

รายงานโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า วิชา 2102499

อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานชนิดเครื่องจักรกลไฟฟ้า

Power Electronics for Electromechanical Energy-Harvesting System

นายณัฐพล กับแก้ว เลขประจำตัว 6130176521

นายลันติ วงศ์ประเสริฐ เลขประจำตัว 6130553421

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สุรพงษ์ สุวรรณกิwin

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

บทคัดย่อ

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

คำสำคัญ: การออกแบบเชิงโมเดล, การเจนเนอเรตโคเด็ต C/C++, แมทแล็บ/ซิมูลิงค์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, モเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร, ระบบฝังตัว

Abstract

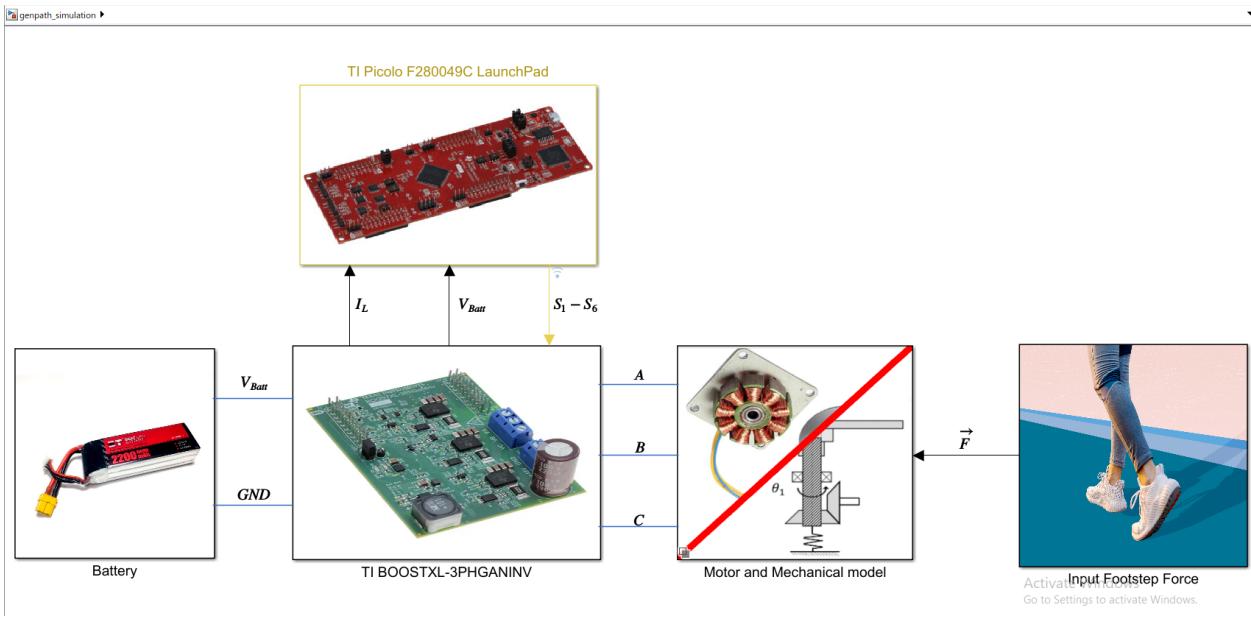
The electromechanical energy harvesting paveway which capable of producing enough power for small electric appliance was developed. This project aims to construct a electromechanical paveway driven by a permanent magnet synchronous motor; PMSM. The machine drive algorithm was developed using MATLAB/Simulink. Thanks to the program, the algorithm can be verified, tested and optimized. After the design iteration process, the C/C++ code optimized for embedded systems can be generated and deployed to the real hardware with the help of Simulink's Embedded Coder. The two arm modulation, first quadrant tracking and nonlinear-dynamic maximum power point tracking algorithm was developed to ensure the maximum efficiency of the paveway.

Keywords: Model-based design, C/C++ code generation, MATLAB/Simulink, Power electronic, Permanent magnet synchronous machine, Embedded systems

สารบัญ

1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากโครงการ	3
2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง (Two Arm Modulation and First Quadrant Tracking Algorithm)	3
2.1.1 การமமดูเลตความกว้างพัลส์แบบใช้สัญญาณพาหะ และ อินเวอร์เตอร์โหมดแรงดันแบบสามเฟส	3
2.1.2 กำลังสูญเสียในส่วนที่ 3 ของทรานซิสเตอร์สำน้ำไฟฟ้าแกลลีียม ในไตรท์	4
2.1.3 การนำกระแสในจตุภาคที่ 3 ของทรานซิสเตอร์สำน้ำไฟฟ้าแกลลีียม ในไตรท์	5
2.1.4 การลดกำลังสูญเสียในการมอดูเลตแบบใช้สัญญาณพาหะ ด้วยการมอดูเลตแบบสองแขน	7
2.1.5 การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการมอดูเลตแบบสองแขนด้วยการติดตามการทำงานในจตุภาคที่ 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 เครื่องจักรกลไฟฟ้าชิ้งโครนัสแม่เหล็ก吸引力	14
2.2.4 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับการติดตามจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking) สำหรับวงจร กักเก็บพลังงาน	16
3 ผลลัพธ์ของโครงการและการอภิปรายผล	19
3.1 การทดสอบอัลกอริทึมการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่งด้วยการจำลองบนโปรแกรม Simulink	19
3.1.1 เนื่องจากการทดสอบกรณีที่ปรับความถี่คำสั่งของอินเวอร์เตอร์	20
3.1.2 เนื่องจากการทดสอบกรณีที่ปรับค่าความหน่วงนำของโหลด	21
3.1.3 เนื่องจากการทดสอบกรณีที่ปรับค่าขนาดของแรงดันคำสั่งของอินเวอร์เตอร์	23
3.2 การทดสอบระบบเข้ากับแผ่นพื้นเก็บพลังงานจริง	25
3.2.1 การทดสอบระบบเข้ากับแผ่นพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานที่ขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	25
3.2.2 การทดสอบระบบเข้ากับแผ่นพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานที่ขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ชิ้งโครนัสแม่เหล็ก吸引力	27
3.3 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้า	30
3.4 ผลการจำลองของแบบจำลองทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้า บนโปรแกรม MATLAB/Simulink	32
4 บทสรุป	38
4.1 สรุปผลการดำเนินการ	38
4.1.1 การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง	38
4.1.2 การทดสอบเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด ผ่านการจำลอง	38
4.1.3 การทดสอบระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานกับอุปกรณ์จริง	38
4.2 ปัญหา อุปสรรค และแนวทางแก้ไข	38
4.2.1 พลังงานที่ได้จากแผ่นพื้นเก็บพลังงานที่ใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าชิ้งโครนัสแม่เหล็ก吸引力 มีค่าน้อย	38
5 เอกสารอ้างอิง	38
6 กิตติกรรมประกาศ	39

7 ภาคผนวก	39
7.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบพลวัตของระบบ	39
7.1.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแบบเตอร์รี	40
7.1.2 Simulink Model ในส่วนของการจำลองบอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI BOOSTXL-3PHGANINV	41
7.1.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบเพิงกลและมอเตอร์ชิ่งโครนัสแม่เหล็กถาวร	41
7.1.4 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแรงที่เท้าเหยียบแผ่นพื้น	42
7.2 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมที่ทำงานบนระบบฝังตัว TI Picolo F280049C LaunchPad	43
7.2.1 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด	44
7.2.2 Simulink Model ในส่วนของการปรับปรุงสัญญาณ	45
7.2.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองอุปกรณ์รอบข้างของระบบฝังตัว	47
7.3 Simulink model ของการแปลงผกผันของคลาร์ก(Inverse Clarke's Transformation)	48



รูป 1: ภาพรวมของระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานที่ถูกสร้างในรายงานฉบับนี้

1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

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

จากค้นคว้าจากการศึกษาในครั้งก่อนๆ [1] [2] ได้ค้นพบว่า พลังงานที่ได้ได้ในแต่ละการเหยียบแต่ละครั้งนั้น มีค่าน้อยมาก นั่นคือประมาณ 1-5 จูล เท่านั้น ดังนั้น ห้ามในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากระบบดังกล่าว คือการมีประสิทธิภาพที่ดี จึงจะสามารถเก็บพลังงานได้เพียงพอ กับการใช้งานต่อไป ดังนั้น การศึกษาในโครงงานฉบับนี้ จึงได้มุ่งเน้นในการเพิ่มประสิทธิภาพให้บันระบบเก็บพลังงานเป็นหลัก

จากโครงงานปี 2563 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ได้เป็นค่าสูงสุด โดยจากการทดสอบค่าประมาณ หนึ่งในสี่ ของพลังงาน ขาเข้าที่มาจากแรงเหยียบของมนุษย์ และไม่ได้มีการลดการกำลังสูญเสียของวงจรแปลงผัน โครงงานปี 2564 นี้ มีการพัฒนาการออกแบบ ทางไฟฟ้าและทางกลเพื่อประปุรุ่งประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน โดยมี 2 ส่วน คือ

1. สร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าชิ้นโครงน้ำหนิดแม่เหล็กถาวร เพื่อทราบเงื่อนไขของแรงดันออกตามหลักการติดตามจุดทำงานสูงสุด

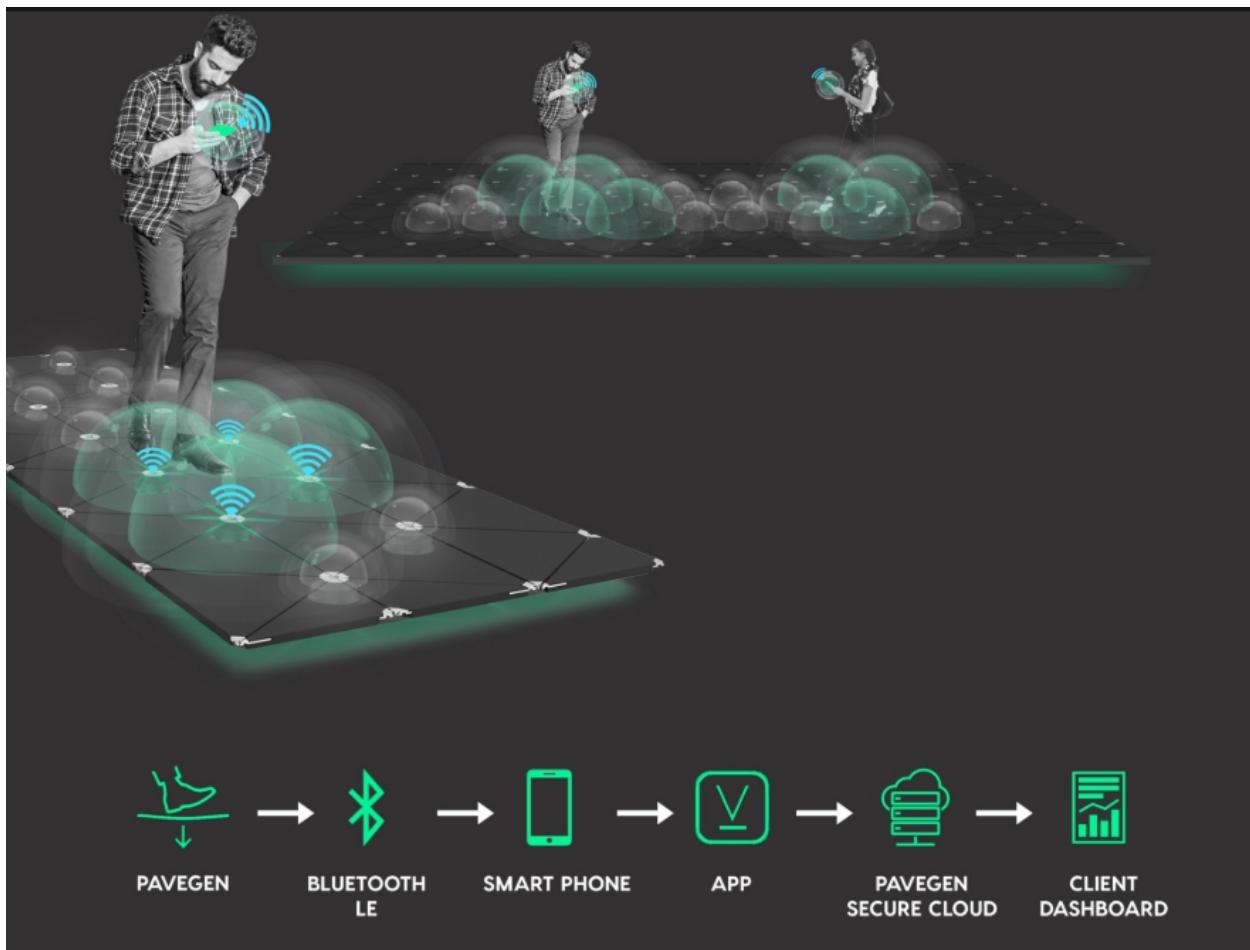
2. การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการมอดูลเตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

- เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสร้างแบบจำลองพลวัตของระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยโปรแกรม MATLAB™/Simulink™ เพื่อตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้ก่อนนำไปใช้กับอุปกรณ์จริง
- เพื่อหาแนวทางในการลดพลังงานสูญเสียในระบบขั้นตอนเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าชิ้นโครงน้ำหนิดแม่เหล็กถาวร และพัฒนาชุดอัลกอริทึมในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน
- เพื่อสร้างต้นแบบอุปกรณ์ แผ่นพื้นเก็บพลังงาน ที่สามารถใช้งานได้จริง

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

- โครงงานฉบับนี้จะใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าชิ้นนิดแม่เหล็กถาวร เป็นตัวกำเนิดไฟฟ้า



รูป 2: โปสเตอร์ของ Pavegen™



รูป 3: สถานที่ที่ได้มีการติดตั้ง Pavegen™

2. โครงการนฉบับนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ TI™ F280049C ที่อยู่บนชุดทดลอง Picolo™ LaunchPad™ เป็นระบบฝังตัวแกนกลาง ในจำนวนอัลกอริทึมต่างๆ
3. โครงการนฉบับนี้จะใช้บอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI™ BOOSTXL-3PHGaNINV เป็นสวิตช์สำหรับจรอินเวอร์เตอร์
4. โครงการนฉบับนี้จะโปรแกรมระบบฝังตัวดังกล่าวผ่านการสร้างโค้ดบนแพลตฟอร์ม Simulink™ Embedded Coder™

1.4 ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากโครงการ

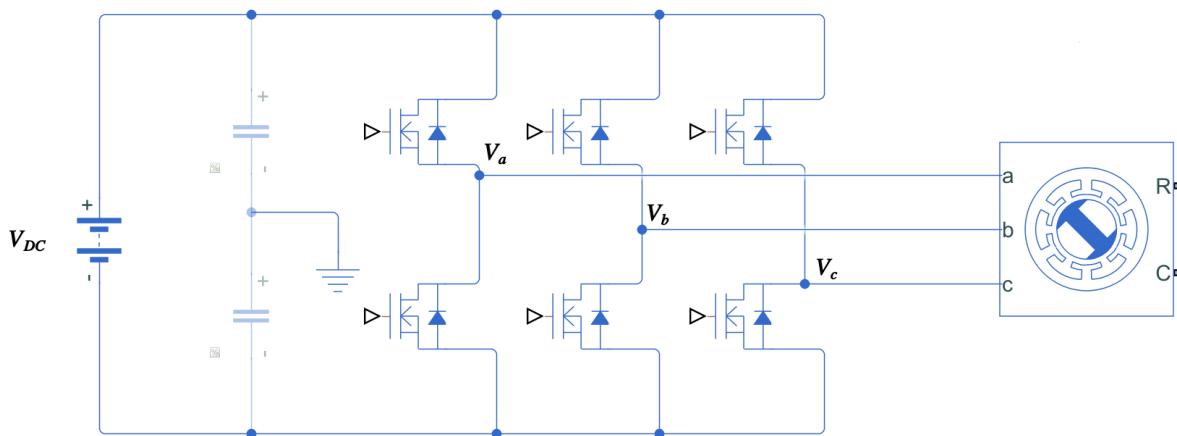
1. แผ่นพื้นเก็บพลังงานดันแบบที่มีประสิทธิภาพสูง และสามารถใช้งานได้จริง
2. อัลกอริทึมในการลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ที่สามารถนำไปใช้กับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และยังสามารถนำไปใช้กับอินเวอร์เตอร์ใดๆ นอกเหนือจากระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานได้อย่างง่าย
3. อัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงาน ที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่สามารถนำไปใช้กับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

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

2.1.1 การมอตูเลตความกว้างพัลส์แบบใช้สัญญาณพาหะ และ อินเวอร์เตอร์ไฮดแรงดันแบบสามเฟส

ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรไฟฟ้าโดยทั่วไปนั้นอาศัยการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนมาแทนที่ของเครื่องจักร กลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างแบบแม่เหล็กถาวรนั้นอาศัยการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ อินเวอร์เตอร์ จึงเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างแบบแม่เหล็กถาวรด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ในโครงการนฉบับนี้ได้นำเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างแบบแม่เหล็กถาวรสามเฟส มาเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน โดยจะเก็บพลังงานที่ผลิตได้ไว้กับแบบเตอร์เรี่ยในโครงการนฉบับนี้ จึงเลือกใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีพอโลโยดีจักรูปที่ 4



รูป 4: ทอโพโลยีของอินเวอร์เตอร์สามเฟส

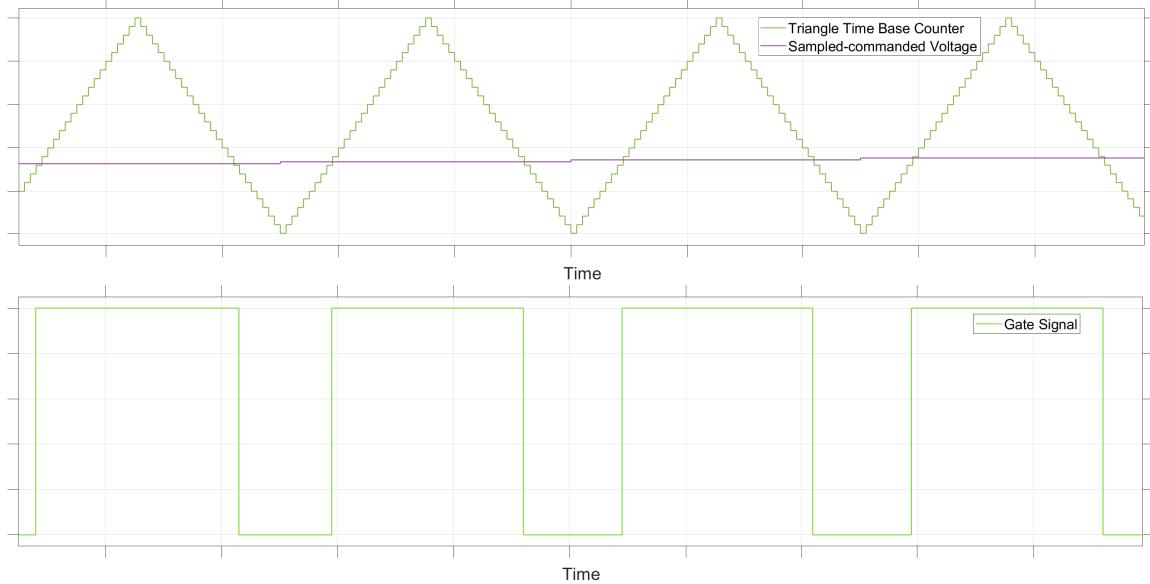
อินเวอร์เตอร์ทอโพโลยีที่ได้นำเสนอมาข้างต้น สามารถสร้างแรงดันออกที่แต่ละขั้วทั้งสามได้เพียงแค่ 2 ค่าเท่านั้นคือ

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

โดยที่ V_t เป็นแรงดันที่ขั้วออกของอินเวอร์เตอร์ และถ้าหากพิจารณาให้กึ่งกลางบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นจุดอ้างอิงแรงดัน จะได้ว่า

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

เนื่องจากจะขับเกลี่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างสามเฟสประเภทแม่เหล็กการนั้น จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับคลื่นรูปไข่ ดังนั้น เทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยใช้สัญญาณพาหะ (Carrier-based Pulse Width Modulation) จึงได้ถูกนำมาใช้ โดยการมอดูเลต ความกว้างพัลส์โดยใช้สัญญาณพาหะมีหลักการในการทำงานคือ นำสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยม มาเปรียบเทียบกับสัญญาณคำสั่ง โดยผลลัพธ์ ของการเปรียบเทียบนั้น จะได้เป็นสัญญาณขั้นนำของสวิตช์ ดังรูปที่ 5 ซึ่งจะส่งผลให้ แรงดันที่ข้าของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับแรงดันคำ สั่ง



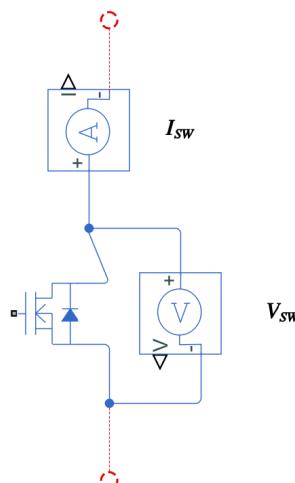
รูป 5: การมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยใช้สัญญาณพาหะ

จากรูปข้างต้น จะเห็นได้ว่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณขั้นนำนั้น เปลี่ยนไปตามขนาดของสัญญาณคำสั่ง และสัญญาณที่จะนำมาเปรียบเทียบนั้น จะเป็นสัญญาณที่ถูกสุมตัวอย่างแล้วคงค่า (Sample and Hold) เพราะว่า อัลกอริทึมการมอดูเลตที่เลือกใช้ในโครงงานฉบับนี้นั้น เป็นการคำนวนบนระบบบังคับ ซึ่งเป็นการประมวลผลในโดเมนดิจิทัล

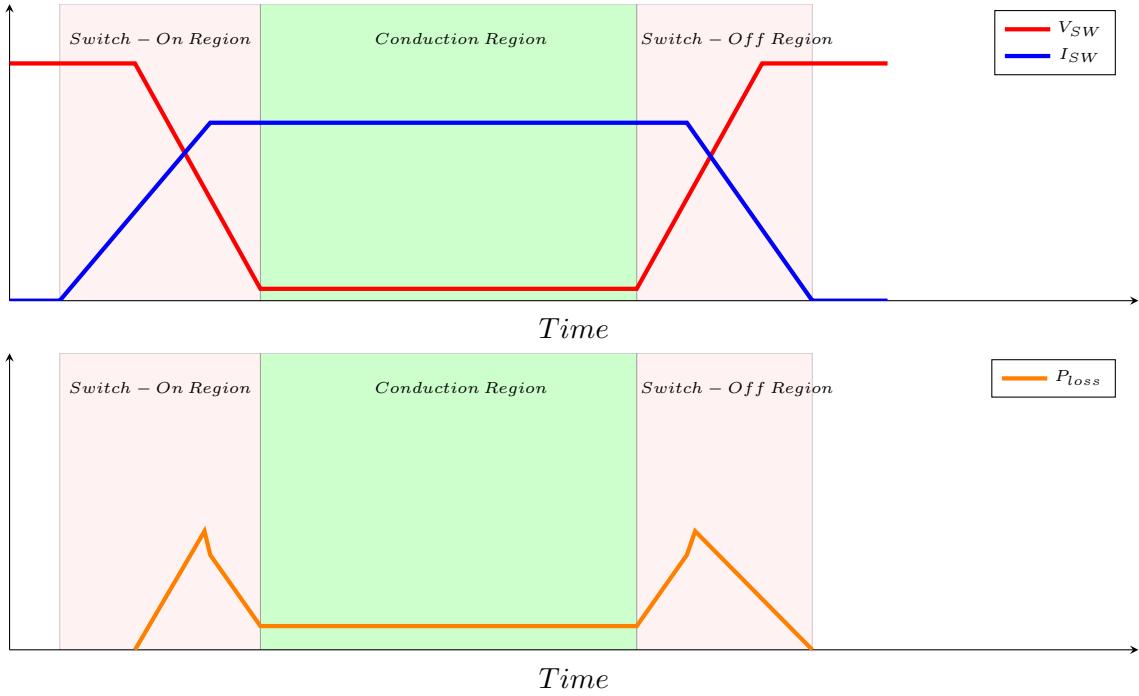
2.1.2 กำลังสูญเสียในสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

กำลังสูญเสียในสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์มีอยู่ด้วยกันสองประเภท คือ กำลังสูญเสียระหว่างสวิตช์ (Switching Loss) และกำลังสูญเสียระหว่าง นำกระแส (Conduction Loss)

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



รูป 6: นิยามของ V_{SW} , I_{SW}



รูป 7: แรงดันต่อกครื่มสวิตช์ กระแสของสวิตช์ และกำลังสูญเสียในสวิตช์

จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่า ในขณะที่กำลังเปิดสวิตช์ กระแสและแรงดันต่อกครื่มสวิตช์จะเหลือกัน ซึ่งเกิดจากโครงสร้างทางกายภาพของทรานซิสเตอร์ 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 สวิตช์จะมีแรงดันต่อกครื่มอยู่เล็กน้อย ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในขณะนำกระแส

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

เมื่อ $v_{sw(on)}$, $i_{sw(on)}$ คือแรงดันต่อกครื่มสวิตช์ และกระแสที่เหลือผ่านสวิตช์ในขณะนำกระแส ตามลำดับ

กำลังสูญเสียระหว่างสวิตช์นั้น ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะสมบัติของสวิตช์ที่เลือกใช้ และจำนวนครั้งในการสวิตช์ นั้นคือ ถ้าหากสวิตช์ที่เลือกใช้มีคุณลักษณะสมบัติที่ทำให้อยู่ในช่วงกำลังสวิตช์นาน หรือมีจำนวนครั้งในการสวิตช์มาก ก็จะทำให้กำลังสูญเสียขณะสวิตช์สูงตามไปด้วย

กำลังสูญเสียขณะนำกระแสนั้น ขึ้นอยู่กับว่าในขณะนำกระแสนั้นมีแรงดันต่อกครื่มสวิตช์มากแค่ไหน ถ้าหากแรงดันต่อกครื่มสวิตช์มาก ก็จะทำให้กำลังสูญเสียขณะนำกระแสมากขึ้นตามมา

2.1.3 การนำกระแสในจตุภาคที่ 3 ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแกลเลียม ในไตรท์

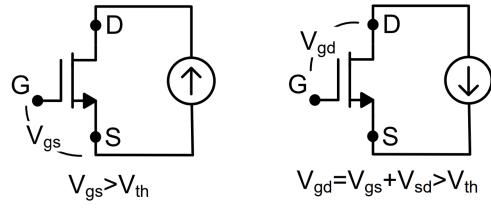
ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแกลเลียม ในไตรท์ หรือ แกน (Gallium Nitride; GaN) ถือเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับผู้ออกแบบในงานอิเล็กทรอนิกส์ กำลัง เพราะว่าทรานซิสเตอร์แกน มีข้อดีกว่าทรานซิสเตอร์แบบบีลิก่อนในหลายด้าน คือ การไม่มีบอร์ดไดโอด ซึ่งทำให้มี reverse recovery loss ในบอร์ดไดโอด ข้อดีเบรียบเน้นที่ทำให้ทรานซิสเตอร์แบบแกนมีการกำลังสูญเสียในขณะสวิตช์น้อยกว่าแบบบังเดิม ทำให้ทำงานได้ที่ความถี่สูงขึ้น ใช้ทรานซิสเตอร์ตัวเล็กลงได้ และความร้อนน้อยลง ซึ่งในโครงงานฉบับนี้ได้เลือกใช้ทรานซิสเตอร์แกนเป็นสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์

เนื่องจากโครงสร้างที่ไม่เหมือนกันของทรานซิสเตอร์แบบแกน ทำให้การนำกระแสในจตุภาคที่สามของทรานซิสเตอร์แบบแกนนั้นแตกต่างไปจากทรานซิสเตอร์แบบบีลิก่อน [3] คือ การนำกระแสผ่านบอร์ดไดโอด

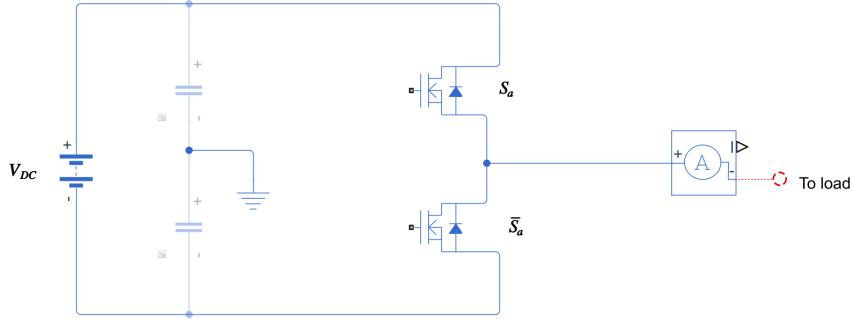
เนื่องจากที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์แกนนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า (Forward) และย้อนกลับ (Reverse) เป็นไปดังรูปที่ 8 คือ

ถ้าหากพิจารณาตัวอย่างที่เกิดขึ้นจริงในอินเวอร์เตอร์เพื่อให้เห็นภาพพจน์ชัดเจนขึ้น ตามรูปวงจรของอินเวอร์เตอร์ ที่ตั้งมาพิจารณาเฉพาะหนึ่งเฟส ตามรูปที่ 9

เรากำหนดให้สวิตช์ S_a เป็นสวิตช์ที่เรานำไปโดยถ้าหากเราขับนำสวิตช์ให้สวิตช์นำกระแส (On) นั้นคือ เราขับนำสัญญาณขา $V_{gs} > V_{th}$ แล้วถ้าหากโหลดที่ต่ออยู่กับขาของร่องของสวิตช์ S_a ตึงกระแสออกไปจากอินเวอร์เตอร์ นั้นคือ $I_a > 0$ จะทำให้ แรงดันต่อกครื่มขาเดренของร่องของสวิตช์ S_a เป็นค่าบวก นั่นคือ $V_{ds} > 0$ เนื่องจากสวิตช์ S_a กำลังนำกระแสอยู่ ดังนั้นสวิตช์ S_a ไม่สามารถนำกระแส

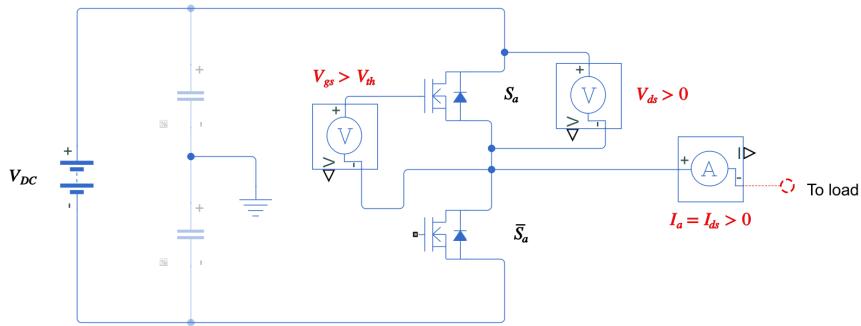


รูป 8: เงื่อนไขที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์แกนนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า และย้อนกลับ



รูป 9: กรณีตัวอย่างการนำกระแสที่เกิดขึ้นจริงในอินเวอร์เตอร์

พร้อมๆ กับสวิตช์ S_a ได้ เพราะจะถูกดึงลง ดังนั้น กระแส I_a ทั้งหมด ก็จะไหลผ่านสวิตช์ S_a ทำให้กระแส $I_{ds} = I_a > 0$ เนื่องจาก กระแส $I_{ds} > 0$ และ $V_{ds} > 0$ ดังนั้น สวิตช์จะนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า จุดทำงานที่กล่าวถึงข้างต้นจะแสดงในรูป 10



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

ถ้าหากพิจารณากรณีถัดไปคือการขับন้ำสวิตช์ในลักษณะเดิมคือ การขับสัญญาณขา $V_{gs} > V_{th}$ แต่มีสิ่งที่เปลี่ยนไปคือ ทิศทางการไหลของกระแส นั่นคือ ถ้าหากให้ลดมีการติดกระแสเข้าอินเวอร์เตอร์ $I_a = I_{sd} > 0$ จะทำให้ แรงดันต่อกลางของตัวต้านทานของสวิตช์เป็นค่าลบ นั่นคือ $V_{ds} < 0$; $V_{sd} > 0$ เนื่องจาก $V_{gd} = V_{gs} + V_{sd} = (\text{ค่าที่มากกว่า } V_{th}) + \text{ค่าที่เป็นบวก } \text{ ดังนั้น } V_{gd} > V_{th}$ และ $I_{ds} < 0$ ทำให้สวิตช์นำกระแสย้อนกลับ

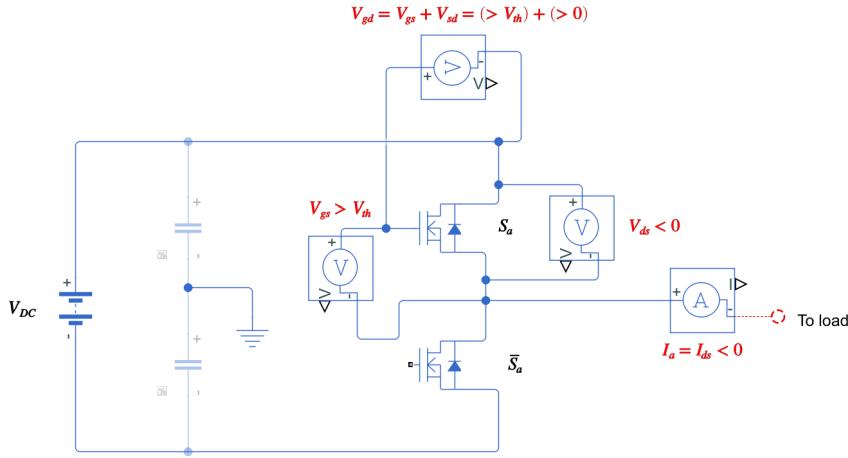
เราจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันขณะนำกระแสไปข้างหน้าได้โดย

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

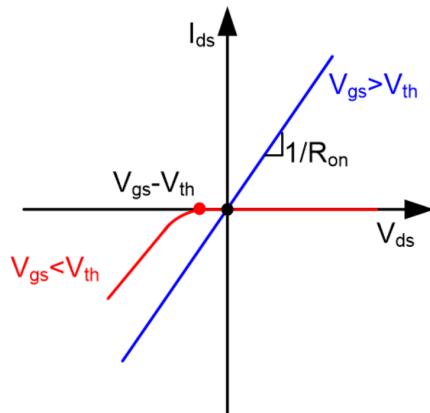
เมื่อแรงดันที่ขาเกตเทียบกับข้อร้องขอของทรานซิสเตอร์ มากกว่าค่าแรงดันขีดเบ่ง และแรงดันที่ขาเดرنเทียบกับข้อร้องขอเป็นบวก จะทำให้แกนนำกระแสในจตุภาคที่หนึ่ง โดยที่เรานิยาม $R_{ds(on)}$ เป็นความต้านทานสมมูลของทรานซิสเตอร์ในขณะที่กำลังทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง และเราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันขณะนำกระแสย้อนกลับได้โดย

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

ในการนำกระแสย้อนกลับ ข้อมูลต่างๆ จะเป็นทวีลักษณะของข้อมูลในขณะนำกระแสไปข้างหน้าเลยคือ เมื่อแรงดันที่ขาเกตเทียบกับเดرنมากกว่าค่าแรงดันขีดเบ่ง และแรงดันที่ขาขอรับเทียบกับเดرنเป็นบวก จะทำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแสในจตุภาคที่สาม



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



รูป 12: พฤติกรรมการนำกระแสในจตุภาคที่หนึ่ง และจตุภาคที่สามของทรานซิสเตอร์แกน

จากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่า แรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ในจตุภาคที่สาม จะมากกว่าแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ในจตุภาคที่หนึ่งที่ค่ากระแสเท่ากัน ซึ่งทำให้การนำกระแสในจตุภาคที่สามนั้นมีกำลังสูญเสียในขณะนำกระแสมากกว่าการนำกระแสในจตุภาคที่หนึ่ง

2.1.4 การลดกำลังสูญเสียในการมอڈูลेटแบบใช้สัญญาณพาหะ ด้วยการมอڈูลेटแบบสองแขน

จากที่ได้นำเสนอไปแล้วในส่วนของการมอڈูลेटแบบใช้สัญญาณพาหะ ว่า เป็นการมอڈูลेटที่มีจำนวนครั้งในการสวิตช์มาก ซึ่งทำให้กำลังสูญเสียในขณะสวิตช์สูง แต่เรามีเทคนิคในการลดกำลังสูญเสียของสวิตช์ในการมอڈูลेटแบบใช้สัญญาณพาหะด้วยการลดจำนวนครั้งในการสวิตช์คือ การมอڈูลेटแบบสองแขน

แขนของการมอڈูลेट คือ คู่ของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแรงดันออกที่ข้อมูลอินเวอร์เตอร์ จะประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ตัวบนซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ที่ต่ออยู่กับบัสแรงดันไฟตรงที่ข้าวบวก และทรานซิสเตอร์ตัวล่าง ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ที่ต่ออยู่กับบัสแรงดันไฟตรงที่ข้าวลบ จากทฤษฎีของอินเวอร์เตอร์ที่เราเลือกใช้ในโครงงานบันนี้ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า จะมีแขนของการมอଡูลेटทั้งหมดสามแขน

จากการพิจารณาจะเห็นได้ว่า หากเราต้องการสร้างแรงดันรูปไข่ที่ข้อมูลอินเวอร์เตอร์ 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) ให้กับแรงดันเฟสของอินเวอร์เตอร์

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

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

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

แรงดันระหว่างสายของมอเตอร์จะมีค่าเท่าเดิม นั่นคือ

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

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

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

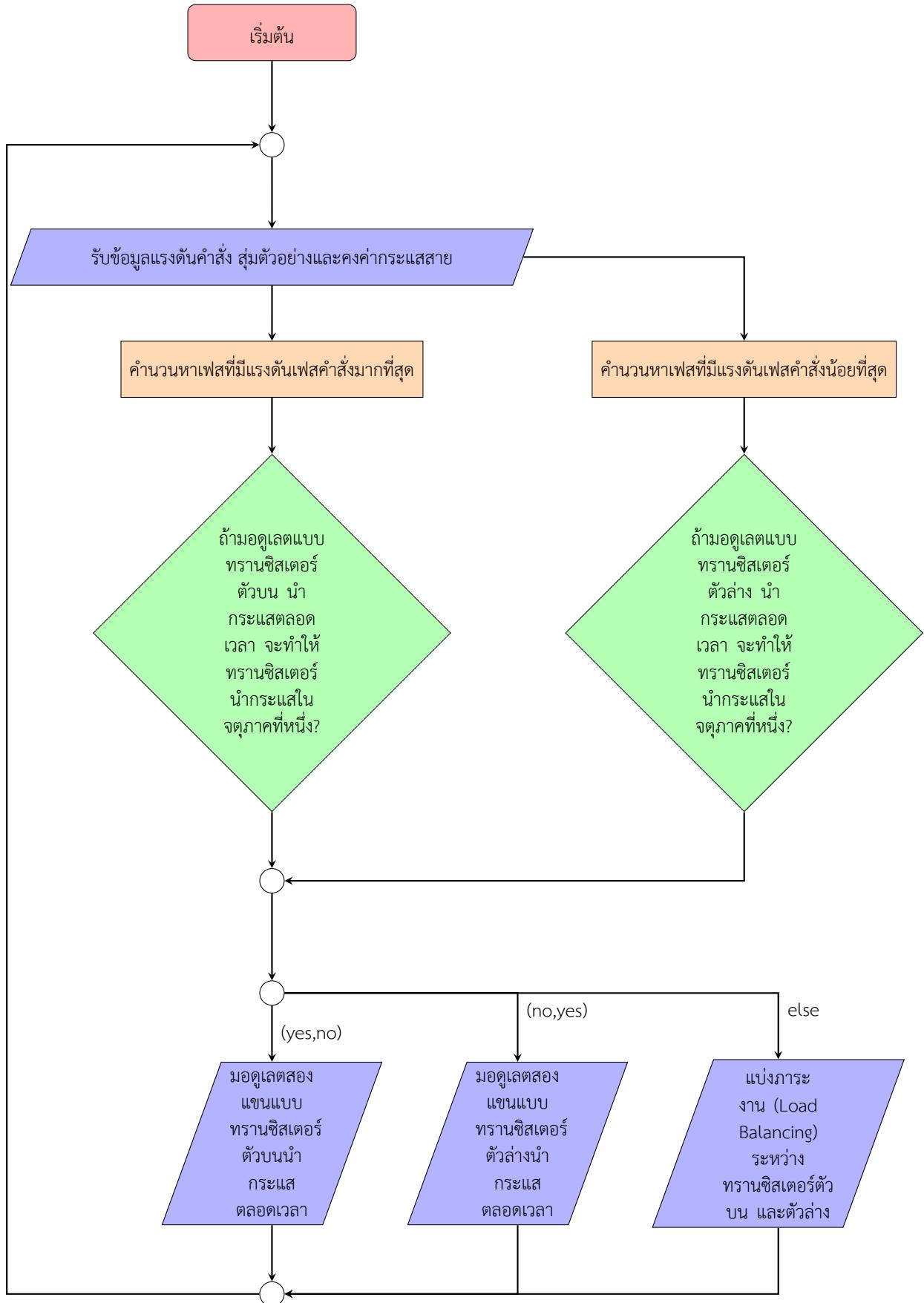
ดังนั้น เราสามารถเลือกแรงดันสำาดับศูนย์ที่จะเพิ่มให้กับแรงดันไฟฟ้าคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ โดยมีเป้าหมายคือ ทำให้แรงดันคำสั่งในไฟฟ้าสูงนั่นของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเท่ากับแรงดันบวก หรือลบของบัสแรงดันกระแสตรง เพื่อที่จะทำให้แขนของการมอตอร์เคลื่อนที่ได้ ปิด หรือ เปิดตลอดเวลา นั่นคือ

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

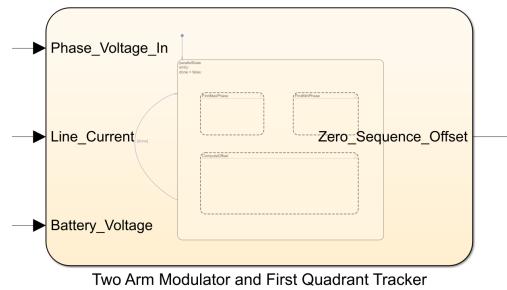
ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ตัวบนกำลังเปิดตลอดเวลา ทรานซิสเตอร์ตัวล่าง ก็จะปิดตลอดเวลาด้วย การให้ทรานซิสเตอร์แขนเดียวกันเปิด หรือปิดตลอดเวลา จะทำให้ลดจำนวนครั้งในการสวิตช์ได้หนึ่งในสามเท่า ก็จะช่วยลดกำลังสูญเสียในขณะสวิตช์ได้

2.1.5 การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการมอตอร์แบบสองแขนด้วยการติดตามการทำงานในจตุภาคที่ 1

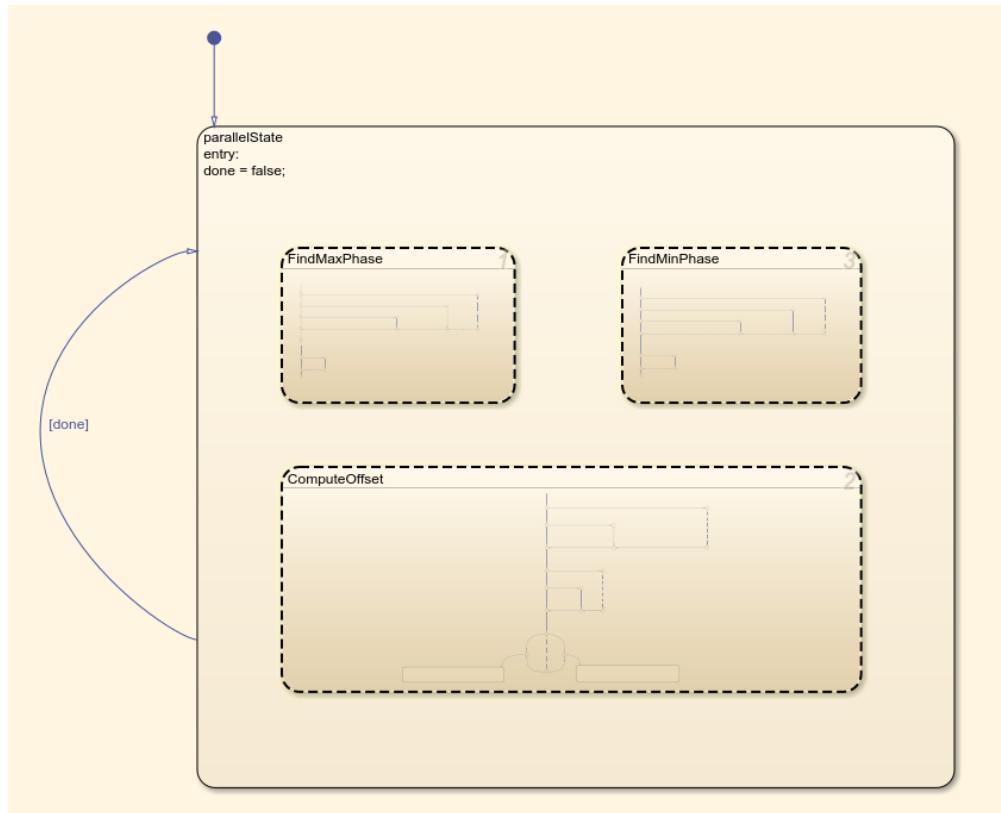
จากผลลัพธ์ที่ได้อภิปรายมาในส่วนที่แล้ว เราได้ทราบว่า เรามีอิสระในเลือกการมอตอร์แบบสองแขนได้สองประเภทคือ แบบทรานซิสเตอร์ ตัวบนนำกระแสตลอด และทรานซิสเตอร์ตัวล่างนำกระแสตลอด ดังนั้น เราจะใช้ข้อได้เปรียบนี้ในการเลือกรูปแบบการมอตอร์แบบสองแขน ให้เกิดประสิทธิภาพสูงที่สุด นั่นคือ การหลีกเลี่ยงการทำงานในจตุภาคที่ 3 สำหรับทรานซิสเตอร์ตัวที่จะนำกระแสตลอดเวลา โดยจะมีหลักการในการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าสำาดับศูนย์ที่จะบวกเข้าไป เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ ตามผังงานในรูปที่ 13 ซึ่งจากผังงานที่ได้นำเสนอไปข้างต้น เราสามารถนำไปสร้างเป็นแผนภูมิการเปลี่ยนสถานะ บน Simulink™/Stateflow™ ได้ดังที่แสดงไว้ในรูป



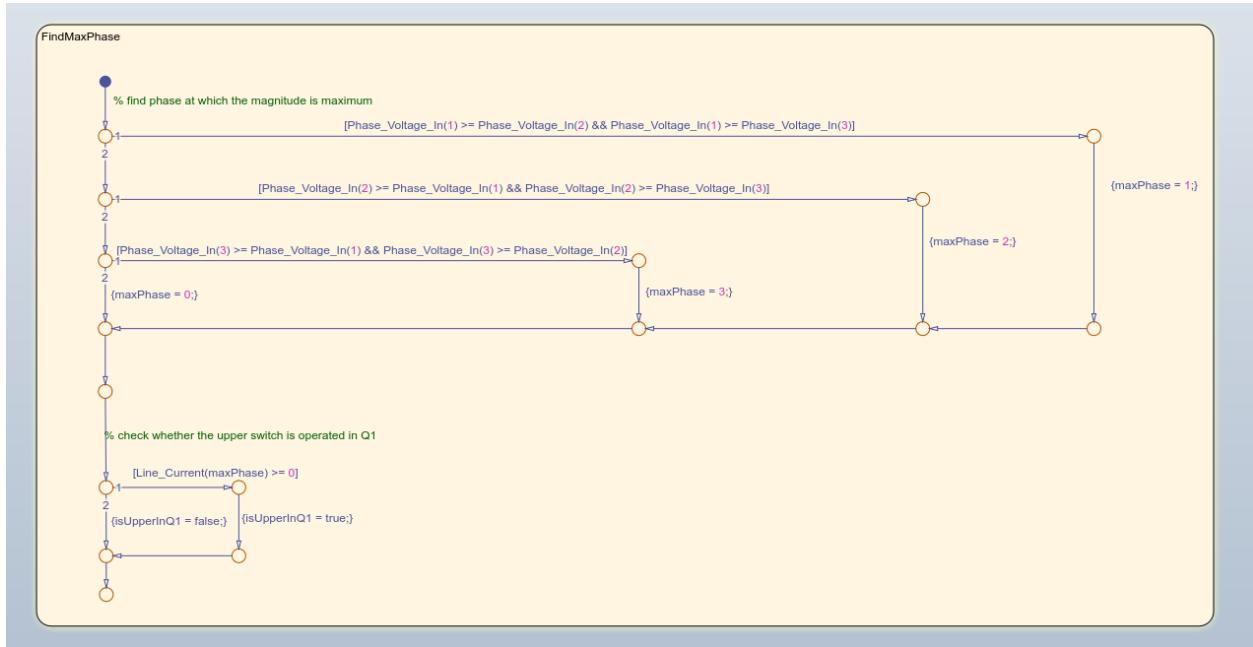
รูป 13: ผังงานของอัลกอริทึมในการคำนวนแรงดันลำดับศูนย์เพื่อติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่งของสวิตช์ที่ถูกมอคูเลตแบบสองแขน



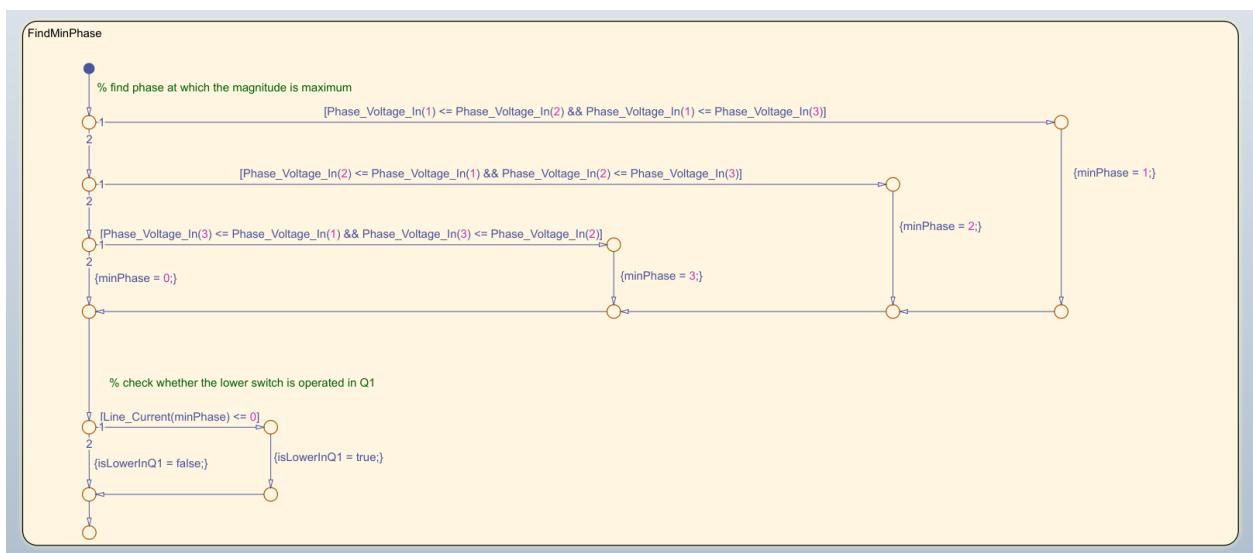
รูป 14: บล็อก Stateflow ของอัลกอริทึมในการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง



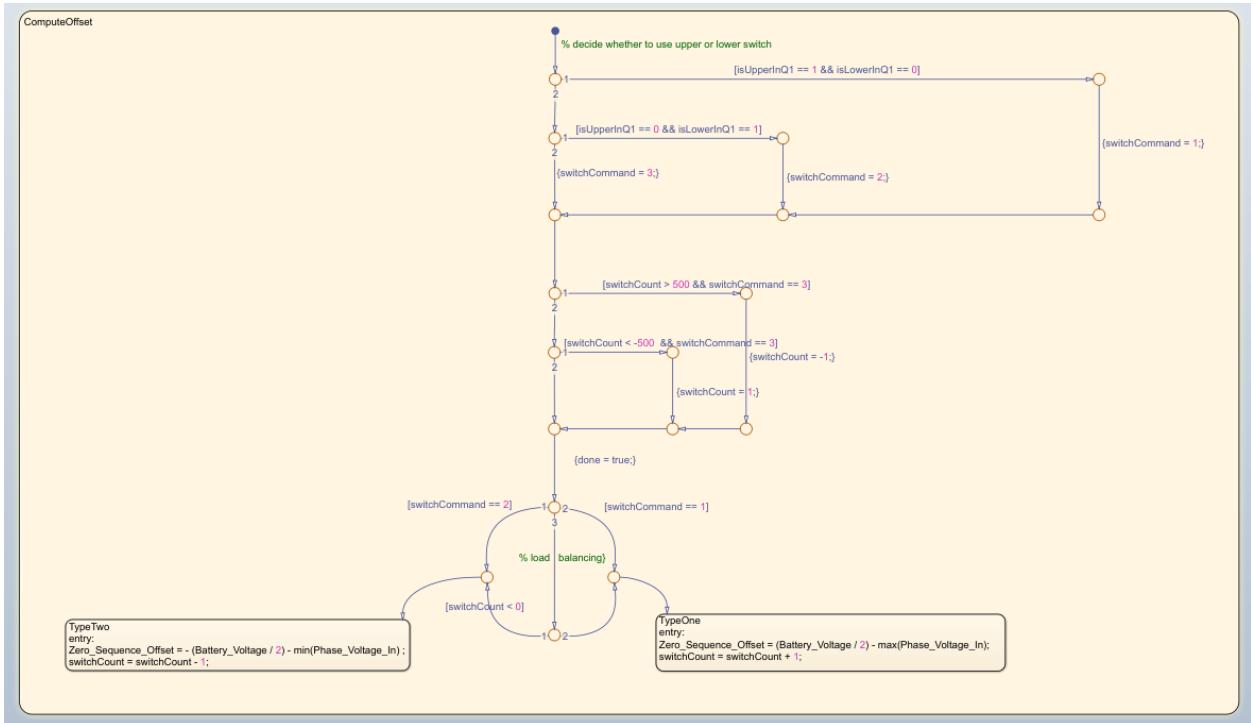
รูป 15: ภาพรวมของ Stateflow chart ของอัลกอริทึมในการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง



รูป 16: Subchart ในส่วนของการหาเฟสที่มีแรงดันค่าสั่งมากที่สุด



รูป 17: Subchart ในส่วนของการหาเฟสที่มีแรงดันค่าสั่งน้อยที่สุด



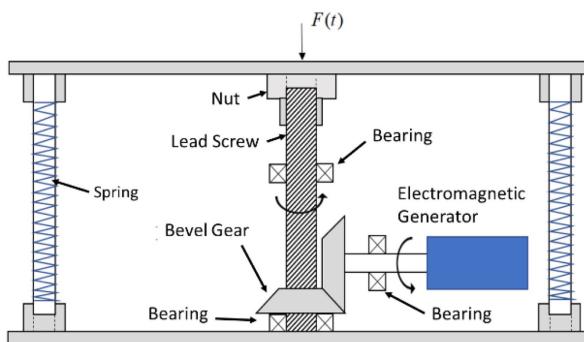
รูป 18: Subchart ในส่วนของการคำนวณแรงดันลำดับศูนย์

2.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking Algorithm; MPPT)

2.2.1 ข้อมูลรายละเอียดและหลักการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

เริ่มแรกต้องศึกษาและเข้าใจหลักการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงานเพื่อทราบความสัมพันธ์ของกลไกและสมการต่างๆ ของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน [2] และเข้าใจพลวัตของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

แผ่นพื้นเก็บพลังงาน สามารถแปลงพลังงานลงจากการก้าวเดินของมนุษย์แปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ หลักการทำงาน เริ่มจากการเหยียบของมนุษย์ลงบนแผ่นพื้นเก็บพลังงานทำให้เกิดการบุบตัวลงของแผ่นพื้น แป้นเกลี่ยว(gut)จะขยับขึ้นลงไปขับเกลี่ยวนำ(lead screw) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่เชิงเส้นไปยังการเคลื่อนที่เชิงหมุน ให้หมุนรอบแนวแกนตั้ง แล้ว เฟืองดอกจอก(bevel gear)ทำหน้าที่เปลี่ยนจากเคลื่อนที่เชิงหมุนแนวแกนตั้งจากเพลาเกลี่ยวนำให้เปลี่ยนทิศทางการหมุนไป 90 องศา หมุนรอบแนวแกน ก่อนที่จะขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 19



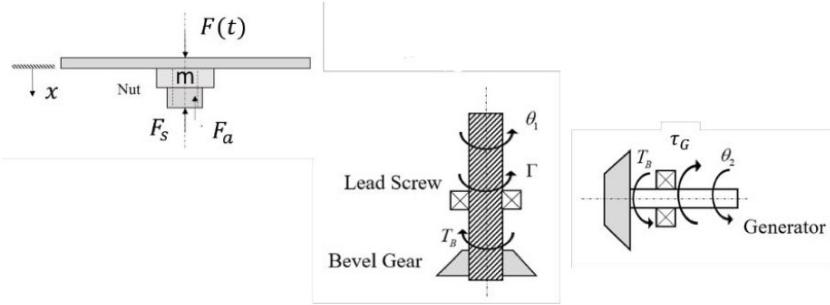
รูป 19: กลไกเกลี่ยวนำ(lead screw) ภายใต้แผ่นพื้นเก็บพลังงาน[2]

จากแผนภาพของวัตถุของระบบทางกล ลีด(lead) และ สกรู(screw) ดังรูปที่ 20 สมการต่างๆ ได้มาจากการที่ส่องของนิวตันและโมเมนตัม เชิงหมุน ซึ่งอธิบายการเลื่อนที่ของแป้นเกลี่ยว และ การเคลื่อนที่เชิงหมุนของเกลี่ยวนำและโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 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 โมเมนต์ความเร็วของเกลียวนำ

J_G คือ โมเมนต์ความเร็วของเพื่องดอกจาก

x คือ ระยะห่างจัดของแผ่นพื้นและแป้นเกลียว

l คือ ระยะห่างระหว่างเกลียวของเกลียวนำ

θ_1 คือ ตำแหน่งเชิงมุมของเกลียวนำ

θ_2 คือ ตำแหน่งเชิงมุมของเพื่องดอกจาก

$F(t)$ 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 ประสิทธิภาพของล้อบลู๊ปนิคลัตซ์ และ η_{thrust} คือ ประสิทธิภาพของเกลียวนำ

2.2.2 การเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า (Electrical analogy)

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

โดยการเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า ของวงจรไฟฟ้าเป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อทำการวิเคราะห์ระบบทางกล ปัญหาทางกลบางอย่างสามารถแก้ไขได้เจ้ายิ่งผ่านการเปรียบเทียบทางไฟฟ้า 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]

อัตราส่วนของเกียร์ของ ขบวนไฟฟ้า (gear train) และเพื่องดออกจอก (bevel gear) ที่ใช้ในการส่งการเคลื่อนที่เชิงหมุนจากเกลี้ยงนำ(lead screw) ไปยังโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครงสร้าง มีอัตราส่วนเท่ากับ 1:1 จึงได้ความสัมพันธ์

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

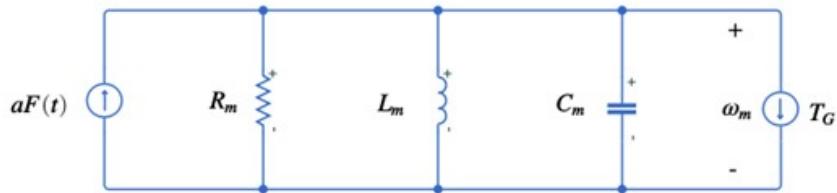
จากสมการที่ (18)-(20) จะพิจารณจากแนวการเคลื่อนที่เชิงเส้นไปยังการเคลื่อนที่เชิงหมุนโดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ (22) และใช้ความสัมพันธ์ของปริมาณทางกลและไฟฟ้าจากตารางที่ 1 จึงได้สมการตั้งแสดงด้านล่าง

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

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

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

จากนั้นแปลงระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้า



รูป 21: วงจรไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

โดยที่

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

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

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

2.2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวร

ศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวร [5] [6] เพื่อเข้าหลักการทำงานและสมการต่างๆที่เกี่ยวข้อง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวร ซึ่งสามารถตู้น้ำจากแม่เหล็กถาวรแทนที่จะเป็นชุดลวด มีโครงสร้างที่สเตเตอร์เหมือนกับมอเตอร์หนี่ยาน้ำคือมีชุดลวดสามเฟสพันอยู่ในร่องล้อตที่สเตเตอร์ แต่ที่โรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร ข้อดีของมอเตอร์ซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวร คือ ไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และชุดลวดสร้างสนามที่ตัวโรเตอร์ ทำให้ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในชุดลวด

ค่าความหนาแน่นภายในและลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวร มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมุมของโรเตอร์ จากสมการแรงดันสามเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวร ดังสมการ

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

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

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

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

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

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

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

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 ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตเตอร์

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

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

ω_e คือ ความเร็วเชิงมุททางไฟฟ้าของโรเตอร์

θ_e คือ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อชั้วของแม่เหล็กถาวร

L_d, L_q คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตเตอร์ในแกน d และ q

λ' คือ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อชั้วของแม่เหล็กถาวร

จากนั้นใช้การแปลงของคลาร์ก(Clark's Transformation) [7] [8] แปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงนิ่ง เพื่อแปลงสมการแรงดันสามไฟฟ้าของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดเดียวกับการเปลี่ยนแปลงด้วยแกน x-y ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำที่พิจารณาทั้งค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและค่าความเหนี่ยvrwmoของขดลวดสเตเตเตอร์ 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 ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตเตอร์

L_s คือ ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและค่าความเหนี่ยvrwmoของขดลวดสเตเตเตอร์

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 แรงดันไฟฟ้าสเตเตเตอร์ในแกน d และ q บนกรอบอ้างอิงโรเตอร์

i_d, i_q คือ กระแสไฟฟ้าสเตเตเตอร์ในแกน d และ q บนกรอบอ้างอิงโรเตอร์

จากพิจารณาทำลักษณะเดียวกันของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้าง

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

เมื่อ

P_{in} คือ กำลังขาเข้าของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้าง

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

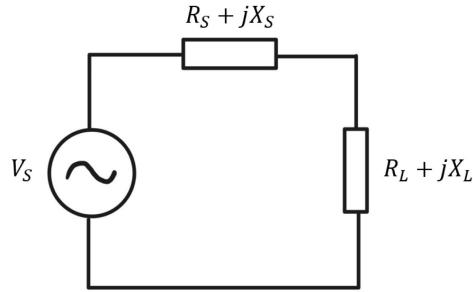
$$T_e = \frac{P_{mech}}{\omega_e/p} = p(\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (38)$$

เมื่อ

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

2.2.4 หลักการเบี้ยงตันเกี่ยวกับการติดตามจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking) สำหรับวงจรกักเก็บพลังงาน

พิจารณาวงจรสมมูลของวงจรการกักเก็บพลังงานดังรูปที่ 22 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายและอิมพีเดนซ์ขาออก



รูป 22: วงจรสมมูลของวงจรกักเก็บพลังงาน [9]

พิจารณาหลักการแมทชิ่งอิมพีเดนซ์ (Matching impedance) เมื่อพิจารณากำลังออก (P_{out}) โดยใช้ทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังสูงสุด (Maximum Power Transfer) ของวงจรสมมูลตั้งกล่าว เมื่อโหลดเป็นอิมพีเดนซ์ใดๆ โดยพิจารณาในสภาพะคงตัว (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 กำลังประภูมิ
 P_{out} คือ กำลังขาออก
 จากสมการที่ (40) จะมีค่าสูงสุดเมื่อพจน์ตัวหารมีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากค่ารีแอคแทนซ์สามารถมีค่าน้อยกว่าศูนย์ได้จึงพิจารณาให้ $X_L = -X_g$ 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 ที่ส่งผลให้พจน์ตัวหารมีค่าสูงสุดด้วยสมการที่ (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 $j\omega X_L = -j\omega X_S$ ต่อมาจะเป็นการขยายแนวคิดตั้งกล่าว โดยพิจารณา กับสัญญาณกระแส ณ ขณะใดๆ เป็นไปแล้วตามเวลา เนื่องจากลักษณะโหลดเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแส ณ เวลาหนึ่ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลง โหลดนั้นทำได้ยากในทางปฏิบัติ ดังนั้น จึงพิจารณาในรูปแบบด้านแทน

กรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กทราบ จะได้ว่าแรงดันทด�始ม่อมโหลดจะต้องมีค่าเท่ากับสัญญาณแรงดันทด�始มอิมพีเดนซ์ ของระบบมูลฐานออก จะได้

$$\vec{v}_{load} = R_g \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} - L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} \quad (44)$$

แต่เนื่องจากโหลดที่ต่ออยู่เป็นแบบเตอร์ ถ้าสามารถควบคุมแรงดันขาออก (v_{ter}) ดังสมการที่ (45) จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ชาร์จเข้าแบบเตอร์ มีค่าสูงสุด

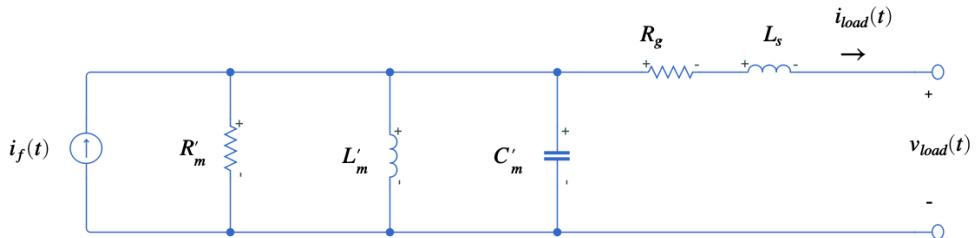
$$\vec{v}_{ter} = \begin{bmatrix} v_{ox} \\ v_{oy} \end{bmatrix} = R_g \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} - L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} \quad (45)$$

โดยการควบคุมแรงดันขาออกของแบบเตอร์ให้เป็นไปตามที่ต้องการตามสมการที่ (45) จะใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ในการแปลงแรงดันไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคการมอดูลเลตความกว้างพัลส์

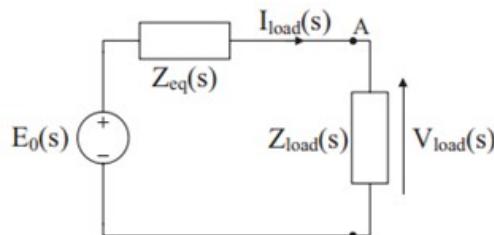
นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงข้อควรระวังของการใช้ตัวอนุพันธ์ เนื่องจากตัวอนุพันธ์มีพฤติกรรมเหมือนตัวขยายสัญญาณ หากมีสัญญาณรบกวน ความถี่สูงเข้ามา อาจทำให้สัญญาณรบกวนถูกขยายขนาดมากขึ้น และอาจส่งผลให้อุปกรณ์เสียหายได้ ดังนั้นการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงต้องมีการ จำกัดขอบเขตของความถี่ ของตัวอนุพันธ์ด้วยตัวปฏิพันธ์ ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอน(Transfer function) ดังสมการด้านล่าง

$$H(s) = \frac{s}{\frac{s}{\omega_H} + 1} \quad (46)$$

เนื่องจากสัญญาณของระบบมาจากเท้าเหยียบของมนุษย์ ซึ่งเป็นสัญญาณที่ไม่เป็นรายคาบ และแปรเปลี่ยนไปตามเวลา การดึงกำลังสูงสุด จากร่องรอยพิจารณาทฤษฎีกำลังถ่ายโอนสูงสุดของระบบพลวัตไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Dynamic Maximum Power Transfer Theorem, ND-MPTT) ซึ่งเป็นทฤษฎีที่พิจารณากรณีที่ไฟฟ้าทุกประเภทสามารถนำพลังงานได้ จึงได้ตัวอนุพันธ์ที่เรียกว่า ความถี่สูงสุด (Maximum Power Transfer Theorem, MPTT) โดยวงจรแผ่นพื้นเก็บพลังงาน แสดงในรูปที่ 23 และในลาปลาสโดเมนในรูปที่ 24 ที่ได้จากการใช้ทฤษฎีของเทเวนินในการแปลงวงจร



รูป 23: วงจรสมมูลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานในลาปลาสโดเมน



รูป 24: วงจรสมมูลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานในลาปลาสโดเมน

$$Z_{eq} = R_g + sL_s + \frac{sR'_m L'_m}{s^2 R'_m L'_m C'_m + sL'_m + R'_m} \quad (47)$$

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 ค่าคู่คุ่วทางกลไฟฟ้า (electromechanical coupling coefficient)

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

$$E_0 = -F(s) \cdot aN \cdot \frac{sR'_m L'_m}{s^2 R'_m L'_m C'_m + sL'_m + R'_m} \quad (48)$$

ทฤษฎีกำลังถ่ายโอนสูงสุดของระบบพลังไม่เป็นเชิงเส้น กล่าวว่า กำลังที่ดึงได้สูงสุดจากการแพร่พื้นเก็บพลังงาน เมื่อสัญญาณขาเข้าเป็นสัญญาณ

ไซ จะได้ว่า อิมพีเดนซ์ที่เหมาะสมของอิมพีเดนซ์ของโหลด คือ $Z_{opt}(s) = Z_{eq}(-s)$

ข้อสังเกต

หากสัญญาณขาเข้าเป็นสัญญาณเป็นไซน์บูรณาการที่ความถี่ $\omega = \omega_{res} = \frac{1}{\sqrt{L'_m C'_m}}$ และ ค่า L'_m และ C'_m จะถูกชดเชยอย่าง

สมบูรณ์ ดังวงจรแสดงในรูปที่ 50 ดังนั้น จากสมการ 47 และ 48 จะได้

$$Z_{eq}|_{s=j\omega_{res}} = (R_g + sL_s)|_{s=j\omega_{res}} + \frac{\left(\frac{j}{\sqrt{L'_m C'_m}}\right) R'_m L'_m}{\left(\frac{j}{\sqrt{L'_m C'_m}}\right)^2 R'_m L'_m C'_m + \left(\frac{j}{\sqrt{L'_m C'_m}}\right) L'_m + R'_m} = (R_g + sL_s + R'_m)|_{s=j\omega_{res}} \quad (49)$$

$$E_0|_{s=j\omega_{res}} = -F(s) \cdot aN \cdot R'_m \quad (50)$$

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

$$Z_{opt}|_{s=j\omega_{res}} = Z_{eq}(-s)|_{s=j\omega_{res}} = -F(s) \cdot aN \cdot R'_m|_{s=j\omega_{res}} = \text{conj}[Z_{eq}(j\omega_{res})] \quad (51)$$

จากสมการนี้หมายความว่าในกรณีสัญญาณไซน์บูรณาการที่ความถี่เรโซแนนท์ ทำให้ได้เงื่อนไขโหลดของทั้ง ND-MPPT และ MPPT จะเหมือนกัน

หากระบบแพร่พื้นเก็บพลังงานได้รับการออกแบบอย่างดีให้มี Q factor สูง จะทำให้แปร 3dB นั้นแคบ และสัญญาณขาเข้าของระบบไม่เป็นสัญญาณไซน์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะทำให้ได้แรงดันเปิดวงจร E_0 จะมีสัญญาณที่ใกล้เคียงสัญญาณไซน์ที่ความถี่ $\omega = \omega_{res}$ ดังนั้น ระบบแพร่พื้นเก็บพลังงานที่มี Q factor สูง ส่งผลให้ MPPT และ ND-MPPT ได้เงื่อนไขโหลดที่เหมาะสมเหมือนกัน คือ

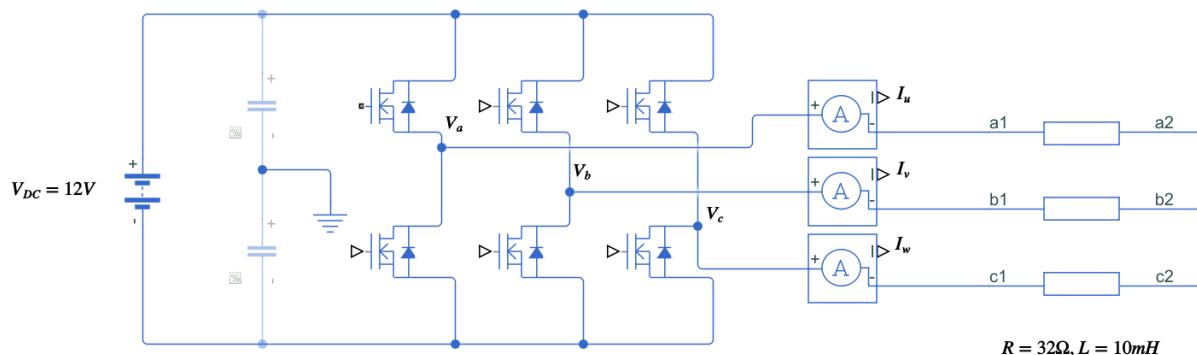
$$Z_{opt}(s) = Z_{eq}(-s) \cong R_g - sL_s + R'_m \quad (52)$$

3 ผลลัพธ์ของโครงงานและการอภิปรายผล

3.1 การทดสอบอัลกอริทึมการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่งด้วยการจำลองบนโปรแกรม Simulink

ในการทดสอบอัลกอริทึมการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง จะทำโดยการนำอินเวอร์เตอร์ไปต่อ กับโหลดแบบตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำสามเฟส โดยเราจะทดลองปรับค่าคำสั่งต่างๆของอินเวอร์เตอร์ และดูว่าระบบให้ผลตอบสนองที่ถูกต้อง หรือไม่ อัลกอริทึมมีการตัดสินใจที่ถูกต้องหรือไม่ โหมดในการทำงานสองคลังกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริงหรือไม่ โดยการประเมินผลที่ได้ก้าวข้างต้น จะต้องมีการวัดและแสดงค่าต่างๆ เหล่านี้คือ

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



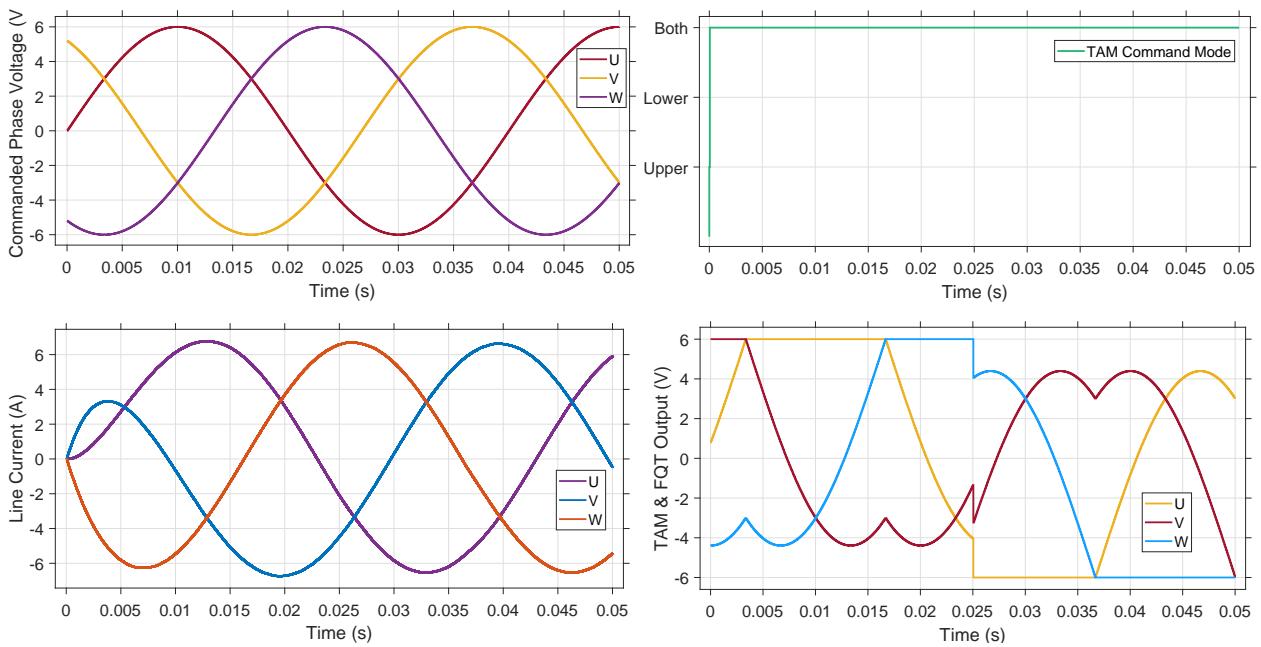
รูป 25: รูปแบบวงจรที่ใช้ทดสอบอัลกอริทึมการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง

ค่าแรงดันไฟฟ้าคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ จะเป็นค่าแรงดันที่ป้อนให้กับอัลกอริทึมของอินเวอร์เตอร์ ค่ากระแสสาย จะนิยามตามรูปที่ 25 คือ นิยามให้กระแสที่ไหลออกจากขั้วของอินเวอร์เตอร์เป็นค่าบวก โหมดการมอดูเลตแบบสองแขนที่อัลกอริทึมตัดสินใจเลือก จะเป็นโหมดที่ได้ก้าวไว้ในรายละเอียดของการมอดูเลตแบบสองแขนคือ

- Upper จะเป็นโหมดที่เลือกให้สวิตช์ตัวที่นำกระแสสตอลอดเวลาเป็นทรานซิสเตอร์ตัวบน
- Lower จะเป็นโหมดที่เลือกให้สวิตช์ตัวที่นำกระแสสตอลอดเวลาเป็นทรานซิสเตอร์ตัวล่าง
- Both จะเป็นโหมดที่เลือกให้ทรานซิสเตอร์ตัวบน หรือตัวล่างนำกระแสสตอลอดเวลาไปได้ ขึ้นกับว่าทรานซิสเตอร์ตัวไหนทำงานหนักกว่า โดยจะแบ่งงานกันทำระหว่างทรานซิสเตอร์ตัวบนและตัวล่าง

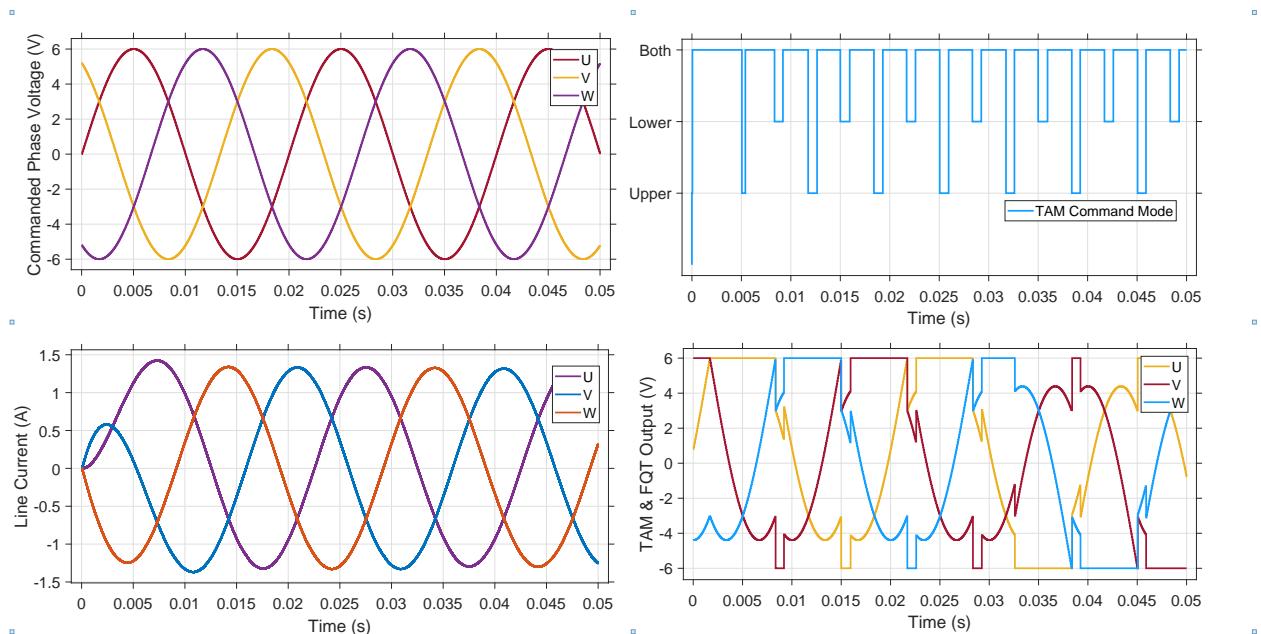
แรงดันคำสั่งที่คำนวนได้จากอัลกอริทึม คือ แรงดันที่คำนวนได้หลังจากการตัดสินใจว่าต้องการมอดูเลตสองแขนแบบไหน โดยจะทำการเลือกแรงดันลำดับศูนย์เพื่อที่จะบวกเข้าไปในแต่ละเฟส เพื่อให้สวิตช์นำกระแสในแบบที่อัลกอริทึมต้องการ

3.1.1 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับความถี่คำสั่งของอินเวอร์เตอร์



รูป 26: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่คำสั่งเท่ากับ 25Hz

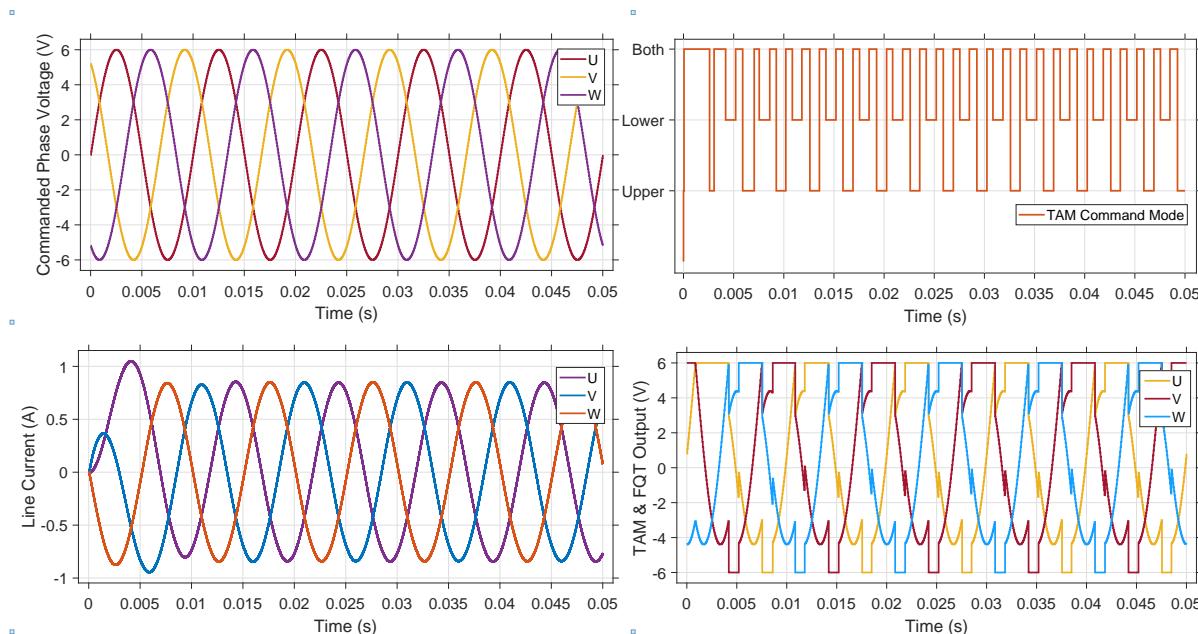
จากรูปที่ 26 จะเห็นได้ว่า การเหลือมกันของกระแสและแรงดันนี้ค่อนขอยมาก ซึ่งเวลาที่กระแสและแรงดันเหลือมกันมีค่าต่ำกว่าค่าเวลา การสุ่มและคงค่าของระบบผังตัว ดังนั้นระบบจึงไม่รับรู้ถึงการเหลือมกันของกระแสและแรงดัน ดังนั้น สวิตช์จะทำงานในจุดภาคที่หนึ่งตลอดเวลา ไม่ว่าจะมีอุณหภูมิแบบสองแขนแบบใดก็ตาม ดังที่แสดงในกราฟ โหนดการมีอุณหภูมิแบบสองแขนที่อัลกอริทึมตัดสินใจเลือก จึงเป็นแบบ Both ตลอดเวลา เพราะจากมุมมองของอินเวอร์เตอร์ อัลกอริทึมจะคิดว่าสามารถที่จะมีอุณหภูมิแบบสองแขนได้ ดังนั้น ระบบจะมีอุณหภูมิแบบสองแขนสลับกันระหว่างตัววนนำกระแสและตลอด และตัวล่างนำกระแสและตลอด โดยมีจุดที่แบ่งการทำงานกันระหว่างทราบชีสเตอร์ตัวบนและตัวล่างอยู่ที่เวลา 0.025 วินาที เพื่อไม่ให้ทราบชีสเตอร์ผู้ใดได้ทำงานหนักเกินไป



รูป 27: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่คำสั่งเท่ากับ 50Hz

จากรูปที่ 27 จะเห็นได้ว่า เมื่อเราเพิ่มความถี่คำสั่งให้กับอินเวอร์เตอร์ จะทำให้ความถี่ไฟฟ้าของแรงดันออกจากอินเวอร์เตอร์มีค่ามากขึ้น

ทำให้องค์ประกอบความเห็นี้ยวนำของโหลดมีค่ามากขึ้น ทำให้การเหลือมกันของกระแสและแรงดันมากขึ้น จึงมีช่วงจังหวะเวลาที่แรงดันคำฟล์อกสำหรับอินเวอร์เตอร์ตัดศูนย์ (เปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกเป็นลบ) และเวลาที่ค่ากระแสสายตัดศูนย์ (เปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกเป็นลบ) ในช่วงเวลาดังกล่าว แรงดันไฟฟล์อกสำหรับอินเวอร์เตอร์ตัดศูนย์จะมีค่าเป็นบวก ส่วนค่ากระแสจะมีค่าเป็นลบ ดังนั้น ถ้าหากเรามอดูล็อตแบบทรานซิสตอร์ตัวบนนำกระแสและแรงดันต่ำลง ทำให้ทราบว่าอินเวอร์เตอร์ตัวบนทำงานในจุดภาคที่สาม ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ เนื่องจากจะมีแรงดันต่ำกว่าแรงดันต่ำของทรานซิสตอร์มากกว่า ดังนั้น เราจึงต้องเลือกให้อัลกอริทึมมอดูล็อตแบบสองแขนเลือกมอดูล็อตแบบ "Lower" ในช่วงเวลาที่ค่าแรงดันไฟฟล์อกสำหรับอินเวอร์เตอร์ตัดศูนย์เป็นบวก และอัลกอริทึมจะเลือกมอดูล็อตแบบ "Upper" ในช่วงเวลาที่ค่าแรงดันไฟฟล์อกสำหรับอินเวอร์เตอร์ตัดศูนย์เป็นลบ และค่ากระแสจะมีค่าเป็นบวก

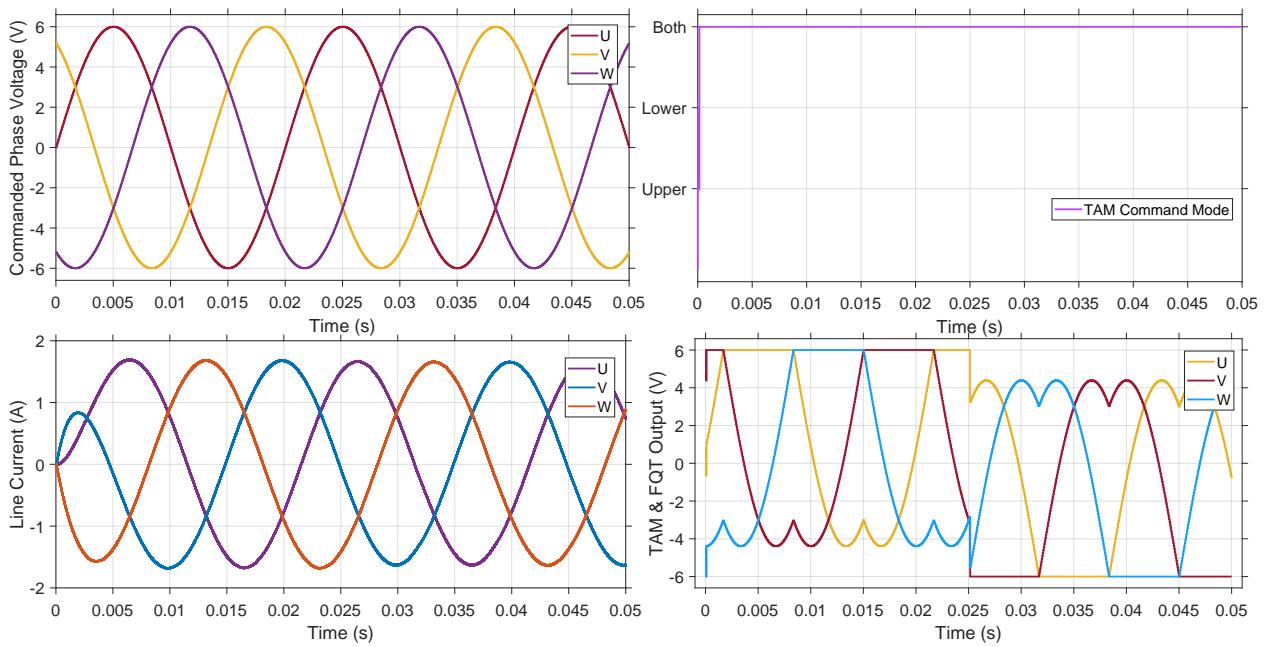


รูป 28: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่คำสั่งเท่ากับ 100Hz

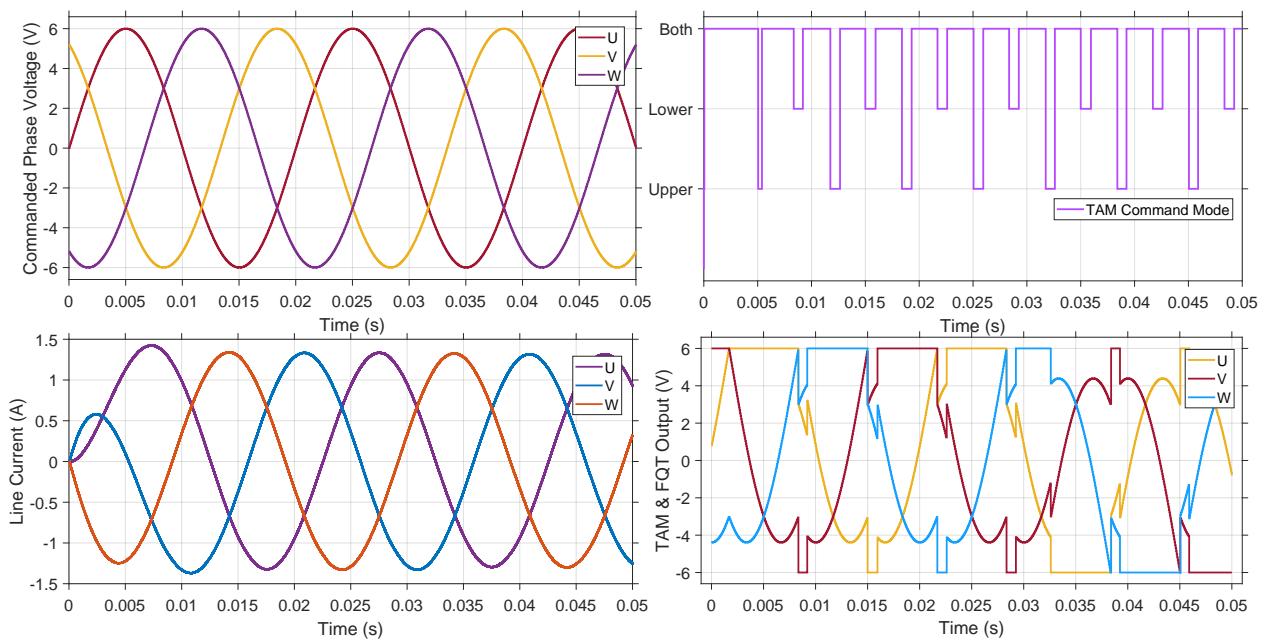
จากรูปที่ 28 จะเห็นได้ว่า เมื่อเราเพิ่มความถี่คำสั่งให้กับอินเวอร์เตอร์ แนวโน้มของการเหลือมกันของกระแสและแรงดันจะมีมากขึ้น ดังนั้น ส่วนแบ่งเวลาที่อัลกอริทึมเลือกมอดูล็อตแบบ "Upper" และ "Lower" จึงมากขึ้น ดังที่จะสะท้อนออกมาในกราฟโดยมีการเปลี่ยนแปลงของอัลกอริทึมเลือก

3.1.2 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับค่าความเห็นี้ยวนำของโหลด

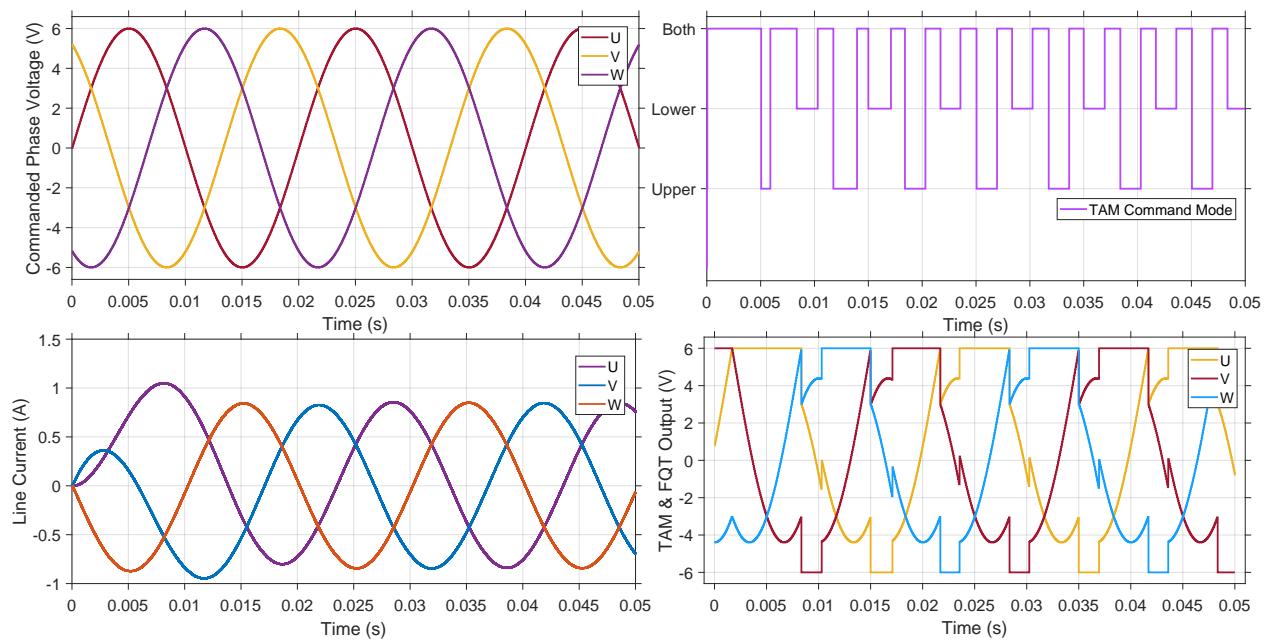
จะเห็นได้ว่าการปรับค่าความเห็นี้ยวนำของโหลดส่งผลกระทบถาวรสู่การปรับค่าความถี่คำสั่งให้กับอินเวอร์เตอร์ เพราะสุดท้ายแล้ว การปรับความถี่คำสั่งของอินเวอร์เตอร์ก็คือการเปลี่ยนค่ารีแอคเคนซ์ของตัวเหนี่ยวนำนั่นเอง จะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องในกรณีการทดสอบต่างๆ



รูป 29: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับความหนึ่ยวนำของโหลดให้เท่ากับ 5mH



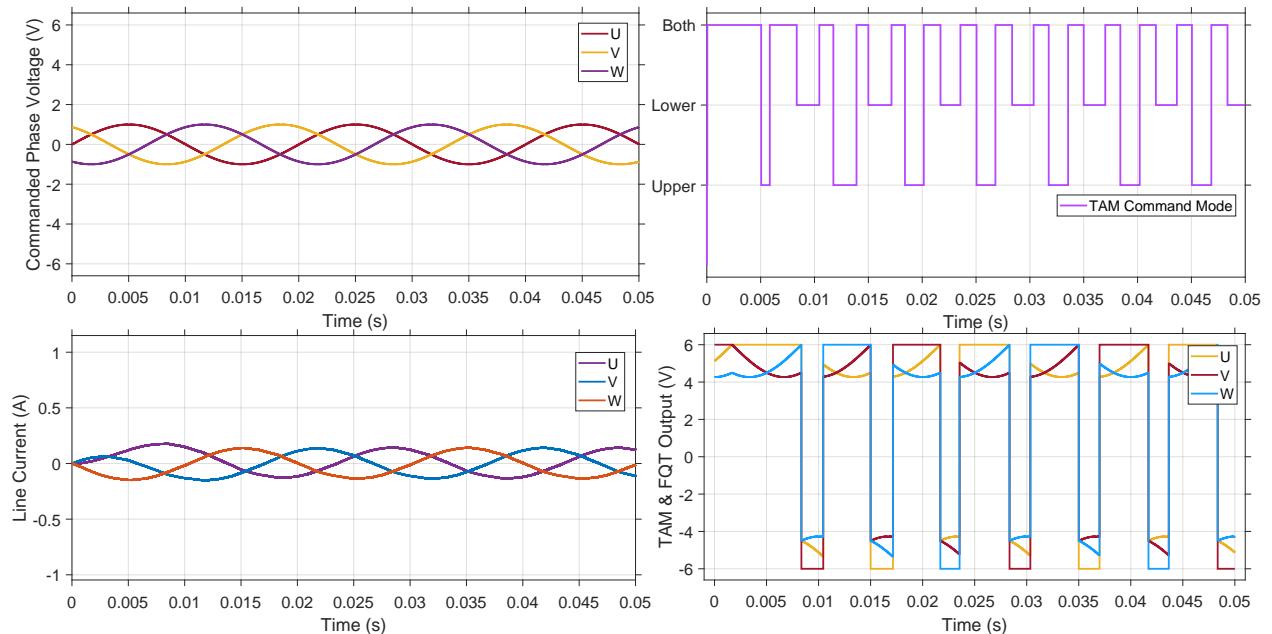
รูป 30: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับความหนึ่ยวนำของโหลดให้เท่ากับ 10mH



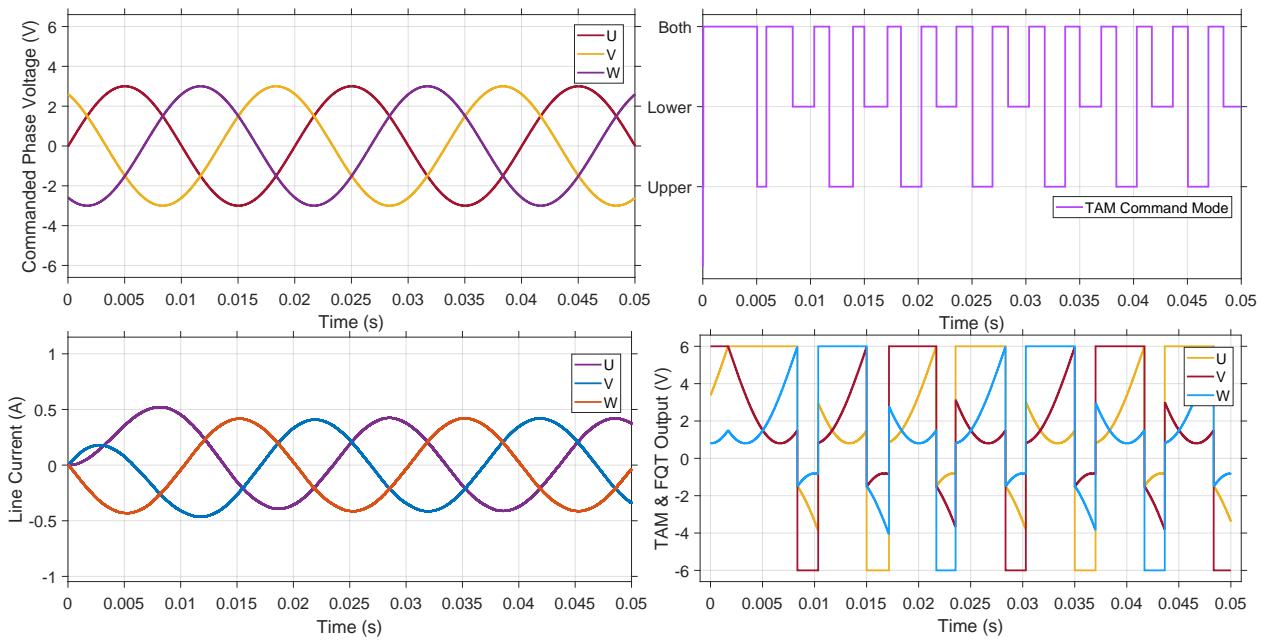
รูป 31: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับความหนี่ยวนำของโถลดให้เท่ากับ 20mH

3.1.3 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับค่าขนาดของแรงดันคำสั่งของอินเวอร์เตอร์

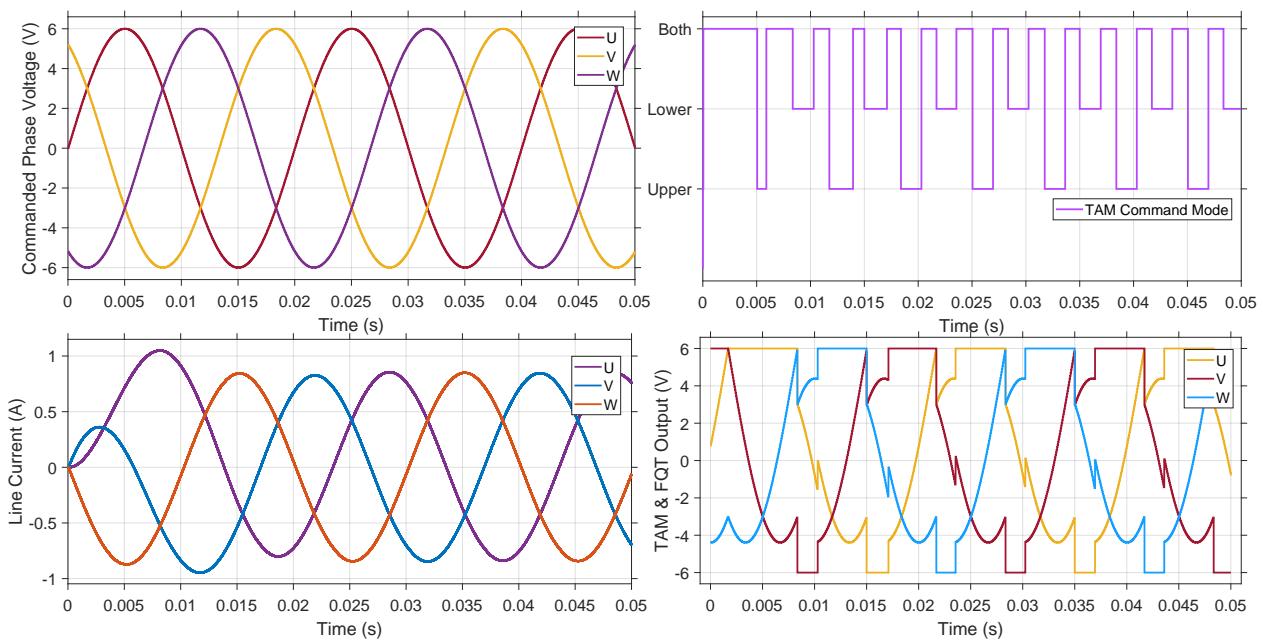
ถ้าหากค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าคำสั่งถูกปรับ ก็จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อขนาดของกระแสสาย นั่นคือ ค่ากระแสสายจะแปรผันตรงกับขนาดของแรงดันคำสั่ง จะสังเกตุได้ว่า อินเวอร์เตอร์ยังสามารถทำงานได้ถูกต้องเมื่อปรับขนาดของแรงดันคำสั่งเป็นค่าต่างๆ



รูป 32: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับขนาดของค่ายอดของดันไฟฟ้าคำสั่งเท่ากับ 1V



รูป 33: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับขนาดของค่าจอดของดันไฟส่องเทา กับ 3 V



รูป 34: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับขนาดของค่าจอดของดันไฟส่องเทา กับ 6 V

3.2 การทดสอบระบบเข้ากับแผ่นพื้นเก็บพลังงานจริง

ในการทดสอบระบบเก็บเกี่ยวพลังงานเข้ากับระบบจริง จะทำโดยการนำชุดระบบฝังตัว และบอร์ดอินเวอร์เตอร์ ต่อเข้ากับแบตเตอรี่ และระบบแผ่นพื้นเก็บเกี่ยวพลังงาน โดยในระหว่างการทำงาน จะมีการส่งข้อมูลกลับมาที่คอมพิวเตอร์ที่อยู่ควบคุม เพื่อเฝ้าสังเกตุว่าระบบทำงานได้อย่างถูกต้องหรือไม่ โดยจะมีการตรวจจับสัญญาณต่างๆ ที่สำคัญ คือ

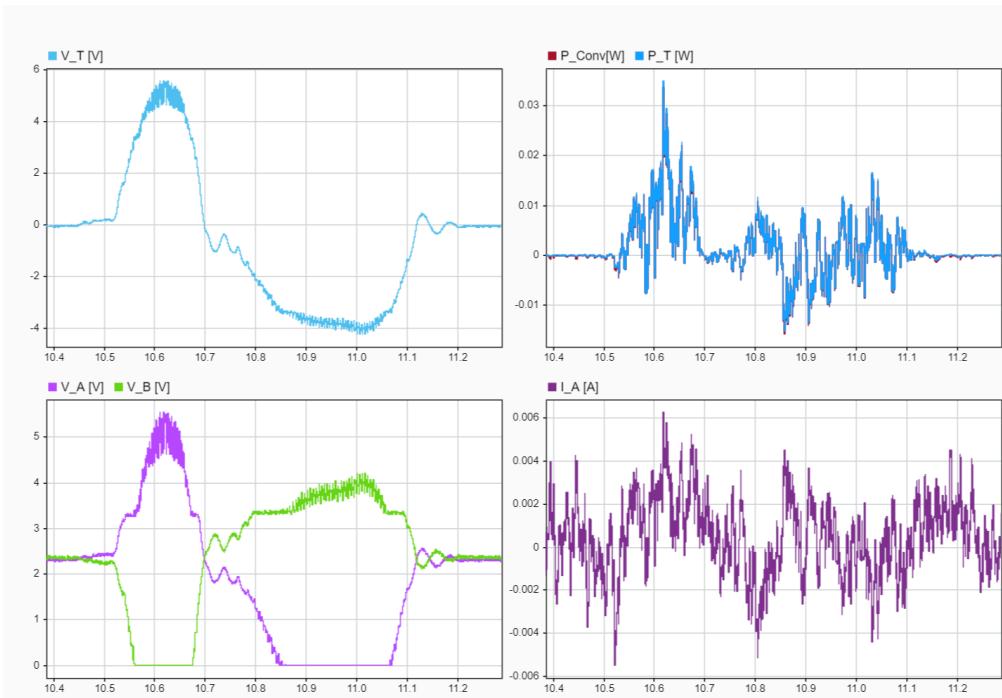
- ค่าแรงดันเฟส (Phase Voltage)
- ค่าแรงดันสาย (Line Voltage)
- ค่ากระแสสาย (Line Current)
- ค่ากำลังที่ข้อของเครื่องจักรกล (Terminal Power) และ ค่ากำลังที่ถูกเปลี่ยนที่คำนวณได้ (Calculated Converted Power)

และในกรณีของเครื่องจักรกลซิงโครนัส จะมีการทดสอบอัลกอริทึมการลดความสูญเสียด้วยการมองดูผลแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่งตัวอย่าง

3.2.1 การทดสอบระบบเข้ากับแผ่นพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานที่ขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

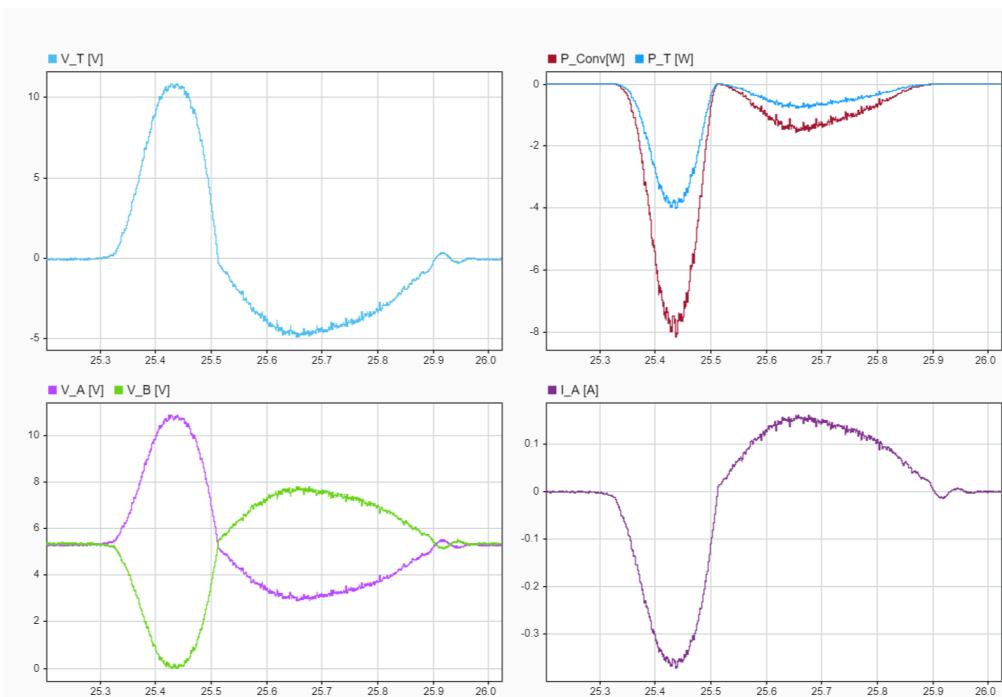


รูป 35: ระบบแผ่นพื้นประเภทมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูป 36: ผลการทดลองของระบบแผ่นพื้นประภากМОเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อไม่ได้เปิดใช้งานอัลกอริทึม

จากรูปที่ 36 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเหยียบตัวแผ่นพื้นเก็บเกี่ยวพลังงาน แรงดันที่ขึ้นของเครื่องจักรกลจะเป็นคลื่นพัลซ์แบบมีแรงดันสองทิศทาง นั่นคือแรงดันบวกในตอนที่เท้ากดลงไปบนพื้น และแรงดันเป็นลบในตอนที่ถอนเท้าออกจากแผ่นพื้น แต่เนื่องจากแรงดันที่ได้จากเครื่องจักรกล น้อยกว่าแรงดันของแบตเตอรี่ จึงทำให้กลไกของตัวเรียงกระแส ที่แฟรงค์อยู่ในอินเวอร์เตอร์ไม่สามารถที่จะดึงพลังงานกลับไปยังแบตเตอร์รี่ได้ ดังนั้น จึงไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลกลับไปยังแบตเตอร์รี่ ค่าที่กำลัง และกระแส อ่านได้ จึงเป็นสัญญาณรบกวน ที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของแรงดันจากเครื่องจักรกลไฟฟ้า

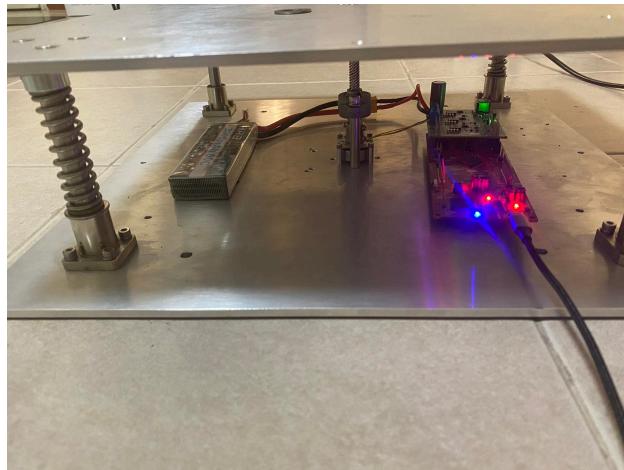


รูป 37: ผลการทดลองของระบบแผ่นพื้นประภากМОเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อมีการเปิดใช้งานอัลกอริทึม

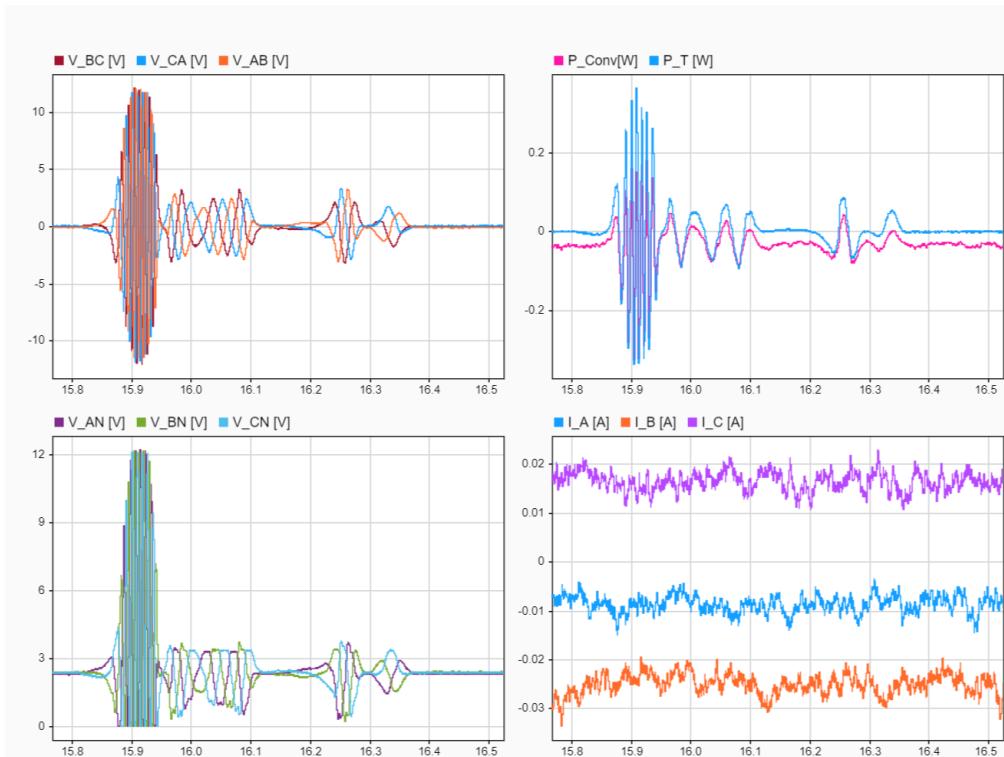
จากรูปที่ 37 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเปิดใช้งานอัลกอริทึมติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด จะทำให้กำลังไฟฟ้าเหล็กจากเครื่องจักรกลไฟฟ้ามายังแบตเตอร์รี่ได้โดยจะสังเกตุได้โดยกำลังไฟฟ้าที่อ่านได้มีค่าติดลบ เนื่องจากค่ากำลังและกระแสที่วัดได้ นิยามจากกำลัง และกระแสที่เหลือเข้าเครื่องจักรกลไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจะเริ่มไหลเข้าแบตเตอร์ริตั้งแต่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเริ่มสร้างแรงดันที่ขึ้นได้ ต่างจากกรณีของตอนที่ยัง

ไม่ได้เปิดใช้งานอัลกอริทึมติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด เพราะอาทัยกลไกการนำไฟฟ้าของตัวเรียงกระแสเพียงอย่างเดียว ข้อสังเกตเพิ่มเติมคือ กำลังไฟฟ้าที่ข้าวของเครื่องจักรกลไฟฟ้า จะเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังที่ถูกเปลี่ยนผ่าน เนื่องจากกลไกของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด เป็นแบบการปรับค่าอัมพิเดนซ์ให้เท่ากัน นั่นคือ อัมพิเดนซ์ของอินเวอร์เตอร์ จะต้องเท่ากับอัมพิเดนซ์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ทำให้ได้ผลลัพธ์มาดังที่แสดง ซึ่งเป็นการยืนยันว่า อัลกอริทึมทำงานได้อย่างถูกต้อง

3.2.2 การทดสอบระบบเข้ากันแ配นพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานที่ขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ชิ่งโครนัสแม่เหล็กถาวร

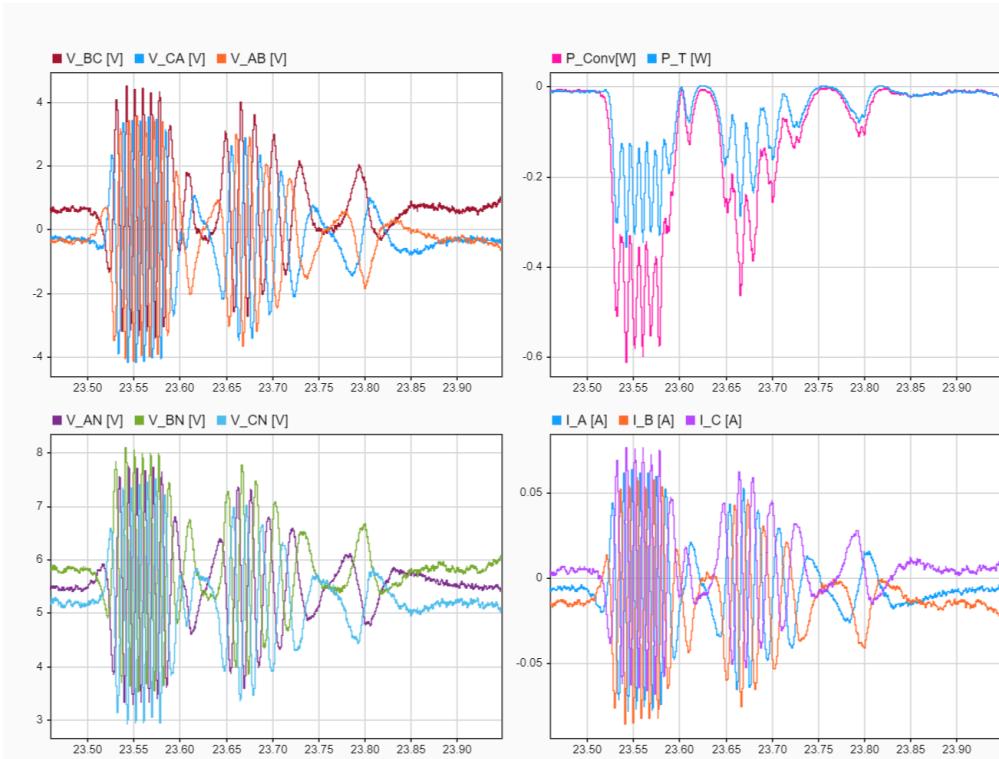


รูป 38: ระบบแ配นพื้นประเภทมอเตอร์ไฟฟ้าชิ่งโครนัสแม่เหล็กถาวร



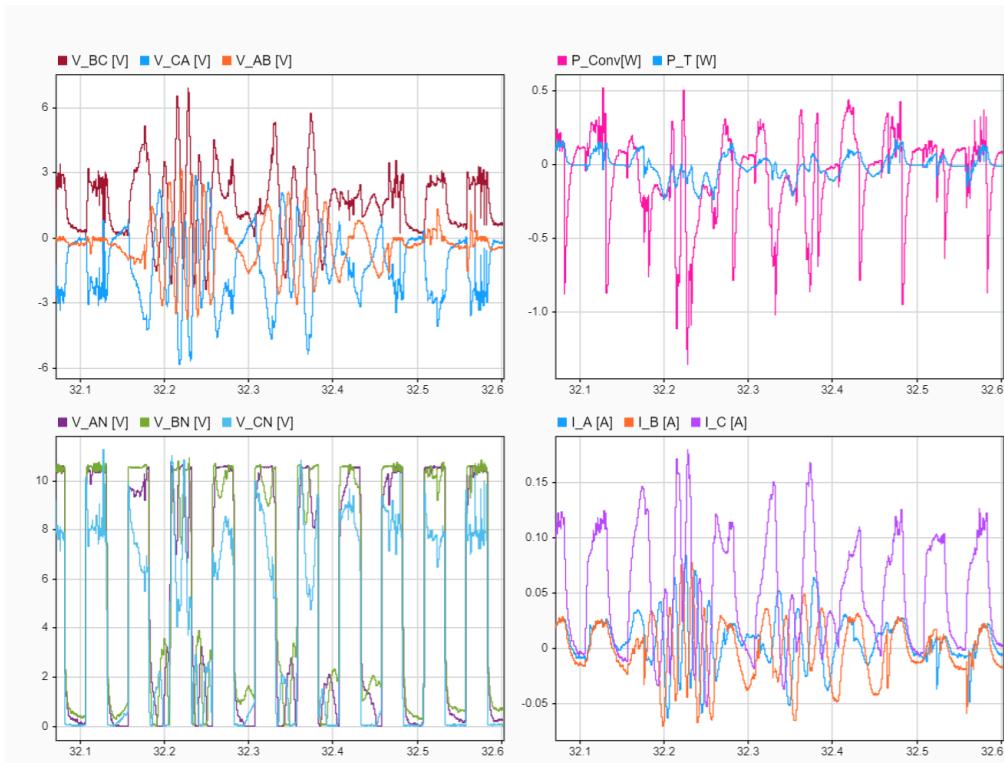
รูป 39: ผลการทดลองของระบบแ配นพื้นประเภทมอเตอร์ไฟฟ้าชิ่งโครนัสแม่เหล็กถาวร เมื่อไม่ได้เปิดใช้งานอัลกอริทึม

จากรูปที่ 39 จะเห็นได้ว่า เช่นเดียวกับกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อแ配นพื้นถูกหยิบ เครื่องจักรกลไฟฟ้าก็จะสร้างแรงดันที่ข้าวอกมา แต่ไม่สามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้ากลับไปยังแบตเตอรี่ได้



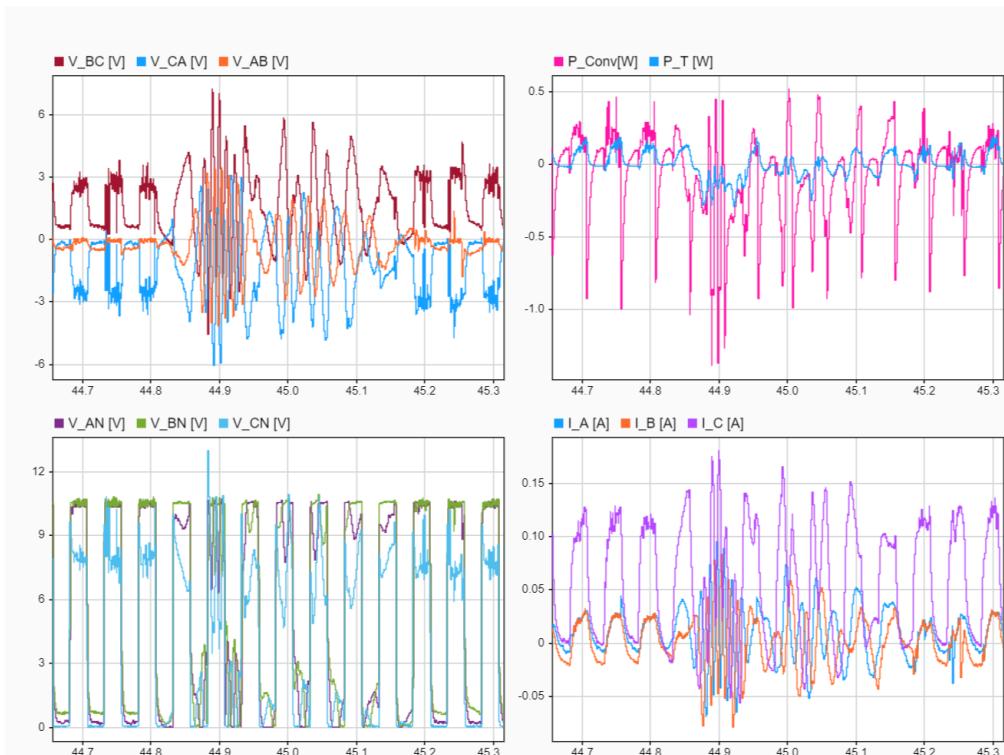
รูป 40: ผลการทดลองของระบบแผ่นพื้นประภากМОเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร เมื่อมีการเปิดใช้งานอัลกอริทึมติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

จากรูปที่ 40 จะเห็นได้ว่า เมื่ออัลกอริทึมติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ถูกเปิดใช้งาน จะทำให้กำลังไฟฟ้าจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าไปสู่เบตเตอร์รี่ได้ และ กำลังไฟฟ้าที่ขึ้นของเครื่องจักรกลไฟฟ้า จะเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังที่ถูกเปลี่ยนผ่าน ซึ่งช่วยยืนยันได้ว่า อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง แต่จะสังเกตได้ว่า กำลังไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรมีค่าน้อย เนื่องจากมอเตอร์ที่นำมาใช้กับระบบแผ่นพื้นมีขนาดเล็ก



รูป 41: ผลการทดลองของระบบแผ่นพื้นประกายมอเตอร์ไฟฟ้าชิ้งโครนัสแม่เหล็กถาวร เมื่อมีการเปิดใช้งานอัลกอริทึมติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด เพิ่มอัลกอริทึมการมองดูเลตแบบสองแข้น

จากรูปที่ 41 จะสังเกตุได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มการใช้งานอัลกอริทึมในการมองดูเลตแบบสองแข้น ระบบได้มีการเพิ่มแรงดันลำดับศูนย์เข้าไปในแรงดันของแต่ละเฟส ซึ่งเป็นการยืนยันว่า อัลกอริทึมการมองดูเลตแบบสองแข้นสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง แต่ในกราฟ กระแสในเฟส C มีการแกว่งไปมา เนื่องจากสัญญาณควบคุมในระบบตรวจจับข้อมูลเมื่อเปิดใช้งานอัลกอริทึมการมองดูเลตแบบสองแข้น



รูป 42: ผลการทดลองของระบบแผ่นพื้นพื้นประกายมอเตอร์ไฟฟ้าชิ้งโครนัสแม่เหล็กถาวร เมื่อมีการเปิดใช้งานอัลกอริทึมติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด เพิ่มอัลกอริทึมการมองดูเลตแบบสองแข้น และติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง

จากรูปที่ 42 จะสังเกตได้ว่า ผลการทดสอบในกรณีที่เพิ่มการติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง จะให้ผลไม่ต่างจากการป้องกันการไม่ติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง เนื่องจากค่ารีแอคแทนซ์เชิงความเรี่ยงของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่นำมานี้อยู่กว่าค่าความต้านทานมากๆ จึงทำให้ระบบไม่สามารถตรวจสอบจับการเหลืออมกันของทิศทางและได้ซึ่งผลลัพธ์นี้ สอดคล้องกับผลการจำลองที่ได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้

3.3 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้า

จากการศึกษาการทำงานของทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และ การเปรียบเทียบชิ้นกล - ไฟฟ้า จึงได้ว่าวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 21

กรณี เครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวร

จากการที่ได้ศึกษาเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวร และได้วางจزمูลของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 21 แล้ว สามารถรวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวรตามขั้นตอน ดังนี้

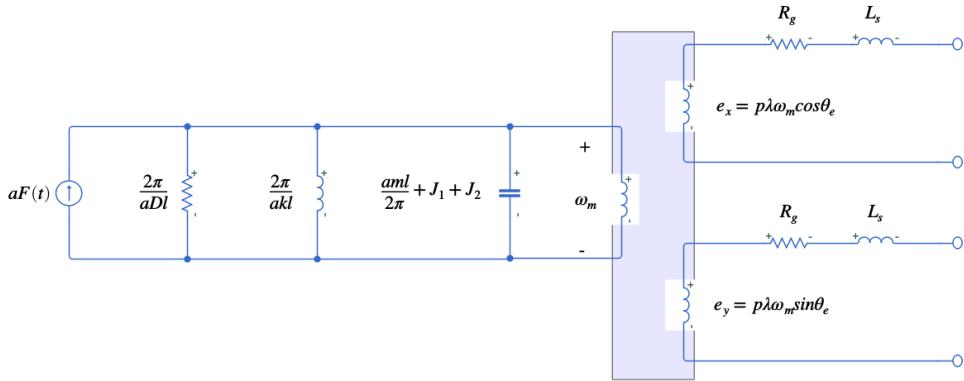
จากสมการแรงดันบนกรอบอ้างอิงนี้ แกน x,y ทำให้ทราบความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนเนินี่ยวนำภายในของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวร ดังสมการด้านล่าง

$$e_x = p\lambda\omega_m \cos(\theta_e) \quad (53)$$

$$e_y = p\lambda\omega_m \sin(\theta_e) \quad (54)$$

$$\vec{e}_{ind} = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \sin(\theta_e) \end{bmatrix} = p\lambda\omega_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \sin(\theta_e) \end{bmatrix} = p\lambda e^{j\theta_e} \quad (55)$$

วงจรที่ไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานสัมพันธ์กับเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวรผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า ความเร็วของโรเตอร์จะห้อนไปยังขนาดแรงเคลื่อนเนินี่ยวนของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างตามสมการด้านบน จึงได้ความสัมพันธ์แสดง ดังแสดงในรูปที่ 43



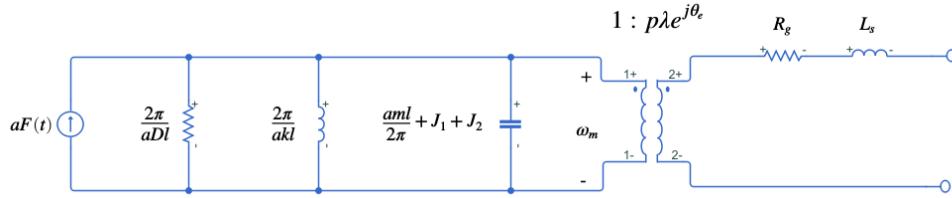
รูป 43: วงจรไฟฟ้าแสดงความสัมพันธ์ระบบทางกลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากนั้นเขียนความสัมพันธ์อยู่ในรูปสเปซเวกเตอร์ของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวร เพื่อสามารถวิเคราะห์เป็นวงจรไฟฟ้าเพียงวงจรเดียวได้

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = p\lambda \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin(\theta_e) \\ \sin(\theta_e) & \cos(\theta_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (56)$$

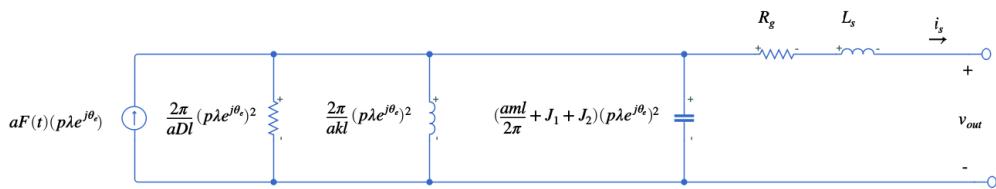
$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = p\lambda e^{-J\theta_e} \begin{bmatrix} \omega_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (57)$$

จึงสามารถมองเป็นวงจรสมมูลที่แสดงความสัมพันธ์เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบเป็นเชิงช้อน ดังแสดงในรูปที่ 44



รูป 44: วงจรไฟฟ้าแสดงความสัมพันธ์ระบบทางกลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีหม้อแปลงไฟฟ้ามีอัตราส่วนเป็นเชิงช้อน

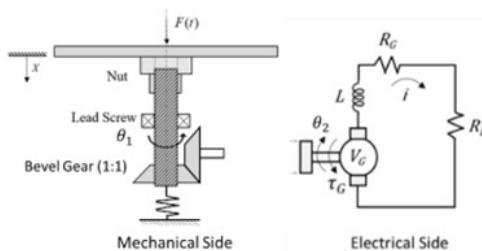
จากนั้นทำการแปลงwang สมมูล โดยอ้างอิงฝั่งทุติยภูมิ(บน) จะได้แสดงดังรูปที่ 45



รูป 45: วงจรสมมูลไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ที่อ้างอิงฝั่งทุติยภูมิ

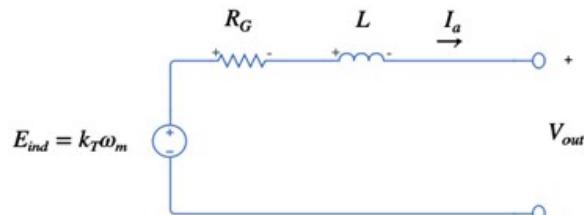
กรณี เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

การดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากแผ่นพื้นเก็บพลังงานโดยใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยวิธีการติดตามจุดทำงานสูงสุด ระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานนั้น แสดงดังรูปที่ 46 ทางฝั่งทางกลประกอบด้วยกลไกเกลียวตัวหนอน (lead screw) และ เกียร์ ส่วนทางฝั่งไฟฟ้ามีเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีความต้านทานและค่าความเหนี่ยาวตัวตัวเอง ต่ออยู่กับโหลด (R_L)



รูป 46: ระบบทางกายภาพของกลไกเกลียวนำของแผ่นพื้นและเครื่องจักรกลไฟฟ้า

จากนั้นพิจารณาฝั่งทางกลในรูปแบบของวงจรไฟฟ้าโดยใช้การเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้า จึงได้วงสมมูลของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน แสดงดังรูปที่ 21 ส่วนวงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง แสดงดังรูปที่ 47 โดยมีความต้านทานและความเหนี่ยาวนำของลวดสเตเตอร์รวมอยู่ด้วย



รูป 47: วงจรสมมูลเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง

โดยที่

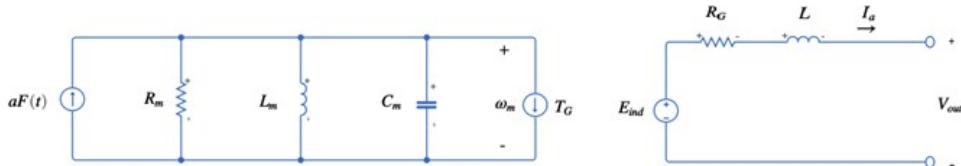
R_G คือ ความต้านทานภายในของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

L คือ ความเหนี่ยวนำภายในของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

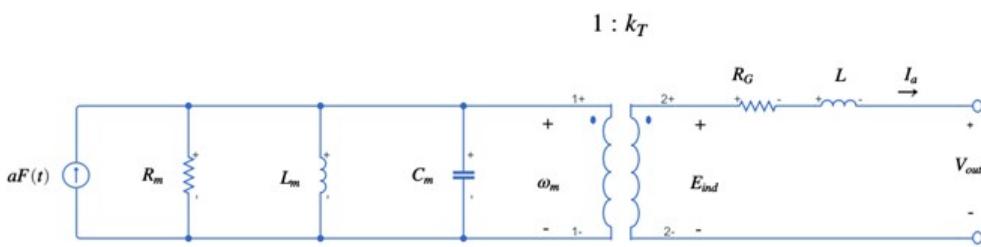
E_{ind} คือ แรงดันเหนี่ยวนำภายในของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

k_T คือ ค่าคงที่มอเตอร์

เมื่อพิจารณาของระบบทางกลและทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 48 จะพบว่าทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน โดยพิจารณาเป็นหม้อแปลง แรงดันที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบ คือ $1 : k_T$ ดังแสดงในรูปที่ 49

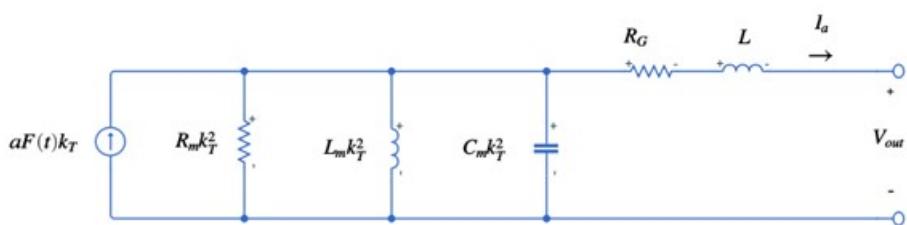


รูป 48: วงจรสมมูลไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง



รูป 49: วงจรไฟฟ้าแสดงความสัมพันธ์ระบบทางกลและเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนจำนวน คือ $1 : k_T$

จากนั้นอ้างอิงจากราหงด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (ด้านเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง) จึงได้ว่าจะ ดังแสดงในรูปที่ 50

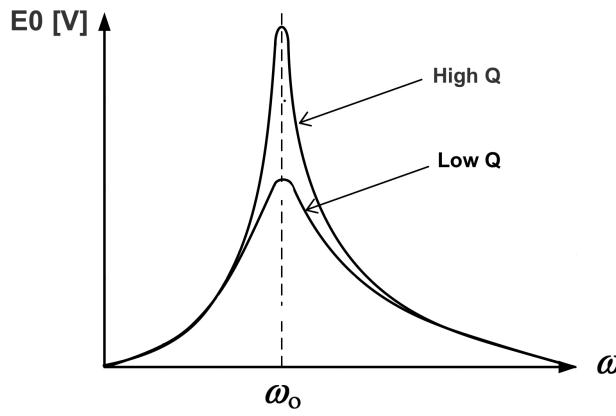


รูป 50: วงจรสมมูลไฟฟ้าของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

3.4 ผลการจำลองของแบบจำลองทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้า บนโปรแกรม MATLAB/Simulink

กรณี เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

จากทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังสูงสุดของระบบพลวัตไม่เป็นเชิงเส้น พบร่วมๆ ถ้าระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานได้รับการออกแบบอย่างดีให้มี quality factor สูง ทำให้ได้แอนบอร์ด 3dB แคบ โดยรูปที่ 51 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเปิดวงจรกับความถี่



รูป 51: ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเปิดวงจรกับความถี่

จากรูปเห็นว่า ระบบที่มี quality factor สูง จะทำให้แรงดันเปิดวงจร E_0 นั้น มีค่าแอมเพลจุดค่าสูงๆจะอยู่รอบความถี่เรโซแนนท์ ขณะที่ความถี่นี้จะมีแอมเพลจุดที่ลดลงเมื่อออกรหัสความถี่เรโซแนนท์ และถึงแม้ว่าสัญญาณเข้าของระบบไม่เป็นสัญญาณไซน์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเท่านั้น สามารถมองประมาณว่า ระบบทำงานที่ความถี่เรโซแนนท์ได้ จึงทำให้ เงื่อนไขโหลดที่เหมาะสมเหมือนกันทั้ง MPPT และ ND-MPPT ทำให้ได้อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดกรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง คือ

$$Z_{load}(s) = Z_{eq}(-s) \cong R_g - sL + R'_m \quad (58)$$

แรงดันขาออกที่สอดคล้องกับหลักการติดตามจุดทำงานกำลังสูงสุด ซึ่งจะทำให้ได้กำลังขาออกของเครื่องจักรไฟฟ้ามีค่าสูงสุด เป็นดังสมการที่ (59)

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

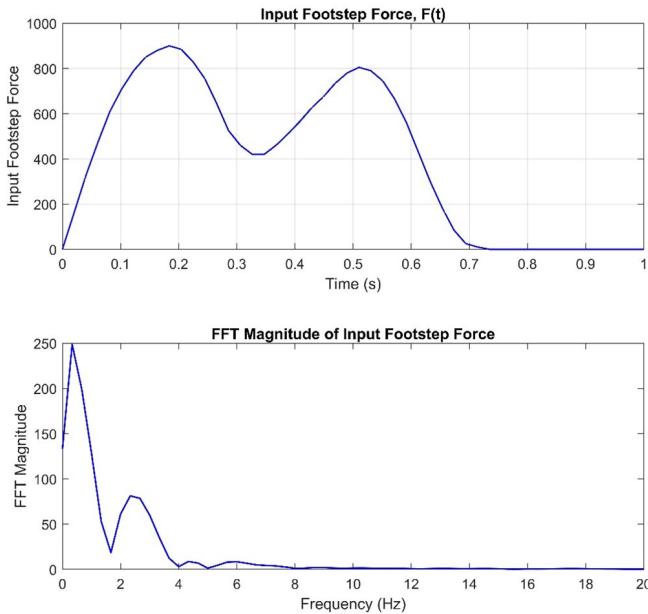
จากสมการที่ (59) เป็นแรงดันคำสั่งที่ใช้สร้างอินเวอร์เตอร์ในการสร้างอุปทาน เสมือนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่สามารถควบคุมได้โดยอัลกอริทึมการติดตามการทำงานสูงสุดทำงานจะนำกระแสเดินทางออกมากวนหาเงื่อนไขแรงดันที่เหมาะสมและส่งกลับไปเป็นสัญญาณแรงดันขาออกของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

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

ตาราง 2: ค่าตัวแปรทางกลและทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับแผ่นพื้นพลังงาน [2]

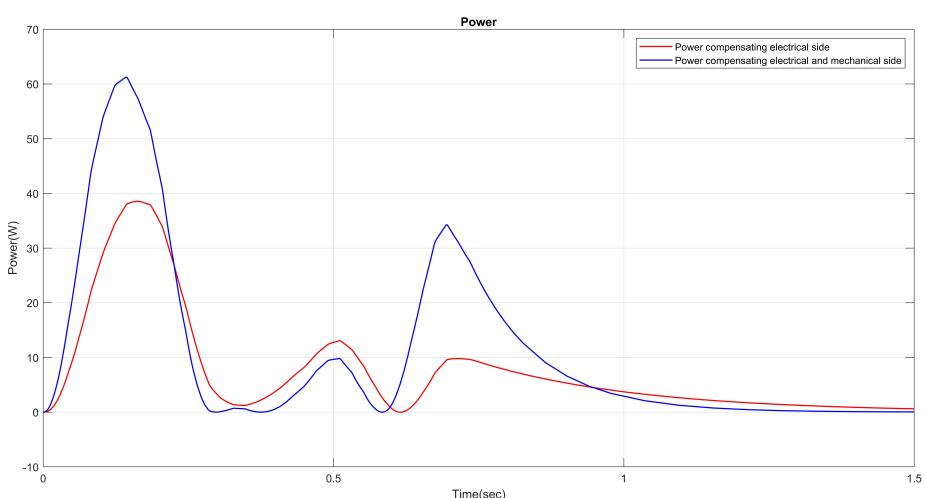
โดยจำลองด้วยสัญญาณเท้าเหยียบและมีสเปกตัมความถี่ แสดงดังรูปที่ 52 สังเกตจากสเปกตัมของเท้าเหยียบมุน竹จะมีความความถี่ต่ำ อよูในช่วง 0 - 10 เอิร์ตซ์



รูป 52: แรงเท้าเหยียบขาเข้า และสเปกตัมเท้าเหยียบ

กรณีที่ 1 เป็นการจำลองระบบแผ่นพื้นก้าบเก็บพลังงานที่ออกแบบให้มีพารามิเตอร์ทั้งทางกลและทางไฟฟ้า และได้ค่าความถี่เรโซแนนท์เท่ากับ 65.02 เอิร์ตซ์ ซึ่งมีค่าที่เข้าใกล้กับสแก็ตตัมความถี่ของเท้าเหยียบมากขึ้น เพื่อศึกษาดูว่ากำลังที่ดึงมากขึ้นหรือไม่ ส่วนกรณีที่ 2 เป็นการจำลองระบบแผ่นพื้นก้าบเก็บพลังงานที่ออกแบบให้มีพารามิเตอร์ทั้งทางกลและทางไฟฟ้าให้ใกล้เคียงกับระบบจริง ทำให้ได้ค่าความถี่เรโซแนนท์เท่ากับ 114.77 เอิร์ตซ์ ซึ่งมีความถี่ห่างจากสเปกตัมความถี่ของเท้าเหยียบมาก

จากผลการจำลองด้วยแผ่นพื้นก้าบพลังงานด้วย MATLAB/Simulink กรณีแรก พบว่าได้ผลลัพธ์ แสดงดังรูปที่ 53

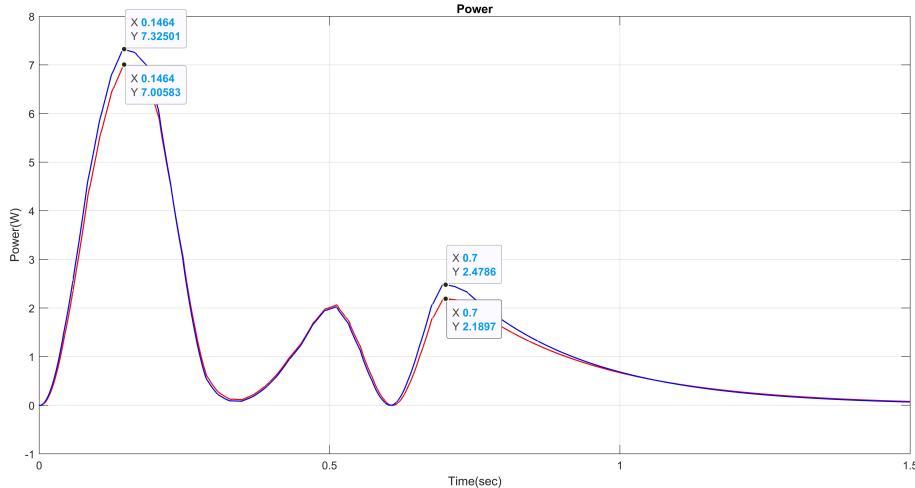


รูป 53: กำลังไฟฟ้าที่ดึงได้จากรอบที่ชดเชยทั้งทางกลและทางไฟฟ้ากับระบบที่ชดเชยทางไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวของระบบก้าบเก็บพลังงาน กรณีที่ 1

จากรูปที่ 53 พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ดึงได้จากรอบที่มีการชดเชยทั้งทางกลและทางไฟฟ้าจะดึงกำลังได้สูงกว่าการชดเชยทางไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวอย่างมาก เนื่องจากสัญญาณขาเข้าของระบบมีความถี่ต่ำมากอยู่ในช่วง 0 - 10 เอิร์ตซ์ และความถี่แรงดันเปิดวงจรของแผ่นก้าบเก็บ

พลังงานมีค่าประมาณ 65.02 เอิร์ตซ์ ซึ่งจะทำให้ระบบทำงานด้วยความถี่ต่ำรอบๆ สัญญาณเท้าเหยียบที่ความถี่ต่ำและกรองความถี่สูงๆ ออกไป แม้ระบบกักเก็บพลังงานจะมีค่า Q factor ไม่สูง แต่เมื่อใช้ทักษะ ND-MPPT เป็นกรณีทั่วไปมากกว่า MPPT โดยค่าความหน่วงนำ L ที่ขาดเชย เป็นการขาดเชยที่ความถี่เรโซแนนซ์และยังขาดเชยที่ความถี่อื่นของสัญญาณขาเข้าด้วย

ส่วนการจำลอง กรณีที่สอง การจำลองด้วยพารามิเตอร์โกล์เดนกับระบบจริงของระบบแผ่นพื้นกักเก็บพลังงาน พบว่าได้ผลลัพธ์ แสดงดังรูปที่ 54



รูป 54: กำลังไฟฟ้าที่ดึงได้จากระบบที่ขาดเชยหั้งทางกลและทางไฟฟ้ากับระบบที่ขาดเชยทางไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวของระบบกักเก็บพลังงาน กรณีที่ 2

จากรูปพบว่า กำลังที่ดึงได้จากระบบแผ่นพื้นกักเก็บพลังงานที่มีการขาดเชยหั้งทางกลและทางไฟฟ้าจะดึงกำลังได้สูงกว่าการขาดเชยทางไฟฟ้าน้อยมาก เช่น ที่ค่าสูงสุดของgraf จะมีกำลังมากขึ้นประมาณ 0.3 วัตต์เท่านั้น ซึ่งเป็นผลมาจากการมิเตอร์ทางกลทำให้ได้ระบบแผ่นพื้นกักเก็บพลังงานที่มีค่า quality factor ไม่สูง ยิ่งไปกว่านั้นยังมีความถี่เรโซแนนซ์ของระบบทางกลอยู่ที่ความถี่ประมาณ 115 เอิร์ตซ์ ขณะที่ความถี่ของสัญญาณเท้าเหยียบโดยทั่วไปจะต่ำกว่าอยู่ในช่วงไม่เกิน 10 เอิร์ตซ์ จึงทำให้การขาดเชยระบบทางกลเพิ่มเข้ามานี้ลดน้อยลง สาเหตุอาจเกิดจากการประมาณพจน์ $\frac{sR'_m L'_m}{s^2 R'_m L'_m C'_m + sL'_m + R'_m}$ ให้เหลือเพียงค่า R'_m และระบบจะไม่ได้ทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบทางกลก็ตาม จึงอาจทำให้ได้กำลังที่เพิ่มขึ้นน้อยมาก

ในระบบจริง ระบบแผ่นพื้นกักเก็บพลังงานมีพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันออกไป อาจมีบางพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า และอาจเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ ทำให้ระบบมีค่า quality factor ที่ไม่สูงและระบบไม่ได้ทำงานด้วยความถี่รอบๆ ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบทางกล จึงทำให้กำลังที่ดึงได้จากระบบแผ่นพื้นกักเก็บพลังงานมีพลังงานอาจได้กำลังที่มากขึ้นเล็กน้อย หรือ เท่าเดิม หรือลดลงก็เป็นได้

กรณี เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

ในการทำงานด้วยกับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง พิจารณาจะรสมมูลไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นกักเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ดังแสดงในรูปที่ 45 ถ้าระบบที่มี quality factor สูง และสัญญาณขาเข้าของระบบไม่เป็นสัญญาณไซน์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จึงทำให้ได้เงื่อนไขโหลดที่เหมาะสมเมื่อกันทั้ง MPPT และ ND-MPPT ทำให้ได้อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดกรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นกักเก็บพลังงานและเครื่องจักรกลซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร คือ

$$Z_{load}(s) = Z_{eq}(-s) \cong R_g - sL_s + R'_m(p\lambda\angle\theta_e)^2 \quad (60)$$

โดยแรงดันขาออกที่สอดคล้องกับหลักการติดตามจุดทำงานกำลังสูงสุด ซึ่งจะทำให้ได้กำลังขาออกของเครื่องจักรไฟฟ้ามีค่าสูงสุด เป็นดังสมการที่ (61)

$$v_{load}(s) = Z_{eq}(-s)i_s \cong R_g i_s - sL_s i_s + R'_m(p\lambda\angle\theta_e)^2 i_s \quad (61)$$

หลังจากนั้นจึงทำการสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อศึกษาการทำงานของแบบจำลองที่ได้ และกำลังขาออกที่ได้

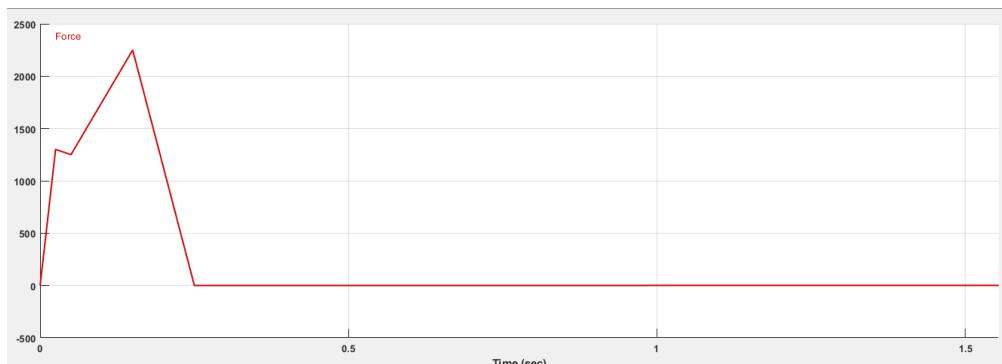
แบบจำลองที่ได้ ทดสอบด้วยแรงจากเท้าเหยียบ แสดงดังรูปที่ 55 โดยค่าพารามิเตอร์อื่นที่ใช้ในการทดสอบ [2] แสดงดังตารางที่ 3 และ 4

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]

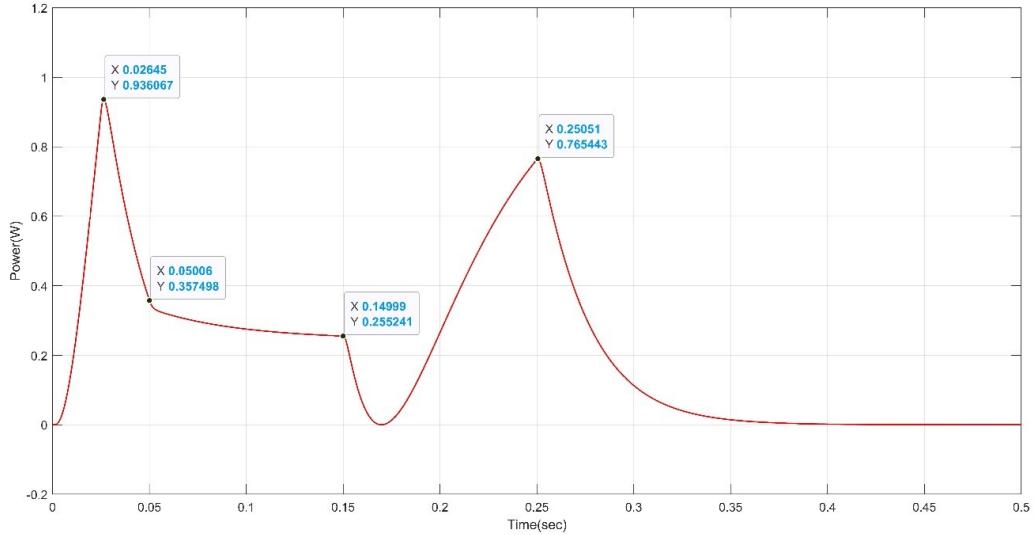
Parameters	Value
ค่าความต้านทานของชุดลวดสเตเตอร์(Rs)	32.23Ω
ค่าความเหนี่ยวนำของชุดลวดสเตเตอร์(Ls)	11.3 mH
ค่าความเหนี่ยวนำของชุดลวดสเตเตอร์ในแนวแกนอ้างอิงดี (Ld)	16 mH
ค่าความเหนี่ยวนำของชุดลวดสเตเตอร์ในแนวแกนอ้างอิงคิว (Lq)	16 mH
ฟลักซ์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร	0.009 Wb
จำนวนคู่ชี้	6 คู่

ตาราง 4: ค่าตัวแปรทางกลที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรไฟฟ้าชิ้งโครนัสแม่เหล็กถาวร[2]

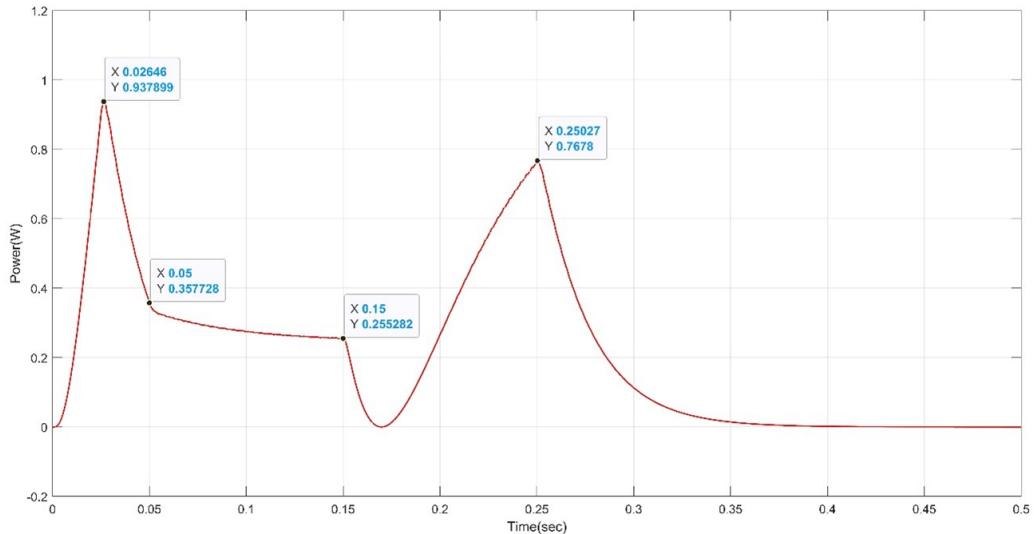


รูป 55: แรงเห้าเหยียบขาเข้า (กรณี เครื่องจักรกลชิ้งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร)

จากผลการทดสอบแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink จะได้ว่ามีลักษณะกำลังข้าอกจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าชิ้งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่ชุดเซย์เฉพาะทางไฟฟ้าของระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน โดยไม่คิดผลของกลไกทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานรวมในอัลกอริทึมการติดตามกำลังสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 56 เปรียบเทียบกับกำลังข้าอกจากเมื่อใช้อัลกอริทึมจากการทำงานสูงสุดที่มาจากการสมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรกลไฟฟ้าชิ้งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ซึ่งเป็นการซัดเซย์ผลทั้งทางกลและทางไฟฟ้าของระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ ??



รูป 56: กำลังข้ออกเมื่อใช้อัลกอริทึมการติดตามการทำงานสูงสุด กรณีชดเชยทางไฟฟ้าของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน



รูป 57: กำลังข้ออกเมื่อใช้อัลกอริทึมการติดตามการทำงานสูงสุด กรณีชดเชยทั้งทางกลและทางไฟฟ้าของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

จากรูปที่ 56 และ 57 พบว่า กรณีที่ชดเชยทั้งทางกลและทางไฟฟ้าของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน จะได้กำลังข้ออกที่สูงกว่าน้อยมากจนไม่เห็นความแตกต่าง หรือก็คือได้กำลังข้ออกเท่าเดิม เมื่อเทียบกับกรณีที่ชดเชยเฉพาะทางไฟฟ้าของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน จึงสรุปได้ว่า อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด กรณีที่ชดเชยทั้งทางกลและทางไฟฟ้าของแผ่นพื้นเก็บพลังงานสามารถไม่ทำให้ได้กำลังข้ออกมีค่าที่สูงขึ้น เนื่องจาก พิจารณาสมการ (60) และ (61) จะมีพจน์ออมพีแคนซ์ $R'_m(p\lambda\angle\theta_e)^2$ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มาจากการบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน เพิ่มเข้ามาไม่น้อยมาก โดยมีขนาดเท่ากับ 0.002916Ω ซึ่งเมื่อเทียบกับความต้านทานของชุด漉ดสเตรอร์ R_g มีค่าเท่ากับ 32.23Ω จึงทำให้พจน์ที่เพิ่มเข้ามาไม่มีความสำคัญ หรือจะกล่าวได้ จึงทำให้กำลังข้ออกที่จำลองได้มีค่าเท่าเดิม

4 บทสรุป

4.1 สรุปผลการดำเนินการ

4.1.1 การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการมองเหตุผลแบบสองชั้น และการติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง

จนถึงปัจจุบัน ได้มีการออกแบบอัลกอริทึมการลดกำลังสัญญาณในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการลดค่าเลดแบบสองชั้น และการติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง บน MATLABTM/SimulinkTM และได้มีสร้างโมเดลของอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อที่จะทดสอบระบบห้องหมุด นั่นคือ

- ไม่เดลแบบจำลองของแบตเตอรี่
 - ไม่เดลแบบจำลองของระบบเชิงกล
 - ไม่เดลแบบจำลองของมอเตอร์ชิ้งโครน์สแม่เหล็กถาวร
 - ไม่เดลแบบจำลองระบบผึ้งตัว
 - ไม่เดลแบบจำลองบอร์ดอินเวอร์เตอร์

และได้มีการทดสอบ และทวนสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ และยัลกอริทึมในการลดกำลังสูญเสีย พบว่า สามารถทำงานและตัดสินใจได้ถูกต้อง

4.1.2 การทดสอบเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นพื้นกับผลิตภัณฑ์ตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุดผ่านการจำลอง

จากการที่ได้ไปศึกษาการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน การเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า เครื่องจักรกลชิ้นໂຄຣນ້ສແມ່ເຫັນກວາງ ແລະ หลักการติดตามจุดทำงานสูงสุด ทำให้ได้วงจรสมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน ใช้حاอລກອຣີທຶນການຕິດຕາມຈຸດทำงานທີ່ໄກ້ກຳລັງສູງສົດໄດ້ ແລະ สร้างແບບຈຳລອງດ້ວຍໂປຣແກຣມ MATLAB/Simulink

จากการทดสอบอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุดซึ่งมีการรวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink พบว่า กรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณด้วย จะได้กำลังข้า้อกที่สูงกว่า กรณีที่ไม่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณเท่าไรก็ตาม สำหรับค่าที่ต้องการติดตามจุดทำงานสูงสุด กรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณ สามารถทำให้ได้กำลังข้า้อกมีค่าที่สูงขึ้นจริง

4.1.3 การทดสอบระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานกับอุปกรณ์จริง

ในรายงานฉบับนี้ ได้มีการทดสอบระบบแพ่นพื้นเก็บพลังงานทั้งสองชนิด นั่นคือแพ่นพื้นเก็บเกี่ยวยพลังงานประเภทมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ได้มีการพัฒนาจากโครงงานในปีการศึกษาที่แล้ว และ แพ่นพื้นเก็บเกี่ยวยพลังงานประเภทมอเตอร์ชิ้งโครนัสแม่เหล็กถาวร ได้ผลลัพธ์คือ ระบบแพ่นพื้นเก็บพลังงาน สามารถเก็บเกี่ยวยพลังงานไฟฟ้าได้จริง และในกรณีของมอเตอร์ชิ้งโครนัสแม่เหล็กถาวร ได้มีการทดสอบอัลกอริทึม การมองเหตุผล化ของวิเคราะห์ และการติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง ได้ผลลัพธ์คือ อัลกอริทึมสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง

4.2 ปัญหา อุปสรรค และแนวทางแก้ไข

4.2.1 พลังงานที่ได้จากแผ่นพื้นเก็บพลังงานที่ใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโคนัสแม่เหล็กความร้อนอยู่

เนื่องจากกลไกแผ่นพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานที่ใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างแม่เหล็กการเลือกใช้มอเตอร์ตัวเล็ก จึงทำให้ค่าความด้านทางกายในของมอเตอร์มีค่าสูง ทำให้กระแสไฟหล่อจากก้มอเตอร์มีค่าน้อย ทำให้กำลังที่เก็บได้มีค่าน้อยตามไปด้วย ดังนั้น แนวทางการแก้ไขคือเลือกใช้มอเตอร์ซึ่งโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ ให้เหมาะสมกับระบบแผ่นพื้นมากกว่า นี้ จะทำให้แผ่นพื้นเก็บพลังงานได้มากขึ้น

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.

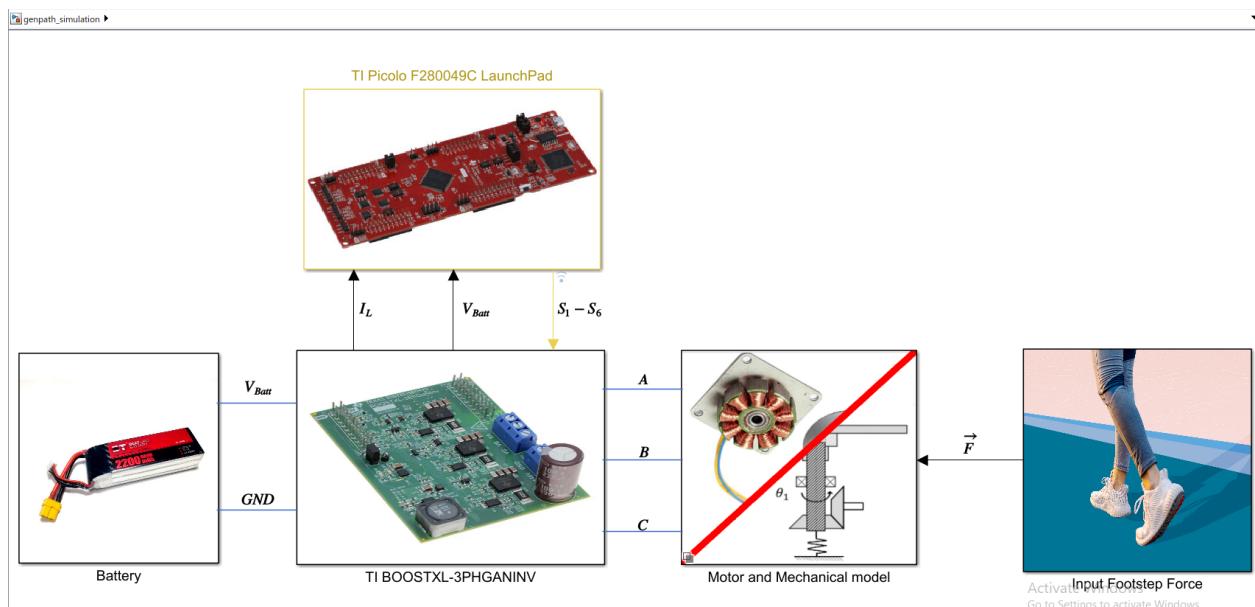
- [4] N. Mohan and S. Raju, *Analysis and Control of Electric Drives: Simulations and Laboratory Implementation*. Wiley, 2020.
- [5] Asst. Prof. Surapong Suwankawin, “Chapter 4 modeling and control of surface permanent magnet synchronous motor.” presented to 2102-543, Faculty of Engineering, Chulalongkorn 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 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์สุรพงศ์ สุวรรณกิwin ที่ได้ช่วยซึ้งและให้คำปรึกษาในระหว่างการทำโครงการฉบับนี้ ขอขอบคุณคณาจารย์และนิสิตภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ช่วยทำขั้นงานแผ่นพื้นต้นแบบให้กับโครงการฉบับนี้

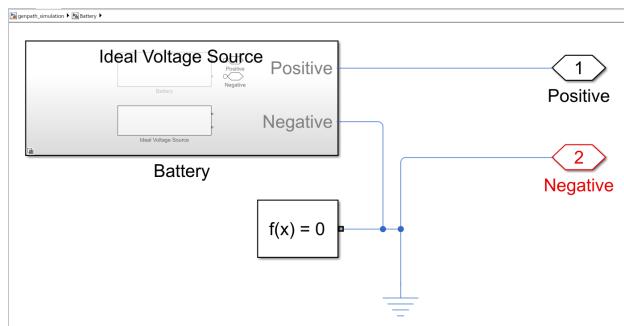
7 ภาคผนวก

7.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบพลังงาน

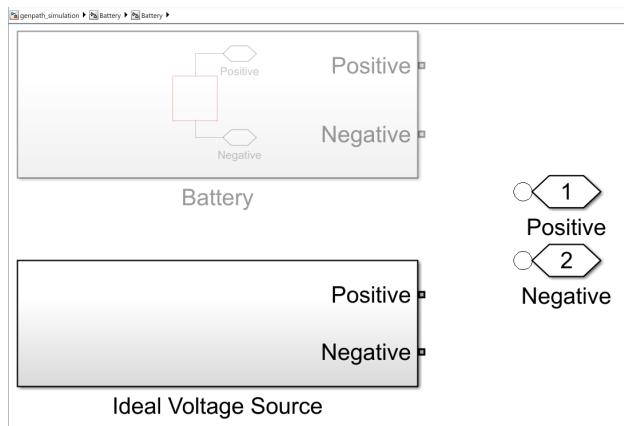


รูป 58: ขั้นที่ 1: ภาพรวมของระบบพลังงานทั้งหมด

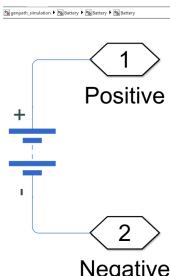
7.1.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแบตเตอรี่



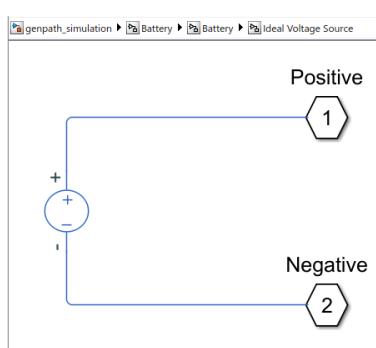
รูป 59: ขั้นที่ 2: แบตเตอรี่ และ Solver Configuration



รูป 60: ขั้นที่ 3: Variant Model ของแบตเตอรี่

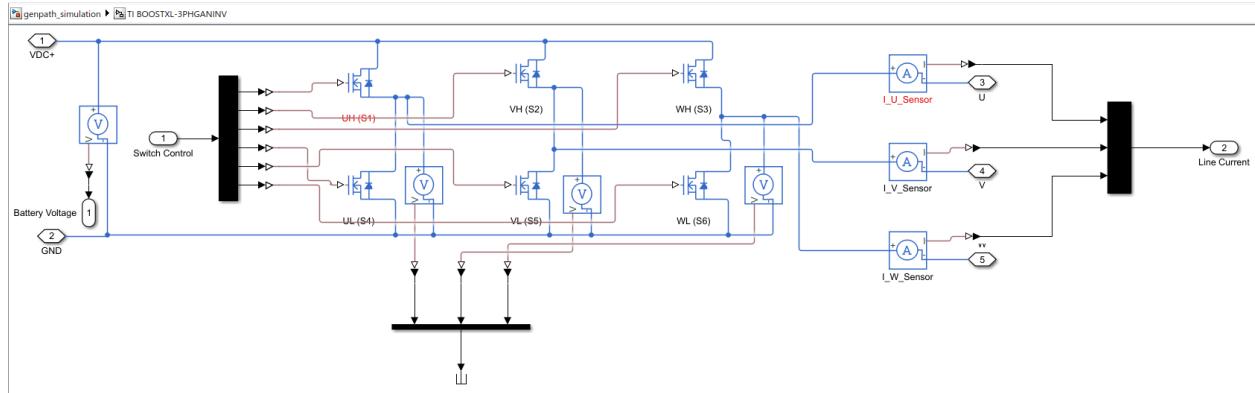


รูป 61: ขั้นที่ 4: ภายใน Variant Model ของแบตเตอรี่



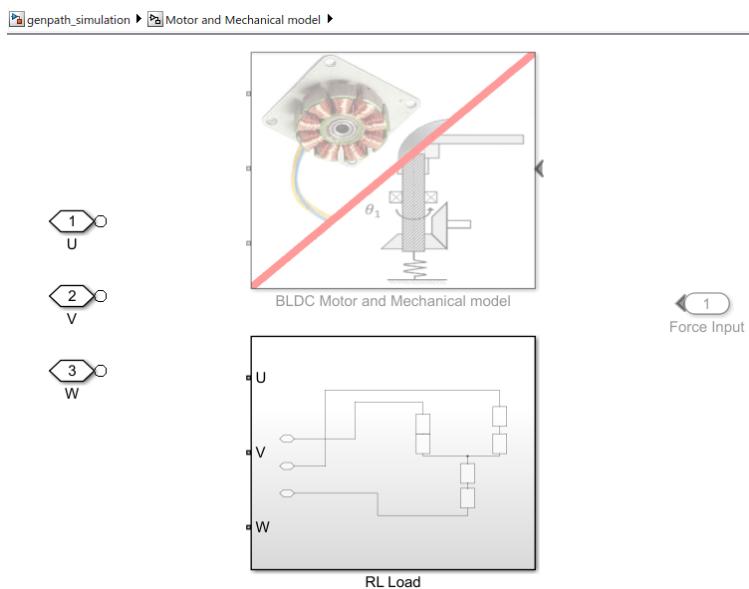
รูป 62: ขั้นที่ 4: ภายใน Variant Model ของแหล่งจ่ายไฟตรงในอุดมคติ

7.1.2 Simulink Model ในส่วนของการจำลองบอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI BOOSTXL-3PHGANINV

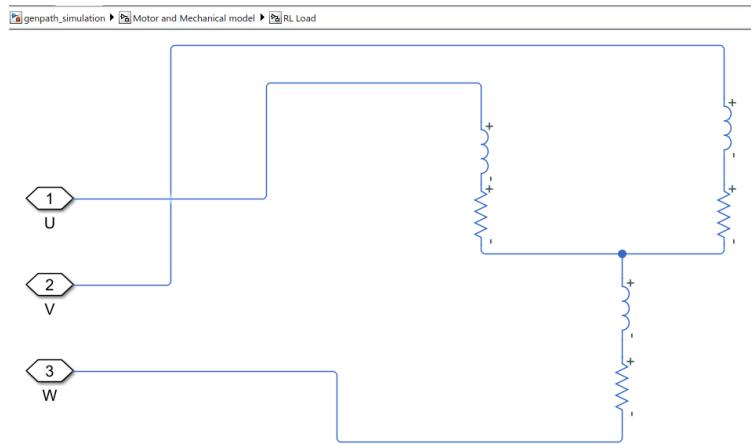


รูป 63: ขั้นที่ 2: บอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI BOOSTXL-3PHGANINV

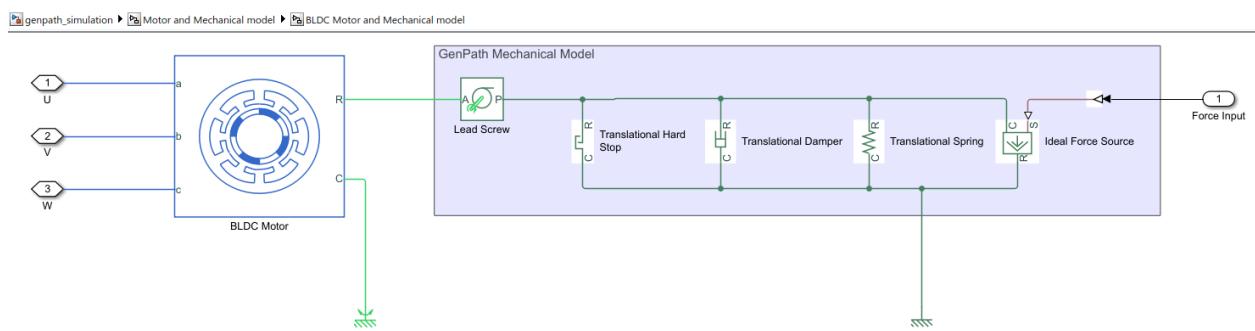
7.1.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบเชิงกลและมอเตอร์ซึ่งโครงสร้างแม่เหล็กถาวร



รูป 64: ขั้นที่ 2: Variant Model ของมอเตอร์และระบบเชิงกล กับโหลดแบบตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวน้ำ

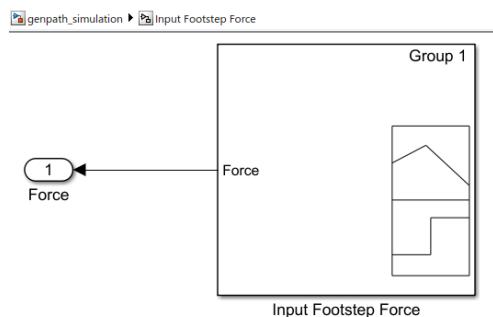


รูป 65: ขั้นที่ 3: ภายใน Variant Model ของโกลด์แบบตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

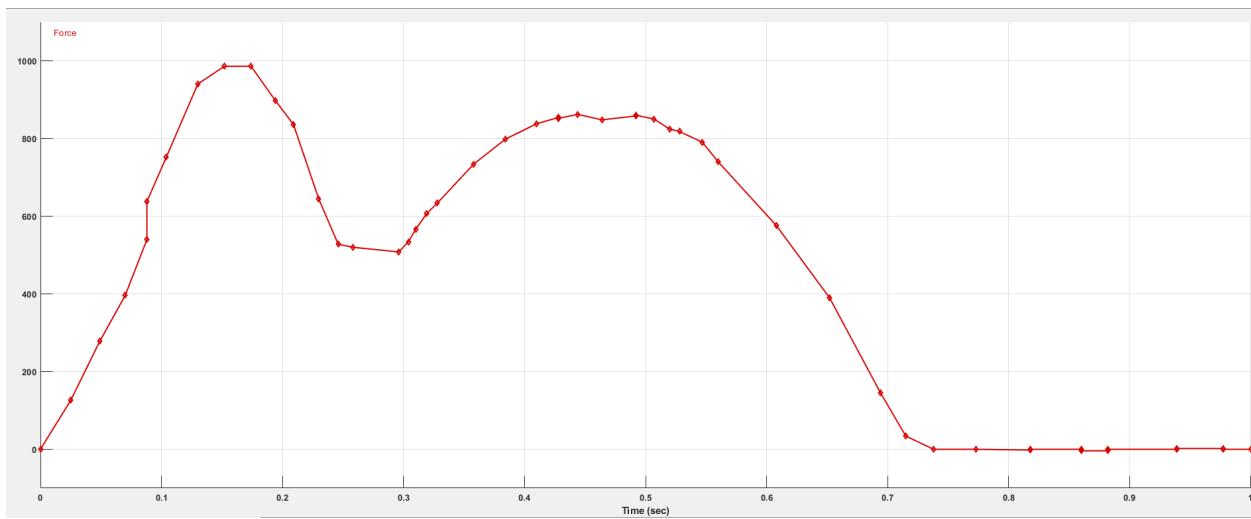


รูป 66: ขั้นที่ 3: ภายใน Variant Model ของระบบเชิงกลและมอเตอร์ซึ่งโครงสร้างแม่เหล็กการ

7.1.4 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแรงที่เท้าเหยียบแผ่นพื้น

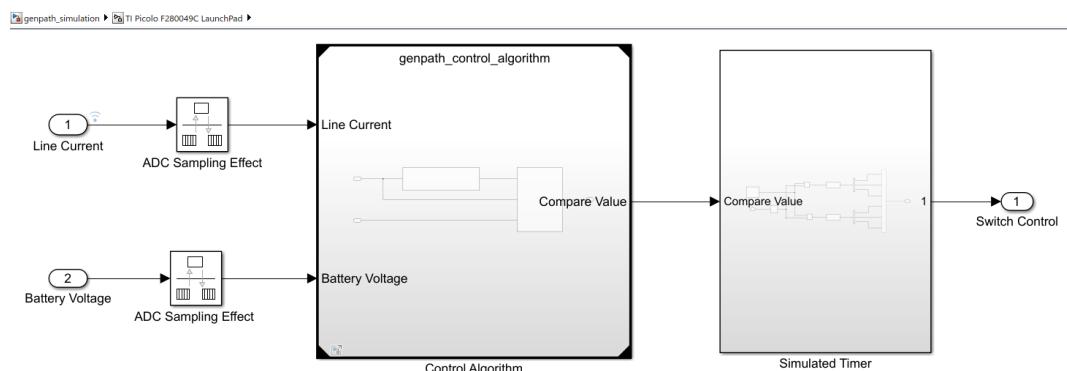


รูป 67: ขั้นที่ 2: แบบจำลองแรงที่มาจากเท้าเหยียบแผ่นพื้น

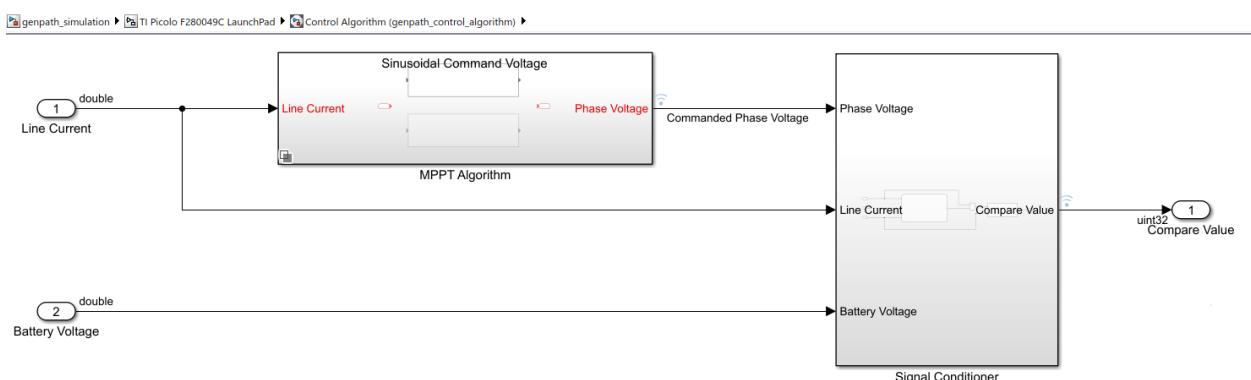


รูป 68: กราฟแสดงสัญญาณแรงที่มาจากเท้าเหยียบ

7.2 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมที่ทำงานบนระบบฝังตัว TI Picolo F280049C LaunchPad

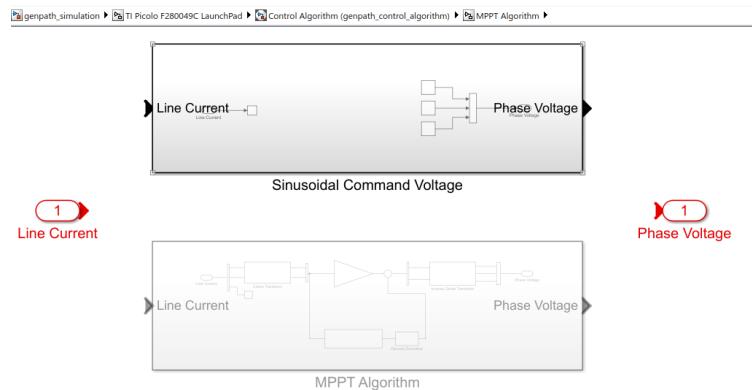


รูป 69: ชิ้นที่ 2: ภายใน Subsystem ของแบบจำลองระบบฝังตัว

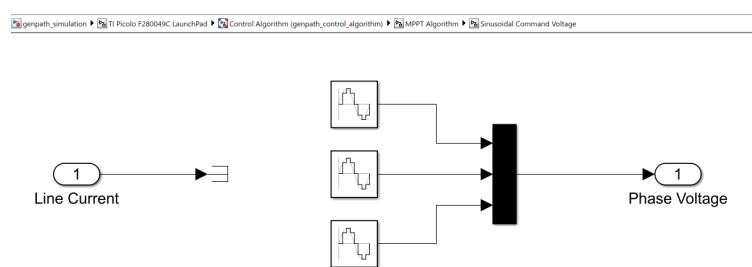


รูป 70: ชิ้นที่ 3: ภายใน Subsystem ของอัลกอริทึมที่ทำงานอยู่บนระบบฝังตัว

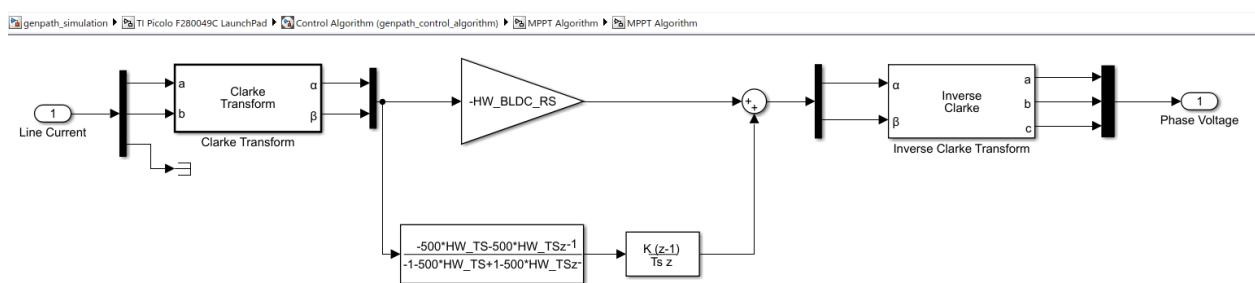
7.2.1 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูป 71: ขั้นที่ 4: Variant Model ของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

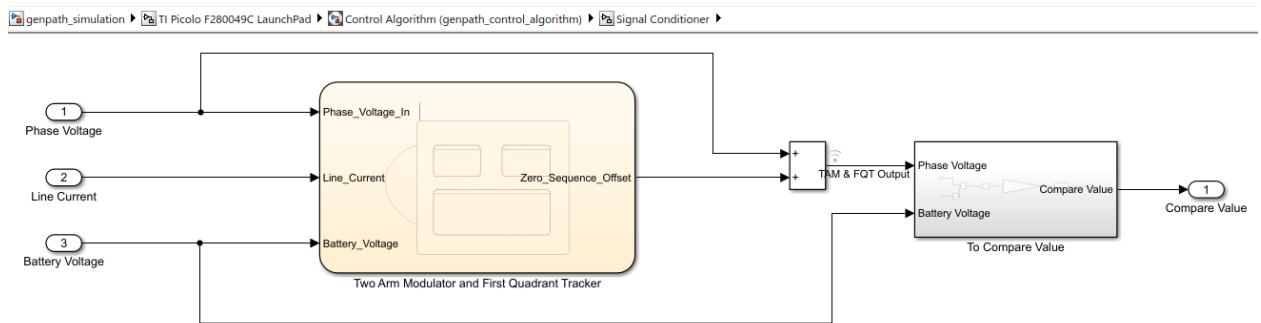


รูป 72: ขั้นที่ 5: ภายใน Variant Model ของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่สร้างสัญญาณคำสั่งแบบไบต์ชีน

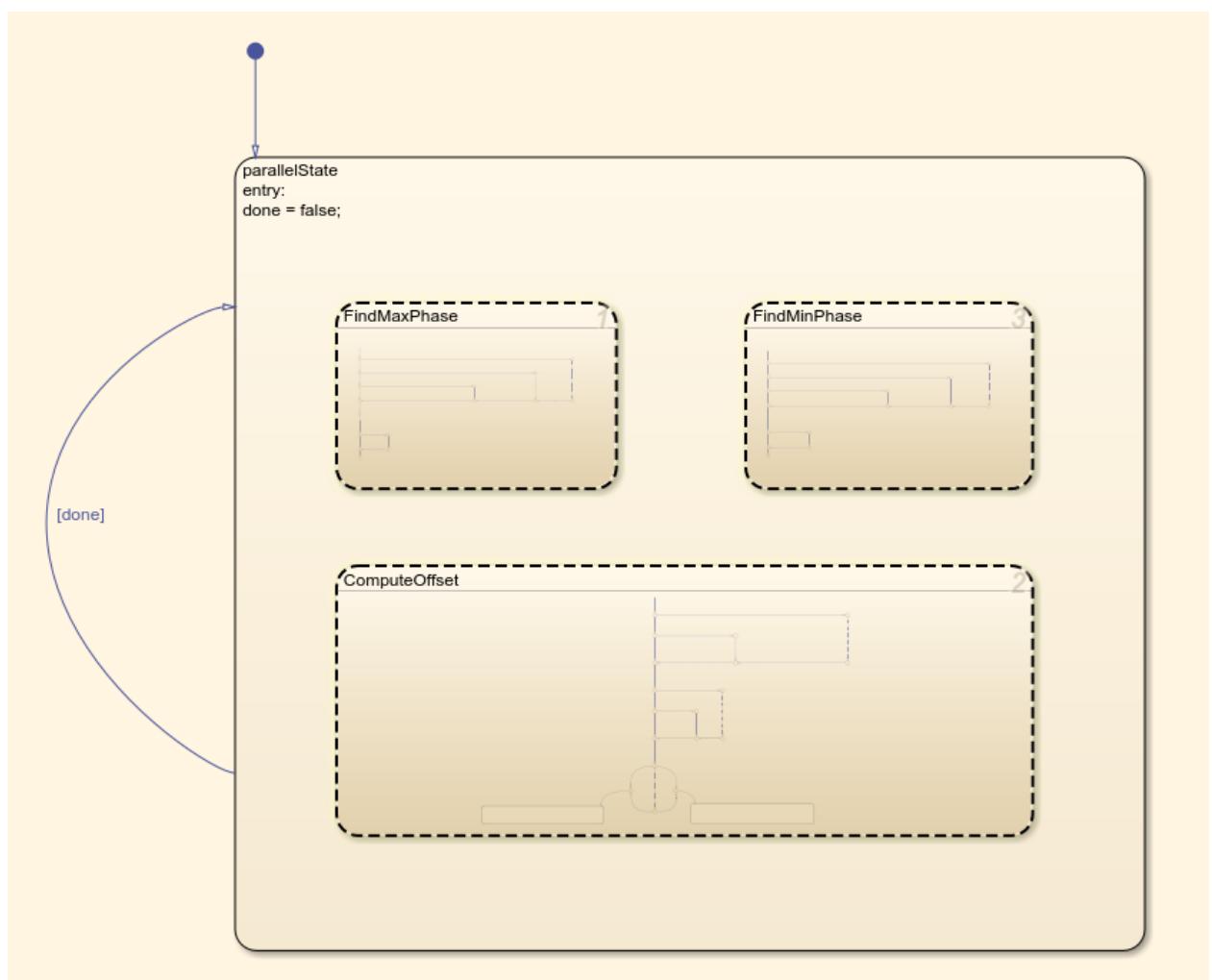


รูป 73: ขั้นที่ 5: อัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

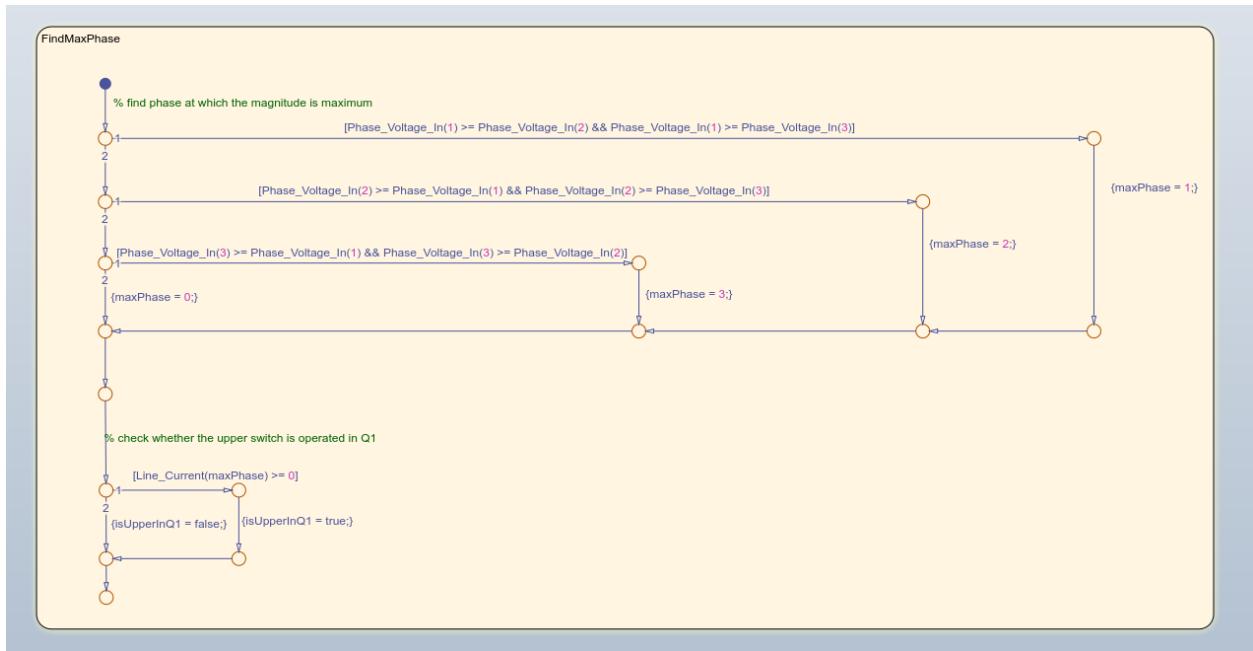
7.2.2 Simulink Model ในส่วนของการปรับปรุงสัญญาณ



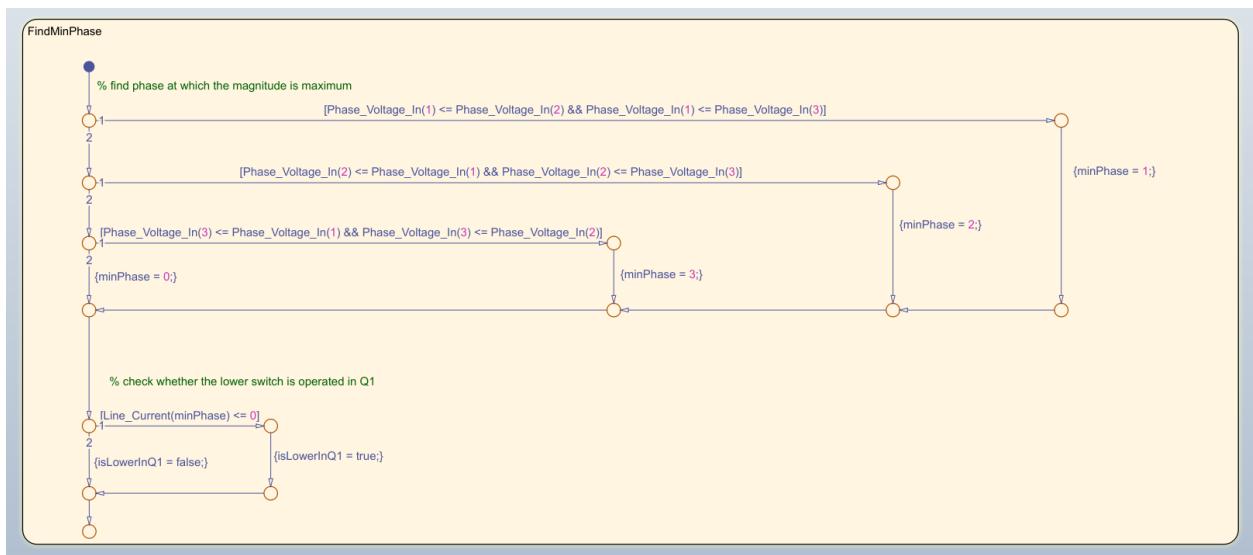
รูป 74: ขั้นที่ 4: ภายใน Subsystem ของระบบปรับปรุงสัญญาณ



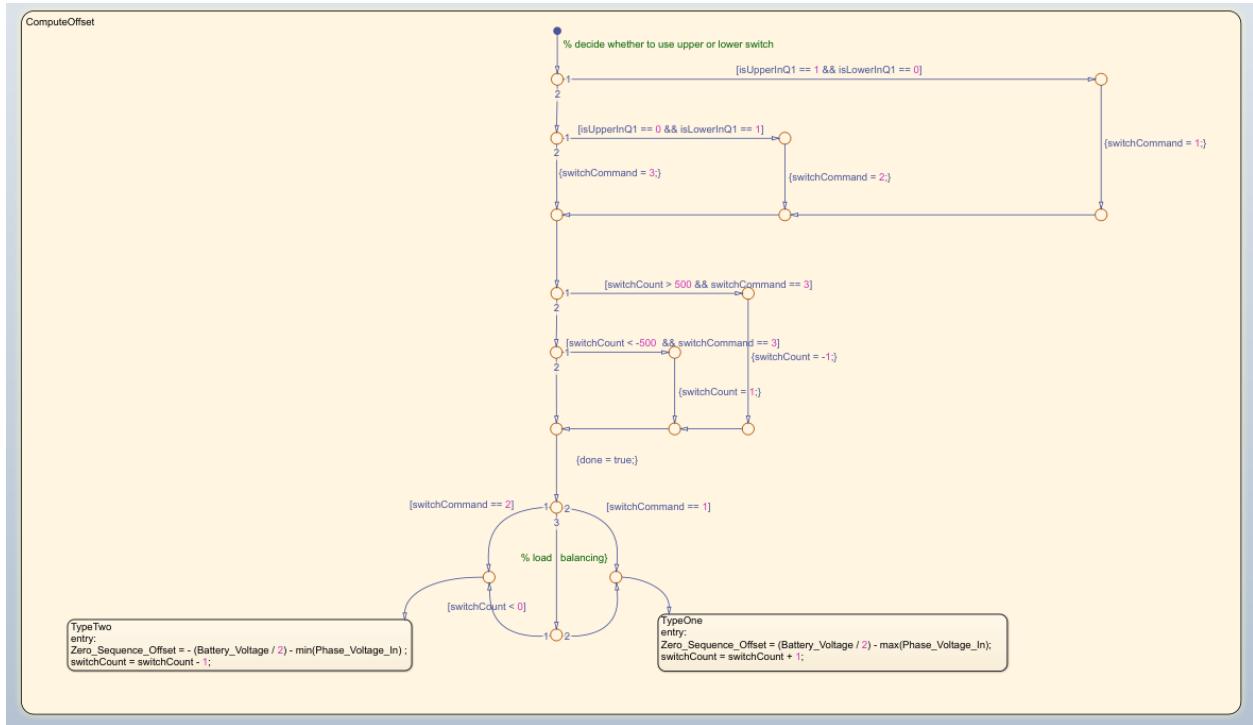
รูป 75: ขั้นที่ 5: ภายใน Stateflow chart ของตัวมอดูลแต่แบบสองแขน และติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง



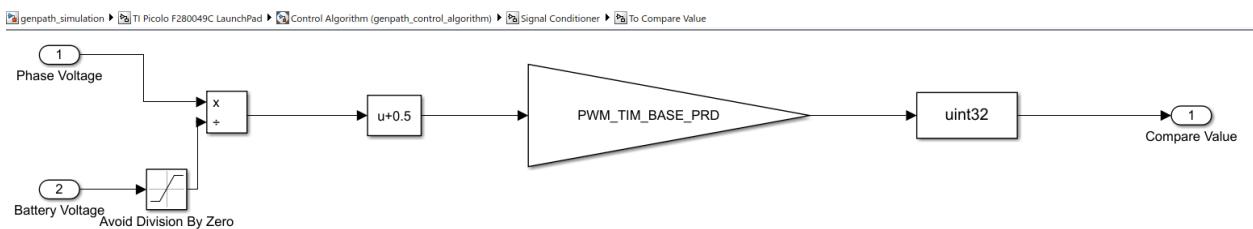
รูป 76: ชั้นที่ 6: ภายใน Subchart ที่ใช้ในการหาเฟสที่มีแรงดันคำสั่งมากที่สุด



รูป 77: ชั้นที่ 6: ภายใน Subchart ที่ใช้ในการหาเฟสที่มีแรงดันคำสั่งน้อยที่สุด

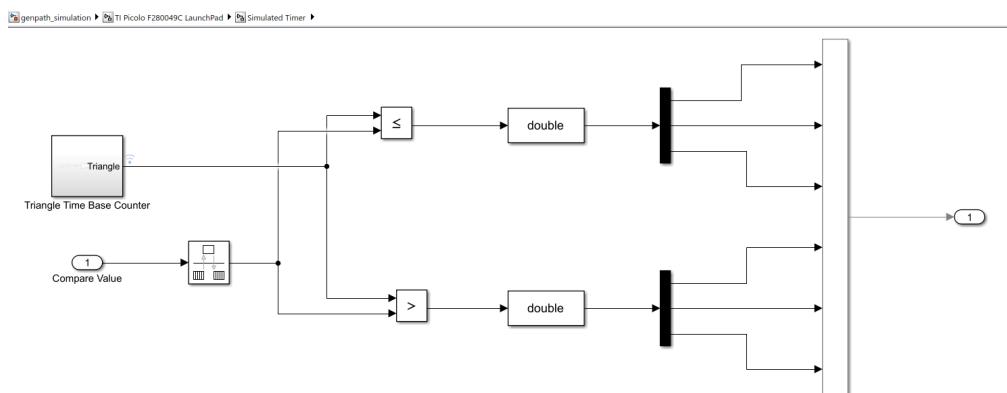


รูป 78: ขั้นที่ 6: ภายใน Subchart ที่ใช้ในการคำนวณแรงดันลำดับศูนย์



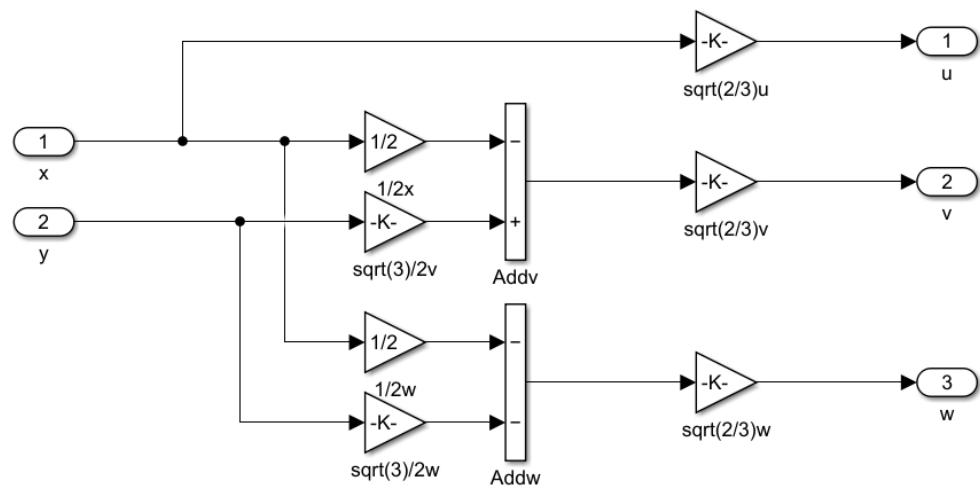
รูป 79: ขั้นที่ 5: ส่วนของการสเกลแรงดันคำสั่งให้เป็นค่าที่ป้อนให้ตัวตั้งเวลาของระบบฝังตัว

7.2.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองอุปกรณ์รอบข้างของระบบฝังตัว



รูป 80: ขั้นที่ 3: การจำลองตัวตั้งเวลาของระบบฝังตัว

7.3 Simulink model ของการแปลงผกผันของคลาร์ก(Inverse Clarke's Transformation)



รูป 81: การแปลงผกผันของคลาร์ก(Inverse Clarke's Transformation)