

S. Sing.

ข้อเสนอโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า วิชา 2102490

2 ธ.ค. 2564

อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานชนิดเครื่องจักรกลไฟฟ้า

Power Electronics for Electromechanical Energy-Harvesting  
System

นายณัฐพล กับแก้ว เลขประจำตัว 6130176521

นายสันติ วงศ์ประเสริฐ เลขประจำตัว 6130553421

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สุรพงษ์ สุวรรณภูมิ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

# สารบัญ

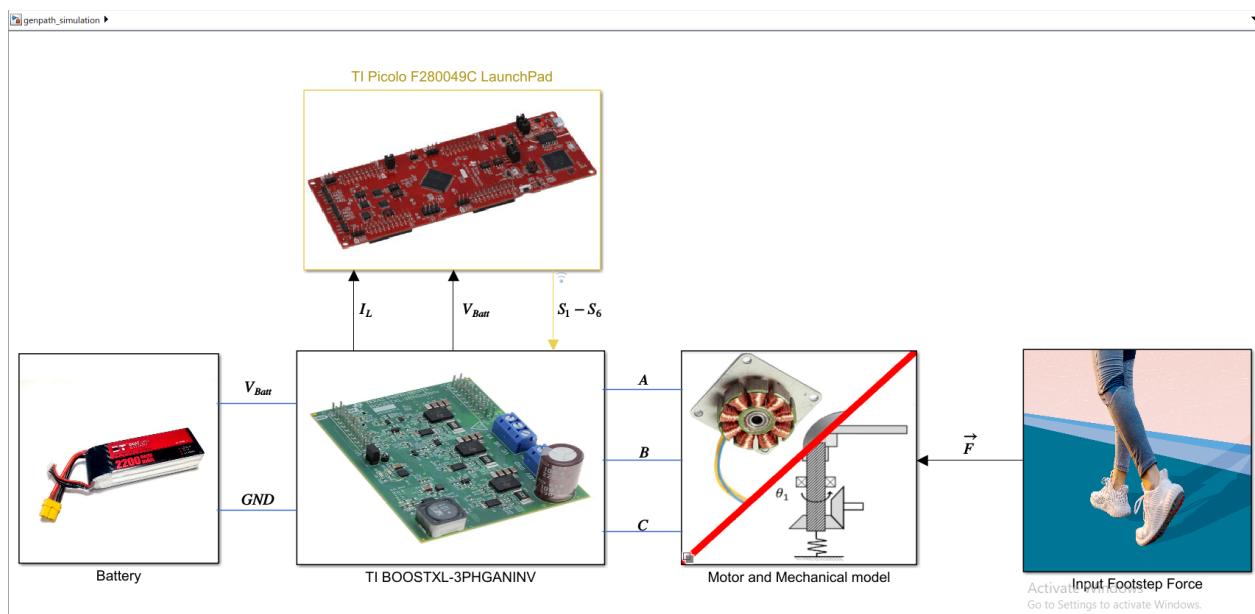
<b>1</b>	<b>บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1	บทคัดย่อ . . . . .	1
1.2	ที่มาและความสำคัญของโครงการ . . . . .	1
1.3	วัตถุประสงค์ของโครงการ . . . . .	3
1.4	ขอบเขตของโครงการ . . . . .	3
1.5	ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากโครงการ . . . . .	3
<b>2</b>	<b>หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1	การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการמודูลेटแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง (Two Arm Modulation and First Quadrant Tracking Algorithm) . . . . .	4
2.1.1	การmodูลेटความกว้างพัลส์แบบใช้สัญญาณพาหะ และ อินเวอร์เตอร์ใหม่ด้วย ต้นแบบสามไฟฟ้า . . . . .	4
2.1.2	กำลังสูญเสียในสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ . . . . .	5
2.1.3	การนำกระแสในจตุภาคที่ 3 ของทรานซิสเตอร์สาม名字ไฟฟ้าแลกเปลี่ยน ในไตรท์ . . . . .	6
2.1.4	การลดกำลังสูญเสียในการmodูลेटแบบใช้สัญญาณพาหะ ด้วยการmodูลेटแบบสองแขน . . . . .	9
2.1.5	การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการmodูลेटแบบสองแขนด้วยการติดตามการทำงานในจตุภาคที่ 1 . . . . .	9
2.2	การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นเก็บพลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking Algorithm; MPPT) . . . . .	15
2.2.1	ข้อมูลรายละเอียดและหลักการทำงานของแผ่นเก็บพลังงาน . . . . .	15
2.2.2	การเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า (Electrical analogy) . . . . .	16
2.2.3	เครื่องจักรภูมิไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร . . . . .	16
2.2.4	หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับการติดตามจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking) สำหรับวงจรกักเก็บพลังงาน . . . . .	18
<b>3</b>	<b>ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น</b>	<b>21</b>
3.1	การทดสอบอัลกอริทึมการmodูลेटแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง . . . . .	21
3.1.1	เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับความถี่คำสั่งของอินเวอร์เตอร์ . . . . .	22
3.1.2	เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับค่าความหน่วงนำของโหลด . . . . .	24
3.1.3	เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับค่าขนาดของแรงดันคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ . . . . .	25
3.2	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร . . . . .	27
3.3	ผลการจำลองของแบบจำลองทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กไฟฟ้า บนโปรแกรม MATLAB/Simulink . . . . .	30
<b>4</b>	<b>บทสรุป</b>	<b>36</b>
4.1	สรุปผลการดำเนินการ . . . . .	36
4.1.1	การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการmodูลेटแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง . . . . .	36
4.1.2	การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นเก็บพลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด . . . . .	36
4.2	แผนการดำเนินงาน . . . . .	36

<b>5</b>	<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>ภาคผนวก</b>	<b>38</b>
6.1	Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบพลวัตของระบบ . . . . .	38
6.1.1	Simulink Model ในส่วนของการจำลองแบตเตอรี่ . . . . .	38
6.1.2	Simulink Model ในส่วนของการจำลองบอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI BOOSTXL-3PHGANINV . . . . .	40
6.1.3	Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบเชิงกลและมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กภาว . . . . .	40
6.1.4	Simulink Model ในส่วนของการจำลองแรงที่เท้าเหยียบแผ่นพื้น . . . . .	41
6.2	Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมที่ทำงานบนระบบฟังตัว TI Picolo F280049C LaunchPad . . . . .	42
6.2.1	Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด . . . . .	43
6.2.2	Simulink Model ในส่วนของการปรับปรุงสัญญาณ . . . . .	44
6.2.3	Simulink Model ในส่วนของการจำลองอุปกรณ์รอบข้างของระบบฟังตัว . . . . .	46
6.3	Simulink model ของการแปลงผกผันของคลาร์ก(Inverse Clarke's Transformation) . . . . .	47

# 1 บทนำ

## 1.1 บทคัดย่อ

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

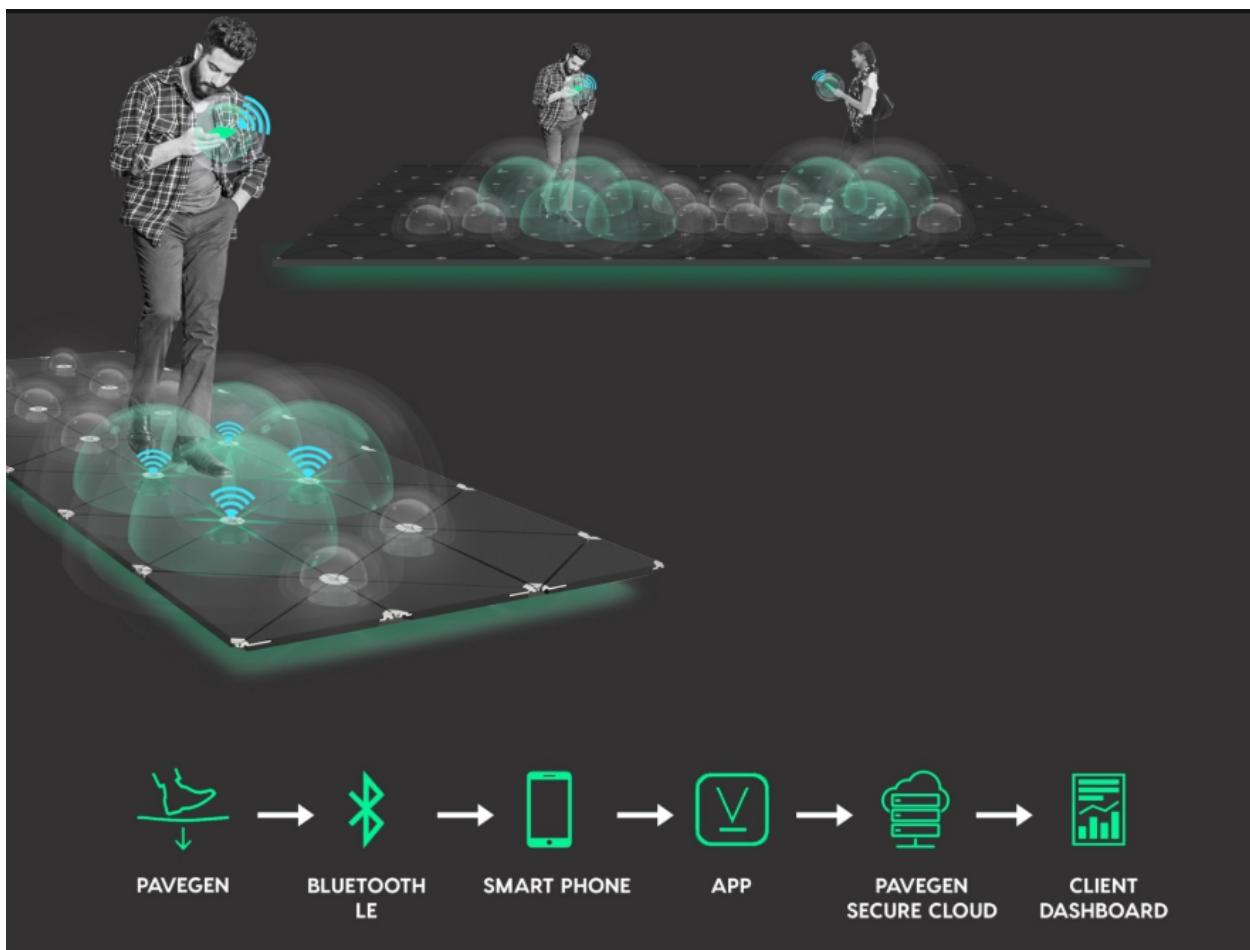


รูป 1: ภาพรวมของระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานที่ถูกสร้างในรายงานฉบับนี้

## 1.2 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวของมนุษย์นั้น เป็นเรื่องที่น่าสนใจ สามารถนำมาทำให้เกิดขึ้นจริงได้ เช่น ในกรณีของแผ่นพื้นเก็บพลังงานนั้น ได้ถูกนำมาสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถสร้างรายได้ และได้มีการติดตั้งใช้งานแล้ว ในหลายๆ ที่ เช่นกรณีตัวอย่างของ Pavegen™ Pavegen™ เป็นบริษัท Startup ที่สร้างแผ่นพื้นเก็บพลังงาน เพื่อที่จะจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ขนาดเล็ก เช่น เซนเซอร์ต่างๆ ที่เชื่อมต่อ กับระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things; IoT) หรืออุปกรณ์ส่องสว่างประเภทหลอด LED หรือกักเก็บพลังงานไว้ในแบตเตอรี่

จากค้นคว้าจากการศึกษาในครั้งก่อนๆ [1] [2] ได้ค้นพบว่า พลังงานที่ได้ในแต่ละครั้งนั้น มีค่า น้อยมาก นั่นคือประมาณ 1-5 จูล เท่านั้น ดังนั้น หัวใจในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากระบบดังกล่าว คือการมีประสิทธิภาพ ที่ดี จึงจะสามารถเก็บพลังงานได้เพียงพอ กับการใช้งานต่อไป ดังนั้น การศึกษาในโครงงานฉบับนี้ จึงได้มุ่งเน้นในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบเก็บพลังงานเป็นหลัก



รูป 2: პოსტორი ოვენი Pavegen™



รูป 3: სათაუროები, რომელთან ერთად მისამართის მიზნით განვითარებულია Pavegen™

จากโครงงานปี 2563 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ได้เป็นค่าสูงสุด โดยจากการทดสอบมีค่าประมาณหนึ่งในสี่ของพลังงานขาเข้าที่มาจากการเท้าเหยียบของมนุษย์ และไม่ได้มีการลดการกำลังสูญเสียของวงจรแปลงผันโครงงานปี 2564 นี้ มีการพัฒนาการออกแบบทางไฟฟ้าและทางกลเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงานโดยมี 2 ส่วน คือ

1. สร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงน้ำหนักนิดแม่เหล็กถาวร เพื่อทราบเงื่อนไขของแรงดันออกตามหลักการติดตามจุดทำงานสูงสุด
2. การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการมอดูลเตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง

### 1.3 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสร้างแบบจำลองพลวัตของระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยโปรแกรม MATLAB<sup>TM</sup>/Simulink<sup>TM</sup> เพื่อตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้ก่อนนำไปใช้กับอุปกรณ์จริง
2. เพื่อหาแนวทางในการลดพลังงานสูญเสียในระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงน้ำหนักแม่เหล็กถาวร และพัฒนาชุดอัลกอริทึมในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน
3. เพื่อสร้างต้นแบบอุปกรณ์ แผ่นพื้นเก็บพลังงาน ที่สามารถใช้งานได้จริง

### 1.4 ขอบเขตของโครงงาน

1. โครงงานฉบับนี้จะใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร เป็นตัวกำเนิดไฟฟ้า
2. โครงงานฉบับนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ TI<sup>TM</sup> F280049C ที่อยู่บนชุดทดลอง Picolo<sup>TM</sup> LaunchPad<sup>TM</sup> เป็นระบบฝังตัวแกนกลางในคำนวณอัลกอริทึมต่างๆ
3. โครงงานฉบับนี้จะใช้บอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI<sup>TM</sup> BOOSTXL-3PHGaNINV เป็นสวิตช์สำหรับจรอินเวอร์เตอร์
4. โครงงานฉบับนี้จะโปรแกรมระบบฝังตัวดังกล่าวผ่านการสร้างโค้ดบนแพลตฟอร์ม Simulink<sup>TM</sup> Embedded Coder<sup>TM</sup>

### 1.5 ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากโครงงาน

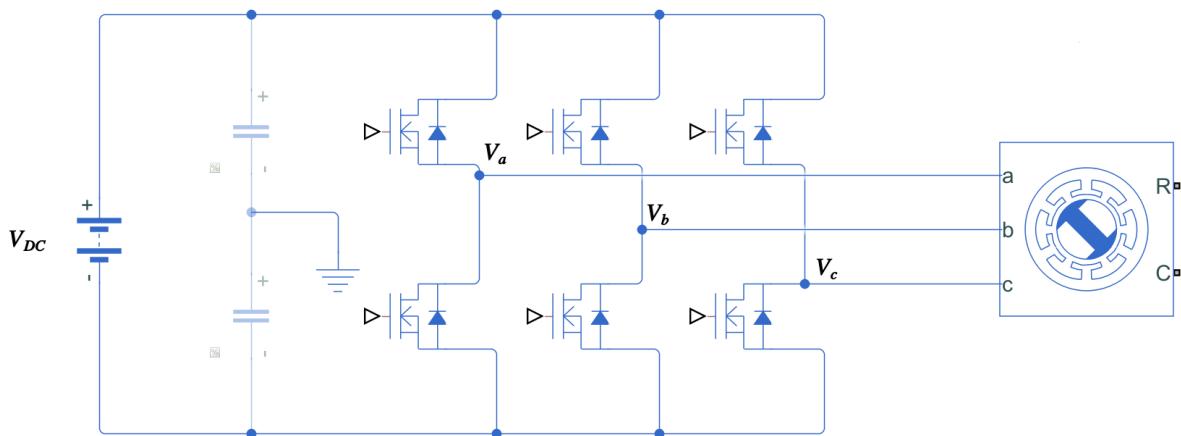
1. แผ่นพื้นเก็บพลังงานต้นแบบที่มีประสิทธิภาพสูง และสามารถใช้งานได้จริง
2. อัลกอริทึมในการลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ที่สามารถนำไปใช้กับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และยังสามารถนำไปใช้กับอินเวอร์เตอร์ได้ฯ นอกเหนือจากระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานได้อีกด้วย
3. อัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงาน ที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด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

## 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การลดกำลังสัญญาณในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการmodulateแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง (Two Arm Modulation and First Quadrant Tracking Algorithm)

#### 2.1.1 การmodulateความกว้างพัลล์แบบใช้สัญญาณพาหะ และ อินเวอร์เตอร์แบบแรงดันแบบสามเฟส

ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยทั่วไปนั้นอาศัยการสร้างสนามแม่เหล็กหมุน มาเห็นี่ยวนำให้เกิดแรงบิด ซึ่งในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงน้ำสแบบแม่เหล็กถาวรนั้นอาศัยการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ อินเวอร์เตอร์ จึงเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงน้ำสแบบแม่เหล็กถาวรด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ในโครงงานนี้ฉบับนี้ ได้นำเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงน้ำสแบบแม่เหล็กถาวรสามเฟส มาเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน โดยจะเก็บพลังงานที่ผลิตได้ไว้กับแบตเตอรี่ ในโครงงานฉบับนี้ จึงเลือกใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มี拓扑ologyดังรูปที่ 4



รูป 4: ทอพอลอยีของอินเวอร์เตอร์สามเฟส

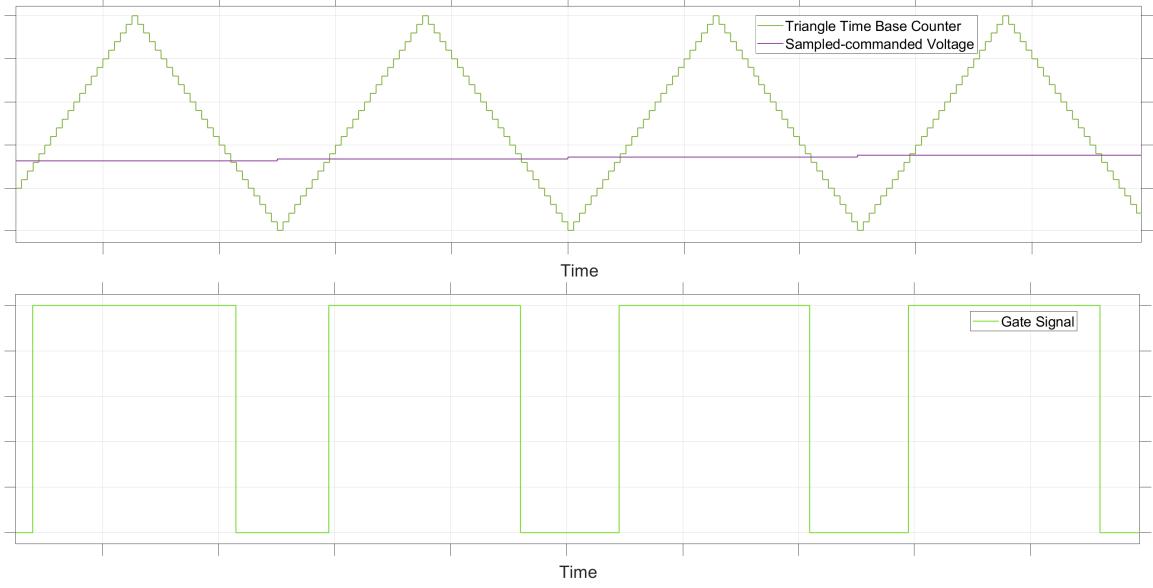
อินเวอร์เตอร์ทอพอลอยีที่ได้นำเสนอมาข้างต้น สามารถสร้างแรงดันออกที่แต่ละขั้วทั้งสามได้เพียงแค่ 2 ค่าเท่านั้น คือ

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

โดยที่  $V_t$  เป็นแรงดันที่ขั้วออกของอินเวอร์เตอร์ และถ้าหากพิจารณาให้กึ่งกลางบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นจุดอ้างอิงแรงดัน จะได้ว่า

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

เนื่องจากกระแสขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงน้ำสสามเฟสประเภทแม่เหล็กถาวรนั้น จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับคลื่นรูปไข่ ดังนั้น เทคนิคการmodulateความกว้างพัลล์โดยใช้สัญญาณพาหะ (Carrier-based Pulse Width Modulation) จึงได้ถูกนำมาใช้ โดยการmodulateความกว้างพัลล์โดยใช้สัญญาณพาหะมีหลักการในการทำงานคือ นำสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยม มาเบริยบเทียบกับสัญญาณคำสั่ง โดยผลลัพธ์ของการเบริยบเทียบนั้น จะได้เป็นสัญญาณขับนำของสวิตช์ ดังรูปที่ 5 ซึ่งจะส่งผลให้ แรงดันที่ขั้วของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับแรงดันคำสั่ง



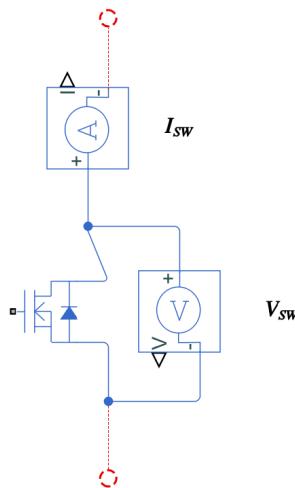
รูป 5: การมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยใช้สัญญาณพาหะ

จากรูปข้างต้น จะเห็นได้ว่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณขับนำนั้น เปลี่ยนไปตามขนาดของสัญญาณคำสั่ง และสัญญาณที่นำมาเปรียบเทียบเท่านั้น จะเป็นสัญญาณที่ถูกสุมตัวอย่างแล้วคงค่า (Sample and Hold) เพราะว่า อัลกอริธึมการมอดูเลตที่เลือกใช้ในโครงงานฉบับนี้นั้น เป็นการคำนวนระบบฟังตัว ซึ่งเป็นการประมวลผลในโดเมนดิจิทัล

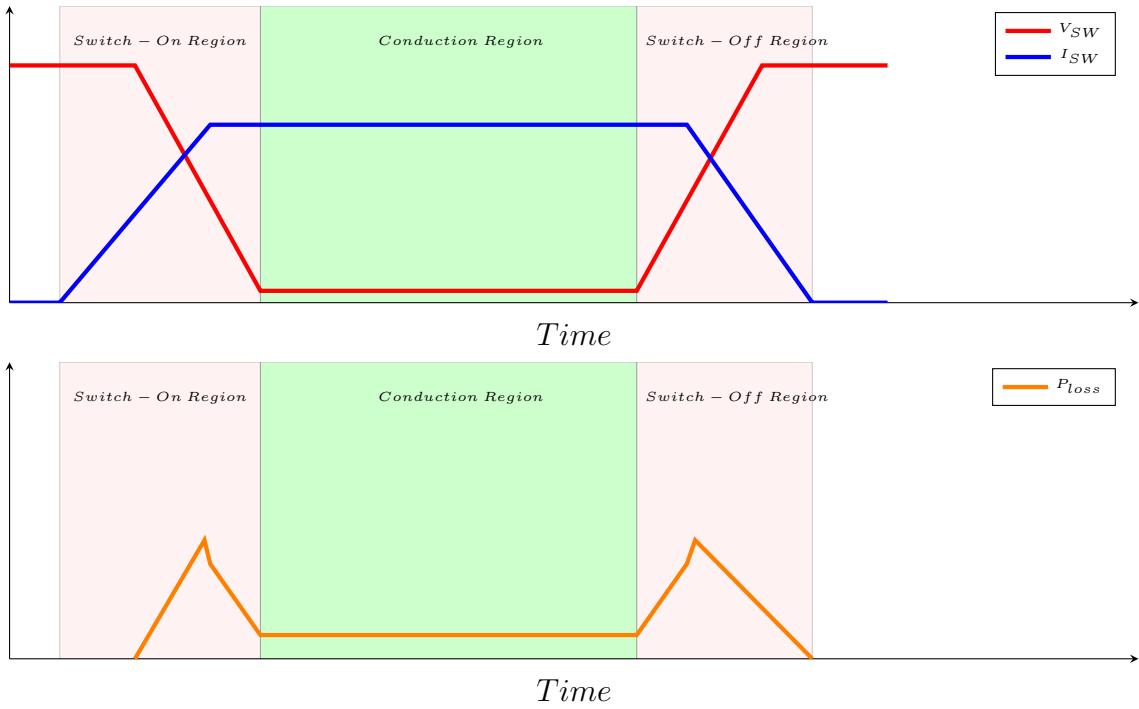
### 2.1.2 กำลังสูญเสียในสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

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

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



รูป 6: นิยามของ  $V_{SW}$ ,  $I_{SW}$



รูป 7: แรงดันต่อกลางสวิตช์ กระแสของสวิตช์ และกำลังสูญเสียในสวิตช์

จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่า ในขณะที่กำลังเปิดสวิตช์ กระแสและแรงดันต่อกลางสวิตช์จะเหลือมีกัน 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 สวิตช์จะมีแรงดันต่อกลางอยู่เล็กน้อย ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในขณะนำกระแส

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

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

กำลังสูญเสียระหว่างสวิตช์นั้น ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะสมบัติของสวิตช์ที่เลือกใช้ และจำนวนครั้งในการสวิตช์ นั้น คือ ถ้าหากสวิตช์ที่เลือกใช้มีคุณลักษณะสมบัติที่ทำให้อุปทานกำลังสวิตช์นาน หรือมีจำนวนครั้งในการสวิตช์มาก ก็ จะทำให้กำลังสูญเสียขณะสวิตช์สูงตามไปด้วย

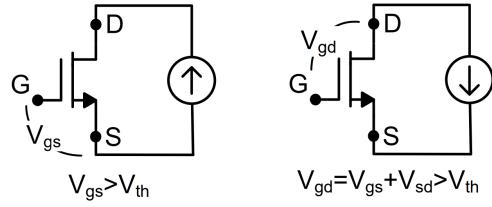
กำลังสูญเสียขณะนำกระแสนั้น ขึ้นอยู่กับว่าในขณะนำกระแสนั้นมีแรงดันต่อกลางสวิตช์มากแค่ไหน ถ้าหากแรงดันต่อกลางสวิตช์มาก ก็จะทำให้กำลังสูญเสียขณะนำกระแสมากขึ้นตามมา

### 2.1.3 การนำกระแสในจตุภาคที่ 3 ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแกลเลียม ในไตรท์

ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแกลเลียม ในไตรท์ หรือ แกน (Gallium Nitride; GaN) ถือเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับผู้ออกแบบในงานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพราะว่าทรานซิสเตอร์แกน มีข้อดีกว่าทรานซิสเตอร์แบบซิลิโคนในหลายด้าน คือ การไม่มีบอดี้ไดโอด ซึ่งทำให้มี reverse recovery loss ในบอดี้ไดโอด ข้อดีเปรียบบีทำให้ทรานซิสเตอร์แบบแกนมีกำลังสูญเสียในขณะสวิตช์น้อยกว่าแบบดังเดิม ทำให้ทำงานได้ที่ความถี่สูงขึ้น ใช้ทรานซิสเตอร์ตัวเล็กลงได้ และ ความร้อนน้อยลง ซึ่งในโครงงานฉบับนี้ ได้เลือกใช้ทรานซิสเตอร์แกนเป็นสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์

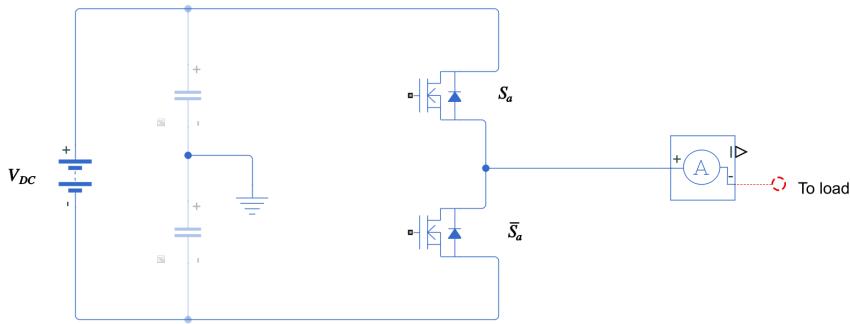
เนื่องจากโครงสร้างที่ไม่เหมือนกันของทรานซิสเตอร์แบบแกน ทำให้การนำกระแสในจตุภาคที่สามของทรานซิสเตอร์แบบแกนนั้นแตกต่างไปจากทรานซิสเตอร์แบบซิลิโคน [3] คือ การนำกระแสผ่านบอดี้ไดโอด

เงื่อนไขที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์เกนนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า (Forward) และย้อนกลับ (Reverse) เป็นไปดังรูปที่ 8 คือ



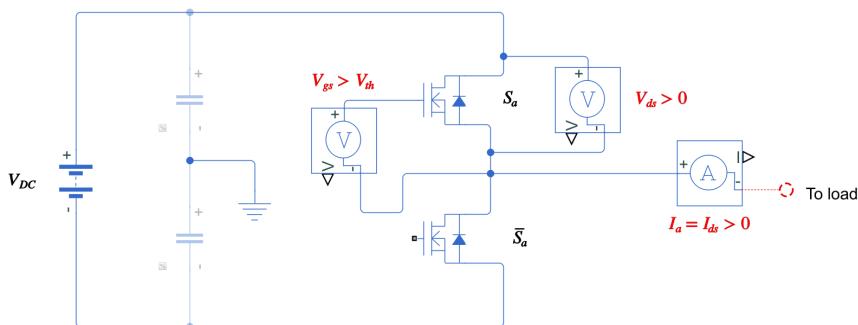
รูป 8: เงื่อนไขที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์เกนนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า และย้อนกลับ

ถ้าหากพิจารณาตัวอย่างที่เกิดขึ้นจริงในอินเวอร์เตอร์เพื่อให้เห็นภาพพจน์ชัดเจนขึ้น ตามรูปของอินเวอร์เตอร์ที่ตัดมาพิจารณาเฉพาะหนึ่งเฟส ตามรูปที่ 9



รูป 9: กรณีตัวอย่างการนำกระแสที่เกิดขึ้นจริงในอินเวอร์เตอร์

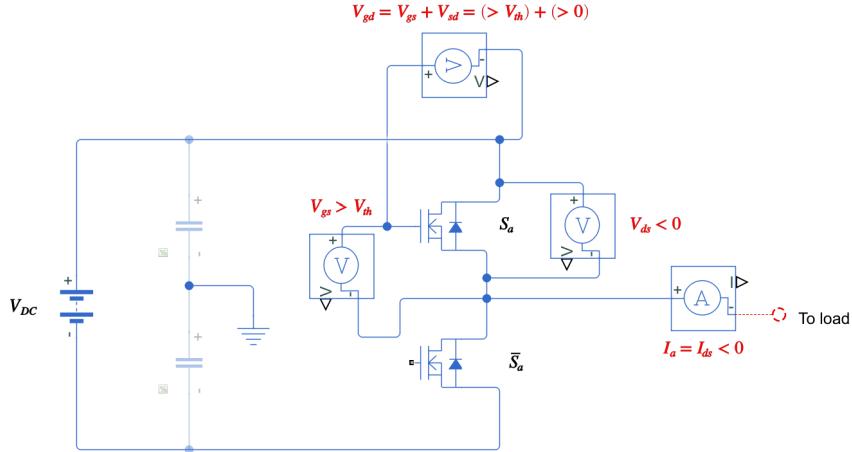
เรา假定ให้สวิตช์  $S_a$  เป็นสวิตช์ที่เราสนใจ โดยถ้าหากเราขับนำสวิตช์ให้สวิตช์นำกระแส ( $Og$ ) นั่นคือ เราขับนำสัญญาณขา  $V_{gs} > V_{th}$  แล้วถ้าหากโหลดที่ต่ออยู่กับขาซอร์สของสวิตช์  $S_a$  ดึงกระแสออกไปจากอินเวอร์เตอร์ นั่นคือ  $I_a > 0$  จะทำให้ แรงดันต่ำคร่อมขาเดренซอร์สของสวิตช์  $S_a$  เป็นค่าบวก นั่นคือ  $V_{ds} > 0$  เนื่องจาก สวิตช์  $S_a$  กำลังนำกระแสอยู่ ดังนั้นสวิตช์  $\bar{S}_a$  ไม่สามารถนำกระแสพร้อมๆ กับสวิตช์  $S_a$  ได้ เพราะจะลัดวงจร ดังนั้น กระแส  $I_a$  ทั้งหมด ก็จะไหลผ่านสวิตช์  $S_a$  ทำให้กระแส  $I_{ds} = I_a > 0$  เนื่องจากกระแส  $I_{ds} > 0$  และ  $V_{ds} > 0$  ดังนั้น สวิตช์จะนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า จุดทำงานที่กล่าวถึงข้างต้นจะแสดงในรูป 10



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

ถ้าหากพิจารณากรณีดังไปคือการขับนำสวิตช์ในลักษณะเดิมคือ การขับสัญญาณขา  $V_{gs} > V_{th}$  แต่มีสิ่งที่เปลี่ยนไปคือ ทิศทางการไหลของกระแส นั่นคือ ถ้าหากโหลดมีการดึงกระแสเข้าอินเวอร์เตอร์  $I_a = I_{sd} > 0$  จะทำให้ แรง

ดันต์คร่อมขาเดренชอร์สของสวิตซ์เป็นค่าลบ นั่นคือ  $V_{ds} < 0$ ;  $V_{sd} > 0$  เนื่องจาก  $V_{gd} = V_{gs} + V_{sd} = ($  ค่าที่มากกว่า  $V_{th}) +$  ค่าที่เป็นบวก ดังนั้น  $V_{gd} > V_{th}$  และ  $I_{ds} < 0$  ทำให้สวิตซ์นำกระแสเสียย้อนกลับ



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

เราจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันขณะนำกระแสไปข้างหน้าได้โดย

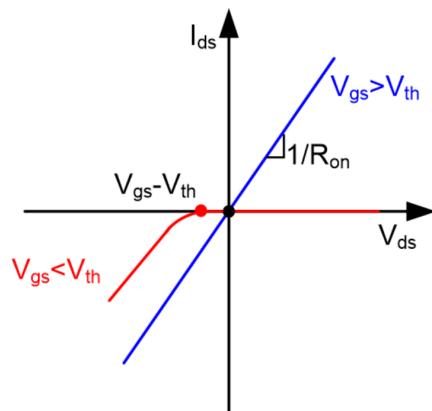
$$V_{ds} = I_{ds} R_{ds(on)} \quad (6)$$

เมื่อแรงดันที่ขาเกตเทียบกับชอร์สของทรานซิสเตอร์มากกว่าค่าแรงดันขีดแบ่ง และแรงดันที่ขาเดренเทียบชอร์สเป็นบวก จะทำให้เกนนำกระแสในจตุภาคที่หนึ่ง โดยที่เรานิยาม  $R_{ds(on)}$  เป็นความต้านทานสมมูลของทรานซิสเตอร์ในขณะที่กำลังทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง

และเราจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันขณะนำกระแสเสียย้อนกลับได้โดย

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

ในการนำกระแสเสียย้อนกลับ ข้อมูลต่างๆ จะเป็นทวีลักษณ์ของข้อมูลในขณะนำกระแสไปข้างหน้าเลยคือ เมื่อแรงดันที่ขาเกตเทียบกับเดренมากกว่าค่าแรงดันขีดแบ่ง และแรงดันที่ขาชอร์สเทียบกับเดренเป็นบวก จะทำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแสในจตุภาคที่สาม



รูป 12: พฤติกรรมการนำกระแสในจตุภาคที่หนึ่ง และจตุภาคที่สามของทรานซิสเตอร์แกน

จากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่า แรงดันต์คร่อมทรานซิสเตอร์ในจตุภาคที่สาม จะมากกว่าแรงดันต์คร่อมทรานซิสเตอร์ในจตุภาคที่หนึ่งที่ค่ากระแสเท่ากัน ซึ่งทำให้การนำกระแสในจตุภาคที่สามนั้นมีกำลังสูญเสียในขณะนำกระแสมากกว่าการนำกระแสในจตุภาคที่หนึ่ง

## 2.1.4 การลดกำลังสัญญาณในการมอดูเลตแบบใช้สัญญาณพาหะ ด้วยการมอดูเลตแบบสองแขน

จากที่ได้นำเสนอไปแล้วในส่วนของการมอดูเลตแบบใช้สัญญาณพาหะ ว่า เป็นการมอดูเลตที่มีจำนวนครั้งในการสวิตช์มาก ซึ่งทำให้กำลังสัญญาณพาหะต่ำ แต่เรามีเทคนิคในการลดกำลังสัญญาณพาหะโดยการลดจำนวนครั้งในการสวิตช์คือ การมอดูเลตแบบสองแขน

แขนของการมอดูเลต คือ คู่ของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแรงดันออกที่ข้ามของอินเวอร์เตอร์ จะประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ตัวบน ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ที่ต่ออยู่กับบัสแรงดันไฟตรงที่ข้ามบวก และทรานซิสเตอร์ตัวล่าง ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ที่ต่ออยู่กับบัสแรงดันไฟตรงที่ข้ามลง จากท่อพอลอยีของอินเวอร์เตอร์ที่เราเลือกใช้ในโครงงานฉบับนี้ ซึ่งแสดงไว้ ณ รูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า จะมีแขนของการมอดูเลตทั้งหมดสามแขน

จากการพิจารณาจะเห็นได้ว่า หากเราต้องการสร้างแรงดันรูปไบ奴ต์ที่ข้ามของอินเวอร์เตอร์ 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 เราสามารถเลือกแรงดันลำดับศูนย์ที่จะเพิ่มให้กับแรงดันเฟสคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ โดยมีเป้าหมายคือ ทำให้แรงดันคำสั่งในเฟสใดเฟสหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเท่ากับแรงดันบวก หรือลบของบัสแรงดันกระแสตรง เพื่อที่จะทำให้แขนของการมอดูเลตแขนนั้น ปิด หรือ เปิดตลอดเวลา นั่นคือ

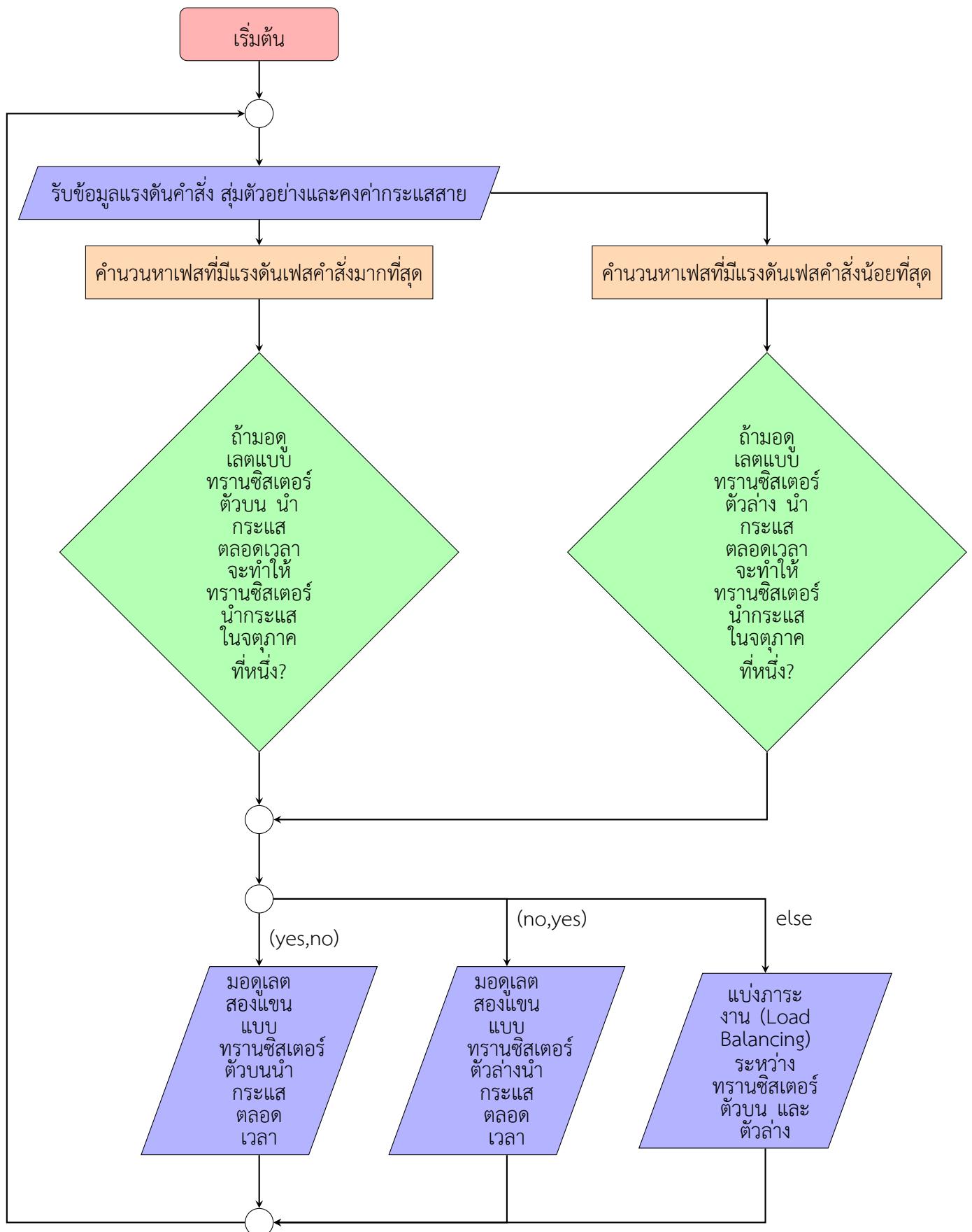
$$v_{N0} = \begin{cases} \frac{V_{DC}}{2} - \max(v_{a0}, v_{b0}, v_{c0}); \text{ ทรานซิสเตอร์ตัวบน On } \\ \frac{-V_{DC}}{2} - \min(v_{a0}, v_{b0}, v_{c0}); \text{ ทรานซิสเตอร์ตัวล่าง On } \end{cases} \quad (17)$$

ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ตัวบนกำลังเปิดตลอดเวลา ทรานซิสเตอร์ตัวล่าง ก็จะปิดตลอดเวลาด้วย การให้ทรานซิสเตอร์แขนใดแขนหนึ่งเปิด หรือปิดตลอดเวลา จะทำให้ลดจำนวนครั้งในการสวิตช์ได้หนึ่งในสามเท่า ก็จะช่วยลดกำลังสัญญาณพาหะในขณะสวิตช์ได้

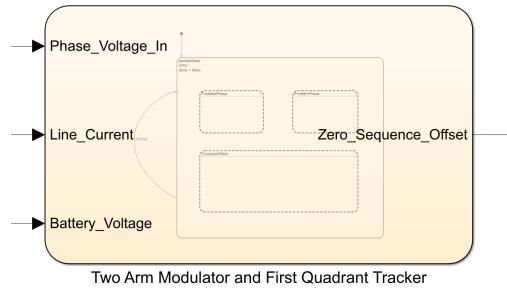
## 2.1.5 การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการมอดูเลตแบบสองแขนด้วยการติดตามการทำงานในจตุภาคที่ 1

จากผลลัพธ์ที่ได้อธิบายมาในส่วนที่แล้ว เราได้ทราบว่า เรามีอิสระในการเลือกการมอดูเลตสองแขนได้สองประเภท คือ แบบทรานซิสเตอร์ตัวบนนำกระแสกระแสตลอด และทรานซิสเตอร์ตัวล่างนำกระแสกระแสตลอด ดังนั้น เราจะใช้ข้อได้เปรียบนี้ ในการเลือกรูปแบบการมอดูเลตแบบสองแขนให้เกิดประสิทธิภาพสูงที่สุด นั่นคือ การหลีกเลี่ยงการทำงานในจตุภาคที่ 3 สำหรับทรานซิสเตอร์ตัวที่จะนำกระแสกระแสตลอดเวลา โดยจะมีหลักการในการคำนวณค่าแรงดันเฟสสำหรับศูนย์

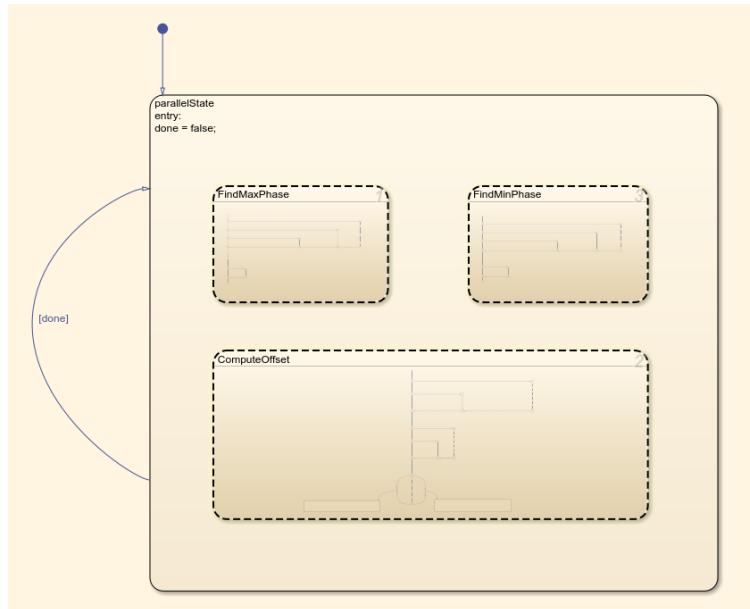
ที่จะบวกเข้าไป เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ ตามผังงานในรูปที่ 13 ซึ่งจากผังงานที่ได้นำเสนอไปข้างต้น เราสามารถนำไปสร้างเป็นแผนภาพการเปลี่ยนสถานะ บน Simulink<sup>TM</sup>/Stateflow<sup>TM</sup> ได้ดังที่แสดงไว้ในรูป 14 15 16 17 18



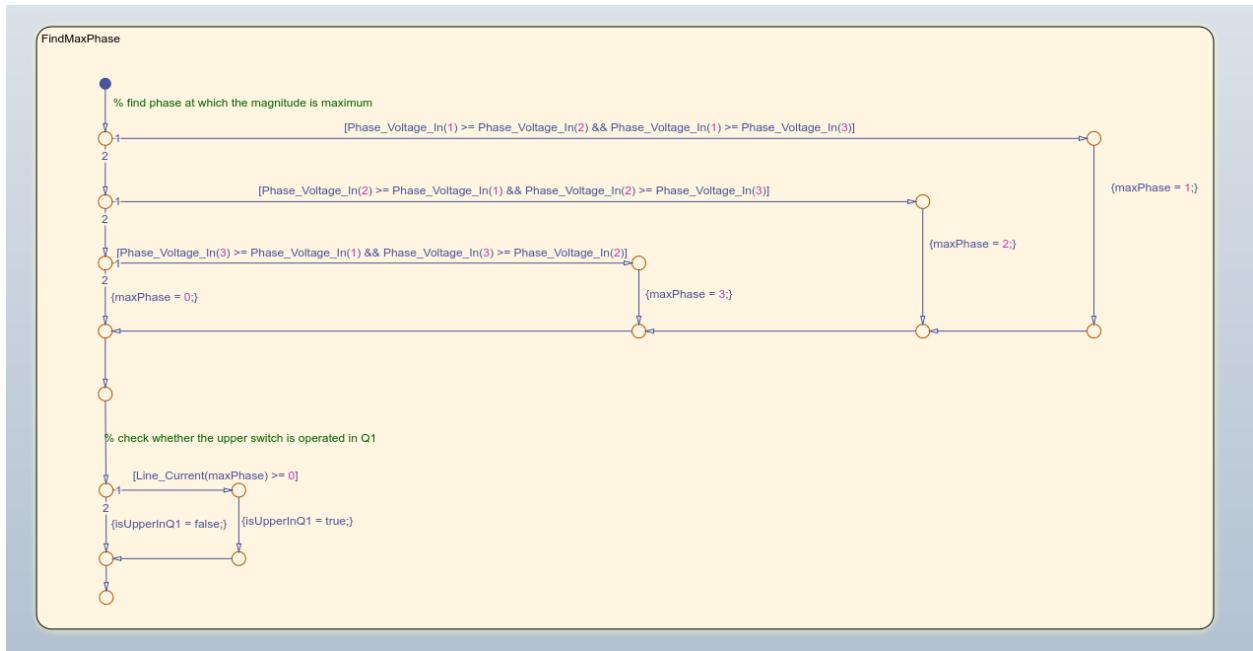
รูป 13: ผังงานของอัลกอริทึมในการคำนวณแรงดันลำดับศูนย์เพื่อติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่งของสวิตช์ที่ถูกมอดูลเต็มแบบสองแขน



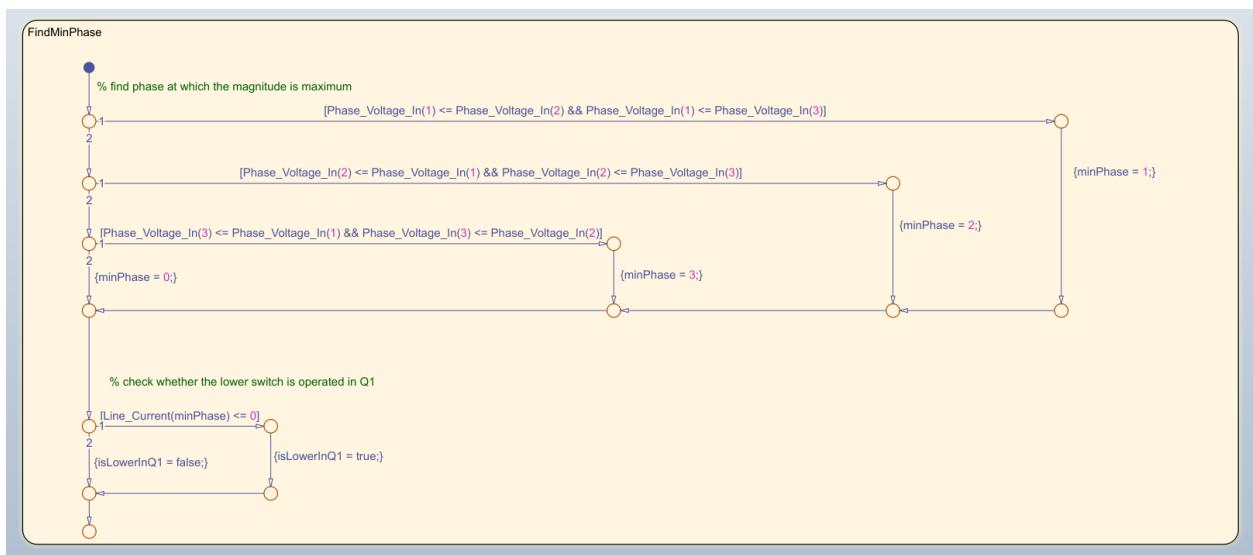
รูป 14: บล็อก Stateflow ของอัลกอริทึมในการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง



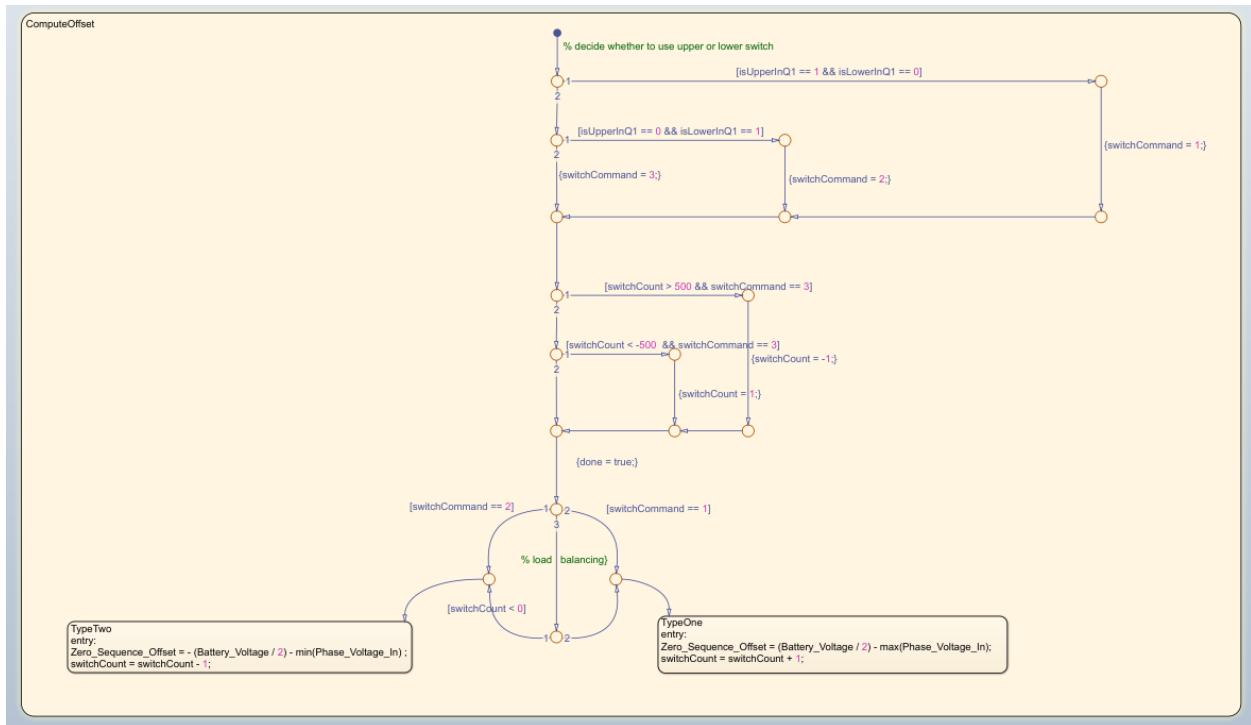
รูป 15: ภาพรวมของ Stateflow chart ของอัลกอริทึมในการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง



รูป 16: Subchart ในส่วนของการหาเฟสที่มีแรงดันคำสั่งมากที่สุด



รูป 17: Subchart ในส่วนของการหาเฟสที่มีแรงดันคำสั่งน้อยที่สุด



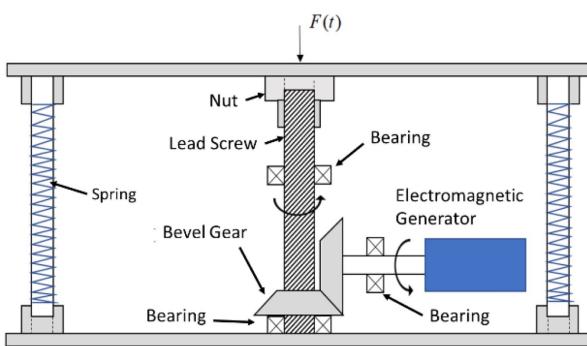
รูป 18: Subchart ในส่วนของการคำนวณแรงดันลำดับศูนย์

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

### 2.2.1 ข้อมูลรายละเอียดและหลักการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

เริ่มแรกต้องศึกษาและเข้าใจหลักการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงานเพื่อทราบความสัมพันธ์ของกลไกและสมการต่างๆของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน [2] และเข้าใจพลวัตของระบบทางกลของของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

แผ่นพื้นเก็บพลังงาน สามารถแปลงพลังงานจนจากการก้าวเดินของมนุษย์แปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ หลักการทำงาน เริ่มจากการเหยียบของมนุษย์ลงบนแผ่นพื้นเก็บพลังงานทำให้เกิดการยุบตัวลงของแผ่นพื้นแบนเกลียว(lead screw)จะยับชั้นลงไปขับเกลียวนำ(lead screw)ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่เชิงเส้นไปยังการเคลื่อนที่เชิงหมุน ให้หมุนรอบแนวแกนตั้ง และ เพื่อองค์ประกอบ(bevel gear)ทำหน้าที่เปลี่ยนจากเคลื่อนที่เชิงหมุนแนวแกนตั้งจากเพลาเกลียวนำให้เปลี่ยนทิศทางการหมุนไป 90 องศา หมุนรอบแนวอน เพื่อขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 19



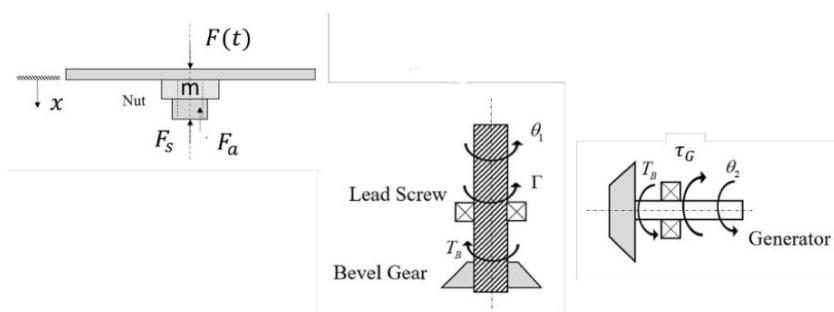
รูป 19: กลไกเกลียวนำ(lead screw) ภายใต้แผ่นพื้นเก็บพลังงาน[2]

จากแผนภาพของวัตถุของระบบทางกล ลีด(lead) และ สกรู(screw) ดังรูปที่ 20 สมการต่างๆ ได้มาจากการข้อที่สองของนิวตันและโมเมนตัมเชิงหมุน ซึ่งอธิบายการเลื่อนที่ของแบนเกลียว และ การเคลื่อนที่เชิงหมุนของเกลียวนำ และโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 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

Mechanical system	Electrical system
Torque ( $T$ )	Current ( $i$ )
Angular speed ( $\omega_m$ )	Voltage ( $v$ )
Angular displacement ( $\theta$ )	Flux linkage ( $\psi$ )
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]

โดยที่

$m$  คือ มวลของแผ่นพื้นและแป้นเกลียว

$J_1$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของเกลียวนำ

$J_G$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของเพ่องดอกจาก

$x$  คือ ระยะกระจัดของแผ่นพื้นและแป้นเกลียว

$l$  คือ ระยะห่างระหว่างเกลียวของเกลียวนำ

$\theta_1$  คือ ตำแหน่งเชิงมุมของเกลียวนำ

$\theta_2$  คือ ตำแหน่งเชิงมุมของเพ่องดอกจาก

$F(t)$  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  $\eta_{tread}$  คือ ประสิทธิภาพของตัวบลูปีนคลัตช์ และ  $\eta_{thrust}$  คือ ประสิทธิภาพของเกลียว

## 2.2.2 การเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า (Electrical analogy)

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

โดยการเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า ของวงจรไฟฟ้าเป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อทำการวิเคราะห์ระบบทางกล ปัญหาทางกลบางอย่างสามารถแก้ไขได้่ายขึ้นผ่านการเปรียบเทียบทางไฟฟ้า โดยความสัมพันธ์ของปริมาณทางกลและทางไฟฟ้า แสดงในตารางที่ 1

## 2.2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัชนิดแม่เหล็กถาวร

ศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัชนิดแม่เหล็กถาวร [5] [6] เพื่อเข้าหลักการทำงานและสมการต่างๆที่เกี่ยวข้อง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัชนิดแม่เหล็กถาวร ซึ่งสามารถตุนมาจากการแม่เหล็กถาวรแทนที่จะเป็นขดลวด มีโครงสร้างที่สเตเตอร์เหมือนกับมอเตอร์หนี่ยวนำคือมีขดลวดสามเฟสพันอยู่ในร่องสล็อตที่สเตเตอร์ แต่ที่รоторเป็นแม่เหล็กถาวร ซึ่งดีของมอเตอร์ซิงโครนัชนิดแม่เหล็กถาวร คือ ไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และขดลวดสร้างสนามที่ตัวโรเตอร์ ทำให้ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด

ค่าความหนี่ยวนำภายในและพลังแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัชนิดแม่เหล็กถาวร มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมุมของโรเตอร์ จากสมการแรงดันสามเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัชนิดแม่เหล็กถาวร ดังสมการ

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

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

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

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

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

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

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

เมื่อ

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

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

$R_s$  คือ ค่าความต้านทานของชุด漉ดสเตเตอร์

$L_u, L_v, L_w$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำต้นของชุด漉ดสเตเตอร์ในเฟส u, v และ w ตามลำดับ

$M_u, M_v, M_w$  คือ ค่าความเหนี่ยvrwของชุด漉ดสเตเตอร์ในเฟส u, v และ w ตามลำดับ

$\omega_e$  คือ ความเร็วเชิงมุ่งทางไฟฟ้าของโรเตอร์

$\theta_e$  คือ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วของแม่เหล็กถาวร

$L_d, L_q$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำของชุด漉ดสเตเตอร์ในแกน d และ q

$\lambda'$  คือ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วของแม่เหล็กถาวร

จากนั้นใช้การแปลงของคลาค(Clark's Transformation) [7] [8] แปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงนิ่ง เพื่อแปลงสมการแรงดันสามไฟฟ้าของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดเดียว ให้เป็นสามารถแรงดันบนกรอบอ้างอิงนิ่ง แกน x-y ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำที่พิจารณาทั้งค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและค่าความเหนี่ยvrwของชุด漉ดสเตเตอร์ ดังสมการด้านล่าง

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

เมื่อ

$v_x, v_y$  คือ แรงดันบนกรอบอ้างอิงนิ่ง แกน x,y ตามลำดับ

$i_x, i_y$  คือ กระแสบนกรอบอ้างอิงนิ่ง แกน x,y ตามลำดับ

$R_g$  คือ ค่าความต้านทานของชุด漉ดสเตเตอร์

$L_s$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและค่าความเหนี่ยvrwของชุด漉ดสเตเตอร์

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

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

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

เมื่อ

$v_d, v_q$  คือ แรงดันไฟฟัสเตเตอร์ในแกน d และ q บนกรอบอ้างอิงโรเตอร์

$i_d, i_q$  คือ กระแสเฟสสเตเตอร์ในแกน d และ q บนกรอบอ้างอิงโรเตอร์  
จากพิจารณากำลังขาเข้าของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส

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

เมื่อ

$P_{in}$  คือ กำลังขาเข้าของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส  
จากนั้นพิจารณาสมการ 30 และ 31 จะได้

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

พิจารณาจนสุดท้ายของสมการ 32 คือ กำลังเชิงกลของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส ดังสมการที่ 34

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

จึงได้สมการแรงบิด คือ

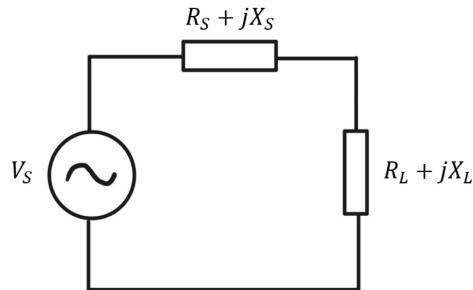
$$T_e = \frac{P_{mech}}{\omega_e/p} = p(\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (34)$$

เมื่อ

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

#### 2.2.4 หลักการเบี้ยงตัวเกี่ยวกับการติดตามจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking) สำหรับ วงจรกักเก็บพลังงาน

พิจารณาวงจรสมมูลของวงจรการกักเก็บพลังงานดังรูปที่ 21 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันและอิมพีเดนซ์ขาออก



รูป 21: วงจรสมมูลของวงจรกักเก็บพลังงาน [9]

พิจารณาหลักการแมทชิ่งอิมพีเดนซ์ (Matching impedance) เมื่อพิจารณากำลังออก ( $P_{out}$ ) โดยใช้ทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังสูงสุด (Maximum Power Transfer) ของวงจรสมมูลดังกล่าว เมื่อโหลดเป็นอิมพีเดนซ์ใดๆ โดยพิจารณาในสภาวะคงตัว (steady state)

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

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

เมื่อ

$S$  คือ กำลังประจุ

$P_{out}$  คือ กำลังขาออก

จากสมการที่ (36) จะมีค่าสูงสุดเมื่อพจน์ตัวหารมีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากค่ารีแอคเ看不懂ซ์สามารถมีค่าน้อยกว่าศูนย์ได้ จึงพิจารณาให้  $X_L = -X_g$  จึงได้

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

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

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

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

จึงได้ว่า  $P_{out}$  จะมีค่าสูงสุดเมื่อ  $R_L = R_s$  และ  $j\omega X_L = -j\omega X_S$  ต่อมาจะเป็นจะเป็นการขยายแนวคิดดังกล่าว โดยพิจารณา กับสัญญาณกระแส ขณะใดๆ เป็นไปแล้วและตามเวลา เนื่องจากลักษณะโหลดเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแส ณ เวลา  $n$  ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโหลดนั้นทำได้ยากในทางปฏิบัติ ดังนั้น จึงพิจารณาในรูปแบบเดียวกัน จะได้ว่าแรงดันตกคร่อมโหลดจะต้องมีค่าเท่ากับสัญญาณแรงดันตกคร่อมอิมพีเดนซ์ของสมมูลขาออก จะได้

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

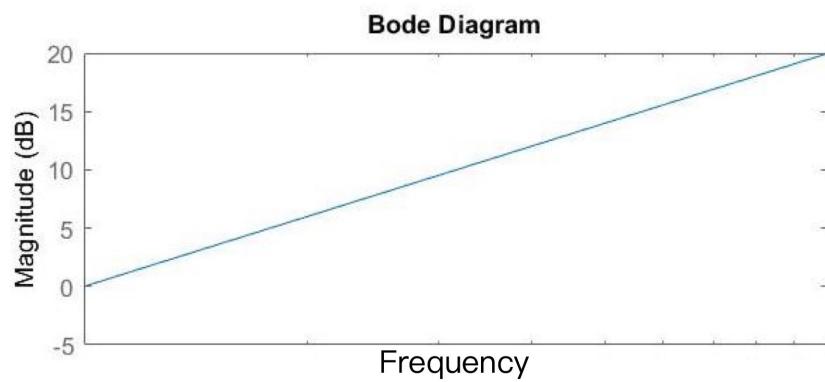
เนื่องจากโหลดที่ต่ออยู่เป็นแบบเตอร์วี ถ้าสามารถควบคุมแรงดันขาออก ( $v_{ter}$ ) ดังสมการที่ (41) จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ชาร์จเข้าแบบเตอร์วีมีค่าสูงสุด

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

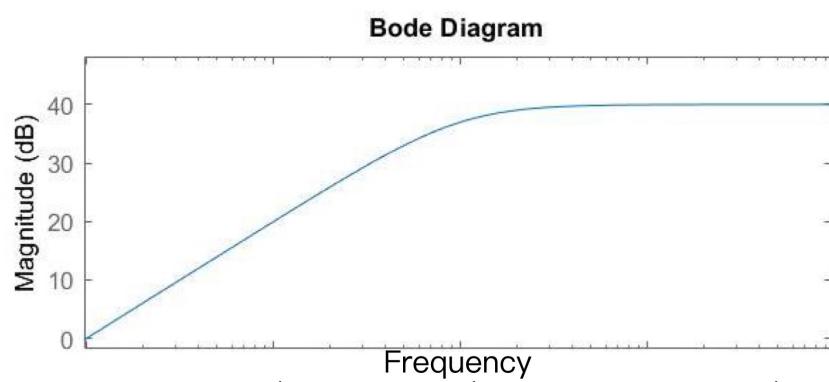
โดยการควบคุมแรงดันขาออกของแบบเตอร์วีให้เป็นไปตามที่ต้องการตามสมการที่ (41) จะใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ในการแปลงแรงดันไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคการมอดูลเลตความกว้างพัลลส์

นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงข้อควรระวังของการใช้ตัวอนุพันธ์ เนื่องจากภาพผลตอบสนองเชิงความถี่ดังรูปที่ 22 เห็นได้ว่าตัวอนุพันธ์มีพุติกรูมเหมือนตัวขยายสัญญาณ หากมีสัญญาณรบกวนความถี่สูงเข้ามา อาจทำให้สัญญาณรบกวนถูกขยายขนาดมากขึ้น และอาจส่งผลให้อุปกรณ์เสียหายได้ ดังนั้นการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงต้องมีการจำกัดขอบเขตของความถี่ ของตัวอนุพันธ์ด้วยตัวปฏิพันธ์ ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ดังสมการด้านล่าง และจะได้กราฟผลตอบสนองเชิงความถี่เป็นดังรูปที่ 23 ซึ่งเมื่อสัญญาณที่ความถี่หนึ่งจะไม่มีอثرขยายไม่เพิ่มขึ้น

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



รูป 22: กราฟผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวอนุพันธ์



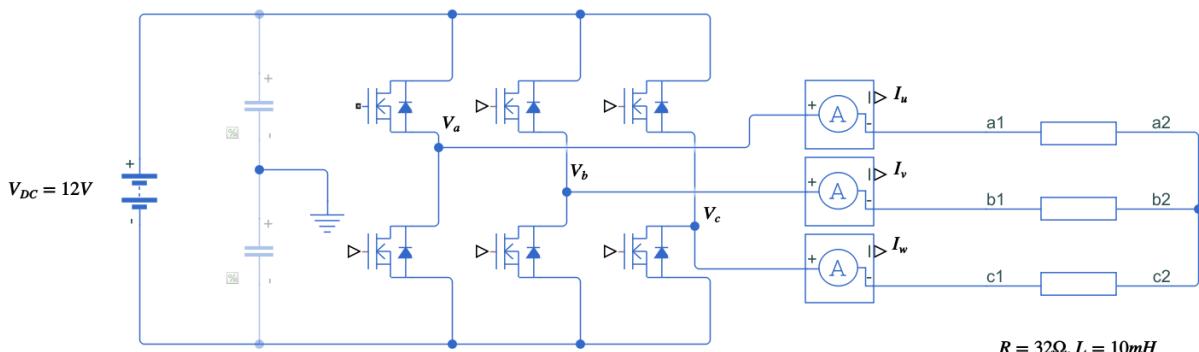
รูป 23: กราฟผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวอนุพันธ์ซึ่งถูกจำกัดขอบเขตโดยตัวปฏิยานุพันธ์

### 3 ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น

#### 3.1 การทดสอบอัลกอริทึมการmodulateแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง

ในการทดสอบอัลกอริทึมการmodulateแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง จะทำโดยการนำอินเวอร์เตอร์ไปต่อ กับ โหลดแบบตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำสามเฟส โดยเราจะทดลองปรับค่าคำสั่งต่างๆของอินเวอร์เตอร์ และดูว่าระบบให้ผลตอบสนองที่ถูกต้องหรือไม่ อัลกอริทึมมีการตัดสินใจที่ถูกต้องหรือไม่ โดยมีการนำสอดคล้องกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริงหรือไม่ โดยการประเมินผลที่ได้กล่าวข้างต้น จะต้องมีการวัดและแสดงค่าต่างๆ เหล่านี้คือ

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



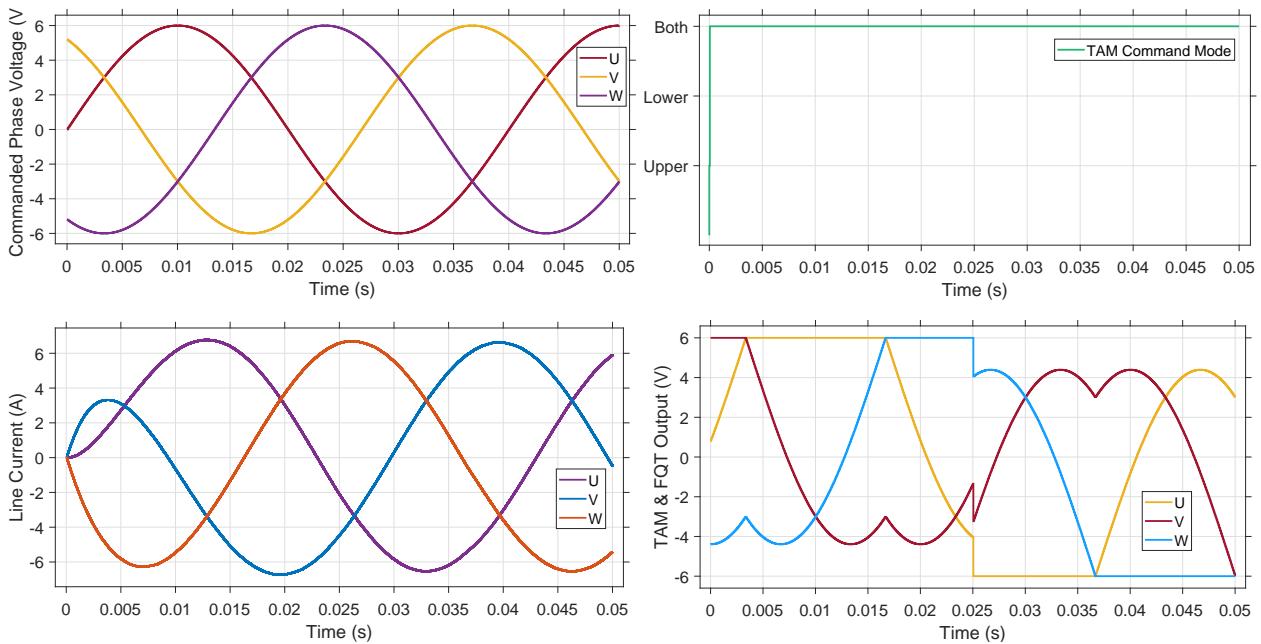
รูป 24: รูปแบบวงจรที่ใช้ทดสอบอัลกอริทึมการmodulateแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง

ค่าแรงดันเฟสคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ จะเป็นค่าแรงดันที่ป้อนให้กับอัลกอริทึมของอินเวอร์เตอร์ ค่ากระแสสาย จะนิยามตามรูปที่ 24 คือ นิยามให้กระแสที่เหลือออกจากขั้วของอินเวอร์เตอร์เป็นค่าบวก โหมดการmodulateแบบสองแขนที่อัลกอริทึมตัดสินใจเลือก จะเป็นโหมดที่ได้กล่าวไว้ในรายละเอียดของการmodulateแบบสองแขนคือ

- Upper จะเป็นโหมดที่เลือกให้สวิตช์ตัวที่นำกระแสแลกเปลี่ยนทำงานชิสเตอร์ตัวบน
- Lower จะเป็นโหมดที่เลือกให้สวิตช์ตัวที่นำกระแสแลกเปลี่ยนทำงานชิสเตอร์ตัวล่าง
- Both จะเป็นโหมดที่เลือกให้ทرانซิสเตอร์ตัวบน หรือตัวล่างนำกระแสแลกเปลี่ยนได้ ขึ้นกับว่าทرانซิสเตอร์ตัวไหนทำงานหนักกว่า โดยจะแบ่งงานกันทำระหว่างทرانซิสเตอร์ตัวบนและตัวล่าง

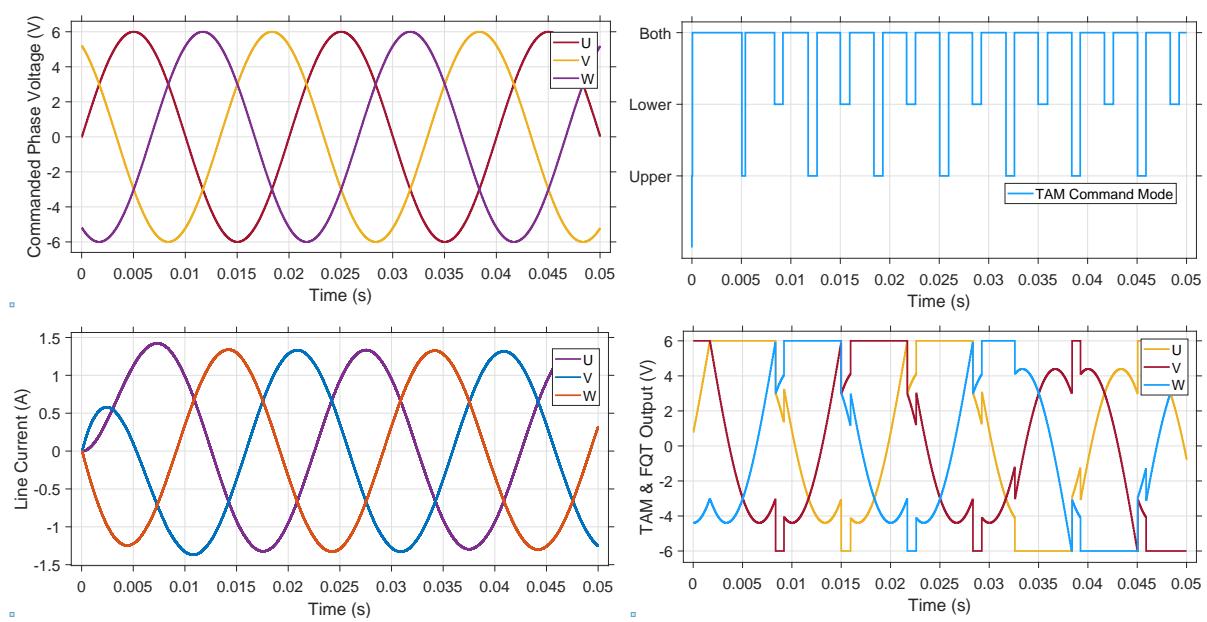
แรงดันคำสั่งที่คำนวนได้จากอัลกอริทึม คือ แรงดันที่คำนวนได้หลังจากการตัดสินใจว่าต้องการmodulateสองแขนแบบไหน โดยจะทำการเลือกแรงดันสำหรับศูนย์เพื่อที่จะบวกเข้าไปในแต่ละเฟส เพื่อให้สวิตช์นำกระแสในแบบที่อัลกอริทึมต้องการ

### 3.1.1 เจื่อนใช้การทดสอบกรณีที่ปรับความถี่กำลังของอินเวอร์เตอร์



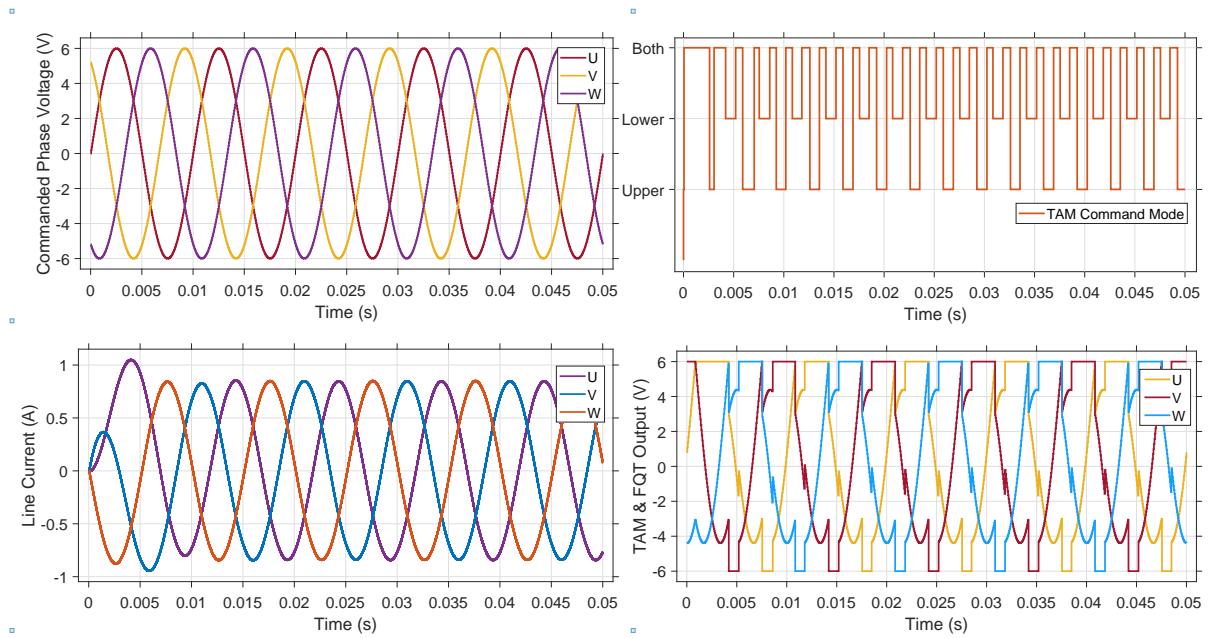
รูป 25: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่กำลังเท่ากับ 25Hz

จากรูปที่ 25 จะเห็นได้ว่า การเหลือมกันของกระแสและแรงดันมีค่าน้อยมาก ซึ่งเวลาที่กระแสและแรงดันเหลือมกันมีค่าต่ำกว่าค่าบกพร่องในจุดภาคที่หนึ่งตลอดเวลา ไม่ว่าจะมอดูเลตแบบสองแขนแบบใดก็ตาม ดังที่แสดงในกราฟ 荷mode ของการมอดูเลตแบบสองแขนที่อัลกอริทึมตัดสินใจเลือก จึงเป็นแบบ Both ตลอดเวลา เพราะจากมุมมองของอินเวอร์เตอร์ อัลกอริทึมจะคิดว่าสามารถที่จะมอดูเลตสองแขนแบบใดก็ได้ ดังนั้น ระบบจะมอดูเลตแบบสองแขนสลับกันระหว่างตัวบนนำกระแสและตัวล่างนำกระแส โดยมีจุดที่แบ่งการทำงานกันระหว่างทรายชิสเตอร์ตัวบนและตัวล่างอยู่ที่เวลา 0.025 วินาที เพื่อไม่ให้ทรายชิสเตอร์ผ้าเดียวทำงานหนักเกินไป



รูป 26: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่คำสั่งเท่ากับ 50Hz

จากรูปที่ 26 จะเห็นได้ว่า เมื่อเราเพิ่มความถี่คำสั่งให้กับอินเวอร์เตอร์ จะทำให้ความถี่ไฟฟ้าของแรงดันออกจาก อินเวอร์เตอร์นีค่ามากขึ้น ทำให้องค์ประกอบความเนี้ยบนำของโหลดมีค่ามากขึ้น ทำให้การเหลือมกันของกระแสและ แรงดันมากขึ้น จึงมีช่วงระหว่างเวลาระหว่างที่แรงดันคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ตัดศูนย์ (เปลี่ยนเครื่องหมายจาก ลบเป็นบวก) และเวลาที่ค่ากระแสสายตัดศูนย์ (เปลี่ยนเครื่องหมายจากลบเป็นบวก) ในช่วงเวลาดังกล่าว แรงดันไฟส คำสั่งจะมีค่าเป็นบวก ส่วนค่ากระแสจะมีค่าเป็นลบ ดังนั้น ถ้าหากเรามอดูเลตแบบทรานซิสเตอร์วนน้ำร้อนแล้ว แรงดันไฟ เท่ากับเราบังคับให้กระแสไฟหล่อผ่านทรานซิสเตอร์ตัวบน ทำให้ทรานซิสเตอร์ตัวบนทำงานในจตุภาคที่สาม ซึ่งเป็น สิ่งที่ไม่ต้องการ เนื่องจากจะมีแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์มากกว่า ดังนั้น เราจึงต้องเลือกให้อัลกอริทึมมอดูเลตแบบ ส่องแขนเลือกมอดูเลตแบบทรานซิสเตอร์ตัวล่างน้ำร้อนแล้วลดลงตัว ทำให้กระแสไฟหล่อผ่านทรานซิสเตอร์ตัวล่างแบบ ที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ตัวล่างน้ำร้อนในจตุภาคที่หนึ่ง ซึ่งมีแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์น้อยกว่า กำลังสูญเสีย ระหว่างน้ำร้อนและน้ำเย็นกว่า ดังที่จะสะท้อนออกมาในกราฟโน้มดรามมอดูเลตแบบสองแขนที่อัลกอริทึมตัดสินใจเลือก จะสังเกตได้ว่า อัลกอริทึมจะเลือกให้อินเวอร์เตอร์รอมมอดูเลตแบบ "Lower" เมื่อยูในช่วงเวลาระหว่างที่ค่าแรงดันไฟส คำสั่งเปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกไปลบ และค่าแรงดันสายเปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกไปลบ และอัลกอริทึมจะเลือก มอดูเลตแบบ "Upper" ในช่วงเวลาระหว่างที่ค่าแรงดันไฟส คำสั่งเปลี่ยนเครื่องหมายจากลบไปบวก และค่ากระแส สายเปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกไปบวก ซึ่งหากพิจารณาจากผลการจำลองจะพบว่า อัลกอริทึมได้ทำงานอย่างถูกต้อง

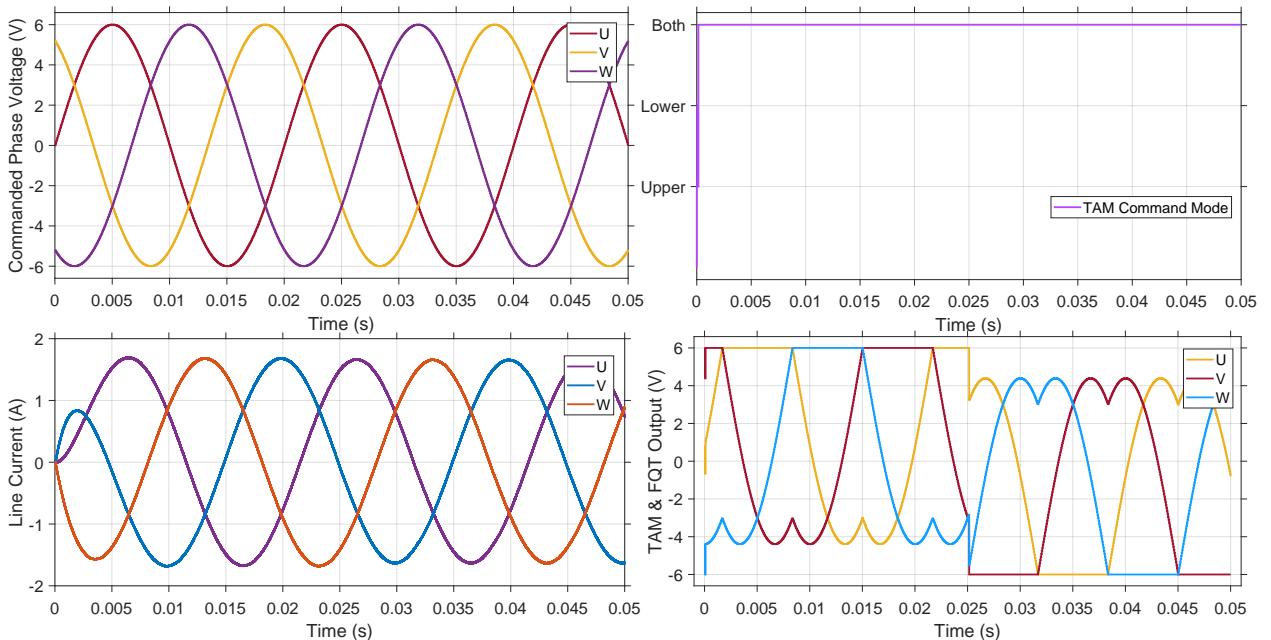


รูป 27: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่คำสั่งเท่ากับ 100Hz

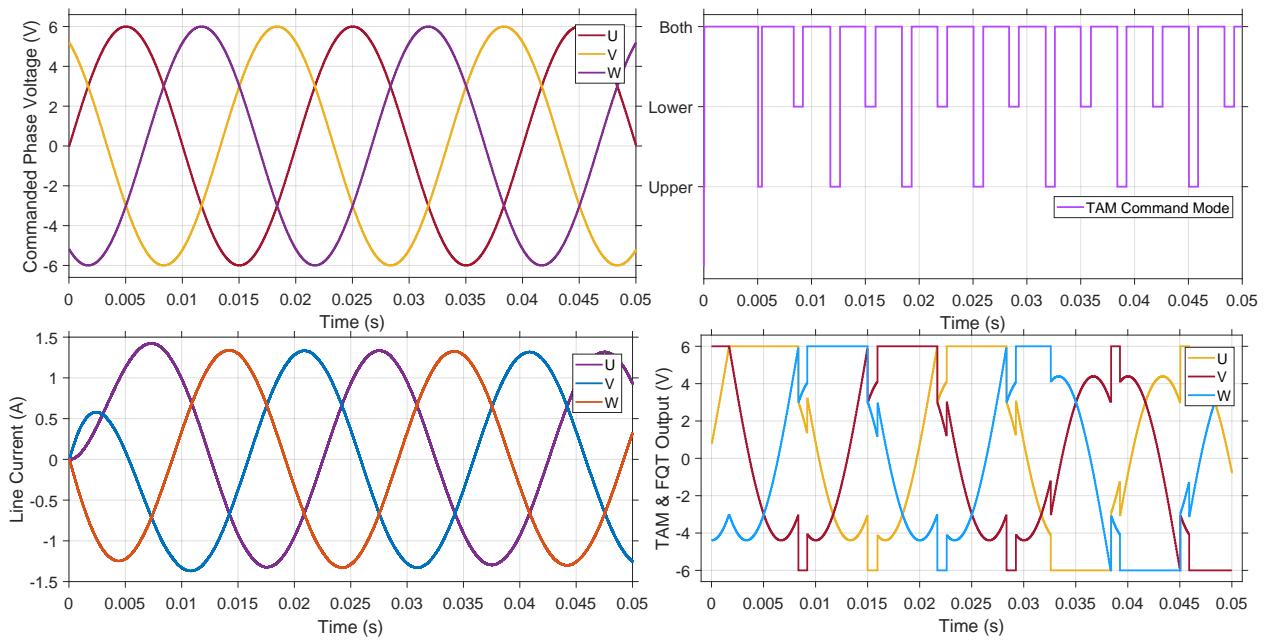
จากรูปที่ 27 จะเห็นได้ว่า เมื่อเราเพิ่มความถี่คำสั่งให้กับอินเวอร์เตอร์ แนวโน้มของการเหลือมกันของกระแสและแรงดันจะมีมากขึ้น ดังนั้น ส่วนแบ่งเวลาที่อัลกอริทึมเลือกมอดูเลตแบบ "Upper" และ "Lower" จึงมีมากขึ้น ดังที่จะสังเกตุในกราฟ โดยมอดูเลตแบบสองชั้นที่อัลกอริทึมเลือก

### 3.1.2 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับค่าความหนี้บานของโหลด

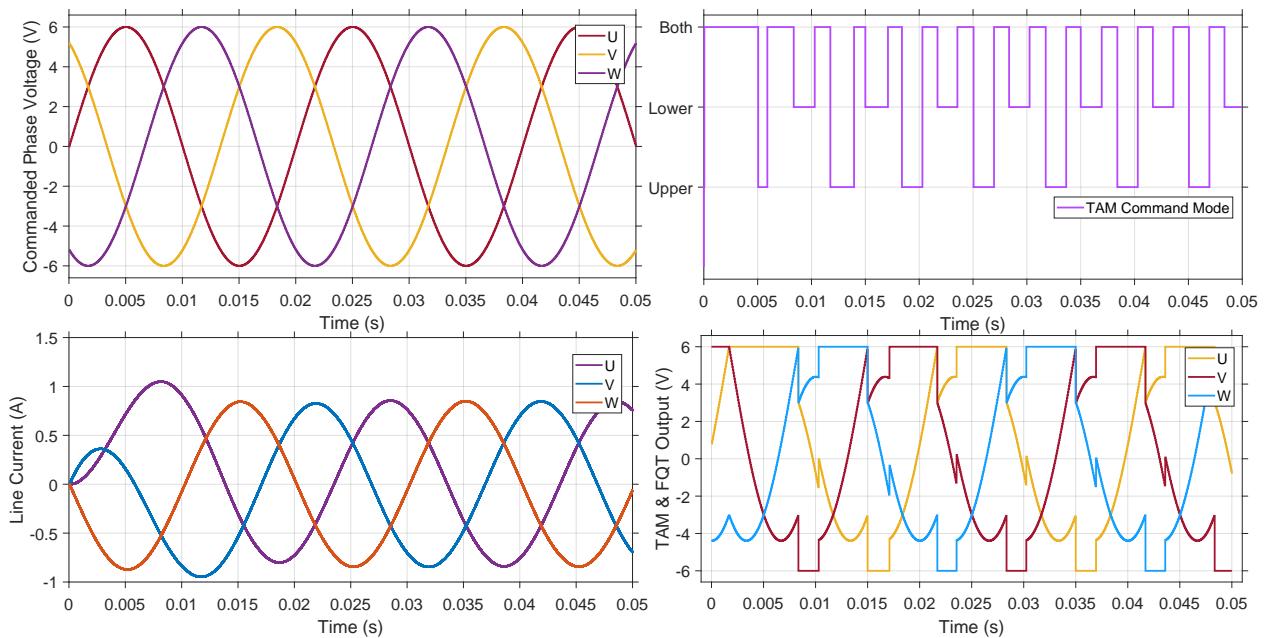
จะเห็นได้ว่าการปรับค่าความหนี้บานของโหลดส่งผลคล้ายกับการปรับค่าความถี่คำสั่งให้กับอินเวอร์เตอร์ เพราะสุดท้ายแล้ว การปรับความถี่คำสั่งของอินเวอร์เตอร์คือการเปลี่ยนค่าเรียกແຕนซ์ของตัวเหนี่ยวนำนั่นเอง จะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องในกรณีการทดสอบต่างๆ



รูป 28: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับความหนี้บานของโหลดให้เท่ากับ 5mH



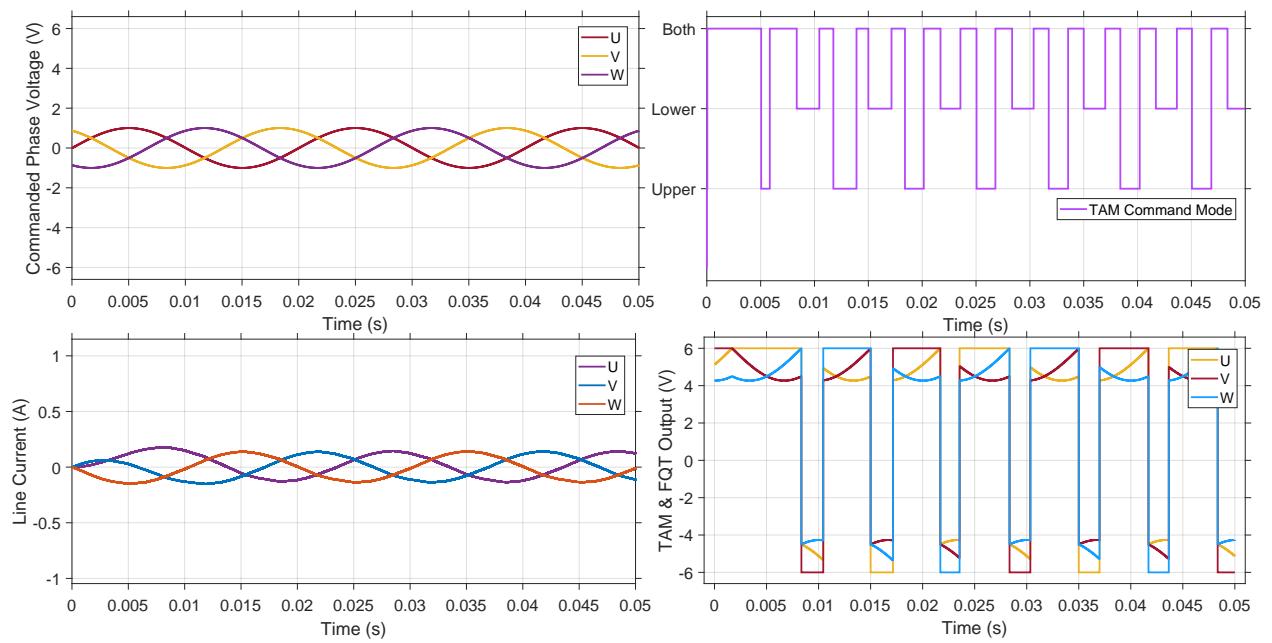
รูป 29: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับความหนี่ยาน้ำของโหลดให้เท่ากับ  $10\text{mH}$



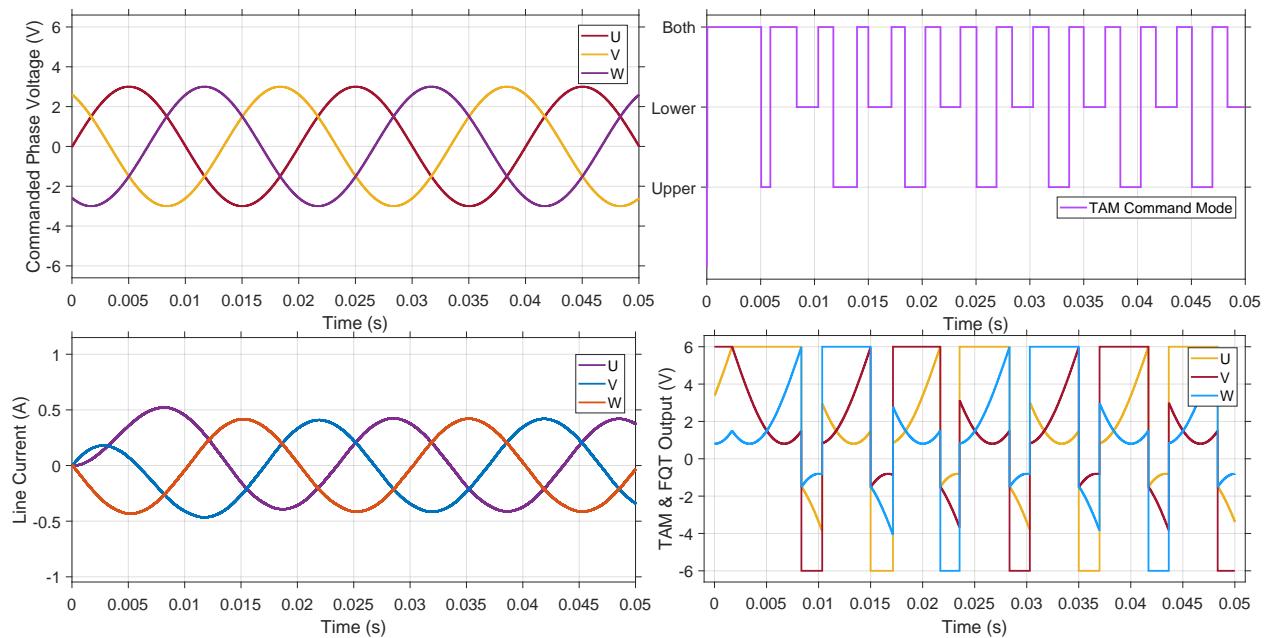
รูป 30: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับความหนี่ยาน้ำของโหลดให้เท่ากับ  $20\text{mH}$

### 3.1.3 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับค่าขนาดของแรงดันคำสั่งของอินเวอร์เตอร์

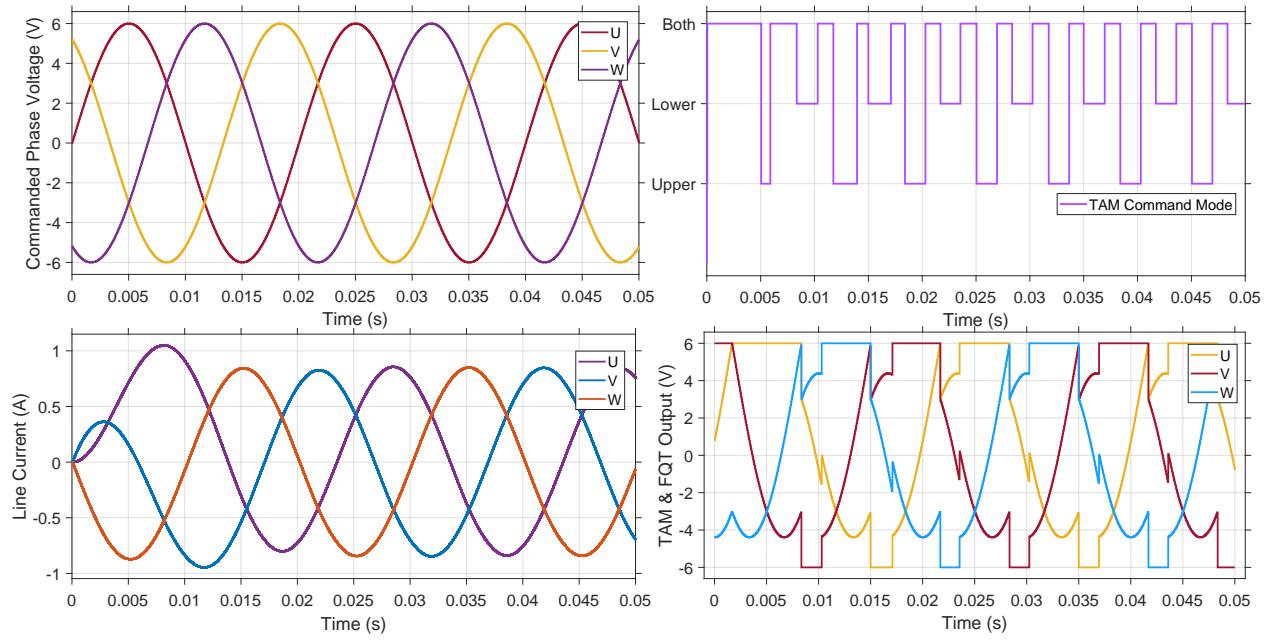
ถ้าหากค่าจอดของแรงดันไฟฟ้าคำสั่งถูกปรับ ก็จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อขนาดของกระแสสาย นั่นคือ ค่ากระแสสายจะแปรผันตรงกับขนาดของแรงดันคำสั่ง จะสังเกตุได้ว่า อินเวอร์เตอร์ยังสามารถทำงานได้ถูกต้องเมื่อปรับขนาดของแรงดันคำสั่งเป็นค่าต่างๆ



รูป 31: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับขนาดของค่าจอดของดันเฟสคำสั่งเท่ากับ 1 V



รูป 32: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับขนาดของค่าจอดของดันเฟสคำสั่งเท่ากับ 3 V



รูป 33: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับขนาดของค่าอุดของดันเฟสคำสั่งเท่ากับ 6 V

### 3.2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

จากการศึกษาการทำงานของทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และ การเปรียบเทียบเชิงกิล - ไฟฟ้า(Electrical analogy) เพื่อแปลงระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้า มีขั้นตอนดังนี้

เนื่องจากอัตราส่วนของเกียร์ของ ขบวนเพื่อง(gear train) และเพื่องดอกจอก(bevel gear) ที่ใช้ในการส่งการเคลื่อนที่เชิงหมุนจากเกลียวนำ(lead screw) ไปยังโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส มีอัตราส่วนเท่ากับ 1:1 จึงได้ความสัมพันธ์

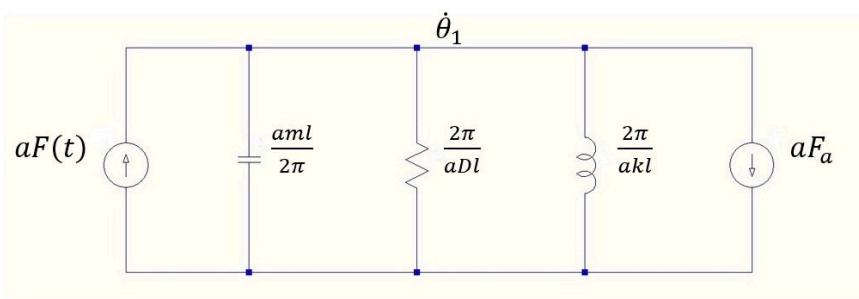
$$x = \frac{l\theta_1}{2\pi} = \frac{l\theta_2}{2\pi} \quad (43)$$

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

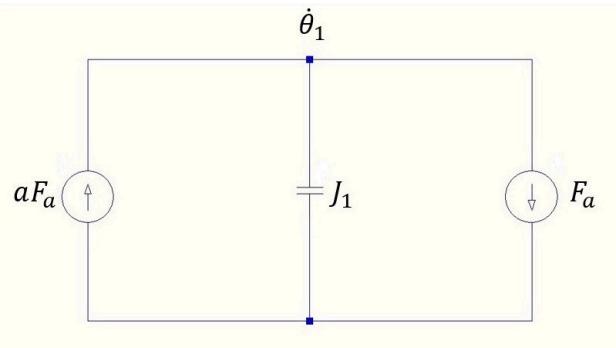
$$\frac{aml}{2\pi} \ddot{\theta}_1 + \frac{aDl}{2\pi} \dot{\theta}_1 + \frac{akl}{2\pi} \theta_1 + aF_a = aF(t) \quad (44)$$

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

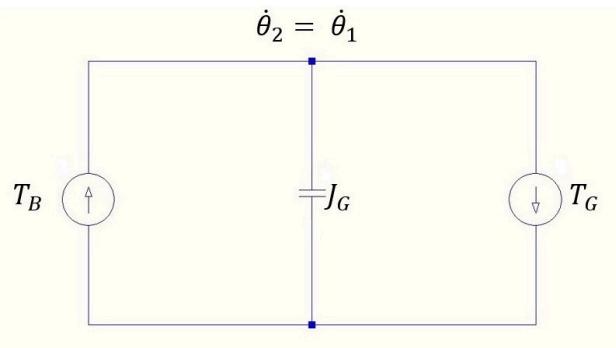
$$J_G \ddot{\theta}_2 + T_G = T_B \quad (46)$$



รูป 34: วงจรไฟฟ้าของการเลื่อนที่ของแป้นเกลียว(nut)

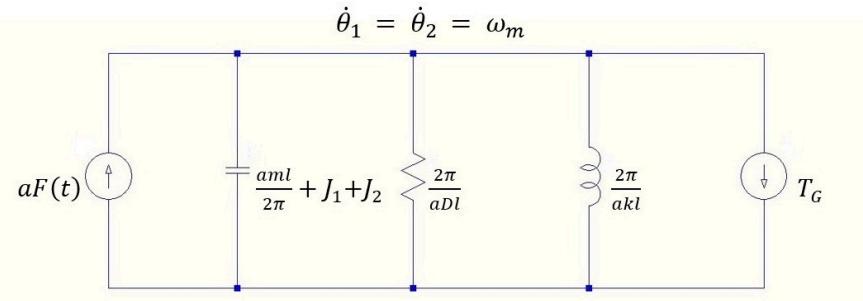


รูป 35: วงจรไฟฟ้าของการเคลื่อนที่เชิงหมุนของเกลียวนำ(lead screw)



รูป 36: วงจรไฟฟ้าของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

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



รูป 37: วงจรสมมูลไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

หลังจากได้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน จึงได้ศึกษาเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ชนิดแม่เหล็กถาวรเพื่อเข้าใจหลักการทำงานและสมการความสัมพันธ์ต่างๆ ที่จะสามารถวิเคราะห์ และสร้างวงจรสมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

จากการที่ได้ศึกษาเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร และได้วงจรสมมูลของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน สามารถรวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรตามขั้นตอน ดังนี้

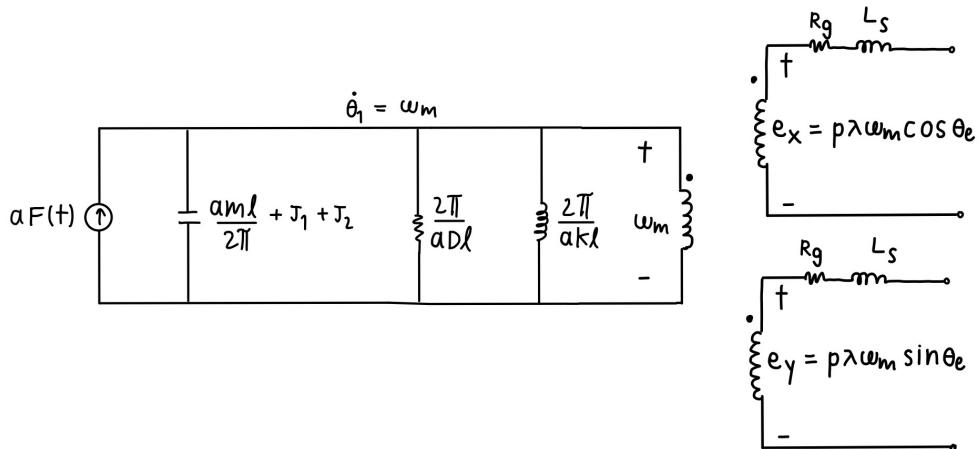
จากสมการณ์ที่ (17) แรงดันบนกรอบอ้างอิงนิ่ง แกน x,y ทำให้ทราบความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนเนียนยาน้ำภายในของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ดังสมการด้านล่าง

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

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

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

วงจรที่ไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานสัมพันธ์กับเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรผ่านห้องเปล่งไฟฟ้า ความเร็วของโรเตอร์จะท้อนไปยังขนาดแรงเคลื่อนเนียนยาน้ำของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสตามสมการด้านบน จึงได้ความสัมพันธ์แสดงดังรูปวงจรด้านล่าง



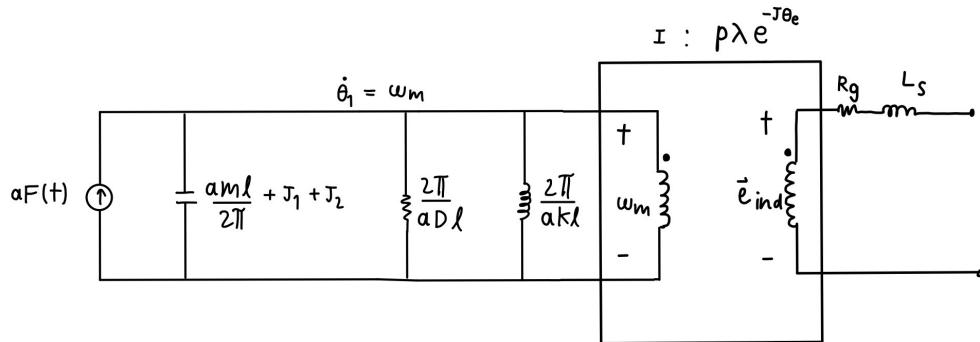
รูป 38: วงจรไฟฟ้าแสดงความสัมพันธ์ระบบทางกลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากนั้นเขียนความสัมพันธ์อยู่ในรูปสเปชเวกเตอร์ของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและ เครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร เพื่อสามารถวิเคราะห์เป็นวงจรไฟฟ้าเพียงวงเดียวได้

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

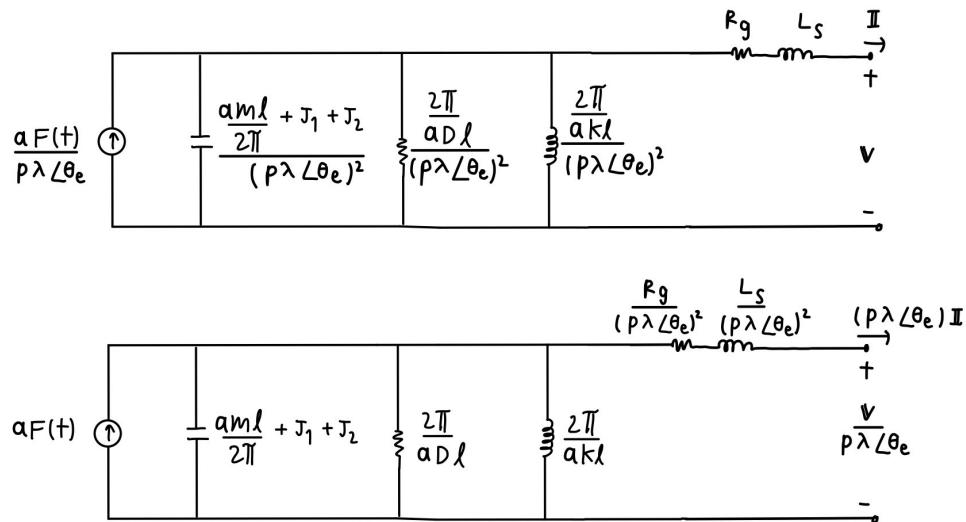
$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = p\lambda e^{-J\theta_e} \begin{bmatrix} \omega_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (51)$$

จึงสามารถมองเป็นวงจรสมมูลที่แสดงความสัมพันธ์เป็นหมวดแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบเป็นเชิงช้อน ดังรูปที่ 39



รูป 39: วงจรไฟฟ้าแสดงความสัมพันธ์ระบบทางกลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีหมวดแปลงไฟฟ้ามีอัตราส่วนเป็นเชิงช้อน

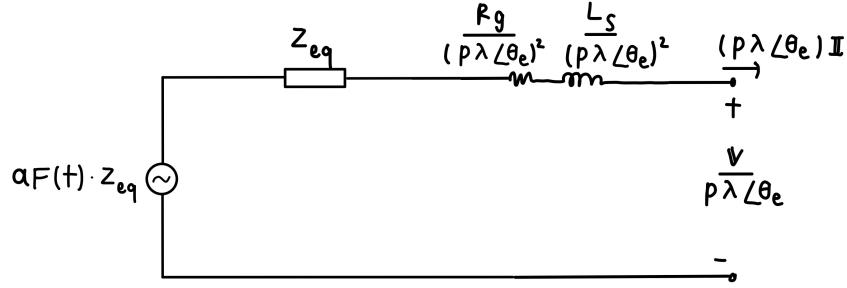
จากนั้นทำการแปลงเป็นวงจรสมมูล โดยอ้างอิงผังทุติยภูมิ(บน) และ อ้างอิงผังปฐมภูมิ(ล่าง) แสดงดังรูปที่ 40



รูป 40: วงจรสมมูลไฟฟ้าที่อ้างอิงผังทุติยภูมิ(บน) และ อ้างอิงผังปฐมภูมิ(ล่าง)

### 3.3 ผลการจำลองของแบบจำลองทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กไฟฟ้า บนโปรแกรม MATLAB/Simulink

จากสมการที่ (41) จึงทำการแปลงวงจรสมมูลจากรูป 40 โดยใช้ทฤษฎีเทเวนิน จะได้วงจรสมมูลดังรูปด้านล่าง



รูป 41: แบบจำลองวงจรไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นพลังงานและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้ทฤษฎีเทเวนิน

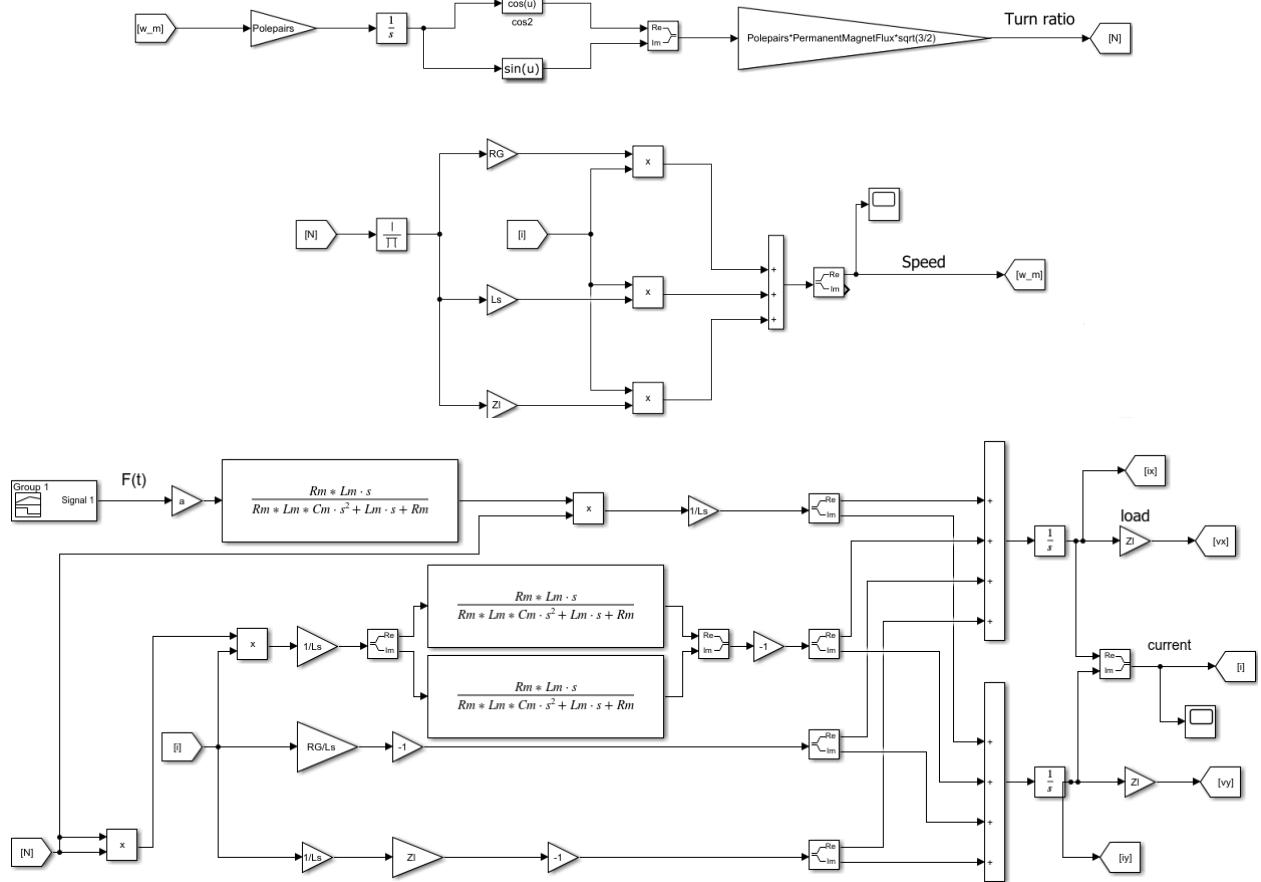
โดย  $Z_{eq}$  คือ  $\frac{2\pi}{aDl} // s \frac{2\pi}{akl} // \frac{1}{s(\frac{aml}{2\pi} + J_1 + J_2)}$  จากทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังสูงสุด จะได้ว่าโหลดที่นำมานั้นต้องมากที่สุด เมื่อ  $Z_{load} = Z_{eq}$

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

โดยแรงดันขาออกที่สอดคล้องกับหลักการติดตามจุดทำงาน ซึ่งทำให้กำลังขาออกของเครื่องจักรไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเป็น ดังสมการที่ (53)

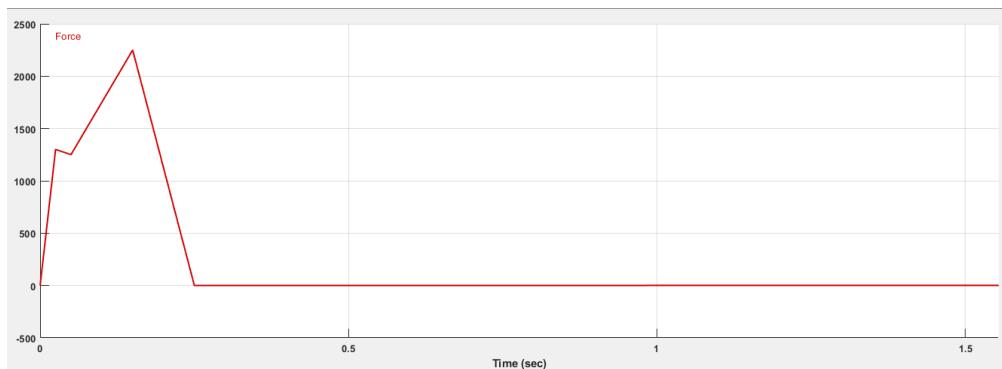
$$v_{out} = conjugate[z_{eq}I(p\lambda\angle\theta_e)^2 + R_gI + sL_sI] \quad (53)$$

หลังจากที่ได้วงจรสมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าชิงโครนัสและเรื่อนไข แรงดันขาออกที่สอดคล้องกับหลักการติดตามจุดทำงาน ซึ่งทำให้กำลังขาออกมีค่าสูงสุด จากรูปที่ 41 และสมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง มาสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังรูปที่ 42 เพื่อศึกษาการทำงานของแบบจำลอง ที่ได้



รูป 42: แบบจำลองวงจรสมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพิ้นพลังงานและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่มีโหลดตัวต้านทาน 32.23 โอม์ม

แบบจำลองที่ได้ ทดสอบด้วยแรเงห์ยีบ ดังรูปที่ 42 และใส่โหลดเป็นตัวต้านทานที่ข้าอกอกของ มีขนาดเท่ากับ ความต้านทานภายในเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่นหลักไฟฟ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 32.23 โอม์ม ใช้แรงจากเท้าแรเงห์ยีบ แสดงดังรูปที่ 43 ค่าพารามิตอร์อื่นที่ใช้ในการทดสอบ [2] แสดงดังตารางที่ 2 และ 3



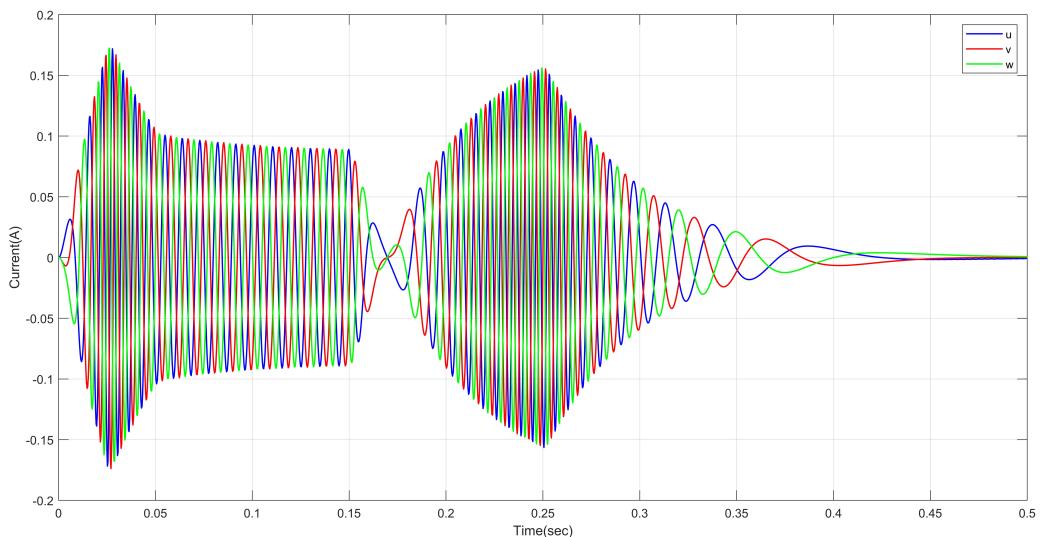
รูป 43: แบบจำลองวงจรสมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพิ้นพลังงานและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่มีโหลดตัวต้านทาน 32.23 โอม์ม

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( $\mu$ )	0.21
Efficient of thrust bearing	1.00
Efficient of thread	0.8

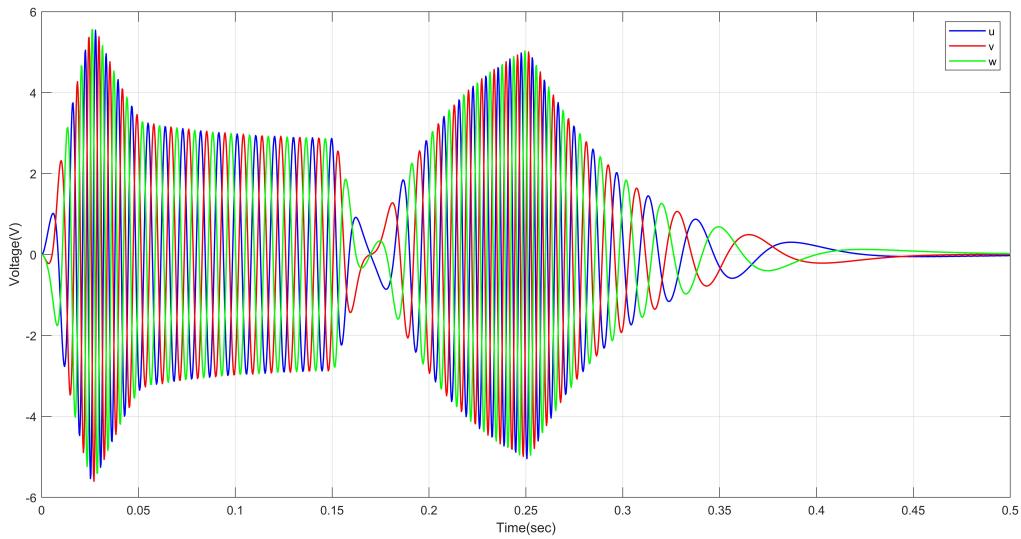
ตาราง 2: ค่าตัวแปรทางกลที่เกี่ยวข้องกับแผ่นพื้นพลังงาน [2]

Parameters	Value
ค่าความต้านทานของชด漉ดสเตเตอร์( $R_s$ )	$32.23 \Omega$
ค่าความเหนี่ยวนำของชด漉ดสเตเตอร์( $L_s$ )	11.3 mH
ค่าความเหนี่ยวนำของชด漉ดสเตเตอร์ในแนวแกนอ้างอิงดี ( $L_d$ )	16 mH
ค่าความเหนี่ยวนำของชด漉ดสเตเตอร์ในแนวแกนอ้างอิงคิว ( $L_q$ )	16 mH
พลักก์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร	0.009 Wb
จำนวนคุชชั่ว	6 คุชชั่ว

ตาราง 3: ค่าตัวแปรทางกลที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรไฟฟ้าซิโครนัสแม่เหล็กถาวร[2]



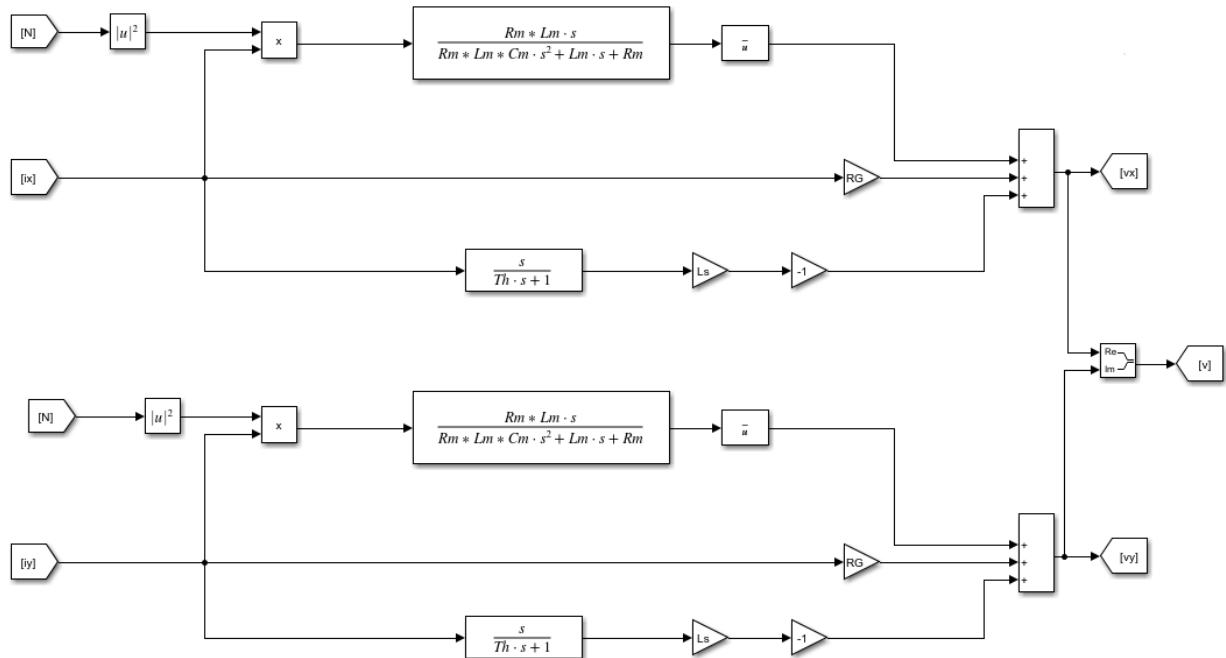
รูป 44: กระแสขาออก เมื่อโหลดตัวต้านทาน 32.23 โอห์ม



รูป 45: แรงดันขาออก เมื่อโหลดตัวต้านทาน 32.23 โอห์ม

จากรูปที่ 44 และ 45 พบรวมว่า แรงดันและกระแสเมล็ดคลื่นเกิดขึ้นจำนวน 2 ลูก โดยลูกแรกเกิดจากการยุบตัวของแผ่นพื้นเนื่องจากแรงที่เหยียบลงบนแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และลูกที่สองเกิดจากการยุบตัวของแผ่นพื้นเนื่องจากแรงคืนตัวของสปริง

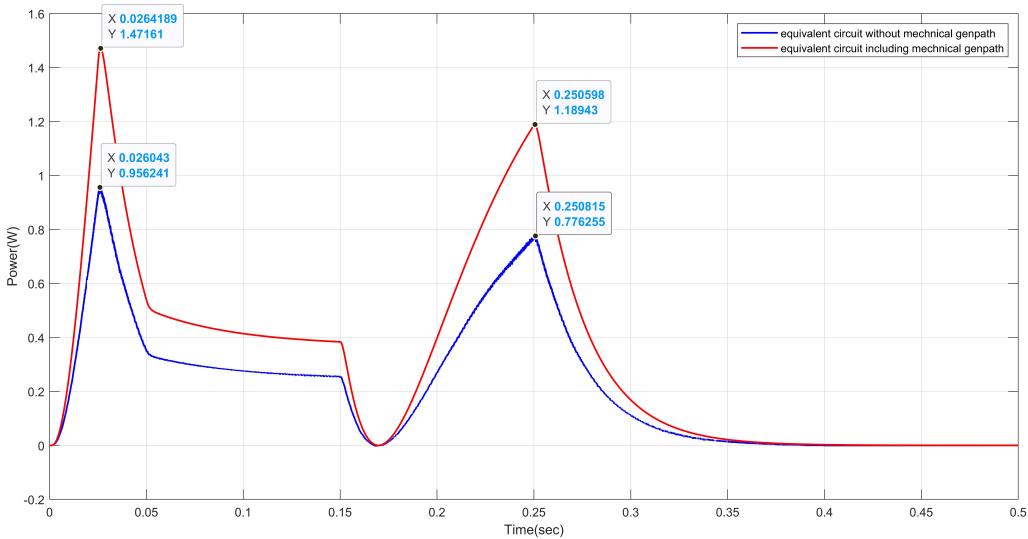
จากสมการที่ (41) เมื่อเปลี่ยนโหลดจากตัวต้านทานเป็นแหล่งจ่ายแรงดันแบบควบคุมได้ สามารถนำมาสร้างเป็นอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดได้ดังรูปที่ 46 โดยนำกระแสขาออกของแบบจำลองมาพิจารณาผ่านอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดเพื่อคำนวนหาเงื่อนไขสัญญาณแรงดันที่เหมาะสมและส่งกลับไปเป็นสัญญาณแรงดันขาออกของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งจะทำให้ได้กำลังขาออกสูงสุด



รูป 46: แผนภาพโดยแกรมของอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดบนแกนอ้างอิงนิ่ง

จากผลการทดสอบแบบจำลอง จะได้ว่ากำลังขาออกเมื่อมีการใช้อัลกอริทึมการติดตามกำลังสูงสุด ที่มาจากการจำลองมูล

ไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าชิงโครนสมลักษณ์ดังรูปที่ 47 และเปรียบเทียบ กำลังข้อกอกเมื่อไม่มีการรวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคิดรวมในอัลกอริทึมการติดตาม กำลังสูงสุดในปี การศึกษา 2563



รูป 47: กำลังข้อกอกเมื่ออัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด กรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณ และกรณีที่ไม่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณ

จากรูป 47 พบร่วมกันว่ากรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณด้วย จะได้กำลังข้อกอกที่สูงกว่า กรณีที่ไม่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณ กำลังข้อกอกสูงสุดค่ายอดลูกแรกเพิ่มจาก 0.95 วัตต์ เป็น 1.47 วัตต์ และกำลังข้อกอกสูงสุดค่ายอดลูกที่สองเพิ่มจาก 0.77 วัตต์ เป็น 1.18 วัตต์ จึงสรุปได้ว่า อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด กรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณ สามารถทำให้ได้กำลังข้อกอกมีค่าที่สูงขึ้นจริง เนื่องจาก พิจารณาสมการ (52) และ (53) จะมีพจน์อิมพีเดนซ์  $Z_{eq}$  ซึ่งเท่ากับ  $\frac{2\pi}{aDl} // s \frac{2\pi}{akl} // \frac{1}{s(\frac{aml}{2\pi} + J_1 + J_2)}$  ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มาจากการบวกทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานเพิ่มเข้ามา นอกจากนี้จากแคลคิวเลตอิมพีเดนซ์ของขวดลวด สเตเตอร์ของเครื่องจักรกลชิงโครนัสเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้แบบจำลองมีความสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้ได้กำลังข้อกอกสูงขึ้นเมื่อเทียบกับปีการศึกษา 2563

## 4 บทสรุป

### 4.1 สรุปผลการดำเนินการ

#### 4.1.1 การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง

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

- โมเดลแบบจำลองของแบตเตอรี่
- โมเดลแบบจำลองของระบบเชิงกล
- โมเดลแบบจำลองของมอเตอร์ชิ้งโครนัสแม่เหล็กถาวร
- โมเดลแบบจำลองระบบฟังตัว
- โมเดลแบบจำลองบอร์ดอินเวอร์เตอร์

และได้มีการทดสอบ และทวนสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ และอัลกอริทึมในการลดกำลังสูญเสีย พบร้า สามารถทำงานและตัดสินใจได้ถูกต้อง

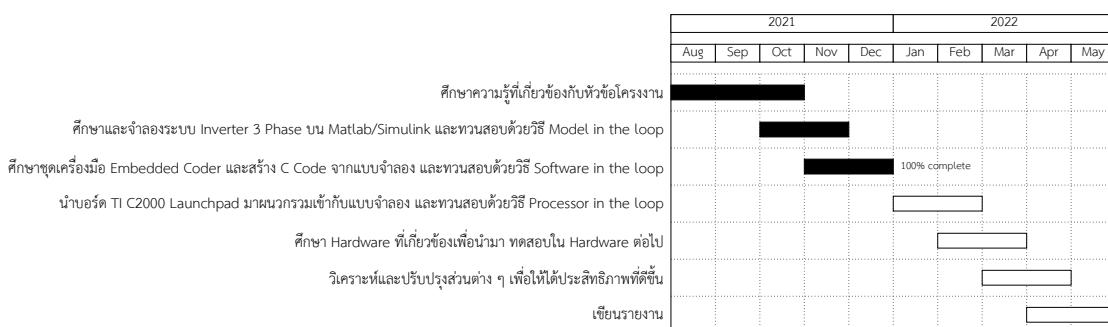
#### 4.1.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด

จากการที่ได้ไปศึกษาการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน การเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า เครื่องจักรกลชิ้งโครนัส แม่เหล็กถาวร และหลักการติดตามจุดทำงานสูงสุด ทำให้ได้ว่าจะสมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน ใช้หากอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุดได้ และสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

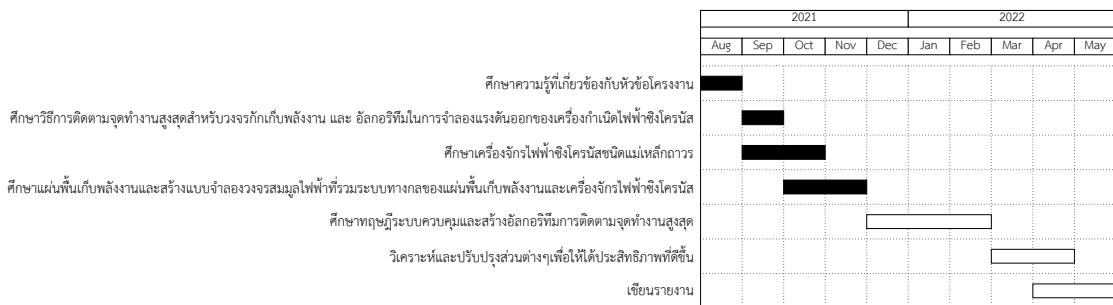
จากการทดสอบอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุดซึ่งมีการรวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink พบร้า กรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณด้วย จะได้กำลังข้าออกที่สูงกว่า กรณีที่ไม่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณที่ทำในปีการศึกษา 2563 จึงสรุปได้ อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด กรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณ สามารถทำให้ได้ กำลังข้าออกมีค่าที่สูงขึ้นจริง

### 4.2 แผนการดำเนินงาน

ในรายงานฉบับนี้ มีแผนการดำเนินงานแยกเป็นของผู้จัดทำแต่ละคน คือ ของนายณัฐพล กับแก้ว ซึ่งมีแผนการดำเนินงานดังแสดงในรูปที่ 48 และของนายสันติ ว่องประเสริฐ ซึ่งมีแผนการดำเนินงานดังแสดงในรูปที่ 49



รูป 48: Gantt chart ของนายณัฐพล กับแก้ว



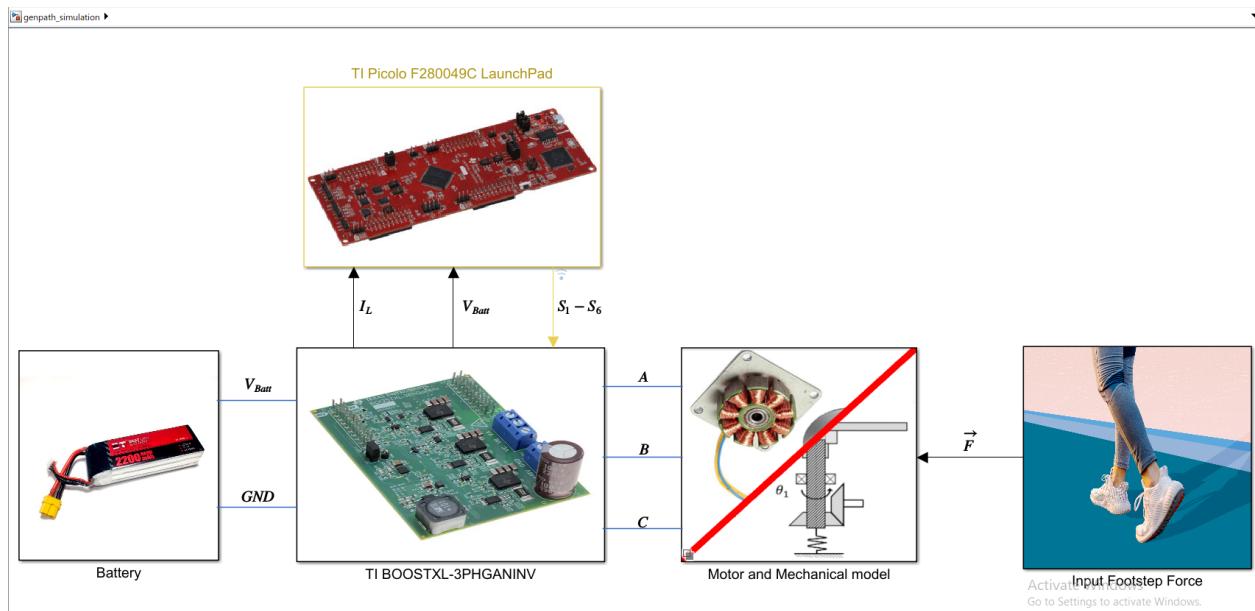
รูป 49: Gantt chart ของนายสันติ วงศ์ประเสริฐ

## 5 เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Riemer and A. Shapiro, “Biomechanical energy harvesting from human motion: theory, state of the art, design guidelines, and future directions.” <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21521509/>, 2011.
- [2] T. Jintanawan, G. Phanomchoeng, S. Suwankawin, P. Kreepoke, P. Chetchatree, and C. Uviengchai, “Design of kinetic-energy harvesting floors.” <https://doi.org/10.3390/en13205419>, 2020.
- [3] B. Sun, “Does gan have a body diode? - understanding the third quadrant operation of gan,” *Texas Instruments Application Report*, no. SNOAA36, 2019.
- [4] N. Mohan and S. Raju, *Analysis and Control of Electric Drives: Simulations and Laboratory Implementation*. Wiley, 2020.
- [5] Asst. Prof. Surapong Suwankawin, “Chapter 4 modeling and control of surface permanent magnet synchronous motor.” presented to 2102-543, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. [PowerPoint slides].
- [6] S. P. Koko, K. Kusakana, and H. J. Vermaak, “Permanent magnet synchronous generator model.” in Micro-hydrokinetic river system modelling and analysis as compared to wind system for remote rural electrification. Central University of Technology, [online document], 2015. Available: ScienceDirect, <http://www.sciencedirect.com> [Accessed: Sep 21, 2020].
- [7] Asst. Prof. Surapong Suwankawin, “Chapter 3 space vector representation.” presented to 2102-543, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. [PowerPoint slides].
- [8] O’Rourke and Colm J. et al., “A geometric interpretation of reference frames and transformations: dq0, clarke, and park.” IEEE Transactions on Energy Conversion 34, 4 (December 2019): 2070 - 2083 © 2019 IEEE.
- [9] K. Tse and H. Chung, “Mppt for electromagnetic energy harvesters having nonnegligible output reactance operating under slow-varying conditions.” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 7, pp. 7110-7122, 2020. [Accessed: Sep 25, 2020].

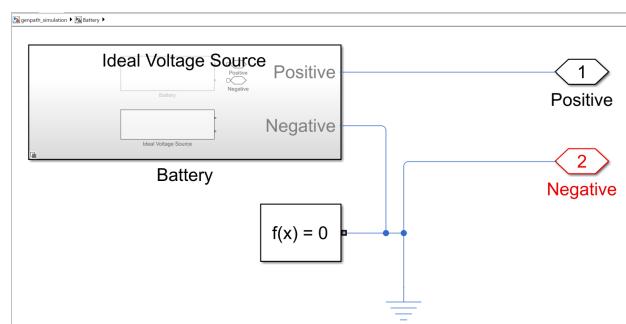
## 6 ภาคผนวก

### 6.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบพลวัตของระบบ

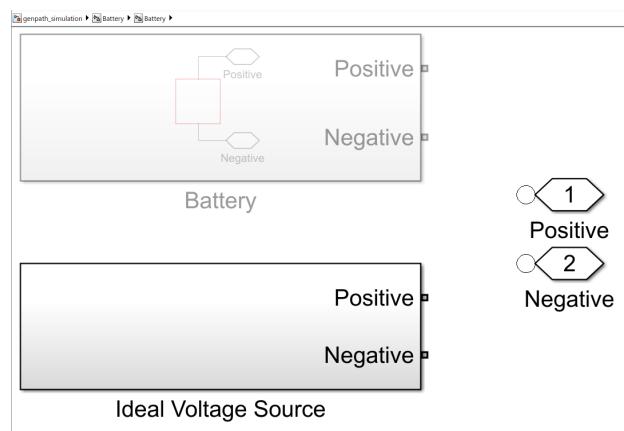


รูป 50: ชั้นที่ 1: ภาพรวมของระบบพลวัตทั้งหมด

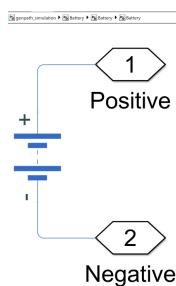
#### 6.1.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแบตเตอรี่



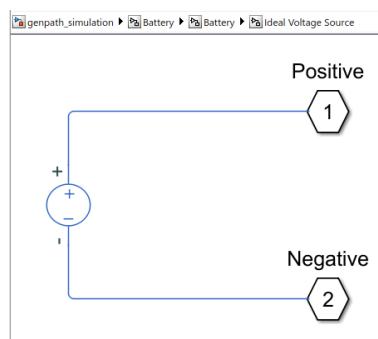
รูป 51: ชั้นที่ 2: แบตเตอรี่ และ Solver Configuration



รูป 52: ขั้นที่ 3: Variant Model ของแบตเตอรี่

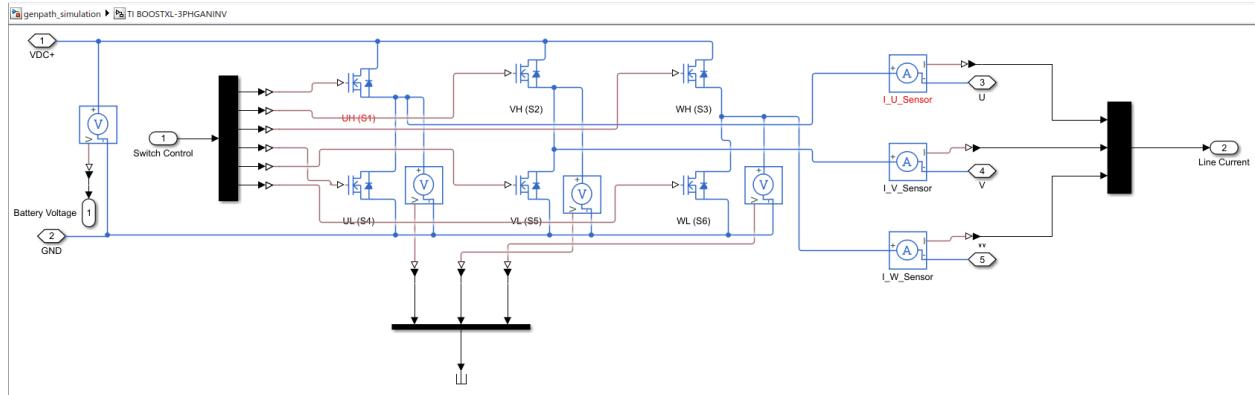


รูป 53: ขั้นที่ 4: ภายใน Variant Model ของแบตเตอรี่



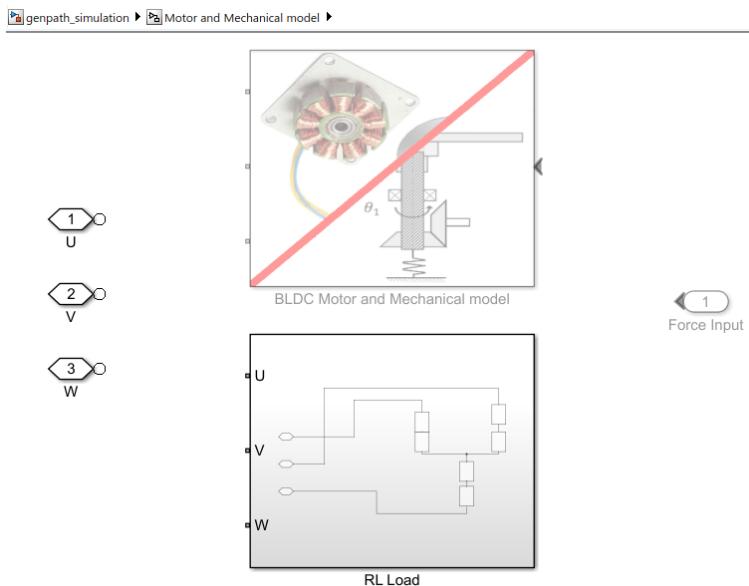
รูป 54: ขั้นที่ 4: ภายใน Variant Model ของแหล่งจ่ายไฟตรงในอุดมคติ

### 6.1.2 Simulink Model ในส่วนของการจำลองบอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI BOOSTXL-3PHGANINV

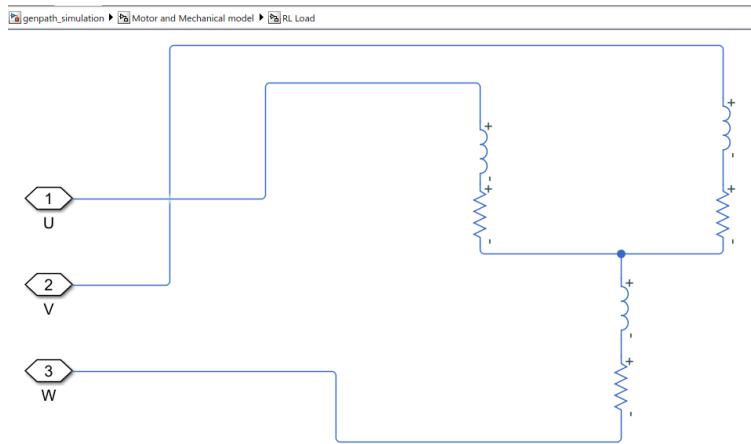


รูป 55: ชิ้นที่ 2: บอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI BOOSTXL-3PHGANINV

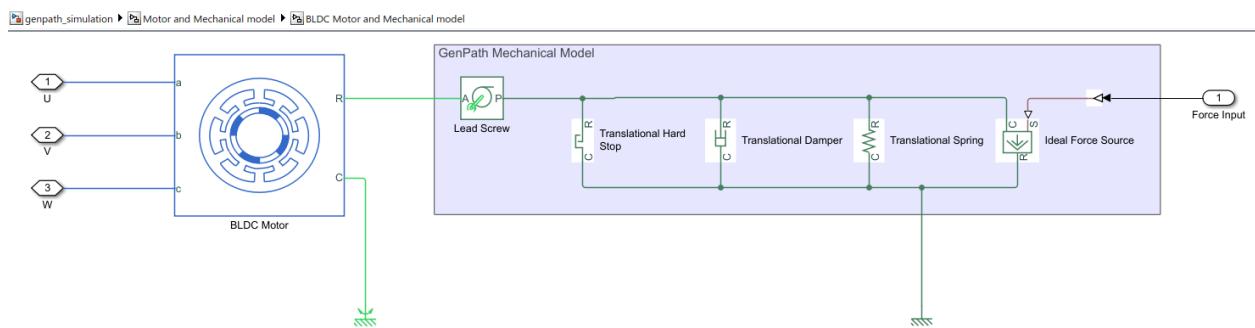
### 6.1.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบเชิงกลและมอเตอร์ชิ้นนั้นแม่เหล็กถาวร



รูป 56: ชิ้นที่ 2: Variant Model ของมอเตอร์และระบบเชิงกล กับโหลดแบบตัวต้านทานและตัวเหนี่ยววนิềา

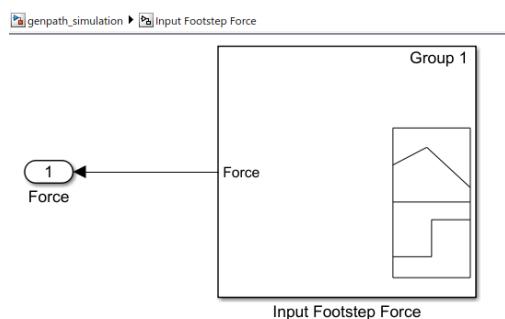


รูป 57: ขั้นที่ 3: ภายใน Variant Model ของโหลดแบบตัวถ่วงและตัวเหนี่ยววนว้า

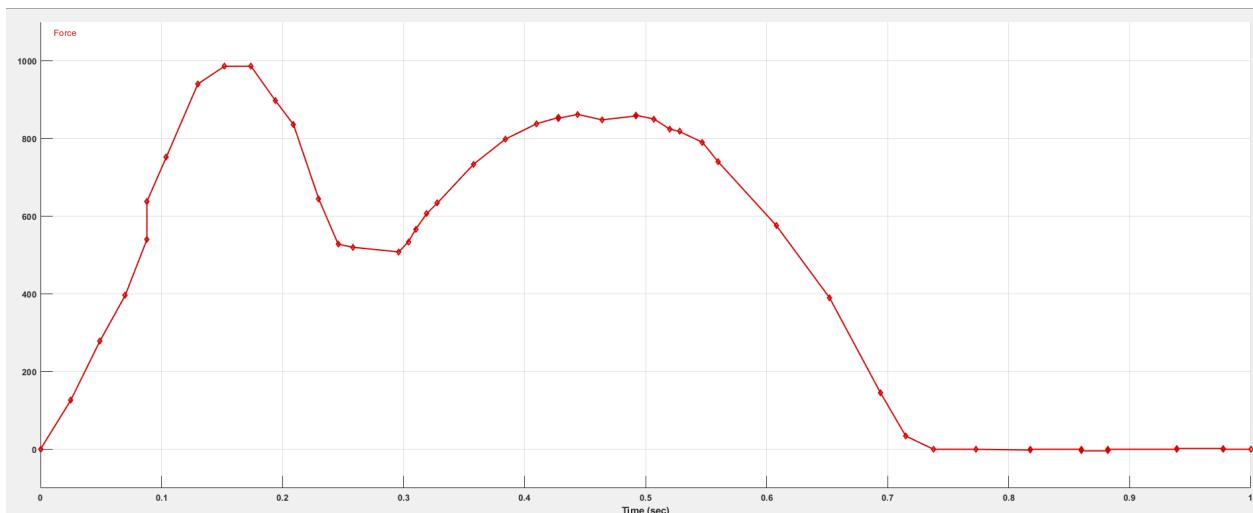


รูป 58: ขั้นที่ 3: ภายใน Variant Model ของระบบเชิงกลและมอเตอร์ชิ้งโครันส์แม่เหล็กถาวร

#### 6.1.4 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแรงที่เท้าเหยียบแผ่นพื้น

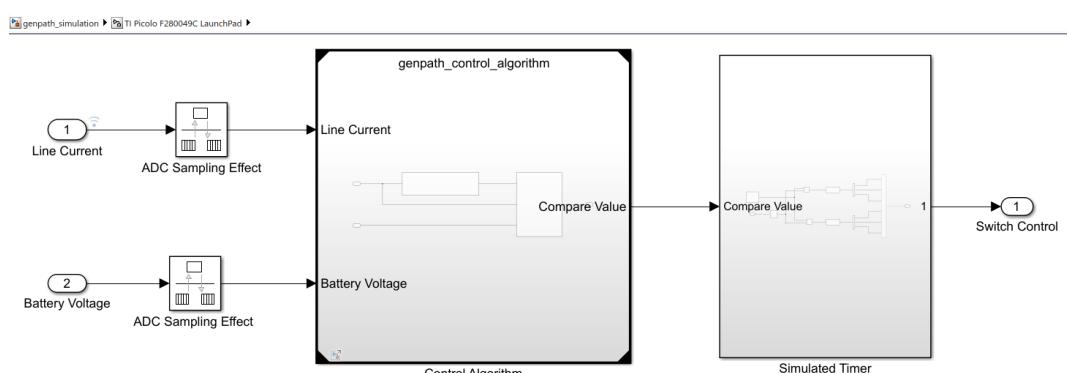


รูป 59: ขั้นที่ 2: แบบจำลองแรงที่มาจากการเหยียบแผ่นพื้น

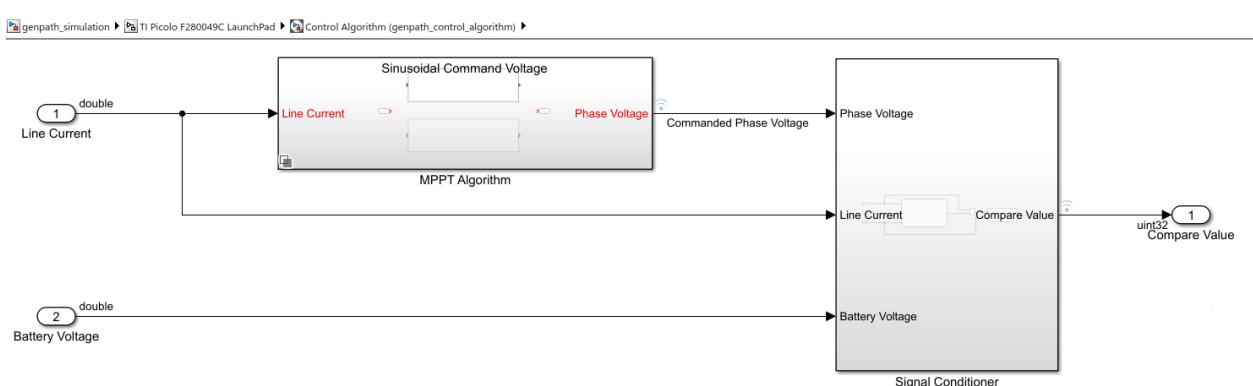


รูป 60: กราฟแสดงสัญญาณแรงที่มาจากเท้าเหยียบ

## 6.2 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมที่ทำงานบนระบบฟังตัว TI Picolo F280049C LaunchPad

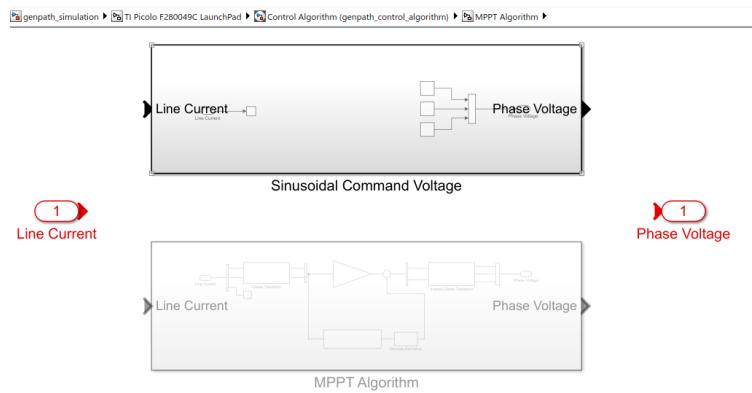


รูป 61: ชั้นที่ 2: ภายใน Subsystem ของแบบจำลองระบบฟังตัว

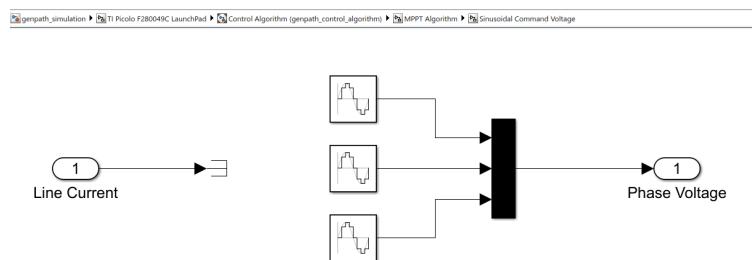


รูป 62: ชั้นที่ 3: ภายใน Subsystem ของอัลกอริทึมที่ทำงานอยู่บนระบบฟังตัว

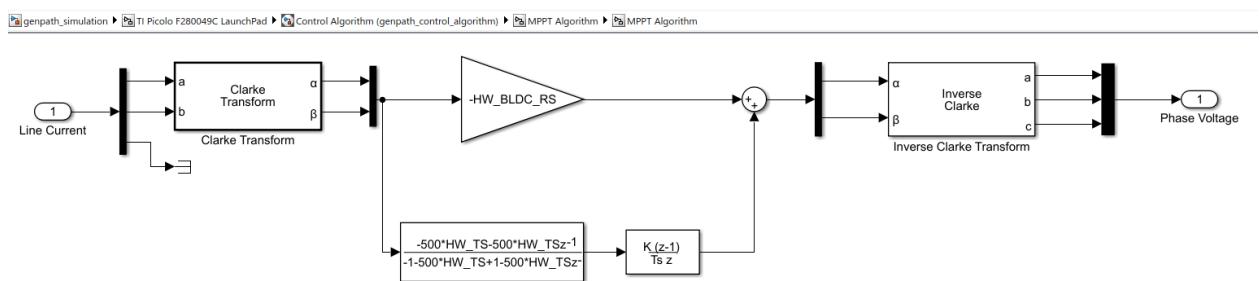
### 6.2.1 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูป 63: ขั้นที่ 4: Variant Model ของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

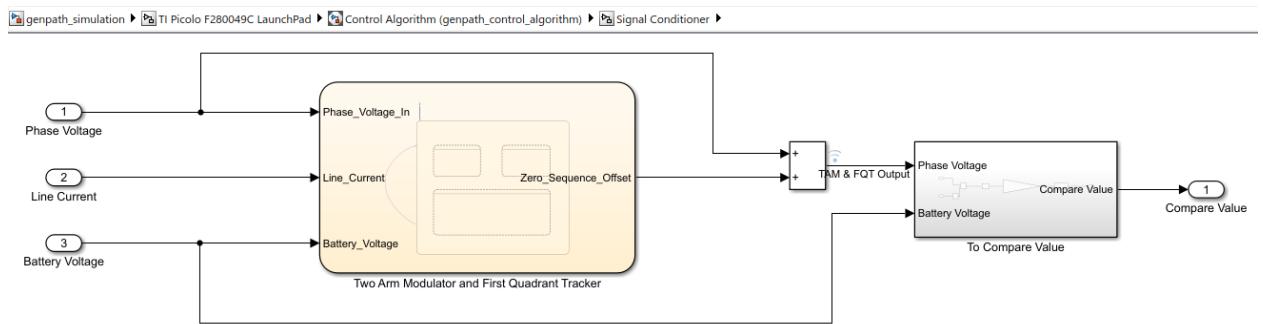


รูป 64: ขั้นที่ 5: ภายใน Variant Model ของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่สร้าง  
สัญญาณคำสั่งแบบไบ奴

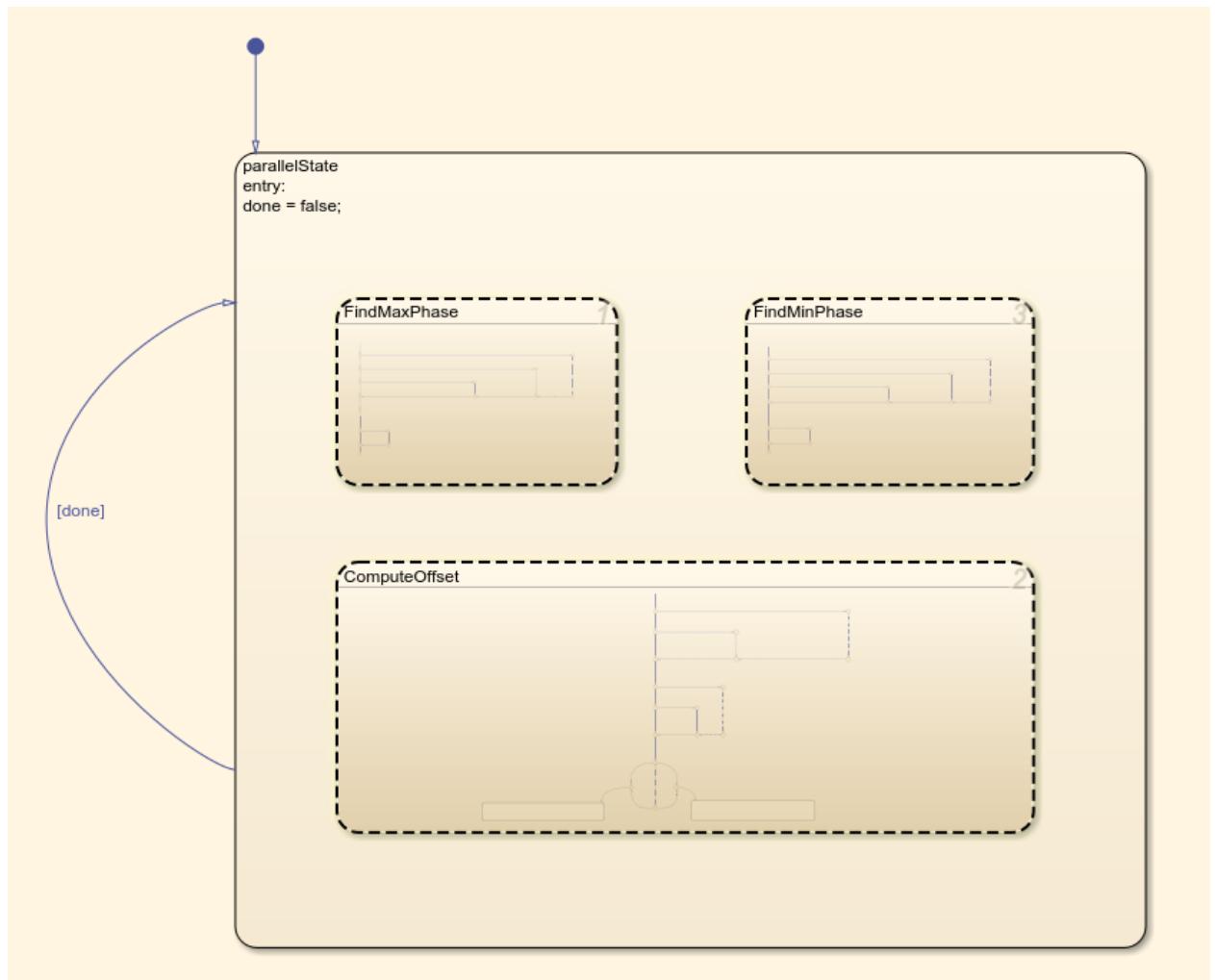


รูป 65: ขั้นที่ 5: อัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

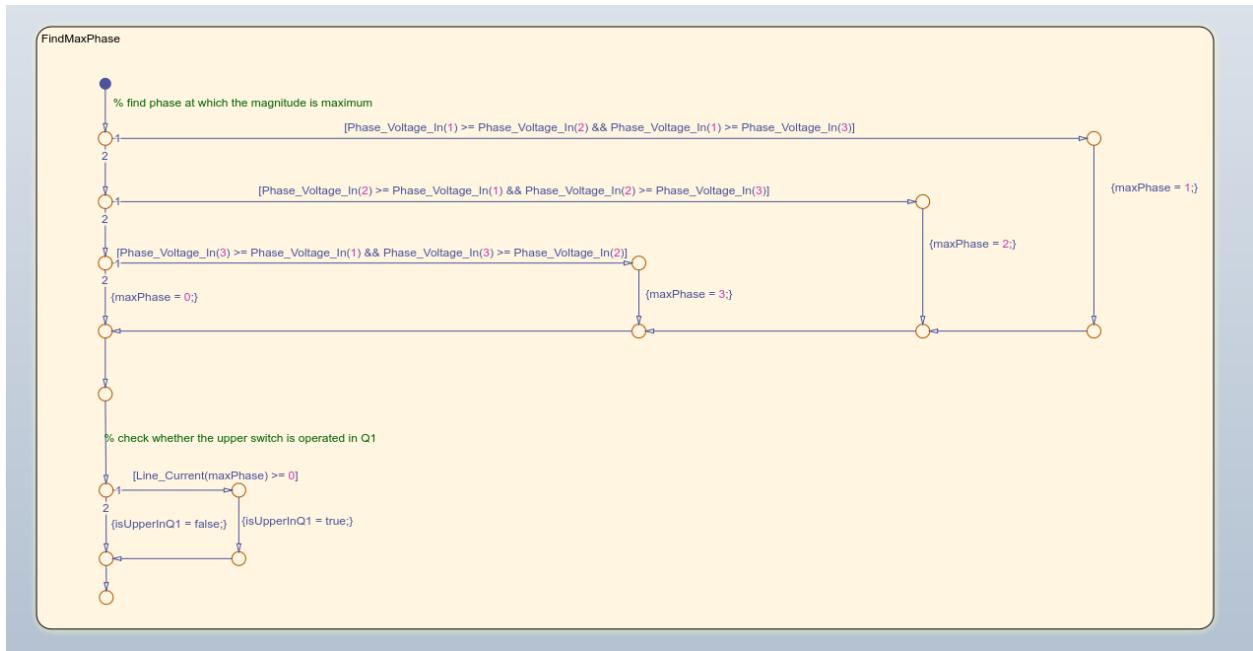
## 6.2.2 Simulink Model ในส่วนของการปรับปรุงสัญญาณ



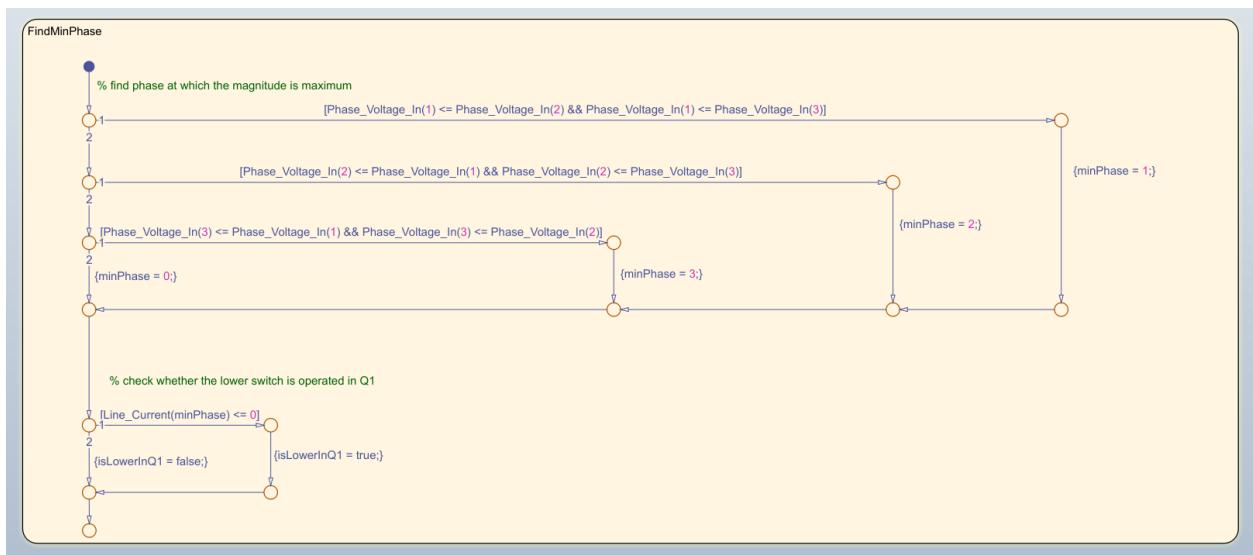
รูป 66: ชั้นที่ 4: ภายใน Subsystem ของระบบปรับปรุงสัญญาณ



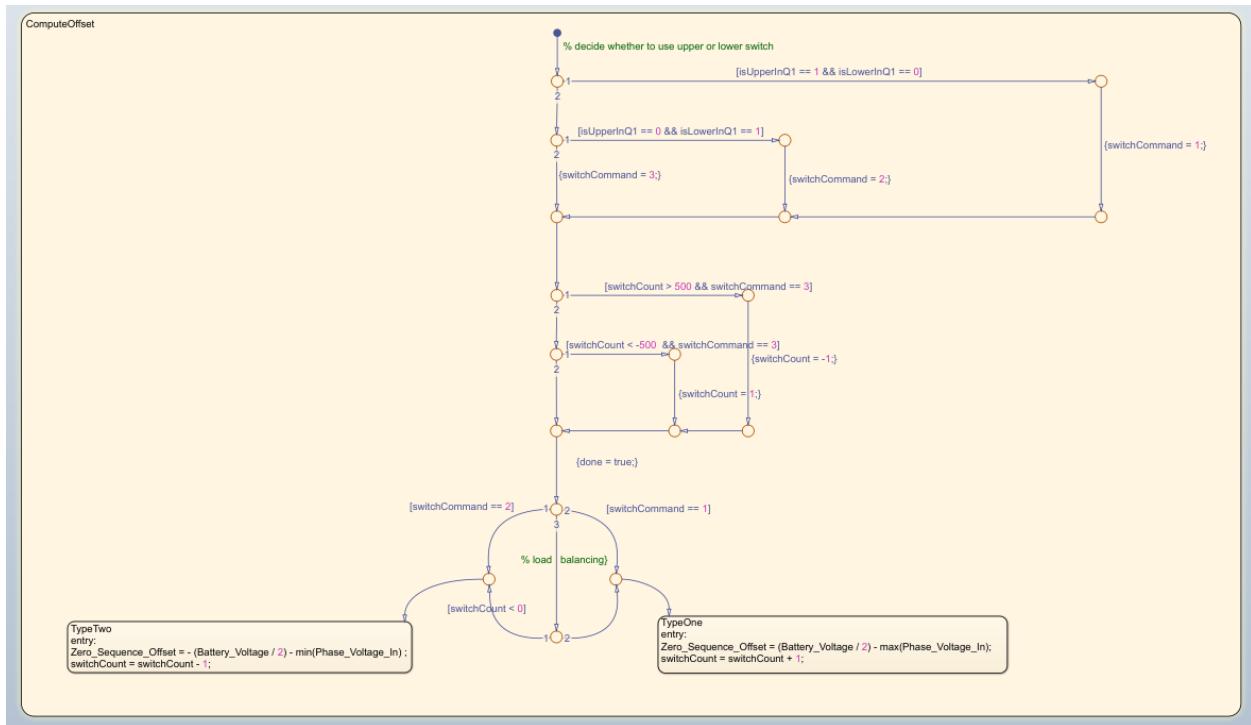
รูป 67: ชั้นที่ 5: ภายใน Stateflow chart ของตัวมอดูลต์แบบสองแขน และติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง



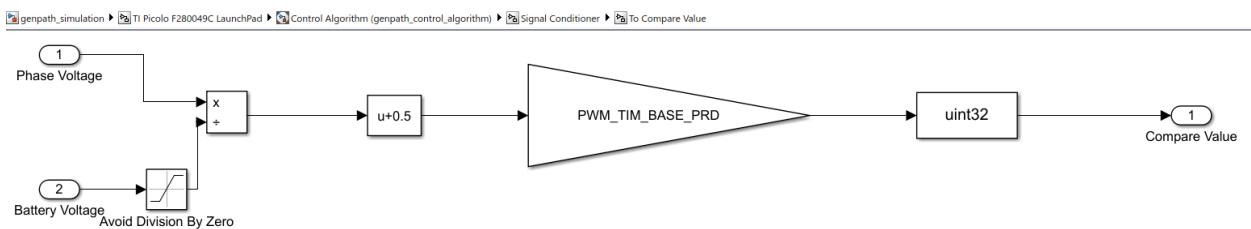
รูป 68: ชั้นที่ 6: ภายใน Subchart ที่ใช้ในการหาเฟสที่มีแรงดันคำสั่งมากที่สุด



รูป 69: ชั้นที่ 6: ภายใน Subchart ที่ใช้ในการหาเฟสที่มีแรงดันคำสั่งน้อยที่สุด

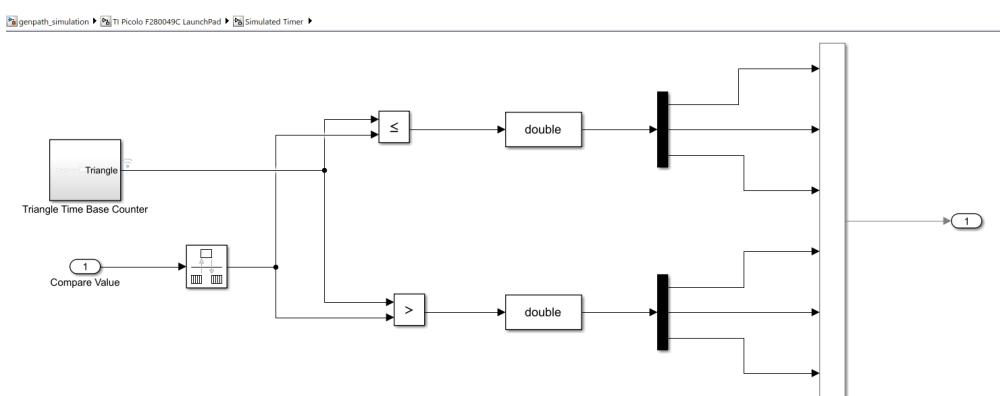


รูป 70: ชั้นที่ 6: ภายใน Subchart ที่ใช้ในการคำนวณแรงดันลำดับศูนย์



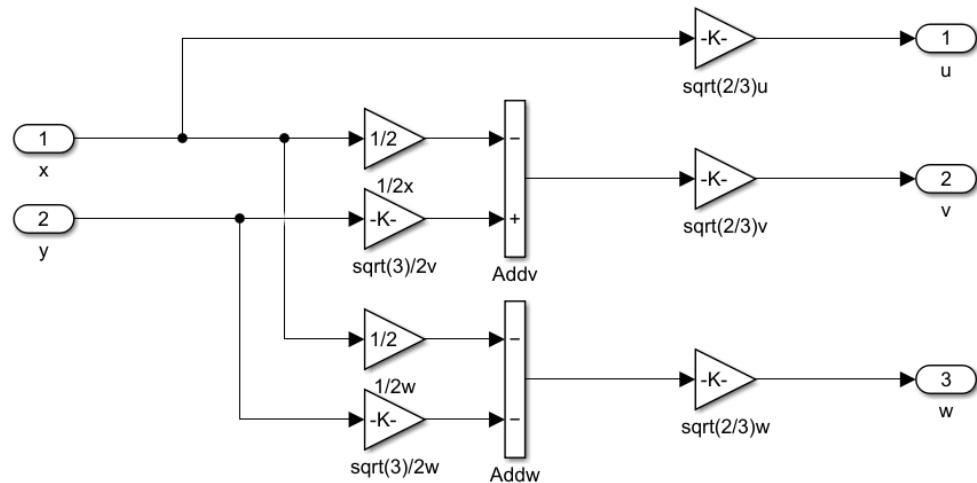
รูป 71: ชั้นที่ 5: ส่วนของการสเกลแรงดันคำสั่งให้เป็นค่าที่ป้อนให้ตัวตั้งเวลาของระบบผังตัว

### 6.2.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองอุปกรณ์รอบข้างของระบบผังตัว



รูป 72: ชั้นที่ 3: การจำลองตัวตั้งเวลาของระบบผังตัว

### 6.3 Simulink model ของการแปลงผกผันของคลาร์ก(Inverse Clarke's Transformation)



รูป 73: การแปลงผกผันของคลาร์ก(Inverse Clarke's Transformation)