



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

วงจรแปลงผันกระแสตรงอัตราขยายสูงที่มีการแยกกราวด์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง

High Step-up Ratio Isolated DC-DC Converter for Fuel Cell Application

โดย

ดร. ศักดา สมกุล และคณะ

มหาวิทยาลัยนเรศวร

กันยายน 2558



สัญญาเลขที่ R2558C094

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

วงจรแปลงผันกระแสตรงอัตราขยายสูงที่มีการแยกกราวด์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง

High Step-up Ratio Isolated DC-DC Converter for Fuel Cell Application

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร

คณะผู้วิจัยว่าโดยทะเบียน... 2.7: 2559

เลขทะเบียน.....

เลขเรียกหนังสือ.....

ดร. ศักดา สมกุล

ดร. จัตรชัย ศิริสัมพันธ์วงศ์

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร

TK
จ ๔๙๓
.P๗๖
๗ 3๓5
๒55๗

สนับสนุนโดย

งบประมาณรายได้มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก งบประมาณรายได้มหาวิทยาลัยนเรศวร ประจำปี
งบประมาณ พ.ศ. 2558

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้สนับสนุนเวลา
และสถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบคุณ รศ.ดร.พิสิษฐ์ ลีวัฒนกุล ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้สละเวลาประเมินข้อเสนอโครงการและให้
คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์จนกระทั่งโครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร.ภูพงษ์ พงษ์เจริญ รองอธิการบดีฝ่ายวิจัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่
กองบริหารการวิจัย มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ช่วยอำนวยความสะดวก และสนับสนุนโครงการวิจัยนี้
ตั้งแต่นั้นตอนการรับข้อเสนอโครงการจนกระทั่งโครงการวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

นอกจากนี้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณฝ่ายสนับสนุนประจำวิทยาลัยพลังงานทดแทนทุกท่านที่
ช่วยอำนวยความสะดวกตลอดโครงการวิจัยนี้ โดยเฉพาะคุณสาธิต บรรทัด และคุณจารุณี มั่งทัด

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณครอบครัวของคณะผู้วิจัยที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจจนกระทั่ง
งานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

ดร. ศักดา สมกุล

ดร. จัตรชัย ศิริสัมพันธ์วงศ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการออกแบบและสร้างวงจร Dual active bridge DC-DC converter เพื่อใช้เป็นวงจรขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการแยกกราวด์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ขนาด 1 kW วงจรดังกล่าวประกอบด้วยวงจร Full bridge DC-AC converter จำนวน 2 วงจร เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่ 20 kHz บ่อนให้กับขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบระหว่างขดลวดทุติยภูมิต่อปฐมภูมิเท่ากับ 7.33 และมีแรงดันอินพุทกระแสตรงอยู่ระหว่าง 40 V ถึง 65 V และมีแรงดันเอาต์พุทในช่วง 360 V ถึง 400 V กำลังไฟฟ้าที่ไหลจากอินพุทไปเอาต์พุทควบคุมจากมุมต่างเฟสระหว่างแรงดันที่ขดลวดทั้งสองของหม้อแปลงไฟฟ้า (ϕ) ระบบควบคุมวงจรถูกกล่าวเป็นแบบรูปเปิดโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 32 บิต เบอร์ TMS320F28069 เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของมอสเฟตของวงจรดังกล่าว

วงจรต้นแบบที่สร้างขึ้นได้ทดสอบกับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกับสายส่งทางด้านเอาต์พุท เมื่อใช้แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงขนาด 48 V เป็นอินพุทพบว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุทสูงสุดเท่ากับ 746 W ที่แรงดันเอาต์พุทเท่ากับ 400 V และ $\phi=40^\circ$ และมีประสิทธิภาพสูงกว่า 93% ตลอดทุกช่วงโวลต์ที่แรงดันเอาต์พุทเท่ากับ 360 V เพราะอัตราขยายแรงดันมีค่าใกล้เคียงอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงทำให้วงจรสามารถทำงานในโหมดสวิตช์ขณะที่แรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) ที่มุม ϕ มีค่าต่ำ

เมื่อทดสอบกับเซลล์เชื้อเพลิงพบว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุทสูงสุดมีค่าประมาณ 420 W แรงดันเอาต์พุทเท่ากับ 360 V และ $\phi=30^\circ$ เนื่องจากเมมเบรนของเซลล์เชื้อเพลิงเกิดการเสื่อมสภาพ วงจรแปลงผันสามารถทำงานในโหมด ZVS ตลอดทุกช่วงโวลต์ที่แรงดันเอาต์พุท 360 V มีประสิทธิภาพสูงกว่า 93.5% ที่มุมต่างเฟสสูงสุด $\phi=30^\circ$ และแรงดันเอาต์พุท 360, 380 และ 400 V วงจรแปลงผันมีประสิทธิภาพสูงกว่า 94% เพราะมีย่านการทำงานในโหมด ZVS ที่กว้างขึ้น

วงจรต้นแบบที่ขึ้นมีอัตราขยายแรงดันสูงสุดเท่ากับ 9.7 เท่า ซึ่งเหมาะสำหรับใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อใช้ในระบบผลิตไฟฟ้ากระแสสลับ นอกจากนี้ก็ยังพบว่าอัตราส่วนจำนวนรอบที่เหมาะสมของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของวงจรแปลงผัน

Abstract

This research describes design and construction of a dual active bridge DC-DC converter as a step-up converter with galvanic isolation for a 1-kW PEM fuel cell. The converter comprises two full bridge DC-AC converters which generate 20-kHz square wave voltages for the primary and secondary windings of a high frequency transformer. The secondary to primary turn ratio of such transformer was 7.33. The DC input and output voltages of the converter ranged from 40 to 65 V and 360 to 400 V respectively. The output power was controlled by the phase angle, ϕ between the primary and secondary voltages of the transformer. The prototype circuit was controlled in the open loop scheme implemented in a TMS320F28069 32-bit microcontroller which was also used to generate switching signals to the MOSFETs.

The output of the constructed converter was connected to a single-phase grid-connected inverter as the load. Using a 48-V DC supply as the input, the maximum output power was found to be 746 W at the output voltage of 400 V and $\phi=40^\circ$. For the output voltage of 360 V, the efficiency was better than 93% for the entire load range. This was due to the fact that the voltage conversion ratio was close to the transformer turn ratio, which allowed the converter to work in the zero voltage switching (ZVS) mode at small values of ϕ .

When tested with the fuel cell stack, the converter delivered the maximum output approximately of 420 W at the output voltage of 360 V and $\phi=30^\circ$. This limited power was caused by degradation in the polymer membranes of the stack. At 360 V, the ZVS operation was achieved for the whole load range with the efficiency greater than 93.5%. At the maximum angle $\phi=30^\circ$ and the output voltage of 360, 380 and 400 V, the efficiency was higher than 94% due to a wider ZVS region.

The prototype converter had the maximum voltage step-up ratio of 9.7, which was suitable for an AC power generation system using fuel cells. In addition, an optimal turn ratio of the high frequency transformer contributed significantly to the converter efficiency.

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
1.1 ปัญหาและความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย	3
1.5 ผลงานที่ได้จากโครงการวิจัยนี้.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM.....	5
2.2 วงจรแปลงผันกระแสตรงแบบ Dual Active Bridge.....	12
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
3 การจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงและวงจรแปลงผันกระแสตรง	26
3.1 การจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	26
3.2 การจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันกระแสตรงแบบ DAB.....	34
4 การออกแบบและสร้างวงจรแปลงผันกระแสตรง	40
4.1 วงจรภาคกำลัง	40
4.2 การออกแบบหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	44
4.3 การออกแบบระบบควบคุม.....	49
5 ผลการวิจัย	53
5.1 การทดสอบการทำงานของวงจร DAB ร่วมกับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 48 V	53

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	7
2-2 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาเคมี อุณหภูมิใช้งาน และชนิด Electrolyte ของเซลล์เชื้อเพลิง ชนิดต่างๆ	7
2-3 โครงสร้างภายในหนึ่งเซลล์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM [14]	8
2-4 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM เมื่อประกอบรวมกันเป็น Stack	8
2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสของเซลล์เชื้อเพลิง	9
2-6 วงจรแปลงผันกระแสตรงแบบ Dual Active Bridge	12
2-7 วงจรสมมูลของวงจร DAB เมื่ออ้างอิงทางด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ..	13
2-8 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจร DAB เมื่อ $d = 1$	16
2-9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจร DAB เมื่อ $d > 1$	17
2-10 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจร DAB เมื่อ $d < 1$	18
2-11 กำลังไฟฟ้าของวงจร DAB และเงื่อนไขขอบเขตการสวิตช์แบบ ZVS	19
2-12 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบบูสต์สำหรับผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง	20
2-13 อินเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ Push pull converter และ Half bridge inverter	21
2-14 วงจรแปลงผันกระแสตรงแบบ Interleaved Current-Fed Full Bridge Converter ...	22
2-15 วงจรแปลงผันกระแสตรงแบบ Dual Active Bridge	23
2-16 วงจร Half-bridge three-port DC-DC converter	24
2-17 ไดอะแกรมแบบจำลองพลวัตของเซลล์เชื้อเพลิงของ Caisheng Wang และคณะ ..	25
3-1 วงจรสมมูลของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์	27
3-2 กราฟแรงดัน-กระแสของเซลล์เชื้อเพลิงรุ่น H-1000	29

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-3 แรงดันสูญเสียเนื่องจาก Activation, Ohmic และ Concentration loss ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM.....	30
3-4 ผลการจำลองกราฟแรงดัน-กระแสในสภาวะคงตัวของเซลล์เชื้อเพลิง H-1000 เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากคู่มือการทำงาน.....	32
3-5 แรงดันและกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อในสภาวะโหลดเปลี่ยนแปลงเทียบกับการจำลองการทำงาน	32
3-6 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงที่สร้างบนโปรแกรม MATLAB/Simulink.....	33
3-7 แบบจำลองของวงจรแปลงผันกระแสตรง DAB ในโปรแกรม MATLAB/Simulink.....	35
3-8 ผลการจำลองการทำงานในสภาวะคงตัวของวงจร DAB เมื่อ $V_{FC} = 43.2 \text{ V}$ และ $\phi = 45^\circ$	38
3-9 ผลการจำลองการทำงานในสภาวะคงตัวของวงจร DAB เมื่อ $V_{FC} = 63 \text{ V}$ และ $\phi = 2^\circ$	38
3-10 ผลการจำลองการทำงานในสภาวะคงตัวของวงจร DAB เมื่อ $V_{FC} = 43.2 \text{ V}$ และ $\phi = 45^\circ$ ที่ค่ากระแสเริ่มต้น $i_p(0) = 0 \text{ A}$	39
4-1 ไดอะแกรมการต่อใช้งานของชุดวงจรมอสเฟต APTM10HM19FT3G	40
4-2 ไดอะแกรมการต่อใช้งานของชุดวงจรมอสเฟต APTC60HM83FT2G.....	41
4-3 ไดอะแกรมแสดงการต่อใช้งานของวงจรขับเคลื่อน SKHI22B	42
4-4 ต้นแบบวงจรแปลงผันกระแสตรง Dual active bridge	44
4-5 ขนาดและมิติของแกนเหล็กและ Coil former ขนาด ETD-59	48
4-6 การสร้างสัญญาณ PWM โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28069.....	51
4-7 วงจรเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับภาคกำลังของวงจร DAB.....	52
5-1 วงจรทดสอบการทำงานของวงจร DAB กับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 48 V.....	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

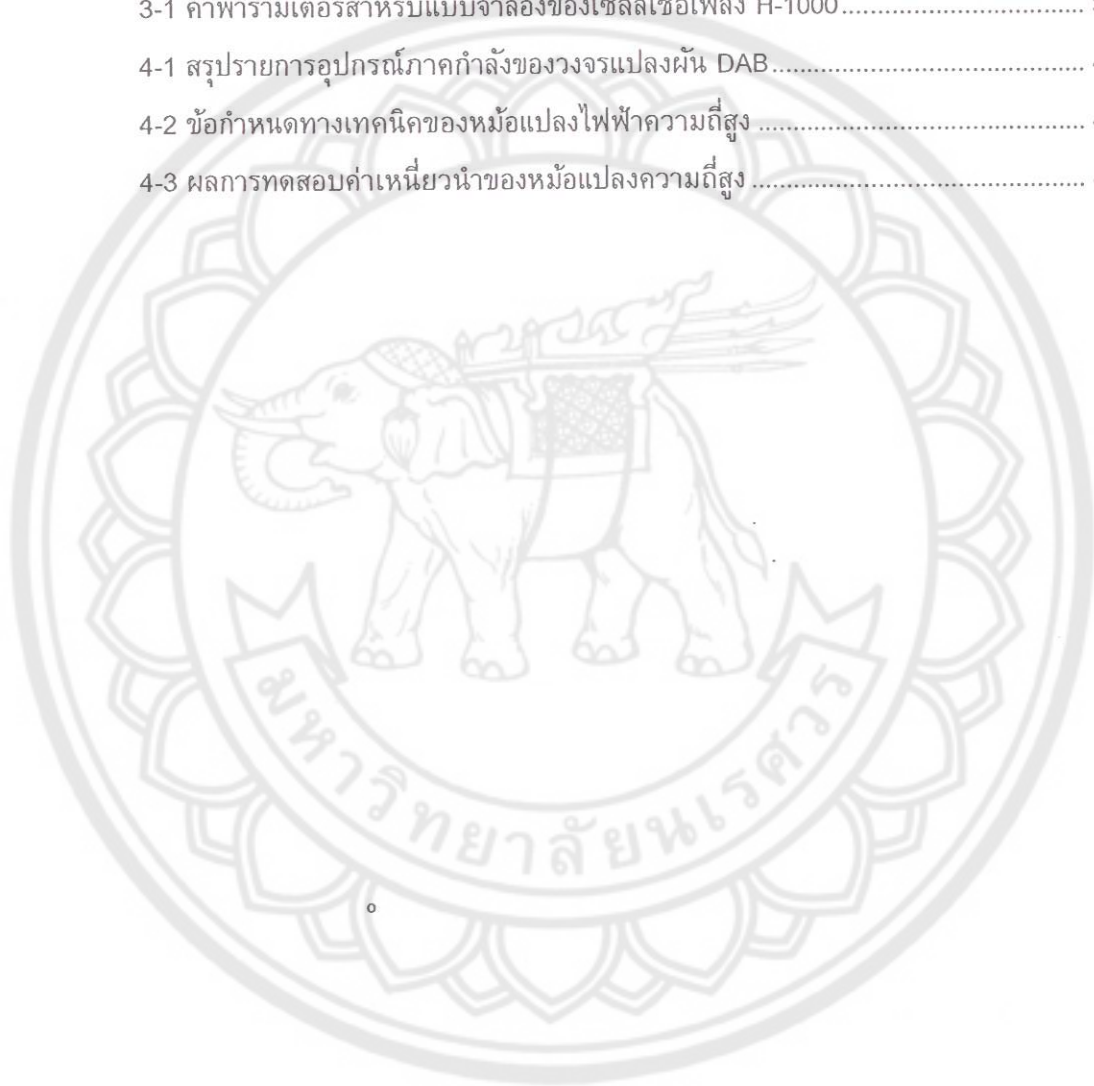
ภาพที่	หน้า
5-2 รูปคลื่นแรงดัน v_p, v_s และรูปคลื่นกระแส i_p, i_{FC} เมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายแรงดัน กระแสตรงขนาด 48 V ที่ $V_o = 360 V$ และ $\phi = 5^\circ$	54
5-3 รูปคลื่นแรงดัน v_p, v_s และรูปคลื่นกระแส i_p, i_{FC} เมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายแรงดัน กระแสตรงขนาด 48 V ที่ $V_o = 360 V$ และ $\phi = 40^\circ$	55
5-4 รูปคลื่นแรงดัน v_p, v_s และรูปคลื่นกระแส i_p, i_{FC} เมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายแรงดัน กระแสตรงขนาด 48 V ที่ $V_o = 380 V$ และ $\phi = 10^\circ$	55
5-5 รูปคลื่นแรงดัน v_p, v_s และรูปคลื่นกระแส i_p, i_{FC} เมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายแรงดัน กระแสตรงขนาด 48 V ที่ $V_o = 380 V$ และ $\phi = 40^\circ$	56
5-6 รูปคลื่นแรงดัน v_p, v_s และรูปคลื่นกระแส i_p, i_{FC} เมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายแรงดัน กระแสตรงขนาด 48 V ที่ $V_o = 400 V$ และ $\phi = 15^\circ$	56
5-7 รูปคลื่นแรงดัน v_p, v_s และรูปคลื่นกระแส i_p, i_{FC} เมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายแรงดัน กระแสตรงขนาด 48 V ที่ $V_o = 400 V$ และ $\phi = 40^\circ$	57
5-8 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทของวงจร DAB จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ เมื่อ แรงดันอินพุทเท่ากับ 48 V.....	57
5-9 ประสิทธิภาพของวงจร DAB เมื่อแรงดันอินพุทเท่ากับ 48 V.....	58
5-10 วงจรทดสอบการทำงานของวงจร DAB กับเซลล์เชื้อเพลิงรุ่น H-1000.....	59
5-11 ระบบทดสอบต้นแบบวงจรแปลงผันกระแสตรงแบบ DAB.....	59
5-12 รูปคลื่นแรงดัน v_p, v_s และรูปคลื่นกระแส $-i_p, i_{FC}$ เมื่อทดสอบกับเซลล์เชื้อเพลิง ที่ $V_o = 360 V$ และ $\phi = 5^\circ$	60
5-13 รูปคลื่นแรงดัน v_p, v_s และรูปคลื่นกระแส $-i_p, i_{FC}$ เมื่อทดสอบกับเซลล์เชื้อเพลิง ที่ $V_o = 360 V$ และ $\phi = 30^\circ$	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-14 รูปคลื่นแรงดัน v_p , v_s , และรูปคลื่นกระแส $-i_p$, i_{FC} เมื่อทดสอบกับเซลล์เชื้อเพลิง ที่ $V_o = 380 V$ และ $\phi = 10^\circ$	61
5-15 รูปคลื่นแรงดัน v_p , v_s , และรูปคลื่นกระแส $-i_p$, i_{FC} เมื่อทดสอบกับเซลล์เชื้อเพลิง ที่ $V_o = 380 V$ และ $\phi = 30^\circ$	61
5-16 รูปคลื่นแรงดัน v_p , v_s , และรูปคลื่นกระแส $-i_p$, i_{FC} เมื่อทดสอบกับเซลล์เชื้อเพลิง ที่ $V_o = 400 V$ และ $\phi = 10^\circ$	62
5-17 รูปคลื่นแรงดัน v_p , v_s , และรูปคลื่นกระแส $-i_p$, i_{FC} เมื่อทดสอบกับเซลล์เชื้อเพลิง ที่ $V_o = 400 V$ และ $\phi = 30^\circ$	62
5-18 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจร DAB เมื่อต่อร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง	63
5-19 ประสิทธิภาพของวงจร DAB เมื่อต่อร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง	63
5-20 ขอบเขตเงื่อนไข ZVS ของวงจร DAB เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 48 V.....	64
5-21 ระบบควบคุมแบบลูปิดสำหรับวงจรแปลงผันกระแสตรง DAB.....	67

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3-1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิง H-1000.....	33
4-1 สรุปรายการอุปกรณ์ภาคกำลังของวงจรแปลงผัน DAB.....	43
4-2 ข้อกำหนดทางเทคนิคของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	47
4-3 ผลการทดสอบค่าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงความถี่สูง	48



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ปัญหาและความเป็นมา

ปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงได้รับการสนใจในฐานะของพลังงานทางเลือกในอนาคต เนื่องจากไม่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางเสียง และมีประสิทธิภาพสูงเพราะเป็นการแปลงผันจากปฏิกิริยาทางเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงซึ่งไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่เหมือนกับระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้แบบกังหันไอน้ำ หรือเครื่องยนต์สันดาปภายใน [1] นอกจากนี้ไฮโดรเจนที่เป็นเชื้อเพลิงของของเซลล์เชื้อเพลิงยังพบได้ในหลากหลายรูปแบบ เช่น ในเชื้อเพลิงฟอสซิล และน้ำ เป็นต้น ซึ่งน้ำถือว่าเป็นวัตถุดิบสำหรับไฮโดรเจนที่ราคาถูกและมีอยู่อย่างมากมาย ปัจจุบันนักวิจัยทั่วโลกกำลังพัฒนากระบวนการ Electrolysis เพื่อให้สามารถแยกไฮโดรเจนจากน้ำได้ในราคาที่ถูกลงโดยใช้ไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนในช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำ [2]

จากข้อดีดังกล่าวสหรัฐอเมริกาได้เลือกใช้เซลล์เชื้อเพลิงสำหรับไฟฟ้าในโครงการกระสวยอวกาศ [1] และเมื่อมีการพัฒนาเทคโนโลยีทางวัสดุทำให้ต้นทุนในการผลิตเซลล์เชื้อเพลิง จึงประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิด Polymer Exchange Membrane (PEM) ผลิตไฟฟ้าเพื่อป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าของชุดขับเคลื่อน [3] นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ยังมีการประยุกต์ใช้ในโรงไฟฟ้าขนาดเล็กประมาณ 10 ถึง 10 kW [4] ที่มีเซลล์แสงอาทิตย์และ/หรือกังหันลมเป็นแหล่งพลังงานหลักและใช้ Electrolyzer ผลิตไฮโดรเจนในเวลาที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ เพื่อใช้เป็นตัวเก็บพลังงานสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงใช้ในการผลิตไฟฟ้าในเวลาที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงกว่าปกติของเซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลม ข้อดีของการใช้สะสมพลังงานในรูปไฮโดรเจน คือ มีความหนาแน่นของพลังงานสูง การรั่วไหลต่ำเหมาะสำหรับสะสมพลังงานระหว่างฤดูกาล (Seasonal energy storage) [2] ในช่วงที่พายุเฮอริเคนแซนดี้ถล่มมรัฐทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของสหรัฐอเมริกาเมื่อปี ค.ศ. 2012 เซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฉุกเฉินให้กับระบบสื่อสารและอาคารต่างๆ [5] โดยแทบไม่เกิดปัญหา

ตลอดช่วงระยะเวลาของอายุ ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำงานได้ติดต่อกันหลายวันโดยใช้ไฮโดรเจนเพียงหนึ่งถัง นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงต้องการการบำรุงรักษาต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล

แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM คือ แรงดันไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแรงดันกระแสตรงที่ไม่มีความเสถียร ซึ่งจะค่าลดลงเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ไม่สามารถต่อใช้งานร่วมกับโหลดได้โดยตรง [6] ปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ เมื่อมีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดทำให้เชื้อเพลิงซึ่งในที่นี้คือไฮโดรเจนไม่เพียงพอต่อความต้องการพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้น โดยที่ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Fuel cell starvation [7] ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer) และเมมเบรนของเซลล์เชื้อเพลิงเสื่อมสภาพได้ [8] ด้วยเหตุนี้การใช้เซลล์เชื้อเพลิงในงานต่างๆ จึงต้องมีวงจรแปลงผันกระแสตรง (DC-DC converter) เพื่อทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน และควบคุมกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงไม่เกินค่ากระแสสูงสุดและกระแสกระชากที่จะเป็นอันตรายต่อตัวเซลล์เชื้อเพลิงอีกด้วย [6] นอกจากนี้กระแสเซลล์เชื้อเพลิงต้องมีการกระเพื่อมที่ไม่เกิน 4% ที่ความถี่สูงกว่า 400 Hz [9] จึงจะไม่ส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง หรืออีกนัยหนึ่งวงจรแปลงผันกระแสเป็นตัวปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าให้กับเซลล์เชื้อเพลิงนั่นเอง (Fuel cell power conditioner) [10]

ปัจจุบันวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ มีเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM รุ่น H-1000 ผลิตโดย Horizon Fuel Cell Technology มีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในย่าน 43-69 V โดยที่มีพิกัดไฟฟ้าสูงสุด 1 kW ที่ 43 V 23.5 A [11] แต่อย่างไรก็ตามเราไม่สามารถนำเอาเซลล์เชื้อเพลิงนี้ไปต่อใช้งานร่วมกับอินเวอร์เตอร์เพื่อผลิตไฟฟ้าได้โดยตรงเนื่องจากแรงดันทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำสุดประมาณ 310 V เพื่อแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ 220 V 50 Hz ตามระบบไฟฟ้าของประเทศไทย ซึ่งจะเห็นได้ว่าวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงต้องมีอัตราขยายแรงดันอย่างต่ำ 7.2 เท่า นอกจากนี้ควรมีแยกกราวด์ (Galvanic isolation) ระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตขึ้นเพื่อป้องกันอันตรายจากกระแสรั่วไหลผ่านทางค่าความจุไฟฟ้าแฝง (Stray capacitance) [10]

จากปัญหาดังกล่าวโครงการวิจัยนี้จึงเป็นการออกแบบและสร้างวงจรแปลงผันกระแสตรงอัตราขยายสูง (DC-DC converter) สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1 kW ที่มีการแยกกราวด์โดยใช้หม้อแปลงความถี่สูงเพื่อให้วงจรมีขนาดเล็ก เพื่อใช้เป็นวงจรปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power conditioner) ทำให้สามารถต่อใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับวงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้ากระแสสลับจากพลังงานไฮโดรเจน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

ออกแบบและสร้างวงจรแปลงผันกระแสตรงแบบ Dual Active Bridge (DAB DC-DC converter) สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1 kW ที่มีการแยกกราวด์โดยใช้หม้อแปลงความถี่สูง เพื่อขยายแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของเซลล์เพลิงในพิสัย 43-70 โวลต์ เพิ่มขึ้นเป็น 400 โวลต์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

วงจรแปลงผันกระแสตรงแบบ Dual Active Bridge (DAB DC-DC converter) สำหรับขยายแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงรุ่น Horizon H-1000 ที่มีค่าอยู่ในย่าน 43-69 V มีคุณลักษณะทางเทคนิคที่สำคัญดังนี้

- 1) มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านเอาต์พุตอยู่ในย่าน 350-400 V
- 2) กำลังไฟฟ้าสูงสุด 1 kW
- 3) มีการแยกกราวด์ระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงและโหลดโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่ 20 kHz
- 4) ควบคุมการทำงานโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

- 1) ทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง Horizon H-1000
- 2) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิง Horizon H-1000 และวงจรแปลงผันกระแสตรงในโปรแกรม MATLAB/Simulink
- 3) ออกแบบและสร้างภาคกำลังและภาคควบคุมของวงจรแปลงผันกระแสตรง

- 4) เขียนโปรแกรมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกระแสตรงและเซลล์เชื้อเพลิง
- 5) ทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันกระแสตรงเมื่อต่อใช้งานร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง
- 6) สรุปผลการทดลองและจัดทำรายงานการวิจัย

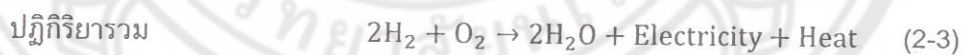
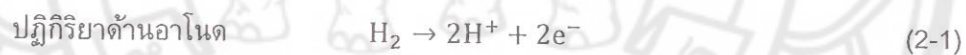
1.5 ผลงานที่ได้จากโครงการวิจัยนี้

บทความวิจัยเรื่อง "Study of an Isolated DC-DC Converter for Fuel Cell Applications" ได้รับการตอบรับเพื่อนำเสนอในที่ประชุมวิชาการ International Conference "Energy: World Future Alternatives" มหาวิทยาลัยนเรศวร ระหว่างวันที่ 29 พฤศจิกายน ถึง 1 ธันวาคม 2558 โดยที่บทความดังกล่าวจะได้รับการพิจารณาเพื่อตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการนานาชาติ Applied Mechanics and Materials (ISSN: 1660-9336) อยู่ในฐานข้อมูล SCOPUS และ SJR Quartile 3 หรือวารสารวิชาการนานาชาติ International Journal of Renewable Energy: IIRE (ISSN: 1905-7172) อยู่ในฐานข้อมูล TCI Tier 1

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM [12, 13]

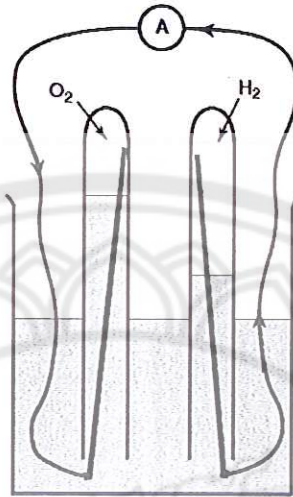
เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cells) เป็นอุปกรณ์ทางเคมีไฟฟ้าที่แปลงผันพลังงานจากปฏิกิริยาเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งคิดค้นโดย William Robert Grove เมื่อปี ค.ศ. 1839 โดยหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2-1 ซึ่งประกอบด้วยอิเล็กโทรด (Electrode) แห่อยู่ในอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เมื่อป้อนไฮโดรเจนที่อิเล็กโทรดด้านแอโนด (Anode) ทำให้เกิดการแยกตัวของอิเล็กตรอนและโปรตอน โดยที่ Electrolyte ยอมให้โปรตอนสามารถเคลื่อนที่เท่านั้น ส่วนอิเล็กตรอนจึงต้องเคลื่อนที่ผ่านตัวนำไฟฟ้าและไหลสลายนอก เมื่ออิเล็กตรอนและโปรตอนไปถึงอิเล็กโทรดด้านคาโทด (Cathode) ก็จะทำปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจนที่เป็นตัวออกซิไดซ์ โดยมีน้ำและความร้อนเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (By product) จากปฏิกิริยาเคมีดังกล่าว ซึ่งปฏิกิริยาเคมีทางด้านแอโนด คาโทด และปฏิกิริยาเคมีโดยรวมสามารถสรุปได้ดังนี้



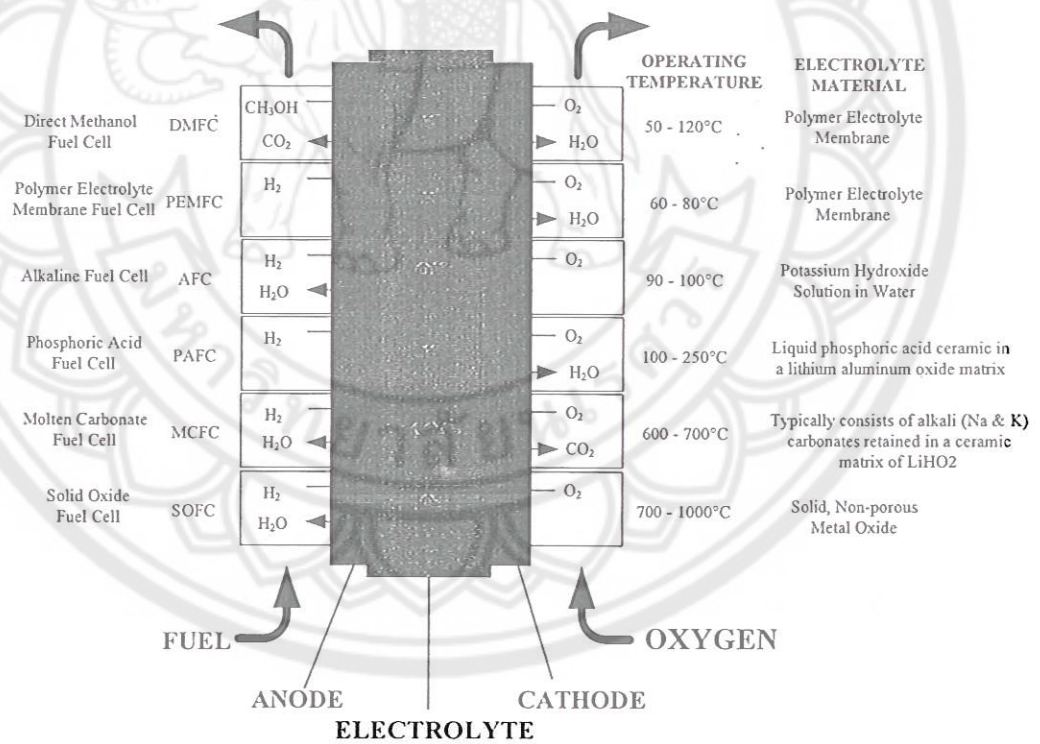
ปัจจุบันมีเซลล์เชื้อเพลิงหลากหลายชนิดซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของ Electrolyte หรือชนิดของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้า โดยสามารถสรุปได้ดังภาพที่ 2-2 ในบรรดาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานมากที่สุดซึ่งมีข้อดีจากคือ อุณหภูมิขณะใช้งานที่ต่ำประมาณ 60°C - 80°C ทำให้สามารถเริ่มต้นการทำงานได้จากอุณหภูมิห้องซึ่งง่ายต่อการใช้งาน โดยที่โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2-3 ซึ่งประกอบด้วย

- 1) อิเล็กโทรด (*Electrode*) ประกอบด้วยด้านแอนโอดและคาโทด (จุดที่ 3 และ 5 ในภาพที่ 2-3) ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (*Catalyst layer*) เพื่อแยกโปรตอนและอิเล็กตรอนของไฮโดรเจน โดยที่ส่วนใหญ่ทำมาจากแพลตตินัมซึ่งมีราคาแพงทำให้สร้างอิเล็กโทรดอยู่ในรูปแบบของอนุภาคเกาะระหว่าง *Electrolyte* และ *Gas diffusion layer* เพื่อลดปริมาณของแพลตตินัม โดยที่บริเวณที่มีการสัมผัสกันระหว่าง *Electrode*, *Electrolyte* และ *Gas diffusion layer* นี้เรียกว่า *Three-phase boundary*
- 2) *Electrolyte membrane* (จุดที่ 4 ในภาพที่ 2-3) ซึ่งทำจากวัสดุโพลีเมอร์ประเภท *Perfluorocarbon-sulfonic acid ionomer* เป็นตัวนำให้โปรตอนเคลื่อนที่ผ่านเพื่อไปรวมตัวกับออกซิเจนทางด้านคาโทด
- 3) *Gas diffusion layer* (จุดที่ 2 และ 6 ในภาพที่ 2-3) ทำจากผ้าหรือกระดาษคาร์บอนที่มีหน้าที่กระจายก๊าซให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งด้านแอนโอดและคาโทดและเป็นช่องทางให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่และเชื่อมต่อทางไฟฟ้ากับโพลดภายนอก
- 4) *Collector plate* (จุดที่ 2 และ 6 ในภาพที่ 2-3) เป็นตัวนำไฟฟ้าให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จาก *Catalyst layer* จากฝั่งแอนโอดไปยังฝั่งคาโทดผ่านทางโพลดทางไฟฟ้า และเป็นช่องทางสำหรับกระจายไฮโดรเจนและออกซิเจนไปยัง *Gas diffusion layer* ผ่านทาง *Flow field*

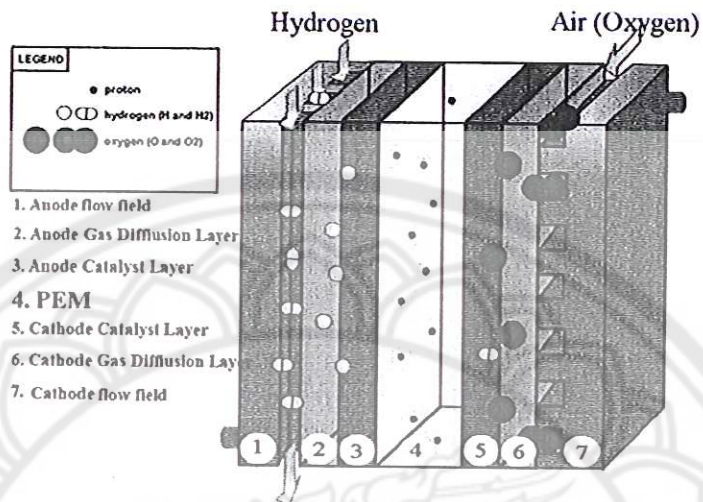
ในทางปฏิบัติเซลล์เชื้อเพลิงถูกต่ออนุกรมเข้าด้วยกันเข้าด้วยกันหลายๆ เซลล์ในรูปแบบของ Stack เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อการใช้งานดังภาพที่ 2-4 ทำให้ *Collector plate* ฝั่งแอนโอดและคาโทดของเซลล์ที่อยู่ด้านในของ Stack ถูกรวมกันเป็นชั้นเดียวกัน เรียกว่า *Bipolar plate* และ *Catalyst*, *Electrolyte membrane* และ *Gas diffusion layer* ถูกบีบอัดเพื่อประกอบเป็นชั้นเดียวกันซึ่งเรียกว่า *MEA (Membrane electrode assembly)*



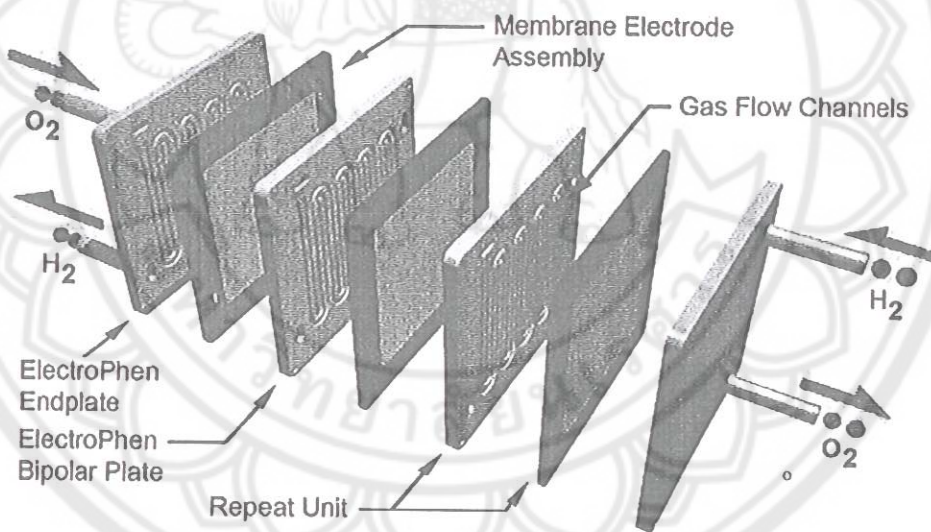
ภาพที่ 2-1 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [12]



ภาพที่ 2-2 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาเคมี อุณหภูมิใช้งาน และชนิด Electrolyte ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ



ภาพที่ 2-3 โครงสร้างภายในหนึ่งเซลล์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM [14]



ภาพที่ 2-4 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM เมื่อประกอบรวมกันเป็น Stack [15]

ภาพที่ 2-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง (Polarisation curve) ซึ่งแรงดันไฟฟ้าจะลดลงเมื่อมีกระแสไหลเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากความสูญเสียต่างๆ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

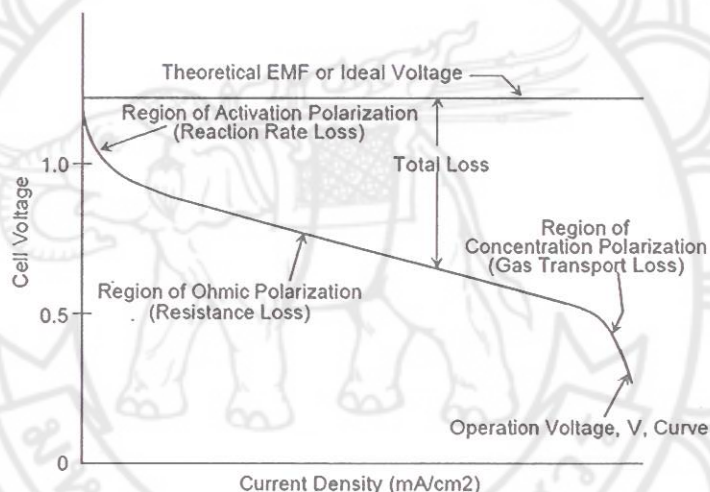
$$V_{cell} = E_0 - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{trans} \quad (2-4)$$

โดยที่ E_0 คือ *Reversible voltage* ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าตามทฤษฎี

ΔV_{act} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ลดลงจากผลของ *Activation loss*

ΔV_{ohm} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ลดลงจากผลของ *Ohmic loss*

ΔV_{trans} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ลดลงจากผลของ *Concentration* หรือ *Mass transportation loss*



ภาพที่ 2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสของเซลล์เชื้อเพลิง [1]

- แรงดันไฟฟ้า E_0 ซึ่งหาได้จากผลต่างของพลังงาน Gibbs free energy ($\Delta \bar{g}_f$) ระหว่างผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (น้ำ) และตัวทำปฏิกิริยา (ไฮโดรเจนและออกซิเจน) ได้ดังนี้

$$E_0 = \frac{-\Delta \bar{g}_f}{2F} \quad (2-5)$$

โดยที่ F คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ ซึ่ง $F = 96485 \text{ As} \cdot \text{mol}^{-1}$ และ 2 ใน (2-5) หมายถึงจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากไฮโดรเจน 1 mol โดยที่ Gibbs free energy นี้ มีค่าไม่คงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสถานะของน้ำ เช่น ที่อุณหภูมิ 25°C ความดันบรรยากาศ 1 atm น้ำมีสถานะเป็นของเหลวจะได้ $\Delta \bar{g}_f = -237.2 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ทำให้

$$E_0 = -(-237.2 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}) / (2 \times 96485 \text{ As} \cdot \text{mol}^{-1}) = 1.23 \text{ V} \quad (2-6)$$

ในทางปฏิบัติแล้วความดันของก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนไม่ได้ป้อนให้กับเซลล์เชื้อเพลิงที่ความดันบรรยากาศ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้า E_0 ใน (2-5) มีรวมผลของความดันแล้ว สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$E_0 = \frac{-\Delta g_f}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (2-7)$$

โดยที่ R เป็นค่าคงที่ของก๊าซ T เป็นอุณหภูมิ ส่วน P_{H_2} P_{O_2} และ P_{H_2O} เป็นความดันของไฮโดรเจน ออกซิเจน และน้ำตามลำดับ และเมื่อพิจารณาเฉพาะเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ซึ่งทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C สมการที่ (2-7) สามารถประมาณได้ดังนี้ โดยที่มีค่าผิดพลาดน้อยมาก

$$E_0 = 1.482 - 0.000845T + 0.0000431T \ln(P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}) \quad (2-8)$$

แรงดันไฟฟ้าที่ลดลงจาก Activation loss ซึ่งเกิดจากการใช้เวลาในเกิดปฏิกิริยาสำหรับถ่ายเทและรับอิเล็กตรอนที่อิเล็กโทรดทั้ง 2 ข้าง โดยที่ ΔV_{act} สามารถอธิบายได้โดยสมการของ Tafel ดังนี้

$$\Delta V_{act} = \frac{RT}{2\alpha F} \ln \left(\frac{i+i_0}{i_0} \right) \quad (2-9)$$

โดยที่ i คือ กระแสของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งนิยามกำหนดให้ในรูปของความหนาแน่นของกระแสต่อพื้นที่

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทประจุ (Charge transfer coefficient) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1.0 สำหรับอานอด 0.1 ถึง 0.5 สำหรับคาโทด

i_0 คือ Exchange current บ่งบอกถึงปริมาณที่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรด ซึ่งถ้ามีค่ามาก แสดงว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็ว

i_n คือ Internal current ซึ่งส่วนหนึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนบางส่วนเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนจาก
 อาโนดไปคาโทด และอีกส่วนหนึ่งจากปรากฏการณ์ Fuel crossover ที่เกิดจากมีโมเลกุลของ
 ไฮโดรเจนจำนวนน้อยเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไปยังคาโทดโดยที่ไม่มีการทำปฏิกิริยาที่อาโนด

สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงจาก Ohmic loss ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเป็นตัวนำให้
 โปรตอนเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน ซึ่งขึ้นกับปริมาณโมเลกุลของน้ำภายในตัว Polymer electrolyte
 ดังนั้นการจัดการน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงจึงมีความสำคัญเพื่อไม่ให้เมมเบรนแห้งจนเกินไปจนโปรตอน
 เคลื่อนที่ลำบาก และไม่เปียกจนเกินไปจนทำให้ปิดกั้นการทำปฏิกิริยาที่อิเล็กโทรดทั้ง 2 ข้าง
 นอกจากนี้ Ohmic loss ยังรวมถึงความเป็นตัวนำไฟฟ้าให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านของ Gas
 diffusion layer, Bipolar plate, Collector plate และขั้วต่อไฟฟ้าสำหรับไหลภายนอกอีกด้วย ซึ่ง
 ปรากฏการณ์ Ohmic loss ทั้งหมดนี้สามารถเขียนรวมกันได้ดังนี้

$$\Delta V_{ohmic} = i \cdot r \quad (2-10)$$

สำหรับ Mass transportation loss เกิดขึ้นเมื่อมีโหลดค่าสูงๆ ซึ่งไฮโดรเจนและออกซิเจน
 ถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการลดลงของความดันของก๊าซทั้งสองชนิด
 เนื่องจากการบริโภคเชื้อเพลิงของเซลล์เองและมาจากโครงสร้างของระบบจ่ายก๊าซเอง โดยที่
 ΔV_{trans} สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\Delta V_{trans} = \frac{RT}{2F} \ln \left(1 - \frac{i}{i_1} \right) \quad (2-11)$$

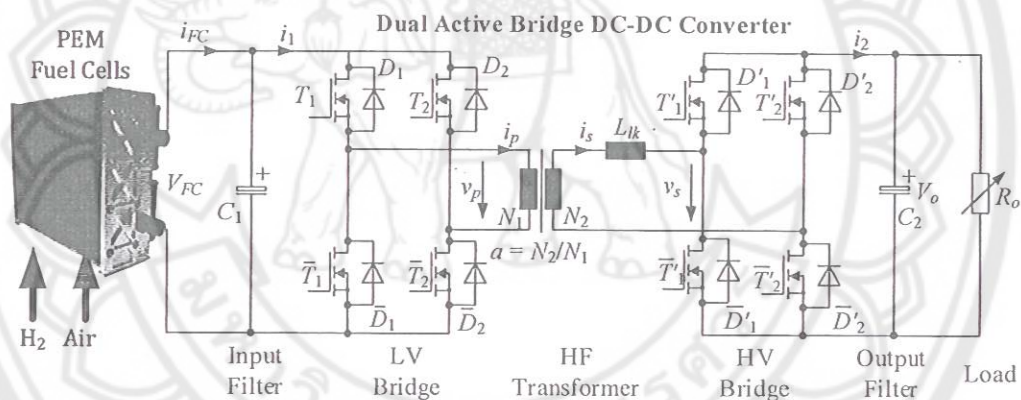
โดยที่ i_1 คือ Limiting current ซึ่งเป็นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงสูงสุดที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิง
 เท่าที่ระบบจะจ่ายได้

จากสมการที่ (2-4) ถึง (2-11) จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงขณะที่ไม่มีโหลด
 $V_{cell,oc}$ ($i = 0$) มียังคงมีค่าต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีเนื่องจาก i_0 และ i_n ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$V_{cell,oc} = E_0 - \frac{RT}{2\alpha F} \ln \left(\frac{i_n}{i_0} \right) \quad (2-12)$$

2.2 วงจรแปลงผันกระแสตรงแบบ Dual Active Bridge [16]

ภาพที่ 2-6 แสดงวงจร Dual Active Bridge (DAB) ที่ต่อร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญของวงจร DAB คือ วงจรแปลงผันสองทิศทาง AC/DC ซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่สูงให้กับขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง และวงจรแปลงผันสองทิศทาง AC/DC ทางด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่สูงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านเอาต์พุตเพื่อจ่ายให้โหลดต่อไป โดยมีตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ทำหน้าที่กรองกระแสด้านอินพุตและเอาต์พุตให้ราบเรียบ ดังนั้นอัตราขยายแรงดันสามารถกำหนดได้จากอัตราส่วนระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า



ภาพที่ 2-6 วงจรแปลงผันกระแสตรงแบบ Dual Active Bridge

วงจร DAB ในภาพที่ 2-6 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังภาพที่ 2-7 โดยที่มอสเฟตที่ต่อขนานกับไดโอดสามารถเทียบเคียงได้กับสวิตช์สองทิศทาง ค่า Magnetising inductance ของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าสูงมาก ทำให้วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้าเทียบเคียงได้กับเหนี่ยวนำจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage inductance) L_{lk} และเมื่อเทียบเคียงวงจรทางด้านเอาต์พุตซึ่งต่ออยู่กับขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงให้อยู่ทางด้านขดลวดปฐมภูมิ ดังนั้นตัวแปรทางทางเอาต์พุตจึงสามารถเขียนได้ดังนี้

$$v'_s = \frac{v_s}{a} \quad (2-13)$$

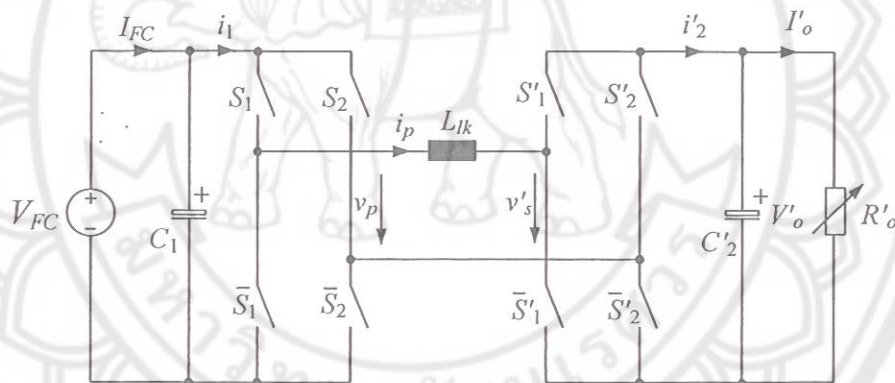
$$V'_o = \frac{V_o}{a} \quad (2-14)$$

$$I'_o = aI_o \quad (2-15)$$

$$R'_o = \frac{R_o}{a^2} \quad (2-16)$$

โดยที่ $a = N_2/N_1$ คือ อัตราส่วนระหว่างขดลวดทุติยภูมิและปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง และ อัตราการขยายแรงดันเทียบเคียงจึงสามารถเขียนได้ดังนี้

$$d = \frac{v'_o}{V_{FC}} \quad (2-17)$$



ภาพที่ 2-7 วงจรสมมูลของวงจร DAB เมื่ออ้างอิงทางด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

สวิตช์กำลังในวงจรบริดจ์ทั้งสองวงจรถูกควบคุมเพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยม v_p และ v'_s โดยที่ v'_s ซ้ำกว่า v_p เป็นมุม ϕ ดังภาพที่ 2-8 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจร DAB เมื่อ $d = 1$ ซึ่งเมื่อสังเกตในช่วงมุม $\theta = 0$ ถึง $\theta = \phi$ และช่วงมุม $\theta = \pi$ ถึง $\theta = \pi + \phi$ เป็นช่วงที่กระแสมีการเปลี่ยนทิศทางและกระแสในมอสเฟตแต่ละตัวจะไม่ไหลทันทีหลังจากที่ถูกสั่งให้ทำงานแล้ว โดยที่ $\theta = \omega_s t = 2\pi f_s t$ และ f_s เป็นความถี่ในการสวิตช์ (Switching frequency) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นปรากฏการณ์สวิตช์ตอนที่แรงตกคร่อมมอสเฟตมีค่าเป็นศูนย์ (Zero

Voltage Switching: ZVS) ทำให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำ กำลังไฟฟ้าที่ถูกถ่ายโอนจากด้านอินพุตไปยังโหลดทั้งด้านเอาต์พุตสามารถหาได้จาก

$$P_{in} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_p(\theta) \cdot i_p(\theta) d\theta \quad (2-18)$$

และเมื่อพิจารณาจากรูปคลื่นในภาพที่ 2-8 กำลังไฟฟ้า P_{in} สามารถหาได้จาก

$$P_{in} = \frac{1}{\pi} V_{FC} \int_0^{\pi} i_p(\theta) d\theta \quad (2-19)$$

โดยที่ $i_p(\theta)$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$i_p(\theta) = \begin{cases} \frac{(V_{FC} + V'_o)}{\omega_s L_{lk}} \theta + i_p(0) & \text{for } 0 \leq \theta < \phi \\ \frac{(V_{FC} - V'_o)}{\omega_s L_{lk}} (\theta - \phi) + i_p(\phi) & \text{for } \phi \leq \theta < \pi \end{cases} \quad (2-20)$$

เนื่องจากรูปคลื่นกระแส $i_p(\theta)$ มีความสมมาตร ดังนั้นจึงสามารถแทนค่า $i_p(\phi) = -i_p(0)$ ลงในสมการที่ (2-20) ทำให้สามารถหาค่า $i_p(0)$ และ $i_p(\phi)$ ได้ดังนี้

$$i_p(0) = -\frac{V_{FC}}{\omega_s L_{lk}} \left[d\phi + \frac{\pi(1-d)}{2} \right] \quad (2-21)$$

$$i_p(\phi) = \frac{V_{FC}}{\omega_s L_{lk}} \left[\phi - \frac{\pi(1-d)}{2} \right] \quad (2-22)$$

จากสมการที่ (2-20) ถึง (2-22) ทำให้สามารถหาค่าของกำลังไฟฟ้า P_{in} ในสมการที่ (2-19) ได้ดังนี้

$$P_{in} = \frac{V_{FC}^2 d}{\omega_s L_{lk}} \phi \left[1 - \frac{\phi}{\pi} \right] \quad (2-23)$$

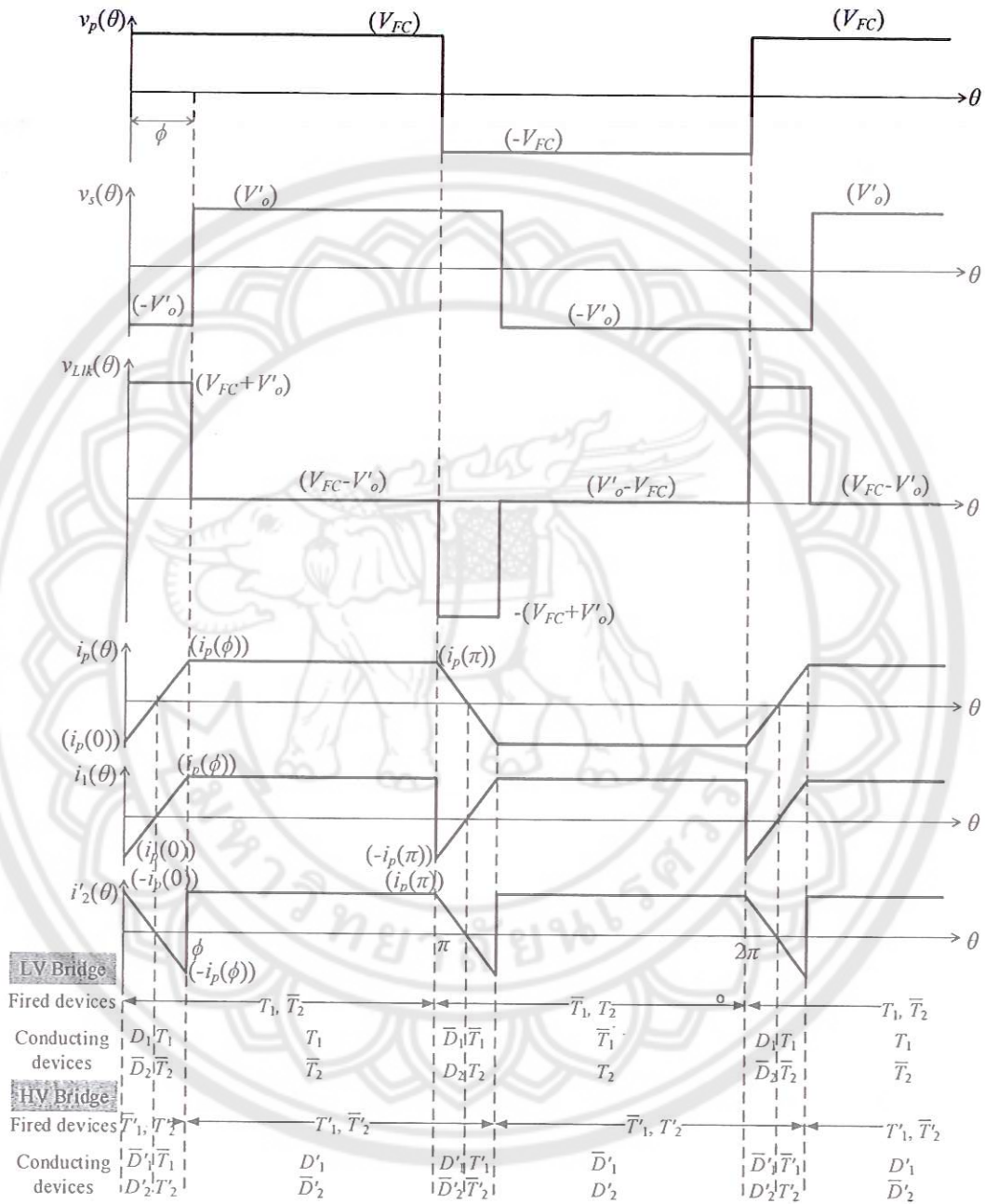
ซึ่งเมื่อพิจารณาสมการที่ (2-23) ทำให้สามารถสรุปคุณลักษณะของวงจร DAB ได้ดังนี้

- กำลังไฟฟ้าสามารถไหลได้สองทิศทางขึ้นอยู่กับค่ามุม ϕ โดยที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่มุม $\phi = \pm\pi/2$
- สามารถทำงานให้อยู่ในโหมดลดและขยายแรงดันไฟฟ้าได้ขึ้นอยู่กับค่า d

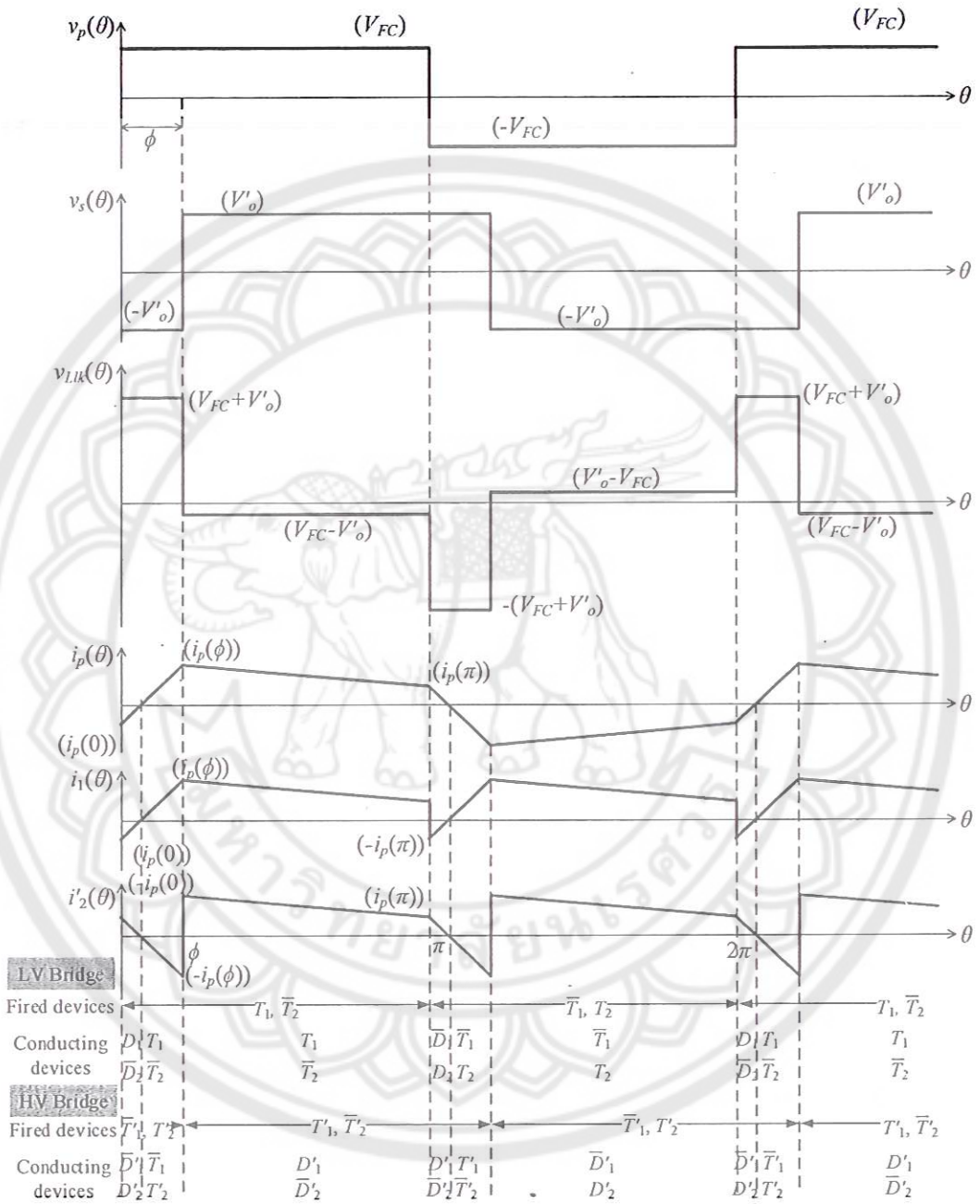
- กำลังไฟฟ้าสูงสุดของวงจรมีขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล L_{lk} โดยสามารถต่อตัวเหนี่ยวนำภายนอกเพิ่มเติมเพื่อจำกัดขนาดของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องการ
- เมื่อความถี่สวิตช์สูงขึ้นทำให้สามารถลดขนาดของ L_{lk} ลงได้ หรืออีกนัยยะหนึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงมีขนาดที่เล็กลง

จากภาพที่ 2-8 สังเกตได้ว่าเมื่อลดมุมต่างเฟส ϕ มีค่าลดลง หรือเมื่อแรงดันไฟฟ้าทางดำนเอาท์พุทสูงกว่าดำนอินพุท ($d > 1$) ดังภาพที่ 2-9 ทำให้ $i_p(0)$ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ส่งผลให้กระแสในมอสเฟตของวงจรถัดจำนอินพุทไหลขณะที่มีเริ่มสั่งงาน (Hard switching) ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้สูญเสียในตัวมอสเฟตสูงขึ้น ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) สำหรับการท้งานแบบ ZVS สำหรับวงจรถัดจำนอินพุทคือ $i_p(0) = 0$ ในทำนองเดียวกันเมื่อแรงดันไฟฟ้าทางดำนอินพุทสูงกว่าดำนเอาท์พุท ($d < 1$) ดังภาพที่ 2-10 เป็นเหตุให้ $i_p(\phi) = 0$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขขอบเขตที่ทำให้วงจรถัดจำนเอาท์พุทท้งานเป็นวงจรรีจกกระแส

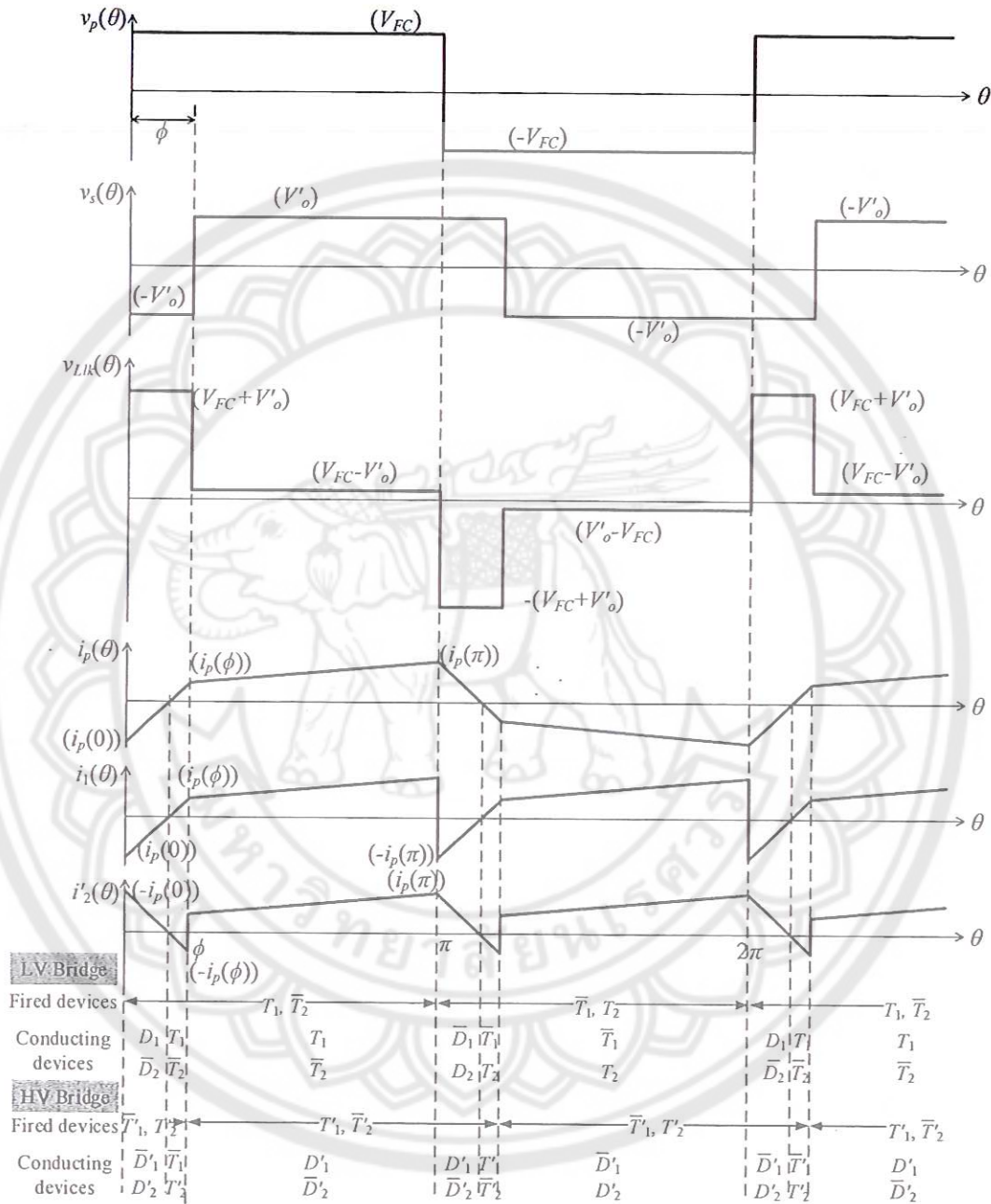
ภาพที่ 2-11 แสดงกำลังไฟฟ้ของวงจรถัด DAB เมื่อถูกทำให้อยู่ในรูป Per unit ด้วยค่า $V_{FC}^2/\omega_s L_{lk}$ เปรียบเทียบกับเงื่อนไขขอบเขต $i_p(0) = 0$ และ $i_p(\phi) = 0$ สำหรับการสวิตช์แบบ ZVS ซึ่งเห็นได้ว่าถ้า $d = 1$ การท้งานของวงจรถัด DAB อยู่ในเงื่อนไขขอบเขตทั้งสองทุกค่ามุมต่างเฟส แต่อย่างไรก็ตามสถานการณ์นี้ไม่สารถเกิดขึ้นในทางปฏิบัติ เพราะโดยส่วนใหญ่แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน เช่น เซลล์เชื้อเพลิง เป็นแบบที่ไม่มีการควบคุม (Unregulated) ดังนั้นการเลือกจำนวนรอบของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงมีความสำคัญเพื่อให้งจรถัด DAB ท้งานแบบ ZVS ทุกช่วงโหลด



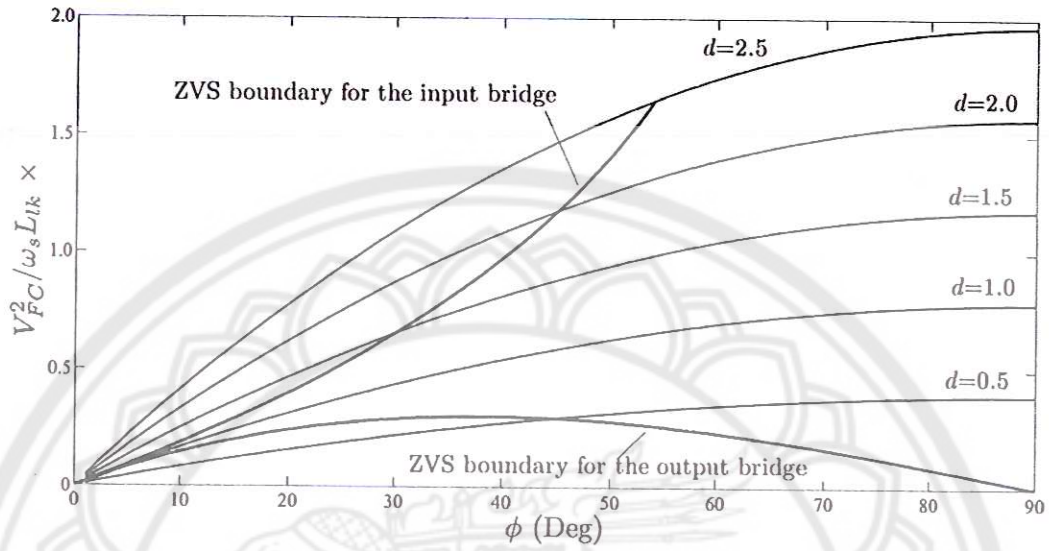
ภาพที่ 2-8 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจร DAB เมื่อ $d = 1$



ภาพที่ 2-9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจร DAB เมื่อ $d > 1$



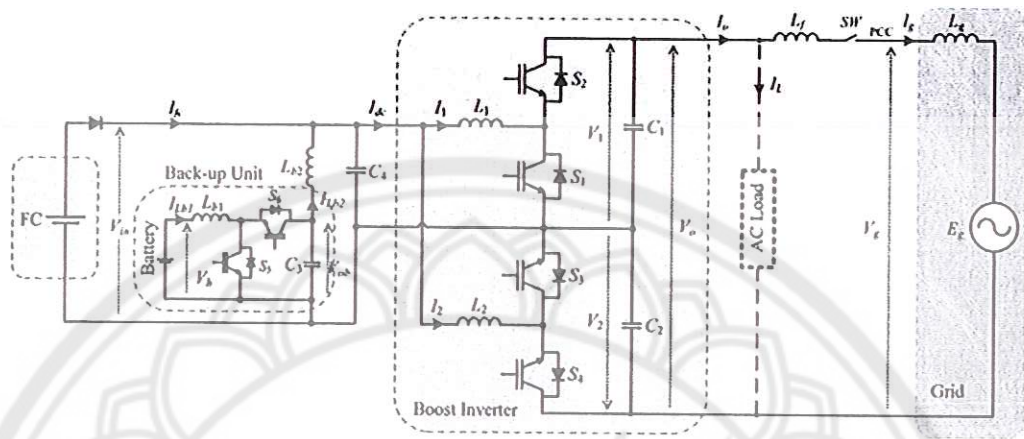
ภาพที่ 2-10 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจร DAB เมื่อ $d < 1$



ภาพที่ 2-11 กำลังไฟฟ้าของวงจร DAB และเงื่อนไขขอบเขตการสวิตช์แบบ ZVS

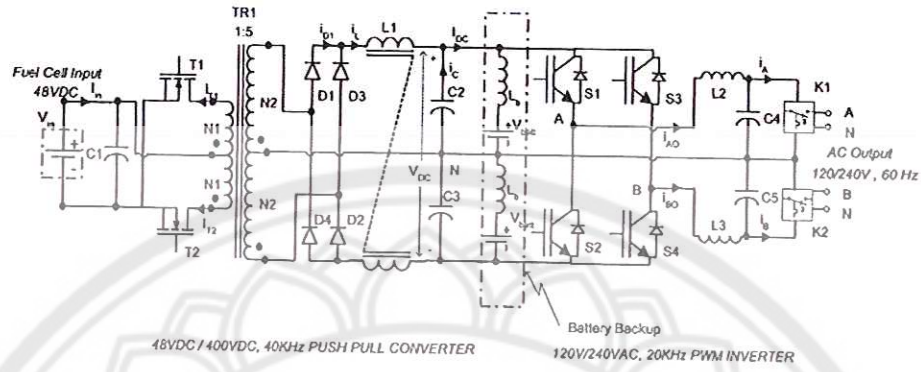
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Minsoo Jang และคณะ [17] ได้เสนอวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบูสต์ (Boost inverter) ดังภาพที่ 2-12 สำหรับผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1 kW ที่มีแรงดันไฟฟ้าในย่าน 39-69 V โดยสามารถแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส 220 V, 50 Hz ข้อดีของวงจรนี้คือ เป็นการแปลงผันจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นกระแสสลับโดยตรงเพียงขั้นตอนเดียว (Single stage) และมีวงจรที่ง่ายไม่ซับซ้อน แต่อย่างไรก็ตามวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบูสต์ไม่มีการแยกกราวด์ระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงและแรงดันกระแสสลับที่ผลิตได้ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดอันตรายต่อตัวเซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากกระแสรั่วไหลผ่านทางตัวเก็บประจุแฝง



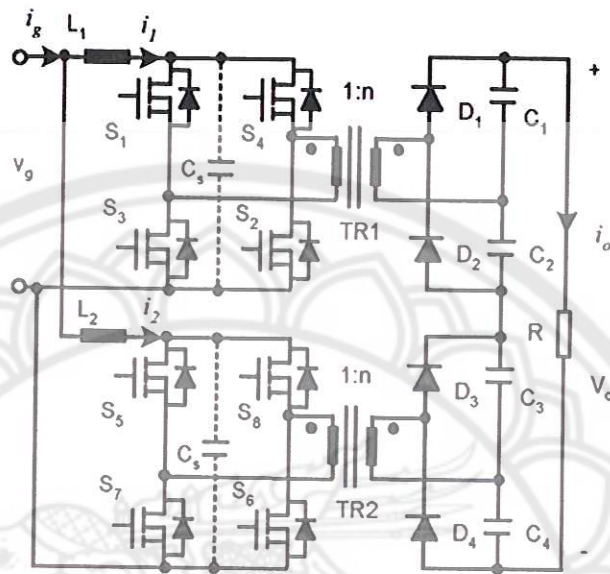
ภาพที่ 2-12 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบบูสต์สำหรับผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง [17]

R. Gopinath และคณะ [18] ได้เสนออินเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้วงจรแปลงผันกระแสตรงแบบ Push pull ต่อร่วมกับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Half bridge 2 ชุด ดังภาพที่ 2-13 เพื่อผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 2 ระดับ ซึ่งระบบนี้มีโครงสร้างที่ง่ายและไม่ซับซ้อน และยังมีกรแยกกราวด์ระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงและแรงดันกระแสสลับเอาต์พุต แต่เนื่องจากด้านอินพุตของวงจร Push pull converter เป็นแบบป้อนแรงดัน (Voltage fed converter) ทำให้ต้องใช้ตัวเก็บประจุต่อคร่อมเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อลดการกระเพื่อมในกระแสของเซลล์เชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังลำบากในการรักษาระดับของความเข้มสนามแม่เหล็กในหม้อแปลงความถี่สูงให้สมดุล เนื่องจากแกนเหล็กถูกกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กด้านบวกและลบด้วยขดลวดคนละขดลวด [19]



ภาพที่ 2-13 อินเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ Push pull converter และ Half bridge inverter [18]

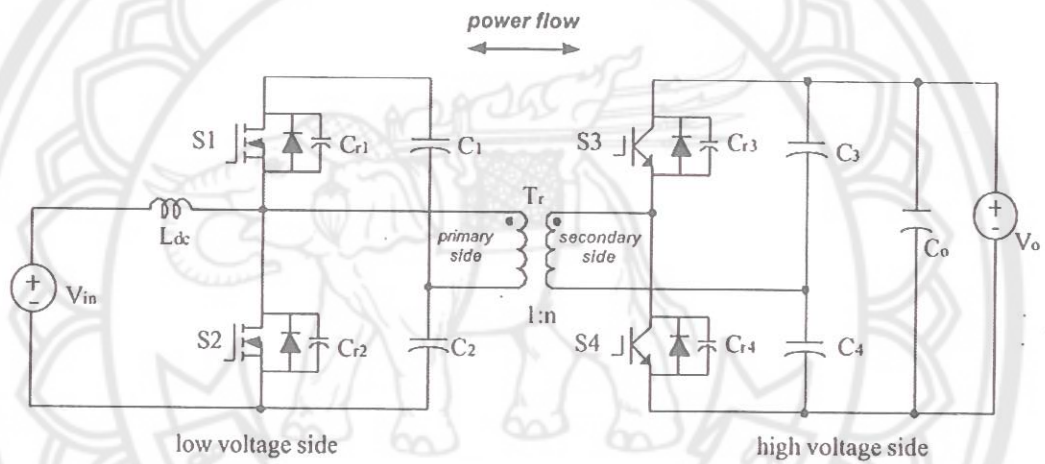
Xin Kong และ Ashwin M. Khambadkone [19] ได้นำเอาวงจร Interleaved Current-Fed Full Bridge Converter เพื่อใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงดังภาพที่ 2-14 ซึ่งใช้หม้อแปลงความถี่สูงสำหรับแยกกราวด์ระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงและวงจรด้านเอาต์พุต และสำหรับเพิ่มอัตราขยายแรงดัน นอกจากนี้ยังมีการควบคุมการเชื่อมต่อกระแสของวงจรแต่ละชุดทำให้กระแสของเซลล์เชื้อเพลิงมีการกระเพื่อมที่ต่ำ ซึ่งวงจรดังกล่าวมีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ 12 เท่า และมีพิกัดกำลังสูงสุด 1,200 W การไหลของกำลังไฟฟ้าของวงจรเป็นแบบทิศทางเดียวจากเซลล์เชื้อเพลิงไปสู่โหลด วงจรนี้ประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 91 %



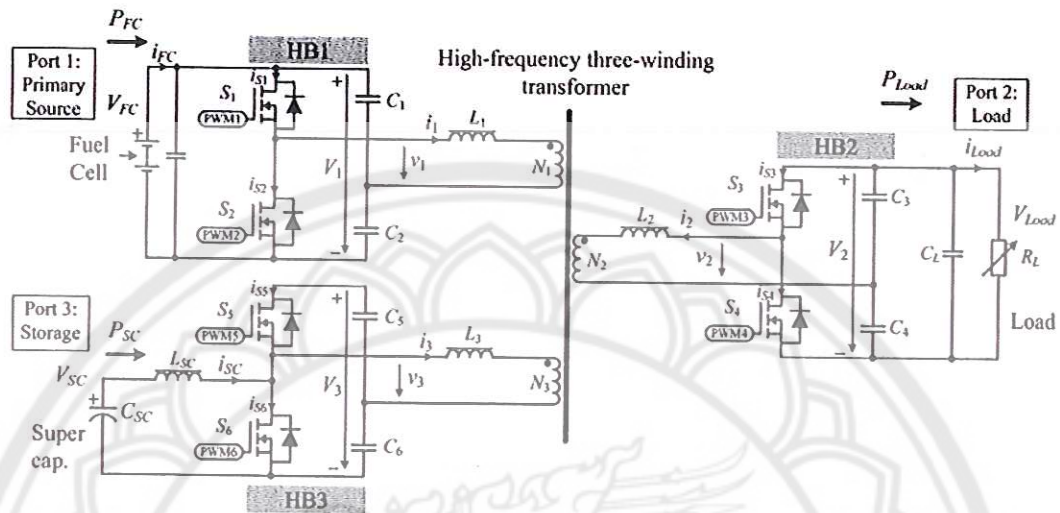
ภาพที่ 2-14 วงจรแปลงผันกระแสตรงแบบ Interleaved Current-Fed Full Bridge Converter [19]

F. Z. Peng และคณะ [20] ได้เสนอวงจรแปลงผันกระแสตรงที่มีการแยกกราวด์ดังภาพที่ 2-15 สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงและแบตเตอรี่ ที่มีวงจรแบบ Half bridge ต่ออยู่กลับเซลล์เชื้อเพลิงหรือแบตเตอรี่ด้านแรงดันต่ำเพื่อขยายแรงดันให้สูงขึ้นและสร้างแรงดันกระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงในเวลาเดียวกัน และมีวงจร Half bridge อีกวงจรหนึ่งต่ออยู่กับขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงเพื่อแปลงแรงดันกระแสสลับให้เป็นกระแสตรง วงจรนี้มีทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ามี 2 ทิศทาง ซึ่งสามารถควบคุมได้จากมุมต่างเฟสระหว่างแรงดันที่ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง วงจรนี้เหมาะกับเซลล์เชื้อเพลิงเพราะเป็นแบบป้อนกระแส (Current fed) ทำให้มีกระแสกระเพื่อมที่ต่ำ นอกจากนั้นวงจรนี้ยังมีการทำงานแบบสวิตช์ที่แรงดันเป็นศูนย์ (Zero Voltage Switching: ZVS) ทำให้มีประสิทธิภาพสูงเกิน 92 % วงจรนี้สามารถดัดแปลงโดยใช้วงจรแบบ Full bridge เพื่อควบคุมคาบเวลาทำให้สามารถใช้งานในย่านแรงดันที่กว้างขึ้นอีกด้วย [21] โดยที่วงจรประเภทนี้เรียกว่า Dual active bridge DC-DC converter

วงจร Dual active bridge ในภาพที่ 2-16 เมื่อเพิ่มขดลวดดัดดัดยภูมิให้กับหม้อแปลงความถี่สูงทำให้สามารถต่อใช้ร่วมกับอุปกรณ์สะสมพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ หรือ ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ดังภาพที่ 2-16 [22] วงจรแบบ Half bridge ในรูปสามารถใช้วงจรแบบ Full bridge ทดแทนได้ [23] ซึ่งวงจรตระกูลนี้เรียกว่าวงจรแปลงผันกระแสตรงแบบหลายพอร์ต (Multi-port DC-DC converter) เหมาะสำหรับแหล่งจ่ายพลังงานหลายแหล่งที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน เช่น แหล่งจ่ายไฟโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับซูเปอร์คาปาซิเตอร์สำหรับผลิตไฟฟ้ากระแสสลับ [24]



ภาพที่ 2-15 วงจรแปลงผันกระแสตรงแบบ Dual active bridge [20]



ภาพที่ 2-16 วงจร Half-bridge three-port DC-DC converter [22]

สำหรับการจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นงานวิจัยที่ผ่านได้นำเสนอทั้งแบบจำลองแบบสถิตย์ (Static model) และแบบจำลองแบบพลวัต (Dynamic model) โดยที่ Saadi และคณะ [25] ได้เปรียบเทียบแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบสถิตย์ของ Amphlett และคณะ [26] แบบจำลองของ Larminie-Dicks [12] และแบบจำลองของ Chamberline-Kim [27] ซึ่งพบว่าแบบจำลองของ Amphlett มีความซับซ้อนเพราะพิจารณาอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นตัวแปรหนึ่งของแบบจำลอง จึงให้ความถูกต้องที่ค่อนข้างสูง แต่แบบจำลองของ Larminie-Dicks และแบบจำลองของ Chamberline-Kim พิจารณาว่าเซลล์เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิคงที่ที่ค่าใช้งาน ทำให้แบบจำลองทั้งสองมีตัวแปรเป็นเพียงกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงเพียงตัวเดียว แบบจำลองของ Larminie-Dicks มีค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 7 ตัว ทำให้ค่าความถูกต้องที่ดีเพราะคำนึงถึงกระแส Exchange current i_0 , Internal current i_n และ Limiting current i_1 แบบจำลองนี้นิยมประยุกต์ใช้ในรถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า สำหรับแบบจำลองของ Chamberline-Kim มีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อนเพราะมีค่าพารามิเตอร์เพียง 5 ตัว แต่ถ้าหากเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้ว แบบจำลองนี้มีค่าผิดพลาดไม่เกิน 1.4 % ซึ่งยังคงเพียงพอต่อการประยุกต์ใช้งานออกแบบระบบควบคุมของเซลล์เชื้อเพลิง

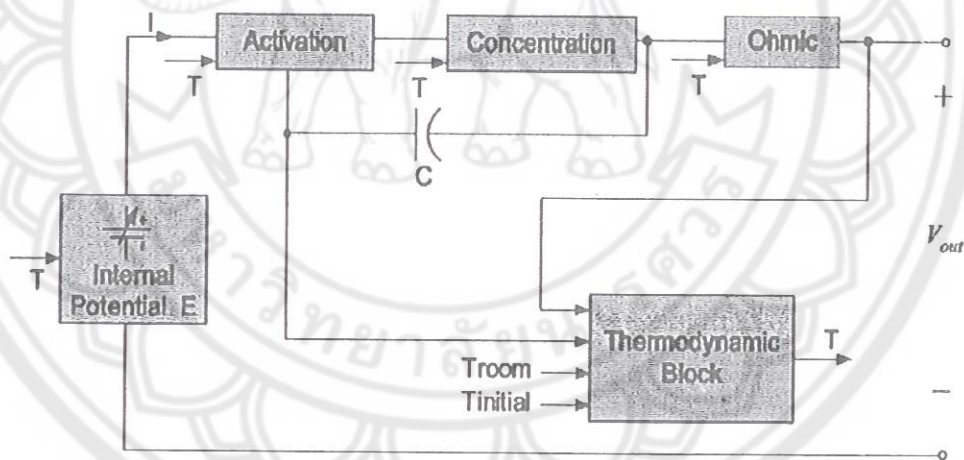
TK
๒๙๓๓
.P๙๖
๗/๑๓/๑๕
๒๕๕๗



สำนักหอสมุด
27 ส.ย. 2559

1๖๙๙๓๕๗๖

Caisheng Wang และคณะ [28] ได้เสนอแบบจำลองพลวัตของเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้หลักการของวงจรไฟฟ้า ซึ่งแบบจำลองพิจารณาว่าแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงเนื่องจาก Activation loss, Ohmic loss และ Concentration loss เปรียบเสมือนค่าความต้านทานในวงจรไฟฟ้า ซึ่งค่าความต้านทานเหล่านี้แปรผันตามอุณหภูมิ ซึ่งได้มาจากแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ดังภาพที่ 2-17 นอกจากนี้แบบจำลองนี้ยังพิจารณาถึงการซึมผ่านของก๊าซ (Gas diffusion) ที่อิเล็กโทรดทั้งสองข้างโดยใช้สมการของ Stefan-Maxwell และปรากฏการณ์ของ Double layer charging ก็ถูกพิจารณาด้วยเช่นเดียวกัน แบบจำลองดังกล่าวถูกสร้างขึ้นบนโปรแกรม MATLAB/Simulink และโปรแกรม PSPICE ซึ่งพบว่าผลการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองเมื่อโหลดของเซลล์เชื้อเพลิงมีการเปลี่ยนแปลงในระยะเวลาที่ไม่ยาวนานมาก แต่เมื่อจำลองการทำงานในระยะเวลาที่นานขึ้นพบว่าในสภาวะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงผลการจำลองมีความผิดพลาดอยู่บ้าง แต่เมื่อพิจารณาในสภาวะคงตัวแล้วแบบจำลองนี้ให้ผลลัพธ์ที่ดี



ภาพที่ 2-17 ไดอะแกรมแบบจำลองพลวัตของเซลล์เชื้อเพลิงของ Caisheng Wang และคณะ [28]

บทที่ 3

การจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงและวงจรแปลงผันกระแสตรง

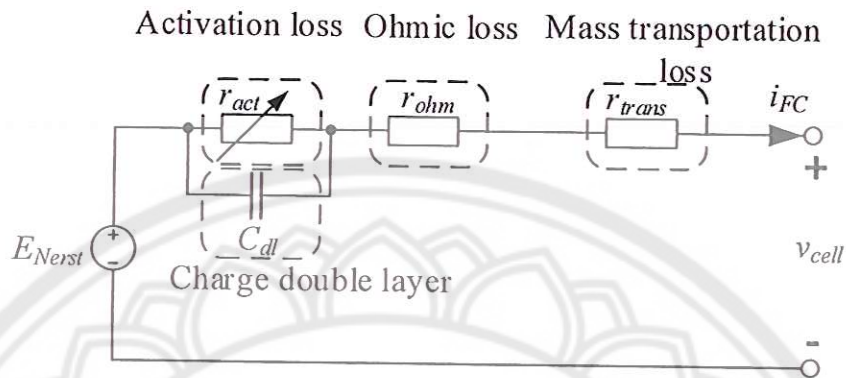
3.1 การจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

ผู้วิจัยได้ดัดแปลงแบบจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพลวัตของ Caisheng Wang และคณะ [28] ซึ่งครอบคลุมปรากฏการณ์ทั้งหมดของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งประกอบด้วย ปฏิกริยาทางเคมีไฟฟ้าที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองข้าง การไหลของก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน และอุณหพลศาสตร์ของ Stack เนื่องจากระบบควบคุมของเซลล์เชื้อเพลิงรุ่น H-1000 เป็นระบบที่ง่าย และงานวิจัยนี้ต้องการจำลองเพียงพฤติกรรมการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่จ่ายให้วงจรแปลงผันกระแสตรง ดังนั้นวงจรสมมูลของเซลล์เชื้อเพลิงในแต่ละเซลล์จึงเทียบเคียงได้ดังภาพที่ 3-1 ซึ่งมีสมมติฐานดังนี้

- 1) แบบจำลองเป็นแบบหนึ่งมิติ
- 2) อุณหภูมิของ Stack มีค่าคงที่
- 3) อุณหภูมิในแต่ละเซลล์มีค่าใกล้เคียงกันมาก
- 4) การกระจายของก๊าซที่จ่ายให้แต่ละเซลล์มีความสม่ำเสมอ
- 5) แรงดันของก๊าซมีค่าคงที่
- 6) ปริมาณของน้ำในเมมเบรนอยู่ในสภาวะสมดุล
- 7) พารามิเตอร์ของ Stack คำนวณจากผลรวมของพารามิเตอร์ในแต่ละเซลล์

จากภาพที่ 3-1 แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ V_{cell} มีค่าลดลงเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นเนื่องจาก Activation loss, Ohmic loss และ Mass transportation loss ดังนี้

$$v_{cell} = E_0 - \Delta v_{act} - \Delta v_{ohm} - \Delta v_{trans} \quad (3-1)$$



ภาพที่ 3-1 วงจรสมมูลของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์

โดยที่ E_0 ณ อุณหภูมิ และความดันของก๊าซที่ต่างจากความดันบรรยากาศ สามารถใช้สมการของ Nernst ในสมการที่ (2-8) จากข้อมูลของเซลล์เชื้อเพลิงรุ่น H-1000 มีอุณหภูมิขณะใช้งานที่ 65°C ($T = 338.15\text{ K}$) และแรงดันก๊าซของไฮโดรเจน 0.5 Bar หรือ $P_{H_2} = 1.494\text{ atm}$ และทางฝั่งคาโทดเป็นแบบเปิด (Open cathode) มีอากาศเป็นตัวออกซิแดนซ์ซึ่งความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ($P_{O_2} = 0.21\text{ atm}$) ดังนั้น $E_0 = 1.19\text{ V}$

สำหรับ Mass transportation loss Δv_{trans} ได้เลือกใช้สมการที่แตกต่างจากสมการที่ (2-11) โดยใช้สมการที่นำเสนอใน [27, 29] ซึ่งให้ผลที่ดีดังนี้

$$\Delta v_{trans} = m e^{n i_{FC}} \quad (3-2)$$

ส่วน Ohmic loss ในสมการการที่ (2-10) นั้น อยู่ในรูปของความหนาแน่นกระแส และความต้านทาน×พื้นที่หน้าตัดของแต่ละเซลล์ สำหรับ Ohmic loss ในรูปของความต้านทานในแต่ละเซลล์ จึงเขียนได้ดังนี้

$$\Delta v_{ohm} = r_{cell} i_{FC} \quad (3-3)$$

สำหรับ Activation loss นั้น มีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ ค่าในสภาวะคงตัวและในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากประจุที่ฝังตัวอยู่ในบริเวณรอยต่อระหว่างเมมเบรนกับอิเล็กโทรไลต์

Activation loss ในสภาวะคงตัวสามารถใช้สมการที่ (2-9) แต่เปลี่ยนพารามิเตอร์ I_0 และ I_n ซึ่งเป็นกระแสแทนที่ i_0 และ i_n ซึ่งเป็นความหนาแน่นของกระแส และเมื่อพิจารณาว่าอุณหภูมิคงที่แล้ว $RT/2\alpha F$ สามารถลดรูปให้อยู่ในรูปสัมประสิทธิ์ A ซึ่งเรียกว่า Tafel slope ดังนี้

$$\Delta V_{act} = A \ln \left(\frac{i_{FC} + I_n}{I_0} \right) \quad (3-3)$$

ดังนั้น Activation loss ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงจึงมีค่าสู่เข้าสมการที่ (3-3) ด้วยสมการที่อธิบายด้วยวงจรสมมูลในภาพที่ 3-1 ได้ดังนี้

$$\frac{d\Delta v_{act}}{dt} = \frac{1}{C_{dl}} \left(i_{FC} - \frac{\Delta V_{act}}{r_{act}(i_{FC})} \right) \quad (3-4)$$

โดยที่ C_{dl} คือ ค่าประจุที่บริเวณรอยต่อระหว่างเมมเบรนกับอิเล็กโทรไลต์ ส่วน r_{act} เป็นค่าความต้านทานสมมูลของ Activation loss ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$r_{act} = \frac{\Delta V_{act}}{i_{FC} + i_n} \quad (3-5)$$

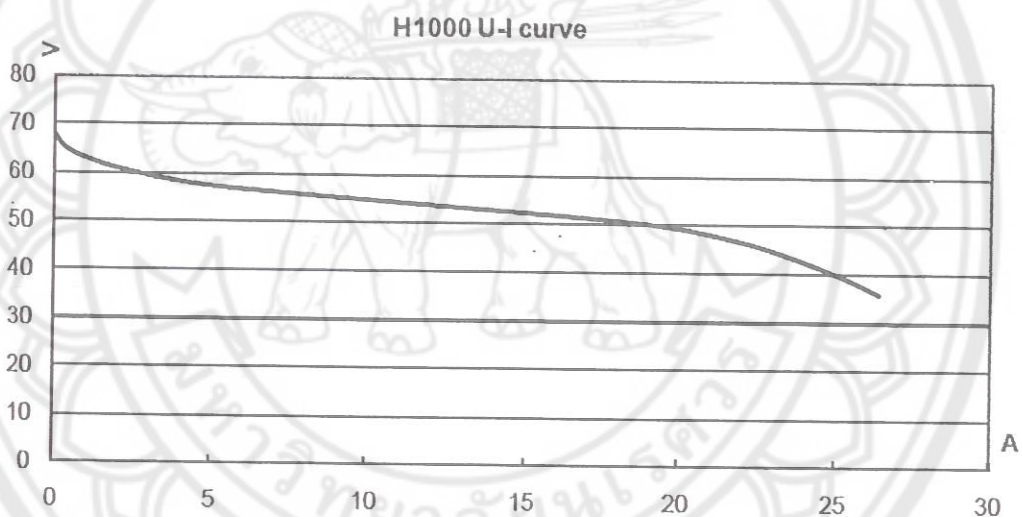
หลังจากที่จำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในแต่ละเซลล์แล้ว ซึ่งอยู่ภายใต้สมมุติฐานที่ว่า อุณหภูมิ และแรงดันของไฮโดรเจน และออกซิเจนในทุกเซลล์มีค่าเท่ากัน ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงได้ดังนี้

$$v_{FC} = N \cdot v_{cell} \quad (3-6)$$

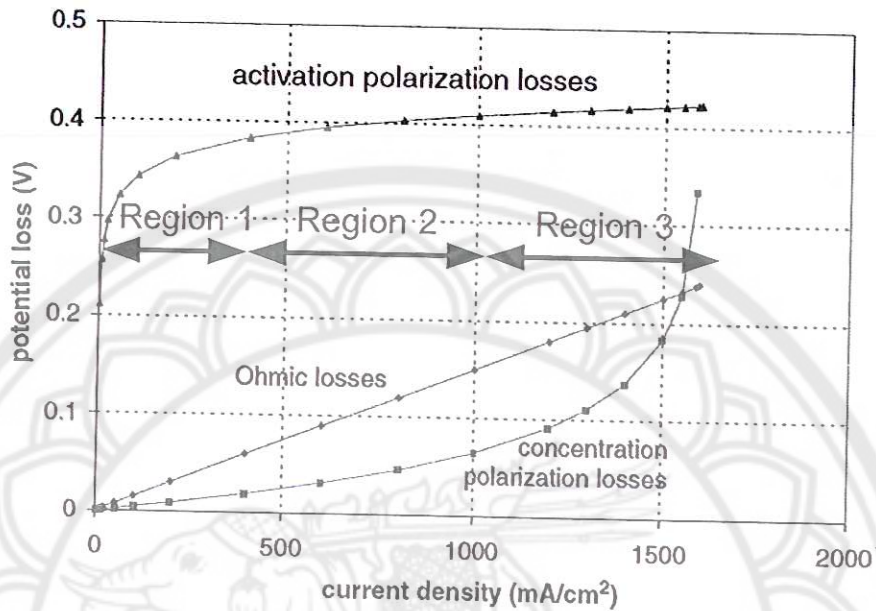
- โดยที่ N คือ จำนวนเซลล์ของเซลล์เชื้อเพลิง สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงรุ่น H-1000 $N = 72$

การทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบงอกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทดสอบการทำงานในสภาวะคงตัวโดยปรับกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงให้เพิ่มขึ้นด้วยโหลดอิเล็กทรอนิกส์จนมีค่าเสถียรแล้วจึงบันทึกค่ากระแสและแรงดัน ส่วนในการทดสอบในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้นใช้โหลดอิเล็กทรอนิกส์ดึงกระแสจากเซลล์เชื้อเพลิงอย่างทันทีทันใด (Current interruption technique) แล้วใช้ออสซิลโลสโคปบันทึกค่ากระแสและแรงดันหลังจากนั้นจึงคำนวณหาค่า C_{dl}

จากการทดสอบเบื้องต้นของเซลล์เชื้อเพลิงพบว่าเมมเบรนมีการเสื่อมสภาพไม่สามารถจ่ายกระแสได้ตามคู่มือการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงรุ่น H-1000 ดังภาพที่ 3-2 ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะคงตัวจากค่าที่วัดได้จริงเทียบกับค่าที่ได้จากคู่มือการใช้งาน สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองในสภาวะคงตัวนั้นผู้วิจัยได้แบ่งย่านการทำงานออกเป็น 3 ย่านดังภาพที่ 3-3 ซึ่งใน Region 1 แรงดันไฟฟ้าสูญเสียส่วนใหญ่เกิดจาก Activation loss สำหรับหาค่าพารามิเตอร์ A , I_0 และ I_n แรงดันไฟฟ้าสูญเสียใน Region 2 ส่วนใหญ่เนื่องจาก Ohmic loss ดังนั้นค่าความต้านทาน r_{cell} จึงหาได้ในย่านนี้ ส่วนพารามิเตอร์ m และ n สำหรับ Mass transportation loss นั้นหาได้ใน Region 3



ภาพที่ 3-2 กราฟแรงดัน-กระแสของเซลล์เชื้อเพลิงรุ่น H-1000 [11]



ภาพที่ 3-3 แรงดันสูญเสียเนื่องจาก Activation, Ohmic และ Concentration loss ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM [13]

สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับ Activation loss ใน Region 1 เริ่มต้นโดยการเลือกค่า Exchange current และ Internal current ตามค่าที่แนะนำใน [12] โดยที่ $i_0 = 0.04 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ และ $i_n = 3 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ โดยที่เซลล์เชื้อเพลิงรุ่น H-1000 มีพื้นที่หน้าตัด $6.5 \times 20 = 130 \text{ cm}^2$ จะได้ $I_0 = 5.2 \text{ mA}$ และ $I_n = 390 \text{ mA}$ ส่วนค่า Tafel slope, A คำนวณจากเงื่อนไขในขณะที่ไม่มีการไหล ($i_{FC} = 0$) ดังนี้

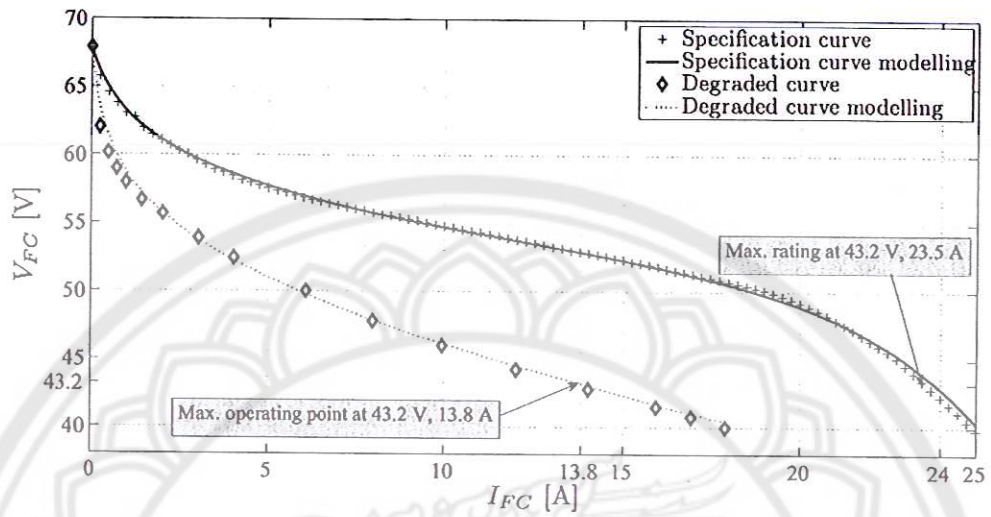
$$A = \frac{E_0 - E_{oc}}{\ln\left(\frac{I_n}{I_0}\right)} \quad (3-7)$$

โดยที่ E_{oc} คือ แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์ขณะเปิดวงจร สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงรุ่น H-1000 แรงดัน $E_{oc} = 0.94 \text{ V}$ หลังจากนั้นจึงปรับค่าของ I_0 และ I_n จนกระทั่งผลการจำลองสอดคล้องกับกราฟแรงดัน-กระแสของเซลล์เชื้อเพลิงใน Region 1 สำหรับพารามิเตอร์ R_{cell} สามารถหาได้ง่ายใน Region 2 โดยคำนวณค่าเริ่มต้นจากความชันจากกราฟแรงดัน-กระแสของเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงกระแส 5 ถึง 10 A ในภาพที่ 3-2

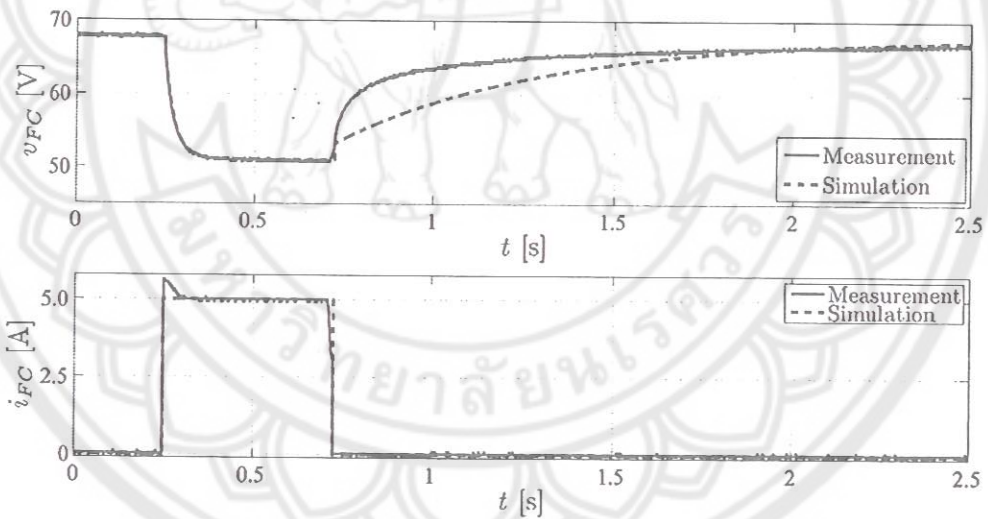
สำหรับแรงดันไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจาก Mass transportation loss ใน Region 3 ได้ทำการจำลองหลังจากได้ค่าพารามิเตอร์ A , I_0 , I_n และ r_{cell} เรียบร้อยแล้ว โดยที่ค่าเริ่มต้นสำหรับพารามิเตอร์ m และ n ได้ใช้ค่าใน [12] ซึ่ง $m = 3 \times 10^{-5}$ V และ $n = 8 \times 10^{-3}$ cm²·mA⁻¹ หรือ $n = 61.5$ mA⁻¹ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง H-1000

ภาพที่ 3-4 เปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง H-1000 กับค่าที่ได้จากคู่มือการทำงานและค่าที่วัดได้จริง โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 3-1 ซึ่งได้ทำการปรับอย่างละเอียดเพื่อให้ผลการจำลองการทำงานมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากคู่มือและค่าที่วัดได้ให้มากที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการจำลองการทำงานมีความใกล้เคียงกัน ซึ่งเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าจากค่าที่วัดได้จริงลดลงเหลือ 43.2 V ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่ใช้งานตามคำแนะนำในคู่มือใช้งาน ดังนั้นการจำลองการทำงานของค่าที่วัดได้จริงจึงมีเพียง Activation loss และ Ohmic loss เท่านั้น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 3-1 จะเห็นได้ว่า Exchange current และ Internal current มีค่าลดลง ส่วนค่าความต้านทานของเมมเบรนมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสะท้อนถึงการเสื่อมสภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

ภาพที่ 3-5 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานกับค่าที่วัดได้จริงขณะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเห็นได้ว่าแบบจำลองทำงานได้ดีเมื่อมีการเพิ่มกระแสอย่างทันทีทันใด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อลดกระแสอย่างทันทีทันใดพบว่าแบบจำลองตอบสนองช้ากว่าค่าที่วัดได้เนื่องจากในความเป็นจริงแล้วค่า C_{dl} ไม่คงที่ และแปรผันตามกระแสของเซลล์เชื้อเพลิง แต่ในทางปฏิบัติแล้วกระแสกระชากดังภาพที่ 3-5 เกิดขึ้นได้น้อยมาก เพื่ออาจทำให้เมมเบรนเสื่อมสภาพได้ และเมื่อทำแบบจำลองดังกล่าวต่อร่วมกับวงจรแปลงผันกระแสตรงพบว่าการจำลองการทำงานใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง [30] แบบจำลองนี้ยังได้ถูกสร้างในโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังภาพที่ 3-6 ซึ่งสามารถนำไปใช้ร่วมกับแบบจำลองวงจรแปลงผันกระแสตรง



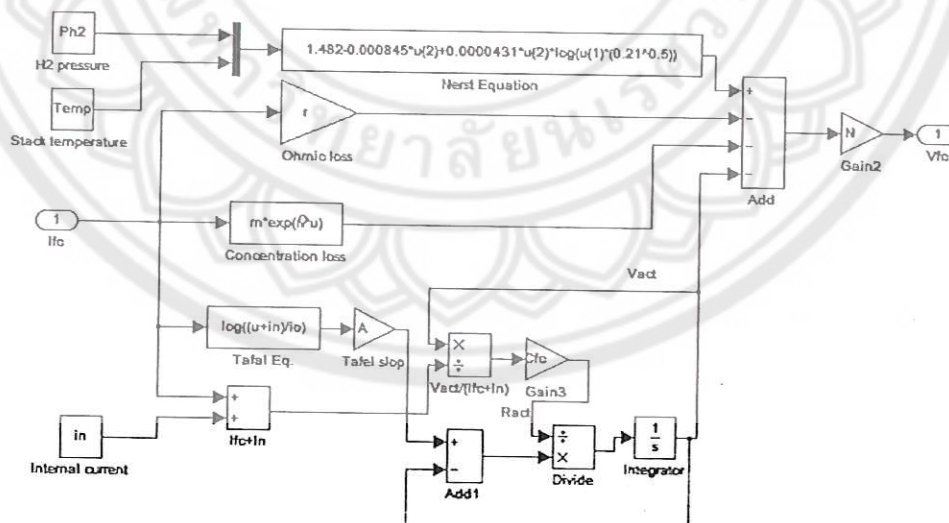
ภาพที่ 3-4 ผลการจำลองกราฟแรงดัน-กระแสในสภาวะคงตัวของเซลล์เชื้อเพลิง H-1000 เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากคู่มือการทำงาน [30]



ภาพที่ 3-5 แรงดันและกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อในสภาวะโหลดเปลี่ยนแปลงเทียบกับการจำลองการทำงาน [30]

ตารางที่ 3-1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิง H-1000 [30]

พารามิเตอร์	ค่าจากคู่มือ	ค่าที่วัดได้จริง	หน่วยวัด
อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง, T	338.15	338.15	K
ความดันของไฮโดรเจน, P_{H_2}	1.494	1.494	atm
ความดันของออกซิเจน, P_{O_2}	0.21	0.21	atm
Tafel slope, A	0.055	0.055	V
Exchange current, I_0	5×10^{-3}	1.5×10^{-3}	A
Internal current, I_n	0.47	0.13	A
Double layer capacitance, C_{dl}	-	0.3	F
Cell resistance, R_{cell}	1×10^{-3}	6×10^{-3}	Ω
Mass transportation loss constant, m	1.7×10^{-4}	-	V
Mass transportation loss constant, n	0.27	-	A^{-1}



ภาพที่ 3-6 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงที่สร้างบนโปรแกรม MATLAB/Simulink

3.2 การจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันกระแสตรงแบบ DAB

จากวงจรเทียบของของวงจร DAB ดังภาพที่ 2-7 มีกระแส i_p ที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำ L_{lk} และ v'_o ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C'_2 เป็นตัวแปรสเตรทสำหรับคำนวณการทำงานของวงจร ส่วนแรงดัน v_{FC} ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 จะประมาณว่ามีค่าคงที่และเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ เนื่องจากผลการสนองเชิงพลวัตของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งไม่ถูกพิจารณาว่าเป็นตัวแปรสเตรท โดยที่สวิตช์แต่ละตัวมีค่าเป็นหนึ่งเมื่อปิดวงจรและเป็นศูนย์เมื่อเปิดวงจร และสวิตช์ตัวบนและตัวล่างที่อยู่ในแถวเดียวกันทำงานสลับกัน ดังนั้นตัวแปรต่างๆ ในวงจรดังภาพที่ 2-7 จึงสามารถเขียนได้ดังนี้

$$L_{lk} \frac{di_p}{dt} = v_p - v'_s \quad (3-8)$$

$$C'_2 \frac{dv'_o}{dt} = i'_2 - i'_o \quad (3-9)$$

โดยที่

$$v_p = (S_1 - S_2)v_{FC} \quad (3-10)$$

$$v'_s = (S'_1 - S'_2)v_o/a \quad (3-11)$$

$$i_2 = (S'_1 - S'_2)i_p/a \quad (3-12)$$

$$i_1 = (S_1 - S_2)i_p \quad (3-13)$$

ส่วนกระแส i_{FC} ในทางอุดมคติเท่ากับค่าเฉลี่ยของกระแส i_1 เมื่อตัวเก็บประจุมีค่าสูงมากจนสามารถรองรับกระแสกระเพื่อมทั้งหมดของ i_1 แต่ในทางปฏิบัติถ้าต้องการจำลองกระแสกระเพื่อมใน i_{FC} และเลือกขนาด C_1 ที่เหมาะสม สามารถทำได้โดยพิจารณาตัวเก็บเก็บประจุ C_1 แยกจากวงจรในภาพที่ 2-7 ได้ดังต่อไปนี้

$$C_1 \frac{dv_{C1}}{dt} = i_{FC} - i_1 \quad (3-14)$$

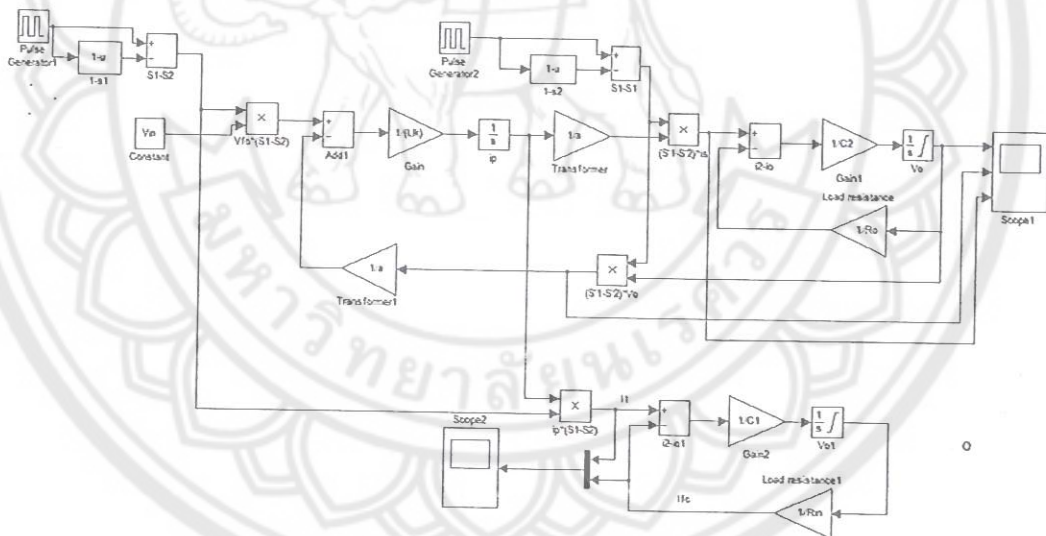
แต่เนื่องจากเราไม่ทราบค่า i_{FC} แต่เรารู้ค่าเฉลี่ยของ I_{FC} ดังนั้นวงจรกรองกระแสด้านอินพุตจึงสามารถพิจารณาว่าเป็นวงจร RC ดังสมการต่อไปนี้

$$C_1 \frac{d\tilde{v}_{c1}}{dt} + \frac{\tilde{v}_{c1}}{R_{in}} = \tilde{i}_1 \quad (3-15)$$

โดยที่สัญลักษณ์ "~" แสดงองค์ประกอบ AC ของสัญญาณ และค่า R_{in} สามารถคำนวณได้จาก

$$R_{in} = \frac{V_{FC}}{I_{FC}} = \frac{V_{FC}^2}{P_{in}} \quad (3-16)$$

สมการที่ (3-8) ถึง (3-16) ได้ถูกจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังภาพที่ 3-7 โดยที่สมการที่ (3-8) สมการที่ (3-9) และสมการที่ (3-15) ต้องเขียนให้อยู่ในรูปแบบการอินทิเกรต ดังนั้นต้องมีค่าเริ่มต้นสำหรับตัวแปร i_p , v_o' และ v_{c1}



ภาพที่ 3-7 แบบจำลองของวงจรแปลงผันกระแสตรง DAB ในโปรแกรม MATLAB/Simulink

จากกราฟแรงดัน-กระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงรุ่น H-1000 ดังภาพที่ 3-4 เห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าอยู่ระหว่าง 43 V ถึง 67 V และเมื่อนำมาต่อใช้งานร่วมกับวงจร DAB ที่มีแรงดันเอาต์พุตคงที่ที่ 400 V ทำให้อัตราขยายแรงดันของวงจร DAB (d) มีการ

เปลี่ยนแปลง และจากภาพที่ 2-11 วงจร DAB ต้องทำงานอยู่ในค่า d ที่เหมาะสมเพื่อให้อยู่ในเงื่อนไขขอบเขตของการสวิตช์ที่แรงดันเป็นศูนย์โดยการเลือกอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงไฟฟ้าให้เหมาะสม เมื่อแทนสมการที่ (2-14) ลงในสมการที่ (2-15) ค่า d สามารถเขียนได้ดังนี้

$$d = \frac{V_o}{aV_{FC}} \quad (3-17)$$

ซึ่งแสดงว่าค่า d มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายโหลดสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากภาพที่ 2-11 ควรเลือกอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงไฟฟ้า (a) เพื่อให้ d มีค่าใกล้เคียงหนึ่งเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายโหลดต่ำ และเมื่อจ่ายโหลดสูงสุดค่า d ต้องอยู่ในเงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวด้วย

ถ้าให้โหลดต่ำสุดของเซลล์เชื้อเพลิงเกิดขึ้นที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 65 V และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับ 400 V และ $d = 1$ ดังนั้น

$$a = \frac{400}{65} = 6.15 \approx 6.2$$

และให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 1 kW ถูกส่งผ่านวงจร DAB ที่มุม ϕ สูงสุดที่ 45° ซึ่งกำลังไฟฟ้างดังกล่าวทำให้ $V_{FC} = 43.2$ V ดังนั้นค่า d ณ กำลังไฟฟ้าพิกัดจึงมีค่าเท่ากับ

$$d = \frac{400}{6.2 \times 43.2} = 1.5$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาจากภาพที่ 2-11 แล้วพบว่าวงจร DAB ยังคงทำงานอยู่ในย่านความสูญเสียในสวิตช์ต่ำ ถ้ากำหนดให้ความถี่สวิตช์เท่ากับ 20 kHz ทำให้สามารถคำนวณตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลรวม L_{lk} จากสมการที่ (2-23) ได้ดังนี้

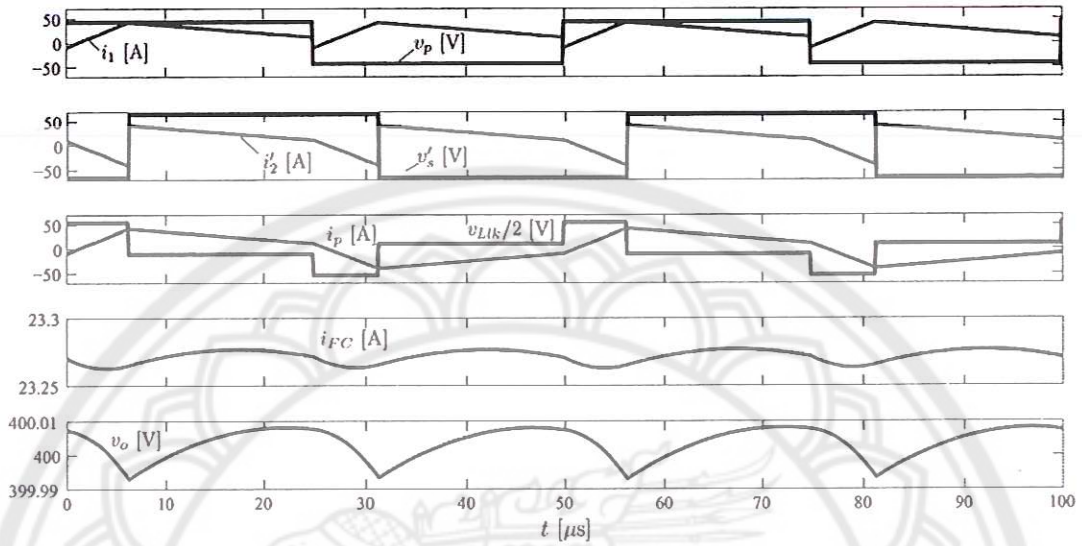
$$L_{lk} = \frac{43.2^2 \times 1.5}{1,000 \times (2 \times \pi \times 20,000)} \times \frac{\pi}{4} \left(\pi - \frac{\pi}{4} \right) = 13.1 \mu\text{H}$$

ส่วนค่าเริ่มต้นสำหรับ $v_o(0) = 400$ V และ $v_{c1}(0) = V_{FC}$ ส่วน $i_p(0)$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-21) ส่วนค่าตัวเก็บประจุกรองกระแสเหนี่ยวนำได้เลือกใช้ $C_1 = 4,700 \mu\text{F}$ และ $C_2 = 2,200 \mu\text{F}$ แบบจำลองดังกล่าวถูกคำนวณใน Simulink ด้วยวิธี ODE3 ซึ่งจากการทำงานพบว่า

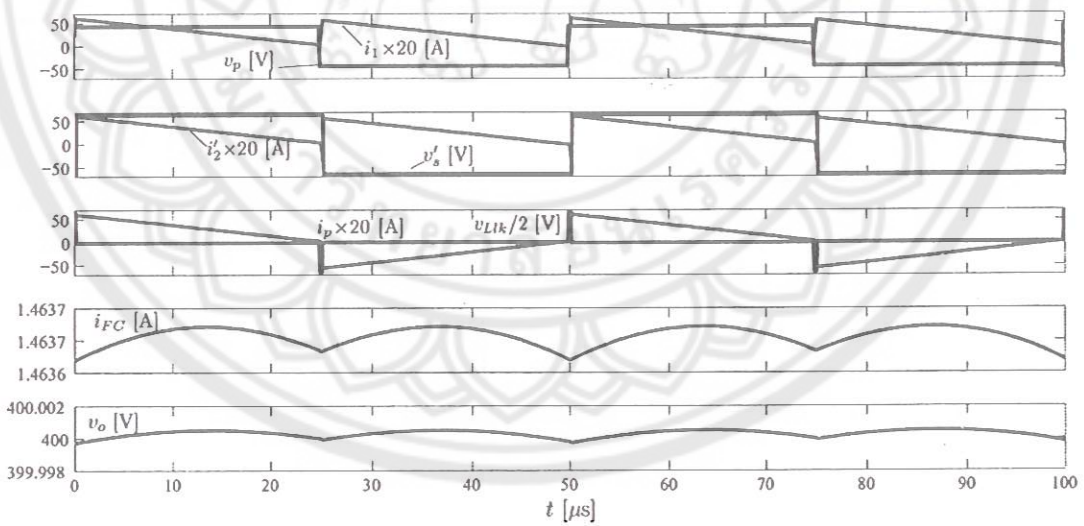
ความละเอียดในการจำลองการทำงานมีค่ามากกว่า 400 เท่าของความถี่สวิตช์แล้วจะให้ผลสอดคล้องกับทฤษฎีในหัวข้อที่ 2.2 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ความละเอียดในการจำลองการทำงานเป็น 500 เท่า ของความถี่สวิตช์หรือ 100 ns

ภาพที่ 3-8 แสดงผลการจำลองการทำงานเมื่อวงจร DAB จ่ายโหลดเต็มพิกัด ซึ่งทำงานอยู่ในโหมดขยายแรงดัน $d = 1.5$ และ $\phi = 45^\circ$ โดยที่วงจร DAB ยังคงทำงานอยู่ในย่านที่ ZVS สอดคล้องกับไดอะแกรมที่ได้วิเคราะห์ไว้ในภาพที่ 2-9 และเมื่อวงจร DAB จ่ายโหลดต่ำๆ ทำให้แรงดันไฟฟ้า v_{FC} มีค่าสูงขึ้น และมุมประวิง ϕ มีค่าลดลง วงจร DAB ยังคงสามารถทำงานอยู่ในย่าน ZVS ได้ดังภาพที่ 3-9 ซึ่งเป็นผลมาจากการเลือกอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงไฟฟ้าให้เหมาะสมกับคุณลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น

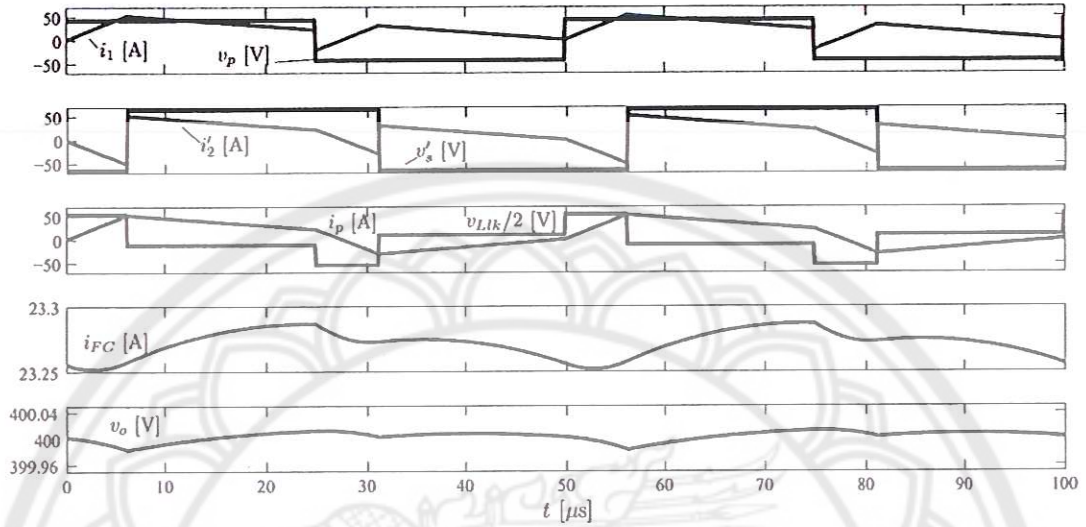
แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองของวงจร DAB ไม่สามารถต่อร่วมกับแบบจำลองพลวัตของเซลล์เชื้อเพลิงได้เนื่องจากปัญหาค่ากระแสเริ่มต้น $i_p(0)$ ดังแสดงในภาพที่ 3-10 ซึ่งมีเงื่อนไขการจำลองการทำงานเหมือนดังภาพที่ 3-8 ยกเว้นกำหนดให้ $i_p(0) = 0$ A จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของกระแส i_{FC} และแรงดัน v_o มีค่าเท่ากับภาพที่ 3-8 แต่กระแส i_p มีค่าเฉลี่ยไม่เท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายความว่ามีการส่งถ่ายพลังงานจากแหล่งจ่ายไปยังโหลดเท่ากัน ถึงแม้ว่ารูปกระแส i_p ไม่สอดคล้องกับทฤษฎี โดยที่ค่ากระแสเริ่มต้นดังกล่าวขึ้นอยู่กับแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงดังสมการที่ (2-21) แต่แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับกระแส i_{FC} ซึ่งเป็นเอาต์พุตของแบบจำลอง DAB ดังนั้นจำเป็นต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปที่ออกแบบมาสำหรับจำลองการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยเฉพาะ เช่น PSIM หรือ Power Electronic Block Sets ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งทางวิทยาลัยพลังงานทดแทนไม่มีลิขสิทธิ์ของโปรแกรมดังกล่าว ดังนั้นแบบจำลองของวงจรแปลงผัน DAB ในหัวข้อนี้จึงใช้จำลองการทำงานตามเงื่อนไขของแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่ค่าต่างๆ สำหรับในสภาวะคงตัวเพียงเท่านั้น



ภาพที่ 3-8 ผลการจำลองการทำงานในสภาวะคงตัวของวงจร DAB เมื่อ $V_{FC} = 43.2 \text{ V}$ และ $\phi = 45^\circ$



ภาพที่ 3-9 ผลการจำลองการทำงานในสภาวะคงตัวของวงจร DAB เมื่อ $V_{FC} = 63 \text{ V}$ และ $\phi = 2^\circ$



ภาพที่ 3-10 ผลการจำลองการทำงานในสภาวะคงตัวของวงจร DAB เมื่อ $V_{FC} = 43.2 \text{ V}$ และ $\phi = 45^\circ$ ที่ค่ากระแสเริ่มต้น $i_p(0) = 0 \text{ A}$

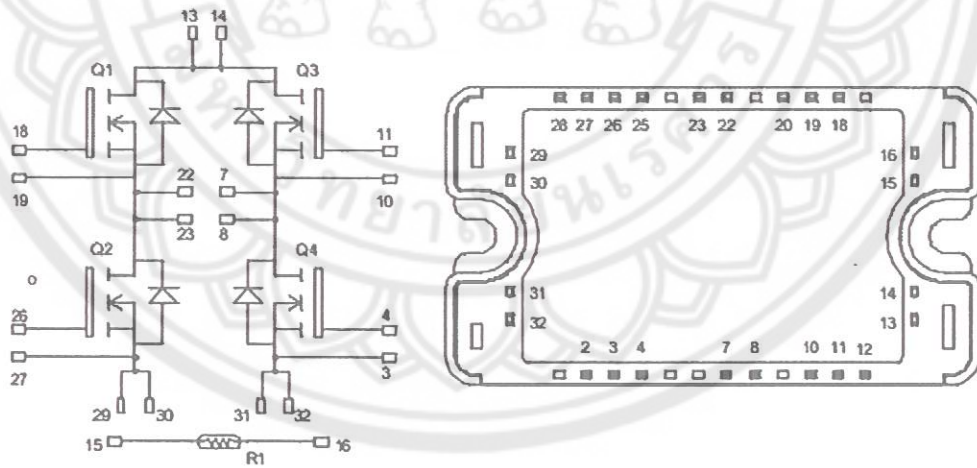


บทที่ 4

การออกแบบและสร้างวงจรแปลงผันกระแสตรง

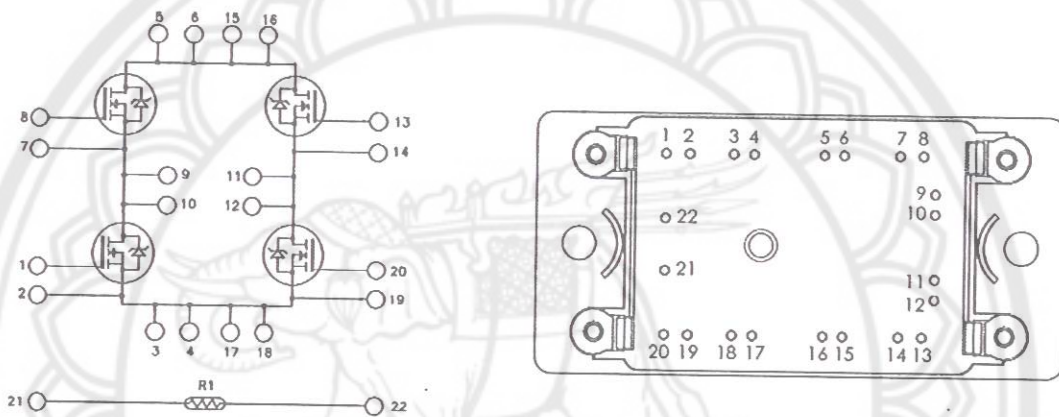
4.1 วงจรภาคกำลัง

จากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผัน DAB ในบทที่ 2 นั้นจะเห็นได้ว่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านมอสเฟตแต่ละตัวในวงจร LV Bridge นั้น มีค่าเท่ากับ $i_p(\phi)$ ในกรณีที่ทำงานในโหมดขยายแรงดัน หรือเท่ากับ $i_p(\pi)$ กรณีทำงานในโหมดลดแรงดัน แรงดันตกคร่อมมอสเฟตแต่ละตัวมีค่าสูงสุดเท่ากับแรงดัน V_{FC} และจากการจำลองการทำงานของวงจร DAB เมื่อจ่ายโหลดสูงสุดดังภาพที่ 3-8 เห็นได้ว่าวงจรทำงานในโหมดขยายแรงดันและ $i_p(\phi) \approx 41.5$ A ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ชุดวงจรมอสเฟตรุ่น APTM10HM19FT3G ของบริษัท Microsemi [31] ดังภาพที่ 4-1 ไตอะแกรมการต่อใช้งานของชุดวงจรมอสเฟต APTM10HM19FT3G [31] ซึ่งสามารถทนกระแสต่อเนื่องได้ 50 A ที่อุณหภูมิ 80°C ทนแรงดันสูงสุดได้ 100 V และยังมีค่าความต้านทานระหว่างขา Drain และขา Source ขณะนำกระแส $R_{DS,on} = 0.019$ m Ω ที่อุณหภูมิ 25°C



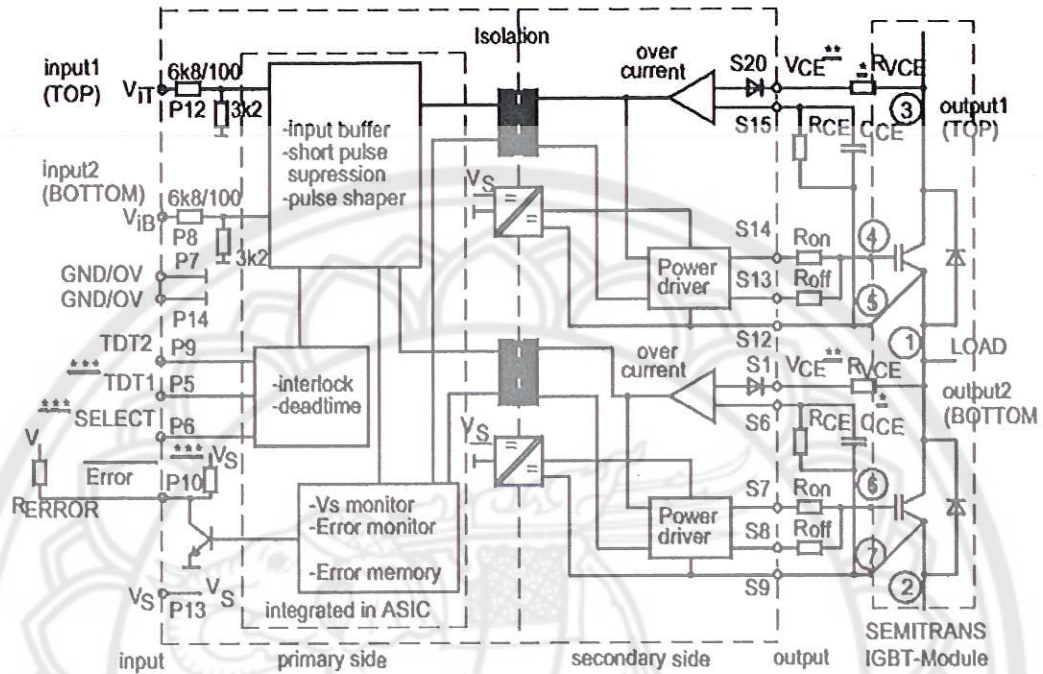
ภาพที่ 4-1 ไตอะแกรมการต่อใช้งานของชุดวงจรมอสเฟต APTM10HM19FT3G [31]

การเลือกใช้มอสเฟตสำหรับวงจร HV Bridge สามารถทำได้ในทำนองเดียวกับวงจร LV Bridge โดยที่กระแสสูงสุดที่ไหลในมอสเฟตแต่ละตัวเท่ากับ $i_s(\phi) = \frac{i_p(\phi)}{a} = \frac{41.5}{6.2} = 6.7 \text{ A}$ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ชุดวงจรมอสเฟต APTC60HM83FT2G [32] ดังภาพที่ 4-2 ซึ่งสามารถทนกระแสต่อเนื่องได้ 27 A ที่อุณหภูมิ 80°C ทนแรงดันสูงสุดได้ 600 V และยังมีค่าความต้านทานระหว่างขา Drain และขา Source ขณะนำกระแส $R_{DS,on} = 0.083 \text{ m}\Omega$ ที่อุณหภูมิ 25°C



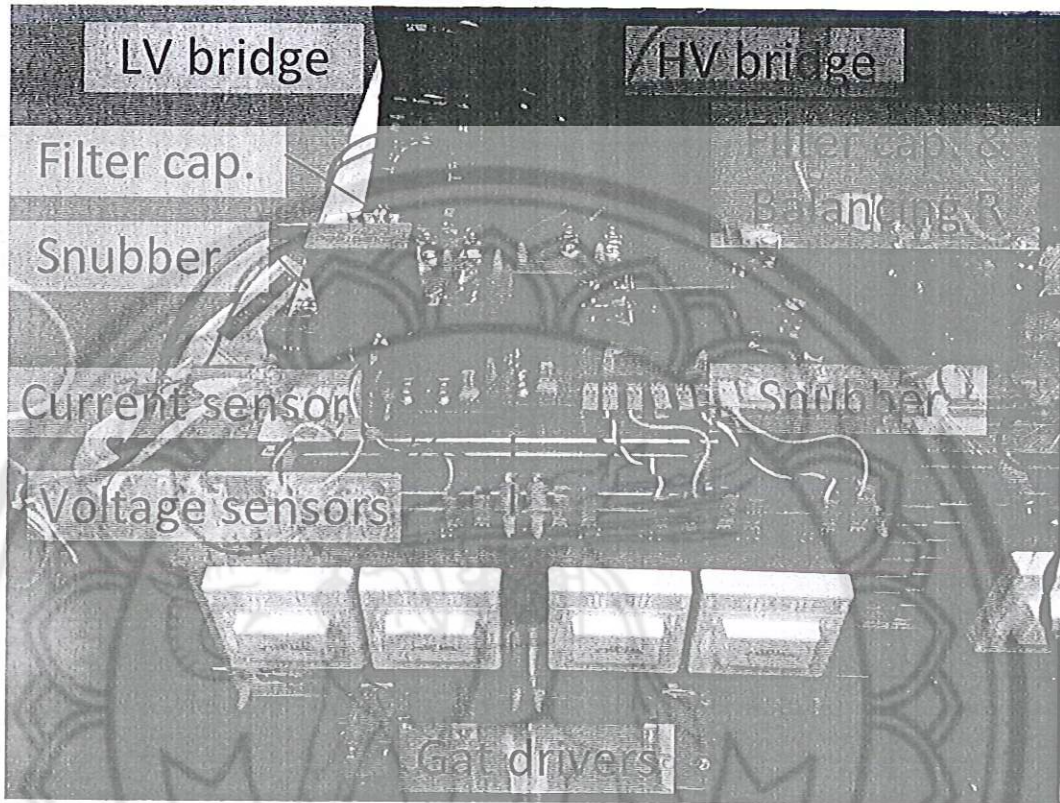
ภาพที่ 4-2 ไลออะแกรมการต่อใช้งานของชุดวงจรมอสเฟต APTC60HM83FT2G [32]

ผู้วิจัยได้เลือกใช้วงจรขับเคลื่อนสำเร็จรูปรุ่น SKHI22B ของบริษัท Semikron [33] ดังภาพที่ 4-3 ซึ่งสามารถใช้ร่วมกับมอสเฟตตัวบนและตัวล่างในแต่ละกิ่งของวงจร Bridge ดังนั้นจึงต้องใช้วงจรขับเคลื่อนทั้งหมด 4 ตัว โครงสร้างภายในของ SKHI22B มีหม้อแปลงความถี่สูงอยู่ภายในตัวทำให้สามารถแยกกราวด์ระหว่างวงจรภาคกำลังและภาคควบคุมเพื่อความปลอดภัยในการทำงาน และยังมีฟังก์ชันป้องกันกระแสเกินในมอสเฟตแต่ละตัวโดยใช้หลักการวัดค่าแรงดันตกคร่อมมอสเฟต v_{DS} ขณะนำกระแส ซึ่งสามารถปรับค่าให้สอดคล้องกับกระแสสูงสุดในระยะเวลาที่มอสเฟตทนโดยไม่เกิดความเสียหายจากการเลือกใช้ค่า R_{CE} และ C_{CE} ส่วน R_{VCE} ดังภาพนั้นถูกใช้ตัววงจรเพราะแรงดันไฟฟ้ากระแสที่บัสของวงจร LV และ HV Bridge มีค่าต่ำกว่า 1,200 V



ภาพที่ 4-3 ไดอะแกรมแสดงการต่อใช้งานของวงจรขับเคลื่อน SKHI22B [33]

นอกจากอุปกรณ์ที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2-6 แล้ว ยังมีอุปกรณ์อื่นๆ ได้แก่ตัวเก็บประจุ Snubber สำหรับป้องกันแรงดันกระชากเนื่องจากตัวเหนี่ยวนำแฝงใน DC bus และเซ็นเซอร์วัดแรงดันและกระแสของ DC Bus อีกด้วย ดังนั้นรายการอุปกรณ์ภาคกำลังทั้งหมดได้สรุปไว้ในตารางที่ 4-1 อุปกรณ์ทั้งหมดถูกประกอบขึ้นบนแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) 2 และยึดติดอยู่บนครีบบระบายความร้อน P3/180 ของบริษัท Semikron ดังแสดงในภาพที่ 4-4



ภาพที่ 4-4 ต้นแบบวงจรแปลงผันกระแสตรง Dual active bridge

4.2 การออกแบบหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง [34]

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีคำนวณหาค่าคงที่ Geometrical constant (K_g) โดยในขั้นต้นแรกคำนวณหาค่าคงที่ K_g โดยใช้พารามิเตอร์ทางไฟฟ้า แล้วนำค่าคงที่ที่คำนวณไปเลือกแกนเหล็กที่มีค่าคงที่ K_g ใหญ่กว่าค่าที่คำนวณได้ ค่าคงที่จากพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่อ้างอิงทางด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จาก

$$K_{g,elec} = \frac{\rho \lambda_1 I_{tot}^2 K_{fe}^2}{4K_u (P_{tot})^{((\beta+2)/\beta)}} \quad (4-1)$$

โดยที่

$\rho = 1.724 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของลวดทองแดงที่อุณหภูมิ 25°C
 λ_1 คือ ค่า Volt-second ของขดลวดปฐมภูมิ ซึ่งคำนวณจากค่า Duty ratio ของแรงดัน v_p
 คาบเวลาในการสวิตช์ T_s และขนาดของแรงดันกระแสตรงอินพุท V_{FC} ได้ดังนี้

$$\lambda_1 = DT_s V_{in} \quad (4-2)$$

I_{tot} คือ ค่ากระแส RMS รวม โดยอ้างอิงทางด้านขดลวดปฐมภูมิซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$I_{tot} = I_p + aI_s \quad (4-3)$$

β คือ ค่าคงที่แสดงถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลง สำหรับวัสดุเฟอร์ไรต์
 ค่า $\beta \approx 2.7$

ค่า K_u คือ ค่า Filled factor แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดงต่อ
 พื้นที่หน้าตัดของช่องว่างสำหรับพันขดลวด สำหรับลวดทองแดงแบบ Litz wire ค่าที่
 เหมาะสมสำหรับ $K_u = 0.4$

P_{tot} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในหม้อแปลงไฟฟ้า

ส่วนค่าคงที่ K_{fe} เป็นค่าคงที่แสดงถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก P_{fe} ที่ขึ้นอยู่กับ
 พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก A_c ความยาวเฉลี่ยสำหรับเส้นเหล็กแม่เหล็ก l_m และขนาดของความ
 หนาแน่นสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็ก ΔB ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$K_{fe} = \left(\frac{P_{fe}}{A_c l_m} \right) / \Delta B^\beta \quad (4-4)$$

โดยส่วนมากแล้วผู้ผลิตมักให้ข้อมูลของกำลังไฟฟ้าสูญเสียสัมพัทธ์ (Relative losses) มีหน่วยเป็น
 kW/m^3 ซึ่งเท่ากับค่า $P_{fe}/A_c l_m$ นั่นเอง

ค่าความหนาแน่นสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็ก ΔB ส่งผลโดยตรงต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียใน
 หม้อแปลงไฟฟ้า ถ้าหากค่า ΔB ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนหม้อแปลง และถ้าหากเพิ่มจำนวน

รอบของขดลวดเพิ่มขึ้นทำให้ลดค่า ΔB ลงได้ แต่ก็ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นค่า ΔB ที่เหมาะสมสามารถหาได้จากการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมที่ต่ำที่สุดด้วยวิธีการหาค่าอนุพันธ์ในฟังก์ชันของค่า ΔB ซึ่งทำให้ได้ค่า ΔB ที่เหมาะสมดังนี้

$$\Delta B = \left[\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2 (MLT)}{2K_u W_A A_c^2 l_m \beta K_{fe}} \frac{1}{\beta} \right]^{\frac{1}{\beta+2}} \quad (4-5)$$

โดยที่ W_A เป็นพื้นที่หน้าตัดของแกนหม้อแปลงสำหรับพันขดลวด และ MLT เป็นความยาวเฉลี่ยหนึ่งรอบของขดลวด ซึ่งทั้งสองตัวแปรเป็นค่าที่ได้จากข้อมูลจำเพาะของแกนหม้อแปลง

ส่วนค่าคงที่ K_g ในฟังก์ชันของมิติของแกนหม้อแปลงสามารถเขียนได้ดังนี้

$$K_{g,core} = \frac{W_A (A_c)^{\frac{2(\beta-1)}{\beta}}}{(MLT) l_m^{\frac{2}{\beta}}} \left[\left(\frac{\beta}{2} \right)^{-\frac{\beta+2}{\beta}} + \left(\frac{\beta}{2} \right)^{\frac{2}{\beta+2}} \right]^{-\frac{\beta+2}{\beta}} \quad (4-7)$$

ซึ่งในการออกแบบต้องเลือกให้ค่า $K_{g,core}$ มากกว่าค่า $K_{g,elec}$ และขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำในขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิสามารถคำนวณได้จาก

$$A_{w1} \leq \frac{I_p}{N_1 I_p + N_2 I_s} K_u W_A \quad (4-8)$$

$$A_{w2} \leq \frac{I_s}{N_1 I_p + N_2 I_s} K_u W_A \quad (4-9)$$

โดยที่จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิสามารถคำนวณได้จาก

$$N_1 = \frac{\lambda_1}{2\Delta B A_c} \quad (4-10)$$

ส่วนการออกแบบตัวเหนี่ยวนำกระแสสลับก็ใช้หลักการเดียวกับการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยกำหนดให้ $N_2 = 0$, $a = 0$ และ $I_s = 0$ ในสมการที่ (4-3), (4-8) และ (4-9)

จากผลการจำลองการทำงานของวงจร DAB ในหัวข้อที่ 3.2 และจากข้อมูลจำเพาะของแกนเฟอร์ไรต์ชนิด N97 [35] ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต้องการมีข้อกำหนดทางเทคนิคดังตารางที่ 4-2

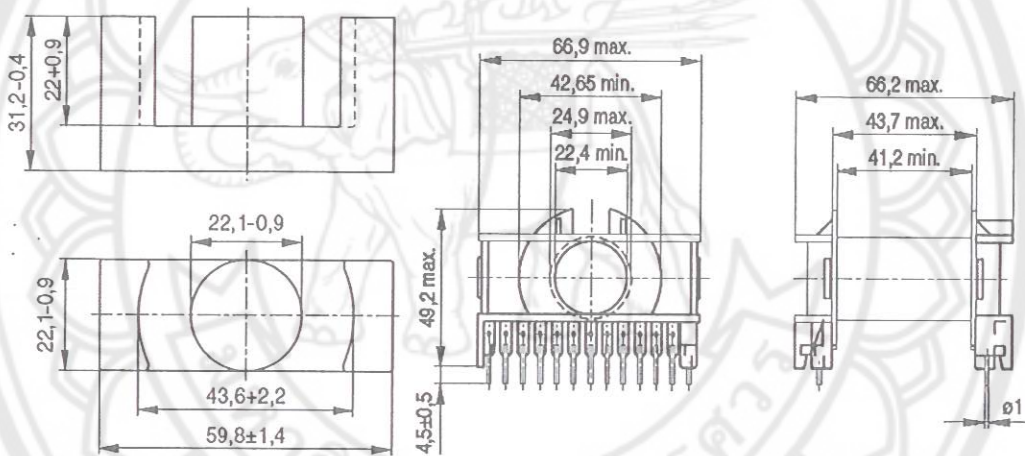
ตารางที่ 4-2 ข้อกำหนดทางเทคนิคของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

ตัวแปร	ค่าที่ต้องการ
แรงดัน RMS ด้านปฐมภูมิ	64.52 V
แรงดัน RMS ด้านทุติยภูมิ	400 V
ความถี่ในการทำงาน	20 kHz
กำลังไฟฟ้าสูญเสีย	8 W (0.8% ของ 1,000 W)
กระแส RMS รวม I_{tot}	49 A
ความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด ΔB	0.27 T
Filled factor K_u	0.4
Relative loss	0.2 W/cm ³ ที่ 20 kHz 0.3 T
Loss exponent, β	2.7
Geometrical factor, $K_{g,elec}$	0.0752
จำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ, N_1	12
จำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิ, N_2	76
ขนาดของลวดตัวนำ A_{w1}	0.061 cm ²
ขนาดของลวดตัวนำ A_{w2}	0.0098 cm ²

ตารางที่ 4-1 สรุปรายการอุปกรณ์ภาคกำลังของวงจรแปลงผัน DAB

อุปกรณ์	วงจร LV Bridge	วงจร HV Bridge
ชุดวงจรมอสเฟต	APTM10HM19FT3G	APTC60HM83FT2G
วงจรขับเคลื่อน	2 × Semikron SKHI22B	2 × Semikron SKHI22B
R_{on} สำหรับวงจรขับเคลื่อน	50 Ω \pm 1% 1/4 W	20 Ω \pm 1% 1/4 W
R_{off} สำหรับวงจรขับเคลื่อน	50 Ω \pm 1% 1/4 W	20 Ω \pm 1% 1/4 W
R_{CE} สำหรับวงจรขับเคลื่อน	3.3 k Ω \pm 1% 1/4 W	5 k Ω \pm 1% 1/4 W
C_{CE} สำหรับวงจรขับเคลื่อน	1.5 nF 63 V MKP	660 pF 63 V MKP
ตัวเก็บประจุกรองกระแส	4,700 μ F 100 V Electrolytic	2 × 2,200 μ F 100 V Electrolytic อนุกรม
วงจรสมมูลแรงดันตก คร่อมตัวเก็บประจุ	-	ตัวต้านทาน 50 k Ω \pm 1% 10 W ขนานกับตัวเก็บประจุแต่ละตัว
ตัวเก็บประจุ Snubber	1.5 μ F 800 V MKP	1 μ F 1,200 V MKP
เซ็นเซอร์วัดกระแส DC bus	LEM CASR 6-NP Flux gate type	-
เซ็นเซอร์วัดแรงดัน DC bus	LEM LV 25-NP Hall effect type	LEM LV 25-NP Hall effect type

ดังนั้นในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าผู้วิจัยได้เลือกใช้แกนหม้อแปลงแบบ ETD ดังภาพที่ 4-5 ซึ่งมีค่า $K_{g,core} = 0.0772$ และใช้ลวดทองแดงแบบ Unserved Litz wire ขนาด 60×36AWG ดีเกลียวรวมกัน 9 เส้น ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดรวมเท่ากับ 0.0686 cm² เป็นขดลวดปฐมภูมิ และลวดทองแดงแบบ Single served Litz wire ขนาด 40×36AWG ดีเกลียวรวมรวม 2 เส้น ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดรวมเท่ากับ 0.0102 cm² เป็นขดลวดทุติยภูมิ แต่จากการสร้างจริงพบว่าสามารถพันขดลวดปฐมภูมิได้ 9 รอบ และขดลวดทุติยภูมิพันได้ 66 รอบ ทำให้อัตราส่วนจำนวนรอบจริงมีค่าเท่ากับ $a = 7.33$ หลังจากนั้นจึงได้ทดสอบวัดค่าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงที่สร้างขึ้นโดยใช้มิเตอร์ LCR Agilent รุ่น 4263B ได้ดังตารางที่ 4-3



ภาพที่ 4-5 ขนาดและมิติของแกนเหล็กและ Coil former ขนาด ETD-59 [36]

ตารางที่ 4-3 ผลการทดสอบค่าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงความถี่สูง

ค่าความเหนี่ยวนำ	ด้านขดลวดปฐมภูมิ	ด้านขดลวดทุติยภูมิ
Magnetizing inductance (เปิดวงจร)	418 μ H	23.04 mH
Total leakage inductance (ลัดวงจร)	1.35 μ H	83.76 μ H

จากการจำลองการทำงานของวงจร DAB ใน 3.2 พบว่าตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล L_{lk} อ้างอิงทางด้านขดลวดปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ $13.1 \mu\text{H}$ แต่จากผลการทดสอบค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้าพบว่าค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านปฐมภูมิมีค่าต่ำเพียง $1.35 \mu\text{H}$ ดังนั้นจึงต้องต่อตัวเหนี่ยวนำเพิ่มเพื่อให้เหมาะสมกับกำลังไฟฟ้าสูงสุดของวงจร ซึ่งสามารถต่อเพิ่มได้ทางด้านขดลวดปฐมภูมิและ/หรือทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า แต่ขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ (V_{core}) แปรผันตามขนาดของพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำและค่า ΔB [30] ดังนี้

$$V_{core} = \frac{\mu L I^2}{\Delta B^2} \quad (4-11)$$

โดยที่ μ คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรต์ ดังนั้นถ้าต่อตัวเหนี่ยวนำเพิ่มทางด้านขดลวดทุติยภูมิทำให้สามารถลดปริมาตรของแกนเฟอร์ไรต์ลงได้มาก ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้หลักการดังที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น โดยใช้ลวดทองแดงแบบ Single served Litz wire ขนาด $40 \times 36 \text{AWG}$ พันบนแกนเฟอร์ไรต์ N87 ขนาด ETD-34 [37] ซึ่งได้ค่าเหนี่ยวนำเท่ากับ $680 \mu\text{H}$ และเมื่อรวมกับค่าค่าเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงไฟฟ้าแล้วได้ $764 \mu\text{H}$ ทางด้านทุติยภูมิ หรือเท่ากับ $14 \mu\text{H}$ ทางด้านปฐมภูมิ

4.3 การออกแบบระบบควบคุม

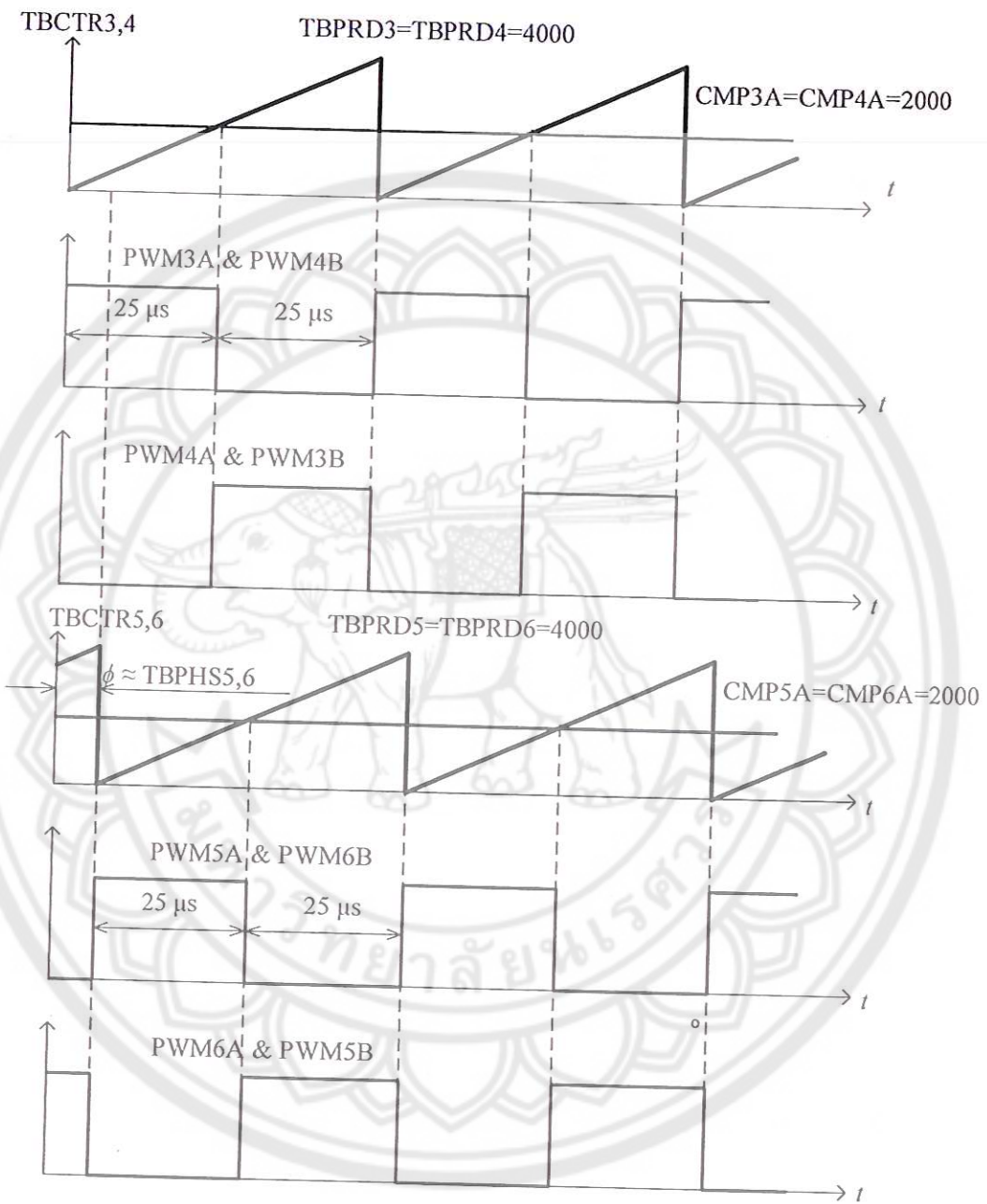
งานวิจัยนี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ TMS320F28069 ของ Texas Instruments โดยที่แกนหลักสำหรับคำนวณฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เป็นตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลแบบจุดทศนิยมคงที่ (Fixed-point digital signal processor) ความละเอียด 32 บิต ทำงานที่ความถี่สัญญาณนาฬิกาสูงสุด 80MHz [38] ซึ่งมีฟังก์ชันภายใน (Peripherals) ที่เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น มี ADC ขนาด 12 บิต 16 ช่อง และ PWM 14 ช่อง ซึ่งในงานวิจัยได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28069 ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นโหลดให้กับวงจร DAB และสร้างสัญญาณ PWM แบบเหลื่อมเฟสให้กับวงจร DAB

ภาพที่ 4-6 แสดงการสร้างสัญญาณ PWM โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28069 โดยกำหนดให้วงจรนับ (Timer counter) CTR3 และ CTR4 ทำงานในโหมดนับขึ้น โดยที่ค่าสูงสุด

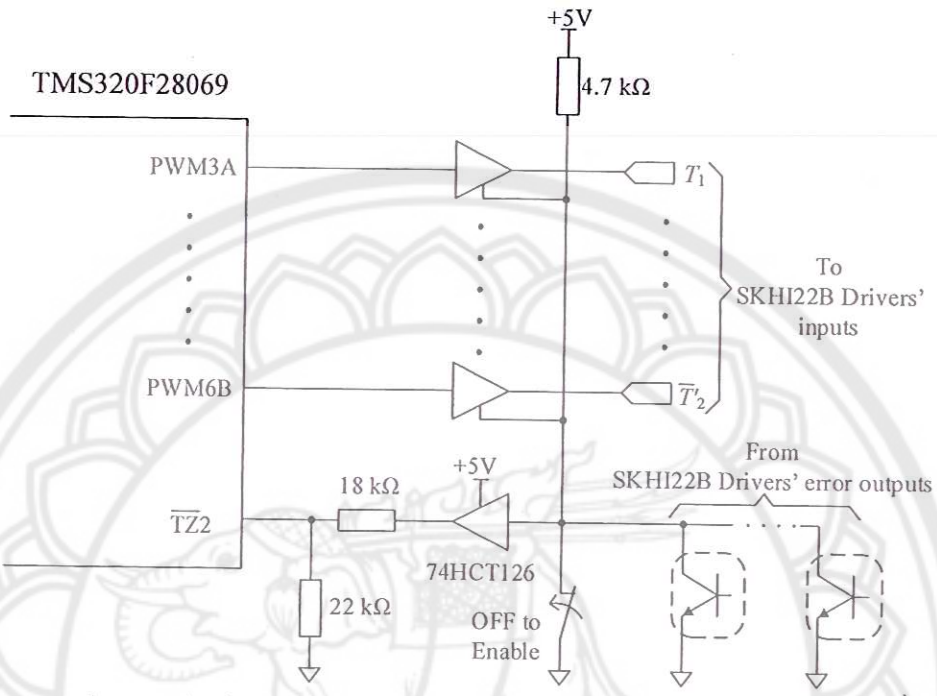
TBPRD3 และ TBPRD4 เท่ากับ 4,000 ทำให้ได้ความถี่สวิตช์เท่ากับ $80 \text{ MHz}/4,000 = 20 \text{ kHz}$ และกำหนดให้ค่ารีจิสเตอร์เปรียบเทียบ (Compare registers) CMP3A และ CMP4A มีค่าเป็น 2,000 และกำหนดให้ PWM3A และ PWM3B ทำงานแบบ Active high complementary และ PWM4A และ PWM4B ทำงานแบบ Active low complementary ดังนั้นสัญญาณ PWM3A, PWM3B, PWM4A และ PWM4B เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่เท่ากับ 20 kHz และมีค่าวัฏจักรงาน (duty ratio) เท่ากับ 50 % ซึ่งสัญญาณดังกล่าวนำไปใช้สั่งงานให้กับวงจรขับเคลื่อนของวงจร LV Bridge ในภาพที่ 2-6

ส่วนสัญญาณควบคุม HV Bridge ได้กำหนดให้ CTR5 และ CTR6 สร้างสัญญาณ PWM5A, PWM5B, PWM6A และ PWM6B เหมือนกับวงจร LV Bridge แต่กำหนดให้สามารถปรับมุมประวิงเวลา ϕ ด้วยการปรับค่ามุมเฟสผ่านทาง TBPHS5 และ TBPHS6 โดยที่ค่า TBPHS5 และ TBPHS6 เท่ากับ 4,000 ทำให้ $\phi = 360^\circ$ ดังนั้นมุม ϕ จึงมีความละเอียดเท่ากับ $360^\circ/4,000 = 0.09^\circ$

ภาพที่ 4-7 แสดงวงจรเชื่อมต่อกันไมโครคอนโทรลเลอร์กับวงจรขับเคลื่อน วงขับเคลื่อน SKHI22B รับสัญญาณตรรกะที่ระดับสัญญาณ 0 และ 5 V แต่ระดับสัญญาณของไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานที่ระดับ 0 และ 3.3 V ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ใช้วงจรรวมเบอร์ 74HCT126 สำหรับเป็นวงจรปรับระดับสัญญาณและเป็นวงจรบัฟเฟอร์ และรับสัญญาณอินพุตจากสัญญาณ Error จากวงจรขับเคลื่อนแต่ละตัวและสวิตช์สำหรับสั่งงานวงจร DAB เข้าที่สัญญาณ Trip zone 2 (TZ2) ซึ่งเมื่อสวิตช์สั่งงานเปิดวงจรหรือมีสัญญาณ Error จากวงจรขับเคลื่อนทำให้ TZ2 = "0" ซึ่งโปรแกรมควบคุมการทำงานที่เขียนขึ้นโดยใช้ภาษาซีจะสั่งให้สัญญาณ PWM ที่ไปควบคุมการทำงานของวงจร LV และ HV Bridge มีสถานะเป็น "0" ทุกสัญญาณ นอกจากนั้นเอาต์พุตของ 74HCT126 ยังมีสถานะเป็น High impedance หรือเทียบได้กับการเปิดวงจร ทำให้ไม่มีสัญญาณสั่งการทำงานไปยังวงจร LV และ HV Bridge



ภาพที่ 4-6 การสร้างสัญญาณ PWM โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28069



ภาพที่ 4-7 วงจรเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับภาคกำลังของวงจร DAB

บทที่ 5 ผลการวิจัย

5.1 การทดสอบการทำงานของวงจร DAB ร่วมกับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 48 V

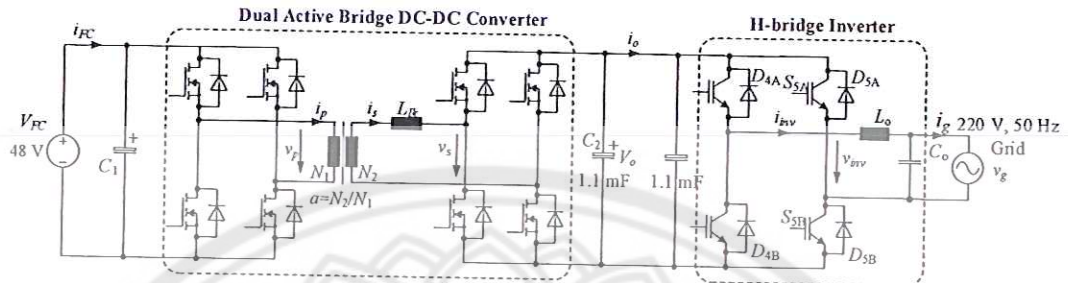
วงจรแปลงผันกระแสตรงแบบ DAB ที่สร้างขึ้นได้ถูกทดสอบในขั้นตอนแรกโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงขนาด 24 V 20 A จำนวน 2 ตัว ต่อกันแบบอนุกรม ซึ่งเปรียบเทียบกับแหล่งจ่ายกระแสตรงขนาด 48 V 20 A บ้อนเข้าทางด้านอินพุต ส่วนทางด้านเอาต์พุตนั้นได้ต่อกับวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่เชื่อมต่อกับสายส่งทำหน้าที่เป็นโหลดให้กับวงจร DAB ดังภาพที่ 5-1 โดยที่แรงดัน v_o ซึ่งเป็นเอาต์พุตของวงจร DAB และเป็นอินพุตให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ถูกควบคุมให้มีค่าคงที่เท่ากับ 360 V, 380 V และ 400 V และค่ามุม ϕ ถูกปรับจาก 5° และเพิ่มขึ้นทีละ 5° จนถึง 40° ซึ่งเป็นค่าที่สามารถทำการทดลองได้

ผู้วิจัยได้ใช้โพรบวัดกระแส Agilent 1146B และ Chauvin Arnoux E3N ซึ่งโพรบทั้งสองรุ่นมีข้อมูลทางเทคนิคที่เหมือนกัน สำหรับวัดกระแส i_{FC} , i_p และ i_o กระแส และใช้โพรบแรงดันสูง Agilent N2791A วัดแรงดัน v_s และโพรบแรงดัน Tektronix TPP0101 วัดแรงดัน v_p ซึ่งสัญญาณกระแสและแรงดันที่วัดได้ถูกแสดงผลบนออสซิลโลสโคป Tektronix TBS1064 และใช้สำหรับวัดค่าเฉลี่ยของกระแส i_{FC} และ i_o ส่วนการวัดค่าเฉลี่ยของแรงดัน V_{FC} และ V_o ได้ใช้มัลติมิเตอร์ Voltth S-11 ดังนั้นกำลังไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุต และประสิทธิภาพของวงจร DAB จึงสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$P_{in} = V_{FC} I_{FC} \quad (4-1)$$

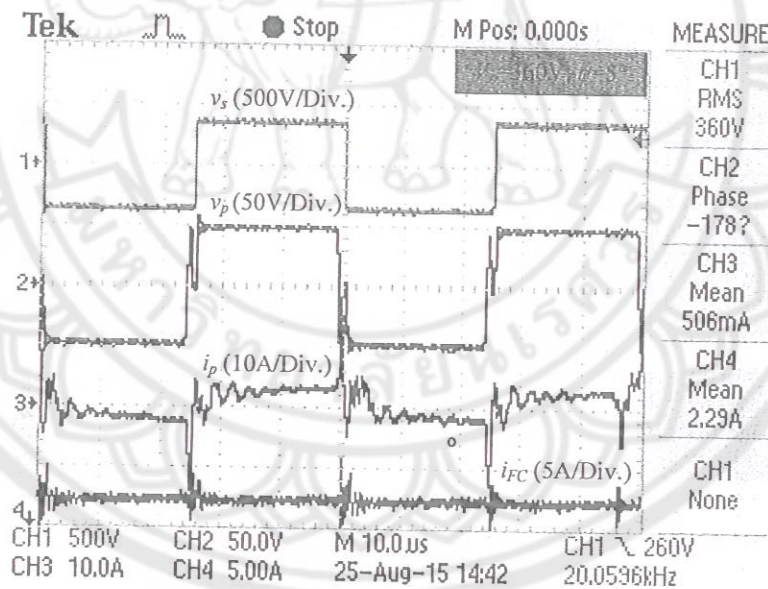
$$P_o = V_o I_o \quad (4-2)$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \quad (4-3)$$

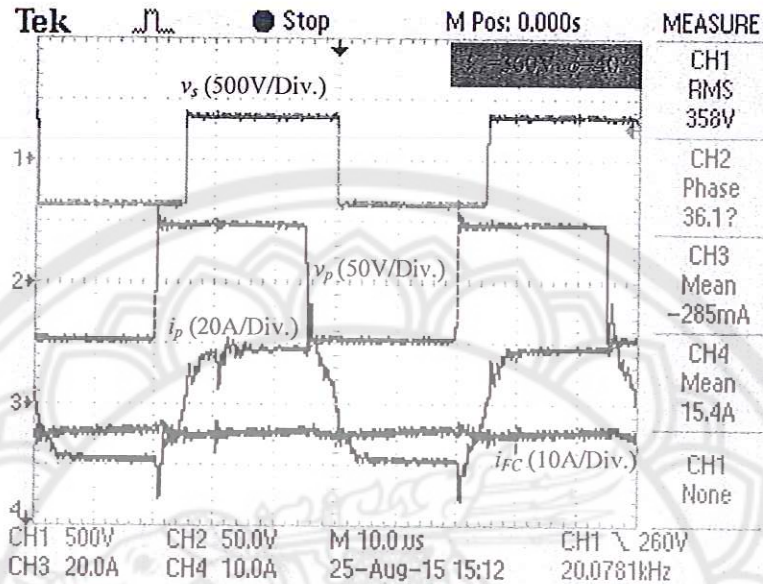


ภาพที่ 5-1 วงจรทดสอบการทำงานของวงจร DAB กับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 48 V

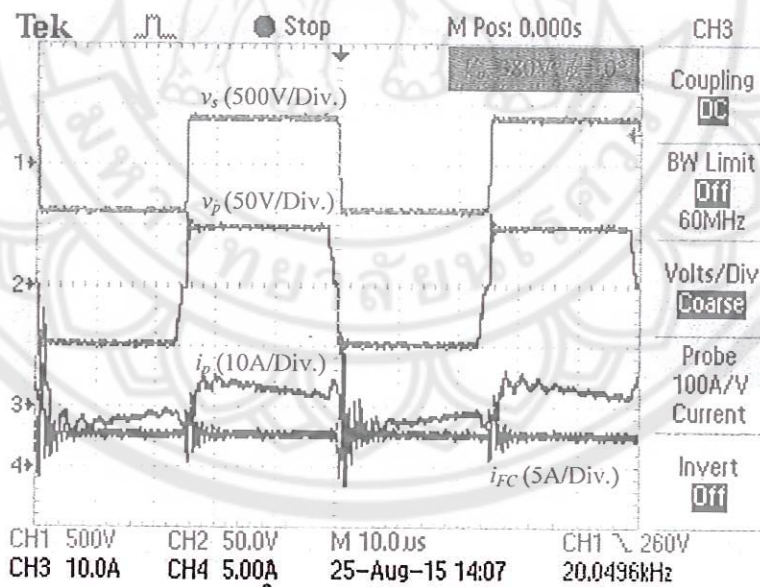
ภาพที่ 5-2 ถึงภาพที่ 5-7 แสดงรูปคลื่นแรงดัน v_p , v_s , และรูปคลื่นกระแส i_p , i_{FC} ที่มุม ϕ ค่าต่ำสุดและสูงสุดที่วงจรสามารถทำงานได้ โดยที่ V_o มีค่าเท่ากับ 360 V, 380 V และ 400 V ส่วนภาพที่ 5-8 แสดงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจร DAB เปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีคำนวณจากสมการที่ (2-23) และภาพที่ 5-9 แสดงค่าประสิทธิภาพของวงจร



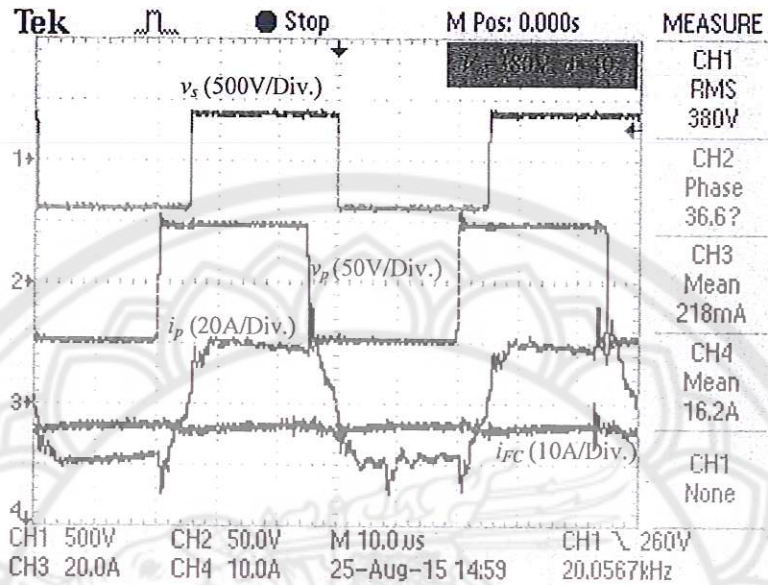
ภาพที่ 5-2 รูปคลื่นแรงดัน v_p , v_s , และรูปคลื่นกระแส i_p , i_{FC} เมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงขนาด 48 V ที่ $V_o = 360$ V และ $\phi = 5^\circ$



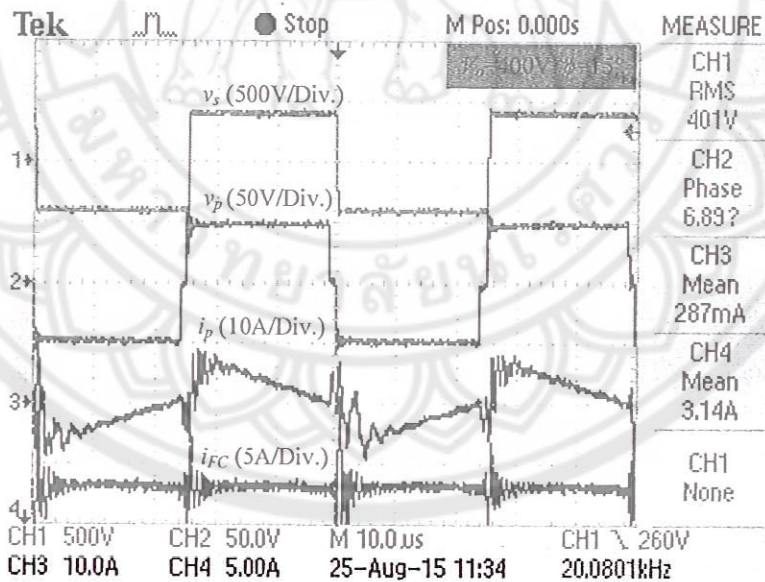
ภาพที่ 5-3 รูปคลื่นแรงดัน v_p , v_s , และรูปคลื่นกระแส i_p , i_{FC} เมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงขนาด 48 V ที่ $V_o = 360$ V และ $\phi = 40^\circ$



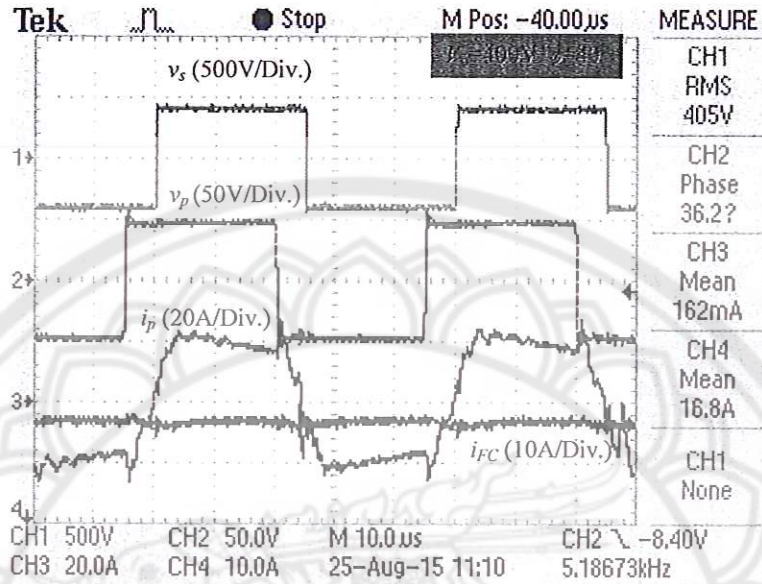
ภาพที่ 5-4 รูปคลื่นแรงดัน v_p , v_s , และรูปคลื่นกระแส i_p , i_{FC} เมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงขนาด 48 V ที่ $V_o = 380$ V และ $\phi = 10^\circ$



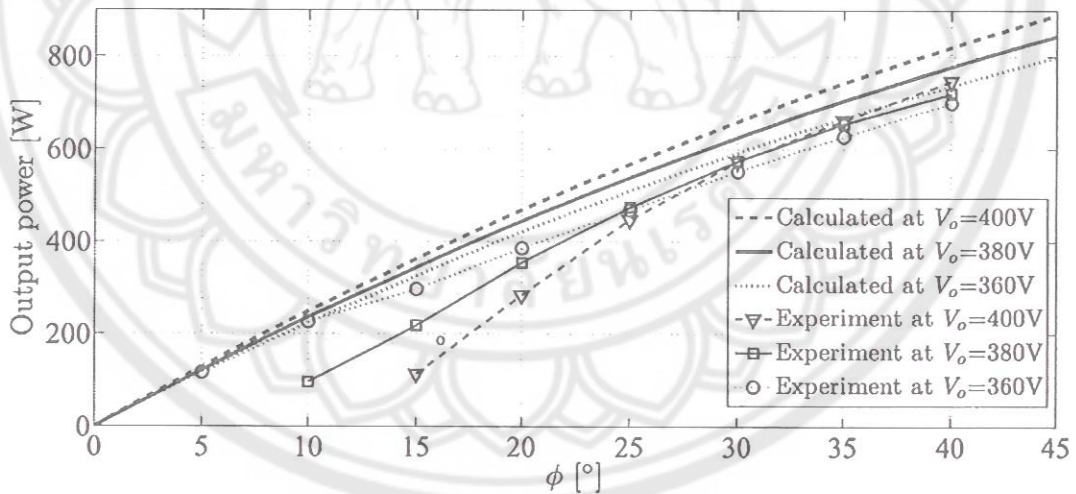
ภาพที่ 5-5 รูปคลื่นแรงดัน v_p , v_s , และรูปคลื่นกระแส i_p , i_{FC} เมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงขนาด 48 V ที่ $V_o = 380$ V และ $\phi = 40^\circ$



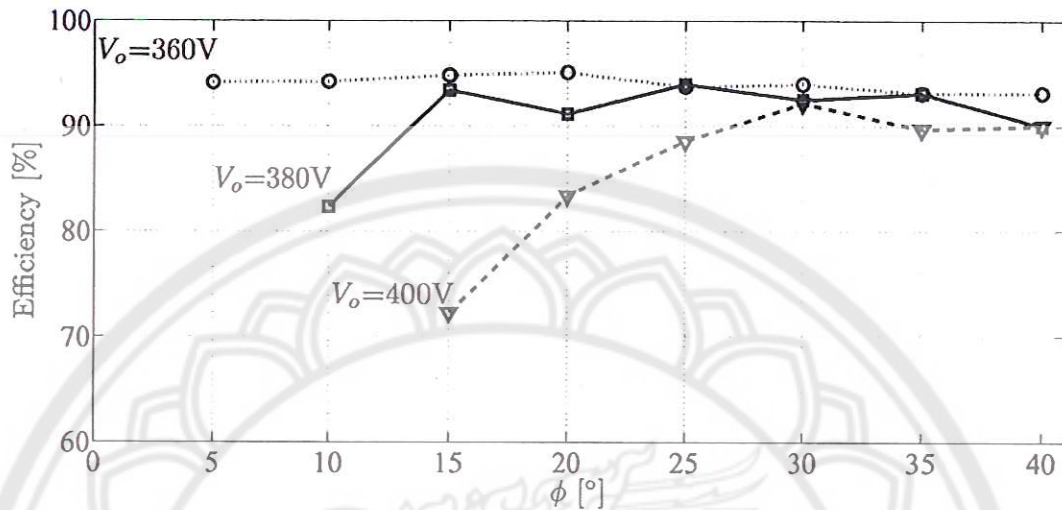
ภาพที่ 5-6 รูปคลื่นแรงดัน v_p , v_s , และรูปคลื่นกระแส i_p , i_{FC} เมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงขนาด 48 V ที่ $V_o = 400$ V และ $\phi = 15^\circ$



ภาพที่ 5-7 รูปคลื่นแรงดัน v_p , v_s , และรูปคลื่นกระแส i_p , i_{FC} เมื่อทดสอบกับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงขนาด 48 V ที่ $V_o = 400$ V และ $\phi = 40^\circ$



ภาพที่ 5-8 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจร DAB จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 48 V

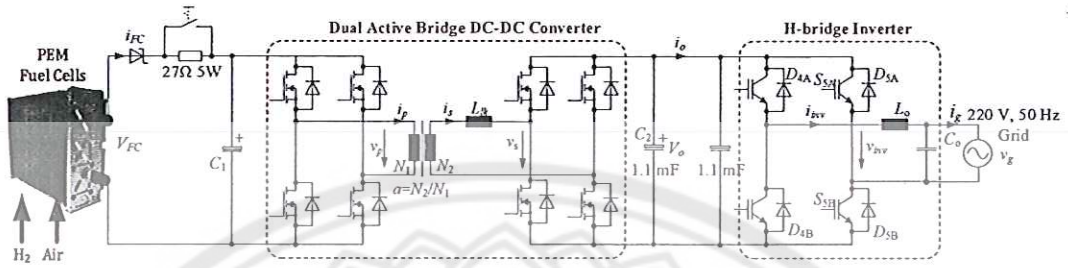


ภาพที่ 5-9 ประสิทธิภาพของวงจร DAB เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 48 V

5.2 การทดสอบการทำงานของวงจร DAB ร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง

หลังจากที่ได้ทดสอบวงจร DAB กับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงจนมั่นใจว่าวงจร DAB สามารถทำงานได้สอดคล้องกับทฤษฎี ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองวงจร DAB ร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง รุ่น H-1000 ที่มีรายละเอียดดังภาพที่ 5-10 โดยที่ตัวต้านทานขนาด 27Ω $5 W$ ต่ออนุกรมกับเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อป้องกันกระแสกระชากขณะที่เริ่มต่อเซลล์เชื้อเพลิงกับวงจร DAB และถูกตัดวงจรโดยสวิตช์ดังภาพเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว ส่วนไดโอดแบบ Schottky ซึ่งมีแรงดันตกคร่อมต่ำเพียงประมาณ $0.5 V$ สำหรับป้องกันกระแสไหลย้อนกลับเข้าเซลล์เชื้อเพลิง ส่วนการวัดค่ากระแสและแรงดันของวงจร DAB ในการทดลองนี้ใช้วิธีการและเครื่องมือชุดเดียวกันเหมือนกับการทดลองในหัวข้อก่อนหน้า ภาพที่ 5-11 แสดงภาพถ่ายของระบบต้นแบบที่สร้างขึ้น

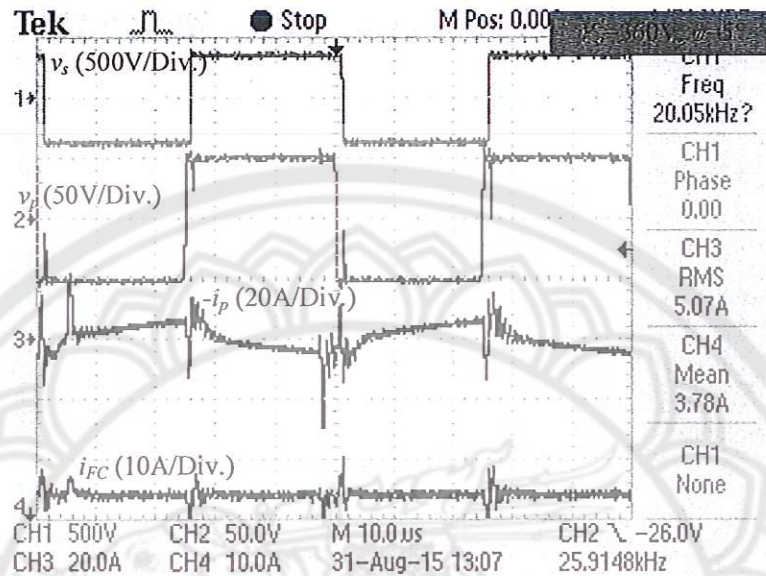
ภาพที่ 5-12 ถึงภาพที่ 5-17 แสดงรูปคลื่นแรงดัน v_p , v_s , และรูปคลื่นกระแส i_p , i_{FC} ของวงจร DAB เมื่อต่อร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง H-1000 ที่มุม ϕ ค่าต่ำสุดและสูงสุดที่วงจรสามารถทำงานได้ โดยที่ V_o มีค่าเท่ากับ $360 V$, $380 V$ และ $400 V$ ส่วนภาพที่ 5-18 และภาพที่ 5-19 แสดงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและค่าประสิทธิภาพของวงจร DAB เมื่อต่อใช้งานร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง



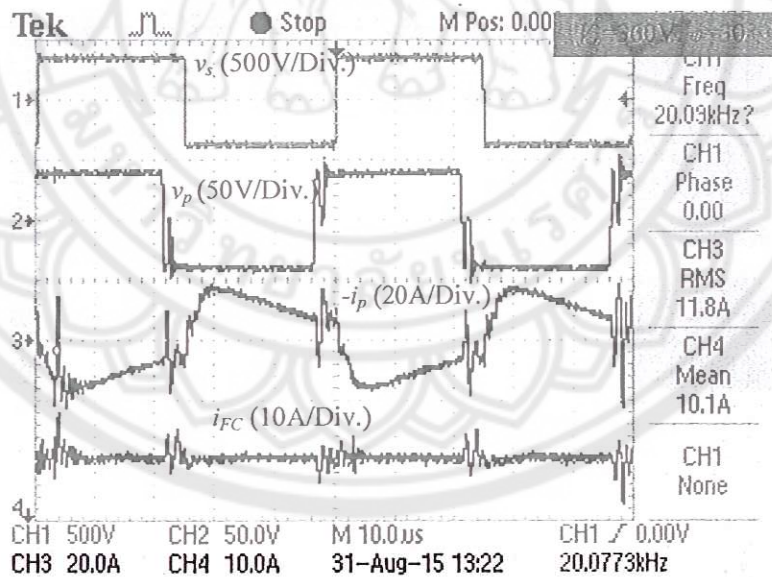
ภาพที่ 5-10 วงจรทดสอบการทำงานของวงจร DAB กับเซลล์เชื้อเพลิงรุ่น H-1000



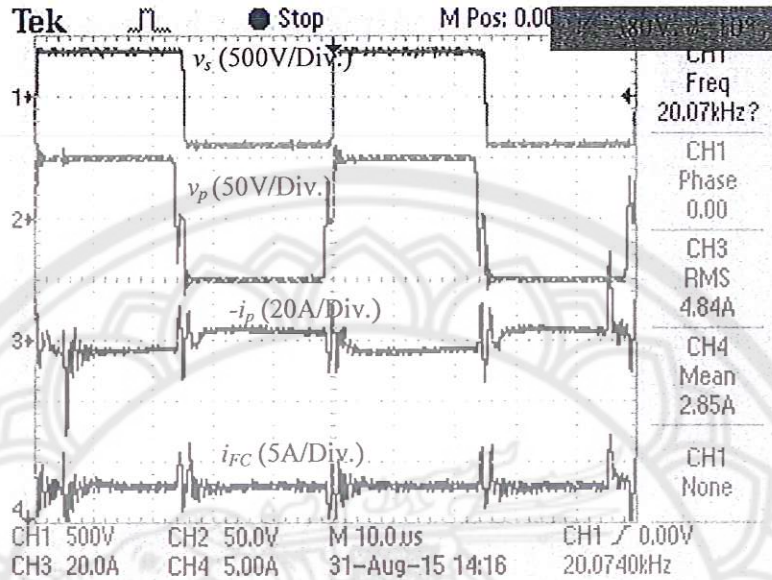
ภาพที่ 5-11 ระบบทดสอบต้นแบบวงจรแปลงผันกระแสตรงแบบ DAB



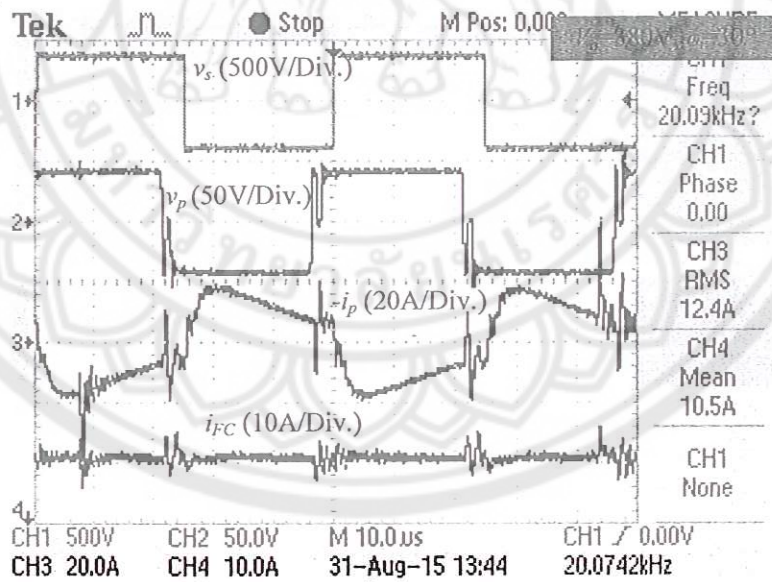
ภาพที่ 5-12 รูปคลื่นแรงดัน v_p , v_s , และรูปคลื่นกระแส $-i_p$, i_{FC} เมื่อทดสอบกับเซลล์เชื้อเพลิง ที่ $V_o = 360$ V และ $\phi = 5^\circ$



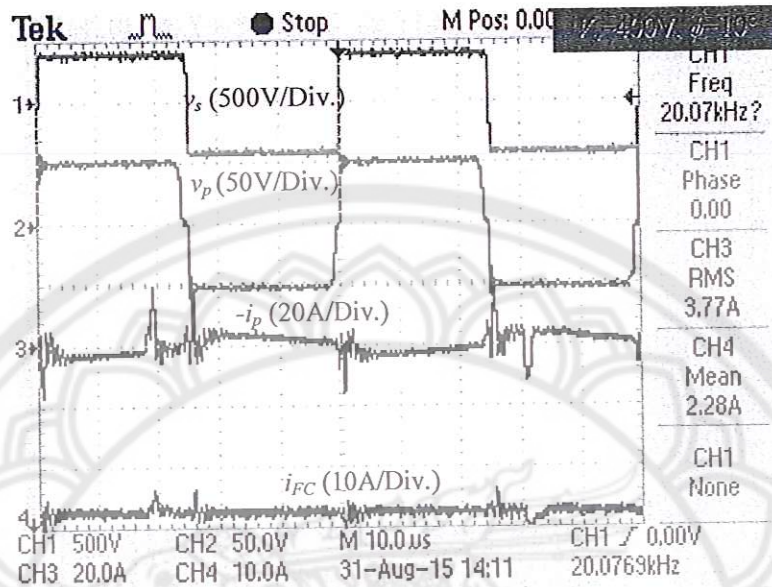
ภาพที่ 5-13 รูปคลื่นแรงดัน v_p , v_s , และรูปคลื่นกระแส $-i_p$, i_{FC} เมื่อทดสอบกับเซลล์เชื้อเพลิง ที่ $V_o = 360$ V และ $\phi = 30^\circ$



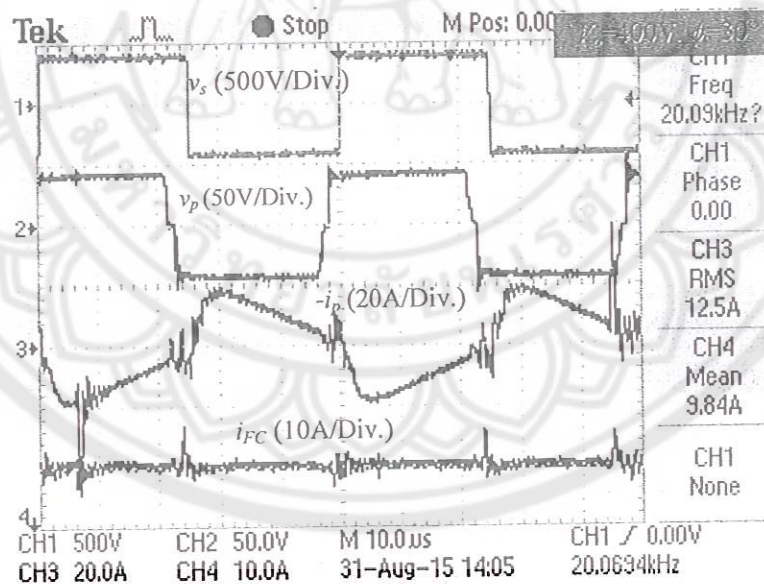
ภาพที่ 5-14 รูปคลื่นแรงดัน v_p , v_s , และรูปคลื่นกระแส $-i_p$, i_{FC} เมื่อทดสอบกับเซลล์เชื้อเพลิง ที่ $V_o = 380$ V และ $\phi = 10^\circ$



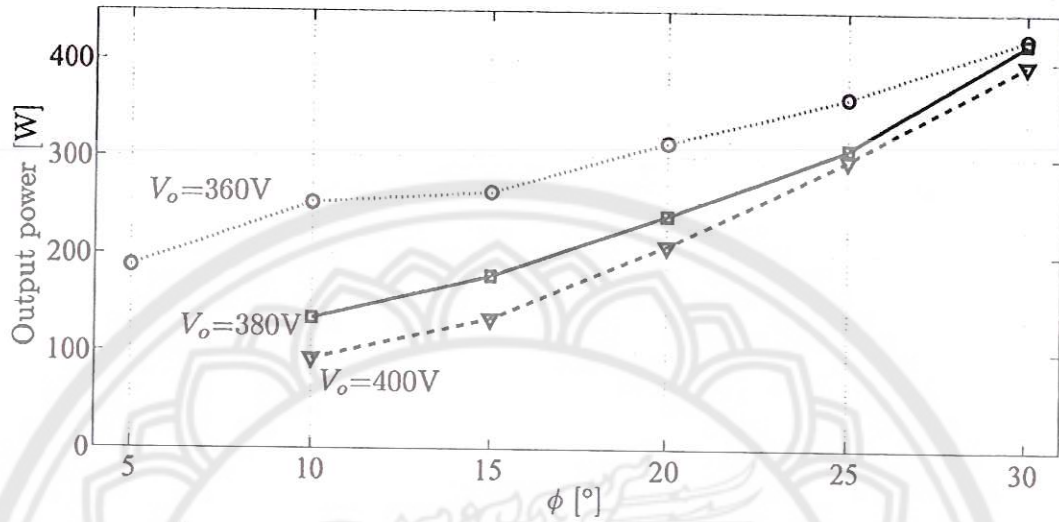
ภาพที่ 5-15 รูปคลื่นแรงดัน v_p , v_s , และรูปคลื่นกระแส $-i_p$, i_{FC} เมื่อทดสอบกับเซลล์เชื้อเพลิง ที่ $V_o = 380$ V และ $\phi = 30^\circ$



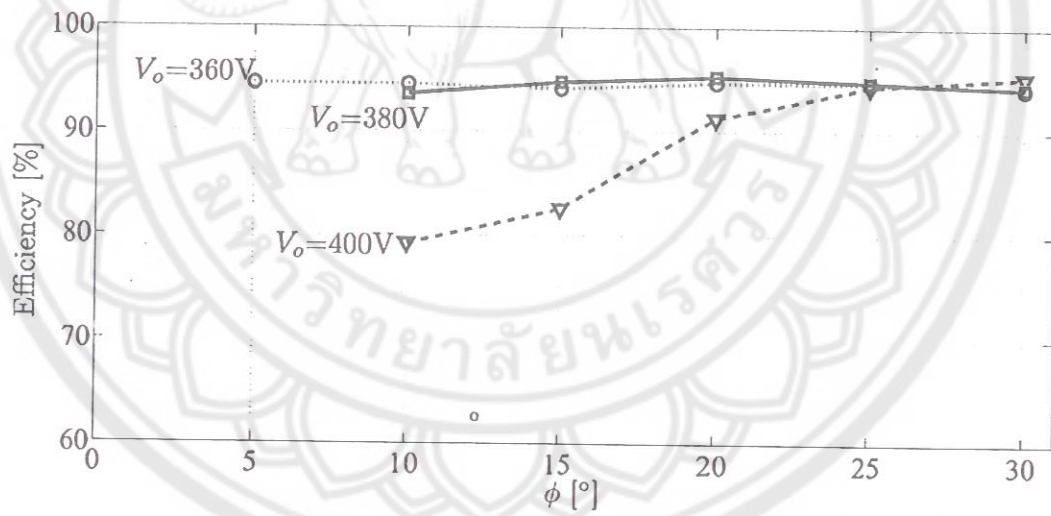
ภาพที่ 5-16 รูปคลื่นแรงดัน v_p , v_s , และรูปคลื่นกระแส $-i_p$, i_{FC} เมื่อทดสอบกับเซลล์เชื้อเพลิง ที่ $V_o = 400$ V และ $\phi = 10^\circ$



ภาพที่ 5-17 รูปคลื่นแรงดัน v_p , v_s , และรูปคลื่นกระแส $-i_p$, i_{FC} เมื่อทดสอบกับเซลล์เชื้อเพลิง ที่ $V_o = 400$ V และ $\phi = 30^\circ$



ภาพที่ 5-18 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจร DAB เมื่อต่อร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง

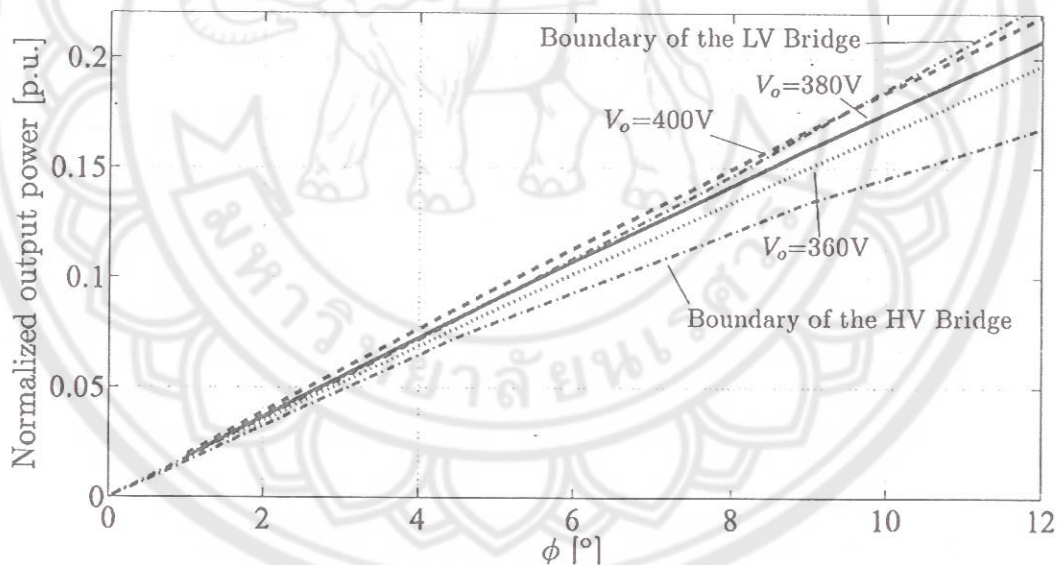


ภาพที่ 5-19 ประสิทธิภาพของวงจร DAB เมื่อต่อร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง

5.3 การอภิปรายผลการวิจัย

5.3.1 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและประสิทธิภาพของวงจรต้นแบบ

จากภาพที่ 5-8 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่มุม $\phi = 40^\circ$ ซึ่งสอดคล้องกับค่าทางทฤษฎีโดยที่ กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันเอาต์พุตสูงขึ้นหรือทำงานอยู่ในโหมดขยายแรงดัน แต่เมื่อ ϕ มีค่าต่ำกว่า 30° กำลังไฟฟ้าที่ $V_o = 360\text{ V}$ ซึ่ง $d \approx 1$ ทำให้วงจร DAB ทำงานอยู่ในโหมด ZVS ตลอดช่วง มุม ϕ สามารถสังเกตได้จากรูปคลื่นกระแสในภาพที่ 5-12 และภาพที่ 5-13 มีค่าสูงกว่าที่ $V_o = 380\text{ V}$ และ $V_o = 400\text{ V}$ ซึ่ง $d = 1.064$ และ $d = 1.12$ ทำให้วงจร DAB ทำงานแบบ Hard switching ในช่วงที่ มุม ϕ มีค่าต่ำๆ ดังแสดงในภาพที่ 5-20 ซึ่งส่งผลให้กำลังไฟฟ้าจากอินพุตสูญเสียในมอสเฟตและไดโอด การทำงานแบบ Hard switching นี้ สามารถสังเกตได้จากรูปคลื่นของ กระแส i_p ในภาพที่ 5-4 และภาพที่ 5-6 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงศูนย์ ณ เวลาที่แรงดัน v_p เปลี่ยนทิศทาง



ภาพที่ 5-20 ขอบเขตเงื่อนไข ZVS ของวงจร DAB เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 48 V

จากการทดลองเมื่อต่อวงจร DAB ร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงพบว่าที่มุม $\phi = 30^\circ$ ทำให้แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงเหลือประมาณ 42-43 V และมีกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตประมาณ 400 W ภาพที่ 5-18 ซึ่งเกิดจากการเอมสภาพของเซลล์เชื้อเพลิงดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.1

นอกจากนั้นเมื่อปรับแรงดัน V_0 เพิ่มขึ้นทำให้กำลังไฟฟ้านลดลง ซึ่งในการทดลองจริงได้ทำการทดสอบวงจร DAB ร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงที่ $V_0 = 360\text{ V}$, 380 V และ 400 V ตามลำดับ ทำให้ความชื้นในเมมเบรนค่อยๆ มีค่าลดลงในระหว่างการทดลอง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าลดลงดังกล่าว ปรากฏการณ์ Hard switching ยังคงพบได้ที่มุม $\phi = 10^\circ$ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากกระแส i_p ในภาพที่ 5-16

การทำงานแบบ Hard switching เมื่อมุม ϕ มีค่าต่ำ สำหรับแรงดัน V_0 ที่มีค่าสูง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าต่ำกว่า 90% ในช่วงการทำงานดังกล่าวดังแสดงในภาพที่ 5-9 และภาพที่ 5-19 ดังนั้นถ้าหากต้องการให้วงจร DAB มีประสิทธิภาพสูงที่มุม ϕ มีค่าต่ำ และ $V_0 = 400\text{ V}$ ตามวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงไฟฟ้าควรมีค่ามากกว่าค่าปัจจุบันที่ $a = 7.33$ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

นอกจากการทำงานแบบ Hard switching จากการทดลองยังปรากฏการณ์ที่ไม่ได้กล่าวไว้ในทฤษฎีคือ Dead time [39] ในแรงดัน v_p และ v_s ซึ่งเกิดจากการตั้งค่า Interlocking time ในวงจรขับเคลื่อนเพื่อป้องกันไม่ให้ออสเฟตตัวบนและตัวล่างทำงานพร้อมกัน ในงานวิจัยนี้ได้ตั้งเวลาดังกล่าวเท่ากับ $1\ \mu\text{s}$ ที่วงจรขับเคลื่อน SKHI22B และไม่มี Interlocking time ในสัญญาณ PWM จากไมโครคอนโทรลเลอร์ แต่เนื่องจากออสเฟตทำงานเร็วกว่า $1\ \mu\text{s}$ ทำให้รูปคลื่นของ v_p และ v_s ไม่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่สมบูรณ์เช่นในภาพที่ 5-17 ซึ่งปรากฏการณ์ Dead time ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจร DAB มีค่าต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีดังที่ได้เปรียบเทียบไว้ในภาพที่ 5-8 และอาจทำให้เกิดการ Oscillation ของกระแส i_p ผ่านไดโอดใน LV Bridge ทำให้ v_p ลดลงเป็นศูนย์ในช่วงระยะเวลาสั้นดังเช่นในภาพที่ 5-15

5.3.2 ผลของหม้อแปลงความถี่สูงต่อการทำงานของวงจร DAB

จากการทดลองพบว่าเมื่อปรับมุม ϕ มากกว่า 40° เมื่อใช้แหล่งจ่ายแรงดันขนาด 48 V บ้อนให้กับวงจร DAB พบว่ากระแส i_p มีค่าสูงขึ้น จนกระทั่งวงจรขับเคลื่อนส่งสัญญาณ Error มาที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากความเข้มสนามแม่เหล็กในแกนหม้อแปลงเกิดการ

อิมตัว ส่งผลให้ค่า Magnetizing inductance มีค่าลดลง จนเป็นสาเหตุทำให้กระแสมีค่าสูงขึ้น ดังกล่าว สาเหตุของปรากฏการณ์อิมตัวของความสนามแม่เหล็กนี้เกิดจากจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิมีค่าน้อยกว่าค่าจากการคำนวณ โดยที่อธิบายได้จากสมการของฟาราเดย์ดังนี้

$$v_p = N_1 A_c \frac{dB}{dt} \quad (5-4)$$

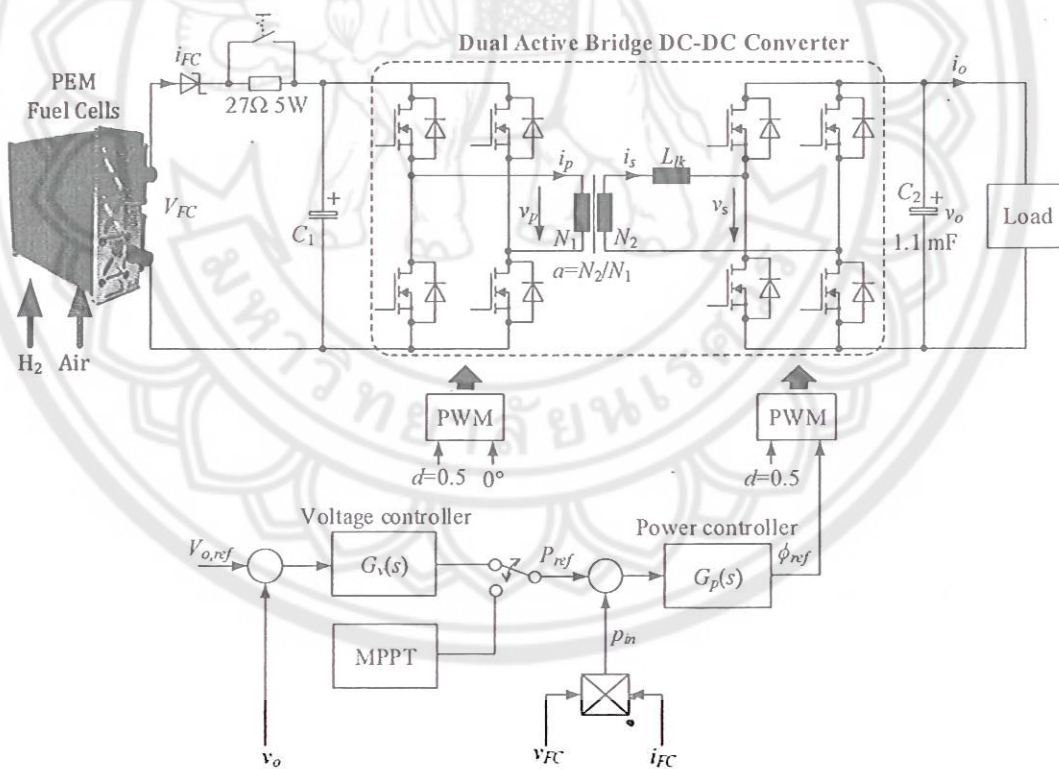
เมื่อแรงดันที่ขดลวดปฐมภูมิมีค่าคงที่ แต่จำนวนรอบของขดลวดมีค่าน้อยลงทำให้ความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น จากการออกแบบได้เลือกให้ $\Delta B = 0.27 \text{ T}$ และ $N_1 = 12$ รอบ แต่จากข้อมูลทางเทคนิคพบว่าความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.41 T ที่อุณหภูมิ 100°C และจากในหัวข้อที่ 4.2 ขนาดของแกนหม้อแปลงที่คำนวณได้ $K_{g,elec}$ มีค่าใกล้เคียงกับ $K_{g,core}$ ของแกน ETD59 ดังนั้นจึงควรเลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดใหญ่กว่านี้เพื่อให้มีช่องว่างในการพันขดลวดมากขึ้น โดยจะต้องใช้แกนเฟอร์ไรต์รูปทรงอื่น เช่น แกน Toroid เพราะ ETD59 เป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดของแกนรูปทรง ETD

นอกจากปัญหาขนาดของแกนเฟอร์ไรต์และขดลวดของหม้อแปลงไม่เหมาะสมแล้ว ผู้วิจัยพบว่าลักษณะการทำงานของหม้อแปลงความถี่สูงในวงจร DAB มีความแตกต่างจากหม้อแปลงความถี่สูงทั่วไป ซึ่งขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในวงจรแปลงผันชนิดอื่น เช่น วงจร Full bridge จะจ่ายกำลังให้กับโหลดที่เป็นลักษณะพาสซีฟ (Passive) ซึ่งโดยทั่วไปเป็นวงจรเรียงกระแส ซึ่งทำให้แรงดันที่ขดลวดทั้งสองมีมุมเฟสที่ใกล้เคียงกัน แต่สำหรับหม้อแปลงในวงจร DAB ขดทั้งสองด้านของหม้อแปลงไฟฟ้าถูกบ้อนด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีมุมต่างเฟสเท่ากับ ϕ หรืออาจกล่าวได้ว่าโหลดของหม้อแปลงในวงจร DAB เป็นแบบแอคทีฟ (Active load) ดังนั้นการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงด้วยวิธี K_g [34] ซึ่งเหมาะสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีโหลดแบบพาสซีฟจึงไม่เหมาะสำหรับการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับวงจร DAB

5.3.3 ระบบควบคุมวงจรแปลงผันกระแสตรงแบบ DAB

ระบบควบคุมในงานวิจัยนี้เป็นแบบรูปเปิดซึ่งใช้สำหรับทดสอบการทำงานในเบื้องต้นของวงจร DAB แต่ถ้าหากพัฒนาต่อเพื่อใช้สำหรับผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงหรือจากแหล่งจ่าย

พลังงานทดแทนชนิดอื่น เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ วงจร DAB จำเป็นแบบรูปปิดดังภาพที่ 5-21 ซึ่งเป็นแบบคาสเคด (Cascade control system) โดยที่รูปในสุดเป็นระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจร DAB ที่มีสัญญาณ ϕ_{ref} เป็นสัญญาณเอาต์พุตสำหรับสั่งงานการสร้างสัญญาณ PWM ในกรณีที่โหลดของวงจรเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบอิสระหรือเป็นโหลดกระแสตรงซึ่งจำเป็นต้องมีระบบควบคุมแรงดันเอาต์พุต แต่ในกรณีที่โหลดเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกับสายส่งซึ่งแรงดันเอาต์พุตของวงจร DAB ต่อกับแรงดันอินพุตของอินเวอร์เตอร์ และอินเวอร์เตอร์มักจะมีการควบคุมแรงดันอยู่แล้ว ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องควบคุมแรงดันเอาต์พุตในระบบควบคุมของวงจร DAB แต่ควรจะมีระบบติดตามกำลังไฟสูงสุดของแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนเหมือนกับที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายพลังงานมาใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุด



ภาพที่ 5-21 ระบบควบคุมแบบรูปปิดสำหรับวงจรแปลงผันกระแสตรง DAB

บทที่ 6 บทสรุป

6.1 สรุปผลการวิจัย

วงจรแปลงผันกำลังแบบ Dual Active Bridge (DAB) ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้มีแรงดันอินพุตอยู่ระหว่าง 40 V ถึง 65 V และมีแรงดันเอาต์พุตอยู่ระหว่าง 360 V ถึง 400 V โดยมุมต่างเฟสระหว่างวงจร Bridge ทั้งสองอยู่ระหว่าง 0° ถึง 40° หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานที่ความถี่ 20 kHz มีอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดเท่ากับ 7.33 สามารถส่งกำลังไฟฟ้าจากแรงดันอินพุตไปที่โหลดได้สูงสุดประมาณ 750 W เมื่อต่อใช้งานกับแหล่งจ่ายแรงดันขนาด 48 V 20 A ทำให้อัตราขยายแรงดันของวงจร DAB มีค่าใกล้เคียงหนึ่งที่แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 360 V เมื่อจ่ายโหลดค่าต่ำ ส่งผลให้วงจร DAB ทำงานในโหมด Zero Voltage Switching (ZVS) ตลอดย่านการทำงาน โดยมีประสิทธิภาพอยู่ระหว่าง 93% ถึง 94%

เมื่อต่อใช้งานร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM รุ่น H-1000 พบว่ากำลังไฟฟ้าที่เอาต์พุตสูงสุดมีค่าประมาณ 400 W เนื่องจากการเสื่อมสภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ที่แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 360 V วงจร DAB ทำงานในโหมด ZVS ตลอดพิสัยแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง โดยมีประสิทธิภาพอยู่ระหว่าง 94% ถึง 95%

สาเหตุหลักที่ทำให้วงจร DAB จ่ายกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตได้สูงสุด 750 W และมีประสิทธิภาพดีที่สุดที่แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 360 V ซึ่งต่ำกว่าวัตต์ประสงค์ที่ตั้งไว้ที่ 1,000 W และแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 400 V เนื่องจากข้อจำกัดของแกนเฟอร์ไรต์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่หาซื้อได้จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเป็นหัวใจสำคัญของวงจรแปลงผันกระแสตรงแบบ DAB

6.2 ปัญหาและข้อเสนอนะ

ควรออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงขึ้นมาใหม่ โดยอาจเลือกใช้แกนหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ขึ้นหรือมีค่าความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กที่สูงขึ้น นอกจากนั้นต้องพิจารณาวิธีการออกแบบวิธีใหม่เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าในวงจร DAB มีโพลเป็นแบบ Active ซึ่งแตกต่างจากหม้อแปลงไฟฟ้าในวงจรแปลงผันชนิดอื่นที่เป็น Passive load

ควรเขียนโปรแกรมควบคุมแบบลูปปิดเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้า แรงดันเอาต์พุต หรือมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด นอกจากนั้นควรพิจารณาเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์หรือตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่มีความเร็วสูงขึ้นเพื่อให้การสร้างสัญญาณ PWM มีความละเอียดมากขึ้น

ควรต่อใช้งานร่วมกับอุปกรณ์สะสมพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ หรืออุลตราคาปาซิเตอร์ ผ่านทางขดลวดดัดยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ทำให่วงจรแปลงผันที่ขึ้นเป็นแบบ Triple active bridge และทางด้านเอาต์พุตควรต่อร่วมกับอินเวอร์เตอร์แบบอิสระหรือเชื่อมต่อกับสายส่ง

เอกสารอ้างอิง

- [1] EG&G Technical Services Inc., *Fuel Cell Handbook*, 7th ed.: U.S. Department of Energy, 2004.
- [2] Carl-Jochen Winter, "Hydrogen energy — Abundant, efficient, clean: A debate over the energy-system-of-change," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, pp. S1-S52, 2009.
- [3] U.S. Department of Energy. Fuel Cell Electric Vehicles [Online]. Available: http://www.afdc.energy.gov/vehicles/fuel_cell.html
- [4] K. Agbossou, M. Kolhe, J. Hamelin, and T. K. Bose, "Performance of a stand-alone renewable energy system based on energy storage as hydrogen," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, pp. 633-640, Sep 2004.
- [5] U.S. Department of Energy. Calling All Fuel Cells [Online]. Available: <http://energy.gov/articles/calling-all-fuel-cells>
- [6] P. Thounthong, B. Davat, S. Rael, and P. Sethakul, "Fuel Cell High Power Applications," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 3, pp. 32-46, Mar 2009.
- [7] P. Thounthong, B. Davat, S. Rael, and P. Sethakul, "Fuel Starvation: Analysis of a PEM fuel-cell system," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 15, pp. 52-59, Jul-Aug 2009.
- [8] A. Taniguchi, T. Akita, K. Yasuda, and Y. Miyazaki, "Analysis of electrocatalyst degradation in PEMFC caused by cell reversal during fuel starvation," *Journal of Power Sources*, vol. 130, pp. 42-49, May 3 2004.
- [9] Randall S. Gemmen, "Analysis for the Effect of Inverter Ripple Current on Fuel Cell Operating Condition," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 125, pp. 576-585, 2003.
- [10] J. S. Lai, "Power conditioning circuit topologies," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 3, pp. 24-34, 2009.
- [11] Horizon Fuel Cell Technologies, *H-1000 Fuel Cell Stack User Manual v2.0*, 2009.
- [12] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2003.

- [13] F. Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, 2nd ed. London: Academic Press, 2013.
- [14] F. Hashemi, S. Rowshanzamir, and M. Rezakazemi, "CFD simulation of PEM fuel cell performance: Effect of straight and serpentine flow fields," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 55, pp. 1540-1557, 2012.
- [15] Future Energies. FUEL CELL POWER [Online]. Available: <http://www.futureenergies.com/modules.php?op=modload&name=News&file=article&sid=959>
- [16] R. W. A. A. De Doncker, D. M. Divan, and M. H. Kheraluwala, "A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high-power applications," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 63-73, 1991.
- [17] Jang Minsoo, M. Ciobotaru, and V. G. Agelidis, "A Single-Phase Grid-Connected Fuel Cell System Based on a Boost-Inverter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, pp. 279-288, 2013.
- [18] R. Gopinath, *et al.*, "Development of a low cost fuel cell inverter system with DSP control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, pp. 1256-1262, 2004.
- [19] X. Kong and A. M. Khambadkone, "Analysis and implementation of a high efficiency, interleaved current-fed full bridge converter for fuel cell system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, pp. 543-550, Mar 2007.
- [20] F. Z. Peng, H. Li, G. J. Su, and J. S. Lawler, "A new ZVS bidirectional DC-DC converter for fuel cell and battery application," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, pp. 54-65, Jan 2004.
- [21] A. K. Jain and R. Ayyanar, "PWM Control of Dual Active Bridge: Comprehensive Analysis and Experimental Verification," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, pp. 1215-1227, Apr 2011.
- [22] H. Tao, A. Kotsopoulos, J. L. Duarte, and M. A. M. Hendrix, "Family of multiport bidirectional DC-DC converters," *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 153, pp. 451-458, 2006.

- [23] CHUANHONG ZHAO, "Isolated Three-port Bidirectional DC-DC Converter," Doctor of Sciences, ETH Zürich, Zürich, 2010.
- [24] Tao Haimin, A. Kotsopoulos, J. L. Duarte, and M. A. M. Hendrix, "Transformer-coupled multiport ZVS bidirectional DC-DC converter with wide input range," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, pp. 771-781, 2008.
- [25] A. Saadi, M. Becherif, A. Aboubou, and M. Y. Ayad, "Comparison of proton exchange membrane fuel cell static models," *Renewable Energy*, vol. 56, pp. 64-71, 2013.
- [26] J. C. Amphlett, *et al.*, "Performance Modeling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell," *Journal of The Electrochemical Society* vol. 142, pp. 1-8, 1995.
- [27] J. Kim, S. M. Lee, S. Srinivasan, and C. E. Chamberlin, "Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance with an Empirical Equation," *Journal of The Electrochemical Society* vol. 142, pp. 2670-2674 1995.
- [28] Caisheng Wang, M. H. Nehrir, and S. R. Shaw, "Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, pp. 442-451, 2005.
- [29] F. Laurencelle, *et al.*, "Characterization of a Ballard MK5-E Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack," *Fuel Cells*, vol. 1, pp. 66-71, 2001.
- [30] S. Somkun, C. Sirisamphanwong, and S. Sukchai, "A DSP-based interleaved boost DC-DC converter for fuel cell applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, pp. 6391-6404, 2015.
- [31] Microsemi Power Products Group, *APT10HM19FT3G– Rev 1*, July 2006.
- [32] Microsemi Power Products Group, *APTC60HM83FT2G– Rev 1*, October 2012.
- [33] Semikron, *Driver Electronic – PCB Drivers*, 2008.
- [34] R. W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, 2nd ed. New York: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [35] EPCOS AG., *Ferrites and accessories SIFERRIT material N97*, 2006.
- [36] EPCOS AG., *ETD 59/31/22 Core*, 2001.
- [37] EPCOS AG., *Ferrites and accessories SIFERRIT material N87*, 2006.

- [38] Texas Instruments, *TMS320F28030, TMS320F28031, TMS320F28032, TMS320F28033, TMS320F28034, TMS320F28035 Piccolo Microcontrollers*, 2012.
- [39] Zhao Biao, Song Qiang, Liu Wenhua, and Sun Yandong, "Dead-Time Effect of the High-Frequency Isolated Bidirectional Full-Bridge DC-DC Converter: Comprehensive Theoretical Analysis and Experimental Verification," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, pp. 1667-1680, 2014.





Study of an Isolated DC-DC Converter for Fuel Cell Applications

Sakda Somkun*, Prabhuraj S., and Chatchai Sirisamphanwong

School of Renewable Energy Technology, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand

*Corresponding author: sakdaso@nu.ac.th

Abstract

Production and storage of hydrogen using excess supply is a promising solution to overcome the intermittency of renewable energy sources. Fuel cells are then used to convert the stored energy in the form of hydrogen back to electricity. Power conditioning circuits are usually required to match up the unregulated low fuel cell output voltage with the load.

This work presents the design and implementation of a dual active bridge (DAB) DC-DC converter as a power conditioning circuits for a 1 kw polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell stack as illustrated in Fig. 1. Each bridge produces a square wave voltage applied to the primary and secondary windings of the high frequency transformers with a phase shift of ϕ . The voltage conversion ratio can be easily selected via the transformer turn ratio, $a = N_2/N_1$. The transferred power is then expressed as

$$P_{FC} = \frac{aV_{FC}V_d}{2\pi f_s L_{lt}} \phi \left[1 - \frac{\phi}{\pi} \right] \quad (1)$$

where f_s is the switching frequency and L_{lt} is the total leakage inductance and the auxiliary inductance referred to the secondary side. The converter can be operated in the zero voltage switching (ZVS) mode resulting high efficiency operation.

The transformer was constructed on ETD59 ferrite cores with $a = 6.6$ and $L_{lt} = 730 \mu\text{H}$ and was operated at 20 kHz. Filtering capacitors, C_1 and C_2 were assembled from electrolytic capacitors to form the capacitance of 4,700 μF and 2,200 μF respectively. Fig. 2 shows the waveforms of v_1 , v_2 , i_p and i_{FC} when $\phi = 38.9^\circ$, $V_{FC} = 48.5 \text{ V}$ and $V_d = 360 \text{ V}$. A power of 795 W flows from the stack to the inverter via the DAB converter, which show good agreement with the theoretical expression in (1).

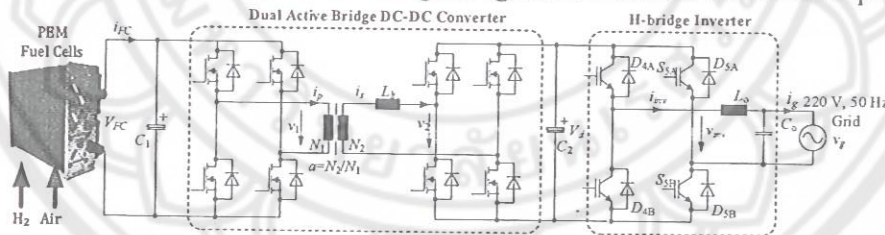


Fig. 1 Test circuits for the DAB DC-DC converter

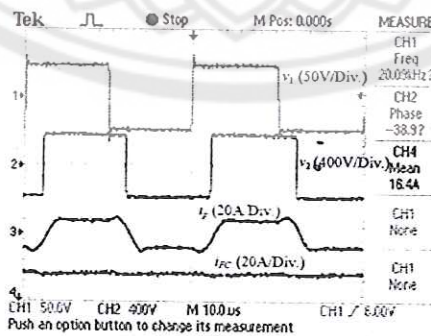


Fig. 2 Key waveforms of the DAB DC-DC converter when $\phi = 38.9^\circ$, $V_{FC} = 48.5 \text{ V}$ and $V_d = 360 \text{ V}$.

Keywords: Fuel cells; Power converters; Hydrogen energy.

sakda somkun

From: Energy:World Future Alternatives <dra.research@gmail.com>
Sent: Saturday, August 15, 2015 4:48 PM
To: Acceptance for presentation in the International Conference "Energy: World Future Alternatives"
Subject: Acceptance for presentation in the International Conference "Energy: World Future Alternatives"

Energy :

World Future Alternatives
November 30 - December 2, 2015

at Eka Thotsarot Building and School of Renewable Energy Technology,
Naresuan University, Phitsanulok, Thailand

Paper ID: 44

Paper Title: **Study of an Isolated DC-DC Converter for Fuel Cell Applications**

Authors: **Mr. Sakda Somkun**

Dear Sakda Somkun

Congratulations !

It is our pleasure to inform you that the above paper has been accepted for Oral presentation in the International Conference "Energy: World Future Alternatives" to be held in Phitsanulok, Thailand on November 30-December 2, 2015. You are cordially invited to attend the conference to present your paper.

Please prepare the final version of your paper with the provided template. Please note that the maximum length is limited to 5 pages. The submission deadline for the final paper is on September 15, 2015. Submission guidelines will be announced shortly.

Authors requiring a visa to enter Thailand must start the process for getting it soon. If you require an invitation letter to obtain a visa, please contact the conference secretary at sert@nu.ac.th. Please note that the document for visa application will be issued only to those who have completed the registration with full payment.

Congratulations again on this fine achievement!

We look forward to welcoming you in Phitsanulok in November 2015 for an exciting event.

Sincerely yours,

Technical Program Committee of the International Conference "Energy: World Future Alternatives"



Organized by: Naresuan University

99 Moo 9 Muang District Phitsanulok 65000, Tel & Fax: +(66-55)962 380, Website: www.nu.ac.th
Website: <http://conference.nu.ac.th/energy>, E-mail: russamees@nu.ac.th, yodthongm@nu.ac.th, sert@nu.ac.th