

# การวิเคราะห์วงจรดีซี-ดีซีฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์แบบแยกกันสำหรับอุปกรณ์จ่ายไฟยานยนต์ไฟฟ้า

## Analysis of An Isolated DC-DC Full bridge Converter for EVSE

ยุทธนา จงเจริญ<sup>1\*</sup> และ ชญา ไชยมงคล<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ cyutana@engr.tu.ac.th\*

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมไฟฟ้า) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ chaya.cha@dome.tu.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์วงจรดีซี-ดีซีฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์แบบแยกกัน สำหรับการประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์จ่ายไฟยานยนต์ไฟฟ้า (EVSE) โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบ Phase-Shifted Full Bridge (PSFB) วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อสร้างความเข้าใจที่สามารถใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาต้นแบบเพาเวอร์โมดูลในอนาคต วงจรถูกออกแบบและจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM เพื่อประเมินลักษณะการทำงาน ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ในสภาวะไม่มีโหลด การเลื่อนเฟสที่  $d = 90^\circ$  สามารถทำให้ได้แรงดันขาออกประมาณ  $V_{out} = 400V$  ตามการออกแบบ ขณะที่ในสภาวะมีโหลด การเพิ่มค่าเลื่อนเฟสส่งผลให้แรงดันและกระแสขาออกลดลง โดยที่  $d = 0^\circ$  วงจรให้ค่า  $V_{out} \approx 400V, I_{out} = 50A$  ผลการศึกษานี้สะท้อนถึงพฤติกรรมพื้นฐานของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่ควบคุมด้วย PSFB และสามารถใช้เป็นแนวทางต่อยอดไปสู่การควบคุมแบบลูปปิด เพื่อปรับการเลื่อนเฟสให้สัมพันธ์กับแรงดันและกระแสที่โหลดต้องการได้อย่างเหมาะสมในอนาคต

**คำสำคัญ:** ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบแยกกัน, อุปกรณ์จ่ายไฟสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า, วงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

### Abstract

This research presents the study and analysis of an isolated DC-DC full-bridge converter for application in electric vehicle supply equipment (EVSE), employing the Phase-Shifted Full Bridge (PSFB) control technique. The objective is to establish a fundamental understanding that can support the future development of a power module prototype. The circuit was designed and simulated using the PSIM program to evaluate its operating characteristics. The simulation results indicate that, under no-load conditions, a phase shift of  $d = 90^\circ$  produces an output voltage of approximately  $V_{out} = 400V$ , which is consistent with the design specification. Under load conditions, increasing the phase shift leads to a reduction in both output voltage and current, while at  $d = 0^\circ$  the circuit delivers  $V_{out} \approx 400V, I_{out} = 50A$ . These results demonstrate the fundamental behavior of the PSFB-controlled full-bridge converter and provide a useful guideline for future extension toward closed-loop control, where the phase shift can be adaptively regulated according to the voltage and current requirements of the load.

**Keywords:** Isolated DC-DC Converters, Electric Vehicle Supply Equipment, Full Bridge Converter

### 1. บทนำ

อุปกรณ์จ่ายไฟสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า (Electric vehicle supply equipment - EVSE) ที่ควบคุมการถ่ายโอนไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟใน

สถานีไฟฟ้าไปยังยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle - EV) เพื่อให้เกิดการชาร์จแบตเตอรี่ได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ [1] สำหรับส่วนประกอบภายในของ EVSE ที่สำคัญที่จ่ายพลังงานออกมาให้กับแบตเตอรี่ก็คือ เพาเวอร์โมดูล (Power module) ซึ่งทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ให้เป็นกระแสตรง ที่เหมาะสมสำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า [2 - 3]

โดยเพาเวอร์โมดูลประกอบด้วยวงจรแปลงพลังงานไฟฟ้าหรือคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งมีหน้าที่แปลงแรงดันและกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมกับความต้องการของแบตเตอรี่ ไม่ว่าจะเป็นการแปลงจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง หรือแปลงแรงดันกระแสตรงให้สูงขึ้นหรือต่ำลง นอกจากนี้ เพาเวอร์โมดูลยังรวมไปถึงวงจรควบคุมและระบบป้องกันต่าง ๆ เพื่อให้การจ่ายพลังงานมีประสิทธิภาพและปลอดภัย โดยประเภทของคอนเวอร์เตอร์ในระบบ EVSE มักถูกออกแบบให้เป็นแยกกันทางไฟฟ้า (Electrical Isolation) เช่น Flyback, Forward, Push-Pull และ Full Bridge เป็นต้น โดยแยกกันระหว่างฝั่งระบบจ่ายไฟฟ้าและฝั่งรถยนต์ ตามมาตรฐาน IEC 61851-1 เพื่อป้องกันอันตรายจากไฟฟ้าลัดวงจรและเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบ EVSE [4] ซึ่งมีความสำคัญในด้านความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานและการทำงานของระบบการจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System-BMS) ภายในรถ [5]

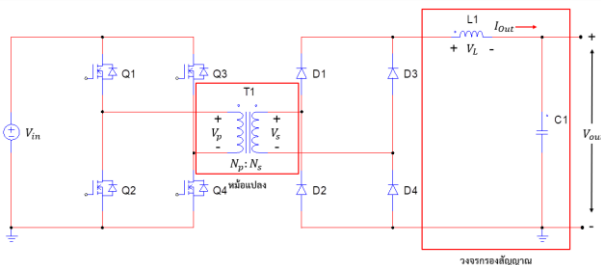
จากการศึกษาพบว่า Flyback Converter มีโครงสร้างง่าย ใช้ชิ้นส่วนน้อย แต่เมื่อใช้กำลังไฟสูง หม้อแปลงจะเป็นตัวเก็บพลังงาน ยิ่งกำลังไฟมากหม้อแปลงก็จะมีขนาดใหญ่ ทำให้ส่วนใหญ่ขีดจำกัดจะอยู่ประมาณ 60W [6] ส่วน Forward Converter ส่งผ่านพลังงานโดยตรงขณะสวิตช์นำกระแส ทำให้มีประสิทธิภาพและการควบคุมแรงดันดีกว่า Flyback แต่ต้องใช้วงจรรีเซตสนามแม่เหล็ก จึงมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น เหมาะกับระบบระดับกลาง (~200W) [7] ขณะที่ Push-Pull Converter รองรับกำลังปานกลางถึงสูง (~500W) ใช้หม้อแปลงหลายชุดลดให้แรงดันขาออกคงที่โดยไม่ต้องพึ่งวงจรควบคุมซับซ้อน แต่ต้องออกแบบให้สมมาตรเพื่อป้องกันการอิมพัลส์ของหม้อแปลง [8], [9] แต่ Full Bridge Converter มีประสิทธิภาพสูง (>90%) แรงดันตกคร่อมของทรานซิสเตอร์ต่ำกว่ารูปแบบ Push-Pull Converter เนื่องจากมีการกระจายแรงดันและกระแสให้กับสวิตช์มากกว่าหนึ่งตัว [9], [10] เหมาะกับงานกำลังสูง เช่น โมดูลจ่ายไฟในยานยนต์ไฟฟ้า และระบบพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น

เมื่อพิจารณาจากการชาร์จแบบ DC Fast Charging ซึ่งพลังงานที่ EVSE จะสร้างเพื่อชาร์จ EV มีตั้งแต่ 50kW – 500kW [11], [12] โดยใน EVSE จะมี Power Module หลายตัวเพื่อสร้างพลังงาน ซึ่ง Power Module 1 ตัว จะมีตั้งแต่ 20kW – 50kW และมีแรงดันขาออกของวงจรตั้งแต่ 50V – 1000V เพื่อรองรับแบตเตอรี่ EV หลายชนิด [13] ในปัจจุบันแรงดันของแบตเตอรี่ EV จะอยู่ที่ 400V [14] จึงทำให้เพาเวอร์โมดูลจะต้องจ่ายแรงดันขาออกอยู่ที่ 400V หรือมากกว่า ขึ้นอยู่กับชนิดของแบตเตอรี่ ทำให้วงจร Full Bridge Converter เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานที่มีแรงดันสูงและกำลังไฟฟ้าสูง

จากความสำคัญดังกล่าว ทำให้การใช้ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบแยกกันในเพาเวอร์โมดูลของระบบ EVSE มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบแยกกันทางไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม PSIM ที่ใช้งานในด้านเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลาย [15] ส่วนที่ 2 จะอธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง Full Bridge Converter โดยแสดงสมการในการคำนวณพื้นฐานของวงจรต่อมาในส่วนที่ 3 นำสมการพื้นฐานคำนวณออกแบบหาค่าภายในวงจรเพื่อทำการจำลองและวิเคราะห์ผ่านการจำลองด้วยโปรแกรม PSIM เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานและประสิทธิภาพของวงจร ผลการจำลองจะถูกลำเสนอในส่วนที่ 4 และส่วนสุดท้ายเป็นการสรุปผลการศึกษา เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบโมดูลเพาเวอร์ ในระบบ EVSE ที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัยต่อไป

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 โครงสร้างวงจร Full Bridge Converter



รูปที่ 1 โครงสร้างของวงจร Full Bridge Converter

โครงสร้างของวงจร ดังรูปที่ 1 ที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์สวิตชิง 4 ตัว (Q1, Q2, Q3, Q4), หม้อแปลงความถี่สูง (T1), ไดโอด (D1, D2, D3, D4), ตัวเหนี่ยวนำ (L1), และตัวเก็บประจุ (C1) การคำนวณจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ 1. คำนวณค่าที่หม้อแปลง และ 2. การคำนวณค่าวงจรกรองสัญญาณ ดังต่อไปนี้

#### 2.1.1 ทฤษฎีการคำนวณค่าที่หม้อแปลง

หม้อแปลงของวงจร Full Bridge Converter จะใช้หม้อแปลงความถี่สูงในการเพิ่มลดระดับแรงดันหรือกระแส สำหรับการนำเสนอจะพิจารณาหม้อแปลงในอุดมคติ ซึ่งมีค่าที่คำนวณดังนี้

##### 1. อัตราส่วนหม้อแปลง (Transformation Ratio)

$$a = \frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (1)$$

เมื่อ  $a$  : อัตราส่วนหม้อแปลง  
 $V_p$  : แรงดันฝั่งปฐมภูมิ  
 $V_s$  : แรงดันฝั่งทุติยภูมิ  
 $N_p$  : จำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ  
 $N_s$  : จำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิ

#### 2.1.2 ทฤษฎีการคำนวณค่าวงจรกรองสัญญาณ

วงจรกรองสัญญาณของวงจร Full Bridge Converter ในการนำเสนอ ใช้ LC filter เพื่อลดแรงดันและกระแสกระเพื่อม (Ripple voltage and Ripple current) โดยทั่วไปค่า Ripple voltage ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงประมาณ 1% ถึง 2% ของแรงดันขาออก [16], [17] และ Ripple current มักอยู่ในช่วง 20% ถึง 40% ของกระแสโหลด [18] ใน [19] ได้ทำการจำลองโดยใช้ค่าแรงดันกระเพื่อม 1% และกระแสกระเพื่อม 20%

#### 1. ค่าตัวเหนี่ยวนำ (Inductance)

การคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำจากกระแสกระเพื่อมเพื่อหาค่า L1 สามารถหาได้โดย

$$\text{จากรูปที่ 1 KVL} \quad V_L = V_{s,on} - V_{out} \quad (2)$$

$$\text{วงจรกรองสัญญาณจะได้} \quad V_L = V_{s,on} - V_{out} + V_{ripple} \quad (3)$$

$$\text{เมื่อ} \quad V_{s,on} = V_{out} + V_{ripple} \quad (3)$$

$$\text{และที่ } V_L \text{ จะได้} \quad V_L = L \frac{di}{dt} \quad (4)$$

$$\text{จัดรูปสมการที่ (4) จะได้} \quad L = V_L \frac{dt}{di} \quad (5)$$

$$\text{จัดรูปสมการที่ (5) จะได้} \quad L = \frac{V_L \cdot D \cdot T_s}{I_{ripple}} \quad (6)$$

$$\text{หรือ} \quad L = \frac{V_L \cdot D}{f \cdot I_{ripple}} \quad (7)$$

ซึ่งสมการที่ (6) และ (7) สามารถหาค่า L1 ได้ โดยสมการที่ (6) ใช้คาบเวลาในการคำนวณ และสมการที่ (7) ทำการแปลงคาบเวลาเป็นความถี่ ซึ่งเป็นรูปสมการที่ใช้ง่ายกว่า ความหมายของตัวแปรดังนี้

เมื่อ  $L$  : ค่าตัวเหนี่ยวนำ  
 $V_L$  : แรงดันที่ตกคร่อมอินดักเตอร์ในช่วงสวิตช์นำ  
 $V_{s,on}$  : แรงดันทุติยภูมิที่ป้อนเข้าสู่โหลดในช่วง conduction  
 $V_{out}$  : แรงดันขาออกของวงจร  
 $V_{ripple}$  : แรงดันกระเพื่อม  
 $I_{ripple}$  : กระแสกระเพื่อม  
 $D$  : สัดส่วนเวลาที่สวิตช์เปิดในหนึ่งคาบการทำงาน  
 $T_s$  : คาบของเวลา โดย  $T_s = 1/f$   
 $f$  : ความถี่ของสวิตช์

#### 2. ค่าตัวเก็บประจุ (Capacitance)

การคำนวณค่าตัวเก็บประจุจากแรงดันกระเพื่อมเพื่อหาค่า C1 สามารถหาได้โดย

$$\text{จากรูปที่ 1} \quad I_C = C \frac{dv}{dt} \quad (8)$$

$$\text{กระแสในวงจรกรองสัญญาณจะได้} \quad I_C = I_C \frac{dt}{dv} \quad (9)$$

$$\text{จัดรูปสมการที่ (7) จะได้} \quad C = \frac{I_{ripple} \cdot D \cdot T_s}{V_{ripple}} \quad (10)$$

$$\text{จัดรูปสมการที่ (8) อีกครั้ง} \quad C = \frac{I_{ripple} \cdot D}{f \cdot V_{ripple}} \quad (11)$$

ซึ่งสมการที่ (10) และ (11) สามารถหาค่า C1 ได้ โดยสมการที่ (10) ใช้คาบเวลาในการคำนวณ และสมการที่ (11) ทำการแปลงคาบเวลาเป็นความถี่ ความหมายของตัวแปรมีดังนี้

เมื่อ  $C$  : ค่าตัวเก็บประจุ

#### 2.1.3 ทฤษฎีการคำนวณโหลดตัวต้านทาน

โหลดตัวต้านทานสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการกำลังไฟฟ้า เพื่อหาค่า  $R_L$  ดังนี้

$$P_o = \frac{V_o^2}{R_L} = I_o^2 R_L \quad (12)$$

$$\text{จัดรูปสมการที่ (12) จะได้} \quad R_L = \frac{V_o^2}{P_o} \quad (13)$$

$$\text{จัดรูปสมการที่ (12) จะได้} \quad R_L = \frac{P_o}{I_o^2} \quad (14)$$

จากการที่จัดรูปสมการที่ (12) แล้วได้เป็นสมการที่ (13) และ (14) สามารถนำไปใช้หาค่าโหลดตัวต้านทานในวงจรได้ โดยใช้ค่าแรงดันขาออกวงจร ( $V_o$ ) หรือกระแสขาออกวงจร ( $I_o$ ) และกำลังไฟฟ้าขาออกของวงจร ( $P_o$ )

## 2.2 การควบคุม Full Bridge Converter

ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบแยกกัน นิยมใช้ MOSFET และ IGBT เป็นอุปกรณ์สวิตช์หลักในวงจร และอาศัยเทคนิคการควบคุมแบบสวิตชิง (Switching Control) ความถี่สูงในช่วงประมาณ 10kHz - 1MHz MOSFET จะเหมาะกับงานที่ต้องการความถี่สวิตชิงสูงและระดับกำลังไฟต่ำถึงปานกลาง ส่วน IGBT จะถูกเลือกใช้ในระบบที่ต้องการกำลังไฟสูงแต่ความถี่ไม่สูงมาก [2]

สำหรับการควบคุมสวิตช์ในวงจร Full Bridge Converter จะใช้เทคนิค Phase Shifted Full Bridge (PSFB) เนื่องจาก รองรับความถี่สูง, ประสิทธิภาพสูง, การสลับแบบนุ่มนวล (Soft switching) ช่วยลดการสูญเสียจากการสวิตช์และ การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) ได้อย่างชัดเจน [20]

## 3. ระบบและการออกแบบพารามิเตอร์ที่ใช้จำลอง

เมื่อได้สมการในการคำนวณแล้วเสร็จ ต้องกำหนดค่าคงที่เพื่อทำการจำลอง โดยการกำหนดค่าของตัวแปร ภายในเพาเวอร์โมดูลจะมี AC-DC Converter จะเป็นส่วนที่รับไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสหรือ 3 เฟส เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะมีแรงดันอยู่ในช่วง 250 – 480V [21] เพื่อใช้เป็นแรงดันขาเข้าวงจร Full Bridge Converter สำหรับการควบคุมใน [22] ได้แนะนำการควบคุมแบบ PSFB ซึ่งได้ใช้ความถี่อยู่ที่ 100kHz และใน [23] ได้ใช้ค่าสัดส่วนเวลาที่สวิตช์เปิดในหนึ่งคาบการทำงานอยู่ที่ 50% จากข้อมูลดังกล่าวมา จึงเลือกใช้ค่าเริ่มต้น สำหรับสำหรับวงจร Full Bridge Converter ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ค่าที่กำหนดสำหรับการจำลอง

| ชื่อของตัวแปร                                      | ค่า          |
|----------------------------------------------------|--------------|
| แรงดันขาเข้าวงจร, $V_{in}$                         | 250V         |
| แรงดันขาออกวงจร, $V_{out}$                         | 400V         |
| กระแสขาออกวงจร, $I_{out}$                          | 50A          |
| กำลังไฟฟ้าขาออกวงจร, $P_{out}$                     | 20kW         |
| ความถี่ของวงจร, $f$                                | 100kHz       |
| แรงดันกระเพื่อมของวงจร, $V_{ripple}$               | 1%           |
| กระแสกระเพื่อมของวงจร, $I_{ripple}$                | 20%          |
| ค่าสัดส่วนเวลาที่สวิตช์เปิดในหนึ่งคาบการทำงาน, $D$ | 0.5 หรือ 50% |

จากค่าคงที่ที่กำหนดสำหรับการจำลอง สามารถคำนวณค่าภายในหม้อแปลง, ค่าวงจรกรองสัญญาณ LC filter และโหลดตัวต้านทาน ได้ดังนี้

### 1. อัตราส่วนหม้อแปลง (Transformation Ratio)

หาค่า  $a$  จากสมการที่ (1);

$$a = \frac{V_p}{V_s} \quad (1)$$

$$a = 0.625$$

### 2. ค่าตัวเหนี่ยวนำ (Inductance)

หาค่า  $V_{ripple}$  จาก

$$V_{ripple} = 1\% \times V_{out}$$

$$V_{ripple} = 4V$$

นำค่า  $V_{ripple}$  แทนในสมการที่ (3);

$$V_{s,on} = V_{out} + V_{ripple} \quad (3)$$

$$V_{s,on} = 404V$$

นำค่า  $V_{s,on}$  แทนในสมการที่ (2);

$$V_L = V_{s,on} - V_{out} \quad (2)$$

$$V_L = 4V$$

หาค่า  $I_{ripple}$  จาก

$$I_{ripple} = 20\% \times I_{out}$$

$$I_{ripple} = 10A$$

นำค่า  $V_L$  และ  $I_{ripple}$  แทนในสมการที่ (7);

$$L = \frac{V_L \cdot D}{f \cdot I_{ripple}} \quad (7)$$

$$L = 0.000002H \text{ หรือ } 2\mu H$$

### 3. ค่าตัวเก็บประจุ (Capacitance)

นำค่า  $V_{ripple}$  และ  $I_{ripple}$  แทนในสมการที่ (10);

$$C = \frac{I_{ripple} \cdot D}{f \cdot V_{ripple}} \quad (11)$$

$$C = 0.0000125F \text{ หรือ } 12.5\mu F$$

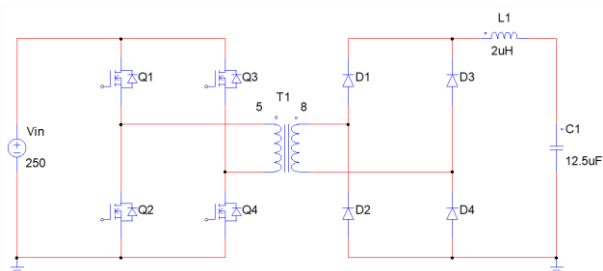
### 4. ค่าโหลดตัวต้านทาน (Resistance)

หาค่า  $R_L$  จากสมการที่ (13);

$$R_L = \frac{V_o^2}{P_o} \quad (13)$$

$$R_L = 8\Omega$$

ดังนั้น จากการคำนวณค่าภายในหม้อแปลงตามสมการที่ (1) อัตราส่วนหม้อแปลง  $a = 0.625$  หรือ 5:8 ค่าวงจรกรองสัญญาณ LC filter ค่าตัวเหนี่ยวนำตามสมการที่ (6)  $L1 = 2\mu H$  ค่าตัวเก็บประจุตามสมการที่ (10)  $C1 = 12.5\mu F$  และค่าโหลดตัวต้านทานตามสมการที่ (12)  $R_L = 8\Omega$  แทนค่าที่คำนวณลงในวงจร แสดงในรูปที่ 2 และผลการจำลอง

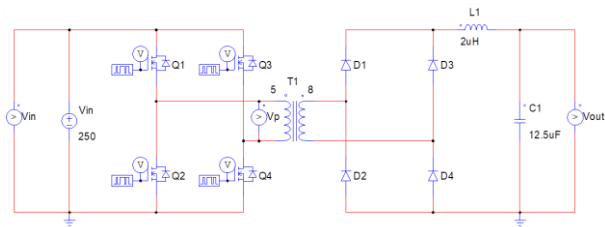


รูปที่ 2 วงจร Full bridge converter สำหรับการจำลอง

## 4. ผลการจำลอง

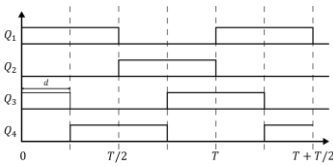
### 4.1 ผลการจำลองการเลื่อนเฟสแบบไม่มีโหลด

การจำลองการเลื่อนเฟสแบบไม่มีโหลด ได้ทำการบันทึกกราฟสัญญาณของ  $V_{in}$ ,  $V_{out}$  และ  $V_p$  ในวงจร Full bridge converter ดังรูปที่ 3

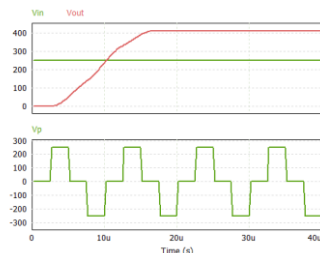


รูปที่ 3 การจำลองการเลื่อนเฟสแบบไม่มีโหลด

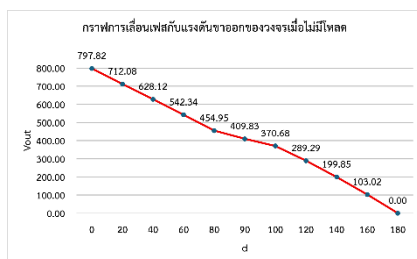
จากการจำลองพบว่า เมื่อเลื่อนเฟสตั้งแต่ 0 ถึง 180 องศา ทำให้  $V_{out}$  เพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่จากตารางที่ 1 ได้กำหนด  $V_{out} = 400V$  เมื่อดูผลของการจำลองแล้ว ความต่างเฟสที่ทำให้แรงดันเข้าใกล้ 400V คือ  $d = 80^\circ$  มี  $V_{out} = 454.95V$  และ  $d = 100^\circ$  มี  $V_{out} = 370.68V$  จึงได้ทำการนำค่า  $d = 80^\circ$  และ  $d = 100^\circ$  หาค่ากลางได้เป็น  $d = 90^\circ$  ซึ่งได้ผลการจำลองตามรูปที่ 4 และ 5 ซึ่งเป็นรูปการเลื่อนเฟสสัญญาณ และรูปกราฟการจำลองตามลำดับ ทำให้การเลื่อนเฟสแบบไม่มีโหลดที่เหมาะสมกับ  $V_{out}$  คือ  $d = 90^\circ$  เมื่อนำข้อมูลการเลื่อนเฟสและแรงดันขาออกของวงจรเมื่อไม่มีโหลดจัดทำเป็นกราฟ ได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 4 การเลื่อนเฟสสัญญาณแบบไม่มีโหลด  $d = 90^\circ$



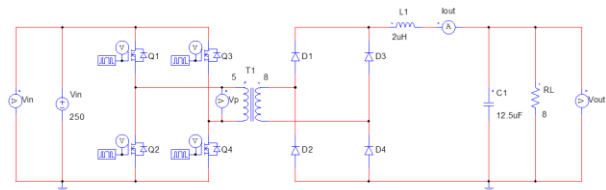
รูปที่ 5 กราฟการจำลองแบบไม่มีโหลด  $d = 90^\circ$



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเลื่อนเฟสกับแรงดันขาออกของวงจรเมื่อไม่มีโหลด

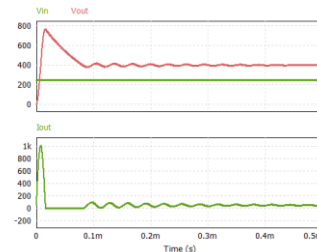
### 4.2 ผลการจำลองการเลื่อนเฟสแบบมีโหลด

การจำลองการเลื่อนเฟสแบบมีโหลด ได้ทำการบันทึกกราฟสัญญาณของ  $V_{in}$ ,  $V_{out}$ ,  $V_p$  และ  $I_{out}$  ในวงจร Full bridge converter ดังรูปที่ 7

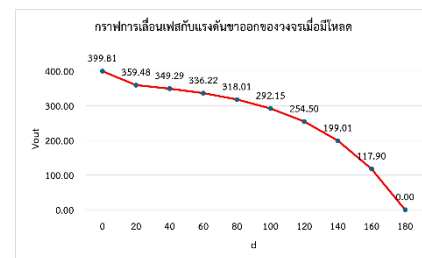


รูปที่ 7 การจำลองการเลื่อนเฟสแบบมีโหลด

จากการจำลองพบว่า เมื่อมีโหลดและปรับการเลื่อนเฟสตั้งแต่ 0 ถึง 180 องศา  $V_{out}$ ,  $I_{out}$  ของวงจรจะลดลง ซึ่งการเลื่อนเฟสเมื่อมีโหลดที่  $d = 0^\circ$  ทำให้  $V_{out}$ ,  $I_{out}$  ของวงจรเท่ากับค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 1 คือ  $V_{out} = 400V$ ,  $I_{out} = 50A$  และ  $P_{out} = 20kW$  เมื่อกราฟอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady State) ตามรูปที่ 8 และเมื่อนำข้อมูลการเลื่อนเฟสและแรงดันขาออกของวงจรเมื่อมีโหลดจัดทำเป็นกราฟ จะได้กราฟดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 กราฟการจำลองแบบมีโหลด  $d = 0^\circ$



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเลื่อนเฟสกับแรงดันขาออกของวงจรเมื่อมีโหลด

ดังนั้นในการจำลองเลื่อนเฟสพบว่า ในกรณีที่ไม่มีโหลด  $V_{out}$  จะเพิ่มขึ้นตามมุมเฟสที่มากขึ้น ซึ่งค่า  $d = 90^\circ$  จะทำให้  $V_{out} \approx 400V$  ตามที่กำหนดไว้ และในกรณีเมื่อมีโหลดพบว่า เมื่อเลื่อนเฟสมากขึ้น  $V_{out}$ ,  $I_{out}$  จะลดลง ซึ่งค่า  $d = 0^\circ$  จะให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงตามค่าที่กำหนดไว้คือ  $V_{out} = 400V$ ,  $I_{out} = 50A$  และ  $P_{out} = 20kW$  ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการของ PSFB ที่ออกแบบมาเพื่อรองรับการแปลงพลังงานที่มีประสิทธิภาพ โดยการควบคุมมุมเฟสจะต้องปรับให้เหมาะสมกับสภาวะโหลดเพื่อให้เกิด ZVS และลดการสูญเสียพลังงานให้ได้มากที่สุด [24], [25]

## 5. สรุปผล

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ ดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบแยกกันทางไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม PSIM และนำผลการศึกษาและวิเคราะห์ไปพัฒนาเป็นต้นแบบในอนาคต

การคำนวณพารามิเตอร์ ไดโอด หม้อแปลงมีอัตราส่วน 5:8 ( $a = 0.625$ ), ตัวเหนี่ยวนำ  $L1 = 2\mu H$ , ตัวเก็บประจุ  $C1 = 12.5\mu F$  และโหลด  $RL = 8\Omega$  เมื่อนำไปจำลองผ่านโปรแกรม PSIM พบว่า ในกรณีที่ไม่มีโหลด เมื่อเลื่อนเฟสมากขึ้นแรงดันขาออกจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยที่  $d = 90^\circ$  ให้ค่า  $V_{out} \approx 400V$  และในกรณีที่ไม่มีโหลด เมื่อเลื่อนเฟสมากขึ้นทำให้แรงดันและกระแสขาออกลดลง โดยที่  $d = 0^\circ$  ทำให้  $V_{out} = 400V$ ,  $I_{out} = 50 A$  และ  $P_{out} = 20kW$

ในงานวิจัยครั้งต่อไปต้องมีการการควบคุมแบบลูปปิด เพื่อควบคุมการเลื่อนเฟสของวงจรในสัมพันธ์กับแรงดันและกระแสขาออก ให้เหมาะสมกับแรงดันและกระแสที่โหลดต้องการ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Driivz, "What is Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE)?," *Driivz*, [Online]. Available: <https://driivz.com/glossary/electric-vehicle-supply-equipment-evse/>.
- [2] D. M. Bellur and M. K. Kazimierczuk, "DC-DC converters for electric vehicle applications," *2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*, Nashville, TN, USA, 2007, pp. 286-293, doi: 10.1109/EEIC.2007.4562633.
- [3] SCU Power, "EV Charger Power Module," *Sichuan Injet Electric Co., Ltd.*, [Online]. Available: <https://www.scupower.com/ev-charger/ev-charger-module/>.
- [4] Ikonix Asia, *IEC 61851 Testing Insight Ensures EV Charger Safety*, [Online]. Available: <https://www.ikonixasia.com/2023/10/issue46-iec-61851-testing-insight-ensures-ev-charger-safety/>.
- [5] S. B. Sudarshan and G. Arunkumar, "Isolated DC-DC Power Converters for Simultaneous Charging of Electric Vehicle Batteries: Research Review, Design, High-Frequency Transformer Testing, Power Quality Concerns, and Future," *Sustainability*, vol. 15, no. 3, p. 2813, Feb. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su15032813>
- [6] Analog Devices, "When the Flyback Converter Reaches Its Limits," [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/when-the-flyback-converter-reaches-its-limits.html>
- [7] F. Alhaj Omar, "Comprehensive Analysis and Evaluation of DC-DC Converters: Advancements, Applications, and Challenges," *BSJ Eng. Sci.*, vol. 6, no. 4, pp. 557-571, 2023, doi: 10.34248/bsen-gineering.1357849.
- [8] A. Kamath, "Push-pull converter simplifies isolated power supply design in HEV/EV systems," *Analog Design Journal*, Texas Instruments, 1Q 2020.
- [9] J. Wang, M. Reinhard, F. Z. Peng and Zhaoming Qian, "Design guideline of the isolated DC-DC converter in green power applications," *The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2004. IPEMC 2004.*, Xi'an, China, 2004, pp. 1756-1761 Vol.3.
- [10] M. A. Chewale, R. A.Wanjari, V. B.Savakhande and P. R.Sonawane, "A Review on Isolated and Non-isolated DC-DC Converter for PV Application," *2018 International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICCPCCCT)*, Kannur, India, 2018, pp. 399-404, doi: 10.1109/ICCPCCCT.2018.8574312.
- [11] A. Ahmad, Z. Qin, T. Wijekoon and P. Bauer, "An Overview on Medium Voltage Grid Integration of Ultra-Fast Charging Stations: Current Status and Future Trends," in *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 3, pp. 420-447, 2022, doi: 10.1109/OJIES.2022.3179743.
- [12] A. K. M. Yousuf, Z. Wang, R. Paranjape and Y. Tang, "An In-Depth Exploration of Electric Vehicle Charging Station Infrastructure: A Comprehensive Review of Challenges, Mitigation Approaches, and Optimization Strategies," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 51570-51589, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3385731.
- [13] MIDA Power, "UL EV Charger Module 30 kW/40 kW AC-DC EV Charging Power Module - Output Voltage Range 50-1000 V DC," \*MIDA Power\*, 2025. [Online]. Available: <https://www.midapower.com/ev-charging-module-40kw-1000v-ac-dc-ev-charging-power-module>.
- [14] F. Grazian, T. B. Soeiro and P. Bauer, "Voltage/Current Doubler Converter for an Efficient Wireless Charging of Electric Vehicles With 400-V and 800-V Battery Voltages," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 8, pp. 7891-7903, Aug. 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3208582.
- [15] Powersim Inc., "PSIM: Simulation Software for Power Electronics and Motor Drive," [Online]. Available: <https://powersimtech.com>
- [16] R. W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, 2nd ed., Springer, 2001.
- [17] M. H. Rashid, *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications*, 4th ed. Pearson, 2013.

- [18] B. K. Bose, "Power electronics and motor drives recent technology advances," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 2, pp. 581–588, Feb. 2009.
- [19] Electronics Two, "Ripple current and voltage in battery charger circuit," YouTube, Sep. 24, 2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=ula919l-w6o>.
- [20] [a] V. V. G. Reddy, A. G. Krishna, and K. S. Reddy, "Phase Shifted Full Bridge Converter for High Power Applications," *Int. Res. J. Eng. Technol. (IRJET)*, vol. 2, no. 4, pp. 1337–1341, July 2015. [Online]. Available: <https://www.irjet.net/archives/V2/i4/Irjet-v2i4288.pdf>
- [21] D. F. Opila, E. Oh, K. Kintzley and J. Lomax, "A reconfigurable three- and single-phase AC/DC non-isolated bi-directional converter for multiple worldwide voltages," *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Cincinnati, OH, USA, 2017, pp. 1708-1714, doi: 10.1109/ECCE.2017.8095999.
- [22] Texas Instruments, "Phase-Shifted Full Bridge DC/DC Power Converter Design Guide, TIDU248," Application Report, Apr. 2014. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ug/tidu248/tidu248.pdf>.
- [23] Chanthay Phok, Jaruwat Manerutanaporn, Nattapong Keanmalee, Pairaya Choeisai and Krit Choeisai, "The design of Power Factor Correction (PFC) Boost Converter Circuit and Phase-shift Full-bridge Inverter Circuit for Electric Vehicle Battery Charger", *KKU RESEARCH JOURNAL (GRADUATE STUDIES)*, Vol. 19 NO. 1: January-March 2019
- [24] Texas Instruments, "Phase-Shifted Full-Bridge Converter Design Considerations," Application Report SLUA560, Sep. 2009. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/an/slua560/slua560.pdf>.
- [25] Infineon Technologies, "Phase-shift ZVS full-bridge converter: Basic function and calculation," Technical Document, Jun. 2021. [Online]. Available: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-N\\_2020\\_03\\_Functionality\\_and\\_Design\\_of\\_a\\_PSF-ApplicationNotes-v01\\_00-EN.pdf](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-N_2020_03_Functionality_and_Design_of_a_PSF-ApplicationNotes-v01_00-EN.pdf).



ยุทธนา จงเจริญ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
ขอบเขตการวิจัยทางด้าน Electrical Machines and Drives/ Power Electronics in Renewable Energy Systems



ชญา ไชยมงคล ปัจจุบันกำลังศึกษาในหลักสูตรปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมไฟฟ้า) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ งานวิจัยที่สนใจ Power Electronics, DC-DC Converter