

ข้อเสนอโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า วิชา 2102490

อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานชนิดเครื่องจักรกลไฟฟ้า

Power Electronics for Electromechanical Energy-Harvesting System

นายณัฐพล กابแก้ว เลขประจำตัว 6130176521

นายสันติ วงศ์ว่องประเสริฐ เลขประจำตัว 6130553421

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกุhin

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

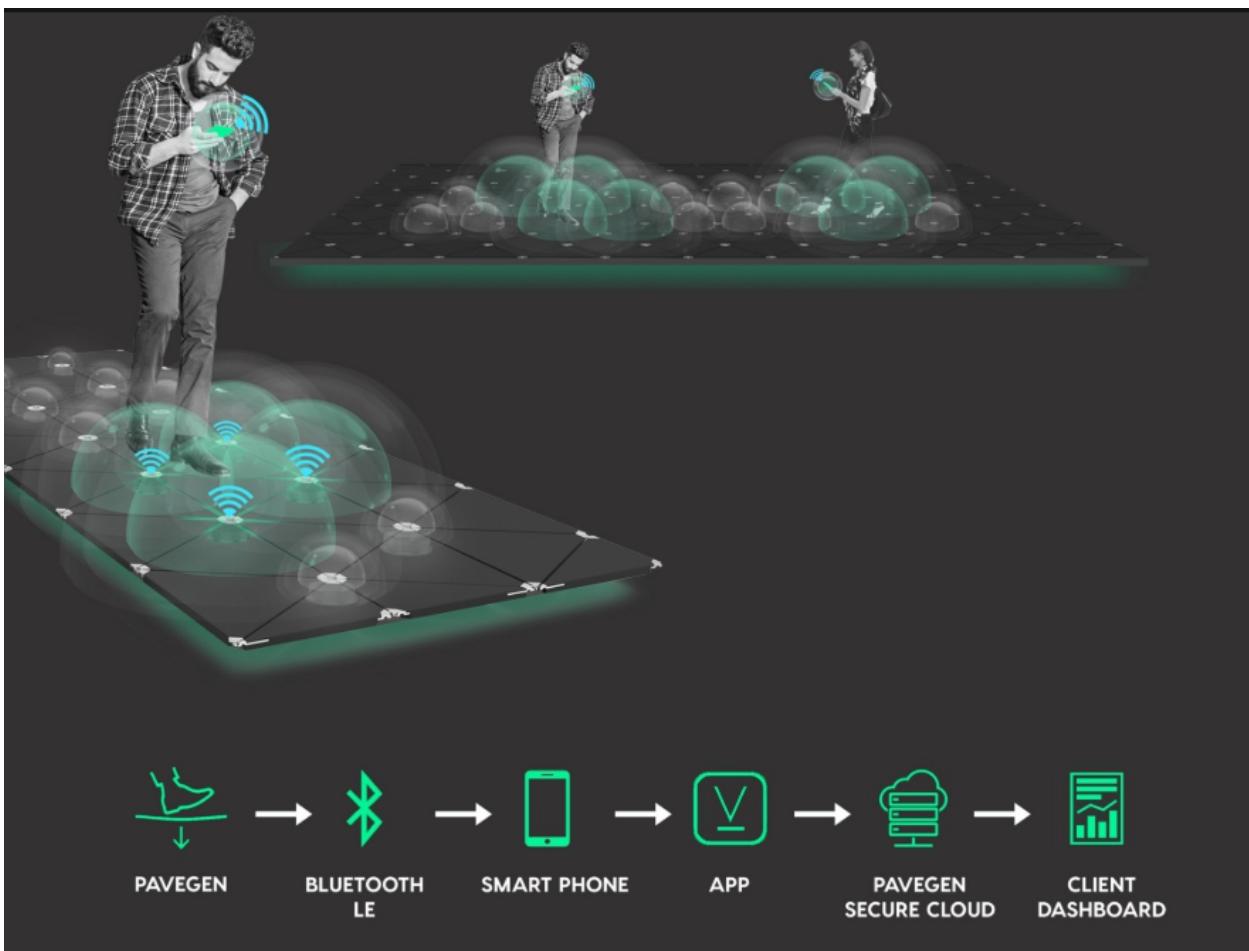
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

# สารบัญ

<b>1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 บทคัดย่อ . . . . .	1
1.2 ที่มาและความสำคัญของโครงการ . . . . .	1
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ . . . . .	2
1.4 ขอบเขตของโครงการ . . . . .	3
1.5 ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากโครงการ . . . . .	3
<b>2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการmodุเลตแบบสองแขวน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง (Two Arm Modulation and First Quadrant Tracking Algorithm) . . . . .	3
2.1.1 การmodุเลตความกว้างพัลส์แบบใช้สัญญาณพาหะ และ อินเวอร์เตอร์โหมดแรงดันแบบสามเฟส . . . . .	3
2.1.2 กำลังสูญเสียในสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ . . . . .	4
2.1.3 การนำกระแสในจตุภาคที่ 3 ของทรานซิสเตอร์สามไไฟฟ้าแกลเลียม ในไตรท์ [1] . . . . .	5
2.1.4 การลดกำลังสูญเสียในการmodุเลตแบบใช้สัญญาณพาหะ ด้วยการmodุเลตแบบสองแขวน . . . . .	7
2.1.5 การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการmodุเลตแบบสองแขวนด้วยการติดตามการทำงานในจตุภาคที่ 1 . . . . .	8
2.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking Algorithm; MPPT) . . . . .	12
2.2.1 ข้อมูลรายละเอียดและหลักการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน . . . . .	12
2.2.2 การเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า (Electrical analogy) . . . . .	13
2.2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสนิดแม่เหล็กการ . . . . .	14
2.2.4 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับการติดตามจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking) สำหรับวงจร ก๊อกเก็บพลังงาน . . . . .	15
<b>3 ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น</b>	<b>17</b>
3.1 การทดสอบอัลกอริทึมการmodุเลตแบบสองแขวน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง . . . . .	17
3.1.1 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับความถี่คำสั่งของอินเวอร์เตอร์ . . . . .	18
3.1.2 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับค่าความหนี้น้ำของโหลด . . . . .	20
3.1.3 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับค่าขนาดของแรงดันคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ . . . . .	21
3.2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสนิดแม่เหล็กการ . . . . .	23
3.3 ผลการจำลองของแบบจำลองทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสนิดแม่เหล็กไฟฟ้า บนโปรแกรม MATLAB/Simulink . . . . .	26
<b>4 บทสรุป</b>	<b>31</b>
4.1 สรุปผลการดำเนินการ . . . . .	31
4.1.1 การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการmodุเลตแบบสองแขวน และการติดตามการทำงาน ในจตุภาคที่หนึ่ง . . . . .	31
4.1.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด . . . . .	31
4.2 แผนการดำเนินงาน . . . . .	31
4.3 ปัญหา อุปสรรค และแนวทางแก้ไข (ถ้ามี) . . . . .	32
<b>5 เอกสารอ้างอิง</b>	<b>32</b>
<b>6 ภาคผนวก</b>	<b>33</b>
6.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบพลวัติของระบบ . . . . .	33
6.1.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแบบเตอร์ริ . . . . .	33
6.1.2 Simulink Model ในส่วนของการจำลองบอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI BOOSTXL-3PHGANINV . . . . .	34
6.1.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบชิงกลและมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กการ . . . . .	35
6.1.4 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแรงที่เท้าเหยียบแผ่นพื้น . . . . .	36
6.2 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมที่ทำงานบนระบบฟังตัว TI Picolo F280049C LaunchPad . . . . .	36
6.2.1 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด . . . . .	37

6.2.2	Simulink Model ในส่วนของการปรับปรุงสัญญาณ . . . . .	38
6.2.3	Simulink Model ในส่วนของการจำลองอุปกรณ์robเข้างของระบบฝังตัว . . . . .	41
6.3	Simulink model ของการแปลงผกผันของคลาร์ก(Inverse Clarke's Transformation) . . . . .	42



รูป 1: โปสเตอร์ของ Pavegen™

## 1 บทนำ

### 1.1 บทคัดย่อ

แผ่นพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยมีความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานต่ำ ได้โครงงานฉบับนี้ มีจุดประสงค์ในการพัฒนาแผ่นพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงน้ำส ประเภทแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Motor) โดยใช้โปรแกรม MATLAB™/Simulink™ โดยโปรแกรม จะช่วยในการทดสอบ (Test) ทวนสอบ (Verify) ออกแบบให้ได้ผลลัพธ์ที่สุด (Optimize design) และใช้โปรแกรมในการสร้างโค้ดภาษาซี และซีพลัสพลัส ที่ถูกออกแบบสำหรับระบบผังตัว (Generate C/C++ Code Optimized for Embedded Systems) จากแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ และใช้เทคนิคในการลดกำลังสูญเสียใน อินเวอร์เตอร์ คืออัลกอริทึมในการmodulateแบบสองแขน (Two Arm Modulation Algorithm) และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง (First Quadrant Tracking Algorithm) และได้เพิ่มประสิทธิภาพของระบบโดยรวมด้วยการนำอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลัง สูงสุด (Maximum Power Point Tracking Algorithm; MPPT )

### 1.2 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวของมนุษย์นั้น เป็นเรื่องที่น่าสนใจ สามารถนำมาทำให้เกิดขึ้นจริงได้ เช่นในกรณีของแผ่นพื้นเก็บ พลังงานนั้น ได้ถูกนำมาสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถสร้างรายได้ และได้มีการติดตั้งใช้งานแล้วในหลายๆ ที่ เช่นกรณีตัวอย่างของ Pavegen™ Pavegen™ เป็นบริษัท Startup ที่สร้างแผ่นพื้นเก็บพลังงาน เพื่อที่จะจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ขนาดเล็ก เช่น เชนเชอร์ต่างๆ ที่เชื่อมต่อกับ ระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things; IoT) หรืออุปกรณ์ส่องสว่างประเภทหลอด LED หรือกักเก็บพลังงานไว้ในแบตเตอรี่

จากค้นคว้าจากการศึกษาในครั้งก่อนๆ [2] [3] ได้ค้นพบว่า พลังงานที่ได้ในแต่ละการเหยียบแต่ละครั้งนั้น มีค่าน้อยมาก นั่นคือประมาณ 1-5 จูล เท่านั้น ดังนั้น หัวใจในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากระบบดังกล่าว คือการมีประสิทธิภาพที่ดี จึงจะสามารถเก็บพลังงานได้เพียงพอ กับ การใช้งานต่อไป ดังนั้น การศึกษาในโครงงานฉบับนี้ จึงได้มุ่งเน้นในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบเก็บพลังงานเป็นหลัก



รูป 2: สถานที่ที่ได้มีการติดตั้ง Pavegen™

จากโครงการปี 2563 กำลังไฟฟ้าจากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ได้เป็นค่าสูงสุด โดยจากการทดสอบมีค่าประมาณ หนึ่งในสี่ ของพลังงาน ขาเข้าที่มาจากการแรงเหาเหียบของมนุษย์ และไม่ได้มีการลดการกำลังสูญเสียของวงจรแปลงผัน โครงการปี 2564 นี้ มีการพัฒนาการออกแบบทางไฟฟ้าและทางกลเพื่อประปุรุ่งประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน โดยมี 2 ส่วน คือ

1. สร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กถาวร เพื่อทราบเงื่อนไขของแรงดันออกตามหลักการติดตามจุดทำงานสูงสุด
2. การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการ模ดูเลตแบบสองแขวน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง

### 1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

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

#### 1.4 ขอบเขตของโครงการ

1. โครงการนี้ใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร เป็นตัวกำเนิดไฟฟ้า
2. โครงการนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ TI™ F280049C ที่อยู่บนชุดทดลอง Picolo™ LaunchPad™ เป็นระบบผังตัวแคนกลางในคำนวณอัลกอริทึมต่างๆ
3. โครงการนี้ใช้บอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI™ BOOSTXL-3PHGaNINV เป็นสวิตช์สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์
4. โครงการนี้จะโปรแกรมระบบผังตัวดังกล่าวผ่านการสร้างโค้ดบนแพลตฟอร์ม Simulink™ Embedded Coder™

#### 1.5 ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากโครงการ

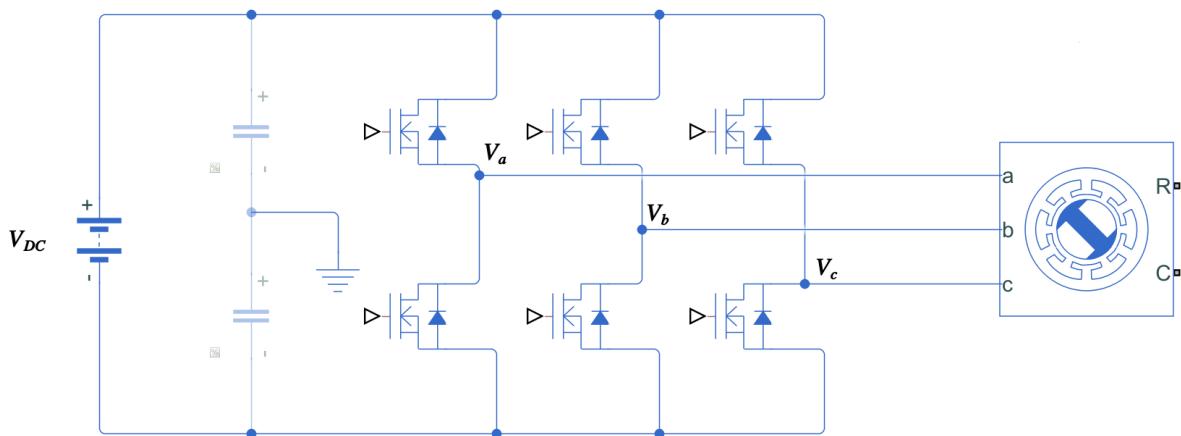
1. แผ่นพื้นเก็บพลังงานต้นแบบที่มีประสิทธิภาพสูง และสามารถใช้งานได้จริง
2. อัลกอริทึมในการลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ที่สามารถนำไปใช้กับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และยังสามารถนำไปใช้กับอินเวอร์เตอร์ใดๆ นอกเหนือจากระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานได้อีกด้วย
3. อัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงาน ที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด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

## 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

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

#### 2.1.1 การลดความกว้างพลังแบบใช้สัญญาณพาหะ และ อินเวอร์เตอร์ใหม่แรงดันแบบสามเฟส

ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยที่ไม่เป็นน้ำยาตัวยึดการสร้างสนามแม่เหล็กหมุน มาแทนที่ยาน้ำให้เกิดแรงบิด ซึ่งในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างแบบแม่เหล็กถาวรนั้นอาศัยการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนโดยไฟฟ้ากระแสสลับ อินเวอร์เตอร์ จึงเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างแบบแม่เหล็กถาวรด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ในโครงการนี้ได้นำเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างแบบแม่เหล็กถาวรสามเฟส มาเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน โดยจะเก็บพลังงานที่ผลิตได้ไว้กับแบตเตอรี่ ในโครงการนี้ จึงเลือกใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีพอโลидรูปที่ 3



รูป 3: 拓扑ology ของอินเวอร์เตอร์สามเฟส

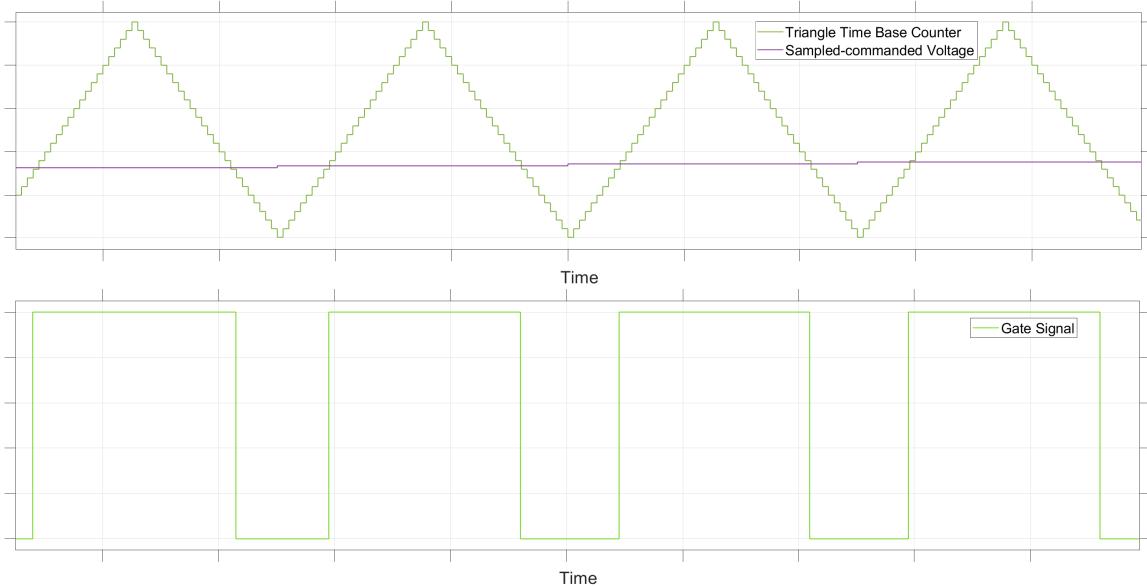
อินเวอร์เตอร์ทอโพโลيدที่ได้นำเสนอมาข้างต้น สามารถสร้างแรงดันออกที่แตกต่างกันได้เพียงแค่ 2 ค่าเท่านั้นคือ

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

โดยที่  $V_t$  เป็นแรงดันที่ข้อวอกของอินเวอร์เตอร์ และถ้าหากพิจารณาให้กึ่งกลางบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นจุดอ้างอิงแรงดัน จะได้ว่า

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

เนื่องจากกระบวนการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างสามเฟสประเภทแม่เหล็กการนั่น จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับคลื่นรูปไซน์ ดังนั้น เทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยใช้สัญญาณพาหะ (Carrier-based Pulse Width Modulation) จึงได้ถูกนำมาใช้ โดยการมอดูเลต ความกว้างพัลส์โดยใช้สัญญาณพาหะมีหลักการในการทำงานคือ นำสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยม มาเปรียบเทียบกับสัญญาณคำสั่ง โดยผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบนั้น จะได้เป็นสัญญาณขั้นนำของสวิตช์ ดังรูปที่ 2.1.1 ซึ่งจะส่งผลให้ แรงดันที่ข้อวอกของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับแรงดันคำสั่ง



รูป 4: การมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยใช้สัญญาณพาหะ

จากรูปข้างต้น จะเห็นได้ว่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณขั้นนำนั้น เปลี่ยนไปตามขนาดของสัญญาณคำสั่ง และสัญญาณที่จะนำมามาเปรียบเทียบนั้น จะเป็นสัญญาณที่ถูกสุ่มตัวอย่างแล้วคงค่า (Sample and Hold) เพราะว่า อัลกอริทึมการมอดูเลตที่เลือกใช้ในโครงงานฉบับนี้นั้น เป็นการคำนวนระบบฝังตัว ซึ่งเป็นการประมวลผลในโดเมนดิจิทัล

### 2.1.2 กำลังสูญเสียในสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

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

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

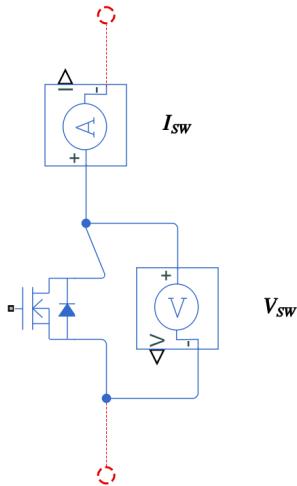
จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่า ในขณะที่กำลังเปิดสวิตช์ กระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์จะเหลือมกัน ซึ่งเกิดจากโครงสร้างทางกายภาพของทรานซิสเตอร์ จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในขณะสวิตช์ ซึ่งจะคำนวณได้จาก

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

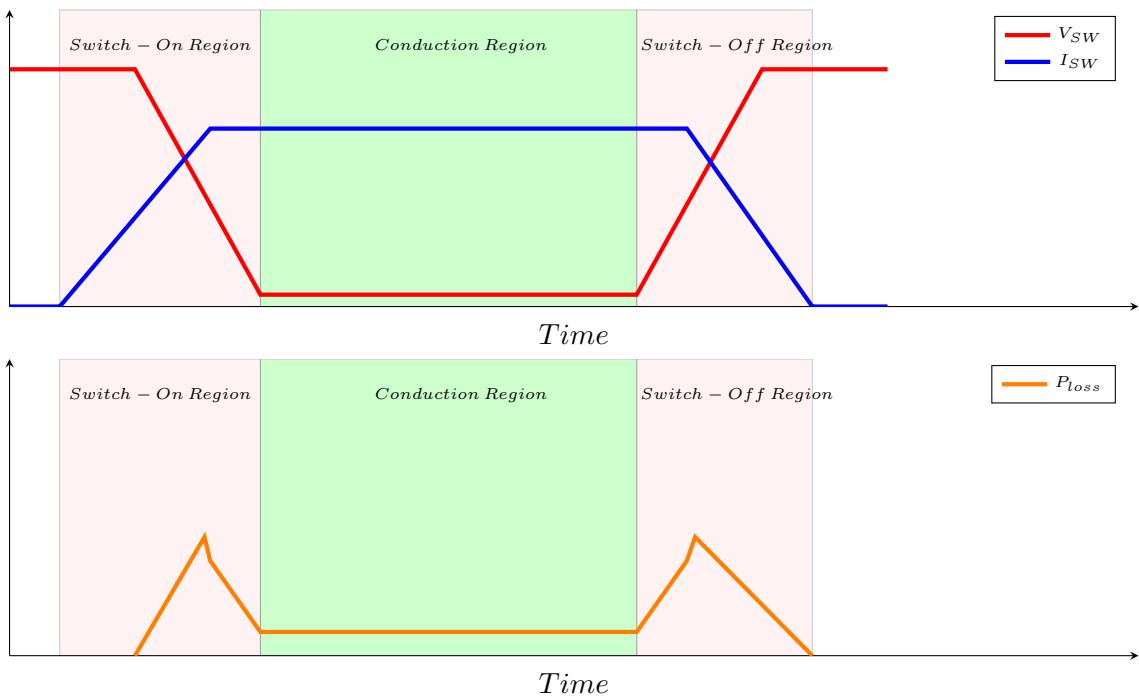
แต่เมื่อพอสวิตช์เปิดเต็มที่แล้ว สวิตช์จะมีแรงดันตกคร่อมอยู่เล็กน้อย ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในขณะนำกระแส

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

เมื่อ  $v_{sw(on)}$ ,  $i_{sw(on)}$  คือแรงดันตกคร่อมสวิตช์ และกระแสที่流ผ่านสวิตช์ในขณะนำกระแส ตามลำดับ



รูป 5: นิยามของ  $V_{SW}, I_{SW}$



รูป 6: แรงดันต่อกคร่อมสวิตช์ กระแสของสวิตช์ และกำลังสูญเสียในสวิตช์

กำลังสูญเสียระหว่างสวิตช์นั้น ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะสมบัติของสวิตช์ที่เลือกใช้ และจำนวนครั้งในการสวิตช์ นั้นคือ ถ้าหากสวิตช์ที่เลือกใช้มีคุณลักษณะสมบัติที่ทำให้อยู่ในย่านกำลังสวิตช์นาน หรือมีจำนวนครั้งในการสวิตช์มาก ก็จะทำให้กำลังสูญเสียขณะสวิตช์สูงตามไปด้วย

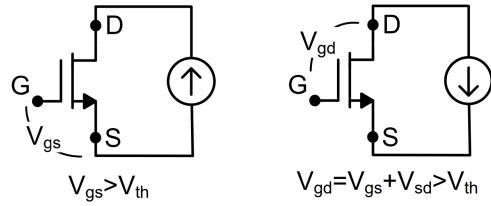
กำลังสูญเสียจะนำกระแสเน้น ขึ้นอยู่กับว่าในขณะนำกระแสเน้นมีแรงตันต่อกคร่อมสวิตช์มากแค่ไหน ถ้าหากแรงตันต่อกคร่อมสวิตช์มาก ก็จะทำให้กำลังสูญเสียขณะนำกระแสมากขึ้นตามมา

### 2.1.3 การนำกระแสในจุดภาคที่ 3 ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแกแลลีียม ในไตรท์ [1]

ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแกแลลีียม ในไตรท์ หรือ แกน (Gallium Nitride; GaN) ถือเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับผู้ออกแบบในงานอิเล็กทรอนิกส์ กำลัง เพราะว่าทรานซิสเตอร์แกน มีข้อดีกว่าทรานซิสเตอร์แบบชิลิคโอลินในหลายด้านคือ การไม่มีเบื้องตัวโดยสาร ซึ่งทำให้มี reverse recovery loss ในเบื้องตัวโดยสาร ข้อได้เปรียบนี้ทำให้ทรานซิสเตอร์แบบแกนมีการกำลังสูญเสียในขณะสวิตช์น้อยกว่าแบบดั้งเดิม ทำให้ทำงานได้ที่ความถี่สูงขึ้น ใช้ทรานซิสเตอร์ตัวเล็กลงได้ และความร้อนน้อยลง ซึ่งในโครงงานฉบับนี้ ได้เลือกใช้ทรานซิสเตอร์แกนเป็นสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์

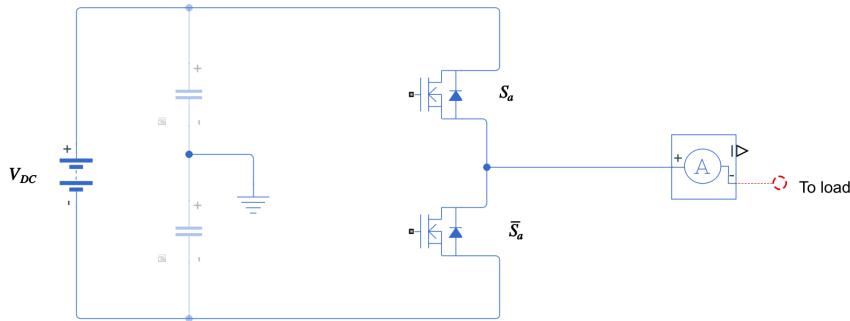
เนื่องจากโครงสร้างที่ไม่เหมือนกันของทรานซิสเตอร์แบบแกน ทำให้การนำกระแสในจุดภาคที่สามของทรานซิสเตอร์แบบแกนนั้นแตกต่างไปจากทรานซิสเตอร์แบบชิลิคโอลินคือ การนำกระแสผ่านบ่อได้โดย

เงื่อนไขที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์แกนนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า (Forward) และย้อนกลับ (Reverse) คือ



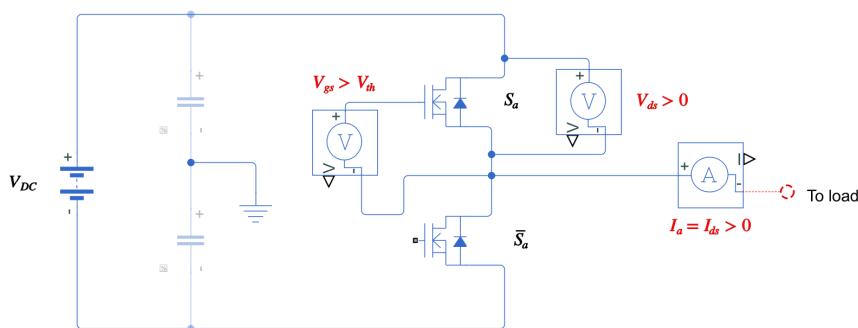
รูป 7: เงื่อนไขที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์แกนนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า และย้อนกลับ

ถ้าหากพิจารณาตัวอย่างที่เกิดขึ้นจริงในอินเวอร์เตอร์เพื่อให้เห็นภาพพจน์ชัดเจนขึ้น ตามรูปวงจรของอินเวอร์เตอร์ ที่ตัดมาพิจารณาเฉพาะหนึ่งเฟส ตามรูปที่ 8



รูป 8: กรณีตัวอย่างการนำกระแสที่เกิดขึ้นจริงในอินเวอร์เตอร์

เรา假定ให้สวิตช์  $S_a$  เป็นสวิตช์ที่เราสนใจ โดยถ้าหากเราขับนำสวิตช์ให้สวิตช์นำกระแส (On) นั่นคือ เราขับนำสัญญาณขา  $V_{gs} > V_{th}$  และถ้าหากโหลดที่ต่ออยู่กับขาของสวิตช์  $S_a$  ดึงกระแสออกไปจากอินเวอร์เตอร์ นั่นคือ  $I_a > 0$  จะทำให้ แรงดันต่อกคร่อมขาเดренของสวิตช์  $S_a$  เป็นค่าบวก นั่นคือ  $V_{ds} > 0$  เนื่องจากสวิตช์  $S_a$  กำลังนำกระแสอยู่ ดังนั้นสวิตช์  $S_a$  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 สวิตช์นำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า จุดทำงานที่กล่าวถึงข้างต้นจะแสดงในรูป 10

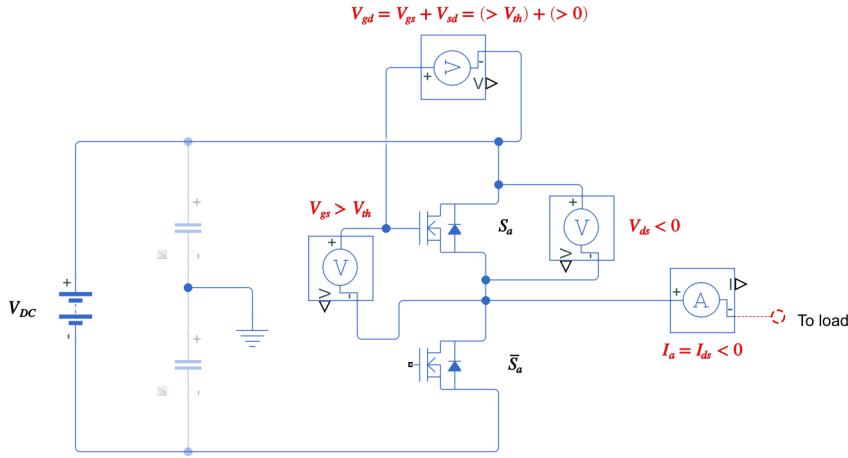


รูป 9: กรณีตัวอย่างการนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า:  $V_{gs} > V_{th}, I_{ds} > 0$

ถ้าหากพิจารณากรณีตัวอย่างที่เกี่ยวกับการขับนำสวิตช์ในลักษณะเดิมคือ การขับนำสัญญาณขา  $V_{gs} > V_{th}$  แต่มีสิ่งที่เปลี่ยนไปคือ ทิศทางการไหลของกระแส นั่นคือ ถ้าหากโหลดมีการดึงกระแสเข้าอินเวอร์เตอร์  $I_a = I_{sd} > 0$  จะทำให้ แรงดันต่อกคร่อมขาเดรนของสวิตช์เป็นค่าลบ 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  $I_{ds} < 0$  จะทำให้สวิตช์นำกระแส反相 ได้โดย

เราจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันขณะนำกระแสไปข้างหน้าได้โดย

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

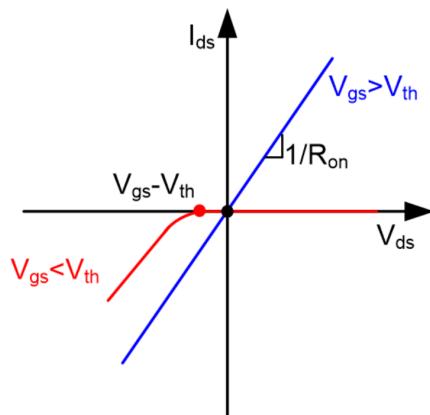


รูป 10: กรณีตัวอย่างการนำกระแสในทิศทางย้อนกลับ:  $V_{gd} > V_{th}$ ,  $I_{ds} < 0$

เมื่อแรงดันที่ขาเกตเทียบกับขั้วซอร์สของทรานซิสเตอร์ มากกว่าค่าแรงดันขีดแบ่ง และแรงดันที่ขาเดรนเทียบกับซอร์สเป็นบวก จะทำให้เกนนำกระแสในจตุภาคที่หนึ่ง โดยที่เรนิยาม  $R_{ds(on)}$  เป็นความต้านทานสมมูลของทรานซิสเตอร์ในขณะที่กำลังทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง และเราก็สามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันขณะนำกระแสเสียย้อนกลับได้โดย

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

ในการนำกระแสเสียย้อนกลับ ข้อมูลต่างๆ จะเป็นทวิภาคณ์ของข้อมูลในขณะนำกระแสไปข้างหน้าเลยคือ เมื่อแรงดันที่ขาเกตเทียบกับเดรน มากกว่าค่าแรงดันขีดแบ่ง และแรงดันที่ขาซอร์สเทียบกับเดรนเป็นบวก จะทำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแสในจตุภาคที่สาม



รูป 11: พฤติกรรมการนำกระแสในจตุภาคที่หนึ่ง และจตุภาคที่สามของทรานซิสเตอร์แกน

จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่า แรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ในจตุภาคที่สาม จะมากกว่าแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ในจตุภาคที่หนึ่งที่ค่ากระแสเท่ากัน ซึ่งทำให้การนำกระแสในจตุภาคที่สามนั้นเกิดลักษณะเสียในขณะนำกระแสมากกว่าการนำกระแสในจตุภาคที่หนึ่ง

#### 2.1.4 การลดกำลังสูญเสียในการมอดูลเตตแบบใช้สัญญาณพาหะ ด้วยการมอดูลเตตแบบสองแขน

จากที่ได้นำเสนอไปแล้วในส่วนของการมอดูลเตตแบบใช้สัญญาณพาหะ ว่า เป็นการมอดูลเตตที่มีจำนวนครั้งในการสวิตช์มาก ซึ่งทำให้กำลังสูญเสียในขณะสวิตช์สูง แต่เรามีเทคนิคในการลดกำลังสูญเสียของสัญญาณสวิตช์ในการมอดูลเตตแบบใช้สัญญาณพาหะด้วยการลดจำนวนครั้งในการสวิตช์คือ การมอดูลเตตแบบสองแขน

แขนของการมอดูลเตต คือ คู่ของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแรงดันออกที่ข้อของอินเวอร์เตอร์ จะประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ตัวบน ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ที่ต่ออยู่กับบัสแรงดันไฟตรงที่ขัวบวก และทรานซิสเตอร์ตัวล่าง ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ที่ต่ออยู่กับบัสแรงดันไฟตรงที่ขัวลบ จากภาพโดยอ้างอิงอินเวอร์เตอร์ที่เราเลือกให้ในโครงงานฉบับนี้ ซึ่งแสดงไว้ใน รูปที่ 3 จะเห็นได้ว่า จะมีแขนของการมอดูลเตตทั้งหมดสามแขน

จากการพิจารณาจะเห็นได้ว่า หากเราต้องการสร้างแรงดันรูปไข่ที่ขึ้นของอินเวอร์เตอร์ เราจำเป็นต้องสวิตซ์ทั้งสามชั้นไปพร้อมๆ กัน แต่ถ้าหากเราพิจารณาความจริงที่ว่า แรงดันที่สร้างกระแสของมอเตอร์ที่ต่อแบบสามเฟสสามสาย เป็นแรงดันระหว่างสาย คือ

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

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

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

และถ้าหากเราเพิ่มแรงดันสำาบศูนย์ (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

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

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

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

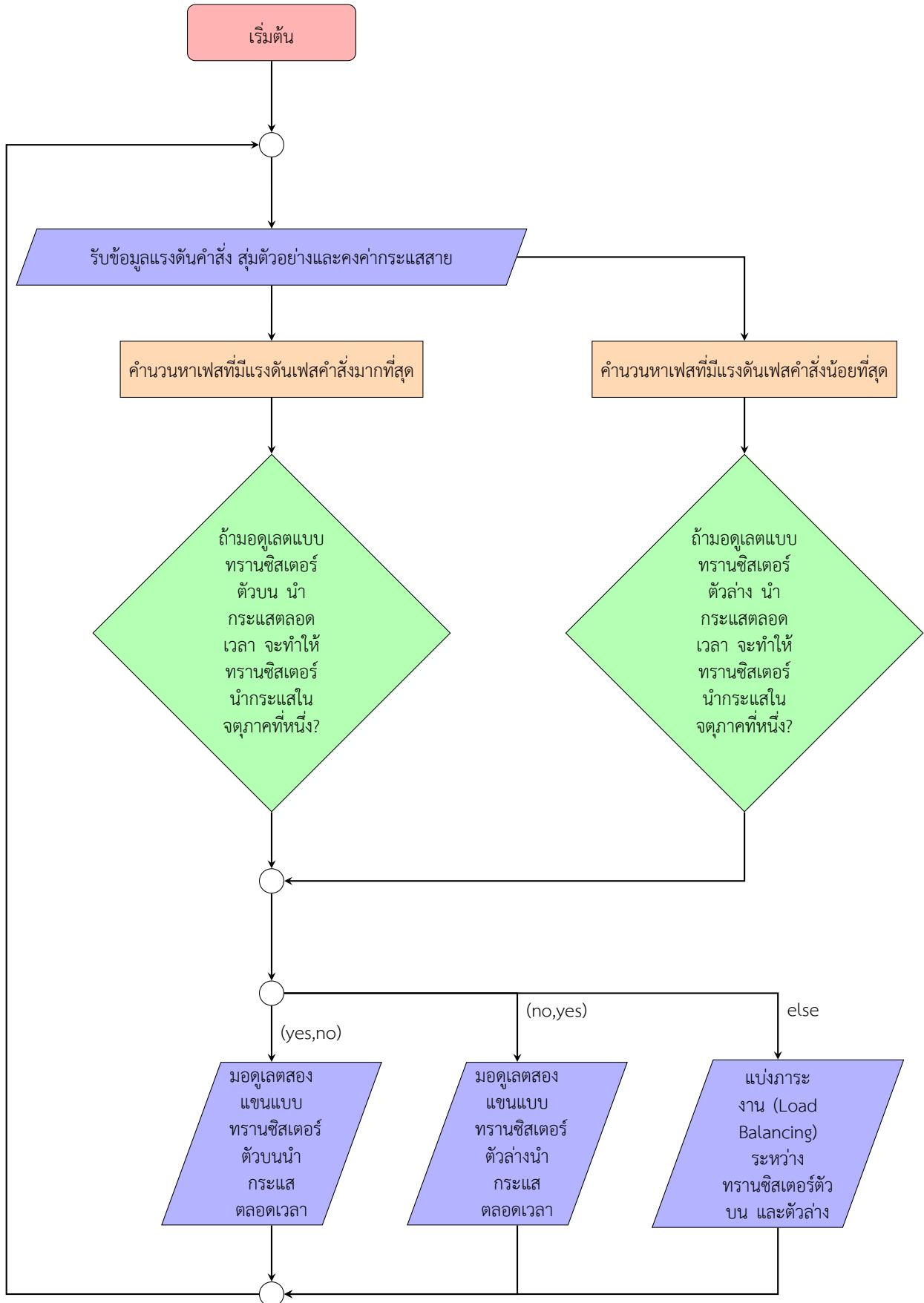
ดังนั้น เรายังสามารถเลือกแรงดันสำาบศูนย์ที่จะเพิ่มให้กับแรงดันเฟสคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ โดยมีเป้าหมายคือ ทำให้แรงดันคำสั่งในเฟส ได้เฟสหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเท่ากับแรงดันบวก หรือลบของบัสแรงดันกระแสตรง เพื่อที่จะทำให้แขนของการมอตอร์เคลื่อนที่ได้ ปิด หรือ เปิดตลอดเวลา นั่นคือ

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

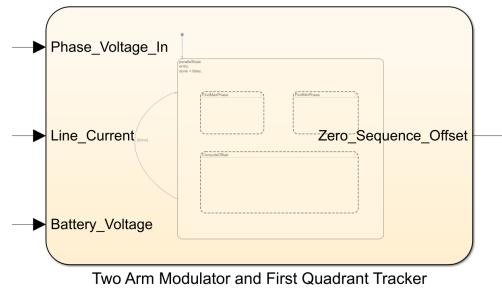
ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ตัวบนกำลังเปิดตลอดเวลา ทรานซิสเตอร์ตัวล่าง ก็จะปิดตลอดเวลาด้วย การที่ทรานซิสเตอร์แขวนได้แขนหนึ่งเปิด หรือปิดตลอดเวลา จะทำให้ลดจำนวนครั้งในการสวิตช์ได้หนึ่งในสามเท่า ก็จะช่วยลดกำลังสูญเสียในขณะสวิตช์ได้

### 2.1.5 การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการมอตอร์แบบสองชั้นด้วยการติดตามการทำงานในจุดภาคที่ 1

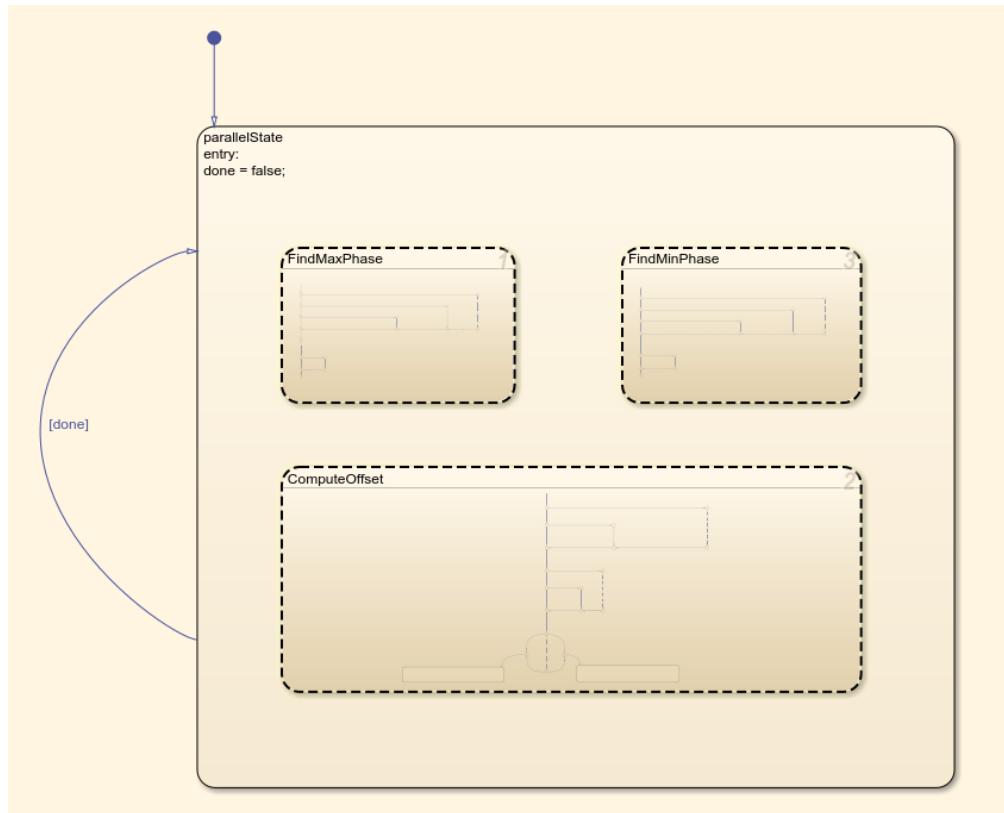
จากผลลัพธ์ที่ได้อภิปรายมาในส่วนที่แล้ว เราได้ทราบว่า เราเมื่อสิรจะในเลือกการมอตอร์แบบสองชั้นได้สองประเภทคือ แบบทรานซิสเตอร์ ตัวบนนำกระแสตลอด และทรานซิสเตอร์ตัวล่างนำกระแสตลอด ดังนั้น เราจะใช้ข้อได้เปรียบนี้ในการเลือกรูปแบบการมอตอร์แบบสองชั้น ให้เกิดประสิทธิภาพสูงที่สุด นั่นคือ การหลีกเลี่ยงการทำงานในจุดภาคที่ 3 สำหรับทรานซิสเตอร์ตัวที่จะนำกระแสตลอดเวลา โดยจะมีหลักการในการคำนวณค่าแรงดันเฟสสำาบศูนย์ที่จะบวกเข้าไป เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ ตามผังงานในรูปที่ 12 ซึ่งจากผังงานที่ได้นำเสนอไปข้างต้น เรายังสามารถนำไปสร้างเป็นแผนภูมิการเปลี่ยนสถานะ บน Simulink™/Stateflow™ ได้ดังที่แสดงไว้ในรูป



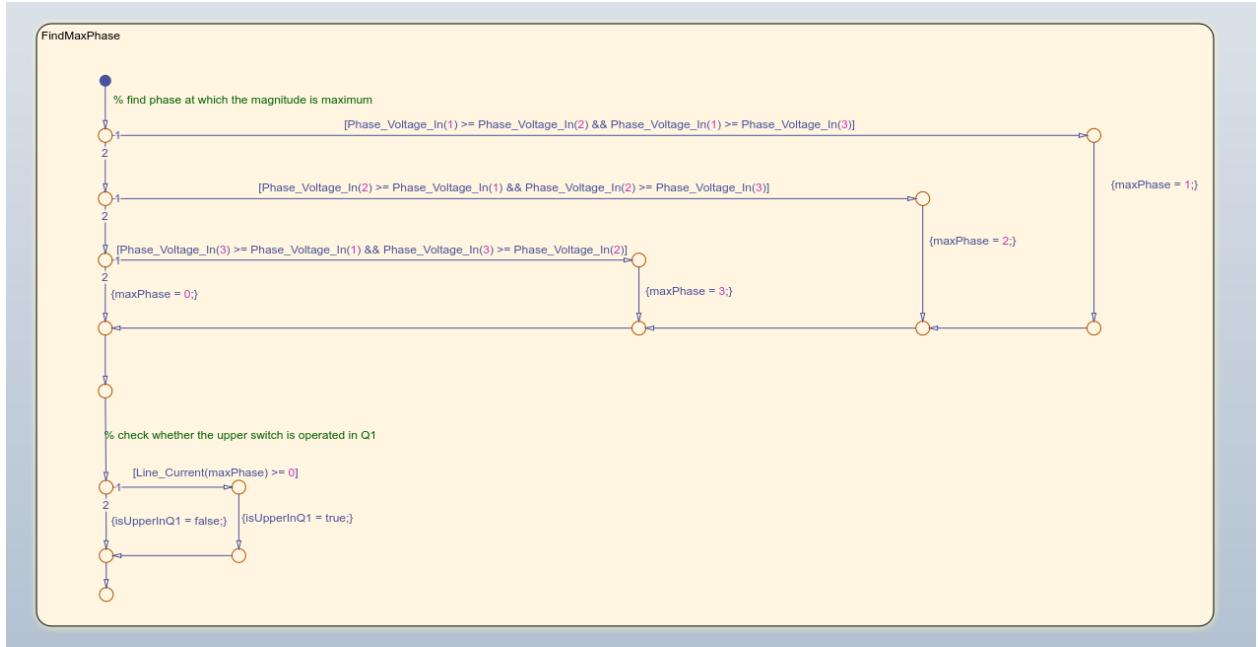
รูป 12: ผังงานของอัลกอริทึมในการคำนวนแรงดันลำดับศูนย์เพื่อติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่งของสวิตช์ที่ถูกมอดูเลตแบบสองแขน



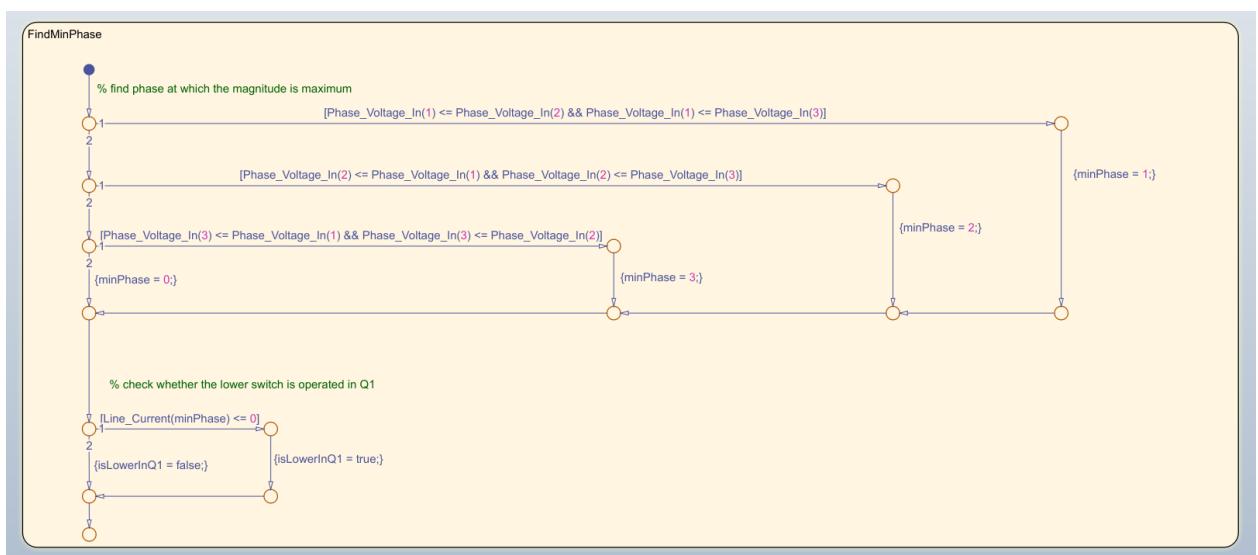
รูป 13: บล็อก Stateflow ของอัลกอริทึมในการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง



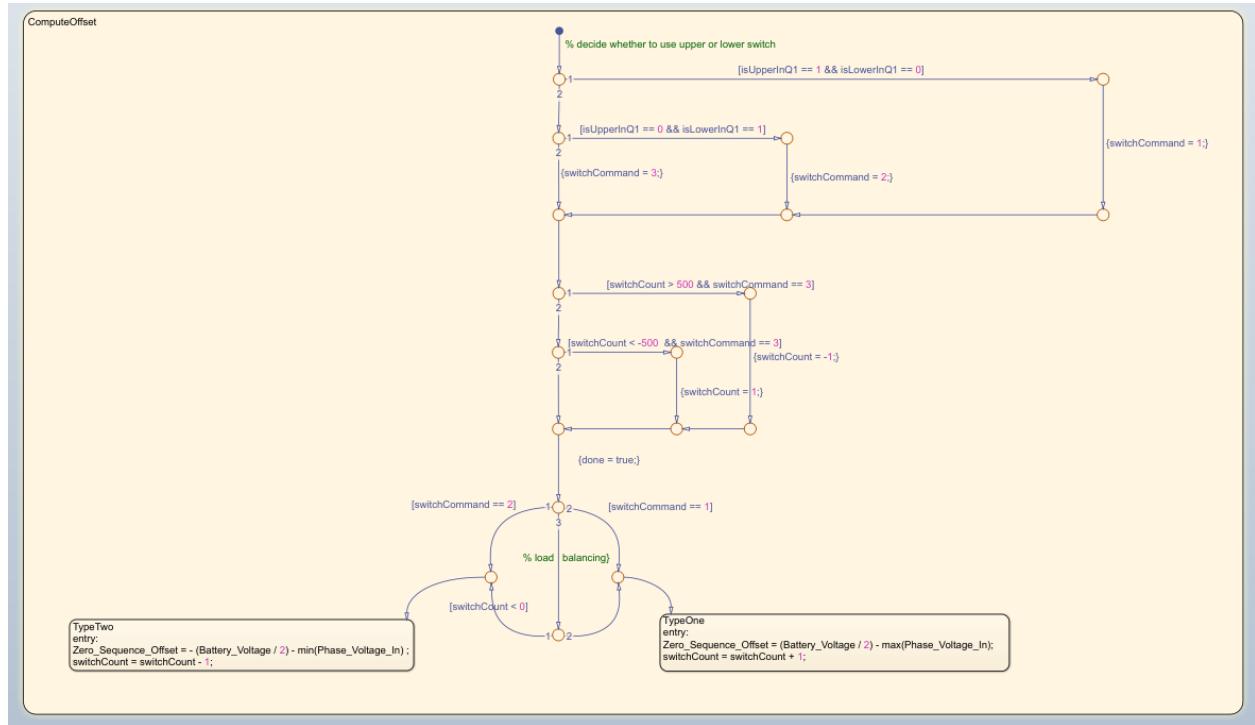
รูป 14: ภาพรวมของ Stateflow chart ของอัลกอริทึมในการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง



รูป 15: Subchart ในส่วนของการหาเฟสที่มีแรงดันค่าสั่งมากที่สุด



รูป 16: Subchart ในส่วนของการหาเฟสที่มีแรงดันค่าสั่งน้อยที่สุด



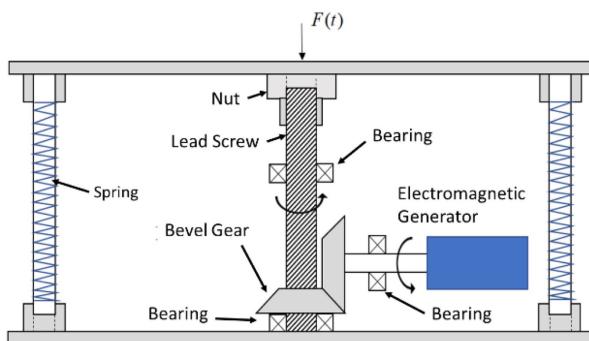
รูป 17: Subchart ในส่วนของการคำนวณแรงดันลำดับศูนย์

2.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นพื้นที่พลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking Algorithm; MPPT)

### 2.2.1 ข้อมูลรายละเอียดและหลักการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

เริ่มแรกต้องศึกษาและเข้าใจหลักการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงานเพื่อทราบความสมัมพันธ์ของกลไกและสมการต่างๆของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน [3] และเข้าใจผลวัดของระบบทางกลของของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

แผ่นพื้นเก็บพลังงาน สามารถแปลงพลังงาน Jenkinsจากการก้าวเดินของมนุษย์แปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ หลักการทำงาน เริ่มจากการเหยียบของมนุษย์ลงบนแผ่นพื้นเก็บพลังงานทำให้เกิดการบุบตัวลงของแผ่นพื้น แบบเกลี่ยว(ktv)จะขับขึ้นลงไปขับเกลี่ยวนำ(lead screw) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่เชิงเส้นไปยังการเคลื่อนที่เชิงหมุน ให้หมุนรอบแนวแกนตั้ง และ เพื่องดออกจอก(bevel gear)ทำหน้าที่เปลี่ยนจากเคลื่อนที่เชิงหมุนแนวแกนตั้งจากเพลาเกลี่ยววนให้เปลี่ยนทิศทางการหมุนไป 90 องศา หมุนรอบแนววนอน เพื่อขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 18



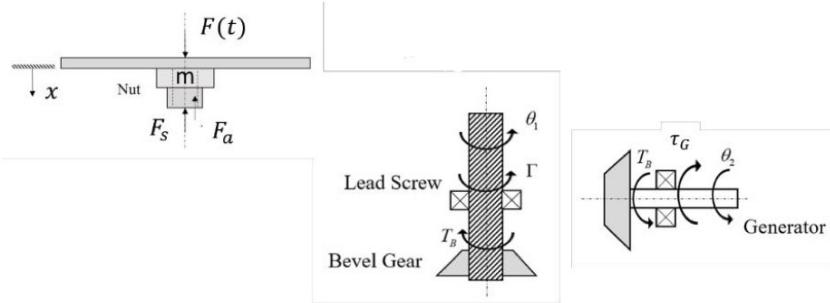
รูป 18: กลไกเกลียวนำ(lead screw) ภายใต้แผ่นเก็บพลังงาน[3]

จากแผนภาพของวัตถุของระบบทางกล ลีด(lead) และ สกรู(screw) ดังรูปที่ 19 สมการต่างๆ ได้มาจากการข้อที่สองของนิวตันและโมเมนตัม เชิงหมุน ซึ่งอธิบายการเลื่อนที่ของแป้นเกลี่ย แล้ว การเคลื่อนที่เชิงหมุนของเกลี่ยวน้ำและโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 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 19: แผนภาพของวัตถุของ lead screw

โดยที่

$m$  คือ มวลของแผ่นพื้นและแป้นเกลียว

$J_1$  คือ โมเมนต์ความเรื่อยของเกลียวนำ

$J_G$  คือ โมเมนต์ความเรื่อยของเพ้อองดอกจาก

$x$  คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นพื้นและแป้นเกลียว

$l$  คือ ระยะห่างระหว่างเกลียวนำ

$\theta_1$  คือ ตำแหน่งเชิงมุมของเกลียวนำ

$\theta_2$  คือ ตำแหน่งเชิงมุมของเพ้อองดอก

$F(t)$  คือ แรงกดลงบนแผ่นพื้นที่เวลาใดๆ

$F_s$  คือ แรงสปริง

$F_a$  คือ แรงเสียดทานระหว่างแป้นเกลียวและเกลียวนำ

$T_B$  คือ แรงบิดเสียดทานระหว่างแป้นเกลียวและเกลียวนำ

$T_G$  คือ แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque)

$T_a$  คือ แรงบิดส่งผ่านจากแป้นเกลียว ไปยัง เกลียวนำ ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $F_a$  ดังนี้

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

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

## 2.2.2 การเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า (Electrical analogy)

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

โดยการเปรียบเทียบเชิงกล-ไฟฟ้า ของวงจรไฟฟ้าเป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อทำการวิเคราะห์ระบบทางกล บัญหาทางกลบางอย่างสามารถแก้ไขได้เจ้ายิ่งขึ้นผ่านการเปรียบเทียบทะทางไฟฟ้า โดยความสัมพันธ์ของปริมาณทางกลและทางไฟฟ้า แสดงในตารางที่ 1

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]

### 2.2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าชิ้งโคนน์ชนิดแม่เหล็กถาวร

ศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชิ้งโคนน์ชนิดแม่เหล็กถาวร [5] [6] เพื่อเข้าหลักการทำงานและสมการต่างๆที่เกี่ยวข้อง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชิ้งโคนน์ชนิดแม่เหล็กถาวร ซึ่งสามารถตั้งมาตรฐานได้ตามที่จะเป็นข้อดีของมอเตอร์ชิ้งโคนน์ชนิดแม่เหล็กถาวร คือ ไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และข้อดีของสิ่งที่ตั้งไว้ในตัวโครงสร้าง ทำให้ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด กับมอเตอร์เนี้ยน้ำหนักน้อยและสามารถเพลี่ยนร่องสล็อตที่สเตเตอร์ แต่ที่โรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร ข้อดีของมอเตอร์ชิ้งโคนน์ชนิดแม่เหล็กถาวร คือ ไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และข้อดีของสิ่งที่ตั้งไว้ในตัวโครงสร้าง ทำให้ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด

ค่าความเห็นใจน้ำหนักในและฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชิ้งโคนน์ชนิดแม่เหล็กถาวร มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมุมของโรเตอร์ จากสมการแรงดันสามเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชิ้งโคนน์ชนิดแม่เหล็กถาวร ดังสมการ

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

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

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

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

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

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

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

เมื่อ

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

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

$R_s$  คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

$L_u, L_v, L_w$  คือ ค่าความเห็นใจน้ำหนักต้นของขดลวดสเตเตอร์ในเฟส u, v และ w ตามลำดับ

$M_u, M_v, M_w$  คือ ค่าความเห็นใจร่วมของขดลวดสเตเตอร์ในเฟส u, v และ w ตามลำดับ

$\omega_e$  คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์

$\theta_e$  คือ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วของแม่เหล็กถาวร

$L_d, L_q$  คือ ค่าความเห็นใจของขดลวดสเตเตอร์ในแนวแกน d และ q

$\lambda'$  คือ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วของแม่เหล็กถาวร

จากนั้นใช้การแปลงของคลาร์ก(Clark's Transformation) [7] [8] แปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงนิ่ง เพื่อแปลงสมการแรงดันสามเฟสของ เครื่องจักรไฟฟ้าชิ้งโคนน์ชนิดแม่เหล็กถาวร เป็นสามารถแรงดันบนกรอบอ้างอิงนิ่ง แกน x-y ซึ่งค่าความเห็นใจร่วมที่พิจารณาทั้งค่าความเห็นใจ นำตัวเองและค่าความเห็นใจร่วมของขดลวดสเตเตอร์ ดังสมการด้านล่าง

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

เมื่อ

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

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

$R_g$  คือ ค่าความต้านทานของชุดลวดสเตเตเตอร์

$L_s$  คือ ค่าความเหนี่ยววนัดว่องและค่าความเหนี่วนำร่วมของชุดลวดสเตเตเตอร์

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

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

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

เมื่อ

$v_d, v_q$  คือ แรงดันเฟสสเตเตเตอร์ในแกน d และ q บนกรอบอ้างอิงโรเตอร์

$i_d, i_q$  คือ กระแสเฟสสเตเตเตอร์ในแกน d และ q บนกรอบอ้างอิงโรเตอร์

จากพิจารณากำลังขาเข้าของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส

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

เมื่อ

$P_{in}$  คือ กำลังขาเข้าของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส

จากนั้นพิจารณาสมการ 30 และ 31 จะได้

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

พิจารณาพจน์สุดท้ายของสมการ 32 คือ กำลังเชิงกลของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส ดังสมการที่ 34

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

จึงได้สมการแรงบิด คือ

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

เมื่อ

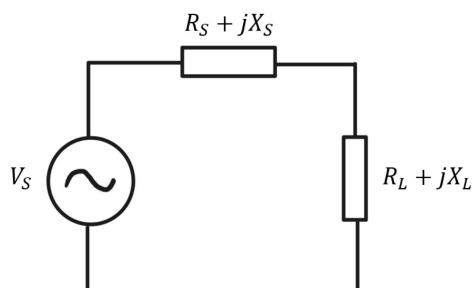
$P_{mech}$  คือ กำลังเชิงกลของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส

$T_e$  คือ แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque)

$p$  คือ จำนวนคูณข้อของเครื่องจักรไฟฟ้า

#### 2.2.4 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับการติดตามจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking) สำหรับวงจรกักเก็บพลังงาน

พิจารณาวงจรสมมูลของวงจรการกักเก็บพลังงานดังรูปที่ 20 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันและอิมพีเดนซ์ขาออก



รูป 20: วงจรสมมูลของวงจรกักเก็บพลังงาน [9]

พิจารณาหลักการแมทซิ่งอิมพีเดนซ์ (Matching impedance) เมื่อพิจารณากำลังออก ( $P_{out}$ ) โดยใช้คุณภูมิการถ่ายโอนกำลังสูงสุด (Maximum Power Transfer) ของจารสมูลติกล่าว 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 กำลังประกาย

$P_{out}$  คือ กำลังขาออก

จากสมการที่ (36) จะมีค่าสูงสุดเมื่อพจน์ตัวหารมีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากค่ารีแอคแทนซ์สามารถมีค่าน้อยกว่าศูนย์ได้ 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  $R_L$  ที่ส่งผลให้พจน์ดังกล่าวมีค่าสูงสุดด้วยสมการที่ (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 เปลี่ยนแปลงตามเวลา เนื่องจากลักษณะโหลดเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแส ในเวลานั้นๆ ซึ่งการเปลี่ยนแปลง โหลดนั้นทำได้ยากในทางปฏิบัติ ดังนั้น จึงพิจารณาในรูปแรงดันแทน จะได้ว่าแรงดันตกคร่อมโหลดจะต้องมีค่าเท่ากับสัมยุคของแรงดันตกคร่อม อิมพีเดนซ์ของจารสมูลติกาออก จะได้

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

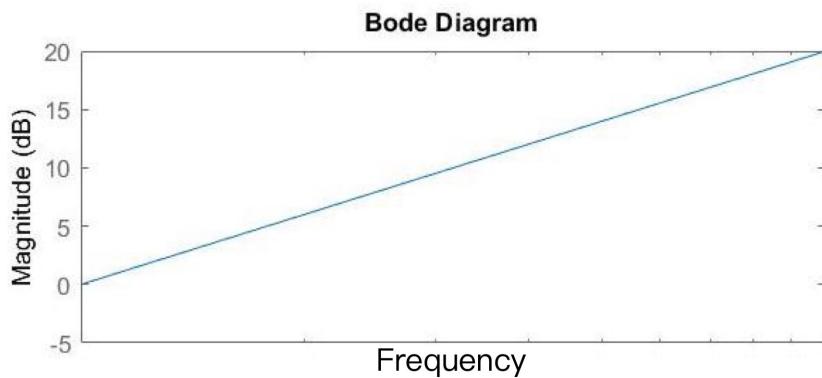
เนื่องจากโหลดที่ต่ออยู่เป็นแบบเตอร์ ถ้าสามารถควบคุมแรงดันขาออก ( $v_{ter}$ ) ดังสมการที่ (41) จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ชาร์จเข้าแบตเตอรี่มี ค่าสูงสุด

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

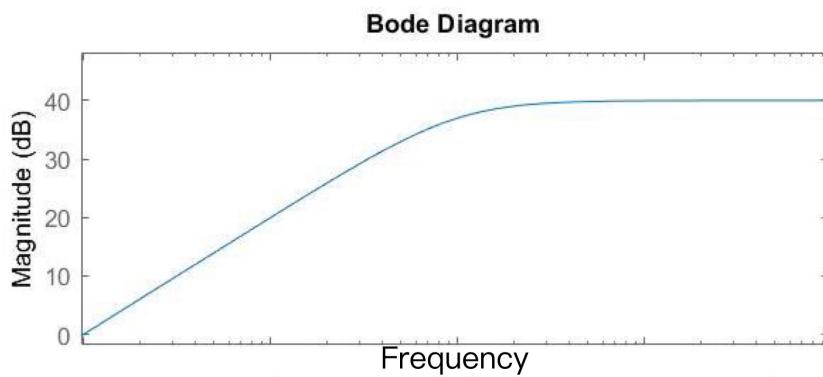
โดยการควบคุมแรงดันขาออกของแบตเตอร์ให้เป็นไปตามที่ต้องการตามสมการที่ (41) จะใช้งานอินเวอร์เตอร์ในการแปลงแรงดันไฟฟ้า โดย ใช้เทคนิคการมอดูลัสลดความกว้างพลัง

นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงข้อควรระวังของการใช้ตัวอนุพันธ์ เนื่องจาก Graf ผลตอบสนองเชิงความถี่ดังรูปที่ 21 เห็นได้ว่าตัวอนุพันธ์มีพฤติกรรม เหมือนตัวขยายสัญญาณ หากมีสัญญาณรบกวนความถี่สูงเข้ามา อาจทำให้สัญญาณรบกวนถูกขยายขนาดมากขึ้น และอาจส่งผลให้อุปกรณ์ เสียหายได้ ดังนั้นการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงต้องมีการจำกัดขอบเขตของความถี่ ของตัวอนุพันธ์ด้วยตัวปฏิพันธ์ ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ดังสมการด้านล่าง และจะได้ Graf ผลตอบสนองเชิงความถี่เป็นดังรูปที่ 22 ซึ่งเมื่อสัญญาณที่ความถี่หนึ่งจะไม่มีอثرขยายไม่เพิ่มขึ้น

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



รูป 21: กราฟผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวอนุพันธ์



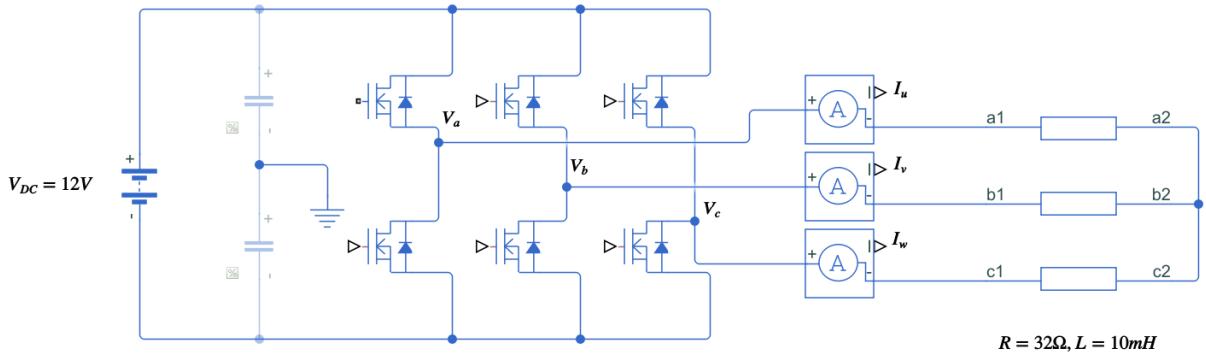
รูป 22: กราฟผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวอนุพันธ์ซึ่งถูกจำกัดขอบเขตโดยตัวปฏิยานุพันธ์

### 3 ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น

#### 3.1 การทดสอบอัลกอริทึมการmodulateแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง

ในการทดสอบอัลกอริทึมการmodulateแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง จะทำโดยการนำอินเวอร์เตอร์ไปต่อ กับโหลดแบบตัวด้านหน้าและตัวหนีบหน้าสำหรับทดสอบ โดยเราจะทดลองปรับค่าคำสั่งต่างๆของอินเวอร์เตอร์ และดูว่าระบบให้ผลตอบสนองที่ถูกต้อง หรือไม่ อัลกอริทึมมีการตัดสินใจที่ถูกต้องหรือไม่ โหมดในการทำงานสอดคล้องกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริงหรือไม่ โดยการประเมินผลที่ได้กล่าวข้างต้น จะต้องมีการวัดและแสดงค่าต่างๆ เหล่านี้คือ

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



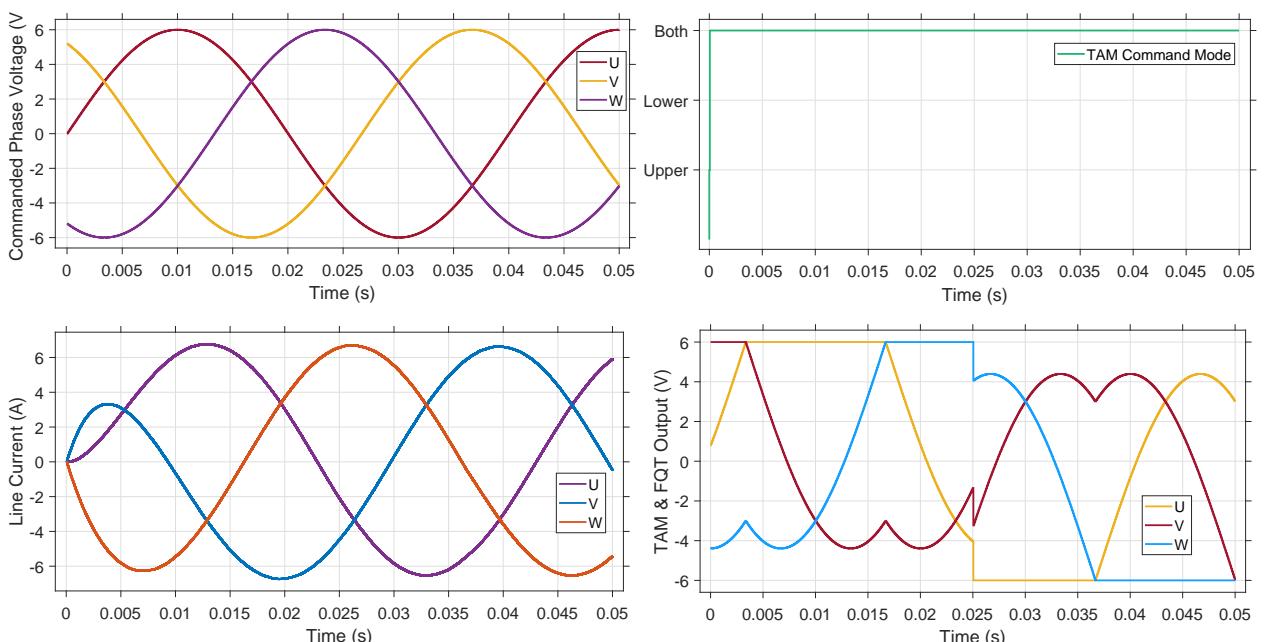
รูป 23: รูปแบบวงจรที่ใช้ทดสอบอัลกอริทึมการรอมดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง

ค่าแรงดันไฟฟ้าสาม相ของอินเวอร์เตอร์ จะเป็นค่าแรงดันที่ป้อนให้กับอัลกอริทึมของอินเวอร์เตอร์ ค่ากระแสสาย จะนิยามตามรูปที่ 23 คือ นิยามให้กระแสที่เหลือออกจากขั้วของอินเวอร์เตอร์เป็นค่าบวก หมายความการรอมดูเลตแบบสองแขนที่อัลกอริทึมตัดสินใจเลือก จะเป็นโหมดที่ได้กล่าวไว้ในรายละเอียดของการรอมดูเลตแบบสองแขนคือ

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

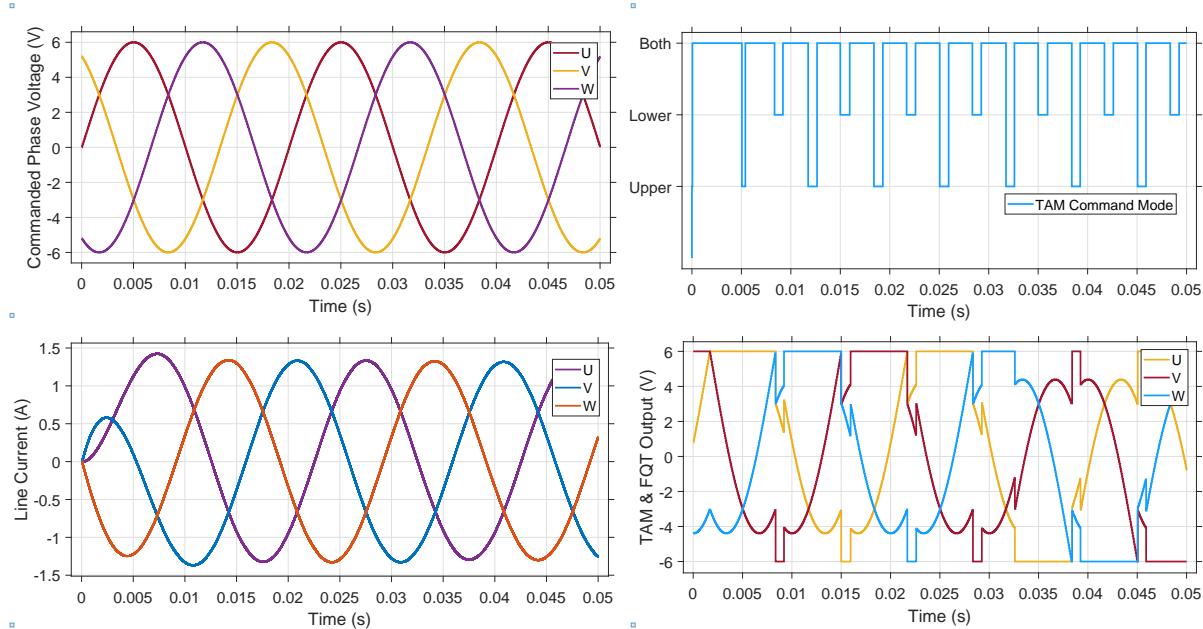
แรงดันคำสั่งที่คำนวนได้จากอัลกอริทึม คือ แรงดันที่คำนวนได้หลังจากการตัดสินใจว่าต้องการรอมดูเลตสองแขนไปหนึ่ง โดยจะทำการเลือกแรงดันลำดับศูนย์เพื่อที่จะบวกเข้าไปในแต่ละเฟส เพื่อให้สวิตช์นำกระแสในแบบที่อัลกอริทึมต้องการ

### 3.1.1 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับความถี่คำสั่งของอินเวอร์เตอร์



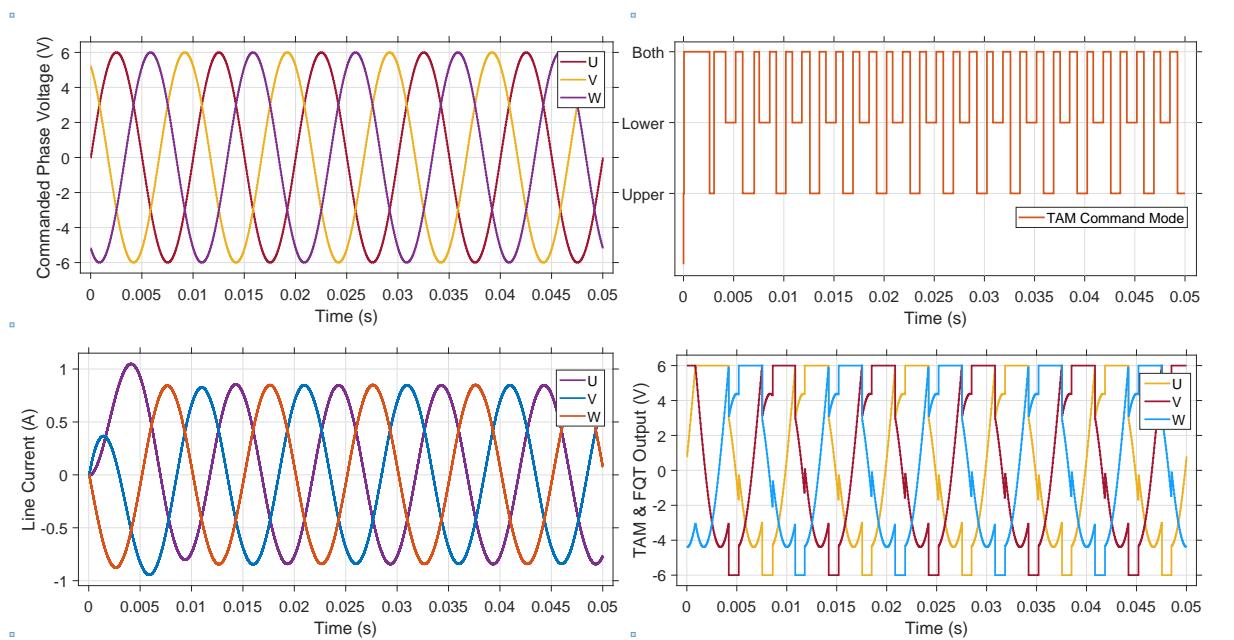
รูป 24: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่คำสั่งเท่ากับ 25Hz

จากรูปที่ 24 จะเห็นได้ว่า การเหลือมกันของกระแสและแรงดันมีค่า้น้อยมาก ซึ่งเวลาที่กระแสและแรงดันเหลือมกันมีค่าต่ำกว่าค่าเวลา การสุ่มและคงค่าของระบบผังตัว ดังนั้นระบบจึงไม่รับรู้ถึงการเหลือมกันของกระแสและแรงดัน ดังนั้น สวิตช์จะทำงานในจุดภาคที่หนึ่งตลอดเวลา ไม่ว่าจะมีความต่อต้านของระบบแบบใดก็ตาม ดังที่แสดงในกราฟ โดยมีการมองคุณลักษณะของแรงดันที่อัลกอริทึมตัดสินใจเลือก จึงเป็นแบบ Both ตลอดเวลา เพราะจากมุมมองของอินเวอร์เตอร์ อัลกอริทึมจะคิดว่าสามารถที่จะมีความต่อต้านของกระแสและแรงดันได้ ดังนั้น ระบบจะมีความต่อต้านแบบสองแขนงสับกันระหว่างตัวบันนำกระแสและลดลง และตัวล่างนำกระแสและลดลง โดยมีจุดที่แบ่งการทำงานกันระหว่างทรายชิสเตอร์ตัวบนและตัวล่างอยู่ที่เวลา 0.025 วินาที เพื่อไม่ให้ทรายชิสเตอร์ฟร์ฟังได้ทำงานหนักเกินไป



รูป 25: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่คำสั่งเท่ากับ 50Hz

จากรูปที่ 25 จะเห็นได้ว่า เมื่อเราเพิ่มความถี่คำสั่งให้กับอินเวอร์เตอร์ จะทำให้ความถี่ไฟฟ้าของแรงดันออกจากรายละเอียดมากขึ้น ทำให้อร์คประกอบความเห็นว่าของโหลดมีค่ามากขึ้น ทำให้การเหลือมกันของกระแสและแรงดันมากขึ้น จึงมีช่วงจังหวะเวลาจะห่างที่แรงดันคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ตัดศูนย์ (เปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกเป็นลบ) และเวลาที่ค่ากระแสสายตัดศูนย์ (เปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกเป็นลบ) ในช่วงเวลาดังกล่าว แรงดันไฟฟ้าคำสั่งจะมีค่าเป็นบวก ส่วนค่ากระแสจะมีค่าเป็นลบ ดังนั้น ถ้าหากเรามองคุณลักษณะของทรายชิสเตอร์ตัวบนนำกระแสและลดลงเวลา เท่ากับเราบังคับให้กระแสไฟหล่อผ่านทรายชิสเตอร์ตัวบน ทำให้ทรายชิสเตอร์ตัวบนทำงานในจุดภาคที่สาม ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ เนื่องจากจะมีแรงดันตกคร่อมทรายชิสเตอร์มากกว่า ดังนั้น เราจึงต้องเลือกให้อัลกอริทึมมองคุณลักษณะของทรายชิสเตอร์ตัวล่างนำกระแสและลดลงเวลา ทำให้กระแสไฟหล่อผ่านทรายชิสเตอร์ตัวล่างแบบที่จะทำให้ทรายชิสเตอร์ตัวล่างนำกระแสในจุดภาคที่หนึ่ง ซึ่งมีแรงดันตกคร่อมทรายชิสเตอร์น้อยกว่า กำลังสูญเสียระหว่างนำกระแสและน้อยกว่า ดังที่จะสังสั�ได้ว่า อัลกอริทึมจะเลือกให้อินเวอร์เตอร์มีความต่อต้านแบบ "Lower" เมื่อยุ่งช่วงเวลาระหว่างที่ค่าแรงดันไฟฟ้าคำสั่งเปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกไปลบ และค่าแรงดันสายเปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกไปลบ และอัลกอริทึมจะเลือกความต่อต้านแบบ "Upper" ในช่วงเวลาจะห่างที่ค่าแรงดันไฟฟ้าคำสั่งเปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกไปลบ และค่ากระแสสายเปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกไปลบ ซึ่งหากพิจารณาจากการจำลองจะพบว่า อัลกอริทึมได้ทำงานอย่างถูกต้อง

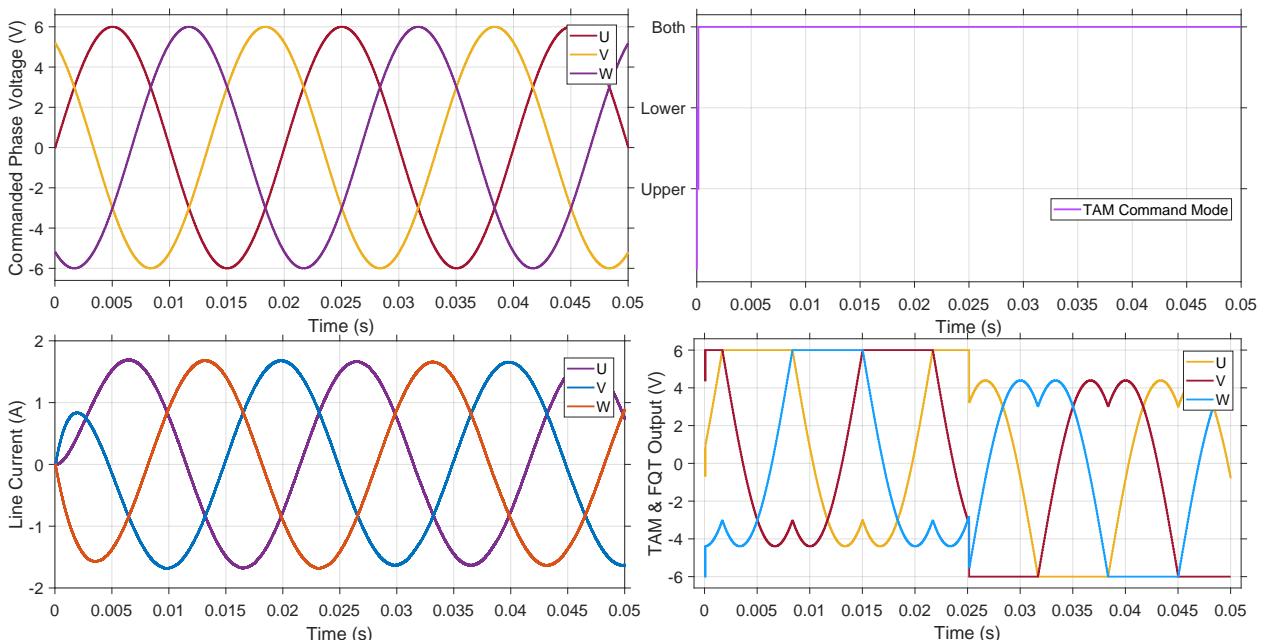


รูป 26: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่คำสั่งเท่ากับ 100Hz

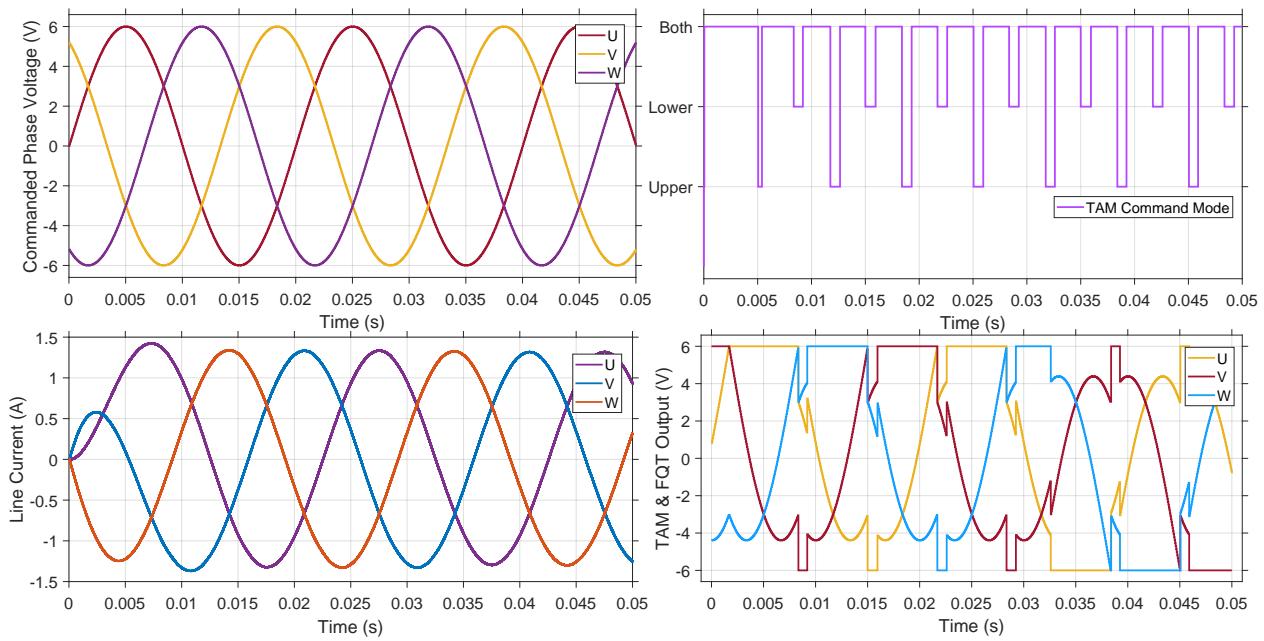
จากรูปที่ 26 จะเห็นได้ว่า เมื่อเราเพิ่มความถี่คำสั่งให้กับอินเวอร์เตอร์ แนวโน้มของการเหลือมกันของกระแสและแรงดันจะมีมากขึ้น ดังนั้น ส่วนแบ่งเวลาที่อัลกอริทึมเลือกมอดูลเดตแบบ "Upper" และ "Lower" จึงมีมากขึ้น ดังที่จะสะท้อนออกมายังกราฟโดยการลดเวลาแบบสองแขนที่อัลกอริทึมเลือก

### 3.1.2 เงื่อนไขการทดสอบกรณีที่ปรับค่าความหนี้บานของโหลด

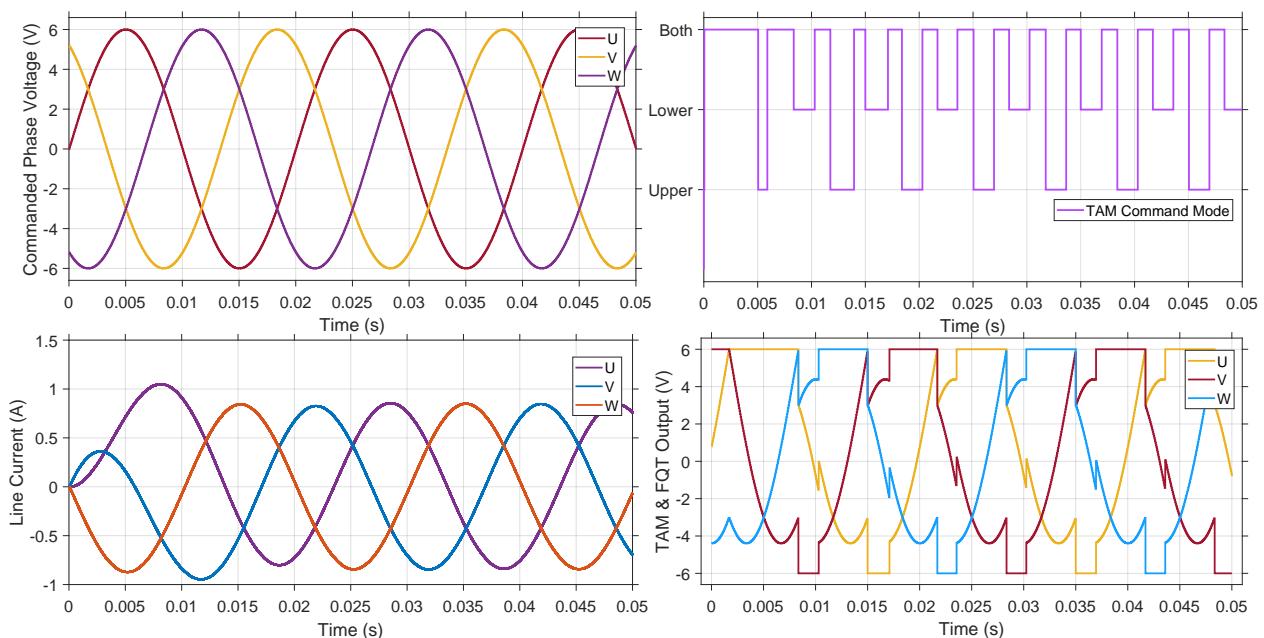
จะเห็นได้ว่าการปรับค่าความหนี้บานของโหลดส่งผลคล้ายกับการปรับค่าความถี่คำสั่งให้กับอินเวอร์เตอร์ เพราะสุดท้ายแล้ว การปรับความถี่คำสั่งของอินเวอร์เตอร์ก็คือการเปลี่ยนค่ารีแอคแทนซ์ของตัวเหนี่ยวนำนั่นเอง จะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องในกรณีการทดสอบต่างๆ



รูป 27: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับความหนี้บานของโหลดให้เท่ากับ 5mH



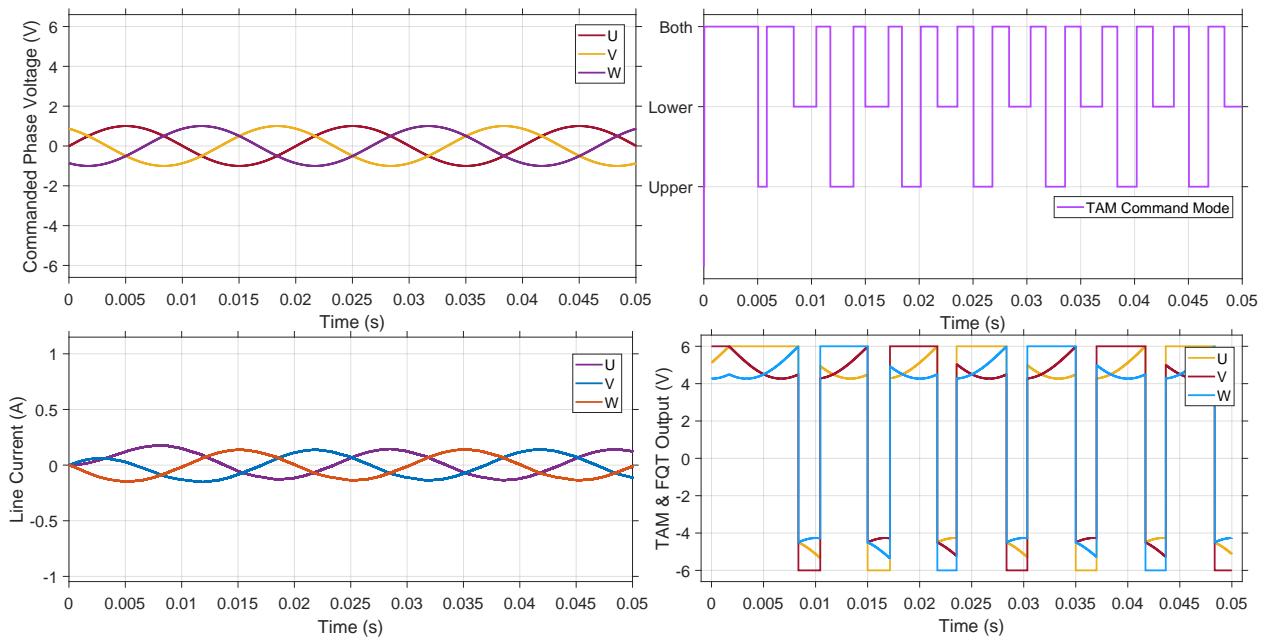
รูป 28: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับความหนี่ยวนำของโหลดให้เท่ากับ  $10\text{mH}$



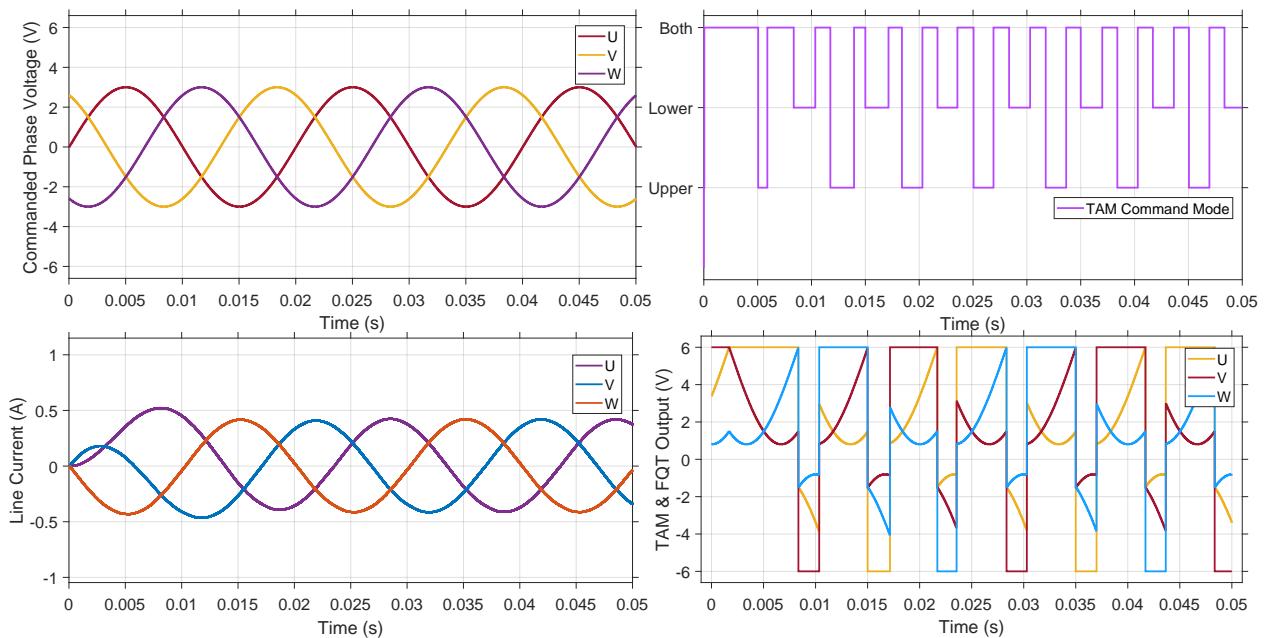
รูป 29: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับความหนี่ยวนำของโหลดให้เท่ากับ  $20\text{mH}$

### 3.1.3 เจื่อนไสการทดสอบกรณีที่ปรับค่าขนาดของแรงดันคำสั่งของอินเวอร์เตอร์

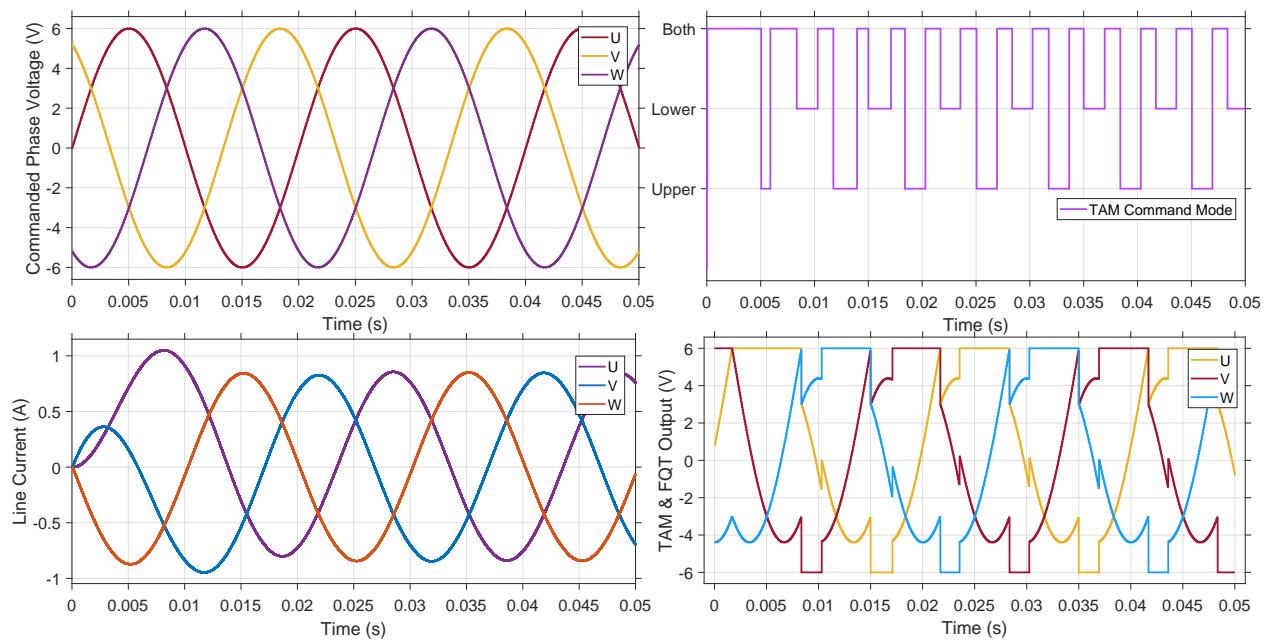
ถ้าหากค่ายอดของแรงดันเฟสคำสั่งถูกปรับ ก็จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อขนาดของกระแสสาย นั่นคือ ค่ากระแสสายจะแปรผันตรงกับขนาดของแรงดันคำสั่ง จะสังเกตุได้ว่า อินเวอร์เตอร์ยังสามารถทำงานได้ถูกต้องเมื่อปรับขนาดของแรงดันคำสั่งเป็นค่าต่างๆ



รูป 30: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับขนาดของค่าจอดของดันไฟสัมประสิทธิ์กับ 1 V



รูป 31: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับขนาดของค่าจอดของดันไฟสัมประสิทธิ์กับ 3 V



รูป 32: ผลการทดลองของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ปรับขนาดของค่ายอดของดันไฟฟ้าสำหรับ 6 V

### 3.2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิodic แม่เหล็กการ

จากการศึกษาการทำงานของทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และ การเปรียบเทียบเชิงกล - ไฟฟ้า(Electrical analogy) เพื่อแปลงระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้า มีขั้นตอนดังนี้

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

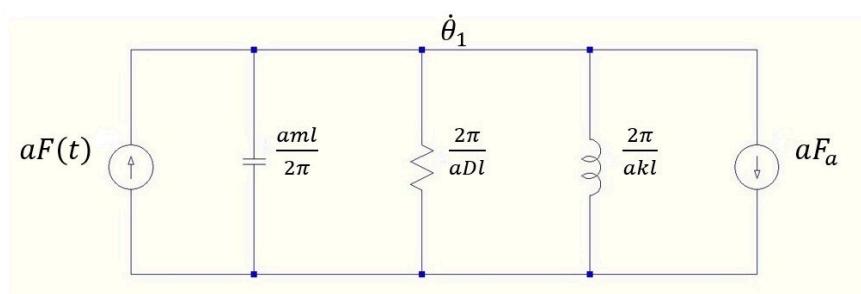
$$x = \frac{l\theta_1}{2\pi} = \frac{l\theta_2}{2\pi} \quad (43)$$

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

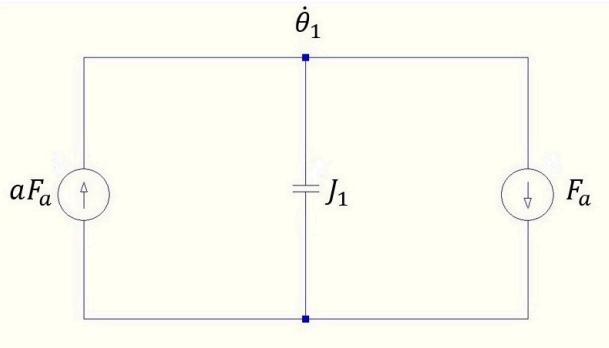
$$\frac{aml}{2\pi} \ddot{\theta}_1 + \frac{aDl}{2\pi} \dot{\theta}_1 + \frac{akl}{2\pi} \theta_1 + aF_a = aF(t) \quad (44)$$

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

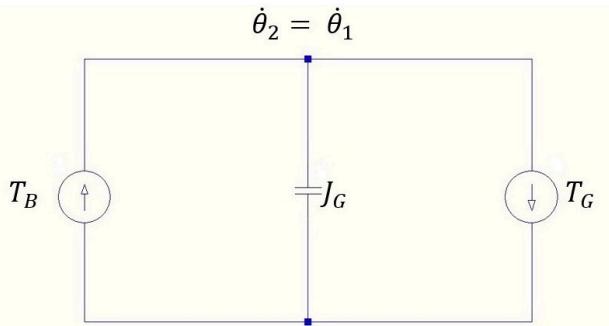
$$J_G \ddot{\theta}_2 + T_G = T_B \quad (46)$$



รูป 33: วงจรไฟฟ้าของการเลื่อนที่ของแผ่นเกลียว(gnut)

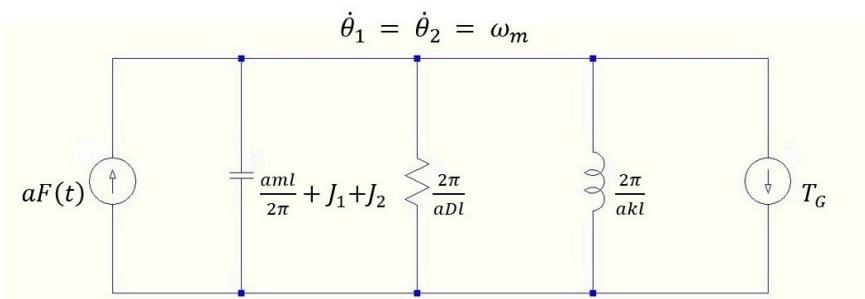


รูป 34: วงจรไฟฟ้าของการเคลื่อนที่เชิงหมุนของเกลียวนำ(lead screw)



รูป 35: วงจรไฟฟ้าของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากร่วมวงจรไฟฟ้าของการเคลื่อนที่ของแป้นเกลียว(gnut) และ การเคลื่อนที่เชิงหมุนของเกลียวนำ(lead screw) และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทั้งสามข้างบน จะได้ วงจรสุมูลทางไฟฟ้าระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน ดังรูปที่ 36



รูป 36: วงจรสุมูลไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

หลังจากได้วงจรสุมูลทางไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน จึงได้ศึกษาเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กการเพื่อเข้าใจหลักการทำงานและสมการความสัมพันธ์ต่างๆ ที่จะสามารถวิเคราะห์ และสร้างวงจรสุมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กทราบ

จากการที่ได้ศึกษาเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กทราบ และได้วงจรสุมูลของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน สามารถรวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กทราบตามขั้นตอน ดังนี้

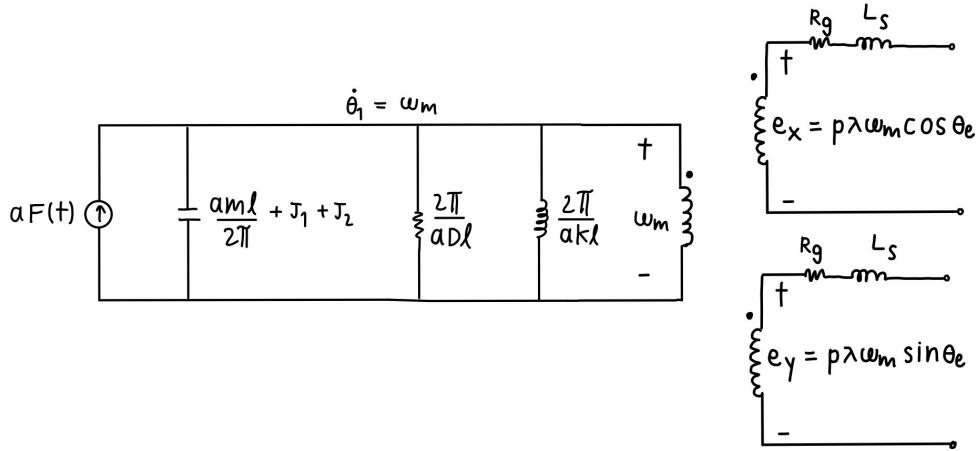
จากสมการที่ (17) แรงดันบนกรอบอ้างอิงนิ่ง แกน x,y ทำให้ทราบความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนเหนี่ยวน้ำภายในของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กทราบ ดังสมการด้านล่าง

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

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

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

วงจรที่ไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นเก็บพลังงานสัมพันธ์กับเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดเดียวกับวงจรที่ไฟฟ้าของโครงสร้างเดียวกันที่อ้างอิงในหน้าที่นี้ ความเร็วของโรเตอร์จะท่อนไปยังขนาดแรงเคลื่อนที่ของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างตามสมการด้านบน จึงได้ความสัมพันธ์แสดงดังรูปวงจรด้านล่าง



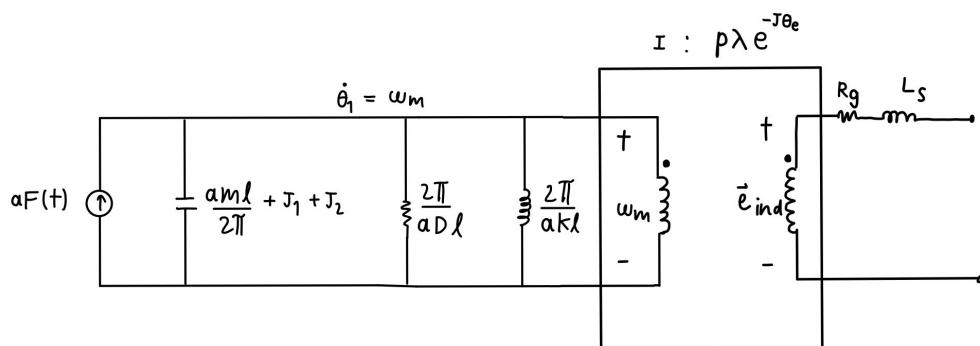
รูป 37: วงจรไฟฟ้าแสดงความสัมพันธ์ระบบทางกลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากนั้นเขียนความสัมพันธ์อยู่ในรูปสเปชเวกเตอร์ของระบบทางกลของแผ่นเก็บพลังงานและ เครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดเดียวกัน เพื่อสามารถวิเคราะห์เป็นวงจรไฟฟ้าเพียงวงจรเดียวได้

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

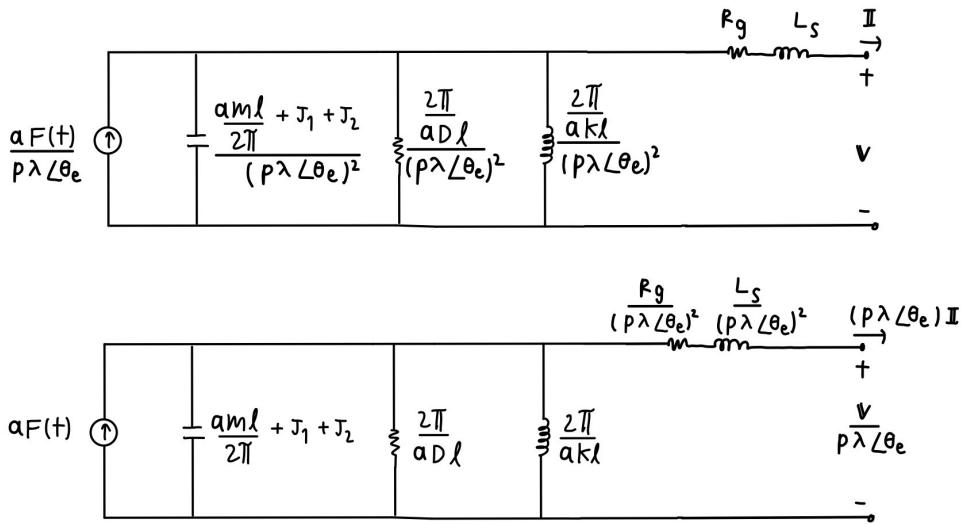
$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = p\lambda e^{-j\theta_e} \begin{bmatrix} \omega_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (51)$$

จึงสามารถมองเป็นวงจรสมมูลที่แสดงความสัมพันธ์เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบเป็นเชิงช้อน ดังรูปที่ 38



รูป 38: วงจรไฟฟ้าแสดงความสัมพันธ์ระบบทางกลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีหม้อแปลงไฟฟ้ามีอัตราส่วนเป็นเชิงช้อน

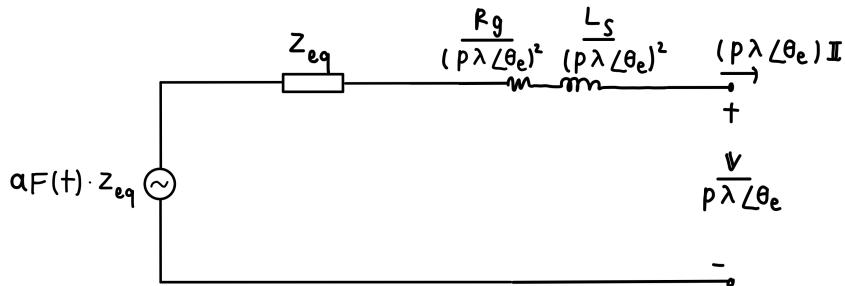
จากนั้นทำการแปลงเป็นวงจรสมมูล โดยอ้างอิงผังทุติยภูมิ(บน) และอ้างอิงผังปฐมภูมิ(ล่าง) แสดงดังรูปที่ 39



รูป 39: วงจรสมมูลไฟฟ้าที่ยังอิงฝั่งทุติยภูมิ(บน)และยังอิงฝั่งปฐมภูมิ(ล่าง)

3.3 ผลการจำลองของแบบจำลองทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กไฟฟ้า บนโปรแกรม MATLAB/Simulink

จากสมการที่ (41) จึงทำการแปลงวงจรสมมูลจากรูป 39 โดยใช้ทฤษฎีเทเวนิน จะได้วงจรสมมูลดังรูปด้านล่าง



รูป 40: แบบจำลองวงจรไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นพลังงานและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้ทฤษฎีเทเวนิน

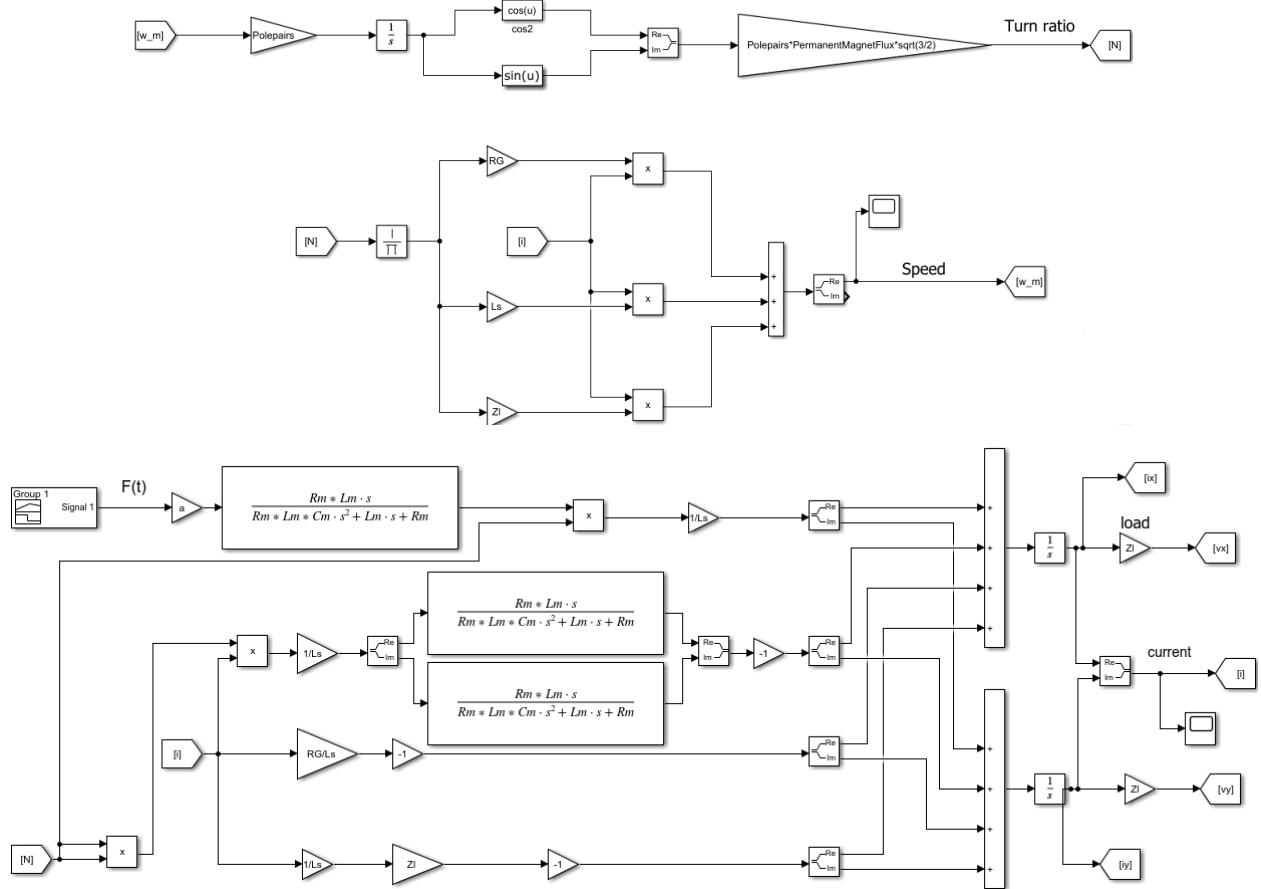
โดย  $Z_{eq}$  คือ  $\frac{2\pi}{aDl} // s \frac{2\pi}{akl} // \frac{1}{s(\frac{aml}{2\pi} + J_1 + J_2)}$  จากทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังสูงสุด จะได้ว่าโหลดที่นำมาต่อที่ด้านข้าอกของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส จะมีลักษณะตามสมการที่ (52)

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

โดยแรงดันข้าอกที่สอดคล้องกับหลักการติดตามจุดทำงาน ซึ่งทำให้กำลังข้าอกของเครื่องจักรไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเป็นดังสมการที่ (53)

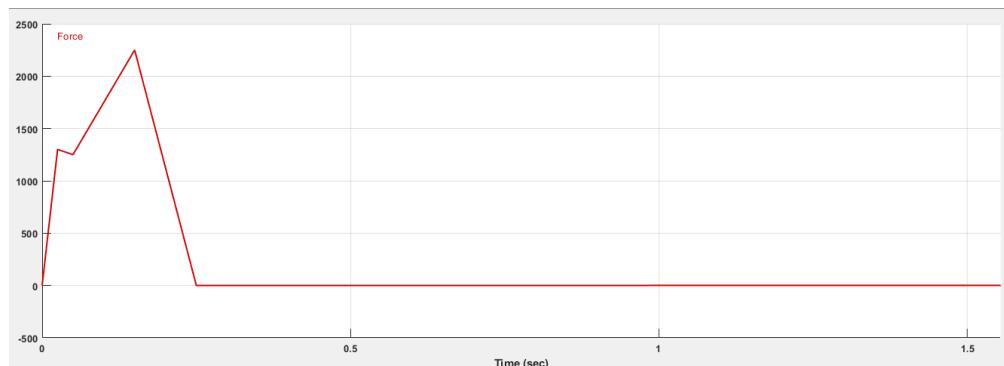
$$v_{out} = \text{conjugate}[z_{eq}I(p\lambda\angle\theta_e)^2 + R_gI + sL_sI] \quad (53)$$

หลังจากที่ได้วงจรสมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสและเงื่อนไขแรงดันข้าอกที่สอดคล้องกับหลักการติดตามจุดทำงานซึ่งทำให้กำลังข้าอกมีค่าสูงสุด จากรูปที่ 40 และสมการต่างๆที่เกี่ยวข้อง มาสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังรูปที่ 41 เพื่อศึกษาการทำงานของแบบจำลองที่ได้



รูป 41: แบบจำลองวงจรสมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นหลังงานและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่มีโหลดตัวต้านทาน 32.23 โอม์ม

แบบจำลองที่ได้ทดสอบด้วยแรงเหยียบ ดังรูปที่ 41 และใส่โหลดเป็นตัวต้านทานที่ข้ออกของ มีขนาดเท่ากับความต้านทานภายในเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโคนันชนิดแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 32.23 โอม์ม ใช้แรงจากเท้าเหยียบแสดงดังรูปที่ 42 ค่าพารามิเตอร์อื่นที่ใช้ในการทดสอบ [3] แสดงดังตารางที่ 2 และ 3



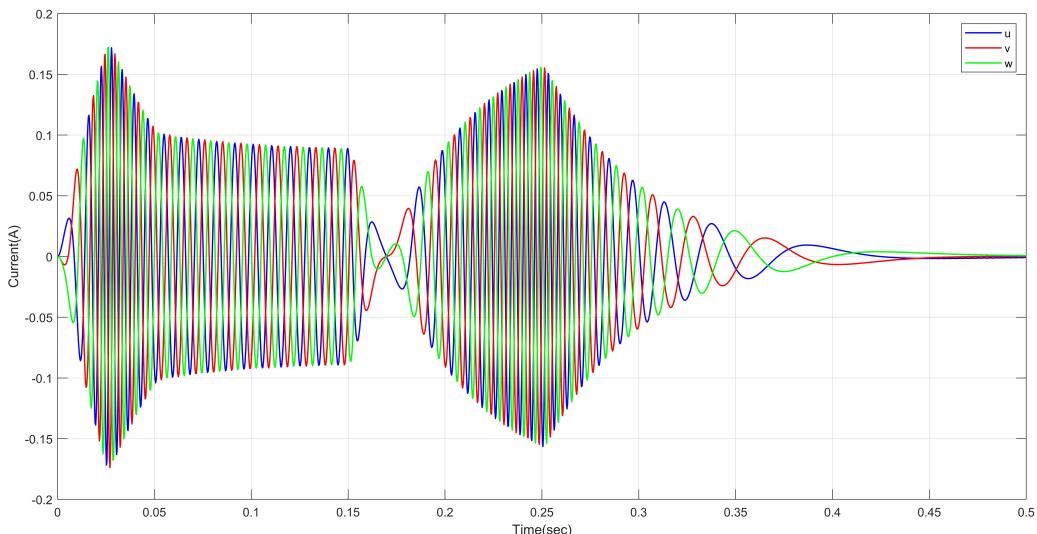
รูป 42: แบบจำลองวงจรสมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นหลังงานและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่มีโหลดตัวต้านทาน 32.23 โอม์ม

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

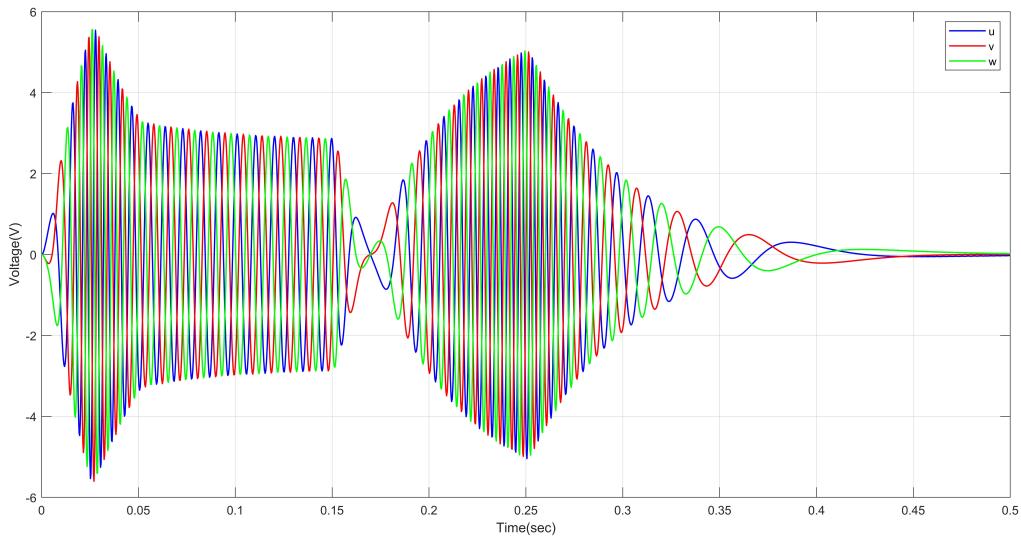
ตาราง 2: ค่าตัวแปรทางกลที่เกี่ยวข้องกับแผ่นพื้นพลังงาน [3]

Parameters	Value
ค่าความต้านทานของชุดลวดสเตเตอร์(Rs)	$32.23 \Omega$
ค่าความเหนี่ยวนำของชุดลวดสเตเตอร์(Ls)	11.3 mH
ค่าความเหนี่ยวนำของชุดลวดสเตเตอร์ในแนวแกนอ้างอิงดี (Ld)	16 mH
ค่าความเหนี่ยวนำของชุดลวดสเตเตอร์ในแนวแกนอ้างอิงคิว (Lq)	16 mH
ฟลักซ์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร	0.009 Wb
จำนวนคูช้า	6 คู่

ตาราง 3: ค่าตัวแปรทางกลที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร[3]



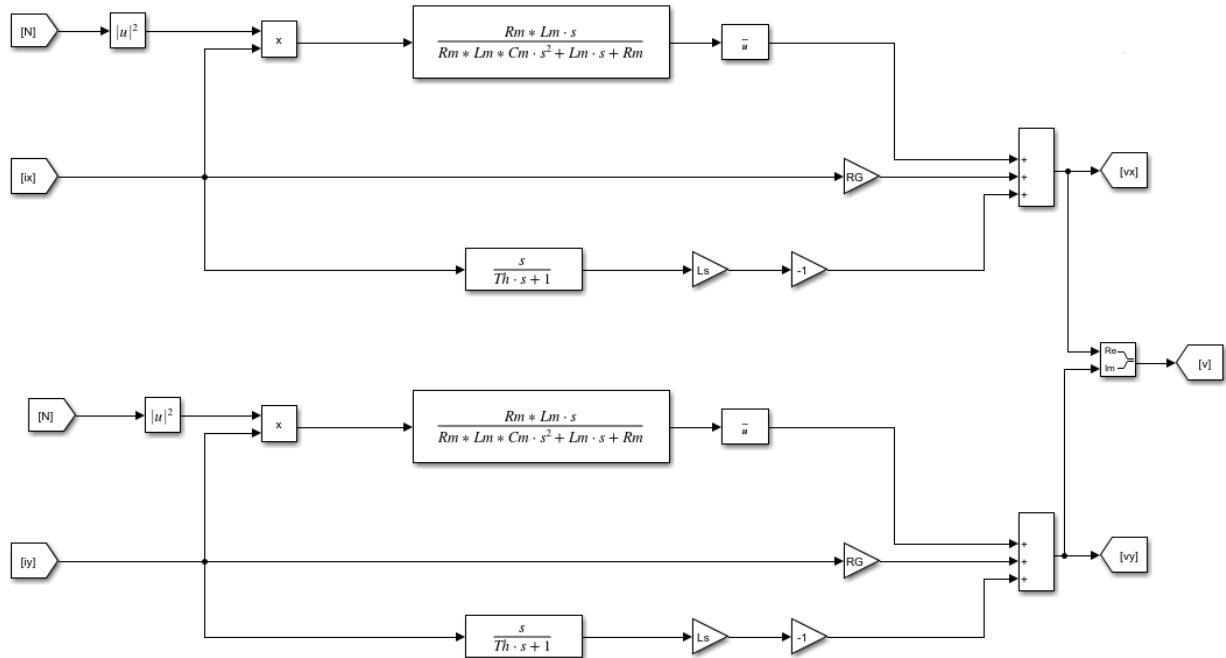
รูป 43: กระแสขาออก เมื่อโหลดตัวต้านทาน 32.23 โอห์ม



รูป 44: แรงดันขาออก เมื่อโหลดตัวต้านทาน 32.23 โอห์ม

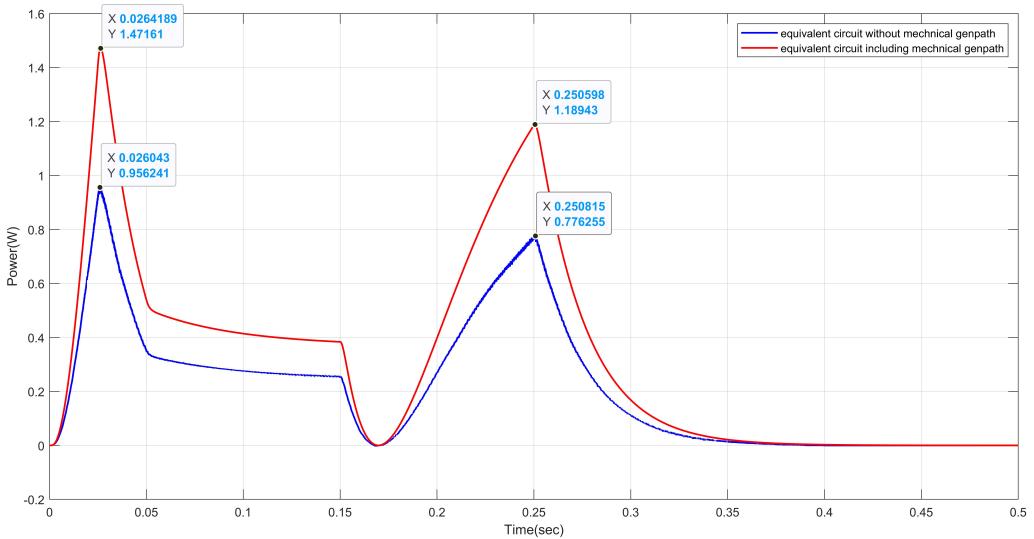
จากรูปที่ 43 และ 44 พบว่า แรงดันและกระแสเมลักคลื่นเกิดขึ้นจำนวน 2 ลูก โดยลูกแรกเกิดจากการยุบตัวของแผ่นพื้นเนื่องจากแรงที่เหยียบลงบนแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และลูกที่สองเกิดจากการยุบตัวของแผ่นพื้นเนื่องจากแรงคืนตัวของสปริง

จากสมการที่ (41) เมื่อเปลี่ยนโหลดจากตัวต้านทานเป็นแหล่งจ่ายแรงดันแบบควบคุมได้ สามารถนำมารังเรื่นอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดได้ดังรูปที่ 45 โดยนั่นจะหมายความว่าการติดตามของแบบจำลองมาพิจารณาผ่านอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดเพื่อคำนวนหาเงื่อนไขสัญญาณแรงดันที่เหมาะสมและส่งกลับไปเป็นสัญญาณแรงดันขาออกของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งจะทำให้ได้กำลังขาออกสูงสุด



รูป 45: แผนภาพโดยแกรมของอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดบนแกนอ้างอิงนิ่ง

จากผลการทดสอบแบบจำลอง จะได้ว่ากำลังขาออกเมื่อมีการใช้อัลกอริทึมการติดตามกำลังสูงสุด ที่มาจากการสมมูลไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างมีลักษณะดังรูปที่ 46 และเปรียบเทียบกับกำลังขาออกเมื่อไม่มีการรวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคิดรวมในอัลกอริทึมการติดตามกำลังสูงสุดในปีการศึกษา 2563



รูป 46: กำลังข้าออกเมื่ออัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด กรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณ และกรณีที่ไม่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณ

จากรูป 46 พบร่วมกับกรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณด้วย จะได้กำลังข้าออกที่สูงกว่า กรณีที่ไม่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณ กำลังข้าออกสูงสุดค่าอยอดลูกแรกเพิ่มจาก 0.95 วัตต์ เป็น 1.47 วัตต์ และกำลังข้าออกสูงสุดค่าอยอดลูกที่สองเพิ่มจาก 0.77 วัตต์ เป็น 1.18 วัตต์ จึงสรุปได้ อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด กรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณ สามารถทำให้ได้กำลังข้าออกมีค่าที่สูงขึ้นจริง เนื่องจาก พิจารณาสมการ (52) และ (53) จะมีพจน์อิมพีเดนซ์  $Z_{eq}$  ซึ่งเท่ากับ  $\frac{2\pi}{aDl} // s \frac{2\pi}{akl} // \frac{1}{s(\frac{aml}{2\pi} + J_1 + J_2)}$  ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มาจากระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานเพิ่มเข้ามา นอกจากนี้จากแคลคูลัสเด่น ซึ่งของขวดความสเตเดอร์ของเครื่องจักรกลชิ้งโครนัสเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้แบบจำลองมีความสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้ได้กำลังข้าออกสูงขึ้นเมื่อเทียบกับปีการศึกษา 2563

## 4 บทสรุป

### 4.1 สรุปผลการดำเนินการ

#### 4.1.1 การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการมอดูลเตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง

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

- โมเดลแบบจำลองของแบตเตอรี่
- โมเดลแบบจำลองของระบบเชิงกล
- โมเดลแบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร
- โมเดลแบบจำลองระบบฝังตัว
- โมเดลแบบจำลองบอร์ดอินเวอร์เตอร์

และได้มีการทดสอบ และทวนสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ และอัลกอริทึมในการลดกำลังสูญเสีย พบร้า สามารถทำงานและตัดสินใจได้ถูกต้อง

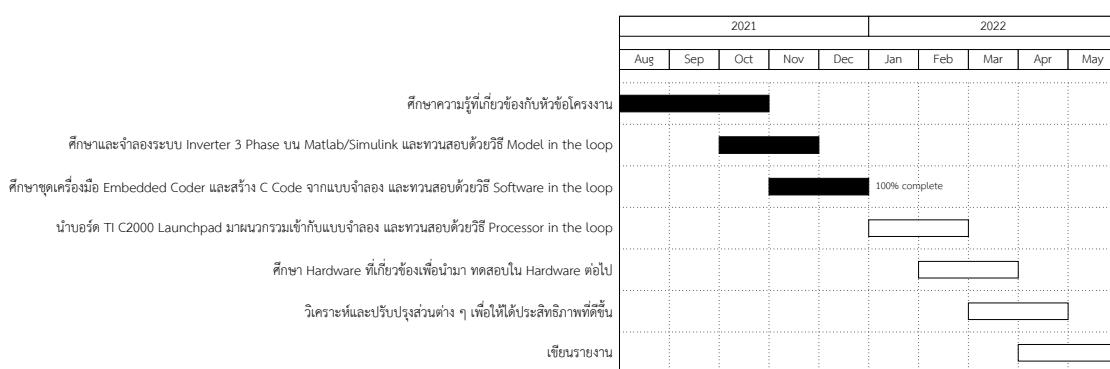
#### 4.1.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด

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

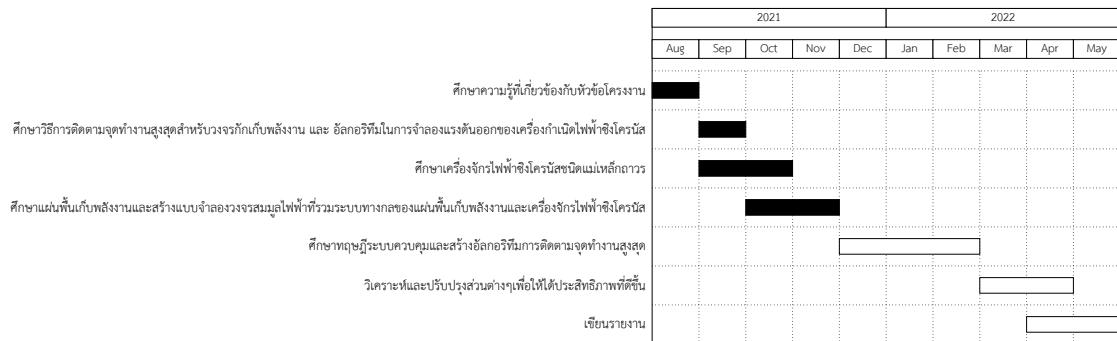
จากการทดสอบอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุดซึ่งมีการรวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink พบร้า กรณีที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณด้วย จะได้กำลังขาออกที่สูงกว่า กรณีที่ไม่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาคำนวณที่ทำในปีการศึกษา 2563 จึงสรุปได้ อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด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

### 4.2 แผนการดำเนินงาน

ในรายงานฉบับนี้ มีแผนการดำเนินงานแยกเป็นของผู้จัดทำแต่ละคน คือ นายณัฐพล กับแก้ว ซึ่งมีแผนการดำเนินงานดังแสดงในรูปที่ 47 และของนายสันติ ว่องประเสริฐ ซึ่งมีแผนการดำเนินงานดังแสดงในรูปที่ 48



รูป 47: Gantt chart ของนายณัฐพล กับแก้ว



รูป 48: Gantt chart ของนายสันติ ว่องประเสริฐ

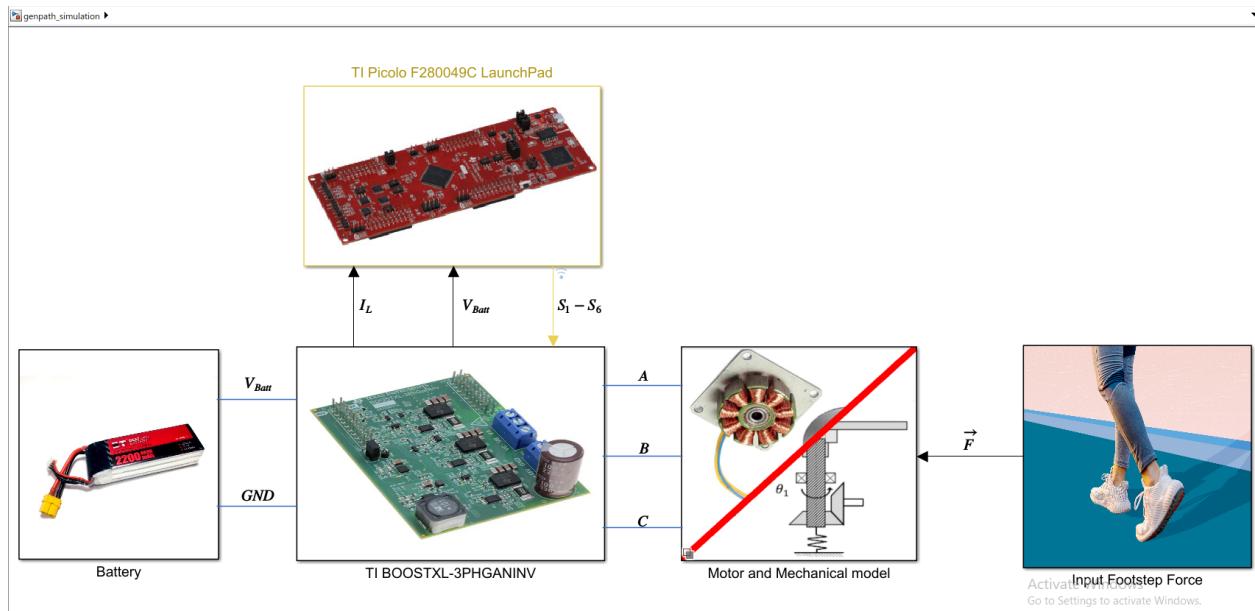
### 4.3 ปัญหา อุปสรรค และแนวทางแก้ไข (ถ้ามี)

## 5 เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Sun, “Does gan have a body diode? - understanding the third quadrant operation of gan,” *Texas Instruments Application Report*, no. SNOAA36, 2019.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [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].

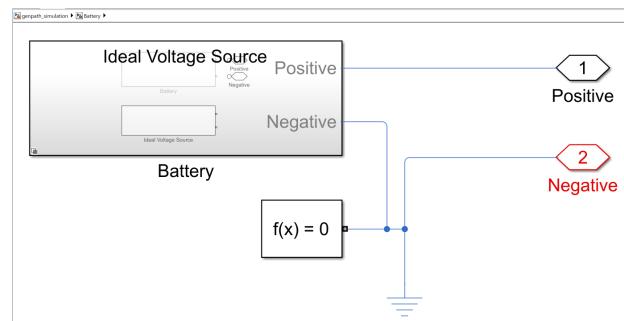
## 6 ภาคผนวก

### 6.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบพลังงานของระบบ

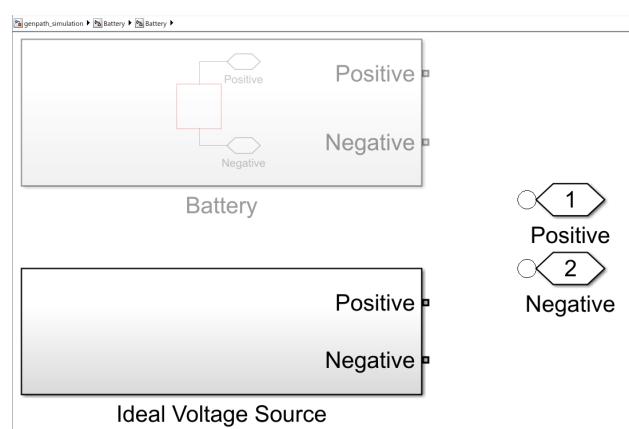


รูป 49: ขั้นที่ 1: ภาพรวมของระบบพลังงานทั้งหมด

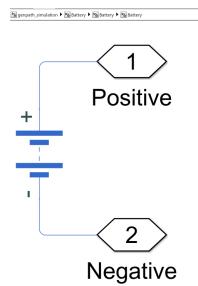
#### 6.1.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแบตเตอรี่



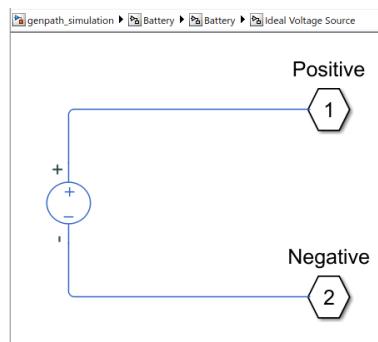
รูป 50: ขั้นที่ 2: แบตเตอรี่ และ Solver Configuration



รูป 51: ขั้นที่ 3: Variant Model ของแบตเตอรี่

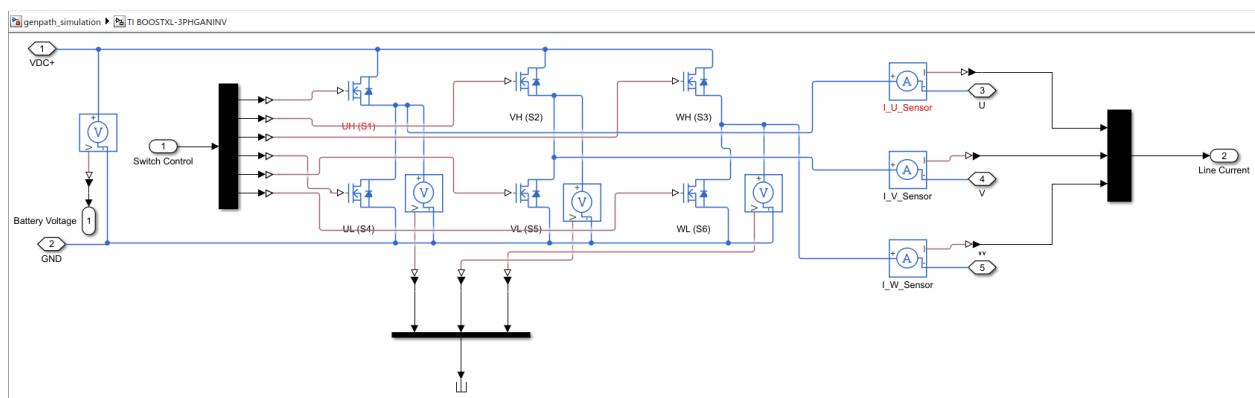


รูป 52: ขั้นที่ 4: ภายใน Variant Model ของแบตเตอรี่



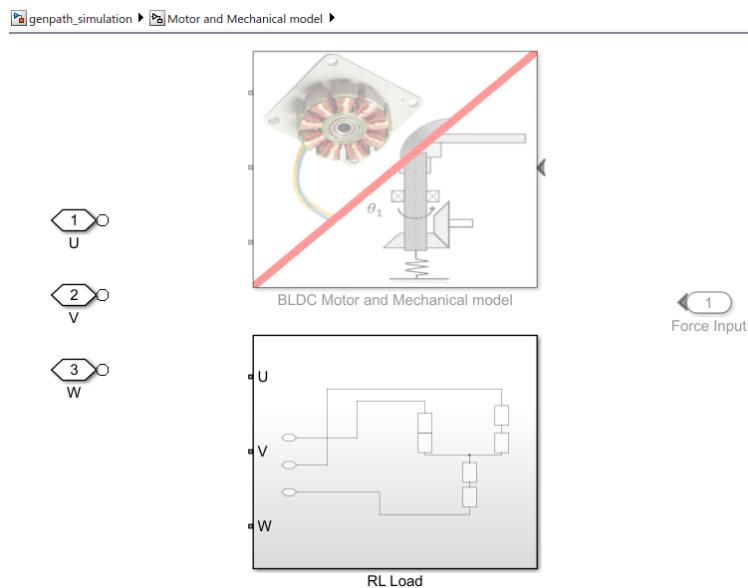
รูป 53: ขั้นที่ 4: ภายใน Variant Model ของแหล่งจ่ายไฟตรงในอุดมคติ

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

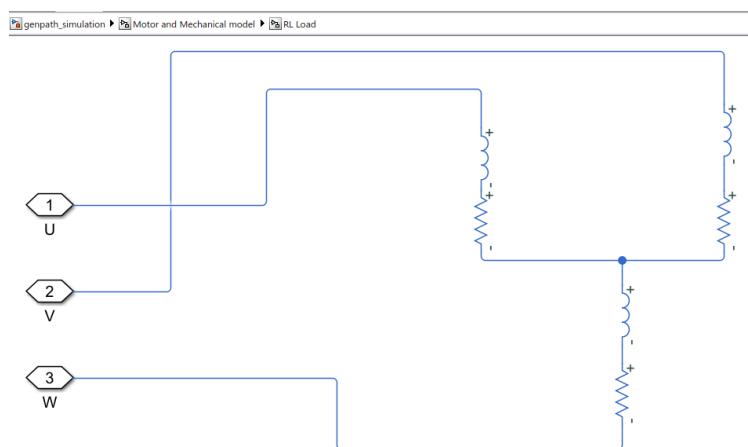


รูป 54: ขั้นที่ 2: บอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI BOOSTXL-3PHGANINV

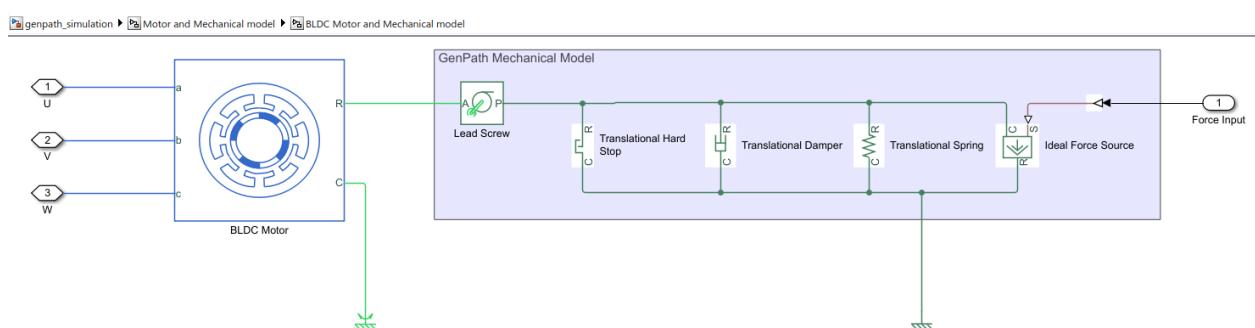
### 6.1.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบเชิงกลและมอเตอร์ชิ้งโครนัสแม่เหล็กถาวร



รูป 55: ขั้นที่ 2: Variant Model ของมอเตอร์และระบบเชิงกล กับโหลดแบบตัวต้านทานและตัวเหนี่ยววนิวม่า

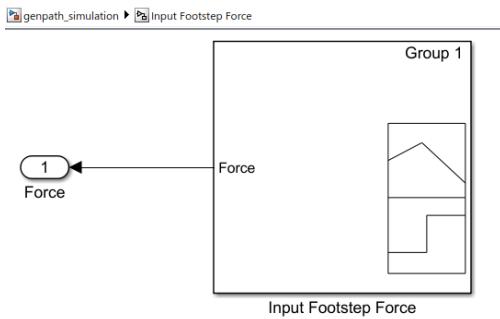


รูป 56: ขั้นที่ 3: ภายใน Variant Model ของโหลดแบบตัวต้านทานและตัวเหนี่ยววนิวม่า

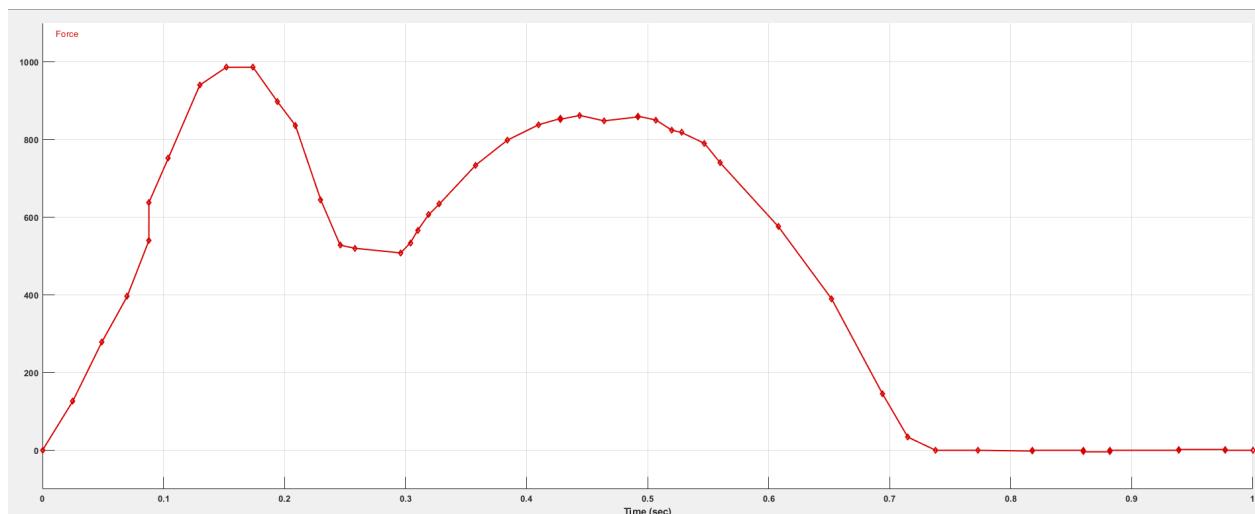


รูป 57: ขั้นที่ 3: ภายใน Variant Model ของระบบเชิงกลและมอเตอร์ชิ้งโครนัสแม่เหล็กถาวร

#### 6.1.4 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแรงที่เท้าเหยียบแผ่นพื้น

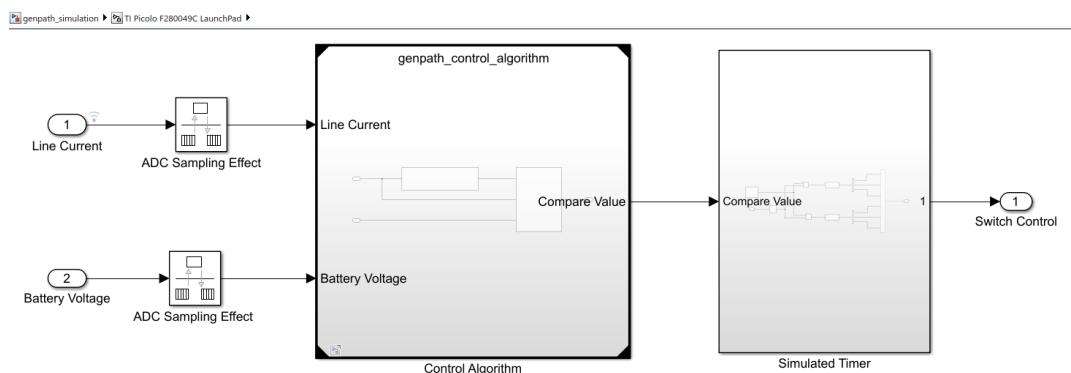


รูป 58: ขั้นที่ 2: แบบจำลองแรงที่มาจากเท้าเหยียบแผ่นพื้น

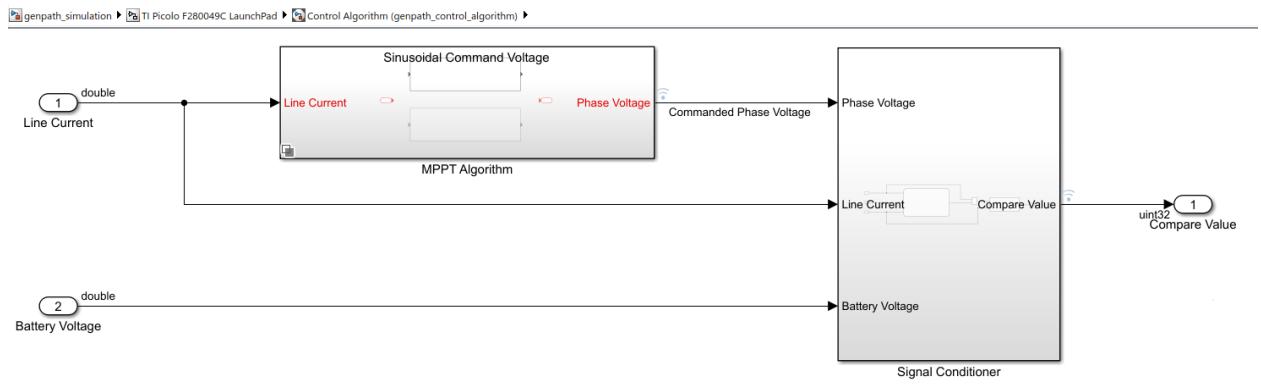


รูป 59: กราฟแสดงสัญญาณแรงที่มาจากเท้าเหยียบ

#### 6.2 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมที่ทำงานบนระบบผังตัว TI Picolo F280049C LaunchPad

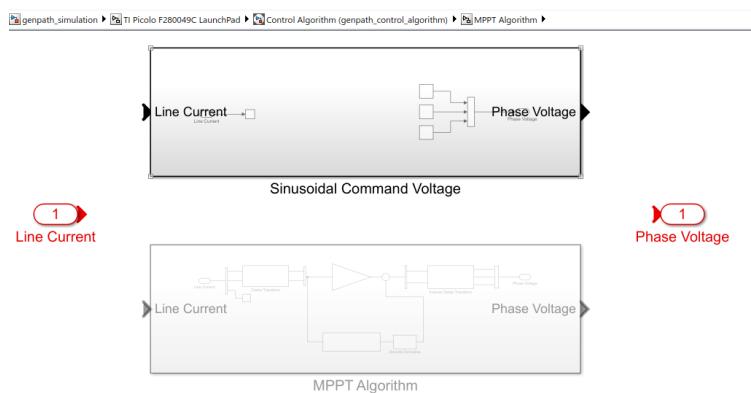


รูป 60: ขั้นที่ 2: ภายใน Subsystem ของแบบจำลองระบบผังตัว

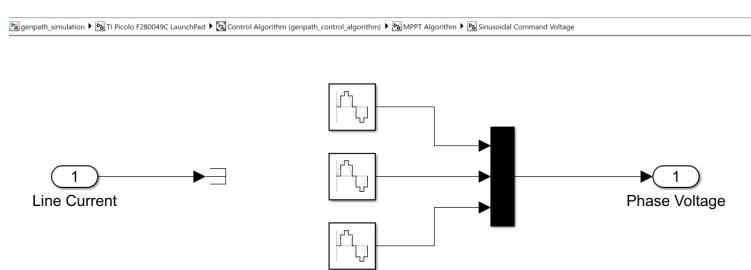


รูป 61: ชั้นที่ 3: ภายใน Subsystem ของอัลกอริทึมที่ทำงานอยู่บนระบบฝังตัว

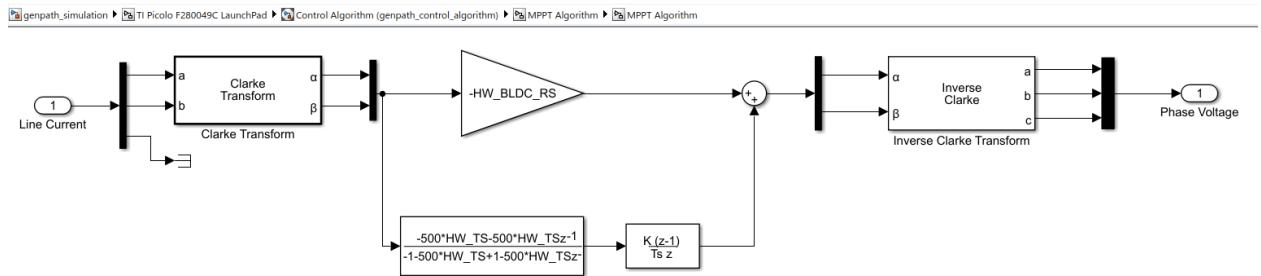
### 6.2.1 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูป 62: ชั้นที่ 4: Variant Model ของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

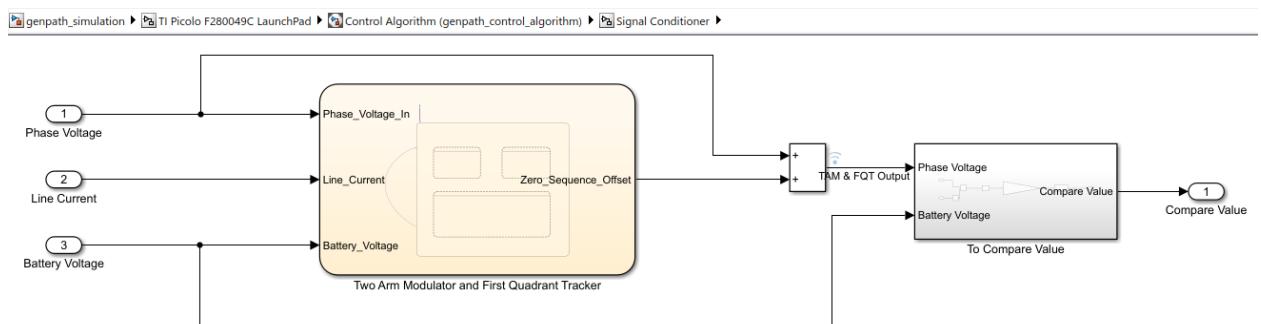


รูป 63: ชั้นที่ 5: ภายใน Variant Model ของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่สร้างสัญญาณคำสั่งแบบไบ奴

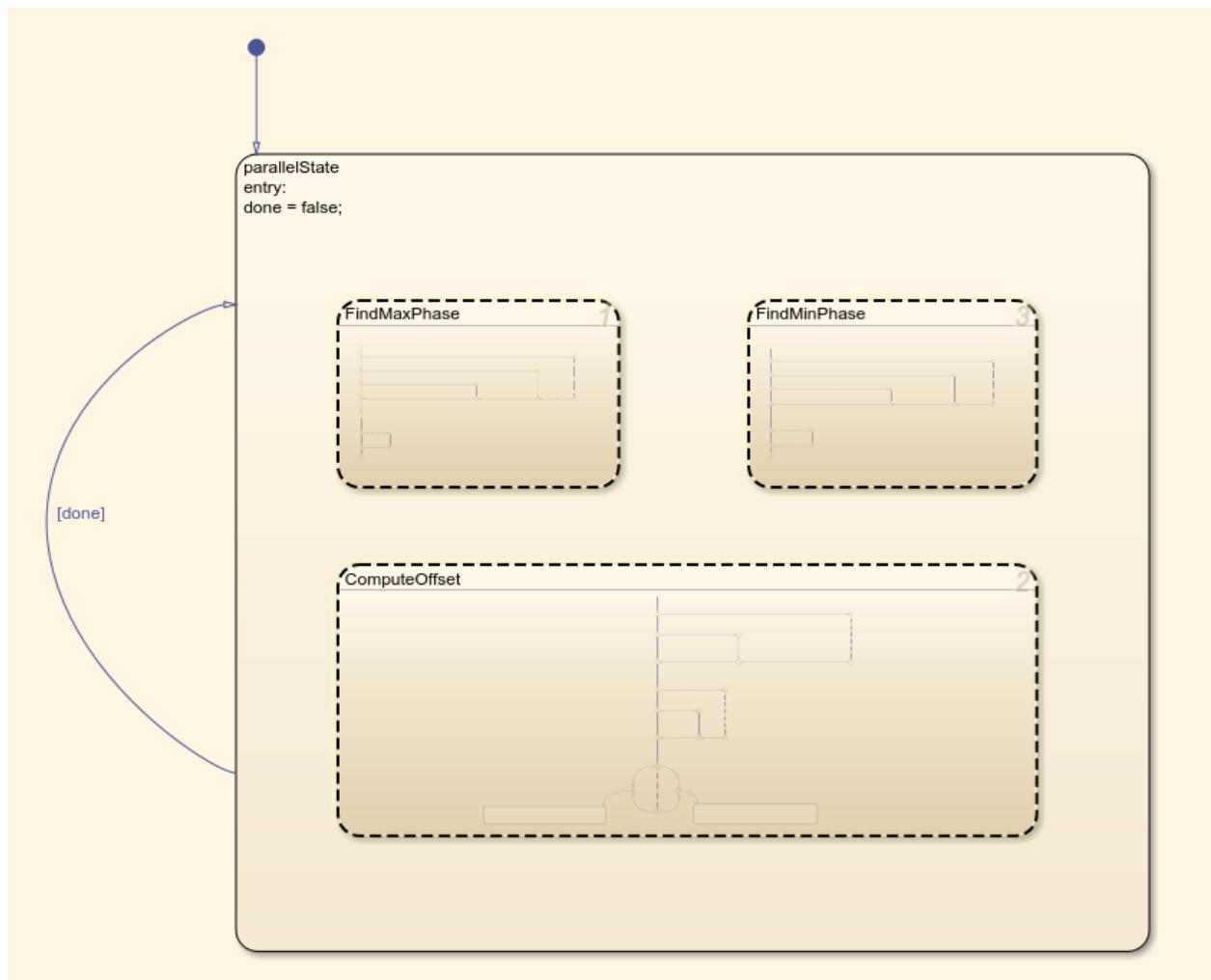


รูป 64: ขั้นที่ 5: อัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

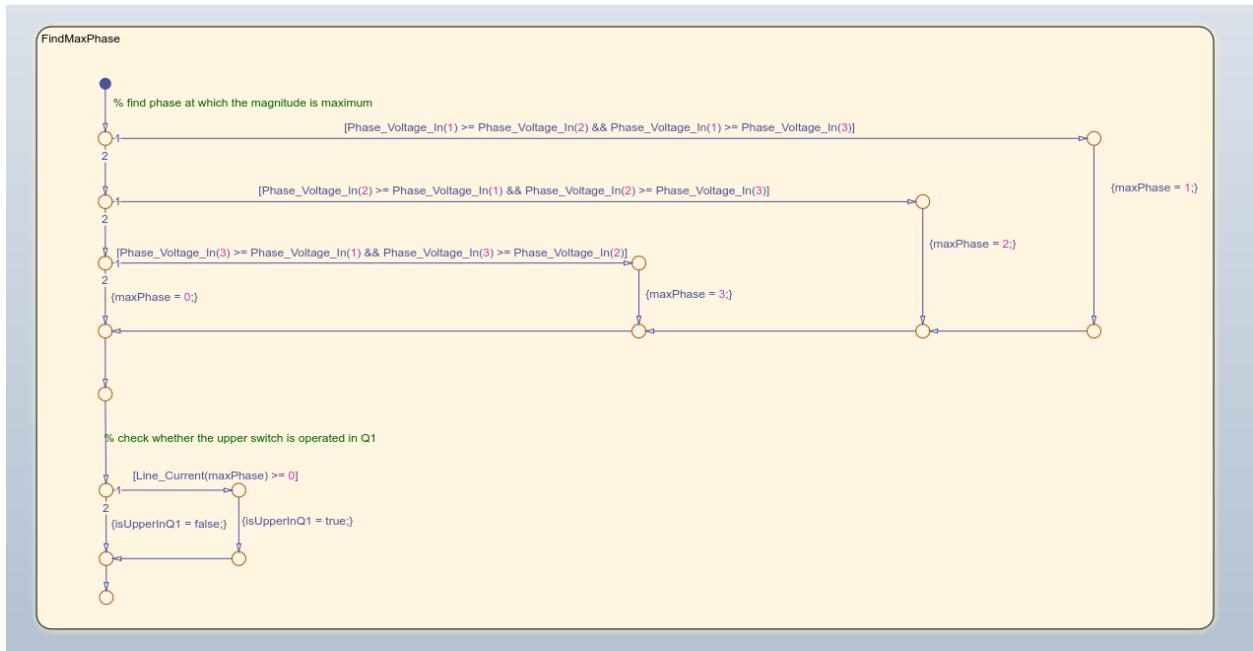
### 6.2.2 Simulink Model ในส่วนของการปรับปรุงสัญญาณ



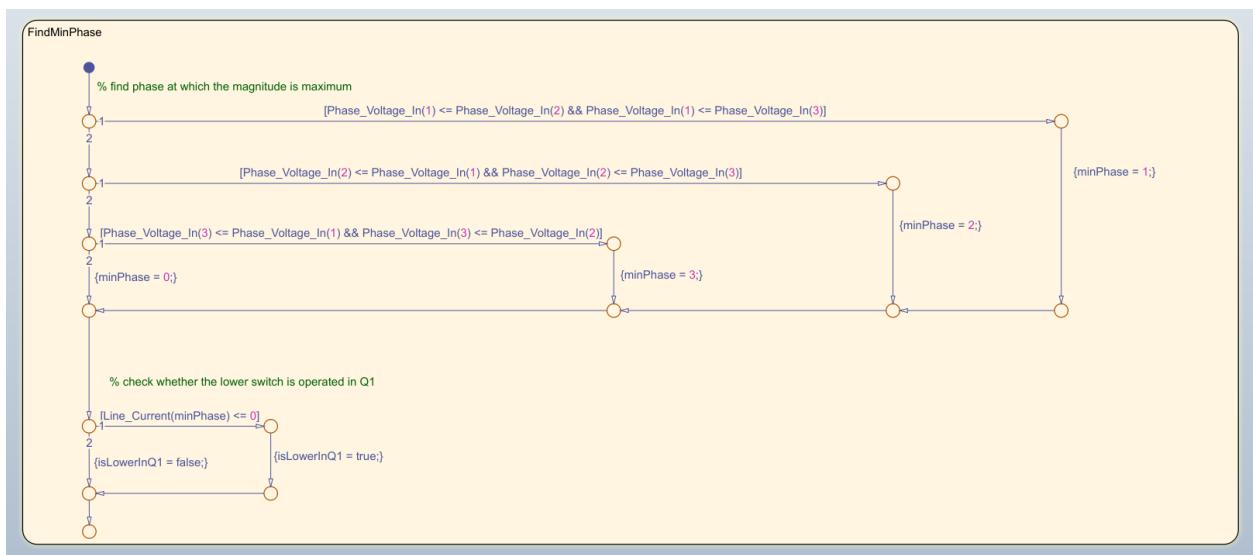
รูป 65: ขั้นที่ 4: ภายใน Subsystem ของระบบปรับปรุงสัญญาณ



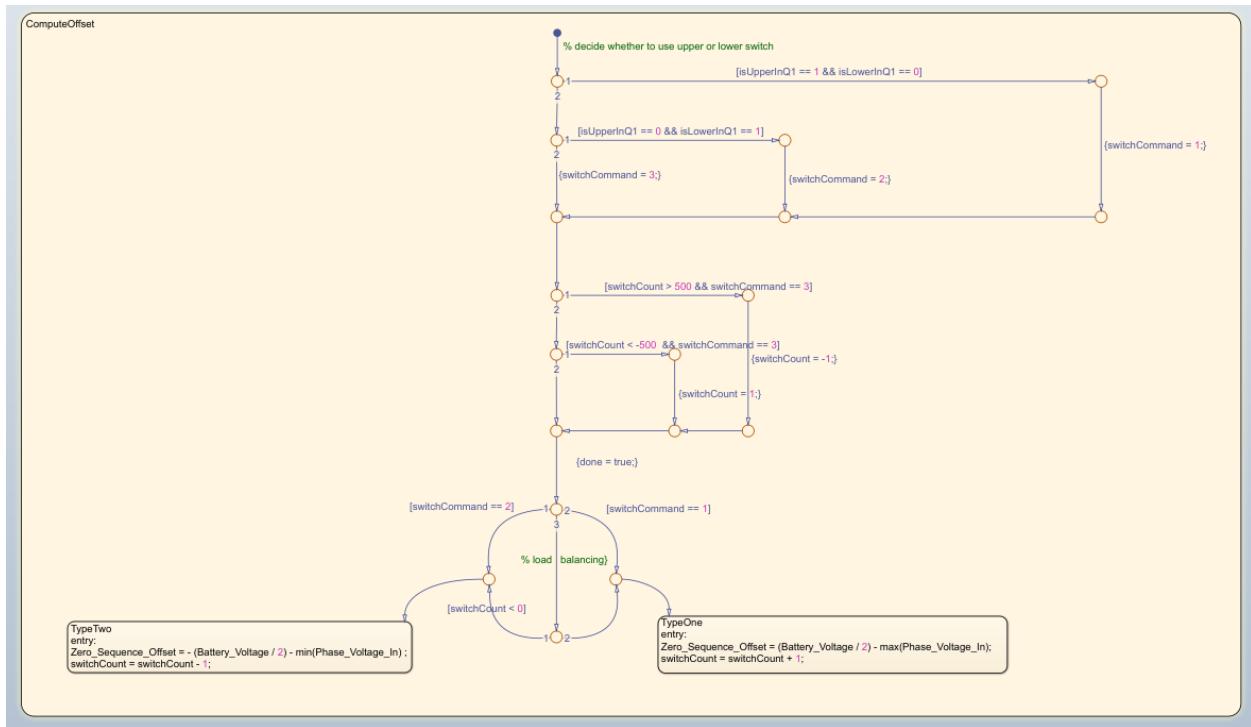
รูป 66: ขั้นที่ 5: ภายใน Stateflow chart ของตัวมอดูลีตแบบสองแขน และติดตามการทำงานในจตุภาคที่หนึ่ง



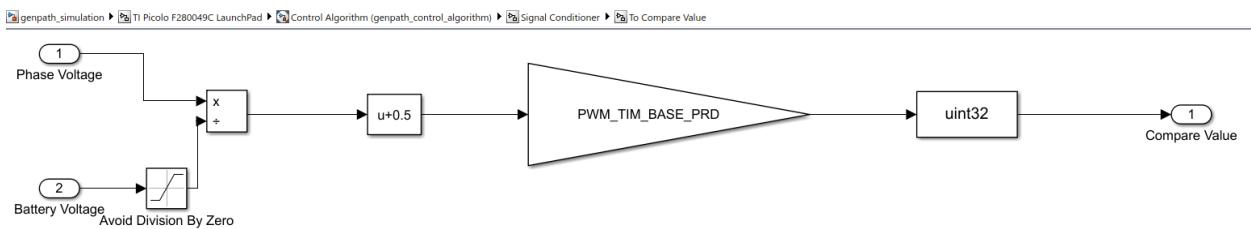
รูป 67: ขั้นที่ 6: ภายใน Subchart ที่ใช้ในการหาเฟสที่มีแรงดันคำสั่งมากที่สุด



รูป 68: ขั้นที่ 6: ภายใน Subchart ที่ใช้ในการหาเฟสที่มีแรงดันคำสั่งน้อยที่สุด

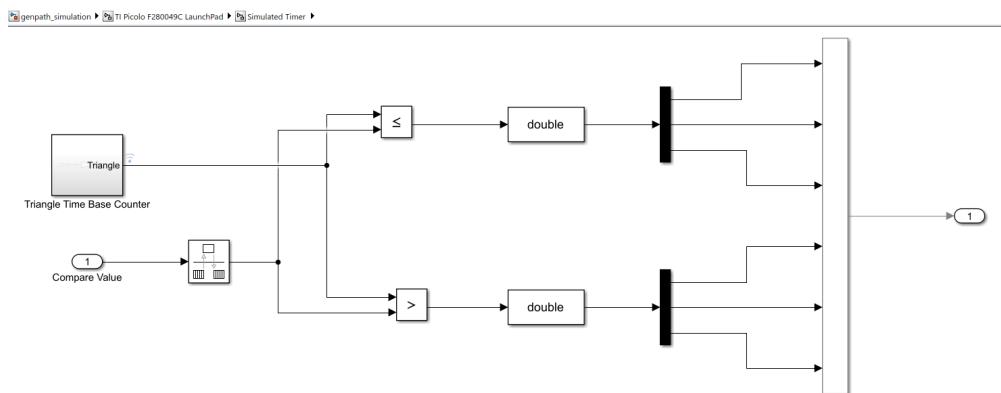


รูป 69: ขั้นที่ 6: ภายใน Subchart ที่ใช้ในการคำนวณแรงดันลำดับศูนย์



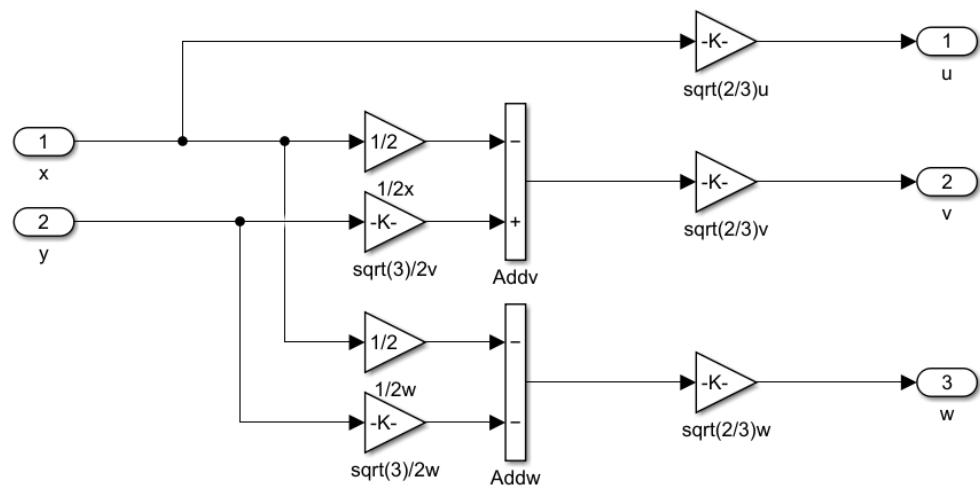
รูป 70: ขั้นที่ 5: ส่วนของการสเกลแรงดันคำสั่งให้เป็นค่าที่ป้อนให้ตัวตั้งเวลาของระบบผังตัว

### 6.2.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองอุปกรณ์รอบข้างของระบบผังตัว



รูป 71: ขั้นที่ 3: การจำลองตัวตั้งเวลาของระบบผังตัว

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



รูป 72: การแปลงผกผันของคลาร์ก(Inverse Clarke's Transformation)