

ข้อเสนอโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า วิชา 2102490

อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานชนิดเครื่องจักรกลไฟฟ้า

Power Electronics for Electromechanical Energy-Harvesting System

นายณัฐพล กาบแก้ว เลขประจำตัว 6130176521

นายสันติ ว่องประเสริฐ เลขประจำตัว 6130553421

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สรุพงศ์ สุวรรณกวิน

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 . . . . .	1
1.4	ขอบเขตของโครงการ . . . . .	2
1.5	ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากโครงการ . . . . .	2
<b>2</b>	<b>หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>2</b>
2.1	การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง (Two Arm Modulation and First Quadrant Tracking Algorithm) . . . . .	2
2.1.1	การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบใช้สัญญาณพาหะ และ อินเวอร์เตอร์โหมดแรงดันแบบสามเฟส . . . . .	2
2.1.2	กำลังสูญเสียในสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ . . . . .	3
2.1.3	การนำกระแสในจุดภาคที่ 3 ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแกลเลียม ไนไตรต์ . . . . .	4
2.1.4	การลดกำลังสูญเสียในการมอดูเลตแบบใช้สัญญาณพาหะ ด้วยการมอดูเลตแบบสองแขน . . . . .	6
2.1.5	การเพิ่มประสิทธิภาพให้การมอดูเลตแบบสองแขนด้วยการติดตามการทำงานในจุดภาคที่ 1 . . . . .	7
2.2	การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking Algorithm; MPPT) . . . . .	11
2.2.1	ข้อมูลรายละเอียดและหลักการดำเนินงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน . . . . .	11
2.2.2	Electrical analogy . . . . .	12
2.2.3	เครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโรนัสชนิดแม่เหล็กถาวร . . . . .	13
<b>3</b>	<b>ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น</b>	<b>15</b>
3.1	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน . . . . .	15
3.2	วงจรสมมูลทางไฟฟ้า ที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโรนัสชนิดแม่เหล็กถาวร . . . . .	17
3.3	ผลการจำลองของแบบจำลองทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโรนัสชนิดแม่เหล็กไฟฟ้า บนโปรแกรม MATLAB/Simulink . . . . .	18
<b>4</b>	<b>บทสรุป</b>	<b>20</b>
4.1	สรุปผลการดำเนินการ . . . . .	20
4.2	แผนการดำเนินงาน . . . . .	20
4.3	ปัญหา อุปสรรค และแนวทางแก้ไข (ถ้ามี) . . . . .	20
<b>5</b>	<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>ภาคผนวก</b>	<b>21</b>
6.1	Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบพลวัตของระบบ . . . . .	21
6.1.1	Simulink Model ในส่วนของการจำลองแบตเตอรี่ . . . . .	21
6.1.2	Simulink Model ในส่วนของการจำลองบอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI BOOSTXL-3PHGANINV . . . . .	22
6.1.3	Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบเชิงกลและมอเตอร์เชิงโรนัสแม่เหล็กถาวร . . . . .	23
6.1.4	Simulink Model ในส่วนของการจำลองแรงที่เหวี่ยงแผ่นพื้น . . . . .	24
6.2	Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมที่ทำงานบนระบบฝังตัว TI Picolo F280049C LaunchPad . . . . .	24
6.2.1	Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด . . . . .	25
6.2.2	Simulink Model ในส่วนของการปรับปรุงสัญญาณ . . . . .	26
6.2.3	Simulink Model ในส่วนของการจำลองอุปกรณ์รอบข้างของระบบฝังตัว . . . . .	29

# 1 บทนำ

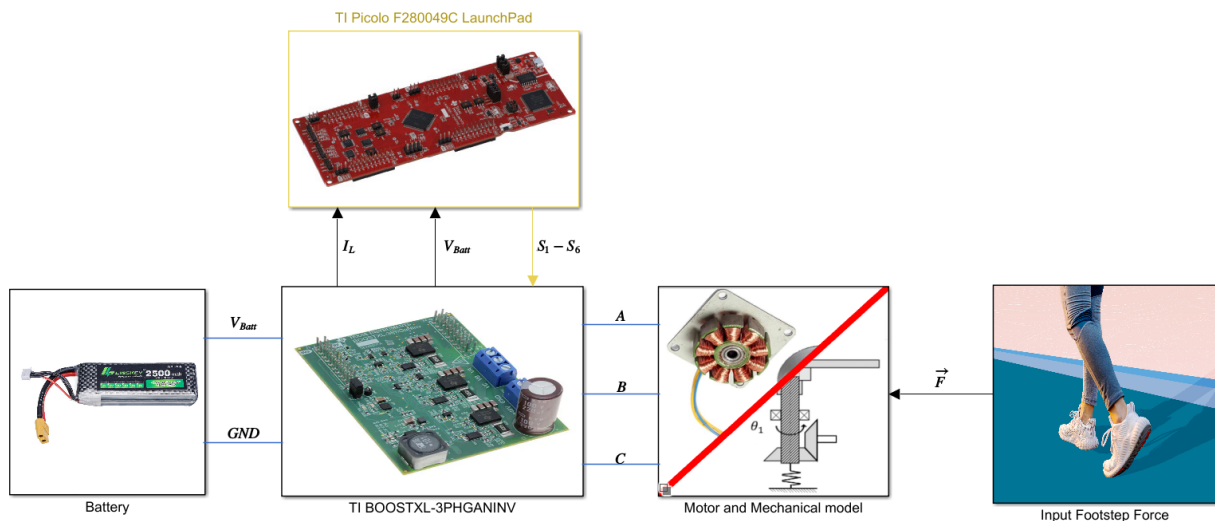
## 1.1 บทคัดย่อ

แผ่นพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยมีความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานต่ำได้ โครงการงานฉบับนี้ มีจุดประสงค์ในการพัฒนาแผ่นพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ประเภทแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Motor) โดยใช้โปรแกรม MATLAB<sup>TM</sup>/Simulink<sup>TM</sup> โดยโปรแกรม จะช่วยในการทดสอบ (Test) ทวนสอบ (Verify) ออกแบบให้ได้ผลดีที่สุด (Optimize design) และใช้โปรแกรมในการสร้างโค้ดภาษาซี และซีพลัสพลัส ที่ถูกออกแบบสำหรับระบบฝังตัว (Generate C/C++ Code Optimized for Embedded Systems) จากแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ และใช้เทคนิคในการลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ คืออัลกอริทึมในการมอดูเลตแบบสองแขน (Two Arm Modulation Algorithm) และการติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง (First Quadrant Tracking Algorithm) และได้เพิ่มประสิทธิภาพของระบบโดยรวมด้วยการนำอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking Algorithm; MPPT) มาใช้งาน

## 1.2 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวของมนุษย์นั้น เป็นเรื่องที่น่าสนใจ สามารถนำมาทำให้เกิดขึ้นจริงได้ และได้มีการศึกษามาแล้วในหลายๆ ครั้ง [1] [2] ซึ่งในการศึกษาดังกล่าว ได้ค้นพบว่า พลังงานที่ได้ในแต่ละการเหยียบแต่ละครั้งนั้น มีค่าน้อยมาก นั่นคือประมาณ 1-5 จูล เท่านั้น ดังนั้น หัวใจในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากระบบดังกล่าว คือการมีประสิทธิภาพที่ดี จึงจะสามารถเก็บพลังงานได้เพียงพอกับการใช้งานต่อไป ดังนั้น การศึกษาในโครงการฉบับนี้ จึงได้มุ่งเน้นในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบเก็บพลังงานเป็นหลัก

แผ่นพื้นเก็บพลังงานนั้น ประกอบไปด้วยหลายส่วนที่สำคัญคือ ชิ้นส่วนเชิงกล บอร์ดคอนโทรลเลอร์ มอเตอร์ไฟฟ้า และระบบควบคุมที่อยู่ในระบบฝังตัว ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 1



รูป 1: ทอพอโลยีของระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

ในส่วนของอุปกรณ์เชิงกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานนั้น เนื่องจากโครงการฉบับนี้ จะให้หน้าหนักกับการวิเคราะห์และออกแบบระบบไฟฟ้าเป็นสำคัญ จึงได้มีการนำอุปกรณ์เชิงกลที่ได้มีการวิเคราะห์และออกแบบไว้แล้วในโครงการวิศวกรรมในปีก่อนๆ [2] มาใช้งาน

## 1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

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

## 1.4 ขอบเขตของโครงการ

1. โครงการฉบับนี้จะใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร เป็นตัวกำเนิดไฟฟ้า
2. โครงการฉบับนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ TI™ F280049C ที่อยู่บนชุดทดลอง Pico™ LaunchPad™ เป็นระบบฝังตัวแกนกลาง ในคำนวณอัลกอริทึมต่างๆ
3. โครงการฉบับนี้จะใช้บอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI™ BOOSTXL-3PHGaNINV เป็นสวิตช์สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์
4. โครงการฉบับนี้จะโปรแกรมระบบฝังตัวดังกล่าวผ่านการสร้างโค้ดบนแพลตฟอร์ม Simulink™ Embedded Coder™

## 1.5 ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากโครงการ

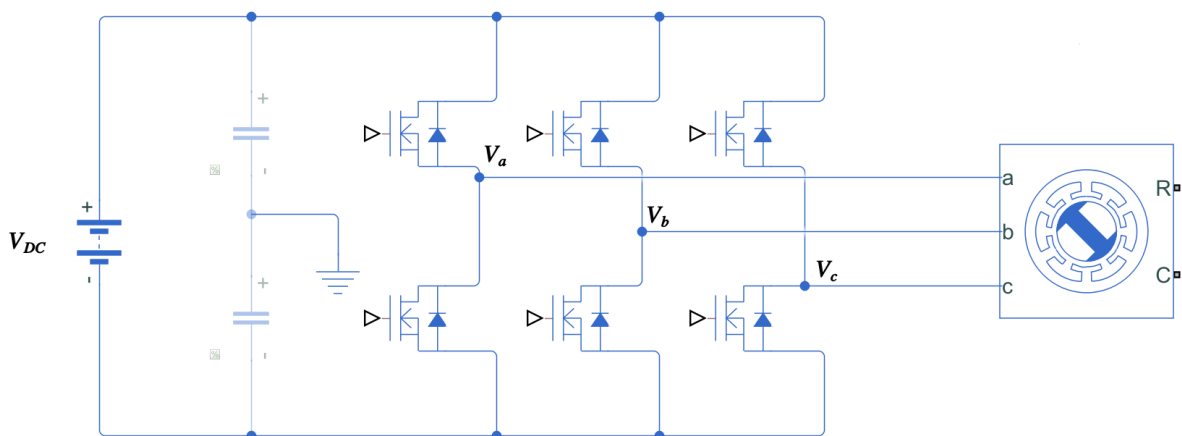
1. แผ่นพื้นเก็บพลังงานต้นแบบที่มีประสิทธิภาพสูง และสามารถใช้งานได้จริง
2. อัลกอริทึมในการลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ที่สามารถนำไปใช้กับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และยังสามารถนำไปใช้กับอินเวอร์เตอร์ใดๆ นอกเหนือจากระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานได้อีกด้วย
3. อัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงาน ที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด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

## 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ด้วยอัลกอริทึมการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง (Two Arm Modulation and First Quadrant Tracking Algorithm)

#### 2.1.1 การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบใช้สัญญาณพาหะ และ อินเวอร์เตอร์โหมตแรงดันแบบสามเฟส

ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยทั่วไปนั้นอาศัยการสร้างสนามแม่เหล็กหมุน มาเหนี่ยวนำให้เกิดแรงบิด ซึ่งในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรรุ่นนี้อาศัยการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ อินเวอร์เตอร์ จึงเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ในโครงการฉบับนี้ ได้นำเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรสามเฟส มาเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน โดยจะเก็บพลังงานที่ผลิตได้ไว้กับแบตเตอรี่ ในโครงการฉบับนี้ จึงเลือกใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีทอพอโลยีดังรูปที่ 2



รูป 2: ทอพอโลยีของอินเวอร์เตอร์สามเฟส

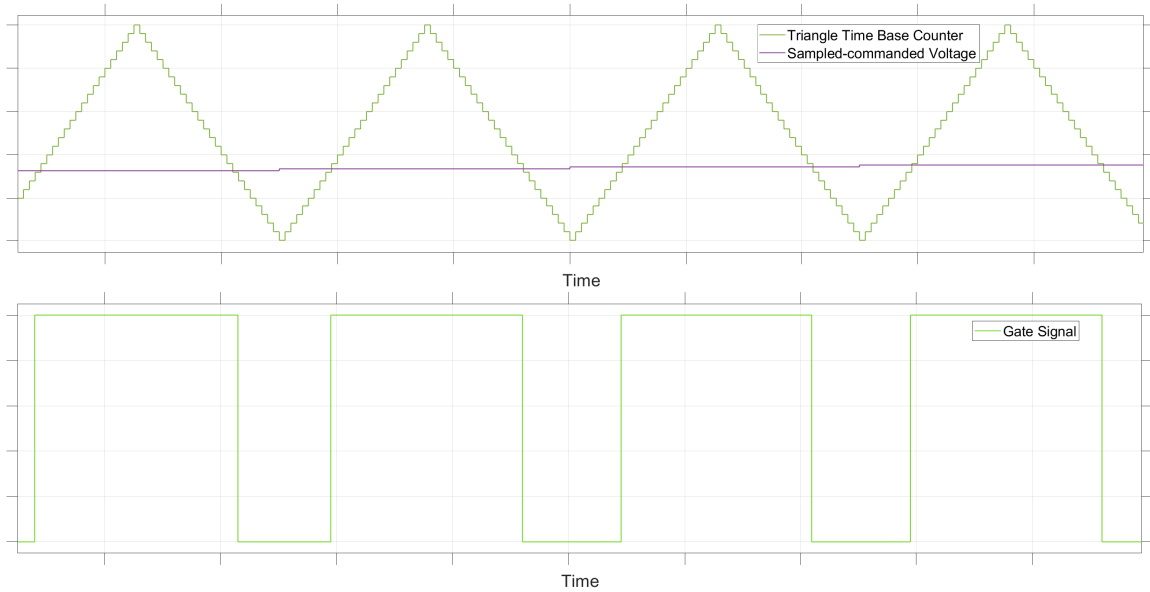
อินเวอร์เตอร์ทอพอโลยีที่ได้นำเสนอมาข้างต้น สามารถสร้างแรงดันออกที่แต่ละขั้วทั้งสามได้เพียงแค่ 2 ค่าเท่านั้นคือ

$$V_t = \begin{cases} V_{DC}, & \text{ถ้าสวิตช์ด้านบนปิด และสวิตช์ด้านล่างเปิด} \\ 0, & \text{ถ้าสวิตช์ด้านบนเปิด และสวิตช์ด้านล่างเปิด} \end{cases} \quad (1)$$

โดยที่  $V_t$  เป็นแรงดันที่ขั้วออกของอินเวอร์เตอร์ และถ้าหากพิจารณาให้กึ่งกลางบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นจุดอ้างอิงแรงดัน จะได้ว่า

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

เนื่องจากกระชับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัสสามเฟสประเภทแม่เหล็กถาวรนั้น จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับคลื่นรูปไซน์ ดังนั้นเทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยใช้สัญญาณพาหะ (Carrier-based Pulse Width Modulation) จึงได้ถูกนำมาใช้ โดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยใช้สัญญาณพาหะมีหลักการในการทำงานคือ นำสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยม มาเปรียบเทียบกับสัญญาณคำสั่ง โดยผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบนั้น จะได้เป็นสัญญาณขับนำของสวิตช์ ดังรูปที่ 2.1.1 ซึ่งจะส่งผลให้ แรงดันที่ขั้วของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับแรงดันคำสั่ง



รูป 3: การมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยใช้สัญญาณพาหะ

จากรูปข้างต้น จะเห็นได้ว่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณขับนำนั้น เปลี่ยนไปตามขนาดของสัญญาณคำสั่ง และสัญญาณที่จะนำมาเปรียบเทียบกับนั้น จะเป็นสัญญาณที่ถูกสุ่มตัวอย่างแล้วคงค่า (Sample and Hold) เพราะว่า อัลกอริทึมการมอดูเลตที่เลือกใช้ในโครงงานฉบับนี้นั้น เป็นการคำนวณบนระบบฝังตัว ซึ่งเป็นการประมวลผลในโดเมนดิจิทัล

### 2.1.2 กำลังสูญเสียในสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

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

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

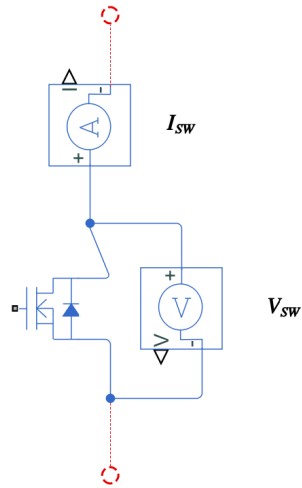
จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า ในขณะที่กำลังเปิดสวิตช์ กระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์จะเหลื่อมกัน ซึ่งเกิดจากโครงสร้างทางกายภาพของทรานซิสเตอร์ จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในขณะสวิตช์ ซึ่งจะคำนวณได้จาก

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

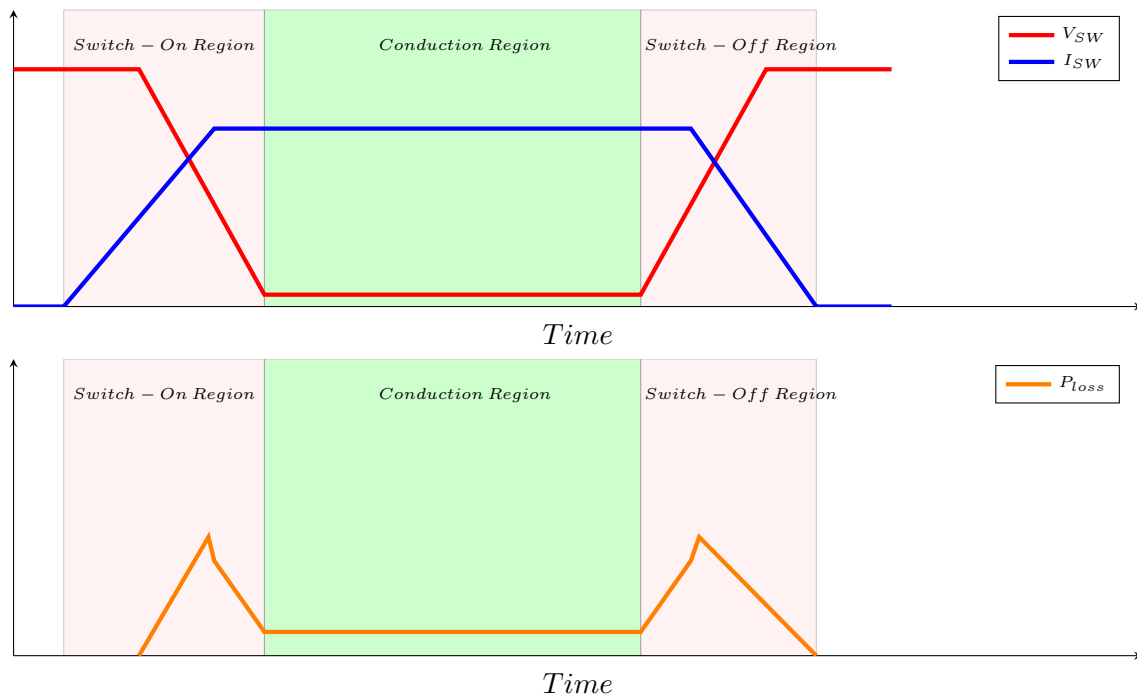
แต่เมื่อพอสวิตช์เปิดเต็มที่แล้ว สวิตช์จะมีแรงดันตกคร่อมอยู่เล็กน้อย ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในขณะนำกระแส

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

เมื่อ  $v_{sw(on)}$ ,  $i_{sw(on)}$  คือแรงดันตกคร่อมสวิตช์ และกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ในขณะนำกระแส ตามลำดับ



รูป 4: นิยามของ  $V_{SW}$ ,  $I_{SW}$



รูป 5: แรงดันตกคร่อมสวิตช์ กระแสของสวิตช์ และกำลังสูญเสียในสวิตช์

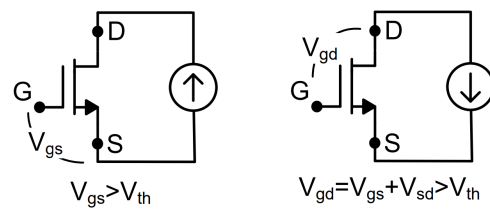
กำลังสูญเสียระหว่างสวิตช์นั้น ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะสมบัติของสวิตช์ที่เลือกใช้ และจำนวนครั้งในการสวิตช์ นั่นคือ ถ้าหากสวิตช์ที่เลือกใช้มีคุณลักษณะสมบัติที่ทำให้อยู่ในย่านกำลังสวิตช์นาน หรือมีจำนวนครั้งในการสวิตช์มาก ก็จะทำให้กำลังสูญเสียขณะสวิตช์สูงตามไปด้วย กำลังสูญเสียขณะนำกระแสขึ้น ขึ้นอยู่กับว่าในขณะนำกระแสนั้นมีแรงดันตกคร่อมสวิตช์มากแค่ไหน ถ้าหากแรงดันตกคร่อมสวิตช์มาก ก็จะทำให้กำลังสูญเสียขณะนำกระแสมากขึ้นตามมา

### 2.1.3 การนำกระแสในจุดภาคที่ 3 ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแกลเลียม ไนไตรท์

ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแกลเลียม ไนไตรท์ หรือ แกน (Gallium Nitride; GaN) ถือเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับผู้ออกแบบในงานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพราะว่าทรานซิสเตอร์แกน มีข้อดีกว่าทรานซิสเตอร์แบบซิลิคอนในหลายด้านคือ การไม่มีบอตโตไดโอด ซึ่งทำให้ไม่มี reverse recovery loss ในบอตโตไดโอด ข้อได้เปรียบนี้ทำให้ทรานซิสเตอร์แบบแกนมีการกำลังสูญเสียในขณะสวิตช์น้อยกว่าแบบดั้งเดิม ทำให้ทำงานได้ที่ความถี่สูงขึ้น ใช้ทรานซิสเตอร์ตัวเล็กลงได้ และความร้อนน้อยลง ซึ่งในโครงงานฉบับนี้ ได้เลือกใช้ทรานซิสเตอร์แกนเป็นสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์

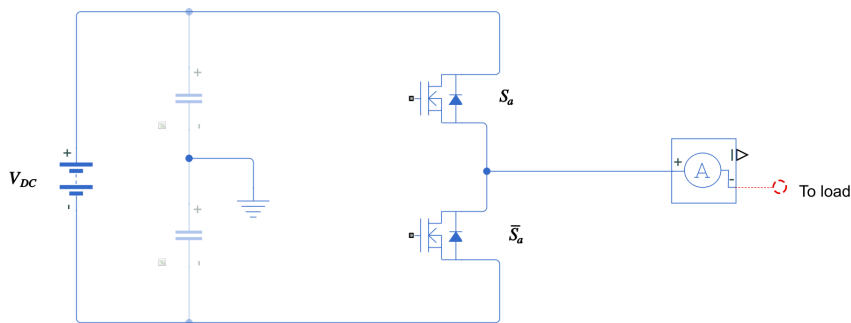
เนื่องจากโครงสร้างที่ไม่เหมือนกันของทรานซิสเตอร์แบบแกน ทำให้การนำกระแสในจุดภาคที่สามของทรานซิสเตอร์แบบแกนนั้นแตกต่างไปจากทรานซิสเตอร์แบบซิลิคอนคือ การนำกระแสผ่านบอตโตไดโอด

เงื่อนไขที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์แกนนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า (Forward) และย้อนกลับ (Reverse) คือ



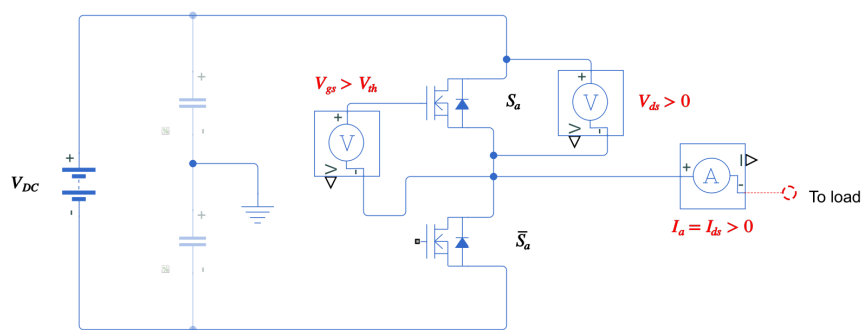
รูป 6: เงื่อนไขที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์แกนนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า และย้อนกลับ

ถ้าหากพิจารณาตัวอย่างที่เกิดขึ้นจริงในอินเวอร์เตอร์เพื่อให้เห็นภาพพจน์ชัดเจนขึ้น ตามรูปวงจรของอินเวอร์เตอร์ ที่ตัดมาพิจารณาเฉพาะหนึ่งเฟส ตามรูปที่ 7



รูป 7: กรณีตัวอย่างการนำกระแสที่เกิดขึ้นจริงในอินเวอร์เตอร์

เรากำหนดให้สวิตช์  $S_a$  เป็นสวิตช์ที่เราสนใจ โดยถ้าหากเราขับนำสวิตช์ให้สวิตช์นำกระแส (On) นั่นคือ เราขับนำสัญญาณ  $V_{gs} > V_{th}$  แล้วถ้าหากโหลดที่ต่ออยู่กับขั้วขอร์สของสวิตช์  $S_a$  ดึงกระแสออกไปจากอินเวอร์เตอร์ นั่นคือ  $I_a > 0$  จะทำให้ แรงดันตกคร่อมขั้วเดรนซอร์สของสวิตช์  $S_a$  เป็นค่าบวก นั่นคือ  $V_{ds} > 0$  เนื่องจากสวิตช์  $S_a$  กำลังนำกระแสอยู่ ดังนั้นสวิตช์  $\bar{S}_a$  ไม่สามารถนำกระแสพร้อมๆ กับสวิตช์  $S_a$  ได้ เพราะจะลัดวงจร ดังนั้น กระแส  $I_a$  ทั้งหมด ก็จะต้องไหลผ่านสวิตช์  $S_a$  ทำให้กระแส  $I_{ds} = I_a > 0$  เนื่องจากกระแส  $I_{ds} > 0$  และ  $V_{ds} > 0$  ดังนั้น สวิตช์นำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า จุดทำงานที่กล่าวถึงข้างต้นจะแสดงในรูป 9

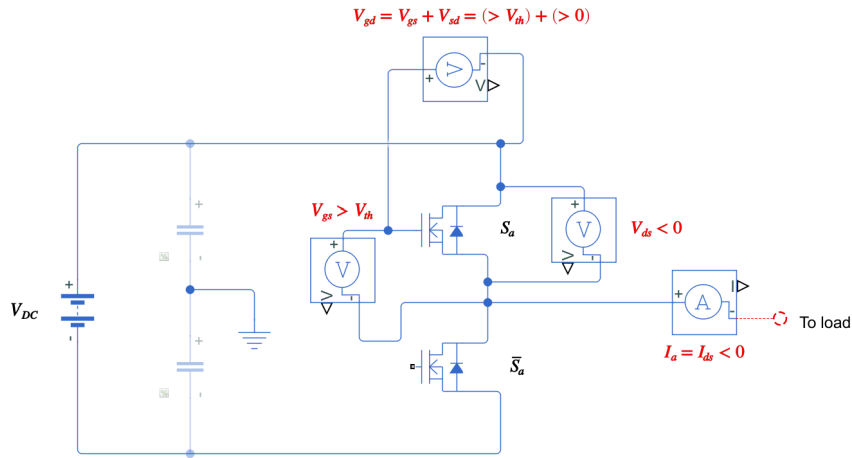


รูป 8: กรณีตัวอย่างการนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า:  $V_{gs} > V_{th}$ ,  $I_{ds} > 0$

ถ้าหากพิจารณากรณีถัดไปคือการขับนำสวิตช์ในลักษณะเดิมคือ การขับสัญญาณ  $V_{gs} > V_{th}$  แต่มีสิ่งที่เปลี่ยนไปคือ ทิศทางการไหลของกระแส นั่นคือ ถ้าหากโหลดมีการดึงกระแสเข้าอินเวอร์เตอร์  $I_a = I_{sd} > 0$  จะทำให้ แรงดันตกคร่อมขั้วเดรนซอร์สของสวิตช์เป็นค่าลบ นั่นคือ  $V_{ds} < 0$ ;  $V_{sd} > 0$  เนื่องจาก  $V_{gd} = V_{gs} + V_{sd} = (\text{ค่าที่มากกว่า } V_{th}) + \text{ค่าที่เป็นบวก}$  ดังนั้น  $V_{gd} > V_{th}$  และ  $I_{ds} < 0$  ทำให้สวิตช์นำกระแสย้อนกลับ

เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันขณะนำกระแสไปข้างหน้าได้โดย

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

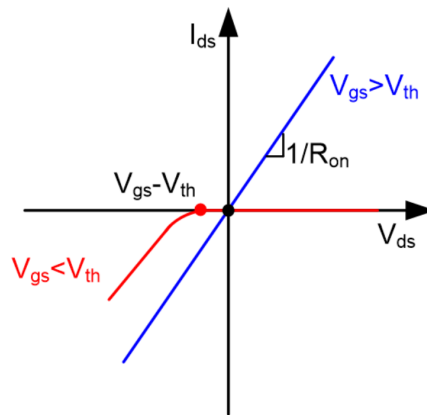


รูป 9: กรณีตัวอย่างการนำกระแสในทิศทางย้อนกลับ:  $V_{gd} > V_{th}$ ,  $I_{ds} < 0$

เมื่อแรงดันที่ขาเกตเทียบกับซอร์สของทรานซิสเตอร์ มากกว่าค่าแรงดันขีดแบ่ง และแรงดันที่ขาเดรนเทียบกับซอร์สเป็นบวก จะทำให้แกนนำกระแสในจุดภาคที่หนึ่ง โดยที่เรานิยาม  $R_{ds(on)}$  เป็นความต้านทานสมมูลของทรานซิสเตอร์ในขณะที่กำลังทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง และเราก็สามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันขณะนำกระแสย้อนกลับได้โดย

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

ในการนำกระแสย้อนกลับ ข้อมูลต่างๆ จะเป็นทวิลักษณ์ของข้อมูลในขณะนำกระแสไปข้างหน้าเลยคือ เมื่อแรงดันที่ขาเกตเทียบกับเดรน มากกว่าค่าแรงดันขีดแบ่ง และแรงดันที่ขาซอร์สเทียบกับเดรนเป็นบวก จะทำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแสในจุดภาคที่สาม



รูป 10: พฤติกรรมการนำกระแสในจุดภาคที่หนึ่ง และจุดภาคที่สามของทรานซิสเตอร์แกน

จากรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่า แรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ในจุดภาคที่สาม จะมากกว่าแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ในจุดภาคที่หนึ่งที่ค่ากระแสเท่ากัน ซึ่งทำให้การนำกระแสในจุดภาคที่สามนั้นมีกำลังสูญเสียในขณะนำกระแสมากกว่าการนำกระแสในจุดภาคที่หนึ่ง

#### 2.1.4 การลดกำลังสูญเสียในการมอดูเลตแบบใช้สัญญาณพาหะ ด้วยการมอดูเลตแบบสองแขน

จากที่ได้นำเสนอไปแล้วในส่วนของการมอดูเลตแบบใช้สัญญาณพาหะ ว่า เป็นการมอดูเลตที่มีจำนวนครั้งในการสวิตช์มาก ซึ่งทำให้กำลังสูญเสียในขณะสวิตช์สูง แต่เรามีเทคนิคในการลดกำลังสูญเสียขณะสวิตช์ในการมอดูเลตแบบใช้สัญญาณพาหะด้วยการลดจำนวนครั้งในการสวิตช์คือ การมอดูเลตแบบสองแขน

แขนของการมอดูเลต คือ คู่ของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแรงดันออกที่ขั้วของอินเวอร์เตอร์ จะประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ตัวบน ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ที่ต่ออยู่กับบัสแรงดันไฟตรงที่ขั้วบวก และทรานซิสเตอร์ตัวล่าง ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ที่ต่ออยู่กับบัสแรงดันไฟตรงที่ขั้วลบ จากทอพอโลยีของอินเวอร์เตอร์ที่เราเลือกใช้ในโครงงานฉบับนี้ ซึ่งแสดงไว้ ณ รูปที่ 2 จะเห็นได้ว่า จะมีแขนของการมอดูเลตทั้งหมดสามแขน



จากการพิจารณาจะเห็นได้ว่า หากเราต้องการสร้างแรงดันรูปไซน์ที่หัวของอินเวอร์เตอร์ 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

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

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

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

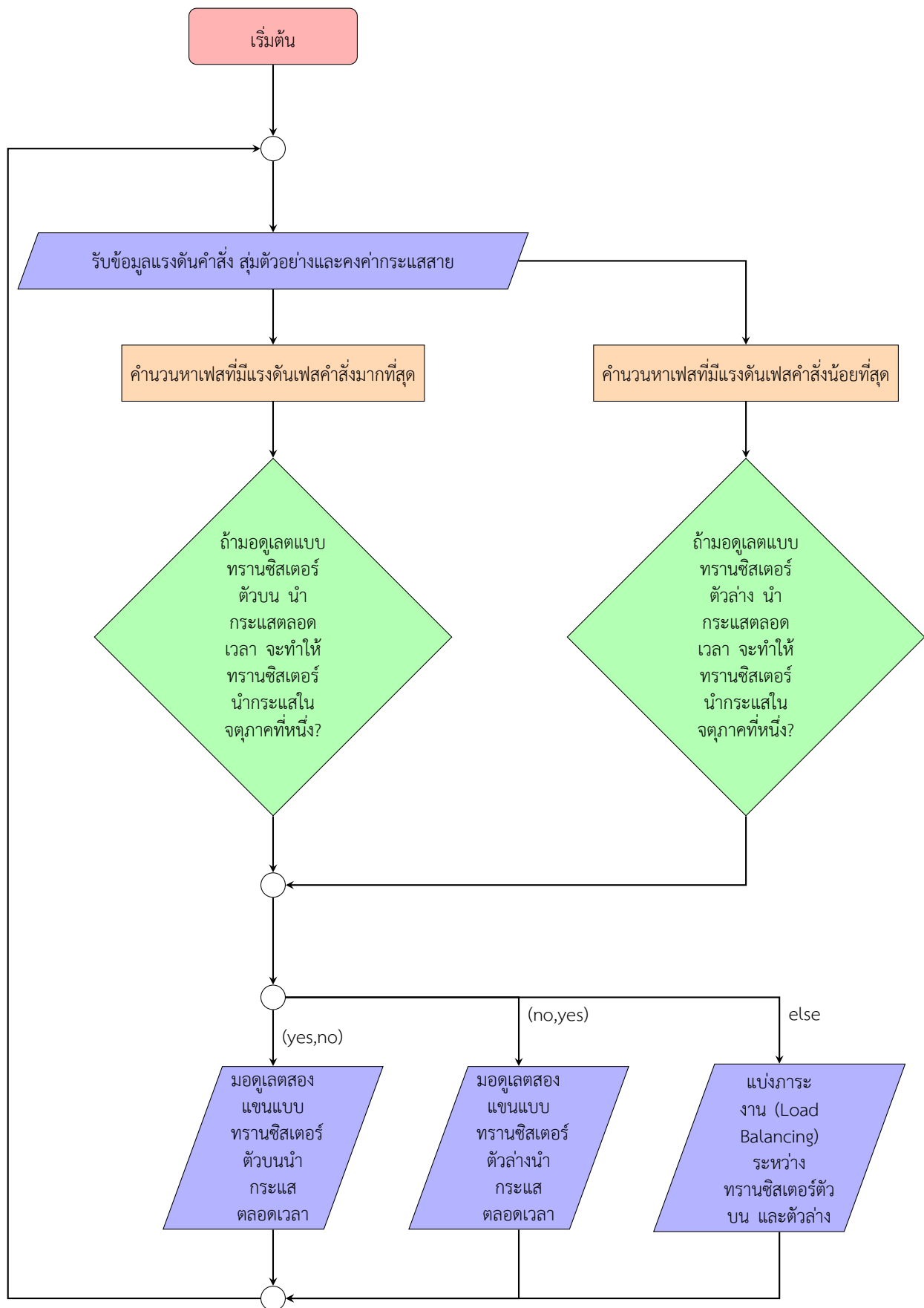
ดังนั้น เราสามารถเลือกแรงดันลำดับศูนย์ที่จะเพิ่มให้กับแรงดันเฟสคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ โดยมีเป้าหมายคือ ทำให้แรงดันคำสั่งในเฟสใดเฟสหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเท่ากับแรงดันบวก หรือลบของบัสแรงดันกระแสตรง เพื่อที่จะทำให้แขนของการมอดูเลตแขนนั้น ปิด หรือ เปิดตลอดเวลา นั่นคือ

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

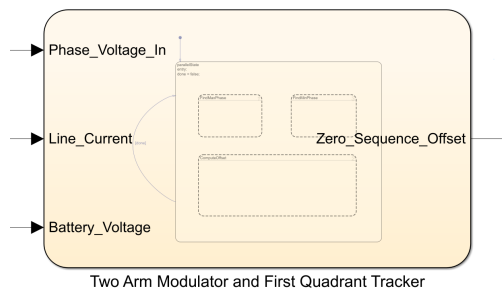
ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ตัวบนกำลังเปิดตลอดเวลา ทรานซิสเตอร์ตัวล่าง ก็จะปิดตลอดเวลาด้วย การให้ทรานซิสเตอร์แขนใดแขนหนึ่งเปิด หรือปิดตลอดเวลา จะทำให้ลดจำนวนครั้งในการสวิตช์ได้หนึ่งในสามเท่า ก็จะช่วยลดกำลังสูญเสียในขณะสวิตช์ได้

### 2.1.5 การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการมอดูเลตแบบสองแขนด้วยการติดตามการทำงานในจุดภาคที่ 1

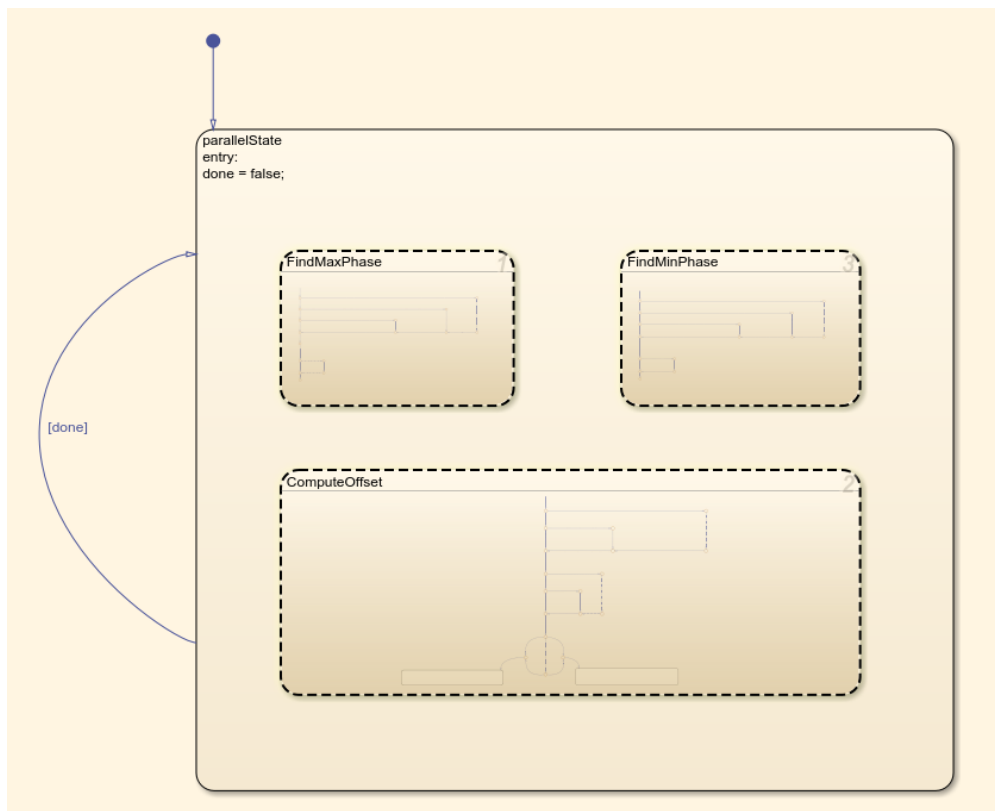
จากผลลัพธ์ที่ได้อภิปรายมาในส่วนที่แล้ว เราได้ทราบว่า เรามีอิสระในเลือกการมอดูเลตสองแขนได้สองประเภทคือ แบบทรานซิสเตอร์ตัวบนนำกระแสตลอด และทรานซิสเตอร์ตัวล่างนำกระแสตลอด ดังนั้น เราจะใช้ข้อได้เปรียบนี้ในการเลือกรูปแบบการมอดูเลตแบบสองแขนให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด นั่นคือ การหลีกเลี่ยงการทำงานในจุดภาคที่ 3 สำหรับทรานซิสเตอร์ตัวที่จะนำกระแสตลอดเวลา โดยจะมีหลักในการคำนวณค่าแรงดันเฟสลำดับศูนย์ที่จะบวกเข้าไป เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ ตามผังงานในรูปที่ 11 ซึ่งจากผังงานที่ได้นำเสนอไปข้างต้น เราสามารถนำไปสร้างเป็นแผนภาพการเปลี่ยนสถานะ บน Simulink<sup>TM</sup>/Stateflow<sup>TM</sup> ได้ดังที่แสดงไว้ในรูป



รูป 11: ผังงานของอัลกอริทึมในการคำนวณแรงดันลำดับศูนย์เพื่อติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่งของสวิตช์ที่ถูกมอดูเลตแบบสองแขน

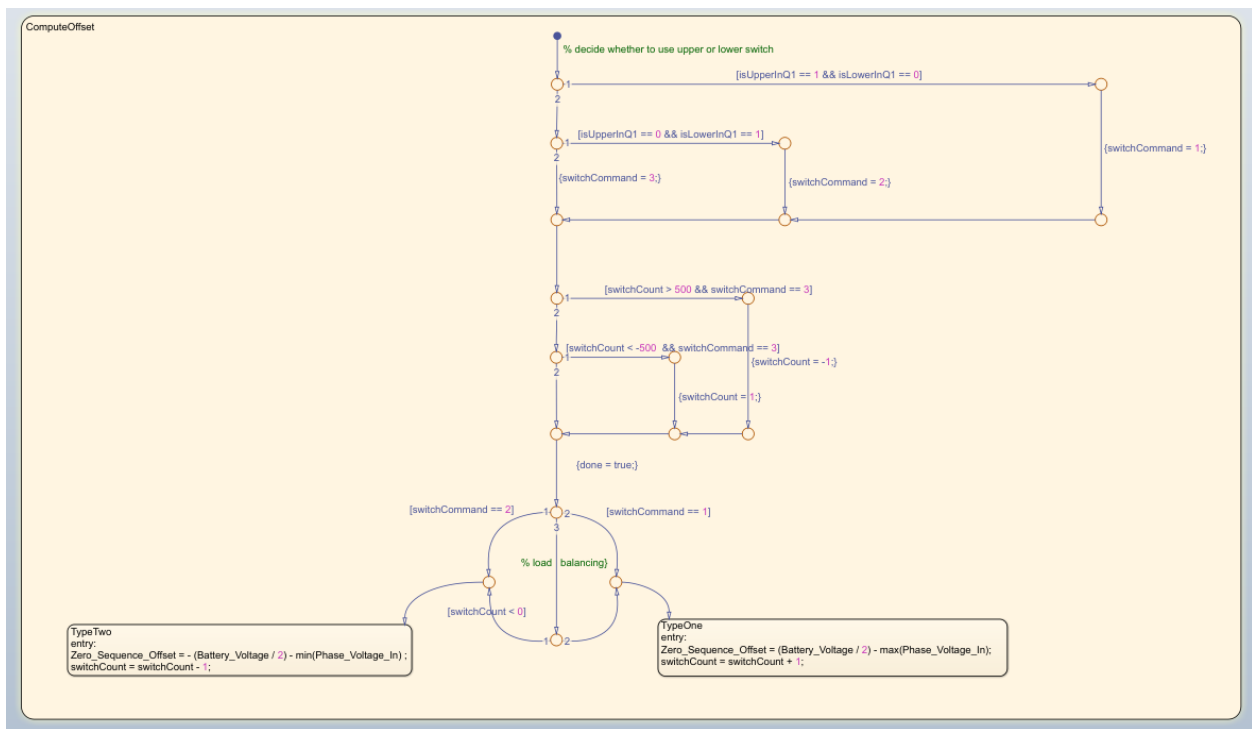


รูป 12: บล็อก Stateflow ของอัลกอริทึมในการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง



รูป 13: ภาพรวมของ Stateflow chart ของอัลกอริทึมในการมอดูเลตแบบสองแขน และการติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง





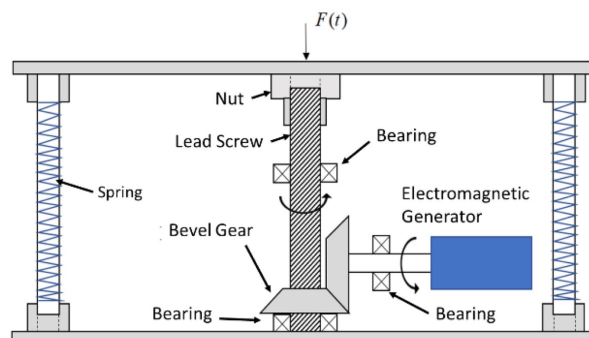
รูป 16: Subchart ในส่วนของการคำนวณแรงดันลำดับศูนย์

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

### 2.2.1 ข้อมูลรายละเอียดและหลักการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

เริ่มแรกต้องเข้าใจหลักการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงานเพื่อทราบความสัมพันธ์ของกลไกและสมการต่างๆของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน จากนั้นจึงสามารถแปลงเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้าได้ต่อไป

แผ่นพื้นเก็บพลังงาน สามารถแปลงพลังงานจากการก้าวเดินของมนุษย์แปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ หลักการทำงาน เริ่มจากการเหยียบของมนุษย์ลงบนแผ่นพื้นเก็บพลังงานทำให้เกิดการยุบตัวของแผ่นพื้น nut จะขยับขึ้นลงไปขับเกลียวนำ(lead screw) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่เชิงเส้นไปยังการเคลื่อนที่เชิงหมุน ให้หมุนรอบแนวแกนตั้ง และ bevel gear ทำหน้าที่เปลี่ยนจากเคลื่อนที่เชิงหมุนแนวแกนตั้งจากเพลากลียวนำให้เปลี่ยนทิศทางการหมุนไป 90 องศา หมุนรอบแนวนอน เพื่อขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 17



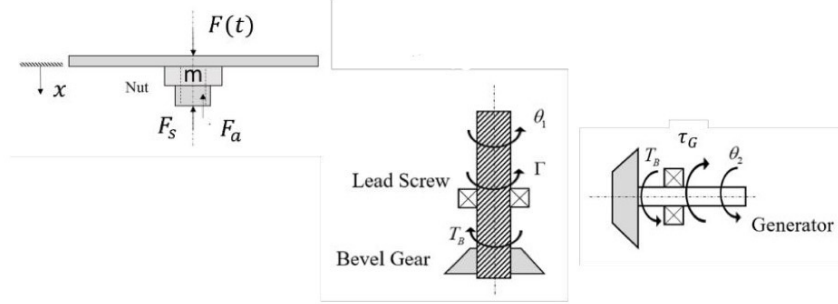
รูป 17: กลไกเกลียวทวนอน(lead screw) ภายใตแผ่นเก็บพลังงาน

จากแผนภาพของวัตถุของระบบทางกล lead และ screw ดังรูปที่ 18 สมการต่างๆ ได้มาจากการเคลื่อนที่ของ nut และการเคลื่อนที่เชิงหมุนของ lead screw และ โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 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 18: แผนภาพของวัตถุของ lead screw

โดยที่

$m$  คือ มวลของแผ่นพื้น และ nut

$J_1$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของ lead screw

$J_G$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของ bevel gear

$x$  คือ ระยะกระจัดของแผ่นพื้น และ nut

$l$  คือ ระยะห่างระหว่างเกลียวของ lead screw

$\theta_1$  คือ ตำแหน่งเชิงมุมของ lead screw

$\theta_2$  คือ ตำแหน่งเชิงมุมของ bevel gear

$F(t)$  คือ แรงกดลงบนแผ่นพื้นที่เวลาใดๆ

$F_s$  คือ แรงสปริง

$F_a$  คือ แรงเสียดทานระหว่าง nut และ lead screw

$T_B$  คือ แรงบิดเสียดทานระหว่าง nut และ lead screw

$T_G$  คือ แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque)

$T_a$  คือ แรงบิดส่งผ่านจาก nut และไปยัง lead screw ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $F_a$  ดังนี้

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

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

### 2.2.2 Electrical analogy

แบบจำลองทางไฟฟ้าที่ของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานสร้างโดยเริ่มจาก โดยใช้ electrical analogy เพื่อที่จะแปลงเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้า

Analogy ของวงจรไฟฟ้าเป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อทำการวิเคราะห์ระบบทางกล ปัญหาทางกลบางอย่างสามารถแก้ไขได้ง่ายขึ้นผ่านการเปรียบเทียบทางไฟฟ้า analogy ที่ใช้งานทั่วไปไม่มีเป็นสิ่งที่สัมพันธ์กันของปริมาณทางกลและทางไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณทางกลและไฟฟ้า

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 ( $n_L/n_M$ )

### 2.2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ซึ่งสนามกระตุ้นมาจากแม่เหล็กถาวรแทนที่จะเป็นขดลวด มีโครงสร้างที่สเตเตอร์เหมือนกับมอเตอร์เหนี่ยวนำคือมีขดลวดสามเฟสพันอยู่ในร่องสลอตที่สเตเตอร์ แต่ที่โรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร ข้อดีของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร คือ ไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และขดลวดสร้างสนามที่ตัวโรเตอร์ ทำให้ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด

ค่าความเหนี่ยวนำภายในและฟลักซ์แม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมุมของโรเตอร์ จากสมการแรงดันสามเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ดังสมการ

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

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

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

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

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

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

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

เมื่อ

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

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

$\omega_e$  คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์

$\theta_e$  คือ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วของแม่เหล็กถาวร

$L_d, L_q$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ในแนวแกน d และ q

$\lambda'$  คือ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วของแม่เหล็กถาวร

จากนั้นใช้กฎของคลาร์ก(Clark's Transformation) แปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงนิ่ง เพื่อแปลงสมการแรงดันสามเฟสของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร เป็นสมการแรงดันบนกรอบอ้างอิงนิ่ง แกน x-y ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำที่พิจารณาทั้งค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและค่าความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดสเตเตอร์ ดังสมการด้านล่าง

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

เมื่อ

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

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

$R_g$  คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

$L_s$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและค่าความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดสเตเตอร์

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

และจากการแปลงของปาร์ก (Park's transformation) 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 แรงดันเฟสสเตเตอร์ในแกน d และ q บนกรอบอ้างอิงโรเตอร์

$i_d, i_q$  คือ กระแสเฟสสเตเตอร์ในแกน d และ q บนกรอบอ้างอิงโรเตอร์

จากพิจารณากำลังขาเข้าของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส

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

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

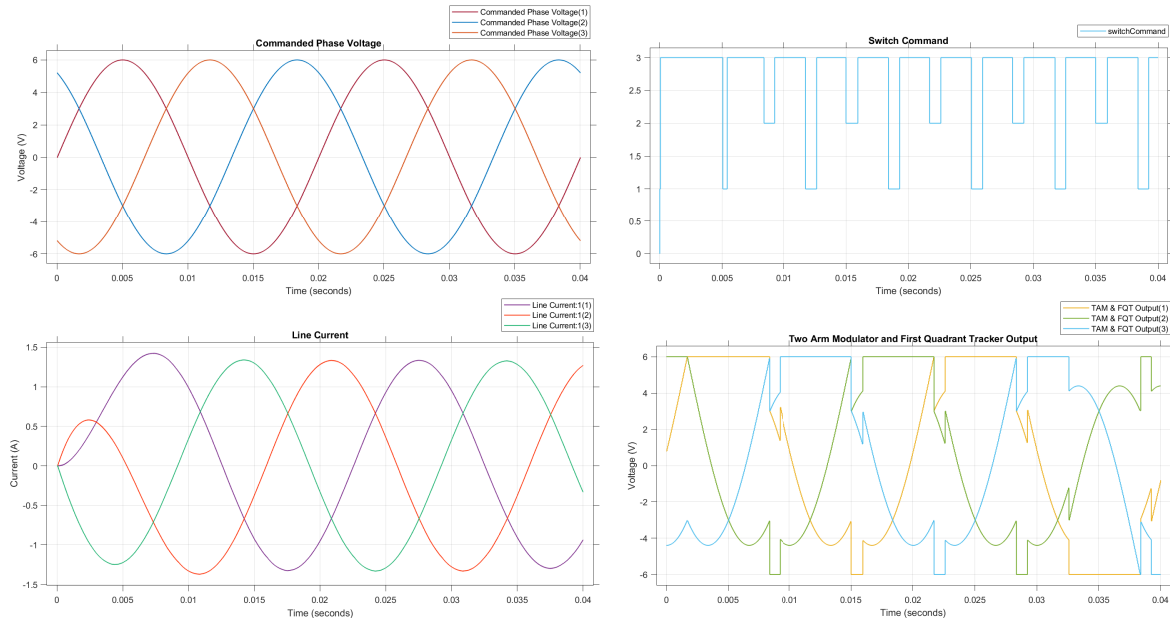
$P_{mech}$  คือ กำลังเชิงกลของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส

$T_e$  คือ แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque)

$p$  คือ จำนวนคู่ขั้วของเครื่องจักรไฟฟ้า



### 3 ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น



รูป 19: 50Hz

#### 3.1 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

จากการศึกษาการทำงานของทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และ Electrical analogy เพื่อแปลงระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน เป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้า มีขั้นตอนดังนี้

เนื่องจากอัตราส่วนของเกียร์ของ gear train และ bevel gears ที่ใช้ในการส่งการเคลื่อนที่เชิงหมุนจาก lead screw ไปยังมอเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีอัตราส่วนเท่ากับ 1:1 จึงได้ความสัมพันธ์

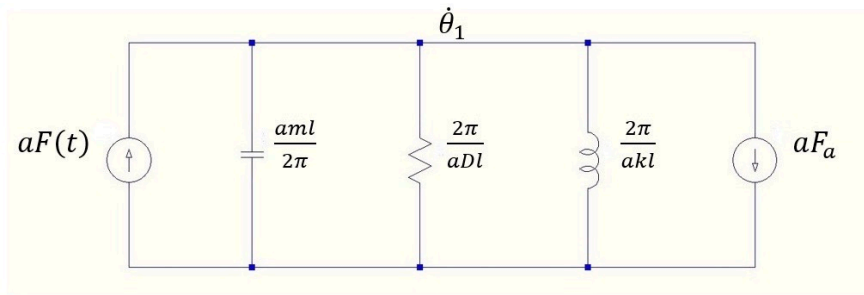
$$x = \frac{l\theta_1}{2\pi} = \frac{l\theta_2}{2\pi} \quad (35)$$

จากสมการที่ (18)-(20) ทำการเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่เชิงเส้นไปยังการเคลื่อนที่เชิงหมุน และใช้ความสัมพันธ์ของปริมาณทางกลและไฟฟ้าจากตารางที่ 1

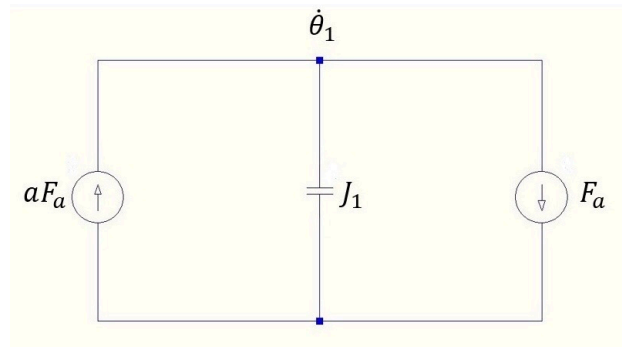
$$\frac{aml}{2\pi}\ddot{\theta}_1 + \frac{aDl}{2\pi}\dot{\theta}_1 + \frac{akl}{2\pi}\theta_1 + aF_a = aF(t) \quad (36)$$

$$J_1\ddot{\theta}_1 + T_B = aF_a \quad (37)$$

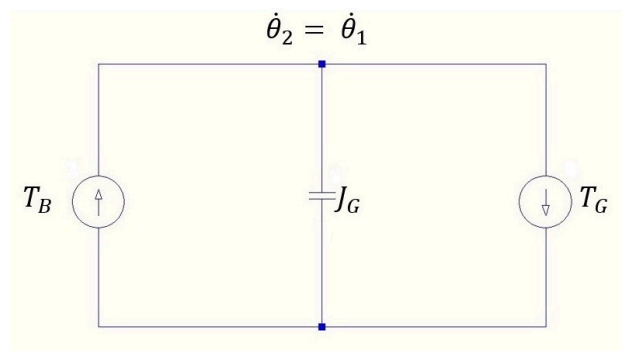
$$J_G\ddot{\theta}_2 + T_G = T_B \quad (38)$$



รูป 20: วงจรไฟฟ้าของการเคลื่อนที่ของ nut

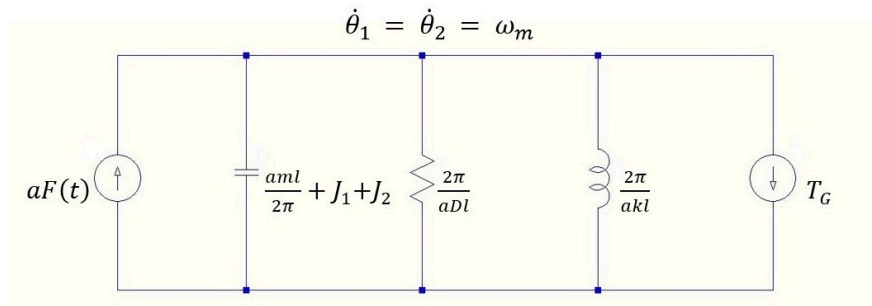


รูป 21: วงจรไฟฟ้าของการเคลื่อนที่เชิงหมุนของ lead screw



รูป 22: วงจรไฟฟ้าของมอเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากรวมวงจรไฟฟ้าของการเคลื่อนที่ของ nut และ การเคลื่อนที่เชิงหมุนของ lead screw และ มอเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทั้งสามข้างบน จะได้ วงจรสมมูลทางไฟฟ้าระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน ดังรูปที่ 23



รูป 23: วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

หลังจากได้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน จึงได้ศึกษาเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรเพื่อเข้าใจหลักการทำงานและสมการความสัมพันธ์ต่างๆ ที่สามารถวิเคราะห์ และสร้างวงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

### 3.2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้า ที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

จากการที่ได้ศึกษาเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร และได้วงจรสมมูลของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน สามารถรวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรตามขั้นตอน ดังนี้

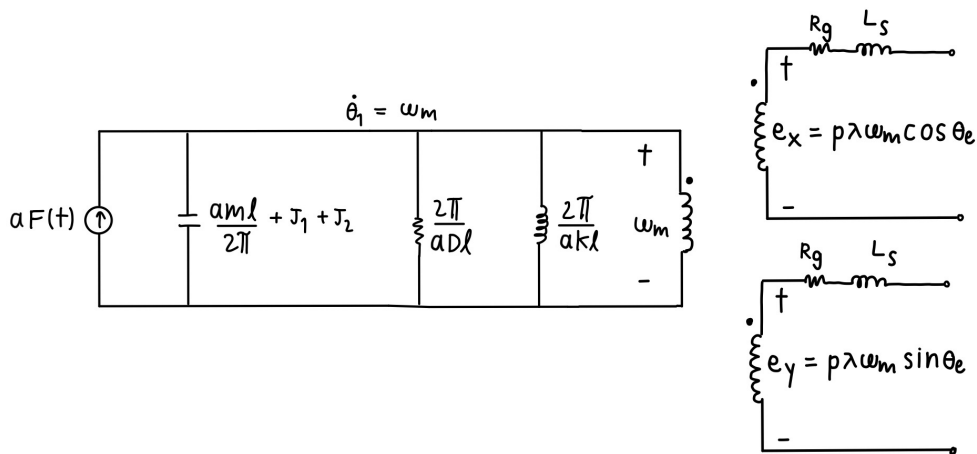
จากสมการที่ (17) แรงดันบนกรอบอ้างอิงนิ่ง แกน x,y ทำให้ทราบความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายในของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ดังสมการด้านล่าง

$$e_x = p\lambda\omega_m \cos(\theta_e) \quad (39)$$

$$e_y = p\lambda\omega_m \sin(\theta_e) \quad (40)$$

$$\vec{e}_{ind} = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \sin(\theta_e) \end{bmatrix} = p\lambda\omega_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \sin(\theta_e) \end{bmatrix} = p\lambda e^{j\theta_e} \quad (41)$$

วงจรที่ไฟฟ้าของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานสัมพันธ์กับเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า ความเร็วของระบบทางกลสะท้อนไปยังขนาดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสตามสมการด้านบน จึงได้ความสัมพันธ์แสดงดังรูปวงจรด้านล่าง



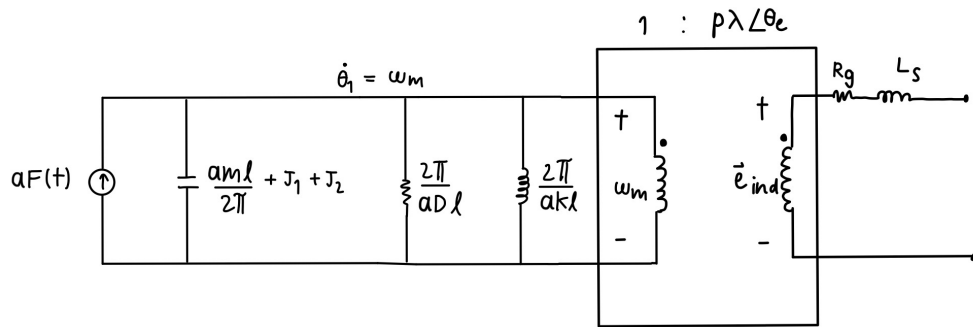
รูป 24: วงจรไฟฟ้าแสดงความสัมพันธ์ระบบทางกลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากนั้นเขียนความสัมพันธ์อยู่ในรูปสเปซเวกเตอร์ของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและ เครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร เพื่อสามารถวิเคราะห์เป็นวงจรไฟฟ้าเพียงวงจรเดียวได้

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = p\lambda \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin(\theta_e) \\ \sin(\theta_e) & \cos(\theta_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (42)$$

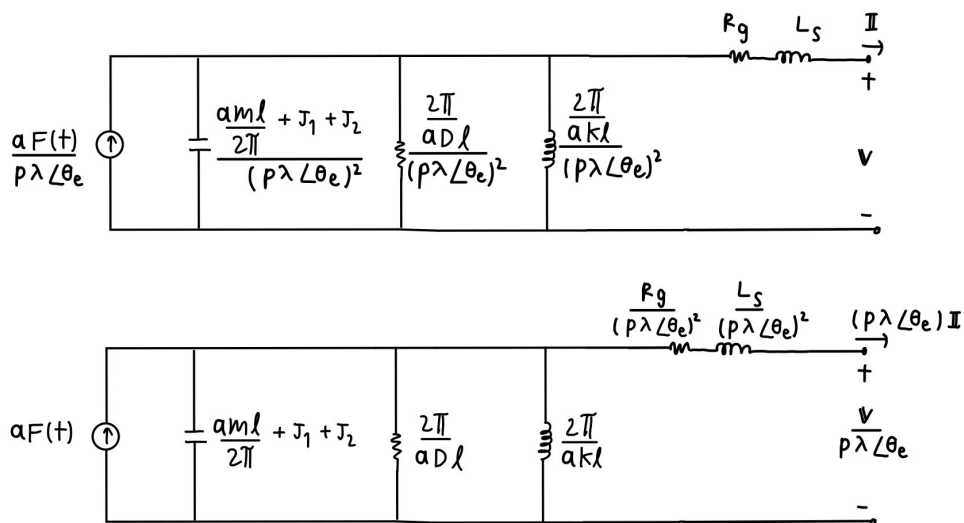
$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = p\lambda e^{-j\theta_e} \begin{bmatrix} \omega_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (43)$$

จึงสามารถมองเป็นวงจรสมมูลที่แสดงความสัมพันธ์เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบเป็นเชิงซ้อน ดังรูปที่ 25



รูป 25: วงจรไฟฟ้าแสดงความสัมพันธ์ระบบทางกลและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีหม้อแปลงไฟฟ้ามีอัตราส่วนเป็นเชิงซ้อน

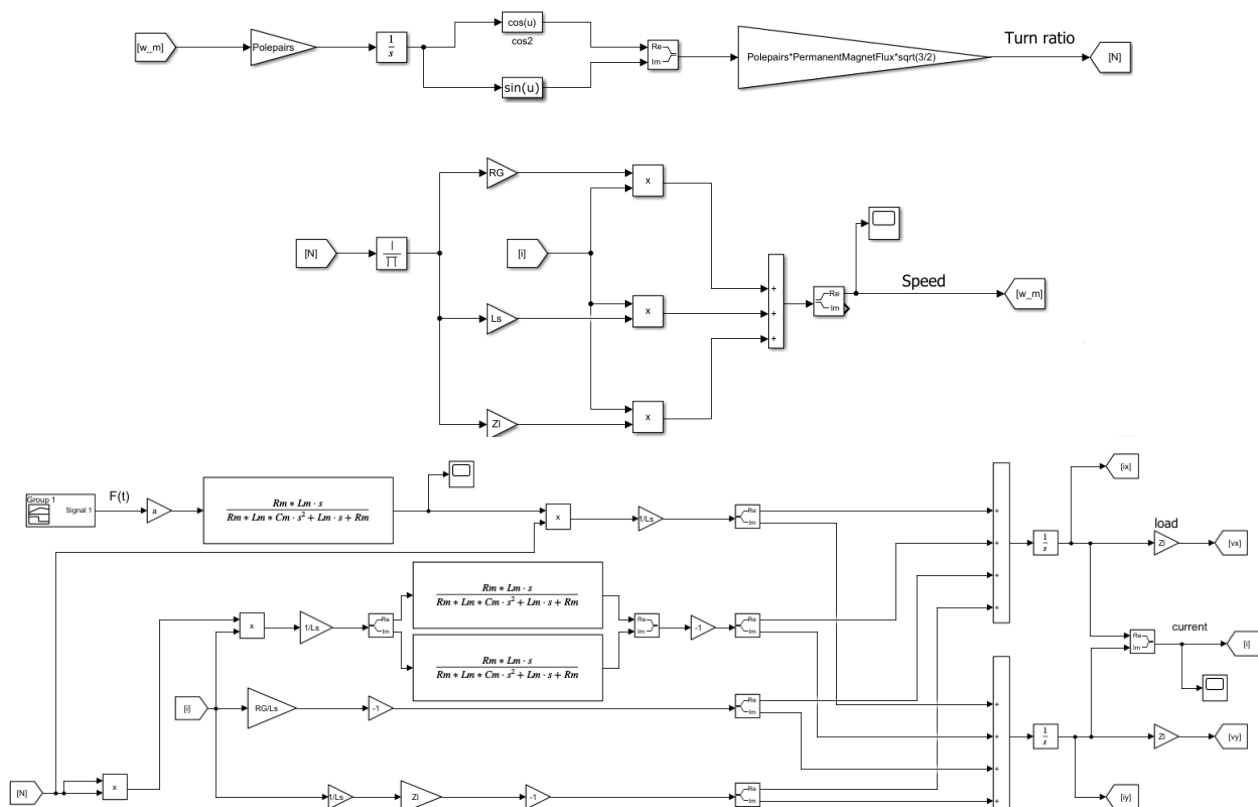
แปลงเป็นวงจรสมมูล แสดงดังรูปที่ 26 ที่อ้างอิงฝั่งทุติยภูมิ(บน)และอ้างอิงฝั่งปฐมภูมิ(ล่าง)



รูป 26: วงจรสมมูลไฟฟ้าที่อ้างอิงฝั่งทุติยภูมิ(บน)และอ้างอิงฝั่งปฐมภูมิ(ล่าง)

### 3.3 ผลการจำลองของแบบจำลองทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโครนัสชนิดแม่เหล็กไฟฟ้า บนโปรแกรม MATLAB/Simulink

หลังจากที่ได้วงจรทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโครนัส จากรูปที่ 26 และสมการต่างๆที่เกี่ยวข้อง มาสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังรูปที่ ?? เพื่อศึกษาการทำงานของแบบจำลองที่ได้



รูป 27: แบบจำลองวงจรไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นพลังงานและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่มีโหลดตัวต้านทาน 32.23 โอห์ม

แบบจำลองที่ได้ทดสอบด้วยแรงเหวี่ยง ดังรูปที่ 27 และใส่โหลดเป็นตัวต้านทานที่ขาออกของ มีขนาดเท่ากับความต้านทานภายในเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 32.23 โอห์ม และค่าพารามิเตอร์อื่นที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2

ใส่รูปแรงดัน กระแส

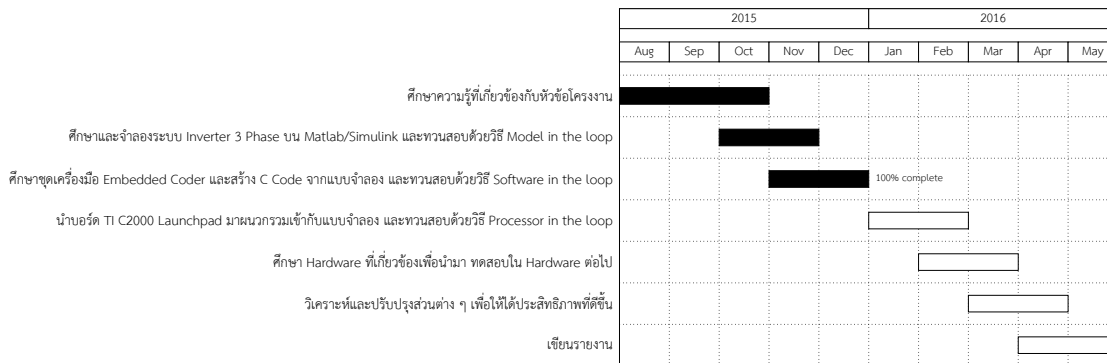
จากรูปที่ ?? พบว่า แรงดันและกระแสมีลูกคลื่นเกิดขึ้นจำนวน 2 ลูก โดยลูกแรกเกิดจากการยุบตัวของแผ่นพื้นเนื่องจากแรงที่เหวี่ยงลงบนแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และลูกที่สองเกิดจากการยุบตัวของแผ่นพื้นเนื่องจากแรงคืนตัวของสปริง

## 4 บทสรุป

### 4.1 สรุปผลการดำเนินการ

### 4.2 แผนการดำเนินงาน

ในรายงานฉบับนี้ มีแผนการดำเนินงานแยกเป็นของผู้จัดทำแต่ละคน คือ ของนายณัฐพล กาบแก้ว ซึ่งมีแผนการดำเนินงานดังแสดงในรูปที่ 28 และของนายสันติ ว่องประเสริฐ ซึ่งมีแผนการดำเนินงานดังแสดงในรูปที่ x



รูป 28: Gantt chart ของนายณัฐพล กาบแก้ว

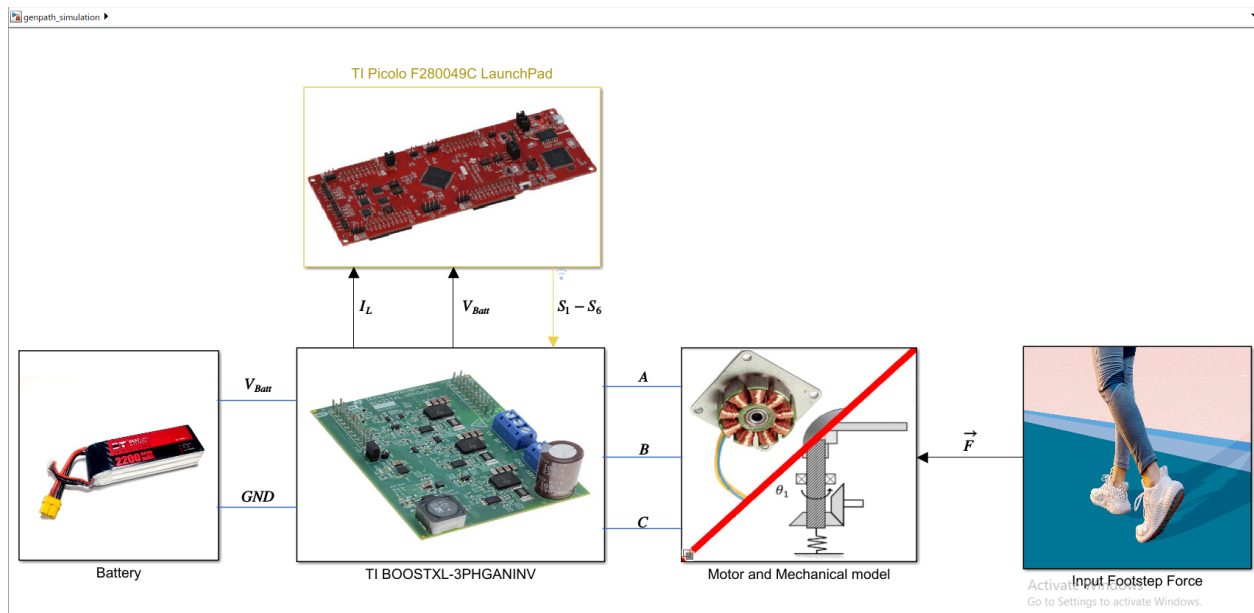
### 4.3 ปัญหา อุปสรรค และแนวทางแก้ไข (ถ้ามี)

## 5 เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Riemer and A. Shapiro, "Biomechanical energy harvesting from human motion: theory, state of the art, design guidelines, and future directions." <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21521509/>, 2011.
- [2] T. Jintanawan, G. Phanomchoeng, S. Suwankawin, P. Kreepoke, P. Chetchatree, and C. U-viengchai, "Design of kinetic-energy harvesting floors." <https://doi.org/10.3390/en13205419>, 2020.

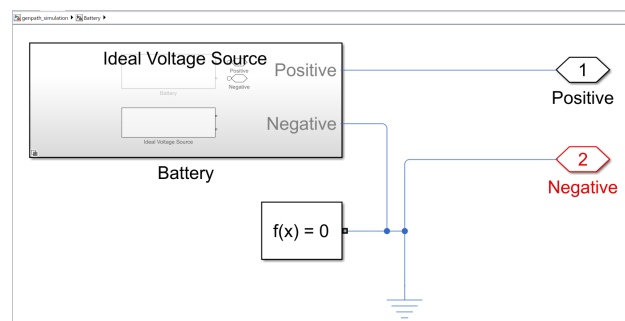
## 6 ภาคผนวก

### 6.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบพลวัตของระบบ

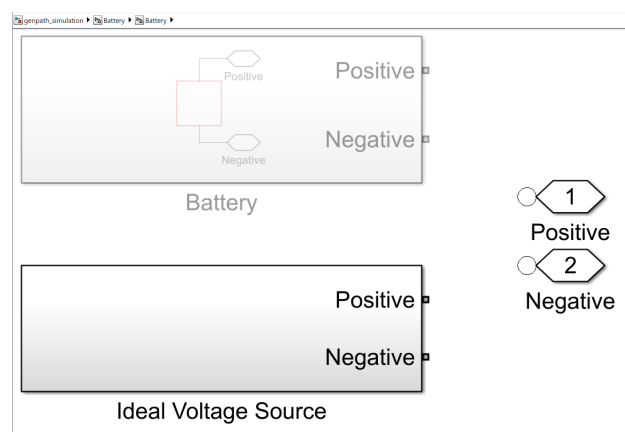


รูป 29: ขั้นที่ 1: ภาพรวมของระบบพลวัตทั้งหมด

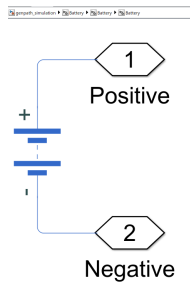
#### 6.1.1 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแบตเตอรี่



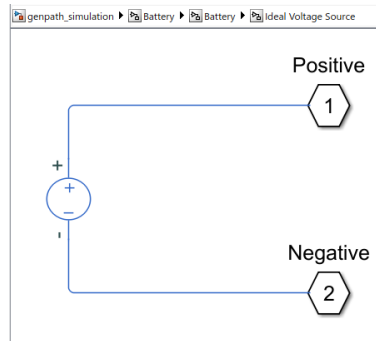
รูป 30: ขั้นที่ 2: แบตเตอรี่และ Solver Configuration



รูป 31: ขั้นที่ 3: Variant Model ของแบตเตอรี่

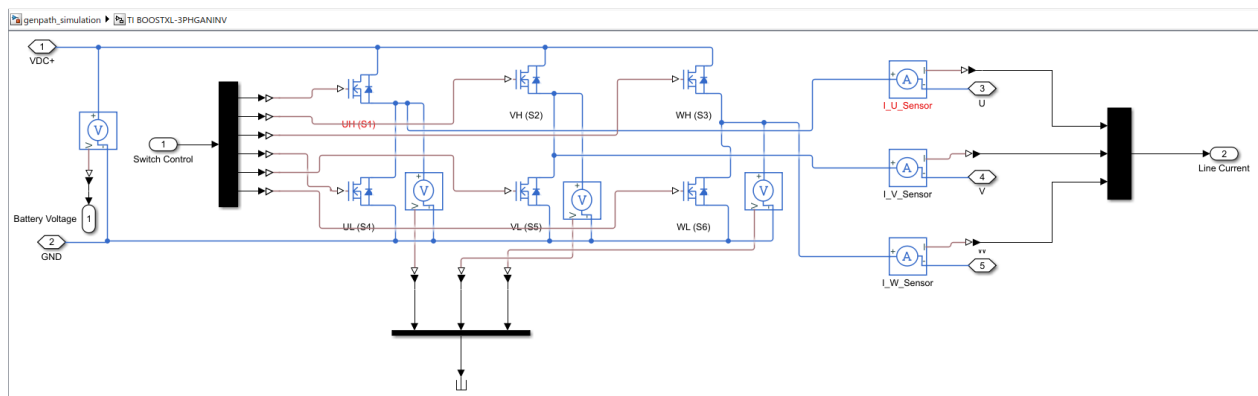


รูป 32: ขั้นที่ 4: ภายใน Variant Model ของแบตเตอรี่



รูป 33: ขั้นที่ 4: ภายใน Variant Model ของแหล่งจ่ายไฟตรงในอุดมคติ

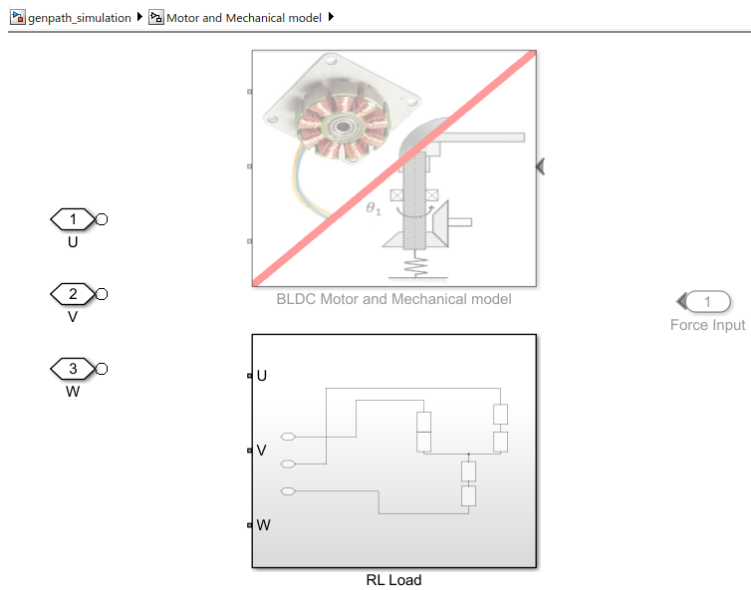
#### 6.1.2 Simulink Model ในส่วนของการจำลองบอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI BOOSTXL-3PHGANINV



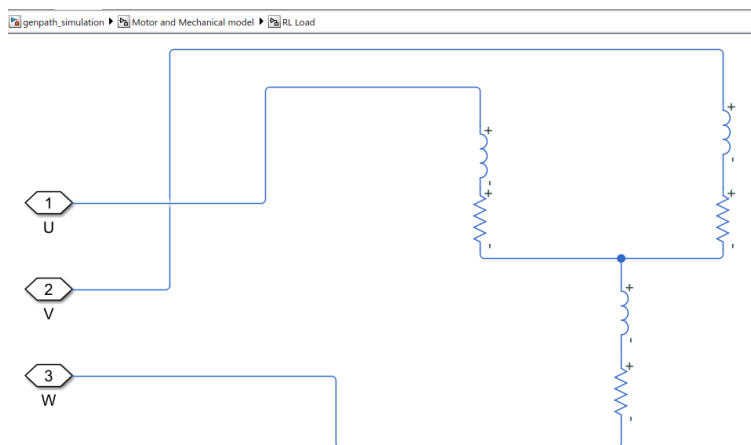
รูป 34: ขั้นที่ 2: บอร์ดอินเวอร์เตอร์ TI BOOSTXL-3PHGANINV



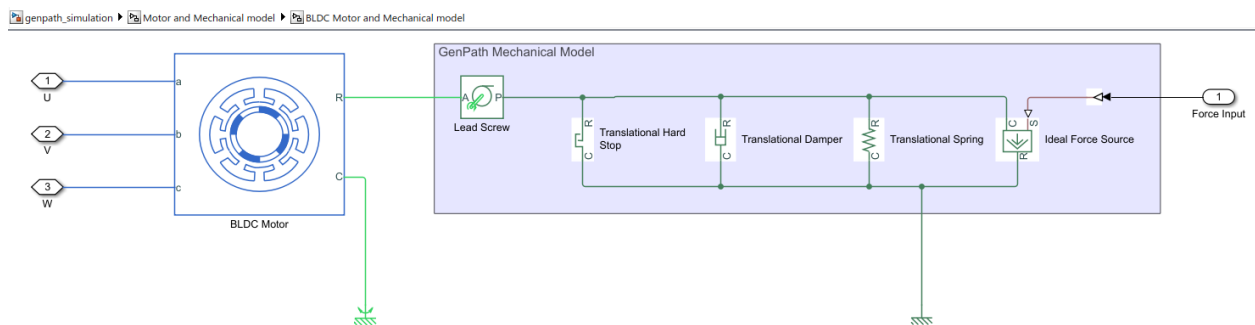
### 6.1.3 Simulink Model ในส่วนของการจำลองระบบเชิงกลและมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร



รูป 35: ขั้นที่ 2: Variant Model ของมอเตอร์และระบบเชิงกล กับโหลดแบบตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

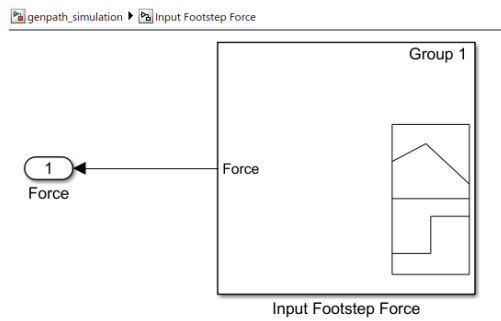


รูป 36: ขั้นที่ 3: ภายใน Variant Model ของโหลดแบบตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

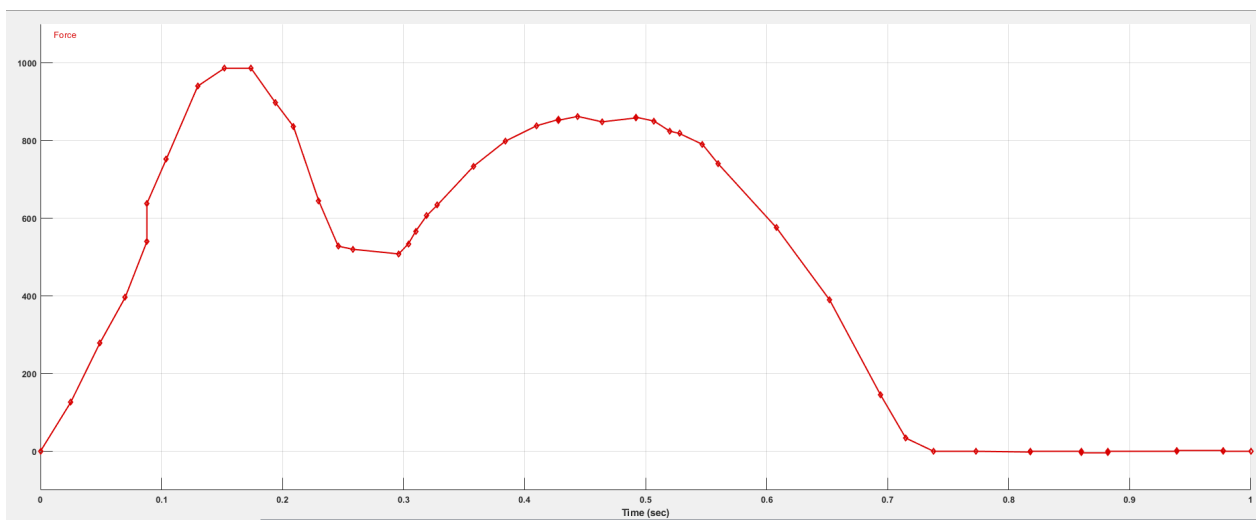


รูป 37: ขั้นที่ 3: ภายใน Variant Model ของระบบเชิงกลและมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร

#### 6.1.4 Simulink Model ในส่วนของการจำลองแรงที่เท้าเหยียบแผ่นพื้น

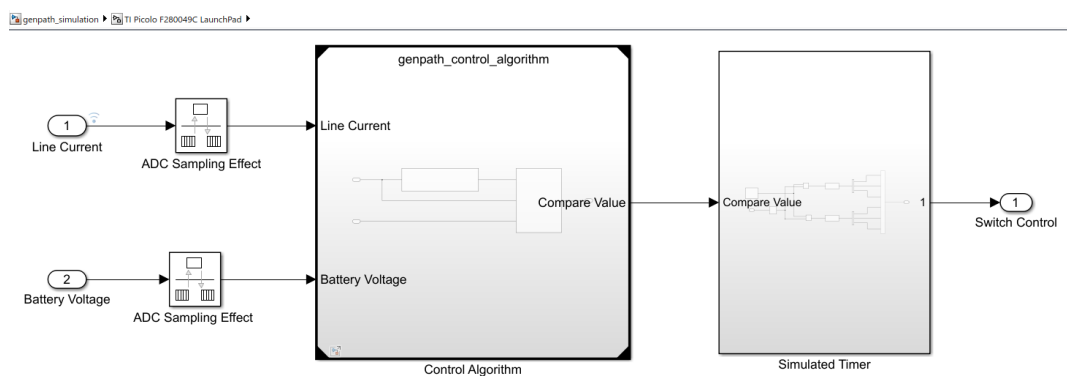


รูป 38: ขั้นที่ 2: แบบจำลองแรงที่มาจากเท้าเหยียบแผ่นพื้น

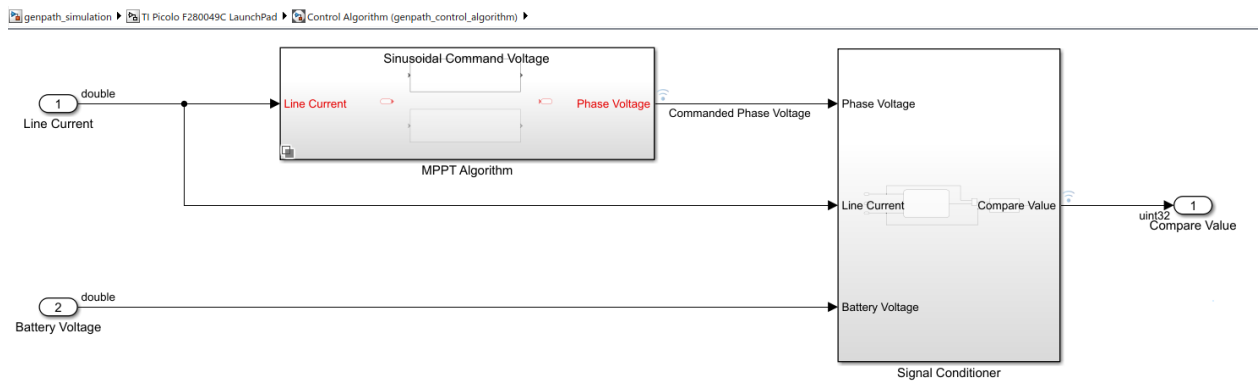


รูป 39: กราฟแสดงสัญญาณแรงที่มาจากเท้าเหยียบ

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

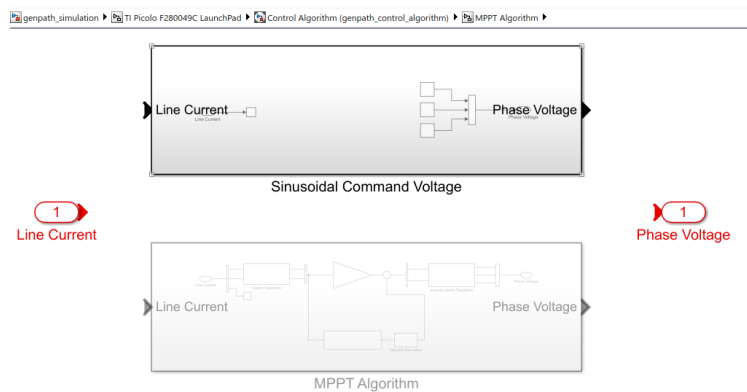


รูป 40: ขั้นที่ 2: ภายใน Subsystem ของแบบจำลองระบบฝังตัว

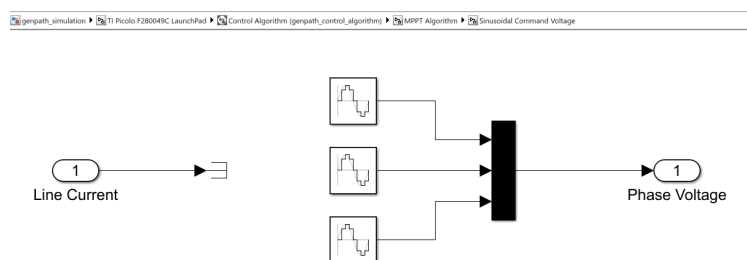


รูป 41: ขั้นที่ 3: ภายใน Subsystem ของอัลกอริทึมที่ทำงานอยู่บนระบบฝังตัว

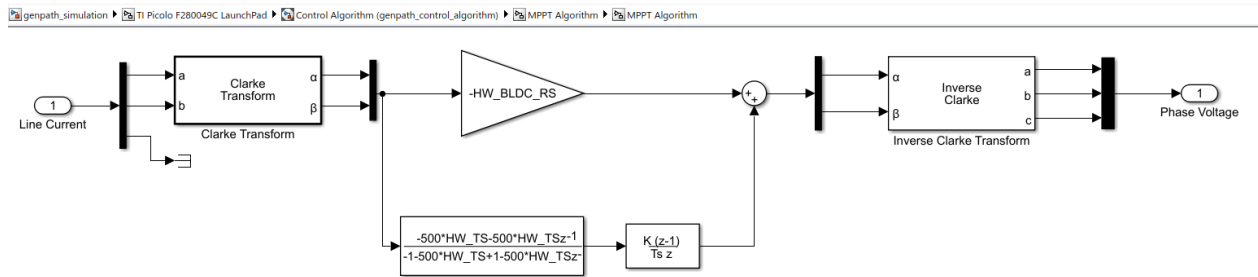
## 6.2.1 Simulink Model ในส่วนของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูป 42: ขั้นที่ 4: Variant Model ของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

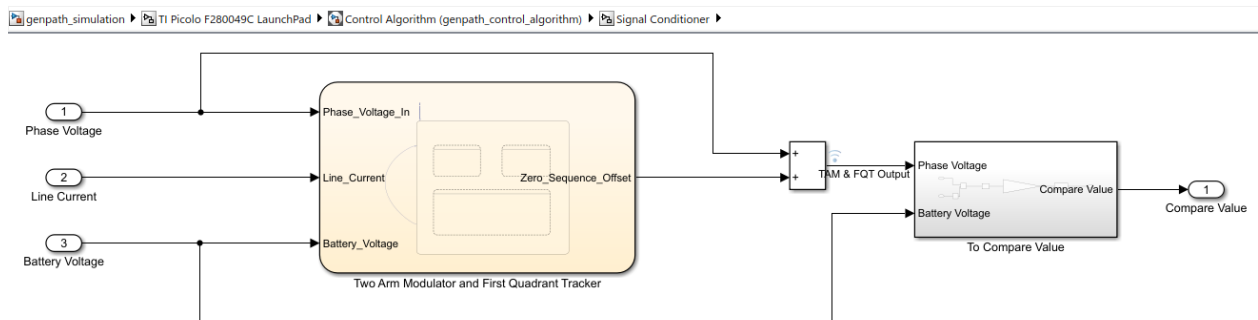


รูป 43: ขั้นที่ 5: ภายใน Variant Model ของอัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่สร้างสัญญาณคำสั่งแบบไซน์

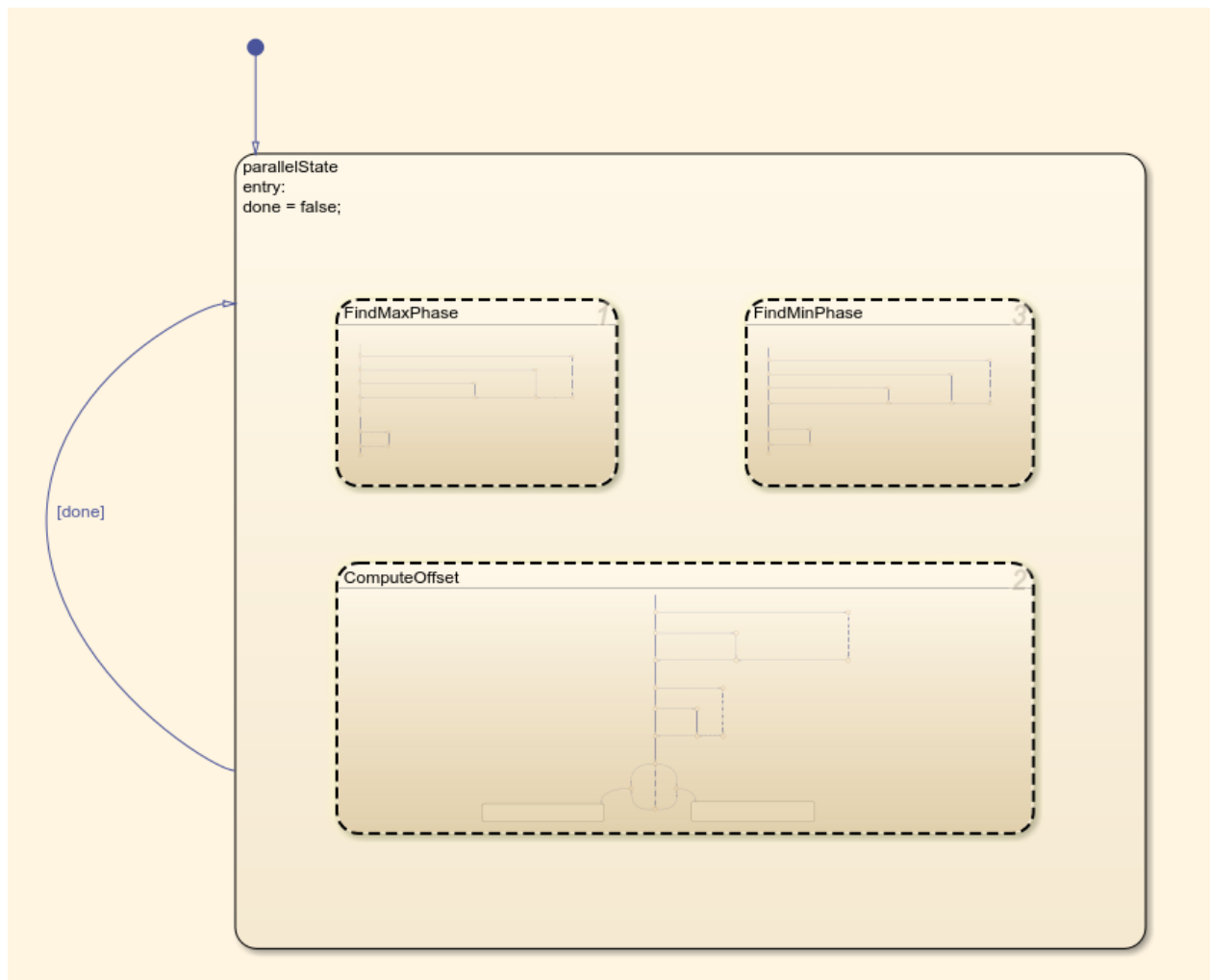


รูป 44: ขั้นที่ 5: อัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

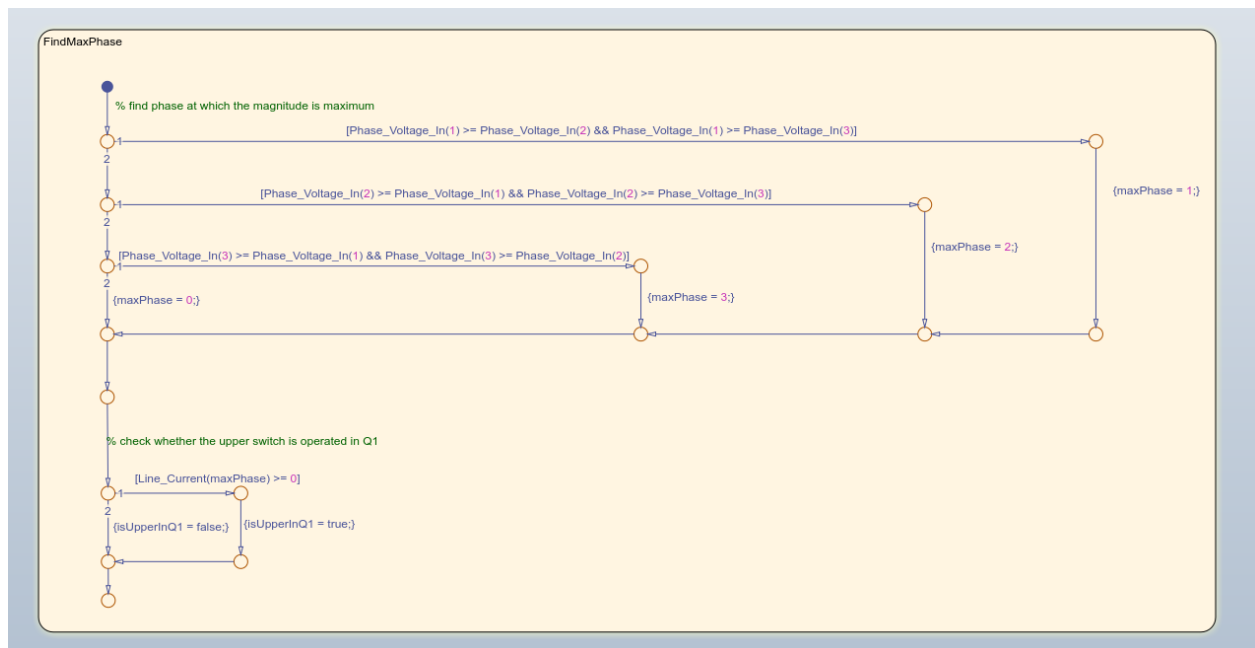
## 6.2.2 Simulink Model ในส่วนของการปรับปรุงสัญญาณ



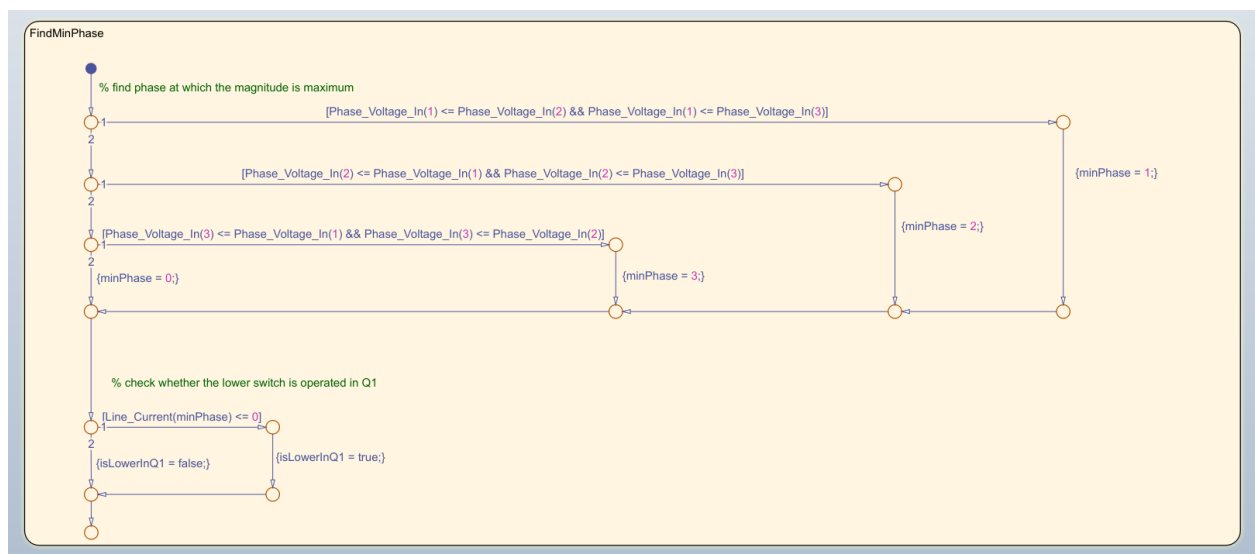
รูป 45: ขั้นที่ 4: ภายใน Subsystem ของระบบปรับปรุงสัญญาณ



รูป 46: ชั้นที่ 5: ภายใน Stateflow chart ของตัวมอดูเลตแบบสองแขน และติดตามการทำงานในจุดภาคที่หนึ่ง



รูป 47: ขั้นที่ 6: ภายใน Subchart ที่ใช้ในการหาเฟสที่มีแรงดันค่าส่งมากที่สุด



รูป 48: ขั้นที่ 6: ภายใน Subchart ที่ใช้ในการหาเฟสที่มีแรงดันค่าส่งน้อยที่สุด

