

ข้อเสนอโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า วิชา 2102490

อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานชนิดเครื่องจักรกลไฟฟ้า

Power Electronics for Electromechanical Energy-Harvesting System

นายณัฐพล กาบแก้ว เลขประจำตัว 6130176521

นายสันติ ว่องประเสริฐ เลขประจำตัว 613XXXXX21

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	การมอดูเลตแบบ SPWM และ อินเวอร์เตอร์โหมดแรงดันแบบสามเฟส . . . . .	2
2.1.2	กำลังสูญเสียในสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ . . . . .	3
2.1.3	การนำกระแสในจุดภาคที่ 3 ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้ากลเลียม ไนไตรต์ . . . . .	4
2.1.4	การลดกำลังสูญเสียในการมอดูเลตแบบ SPWM ด้วยการมอดูเลตแบบสองแขน . . . . .	5
2.1.5	การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการมอดูเลตแบบสองแขนด้วยการติดตามการทำงานในจุดภาคที่ 1 . . . . .	6
2.2	การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking Algorithm; MPPT) . . . . .	6
<b>3</b>	<b>ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>บทสรุป</b>	<b>7</b>
4.1	สรุปผลการดำเนินการ . . . . .	7
4.2	แผนการดำเนินงาน . . . . .	7
4.3	ปัญหา อุปสรรค และแนวทางแก้ไข (ถ้ามี) . . . . .	7
<b>5</b>	<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>7</b>
<b>6</b>	<b>ภาคผนวก (ถ้ามี)</b>	<b>7</b>

# 1 บทนำ

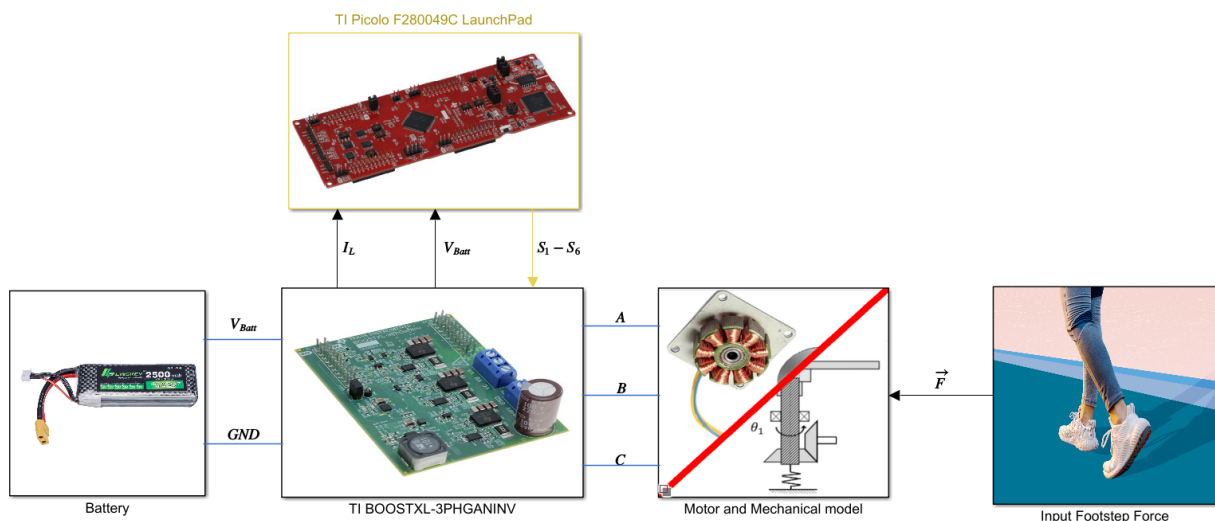
## 1.1 บทคัดย่อ

แผ่นพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยมีความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานต่ำได้ โครงการฉบับนี้มีจุดประสงค์ในการพัฒนาแผ่นพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ประเภทแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Motor) โดยใช้โปรแกรม MATLAB™/Simulink™ 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 บอร์ดอินเวอร์เตอร์ มอเตอร์ไฟฟ้า และระบบควบคุมที่อยู่ในระบบฝังตัว ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 1



รูป 1: ทอพอโลยีของระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน

ในส่วนของอุปกรณ์เชิงกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานนั้น เนื่องจากโครงการฉบับนี้ จะให้น้ำหนักกับการวิเคราะห์และออกแบบระบบไฟฟ้าเป็นสำคัญ จึงได้มีการนำอุปกรณ์เชิงกลที่ได้มีการวิเคราะห์และออกแบบไว้แล้วในโครงการวิศวกรรมในปีก่อนๆ [2] มาใช้งาน

## 1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสร้างแบบจำลองพลวัตของระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยโปรแกรม MATLAB™/Simulink™ 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

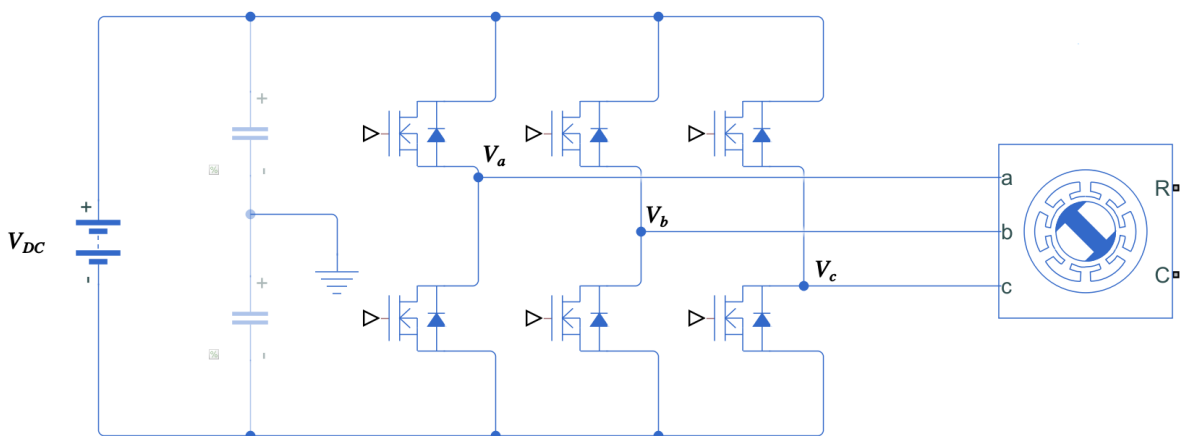
1. แผ่นพื้นเก็บพลังงานต้นแบบที่มีประสิทธิภาพสูง และสามารถใช้งานได้จริง
2. อัลกอริทึมในการลดกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ที่สามารถนำไปใช้กับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และยังสามารถนำไปใช้กับอินเวอร์เตอร์ใดๆ นอกเหนือจากระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงานได้อีกด้วย
3. อัลกอริทึมในการติดตามจุดทำงาน ที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด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

## 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

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

#### 2.1.1 การมอดูเลตแบบ SPWM และ อินเวอร์เตอร์โหมดแรงดันแบบสามเฟส

ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยทั่วไปนั้นอาศัยการสร้างสนามแม่เหล็กหมุน มาเหนี่ยวนำให้เกิดแรงบิด ซึ่งในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรรุ่นนี้ อาศัยการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ อินเวอร์เตอร์ จึงเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ในโครงการฉบับนี้ ได้นำเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรสามเฟส มาเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับระบบแผ่นพื้นเก็บพลังงาน โดยจะเก็บพลังงานที่ผลิตได้ไว้กับแบตเตอรี่ ในโครงการฉบับนี้ จึงเลือกใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีทอพอโลยีดังรูปที่ 2



รูป 2: ทอพอโลยีของอินเวอร์เตอร์สามเฟส

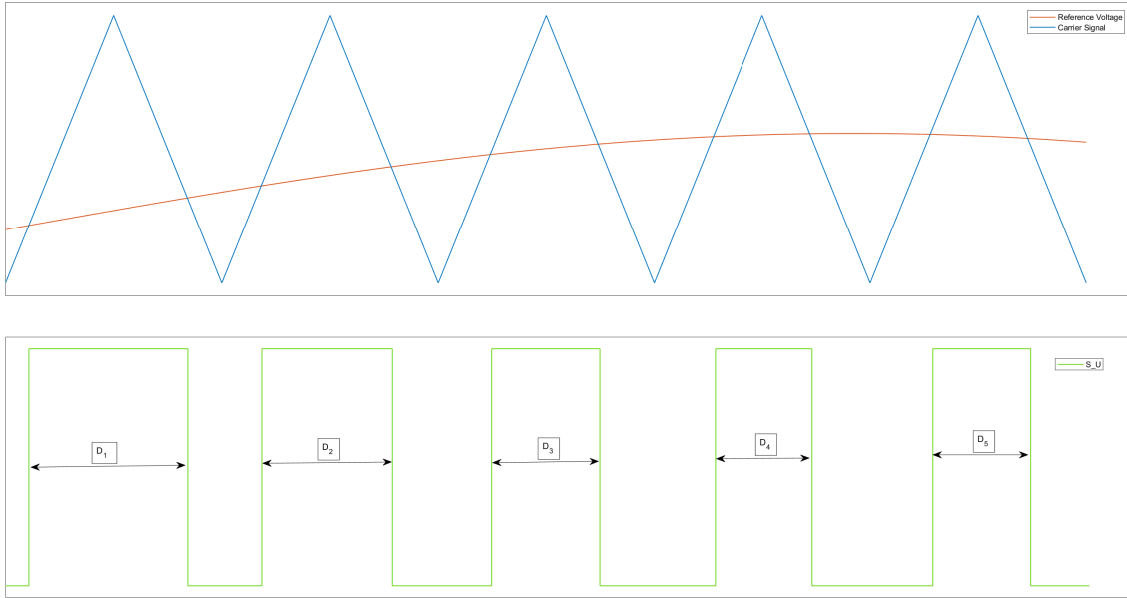
อินเวอร์เตอร์ทอพอโลยีที่ได้นำเสนอมาข้างต้น สามารถสร้างแรงดันออกที่แต่ละขั้วทั้งสามได้เพียงแค่ 2 ค่าเท่านั้นคือ

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

โดยที่  $V_t$  เป็นแรงดันที่ขั้วออกของอินเวอร์เตอร์ และถ้าหากพิจารณาให้กึ่งกลางบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นจุดอ้างอิงแรงดัน จะได้ว่า

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

เนื่องจากกระแสขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสสามเฟสประเภทแม่เหล็กถาวรนั้น จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับคลื่นรูปไซน์ ดังนั้นเทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบไซน์ (Sinusoidal Pulse Width Modulation; SPWM) จึงได้ถูกนำมาใช้ โดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบไซน์มีหลักการในการทำงานคือ นำสัญญาณพาห้รูปสามเหลี่ยม มาเปรียบเทียบกับสัญญาณคำสั่งรูปไซน์ โดยผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบนั้น จะได้เป็นสัญญาณขับนำของสวิตช์ ดังรูปที่ 2.1.1 ซึ่งจะส่งผลให้ แรงดันที่ขั้วของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับแรงดันคำสั่ง



รูป 3: การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบไซน์

จากรูปข้างต้น จะเห็นได้ว่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณขับนำนั้น เปลี่ยนไปตามขนาดของสัญญาณ

### 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

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

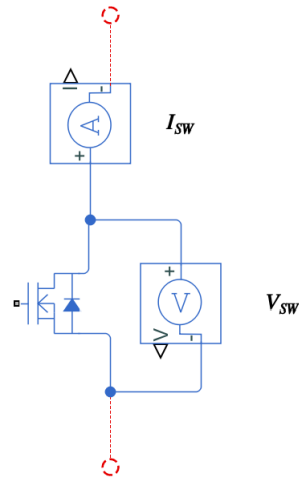
แต่เมื่อพอสวิตช์เปิดเต็มที่แล้ว สวิตช์จะมีแรงดันตกคร่อมอยู่เล็กน้อย ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในขณะนำกระแส

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

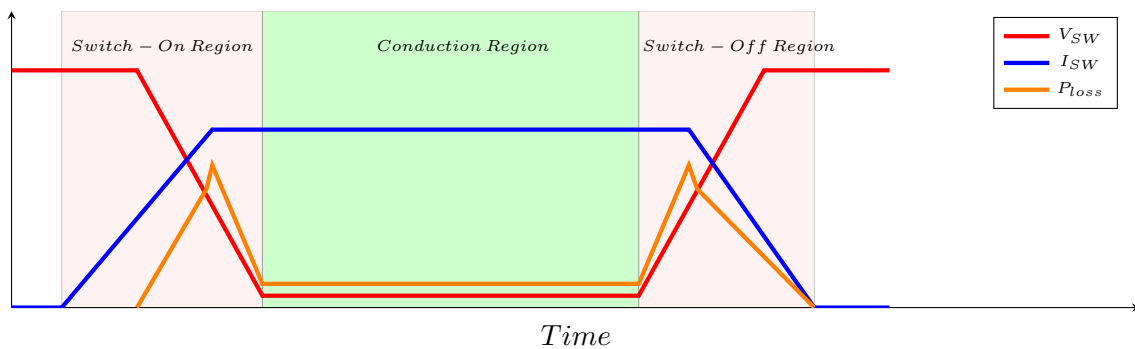
เมื่อ  $v_{sw(on)}$ ,  $i_{sw(on)}$  คือแรงดันตกคร่อมสวิตช์ และกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ในขณะนำกระแส ตามลำดับ

กำลังสูญเสียระหว่างสวิตช์นั้น ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะสมบัติของสวิตช์ที่เลือกใช้ และจำนวนครั้งในการสวิตช์ นั่นคือ ถ้าหากสวิตช์ที่เลือกใช้มีคุณลักษณะสมบัติที่ทำให้อยู่ในย่านกำลังสวิตช์นาน หรือมีจำนวนครั้งในการสวิตช์มาก ก็จะทำให้กำลังสูญเสียขณะสวิตช์สูงตามไปด้วย

กำลังสูญเสียขณะนำกระแสนั้น ขึ้นอยู่กับว่าในขณะนำกระแสนั้นมีแรงดันตกคร่อมสวิตช์มากแค่ไหน ถ้าหากแรงดันตกคร่อมสวิตช์มาก ก็จะทำให้กำลังสูญเสียขณะนำกระแสมากขึ้นตามมา



รูป 4: นิยามของ  $V_{SW}$ ,  $I_{SW}$



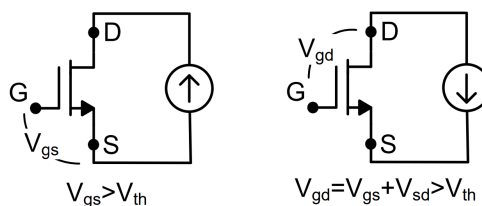
รูป 5: แรงดันตกคร่อมสวิตช์ กระแสของสวิตช์ และกำลังสูญเสียในสวิตช์

### 2.1.3 การนำกระแสในจุดภาคที่ 3 ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแกเลียม ไนไตรท์

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

เนื่องจากโครงสร้างที่ไม่เหมือนกันของทรานซิสเตอร์แบบแกน ทำให้การนำกระแสในจุดภาคที่สามของทรานซิสเตอร์แบบแกนนั้นแตกต่างไปจากทรานซิสเตอร์แบบซิลิคอนคือ การนำกระแสผ่านบอตโตไดโอด

สิ่งที่กล่าวต่อไปคือ เงื่อนไขที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์แกนนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า (Forward) และย้อนกลับ (Reverse) คือ



รูป 6: เงื่อนไขที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์แกนนำกระแสในทิศทางไปข้างหน้า และย้อนกลับ

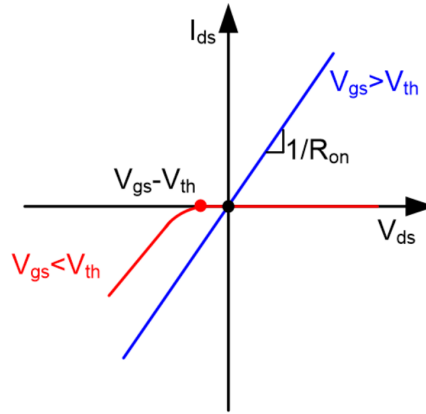
เราจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันขณะนำกระแสไปข้างหน้าได้โดย

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

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 7: พฤติกรรมการนำกระแสในจุดภาคที่หนึ่ง และจุดภาคที่สามของทรานซิสเตอร์แกน

จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่า แรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ในจุดภาคที่สาม จะมากกว่าแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ในจุดภาคที่หนึ่งที่ค่ากระแสเท่ากัน ซึ่งทำให้การนำกระแสในจุดภาคที่สามนั้นมีกำลังสูญเสียในขณะนำกระแสมากกว่าการนำกระแสในจุดภาคที่หนึ่ง

#### 2.1.4 การลดกำลังสูญเสียในการมอดูเลตแบบ SPWM ด้วยการมอดูเลตแบบสองแขน

จากที่ได้นำเสนอไปแล้วในส่วนของการมอดูเลตแบบ SPWM ว่า เป็นการมอดูเลตที่มีจำนวนครั้งในการสวิตช์มาก ซึ่งทำให้กำลังสูญเสียในขณะสวิตช์สูง แต่เรามีเทคนิคในการลดกำลังสูญเสียขณะสวิตช์ในการมอดูเลตแบบ SPWM ด้วยการลดจำนวนครั้งในการสวิตช์คือ การมอดูเลตแบบสองแขน

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

จากการพิจารณาจะเห็นได้ว่า หากเราต้องการสร้างแรงดันรูปไซน์ที่ขั้วของอินเวอร์เตอร์ 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 ทำให้แรงดันคำสั่งโนเฟสใดเฟสหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเท่ากับแรงดันบวก หรือลบของบัสแรงดันกระแสตรง เพื่อที่จะทำให้แกนของการมอดูเลตแกนนั้น ปิด หรือ เปิดตลอดเวลา นั่นคือ

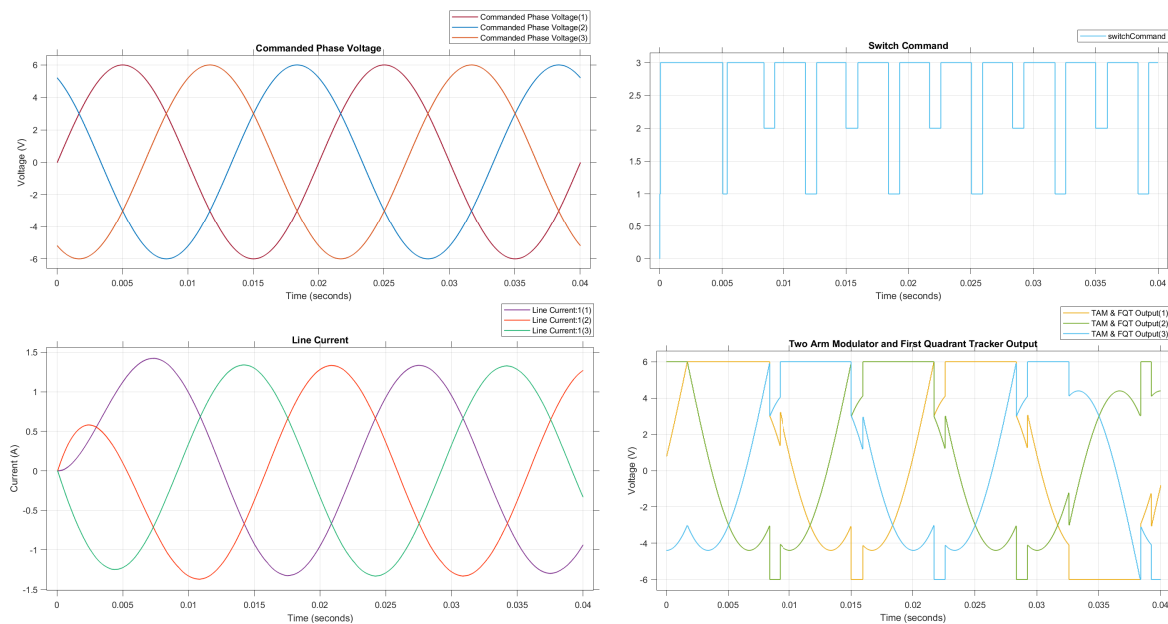
$$V_{N0} = \left\{ \frac{V_{DC}}{2} - \max() \right. \quad (17)$$

2.1.5 การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการมอดูเลตแบบสองแขนด้วยการติดตามการทำงานในจุดภาคที่ 1

2.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเก็บพลังงานด้วยอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking Algorithm; MPPT)



### 3 ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น



รูป 8: 50Hz

### 4 บทสรุป

#### 4.1 สรุปผลการดำเนินการ

#### 4.2 แผนการดำเนินงาน

#### 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 (ถ้ามี)