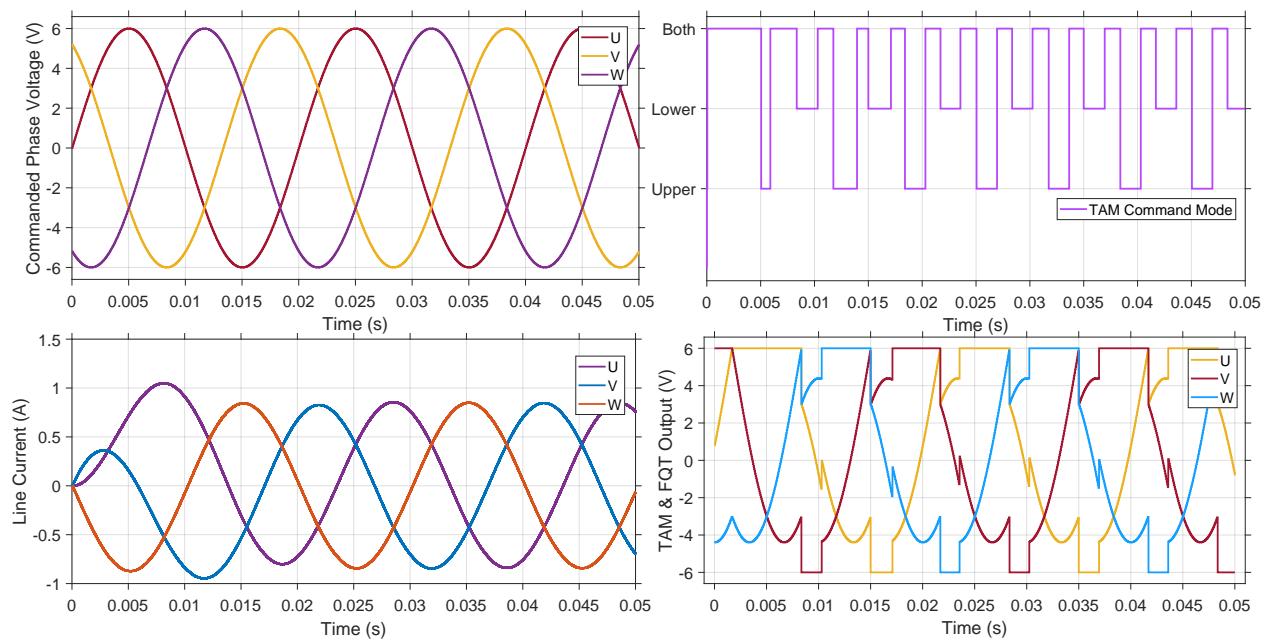
จะเห็นได้ว่าการปรับค่าความหนี้ยานำของโหลดส่งผลคล้ายกับการปรับค่าความถี่คำสั่งให้กับอินเวอร์เตอร์ เพราะสุดท้ายแล้ว การปรับความถี่คำสั่งของอินเวอร์เตอร์ก็คือการเปลี่ยนค่ารีแอคเวนซ์ของตัวเหนี่ยวนำนั่นเอง จะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องในกรณีการทดสอบต่างๆ



รูป 29: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับความหนึ่งไข่ความนำของโหลดให้เท่ากับ 5mH



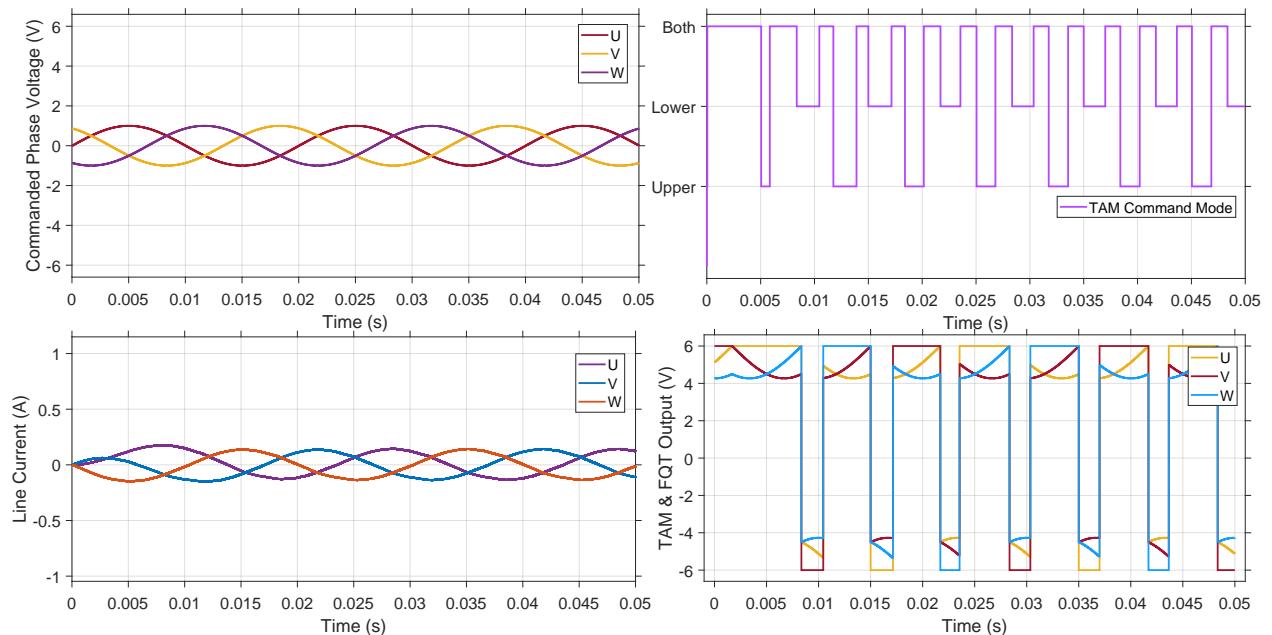
รูป 30: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับความหนึ่งไข่ความนำของโหลดให้เท่ากับ 10mH



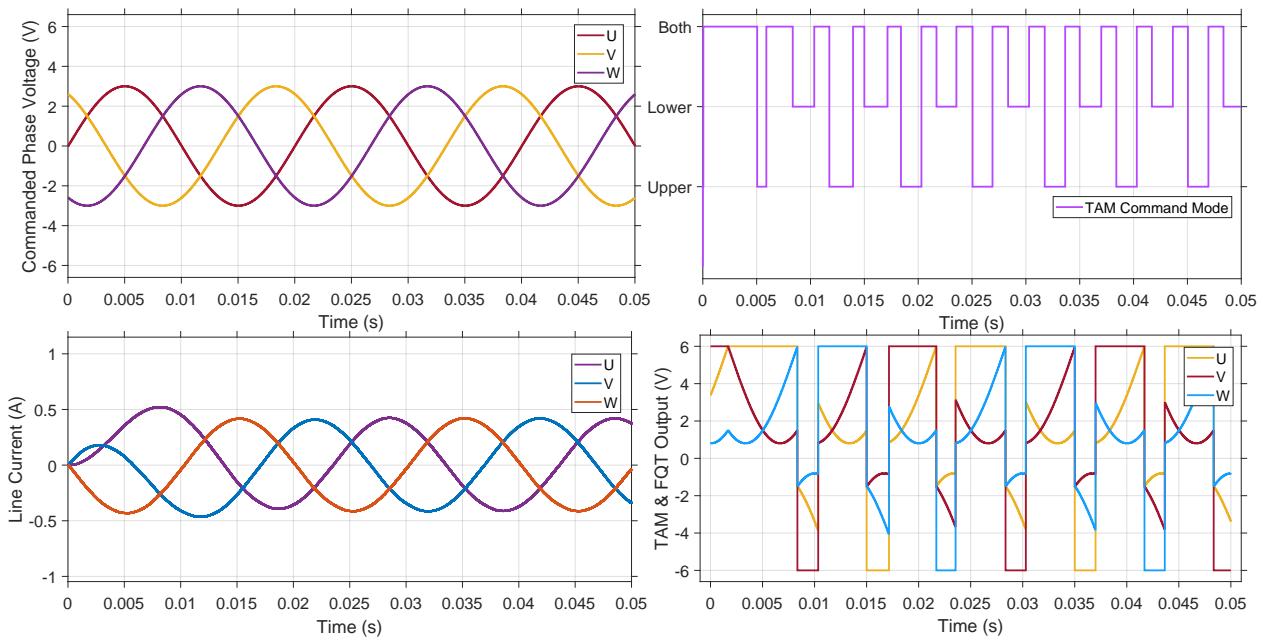
รูป 31: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับความหนี่ยวนำของโถลดให้เท่ากับ 20mH

3.1.3 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับค่าขนาดของแรงดันคำสั่งของอินเวอร์เตอร์

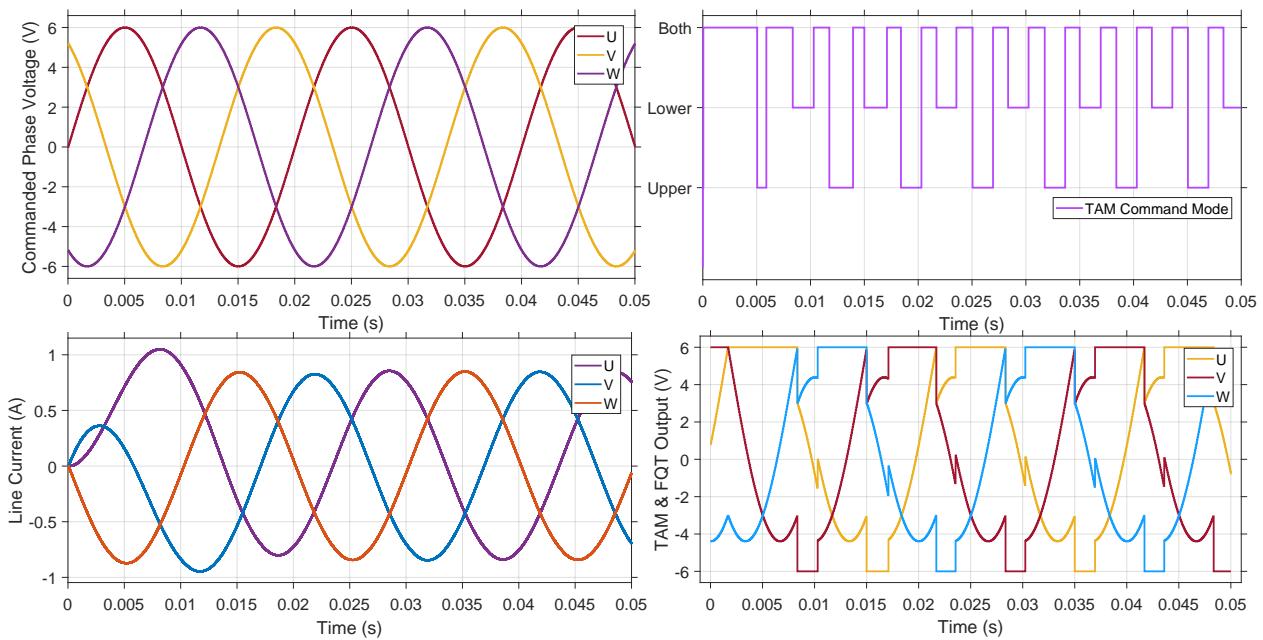
ถ้าหากค่าよดของแรงดันไฟฟ้าคำสั่งถูกปรับ ก็จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อขนาดของกระแสสาย นั่นคือ ค่ากระแสสายจะแปรผันตรงกับขนาดของแรงดันคำสั่ง จะสังเกตุได้ว่า อินเวอร์เตอร์ยังสามารถทำงานได้ถูกต้องเมื่อปรับขนาดของแรงดันคำสั่งเป็นค่าต่างๆ



รูป 32: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับขนาดของค่าよดของดันไฟฟ้าคำสั่งเท่ากับ 1V



รูป 33: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับขนาดของค่ายอดของดันไฟฟ้าสำสั่งเท่ากับ 3 V



รูป 34: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับขนาดของค่ายอดของดันไฟฟ้าสำสั่งเท่ากับ 6 V

3.2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้า

จากการศึกษาการทำงานของทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และ การเปรียบเทียบเชิงกล - ไฟฟ้า จึงได้วางสมมูลทางไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 21

กรณี เครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิ่มແล็กถาวร

จากการที่ได้ศึกษาเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิ่มແล็กถาวร และได้วางสมมูลของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 21 แล้ว สามารถรวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิ่มແล็กถาวรตามขั้นตอน ดังนี้

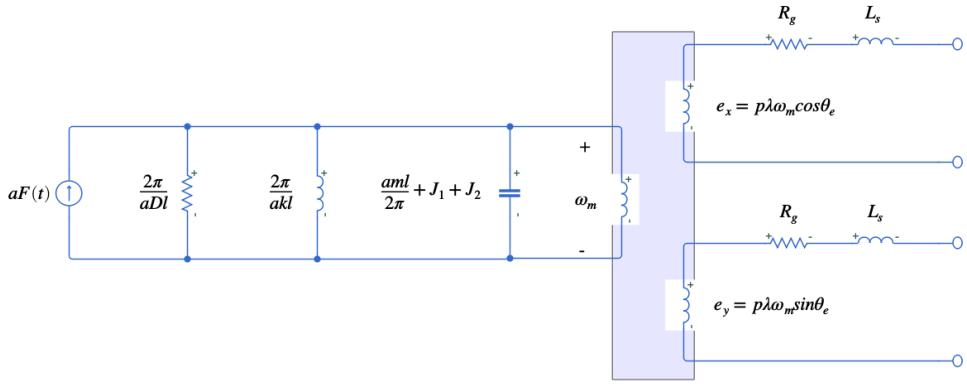
จากการแรงดันบนกรอบอ่างอิงนิ่ง แกน x,y ทำให้ทราบความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนเนินที่นานาภัยในของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิ่มແล็กถาวร ดังสมการด้านล่าง

$$e_x = p\lambda\omega_m \cos(\theta_e) \quad (54)$$

$$e_y = p\lambda\omega_m \sin(\theta_e) \quad (55)$$

$$\vec{e}_{ind} = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \sin(\theta_e) \end{bmatrix} = p\lambda\omega_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \sin(\theta_e) \end{bmatrix} = p\lambda e^{j\theta_e} \quad (56)$$

วงจรที่ไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นเก็บพลังงานสัมพันธ์กับเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถูกการผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า ความเร็วของโรเตอร์จะท่อนไปยังขนาดแรงเคลื่อนไหวของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างตามสมการด้านบน จึงได้ความสัมพันธ์แสดงดังแสดงในรูปที่ 35



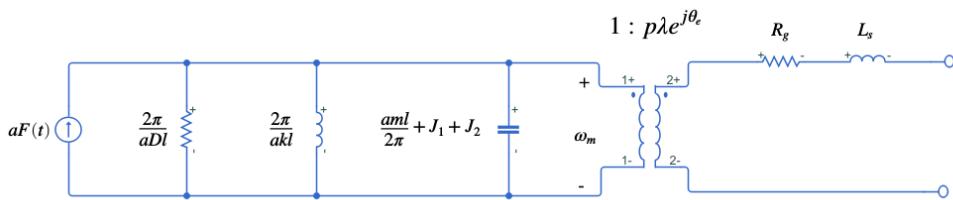
รูป 35: วงจรไฟฟ้าแสดงความสัมพันธ์ระบบทางกลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากนั้นเขียนความสัมพันธ์อยู่ในรูปสเปชเวกเตอร์ของระบบทางกลของแผ่นเก็บพลังงาน และเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถูกการเพื่อสามารถวิเคราะห์เป็นวงจรไฟฟ้าเพียงวงจรเดียวได้

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = p\lambda \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin(\theta_e) \\ \sin(\theta_e) & \cos(\theta_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (57)$$

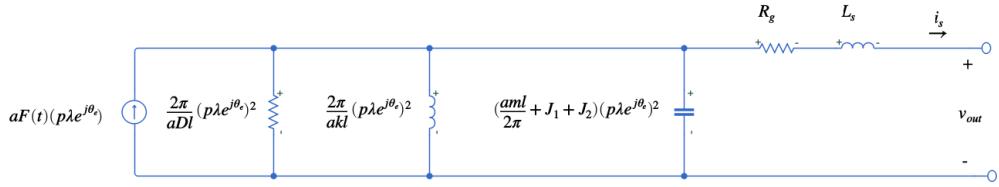
$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = p\lambda e^{-J\theta_e} \begin{bmatrix} \omega_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (58)$$

จึงสามารถมองเป็นวงจรสมมูลที่แสดงความสัมพันธ์เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบเป็นเชิงช้อน ดังแสดงในรูปที่ 36



รูป 36: วงจรไฟฟ้าแสดงความสัมพันธ์ระบบทางกลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีหม้อแปลงไฟฟ้ามีอัตราส่วนเป็นเชิงช้อน

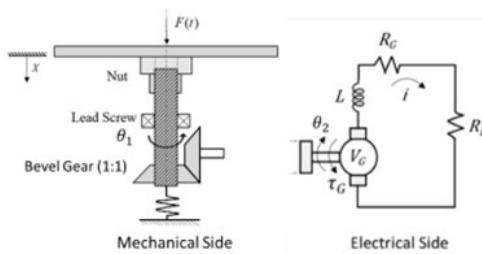
จากนั้นทำการแปลงวงจรสมมูล โดยอ้างอิงผู้ทุติยภูมิ(บบ) จะได้แสดงดังรูปที่ 37



รูป 37: วงจรสมมูลไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าชิ้งโครนส์ชนิดแม่เหล็กถาวร ที่อ้างอิงทุกดิจิทัล

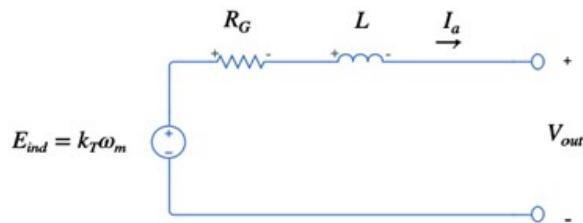
กรณี เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

การดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากแผ่นพื้นเก็บพลังงานโดยใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยวิธีการติดตามจุดทำงานสูงสุด ระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานนั้น แสดงดังรูปที่ 38 ทางผังทางกลประกอบด้วยกลไกเกลี้ยงตัวหนอน (lead screw) และ เกียร์ ส่วนทางฝั่งไฟฟ้ามีเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีความต้านทานและค่าความเห็นใจตัวตัวเอง ต่ออยู่กับโหลด (R_L)



รูป 38: ระบบทางกายภาพของกลไกเกลี้ยงนำของแผ่นพื้นและเครื่องจักรกลไฟฟ้า

จากนั้นพิจารณาฝั่งทางกลในรูปแบบของวงจรไฟฟ้าโดยใช้การเบรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้า จึงได้วงสมมูลของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน แสดงดังรูปที่ 21 ส่วนวงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง แสดงดังรูปที่ 39 โดยมีความต้านทานและความเห็นใจนำของโหลดเดอร์รอมอยู่ด้วย



รูป 39: วงจรสมมูลเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง

โดยที่

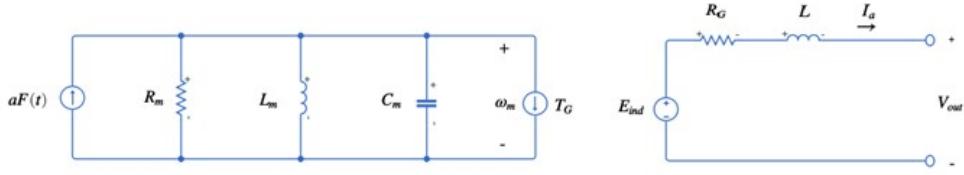
R_G คือ ความต้านทานภายในของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

L คือ ความเห็นใจนำภายในของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

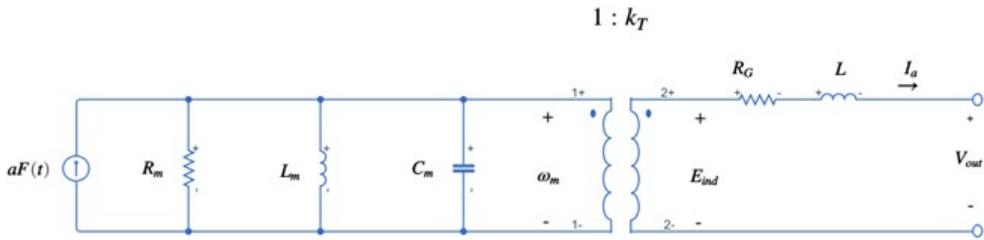
E_{ind} คือ แรงเคลื่อนเนินภายในภายในของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

k_T คือ ค่าคงที่มอเตอร์

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลทั้งทางระบบทางกลและทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 40 จะพบว่าทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน โดยพิจารณาเป็นหม้อแปลงแรงดันที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบ คือ $1 : k_T$ ดังแสดงในรูปที่ 41

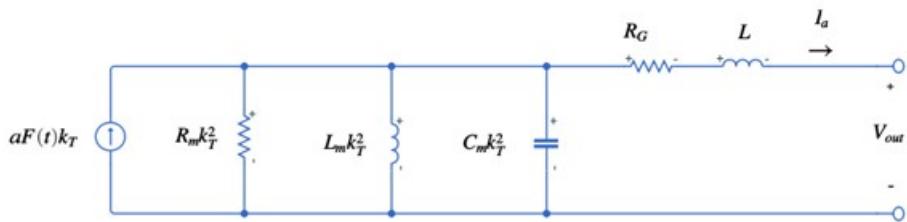


รูป 40: วงจรสมมูลไฟฟ้าของระบบกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง



รูป 41: วงจรไฟฟ้าแสดงความสัมพันธ์ระบบทางกลและเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนจำนวน คือ $1 : k_T$

จากนั้นอ้างอิงวงจรทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (ด้านเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง) จึงได้วงจร ดังแสดงในรูปที่ 42

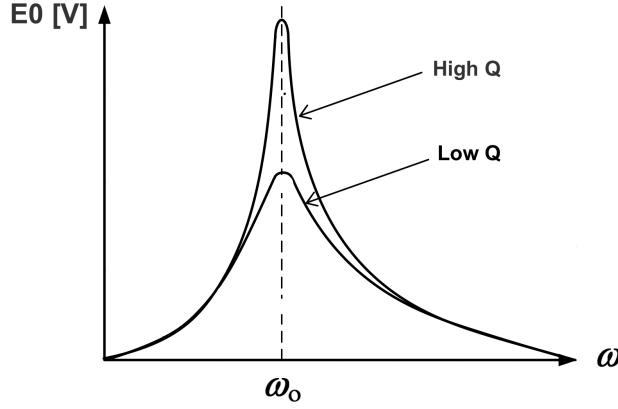


รูป 42: วงจรสมมูลไฟฟ้าของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

3.3 ผลการจำลองของแบบจำลองทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้า บนโปรแกรม MATLAB/Simulink

กรณี เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

จากทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังสูงสุดของระบบพลังไม่เป็นเชิงเส้น พบว่า ถ้าระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานได้รับการออกแบบอย่างดีให้มี quality factor สูง ทำให้ได้แอน 3dB แคบ โดยรูปที่ 43 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบิดวงจรกับความถี่



รูป 43: ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเปิดวงจรกับความถี่

จากรูปเห็นว่า ระบบที่มี quality factor สูง จะทำให้แรงดันเปิดวงจร E_0 นั้น มีค่าแอมเพลจูดค่าสูงๆจะอยู่รอบความถี่เรโซแนนท์ขณะที่ความถี่นี้จะมีแอมเพลจูดที่ลดลงเมื่อออกรหัสความถี่เรโซแนนท์ และถึงแม้ว่าสัญญาณเข้าของระบบไม่เป็นสัญญาณไชน์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ก็ตาม จะสามารถมองประมวลณ์ว่า ระบบทำงานที่ความถี่เรโซแนนท์ได้ จึงทำให้ เนื่องจากโหลดที่เหมาะสมเหมือนกันทั้ง MPPT และ ND-MPPT ทำให้ได้อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดกรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง คือ

$$Z_{load}(s) = Z_{eq}(-s) \cong R_g - sL + R'_m \quad (59)$$

ในกรณีแผ่นพื้นเก็บพลังงานที่ออกแบบ ไม่ได้ทำงานที่ความถี่เรโซแนนท์ หรือทำงานที่ความถี่เรโซแนนท์ แต่ทำมีค่า quality factor ที่ต่ำ ก็จะยังคงประมวลณ์โหลดที่น้ำหนาต่อเป็นดังสมการที่ (59) เมื่อจาก เมื่อพิจารณาพจน์ $\frac{sR'_m L'_m}{s^2 R'_m L'_m C'_m + sL'_m + R'_m}$ หากระบบไม่ได้ทำงานที่ความถี่เรโซแนนท์จะทำให้พจน์ $s^2 R'_m L'_m C'_m$ และพจน์ R'_m ที่ตัวส่วนไม่หักล้างกัน ทำให้ระบบเกิดโพลที่ไม่เสถียร (unstable pole) เกิดขึ้น ดังนั้น จึงต้องประมวลณ์ว่าระบบทำงานที่ความถี่เรโซแนนท์ และประมวลณ์เหลือเพียง R'_m ดังแสดงในสมการที่ (59)

แรงดันขาออกที่สอดคล้องกับหลักการติดตามจุดทำงานกำลังสูงสุด ซึ่งจะทำให้ได้กำลังขาออกของเครื่องจักรไฟฟ้ามีค่าสูงสุด เป็นดังสมการที่ (60)

$$v_{load}(s) = Z_{eq}(-s)I_a \cong R_g I_a - sLI_a + R'_m I_a \quad (60)$$

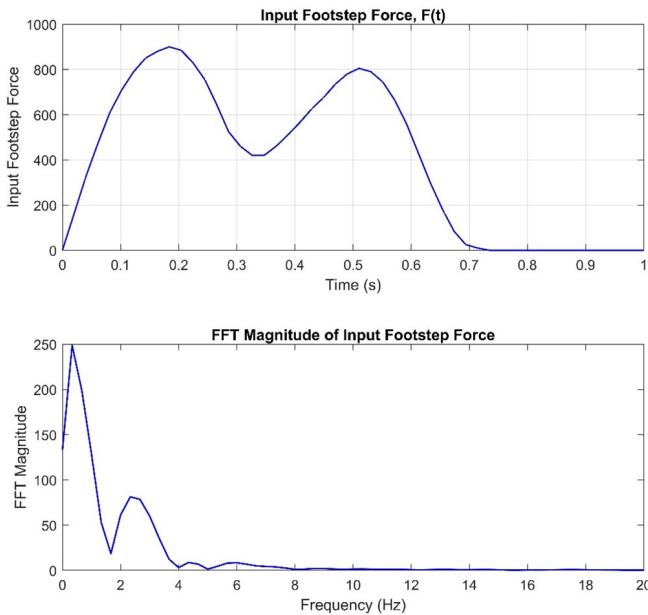
จากสมการที่ (60) เป็นแรงดันคำสั่งที่ใช้สร้างอินเวอร์เตอร์ในการสร้างอุปทาน สมมุติเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่สามารถควบคุมได้ โดยอัลกอริทึมการติดตามการทำงานสูงสุดทำงานจะนำกระแสเด้านอกจากความต้องการให้แรงดันที่เหมาะสมและส่งกลับไปเป็นสัญญาณแรงดันขาออกของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

เพื่อตรวจสอบกำลังที่ดึงได้สูงสุดจากระบบกักเก็บพลังงานด้วย ZD-MPPT จึงทำการจำลองด้วยแผ่นพื้นเก็บพลังงานตัวอย่างอยู่ 2 กรณี ด้วยกัน ดังแสดงในตารางที่ 2

Parameters	Case I	Case II
Pitch of lead screw	8 mm	8 mm
lead(l)	0.015 m	0.015 m
Mass of nut and plate(m)	2.16 kg	2.16 kg
Moment of inertia of bevel gear(J_G)	$8.6756 \times 10^{-7} \text{ kgm}^2$	$8.6756 \times 10^{-7} \text{ kgm}^2$
Moment of inertia of lead screw(J_l)	$2.5536 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$	$2.5536 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$
lead angle	45 degree	45 degree
Spring coefficient(k)	15000 N/m	40000 N/m
Damping coefficient(D)	2000 Ns/m	13600 Ns/m
Friction coefficient(μ)	0.21	0.21
Efficient of thrust bearing	0.8	0.8
Efficient of thread	0.8	0.65
Stator resistance	5.0Ω	5.0Ω
Stator inductance	19.6 mH	19.6 mH
Motor constant (k_T)	0.4 Vs/rad	0.4 Vs/rad
R'_m	31.5827 Ω	3.6242 Ω
L'_m	4.2110 H	8.0191 H
C'_m	1.4228 μF	1.5606 μF
resonant frequency	65.02 Hz	144.70 Hz

ตาราง 2: ค่าตัวแปรทางกลและทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับแผ่นพื้นพลังงาน [2]

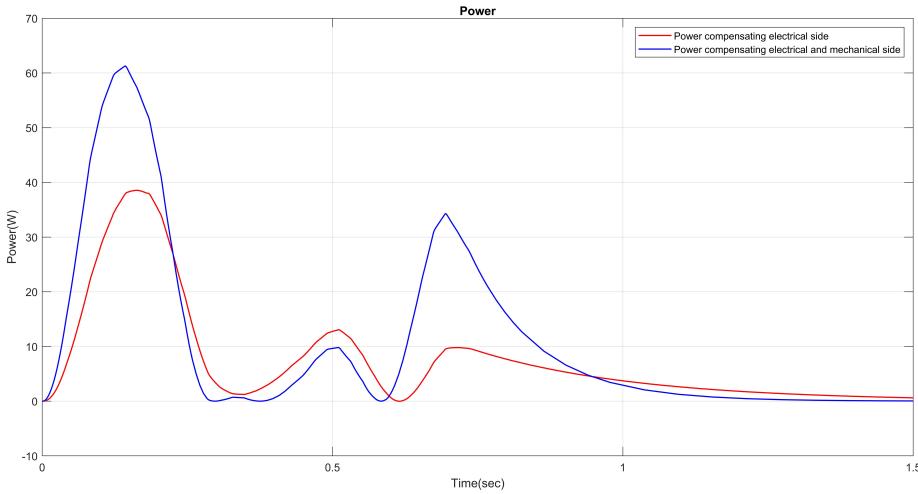
โดยจำลองด้วยสัญญาณเท้าเหยียบและมีสเปกตรัมความถี่ แสดงดังรูปที่ 44 สังเกตจากสเปกตรัมของเท้าเหยียบมันนุ่มยื่น มีความความถี่ต่ำ อุปในช่วง 0 - 10 เฮิรตซ์



รูป 44: แรงดันเบิดวงจรของแผ่นพื้นเก็บพลังงานของรูปที่ (บน) และ สเปกตรัมของสัญญาณเบิดวงจรของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน (ล่าง)

กรณีที่ 1 เป็นการจำลองระบบแผ่นพื้นที่กับเก็บพลังงานที่ออกแบบให้มีพารามิเตอร์ทั้งทางกลและทางไฟฟ้า และได้ค่าความถี่เรโซแนนท์เท่ากับ 65.02 เฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าที่เข้าใกล้กับสเปกตรัมความถี่ของเท้าเหยียบมากขึ้น เพื่อศึกษาดูว่ากำลังที่ดึงมากขึ้นหรือไม่ ส่วนกรณีที่ 2 เป็นการจำลองระบบแผ่นพื้นที่กับเก็บพลังงานที่ออกแบบให้มีพารามิเตอร์ทั้งทางกลและทางไฟฟ้าให้ใกล้เคียงกับระบบจริง ทำให้ได้ค่าความถี่เรโซแนนท์เท่ากับ 114.77 เฮิรตซ์ ซึ่งมีความถี่ห่างจากสเปกตรัมความถี่ของเท้าเหยียบมาก

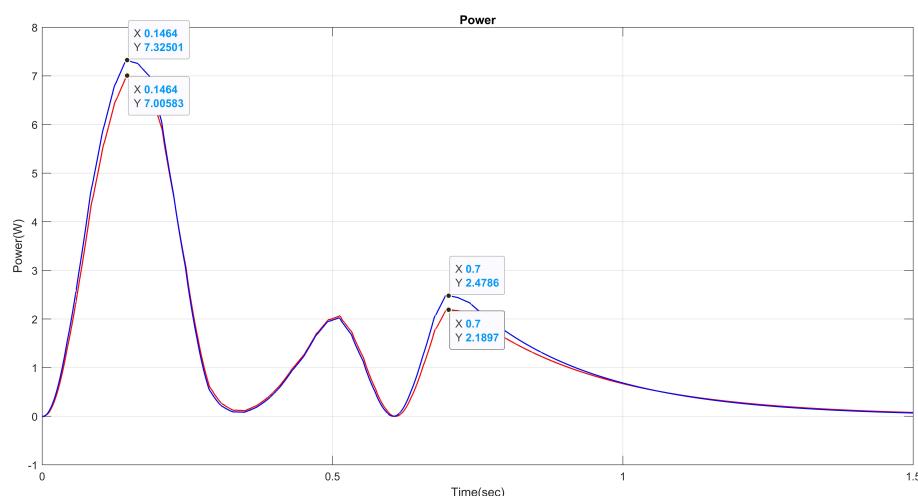
จากผลการจำลองด้วยแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วย MATLAB/Simulink กรณีแรก พบว่าได้ผลลัพธ์ แสดงดังรูปที่ 45



รูป 45: กำลังไฟฟ้าที่ดึงได้จากระบบที่ชดเชยทั้งทางกลและทางไฟฟ้ากับระบบที่ชดเชยทางไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวของระบบก้าวเก็บพลังงานกรณีที่ 1

จากรูปที่ 45 พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ดึงได้จากระบบที่มีการชดเชยทั้งทางกลและทางไฟฟ้าจะดึงกำลังได้สูงกว่าการชดเชยทางไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวอย่างมาก เนื่องจากสัญญาณขาเข้าของระบบมีความถี่ที่ต่ำมากอยู่ในช่วง 0 - 10 เอิร์ตรัชต์ และความถี่แรงดันเปิดวงจรของแผ่นพื้นก้าบเก็บพลังงานมีค่าประมาณ 65.02 เอิร์ตรัชต์ ซึ่งจะทำให้ระบบทำงานด้วยความถี่ต่ำรอบๆ สัญญาณเท้าเหยียบที่ความถี่ต่ำแลกรองความถี่สูงๆ ออกไป เมื่อระบบก้าบเก็บพลังงานจะมีค่า Q factor ไม่สูง แต่นั่นเองใช้ทฤษฎี ND-MPPT เป็นกรณีที่ໄປมาหากว่า MPPT โดยค่าความหนาแน่น L ที่ชดเชย เป็นการชดเชยที่ความถี่เรโซแนนซ์และยังชดเชยที่ความถี่อื่นของสัญญาณขาเข้าด้วย

ส่วนการจำลอง กรณีที่สอง การจำลองด้วยพารามิเตอร์โกลเดนกับระบบจริงของระบบแผ่นพื้นก้าบพลังงาน พบร้าได้ผลลัพธ์ แสดงดังรูปที่ 46



รูป 46: กำลังไฟฟ้าที่ดึงได้จากระบบที่ชดเชยทั้งทางกลและทางไฟฟ้ากับระบบที่ชดเชยทางไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวของระบบก้าบเก็บพลังงานกรณีที่ 2

จากรูปพบว่า กำลังที่ดึงได้จากระบบแผ่นพื้นก้าบเก็บพลังงานที่มีการชดเชยทั้งทางกลและทางไฟฟ้าจะดึงกำลังได้สูงกว่าการชดเชยทางไฟฟ้าน้อยมาก เช่น ที่ค่าสูงสุดของgraf จะมีกำลังมากขึ้นประมาณ 0.3 วัตต์เท่านั้น ซึ่งเป็นผลมาจากการมีเตอร์ทางกลทำให้ได้ระบบแผ่นพื้นก้าบเก็บพลังงานที่มีค่า quality factor ไม่สูง ยิ่งไปกว่านั้นยังมีความความถี่เรโซแนนซ์ของระบบทางกลอยู่ที่ความถี่ประมาณ 115 เอิร์ตรัชต์ ขณะที่ความถี่ของสัญญาณเท้าเหยียบโดยทั่วไปจะต่ำมากอยู่ในช่วงไม่เกิน 10 เอิร์ตรัชต์ จึงทำให้การชดเชยระบบทางกลเพิ่มเข้ามานี้ผลน้อยมาก สาเหตุอาจเกิดจากการปรามานพจน์ $\frac{sR'_m L'_m}{s^2 R'_m L'_m C'_m + sL'_m + R'_m}$ ให้เหลือเพียงค่า R'_m แม้ระบบจะไม่ได้ทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบทาง

กลกีตตาม จึงอาจทำให้ได้กำลังที่เพิ่มขึ้นน้อยมาก

ในระบบจริง ระบบแผ่นพื้นกักเก็บพลังงานมีพารามิเตอร์ทั้งทางกลและทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป อาจมีบางพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า และอาจเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ ทำให้ระบบมีค่า quality factor ที่ไม่สูงและระบบไม่ได้ทำงานด้วยความถี่รุ่บๆความถี่เรโซแนนซ์ของระบบทางกล จึงทำให้กำลังที่ได้จากการทดสอบนี้ลดลง แต่หากต้องการให้ได้กำลังที่มากขึ้นเล็กน้อย หรือ เท่าเดิม หรือลดลงก็เป็นได้

กรณี เครื่องจักรกลไฟฟ้าชิ้งโครนสชนิดแม่เหล็กถาวร

พิจารณาระบบที่มีไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นกักเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าชิ้งโครนสชนิดแม่เหล็กถาวร ดังแสดงในรูปที่ 37 ทำให้ได้อัมพิเดนซ์ของวงจรแผ่นพื้นกักเก็บพลังงาน คือ

$$Z_{eq}(s) = R_g + sL_s + Z_m(p\lambda\angle\theta_e)^2 \quad (61)$$

โดยที่

$$Z_m = R_m // sL_m // \frac{1}{sC_m}$$

$$R_m = \frac{2\pi}{qDl}$$

$$L_m = \frac{2\pi}{akl}$$

$$C_m = \frac{aml}{2\pi} + J_1 + J_2$$

โดยค่าพารามิเตอร์อื่นที่ใช้ในการทดสอบ [2] แสดงดังตารางที่ 3 และ 4

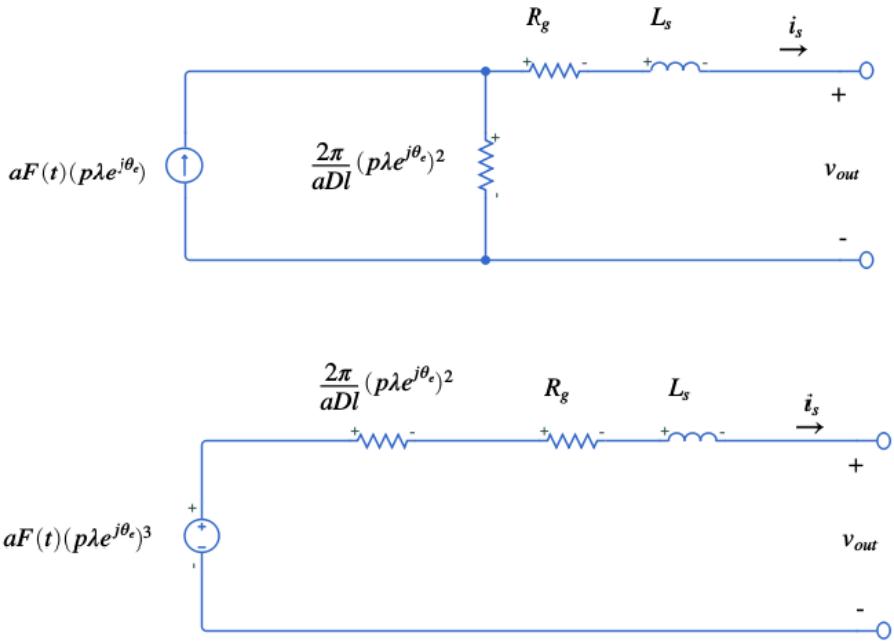
Parameters	Value
Pitch of lead screw	8 mm
lead(l)	0.015 m
Mass of nut and plate(m)	2.16 kg
Moment of inertia of bevel gear(J_G)	$8.6756 \times 10^{-7} \text{ kgm}^2$
Moment of inertia of lead screw(J_l)	$2.5536 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$
lead angle	45 degree
Spring coefficient(k)	40000 N/m
Damping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

ตาราง 3: ค่าตัวแปรทางกลที่เกี่ยวข้องกับแผ่นพื้นพลังงาน [2]

Parameters	Value
ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์(R_s)	32.23Ω
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์(L_s)	11.3 mH
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ในแนวแกนอ้างอิงดี (L_d)	16 mH
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ในแนวแกนอ้างอิงคิว (L_q)	16 mH
ฟลักซ์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร	0.009 Wb
จำนวนคูชี้ว้า	6 คู่

ตาราง 4: ค่าตัวแปรทางกลที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรไฟฟ้าชิ้งโครนสแม่เหล็กถาวร[2]

เมื่อคำนวณพบว่า R_m ค่าเท่ากับ 70.1839 โอม L_m ค่าเท่ากับ 3.5092 เมนรี C_m มีค่าเท่ากับ 18.809×10^{-6} ฟาร์ด เมื่อจากค่า C_m มีค่าน้อย และ L_m มีค่ามาก จึงจะได้ผลลัพธ์ที่ดี แต่หากต้องการลดค่า C_m ให้ต่ำลง หรือเพิ่มค่า L_m ให้สูงขึ้น จึงได้ว่าจะ ดังแสดงรูปในรูปที่ 47



รูป 47: วงจรແນ່ພື້ນເກີບພັດງານຈາກກາປະມານ ແລະໃໝ່ທຄະກູ່ເທວນນິນ

ຈະໄດ້ວ່າອົມພື້ນເກີບພັດງານປະມານໄດ້ ຕັ້ງສາມາດ (62)

$$Z_{eq}(s) = R_g + sL_s + R_m(p\lambda\angle\theta_e)^2 \quad (62)$$

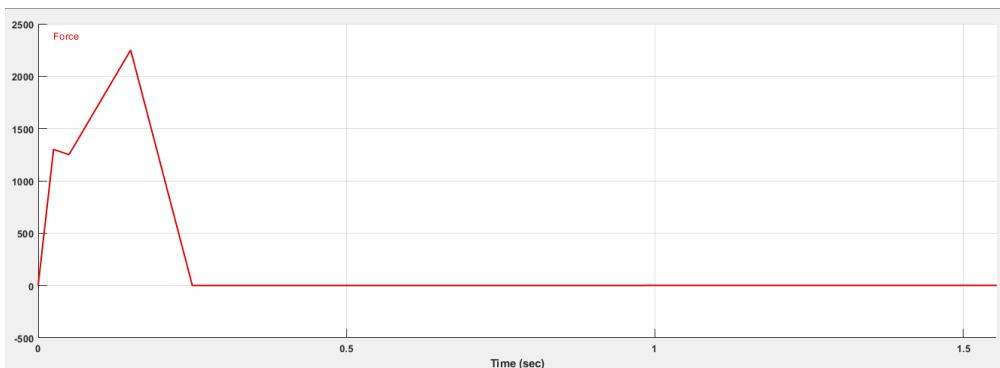
ຈາກທຄະກູ່ ND-MPPT ຈະໄດ້ວ່າໄລດ້ທີ່ນຳມາຕ່ອງທີ່ດ້ານຂາອອກຂອງເຄື່ອງຈັກໄຟຟ້າຊີໂຄຣນັສ ຊຶ່ງເປັນອັລກອົບຮົມກາຕິດຕາມຈຸດທໍາງານສູງສຸດ ກຽນທີ່ຮ່ວມຮະບບທາງກລຂອງແນ່ພື້ນເກີບພັດງານແລະເຄື່ອງຈັກກລຊີໂຄຣນັສນິດແມ່ເຫັນກາວ່າ ຄົວ

$$Z_{load}(s) = Z_{eq}(-s) \cong R_g - sL_s + \text{conj}[R_m(p\lambda\angle\theta_e)^2] \quad (63)$$

ໂດຍແຮງດັນຂາອອກທີ່ສອດຄລອງກັບໜັກກາຕິດຕາມຈຸດທໍາງານກຳລັງສູງສຸດ ຊຶ່ງຈະທໍາໄຫ້ໄດ້ກຳລັງຂາອອກຂອງເຄື່ອງຈັກໄຟຟ້າມີຄ່າສູງສຸດ ເປັນດັ່ງສາມາດ (64)

$$v_{load}(s) = Z_{eq}(-s)\vec{i}_s \cong R_g\vec{i}_s - sL_s\vec{i}_s + \text{conj}[R_m(p\lambda\angle\theta_e)^2\vec{i}_s] \quad (64)$$

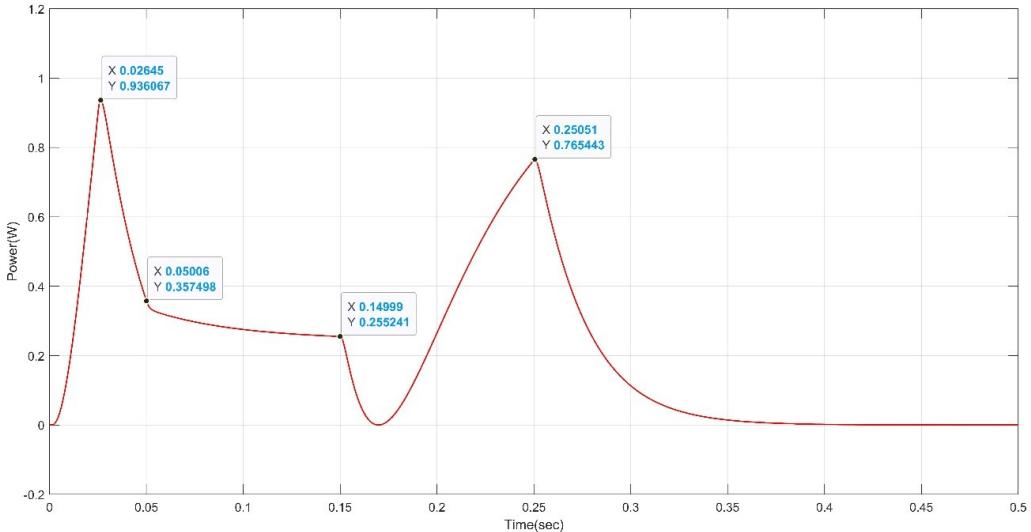
ໜັກນັ້ນຈຶ່ງທໍາການສ່ວນແບບຈຳລອງນໂປຣແກຣມ MATLAB/Simulink ເພື່ອສຶກສາການທໍາງານຂອງແບບຈຳລອງທີ່ໄດ້ ແລະກຳລັງຂາອອກທີ່ໄດ້ ຈຶ່ງທດສອບດ້ວຍແຮງຈາກເທົ່າເໜີຍບ ແສດງດັ່ງຮູບທີ່ 48



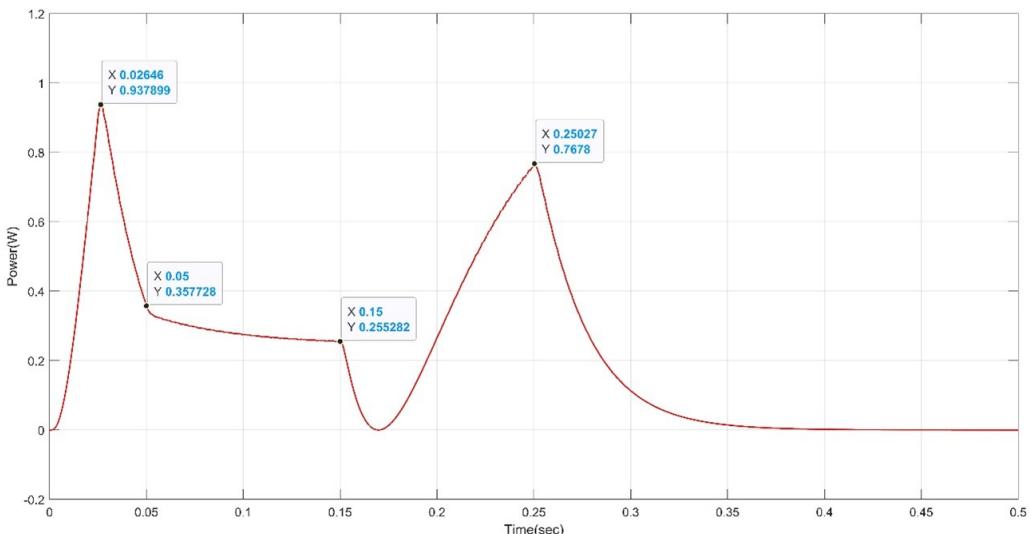
ຮູບ 48: ແຮງເທົ່າເໜີຍບຂາເຂົ້າ (ກຽນທີ່ເຄື່ອງຈັກກລຊີໂຄຣນັສນິດແມ່ເຫັນກາວ່າ)

ຈາກຜລກາທດສອບແບບຈຳລອງດ້ວຍໂປຣແກຣມ MATLAB/Simulink ຈະໄດ້ວ່າມີລັກນະກຳລັງຂາອອກຈາກເຄື່ອງຈັກກລໄຟຟ້າຊີໂຄຣນັສນິດແມ່ເຫັນກາວ່າທີ່ຈຶ່ງທີ່ເປັນອັນດັບທີ່ໄດ້ ແລະ ດັ່ງນີ້ແມ່ນວິທີ່ສຶກສາການທໍາງານຂອງແບບຈຳລອງທີ່ໄດ້

การติดตามกำลังสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 49 เปรียบเทียบกับกำลังข้าออกเมื่อใช้อัลกอริทึมจากการทำงานสูงสุดที่มาจากการสมมูลไฟฟ้า ที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวร ซึ่งเป็นการซัดเซย์ผลทั้งทางกลและทางไฟฟ้า ของระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 37



รูป 49: กำลังข้าออกเมื่อใช้อัลกอริทึมการติดตามการทำงานสูงสุด กรณีซัดเซย์ทางไฟฟ้าของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน



รูป 50: กำลังข้าออกเมื่อใช้อัลกอริทึมการติดตามการทำงานสูงสุด กรณีซัดเซย์ทั้งทางกลและทางไฟฟ้าของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

จากรูปที่ 49 และ 50 พบว่า กรณีที่ซัดเซย์ทั้งทางกลและทางไฟฟ้าของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน จะได้กำลังข้าออกที่สูงกว่าน้อยมากจนไม่เห็นความแตกต่าง หรือก็คือได้กำลังข้าออกเท่าเดิม เมื่อเทียบกับกรณีที่ซัดเซย์เฉพาะทางไฟฟ้าของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน จึงสรุปได้ว่า อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด กรณีที่ซัดเซย์ทั้งทางกลและทางไฟฟ้าของแผ่นพื้นเก็บพลังงานสามารถไม่ทำให้ได้กำลังข้าออกมีค่าที่สูงขึ้น เนื่องจาก พิจารณาสมการ (63) และ (64) จะมีพจน์อิมพีเดนซ์ $R_m(p\lambda\angle\theta_e)^2$ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มาจากการบหทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน เพิ่มเข้ามาไม่น้อยมาก โดยมีขนาดเท่ากับ 0.002916Ω ซึ่งเมื่อเทียบกับความต้านทานของชุดลวดสเตเตอเร่อ R_g มีค่าเท่ากับ 32.23Ω จึงทำให้พจน์ที่เพิ่มเข้ามาไม่มีนัยสำคัญ หรือจะเลยก็ได้ จึงทำให้ได้กำลังข้าออกที่จำลองได้มีค่าเท่าเดิม ดังนั้น ในระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานจริงจะมีพารามิเตอร์ทั้งทางกลและทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป อาจมีบางพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า และอาจเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ อาจทำให้อิม

พีเดนซ์ที่นำมาซัดเซยทางกลมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับทางไฟฟ้า จึงกำลังที่ดึงได้จากระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานได้กำลังเท่าเดิม หรืออาจจะลดลง ก็เป็นไปได้ ขึ้นกับแผ่นพื้นเก็บพลังงานที่ออกแบบไว้

4 บทสรุป

4.1 สรุปผลการดำเนินการ

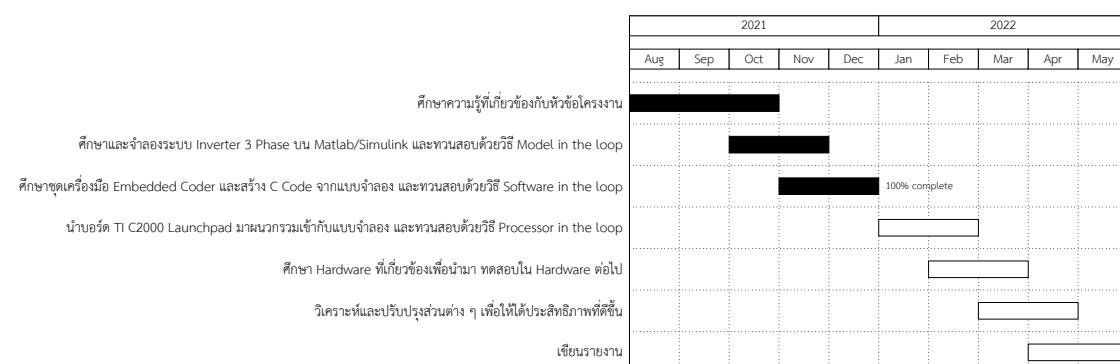
โครงการ “อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานชนิดเครื่องจักรกลไฟฟ้า” นี้ได้พัฒนาให้มีการเก็บเกี่ยวพลังงานมากขึ้น และมีประสิทธิภาพมากขึ้น จากปีการศึกษา 2563 โดยได้มีการออกแบบอัลกอริทึมการมอนิเตอร์และติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง เพื่อลดกำลังสูญเสียอินเวอร์เตอร์ นอกจากนี้ได้มีจากการนำผลของกลไกทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาใช้ในการหาแรงดันคำสั่ง หรือสร้างอัลกอริทึมการติดตามการทำงานสูงสุด เพื่อเป็นการชดเชยกำลังสูญเสียทางกล นอกเหนือจากการชดเชยทางไฟฟ้าเพียงเท่านั้น

จากการทดสอบบน MATLAB/Simulink ได้ทำการทดสอบและทวนสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์และอัลกอริทึมในการลดกำลังสูญเสีย พบว่าอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานและตัดสินใจได้อย่างถูกต้อง เพื่อสร้างแรงดันคำสั่งให้ เหมาะสมตามอัลกอริทึมการติดตามกำลังสูงสุด และยังช่วยลดกำลังสูญเสียอินเวอร์เตอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับในปีการศึกษา 2563 นอกจากนี้ เมื่อทดสอบอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด ที่ร่วมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน เพื่อเป็นการชดเชยผลหักทางกลและทางไฟฟ้าของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน โดยในกรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง สามารถทำให้กำลังไฟฟ้าข้าอกจากเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าสูงขึ้นจริงอยู่เล็กน้อย ซึ่งกำลังไฟฟ้าข้าอกจากที่ได้นั้นขึ้น กับพารามิเตอร์ทั้งทางกลและทางไฟฟ้าของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และยังขึ้นกับทั้งความถี่และแอมป์ลิจูดของสัญญาณขาเข้าของระบบ ส่วนในกรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัชนิดแม่เหล็กถาวรไม่ได้ทำให้กำลังไฟฟ้าข้าอกสูงขึ้น หรือก็คือไม่กำลังขาออกเท่าเดิม โดยมีสาเหตุจากการประมวลผลสมมูลกับร่วมกับกลไกทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัชนิดแม่เหล็กถาวร และยังขึ้นกับพารามิเตอร์ทางกลและทางไฟฟ้าของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน ซึ่งเมื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาแรงดันคำสั่งหรืออัลกอริทึม ทำให้อัมพ์เดนซ์ทางกลที่เพิ่มเข้ามา มีค่าน้อยมากจนไม่มีนัยสำคัญหากเทียบกับพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า

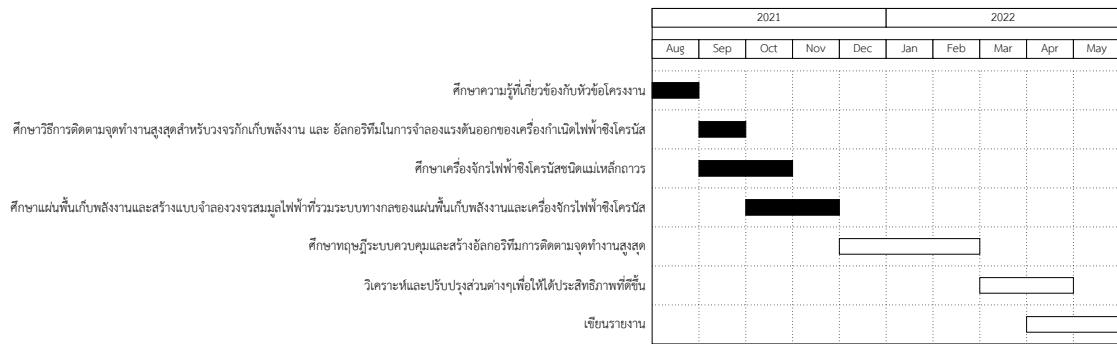
โครงการในปีการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบกับอุปกรณ์ต้นแบบจริง โดยในกรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง พบร้า ได้กำลังขาออกสูงขึ้น กว่าปีการศึกษา 2563 จริง ส่วนกรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัชนิดแม่เหล็กถาวรได้มีการทดสอบกับอุปกรณ์ต้นแบบจริง ขณะที่ปีการศึกษา 2563 ไม่ได้ทำการทดสอบกับอุปกรณ์ต้นแบบจริง จึงบรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการ นอกจากนี้ คณบุรุษจัดทำหัวว่าโครงการนี้จะถูกนำไปใช้ พัฒนาต่ออย่างให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าข้าอกของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมากขึ้น และมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในอนาคต

4.2 แผนการดำเนินงาน

ในรายงานฉบับนี้ มีแผนการดำเนินงานแยกเป็นของผู้จัดทำแต่ละคน คือ ของนายณัฐพล กับแก้ว ซึ่งมีแผนการดำเนินงานดังแสดงในรูปที่ 51 และของนายสันติ ว่องประเสริฐ ซึ่งมีแผนการดำเนินงานดังแสดงในรูปที่ 52



รูป 51: Gantt chart ของนายณัฐพล กับแก้ว



รูป 52: Gantt chart ของนายสันติ ว่องประเสริฐ

4.3 ข้อเสนอแนะ

ในแผ่นพื้นเก็บพลังงานกรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง กำลังข้าอกจะขึ้นกับพารามิเตอร์ทางกลและทางไฟฟ้าของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน การที่จะดึงกำลังไฟฟ้ามากขึ้น อาจทำได้จากการปรับปรุงความถี่ของระบบ ผ่านการปรับพารามิเตอร์ทางกล เช่น เทคนิคปรับจุนความถี่เรโซแนนท์โดยปรับความเค้นของสปริงที่ยืดหยุ่นได้ (tunable resonance frequency based on stress modulation of flexible springs) เทคนิคปรับความแข็งแกร่งของสปริงโดยใช้แอคโซเมเตอร์ (electrostatic comb-drive actuator)

ในแผ่นพื้นเก็บพลังงานกรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรนั้น กำลังข้าอกจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าไม่ใช่ค่าสูงสุด อาจมีค่าสูงกว่าที่ได้เนื่องจากมีการประเมินว่างจรสมดุลที่รวมกลไกทางกลของแพนพื้นเก็บพลังงานและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรมาใช้ในการคำนวณหาแรงดันคำสั่งหรืออัลกอริทึม

แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานอาจใช้การควบคุมกระแส i_{sq} ในการหาอัลกอริทึม โดยพิจารณาสมการแรงบิด ดังสมการด้านล่าง

$$T = p|\lambda|i_{sq} \quad (65)$$

จากนั้นสร้างอินเวอร์เตอร์ควบคุมกระแส (current controlled inverter) มาควบคุมกระแส i_{sq} เพื่อเป็นการควบคุมแรงบิดโดยตรง และหาอัลกอริทึมการติดตามจุดสูงสุด เพื่อทำการชดเชยกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าและทางกลให้น้อยที่สุด ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าข้าอกของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรสูงขึ้น ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาได้ในอนาคต

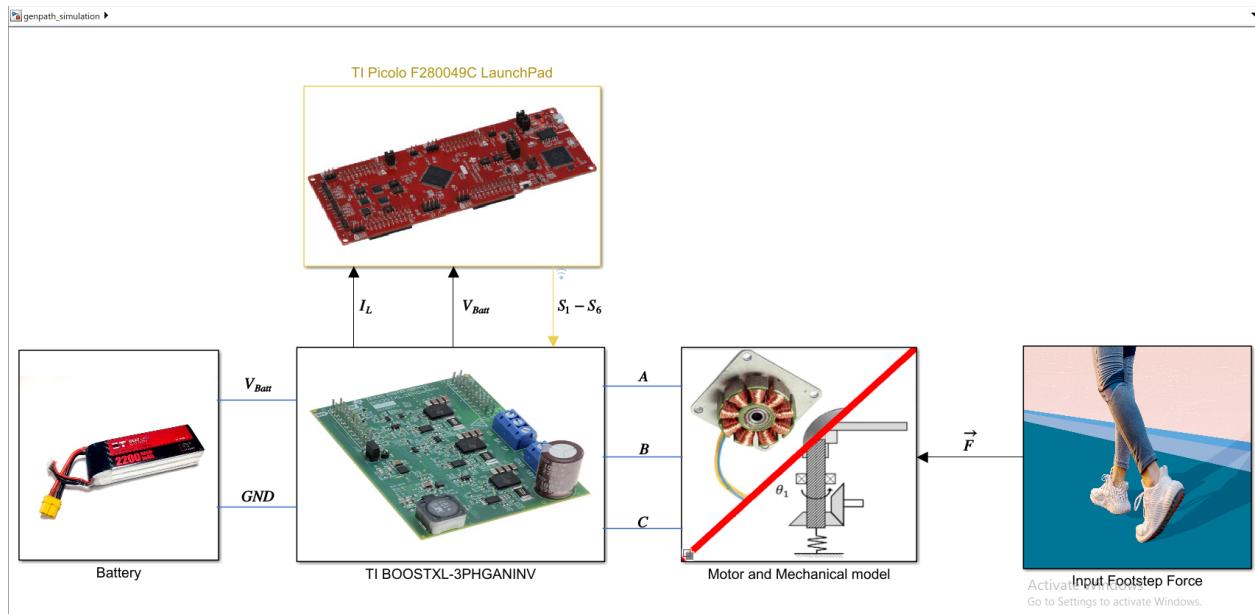
5 เอกสารอ้างอิง

- [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].

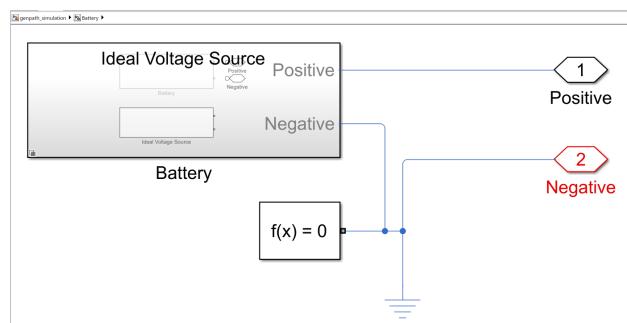
6 ภาคผนวก

6.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบพลวัตของระบบ

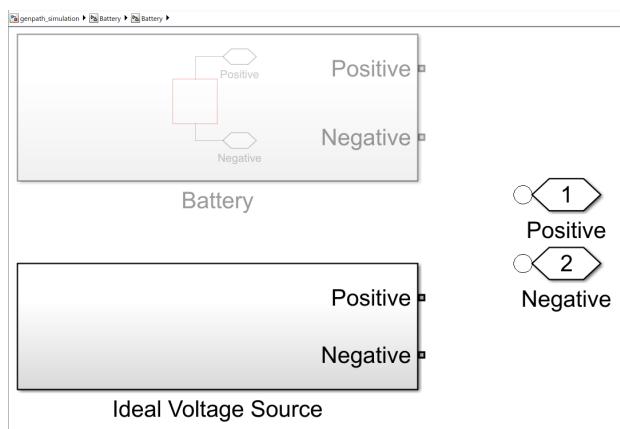


รูป 53: ขั้นที่ 1: ภาพรวมของระบบพลวัตทั้งหมด

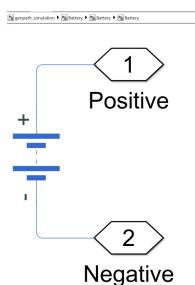
6.1.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแบตเตอรี่



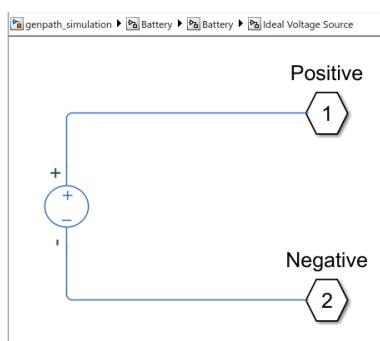
รูป 54: ขั้นที่ 2: แบตเตอรี่ และ Solver Configuration



รูป 55: ขั้นที่ 3: Variant Model ของแบตเตอรี่

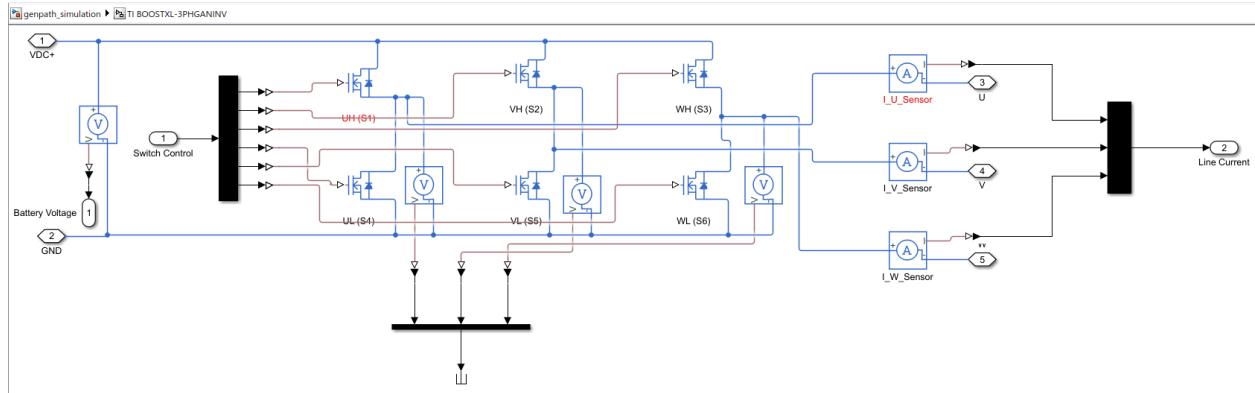


รูป 56: ขั้นที่ 4: ภายใน Variant Model ของแบตเตอรี่



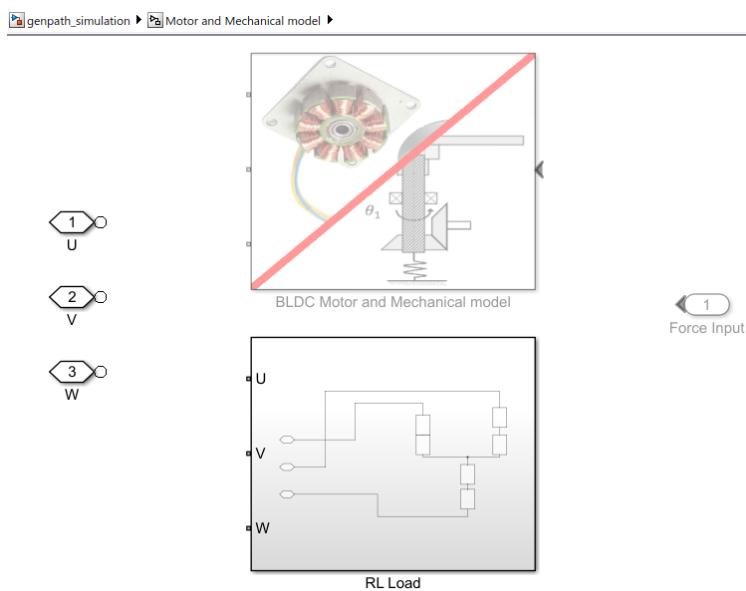
รูป 57: ขั้นที่ 4: ภายใน Variant Model ของแหล่งจ่ายไฟตรงในอุดมคติ

6.1.2 Simulink Model ในส่วนของการจำลองบอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI BOOSTXL-3PHGANINV

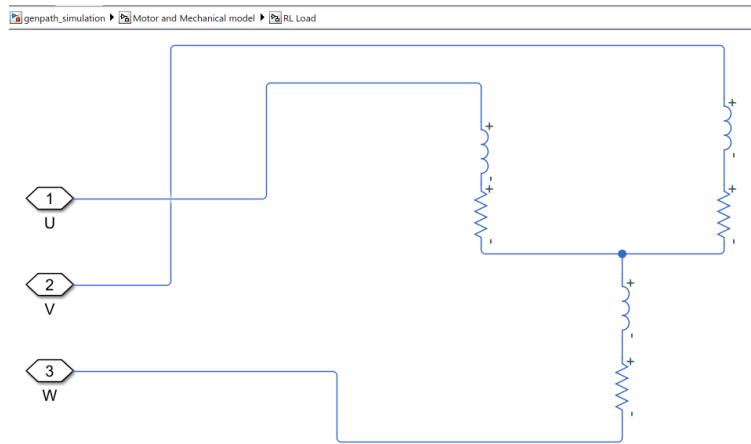


รูป 58: ขั้นที่ 2: บอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI BOOSTXL-3PHGANINV

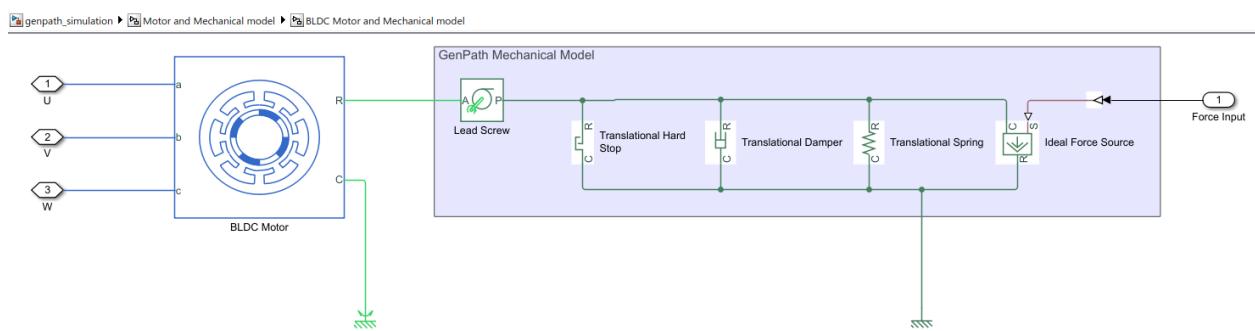
6.1.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบเชิงกลและมอเตอร์ซึ่งโครงสร้างแม่เหล็กถาวร



รูป 59: ขั้นที่ 2: Variant Model ของมอเตอร์และระบบเชิงกล กับโหลดแบบตัวต้านทานและตัวหนีไฟนำ

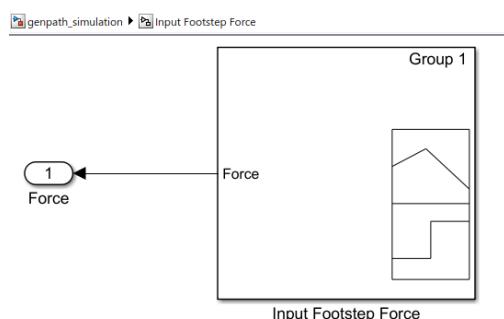


รูป 60: ขั้นที่ 3: ภายใน Variant Model ของโกลด์แบบตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

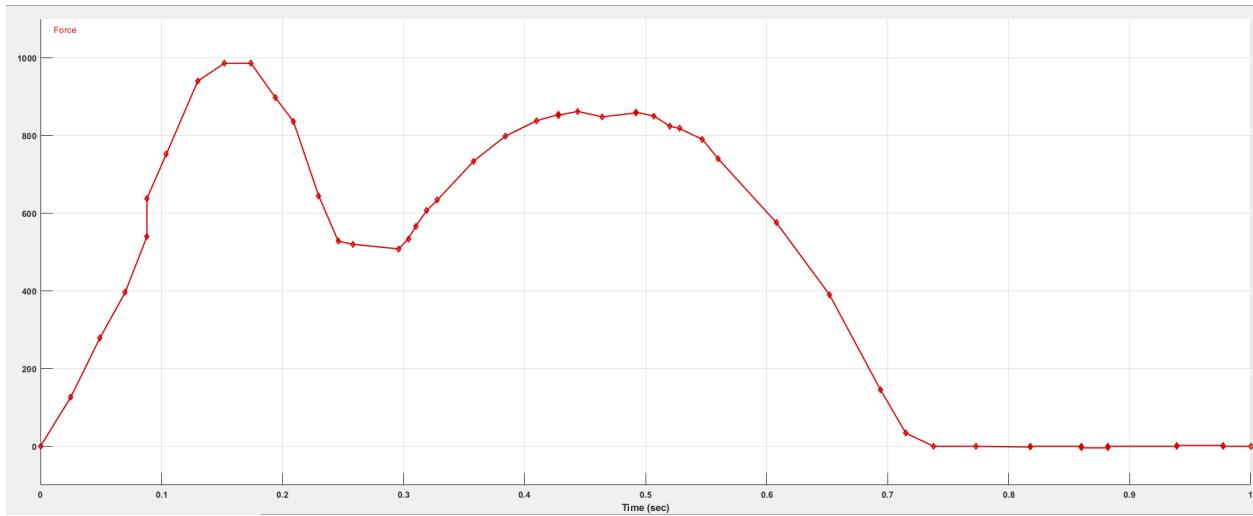


รูป 61: ขั้นที่ 3: ภายใน Variant Model ของระบบเชิงกลและมอเตอร์ซึ่งโครงสร้างแม่เหล็ก固定

6.1.4 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแรงที่เท้าเหยียบแผ่นพื้น

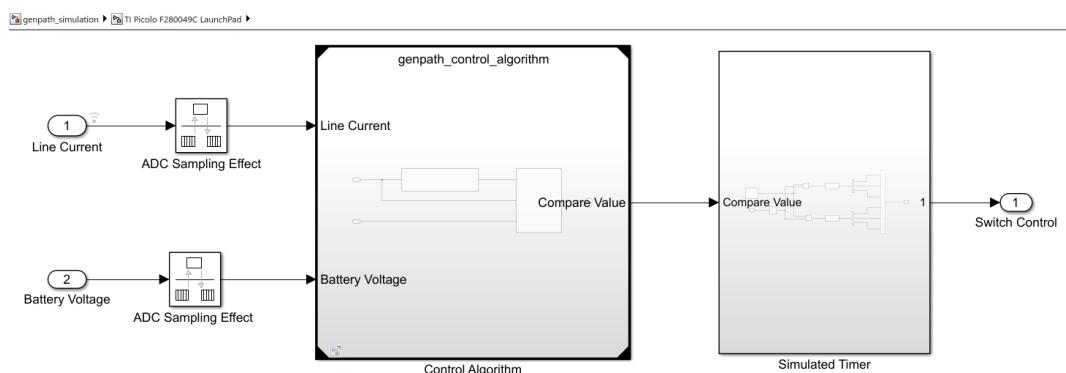


รูป 62: ขั้นที่ 2: แบบจำลองแรงที่มาจากเท้าเหยียบแผ่นพื้น

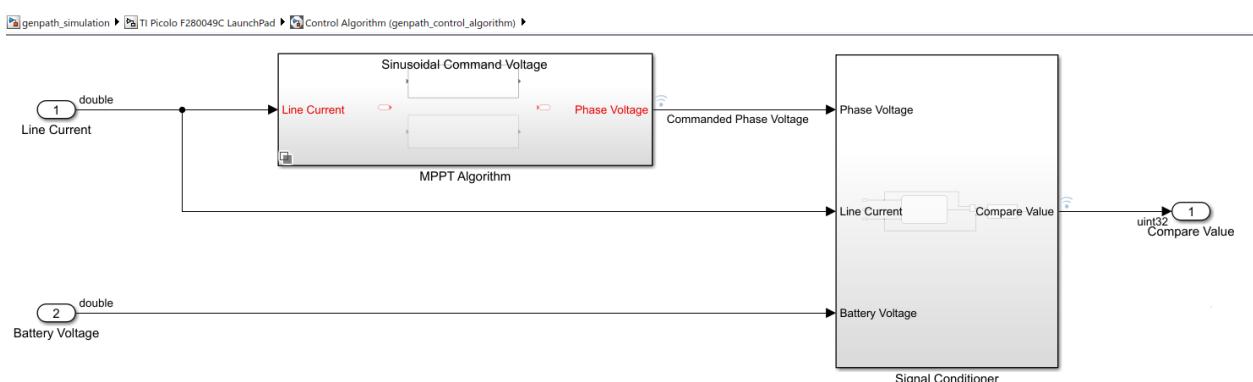


รูป 63: กราฟแสดงสัญญาณแรงที่มีมาจากการทดลอง

6.2 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมที่ทำงานบนระบบฝังตัว TI Picolo F280049C LaunchPad

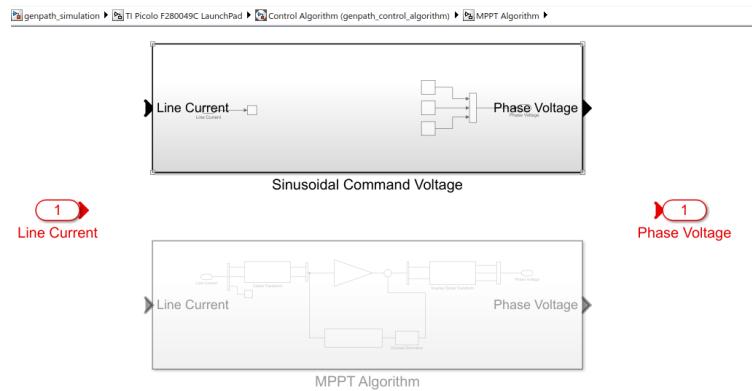


รูป 64: ชิ้นที่ 2: ภายใน Subsystem ของแบบจำลองระบบฝังตัว

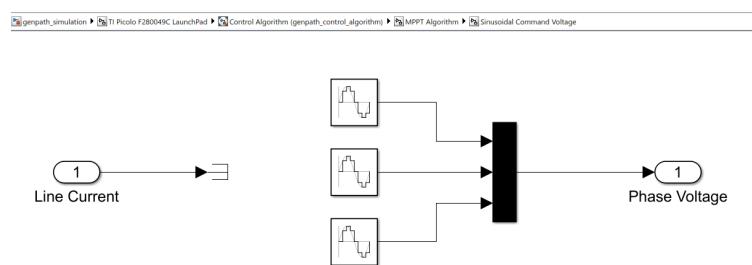


รูป 65: ชิ้นที่ 3: ภายใน Subsystem ของอัลกอริทึมที่ทำงานอยู่บนระบบฝังตัว

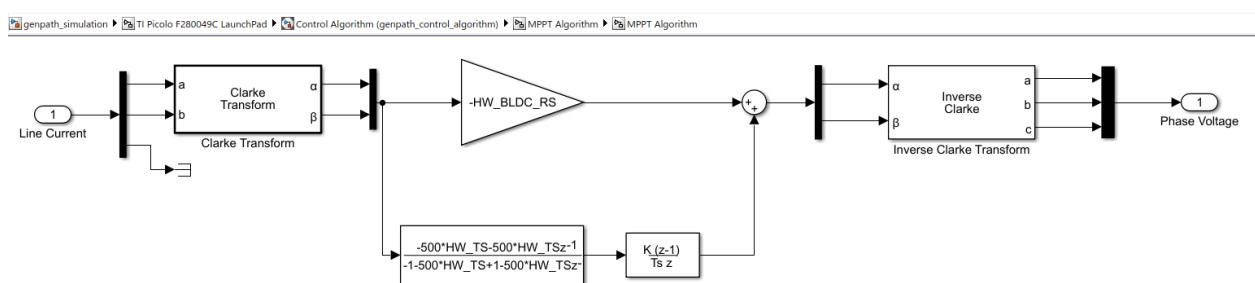
6.2.1 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูป 66: ขั้นที่ 4: Variant Model ของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

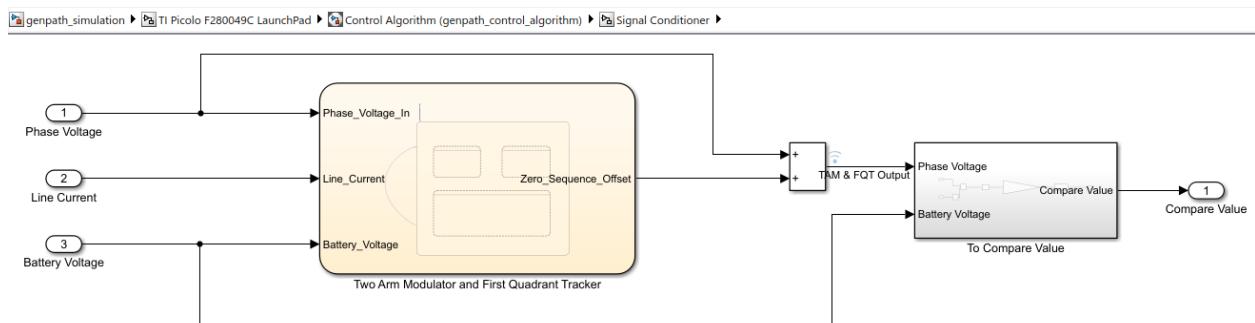


รูป 67: ขั้นที่ 5: ภายใน Variant Model ของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่สร้างสัญญาณคำสั่งแบบบีเซ็น

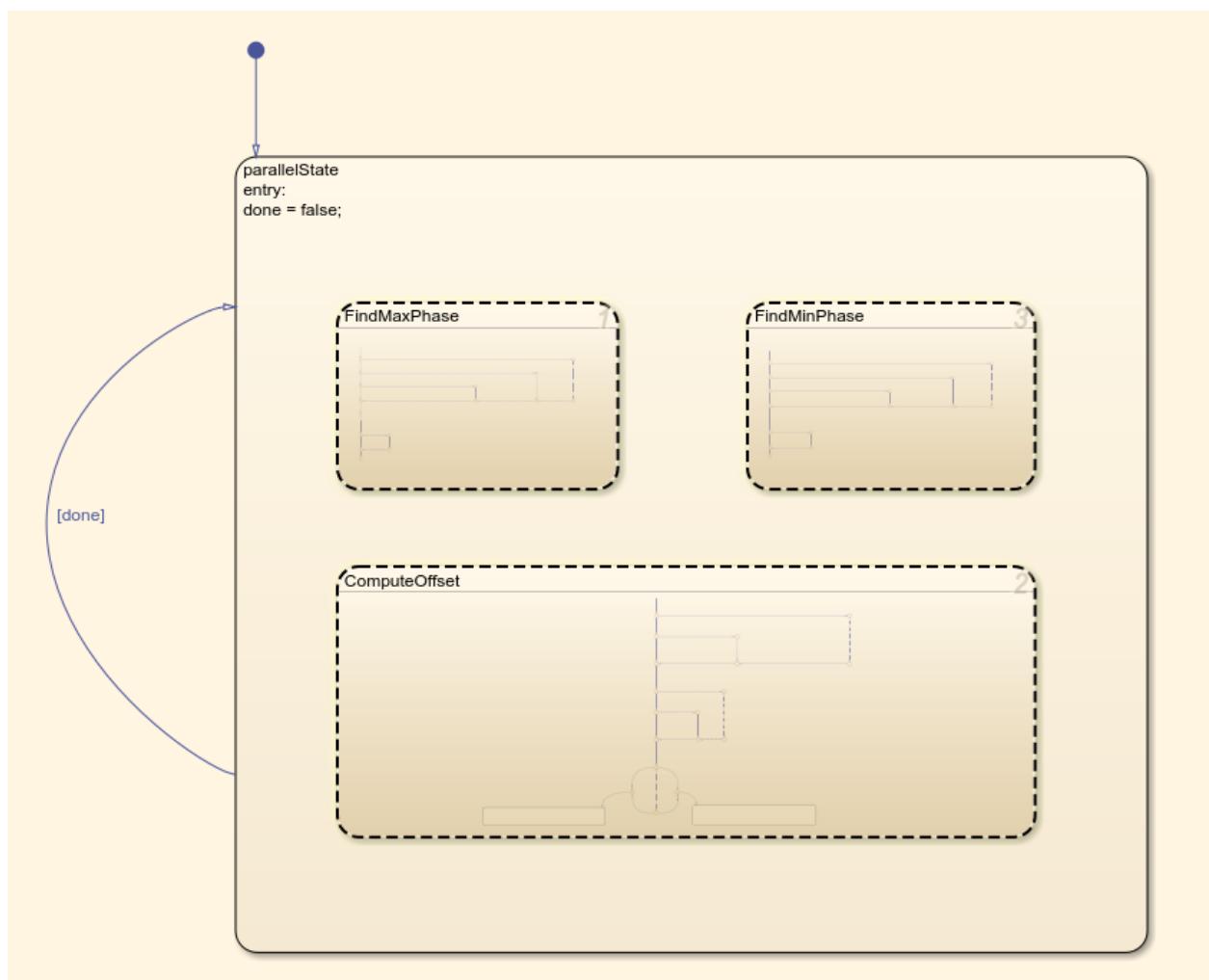


รูป 68: ขั้นที่ 5: อัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

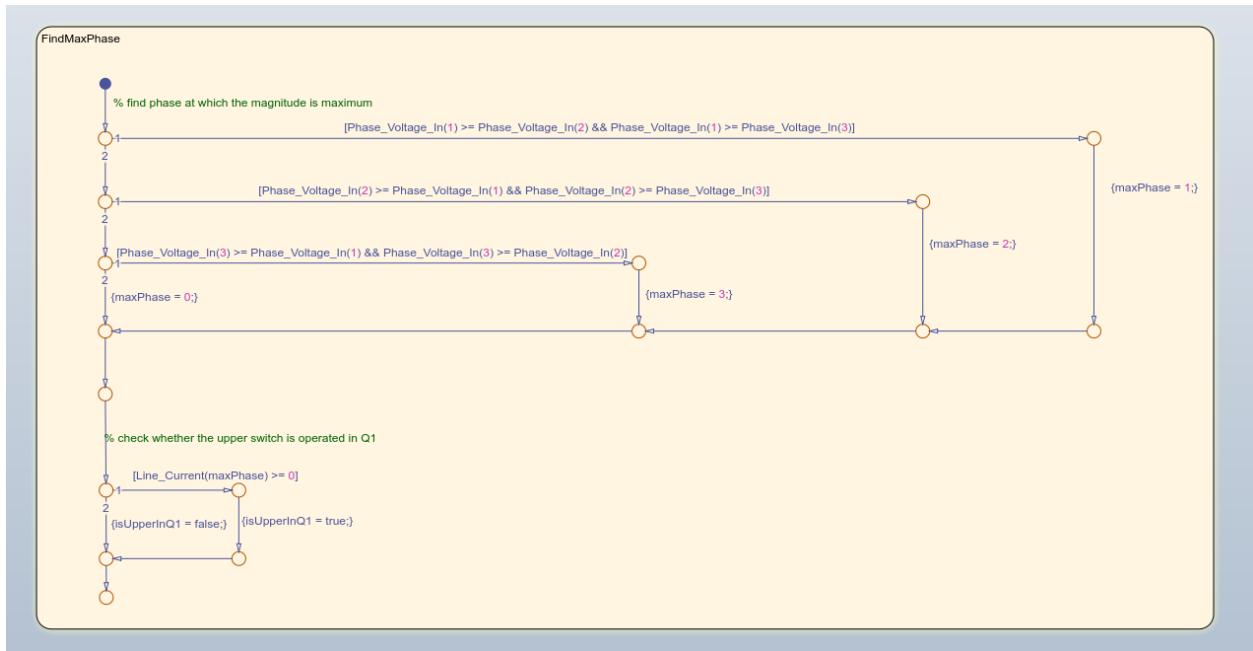
6.2.2 Simulink Model ในส่วนของการปรับปรุงสัญญาณ



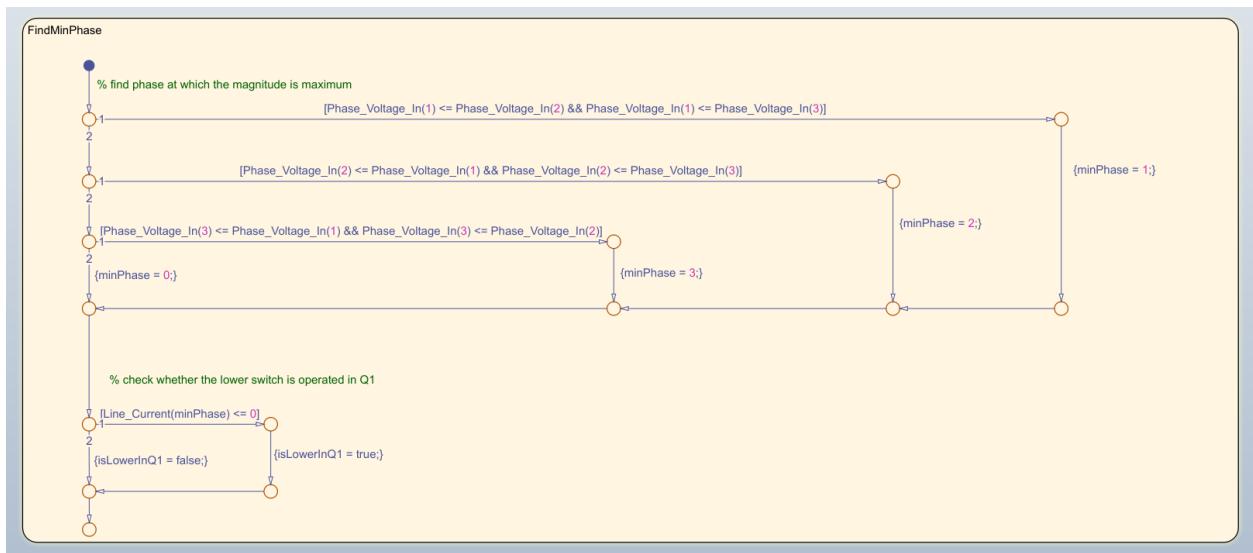
รูป 69: ขั้นที่ 4: ภายใน Subsystem ของระบบปรับปรุงสัญญาณ



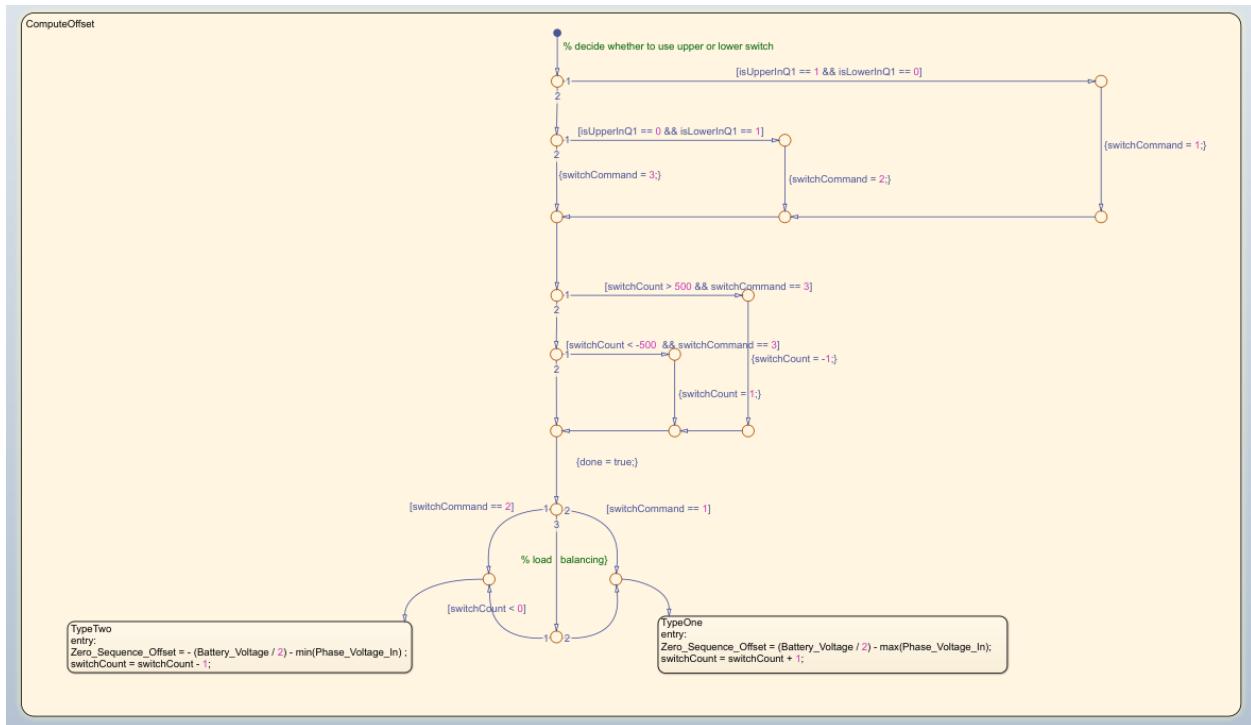
รูป 70: ขั้นที่ 5: ภายใน Stateflow chart ของตัวมอดูลเตแบบสองแข่น และติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง



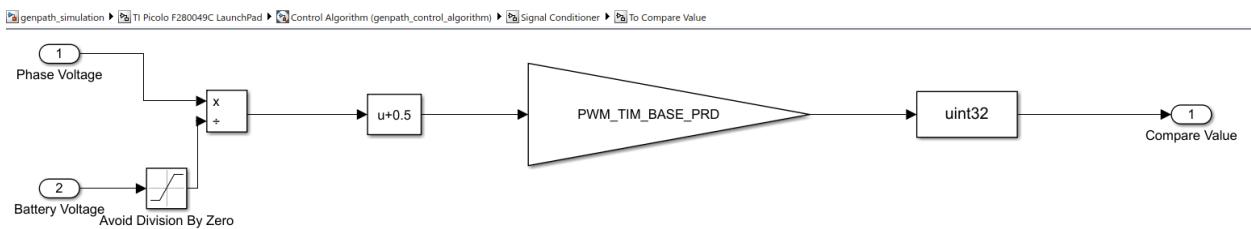
รูป 71: ขั้นที่ 6: ภายใน Subchart ที่ใช้ในการหาเฟสที่มีแรงดันคำสั่งมากที่สุด



รูป 72: ขั้นที่ 6: ภายใน Subchart ที่ใช้ในการหาเฟสที่มีแรงดันคำสั่งน้อยที่สุด

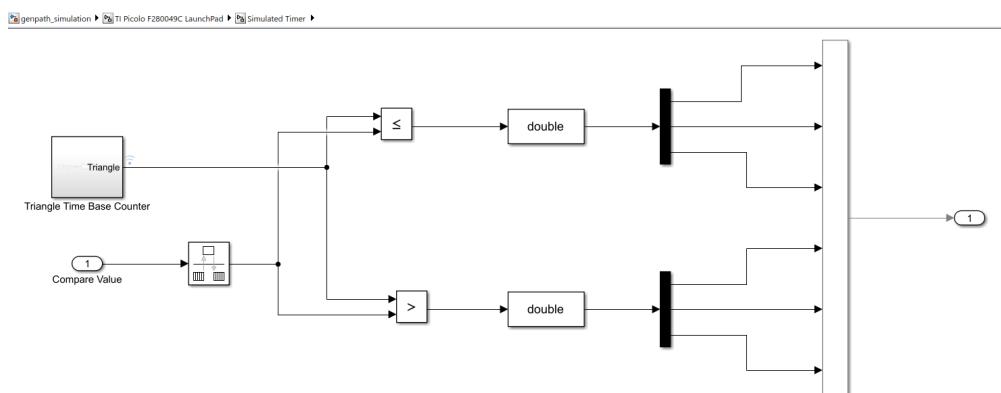


รูป 73: ขั้นที่ 6: ภายใน Subchart ที่ใช้ในการคำนวณแรงดันลำดับศูนย์



รูป 74: ขั้นที่ 5: ส่วนของการสเกลแรงดันคำสั่งให้เป็นค่าที่ป้อนให้ตัวตั้งเวลาของระบบผังตัว

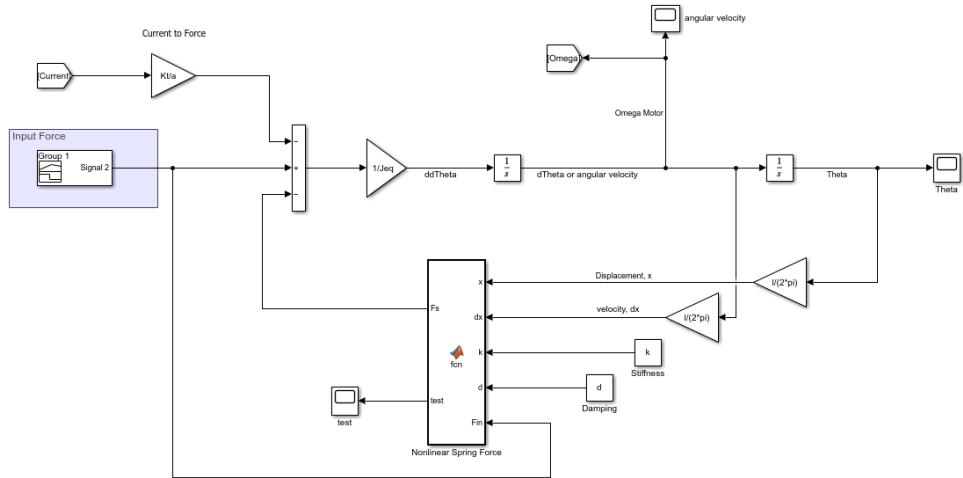
6.2.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองอุปกรณ์รอบข้างของระบบผังตัว



รูป 75: ขั้นที่ 3: การจำลองตัวตั้งเวลาของระบบผังตัว

6.3 Simulink model ของแบบจำลองของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และอัลกอริทึมการติดตามจุดสูงสุด

ส่วนต่อไปจะเป็นการแสดงแบบจำลองของแผ่นพื้นเก็บพลังงานในโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อศึกษาแบบจำลองแผ่นพื้นเก็บพลังงานที่ใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง



รูป 76: แบบจำลองกลไกทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน กรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

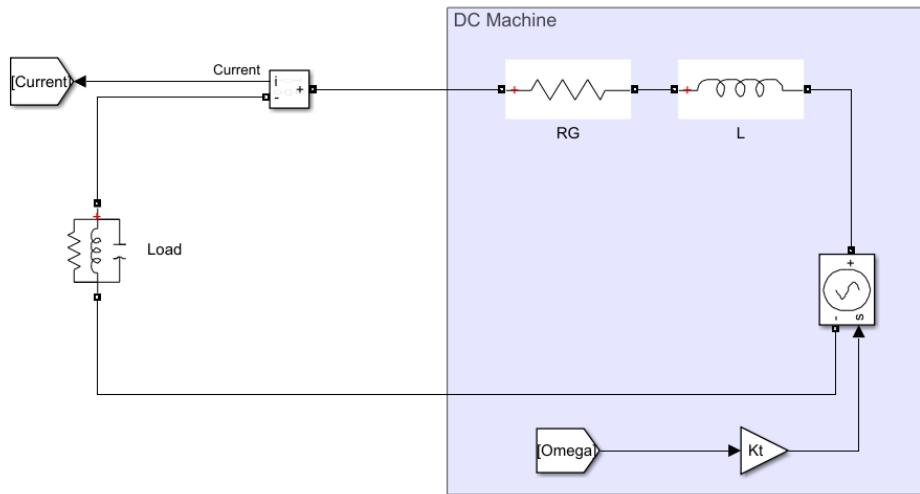
```

function [Fs,test] = fcn(x,dx,k,d,Fin)

if x >-0.015
    Fs = k*x+d*dx;
    test = 1;
else
    Fs = Fin+d*dx;
    test = 0;
end
if Fin == 0
    Fs = k*x+d*dx;
    test = 2;
end

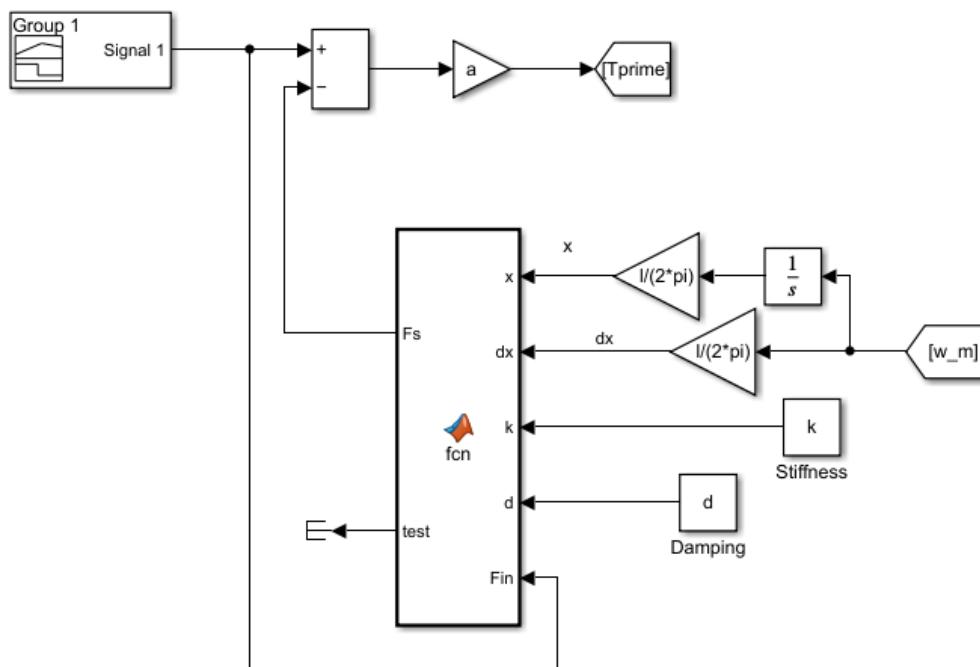
```

รูป 77: แบบจำลองเจี้ยนไข้ภายในส่วนที่เป็นทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

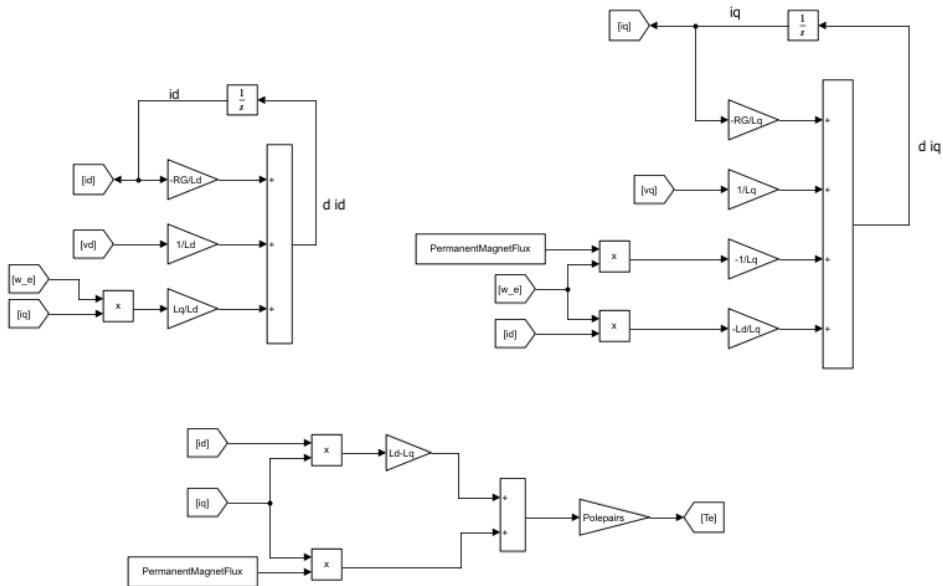


รูป 78: แบบจำลองทางไฟฟ้าของแม่พิมพ์เก็บพลังงาน กรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่น้ำก็สามารถใช้ MATLAB/Simulink

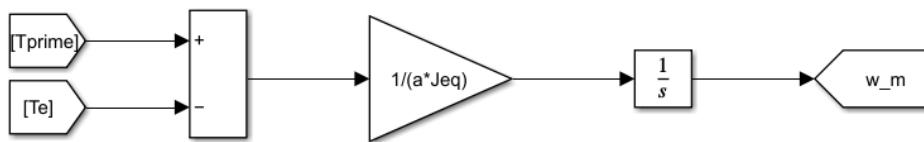
ส่วนต่อไปเป็นสือกไดอะแกรมของแบบจำลองของระบบแม่พิมพ์เก็บพลังงานที่ใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่น้ำก็สามารถใช้ MATLAB/Simulink



รูป 79: แบบจำลองกลไกทางกลของแม่พิมพ์เก็บพลังงาน กรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่น้ำก็สามารถใช้ MATLAB/Simulink

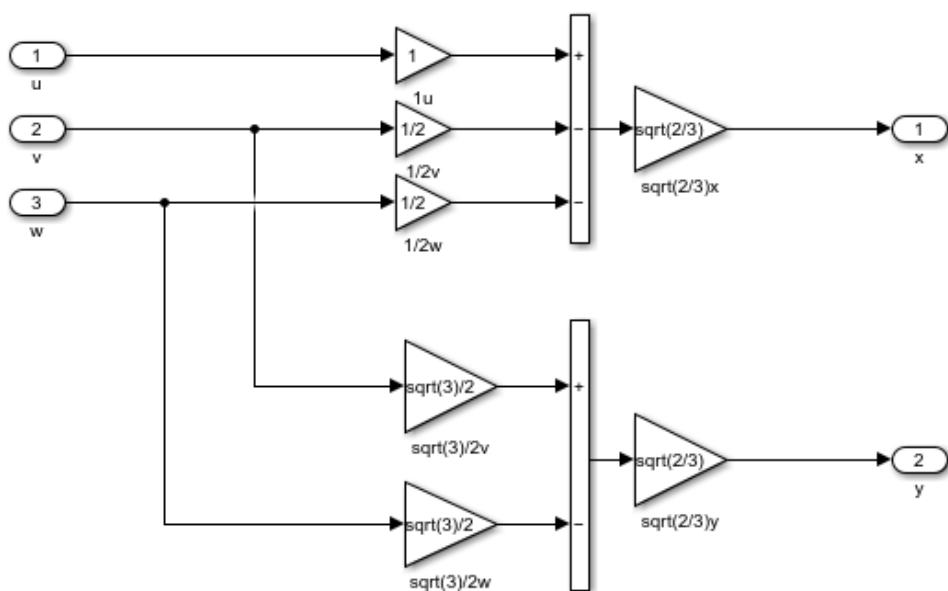


รูป 80: แบบจำลองพลวัตทางไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

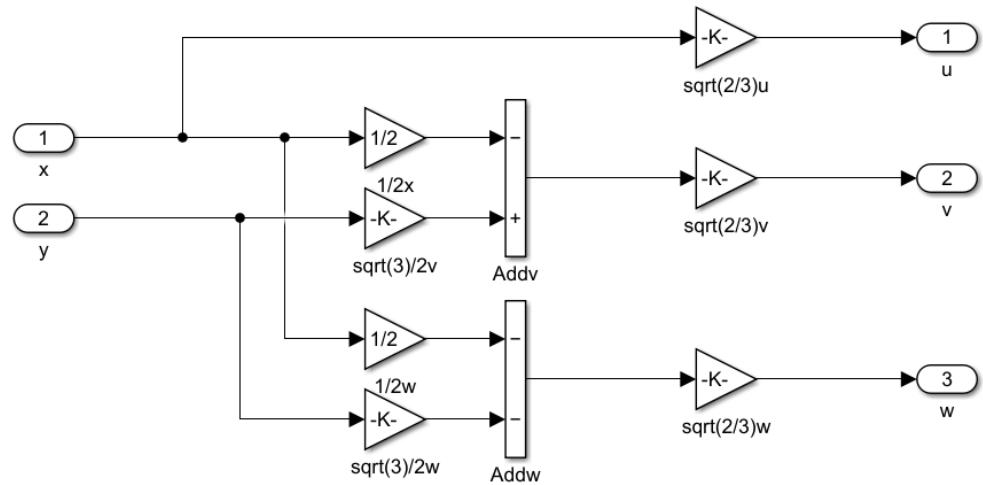


รูป 81: แบบจำลองเชิงกลของระบบควบคุมระหว่างแผ่นเก็บพลังงาน และเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

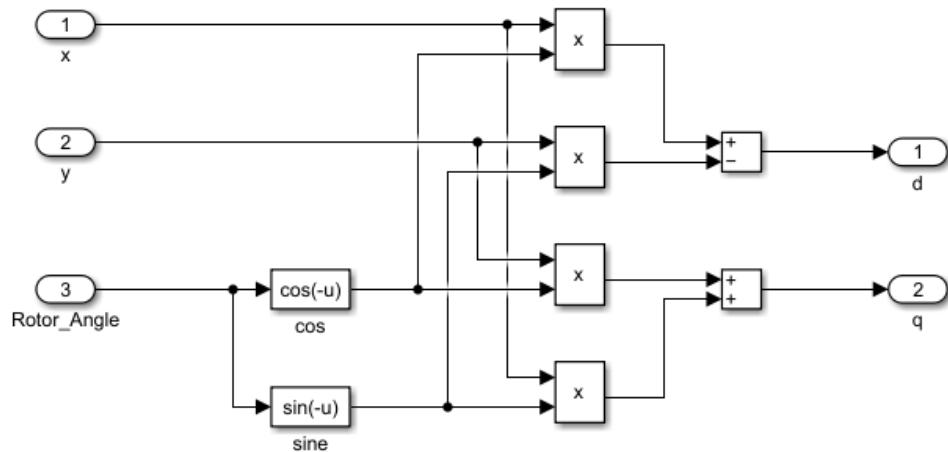
3 / 2 Transformation



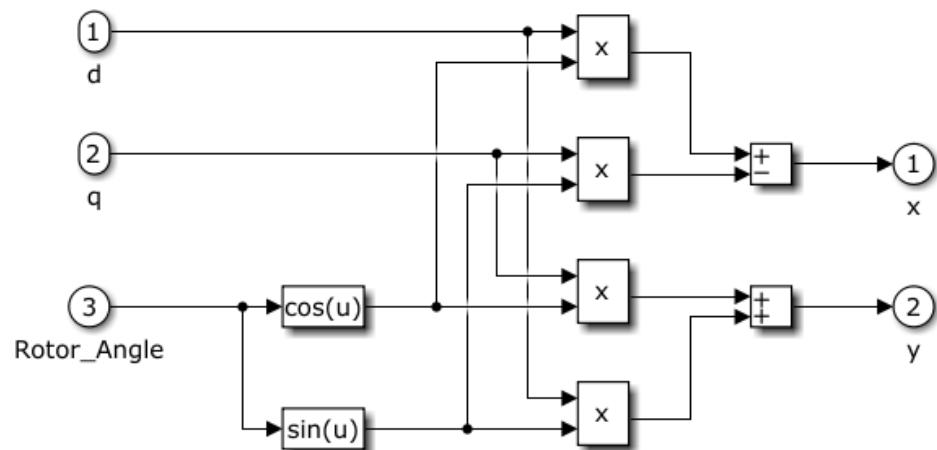
รูป 82: แผนภาพโดยรวมของการแปลงภาพของคลอก



รูป 83: การแปลงผกผันของคลาร์ก(Inverse Clarke's Transformation)



รูป 84: แผนภาพไ/doะแกรมของการแปลงภาพของปาร์ค



รูป 85: แผนภาพไ/doะแกรมของการแปลงภาพผกผันของปาร์ค