สัญญาเลขที่ MRG4880123

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงจากเซลล์เชื้อเพลิง

1. ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2. ตฤณ แสงสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงแบบใหม่เพื่อใช้ทำหน้าที่แทนระบบเซลล์เชื้อเพลิงจริงในขั้นตอนการออกแบบและทดสอบระบบอินเวอร์เตอร์ที่ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง ภาคกำลังของวงจรที่นำเสนอนี้ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงและวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง ด้วยการทำงานร่วมกันของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทั้งสองและเทคนิคการควบคุมที่เหมาะสม วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถเลียนแบบผลตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิงได้ทุกชนิด อีกทั้งมีแรงดันและกระแสขาออกที่มีคุณภาพสูง งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การจำลองพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้ในประเทศไทยสองชนิด ดังนี้คือ ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนและแบบออกไซด์ของแข็ง

รายงานฉบับนี้ได้นำเสนอ วิธีการวิเคราะห์ วิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิธีการควบคุมสำหรับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงและสำหรับระบบการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ระบบต้นแบบสำหรับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงและระบบการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกจัดสร้างขึ้นเพื่อยืนยันสมรรถนะของภาคกำลังและประสิทธิภาพของภาคควบคุมตามที่นำเสนอ ผลการทดลองที่สำคัญชี้ให้เห็นว่าการทำงานโดยรวมของวงจรที่นำเสนออยู่ในเกณฑ์ที่ดีและสอดคล้องกับวิธีการที่นำเสนอ

Abstract

This research proposes a new fuel cell emulator used to replace a real fuel cell system during the development stage of a fuel-cell inverter system. The power stage of this new fuel cell emulator consists of a current source converter (buck rectifier) and a dc-to-dc buck converter. With the collaboration of these two power electronics circuits and the anticipated control technique, the proposed fuel cell emulator effectively provides both correctly emulated responses for various types of fuel cells and the high-quality output voltage and current. This research mainly focuses on emulating the behavior of two well-known types of fuel cell systems suitable to be applied in Thailand, i.e. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) and Solid Oxide Fuel Cells (SOFC).

This report presents analysis, modeling and control strategy for the proposed systems. To verify their performance, hardware prototypes of the emulator, as well as the inverter system, have been implemented. The experiment results showed that the performance of the proposed fuel cell emulation is exceptional and is consistent with the proposed concept.

สรุปสำหรับผู้บริหาร

Executive Summary

แหล่งพลังงานไฟฟ้าทดแทนที่ดีควรส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด สามรถควบคุมได้ และใช้วัตถุดิบที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ หนึ่งในแหล่งพลังงานไฟฟ้าทดแทนที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ เซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงถือได้ว่าเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีความเป็นไปได้สูงที่จะเข้ามาแทนที่เทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ปัจจุบันได้ อย่างไรก็ตามตัวเซลล์เชื้อเพลิงเองไม่สามารถที่จะผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจได้ กล่าวคือพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจะอยู่ในรูปของไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งยากต่อการจัดการ ยกตัวอย่างเช่น การแปลงระดับแรงดันไฟตรงให้สูงขึ้นหรือต่ำลงนั้นทำได้ยากในทางปฏิบัติ อีกทั้งพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับบ้านพักอาศัย กิจกรรมทางการเกษตร และโรงงานอุตสาหกรรม จะอยู่ในรูปของไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพ จะเป็นตัวการสำคัญในการเพิ่มมูลค่าให้กับพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง อย่างไรก็ตามการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับเซลล์เชื้อเพลิงในประเทศไทยนั้นยังถือได้ว่าน้อยมาก ทำให้ต้องมีการนำเข้าตัวเซลล์เชื้อเพลิงจากต่างประเทศซึ่งมีราคาที่ค่อนข้างสูง รวมทั้งค่าซ่อมบำรุงที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากอายุของอุปกรณ์ต่างๆที่สั้น ทำให้การศึกษาพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงในเมืองไทยทำได้ยาก

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ทำให้การวิจัยและพัฒนาระบบที่สามารถเลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง รวมถึงระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพเป็นที่สนใจอย่างมาก ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวงจรอิเล็กทรอนิกส์แนวใหม่ที่ออกแบบเพื่อให้สามารถเลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงได้หลายชนิด รวมถึงนำเสนอวิธีการควบคุมที่มีเสถียรภาพ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งจะจัดการในเรื่องของการแปลงผันรูปแบบของพลังงานไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้และเพิ่มคุณภาพของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงให้ดีขึ้น รวมไปถึงการจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินที่ผลิตได้ในขบวนการให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงโดยรวม

สำหรับภาคกำลังของวงจรที่นำเสนอนี้ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงและวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง ด้วยการทำงานร่วมกันของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทั้งสองและเทคนิคการควบคุมที่เหมาะสม วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถเลียนแบบผลตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิงได้ทุกชนิด อีกทั้งมีแรงดันและกระแสขาออกที่มีคุณภาพสูง งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การจำลองพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงสอง

ชนิดที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ประเทศไทย ดังนี้คือ ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนและแบบออกไซด์ของแข็ง วิธีการวิเคราะห์ วิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิธีการควบคุมสำหรับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงและสำหรับระบบการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกนำเสนอในรายงานฉบับนี้ ระบบต้นแบบสำหรับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงและระบบการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกจัดสร้างขึ้นเพื่อยืนยันสมรรถนะของภาคกำลังและประสิทธิภาพของภาคควบคุมตามที่นำเสนอ ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการทำงานโดยรวมของวงจรที่นำเสนอเป็นไปตามความคาดหมาย

ผลงานของโครงการวิจัยนี้คือ ระบบต้นแบบของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง วิธีการควบคุมแบบใหม่ และระบบต้นแบบสำหรับการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการทำงานร่วมกับตัวประจุความจุสูง ซึ่งผลงานทั้งหมดนี้จะถูกนำไปประยุกต์ใช้กับโครงการวิจัยพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบต่อไป

สารบัญ

1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 สรุปย่อ (Summary) 2

2 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells) และวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Emulator) 4

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง 4
2.1.1 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง 8
2.1.2 เซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย 41
2.2 คุณลักษณะของพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง 43
2.3 วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Emulator) 46
2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง 47
2.3.2 วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ 61
2.3.3 ระบบต้นแบบของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ 75

3 กระบวนการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel-Cell Electrical Energy Conversion) 84

3.1 ภาคกำลัง (Power Stage) 84
3.1.1 ระบบการแปลงและควบคุมไฟตรง (DC-DC Converter) 84
3.1.2 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย 96
3.1.3 ระบบการแปลงไฟกระแสตรงเป็นไฟกระแสสลับ (DC-AC Inverter) 101
3.1.4 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย 109
3.1.5 ระบบการจัดเก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy Storage) 110
3.1.6 อุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy Storage Device) 110
3.2 วงจรจัดการพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ 126
3.3 ระบบต้นแบบ 127
3.3.1 การออกแบบระบบการแปลงพลังงาน 127

4 ระบบต้นแบบและผลการทดลอง 142

4.1 ระบบต้นแบบ 142
4.2 วิธีการทดลองและผลการทดลอง 143
4.2.1 กรณีที่ 1 143
4.2.2 กรณีที่ 2 146
4.2.3 สรุปผลการทดลอง 147

5 ทฤษฎีและข้อมูลเทคนิคที่เกี่ยวข้อง 148

6 บทสรุป 161

บรรณานุกรม 162

ผลงานที่ได้จากโครงการ 164

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1 แสดงลักษณะและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจากการทดลองของเซอร์ วิลเลียม โรเบิร์ต โกรฟ (ก) เกิดปฏิกิริยาทางเคมี (ข) มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น (ที่มา http://www.tfic.kmitnb.ac.th) 5

รูปที่ 2 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิง 5

รูปที่ 3 แสดงการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในเซลล์เชื้อเพลิง.....6

รูปที่ 4 เซลล์เชื้อเพลิงที่ต่อกันเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (ก) การต่ออนุกรมเซลล์เชื้อเพลิง (ที่มา www.sglcarbon.com/sgl_t) (ข) ชุดของเซลล์เชื้อเพลิง (ที่มา www.generalhydrogen.com).....7

รูปที่ 5 แสดงลักษณะของแผ่นอิเล็กโทรด (ที่มา www.sglcarbon.com/sgl_t) 8

รูปที่ 6 ข้อดีและความแตกต่างการประยุกต์ใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด 11

รูปที่ 7 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ขนาด 1.5 kW ที่ใช้บนยานอวกาศอพอลโล (ที่มา www.corrosion-doctors.org).....12

รูปที่ 8 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ขนาด 12 kW ที่ใช้บนกระสวยอวกาศโดยมีน้ำหนัก 120kg มีเซลล์ภายใน 32 เซลล์แต่ละเซลล์ให้แรงดันไฟฟ้า 0.875 โวลต์ (ที่มา www.fuelcelltoday.com).....13

รูปที่ 9 การเกิดปฏิกิริยาเคมีเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ 13

รูปที่ 10 โครงสร้างภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ (ที่มา www.fctec.com).....14

รูปที่ 11 แสดงระบบโดยรวมของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Mobile Electrolyte 15

รูปที่ 12 ระบบโดยรวมของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Static Electrolyte Alkaline Fuel Cell 16

รูปที่ 13 แสดงโครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Dissolved Fuel Alkaline Fuel Cell.....17

รูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพพลังงานระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิด DMFC กับ PEMFC.....18

รูปที่ 15 โครงสร้างและระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด DMFC 19

รูปที่ 16 การประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรงกับอุปกรณ์เล็กทรอนิกส์ต่างๆ (ก) เครื่องชาร์จแบตเตอรี่ (ที่มา www.dcviews.com/press/images/Toshiba-Methanol-Fuel-Cell.jpg) (ข) เครื่องเล่น MP3 (ที่มา www.anythingbutipod.com/archives/images/toshiba-methanol%20.jpg) (ค) เครื่อง PDA (ที่มา www.batteriesdigest.com/4cf40400.png) (ง) เครื่องคอมพิวเตอร์พกพา (ที่มา www.capital.lv/pics/news/toshiba-f1.jpg).....20

รูปที่ 17 โครงสร้างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PAFC (ที่มา www.fctec.com).....21

รูปที่ 18 ลักษณะส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PAFC (ก) เซลล์เชื้อเพลิง 1เซลล์ (ข) เซลล์เชื้อเพลิงในลักษณะ Stack (ค) ลักษณะทิศทางการไหลของเชื้อเพลิง (ที่มา www.eere.energy.gov) 22

รูปที่ 19 การประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า (ก) เซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 กิโลวัตต์ โดยบริษัท ONSI ปัจจุบันเปลี่ยนชื่อเป็น UTC (ที่มา members.aol.com/fuelcells/10.htm) (ข) เซลล์เชื้อเพลิง Toshiba-UTC PC25 (ที่มา www.fuelcell.no).....23

รูปที่ 20 การเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด MCFC.....24

รูปที่ 21 แสดงโครงสร้างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด MCFC (ที่มา www.teenet.tei.or.th).....25

รูปที่ 22 MTU “Hot Module” (ที่มา www.innovation-brennstoffzelle.de/bzelle/haupt7.html).....25

รูปที่ 23 โรงไฟฟ้าขนาด 2 เมกกะวัตต์ที่แคลิฟอร์เนีย (ที่มา www.moea.state.mn.us.htm).....26

รูปที่ 24 การเกิดปฏิกิริยาขั้วแอโนดและแคโทดของเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด (ก) แสดงการเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC ใช้เชื้อเพลิงที่เป็นไฮโดรเจน (ข) แสดงการเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC ใช้เชื้อเพลิงที่เป็นคาร์บอนมอนนอกไซด์ 27

รูปที่ 25 โครงสร้างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC (ที่มา www.teenet.tei.or.th).....28
รูปที่ 26 ลักษณะโครงสร้างภายในของ Tubular SOFC
(ที่มา www.powergeneration.siemens.com/en/fuelcells/technology/tubular/index.cfm) 29
รูปที่ 27 เซลล์เชื้อเพลิง Stack โดยมี 24 ท่อ มีรัศมี 2.0 เซนติเมตรและมีความยาวประมาณ 150 เซนติเมตร
(ที่มา www.powergeneration.siemens.com/en/fuelcells/technology/modular/index.cfm) 29
รูปที่ 28 ระบบการไหลเวียนเชื้อเพลิงภายใน.....30
รูปที่ 29 เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าขนาด 100 กิโลวัตต์ที่ เนเธอร์แลนด์ (ที่มา http://evworld.com/view.cfm)
.....30
รูปที่ 30 ลักษณะเซลล์เชื้อเพลิง SOFC แบบ Planer
(ที่มา www.aki.che.tohoku.ac.jp/~koyama/html/research/SOFC.html) 31
รูปที่ 31 ระบบเซลล์เชื้อเพลิง SOFC แบบหมุนเวียน ขนาด 300 กิโลวัตต์ทำงานที่ความดัน 10 bar
(ที่มา www.ept.ntnu.no/te/pix/SOFC.jpg) 32
รูปที่ 32 แผนผังการทำงานระบบหมุนเวียน.....32
รูปที่ 33 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ Tubular Solid Oxide โดย Siemens Westinghouse
(ที่มา www.moea.state.mn.us.htm) 33
รูปที่ 34 การเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM.....34
รูปที่ 35 โครงสร้างภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM (ที่มา www.fctec.com).....34
รูปที่ 36 ลักษณะชั้นคาร์บอน (ที่มา http://www.tfic.kmitnb.ac.th) 35
รูปที่ 37 ลักษณะ MEA (Membrane Electrode Assembly) (ที่มา http://www.tfic.kmitnb.ac.th).....36
รูปที่ 38 ลักษณะแผ่น Bipolar Plate (ที่มา http://www.tfic.kmitnb.ac.th) 37
รูปที่ 39 ลักษณะล่องแบบต่างๆของแผ่นเพลตที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM (ก) Parallel (ข) Serpentine
(ค) Parallel serpentine (ง) Grid (จ) Long parallel.....37
รูปที่ 40 ส่วนประกอบของ Fuel cell stack (ที่มา www.sglcarbon.com/sgl_t).....38
รูปที่ 41 ระบบแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง 39
รูปที่ 42 ระบบแรงดันแบบรีฟอร์มเมอร์ 40
รูปที่ 43 ลักษณะของแรงดันที่มีผลต่อพลังงานไฟฟ้า 40
รูปที่ 44 การประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (ก) เครื่องต้นแบบขนาด 5
กิโลวัตต์ที่ผลิตโดย UTC Fuel Cell ของอเมริกา (ข) เครื่องยนต์ขับเคลื่อนสำหรับรถบัสกำลังขับ
มอเตอร์ 205 กิโลวัตต์ (ค) การประยุกต์ใช้งานในรถบัสและรถยนต์ (ที่มา www.fuelcelltoday.com)
.....42
รูปที่ 45 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงทั่วไป.....43
รูปที่ 46 Tafel plots ความแตกต่างปฏิกิริยาเคมีช้าและเร็ว 44
รูปที่ 47 ระบบรวมของแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง 48
รูปที่ 48 ลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง 48
รูปที่ 49 แผนผังการทำงานของวงจรจำลองการทำงานเซลล์เชื้อเพลิง 49
รูปที่ 50 วงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง 50
รูปที่ 51 ผลที่ได้จากวงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง
(ก) ผลที่ได้จากการจำลองบนคอมพิเตอร์ (ข) ผลที่ได้จากการทดลองจริง.....51
รูปที่ 52 ลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอน 1 เซลล์ 51

รูปที่ 53 รูปวงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอน....52
รูปที่ 54 การเปรียบเทียบผลการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิง....54
รูปที่ 55 ผลการเปรียบเทียบสภาวะการเปลี่ยนแปลงของโหลด (ก) ผลจากแบบจำลอง (ข) ผลจากการทดลองจริง....54
รูปที่ 56 โครงสร้างและองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง....55
รูปที่ 57 วงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง....57
รูปที่ 58 (ก) เชื้อเพลิง (ข) อากาศของวงจรจำลองเครื่องทำความชื้น....57
รูปที่ 59 วงจรจำลองการทำงานของ (ก) ออกซิเจน (ข) น้ำ (ค) ไฮโดรเจน....59
รูปที่ 60 การออกแบบวงจรจำลองการทำงานเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้โปรแกรม PSpice....60
รูปที่ 61 ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1.6 กิโลวัตต์....60
รูปที่ 62 ความแตกต่างของแรงดันที่มีผลต่อกระแสและอัตราการไหลของเชื้อเพลิง....60
รูปที่ 63 แผนภาพบล็อกของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ....62
รูปที่ 64 ส่วนประกอบในภาคกำลังของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ....63
รูปที่ 65 วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง....64
รูปที่ 66 แบบจำลองสวิตชิ่งของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง....65
รูปที่ 67 สถานะการปิด-เปิดของสวิตช์และความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน....65
รูปที่ 68 วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงที่ใช้ในงานวิจัย....67
รูปที่ 69 แบบจำลองเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง....68
รูปที่ 70 แบบจำลองเฉลี่ยพิกัด dqo ของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง....70
รูปที่ 71 แบบจำลองเฉลี่ยของวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง....70
รูปที่ 72 แบบจำลองเฉลี่ยของวงจรเลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ....71
รูปที่ 73 เวกเตอร์แรงดันในพิกัด ABC อยู่ในทิศทางตามแนวแกน D ในพิกัด DQ0....73
รูปที่ 74 วิธีการควบคุมที่นำเสนอ....74
รูปที่ 75 กระแสและแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์ (จาก Ballard PEMFC)....76
รูปที่ 76 อุปกรณ์ที่ใช้ในส่วนของวงจรบัคเร็กติไฟเออร์ (ก) ไดโอด (ข) ไอจีบีที....77
รูปที่ 77 อุปกรณ์ภาคสวิตชิ่งกำลังที่ได้จัดสร้างขึ้น....77
รูปที่ 78 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนการทำงานภายในวงจรขับเกทเบอร์ HCPL–316J....78
รูปที่ 79 ชุดขับสวิตช์แบบแยกแหล่งจ่ายไฟและสัญญาณทางไฟฟ้า....78
รูปที่ 80 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า....79
รูปที่ 81 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า....79
รูปที่ 82 วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ....81
รูปที่ 83 ชุดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจร....82
รูปที่ 84 วงจรอุปกรณ์ตัวรับรู้ต่างๆและแหล่งจ่ายไฟของวงจร....82
รูปที่ 85 วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่สร้างเสร็จสมบูรณ์....83
รูปที่ 86 ลักษณะของวงจรแปลงและควบคุมไฟตรง แบบพุชพุล [9]....85
รูปที่ 87 ลักษณะของวงจรแปลงและควบคุมไฟตรงแบบครึ่งคลื่น [12]....89
รูปที่ 88 ลักษณะของวงจรแปลงและควบคุมไฟตรงแบบเต็มคลื่น [13]....93
รูปที่ 89 โครงร่างของวงจรครึ่งคลื่น [15]....102
รูปที่ 90 โครงสร้างของวงจรแบบเต็มคลื่น [9]....106

รูปที่ 91 โครงร่างของวงจรจัดการพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ 127
รูปที่ 92 วงจรรวมของระบบแปลงพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง 128
รูปที่ 93 ตัวเก็บประจุความจุสูงขนาดความจุ 400 ฟาหรัดแรงดัน 2.7 โวลต์ 130
รูปที่ 94 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจากแกน ETD44949 134
รูปที่ 95 (ก) วงจรตรวจจับกระแส (ข) วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า และ (ค) แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรตรวจจับกระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 137
รูปที่ 96 (ก) วงจรตรวจจับแรงดันและ (ข) แผ่นวงจรพิมพ์วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Dc-link) 138
รูปที่ 97 (ก) วงจรตรวจจับอุณหภูมิแผ่นระบายความร้อน (ข) สวิตช์ความร้อน 90 องศาและ (ค) แผ่นวงจรพิมพ์วงจรตรวจจับความร้อน 139
รูปที่ 98 ระบบการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อประกอบลงกล่องแล้ว 140
รูปที่ 99 (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลังของระบบแปลงพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง 141
รูปที่ 100 ระบบต้นแบบของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงและระบบต้นแบบของการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง 142
รูปที่ 101 ระบบที่ใช้ในการทดลองกรณีที่ 1 143
รูปที่ 102 ผลการทดลอง แรงดันขาออกของวงจรที่ค่ากระแสโหลดต่างๆกัน กรณีอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ (การตั้งค่าออสซิลโลสโคป: Mode: XY, V_{FC}(t): 10V/DIV, i_{Load}(t): 5A/DIV) 144
รูปที่ 103 ผลการทดลอง แรงดันขาออกของวงจรที่ค่ากระแสโหลดต่างๆกัน กรณีอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 75 เปอร์เซ็นต์ (การตั้งค่าออสซิลโลสโคป: Mode: XY, V_{FC}(t): 10V/DIV, i_{Load}(t): 5A/DIV) 144
รูปที่ 104 ผลการทดลอง แรงดันขาออกของวงจรที่ค่ากระแสโหลดต่างๆกัน กรณีอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ (การตั้งค่าออสซิลโลสโคป: Mode: XY, V_{FC}(t): 10V/DIV, i_{Load}(t): 5A/DIV) 145
รูปที่ 105 ผลการทดลอง แรงดันขาออกของวงจรที่ค่ากระแสโหลดต่างๆกัน กรณีอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ (การตั้งค่าออสซิลโลสโคป: Mode: XY, V_{FC}(t): 10V/DIV, i_{Load}(t): 5A/DIV) 145
รูปที่ 106 ผลการทดลองการตอบสนองของแรงดันขาออกของวงจรต้นแบบเมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 A ไปที่ 45 A และในทางกลับกัน โดยมีอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 100% (การตั้งค่าออสซิลโลสโคป: V_{FC}(t): 10V/DIV, i_{Load}(t): 10A/DIV, t: 5ms/DIV) 146

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 ความแตกต่างของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด (ที่มา www.rmi.org) 9
ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลังงานระหว่างเมทิลแอลกอฮอร์กับไฮโดรเจน 18
ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ของสวิตช์กับกระแสและแรงดัน 66
ตารางที่ 4 คุณสมบัติของมอสเฟทสำหรับแรงดันอินพุท 12 โวลต์จากบริษัท IR 98
ตารางที่ 5 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรทั้งสามแบบ 100
ตารางที่ 6 ตารางเทียบขนาดเป็นเท่าระหว่างแบบพุชพุลกับทั้งสองแบบ 101
ตารางที่ 7 คุณสมบัติของไอจีบีทีเบอร์ STGP3NB60 105
ตารางที่ 8 ตารางคุณสมบัติของไอจีบีทีเบอร์ STGP7NB60 108
ตารางที่ 9 เปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรแบบครึ่งคลื่นและเต็มคลื่น 109
ตารางที่ 10 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆของตัวเก็บประจุความจุสูงที่ติดตั้งอยู่ระหว่างด้านแรงดันต่ำและด้านแรงดันสูง 117
ตารางที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันแบตเตอร์รี่กับเปอร์เซ็นต์การประจุ 120
ตารางที่ 12 ราคาโดยประมาณของแบตเตอร์รี่ชนิดแห้งสำหรับเครื่องสำรองไฟ (UPS) ยี่ห้อลีอ็อช 120
ตารางที่ 13 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆของการติดตั้งแบตเตอร์รี่ที่ด้านแรงดันต่ำและด้านแรงดันสูงสำหรับระบบแปลงพลังงานขนาด1.5กิโลวัตต์ 122
ตารางที่ 14 เปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างแบตเตอร์รี่กับตัวเก็บประจุความจุสูง 125

1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

อาจกล่าวได้ว่าชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์คงจะสะดวกสบายไปไม่ได้ หากขาดแคลนพลังงานไฟฟ้า นอกจากนั้นแล้วพลังงานไฟฟ้ายังเป็นกลไกส่วนสำคัญในการผลักดันให้เกิดการพัฒนาทางด้านการเกษตรและทางอุตสาหกรรม ประสิทธิภาพของการดำเนินงานที่ดีขึ้น เป็นผลทำให้การพัฒนาในทุกๆด้านเป็นไปอย่างยิ่งยวด ส่งผลกลับมาทำให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้ามีมากขึ้น โดยส่วนใหญ่การได้มาของพลังงานไฟฟ้าเป็นการเผาผลาญน้ำมันเชื้อเพลิงหรือถ่านหินให้เกิดความร้อนเพื่อใช้ต้มน้ำให้กลายเป็นไอน้ำความดันสูง มีพลังงานสูงพอที่จะหมุนกังหันที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ เป็นที่ทราบกันดีว่าการเผาผลาญน้ำมันเชื้อเพลิงหรือถ่านหินนั้นก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งทางตรงและทางอ้อม อีกทั้งปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงและถ่านหินที่มีตามธรรมชาติก็นับวันจะน้อยลงทุกที ทำให้มีเชื้อเพลิงดังกล่าวมีราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงส่งผลให้การแสวงหาแหล่งพลังงานไฟฟ้าทดแทนทวีความสำคัญมากขึ้นทุกขณะ

แหล่งพลังงานไฟฟ้าทดแทนที่ดีควรจะส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ควบคุมได้ ใช้วัตถุดิบที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ หนึ่งในแหล่งพลังงานไฟฟ้าทดแทนที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells) เซลล์เชื้อเพลิงถือได้ว่าเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงและปลอดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีความเป็นไปได้สูงที่จะเข้ามาแทนที่เทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ใช้อยู่ปัจจุบันได้ตั้งแต่กำลังการผลิตระดับต่ำไปจนถึงระดับสูง นอกจากนั้นเซลล์เชื้อเพลิงยังสามารถที่จะใช้เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำรองได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามเซลล์เชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียวไม่สามารถที่จะผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจได้ กล่าวคือพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจะอยู่ในรูปของไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งยากต่อการจัดการเช่น การแปลงระดับแรงดันไฟตรงให้สูงขึ้นหรือต่ำลงนั้นทำได้ยากในทางปฏิบัติ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้กันในบ้านพักอาศัย กิจกรรมทางการเกษตร และโรงงานอุตสาหกรรม จึงอยู่ในรูปของไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพ จะเป็นตัวการสำคัญในการเพิ่มมูลค่าให้กับพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง

อย่างไรก็ตามการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงในประเทศไทยนั้นถือได้ว่ายังน้อยมาก ทำให้ยังต้องมีการนำเข้าตัวเซลล์เชื้อเพลิงจากต่างประเทศซึ่งมีราคาที่ค่อนข้างสูง รวมทั้งค่าซ่อมบำรุงที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากอายุของอุปกรณ์ต่างๆที่สั้น ทำให้การศึกษาพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงในเมืองไทยทำได้ยาก

ด้วยเหตุผลหลายประการดังกล่าวข้างต้น ทำให้การวิจัยและพัฒนาระบบที่สามารถเลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง รวมถึงระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพเป็นที่สนใจอย่างมาก ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบเพื่อให้สามารถเลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงได้หลายชนิด รวมถึงนำเสนอวิธีการควบคุมที่มีเสถียรภาพ นอกจากนั้นโครงการวิจัยนี้ยังได้นำเสนอระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งจะจัดการในเรื่องของการแปลงผันรูปแบบของพลังงานไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้และเพิ่มคุณภาพของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงให้ดีขึ้น นอกจากนั้นยังรวมไปถึงการจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินที่ผลิตได้ในขบวนการให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงโดยรวม

1.2 วัตถุประสงค์

1) ศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง
2) ศึกษาและออกแบบวงจรเลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง
3) ศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจของพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง
4) ศึกษาแนวทางการนำเอาพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงมาเป็นแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อประโยชน์ในกิจการภายในประเทศ
5) จัดสร้างระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบเพื่อรองรับการวิจัยแบบบูรณาการร่วมกับโครงการวิจัยและพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบภายในประเทศ

1.3 สรุปย่อ (Summary)

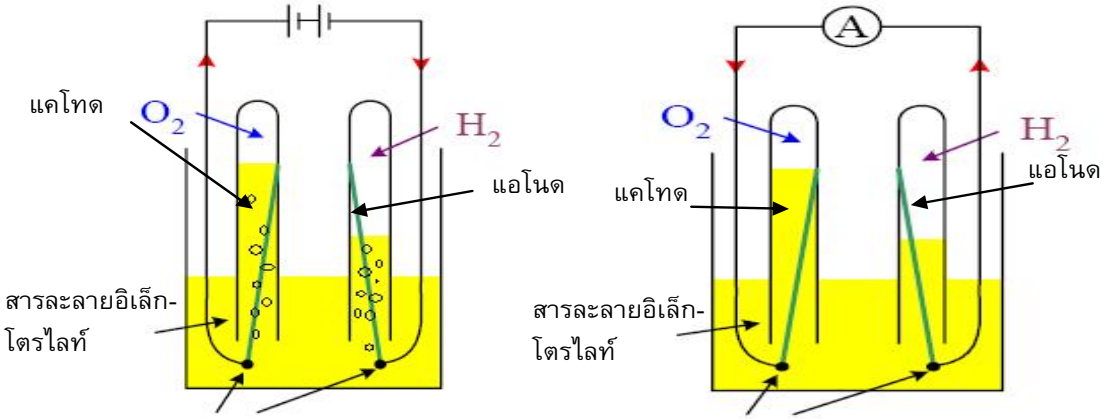
โครงการวิจัยนี้เพื่อทำการศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงและปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจของพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ศึกษาและออกแบบวงจรเลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง รวมถึงการหาแนวทางการนำเอาพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงมาเป็นแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อประโยชน์ในกิจการภายในประเทศ จัดสร้างระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบเพื่อรองรับการวิจัยแบบบูรณาการร่วมกับโครงการวิจัยและพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบภายในประเทศ

การดำเนินงานวิจัยเริ่มจากศึกษาถึงโครงสร้างและคุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีใช้ในปัจจุบัน ซึ่งมีด้วยกันทั้งสิ้น 6 ชนิดหลักๆ คือ ชนิดแอลคาไลน์ ชนิดป้อนสารเมทานอลโดยตรง ชนิดกรดฟอสฟอริก ชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอม ชนิดออกไซด์ของแข็ง และชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งจากผลการศึกษาทำให้ทราบว่าสองชนิดหลังนั้นมีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดย่อมและบ้านพักอาศัยในประเทศไทยได้เป็นอย่างดี เนื่องจากในปัจจุบันตัวเซลล์เชื้อเพลิงยังคงมีราคาแพง ดังนั้นการจำลองพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงโดยอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกส์จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ จึงได้มีการเปลี่ยนแผนงานวิจัยโดยเพิ่มการศึกษาบทความเกี่ยวกับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งยังมีจำนวนไม่มากนัก จากการศึกษาจากงานวิจัยที่ได้ดำเนินการในต่างประเทศทั้งสิ้น 3 ผลงาน ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่แก้ไขข้อเสียจากงานวิจัยทั้งสาม โดยมีข้อดีคือมีประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีขึ้นเนื่องจากใช้รอบทำงานที่มีค่าสูงขึ้น มีความยืดหยุ่นของจุดทำงานที่ดีขึ้น นั่นคือใช้ได้กับเซลล์เชื้อเพลิงทุกชนิด และมีไม่มีความซับซ้อนในการสร้างวงจรขึ้นใช้งานจริง วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอนี้ประกอบด้วยสองส่วนหลักๆ ดังนี้คือ ส่วนภาคกำลัง และส่วนควบคุม สำหรับภาคกำลังนั้นแบ่งออกเป็นสองวงจรย่อยคือ วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง (Buck Rectifier) และวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง (Buck Converter) วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงจะทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันกระแสสลับสามเฟสให้เป็นแรงดันกระแสตรงที่ปรับค่าได้ เหตุผลที่ใช้อินพุตเป็นแรงดันสามเฟสนั้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการจ่ายพลังงานที่สูงขึ้นและเพื่อลดแรงดันกระเพื่อม (Ripple Voltage) วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงนำมาใช้ในการเลียนแบบพฤติกรรมของแรงดันเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณและความดันเชื้อเพลิง (ไฮโดรเจน) ที่เซลล์เชื้อเพลิงได้รับ ในส่วนของวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลงนั้น นำมาใช้ในการเลียนแบบพฤติกรรมของแรงดันเอาต์พุตที่เป็นไปตามลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน (V-I Characteristic) ส่วนสุดท้ายคือวงจรควบคุม ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ควบคุมการทำงานของภาคกำลังทั้งสองวงจร โดยการส่งสัญญาณสวิตชิ่งที่เหมาะสมไปยังอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังของวงจรทั้งสองเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าเป็นไปตามต้องการและคงที่ด้วยการป้อนแรงดันและกระแสเอาต์พุตกลับมายังวงจรควบคุม เนื่องจากในวงจรควบคุมระบบเซลล์เชื้อเพลิงจริงนั้นจะมีการรับคำสั่งจากภายนอกในการเพิ่มลดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตออกมา ดังนั้นวงจรควบคุมของวงจรเลียนแบบจึงมีส่วนการรับสัญญาณคำสั่งดังกล่าว ตัวอย่างเช่น อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจน อุณหภูมิการทำงาน เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาบทความเกี่ยวกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงและวงจรควบคุม อาศัยผลการพิจารณาการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวงจรที่เกี่ยวข้องต่างๆ ในการออกแบบภาคกำลังของระบบจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้นำเสนอ ซึ่งประกอบด้วยวงจรแปลงไฟกระแสตรงให้สูงขึ้น วงจรการแปลงแรงดันสูงกระแสตรงให้เป็นแรงดันสูงกระแสสลับ และส่วนสำรองพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ตัวประจุความจุสูง

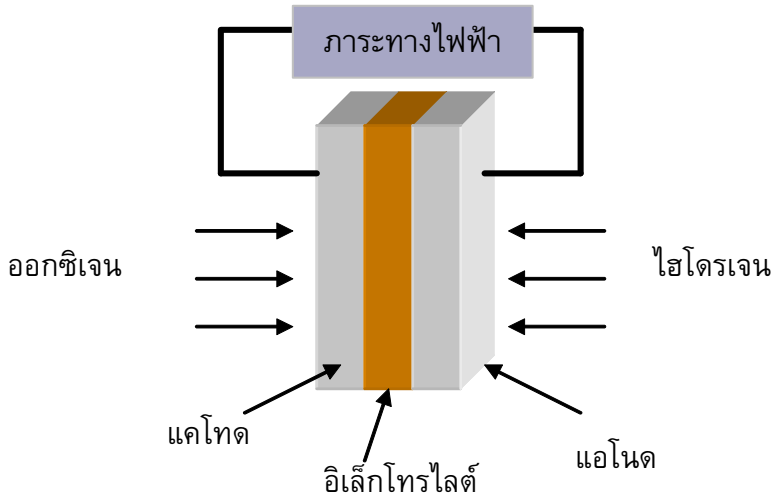
2 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells) และวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Emulator)

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างไฮโดรเจนและออกซิเจนทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้า เซลล์เชื้อเพลิงถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1839 โดยเซอร์วิลเลียม โรเบิร์ต โกรฟ (Sir William Robert Grove) นักวิทยาศาสตร์และทนายความชาวอังกฤษ หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นคล้ายกับแบตเตอรี่แต่จะแตกต่างตรงที่ไม่มีการประจุไฟใหม่และสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ตลอดเวลาตราบเท่าที่ยังคงมีการจ่ายเชื้อเพลิงให้กับตัวเซลล์เชื้อเพลิง ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงที่เด่นชัดคือไม่มีกระบวนการเผาไหม้หรือสันดาปภายใน จึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิงนี้ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ อีกทั้งมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าเครื่องยนต์เผาไหม้ 1 ถึง 3 เท่า เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิดแบบขึ้นอยู่กับสารที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงเช่น เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน-ออกซิเจน, ไฮโดรเจน-ไฮดราซีน และโพรเพน-ออกซิเจน เป็นต้น โดยลักษณะและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้จากการทดลองของเซอร์วิลเลียม โรเบิร์ต โกรฟนั้น จะนำเอาแท่งอิเล็กโทรดที่เคลือบด้วยแพลตตินั่ม (Platinum Electrodes) สองแท่งคือ แท่งแอโนดและแท่งแคโทด ใส่ในหลอดแก้วที่อัดด้วยแก๊สไฮโดรเจน (H_2) และ ออกซิเจน (O_2) จุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Dilute Acid Electrolyte) ดังรูปที่ 1(ก) และ (ข) ซึ่งอธิบายการเกิดเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและทางไฟฟ้าตามลำดับ จากผลการทดลองที่ได้นั้นยังได้กระแสไฟฟ้าออกมาจำนวนน้อยมากเนื่องจากว่ามีบริเวณพื้นที่หน้าสัมผัสน้อยระหว่างแก๊ส อิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดรวมไปถึงอิเล็กโทรไลต์ที่ต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงได้มีการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยทำให้อิเล็กโทรดมีขนาดที่แบนเรียบและชั้นของอิเล็กโทรไลต์ที่มีความบางดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในปัจจุบัน



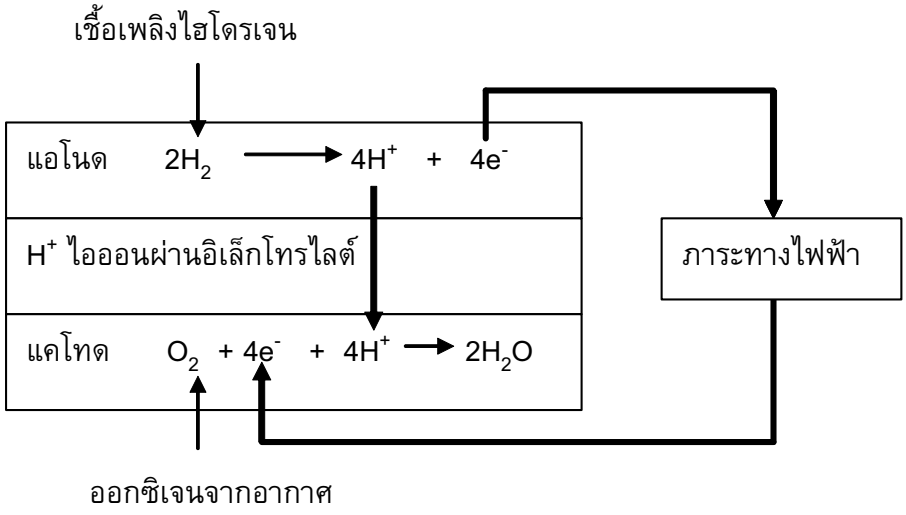
รูปที่ 1 แสดงลักษณะและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจากการทดลองของเซอร์ วิลเลียม โรเบิร์ต โกรฟ (ก) เกิดปฏิกิริยาทางเคมี (ข) มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น (ที่มา http://www.tfic.kmitnb.ac.th)



รูปที่ 2 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิง

การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าออกมานั้น เมื่อป้อนไฮโดรเจนเข้าที่ขั้วแอโนด ไฮโดรเจนจะสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ซึ่งเคลือบอยู่ที่อิเล็กโทรดและแตกตัวเป็นโปรตอนไฮโดรเจน (H+) และอิเล็กตรอน (e-) ออกมา อิเล็กโทรไลต์จะมีคุณลักษณะพิเศษคือจะยอมให้โปรตอน (H+) ผ่านไปได้แต่จะไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงไหลผ่านวงจรด้านนอกทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปยังโหลด ด้านขั้ว

แคโทดจะทำการป้อนออกซิเจน (O_2) ที่ปนอยู่ในอากาศ เมื่อโปรตอน (H+) ผ่านเล็กโทรไลต์มายังแคโทดและอิเล็กตรอนที่ผ่านวงจรภายนอกมายังแคโทดจะสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดน้ำขึ้น ปฏิกิริยาทั้งหมดจะเกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์ซึ่งสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 0.7 โวลต์ (ธนารัฐ สิงหา :2545) การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในเซลล์เชื้อเพลิง

โดยปฏิกิริยาทางเคมีตัวอย่างดังรูปที่ 3 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดโปรตอนแลกเปลี่ยนเมมเบรนที่มีโครงสร้างเป็นที่นิยมนำมาใช้งานและมีหลักการทำงานที่เข้าใจง่าย สำหรับส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงและหน้าที่ของแต่ละส่วนประกอบนั้นมี 4 ส่วน คือ

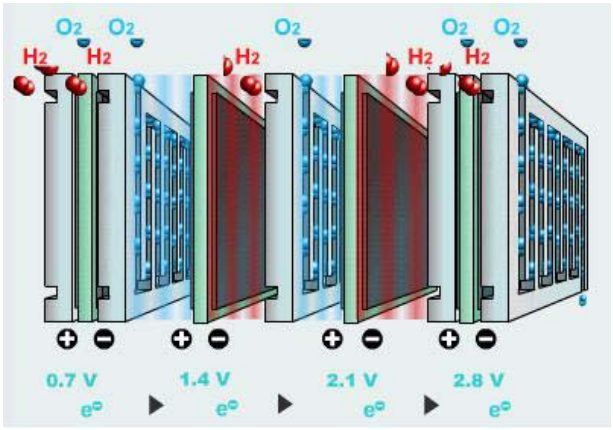
1. แอโนด (Anode) เป็นขั้วลบของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้อิเล็กตรอนและโปรตอน (H+) แตกตัวออกจากไฮโดรเจน อิเล็กตรอนที่ได้จะเคลื่อนที่ไปสู่วงจรภายนอกทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าจ่ายไปยังโหลดจากนั้นจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวกหรือแคโทด

2. แคโทด (Cathode) เป็นขั้วบวกของเซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหมือนกับแอโนด เป็นส่วนที่จะมีการเกิดปฏิกิริยารวมกันของโปรตอน (H+), อิเล็กตรอนของไฮโดรเจนและออกซิเจน (O_2) จากอากาศ ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นน้ำและความร้อนขึ้น

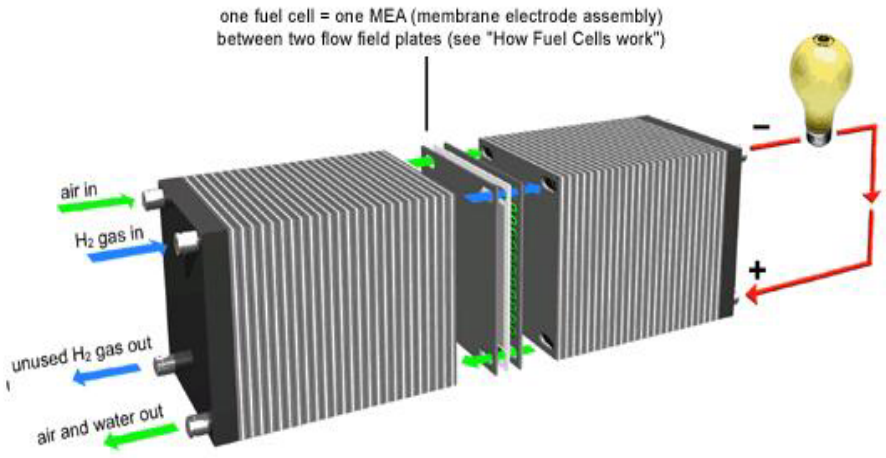
3. อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เป็นแผ่นเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Polymer Electrolyte Membrane หรือ Proton Exchange Membrane) จะคล้ายแผ่นพลาสติกใส มีคุณสมบัติคือยอมให้โปรตอน (H+) ของไฮโดรเจนผ่านได้แต่ไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่านได้

4. ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เป็นสารพิเศษที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาของออกซิเจนและไฮโดรเจน ซึ่งโดยทั่วไปทำมาจากแร่แพลตตินั่ม

กระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงมีความต่างศักย์ได้ประมาณ 0.7 โวลต์ซึ่งมีระดับต่ำกว่าที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ เพื่อให้ได้ระดับความต่างศักย์ตามที่ต้องการ จึงต้องนำเซลล์เชื้อเพลิงมาเรียงต่อกันและเรียกว่าเป็นชุดของเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel-cell Stack) ซึ่งมีลักษณะการต่อกันของเซลล์ย่อยเป็นแบบอนุกรม โดยที่ขั้วแอโนดจะเชื่อมต่อไปยังขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงตัวถัดไปแสดงดังรูปที่ 4(ก) และ 4(ข)



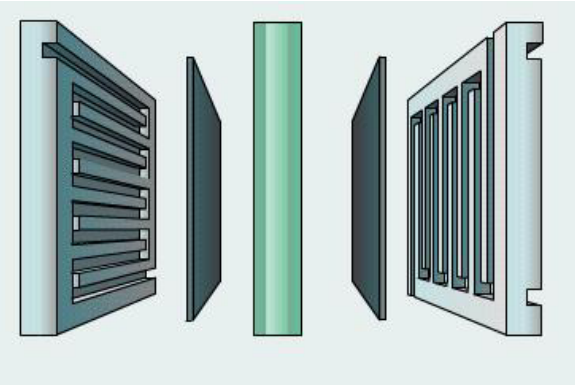
(ก)



(ข)

รูปที่ 4 เซลล์เชื้อเพลิงที่ต่อกันเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (ก) การต่ออนุกรมเซลล์เชื้อเพลิง (ที่มา www.sglcarbon.com/sgl_t) (ข) ชุดของเซลล์เชื้อเพลิง (ที่มา www.generalhydrogen.com)

รูปที่ 5 แสดงลักษณะของตัวแผ่นอิเล็กโทรดนั้นจะทำให้บริเวณหน้าสัมผัสกับแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นร่อง เพื่อทำให้เชื้อเพลิงที่จ่ายเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถไหลผ่านไปบนอิเล็กโทรดได้อย่างทั่วถึงและให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 5 แสดงลักษณะของแผ่นอิเล็กโทรด (ที่มา www.sglcarbon.com/sgl_t)

2.1.1 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิดและสามารถแบ่งออกตามปัจจัยต่าง ๆ ที่นำมาพิจารณาเช่น แบ่งตามประเภทเชื้อเพลิงที่ใช้ อุณหภูมิในขบวนการเคมีไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น โดยเซลล์เชื้อเพลิงทุกชนิดจะให้พลังงานไฟฟ้าในรูปไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) ในปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการวิจัยอย่างต่อเนื่องและนำมาใช้งานได้จริงนั้น แบ่งออกได้เป็น 6 ชนิดใหญ่ ได้ดังนี้คือ

6) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ (Alkaline)
7) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดป้อนสารเมทานอลโดยตรง (Direct Methanol)
8) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid)
9) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate)
10) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide)
11) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane - PEM)

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงทั้ง 6 ชนิด นั่นคือ เชื้อเพลิงที่ใช้ (Anode Gas), อิเล็กโทรไลต์, แก๊สที่แคโทด, อุณหภูมิ และประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 ความแตกต่างของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด (ที่มา www.rmi.org)

Fuel Cell Type	**Electrolyte**	**Anode Gas**	**Cathode Gas**	**Temperature**	**Efficiency**
Alkaline	Potassium hydroxide	hydrogen	pure oxygen	below 80°C	50–70%
Proton Exchange Membrane	Solid polymer membrane	hydrogen	pure or atmospheric oxygen	75°C (180°F)	35–60%
Direct Methanol	Solid polymer membrane	methanol solution in water	atmospheric oxygen	75°C (180°F)	35–40%
Phosphoric Acid	Phosphorous	hydrogen	atmospheric oxygen	210°C (400°F)	35–50%
Molten Carbonate	Alkali-Carbonates	hydrogen, methane	atmospheric oxygen	650°C (1200°F)	40–55%
Solid Oxide	Ceramic Oxide	hydrogen, methane	atmospheric oxygen	800–1000°C (1500–1800°F)	45–60%

นอกจากคุณสมบัติภายในตัวเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความแตกต่างกันแล้ว ในส่วนของการนำมาประยุกต์ใช้งานก็ถือว่าเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันด้วยเช่น

เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์ (Alkaline) เป็นชนิดแรกที่มีการสร้างขึ้นมา ถูกใช้ในโครงการอวกาศของสหรัฐในช่วงปี 1960 แต่เนื่องจากระบบไวต่อการปนเปื้อนมาก จึงจำเป็นต้องใช้ไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์เท่านั้น ทำให้ระบบมีราคาสูงมาก ดังนั้นส่วนใหญ่จะใช้เฉพาะบนอวกาศ เช่น บนยานอวกาศอพอลโล เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงสุด อุณหภูมิขณะที่ทำงานอยู่ต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ของเสียที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงคือน้ำซึ่งนักบินอวกาศสามารถใช้บริโภคได้ ซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่มีคุณค่า

เซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรง (Direct Methanol - DMFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ถูกพัฒนาจากเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน มีอุณหภูมิในการทำงานค่อนข้างต่ำและให้พลังงานไฟฟ้าที่น้อยมาก จึงเหมาะที่จะใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กเช่น โทรศัพท์มือถือ เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพาเป็นต้น

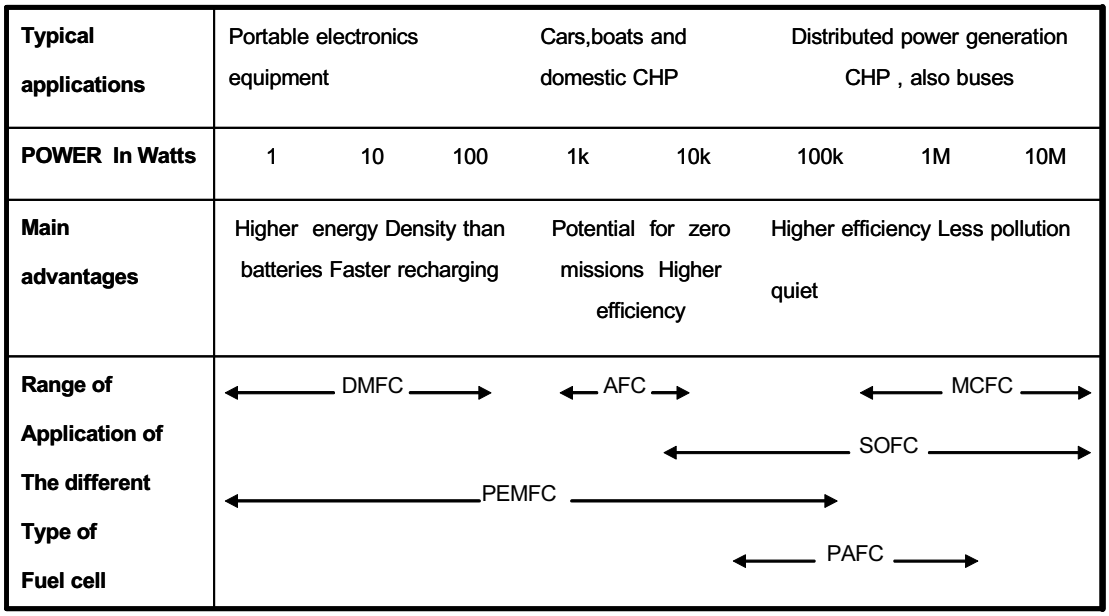
เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid - PAFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแรกที่สามารถสร้างขึ้นในเชิงพาณิชย์ มีระดับอุณหภูมิในการทำงานประมาณ 210 องศาเซลเซียส สามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าได้ถึง 200 กิโลวัตต์ มักนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าในสถานที่ขนาดเล็กต่างๆ เช่น โรงแรมและสำนักงานต่างๆ เป็นต้น

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate - MCFC) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เหมาะสมสำหรับโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่สำหรับจำหน่ายไฟฟ้า มีอุณหภูมิการทำงานที่สูงมากประมาณ 650 องสาเซลเซียส สามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึง 2 เมกกะวัตต์ และยังให้ไอน้ำความดันสูงออกมาและสามารถนำมาช่วยผลิตกระแสไฟฟ้าในลักษณะความร้อนร่วมได้อีกด้วย เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบโดยรวมสูงขึ้นถึง 85 เปอร์เซ็นต์ และเนื่องจากทำงานที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า SOFC ทำให้ไม่ต้องใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษ จึงทำให้ระบบโดยรวมมีราคาที่ต่ำกว่า

เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide - SOFC) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดมีอุณหภูมิในการทำงานที่สูงมากประมาณ 800–1000 องศาเซลเซียส เหมาะสำหรับโรงงานไฟฟ้าขนาดใหญ่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น มีไอน้ำอุณหภูมิสูงเป็นผลผลิตจากกระบวนการทางเคมี ซึ่งสามารถนำไปใช้ปั่นกังหันแก๊สได้หรือช่วยผลิตกระแสไฟฟ้าในลักษณะความร้อนร่วมได้นั่นเอง ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้นสูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสำหรับในระบบที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงมากๆ นั้นเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งจะมีราคาถูกกว่าระบบที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอม

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane PEM) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ได้รับความนิยมมากในการนำมาประยุกต์ใช้งานเนื่องจากมีอุณหภูมิในการทำงานที่ไม่สูงมากนักและราคาที่ไม่แพงเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น รวมถึงมีประสิทธิภาพที่สูง ปัจจุบันนำมาประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น เป็นแหล่งพลังงานขับเคลื่อนสำหรับรถยนต์หรือรถสาธารณะ แหล่งกำเนิดระแสไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อใช้ภายในที่อยู่อาศัย เป็นต้น

รูปที่ 6 แสดงข้อดีและการประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงทั้ง 6 ชนิด ซึ่งจะเห็นได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีการนำไปประยุกต์ใช้งานในระดับพลังงานที่กว้าง เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งจะถูกใช้กับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงมากๆ ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดนี้



รูปที่ 6 ข้อดีและความแตกต่างการประยุกต์ใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด

ก. เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์ (Alkaline)

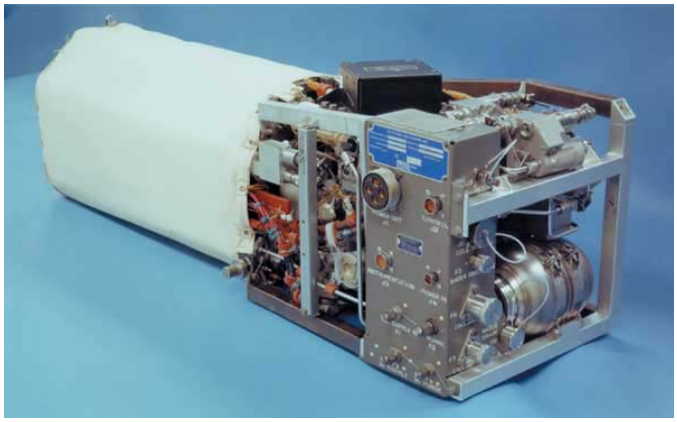
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการพัฒนารุ่นแรกๆ และเป็นชนิดแรกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในโครงการอวกาศของสหรัฐอเมริกาดังตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8 เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าและน้ำดื่มบนยานอวกาศ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ประสิทธิภาพของ AFC ค่อนข้างสูงซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในเซลล์ จากการใช้งานในอวกาศได้แสดงให้เห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ให้ประสิทธิภาพประมาณ 70% อย่างไรก็ตามข้อด้อยของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือเสียหาย

ง่ายด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในความเป็นจริงแค่ CO_2 เพียงเล็กน้อยในอากาศก็สามารถมีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ ความไวต่อ CO_2 นี้มีผลต่ออายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้จำเป็นต้องใช้ทั้งไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์เท่านั้น ซึ่งกระบวนการที่ทำให้แก๊สทั้งสองชนิดนี้ให้บริสุทธิ์มีราคาที่ค่อนข้างสูง

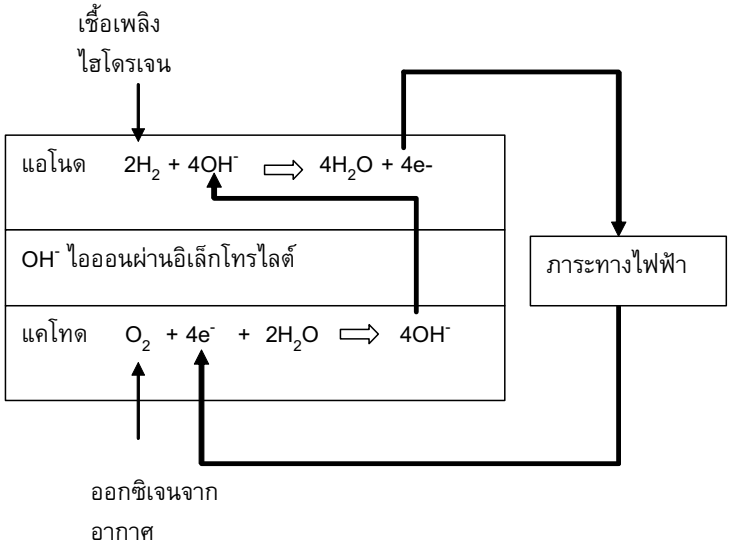
การออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์คล้ายกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน หากแต่ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ รูปที่ 9 และรูปที่ 10 แสดงปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นโดยที่ไฮดรอกซิลไอออน (OH-) เคลื่อนที่จากขั้วลบไปยังขั้วบวก และทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนได้น้ำและอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกนี้ใช้เป็นพลังงานไฟฟ้าให้กับวงจรไฟฟ้าภายนอกเซลล์และกลับไปที่ขั้วลบภายในเซลล์ ที่ขั้วลบนี้อิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำเพื่อผลิตไฮดรอกซิลไอออนเพิ่มขึ้น

การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด	:	$2H_2 + 4OH^-$	=>	$4H_2O + 4e^-$
การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแคโนด	:	$O_2 + 4e^- + 2H_2O$	=>	$4OH^-$
การเกิดปฏิกิริยารวม	:	$2H_2 + O_2$	=>	$2H_2O$

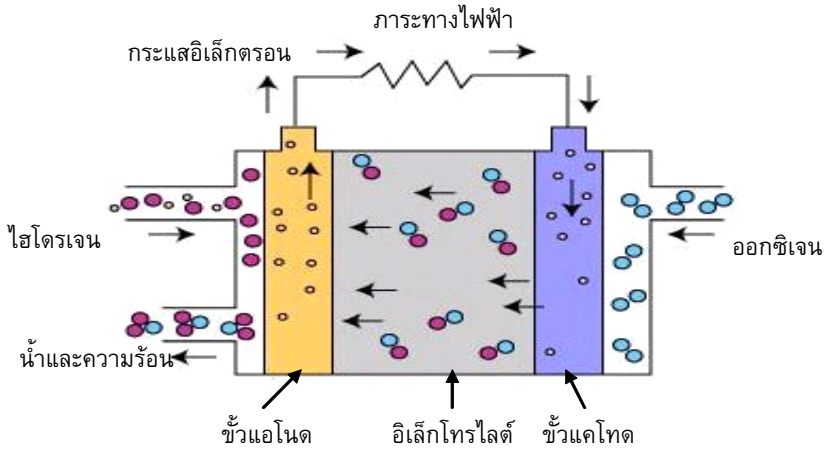
รูปที่ 7 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ขนาด 1.5 kW ที่ใช้บนยานอวกาศอพอลโล
(ที่มา www.corrosion-doctors.org)



รูปที่ 8 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ขนาด 12 kW ที่ใช้บนกระสวยอวกาศโดยมีน้ำหนัก 120kg มีเซลล์ภายใน 32 เซลล์แต่ละเซลล์ให้แรงดันไฟฟ้า 0.875 โวลต์ (ที่มา www.fuelcelltoday.com)



รูปที่ 9 การเกิดปฏิกิริยาเคมีเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์



รูปที่ 10 โครงสร้างภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ (ที่มา www.fctec.com)

ข. ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์

เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์นี้สามารถแบ่งออกได้ อีก 3 ชนิด คือ

12)แบบ Mobile Electrolyte

13)แบบ Static Electrolyte Alkaline Fuel Cell

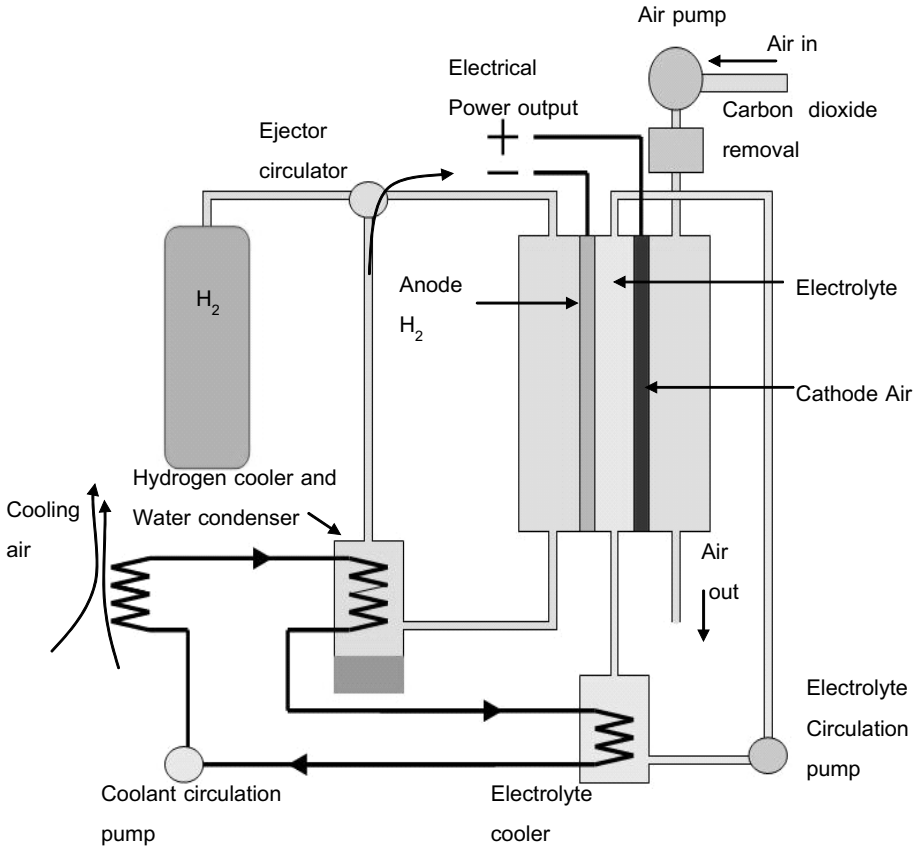
14)แบบ Dissolved Fuel Alkaline Fuel Cell

- **แบบ Mobile Electrolyte**

ลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้จะมีลักษณะใช้หลักการเคลื่อนที่ของเล็กโทรไลต์ภายในแสดงดังรูปที่ 11 จะมีปั้มอยู่รอบๆ ตัวเซลล์เชื้อเพลิง โดยไฮโดรเจนจะส่งไปยังขั้วแอโนดแบบหมุนเวียนแต่ขณะเดียวกันจะเกิดไอน้ำขึ้นซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการแล้วจะถูกทำให้กลั่นตัวเป็นน้ำ เชื้อเพลิงจะได้มาจากถังเก็บไฮโดรเจนและจากการหมุนเวียนไฮโดรเจนในระบบด้วย Ejector Circulator

ลักษณะเด่นของเซลล์เชื้อเพลิงแอลคาไลน์ชนิดนี้คือมีอิเล็กโทรไลต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ ที่ต้องทำเช่นนี้เนื่องจากว่าคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอากาศจะทำปฏิกิริยากับอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ความหนาแน่นของไฮดรอกซิลไอออน (OH-) ลดลงและถูกแทนที่ด้วยคาร์บอเนตไอออน (CO_3^-) ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานภายในเซลล์เชื้อเพลิง วิธีในการแก้ไขปัญหาในจุดนี้คือการทำให้ออกซิเจนในอากาศปราศจากคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แต่ในความเป็นจริงไม่สามารถที่จะกำจัดออกได้หมด อิเล็กโทรไลต์

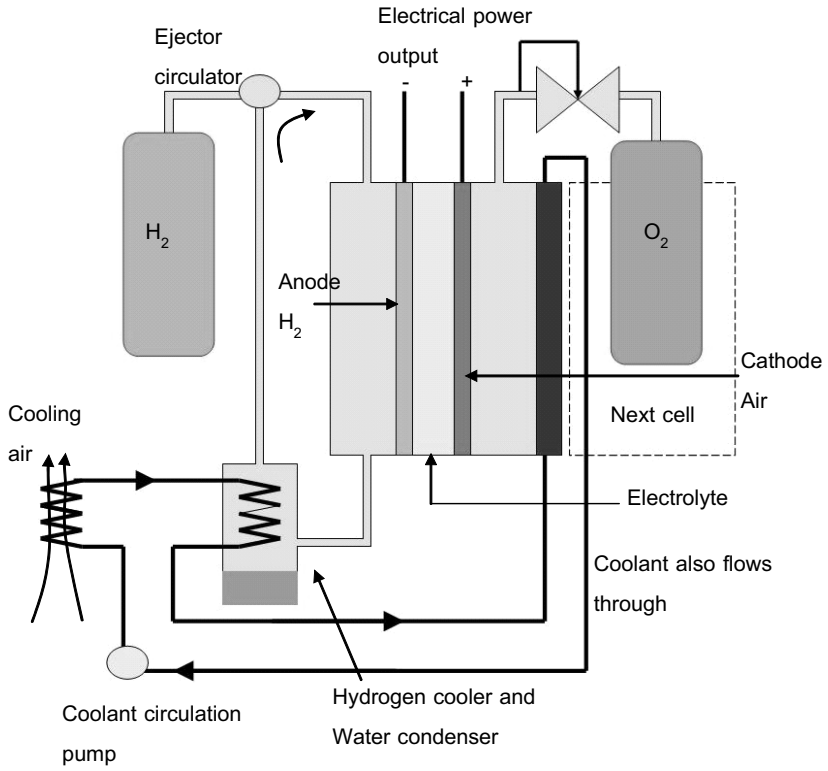
จึงเสื่อมเร็วดังนั้นจึงใช้วิธีการให้อิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่โดยมีระบบปั๊มส่งไปยัง Electrolyte Cooler เพื่อทำการฟอกลดการปนเปื้อนของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศทำให้อายุการใช้งานของตัวเซลล์นานขึ้น เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานบนยานอวกาศอพอลโล



รูปที่ 11 แสดงระบบโดยรวมของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Mobile Electrolyte

- **แบบ Static Electrolyte Alkaline Fuel Cell**

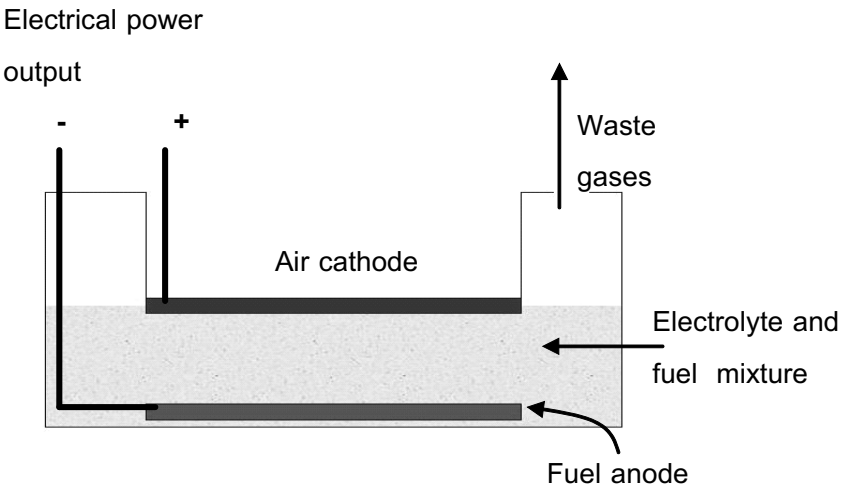
ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะเหมือนกับแบบ Mobile electrolyte แต่จะไม่มีระบบหมุนเวียนของอิเล็กโทรไลต์และต้องใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เพื่อป้อนไปยังขั้วแคโทดดังรูปที่ 12 อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงนี้จะทำมาจากแร่ใยหิน (Asbestos) เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงป้องกันการสึกกร่อนและลักษณะการซึมผ่านที่ดี ในระบบจะมีการใช้ไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเพราะถ้าอิเล็กโทรไลต์เสื่อมจะไม่สามารถใช้งานได้ และมีความยุ่งยากอย่างมากในการเปลี่ยน



รูปที่ 12 ระบบโดยรวมของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Static Electrolyte Alkaline Fuel Cell

- **แบบ Dissolved Fuel Alkaline Fuel Cell**

เป็นเซลล์เชื้อเพลิงอีกชนิดหนึ่งที่มีลักษณะโครงสร้างไม่ซับซ้อนและกระบวนการผลิตที่ไม่ยุ่งยากแต่ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสำหรับงานที่ต้องการกำลังงานสูง อิเล็กโทรดที่แอโนดจะใช้แพลตตินั่มเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่แคโทดจะไม่ใช้ ดังนั้นปฏิกิริยาเคมีที่แคโทดจะช้ามาก รูปที่ 13 แสดงให้เห็นว่าอิเล็กโทรไลต์ผสมกับเชื้อเพลิงแล้วใส่เข้าไปในตัวเซลล์บริเวณแท่งแคโทดและแอโนดจะสัมผัสเชื้อเพลิงชนิดเดียวกัน กระบวนการในการเติมเชื้อเพลิงจึงค่อนข้างง่ายกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือ ต้นทุนต่ำ มีขนาดกะทัดรัด มีโครงสร้างที่ง่าย ข้อเสียคือ เชื้อเพลิงที่ใช้ค่อนข้างมีอันตรายเพราะเป็นสารเคมีที่มีผลทำให้เกิดมะเร็งและอาจทำให้เกิดการระเบิดได้



รูปที่ 13 แสดงโครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Dissolved Fuel Alkaline Fuel Cell

ค. เซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรง (Direct Methanol)

เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีลักษณะเหมือนกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอน แต่จะใช้เมทิลแอลกอฮอร์ (CH_3OH) 25 เปอร์เซ็นต์ผสมกับน้ำเป็นเชื้อเพลิงป้อนเข้าสู่ขั้วแอโนดโดยตรง ในตัวเมทิลแอลกอฮอร์จะประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไฮดรอกซิล เป็นตัวทำปฏิกิริยา ส่วนออกซิเจนนั้นจะป้อนเข้าที่ขั้วแคโทด ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือไม่มีปัญหาเกี่ยวกับถังเก็บเชื้อเพลิงที่พบในเซลล์เชื้อเพลิงบางชนิดและราคายังถูกกว่า นอกจากนี้ความหนาแน่นของพลังงานที่ได้จากเมทิลแอลกอฮอร์ยังสูงกว่าไฮโดรเจน ดังรายละเอียดในตารางที่ 2

การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด : $CH_3OH + H2O \Rightarrow CO_2 + 6H+ + 6e-$

การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด : $3/2\ O_2 + 6H+ + 6e- \Rightarrow 3H_2O$

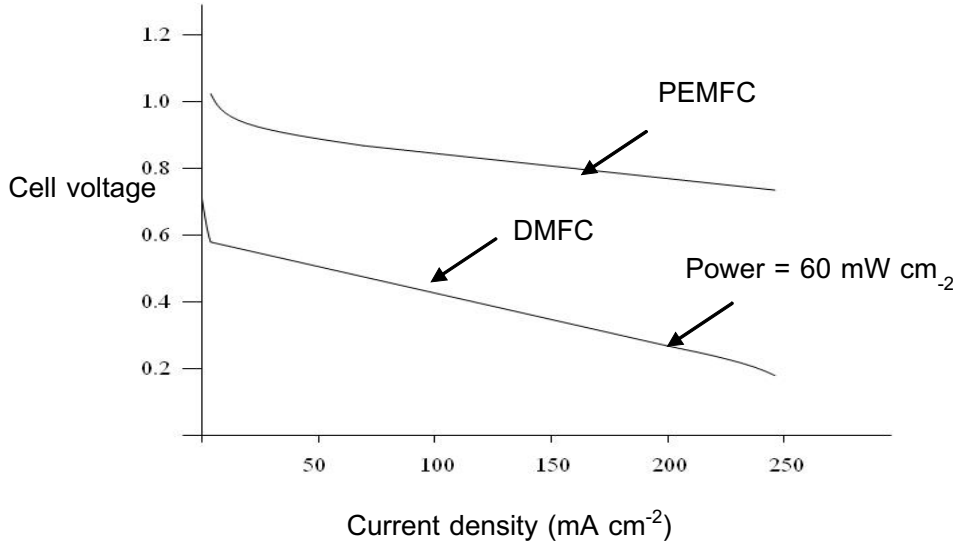
การเกิดปฏิกิริยารวม : $CH_3OH + 2/3\ O_2 \Rightarrow CO_2 + 2H_2O$

แม้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะมีข้อดีหลายประการซึ่งเป็นปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่ใช้ในการตัดสินใจในการเลือกใช้งาน แต่ก็มีข้อเสียคือการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้เมทิลแอลกอฮอร์ที่บริเวณขั้วแอโนดนั้นจะช้ากว่าไฮโดรเจนและการเกิดปฏิกิริยารวมตัวกันกับออกซิเจนที่ขั้วแคโทดที่สลับซับซ้อนกว่า จึงส่งผลให้ระบบของการเกิดปฏิกิริยาโดยรวมแล้วช้ากว่าการเกิดปฏิกิริยาใน

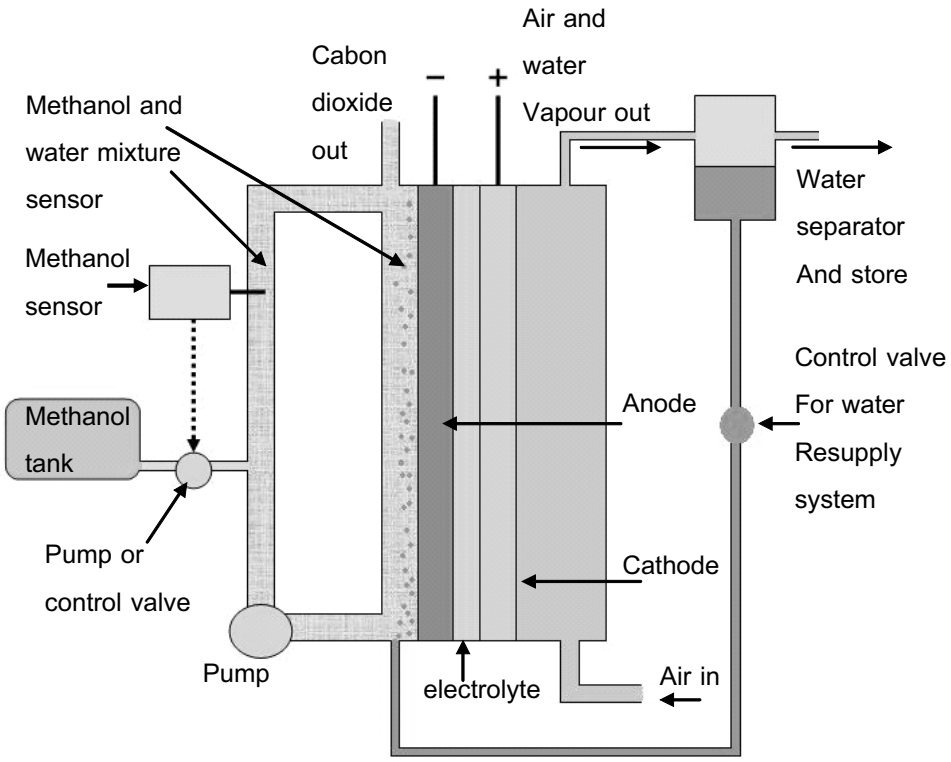
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ มาก นั่นเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ได้นั้นต่ำกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น ในรูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้ากับเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ส่วนในรูปที่ 15 แสดงโครงสร้างภายในของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลังงานระหว่างเมทิลแอลกอฮอร์กับไฮโดรเจน

Storage method	Energy density Of fuel	Storage efficiency (%)	Net energy density
H_2 at 300 bar pressure in composite cylinders	119.9MJ kg -1 33.3 kWh kg -1	0.6	0.72MJ kg -1 0.20 kWh kg -1
H_2 in metal hydride cylinders	119.9MJ kg -1 33.3 kWh kg -1	0.65	0.78MJ kg -1 0.22 kWh kg -1
H_2 from methanol – indirect methanol	119.9MJ kg -1 33.3 kWh kg -1	6.9	8.27MJ kg -1 2.3 kWh kg -1
Methanol in strong plastic Tanks for direct use as fuel	19MJ kg -1 5.54 kWh kg -1	95	18.9MJ kg -1 5.26 kWh kg -1



รูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพพลังงานระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิด DMFC กับ PEMFC



รูปที่ 15 โครงสร้างและระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด DMFC

สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรงนั้นน้ำถือเป็นส่วนผสมสำคัญสิ่งจำเป็นอย่างมากต่อการเกิดปฏิกิริยาเพราะเมธิลแอลกอฮอร์เพียงอย่างเดียวนั้นไม่สามารถใช้ได้ในกระบวนการ จึงจำเป็นต้องมีระบบหมุนเวียนของน้ำเพื่อเติมให้กับเมธิลแอลกอฮอร์ตลอดเวลาในอัตราส่วนที่พอเหมาะ ของเสียที่จะมาจากอิเล็กโทรดทั้งสองด้านโดยด้านขั้วแอโนดจะได้ของเสียเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และขั้วแคโทดของเสียที่ได้จะเป็นอากาศและไอน้ำ

ในการประยุกต์ใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ค่อนข้างมีขีดจำกัดเนื่องมาจากพลังไฟฟ้าที่ได้ออกมานั้นต่ำ จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในงานที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าสูง ๆ ได้ แต่เนื่องจากมีความหนาแน่นของพลังงานสูงจากเชื้อเพลิงที่ใช้จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าต่อเนื่องเป็นเวลานาน เช่น โทรศัพท์มือถือ เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา หรือเครื่องชาร์จแบตเตอรี่ เป็นต้นดังแสดงในรูปที่ 16(ก)-(ง)

(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

รูปที่ 16 การประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรงกับอุปกรณ์เล็กทรอนิกส์ต่างๆ
(ก) เครื่องชาร์จแบตเตอรี่ (ที่มา www.dcviews.com/press/images/Toshiba-Methanol-Fuel-Cell.jpg)
(ข) เครื่องเล่น MP3 (ที่มา www.anythingbutipod.com/archives/images/toshiba-methanol%20.jpg)
(ค) เครื่อง PDA (ที่มา www.batteriesdigest.com/4cf40400.png)
(ง) เครื่องคอมพิวเตอร์พกพา (ที่มา www.capital.lv/pics/news/toshiba-f1.jpg)

ง. เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid - PAFC)

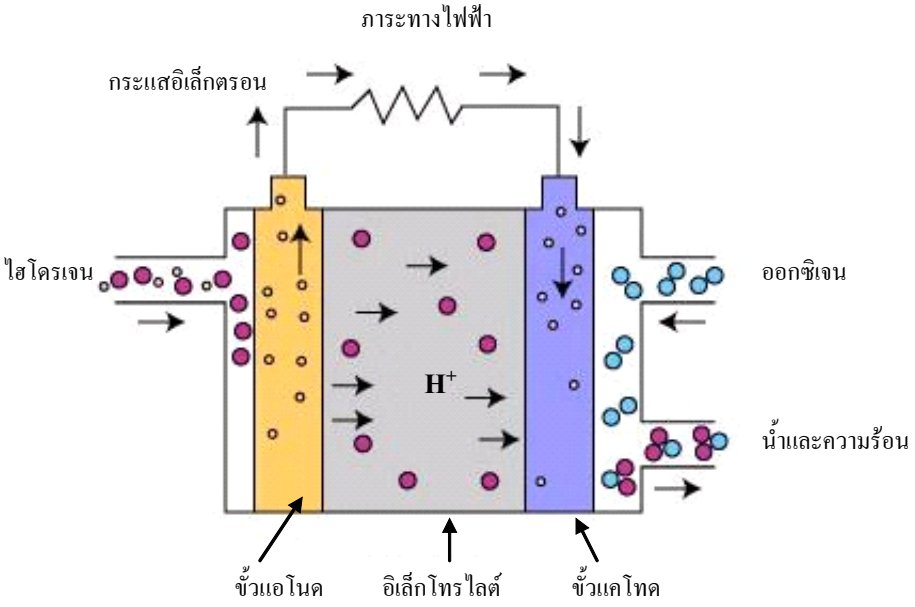
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีลักษณะการทำงานที่เหมือนกับชนิด PEM โดยโปรตอน(+) จะเคลื่อนที่ผ่านเล็กโทรไลต์รวมไปถึงปฏิกิริยาเคมีบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดด้วย โดยใช้กรดฟอสฟอริก (H3PO4) เข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์เป็นเล็กโทรไลต์ ซึ่งสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูง 150 ถึง 220 องศาเซลเซียสได้อย่างมีเสถียรภาพนอกจากนั้นยังทนทานต่อคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เกิดขึ้นอีกด้วย อิเล็กโทรดที่ใช้เหมือนกับแบบ PEM โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแพลตตินั่มเคลือบอยู่บนกระดาษที่ทำจากคาร์บอน ในปัจจุบันจะใช้แพลตตินั่มเคลือบประมาณ 0.05 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรที่ขั้วแคโทดและ 0.10 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรที่

ขั้วแอโนด แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จะทำให้เกิดความเสียหายที่บริเวณขั้วแอโนดซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการรีฟอร์เมอร์ภายในระบบแต่สามารถที่ทำให้บริเวณขั้วแอโนดนั้นลดการดูดซับ CO ได้โดยการให้ทำงานที่อุณหภูมิสูง การทำงานจะแสดงดังรูปที่ 17

การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด : H_2 => 2H+ + 2e-

การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแคโนด : $1/2O_2$ + 2H+ +2e- => H_2O

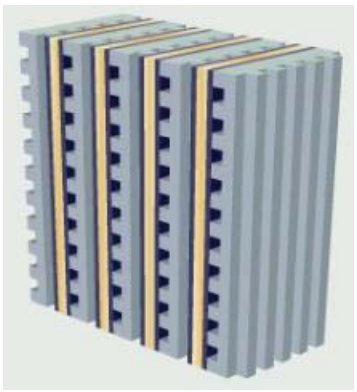
การเกิดปฏิกิริยารวม : $H_2 + 1/2O_2$ => H_2O



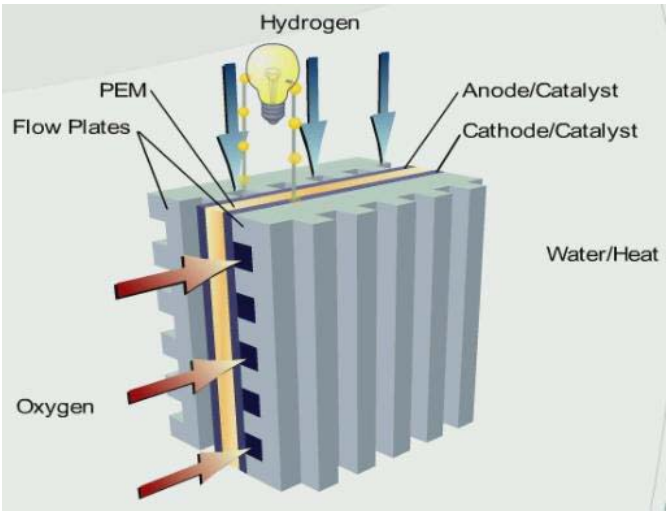
รูปที่ 17 โครงสร้างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PAFC (ที่มา www.fctec.com)

เซลล์ที่นำมาต่อเป็น Stack นั้นจะคล้ายกับแบบ PEM ซึ่งก็จะประกอบด้วย แผ่นเพลต (Bipolar Plate) ขั้วแอโนดและแคโทด และอิเล็กโตรไลท์ โดยปกติจะต่อเรียงกันประมาณ 50 เซลล์ต่อ Stack หรือมากกว่านั้นแล้วแต่ขนาดพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการ แผ่นเพลตที่ใช้จะมี 2 ด้านโดยแต่ละด้านจะทำเป็นลักษณะร่องที่แตกต่างกันเพื่อกำหนดทิศทางการไหลของเชื้อเพลิง ซึ่งด้านที่ทำเป็นช่องลักษณะแนวตั้งจะเป็นทางไหลของไฮโดรเจนและอีกด้านเป็นแนวนอนเป็นช่องลักษณะแนวนอนจะเป็นทางไหลของออกซิเจนดังรูปที่ 18(ก)-(ค)

(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 18 ลักษณะส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PAFC (ก) เซลล์เชื้อเพลิง 1เซลล์ (ข) เซลล์เชื้อเพลิงในลักษณะ Stack (ค) ลักษณะทิศทางการไหลของเชื้อเพลิง (ที่มา www.eere.energy.gov)

ปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PAFC ถูกผลิตออกมาใช้ในเชิงพาณิชย์แล้ว ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะเพิ่มขึ้นถึง 85 เปอร์เซ็นต์ถ้านำมาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบความร้อนร่วม (CHP, Combined Heat and Power) ซึ่งอุณหภูมิในการทำงานจัดอยู่ในระดับกลาง รูปที่ 19(ก) และ (ข) แสดงตัวอย่างระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PAFC ซึ่งนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับงานด้านต่างๆ เช่น โรงผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับชุมชน สำนักงาน บริษัท และโรงพยาบาล เป็นต้น

(ก)

(ข)

รูปที่ 19 การประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า (ก) เซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 กิโลวัตต์ โดยบริษัท ONSI ปัจจุบันเปลี่ยนชื่อเป็น UTC (ที่มา members.aol.com/fuelcells/10.htm)
(ข) เซลล์เชื้อเพลิง Toshiba-UTC PC25 (ที่มา www.fuelcell.no)

จ. *เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate - MCFC)*

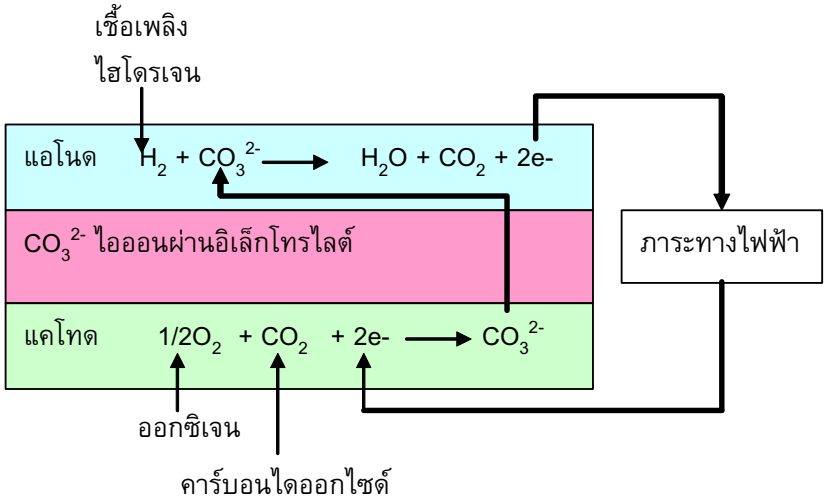
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะใช้เกลือลิเธียมโพแทสเซียมคาร์บอเนตหรือลิเธียมโซเดียม-คาร์บอเนตหลอมละลายเป็นเล็กโทรไลต์ซึ่งจะบรรจุในเมตริกซ์เซรามิกลิเธียมอลูมิเนียมออกไซด์ (LiAlO2) (สมนึก บุญพาไสว : 2548) ใช้โลหะนิกเกิลที่ขั้วแอโนดและโลหะนิกเกิลออกไซด์ที่ขั้วแคโทดซึ่งทนความร้อนสูงนอกจากนี้ยังมีราคาถูกกว่าแพลตตินั่มที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ เมื่อทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียสจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ไอออนคาร์บอเนตออกมาซึ่งจะเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดดังรูป

ที่ 20 และรูปที่ 21 เชื้อเพลิงที่ใช้จ่ายไปยังเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือไฮโดรเจนซึ่งจะจ่ายไปยังขั้วแอโนดและออกซิเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์จ่ายไปยังขั้วแคโทด ของเสียที่ได้จากกระบวนการจะเป็นน้ำ ความร้อนและคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งสามารถนำกลับเข้ามาใช้ใหม่ได้ด้วยกระบวนการรีฟอร์มเมอร์ภายใน (Internal Reforming) ที่สามารถใช้ความร้อนภายในตัวเซลล์มาทำการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ทำให้ประหยัดต้นทุน ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้อยู่ที่ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์และถ้านำมาผลิตไฟฟ้าแบบความร้อนร่วมก็จะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมสูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์

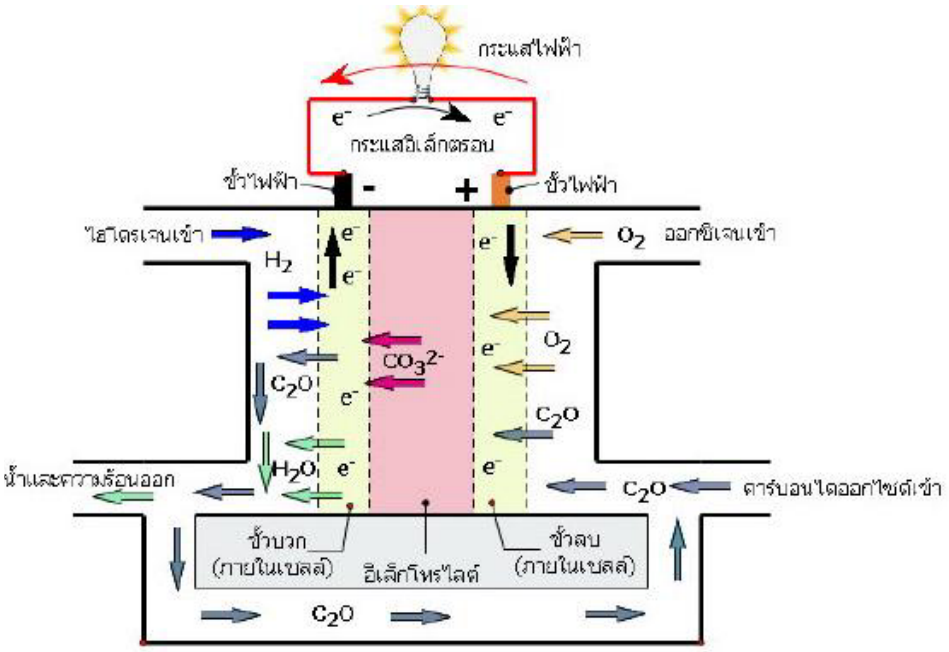
การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด : $H_2 + CO_3^{2-}$ => $H_2O + CO_2 + 2e-$

การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแคโนด : $1/2O_2 + CO_2 + 2e-$ => CO_3^{2-}

การเกิดปฏิกิริยารวม : $H_2 + 1/2O_2 + CO_2$ => $H_2O + CO_2$



รูปที่ 20 การเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด MCFC



รูปที่ 21 แสดงโครงสร้างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด MCFC (ที่มา www.teenet.tei.or.th)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิสูงมากจึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในที่อยู่อาศัยหรือยานพาหนะ โดยปกติแล้วจะนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม ตัวอย่างที่มีการสร้างใช้งานจริงจะเป็นของ MTU 'Hot Module' ที่มีขนาด 250 กิโลวัตต์ ดังรูปที่ 22 และโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 2 เมกกะวัตต์ดังรูปที่ 23

รูปที่ 22 MTU "Hot Module" (ที่มา www.innovation-brennstoffzelle.de/bzelle/haupt7.html)

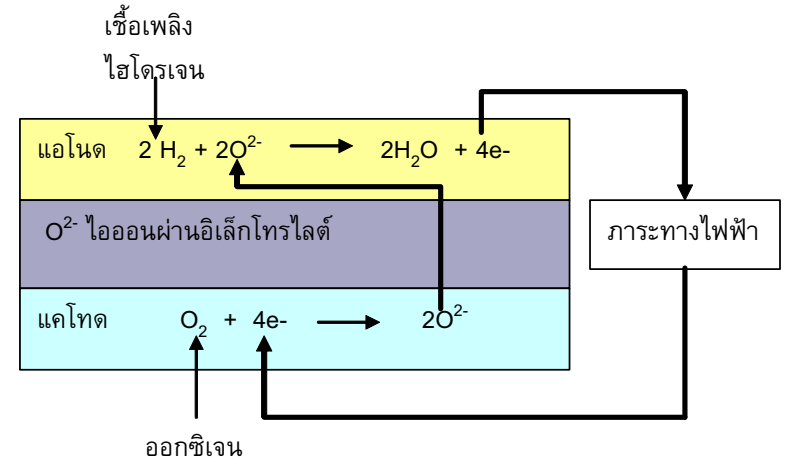
รูปที่ 23 โรงไฟฟ้าขนาด 2 เมกกะวัตต์ที่แคลิฟอร์เนีย (ที่มา www.moea.state.mn.us.htm)

ฉ. *เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide - SOFC)*

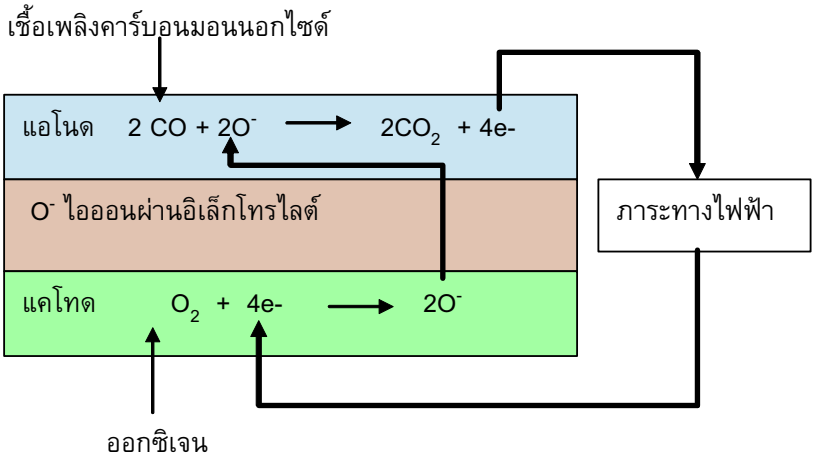
เซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิสูงสุดในการทำงานประมาณ 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส สามารถให้ประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ พลังงานความร้อนที่แผ่ออกมาของ SOFC สามารถที่จะนำไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าแบบความร้อนร่วมได้ ซึ่งจะส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยรวมทั้งระบบเพิ่มขึ้นได้ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC นี้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชนิด PAFC และ PEM นอกจากจะให้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการผลิตที่ดีกว่าแล้ว เชื้อเพลิงยังสามารถใช้ได้ทั้ง ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนนอกไซด์ แอลกอฮอล์และไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นจึงสามารถนำเอาแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์จากถ่านหินเข้ามาใช้ร่วมได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กับ SOFC นั้นยังมีราคาที่ถูกกว่าเนื่องจากทำงานที่อุณหภูมิสูงสามารถที่จะใช้โลหะที่ไม่มีค่าทำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC ยังมีเสถียรภาพการทำงานสูงและอายุการใช้งานของเซลล์นานเนื่องจากส่วนประกอบนั้นเป็นของแข็ง

ส่วนประกอบหลักของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC จะประกอบด้วย ขั้วแอโนด, อิเล็กโทรไลต์, ขั้วแคโทดและตัวเชื่อมต่อ (Interconnect) การทำงานจะจ่ายอากาศไปยังขั้วแคโทดเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยารวมตัวกันของอากาศ ส่วนเชื้อเพลิงจะจ่ายไปยังขั้วแอโนดแสดงดังรูปที่ 24(ก)-(ข) และรูปที่ 25 เมื่อทำงานที่อุณหภูมิสูงออกซิเจนไอออนสามารถวิ่งผ่านเล็กโทรไลต์ได้เพื่อไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงที่ขั้วแอโนดทำให้ได้ของเสียคือความร้อนกับน้ำและอิเล็กตรอนออกมาส่งไปยังโหลดไฟฟ้าและไหลกลับมายังขั้วแคโทดเพื่อทำปฏิกิริยากับอากาศเพื่อให้ได้ออกซิเจนไอออนออกมา

การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด	:	$2H_2 + 2O_2$-	=>	$2H_2O + 4e$-
การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแคโนด	:	$O_2 + 4e$-	=>	$2O_2$-
การเกิดปฏิกิริยารวม	:	$2H_2 + 2O_2$	=>	$2H_2O$

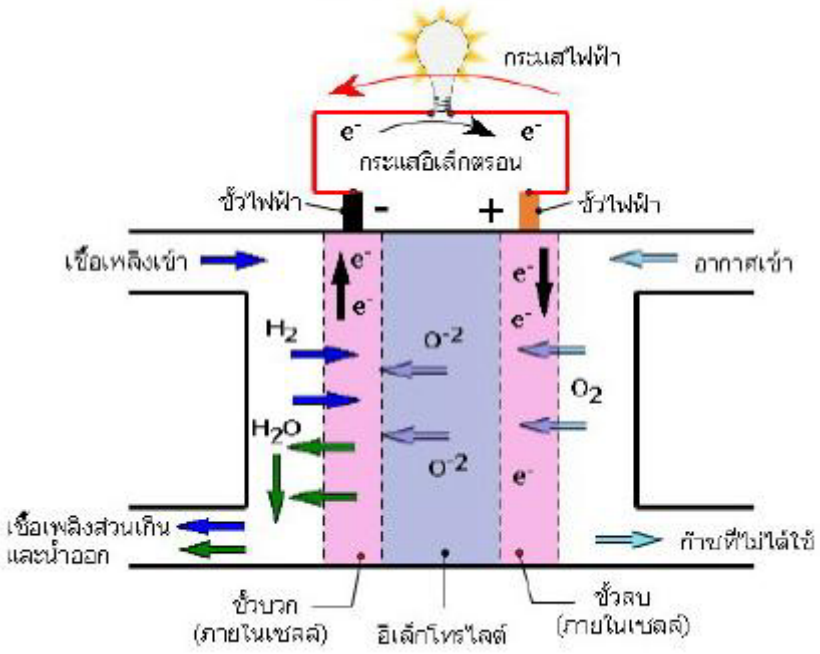


(ก)



(ข)

รูปที่ 24 การเกิดปฏิกิริยาขั้วแอโนดและแคโทดของเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด (ก) แสดงการเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC ใช้เชื้อเพลิงที่เป็นไฮโดรเจน (ข) แสดงการเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC ใช้เชื้อเพลิงที่เป็นคาร์บอนมอนนอกไซด์



รูปที่ 25 โครงสร้างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC (ที่มา www.teenet.tei.or.th)

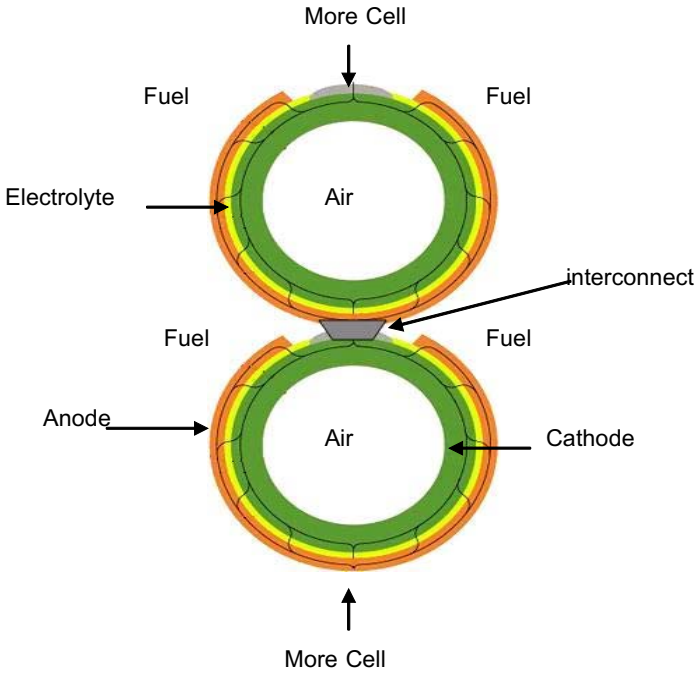
เซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC จะใช้เซรามิกเป็นอิเล็กโทรไลต์ซึ่งทำมาจากสารเซอร์โคเนียมออกไซด์ (Zirconium Oxide) ที่เจือด้วยยิเตรียม (Yttria) จำนวนเล็กน้อยบางครั้งเรียกว่า YSZ (Yttria Stabilized Zirconia) นอกจากนี้ยังทำมาจากคู่ของออกไซด์อื่นเช่น เซอร์โคเนียมออกไซด์ (Zirconium Oxide) และแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) (สมนึก บุญพาไสว : 2548) เซอร์โคเนียมให้เสถียรภาพการทำงานสูงและยังลดออกไซด์ที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วแอโนดและแคโทดอีกด้วย นอกจากนั้นยังเป็นตัวนำที่ดีเพื่อให้ไอออนออกซิเจนไหลผ่านได้ และยังสามารถทำให้อิเล็กโทรไลต์มีความบางมากประมาณ 25-50 ไมโครเมตร อิเล็กโทรดซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางด้านขั้วแอโนดทำจากนิกเกิลผสมกับ YSZ และขั้วแคโทดจะทำจากโลหะผสมเช่น โคบอลต์ แมงกานีส และเซอร์โคเนียม คุณสมบัติของอิเล็กโทรดนั้นจะต้องเสถียรต่ออุณหภูมิที่สูง เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีและมีความแข็งแรง ตัวเชื่อมต่อ (Interconnect) เป็นตัวที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อเซลล์ที่อยู่ใกล้ๆเข้าด้วยกันจะต้องมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีทนความร้อนสูง มีความแข็งแรงไม่เป็นตัวนำไอออนและน้ำจะทำมาจากโลหะเช่น Cr-5Fe-1Y2O3

- **ลักษณะการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC**

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถออกแบบได้ 2 วิธีคือ แบบ Tubular และแบบ Planar

1) แบบ Tubular

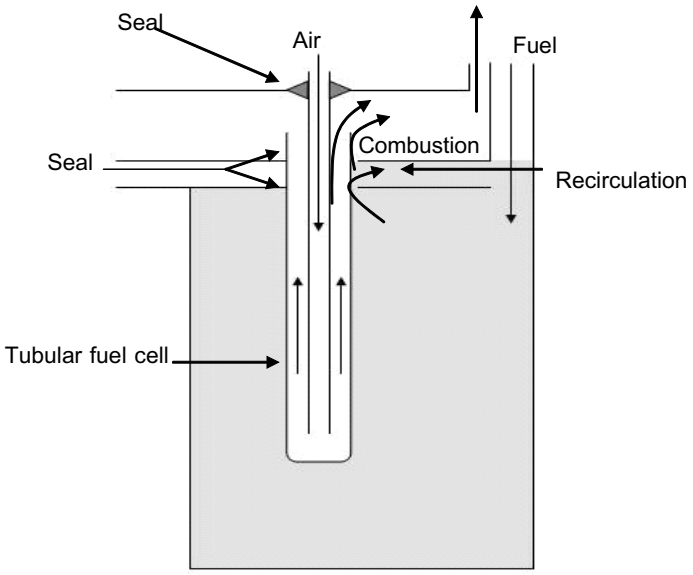
เซลล์เชื้อเพลิงแบบ Tubular SOFC ได้มีการพัฒนาครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1970 โดยบริษัท Siemens Westinghouse Power Corporation มีลักษณะเป็นท่อซึ่งจะทำมาจากเซอร์โคเนียมพรุนดังรูปที่ 26 และรูปที่ 27 ซึ่งเป็นมาตรฐานในการผลิตเป็นต้นมา โดยด้านในสุดของท่อจะเป็นชั้นของขั้วแคโทดที่จะสัมผัสกับอากาศภายในและผิวนอกท่อจะเป็นชั้นขั้วแอโนดที่จะสัมผัสกับเชื้อเพลิงและบริเวณชั้นกลางระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองจะเป็นชั้นของอิเล็กโทรไลต์



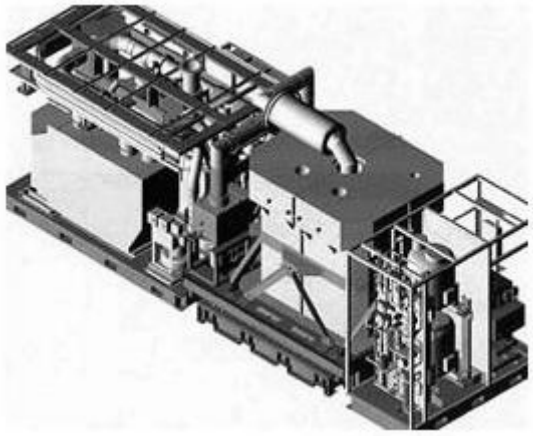
รูปที่ 26 ลักษณะโครงสร้างภายในของ Tubular SOFC
(ที่มา www.powergeneration.siemens.com/en/fuelcells/technology/tubular/index.cfm)

รูปที่ 27 เซลล์เชื้อเพลิง Stack โดยมี 24 ท่อ มีรัศมี 2.0 เซนติเมตรและมีความยาวประมาณ 150 เซนติเมตร
(ที่มา www.powergeneration.siemens.com/en/fuelcells/technology/modular/index.cfm)

ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าต่ำเนื่องจากมีสภาวะของการสูญเสียแบบ Ohmic เกิดขึ้นและกระบวนการผลิตยุ่งยากและมีราคาแพงมาก ข้อดีคือระบบการไหลเวียนแก๊สภายในที่มีระบบป้องกันที่แน่นหนาระหว่างของเสียกับอากาศที่เข้าไปได้อย่างมีประสิทธิภาพดังรูปที่ 28 ได้มีการนำเซลล์ในลักษณะนี้ไปประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าขนาด 100 กิโลวัตต์ ดังรูปที่ 29



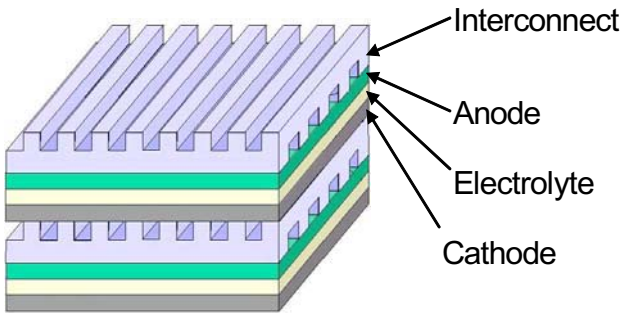
รูปที่ 28 ระบบการไหลเวียนเชื้อเพลิงภายใน



รูปที่ 29 เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าขนาด 100 กิโลวัตต์ที่ เนเธอร์แลนด์ (ที่มา http://evworld.com/view.cfm)

2) แบบ Planer

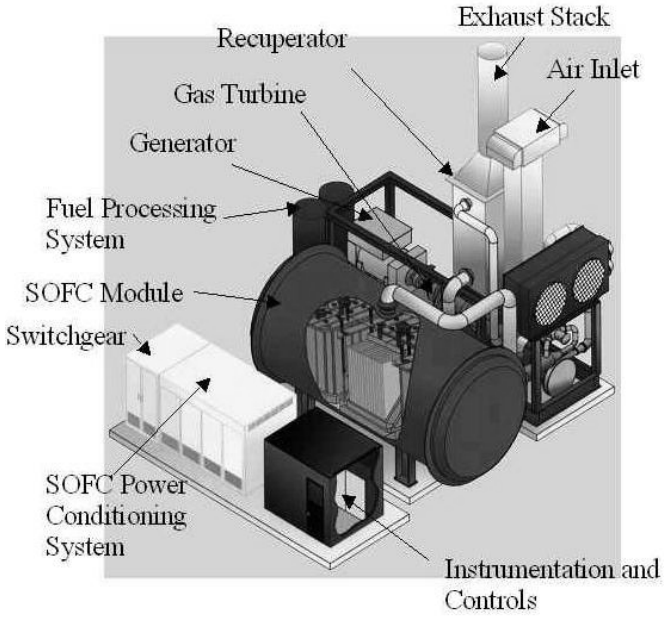
มีลักษณะเป็นแผ่นของเซลล์เชื้อเพลิงซ้อนทับกันเหมือนกับชนิด PEM และ PAFC ซึ่งมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่สลับซับซ้อน โดยประกอบด้วยแผ่นเพลตประกบกัน 2 ข้างของเซลล์เชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 30 การเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์ทำได้ง่ายกว่า ลักษณะของแผ่นเพลตนั้นจะมีความบางทำให้สภาวะของการสูญเสียแบบ Ohmic ต่ำกว่าแบบ Tubular ดังนั้นจึงมีความหนาแน่นของพลังงานสูงกว่า ข้อดีคือกระบวนการผลิตจะง่ายและต้นทุนต่ำกว่า ข้อเสียคือการป้องกันการรั่วไหลของแก๊สทำได้ยากนอกจากนั้นแล้วตัวเซลล์ต้องมีความแข็งแรงสูงเพื่อรองรับการต่อเซลล์เป็นชั้นๆ ดังนั้นการมาประยุกต์ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าไม่เป็นที่นิยมเนื่องมีปัญหาทางเทคนิคมาก



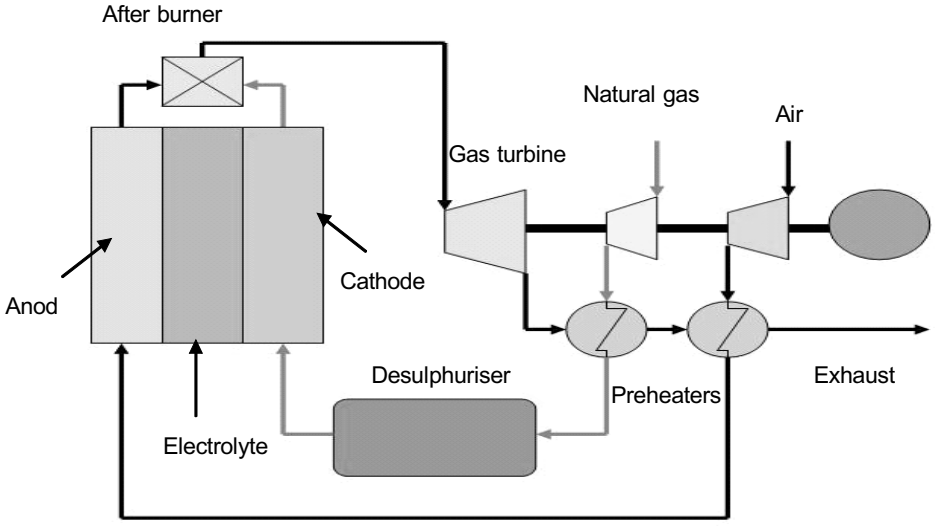
รูปที่ 30 ลักษณะเซลล์เชื้อเพลิง SOFC แบบ Planer
(ที่มา www.aki.che.tohoku.ac.jp/~koyama/html/research/SOFC.html)

- **ระบบหมุนเวียนภายในเซลล์เชื้อเพลิง SOFC**

เซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่อุณหภูมิสูงจึงมีการนำเอาระบบหมุนเวียนเข้ามาใช้เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยสามารถใช้ทั้งแก๊สและไอน้ำที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีนำมาปั่นกังหันให้กับเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า บริษัท Siemens Westinghouse เป็นผู้คิดค้นระบบหมุนเวียนนี้ขึ้น โดยสามารถพัฒนาออกให้จนสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้จากเซลล์ที่มีพลังงานไฟฟ้าเพียง 220 กิโลวัตต์ ให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึง 300 กิโลวัตต์ ดังรูปที่ 31 และรูปที่ 32 แสดงบล็อกการทำงานภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้



รูปที่ 31 ระบบเซลล์เชื้อเพลิง SOFC แบบหมุนเวียน ขนาด 300 กิโลวัตต์ทำงานที่ความดัน 10 bar (ที่มา www.ept.ntnu.no/te/pix/SOFC.jpg)



รูปที่ 32 แผนผังการทำงานระบบหมุนเวียน

เซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC มีอุณหภูมิในการทำงานสูงมากซึ่งไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ในพื้นที่ที่ใกล้คน จึงได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ดังรูปที่ 33 สำหรับแจกจ่ายหรือสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่

รูปที่ 33 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ Tubular Solid Oxide โดย Siemens Westinghouse
(ที่มา www.moea.state.mn.us.htm)

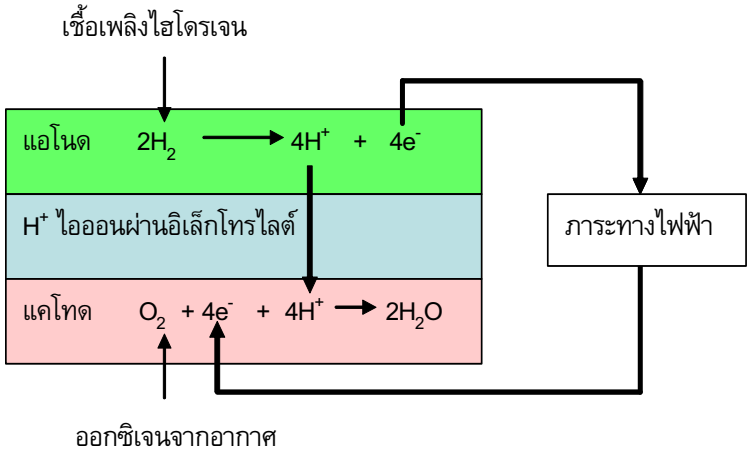
ช. เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอน (Proton Exchange Membrane PEM)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane :PEM) หรือมีชื่อเรียกอีกอย่างว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่ออิเล็กโทรไลต์พอลิเมอร์ (Polymer electrolyte membrane: PEM) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการพัฒนาครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ. 1960 เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในยานอวกาศขององค์การ NASA ส่วนของอิเล็กโทรไลต์ใช้โพลิเมอร์แข็งซึ่งจะทำงานที่อุณหภูมิที่ต่ำประมาณ 75 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นข้อดีคือจะทำให้เซลล์เชื้อเพลิงสามารถเข้าสู่สภาวะการทำงานปกติได้ในระยะเวลาอันสั้น อีกทั้งแต่ละเซลล์ยังมีขนาดที่บาง ส่งผลให้น้ำหนักโดยรวมค่อนข้างเบา นอกจากนั้นแล้วการสึกกร่อนของตัวเซลล์ยังมีน้อย มีการนำเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเพราะสามารถใช้เป็นแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กไปจนถึงแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดใหญ่ได้เช่น เซลล์เชื้อเพลิงที่มีกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าน้อยๆ สามารถนำไปใช้กับโทรศัพท์มือถือหรือเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา ขนาดเป็นกิโลวัตต์จะนำไปใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในอาคารที่พักอาศัย ขนาดสิบกิโลวัตต์จะนำไปใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในรถไฟฟ้า ถ้าเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีขนาดสูงถึง 100 กิโลวัตต์แล้วก็เหมาะที่จะใช้เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถบัสหรือรถโดยสารได้

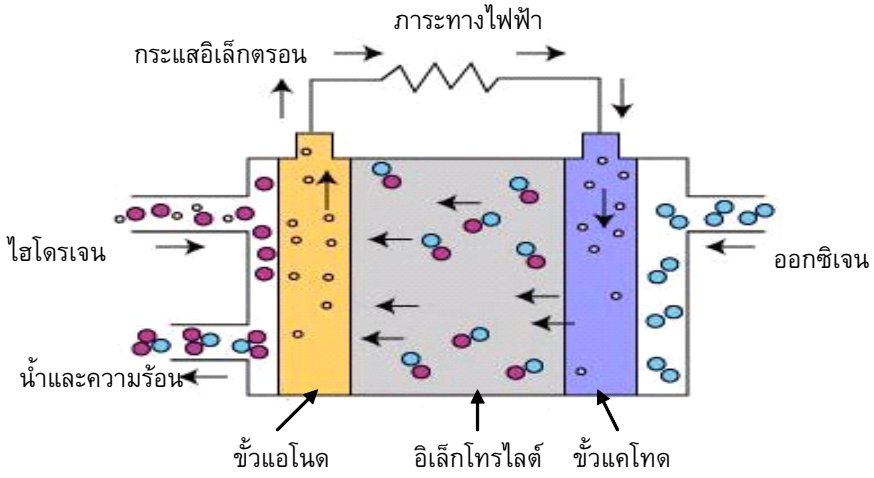
สำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาคือ ไฮโดรเจนและออกซิเจนจากอากาศดังในรูปที่ 34 และรูปที่ 35 โดยจะทำการป้อนไฮโดรเจนเข้าทางด้านขั้วแอโนด ทำให้เกิดการแตกตัวได้โปรตอน (H+) และอิเล็กตรอน โดยโปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วแคโทด ในขณะที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปตามสายไฟสู่อุปกรณ์ไฟฟ้า (ภาระทางไฟฟ้า) และ

ไหลกลับมายังขั้วแคโทด ส่วนออกซิเจนที่ทำการป้อนที่ขั้วแคโทดจะเป็นตัวทำให้เกิดการรวมตัวกันของโปรตอนและอิเล็กตรอนของไฮโดรเจน ได้ผลลัพธ์เป็นน้ำและความร้อนออกมาดังสมการต่อไปนี้

การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด	:	$2H_2$	=>	4H+ + 4e-
การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแคโนด	:	O_2 + 4e- + 4H+	=>	$2H_2O$
การเกิดปฏิกิริยารวม	:	$2H_2 + O_2$	=>	$2H_2O$



รูปที่ 34 การเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM



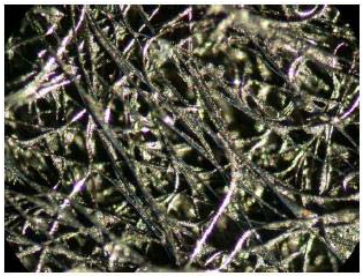
รูปที่ 35 โครงสร้างภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM (ที่มา www.fctec.com)

- **โครงสร้างของโพลิเมอร์**

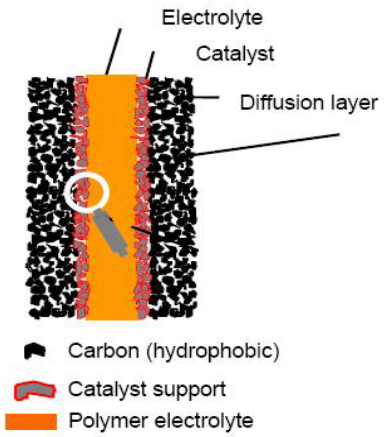
โครงสร้างของโพลิเมอร์ที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนนั้น เป็นพลาสติกสังเคราะห์ชนิดหนึ่งซึ่งมีลักษณะเป็นโมเลกุลยาว จากนั้นจะทำการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของโพลิเมอร์ให้เป็น PTFE (Polytetrafluoroethylene) ซึ่งการเปลี่ยนโครงสร้างในลักษณะนี้เป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้มีความทนทานต่อการกัดกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี สามารถทำให้อิเล็กโทรไลต์มีความบางได้ถึง 50 ไมโครเมตรและโปรตอนของเชื้อเพลิงยังไหลผ่านได้ดี โดยมีประโยชน์ต่อเซลล์เชื้อเพลิงหลายชนิดเช่น ชนิดแอลคาไลน์ ชนิดกรดฟอสฟอริก และชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เป็นต้น

- **โครงสร้างของอิเล็กโทรด**

อิเล็กโทรดที่ใช้ทั้งขั้วแอโนดและแคโทดนั้นจะเป็นแพลตตินั่ม ซึ่งถือว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี ในช่วงแรกๆ อัตราส่วนที่ใช้คือ 28 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรเป็นอัตราส่วนที่สูง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อราคาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีการลดจำนวนลงเหลือเพียง 0.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแพลตตินั่มนั้นจะประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆ ที่เคลือบบนกระดาษหรือผ้าที่ทำมาจากคาร์บอนอิเล็กโทรดเมื่อเคลือบแล้วจะลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระเป็นคุณสมบัติที่ให้โปรตอนสามารถซึมผ่านได้ ซึ่งเป็นบริเวณที่แก๊สจะมากระทบที่พื้นผิวนี้ดังรูปที่ 36 ชิ้นส่วนต่างๆ ของอิเล็กโทรดเมื่อเคลือบเป็นชิ้นแล้วก็จะนำมาประกอบติดทั้งสองข้างของโพลิเมอร์บางครั้งเรียกว่า MEA (Membrane Electrode Assembly) แสดงดังรูปที่ 37 อัตราส่วนความหนาที่มีการออกแบบนั้น ที่เยื่อเมมเบรนจะมีความหนาประมาณ 0.05-0.1 มิลลิเมตร อิเล็กโทรดมีความหนาประมาณ 0.03 มิลลิเมตรและชั้นคาร์บอนจะมีความหนา 0.2-0.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 36 ลักษณะชั้นคาร์บอน (ที่มา http://www.tfic.kmitnb.ac.th)

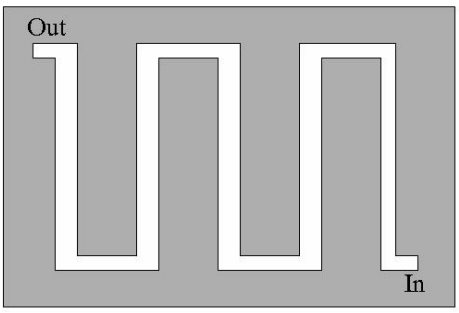


รูปที่ 37 ลักษณะ MEA (Membrane Electrode Assembly) (ที่มา http://www.tfic.kmitnb.ac.th)

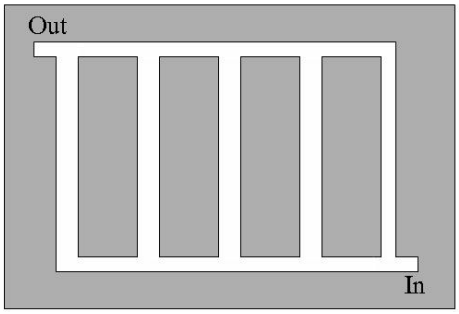
- **แผ่นเพลต (Bipolar Plate) ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM**

แผ่นเพลตหรือ Bipolar Plate คือแผ่นที่ใช้สำหรับกำหนดทิศทางการไหลของเชื้อเพลิงที่ป้อนทั้งด้านแคโทดและด้านแอโนด เพื่อให้ตัวเชื้อเพลิงสัมผัสโดนตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ได้อย่างทั่วถึงโดยจะมีลักษณะเป็นร่องทั้งสองด้านของแผ่นเพลตดังรูปที่ 38 ลักษณะของร่องที่อยู่บนแผ่นเพลตจะมีลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานข้อดีของแต่ละแบบก็จะแตกต่างกันไปด้วยดังรูปที่ 39(ก) ถึง (จ)

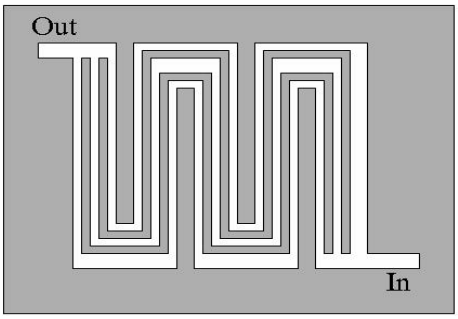
รูปที่ 38 ลักษณะแผ่น Bipolar Plate (ที่มา http://www.tfic.kmitnb.ac.th)



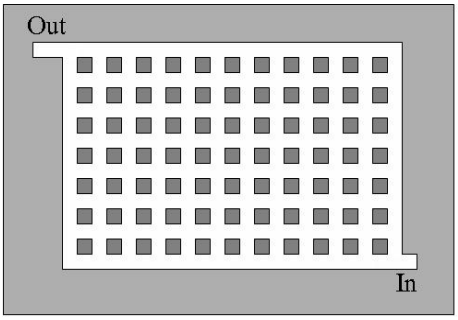
(ก)



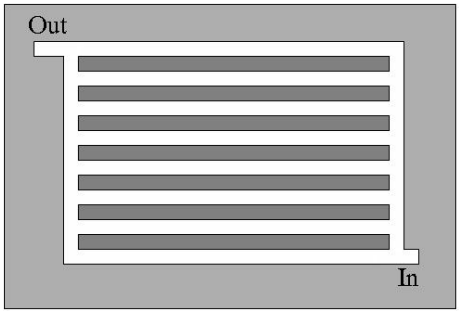
(ข)



(ค)



(ง)

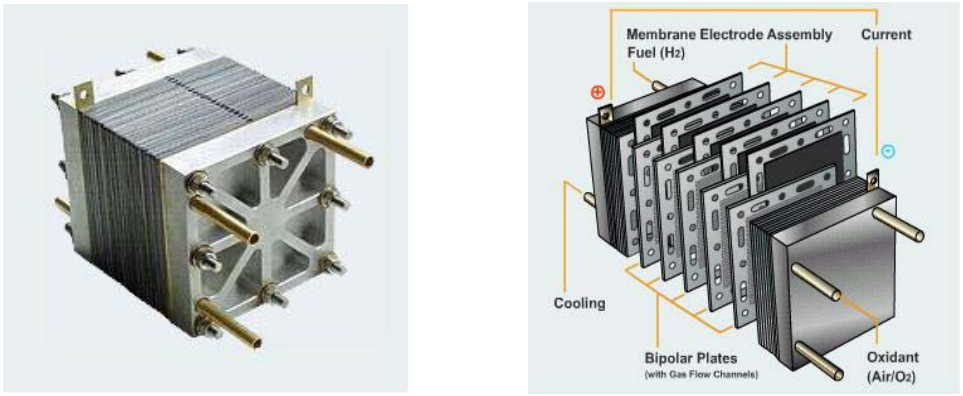


(จ)

รูปที่ 39 ลักษณะล่องแบบต่างๆของแผ่นเพลตที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM (ก) Parallel (ข) Serpentine (ค) Parallel serpentine (ง) Grid (จ) Long parallel

ข้อดีของร่องบนแผ่นเพลตในแต่ละแบบจะมีข้อดีและเหมาะในการใช้งานเฉพาะ ยกตัวอย่างชนิด (ก) จะเหมาะกับการไหลเวียนของน้ำ แต่ไม่เหมาะที่จะใช้ในงานที่ต้องเคลื่อนที่ แบบ (ข) จะเหมาะสำหรับงานที่ต้องเคลื่อนย้ายไปมา แบบ (ค) ค่อนข้างที่จะสลับซับซ้อนทำให้ต้องใช้แรงดันสูงในการขับแก๊สให้ไหลทั่วแผ่น แบบ (ง) เป็นแบบที่แก๊สสามารถไหลผ่านอิเล็กโทรดได้อย่างทั่วถึงแต่อัตราการไหลของแก๊สภายในจะไม่สม่ำเสมอ ความลึกและความกว้างของร่องนั้นจะกำหนดให้น้อยกว่า 1 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ทำมีหลายชนิดเช่น คาร์บอน วัสดุผสมคาร์บอนหรือโพลิเมอร์ เหล็ก เป็นต้น

แผ่นเพลตนอกจากจะเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลให้กับเชื้อเพลิงแล้วยังเป็นช่วยในการต่อเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์เข้าด้วยกันเป็นชั้นๆเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (Fuel Cell Stack) ให้แน่นหนาแล้วมีความแข็งแรงดังรูปที่ 40(ก) และ (ข)



(ก) (ข)

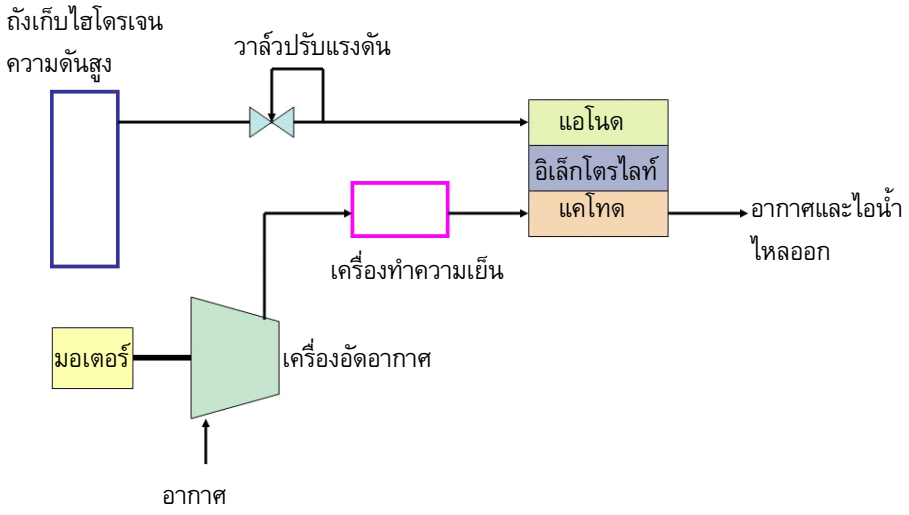
รูปที่ 40 ส่วนประกอบของ Fuel cell stack (ที่มา www.sglcarbon.com/sgl_t)

- **ระบบแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง**

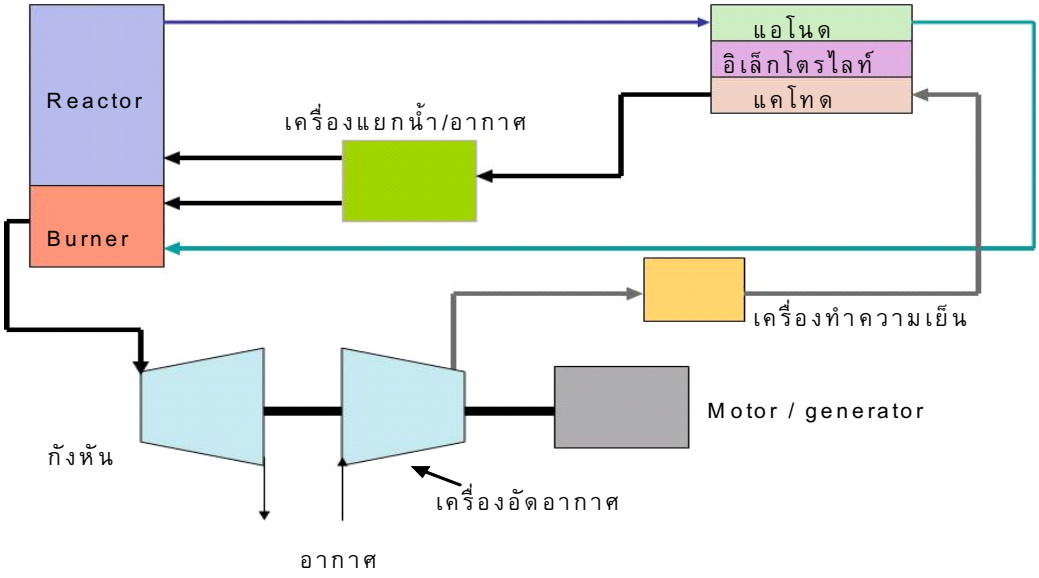
แรงดันที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงไม่ว่าจะเป็นระบบขนาดใหญ่หรือขนาดเล็กเป็นปัจจัยอีกข้อหนึ่งที่มีผลต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตออกมาจากตัวเซลล์ ในระบบแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงจะประกอบด้วยถังเก็บไฮโดรเจนแรงดันสูงซึ่งจะถูกควบคุมแรงดันด้วยวาล์วเพื่อจ่ายไปยังขั้วแอโนดในอัตราที่เหมาะสม ทางด้านขั้วแคโทดจะถูกป้อนด้วยอากาศที่มาจากเครื่องอัดอากาศซึ่งใช้กำลังการขับจากมอเตอร์ไฟฟ้า ดังนั้นจะต้องมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้มอเตอร์ตลอดโดยจะใช้ไฟฟ้าจากตัวของเซลล์เชื้อเพลิงเองเช่น ในระบบของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีพลังงานไฟฟ้า 100

กิโลวัตต์ พลังงานที่ต้องใช้ขับมอเตอร์นั้นจะใช้ไปประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ เป็นระบบที่มีข้อเสียในจุดนี้ดังรูปที่ 41

การแก้ไขปัญหาพลังงานสูญเสียในการอัดอากาศในระบบจัดการแรงดันคือการใช้ รี-ฟอร์มเมอร์ (Reformer) ซึ่งเป็นกระบวนการสกัดเชื้อเพลิงที่มีไฮโดรเจนผสมอยู่ เช่น ไฮโดรคาร์บอนและมีเทน เป็นต้น ในรูปที่ 42 เป็นระบบที่นำเอาน้ำหรือไอน้ำซึ่งเป็นของเสียจากระบบมาเข้ากระบวนการแยกไฮโดรเจนสำหรับเป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้ของเสียที่ได้ยังนำไปผ่านการเผาไหม้เพื่อให้เกิดแรงดันสำหรับปั่นกังหันที่ใช้ในกระบวนการอัดอากาศในระบบ ในช่วงแรกจะใช้กระแสไฟฟ้าในการขับมอเตอร์เพื่ออัดอากาศแต่หลังจากระบบทำงานสมบูรณ์แล้วมอเตอร์จะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแทน ระบบการรีฟอร์มเมอร์ ถือว่าเป็นระบบที่มีความสมดุลสูง

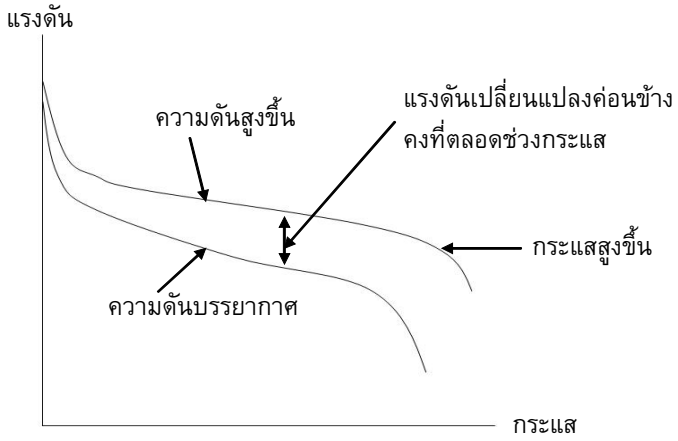


รูปที่ 41 ระบบแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 42 ระบบแรงดันแบบรีฟอร์มเมอร์

แรงดันนอกจากจะเป็นตัวส่งเชื้อเพลิงไปยังส่วนต่างๆ ของระบบแล้วยังเป็นปัจจัยที่ส่งผลถึงพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตออกมาอีกด้วย โดยถ้าต้องการให้มีพลังงานไฟฟ้าออกมามากขึ้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการทางไฟฟ้า สามารถทำได้โดยเพิ่มแรงดันในการขับเชื้อเพลิงไปยังเซลล์เชื้อเพลิง ดังเห็นได้จากความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแรงดันเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันในรูปที่ 43



รูปที่ 43 ลักษณะของแรงดันที่มีผลต่อพลังงานไฟฟ้า

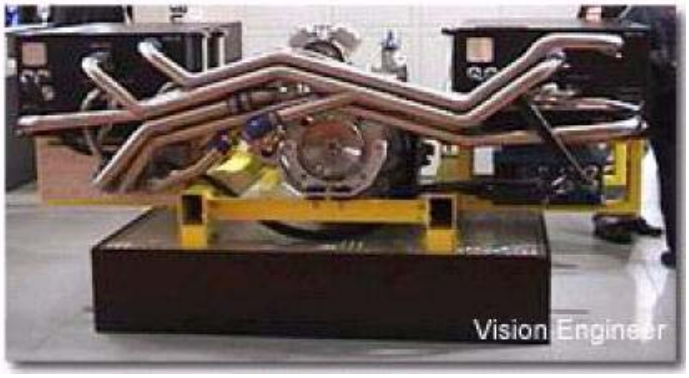
- **การประยุกต์ใช้งาน**

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนนี้ถือว่ามีการนำมาประยุกต์ใช้งานมากที่สุดเพราะสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 12 วัตต์ จนถึง 250 กิโลวัตต์ รวมไปถึงประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงที่สูงและอุณหภูมิในการทำงานที่ค่อนข้างต่ำจนสามารถนำมาใช้ในที่อยู่อาศัยได้ ในปัจจุบันเริ่มมีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมรถยนต์มากขึ้น เนื่องจากไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและไม่ต้องใช้พลังงานจากน้ำมันแต่จะใช้พลังงานที่ได้จากไฮโดรเจนกับออกซิเจนแทนเป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ตัวอย่างที่มีการนำเอาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมาใช้งานเช่น แหล่งพลังงานไฟฟ้าในที่อยู่อาศัย แหล่งพลังงานไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถยนต์หรือรถบัส เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 44 (ก) ถึง (ค)

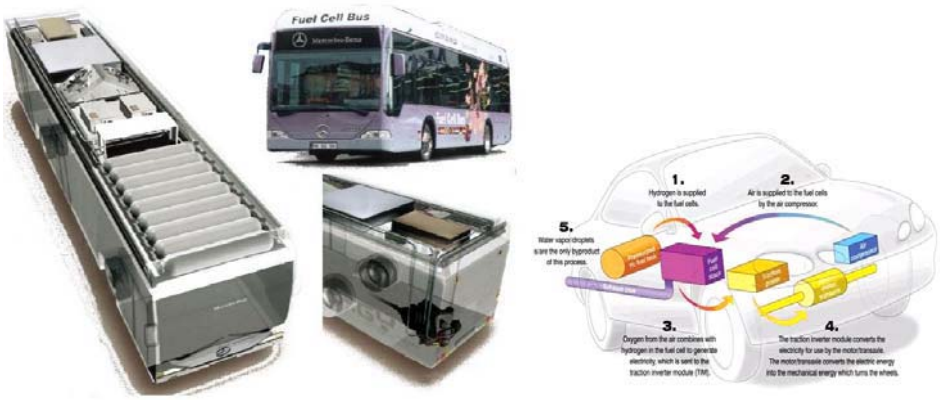
2.1.2 เซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย

จากการศึกษาคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิดทำให้สามารถสรุปได้ว่า ชนิดออกไซด์ของแข็ง และชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนในยานยนต์ โรงงานอุตสาหกรรมขนาดย่อม และบ้านพักอาศัยในประเทศไทยได้เป็นอย่างดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเน้นศึกษาระบบจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดนี้

(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 44 การประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (ก) เครื่องต้นแบบขนาด 5 กิโลวัตต์ที่ผลิตโดย UTC Fuel Cell ของอเมริกา (ข) เครื่องยนต์ขับเคลื่อนสำหรับรถบัสกำลังขับมอเตอร์ 205 กิโลวัตต์ (ค) การประยุกต์ใช้งานในรถบัสและรถยนต์ (ที่มา www.fuelcelltoday.com)

2.2 คุณลักษณะของพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง

ค่าของแรงดันไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้จากปฏิกิริยาทางเคมีนั้นในขณะที่ไม่มีการต่อภาระทางไฟฟ้าภายนอกแรงดันไฟฟ้าจะได้ดังสมการ

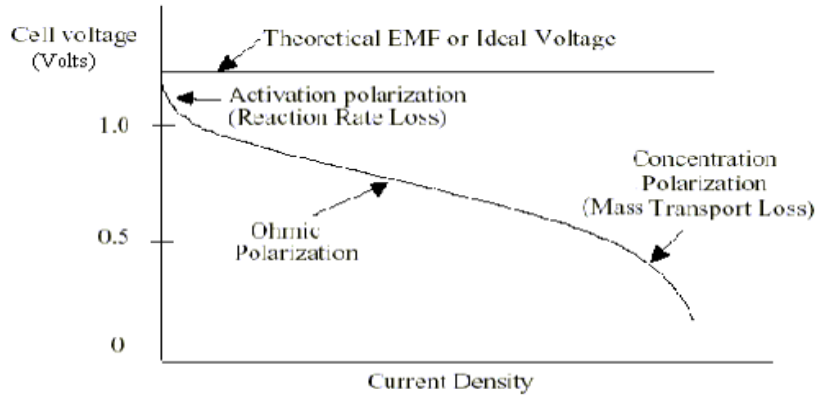
$$E = \frac{-\Delta \overline{g} f}{2F} \qquad (1)$$

โดยที่ E คือ ค่าของแรงดันไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง

$-\Delta \overline{g} f$ คือ พลังงานที่ปล่อยออกมาจากการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ซึ่งเท่ากับ 96485 คูลอมบ์

ค่าของแรงดันที่ได้จะมีค่าโดยประมาณ 1.2 โวลต์ทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียสแต่เมื่อได้ทำการต่อภาระทางไฟฟ้าภายนอกเข้ามาใช้งาน ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าลดลงซึ่งจะมีค่าแปรผกผันตามค่าของกระแสที่เพิ่มขึ้น กระแสและแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีลักษณะดังรูปที่ 45

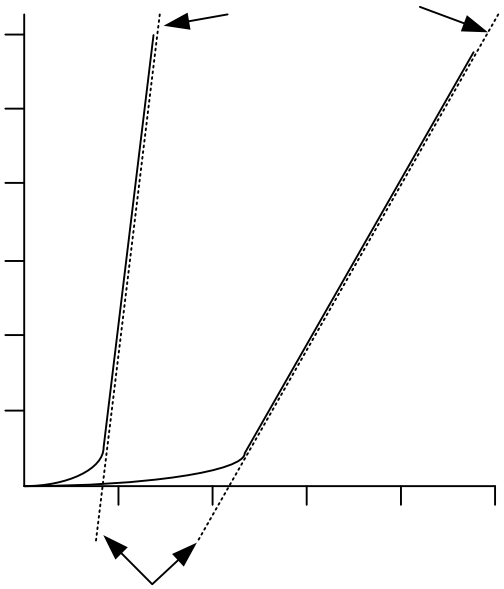


รูปที่ 45 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงทั่วไป

สาเหตุที่ทำให้ลักษณะของกระแสและแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะดังรูปที่ 45 เนื่องมาจากค่าความสูญเสียภายใน (โพลาไรเซชัน : Polarization) ซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยหลายอย่างด้วยกันดังเช่น ปฏิกิริยาเคมี สารเคมีที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง อุณหภูมิในการทำงาน วัสดุที่ใช้ในการสร้าง ความดันก๊าซในระบบ เป็นต้น สาเหตุหลักของค่าความสูญเสียสามารถแบ่งออกได้ 3 ลักษณะด้วยกันคือ 1) โพลาไรเซชั่นการกระตุ้น (Activation Polarization) 2) โพลาไรเซชั่นจากความต้านทาน (Ohmic Polarization) และ 3) โพลาไรเซชั่นจากความเข้มข้นของเชื้อเพลิง (Concentration Polarization)

ก. โพลาไรเซชั่นการกระตุ้น (Activation Polarization หรือ Activation Losses)

เกิดจากผลของปฏิกิริยาทางเคมีบริเวณพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทดทั้งสองที่ทำให้แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงไม่เป็นตามอุดมคติ และจะมีส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่ตกในช่วงแรก ปฏิกิริยาบริเวณขั้วไฟฟ้าจะค่อนข้างช้าโดยสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 46 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 46 Tafel plots ความแตกต่างปฏิกิริยาเคมีช้าและเร็ว

สามารถเขียนเป็นสมการความแตกต่างของแรงดันบริเวณแรงดันความสูญเสียการกระตุ้นได้ดังนี้

$$\Delta V_{act} = A \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \qquad (2)$$

โดยที่ ΔV_{act} = แรงดันสูญเสียจากการกระตุ้น

A = ค่าคงที่ในสมการ Tafel

i = ความหนาแน่นของกระแส $\left(mAcm^{-2}\right)$

i_0 = ความหนาแน่นของกระแสที่เปลี่ยนแปลง $\left(mAcm^{-2}\right)$

จากรูปที่ 46 ช่วงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงที่ปฏิกิริยาเคมีช้าแรงดันไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจะลดลงมากกว่าการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เร็ว กล่าวโดยสรุปคือถ้ายิ่งเร่งให้มี

ปฏิกิริยาบริเวณขั้วไฟฟ้าเร็วเท่าไหร่ การสูญเสียของแรงดันไฟฟ้าในส่วนของการกระตุ้นก็จะมีค่าลดลง

ข. *โพลาไรเซชั่นจากความต้านทาน (Ohmic Polarization)*

โพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเป็นความสูญเสียแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งได้รับผลกระทบมาจากความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการสร้างมีประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าไม่ดีและความต้านทานการไหลของไอออนผ่านแผ่นเยื่ออิเล็กโทรไลต์ จากทั้งหมดสามารถเขียนเป็นสมการความสูญเสียจากความต้านทานได้ดังนี้

$$\Delta V_{Ohm} = ir \tag{3}$$

โดยที่ V_{Ohm} = แรงดันสูญเสียจากความต้านทาน

i = ความหนาแน่นของกระแส $\left(mAcm^{-2}\right)$

r = ความต้านทานของพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยา $\left(k\Omega cm^{2}\right)$

ดังนั้นการที่จะลดความสูญเสียจากความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำให้ดีขึ้นได้โดยการเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าให้มีค่าความนำของกระแสไฟฟ้าที่สูงเพื่อลดแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน นอกจากนี้ในส่วนของเยื้อแผ่นอิเล็กโทรไลต์นั้นควรจะมีการออกแบบให้มีขนาดบางที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้เพื่อให้ไอออนของเชื้อเพลิงสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้เร็วขึ้น

ค. *โพลาไรเซชั่นจากความเข้มข้นของเชื้อเพลิง (Concentration Polarization)*

การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิงที่จ่ายให้กับเซลล์เชื้อเพลิงเป็นพลังงานไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเพลิงในขั้วไฟฟ้าทั้งสองซึ่งบริเวณขั้วแคโทดปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนก็จะมีปริมาณลดลงและที่บริเวณขั้วแอโนด ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนก็จะลดลงเช่นกัน การลดลงของความเข้มข้นของสารนี้ทำให้แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงสูญเสียไปโดยจะเห็นได้ชัดในช่วงที่มีการดึงกระแสในปริมาณสูงสามารถเขียนให้ออกมาอยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$\Delta V_{trans} = m\exp(ni) \tag{4}$$

โดยที่ ΔV_{trans} = แรงดันสูญเสียจากความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

m และ n = ค่าของการถ่ายเทมวลสาร

จากสมการ (1) ถึง (4) สามารถนำมาคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อนำมาต่อใช้งานกับภาระทางไฟฟ้าภายนอก ซึ่งมีค่าแปรผันตามขนาดของความหนาแน่นของกระแสจะได้เป็นความสัมพันธ์ตามสมการ (5)

$$V = E - \Delta V_{Ohm} - \Delta V_{Act} - \Delta V_{trans} \tag{5}$$

2.3 วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Emulator)

ในส่วนนี้เป็นการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองและวงจรเลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง รวมถึงนำเสนอวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงแนวใหม่ที่ดำเนินการในงานวิจัยนี้ แบบจำลองและการเลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบวงจรป้อนกลับสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้จัดการพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง สำหรับการเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์ของเชื้อเพลิงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้คือ แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิง และวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง โดยมีหลักการ ข้อดี-ข้อเสีย ดังต่อไปนี้คือ

- **แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิง**

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นการบรรยายพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงในรูปแบบความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุต โดยอาศัยสมการคณิตศาสตร์ จุดประสงค์หลักของการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น เพื่อใช้ในการออกแบบวงจรควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งโดยทั่วไปมีความเหมาะสมอย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้จำลองการทำงานของระบบกำเนิดพลังงานไฟฟ้าบนคอมพิวเตอร์ เนื่องจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีความถูกต้องและความแม่นยำที่สูง อย่างไรก็ตามในการนำเอาแบบจำลองคณิตศาสตร์ดังกล่าวไปใช้สร้างวงจรจริงเพื่อใช้เลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิงนั้นเป็นไปได้ยากเนื่องจากความซับซ้อนของสมการทางคณิตศาสตร์

- **วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง**

เนื่องจากความซับซ้อนของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้จำเป็นที่ต้องหาวิธีการที่มีความซับซ้อนน้อยกว่า ในขณะที่ยังคงความถูกต้องของพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงเอาไว้ จึงมีการนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะเฉพาะใกล้เคียงกับพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงมาประกอบกันขึ้นให้ทำงานเป็นวงจรที่เลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์

เชื้อเพลิง จุดประสงค์หลักของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงคือการนำมาใช้เป็นตัวแทนของเซลล์เชื้อเพลิงจริงๆ ซึ่งมีราคาที่สูงมาก โดยเฉพาะในประเทศไทยที่ยังไม่มีการผลิตขึ้น งานวิจัยในปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงนั้นสามารถแบบออกเป็น 2 ประเภทดังนี้คือ วงจรเลียนแบบโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน และวงจรเลียนแบบโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ทั้งสองประเภทมีข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกันไปซึ่งขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการใช้งาน ข้อดีของวงจรเลียนแบบที่ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานคือความง่าย ไม่สลับซับซ้อน หากแต่มีข้อเสียคือมีความยืดหยุ่นน้อย นั่นคือใช้สำหรับเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงได้ในขอบเขตที่จำกัด เนื่องจากพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานที่ใช้มีค่าที่ค่อนข้างคงที่ เป็นผลให้ช่วงของจุดทำงานของวงจรเลียนแบบดังกล่าวค่อนข้างแคบ ในทางกลับกันวงจรเลียนแบบที่ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังนั้นจะมีความยืดหยุ่นสูงกว่า สามารถเลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงได้หลายประเภท และช่วงจุดทำงานที่กว้างกว่า อย่างไรก็ตามวงจรเลียนแบบที่ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะมีความซับซ้อนกว่า มีราคาที่สูงกว่า

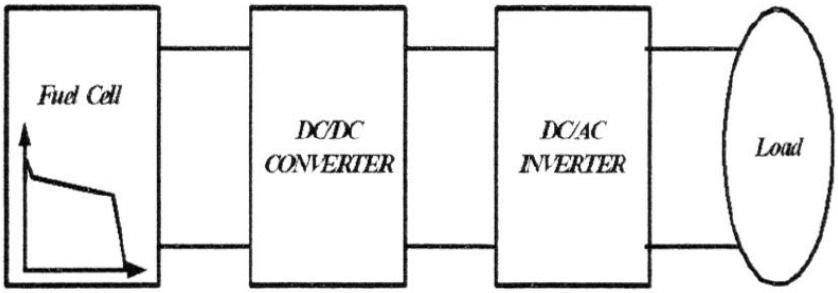
ในงานวิจัยนี้จะเน้นการสร้างวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงโดยอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุดและมีความยืดหยุ่นสำหรับการเลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงที่กว้างที่สุด

2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง

จากผลการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง มีงานวิจัยที่น่าสนใจด้วยกันสามผลงานดังนี้คือ

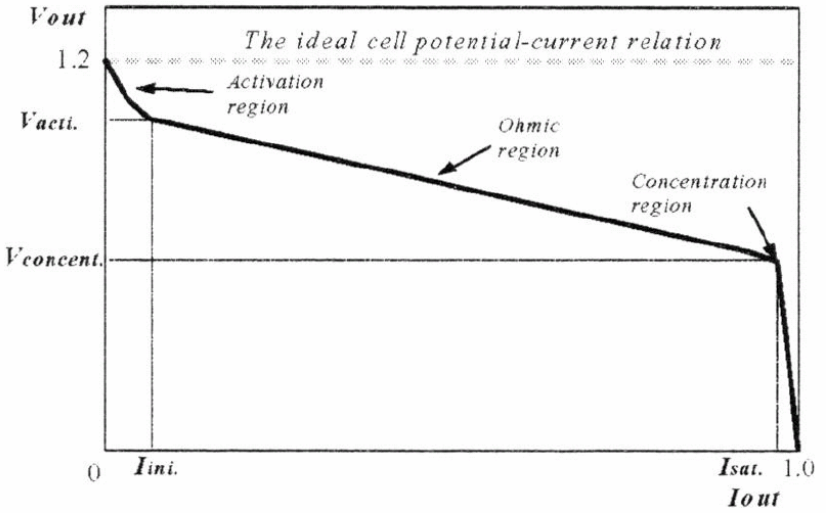
ก. งานวิจัยที่ 1

Tae Won lee และคณะ ได้เสนองานวิจัยเรื่องแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 3 กิโลวัตต์โดยใช้ตัวจำลองพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง ระบบที่นำเสนอประกอบด้วย 3 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 47 คือ วงจรจำลองเซลล์เชื้อเพลิง, วงจรแปลงไฟตรงแบบฟูลบริดจ์ และวงจรอินเวอร์เตอร์ จุดประสงค์หลักในงานวิจัยก็คือเพื่อควบคุมพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อจ่ายไปยังโหลดได้อย่างมีเสถียรภาพ ในการควบคุมทั้ง 3 ส่วนจะใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 วงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะใช้หลักการของวงจรแปลงไฟตรงแบบแปลงลง มาใช้เพื่อให้ได้ลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าออกมาได้เหมือนเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนโดยมีขนาด 3 กิโลวัตต์ แรงดันที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจะอยู่ในช่วง 39 ถึง 72 โวลต์

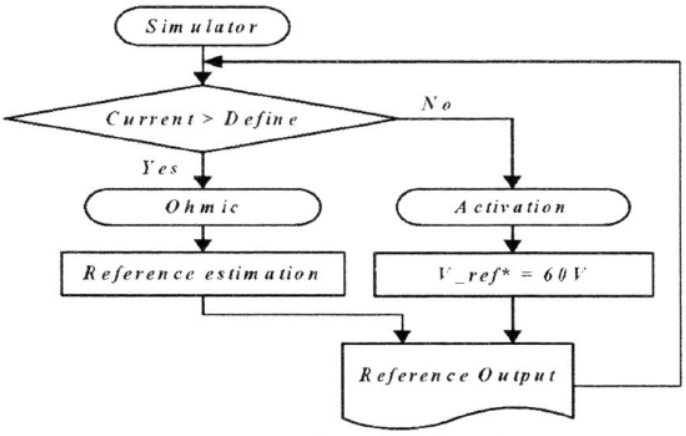


รูปที่ 47 ระบบรวมของแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงจะมีลักษณะความสัมพันธ์เฉพาะของกระแสและแรงดันดังรูปที่ 48 ซึ่งเกิดจากค่าความสูญเสียภายใน ได้แก่ Activation, Ohmic และ Concentration แต่สำหรับการออกแบบวงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้จะใช้ความสูญเสียภายใน Activation และ Ohmic มาพิจารณาในการออกแบบเท่านั้น



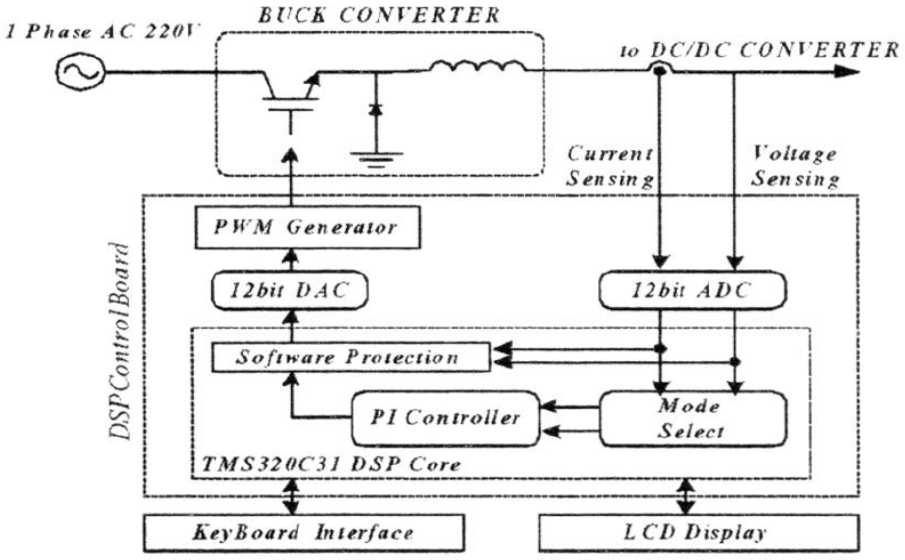
รูปที่ 48 ลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 49 แผนผังการทำงานของวงจรจำลองการทำงานเซลล์เชื้อเพลิง

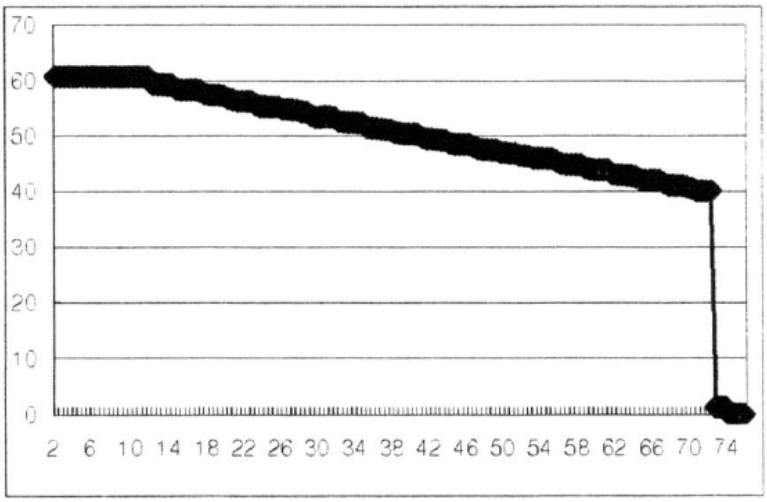
รูปที่ 49 แสดงวิธีการควบคุมวงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้ ซึ่งแสดงเป็นแผนผังการทำงานของตัวโปรแกรมภายในซึ่งจะมีการกำหนดขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงเช่น ค่ากระแส, แรงดัน, ความสูญเสียภายใน Activation, Ohmic และ Concentration เป็นต้น เริ่มแรกจะทำการรับค่าเข้ามาที่ได้จากการวัดกระแสและแรงดันจากนั้นจะทำการตรวจสอบว่าค่าของกระแสที่ได้นั้นมากกว่าค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้ามากกว่า การควบคุมในส่วนของ Ohmic ก็จะเริ่มทำงานทำให้แรงดันและกระแสมีความสัมพันธ์เป็นลักษณะเชิงเส้น แต่ถ้ากระแสที่วัดได้ไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนด ส่วนควบคุมจะทำงานในส่วน Activation เพื่อกำหนดให้ค่าแรงดันอ้างอิงเป็น 60 โวลต์แล้วส่งกลับทำการตรวจสอบจนกว่าจะได้เข้าสู่โหมดการทำงานของ Ohmic

วงจรแปลงไฟตรงแบบแปลงลงที่ใช้จะถูกควบคุมด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) ให้เป็นไปตามลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 3 กิโลวัตต์ที่กำหนดไว้ข้างต้น รายละเอียดของวงจรที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 50 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่ใช้คือ TMS320C31 ส่วนของการตรวจวัดกระแสและแรงดันจะใช้ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital Converter) เพื่อแปลงสัญญาณกระแสและแรงดันในรูปแบบแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณแบบดิจิทัลและส่งไปยังตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ประมวลผลเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ออกมาแล้วนำไปแปลงเป็นสัญญาณแอนะล็อกเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยมในส่วนของวงจรสร้างรูปคลื่นมอดูเลชันความกว้างพัลส์ (PWM Generator) สัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบจะนำไปขับสวิตช์ในวงจรแปลงไฟตรงแบบแปลงลง ทำให้แรงดันที่ได้ออกมามีลักษณะเหมือนเซลล์เชื้อเพลิง

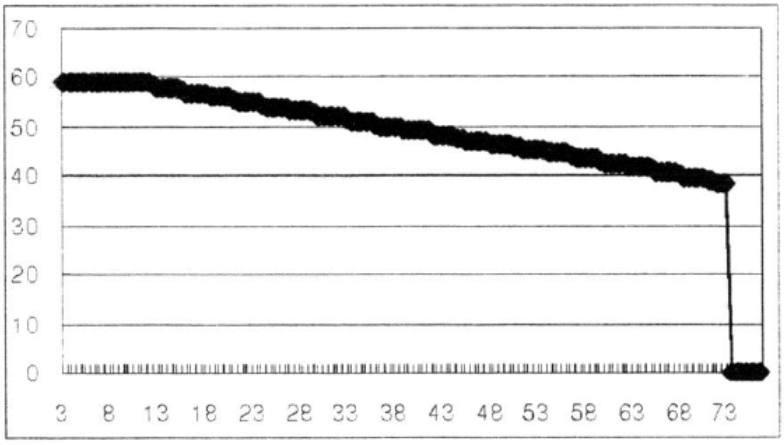


รูปที่ 50 วงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

ผลการทดลองที่ได้จากการจำลองในคอมพิวเตอร์กับผลที่ได้จากการทดสอบของวงจรจำลองการทำงานเซลล์เชื้อเพลิงนั้นมีใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 51(ก) และ (ข) แรงดันที่ได้ในช่วงของ Activation จะมีค่าประมาณ 60 โวลต์ในช่วงกระแสโหลดจาก 0 ถึง 12 แอมป์ จากนั้นแรงดันจะลดลงอยู่ในช่วงจาก 60 ถึง 39 โวลต์ ในลักษณะเชิงเส้นเมื่อกระแสโหลดเพิ่มขึ้นในช่วงของ Ohmic



(ก)

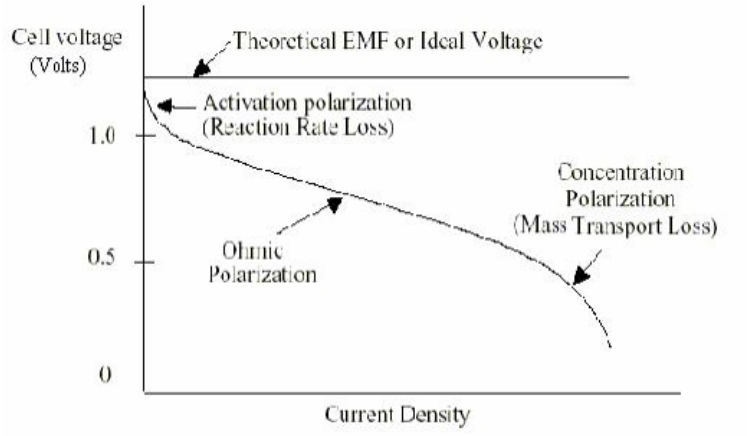


(ข)

รูปที่ 51 ผลที่ได้จากวงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง
(ก) ผลที่ได้จากการจำลองบนคอมพิเตอร์ (ข) ผลที่ได้จากการทดลองจริง

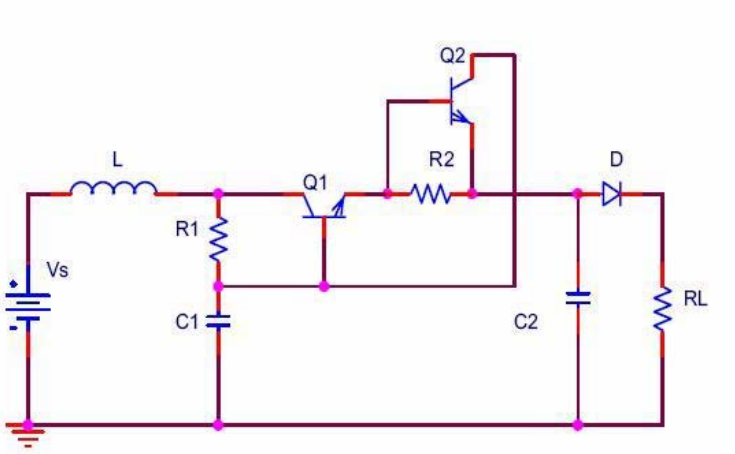
ข. งานวิจัยที่ 2

S. Yuvarajan และ Dachuan Yu ได้เสนองานวิจัยเรื่องคุณลักษณะและการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอน โดยงานวิจัยจะใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ามาใช้เลียนแบบพฤติกรรมและสภาวะการทำงานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1.2 กิโลวัตต์ เซลล์เชื้อเพลิงจะผลิตกระแสไฟฟ้าจากปฏิกิริยาเคมีของไฮโดรเจนกับออกซิเจนทำงานภายใต้อุณหภูมิและความดันปกติ ลักษณะเฉพาะของแรงดันและกระแสแสดงดังรูปที่ 52 ซึ่งจะเห็นว่ามีลักษณะที่แปรผันที่ไม่เป็นเชิงเส้น ปัจจัยที่มีผลต่อการแปรผันของแรงดันนั้นเกิดมาจากค่าความสูญเสียภายในซึ่งได้แก่ Activation Polarization, Ohmic Polarization และ Concentration Polarization (Mass Transportation Losses)



รูปที่ 52 ลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอน 1 เซลล์

วงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น ตัวต้านทาน, ทรานซิสเตอร์ (BJT), ตัวเหนี่ยวนำ, ไดโอด และ ตัวเก็บประจุ เป็นต้น พฤติกรรมเฉพาะตัวของอุปกรณ์เหล่านี้นำมาใช้แทนสภาวะลพฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในตัวเซลล์เชื้อเพลิง รูปที่ 53 แสดงรายละเอียดของวงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM



รูปที่ 53 รูปวงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอน

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่ใช้แทนสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมม-เบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอน สามารถอธิบายได้ดังนี้คือ

- **Activation Polarization**

ในส่วนนี้เป็นสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของอิเล็กโทดเพื่อที่จะได้อิเล็กตรอนออกมา โดยปฏิกิริยานี้จะเริ่มและดำเนินไปค่อนข้างช้า เป็นสาเหตุที่ทำให้มีเกิดการสูญเสียเกิดขึ้น ส่งผลให้แรงดันในตัวเซลล์เชื้อเพลิงลดลง จากลักษณะของพฤติกรรมในช่วง Activation จะเห็นได้ว่าไดโอดเป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมที่จะใช้แทนสภาวะการทำงานดังกล่าว เนื่องจากไดโอดเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีชั้นรอยต่อพีเอ็น (P-N Junction) นั่นคือในการที่ไดโอดจะนำกระแสไฟฟ้าได้นั้นจะต้องมีแรงดันตกคร่อมไดโอดมากกว่าแรงดันเริ่มเปลี่ยน (Threshold Voltage) ค่าหนึ่ง ซึ่งจะทำให้ไดโอดมีคุณสมบัติเป็นตัวนำเป็นและแรงดันเริ่มเปลี่ยนดังกล่าวคือสาเหตุที่ทำให้มีแรงดันส่วนหนึ่งหายไปในตัวของไดโอด

- **Ohmic Polarization**

ความสูญเสียภายในตัวเซลล์เชื้อเพลิงที่เกิดจากมีความต้านการไหลของอิเล็กตรอนที่บริเวณอิเล็กโทดไปจนถึงการเชื่อมต่อกับระบบภายนอกและยังรวมไปถึงความต้านทานการไหล

ของโปรตอนที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นอิเล็กโทรไลต์ด้วย ความต้านทานของไดโอดจึงเป็นองค์ประกอบที่สามารถนำมาแทนสภาวะการทำงานนี้ได้ ซึ่งทำให้ความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตและกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะแปรผกผันที่เป็นเชิงเส้น

- **Concentration Polarization**

สถาวะของเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงนี้เกิดจากความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่จ่ายให้เซลล์เชื้อเพลิงลดลงที่บริเวณอิเล็กโทด เมื่อเชื้อเพลิงได้ถูกใช้ไปจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั้งขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงอย่างรวดเร็ว ในกรณีนี้ได้นำเอาทรานซิสเตอร์สองตัว คือ Q1 และ Q2 มาประกอบกันเป็นวงจรจำกัดกระแส โดยที่ใช้ตัวต้านทาน R2 เป็นตัวตรวจจับกระแสเอาต์พุตของเซลล์เชื้อเพลิงว่าอยู่ในช่วงบริเวณพิกัดหรือไม่ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน R2 มากกว่าค่าที่กำหนดไว้ ทรานซิสเตอร์ Q2 จะนำกรแสส่งผลให้แรงดันที่ขาเบส Q1 ลดลง เป็นผลให้แรงดันออกที่ขาอิมิเตอร์ลดลง

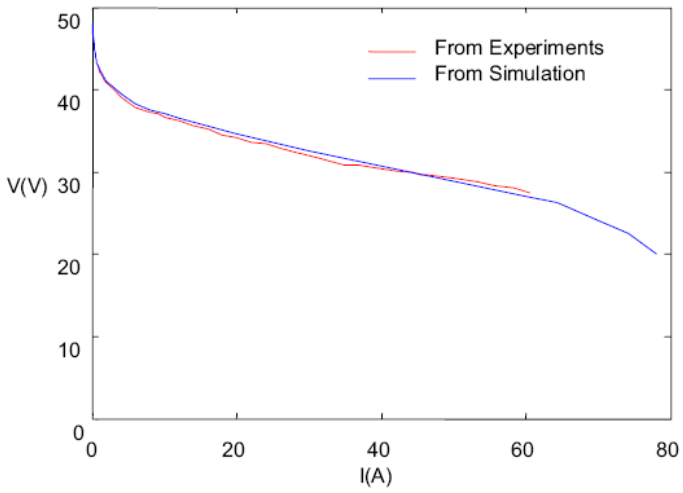
- **The Charge Double Layer**

เป็นผลมาจากการแพร่ (Diffusion) และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างแคโทดและอิเล็กโทรไลต์ ในเซลล์เชื้อเพลิงจะมีชั้นที่เรียกว่า Charge Double อยู่ปริเวณรอบๆ แคโทด ซึ่งมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมของตัวเก็บประจุ นั่นคือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลดอย่างฉับพลัน แรงดันเอาต์พุตของเซลล์เชื้อเพลิงจะใช้เวลาช่วงหนึ่งในการเข้าสู่จุดสถานะคงตัว

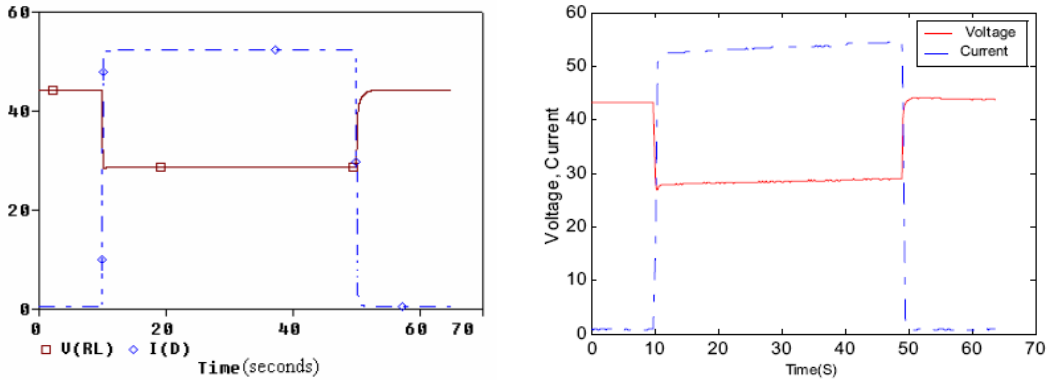
- **Undershoot in Stack Voltage**

ผลการตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณสูงจะทำให้อัตราการไหลของอากาศสูงขึ้นประมาณ 5 วินาทีส่งผลให้มีกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แรงดันออกมาต่ำกว่าแรงดันอุดมคติ พฤติกรรมนี้จะเหมือนกับตัวเหนี่ยวนำซึ่งสามารถนำมาใช้แทนสภาวะการทำงานนี้ได้

โดยวงจรจำลองจะเลียนแบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีขนาดเป็นโมดูลที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ถึง 1.2 กิโลวัตต์ภายใต้แรงดัน 72 psi แรงดันสามารถแปรผันได้ตั้งแต่ 43 โวลต์ถึง 26 โวลต์และมีค่าของกระแสไฟฟ้าพิกัดที่ 46 แอมแปร์ ทดสอบกับภาระไฟฟ้าที่ปรับค่าได้จาก 0.5 โอห์ม – 100 โอห์ม การทดสอบเปรียบเทียบผลโดยวงจรจำลองเซลล์เชื้อเพลิงกับการทดสอบกับเซลล์เชื้อเพลิงจริงแสดงดังรูปที่ 54 นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบกับโหลดในกรณีที่โหลดเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดเพื่อเปรียบเทียบผลทางพลวัต ในที่นี้จะทดสอบกับโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 108 โอห์มเป็น 0.55 โอห์มซึ่งจะเห็นได้ว่าให้ผลออกมาที่เหมือนกันดังรูปที่ 55



รูปที่ 54 การเปรียบเทียบผลการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิง



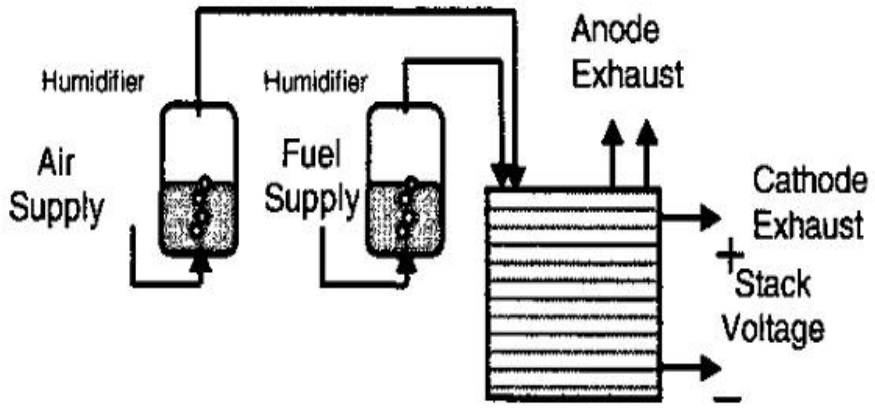
(ก) (ข)

รูปที่ 55 ผลการเปรียบเทียบสภาวะการเปลี่ยนแปลงของโหลด (ก) ผลจากแบบจำลอง (ข) ผลจากการทดลองจริง

ค. งานวิจัยที่ 3

Parviz Famouri และคณะ เสนอวงจรจำลองปฏิกิริยาเคมีภายในของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM โดยจะจำลองการทำงานในส่วนต่าง ๆของเซลล์เชื้อเพลิงเช่น ขั้วแคโทด, ขั้วแอโนด, เชื้อเพลิง, อากาศ เป็นต้น แล้วนำส่วนที่จำลองมาประกอบรวมกันเป็นวงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง มีประโยชน์ที่จะนำมาออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM และการวิเคราะห์ทดสอบกับภาระโหลดกับตัวเซลล์เชื้อเพลิงทำให้สามารถนำมาออกแบบระบบควบคุมพลังงาน

ไฟฟ้าเพื่อใช้กับที่พักอาศัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลักการในการจำลองจะใช้สมการทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยซึ่งจะแทนสภาวะการทำงานต่างๆ ภายในตัวเซลล์เชื้อเพลิงดังรูปที่ 56



รูปที่ 56 โครงสร้างและองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง

การจำลองสภาวะการทำงานในตัวเซลล์เชื้อเพลิงจะให้มีอุณหภูมิการทำงานอยู่ที่ 350 องศาเคลวินและแรงดันอยู่ที่ 101 kPa เชื้อเพลิงที่จ่ายไปยังขั้วแอโนดและแคโทดจะมีความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$P_{anode} = P_{H2} + P_{H2O} \tag{6}$$

$$P_{cathode} = P_{O2} + P_{H2O} + P_{N2} \tag{7}$$

จะเห็นได้ว่าที่บริเวณขั้วแอโนดจะได้รับเชื้อเพลิงเป็นไฮโดรเจนละไอน้ำเข้ามาและบริเวณขั้วแคโทดจะได้รับอากาศ, ไนโตรเจนจากอากาศ, ไอน้ำ นอกจากนี้แล้วยังสามารถคำนวณแรงดันที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิงที่เป็นแบบ Stack ได้จากสมการ (8) นี้

$$V_{stack} = N\left[E_o + \frac{RT}{nF}\ln\left(\frac{P_{H2}\sqrt{P_{O2}}}{P_{H2O}} \right) - ZI - h_e - h_O \right] \tag{8}$$

ปฏิกิริยาทางเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงที่เข้ามายังอิเล็กโทดทั้งสองจะสามารถนำมาจำลองได้เช่นกันซึ่งจะเป็นดังสมการดังต่อไปนี้

ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด

$$\left(\frac{V_a}{RT}\right)\frac{dP_{H2}}{dt} = m_{H2_in} - \left(\rho_{H2}UA\right)_{out} - \frac{1}{2F}$$

(9)

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด

$$\left(\frac{V_c}{RT}\right)\frac{dP_{O2}}{dt} = m_{O2_in} - \left(\rho_{O2}UA\right)_{out} - \frac{1}{4F}$$

(10)

อัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่ไหลเข้าเซลล์เชื้อเพลิงทั้งขั้วแอโนดละแคโทดเป็นดังนี้

$$m_{in} = \rho K \Delta P = \rho UA$$

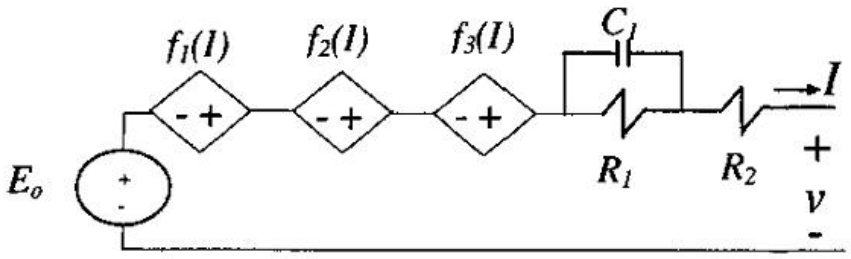
(11)

โดยที่ ΔP เป็นความดันที่หายไปส่วนหนึ่งจากเครื่องทำความชื้นไปยังเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งแรงดันที่เครื่องทำความชื้นบริเวณแคโทดและแอโนดสามารถแสดงได้ดังสมการ (12)

$$\frac{dP_h}{dt} = \frac{RT_h}{V_h}\left(m_{ih} - m_{oh}\right)$$

(12)

วงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM นั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 57 ซึ่งจะประกอบด้วยส่วนประกอบของวงจรที่ไม่เป็นเชิงเส้น $\left(f_1(I), f_2(I), f_3(I)\right)$, วงจร RC และความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 57 วงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

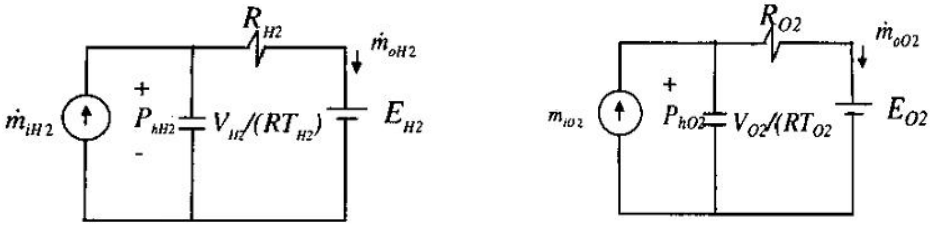
โดยวงจรที่ไม่เป็นลักษณะเชิงเส้นจะมีสมการที่สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$f_1(I) = \frac{RT}{2F}\ln\left(\frac{P_{H2}\sqrt{P_{O2}}}{P_{H2O}}\right) \tag{13}$$

$$f_2(I) = \frac{-RT}{2F}\ln\left(\frac{I}{I_o}\right) \tag{14}$$

$$f_3(I) = \frac{RT}{2F}\ln\left(1-\frac{I}{I_{\max}}\right) \tag{15}$$

จากสมการ (12) สามารถนำมาพัฒนาเป็นวงจรจำลองการทำงานของอัตราของมวลเชื้อเพลิงและอากาศของแหล่งจ่ายจากเครื่องทำความชื้นที่จ่ายให้แก่เซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 58

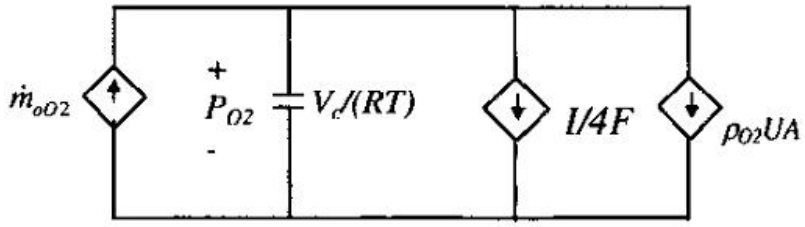


(ก) (ข)

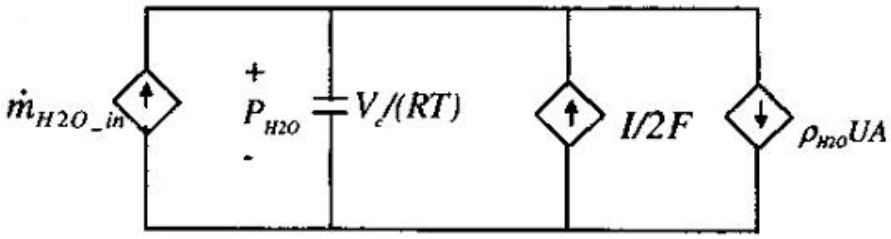
รูปที่ 58 (ก) เชื้อเพลิง (ข) อากาศของวงจรจำลองเครื่องทำความชื้น

วงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกสร้างขึ้นตามสภาวะการทำงานต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรม PSpice ดังรูปที่ 60 ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นถึงแรงดันที่ออกมานั้นมีระยะเวลาของความไม่มีเสถียรภาพของแรงดันอยู่ประมาณ 20 วินาที ดังรูปที่ 61 โดยใช้อัตราการไหลของเชื้อเพลิงภายใน 100 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังได้เสนอลักษณะของอัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่มีผลต่อแรงดันและกระแสที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ดังรูปที่ 62

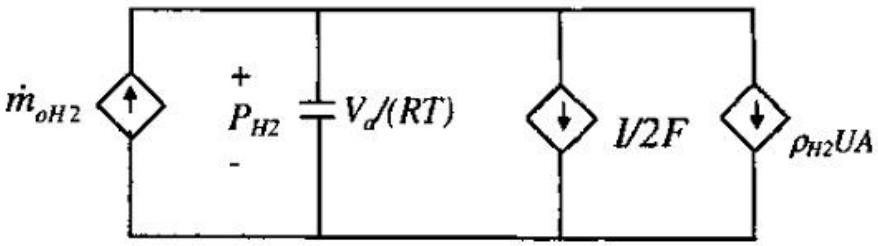
วงจรจำลองที่ได้จากสมการ (8) และ (9) แสดงดังรูปที่ 59 ซึ่งจะจำลองการทำงานของมวลของออกซิเจน, ไฮโดรเจน และน้ำ



(ก)

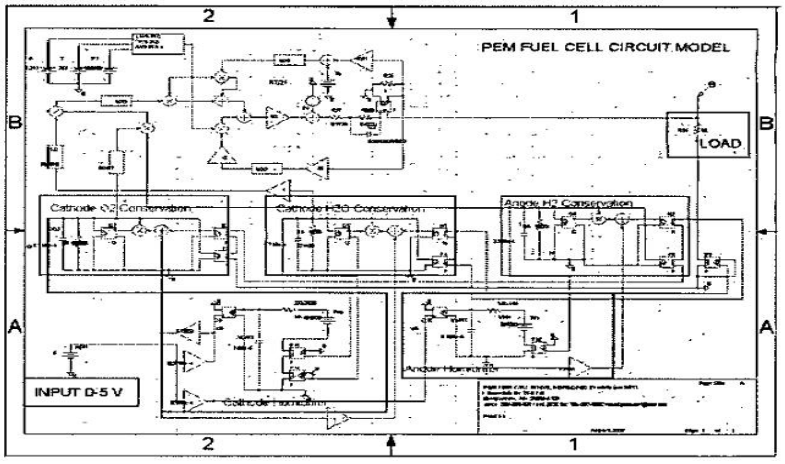


(ข)

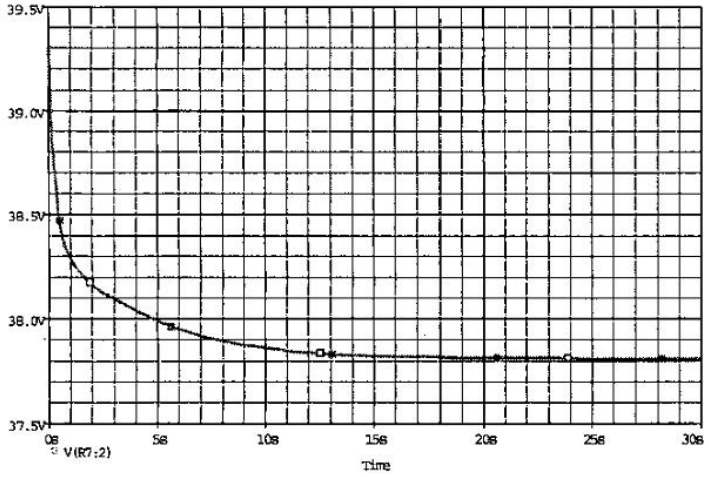


(ค)

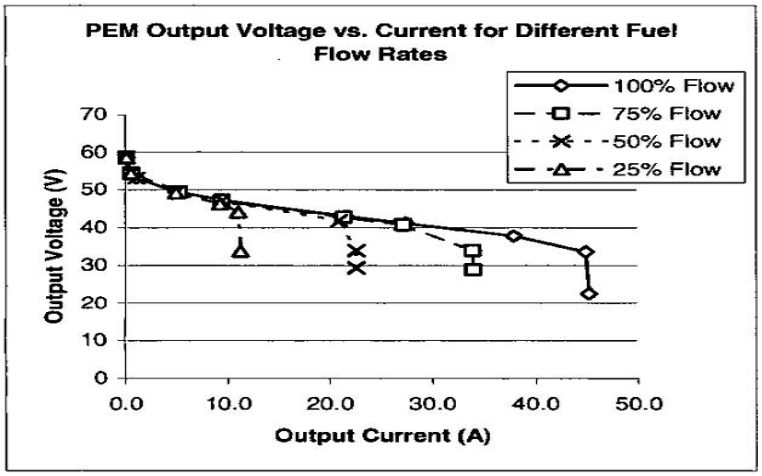
รูปที่ 59 วงจรจำลองการทำงานของ (ก) ออกซิเจน (ข) น้ำ (ค) ไฮโดรเจน



รูปที่ 60 การออกแบบวงจรจำลองการทำงานเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้โปรแกรม PSpice



รูปที่ 61 ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1.6 กิโลวัตต์



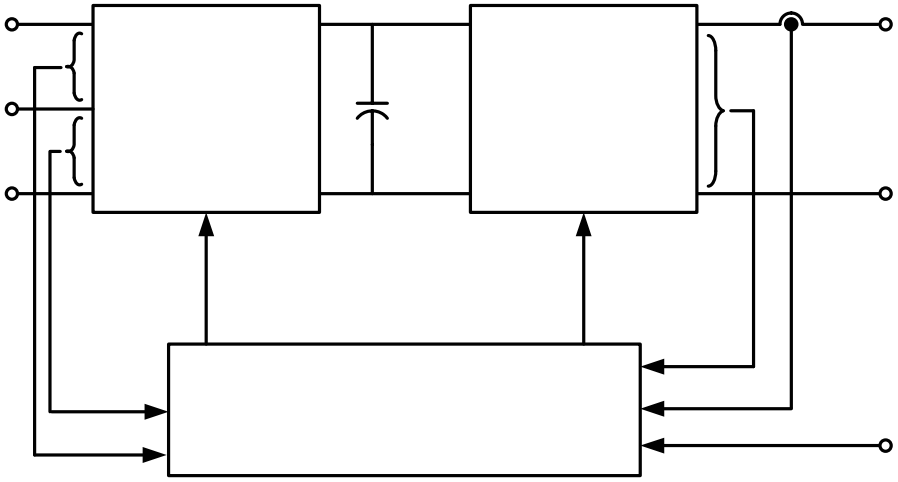
รูปที่ 62 ความแตกต่างของแรงดันที่มีผลต่อกระแสและอัตราการไหลของเชื้อเพลิง

2.3.2 วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้ศึกษามานั้น ยังมีจุดด้อยอยู่หลายประการด้วยกันกล่าวคือ ในงานวิจัยที่ 1 นั้นแรงดันสูงสุดมีค่าประมาณ 311 โวลท์ในขณะที่แรงดันไฟตรงขาออกของวงจรแปลงไปกระแสตรงแบบแปลงลงมีค่าในช่วง 20 ถึง 50 โวลท์ ซึ่งหมายความว่ารอบทำงานของวงจรแปลงไปกระแสตรงแบบแปลงลงจะมีค่าในช่วง 0.06 ถึง 0.16 ตามหลักการแล้วที่รอบทำงานในช่วงดังกล่าวถือได้ว่ามีค่าต่ำมาก ผลที่ตามมาคือประสิทธิภาพของวงจรโดยรวมจะมีค่าต่ำ รวมถึงคลื่นรบกวนที่เกิดจากการสวิตชิ่งจะมีค่าค่อนข้างสูงและรบกวนสิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยที่ 2 นั้นอาศัยพฤติกรรมของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานที่มีใช้อยู่โดยทั่วไป ข้อดีคือง่ายหากแต่มีข้อเสียคือไม่มีความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของวงจร เช่น หากต้องการเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน จำเป็นที่จะต้องทำการออกแบบและหาค่าของอุปกรณ์พื้นฐานต่างๆ ใหม่ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ยุ่งยากมากในทางปฏิบัติ ส่วนงานวิจัยที่ 3 นั้นข้อดีคือมีความแม่นยำสูง สามารถเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงได้อย่างถูกต้อง หากแต่มีข้อเสียคือมีความซับซ้อนอย่างมากในขั้นตอนการทำให้เป็นวงจรใช้งานจริง

งานวิจัยจึงนำเสนอวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่แก้ไขข้อเสียจากงานวิจัยทั้งสาม โดยมีข้อดีคือมีประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีขึ้นเนื่องจากใช้รอบทำงานที่สูงขึ้น มีความยืดหยุ่นของจุดทำงานที่ดีขึ้น และไม่มีความซับซ้อนในการสร้างวงจรขึ้นใช้งานจริง แผนภาพบล็อกอย่างง่ายของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 63 ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนหลักๆ ดังนี้คือ ส่วนภาคกำลัง และส่วนควบคุม สำหรับภาคกำลังนั้นแบ่งออกเป็นสองวงจรย่อยคือ วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง (Buck Rectifier) และวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง (Buck Converter) วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงจะทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันกระแสสลับสามเฟสให้เป็นแรงดันกระแสตรงที่ปรับค่าได้ เหตุผลที่ใช้อินพุตเป็นแรงดันสามเฟสนั้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการจ่ายพลังงานที่สูงขึ้นและเพื่อลดแรงดันระลอก (Ripple Voltage) กล่าวคือเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรเรียงกระแสแบบหนึ่งเฟส ซึ่งมีความถี่ของแรงดันระลอกขนาดเท่ากับ สองเท่าของความถี่มูลฐาน นั่นคือ 100 Hz สำหรับประเทศในแถบเอเชียและยุโรป และ 120 Hz สำหรับประเทศในแถบอเมริกาเหนือ ในขณะที่วงจรเรียงกระแสแบบสามเฟสจะมีความถี่ของแรงดันระลอกเท่ากับ หกเท่าของความถี่มูลฐาน นั่นคือ 300 Hz สำหรับประเทศในแถบเอเชียและยุโรป และ 360 Hz สำหรับประเทศในแถบอเมริกาเหนือ ดังนั้นหากใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเท่ากัน แรงดันระลอกในวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟสจะมีขนาดต่ำกว่าในวงจรเรียงกระแสแบบหนึ่งเฟสประมาณสามเท่า วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงนำมาใช้ในการเลียนแบบพฤติกรรมของแรงดันเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณและความดันเชื้อเพลิง (ไฮโดรเจน) ที่เซลล์เชื้อเพลิงได้รับ ในส่วนของวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลงนั้น นำมาใช้ในการเลียนแบบพฤติกรรมของแรงดันเอาต์พุตที่

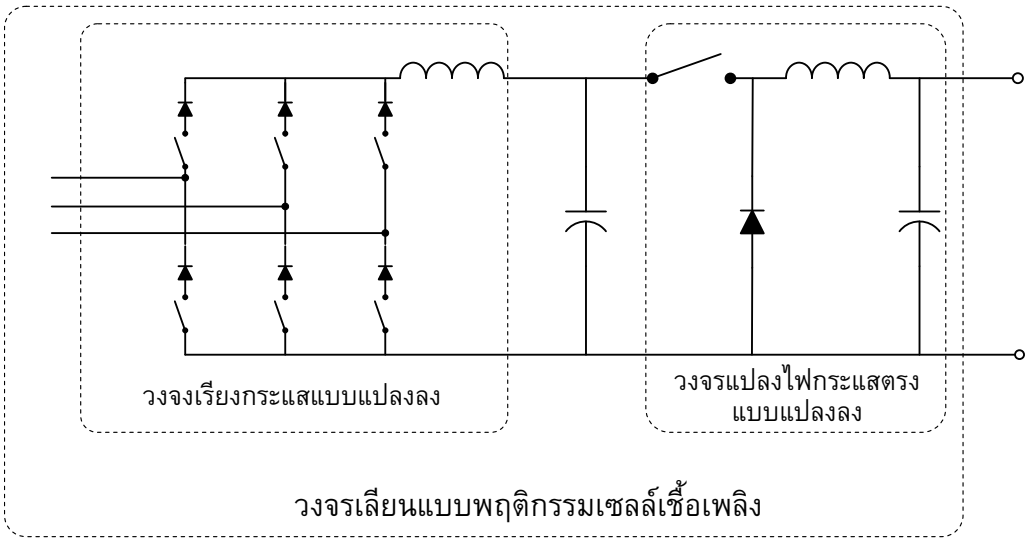
เป็นไปตามลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน (V-I Characteristic) ส่วนสุดท้ายคือวงจรควบคุม ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ควบคุมการทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงและวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง โดยการส่งสัญญาณสวิตชิ่งที่เหมาะสมไปยังอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง (Power Semiconductor Device) ของวงจรทั้งสองเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าเป็นไปตามที่ต้องการและรักษาระดับให้คงที่ด้วยการป้อนกลับแรงดันและกระแสเอาต์พุตกลับมายังวงจรควบคุม จังหวะการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงจะควบคุมให้สมวาร (Synchronous) กับระบบแรงดันสามเฟสโดยการวัดแรงดันสายถึงสายทางด้านอินพุต เนื่องจากในวงจรควบคุมระบบเซลล์เชื้อเพลิงจริงนั้นจะมีการรับคำสั่งจากภายนอกในการเพิ่มลดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตออกมา ดังนั้นวงจรควบคุมของวงจรเลียนแบบจึงมีส่วนการรับสัญญาณคำสั่งดังกล่าว ตัวอย่างเช่น แรงดันของไฮโดรเจน อุณหภูมิการทำงาน (Operation Temperature) เป็นต้น โดยคำสั่งเหล่านี้จะถูกปรับให้อยู่ในสเกลที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้กับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ



รูปที่ 63 แผนภาพบล็อกของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ

ก. ภาคกำลังของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ

ภาคกำลังของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอประกอบด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังสองวงจรคือ 1) วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงและ 2) วงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 64



รูปที่ 64 ส่วนประกอบในภาคกำลังของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ

- **วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง**

วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงในวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนออาศัยการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งกำเนิดกระแส (Current Source Inverter) ในลักษณะที่เป็นวงจรเรียงกระแส กล่าวคือมีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากด้านกระแสตรงไปด้านกระแสสลับ วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงประกอบด้วยหกสวิตช์ แต่ละสวิตช์ต่ออนุกรมกับไดโอดเพื่อป้องกันการไหลกลับทิศของกระแส ขนาดของแรงดัน V_{DC} สามารถควบคุมได้ด้วยรอบทำงานของสวิตช์ทั้งหก ตัวเหนี่ยวนำ L_{BR} ทำหน้าที่ลดขนาดของกระแสระลอก (Ripple Current) และเพิ่มค่าคงที่เวลา (Time Constant) ให้มีค่านานขึ้นเพื่อให้สอดคล้องกับค่าคงที่เวลาในการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตของภาคควบคุมของระบบเซลล์เชื้อเพลิง

- **วงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง**

วงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลงทำหน้าที่แปลงแรงดันเอาต์พุต V_{FC} ให้สอดคล้องกับลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดันเอาต์พุต (ยกตัวอย่างเช่นในรูปที่ 62) ซึ่งสามารถดำเนินการได้เป็นอย่างดีเนื่องจากวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลงมีการตอบสนองที่รวดเร็ว

ข. ภาคควบคุมวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ

ส่วนควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนควบคุมวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงและส่วนควบคุมวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง

- **ส่วนควบคุมวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง**

การออกแบบวงจรควบคุมในส่วนนี้เริ่มต้นจากการหาแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กโดยมีขั้นตอนดังนี้คือ การสร้างแบบจำลองสวิตชิ่ง จากนั้นใช้ตัวปฏิบัติการเฉลี่ยหาแบบจำลองเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง จากนั้นแปลงแบบจำลองเฉลี่ยในพิกัด abc เป็นแบบจำลองเฉลี่ยในพิกัด dqo จากวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงดังรูปที่ 65 ด้านกระแสสลับเป็นการควบคุมแบบแรงดันในขณะที่ด้านกระแสตรงเป็นการควบคุมแบบกระแส สวิตช์ทั้ง 6 ยอมให้กระแสไหลผ่านได้ทิศทางเดียวในขณะที่ยอมให้แรงดันตกคร่อมได้สองทิศทางคือทั้งบวกและลบ หลักการทำงานของสวิตช์มีข้อกำหนดดังนี้คือ

$$s_{ak} + s_{bk} + s_{ck} = 1; \qquad k \in \{p, n\}$$

โดยที่ S_{ak} S_{bk} และ S_{ck} มีค่าเป็น 0 เมื่อเปิด และเป็น 1 เมื่อปิด

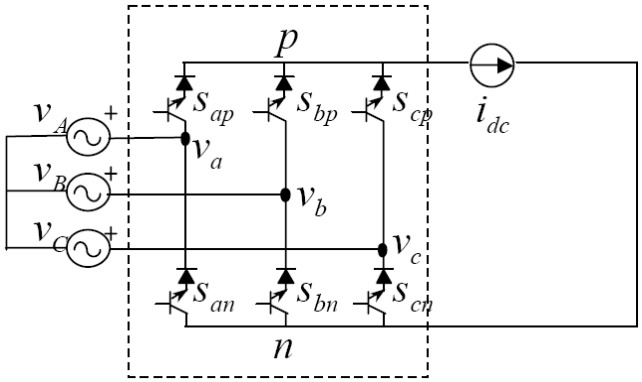
นั่นคือ ณ เวลาหนึ่ง อย่างน้อยหนึ่งในสามสวิตช์ต้องปิดเพื่อที่จะสร้างเส้นทางการไหลของกระแสโหลด หากกำหนดให้

$$s_a = s_{ap} - s_{an} \qquad s_b = s_{bp} - s_{bn} \qquad s_c = s_{cp} - s_{cn}$$

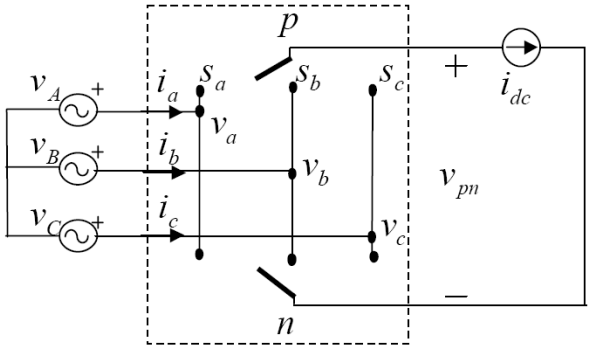
ดังนั้น

$$s_a + s_b + s_c = s_{ap} + s_{bp} + s_{cp} - (s_{an} + s_{bn} + s_{cn}) = 1 - 1 = 0$$

วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงจึงสามารถแทนได้ด้วยแบบจำลองสวิตชิ่งดังรูปที่ 66

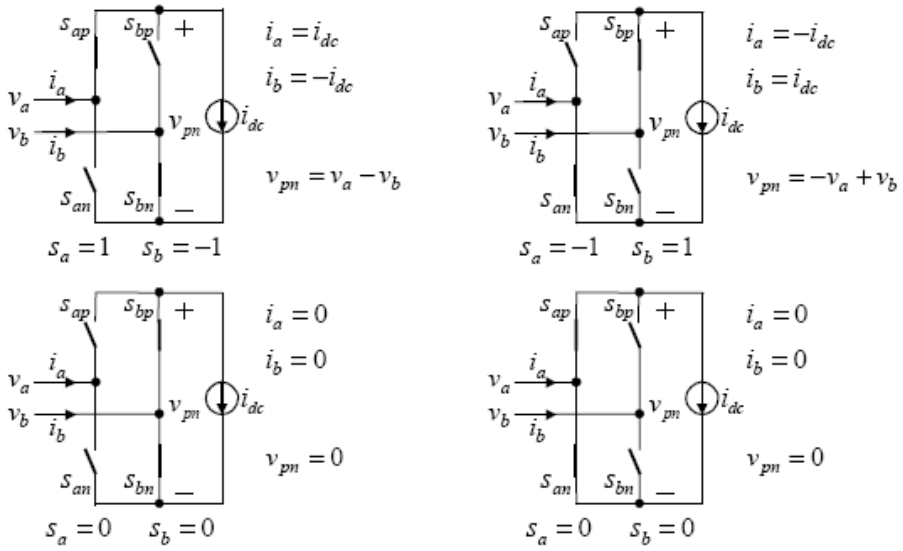


รูปที่ 65 วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง



รูปที่ 66 แบบจำลองสวิตชิ่งของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง

รูปที่ 67 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันทั้งทางด้านกระแสสลับและกระแสตรงของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงแบบหนึ่งเฟส ซึ่งเมื่อรวมเอาสวิตช์ที่ห้าและหกเข้าด้วยกันแล้วก็จะสามารถสรุปการทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงเป็นตารางความสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ 3



รูปที่ 67 สถานะการปิด-เปิดของสวิตช์และความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ของสวิตช์กับกระแสและแรงดัน

p	n	s_a	s_b	s_c	i_a	i_b	i_c	v_{pn}
a	a	0	0	0	0	0	0	0
a	b	1	–1	0	i_{dc}	$-i_{dc}$	0	$v_a - v_b$
a	c	1	0	–1	i_{dc}	0	$-i_{dc}$	$v_a - v_c$
b	a	–1	1	0	$-i_{dc}$	i_{dc}	0	$-v_a + v_b$
b	b	0	0	0	0	0	0	0
b	c	0	1	–1	0	i_{dc}	$-i_{dc}$	$v_b - v_c$
c	a	–1	0	1	$-i_{dc}$	0	i_{dc}	$-v_a + v_c$
c	b	0	–1	1	0	$-i_{dc}$	i_{dc}	$-v_b + v_c$
c	c	0	0	0	0	0	0	0

จากตารางที่ 3 เราสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันทั้งทางด้านกระแสสลับและกระแสตรงได้ดังนี้คือ

$$\vec{i}_{abc} = \vec{s}_{abc} \cdot i_{dc}$$

$$v_{pn} = \vec{s}_{abc}^{T} \cdot \vec{v}_{abc} \qquad (16)$$

โดยที่

$$\vec{i}_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \qquad \vec{s}_{abc} = \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{ap} - s_{an} \\ s_{bp} - s_{bn} \\ s_{cp} - s_{cn} \end{bmatrix} \qquad \vec{v}_{abc} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

พิจารณาวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงที่เสนอในงานวิจัยนี้ดังแสดงในรูปที่ 68 และสมการที่ (16) ใช้ทฤษฎีวงจรไฟฟ้า เราสามารถเขียนสมการบรรยายพฤติกรรมของแบบจำลองสวิตชิ่งได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} \cdot i_{dc} \quad \text{และ} \quad \begin{aligned} v_{pn} &= L\frac{di_{dc}}{dt} + v_{dc} \\ i_{dc} &= C\frac{dv_{dc}}{dt} + \frac{v_{dc}}{R} \end{aligned} \qquad (17)$$

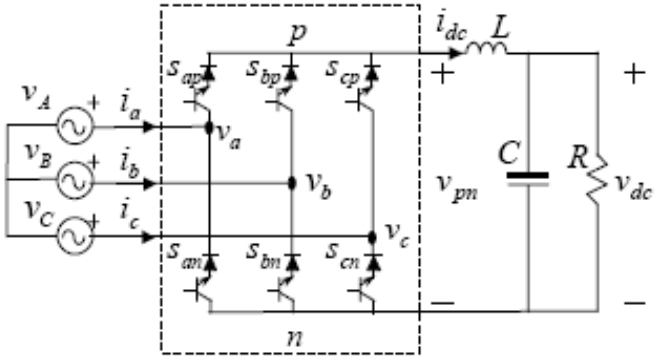
ดังนั้น

$$\vec{i}_{abc} = \vec{s}_{abc} \cdot i_{dc}$$

$$\vec{s}_{abc}^{T} \cdot \vec{v}_{abc} = L\frac{di_{dc}}{dt} + v_{dc}$$

$$i_{dc} = C\frac{dv_{dc}}{dt} + \frac{v_{dc}}{R}$$

(18)



รูปที่ 68 วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงที่ใช้ในงานวิจัย

ใช้ตัวปฏิบัติการเฉลี่ยกับสมการที่ (18) เพื่อหาแบบจำลองเฉลี่ย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{1}{T}\int_{t-T}^{t} \vec{i}_{abc}(\tau)d\tau = \frac{1}{T}\int_{t-T}^{t} \vec{s}_{abc}(\tau) \cdot i_{dc}(\tau)d\tau$$

$$\frac{1}{T}\int_{t-T}^{t} \vec{s}_{abc}^{T}(\tau) \cdot \vec{v}_{abc}(\tau)d\tau = \frac{1}{T}\int_{t-T}^{t} (L\frac{di_{dc}}{dt} + v_{dc})d\tau$$

$$\frac{1}{T}\int_{t-T}^{t} i_{dc}(\tau)d\tau = \frac{1}{T}\int_{t-T}^{t} (C\frac{dv_{dc}(\tau)}{dt} + \frac{v_{dc}(\tau)}{R})d\tau$$

(19)

ดังนั้น

$$\bar{\bar{i}}_{abc} = \bar{\bar{d}}_{abc} \cdot \bar{i}_{dc}$$

$$\bar{\bar{d}}^{T}_{abc} \cdot \bar{\bar{v}}_{abc} = L\frac{d\bar{i}_{dc}}{dt} + \bar{v}_{dc}$$

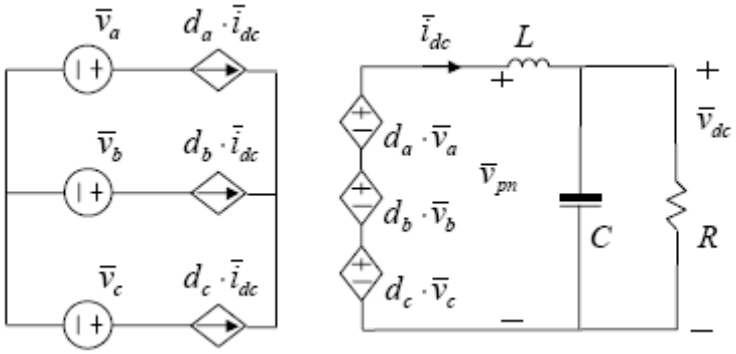
$$\bar{i}_{dc} = C\frac{d\bar{v}_{dc}}{dt} + \frac{\bar{v}_{dc}}{R}$$

(20)

โดยที่

$$\bar{\bar{d}}_{abc} = \begin{bmatrix} d_a \\ d_b \\ d_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{s}_a \\ \bar{s}_b \\ \bar{s}_c \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (20) แบบจำลองเฉลี่ยสามารถวาดได้ดังรูปที่ 69



รูปที่ 69 แบบจำลองเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง

ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\bar{\bar{i}}_{abc} = \bar{\bar{d}}_{abc} \cdot \bar{i}_{dc}$$

$$\bar{v}_{pn} = \bar{\bar{d}}^{T}_{abc} \cdot \bar{\bar{v}}_{abc}$$

(21)

เนื่องจากเป็นวงจรสามเฟส การควบคุมแบบ dqo สามารถทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพมากขึ้น เริ่มต้นด้วยการแปลงแบบจำลองเฉลี่ยพิกัด abc เป็นแบบจำลองเฉลี่ยพิกัด dqo อาศัยความสัมพันธ์ตามสมการ

$$X_{dq0} = T \cdot X_{abc}$$

(22)

โดยที่ T คือเมทริกซ์การแปลงของปาร์ค (Park's Transformation Matrix) ซึ่งมีสมการดังนี้คือ

$$T_{dq0/abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \theta) & \cos(\omega t - \theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t - \theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t - \theta) & -\sin(\omega t - \theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (22) และความสัมพันธ์ของแบบจำลองเฉลี่ย abc ของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงตามสมการที่ (20) จะได้ว่า

$$T^{-1} \cdot \bar{\bar{i}}_{dq0} = T^{-1} \cdot \vec{d}_{dq0} \cdot \bar{i}_{dc}$$

$$\vec{d}_{abc}^{T} \cdot T^{-1} T \cdot \bar{\bar{v}}_{abc} = L \frac{d\bar{i}_{dc}}{dt} + \bar{v}_{dc}$$

$$\bar{i}_{dc} = C \frac{d\bar{v}_{dc}}{dt} + \frac{\bar{v}_{dc}}{R}$$

(23)

ดังนั้น

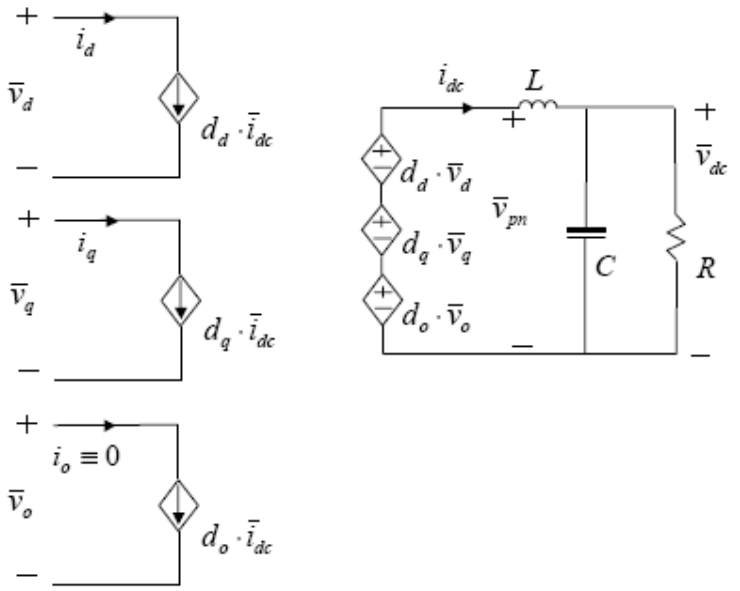
$$\bar{\bar{i}}_{dq0} = \vec{d}_{dq0} \cdot \bar{i}_{dc}$$

$$\vec{d}_{dq0}^{T} \cdot \bar{\bar{v}}_{dq0} = L \frac{d\bar{i}_{dc}}{dt} + \bar{v}_{dc}$$

$$\bar{i}_{dc} = C \frac{d\bar{v}_{dc}}{dt} + \frac{\bar{v}_{dc}}{R}$$

(24)

ซึ่งนำมาวาดเป็นแบบจำลองเฉลี่ยในพิกัด dqo ของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงได้ดังรูปที่ 70

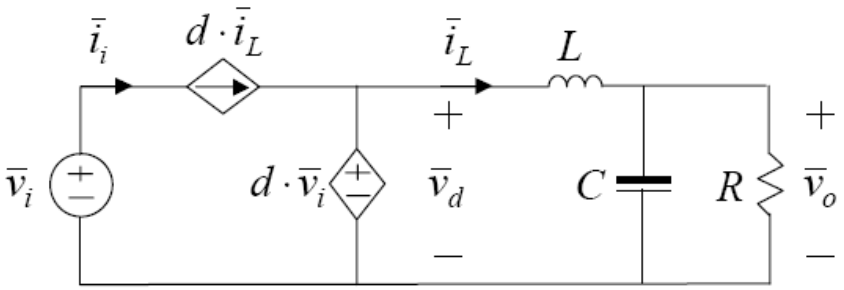


รูปที่ 70 แบบจำลองเฉลี่ยพิกัด dqo ของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง

จากรูปที่ 70 และสมการที่ (24) ทำให้ทราบว่าแรงดัน V_{DC} ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_{FC} ในรูปที่ 64 สามารถควบคุมได้โดยการปรับค่ารอบทำงาน d_d d_q และ d_o อย่างไรก็ตามเนื่องจากในวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงเป็นวงจรสามเฟสที่สมดุล ดังนั้น d_o มีค่าเป็นศูนย์ตลอดทุกช่วงการทำงาน

- **ส่วนควบคุมวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง**

แบบจำลองเฉลี่ยวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงดังแสดงในรูปที่ 71 ซึ่งใช้วิธีการเช่นเดียวกับการหาแบบจำลองเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง



รูปที่ 71 แบบจำลองเฉลี่ยของวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง

จากรูปที่ 71 จะเห็นว่าที่ภาวะคงตัว การปรับค่าแรงดันเอาต์พุต V_O ทำได้โดยการปรับค่ารอบทำงาน d ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่สำคัญสามารถแสดงได้ดังนี้คือ

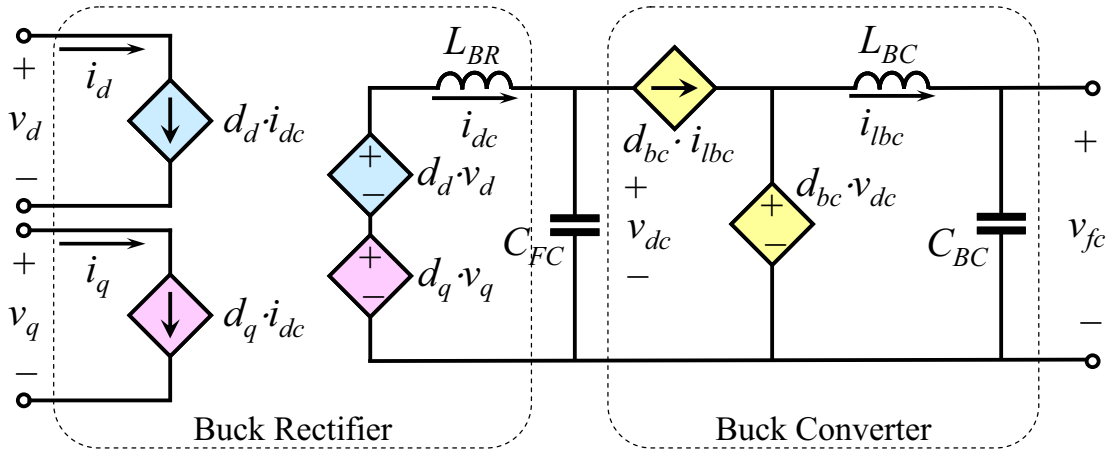
$$\bar{i}_i = d \cdot \bar{i}_L$$

$$\bar{v}_d = d \cdot \bar{v}_i$$

(25)

- **แบบจำลองเฉลี่ยของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ**

อาศัยแบบจำลองเฉลี่ยพิกัด dqo ของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงและแบบจำลองเฉลี่ยของวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลงที่ได้เสนอข้างต้น รูปที่ 72 แสดงแบบจำลองเฉลี่ยของวงจรเลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ



รูปที่ 72 แบบจำลองเฉลี่ยของวงจรเลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ

- **วิธีการควบคุมที่นำเสนอ**

ที่สภาวะคงตัว จากรูปที่ 72 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของวงจรเลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$v_{dc} = d_d v_d + d_q v_q$$

(26)

$$v_{fc} = d_{bc} v_{dc}$$

(27)

$$i_{dc} = d_{bc} i_{lbc}$$

(28)

$$i_d = d_d i_{dc} \text{ และ } i_q = d_q i_{dc}$$

(29)

โดยที่

v_{dc} คือ แรงดันขาออกของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง

v_{fc} คือ แรงดันขาออกของวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง หรือแรงดันขาออกของวงจรเลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิง

v_d และ v_q คือ องค์ประกอบแกน D และแกน Q ของแรงดันขาเข้าของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง หรือแรงดันขาเข้าของวงจรเลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิง

i_{dc} คือ กระแสขาออกของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง

i_{lbc} คือ กระแสขาออกของวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง หรือกระแสขาออกของวงจรเลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิง

i_d และ i_q คือ องค์ประกอบแกน D และแกน Q ของกระแสขาเข้าของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง หรือกระแสขาเข้าของวงจรเลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิง

d_d และ d_q คือ รอบทำงานแกน D และแกน Q ของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง

d_{bc} คือรอบทำงานวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง

หากแทนสมการ (26) ลงใน (27) ความสัมพันธ์ของแรงดันขาเข้าและขาออกของวงจรเลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิงสามารถแสดงได้ดังสมการ (30)

$$v_{fc} = d_{bc} d_d v_d + d_{bc} d_q v_q$$

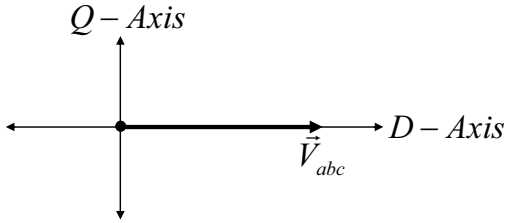
(30)

ในทำนองเดียวกัน หากแทนสมการ (28) ลงใน (29) ความสัมพันธ์ของกระแสขาเข้าและขาออกของวงจรเลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิงได้ดังสมการ

$$i_d = d_{bc} d_d i_{lbc} \text{ และ } i_q = d_{bc} d_q i_{lbc}$$

(31)

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการลดจำนวนของตัวแปรในระบบลงดังแสดงในรูปที่ 73 วิธีนี้เป็นการวางตำแหน่งของเวกเตอร์ V_{abc} ให้อยู่บนแกน *D* เพื่อกำจัดส่วนประกอบของแรงดันสามเฟสในแนวแกน Q ซึ่งหลังจากทำการแปลงแบบจำลองเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงจากพิกัด abc มาอยู่ในพิกัด dqo จำนวนตัวแปรแรงดันจะลดลงจาก 3 เป็น 1 ในกรณีของระบบแรงดันสามเฟสแบบสมดุล



รูปที่ 73 เวกเตอร์แรงดันในพิกัด ABC อยู่ในทิศทางตามแนวแกน D ในพิกัด DQ0

ด้วยวิธีดังกล่าว สมการ (30) สามารถลดรูปได้ดังสมการ (34)

$$v_{fc} = d_{bc} d_d v_d$$

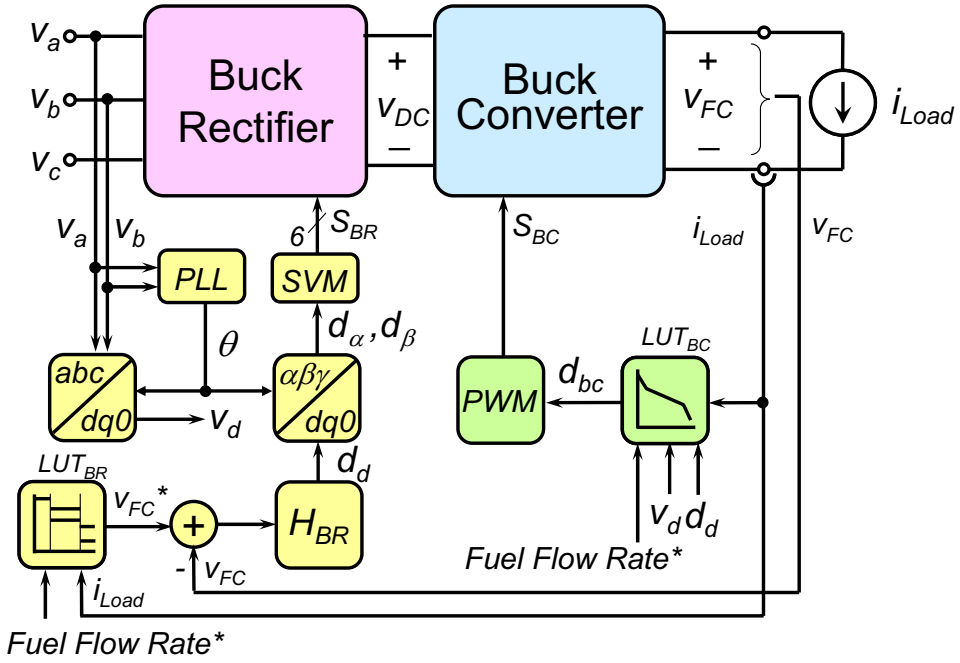
(32)

ดังนั้นการควบคุมแรงดันขาออกของวงจรเลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนค่า

1) d_{bc} ซึ่งเป็นรอบทำงานของวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง และ

2) d_d ซึ่งเป็นรอบทำงานแกน D ของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง

วิธีการควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ จะอาศัยรอบทำงาน d_{bc} ในการปรับแรงดันขาออกของวงจรเลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานในช่วง Activation และ Ohmic ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงานในช่วง Concentration จะอาศัยการปรับค่ารอบทำงาน d_d หลักการควบคุมวงจรเลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 74 ส่วนของคำสั่งภายนอกของระบบควบคุมคือ อัตราการไหลของเชื้อเพลิง (ก๊าซไฮโดรเจน) โดยจุดประสงค์หลักของระบบควบคุมที่นำเสนอนี้คือ ควบคุมวงจรเลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิงให้สร้างระดับแรงดันไฟตรงที่แปรเปลี่ยนตามขนาดของกระแสโหลด ซึ่งเป็นไปตามกระบวนทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงจริง โดยขนาดของแรงดันที่สร้างขึ้นจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของเชื้อเพลิง ณ ขณะนั้นๆด้วย



รูปที่ 74 วิธีการควบคุมที่นำเสนอ

- วงรอบควบคุมสำหรับวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง

สำหรับการควบคุมวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลงนั้น จะเป็นแบบเปิด โดยจะมีตารางที่บันทึกความสัมพันธ์ (LUT_{BC}) ของ กระแสโหลด รอบทำงาน d_d แรงดัน V_d และอัตราการไหลของเชื้อเพลิงซึ่งในกรณีนี้คือ คำสั่งจากภายนอก โดยจากค่าของพารามิเตอร์ดังกล่าวเหล่านี้จะนำมาหารอบทำงาน d_{bc} ซึ่งเป็นเอาต์พุตของตารางนี้ ค่ารอบทำงาน d_{bc} ที่ได้นี้จะนำไปเปลี่ยนเป็นสัญญาณสวิตชิ่งโดยวิธี PWM เพื่อนำไปควบคุมสวิตช์ S_{BC} ต่อไป เหตุผลที่ใช้สัญญาณรอบทำงาน d_d และแรงดัน V_d ก็เพื่อที่จะลดการใช้ตัวรับรู้แรงดันสำหรับแรงดันบัสกระแสตรง V_{DC} เนื่องจาก ผลคูณของรอบทำงาน d_d และแรงดัน V_d คือแรงดัน V_{DC} นั่นเอง ผล

คูณของ d_d และ V_d สามารถนำมาประมาณค่า V_{DC} ได้เนื่องจากในงานวิจัยนี้ วงรอบควบคุมสำหรับวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลงถูกออกแบบให้มีการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าของวงรอบควบคุมสำหรับวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงมาก

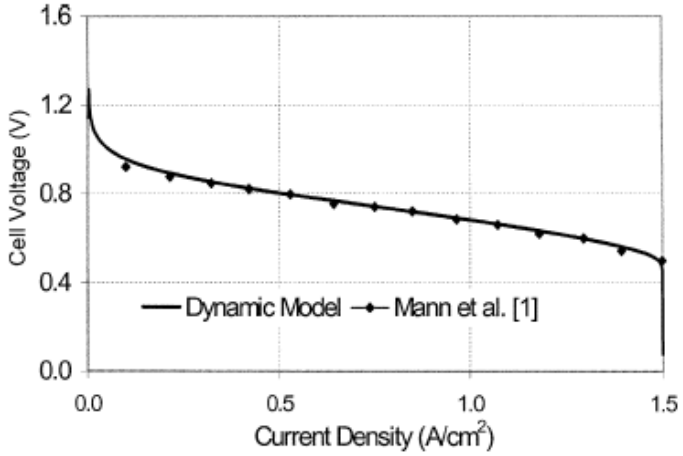
- วงรอบควบคุมสำหรับวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง

วัตถุประสงค์หลักของการควบคุมวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงนี้คือ การปรับระดับแรงดันไฟตรง V_{DC} ให้สอดคล้องกับพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงที่สภาวะต่าง ๆของกระแสโหลดและอัตราการไหลของเชื้อเพลิง โดยแรงดัน V_{DC} ในแต่ละช่วงการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะควบคุมให้คงที่ สำหรับค่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิงหนึ่ง ๆ ค่าของแรงดัน V_{FC}* จะได้จากตารางบันทึกความสัมพันธ์ LUT_{BC} โดยมีอินพุตคือกระแสโหลด i_{Load} และ อัตราการไหลของเชื้อเพลิง ค่าแรงดัน V_{FC}* ที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับ V_{FC} เพื่อหาค่าความผิดพลาดของแรงดันขาออกของวงจร ซึ่งเป็นอินพุตของตัวชดเชย H_{BR} โดยจะให้เอาต์พุตเป็นค่ารอบทำงาน d_d เพื่อที่จะนำค่ารอบทำงานที่ได้นี้ไปใช้ควบคุมสวิตช์ทั้งหกของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง มีความจำเป็นที่ต้องแปลงค่ารอบทำงาน d_d ที่ได้กลับเป็นรอบทำงาน d_α และ d_β จากนั้นจะใช้วิธีการมอดูเลตแบบเวกเตอร์ปริภูมิ (Space Vector Modulation) ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่สามารถนำไปควบคุมอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสวิตชิ่งต่อไป

2.3.3 ระบบต้นแบบของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ภาคกำลังของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ วงจรวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง (บัคเร็กติไฟ-เออร์) และวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง (วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์) โดยในส่วนนี้จะทำการหาค่าตัวอุปกรณ์ต่าง ๆที่นำมาใช้ในการออกแบบ ซึ่งได้กำหนดขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงที่ต้องการออกแบบให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดอยู่ที่ประมาณ 1.5 กิโลวัตต์ ขนาดแรงดันและกระแสขาออกของเซลล์เชื้อเพลิงต่อ 1 เซลล์จะมีความสัมพันธ์กันดังรูปที่ 75 โดยในงานวิจัยจนถึงปัจจุบันนี้ ขนาดของแรงดันขาออกต่อ 1 เซลล์อยู่ที่ประมาณ 1.2 โวลต์ขณะไม่มีโหลด ในการใช้งานจริงจะมีการต่อแบบเซลล์เชื้อเพลิงหลาย ๆเซลล์เข้าด้วยกันในรูปแบบอนุกรมหรือ Stack เพื่อเพิ่มขนาดของแรงดันขาออกให้ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งในปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงจะมีขนาดตั้งแต่ 12, 24, 36, 48, 60 โวลต์เป็นต้น ในการออกแบบวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอนี้จะมุ่งไปยังเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM เนื่องจากว่าปัจจุบันมีการนำเอาเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM เข้ามาใช้ในการประยุกต์ใช้งานที่กว้างขวางและหลากหลายกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ เช่น แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าสำหรับยานยนต์, แหล่งกำเนิดผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา, แหล่งกำเนิดผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับที่พักอาศัย เป็นต้น โดยจะออกแบบให้มีขนาดกำลังไฟฟ้าออกมาได้ประมาณ 1.5 กิโลวัตต์และขนาดของแรงดันไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงได้ทุกแรงดันซึ่งจะพิจารณาถึงฐานข้อมูลของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่ง

ได้จากกราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันดังรูปที่ 54 สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1.2 กิโลวัตต์และรูปที่ 62 สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1.6 กิโลวัตต์



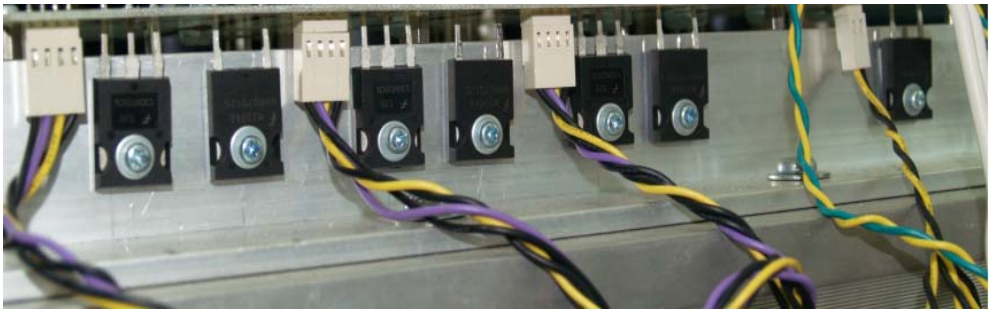
รูปที่ 75 กระแสและแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์ (จาก Ballard PEMFC)

ก. การออกแบบสร้างชุดภาคกำลังของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง

วงจรภาคกำลังทางด้านแหล่งจ่ายเพื่อเป็นตัวกำหนดขนาดของแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจะเป็นวงจรบัคเร็กติไฟเออร์หรือวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง ซึ่งจะรับแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเข้ามาแปลงผันไฟสลับเป็นไฟตรงโดยจะเป็นแรงดันระหว่างสาย (Line to Line) ดังนั้นแรงดันระหว่างสายจะมีขนาดเท่ากับ 380 โวลต์ซึ่งค่าแรงดันสูงสุดจะอยู่ที่ค่าประมาณ 537 โวลต์ ทางด้านของกระแสที่ต้องการจากฐานข้อมูลของเซลล์เชื้อเพลิงจะอยู่ที่ประมาณ 50 แอมป์ นอกจากนั้นในส่วนของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ก็เช่นเดียวกันจะต้องออกแบบให้รับแรงดันและกระแสเท่ากับวงจรบัคเร็กติไฟเออร์เนื่องจากจะคิดในขณะที่เริ่มทำงานพร้อมกันจำเป็นจะต้องคิดในส่วนเผื่อปัจจัยความปลอดภัย (Safety Factor) เอาไว้ ดังนั้นจึงเลือกขนาดของตัวอุปกรณ์ทั้งในส่วนของตัวสวิตช์และไดโอดที่นำมาต่ออนุกรมกันให้มีขนาดแรงดันเป็น 2 เท่าของค่าสูงสุด คือ 1074 โวลต์ในที่นี่เลือกใช้ที่ขนาดแรงดัน 1200 โวลต์ ในส่วนของกระแสเลือกที่ขนาดกระแสให้ทนได้ 1.5 เท่าของกระแสจริงโดยจะใช้ขนาด 75 แอมป์ สำหรับอุปกรณ์สวิตช์หลักที่ใช้คือไอจีบีทีเบอร์ HGTG30N120CN จากบริษัท FAIRCHILD SEMICONDUCTOR ดังแสดงในรูปที่ 76 ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับสวิตช์ที่มีแรงดันพิกัดอยู่ที่ 1200 โวลต์และกระแสพิกัดที่ 75 แอมป์ สามารถทำงานที่ความถี่สูงกว่า 10 กิโลเฮิรตซ์ ส่วนไดโอดนั้นจะเป็นเบอร์ RHRG75120 ซึ่งมีแรงดันพิกัดเท่ากับ 1.2 กิโลโวลต์และกระแสพิกัดที่ 75 แอมป์ มีคุณสมบัติการฟื้นตัวเร็วสูง โดยมีค่าน้อยกว่า 85 ns ซึ่งเหมาะที่จะนำมาใช้ทำงานร่วมกับวงจรด้านสวิตช์ชิ่งที่ความถี่สูง รูปที่ 77 แสดงวงจรภาคกำลังของอุปกรณ์ไอจีบีทีและไดโอดกำลังที่ได้จัดสร้างขึ้น

(ก) (ข)

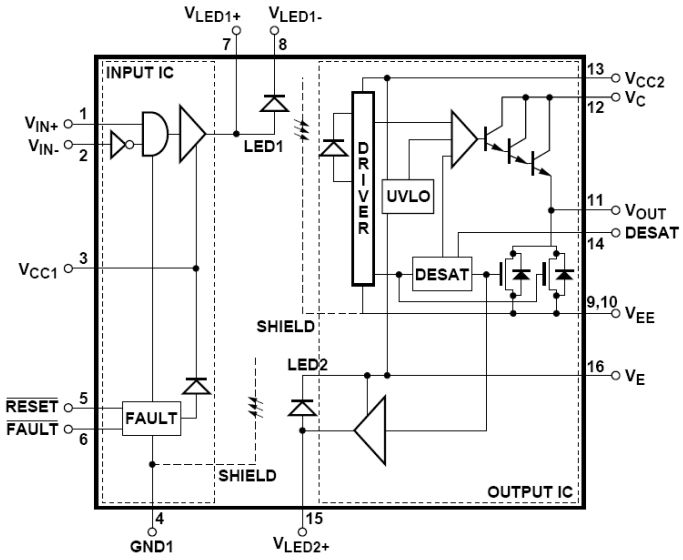
รูปที่ 76 อุปกรณ์ที่ใช้ในส่วนของวงจรบัคเร็กติไฟเออร์ (ก) ไดโอด (ข) ไอจีบีที



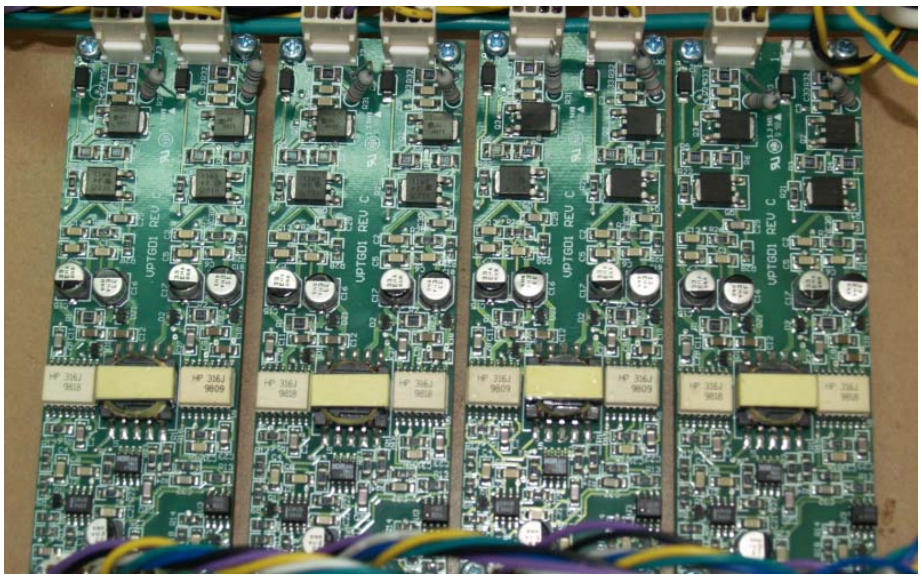
รูปที่ 77 อุปกรณ์ภาคสวิตชิ่งกำลังที่ได้จัดสร้างขึ้น

ข. ชุดขับสวิตช์สำหรับวงจรภาคกำลัง

ทางด้านชุดการขับสวิตช์กำลังในแต่ละชุดจำเป็นจะต้องมีการใช้แหล่งจ่ายแบบแยกกราวด์เพื่อแยกสัญญาณทางไฟฟ้า โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ชุดขับสวิตช์ที่มีอุปกรณ์แยกกราวน์ด้วยแสงเบอร์ HCPL – 316J ดังบล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนการทำงานภายในวงจรขับเกทเบอร์ดังกล่าวในรูปที่ 78 ซึ่งเหมาะสำหรับขับไอจีบีทีที่มีขนาดกระแสสูงได้ถึง 150 แอมป์ และแรงดัน 1200 โวลต์ ความเร็วในการสวิตช์มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 500 ns นอกจากนี้ยังประกอบด้วยส่วนของวงจรป้องกันภายในตัวเอง ซึ่งเมื่อเกิดสัญญาณฟอลท์ขึ้นวงจรจะทำการส่งสัญญาณไปยังตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเพื่อสั่งให้อุปกรณ์ภายตัวหยุดส่งสัญญาณในการขับสวิตช์ โดยในบอร์ดชุดขับสวิตช์ 1 ชุดจะประกอบไปด้วยวงจรขับเกท 2 วงจร ซึ่งสามารถใช้ขับสวิตช์ได้ 2 สวิตช์ด้วยกัน รูปที่ 79 แสดงบอร์ดที่ใช้ขับสวิตช์ทั้งหมดในวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ



รูปที่ 78 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนการทำงานภายในวงจรขับเกทเบอร์ HCPL–316J

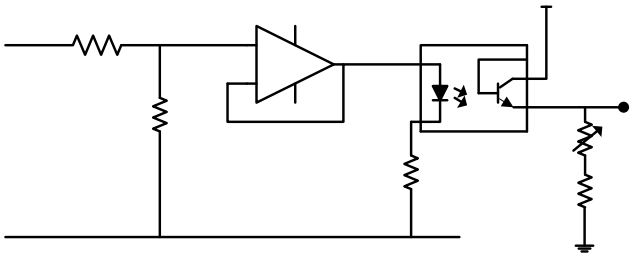


รูปที่ 79 ชุดขับสวิตช์แบบแยกแหล่งจ่ายไฟและสัญญาณทางไฟฟ้า

ค. วงจรตรวจจับแรงดันเกิน

นอกจากได้มีการออกแบบเลือกใช้ตัวอุปกรณ์หลักๆในวงจรที่นำเสนอแล้ว ในส่วนการป้องกันวงจรนั้นได้มีการออกแบบวงจรป้องกันแรงดันเกินดังรูปที่ 80 โดยเอาต์พุตของวงจรดังกล่าวจะเป็นสัญญาณที่ใช้แสดงสภาวะแรงดันเกินที่บัสไฟตรงเพื่อให้หยุดการขับสวิตช์ไอจีบีทีเพื่อความปลอดภัยทั้งตัวของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเองและผู้ทำวิจัยในการเก็บผลปฏิบัติ

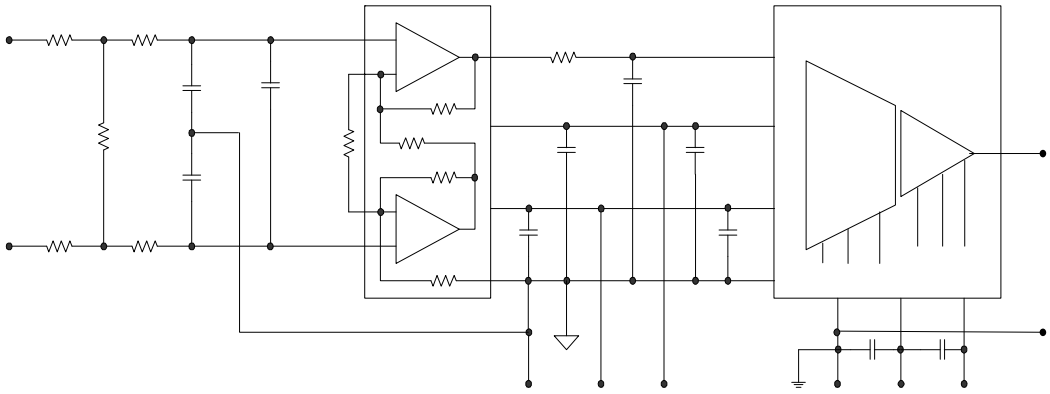
โดยวงจรป้องกันแรงดันเกินจะตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าเพื่อส่งไปให้ตัวประมวลผลทำการตรวจวสอบและหยุดขับนำสวิตช์ ในกรณีที่มีแรงดันไฟตรงสูงกว่าระดับปกติหลักการทำงานของวงจรจะใช้การแบ่งแรงดันด้วยตัวต้านทานแล้วส่งต่อไปยังอุปกรณ์แยกกราวน์ด้วยแสงเพื่อส่งสัญญาณไปให้กับตัวประมวลลผลเพื่อตรวจสอบแรงดันเกิน



รูปที่ 80 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

ง. ชุดตรวจวัดขนาดแรงดันไฟฟ้า

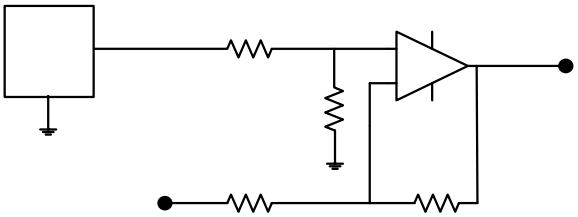
เนื่องจากแรงดันของบัสไฟตรงของวงจรบัคเร็กติไฟเออร์นั้นจะมีค่าที่ค่อนข้างสูงคือประมาณ 540 โวลต์ ดังนั้นวงจรที่ใช้วัดจำเป็นที่ต้องเป็นแบบแยกสัญญาณกราวน์เพื่อความปลอดภัยของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองโดยเฉพาะตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล โดยรายละเอียดของวงจรวัดขนาดแรงดันที่นำเสนอนั้นแสดงดังรูปที่ 81 ซึ่งประกอบด้วยวงจรอินสตรูเมนท์แอมปลิไฟเออร์เบอร์ INA126 และออปแอมป์ชนิดแยกสัญญาณทางไฟฟ้าเบอร์ ISO122



รูปที่ 81 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า

จ. ชุดตรวจวัดขนาดกระแสไฟฟ้า

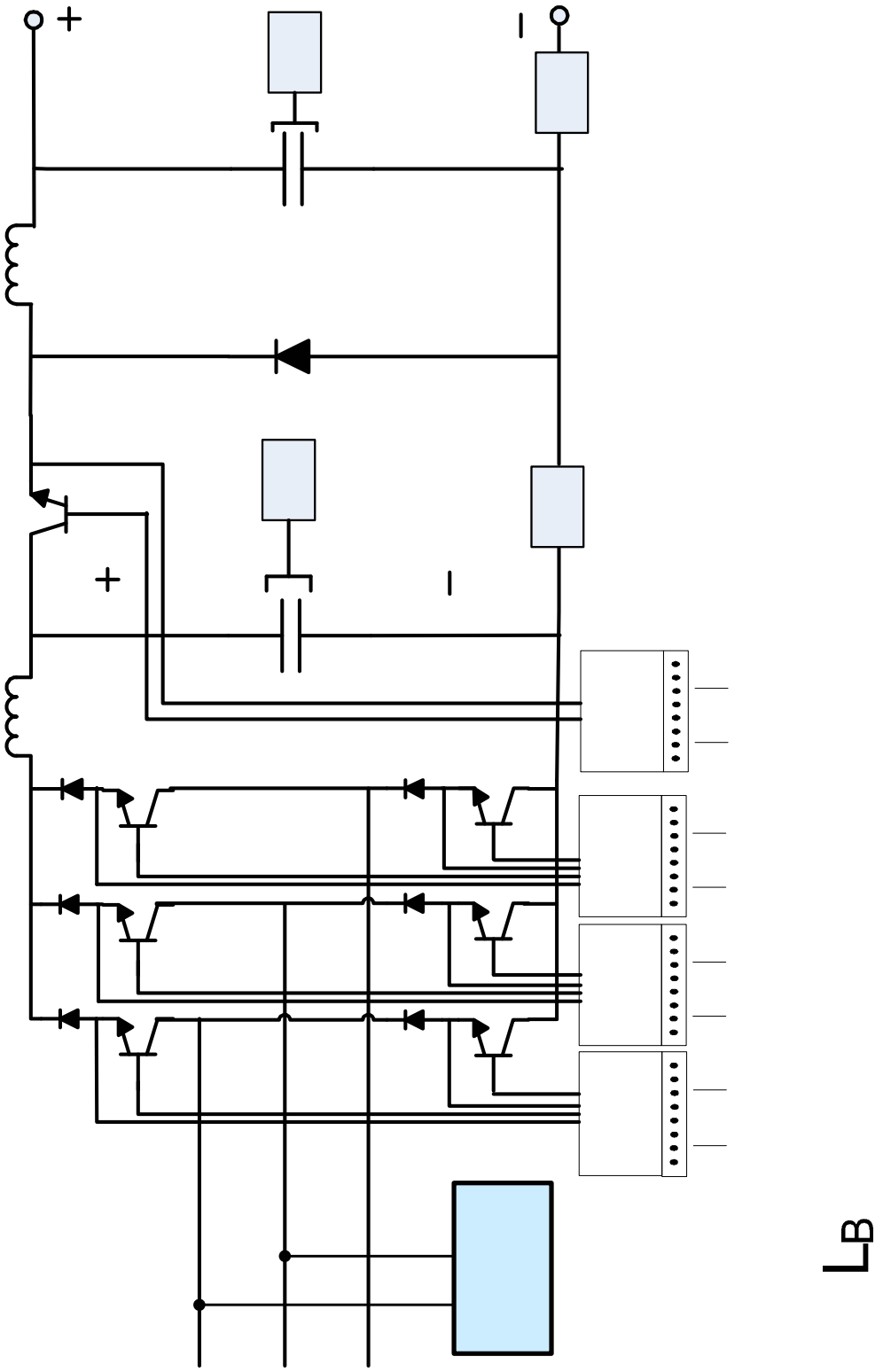
การวัดขนาดกระแสมีความจำเป็นมากในส่วนของงานวิจัยนี้เพื่อให้การตอบสนองการทำงานที่มีความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัววัดกระแสของ Allegro เบอร์ ACS750 ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานควบคุมด้านต่างๆเช่น งานด้านการควบคุมมอเตอร์ ระบบจัดการพลังงานไฟฟ้า อุปกรณ์สำหรับป้องกันกระแสเกิน เป็นต้น มีความแม่นยำสูงและมีการแยกส่วนกันทางไฟฟ้าสามารถวัดขนาดกระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ -50 ถึง 50 แอมป์ตอบสนองความถี่ในการทำงาน 35 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าความผิดพลาดประมาณ ± 1 เปอร์เซ็น ช่วงเวลาในการตอบสนองการทำงาน 12 us ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะออกมาในรูปของแรงดันไฟฟ้าโดยที่กระแส 0 แอมป์หรือขณะที่ไม่มีกระแสไหลผ่านจะมีปริมาณแรงดันไฟฟ้าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย VCC อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 40 mv/A ซึ่งสามารถนำไปกำหนดวัดขนาดของกระแสไฟฟ้าในช่วงสภาวะแรงดันต่างๆได้ แรงดันที่ได้นี้จะนำเข้าสู่วงจรปรับระดับแรงดันดังรูปที่ 81 เพื่อให้สัญญาณในระดับกระแส 0 แอมป์มีแรงดันออกมาอยู่ในระดับ 0 โวลต์ โดยความสัมพันธ์ของแรงดัน V_{OUT} V_{REF} และ V_{DSP} แสดงได้ดังสมการ (33)



รูปที่ 81 วงจรตรวจวัดขนาดกระแสไฟฟ้า

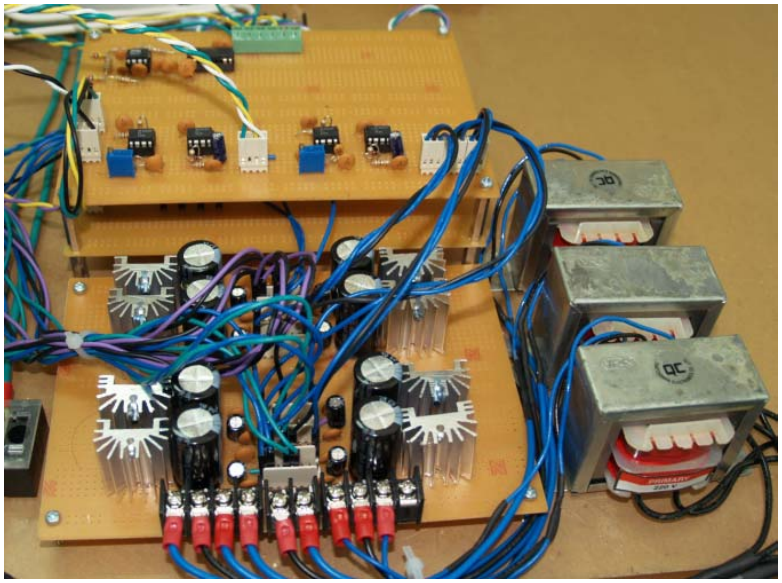
$$V_{DSP} = \left(V_{OUT} \times \frac{R_1 + R_3}{R_1} \times \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) - \left(V_{REF} \times \frac{R_3}{R_1} \right) \tag{33}$$

ภาพรวมของวงจรเลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 82 โดยรูปภาพของส่วนต่างๆในวงจรที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 83 ถึงรูปที่ 85

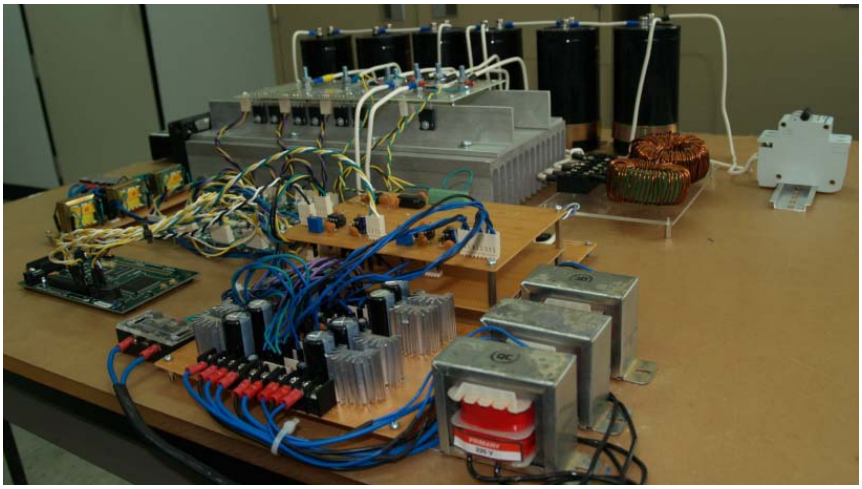


รูปที่ 82 วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ

รูปที่ 83 ชุดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจร



รูปที่ 84 วงจรอุปกรณ์ตัวรับรู้ต่าง ๆและแหล่งจ่ายไฟของวงจร



รูปที่ 85 วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่สร้างเสร็จสมบูรณ์

3 กระบวนการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel-Cell Electrical Energy Conversion)

กระบวนการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยสองส่วนหลักๆ ดังนี้คือ ภาคกำลังและภาคควบคุม ซึ่งภาคกำลังจะเป็นส่วนที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการถ่ายโอนและปรับเปลี่ยนรูปแบบพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงที่ส่งไปยังภาระทางไฟฟ้า โดยที่การทำงานของภาคกำลังจะถูกควบคุมให้ทำงานถูกต้องและมีประสิทธิภาพโดยภาคควบคุม ในบทนี้จะเป็นการสืบค้นงานวิจัยที่ได้มีการดำเนินการแล้วและเทคโนโลยีที่มีใช้ในปัจจุบัน ดำเนินการเปรียบเทียบและสรุปหาโครงร่างของวงจรภาคกำลังที่เหมาะสม เพื่อที่จะนำมาใช้ในการสร้างระบบต้นแบบต่อไป

3.1 ภาคกำลัง (Power Stage)

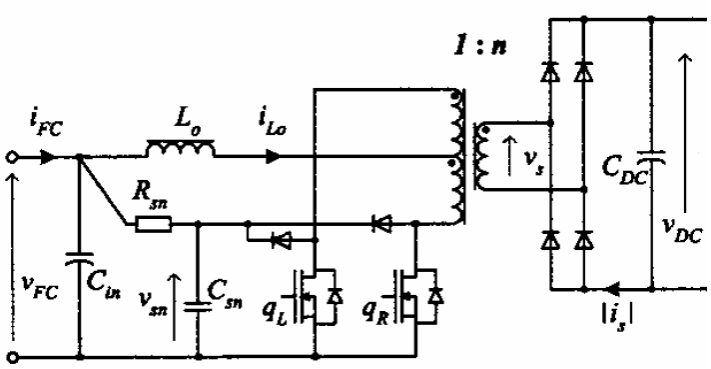
3.1.1 ระบบการแปลงและควบคุมไฟตรง (DC-DC Converter)

ระบบการแปลงและควบคุมไฟตรงทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากเซลล์เชื้อเพลิงให้มีแรงดันที่สูงขึ้นและยังคงอยู่ในรูปของไฟฟ้ากระแสตรงแต่มีระดับแรงดันที่สูงขึ้นเพื่อนำไปป้อนให้กับวงจรแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ในขั้นตอนนี้จะใช้การมอดูเลชั่นความกว้างพัลซ์เปลี่ยนแรงดันอินพุตให้เป็นไฟสลับ แล้วส่งผ่านหม้อแปลงขึ้นแบบความถี่สูง (High Frequency Step-up Transformer) เพื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้ได้ประมาณ 400 โวลต์ แล้วทำการแปลงกลับมาอยู่ในรูปไฟฟ้ากระแสตรงอีกครั้งด้วยวงจรเรียงกระแส ระบบการแปลงและควบคุมไฟตรงนี้จะมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบแปลงพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลมาจากค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากโครงสร้างของวงจรและอุปกรณ์ประกอบภายในรูปแบบต่างๆ ที่เลือกนำมาใช้

ในงานวิจัยนี้ วงจรแปลงและควบคุมไฟตรงทำการเพิ่มระดับแรงดันให้ได้สูงถึง 400 โวลต์และมีขนาดกำลังงานประมาณ 1.5 กิโลวัตต์ ระบบการแปลงพลังงานไฟฟ้าแบบดีซีเอซีดีซีเอซีมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน เนื่องจากวงจรชนิดนี้มีอัตราส่วนในการเพิ่มแรงดัน (Voltage Boosting Ratio) ที่สูง [8] กว่าวงจรประเภทอื่นๆ และสามารถทำงานกับช่วงแรงดันอินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลงได้กว้าง ลักษณะโครงสร้างและสภาวะในการควบคุมต่างๆ ของวงจรมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ศึกษาการออกแบบระบบการแปลงพลังงานไฟฟ้า รูปแบบของวงจรแปลงและควบคุมไฟตรงที่นำมาพิจารณาเปรียบเทียบในงานวิจัยฉบับนี้ประกอบด้วย วงจรพุชพุล วงจรครึ่งคลื่น และวงจรเต็มคลื่น

ก. วงจรพุชพุล (Push Pull)

ระบบการแปลงไฟตรงแบบพุชพุลดังรูปที่ 86 เป็นระบบที่ใช้อุปกรณ์น้อย มีประสิทธิภาพสูง [9] [10] เป็นการนำเอาสวิตช์ 2 ตัวมาต่อขนานกันและควบคุมให้ทำงานสลับกันครั้งละครึ่งคลื่นเป็นผลให้เกิดกระแสไหลผ่านหม้อแปลงขึ้น แรงดันไฟฟ้ามีการกลับขั้วไปมาเมื่อเทียบกับขั้วกลาง (Center Tap) ของหม้อแปลงไปคนละด้านกัน การต่อวงจรแบบนี้มีข้อดีคือใช้อุปกรณ์สวิตช์เพียงแค่ 2 ตัว แต่จะต้องใช้หม้อแปลงแบบที่มีขั้วกลาง ทำให้หม้อแปลงมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากต้องเพิ่มจำนวนขดลวดด้านปฐมภูมิขึ้นอีกหนึ่งเท่าตัว ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นตามมาและในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงเรื่องความสมดุลของสนามแม่เหล็กที่ขดปฐมภูมิทั้งคู่ด้วย



รูปที่ 86 ลักษณะของวงจรแปลงและควบคุมไฟตรง แบบพุชพุล [9]

แรงดันตกคร่อมสวิตช์ในขณะที่ไม่นำกระแสของวงจรจะเท่ากับสองเท่าของแรงดันอินพุต [11] (2 V_{FC}) เนื่องจากจะเกิดแรงดันจากสนามแม่เหล็กของขดลวดปฐมภูมิชุดที่สวิตช์หยุดนำกระแสต่ออยู่ในลักษณะอนุกรมกับแหล่งจ่ายอินพุต ดังนั้นจะต้องเลือกใช้อุปกรณ์สวิตช์ที่สามารถทนแรงดันได้สูงเป็น 2 เท่าของแรงดันอินพุต ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต แรงดันเอาต์พุต จำนวนขดลวดของหม้อแปลง และค่าเวลาในการนำกระแสของระบบการแปลงพลังงานซึ่งสามารถหาได้จากสมการข้างล่าง

$$Vdc = \left\{ (Vfc - Vds)\frac{Ns}{Np} - 2Vd \right\}\frac{2Ton}{T} \qquad (34)$$

หาลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต โดยกำหนดให้ระบบแปลงพลังงานนี้มีประสิทธิภาพเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตเป็นดังนี้

จากสมการประสิทธิภาพ

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100$$

(35)

จะได้

$$P_{in} = \frac{P_o}{0.9}$$

(36)

หรือ

$$P_{in} = 1.1P_o$$

(37)

เพราะฉะนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตเท่ากับ

$$1.1P_o = V_{fc}I_{pft}$$

(38)

ในการทำงานของวงจรสวิตชิ่งนั้นจะกำหนดให้สวิตช์มีการทำงานหรือเวลาการนำกระแสสูงสุดไม่ควรเกิน 80 เปอร์เซ็นต์ของคาบการสวิตช์ ดังนั้นค่าเวลาในการนำกระแสสูงสุดเท่ากับ

$$T_{on} = \frac{0.8T}{2}$$

(39)

นำค่าเวลาการนำกระแสมาคูณกับสมการที่ (38) จะสามารถหาค่ากระแสอินพุตที่ไหลผ่านหม้อแปลงได้ดังนี้

$$1.1P_o = V_{fc}\left(\frac{0.8T}{T}\right)I_{pft}$$

(40)

จะได้

$$I_{pft} = 1.38\frac{P_o}{V_{fc}}$$

(41)

นำความสัมพันธ์ของสมการที่ (41) ไปหาค่ากระแสอินพุต เมื่อกำหนดค่าแรงดันอินพุต และกำลังงานเอาต์พุตสูงสุดของระบบ จะสามารถหาค่ากระแสอินพุตได้และนำค่ากระแสที่ได้และแรงดันนี้ไปใช้เลือกอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ของวงจร จากนั้นหาค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านหม้อแปลงในขดลวดปฐมภูมิเพื่อหาขนาดของหม้อแปลงทางด้านขดลวดปฐมภูมิ เนื่องจากขดลวดปฐมภูมิของวงจรแบบพุชพุลนั้นมี 2 ขดเท่าๆกัน เพราะฉะนั้นในจะเกิดกระแสไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงในแต่ละซีกเพียงครึ่งคาบเวลาเท่านั้น ทำให้ค่าเวลาในการนำกระแสหรือค่ารอบทำงานของวงจรแบบพุชพุลเป็นครึ่งหนึ่งเช่นกัน ซึ่งจะได้เท่ากับครึ่งคาบเวลาคือ (0.8T/2)/T หรือเท่ากับ 0.4 และนำค่ารอบทำงานนี้ไปหาค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านหม้อแปลงได้จากสมการ

$$I_{rms} = I_{pft}\sqrt{D}$$

(42)

จะได้

$$I_{rms} = 0.632 I_{pft}$$

(43)

นำค่ากระแสอินพุต (I_{pft}) จากสมการที่ (37) มาแทนในสมการที่ (43) จะได้

$$I_{rms} = 0.632\frac{1.38P_o}{V_{fc}}$$

(44)

หรือ

$$I_{rms} = \frac{0.873P_o}{V_{fc}}$$

(45)

หากพิจารณาจากขนาดของแรงดันและกระแสที่ใช้ อุปกรณ์สวิตชิ่งที่เหมาะสมกับงานนี้ คือ มอสเฟทกำลัง (Power MOSFET) จะต้องหาแรงดันตกคร่อมมอสเฟทขณะทำงาน ($V_{ds(on)}$) เนื่องจากว่าแรงดันตกคร่อมมอสเฟทจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่ไหลผ่านในขณะที่มีการนำกระแสซึ่งหาได้จากสมการดังนี้

$$V_{ds(on)} = I_{pft} I R_{on} \tag{46}$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (34) เมื่อกำหนดให้วงจรเรียงกระแสทางด้านเอาต์พุตเป็นวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ ซึ่งไดโอดมีค่าแรงดันตกคร่อมขณะทำงาน (V_d) เท่ากับ 0.7 โวลต์จะได้

$$V_{dc} = \left\{ \left(V_{fc} - V_{ds(on)} \right) \frac{N_s}{N_p} - 2V_d \right\} \frac{2T_{on}}{T} \tag{47}$$

$$N_s = \left(\frac{N_p}{\left(V_{fc} - V_{ds(0n)} \right)} \right) \left(2V_d + \frac{V_{dc}}{\frac{2T_{on}}{T}} \right) \tag{48}$$

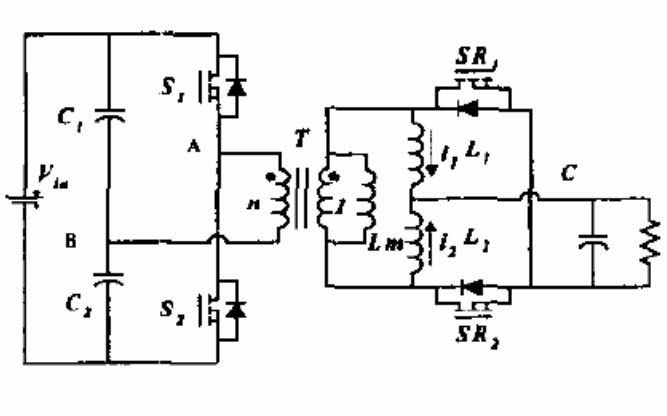
$$N_s = \left(\frac{N_p}{\left(V_{fc} - I_{pft} I R_{on} \right)} \right) \left(1.4 + \frac{V_{dc}}{0.8} \right) \tag{49}$$

เมื่อกำหนดค่าแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตให้ ก็จะสามารถเลือกคุณสมบัติของมอสเฟทเพื่อให้ได้ค่าความต้านทานขณะนำกระแสและหาค่ากระแสอินพุตของวงจร นำมาแทนค่าลงในสมการที่ (49) ก็จะได้อัตราส่วนของหม้อแปลงเพื่อนำไปหาขนาดของหม้อแปลงที่จะนำมาใช้งาน

ข. วงจรครึ่งคลื่น (Half Wave)

วงจรแบบครึ่งคลื่นดังแสดงในรูปที่ 87 ประกอบด้วยสวิตช์หลัก 2 ตัว มีหลักการทำงานดังนี้คือ ในขณะที่สวิตช์ด้านหนึ่งนำกระแสจะเกิดแรงดันตกคร่อมสวิตช์ส่วนที่ไม่นำกระแสของวงจรเท่ากับแรงดันอินพุต (V_{fc}) ในการเลือกอุปกรณ์สวิตช์จะกำหนดให้สามารถทนแรงดันได้ประมาณ 1.5 เท่าของแรงดันอินพุต ลักษณะการทำงานของวงจรแบบครึ่งคลื่นจะใช้สวิตช์ 2 ตัว ส่งพลังงานไปที่หม้อแปลง โดยที่ขั้วหนึ่งของหม้อแปลงจะต่อกับจุดต่อระหว่างสวิตช์ทั้ง 2 ตัว ส่วนอีกขั้วต่อกับจุดต่อของตัวเก็บประจุ ซึ่งจะมีแรงดันเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันอินพุต โดยใช้ตัวเก็บประจุที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการทั้งสองตัวในการทำหน้าที่แบ่งแรงดัน สวิทช์จะมีการทำงานในลักษณะผลัดกันนำกระแส ทำให้มีกระแสไหลผ่านหม้อแปลงโดยมีแรงดันตกคร่อมที่ตัวหม้อแปลงเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันอินพุตแต่มีขั้วที่ต่างกัน ซึ่งได้แรงดันที่ขดลวดปฐมภูมิตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$V_t = \frac{V_{fc}}{2} - V_{ds(on)} \qquad (50)$$



รูปที่ 87 ลักษณะของวงจรแปลงและควบคุมไฟตรงแบบครึ่งคลื่น [12]

โดยปกติ การกำหนดให้ค่าเวลาในการนำกระแสของสวิตช์แต่ละตัวจะให้ไม่เกิน 80 เปอร์เซ็นต์ของครึ่งคาบเวลาสำหรับวงจรแบบครึ่งคลื่น เพื่อเป็นการช่วยป้องกันไม่ให้สวิตช์ทั้งสองตัวเกิดโอกาสที่จะนำกระแสที่พร้อมกันขึ้น ซึ่งการนำกระแสพร้อมกันนี้จะส่งผลให้เกิดการลัดวงจรแรงดันทางด้านอินพุตจากเซลล์เชื้อเพลิง โดยที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายได้

จะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิตช์นั้นขดลวดปฐมภูมิจะมีกระแสไหลผ่าน 2 ครั้งด้วยความกว้าง 0.8T/2 และที่แรงดันเท่ากับ $(V_{fc}/2)-V_{ds(on)}$ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ระหว่างกระแสด้าน

ขดลวดปฐมภูมิ กำลังงานเอาต์พุต แรงดันอินพุต และจำนวนขดลวดของหม้อแปลง เช่นเดียวกับวงจรแบบพุชพุล จากสมการที่ (34) แต่จะมีค่าแรงดันอินพุตเป็นครึ่งหนึ่งดังนี้

$$V_{dc} = \left\{ \left(\frac{V_{fc}}{2} - V_{ds(on)} \right) \frac{N_s}{N_p} - 2V_d \right\} \frac{2T_{on}}{T}$$

(51)

สมมุติให้ระบบแปลงพลังงานมีประสิทธิภาพเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ของกำลังงานอินพุต และแรงดันอินพุตที่ขดลวดปฐมภูมิเท่ากับ $V_{fc}/2$ นำมาหาค่ากระแสอินพุตจากสมการที่ (40) จะได้

$$I_{pft} = 1.38 \frac{P_o}{V_{fc}/2}$$

(52)

หรือ

$$I_{pft} = 2.75 \frac{P_o}{V_{fc}}$$

(53)

เนื่องจากกำหนดให้เวลาในการนำกระแสของสวิตช์เท่ากับ 0.8T/2 หากแต่ในแต่ละคาบเวลาที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงจะเกิดกระแสไหลผ่าน 2 ครั้ง เพราะฉะนั้นค่ารอบทำงานในขณะทำงานจะเท่ากับ 0.8 ซึ่งสามารถนำมาหาค่ากระแสเฉลี่ยได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_{rms} = I_{pft}\sqrt{D}$$

(54)

จะได้

$$I_{rms} = 0.894 I_{pft}$$

(55)

นำค่ากระแสอินพุต(I_{pft}) จากสมการที่ (53) มาแทนในสมการที่ (55) จะได้

$$I_{rms} = 2.75\frac{P_o}{V_{fc}}(0.894)$$

(56)

$$I_{pft} = 2.46\frac{P_o}{V_{fc}}$$

(57)

เมื่อเลือกใช้มอสเฟทเป็นอุปกรณ์สวิตช์วงจรแปลงพลังงาน จะต้องหาแรงดันตกคร่อมมอสเฟทขณะทำงาน($V_{ds(on)}$) จากกระแสที่ไหลผ่านในขณะที่มีการนำกระแสโดยใช้สูตรคำนวณเช่นเดียวกับวงจรแบบพุชพุล นั่นคือ

$$V_{ds(on)} = I_{pft}R_{on}$$

(58)

จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (51) เมื่อกำหนดให้วงจรเรียงกระแสทางด้านเอาต์พุตเป็นวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ ซึ่งไดโอดมีค่าแรงดันตกคร่อมขณะทำงาน (V_d) เท่ากับ 0.7 โวลต์ จะสามารถนำไปหาอัตราส่วนของหม้อแปลงได้ดังนี้

$$V_{dc} = \left\{\left(\frac{V_{fc}}{2} - V_{ds(on)}\right)\frac{N_s}{N_p} - 2V_d\right\}\frac{2T_{on}}{T}$$

(59)

$$N_s = \left(\frac{N_p}{\left(\frac{V_{fc}}{2} - V_{ds(0n)}\right)}\right)\left(2V_d + \frac{V_{dc}}{\frac{2T_{on}}{T}}\right)$$

(60)

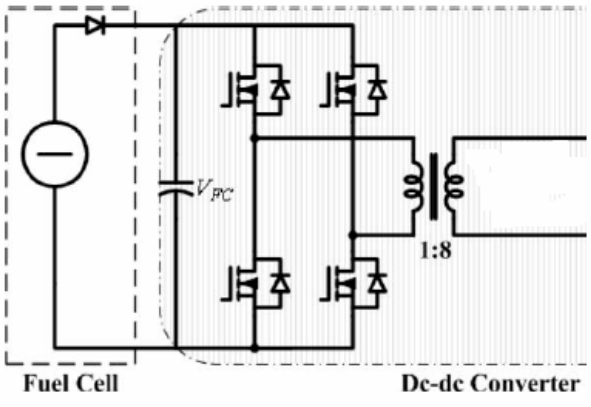
$$N_s = \left(\frac{N_p}{\left(\frac{V_{fc}}{2} - I_{pft}R_{on}\right)}\right)\left(1.4 + \frac{V_{dc}}{0.8}\right)$$

(61)

วงจรแบบครึ่งคลื่นจะไม่พบปัญหาเรื่องค่าความเหนี่ยวนำรั่วเช่นที่ปรากฏกับวงจรแบบพุชพุล [11] เนื่องจากโครงร่างของวงจรนี้ สัญญาณสไปค์ (Spikes) ที่เกิดขึ้นจะถูกตัดทิ้งโดยตัวไดโอดที่ต่อขนานกับสวิตช์ทั้งสองตัว ตัวอย่างเช่น วงจรดังรูปที่ 87 เมื่อสวิตช์ตัวที่ 1 นำกระแสจะเกิดการไหลของกระแสโหลดและสนามแม่เหล็ก เมื่อเกิดค่าความเหนี่ยวนำรั่วที่หม้อแปลง จะเกิดค่าความเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กและค่าความต้านทานโหลด (Secondary Load Impedance) ซึ่งสะท้อนจากอัตราส่วนของขดลวดจากด้านหนึ่งไปที่จุดต่อระหว่าง C1 และ C2 ที่ตำแหน่ง A ของขดลวดปฐมภูมิโดนจะมีศักย์เป็นบวก ซึ่งส่งผลให้ที่ตำแหน่ง B เป็นบวกด้วย เมื่อสวิตช์ตัวที่ 1 หยุดนำกระแสสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดการสลับขั้ว ที่ตำแหน่ง A ของขดลวดปฐมภูมิจะเปลี่ยนสถานะเป็นลบซึ่งมีค่าสูงมากที่จะสามารถทำให้สวิตช์ทั้งสองตัวเสียหายได้ แต่จากการต่อไดโอดขนานกับสวิตช์ตัวที่ 2 ทำให้เกิดสภาวะการไบแอสตรงระหว่างตำแหน่ง A ของหม้อแปลงกับขั้วลบของแรงดันอินพุต ส่งผลให้ที่ตำแหน่ง A ไม่สามารถเกิดค่าแรงดันลบที่มีค่าสูงกว่าแรงดันอินพุต ในกรณีที่สวิตช์ตัวที่ 2 นำหรือหยุดนำกระแสก็จะเกิดกรณีเช่นเดียวกันเพียงแต่ขั้วของขดลวดจะตรงกันข้ามและจะใช้ไดโอดที่ต่อขนานกับสวิตช์ตัวที่ 1 มาทำหน้าที่ป้องกันค่าความเหนี่ยวนำรั่วแทน

ค. วงจรเต็มคลื่น (Full Wave)

ลักษณะของวงจรแปลงไฟตรงแบบเต็มคลื่นดัง รูปที่ 88 นั้นจะมีโครงสร้างของวงจรเช่นเดียวกันกับแบบครึ่งคลื่นแต่มีจำนวนของสวิตช์เพิ่มขึ้นเป็น 4 ตัวต่ออยู่ในลักษณะของวงจรบริดจ์ ในแต่ละครึ่งคาบเวลาจะมีการนำกระแสพร้อมกันครั้งละสองตัว โดยแบ่งการทำงานเป็น 2 ชุดคือให้สวิตช์ตัวบนซ้ายกับล่างขวาทำการนำกระแสในครึ่งคาบเวลาแรกและให้สวิตช์ตัวบนขวากับล่างซ้ายนำกระแสในครึ่งคาบเวลาต่อมา ซึ่งทั้ง 2 ชุดจะมีเวลาในการนำกระแสที่เท่ากันและจะทำงานสลับกันเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ข้อดีของวงจรแปลงไฟตรงชนิดนี้คือจะได้แรงดันที่ป้อนให้กับหม้อแปลงเท่ากับแรงดันอินพุท และแรงดันตกคร่อมสวิตช์ในขณะที่หยุดนำกระแสก็มีขนาดเท่ากับแรงดันอินพุทเช่นกันในขณะที่สวิตช์ด้านหนึ่งนำกระแสจะเกิดแรงดันตกคร่อมสวิตช์ส่วนที่ไม่นำกระแสของวงจรเท่ากับแรงดันอินพุต (Vfc) ในการเลือกอุปกรณ์สวิตช์จะกำหนดให้สามารถทนแรงดันได้ 1.5 เท่าของแรงดันอินพุตเช่นเดียวกับวงจรแบบครึ่งคลื่น การกำหนดให้ค่าเวลาในการนำกระแสของสวิตช์แต่ละตัวให้ไม่เกิน 80เปอร์เซ็นต์ของครึ่งคาบเวลาสำหรับวงจรแบบครึ่งคลื่น เพื่อป้องกันกรณีการนำกระแสที่พร้อมกันของสวิตช์ทั้งสองชุดนี้ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการลัดวงจรอินพุตจากเซลล์เชื้อเพลิง [11]



รูปที่ 88 ลักษณะของวงจรแปลงและควบคุมไฟตรงแบบเต็มคลื่น [13]

จะเห็นว่าในหนึ่งคาบเวลานั้นที่ขดลวดปฐมภูมิจะมีกระแสไหลผ่าน 2 ครั้งด้วยเวลา 0.8T/2 โดยที่มีการนำกระแสของสวิตช์ 2 ตัวพร้อมกันในแต่ละชุดของพัลซ์ แรงดันตกคร่อมขดลวดจะมีค่าเท่ากับ V_{fc}-$2V_{ds(on)}$ ด้วยเหตุนี้จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสด้านขดลวดปฐมภูมิ กำลังงานเอาต์พุต แรงดันอินพุต และจำนวนขดลวดของหม้อแปลงเช่นเดียวกับวงจรแบบพุชพุล จากสมการที่ (34) แต่จะมีค่าแรงดันแรงดันตกคร่อมสวิตช์ที่มากกว่าดังนี้

$$V_{dc} = \left\{ \left(V_{fc} - 2V_{ds(on)} \right) \frac{N_s}{N_p} - 2V_d \right\} \frac{2T_{on}}{T}$$

(62)

สมมุติให้ระบบแปลงพลังงานมีประสิทธิภาพเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ของกำลังงานอินพุต และแรงดันอินพุตที่ขดลวดปฐมภูมิเท่ากับ V_{fc} ค่ากระแสอินพุตจะได้เท่ากันกับวงจรพุชพุลจากสมการที่ (41) จะได้

$$I_{pft} = 1.38 \frac{P_o}{V_{fc}}$$

(63)

เนื่องจากกำหนดให้เวลาในการนำกระแสของสวิตช์เท่ากับ 0.8T/2 แต่ในแต่ละคาบเวลาที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงจะเกิดกระแสไหลผ่าน 2 ครั้ง เพราะฉะนั้นค่ารอบทำงานในขณะการทำงานจะเท่ากับ 0.8 นำมาหาค่ากระแสเฉลี่ยจากสมการ

$$I_{rms} = I_{pft}\sqrt{D}$$

(64)

จะได้ว่า

$$I_{rms} = 0.894 I_{pft}$$

(65)

นำค่ากระแสอินพุต(I_{pft}) มาแทนในสมการจะได้

$$I_{rms} = 1.38\frac{P_o}{V_{fc}}(0.894)$$

(66)

$$I_{pft} = 1.23\frac{P_o}{V_{fc}}$$

(67)

เมื่อเลือกใช้มอสเฟทเป็นอุปกรณ์สวิตช์วงจรแปลงพลังงาน จะต้องหาแรงดันตกคร่อมมอสเฟทขณะทำงาน ($V_{ds(on)}$) จากกระแสที่ไหลผ่านในขณะที่มีการนำกระแสโดยใช้สูตรการหาเช่นเดียวกับวงจรแบบพุชพุล นั่นคือ

$$V_{ds(on)} = I_{pft}R_{on}$$

(68)

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (62) เมื่อกำหนดให้วงจรเรียงกระแสทางด้านเอาต์พุตเป็นวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ ซึ่งไดโอดมีค่าแรงดันตกคร่อมขณะทำงาน (V_d) เท่ากับ 0.7 โวลต์จะสามารถนำไปหาอัตราส่วนของหม้อแปลงได้ดังนี้

$$V_{dc} = \left\{(V_{fc} - 2V_{ds(on)})\frac{N_s}{N_p} - 2V_d\right\}\frac{2T_{on}}{T}$$

(69)

$$N_s = \left(\frac{N_p}{(V_{fc} - 2V_{ds(0n)})} \right) \left(2V_d + \frac{V_{dc}}{\frac{2T_{on}}{T}} \right)$$

(70)

$$N_s = \left(\frac{N_p}{(V_{fc} - 2I_{pft}IR_{on})} \right) \left(1.4 + \frac{V_{dc}}{0.8} \right)$$

(71)

วงจรแบบเต็มคลื่นจะมีวิธีการกำจัดสัญญาณสไปค์ (Spikes) ซึ่งเป็นปัญหาเรื่องค่าความเหนี่ยวนำรั่วเช่นเดียวกับวงจรแบบครึ่งคลื่นคือการต่อไดโอดขนานกับตัวสวิตช์

กำลังงานสูญเสียที่เกิดจากการทำงานของวงจรแปลงพลังงานจะเกิดจาก 2 ส่วนด้วยกัน คือ กำลังงานสูญเสียจากการสวิตช์ (Psw) และกำลังงานสูญเสียจากการนำกระแส (Pcon) ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกันทุกวงจร [11] ดังนี้คือ

$$P_{sw} = \left(I_{pft} \frac{2V_{in}}{2} \frac{T_r}{T} \right) + \left(2V_{in} \frac{I_{pft}}{2} \frac{T_f}{T} \right) = 2I_{pft}V_{in} \left(\frac{T_r + T_f}{T} \right)$$

(72)

และ

$$P_{con} = (I_{pft})^2 R_{on} \frac{T_{on}}{T}$$

(73)

จะได้ว่า

$$P_t = 2I_{pft}V_{in} \left(\frac{T_r + T_f}{T} \right) + (I_{pft})^2 R_{on} \frac{T_{on}}{T}$$

(74)

3.1.2 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย

ในการพิจารณาเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวงจรทั้ง 3 แบบนี้จะใช้การเปรียบเทียบใน 2 ลักษณะคือ 1) ทางด้านประสิทธิภาพ ซึ่งจะดูที่เรื่องของกำลังงานสูญเสียและ 2) ทางด้านอุปกรณ์ โดยดูจากจำนวนและขนาดพิกัดของอุปกรณ์ที่นำมาใช้ที่สภาวะการทำงานเดียวกัน

กำหนดให้ระบบแปลงและควบคุมไฟตรงรับแหล่งพลังงานด้านอินพุทขนาด 24 โวลต์จากเซลล์เชื้อเพลิง จากคุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงขณะที่จ่ายกำลังงานเต็มแรงดันจะลดลงครึ่งหนึ่งนั่นคือจะเหลือเพียง 12 โวลต์เท่านั้น กำหนดให้แรงดันเอาท์พุทของวงจรเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 400 โวลต์ และกำลังงานเอาท์พุทของระบบแปลงไฟตรงเท่ากับ 1.5 กิโลวัตต์ นำมาหาค่ากระแสและแรงดันตกคร่อมตัวอุปกรณ์ที่เกิดขึ้นที่ด้านอินพุทของวงจรแปลงไฟทั้ง 3 แบบ โดยสมมุติให้ระบบแปลงพลังงานมีประสิทธิภาพเท่ากับ 90เปอร์เซ็นต์ และกำลังงานที่ได้เกิดจากการนำกระแสที่ 80เปอร์เซ็นต์ของเวลาทั้งหมด หากำลังงานอินพุทได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$P_{in} = 1.1P_o = 1.1(1500) \tag{75}$$

$$P_{in} = 1666.67W \tag{76}$$

หาค่ากระแสอินพุทจากแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงในขณะที่จ่ายกำลังงานปกติและจ่ายกำลังงานเต็มที่ซึ่งแรงดันอินพุทมีค่าเท่ากับ 24 และ 12 โวลต์ตามลำดับ

$$I_{pft} = \frac{1.38P_o}{V_{in}} \tag{77}$$

กรณีจ่ายกำลังงานเต็มที่แรงดันอินพุทเท่ากับ 12 โวลต์

สำหรับวงจรพุชพุล

$$I_{pft} = 1.38\frac{P_o}{V_{in}} = 1.38 \times \frac{1500}{12} = 172.5A \tag{78}$$

สำหรับวงจรครึ่งคลื่น

$$I_{pft} = 2.75\frac{P_o}{V_{in}} = 2.75 \times \frac{1500}{12} = 343.75A$$

(79)

และสำหรับวงจรเต็มคลื่น

$$I_{pft} = 1.38\frac{P_o}{V_{in}} = 1.38 \times \frac{1500}{12} = 172.5A$$

(80)

นำค่ากระแสอินพุตที่ได้มาหาค่ากระแสอินพุตเฉลี่ย (I_{rms}) ที่ไหลผ่านขดปฐมภูมิของหม้อแปลงจากสมการที่ (54) จะได้ว่า

สำหรับวงจรพุชพุล

$$I_{rms} = I_{pft}\sqrt{0.4} = 1.38\frac{P_o}{V_{in}}\sqrt{0.4} = 0.873 \times \frac{1500}{12} = 109.1A$$

(81)

สำหรับวงจรครึ่งคลื่น

$$I_{rms} = I_{pft}\sqrt{0.8} = 2.75\frac{P_o}{V_{in}}\sqrt{0.8} = 2.460 \times \frac{1500}{12} = 307.46A$$

(82)

และสำหรับวงจรเต็มคลื่น

$$I_{rms} = I_{pft}\sqrt{0.8} = 1.38\frac{P_o}{V_{in}}\sqrt{0.8} = 1.230 \times \frac{1500}{12} = 154.29A$$

(83)

คำนวณหาแรงดันตกคร่อมมอสเฟทขณะนำกระแส ซึ่งจะนำไปหาค่าแรงดันตกคร่อมที่ตัวหม้อแปลงเพื่อใช้ในการคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวด ทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยใช้คุณสมบัติของมอสเฟทที่สามารถทนต่อกระแสและแรงดันตกคร่อมของวงจรทั้ง 3 แบบ โดยใช้คุณสมบัติตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของมอสเฟทสำหรับแรงดันอินพุท 12 โวลต์จากบริษัท IR

Topology	MOSFET	VDSS(V)	IDS(A)		Rds(on)mΩ		T_r / T_f(nS)
			IMOSFET	IT	1ตัว	ขนาน	
พุชพุล	IRFP2907	75	209	172.5	4.5	-	190/130
ครึ่งคลื่น	IRFBA1405P	55	174X2	343.75	5	2.5	190/100
เต็มคลื่น	IRF3205S	55	110	172.5	8	4	101/65

ในการเลือกใช้มอสเฟทจะพิจารณาคุณสมบัติของมอสเฟทจากตารางเปรียบเทียบจากเวปไซต์ http://datasheetarchive.com โดยเลือกมอสเฟทสามารถทนแรงดันตกคร่อมขณะที่มอสเฟทหยุดนำกระแสของวงจรแต่ละแบบได้ ทนได้เท่ากับหรือมากกว่ากระแสอินพุท และมีค่าความต้านทานภายในต่ำ เนื่องจากหากไม่สามารถหามอสเฟทที่กระแสได้เท่ากับค่ากระแสเฉลี่ย โดยจึงนำมอสเฟทมาขนานกันเพื่อให้ได้กระแสเท่ากับความต้องการหรือมากกว่าเล็กน้อย ในการต่อขนานนี้จะส่งผลให้แรงดันตกคร่อมลดลงเนื่องจากค่าความต้านทานภายในวงจรขนานมอสเฟทลดลง ซึ่งจะส่งผลให้อัตราส่วนหม้อแปลงและค่ากำลังงานสูญเสียจากการนำกระแสลดลงได้ด้วย จากสมการ $V_{ds(on)} = R_{ds(on)} \times I_{pft}$ จะได้แรงดันตกคร่อมมอสเฟทแต่ละตัวดังนี้

สำหรับวงจรพุชพุล

$$V_{ds(on)} = R_{ds(on)} \times I_{pft} = 4.5 \times 10^{-3} \times 172.50 = 0.78V \quad (84)$$

สำหรับวงจรครึ่งคลื่น

$$V_{ds(on)} = R_{ds(on)} \times I_{pft} = 2.5 \times 10^{-3} \times 343.75 = 0.86V \quad (85)$$

และสำหรับวงจรเต็มคลื่น

$$V_{ds(on)} = R_{ds(on)} \times I_{pft} = 4.0 \times 10^{-3} \times 172.50 = 0.69V \quad (86)$$

เมื่อกำหนดให้วงจรเรียงกระแสด้านเอาต์พุตเป็นชนิดเต็มคลื่นแบบบริดจ์ สามารถหาอัตราส่วนของขดลวดปฐมภูมิต่อทุติยภูมิของหม้อแปลงโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต แรงดันเอาต์พุต เวลาในการนำกระแส และขดลวดทั้งสองด้านได้จากสมการที่ (49) (61) และ (71) สำหรับแบบพุชพุล แบบครึ่งคลื่น และแบบเต็มคลื่นตามลำดับ จะได้ว่า

วงจรพุชพุล

$$N_s = \left(\frac{N_p}{(V_{fc} - I_{pft}|R_{on})}\right)\left(1.4 + \frac{V_{dc}}{0.8}\right)$$

$$N_s = \left(\frac{1}{(12 - 0.78)}\right)\left(1.4 + \frac{400}{0.8}\right) = 44.6 \approx 45$$

วงจรครึ่งคลื่น

$$N_s = \left(\frac{N_p}{\left(\frac{V_{fc}}{2} - I_{pft}R_{on}\right)}\right)\left(1.4 + \frac{V_{dc}}{0.8}\right)$$

$$N_s = \left(\frac{1}{\left(\frac{12}{2} - 0.86\right)}\right)\left(1.4 + \frac{400}{0.8}\right) = 97.5 \approx 98$$

วงจรเต็มคลื่น

$$N_s = \left(\frac{N_p}{(V_{fc} - 2I_{pft}|R_{on})}\right)\left(1.4 + \frac{V_{dc}}{0.8}\right)$$

$$N_s = \left(\frac{1}{(12 - 2\times 0.69)}\right)\left(1.4 + \frac{400}{0.8}\right) = 47.2 \approx 48$$

จากตารางคุณสมบัติของมอสเฟทนำค่า Tr และ Tf นำไปหาค่ากำลังงานสูญเสียที่เกิดจากการทำงานของสวิตช์แต่ละตัวทั้งกำลังงานสูญเสียจากการสวิตช์ (Psw) และกำลังสูญเสียจากการนำกระแส (Pcon) จากสมการที่ (74) จะได้ว่า

$$Pt = 2I_{pft}V_{in}\left(\frac{T_r + T_f}{T}\right) + (I_{pft})^2 R_{on}\frac{T_{on}}{T}$$

(87)

กำหนดให้สวิตช์ทำงานที่ความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์จะได้ค่าคาบการสวิตช์ (T) เท่ากับ 50 μs ซึ่งสามารถหาค่ากำลังงานสูญเสียได้ดังนี้

สำหรับวงจรพุชพุล

$$Pt = 2\left\{2\times 172.5\times 12\left(\frac{190n + 130n}{50u}\right) + 0.4(172.5)^2 \times 0.0045\right\} = 160.11W$$

สำหรับวงจรครึ่งคลื่น

$$Pt = 4\left\{2\times\frac{343.75}{2}\times 6\left(\frac{190n + 100n}{50u}\right) + 0.8\left(\frac{343.75}{2}\right)^2 \times 0.005\right\} = 571.66W$$

และสำหรับวงจรเต็มคลื่น

$$Pt = 8\left\{2\times\frac{172.5}{2}\times 12\left(\frac{190n + 100n}{50u}\right) + 0.8\left(\frac{172.5}{2}\right)^2 \times 0.005\right\} = 435.86W$$

ตารางที่ 5 และ ตารางที่ 6 เป็นการนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่คำนวณจากการทำงานของวงจรทั้ง 3 แบบมาเปรียบเทียบกัน

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรทั้งสามแบบ

	พุชพุล	ครึ่งคลื่น	เต็มคลื่น
แรงดันสวิตช์($V_{ds(off)}$)	75V	55V	55V
แรงดันคร่อมสวิตช์($V_{ds(on)}$)	0.78V	0.86V	0.69V
กระแสอินพุท (I_{pft})	172.5A	343.75A	172.5A
กระแสเฉลี่ย (I_{rms})	109.1A	307.46A	154.29A
อัตราส่วนหม้อแปลง	1:45	1:98	1:48
กำลังสูญเสีย	160.11W	571.66W	435.86W
มอสเฟท	2ตัว	4ตัว	8ตัว

ตารางที่ 6 ตารางเทียบขนาดเป็นเท่าระหว่างแบบพุชพุลกับทั้งสองแบบ

	น้อย	ปานกลาง	มาก
ขนาดหม้อแปลง	พุชพุล	เต็มคลื่น	ครึ่งคลื่น
จำนวนสวิตช์	พุชพุล	ครึ่งคลื่น	เต็มคลื่น
ขนาดสวิตช์	เต็มคลื่น	ครึ่งคลื่น	พุชพุล
ราคาสวิตช์	เต็มคลื่น	ครึ่งคลื่น	พุชพุล
กำลังงานสูญเสีย	พุชพุล	เต็มคลื่น	ครึ่งคลื่น

จากการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวงจรแปลงไฟตรงทั้ง 3 แบบจะพบว่า ทางด้านประสิทธิภาพนั้นแบบพุชพุลสามารถให้ประสิทธิภาพที่สูงที่สุดเนื่องจากมีค่ากำลังงานสูญเสียต่ำที่สุด รองลงมาคือแบบเต็มคลื่นส่วนแบบครึ่งคลื่นนั้นจะมีกำลังงานสูญเสียที่สูงที่สุด หากพิจารณาเรื่องของขนาดและจำนวนของอุปกรณ์นั้นแบบพุชพุลจะใช้หม้อแปลงที่มีขนาดเล็กที่สุดและจำนวนสวิตช์ที่น้อยที่สุด แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบระหว่างขนาด จำนวน และราคาของสวิตช์แล้วจะพบว่าราคาต้นทุนสวิตช์ของแบบเต็มคลื่นต่ำที่สุดเนื่องจากใช้สวิตช์ที่มีขนาดของกระแสและแรงดันต่ำถึงแม้ว่าจะมีจำนวนสวิตช์ที่มากกว่าแบบอื่นๆก็ตาม หากเราพิจารณาเปรียบเทียบโดยให้ความสำคัญในเรื่องของราคาต้นทุนเป็นอันดับแรกแล้วจะพบว่าวงจรแปลงไฟตรงแบบเต็มคลื่นนั้นใช้ต้นทุนต่ำที่สุดโดยที่ยังสามารถให้ประสิทธิภาพอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งมีความเหมาะที่จะนำมาใช้กับระบบแปลงพลังงานในงานวิจัยนี้

3.1.3 ระบบการแปลงไฟกระแสตรงเป็นไฟกระแสสลับ (DC-AC Inverter)

ระบบการแปลงไฟกระแสตรงเป็นไฟกระแสสลับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 400 โวลท์ที่ได้จากวงจรแปลงและควบคุมไฟตรงให้อยู่ในรูปไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์ขนาด 220 โวลท์อาร์เอ็มเอสที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ โดยใช้หลักการทำงานของเทคนิคการมอดูเลชั่นความกว้างพัลซ์เช่นเดียวกับระบบการแปลงและควบคุมไฟตรง โดยระบบแปลงพลังงานต้องการให้มีความสามารถในการจ่ายกำลังงานทางด้านเอาต์พุตสูงสุดที่ 1.5 กิโลวัตต์ โดยวงจรแปลงไฟกระแสตรงเป็นไฟกระแสสลับที่นำมาเปรียบเทียบมีด้วยกัน 2 วงจรด้วยกันคือแบบครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่น

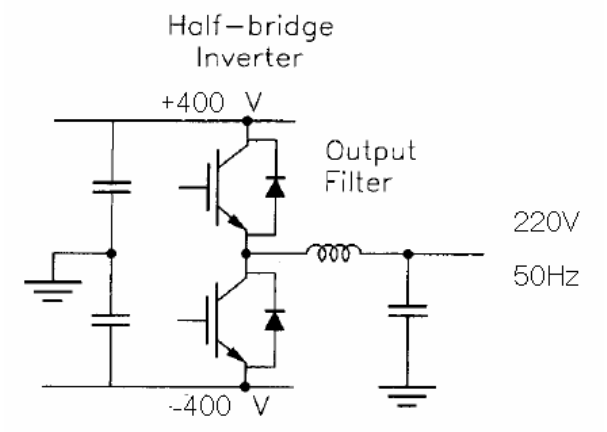
ก. แบบครึ่งคลื่น (Half Wave)

ลักษณะของวงจรแปลงไฟสลับแบบครึ่งคลื่นประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตช์ 2 ตัวและหม้อแปลงด้านทุติยภูมิที่มีขั้วกลาง หรือใช้ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดันดังรูปที่ 89 เมื่อต้องการแปลงไฟสลับให้ด้านเอาต์พุตมีแรงดันไฟฟ้าถึง 220 โวลต์ ที่ด้านอินพุตแต่ละซีกก็จะต้องมีแรงดันอย่างน้อยเท่ากับ 220 โวลต์ด้วย เพราะฉะนั้นแรงดันเอาต์พุตจากวงจรเรียงกระแสจะต้องได้ด้านละ 400 โวลต์ และจะต้องใช้ตัวเก็บประจุกรองกระแสกระเพื่อมจำนวน 2 ตัวด้วย จากวงจรสามารถ

หาแรงดันเอาต์พุตสูงสุดจะได้จากดัชนีมอดูเลชั่น (Modulation Index) กับค่าแรงดันอินพุตจากสมการการหาแรงดันเอาต์พุตได้ดังนี้

$$Vout = M\left(\frac{Vdc}{2}\right)Sine(\omega_1 T);0 < M < 1$$

(88)



รูปที่ 89 โครงร่างของวงจรครึ่งคลื่น [15]

สวิตชิ่งฟังก์ชั่น (sw1) ของวงจรมีค่าเท่ากับ

$$Vout = 0.5\left(\frac{M}{2}\right)Sine(\omega_1 T) + highestfrequency$$

(89)

หาค่ากระแสของวงจรจากแรงดันและกำลังงานเอาต์พุต

Irms = 1500/220 = 6.8 A

(90)

ในกรณีที่มีการจ่ายกระแสให้กับอุปกรณ์จำพวกขดลวดหรือตัวเก็บประจุ ซึ่งเป็นการจ่ายโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear load) สมมุติว่ากระแสที่ได้มีเฉพาะกระแสเอาต์พุตหลักมูล (Fundamental) กับฮาร์โมนิคที่สาม (Third harmonic) เท่านั้น สามารถคำนวณหากระแสได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้คือ

$$I_{rms} = \sqrt{2I_1 Sine\left(\omega_1 t - \varphi_1\right)} + \sqrt{2I_3 Sine\left(\omega_1 t - \varphi_3\right)}$$

(91)

นั่นคือ

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2} = 1.22 I_1$$

(92)

จะได้ค่ากระแสเอาต์พุตเฉลี่ยเท่ากับ

$$I_1 = \frac{6.8}{1.22} = 5.6A$$

(93)

เนื่องจากเป็นวงจรแบบครึ่งคลื่น ดังนั้นกระแสที่ได้จากวงจรเรียงกระแสที่ส่งไปให้กับสวิตช์แต่ละตัวจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของกระแส I1 ซึ่งจะได้กระแสที่ผ่านตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่กรองกระแสกระเพื่อม I_{C1} เท่ากับ

$$I_{C1} = \frac{I_1}{2}$$

(94)

นั่นคือ

$$I_{C1} = \frac{5.6}{2} = 2.8A$$

(95)

โดยทั่วไปวงจรเรียงกระแสจะยอมให้เกิดแรงดันกระเพื่อม (Ripple Voltage) ได้ไม่เกิน 5% ของแรงดันเอาต์พุต เมื่อทางด้านอินพุตมีแรงดันเท่ากับ 400 โวลต์ จะได้ค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตหรือแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเรียงกระแส (ΔVC) มีค่าเท่ากับ 20 โวลต์ นำมาหาค่าตัวเก็บประจุเรียงกระแส (Capacitor Filter) จากสมการ

$$\Delta V_C = \frac{I_{C1}}{\omega C}$$

(96)

หรือ

$$C = \frac{I_{C1}}{\omega \Delta V_C}$$

(97)

นั่นคือ

$$C = \frac{2.8}{2\pi \times 50 \times 20} = 445.5 \approx 450\mu F$$

(98)

แรงดันสูงสุดของตัวเก็บประจุ

$$V_{C1,peak} = \frac{1}{2} V_{dc} + \frac{1}{2} \Delta V_{dc}$$

(99)

ดังนั้น

$$V_{C1,peak} = 400 + 10 = 410V$$

(100)

เนื่องจากไม่สามารถหาตัวเก็บประจุที่มีค่าเท่ากับที่คำนวณได้ เพราะฉะนั้นจะต้องเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีจำหน่ายอยู่ในปัจจุบัน นั่นคือใช้ตัวเก็บประจุขนาด 450μF 420 โวลต์ จำนวน 4 ตัว

กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์จะเท่ากับ

$$I_T = \frac{I_{rms}}{\sqrt{2}}$$

(101)

จะได้

$$I_T = \frac{I_{rms}}{\sqrt{2}} = \frac{6.8}{\sqrt{2}} = 4.8A$$

(102)

หากวงจรนี้จะเลือกใช้ไอจีบีทีเบอร์ STGP3NB60 ของบริษัท TSMicroelectrics ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ซึ่งมีคุณสมบัติต่างๆที่จะต้องนำมาใช้ในการหาค่ากำลังงานสูญเสียดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 คุณสมบัติของไอจีบีทีเบอร์ STGP3NB60

VCES (V)	Ic(25oC) (A)	Ic(100oC) (A)	tr (ns)	tf (ns)	PTOT (w)	
					P(25oC)	Derating(w/c)
2.8	10	6	5	130	50	0.4

สมมุติให้วงจรแปลงไฟตรงเป็นไฟสลับทำงานที่ความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ ค่าเวลาการสวิตช์มีค่าเท่ากับ 50 ไมโครวินาที จะได้กำลังงานสูญเสียจากการทำงานทั้งการสวิตช์และการนำกระแสของสวิตช์แต่ละตัวตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$P_{sw} = \left(I_{dc} \frac{2V_{in}}{2} \frac{T_r}{T} \right) + \left(2V_{in} \frac{I_{dc}}{2} \frac{T_f}{T} \right) = 2I_{dc}V_{in} \left(\frac{T_r + T_f}{T} \right)$$

(103)

$$P_{con} = I_t V_{CE} \frac{T_{on}}{T} = P_{TOT}$$

(104)

กำลังงานสูญเสียจากการสวิตช์ของไอจีบีที

$$P_{sw} = 2 \times 4.8 \times 400 \left(\frac{5n + 130n}{50\mu} \right) = 10.4W$$

(105)

เนื่องจากกำลังงานสูญเสียจากการนำกระแสของสวิตช์จะเท่ากับค่า PTOT ที่ได้จากตาราง กำหนดให้อุณหภูมิการทำงานสูงสุดที่กระแส 6 แอมแปร์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีส่วนต่างของอุณหภูมิเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส เพราะฉะนั้นจะได้ค่ากำลังงานสูญเสียจากการทำงานเท่ากับ

$$P_{con} = P_{(25C)} + P_{decorating}$$

(106)

$$P_{con} = 50 + (0.4 \times 75) = 80W$$

(107)

หากำลังงานสูญเสียที่เกิดจากการนำกระแสและการทำงานของไอจีบีทีรวมเท่ากับ

$$P_T = P_{sw} + P_{con}$$

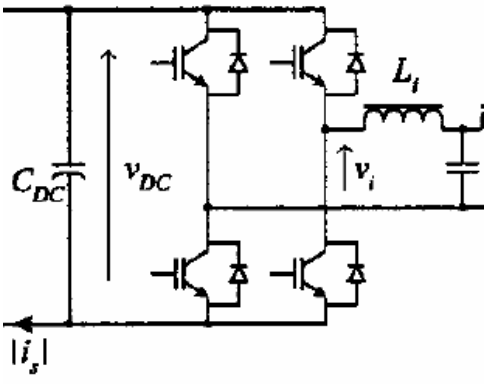
(108)

$$P_T = 10.4 + 80 = 90.4W$$

(109)

วงจรแปลงไฟตรงเป็นไฟสลับแบบครึ่งคลื่นใช้สวิตช์จำนวน 2 ตัวจะได้กำลังงานสูญเสียรวมเท่ากับ 201.4 วัตต์

ข. แบบเต็มคลื่น (Full Wave)



รูปที่ 90 โครงสร้างของวงจรแบบเต็มคลื่น [9]

วงจรแบบเต็มคลื่นจะมีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับแบบครึ่งคลื่น แต่ไม่จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงที่มีขั้วกลางและสามารถที่จะใช้ตัวเก็บประจุกรองกระแสกระเพื่อมเพียงตัวเดียวเท่านั้น ใช้สวิตช์หลักทั้งหมด 4 ตัว เมื่อกำหนดใช้แรงดันและกำลังงานเอาต์พุตเท่ากับ 220 โวลต์และ 1.5 กิโลวัตต์ตามลำดับ จะได้ค่ากระแสเอาต์พุตเช่นเดียวกับแบบครึ่งคลื่นจากสมการ

$$Irms = \frac{1500}{220} = 6.8A$$

(110)

และ

$$I_1 = \frac{I_{rms}}{1.22} = \frac{6.8}{1.22} = 5.6A$$

(111)

จากลักษณะของวงจรจะเห็นว่าวงจรแบบเต็มคลื่นนี้มีความแตกต่างจากแบบครึ่งคลื่น คือมีอินพุตป้อนให้แก่สวิตซ์เพียงด้านเดียว ดังนั้นกระแสเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์นั่นคือ Irms = I_T และ Ic = I_1 เพราะฉะนั้น

$$Irms = I_T = 6.8A$$

(112)

$$Ic = I_1 = 5.6$$

(113)

นำค่า I_C ที่ได้ไปแทนค่าในสมการที่ (97) เพื่อหาค่าตัวเก็บประจุ โดยที่ค่าแรงดันกระเพื่อมตามข้อกำหนดจะไม่เกิน 5% เช่นเดียวกับแบบครึ่งคลื่นนั่นคือ 20 โวลต์จะได้ว่า

$$C = \frac{5.6}{2\pi \times 50 \times 20} = 890.9 \approx 1000\mu F$$

(114)

เพราะฉะนั้นวงจรนี้จะต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีความจุ 1000μF และสามารถทนแรงดันได้ถึง 450 โวลต์จำนวน 1 ตัว

หากวงจรนี้จะเลือกใช้ไอจีบีทีเบอร์ STGP7NB60 ของบริษัท TSMicroelectrics ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ซึ่งมีคุณสมบัติต่างๆที่จะต้องนำมาใช้ในการหาค่ากำลังงานสูญเสียดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ตารางคุณสมบัติของไอจีบีทีเบอร์ STGP7NB60

VCES (V)	Ic(25oC) (A)	Ic(100oC) (A)	tr (ns)	tf (ns)	PTOT (w)	
					P(25oC)	Derating(w/c)
2.8	14	7	6	150	80	0.64

สมมุติให้วงจรแปลงไฟตรงเป็นไฟสลับทำงานที่ความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ ค่าเวลาการสวิตช์เท่ากับ 50 ไมโครวินาทีจะได้กำลังงานสูญเสียจากการทำงานทั้งการสวิตช์และการนำกระแสของสวิตช์แต่ละตัวจากสมการ

$$P_{sw} = \left(I_{dc} \frac{2V_{in}}{2} \frac{T_r}{T} \right) + \left(2V_{in} \frac{I_{dc}}{2} \frac{T_f}{T} \right) = 2I_{dc}V_{in} \left(\frac{T_r + T_f}{T} \right)$$

(115)

$$P_{con} = I_t V_{CE} \frac{T_{on}}{T} = P_{TOT}$$

(116)

กำลังงานสูญเสียจากการสวิตช์ของไอจีบีที

$$P_{sw} = 2 \times 6.8 \times 400 \left(\frac{6n + 150n}{50\mu} \right) = 17W$$

(117)

เนื่องจากกำลังงานสูญเสียจากการนำกระแสของสวิตช์จะเท่ากับค่า PTOT ที่ได้จากตาราง กำหนดให้อุณหภูมิการทำงานสูงสุดที่กระแส 6 แอมแปร์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีส่วนต่างของอุณหภูมิเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส เพราะฉะนั้นจะได้ค่ากำลังงานสูญเสียจากการทำงานเท่ากับ

$$P_{con} = P_{(25C)} + P_{decorating}$$

(118)

$$P_{con} = 80 + (0.64 \times 75) = 128W$$

(119)

หากำลังงานสูญเสียที่เกิดจากการนำกระแสและการทำงานของไอจีบีทีรวมเท่ากับ

$$P_T = P_{sw} + P_{con}$$

(120)

$$P_T = 17 + 128 = 145W$$

(121)

วงจรแปลงไฟตรงเป็นไฟสลับแบบครึ่งคลื่นใช้สวิตช์จำนวน 4 ตัวจะได้กำลังงานสูญเสียรวมเท่ากับ 580 วัตต์

3.1.4 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย

จากตารางที่ 9 จะเห็นว่าวงจรแบบเต็มคลื่นต้องใช้สวิตช์จำนวนมากกว่า มีขนาดที่ใหญ่กว่า ส่วนตัวเก็บประจุนั้นหากพิจารณาจากจำนวนและขนาดแล้วจะพบว่าไม่แตกต่างกันมากนัก หากแต่แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองของวงจรแบบคลื่นไม่เท่ากัน คุณภาพของแรงดันเอาต์พุตก็จะแย่ลง จำนวนขดหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิของแบบครึ่งคลื่นต้องใช้มากกว่าเป็น 2 เท่าของจำนวนขดหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิของแบบเต็มคลื่น ข้อเสียของวงจรแบบเต็มคลื่นคือเรื่องของราคาที่สูงกว่า แต่หากพิจารณาเรื่องคุณภาพของแรงดันเอาต์พุต และความอิสระในการควบคุมแล้วจะพบว่าวงจรแบบเต็มคลื่นนั้นจะมีคุณภาพที่ดีกว่าและมีความเป็นอิสระในการควบคุมที่สูงกว่ามาก ดังนั้นวงจรแบบเต็มคลื่นจึงเหมาะสมสำหรับวงจรแปลงไฟสลับมากกว่าแบบครึ่งคลื่น

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรแบบครึ่งคลื่นและเต็มคลื่น

	ครึ่งคลื่น	เต็มคลื่น
จำนวนสวิตช์	2	4
ขนาดสวิตช์	5A/600V	7A/600V
จำนวนตัวเก็บประจุ	2	1
ขนาดตัวเก็บประจุ	450μF	1000μF
หม้อแปลงด้านทุติยภูมิ	2N	N
กำลังงานสูญเสีย	201.4W	580W

3.1.5 ระบบการจัดเก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy Storage)

ระบบการการจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าจะทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้กับระบบในกรณีที่กระแสไฟฟ้าจากเซลเชื้อเพลิงทางด้านอินพุตขาดหายไป เพื่อให้เกิดความต่อเนื่องแก่โหลดและเป็นการเพิ่มเสถียรภาพของระบบแปลงพลังงาน โดยทั่วไปแล้วระบบสำรองไฟต่างๆจะใช้แบตเตอรี่แบบแห้ง เนื่องจากเป็นชนิดที่ไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาและสามารถจ่ายพลังงานได้อย่างเต็มที่อย่างต่อเนื่อง แบตเตอรี่แต่ละเซลล์จะมีขนาดความจุที่แตกต่างกันออกไปหากมีขนาดที่ไม่พอดีกับความต้องการก็สามารนำมาต่ออนุกรมหรือขนานเพื่อเพิ่มแรงดันและกระแสได้ ส่วนตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานเข้ากับระบบแปลงพลังงานนั้นมี 2 ตำแหน่งด้วยกันคือต่อขนานกับเซลเชื้อเพลิงที่ด้านแรงดันต่ำ และต่อขนานกับตัวเก็บประจุด้านแรงดันสูง แต่การต่อทางด้านแรงดันสูงนั้นจะต้องนำอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานมาต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าสูงเท่าที่ต้องการ ซึ่งจะส่งผลเสียต่อเรื่องความความสมดุลของอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานในแต่ละเซลล์เนื่องจากการต่อแบบอนุกรม ซึ่งส่งผลไปถึงประสิทธิภาพในการเก็บพลังงานของตัวอุปกรณ์ด้วย รวมถึงจำนวนของเซลล์ไฟฟ้าที่ต้องใช้เป็นจำนวนมากเพราะต้องนำมาต่ออนุกรมให้ได้แรงดันสูงเท่าที่ต้องการ อีกทั้งในการซ่อมบำรุงหรือการเปลี่ยนอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานจะต้องเปลี่ยนพร้อมกันทั้งหมด ซึ่งก็จะทำให้ต้นทุนในการซ่อมบำรุงสูงตามด้วย

เพราะฉะนั้นตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานที่เหมาะสมก็คือ นำไปต่อขนานกับเซลล์เชื้อเพลิงที่ด้านอินพุตของระบบแปลงพลังงาน ถึงแม้ว่าที่ตำแหน่งนี้จะต้องจ่ายกำลังงานส่วนหนึ่งไปกับกำลังงานสูญเสียของสวิตช์ก็ตาม แต่จำนวนของอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานที่นำมาใช้และต้นทุนในการซ่อมบำรุงนั้นมีขนาดที่ต่ำกว่ามาก

3.1.6 อุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy Storage Device)

ในปัจจุบันอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับจัดเก็บพลังงานที่ประกอบอยู่ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังมี 2 แบบ ได้แก่แบตเตอร์รี่และตัวเก็บประจุ สำหรับแบตเตอร์รี่ได้มีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายเป็นเวลานานแล้ว ส่วนการนำตัวเก็บประจุมาใช้เก็บพลังงานนั้นอยู่ในระหว่างการพัฒนา ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาตัวเก็บประจุให้มีความสามารถเก็บประจุได้สูงมากขึ้นเรียกว่าตัวเก็บประจุความจุสูง (Super Capacitor หรือ Ultra capacitor) ทั้งสองชนิดมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการใช้งาน

ก. ตัวเก็บประจุความจุสูง

ตัวเก็บประจุความจุสูงเป็นอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานชนิดใหม่ มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับตัวเก็บประจุแบบอิเล็คโตรไลท์ ซึ่งจะทำการเก็บพลังงานไว้ในสนามไฟฟ้าภายใน เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้เป็นไดอิเล็คตริกที่มีค่าความหนาแน่นพลังงาน (E/M) สูงกว่าตัวเก็บประจุทั่วไป 10 ถึง

100 เท่าซึ่งมีค่าประมาณ 20-70 MJ/cm^3 และมีการเพิ่มพื้นที่ด้วยการเพิ่มชั้นของอิเล็คโทรดและไดอิเล็กตริกนี้ขึ้นเป็น 2 ชั้น [18] จึงทำให้มีความสามารถในการเก็บประจุได้สูง จากคุณสมบัติของตัวเก็บประจุที่มีค่าเวลาคงที่สั้นสามารถทำการประจุได้อย่างรวดเร็วและคายประจุได้เต็มที่ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ในขณะที่แบตเตอร์รี่สามารถคายประจุได้เพียงแค่ 80 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น จึงทำให้สามารถนำพลังงานเข้าและออกได้อย่างเต็มที่ วงรอบในการทำงาน (Charge-Discharge Cycle) ของตัวเก็บประจุสูงถึง 1 ล้านครั้งซึ่งมากกว่าแบตเตอร์รี่ถึง 1000 เท่าทำให้มีอายุการใช้งานที่สูงกว่า และการนำไปใช้งานนั้นไม่จำเป็นที่จะต้องมีวงจรควบคุมการประจุเนื่องจากคุณสมบัติของตัวเก็บประจุที่สามารถทนต่อการประจุเกิน (Over Charging) ได้ หากเปรียบเทียบกับแบตเตอร์รี่ที่มีขนาดเท่ากันแล้วจะพบว่าตัวเก็บประจุความจุสูงนี้มีน้ำหนักที่น้อยกว่า 1 เท่าตัว แต่ข้อด้อยของตัวเก็บประจุความจุก็สูงคือมีความจุน้อยกว่าหากเปรียบเทียบกับแบตเตอร์รี่ที่ขนาดเท่ากัน และมีราคาที่สูงกว่ามาก

ลักษณะเด่นของตัวเก็บประจุความจุสูง [19]

1) ค่าความเก็บประจุสูงถึง 100 เท่าของตัวเก็บประจุทั่วไป (มากกว่า 3 ฟาหรัด/ลูกบาศก์นิ้ว หรือ 0.18 ฟาหรัด/ตารางเซ็นติเมตร)
2) ค่าความหนาแน่นประจุสูงมากถึง 20 เท่าของตัวเก็บประจุ
3) มีอายุการใช้งานที่ยาวนานสามารถประจุและคายประจุได้มากว่า 1ล้านครั้งหรือประมาณ 25 ปี
4) สามารถประจุและคายประจุได้เร็ว
5) ไม่ต้องใช้ตัวป้องกันแรงดันเกินและตัวต้านทานควบคุมกระแสในการประจุ
6) ไม่ต้องมีการบำรุงรักษา
7) ปลอดภัยไม่มีการระเบิดจากการลัดวงจร
8) อุณหภูมิในการทำงาน -40 ถึง 85 องศา
9) กระแสรั่ว (Leakage Current) ต่ำเพียง 0.1 ถึง 4 ไมโครแอมป์
10) ตัวเก็บประจุความจุสูงบางชนิดไม่ต้องมีขั้ว
11) ความหนาแน่นพลังงานต่อปริมาตรเท่ากับ 9 Wh/l.
12) ความหนาแน่นพลังงานต่อน้ำหนักเท่ากับ 4 Wh/kg.
13) ความหนาแน่นกำลังงานต่อปริมาตรเท่ากับ 900 W/l.
14) ความหนาแน่นกำลังงานงานต่อน้ำหนักเท่ากับ 400W/kg

ในปัจจุบันตัวเก็บประจุความจุสูงมีค่ามากตั้งแต่ 1 ถึง 1800 ฟาหรัด แต่ด้านแรงดันนั้นค่อนข้างต่ำมีค่าเพียง 2.5 ถึง 15 โวลต์เท่านั้น ค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุหาได้จากสมการ

$$V_C = \frac{Q}{C}$$

(122)

เมื่อ Q คือประจุที่เก็บอยู่ในตัวเก็บประจุและ C คือค่าความเก็บประจุ กำลังงานที่เก็บอยู่ภายในตัวเก็บประจุเท่ากับ

$$E_C = \frac{1}{2} C V_C^{\ 2}$$

(123)

การนำตัวเก็บประจุความจุสูงไปต่อใช้งานกับวงจรแปลงพลังงานสามารถต่อได้ 2 แบบ คือ 1) ขนานกับวงจรแปลงไฟตรงเป็นไฟสลับที่แรงดันสูงและ 2) ขนานกับอินพุตของระบบแปลงพลังงานด้านแรงดันต่ำ ในกรณีแรกจะทำหน้าที่เหมือนกับตัวเก็บประจุกรองกระแสกระเพื่อม เพื่อให้สามารถควบคุมเอาต์พุตให้คงที่และที่ตำแหน่งนี้ตัวเก็บประจุก็ต้องการค่าแรงดันจุที่สูงด้วย ระบบแปลงพลังงานขนาด 1.5 กิโลวัตต์ต้องการให้จ่ายพลังงานได้ประมาณไม่เกิน 20 วงรอบของการทำงาน หากวงจรแปลงพลังงานทำงานที่ความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์หรือมีค่าคาบการสวิตชิ่งเท่ากับ 50 ไมโครวินาทีจะได้ค่าเวลาที่ต้องการจ่ายพลังงานเท่ากับ 1 มิลลิวินาที จะได้ค่าพลังงานที่ต้องจ่ายได้เท่ากับ

$$E = \Delta tP = \frac{1}{2} C \Delta V^2 = 1 \times 10^{-3} \times 1.5 \times 10^3 = 1.5J$$

(124)

สมมุติว่าในการออกแบบยอมให้เกิดแรงดันกระเพื่อมได้ 5 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเท่ากับ 20 โวลต์ หาค่าความเก็บประจุที่สามารถจ่ายพลังงานให้แก่วงจรแปลงไฟตรงเป็นไฟสลับได้ดังนี้

$$C = \frac{2\Delta tP}{\Delta V^2} = \frac{2 \times 1 \times 10^{-3} \times 1.5 \times 10^3}{20^2} = 0.0075F$$

(125)

หากใช้ตัวเก็บประจุความจุสูงขนาด 1.5 ฟาหรัด 2.5 โวลต์ มาต่อขนานและอนุกรมให้ได้ขนาดความจุเท่า 0.0075 ฟาหรัดและได้แรงดันเท่ากับ 400 โวลต์ จะต้องใช้ตัวเก็บประจุความจุสูงที่จะนำมาต่ออนุกรมและขนานกันได้ดังนี้

$$N_s = \frac{V_{dc}}{V_s} = \frac{400}{2.5} = 160$$

(126)

เมื่อ V_{dc} คือแรงดันอินพุตของวงจรแปลงไฟตรงเป็นไฟสลับ Ns คือจำนวนตัวเก็บประจุความจุสูงและ Vs คือแรงดันของตัวเก็บประจุความจุสูงแต่ละตัว เนื่องจากว่าการนำตัวเก็บประจุความจุสูงมาต่ออนุกรมกันจะทำให้ค่าความจุของตัวเก็บประจุลดลง เพราะฉะนั้นจะสามารถหาค่าความจุที่เกิดจากการต่ออนุกรมได้จากสมการ

$$C_{series} = \frac{C_s}{N_s} = \frac{1.5}{160} = 0.0094F$$

(127)

เมื่อ Cseries คือค่าความเก็บประจุที่ได้จากการต่ออนุกรม และ Cs คือค่าของตัวเก็บประจุแต่ละตัว จากนั้นหาจำนวนของชุดตัวเก็บประจุความจุสูงที่จะนำมาต่อขนานกัน

$$N_p = \frac{C}{C_{series}} = \frac{0.0075}{0.0094} \approx 1$$

(128)

จะได้จำนวนตัวเก็บประจุความจุสูงทั้งหมดที่ใช้สำหรับรักษาระดับแรงดันที่ตำแหน่งแรงดันสูงได้เท่ากับ

$N_t = N_s \times N_p = 160$ ตัว

(129)

ตัวเก็บประจุความจุสูง พานาโซนิคขนาด 1.5 ฟาหรัด 2.5 โวลต์มีขนาด 3 ตารางเซนติเมตร ขนาดพื้นที่ของตัวเก็บประจุความจุสูงทั้งหมดเท่ากับ

$$V = 160 \times 3cm^3 = 840cm^3$$

(130)

เนื่องจากค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุความจุสูงจากการต่ออนุกรม (ESR) มีผลต่อการควบคุมแรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสในช่วงเริ่มต้นจะทำให้ได้ค่ากระแสเท่ากับ

$$\Delta I = \frac{P}{V} = \frac{1500}{400} = 3.75A$$

(131)

สมมุติให้ค่าความต้านทาน ESR ของตัวเก็บประจุความจุสูง $r_c = 0.1\Omega$ จะได้แรงดันตกคร่อม ESR เท่ากับ

$$Vr_c = r_c \Delta I = 0.1 \times 3.75 = 0.375V$$

(132)

แรงดันอินพุตมีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ $400 - 0.375$ ซึ่งมีผลต่อแรงดันอินพุตน้อยมาก จะเห็นว่าในกรณีที่ต้องการให้ระบบจัดเก็บพลังงานจากตัวเก็บประจุความจุสูงจ่ายพลังงานกับระบบแปลงไฟตรงที่กำลังงานเอาต์พุตขนาด 1.5 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 1 มิลลิวินาที ที่ขนาดของแรงดันอินพุตของวงจรแปลงไฟตรง 24 โวลต์จะต้องใช้ตัวเก็บประจุความจุสูงจำนวน 160 ตัว

ในกรณีที่ 2 นำตัวเก็บประจุความจุสูงมาต่อกับระบบแปลงพลังงานที่ด้านอินพุตของวงจรแปลงไฟตรง เมื่อทางด้านเอาต์พุตต้องการกำลังงานสูงชั่วขณะจะส่งผลให้แรงดันด้านอินพุตลดลง พลังงานจะถูกส่งจากตัวเก็บประจุความจุสูงไปยังโหลด ในทางกลับกันเมื่อความต้องการพลังงานทางด้านเอาต์พุตลดลงอย่างรวดเร็ว นั่นคือแรงดันทางด้านโหลดลดลงจะเกิดกระแสไหลจากโหลดมาสู่ตัวเก็บประจุความจุสูงแทน

เมื่อกำหนดให้แรงดันอินพุตของวงจรแปลงไฟตรงเท่ากับ 24 โวลต์ จากคุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงในกรณีที่มีการจ่ายกระแสสูงสุดจะทำให้แรงดันลดลงครึ่งหนึ่งซึ่งเท่ากับ 12 โวลต์ ตัวเก็บประจุความจุสูงจะต้องสามารถจ่ายพลังงานให้กับโหลดได้ครอบคลุมการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก 12 ถึง 24 โวลต์ เพราะฉะนั้นจะได้ค่าความจุของตัวเก็บประจุความจุสูงที่ต้องการใช้เท่ากับ

$$C = \frac{2\Delta tP}{\Delta V^2} = \frac{2 \times 1 \times 10^{-3} \times 1.5 \times 10^3}{12^2} = 0.0208F$$

(133)

หากใช้ตัวเก็บประจุความจุสูงขนาด 1 ฟาหรัด 2.5 โวลต์ มาต่อขนานและอนุกรมให้ได้ขนาดเท่ากับ 0.0208 ฟาหรัด 24 โวลต์ หาจำนวนของตัวเก็บประจุที่จะนำมาอนุกรมกันได้ดังนี้

$$N_s = \frac{V_{dc}}{V_s} = \frac{24}{2.5} = 9.6 \approx 10$$

(134)

เมื่อ V_{dc} คือแรงดันอินพุตของวงจรแปลงไฟตรง Ns คือจำนวนตัวเก็บประจุความจุสูง และ Vs คือแรงดันของตัวเก็บประจุความจุสูงแต่ละตัว เนื่องจากว่าการนำตัวเก็บประจุความจุสูงมาต่ออนุกรมกันจะทำให้ค่าความจุของตัวเก็บประจุลดลง เพราะฉะนั้นจะสามารถหาค่าความจุที่เกิดจากการต่ออนุกรมได้จาก

$$C_{series} = \frac{C_s}{N_s} = \frac{1}{10} = 0.1F$$

(135)

เมื่อ Cseries คือค่าความเก็บประจุที่ได้จากการต่ออนุกรม และ Cs คือค่าของตัวเก็บประจุแต่ละตัว จากนั้นหาจำนวนของชุดตัวเก็บประจุความจุสูงที่จะนำมาต่อขนานกัน

$$N_p = \frac{C}{C_{series}} = \frac{0.0208}{0.1} \approx 1$$

(136)

จะได้จำนวนตัวเก็บประจุความจุสูงทั้งหมดที่ใช้ต่อเพื่อรักษาระดับพลังงานทางด้านอินพุตเท่ากับ

Nt = Ns × Np = 10 ตัว

(137)

หากใช้ตัวเก็บประจุความจุสูง พานาโซนิคขนาด 3 ฟาหรัด 2.5 โวลต์มีขนาด 3 ตารางเซนติเมตร ขนาดพื้นที่ของตัวเก็บประจุความจุสูงทั้งหมดเท่ากับ

$$V = 10 \times 3cm^3 = 30cm^3$$

(138)

เนื่องจากค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุความจุสูงจากการต่ออนุกรม (ESR) มีผลต่อการควบคุมแรงดัน สมมุติให้วงจรแปลงไฟตรงขนาด 1.5 กิโลวัตต์นี้มีประสิทธิภาพเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ จะได้กำลังงานที่ต้องการทางด้านอินพุตเท่ากับ 1667 วัตต์ การเปลี่ยนแปลงของกระแสตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นจนถึงสูงสุดจะได้ค่ากระแสเท่ากับ

$$\Delta I = \frac{P}{V} = \frac{1667}{12} = 138.92A$$

(139)

สมมุติให้ค่าความต้านทาน ESR ของตัวเก็บประจุความจุสูง $r_c = 0.1\Omega$ จะได้แรงดันตกคร่อม ESR เท่ากับ

$$Vr_c = r_c \Delta I = 0.1 \times 138.92 = 13.892V$$

(140)

แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุความจุสูงจะส่งผลให้แรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงเท่ากับ

$$V_{in} - Vr_c = 24 - 13.892 = 10.1V$$

(141)

แรงดันอินพุตมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 10.1 ถึง 24 โวลต์ เนื่องจากแรงดันทางด้านอินพุตต่ำจึงทำให้ช่วงการเปลี่ยนแปลงนี้มีผลกระทบต่อด้านดันอินพุต เพราะฉะนั้นในการออกแบบวงจรแปลงไฟตรงในกรณีที่ใช้ตัวเก็บประจุความจุสูงที่ด้านอินพุต จะต้องใช้ค่าต่ำสุดของการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตนี้มาคำนวณอัตราส่วนของหม้อแปลง

จะเห็นว่าในกรณีที่ต้องการให้ระบบจัดเก็บพลังงานจากตัวเก็บประจุความจุสูงจ่ายพลังงานกับระบบแปลงไฟตรงที่กำลังงานเอาต์พุตขนาด 1.5 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 1 มิลลิวินาที ที่ขนาดของแรงดันอินพุตของวงจรแปลงไฟตรง 24 โวลต์จะต้องใช้ตัวเก็บประจุความจุสูงจำนวน 10 ตัวและต้องออกแบบให้ วงจรแปลงไฟตรงสามารถทำงานได้เมื่อแรงดันอินพุตมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 10 ถึง 24 โวลต์

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆของตัวเก็บประจุความจุสูงที่ติดตั้งอยู่ระหว่างด้านแรงดันต่ำและด้านแรงดันสูง

	แรงดันต่ำ	แรงดันสูง
ขนาดตัวเก็บประจุ (F)	1	1.5
ค่าความเก็บประจุรวม (F)	0.0208	0.0075
ค่าความเก็บประจุอนุกรม (F)	0.1	0.0094
จำนวนอนุกรม (ตัว)	10	160
จำนวนขนาน (ตัว)	1	1
จำนวนรวม (ตัว)	10	160
แรงดันอินพุตต่ำสุด (V)	10	24
แรงดันเอาต์พุตต่ำสุด (V)	400	399.625
แรงดันคร่อม ESR (V)	13.892	0.375
ปริมาตรตัวเก็บประจุรวม (cm^3)	30	840

จากตารางที่ 10 จะเห็นว่าจำนวนของตัวเก็บประจุความจุสูงที่ใช้กับด้านแรงดันต่ำน้อยกว่าด้านแรงดันสูงถึง 84 เท่าซึ่งส่งผลให้ขนาดพื้นที่และต้นทุนของระบบสำรองไฟมีขนาดต่ำกว่าด้วยเช่นกัน เนื่องจากว่าค่าความเก็บประจุจะแปรผกผันกับจำนวนที่นำมาต่ออนุกรมจากคุณสมบัติในการต่ออนุกรมของตัวเก็บประจุในสมการที่ (125) และ (133) ดั้งนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการนำตัวเก็บประจุความจุสูงซึ่งมีค่าแรงดันเพียงแค่ 2.5 โวลต์ต่อตัวไปต่ออนุกรมเพื่อใช้กับวงจรที่มีแรงดันขนาดสูงเช่นระบบแปลงพลังงานนี้

ข. แบตเตอร์รี่

แบตเตอร์รี่เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เก็บพลังงานไฟฟ้าไว้เพื่อให้สามารถนำมาใช้งานได้อีกครั้งในภายหลัง การเก็บพลังงานของแบตเตอร์รี่จะใช้ลักษณะของหลักการไฟฟ้าเคมีเพื่อเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของพลังงานเคมีในขณะที่ทำการประจุไฟ และเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าในขณะคายประจุ โดยภายในจะประกอบด้วยเซลล์ไฟฟ้าและในแต่ละเซลล์จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า (Electrode) 2 ขั้วซึ่งจะทำหน้าที่เป็นขั้วบวกและขั้วลบ และมีสารละลายอยู่ตรงกลางเรียกว่าอิเล็คโตรไลท์ (Electrolyte) ในระหว่างการประจุและคายประจุนั้นจะเกิดพลังงานสูญเสียส่วนหนึ่งจากการทำปฏิกิริยาเคมีและความร้อน จึงทำให้ประสิทธิภาพของแบตเตอร์รี่ต่ำกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ [20] หากพิจารณาตามความเหมาะสมของการใช้งานจะสามารถแบ่งชนิดของแบตเตอร์รี่ได้เป็น 3 ชนิดดังต่อไปนี้

1. ใช้สำหรับการเริ่มเดิน (SLR ,Starting, Lighting, Ignition) การติดเครื่องยนต์ในแต่ละครั้งต้องการจายกระแสสูงแต่ช่วงเวลาการใช้งานสั้น ในการใช้งานปกติวงรอบการประจุและคายประจุจะมากกว่า 1000 ครั้ง และในแต่ละครั้งจะมีการคายประจุประมาณ 2 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น โครงสร้างภายในของแบตเตอร์รี่ชนิดนี้จะประกอบด้วยแผ่นตะกั่วบางซ้อนกันอยู่จำนวนมาก เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่หน้าสัมผัสในการทำปฏิกิริยา นอกจากนั้นแผ่นตะกั่วจะถูกทำให้บวมฟูลักษณะคล้ายกับฟองน้ำเพื่อให้เกิดหน้าสัมผัสเพิ่มขึ้นอีก แผ่นตะกั่วนี้จะแตกและหลุดออกได้ง่ายในกรณีที่มีการคายประจุจนหมด (Deep Cycle) ซึ่งหลังจากเกิดกรณีมีการคายประจุจนหมดจะสามารถประจุไฟได้อีกเพียง 30 ถึง 150 ครั้งเท่านั้น ชนิดนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า CCA (Cold Crack Amps)

2. แบตเตอร์รี่อุตสาหกรรม แบตเตอร์รี่ชนิดนี้ออกแบบให้สามารถคายประจุได้จนหมดถึง 80 เปอร์เซ็นต์ในการใช้งานปกติ แผ่นตะกั่วของแบตเตอร์รี่ชนิดนี้จะหนากว่าและที่แตกต่างจากแบบอื่นคือใช้เป็นแผ่นตะกั่วที่เป็นของแข็งแทนลักษณะที่เป็นฟองน้ำ เหมาะสำหรับระบบสำรองไฟขนาดเล็กและขนาดกลางเช่น รถยกของในโรงงาน รถกอล์ฟ เป็นต้น หากต้องการนำไปใช้งานสำหรับติเครื่องยนต์เช่นแบบแรก จะต้องใช้แบตเตอร์รี่ที่มีขนาดที่โตกว่าปกติอย่างน้อย 25 เปอร์เซ็นต์เพื่อให้สามารถจ่ายระแสได้สูง

3. แบตเตอร์รี่เรือ (Marine) ชนิดนี้จะเป็นการรวมเอาข้อดีของทั้ง 2 ชนิดเข้าไว้ด้วยกัน แผ่นตะกั่วจะมีลักษณะเป็นฟองน้ำเช่นเดียวกับแบบแรกแต่มีความหนาและน้ำหนักที่มากกว่า การคายประจุออกแบบไว้ไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า MCA (Marine Crack Amps)

ระบบสำรองไฟส่วนใหญ่จะใช้แบตเตอร์รี่ที่ไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษา เช่นแบบที่เรียกว่าแบตเตอร์รี่แบบแห้ง ซึ่งภายในจะประกอบด้วยกรดซัลฟูริคเอซิดและน้ำ 30 และ 70 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แบตเตอร์รี่แบบแห้งบางชนิดใช้นิเกิ้ลไอรอน (NiFe) เป็นส่วนประกอบ เนื่องจากมีอายุการใช้งานที่นาน แต่จะให้ประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำเพียงแค่ 60 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น และยังให้แรงดันที่แตกต่างออกไปซึ่งยากต่อการนำมาใช้กับระบบแปลงพลังงานที่มีระดับแรงดันเป็น 12 24 และ 48 โวลต์ แรงดันที่ได้จากแต่ละเซลล์จากแบตเตอร์รี่แบบแห้งจะเท่ากับ 2.14 โวลต์ เพราะฉะนั้น เราจะได้แรงดันขนาด 12.6 หรือ 12.8 โวลต์จากแบตเตอร์รี่ขนาด 12 โวลต์เมื่อทำการประจุเต็มที่ 100 เปอร์เซ็นต์ และหากทิ้งไว้จะเกิดการรั่ว (Leakage) หรือมีการคายประจุเองซึ่งอัตราการรั่วจะขึ้นอยู่กับชนิด อายุ และอุณหภูมิในการเก็บรักษา ประมาณ 1 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ต่อเดือน หากปล่อยให้รั่วจนหมดก็จะทำให้เสียหายได้ เพราะฉะนั้นจำเป็นต้องมีวงรอบการประจุอยู่เป็นประจำ ถึงแม่จะไม่มีการใช้งานก็ตาม

แรงดันที่วัดได้จากแบตเตอร์รี่จะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์การพลังงาน เช่นแบตเตอร์รี่ขนาด 12 โวลต์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันโดยประมาณอยู่ในช่วงระหว่าง 10.5 ถึง 12.7 โวลต์ ซึ่งในการวัดค่าแรงดันที่ได้นี้จะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า แบตเตอร์รี่ที่จะนำมาวัดแรงดันนั้นจะต้องมีการประจุไฟมาแล้ว และหลังจากที่ทำการประจุแล้วจะต้องจะต้องทิ้งไว้อย่างน้อย 3 ชั่วโมง เพราะหากไม่มีการประจุไฟหรือทำการวัดทันที่หลังจากการประจุไฟค่าที่อ่านได้จะไม่ถูกต้อง เนื่องจากในการประจุไฟจะส่งผลให้แรงดันแต่ละเซลล์จะสูงกว่าปกติ

ในการนำแบตเตอร์รี่มาใช้เป็นระบบสำรองไฟของวงจรแปลงพลังงานไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วจะใช้แบตเตอรี่แบบแห้ง เนื่องจากมีข้อดีในแง่ของการบำรุงรักษาที่ไม่จำเป็นที่จะต้องมีการดูแลมากนัก แบตเตอร์รี่ที่นำมาใช้มีขนาดแรงดันเท่ากับ 12 โวลต์โดยมีขนาดความจุจะแตกต่างกันออกไปตามความเหมาะสมของการออกแบบ ซึ่งถ้าขนาดของแบตเตอรี่ไม่พอดีกับความต้องการใช้งาน ก็สามารถนำมาต่ออนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันและต่อขนานเพื่อเพิ่มขนาดกระแสได้ ตำแหน่งในการติดตั้งแบตเตอรี่กับวงจรแปลพลังงานก็มี 2 ตำแหน่งเช่นเดียวกับการติดตั้งตัวเก็บประจุความจุสูง คือต่อขนานกับเซลเชื้อเพลิงที่ด้านแรงดันต่ำ และที่ตำแหน่งตัวเก็บประจุกรองกระแสกระเพื่อมด้านแรงดันสูง

ตารางที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันแบตเตอร์รี่กับเปอร์เซ็นต์การประจุ

เปอร์เซ็นต์การประจุ	แรงดันแบตเตอร์รี่ 12 โวลต์	แรงดันต่อเซลล์
100	12.70	2.14
90	12.50	2.12
80	12.42	2.07
70	12.32	2.05
60	12.20	2.03
50	12.06	2.01
40	11.90	1.98
30	11.75	1.96
20	11.58	1.93
10	11.31	1.89
0	10.50	1.75

ตารางที่ 12 ราคาโดยประมาณของแบตเตอร์รี่ชนิดแห้งสำหรับเครื่องสำรองไฟ (UPS) ยี่ห้อลีอ็อช
แหล่งข้อมูล :บริษัทตัวแทนจำหน่ายแบตเตอร์รี่ยี่ห้อ Leoch (เมษายน 2549)

ขนาด (Ah)	1.2	2.3	3.2	5.4	7.2	7.6	9	12	24	26	28	33
ราคา (บาท)	260	310	321	340	360	375	480	695	1,285	1,390	1,500	1,920

ในการติดตั้งที่ด้านแรงดันต่ำ สมมุติให้ระบบแปลงพลังงานขนาด 1500 วัตต์มีประสิทธิภาพเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ได้ความต้องการพลังงานด้านอินพุตเท่ากับ 1667 วัตต์ ค่ากระแสที่ด้านอินพุตของวงจรแปลงไฟตรงเท่ากับ

$$I_{in} = \frac{P_{in}}{V_{in}} = \frac{1667}{48} = 34.73 \text{ A}$$

(142)

กำหนดให้แรงดันอินพุตเท่ากับ 48 โวลต์หากใช้แบตเตอร์รี่ขนาด 12 โวลต์ 7.2Ah จะได้จำนวนก้อนที่ต่ออนุกรมและขนานเท่ากับ

$$N_s = \frac{V_{in}}{V_b} = \frac{48}{12} = 4$$

(143)

$$N_p = \frac{I_{in}}{I_b} = \frac{34.73}{7.2} = 4.8 \approx 5$$

(144)

รวมจำนวนแบตเตอร์รี่ที่ต้องใช้ทั้งหมด

$$N_t = N_s \times N_p = 4 \times 5 = 20$$

(145)

จากตารางราคาของแบตเตอร์รี่หากใช้ขนาด 7.2Ah จำนวนทั้งหมด 20 ก้อนราคารวมจะเท่ากับ 7,200 บาท

ที่ด้านแรงดันต่ำนี้จะใช้แบตเตอร์รี่ขนาด 12 โวลต์ 7.2Ah จำนวนก้อนโดยต่ออนุกรม 4 ก้อนและต่อขนานกันอีก 5 ชุด ซึ่งจะได้กำลังงานจากชุดแบตเตอร์รี่ทั้งหมด 35 Ah เพราะฉะนั้นจะสามารถสำรองไฟได้เป็นเวลาเท่ากับ

$$\text{time} = \frac{I_b}{I_{in}} = \frac{36}{34.73} = 1.036 \text{ ชั่วโมง}$$

(146)

กำหนดให้แรงดันอินพุตของระบบแปลงไฟตรงเป็นไฟสลับสลับขนาด 1500 วัตต์มีขนาดเท่ากับ 400 โวลต์ ในการการติดตั้งแบตเตอร์รี่ที่ด้านแรงดันสูงนี้จะต้องหาค่ากระแสของวงจรแปลงไฟสมมุติว่าวงจรแปลงไฟสลับไม่มีกำลังงานสูญเสียเลยจะได้กระแสเท่ากับ

$$I_{dc} = \frac{P_{out}}{V_{dc}} = \frac{1500}{400} = 3.75A$$

(147)

หากใช้แบตเตอร์รี่ขนาด 12 โวลต์ 3.2Ah จะได้จำนวนก้อนที่ต่ออนุกรมเท่ากับ

$$N_s = \frac{V_{dc}}{V_b} = \frac{400}{12} = 33.33 \approx 34$$

(148)

เนื่องจากค่ากระแสของวงจรและแบตเตอร์รี่มีค่าใกล้เคียงกันจึงใช้เพียงชุดเดียวเท่านั้น นั่นก็คือใช้แบตเตอร์รี่ขนาด 12 โวลต์ 3.2Ah ทั้งหมดจำนวน 34 ก้อนนำมาต่ออนุกรมกันซึ่งจะได้แรงดันรวมเท่ากับ 408 โวลต์ จากตารางราคาของแบตเตอร์รี่จะได้ราคาของชุดนี้จะเท่ากับ 10,914 บาท และเวลาในการสำรองไฟจะได้เท่ากับ

$$\text{time} = \frac{I_b}{I_{dc}} = \frac{3.2}{3.75} = 0.85 \text{ ชั่วโมง}$$

(149)

ตารางที่ 13 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆของการติดตั้งแบตเตอร์รี่ที่ด้านแรงดันต่ำและด้านแรงดันสูง สำหรับระบบแปลงพลังงานขนาด1.5กิโลวัตต์

	แรงดันต่ำ	แรงดันสูง
แรงดันแบตเตอร์รี่ (V)	12	12
แรงดันอินพุต (V)	48	400
กระแสอินพุตของวงจร (A)	34.73	3.75
กระแสแบตเตอร์รี่ (Ah)	36	3.2
จำนวนที่ต่อขนาน(ชุด)	5	1
จำนวนที่ต่ออนุกรม(ก้อน)	4	34
จำนวนรวม(ก้อน)	20	34
ราคา(บาท)	7,200	10,914
เวลาสำรองไฟ	1.036	0.85

จากตารางที่ 13 จะเห็นว่าการต่อที่ด้านแรงดันต่ำจะใช้จำนวนก้อนของแบตเตอร์รี่น้อยกว่าด้านแรงดันสูง ซึ่งทำให้ราคาและพื้นที่การติดตั้งต่ำกว่าด้วย รวมทั้งการนำแบตเตอร์รี่มาต่อต่ออนุกรมกันเป็นจำนวนมากเพื่อให้ได้แรงดันสูงจะส่งผลต่อเรื่องความสมดุลระหว่างเซลล์ ซึ่งส่งผลต่ออายุการใช้งานของตัวแบตเตอร์รี่เพราะเมื่อเซลล์ใดเซลล์หนึ่งเสียแล้วจำเป็นที่จะต้องทำการเปลี่ยนทั้งชุดพร้อมกัน นอกจากนั้นยังพบว่าเวลาในการสำรองไฟของการติดตั้งที่ด้านนี้ยังมี

ค่ามากกว่าด้วย ถึงแม่ว่าจะต้องเสียกำลังงานส่วนหนึ่งไปกับค่ากำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการทำงานของวงจรแปลงไฟตรงด้วยก็ตาม

อย่างไรก็ดีข้อด้อยของการติดตั้งที่ตำแหน่งแรงดันต่ำที่พบก็คือเรื่องของการรักษาระดับพลังงานเมื่อเกิดปัญหาหาการกระชาก (Transient) ในกรณีที่โหลดมีความต้องการพลังงานแบบทันที่ทันใด ซึ่งจะไม่สามารถรักษาระดับพลังงานได้ดีเท่ากับทางด้านแรงดันสูง แต่ถ้าหากเราหาวิธีป้องกันปัญหาการกระชากที่เหมาะสมและคำนึงถึงเรื่องของราคาและขนาดเป็นสำคัญแล้ว การติดตังแบตเตอร์รี่ทางด้านแรงดันต่ำจะเหมาะสมกว่ามาก

ค. ระบบจัดเก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy Storage System)

จะเห็นว่าอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานทั้งสองชนิดมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับการนำไปประยุกต์ใช้งาน เช่นระบบการแปลงพลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีระยะเวลาการประจุในช่วงกลางวันและคายประจุในเวลากลางคืน เป็นระบบพลังงานที่มีช่วงระยะเวลาการประจุและคายประจุเท่าๆ กัน ระบบจึงต้องการความสามารถจ่ายพลังงานได้จำนวนมากและมีระยะเป็นเวลานาน ดังนั้นอุปกรณ์ที่เหมาะสมก็คือแบตเตอร์รี่แต่ถ้าหากระบบพลังงานนั้นต้องการให้อุปกรณ์เก็บพลังงานมีการตอบสนองที่รวดเร็วโดยที่ใชพลังงานรวมต่อเวลาไม่มากนัก ตัวเก็บประจุความจุสูงก็จะเป็นตัวเลือกที่ควรจะนำมาพิจารณา หรือในบางกรณีอาจจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิดไปพร้อมกัน

ระบบจัดเก็บพลังงานนี้ใช้สำหรับแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง นี้เป็นระบบที่ไม่ต้องการระยะเวลาในการจ่ายกระแสที่นาน เนื่องจากเป็นการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เชื้อเพลิงเช่นไฮโดรเจน เมทานอล หรือเอทานอล เป็นต้น ซึ่งจะมีการจ่ายพลังงานออกมาจากแหล่งจ่ายอยู่ตลอดเวลา ระบบแปลงพลังงานต้องการพลังงานสำรองในขณะที่มีการจ่ายกระแสให้แก่โหลดสูงสุดเป็นเวลาสั้นๆประมาณ 20 วงรอบการทำงานเท่านั้น ซึ่งค่อนข้างต่ำมากหากเปรียบเทียบกับระบบแปลงพลังงานอื่นๆ

สมมุติให้ระบบจ่ายพลังงานสำรองสามารถจ่ายได้ถึง 3 เท่าของระยะเวลาตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิง นั่นคือให้สามารถจ่ายได้ถึง 120 วินาที นำมาหาขนาดของอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานทั้ง 2 ชนิด โดยติดตั้งที่ด้านแรงดันต่ำ สำหรับระบบแปลงพลังงานขนาด 1.5 กิโลวัตต์ที่ประสิทธิภาพเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์

จากสมการที่ (135) จะได้จำนวนตัวเก็บประจุความจุสูงที่สามารถสำรองพลังงานได้เป็นเวลา 2 วินาทีหากต้องการให้ได้ถึง 60 วินาทีจะต้องใช้ค่าความจุเท่ากับ

$$C = \frac{2\Delta tP}{\Delta V^2} = \frac{0 \times 2 \times 1.5 \times 10^3}{48^2} = 78.125F$$

จากสมการที่ (134) ใช้ตัวเก็บประจุความจุสูงขนาด 10 ฟาหรัด 2.5 โวลต์มาต่ออนุกรม จะต้องใช้ตัวเก็บประจุจำนวน 20 ตัว และค่าประจุจากการต่ออนุกรมจากสมการที่ (135) ได้เท่ากับ 0.5 ฟาหรัด นำมาหาจำนวนชุดของตัวเก็บประจุที่ต้องนำมาต่อขนานกันจากสมการที่ 5.16 จะได้เท่ากับ

$$N_p = \frac{C}{C_{series}} = \frac{78.125}{0.5} = 156.25 \approx 157$$

จะได้จำนวนตัวเก็บประจุความจุสูงทั้งหมดที่ใช้ต่อขนานและอนุกรมเพื่อรักษาระดับพลังงานทางด้านอินพุตสมการ (137) เท่ากับ

$$N_t = N_s \times N_p = 20 \times 157 = 3{,}140 \text{ ตัว}$$

หากใช้ตัวเก็บประจุความจุสูง พานาโซนิคขนาด 10 ฟาหรัด 2.5 โวลต์มีขนาด 3 ลูกบาศก์เซนติเมตร ขนาดพื้นที่ของตัวเก็บประจุความจุสูงทั้งหมดเท่ากับ

$$V = 3140 \times 3\text{cm}^3 = 9{,}420 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

จากสมการ (144) ระบบสำรองพลังงานที่เกิดจากการต่อแบตเตอร์รี่ขนาด 12 โวลต์ 7Ah มาต่ออนุกรมกัน 4 ก้อนและขนานกันอีก 5 ชุดจะสามารถจ่ายกระแสได้ 36Ah ซึ่งสามารถสำรองพลังงานงานได้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หากต้องการต้องการสำรองพลังงานเป็นเวลา 60 วินาทีเช่นเดียวกับที่ตัวเก็บประจุความจุสูงจะต้องใช้แบตเตอร์รี่ขนาดเท่ากับ

$$I_{b(60s)} = \frac{I_{b(1hr)}}{60} = \frac{36}{60} = 0.6\text{A}$$

เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายและยืดอายุในการใช้แบตเตอร์รี่ในระยะที่ปลอดภัย และจากความสามารถในการประจุที่ค่อนข้างช้า ระบบสำรองพลังงานควรออกแบบให้แบตเตอร์รี่คายประจุไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ เพราะฉะนั้นจะต้องใช้แบตเตอร์รี่ที่มีวามจุเป็น 2 เท่า นั่นคือต้องใช้ขนาดเท่ากับ 1.2Ah ซึ่งมีราคาเท่ากับ 5,200 บาทโดยประมาณ

ขนาดของแบตเตอร์รี่ที่ความจุ 1.2 Ah ทั่วไปโดยประมาณ $5.45 \times 9.7 \times 4.8$ (กว้างยาวสูง) เท่ากับ 253.75 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อก้อน รวมทั้งหมด 4 ก้อนเท่ากับ

$$4 \times 253.75 = 1{,}015 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

ตารางที่ 14 เปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างแบตเตอร์รี่กับตัวเก็บประจุความจุสูง

	แบตเตอร์รี่	ตัวเก็บประจุความจุสูง
เวลาการประจุและคายประจุ	ช้า	เร็ว
วงรอบการประจุ(ครั้ง)	1,000	1,000,000
ความสามารถคายประจุ	80%	100%
กำลังงานสูญเสีย	สูง	ต่ำ
กระแสรั่ว	สูง	ต่ำ
อุปกรณ์ควบคุมการประจุ	มี	ไม่มี
อุปกรณ์ป้องกันไฟเกิน	มี	ไม่มี
อันตรายจากการลัดวงจร	มี	ไม่มี
อุณหภูมิการทำงาน	อุณหภูมิห้อง	-40 ถึง 85 องศา
การบำรุงรักษา	มี	ไม่มี
ขนาดขนาดความจุ	สูง	ต่ำ
ขนาดของอุปกรณ์(ซม^3)	1,015	9,420
ราคา	ต่ำ	สูง

จากตารางที่ 14 เปรียบเทียบจะเห็นว่าตัวเก็บประจุสูงมีคุณสมบัติต่าง ๆที่ดีกว่าแบตเตอร์รี่อยู่มาก ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของประสิทธิภาพ ความเร็วในการประจุและคายประจุ ความปลอดภัยในการใช้งาน กำลังงานสูญเสียจากการทำงาน กระแสรั่วไหล การใช้อุปกรณ์ควบคุมการประจุ อายุการใช้งาน และการบำรุงรักษา ยกเว้นเรื่องของขนาดและราคาที่พบว่าตัวเก็บประจุความจุสูงมีราคาสูงกว่ามาก แต่ถ้าหากว่าพิจารณาจากอายุการใช้งานในระยะยาวจะพบว่าตัวเก็บประจุสูงมีวงรอบการประจุและคายประจุสูงกว่าถึง 1,000 เท่า ซึ่งหมายความว่าเราอาจจะต้องเปลี่ยนแบตเตอร์รี่ถึง 1,000 ครั้งต่อตัวเก็บประจุความจุสูงครั้งเดียว ราคาของระบบการจัดเก็บพลังงานโดยใช้ตัวเก็บประจุความจุสูงจึงสูงกว่าเพียง 3 เท่าเท่านั้น

ระบบแปลงพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุสูงเป็นอุปกรณ์จัดเก็บพลังงาน สามารถลดขนาดของตัวเก็บประจุความจุสูงด้วยการลดแรงดันอินพุตของวงจรแปลงไฟตรงเพื่อให้จำนวนที่ต่ออนุกรมลดลง แต่ไปเพิ่มอัตราส่วนของหม้อแปลงขึ้น และออกแบบให้แรงดันไฟตรงทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงไฟตรงใกล้เคียงกับแรงดันไฟสลับของวงจรแปลงไฟสลับ (220 โวลต์) ก็จะสามารถลดขนาดและต้นทุนของการใช้ตัวเก็บประจุความจุสูงได้ถึงหนึ่งเท่าตัว

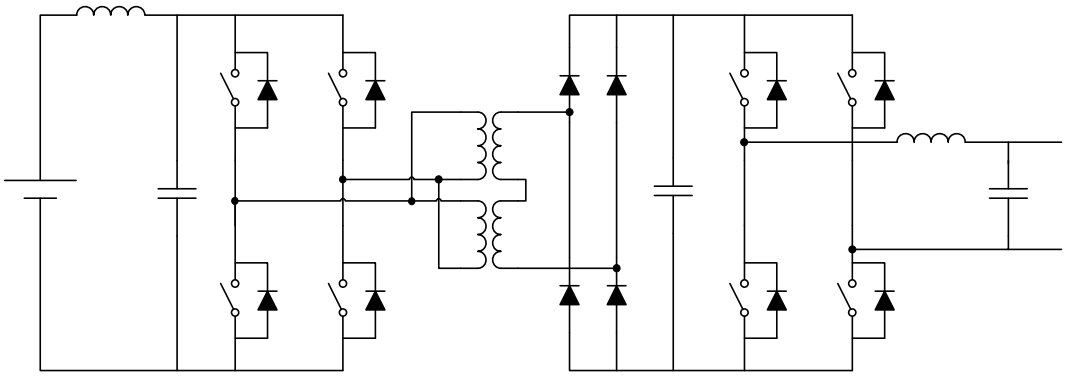
3.2 วงจรจัดการพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ

จากผลการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังและระบบสำรองพลังงานที่เหมาะสมกับการนำมาใช้จัดการพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิง โครงร่างของวงจรจัดการพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดดังรูปที่ 91

ในส่วนของวงจรแปลงไฟกระแสตรงให้สูงขึ้นนั้นประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ 1) วงจรเต็มคลื่น 2) หม้อแปลงขึ้นความถี่สูง และ 3) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น วงจรเต็มคลื่นซึ่งประกอบด้วยสวิตช์ S_{L1} ถึง S_{L4} และไดโอด D_{L1} ถึง D_{L4} วงจรเต็มคลื่นทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันกระแสตรง V_{FC} ที่มีค่าต่ำๆ (ประมาณ 12-24 โวลท์) ที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงให้เป็นแรงดันกระแสสลับ (รูปคลื่นสี่เหลี่ยม) ขนาดเท่ากับ $\pm V_{FC}$ ที่ความถี่ประมาณ 20 กิโลเฮิรตซ์ ใช้หม้อแปลงขึ้นความถี่สูงแปลงแรงดันกระแสสลับให้มีขนาดสูงขึ้นประมาณ ±350 ถึง ±400 โวลท์ จากนั้นอาศัยวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นแปลงแรงดันกระแสสลับดังกล่าวให้เป็นแรงดันสูงกระแสตรงซึ่งมีค่าประมาณ +350 ถึง +400 โวลท์และกรองให้เรียบด้วยตัวเก็บประจุ C_H สาเหตุที่ต้องใช้หม้อแปลงขึ้นความถี่สูงสองวงจรเนื่องจากสัดส่วนของแรงดันด้านทุติยภูมิต่อแรงดันด้านปฐมภูมิมีค่าค่อนข้างสูงส่งผลให้อัตราส่วนรอบของหม้อแปลงที่ต้องการนั้นมีค่าสูงตามไปหากใช้หม้อแปลงตัวเดียวในวงจรจะทำให้มีขนาดใหญ่และมีราคาค่อนข้างแพง อีกทั้งการจัดวางตำแหน่งของฮาร์ดแวร์จะทำได้ยากด้วย ในงานวิจัยนี้จึงเสนอให้ใช้สองหม้อแปลงที่มีขนาดเล็กลง อย่างไรก็ตามจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาในเรื่องของความสูญเสียทางไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นได้ต่อไป

ส่วนของวงจรการแปลงแรงดันสูงกระแสตรงให้เป็นแรงดันสูงกระแสสลับนั้น อาศัยวงจร 2 ส่วนด้วยกันคือ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter) วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่นทำหน้าที่ในการสวิตช์แรงดันสูงกระแสตรงประมาณ +350 ถึง +400 โวลท์ให้เป็นแรงดันกระแสสลับที่มีค่าอาร์เอ็มเอสประมาณ 220 โวลท์และมีความถี่มูลฐานอยู่ที่ 50 เฮิรตซ์ โดยอาศัยเทคนิคที่เรียกว่า การมอดูเลชั่นความกว้างพัลส์ที่ความถี่สวิตชิ่งประมาณ 20 กิโลเฮิรตซ์ แรงดันผลลัพธ์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่สูง (ประมาณ 20 กิโลเฮิรตซ์) ซึ่งประกอบด้วยคลื่นแรงดันรูปซายน์ที่มีความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 เฮิรตซ์และคลื่นแรงดันรูปซายน์ที่มีความถี่อื่นๆ โดยทั่วไปจะมีค่าสูงกว่าความถี่มูลฐานและเป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน ซึ่งเรียกว่า ความถี่ฮาร์โมนิก องค์ประกอบฮาร์โมนิกเหล่านี้สามารถกำจัดออกได้โดยอาศัยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุ C_{LF} และตัวเหนี่ยวนำ L_{LF} อุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งสองตัวนี้ทำหน้าเป็นวงจรกรององค์ประกอบที่มีความถี่สูงไม่ให้ผ่านออกไป โดยทั่วไปแล้วจะออกแบบให้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านนี้ให้มีความถี่คัดออฟ (Cutoff Frequency) ให้มีค่าสูงกว่าความถี่มูลฐานประมาณ 5 ถึง 10 เท่า หลังจากกรอง

ความถี่สูงออกแล้วแรงดันผลลัพธ์ V_O จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นซายน์ที่มีความถี่ 50 เฮิรตซ์ขนาด 220 โวลท์อาร์เอ็มเอส ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป



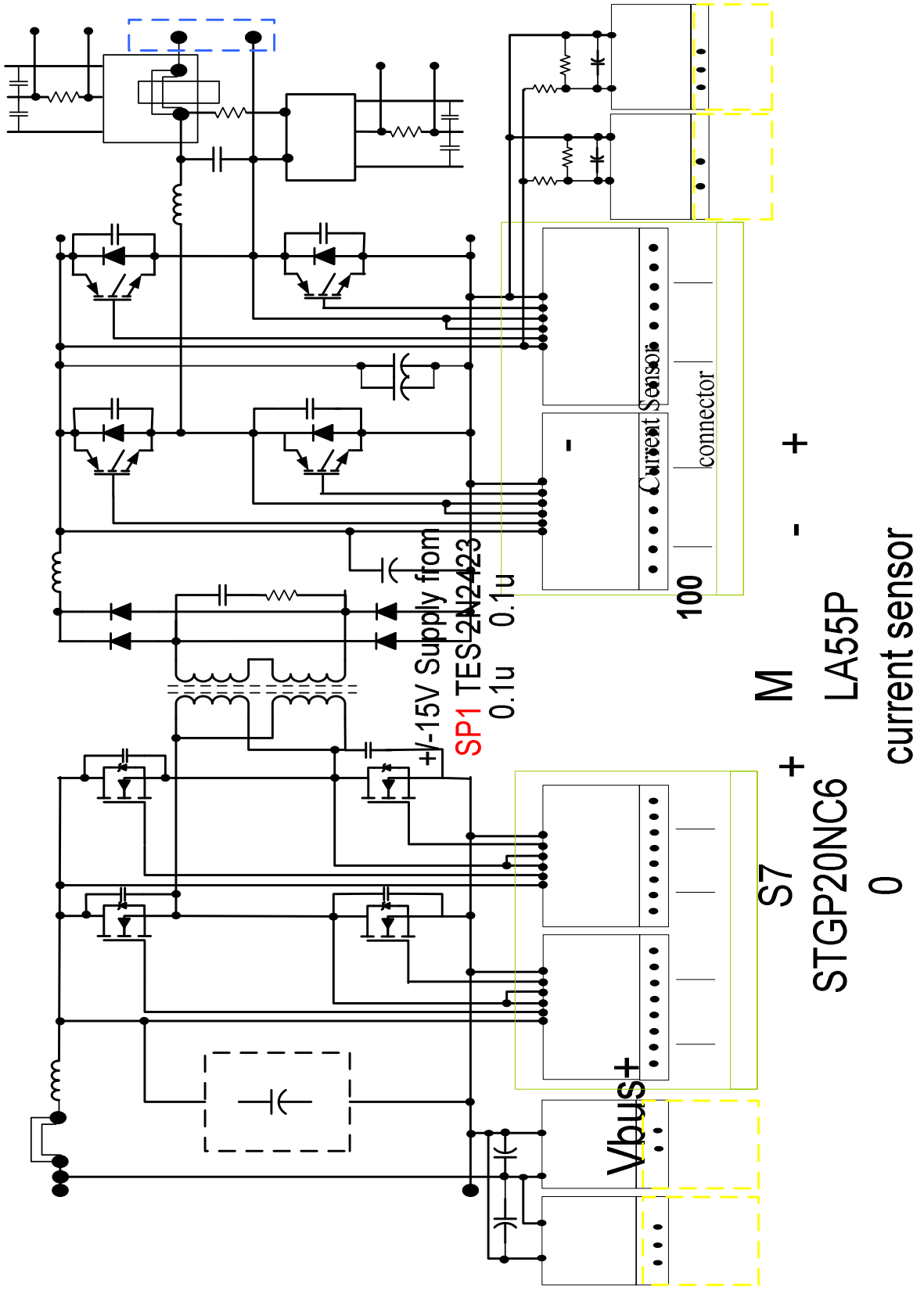
รูปที่ 91 โครงร่างของวงจรจัดการพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

ในส่วนสุดท้ายของวงจรจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ คือ ส่วนสำรองพลังงานไฟฟ้าที่สามารถนำมาใช้งานแทนในบางขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ทันตามที่ภาระทางไฟฟ้าต้องการ ในงานวิจัยนี้เสนอการเก็บพลังงานไฟฟ้าชั่วคราวด้วยตัวเก็บประจุความจุสูง ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีแนวโน้มที่จะเข้ามาแทนที่อุปกรณ์เก็บพลังงานชั่วคราวชนิดอื่นๆ ในไม่ช้า เนื่องจากมีการทำวิจัยและพัฒนาทั้งทางด้านคุณสมบัติให้ดีขึ้นและราคาที่ต่ำลงเรื่อย อย่างไรก็ตามในปัจจุบันตัวเก็บประจุความจุสูงยังถือว่าเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับอุปกรณ์อื่น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจำเป็นที่ต้องทำการปรับลดแรงดันจากเซลล์เชื้อเพลิงให้ต่ำลง เพื่อที่จะสามารถนำเอาตัวเก็บประจุความจุสูงมาประยุกต์ใช้ได้ กระแสของเซลล์เชื้อเพลิงที่นำออกมาใช้นั้นจะทำให้มีกระแสกระเพื่อมลดลงโดยตัวเหนี่ยวนำ L_L

3.3 ระบบต้นแบบ

3.3.1 การออกแบบระบบการแปลงพลังงาน

ในการออกแบบวงจรต่างๆของระบบแปลงพลังงานได้เอาเลือกรูปแบบวงจรและอุปกรณ์ที่มีความเหมาะสมที่สุดจากข้อมูลที่ได้ศึกษามาในเบื้องต้นมาใช้โดยแยกการออกแบบวงจรทีละส่วนเริ่มจากระบบการจัดเก็บพลังงานที่เชื่อมต่อกับไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านอินพุทไปจนถึงวงจรกรองความถี่ทางด้านเอาท์พุทที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับจ่ายออกไปให้แก่โหลด วงจรโดยรวมของระบบต้นแบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 92



รูปที่ 92 วงจรรวมของระบบแปลงพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง

ก. ระบบการจัดเก็บพลังงาน

หาขนาดของตัวเก็บประจุสูงที่ต้องใช้ในการจ่ายพลังงานให้แก่ระบบเมื่อแรงดันอินพุทลดลงเหลือ 12 โวลต์เป็นเวลา 1 มิลลิวินาทีจะได้ค่าของตัวเก็บประจุเท่ากับ

$$C_s = \frac{2\Delta tP}{\Delta V^2} = \frac{2\times 1\times 10^{-3}\times 1.5\times 10^{3}}{12^2} = 0.0208 \text{ ฟาหรัด}$$

(150)

นำตัวเก็บประจุความจุสูงขนาดแรงดัน 2.7 โวลต์ค่าความจุ 400 ฟาหรัดมาอนุกรมกันจำนวน 10 ตัวจะได้ค่าแรงดันเท่ากับ 27 โวลต์และค่าของตัวเก็บประจุอนุกรมดังนี้

$$C_s = \frac{C_s}{N_s} = \frac{400}{10} = 40 \text{ ฟาหรัด}$$

(151)

ความต้านทานภายในของตัวเก็บประจุความจุสูงแต่ละตัวมีค่าเท่ากับ 4.2 มิลลิโอห์มจะได้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุอนุกรมเท่ากับ

$$Vr_c = N_{cs} r_c \Delta I = 10\times 0.0042\times 69.46 = 2.9 \text{ โวลต์}$$

(152)

ค่าแรงดันที่ระบบจัดเก็บพลังงานสามารถจ่ายให้กับวงจรแปลงและควบคุมไฟตรงเมื่อไม่มีแรงดันจากเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ

$$V = (V_c \times N_{cs}) - Vr_c = (2.7\times 10)\times 2.9 = 24.1 \text{ โวลต์}$$

(153)

ขนาดพื้นที่ของตัวเก็บประจุความจุสูงทั้งหมดเท่ากับ

$$A_{ct} = 10\times 66 = 660 \quad \text{ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

(154)

รูปที่ 93 แสดงวงจรของตัวเก็บประจุความจุสูงที่ใช้ในวงจรที่นำเสนอ

รูปที่ 93 ตัวเก็บประจุความจุสูงขนาดความจุ 400 ฟาหรัดแรงดัน 2.7 โวลต์

ข. วงจรแปลงและควบคุมไฟตรง

จากข้อดีในด้านความซับซ้อนในการออกแบบวงจรและการออกแบบส่วนควบคุมการทำงานของสวิตช์ สำหรับระบบแปลงพลังงานในงานวิจัยนี้เลือกใช้วงจรแปลงและควบคุมไฟตรงเป็นแบบเต็มคลื่น เริ่มต้นโดยการหาค่ากระแสอินพุทของวงจรได้เท่ากับ

$$I_{pft} = 1.235\frac{P_o}{V_{fc}} = 1.235\frac{1500}{24} = 77.19 \text{ แอมแปร์}$$

(155)

ในแต่ละคาบเวลาที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงจะเกิดกระแสไหลผ่าน 2 ครั้ง เมื่อกำหนดให้สวิตช์แต่ละตัวสามารถนำกระแสได้เต็มกำลังที่อัตราส่วนการทำงานเท่ากับ 1 จะได้ค่ากระแสอินพุทเฉลี่ยมีค่าเท่ากับกระแสอินพุทดังนี้

$$I_{rms} = I_{pft}\sqrt{D} = I_{pft} = 77.19 \text{ แอมแปร์}$$

(156)

เลือกใช้มอสเฟทเบอร์ STP120NF10 ซึ่งมีค่าความต้านทานภายในเท่ากับ 0.9 มิลลิโอห์มจะได้ค่าแรงดันตกคร่อมมอสเฟทขณะทำงานดังนี้

$$V_{ds(on)} = I_{pft}R_{on} = 77.19 \times 9 \times 10^{-3} = 0.69 \text{ โวลต์}$$

(157)

วงจรแบบเต็มคลื่นประกอบด้วยสวิตช์จำนวน 4 ตัว นำค่าพารามิเตอร์จากตารางคุณสมบัติของมอสเฟทมาหาค่ากำลังงานสูญเสียจากการทำงานกรณีที่วงจรแปลงพลังงานทำงานเต็มกำลังที่อัตราส่วนดิวตี้เท่ากับหนึ่งได้ดังนี้

$$P_t = 2I_{pft}V_{in}\left(\frac{T_r + T_f}{T}\right) + \left(I_{pft}\right)^2 R_{on}\frac{T_{on}}{T}$$

$$Pt = 4\left\{2\times 77.19\times 24\left(\frac{90n + 68n}{50u}\right) + 0.5\times\left(77.19\right)^2\times 0.009\right\}$$

$$Pt = 4\{11.7 + 26.8\} = 154 \qquad \text{วัตต์}$$

(158)

ค. หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในหัวข้อหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงมาจัดสร้างหม้อแปลงจำนวน 2 ตัวสำหรับประกอบกับวงจรแปลงและควบคุมไฟตรง โดยในการต่อหม้อแปลงทั้งสองจะอยู่ในลักษณะขนานกันที่ขดอินพุทและต่ออนุกรมที่ขดทุติยภูมิ ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการลดขนาดของแกนและเพิ่มขนาดเส้นลวดของขดทุติยภูมิ ลักษณะนี้จะทำให้สามารถลดกำลังงานสูญเสียและอุณหภูมิจากการทำงานลงได้ จากการทดลองประกอบหม้อแปลงพบปัญหาในการพันขดลาดที่ไม่สามารถใช้เบอร์ลวดตามขนาดที่ต้องการได้เนื่องจากข้อจำกัดในการประกอบหม้อแปลงของบริษัทภายในประเทศ จึงได้ปรับเปลี่ยนขนาดและตราส่วนของขดลวดใหม่โดยใช้ลวดเบอร์ 27 พันเกลียว 12 เส้น พันรอบแกนจำนวน 6 รอบทางด้านปฐมภูมิและพันเกลียว 6 เส้นพันรอบแกน 105 รอบทางด้านทุติยภูมิส่งผลให้ได้ค่าพารามิเตอร์ใหม่ดังนี้

1. อัตราส่วน 1:17.5

2. ปฐมภูมิเทียบเท่าเบอร์ AWG16 ค่าความต้านทานภายในเท่ากับ 140.63 ไมโครโอห์ม/ตารางเซนติเมตร

3. ทุติยภูมิเทียบเท่าเบอร์ AWG19 ค่าความต้านทานภายในเท่ากับ 281.26 ไมโครโอห์มต่อตารางเซนติเมตร

จะได้ค่าความต้านทานขดลวดปฐมภูมิ เท่ากับ

$$R_p = MLT\left(N_p\right)\left(\frac{\mu\Omega}{cm}\right)\times 10^{-6}$$

$$R_p = 9.43(6)(140.63)\times 10^{-6} = 7.96\times 10^{-3} \text{ โอห์ม}$$

(159)

หากำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากขดลวดด้านปฐมภูมิเท่ากับ

$$R_p = I_{p(rms)}{}^2 R_p = (37.53)^2 (7.96\times 10^{-3}) = 11.2 \text{ วัตต์}$$

(160)

หาค่าความต้านทานขดลวดทุติยภูมิได้เท่ากับ

$$R_s = MLT(N_s)\left(\frac{\mu\Omega}{cm}\right)\times 10^{-6}$$

$$R_s = 9.34(105)(281.26)\times 10^{-6} = 278.496 \text{ มิลลิโอห์ม}$$

(161)

จะได้กำลังงานสูญเสียจากขดลวดทุติยภูมิจากสมการ

$$P_s = (I_o)^2 R_s = (4.17)^2 (175.11\times 10^{-3}) = 4.84 \text{ วัตต์}$$

(162)

กำลังงานสูญเสียขดลวดรวมที่เกิดจากจากขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิเท่ากับ

$$P_{cu} = P_p + P_s = 11.2 + 4.84 = 16.05 \text{ วัตต์}$$

(163)

จะได้ Regulation ของหม้อแปลงเท่ากับ

$$\alpha = \frac{P_{cu}}{P_{to}}\times 100 = \frac{16.05}{838.5}\times 100 = 1.9 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

(164)

หาความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (AC flux density) จากสมการ

$$B_{ac} = \frac{V_p \times 10^4}{K_f f A_c N_p} = \frac{21.72 \times 10^4}{(4)(2000)(2.09)(6)} = 0.2164 \text{ เทสลาร์}$$

(165)

คำนวณหาจำนวนกำลังงานต่อน้ำหนักได้ดังนี้

$$WK = 3.18 \times 10^{-4} (f)^{1.51} (B_{ac})^{2.747}$$

$$WK = 3.18 \times 10^{-4} (20000)^{1.51} (0.216467)^{2.747}$$

$$WK = 14.8 \text{ มิลลิวัตต์/กรัม}$$

(166)

ดังนั้นกำลังงานสูญเสียจากแกนมีค่าเท่ากับ

$$P_{fe} = \left(\frac{milliwatts}{gram} \right) Wt_{fe} \times 10^{-3}$$

$$P_{fe} = (14.8)(94) \times 10^{-3} = 1.486 \text{ วัตต์}$$

(167)

จะได้กำลังงานสูญเสียรวมของหม้อแปลงเท่ากับ

$$P_\Sigma = P_{fe} + P_{cu} = 1.486 + 16.05 = 17.53 \quad \text{วัตต์}$$

(168)

ค่าความหนาแน่นกำลังงาน (Watt Density) มีค่าเท่ากับ

$$\lambda = \frac{P_\Sigma}{A_t} = \frac{17.53}{107.16} = 0.1636 \text{ วัตต์/ตารางเซนติเมตร}$$

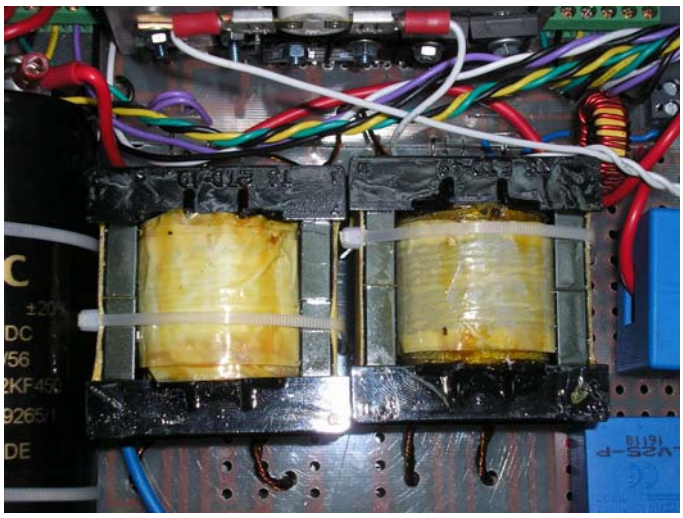
(169)

คำนวณหาค่าอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ

$$T_r = 450(\lambda)^{0.826} = 450(0.1636)^{0.826} = 100.9 \text{ องศาเซลเซียส}$$

(170)

จะเห็นว่าจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงโดยการเปลี่ยนขนาดของขดลวด ส่งผลให้ค่ากำลังงานสูญเสียของขดลวดเพิ่มสูงขึ้นและการลดจำนวนขดปฐมภูมิจะส่งผลให้ค่ากำลังงานสูญเสียจากแกนสูงขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากค่าสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น ค่ากำลังงานสูญเสียที่สูงขึ้นนี้จะแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิการทำงานของหม้อแปลง ในการปรับลดค่ากำลังงานสูญเสียและอุณหภูมิการทำงานที่เพิ่มขึ้นหม้อแปลงในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนขนาดแกนให้โตขึ้นหรือปรับเปลี่ยนวิธีการพันขดลวดให้สามารถเพิ่มขนาดความโตของเส้นลวดให้ได้ตรงตามข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ หม้อแปลงที่ได้สร้างขึ้นจากผลการคำนวณแสดงในรูปที่ 94



รูปที่ 94 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจากแกน ETD44949

ง. วงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแสชนิดเต็มคลื่นแบบบริดจ์ประกอบด้วยไดโอดจำนวน 4 ตัว ตัวเหนี่ยวนำกรองกระแสและตัวเก็บประจุกรองแรงดันกระเพื่อมอย่างละ 1 ตัว หาค่ากระแสในส่วนที่ไหลผ่านวงจรเรียงกระแสได้ดังนี้

$$I_{out} = \frac{P_{out}}{V_{out}} = \frac{1500}{220} = 6.8 \text{ แอมแปร์}$$

(171)

$$I_{dc} = \frac{I_{out}}{0.9} = \frac{6.8}{0.9} = 7.57 \text{ แอมแปร์}$$

(172)

ในที่นี้กำหนดให้ กระแสกระเพื่อมและแรงดันกระเพื่อมมีค่าไม่เกิน 15 และ 5 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ค่ากระแสและแรงดันกระเพื่อมดังนี้

$$\Delta I = I_{dc} \times 15\% = 7.57 \times 15\% = 1.1355 \text{ แอมแปร์}$$

(173)

$$\Delta V = V_{dc} \times 5\% = 400 \times 5\% = 20 \text{ โวลต์}$$

(174)

กำหนดให้อัตราส่วนรอบทำงานสูงสุดของสวิตซ์เท่ากับ 0.9 และความถี่ในการทำงานของวงจรเท่ากับ 20 กิโลเฮิรตซ์ จะได้เวลาในการนำกระแส (Ton) และหยุดนำกระแส (Ton) ดังนี้

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{20 \times 10^3} = 50 \quad \text{ไมโครวินาที}$$

$$T_{on} = 0.9T = 45 \quad \text{ไมโครวินาที}$$

$$T_{off} = T - T_{off} = 5 \quad \text{ไมโครวินาที}$$

$$dt = \frac{T_{on}}{2} = \frac{45}{2} = 22.5 \quad \text{ไมโครวินาที}$$

(175)

หาขนาดตัวเหนี่ยวนำได้ดังสมการ

$$L = (V_{dc} + \Delta V)\frac{dt}{dI} = (400 + 20)\frac{22.5 \times 10^{-6}}{1.1355} = 8.33 \text{ มิลลิเฮนรี่}$$

(176)

หาขนาดของตัวเก็บประจุได้จากสมการ

$$\Delta V_c = \frac{Ic_1}{\omega C}$$

(177)

จะได้

$$C = \frac{Ic_1}{\omega \Delta V_c} = \frac{3.1}{2\pi \times 50 \times 20} = 493.2 \approx 500 \text{ ไมโครฟารัด}$$

(178)

หาค่าแรงดันสูงสุดของตัวเก็บประจุ

$$V_c = V_{dc} + \Delta V_d = 400 + 10 = 410 \approx 450 \text{ โวลต์}$$

(179)

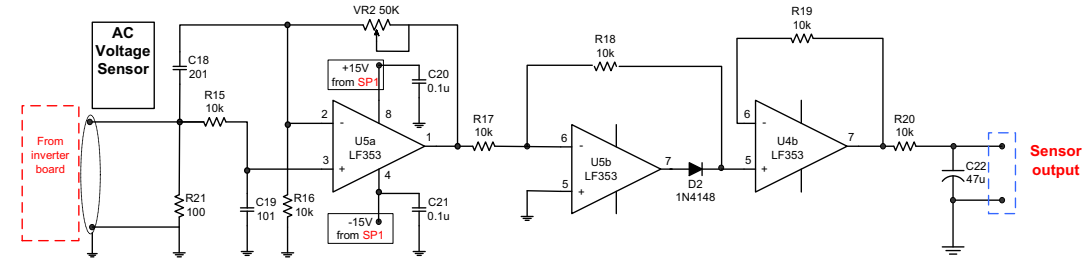
จะได้ตัวเหนี่ยวนำขนาด 8.33 มิลลิเฮนรี่ที่สามารถทนกระแสได้ประมาณ 7.5 แอมแปร์ และตัวเก็บประจุขนาด 500 ไมโครฟาหรัด ที่สามารถทนแรงดัน 450 โวลต์ตามลำดับ

จ. *วงจรตัวรับรู้กระแสและแรงดันและวงจรป้องกัน*

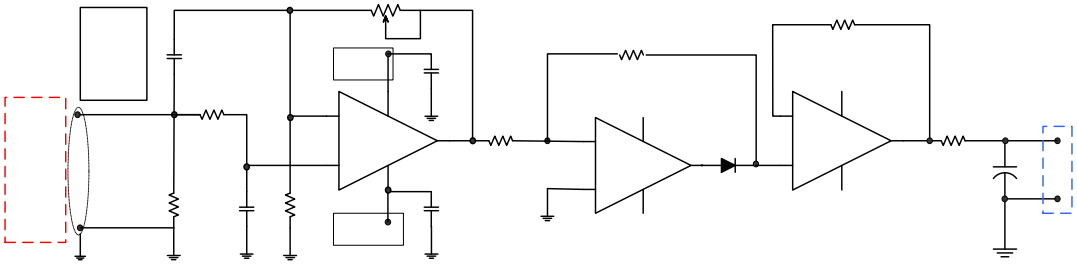
สำหรับการป้อนกลับกระแสและแรงดันกระแสสลับนั้นจะใช้วงจรที่ออกแบบดังแสดงในรูปที่ 95(ก) และ (ข) ซึ่งวงจรทั้งมีลักษณะเช่นเดียวกันโดยประกอบด้วย วงจรปรับปรุงสัญญาณ วงจรขยายสัญญาณ และวงจรตามแรงดัน รูปที่ 95(ค) แสดงภาพของวงจรตัวรับรู้กระแสและแรงดันกระแสสลับที่ได้ทำการจัดสร้างขึ้น

สำหรับการวัดแรงดันกระแสตรงของ DC link นั้นจะใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 96(ก) ซึ่งประกอบด้วยวงจรขยายเครื่องมือวัด และวงจรขยายแบบแยกกราวน์ ภาพของวงจรที่เสร็จสมบูรณ์แล้วแสดงดังรูปที่ 96(ข)

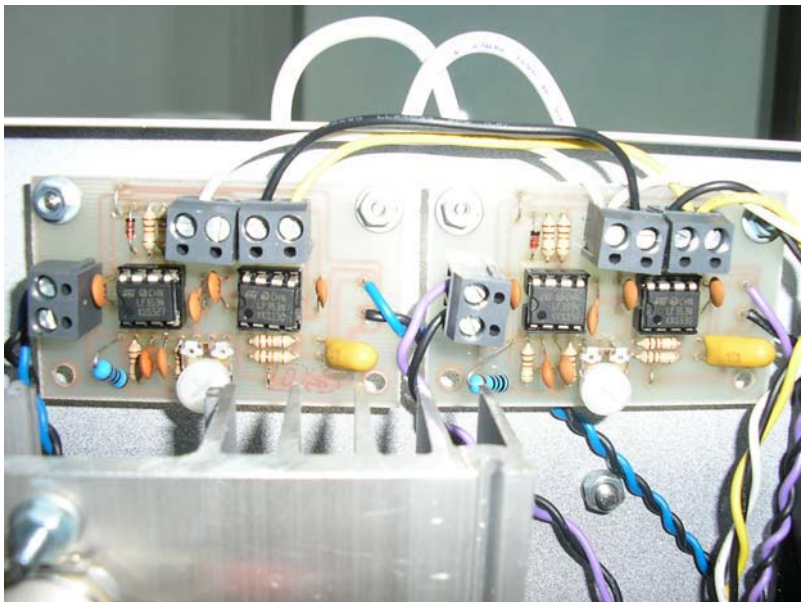
ในส่วนของวงจรป้อนกันที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะเป็นการป้องกันอุณหภูมิสูงเกินของอุปกรณ์สวิตชิ่ง โดยจะมีสวิตช์ที่ใช้ตรวจจับอุณหภูมิของแผ่นระบายความร้อนที่ติดกับตัวอุปกรณ์สวิตชิ่ง ซึ่งหากเมื่อใดก็ตามอุณหภูมิที่จุดดังกล่าวมีค่าสูงเกิน 90 อาศา สวิตช์จะปิดวงจรระบบควบคุมจะทำการหยุดส่งสัญญาณควบคุมการปิด/เปิดอุปกรณ์สวิตชิ่งทันที รายละเอียดของวงจรที่ออกแบบและวงจรที่เสร็จสมบูรณ์สำหรับการป้องกันอุณหภูมิเกินแสดงดังรูปที่ 97(ก) และ (ค) ตามลำดับ สำหรับตัวสวิตช์ที่ใช้ตรวจจับอุณหภูมิเกินแสดงดังรูปที่ 97(ข)



(ก)

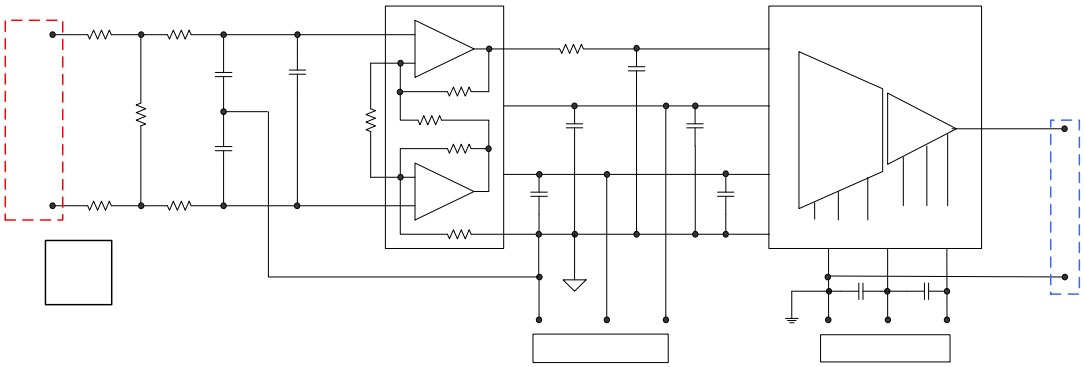


(ข)

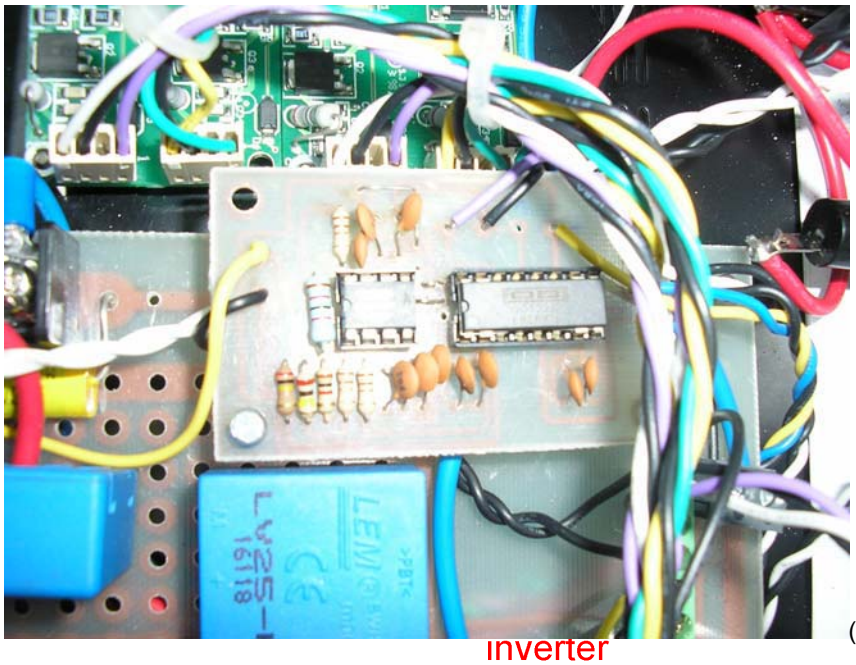


(ค)

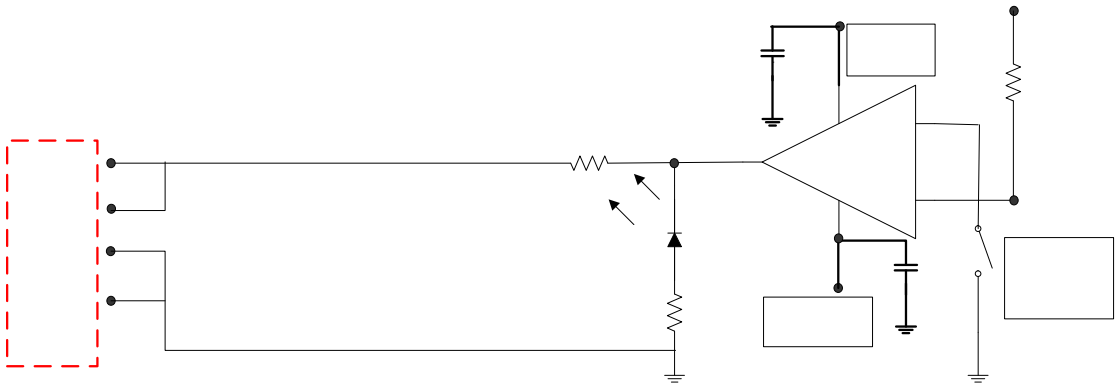
รูปที่ 95 (ก) วงจรตรวจจับกระแส (ข) วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า และ (ค) แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรตรวจจับกระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



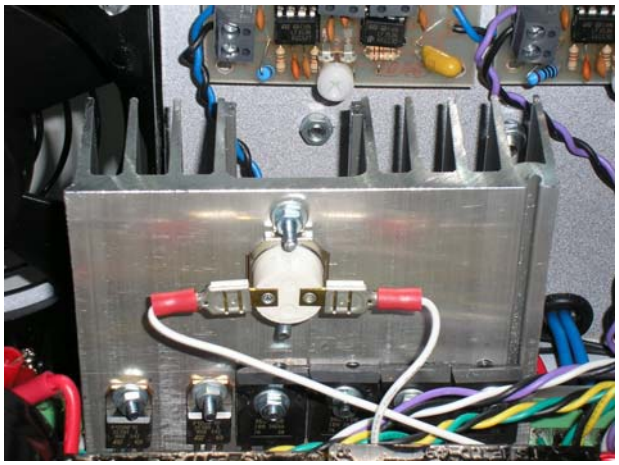
(ก)



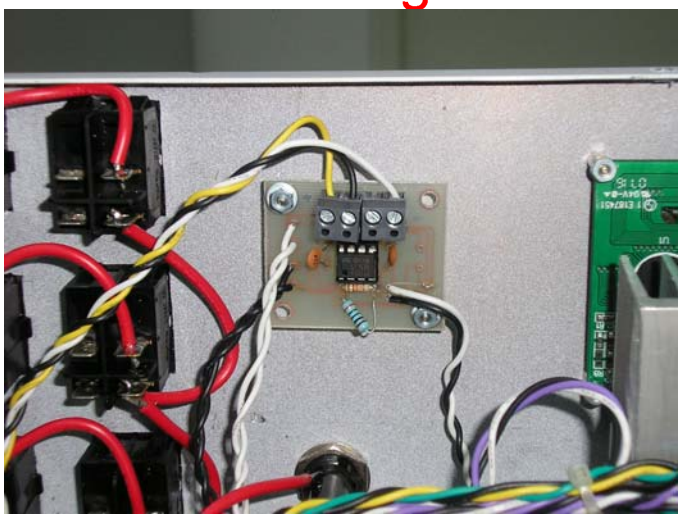
รูปที่ 96 (ก) วงจรตรวจจับแรงดันและ (ข) แผ่นวงจรพิมพ์วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Dc-link)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 97 (ก) วงจรตรวจจับอุณหภูมิแผ่นระบายความร้อน (ข) สวิตช์ความร้อน 90 องศาและ (ค) แผ่นวงจรพิมพ์วงจรตรวจจับความร้อน

หลังจากทำการออกแบบวงจรในส่วนต่าง ๆตามที่ได้นำเสนอข้างต้น วงจรย่อยต่าง ๆได้นำมาประกอบเป็นวงจรต้นแบบดังแสดงในรูปที่ 98 ส่วนลักษณะภายนอกของระบบแสดงในรูปที่ 99

รูปที่ 98 ระบบการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อประกอบลงกล่องแล้ว

(ก)

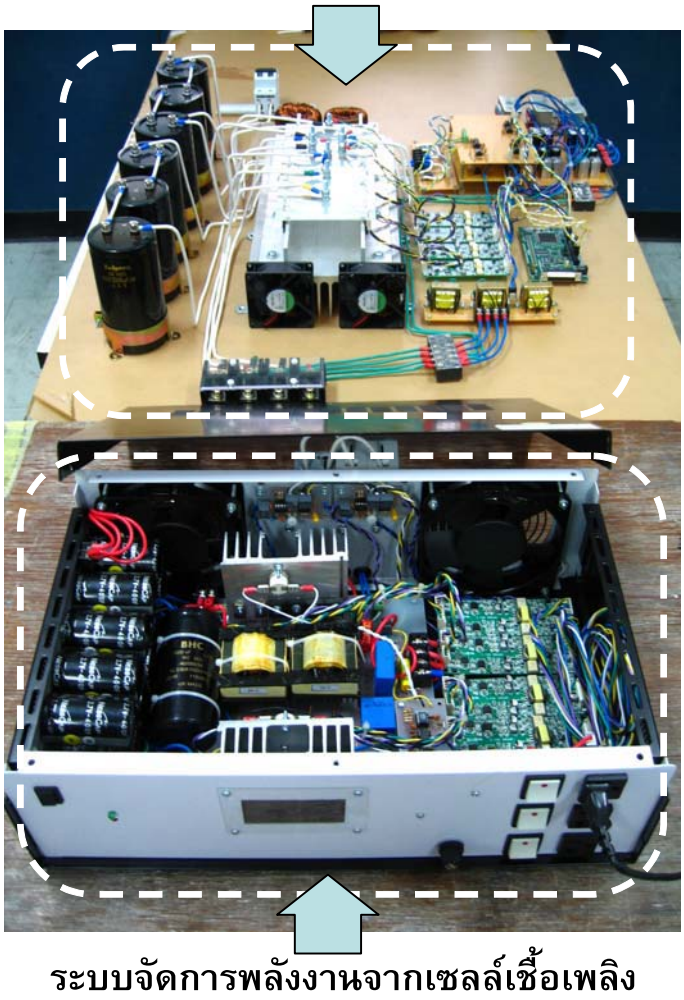
(ข)

รูปที่ 99 (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลังของระบบแปลงพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง

4 ระบบต้นแบบและผลการทดลอง

4.1 ระบบต้นแบบ

เพื่อยืนยันความถูกต้องและสมรรถนะของเทคนิคและวิธีการใหม่ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ระบบต้นแบบของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงและระบบต้นแบบของการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ได้ถูกจัดสร้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 100 ดังที่ได้กล่าวไว้ในรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2 และ 3 งานวิจัยนี้จะเน้นไปที่การทดลองความถูกต้องและสมรรถนะของระบบต้นแบบของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง



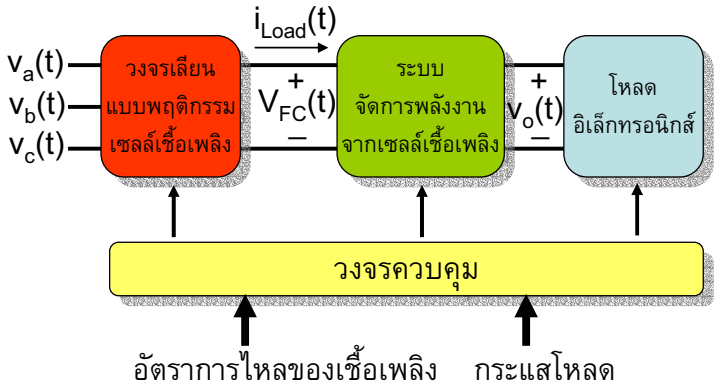
รูปที่ 100 ระบบต้นแบบของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงและระบบต้นแบบของการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง

4.2 วิธีการทดลองและผลการทดลอง

ในการทดลองระบบต้นแบบวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่จัดสร้างขึ้นนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 กรณีด้วยกัน คือ กรณีที่ 1 เป็นการทดลองการทำงานของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิงต่างๆกัน คือที่ 25% 50% 75% และ 100% ส่วนกรณีที่ 2 เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันการทำงานของระบบควบคุมที่ออกแบบต่อการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของภาวะโหลดจาก 0% และ 100% และในทางกลับกัน

4.2.1 กรณีที่ 1

รูปที่ 101 แสดงระบบที่ใช้ในการทดลอง ตัวแปรอินพุตของการทดลองคือ 1) อัตราการไหลของเซลล์เชื้อเพลิง 2) กระแสโหลด กล่าวคืออัตราการไหลของเชื้อเพลิงจะปรับเปลี่ยนให้มีค่าต่างกัน 4 ค่าคือ 25% 50% 75% และ 100% ซึ่งในแต่ละระดับของอัตราการไหลของเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งๆนั้น ค่าของกระแสโหลดจะถูกปรับเปลี่ยนจาก 0% (ไม่มีโหลด) ไปจนค่าที่ทำให้แรงดันขาออกของวงจรมีค่าเป็นศูนย์ตามพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงในรูปที่ 62

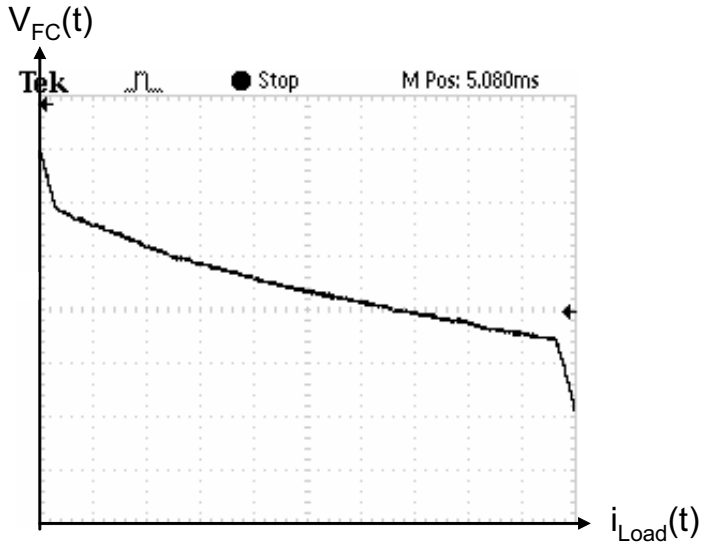


รูปที่ 101 ระบบที่ใช้ในการทดลองกรณีที่ 1

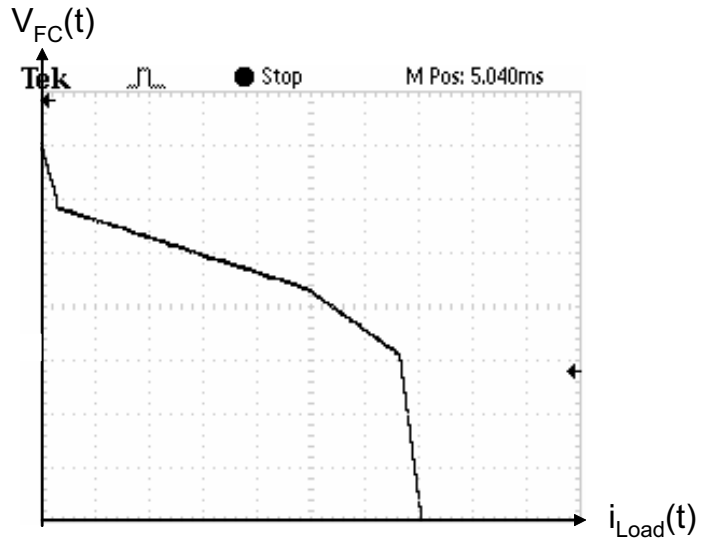
ผลการทดลองสำหรับกรณีอัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่ 100% 75% 50% และ 25% แสดงดังรูปที่ 102 ถึงรูปที่ 105 ตามลำดับ การตั้งค่าออสซิลโลสโคป (เครื่องมือวัด) เป็นดังนี้คือ โหมด XY โดยที่แกน X คือกระแสโหลด $i_{Load}(t)$ และแกน Y คือแรงดัน $V_{FC}(t)$ ความละเอียดของแกน Y คือ 10V/DIV และแกน X คือ 5A/DIV

จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าแรงดันขาออก $V_{FC}(t)$ ของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอนั้นมีความสัมพันธ์กับกระแสโหลดใกล้เคียงกับพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงจริง (ดังรูปที่ 62) อย่างไรก็ตามผลการทดลองยังแสดงให้เห็นด้วยว่าในบางช่วงของความสัมพันธ์ของกระแสโหลดและแรงดัน $V_{FC}(t)$ นั้นยังมีความคลาดเคลื่อน ยกตัวอย่างเช่น ผลการทดลองในรูปที่ 102 ซึ่งเป็นแรงดันขาออกที่ค่ากระแสโหลดต่างๆกัน โดยมีระดับอัตราการ

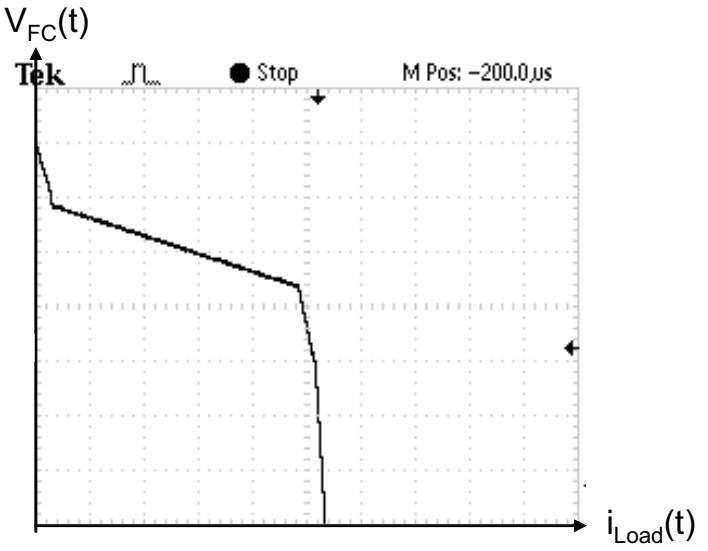
ไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงของ Ohmic Polarization ซึ่งแรงดัน $V_{FC}(t)$ และกระแสโหลดควรมีความสัมพันธ์กับกระแสโหลดเป็นเชิงเส้น แต่จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ยังไม่เป็นเชิงเส้น อันเนื่องมาจากค่าความต้านทานขาออกของระบบและแบนวิดของวงจรควบคุมที่ออกแบบไม่สามารถตอบสนองได้อย่างสมบูรณ์



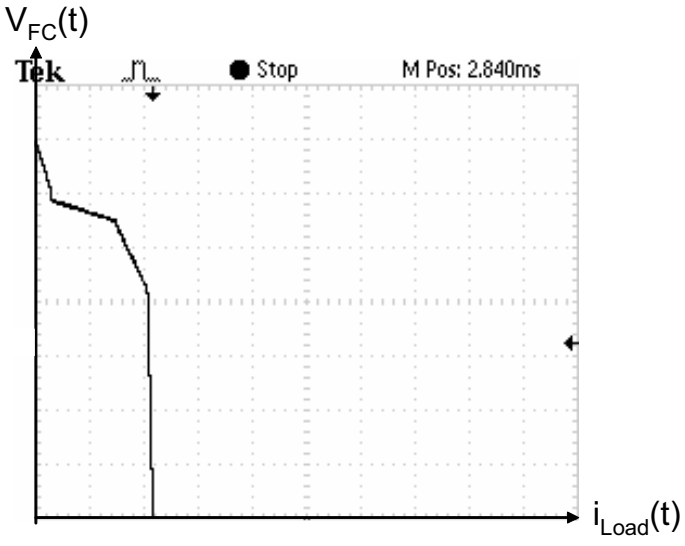
รูปที่ 102 ผลการทดลอง แรงดันขาออกของวงจรที่ค่ากระแสโหลดต่างๆกัน กรณีอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ (การตั้งค่าออสซิลโลสโคป: Mode: XY, $V_{FC}(t)$: 10V/DIV, $i_{Load}(t)$: 5A/DIV)



รูปที่ 103 ผลการทดลอง แรงดันขาออกของวงจรที่ค่ากระแสโหลดต่างๆกัน กรณีอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 75 เปอร์เซ็นต์ (การตั้งค่าออสซิลโลสโคป: Mode: XY, $V_{FC}(t)$: 10V/DIV, $i_{Load}(t)$: 5A/DIV)



รูปที่ 104 ผลการทดลอง แรงดันขาออกของวงจรที่ค่ากระแสโหลดต่างๆกัน กรณีอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ (การตั้งค่าออสซิลโลสโคป: Mode: XY, $V_{FC}(t)$: 10V/DIV, $i_{Load}(t)$: 5A/DIV)

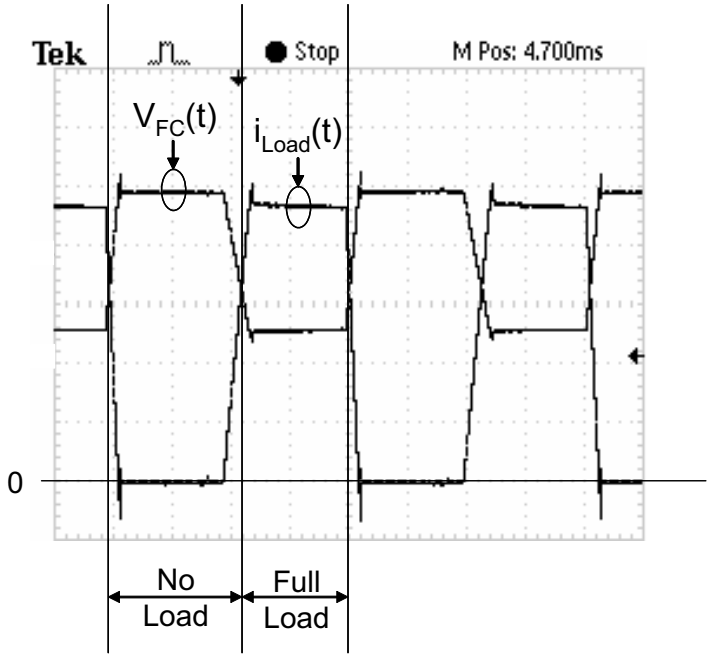


รูปที่ 105 ผลการทดลอง แรงดันขาออกของวงจรที่ค่ากระแสโหลดต่างๆกัน กรณีอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ (การตั้งค่าออสซิลโลสโคป: Mode: XY, $V_{FC}(t)$: 10V/DIV, $i_{Load}(t)$: 5A/DIV)

4.2.2 กรณีที่ 2

สำหรับการทดลองในกรณีที่ 2 นี้จะเป็นการทดสอบเพื่อยืนยันถึงเสถียรภาพของวิธีการควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ รวมถึงพลวัตรวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขาออกของวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลด โดยระบบที่ใช้ในการทดลองนั้นจะเป็นระบบเดียวกันกับที่ใช้ในการทดลองในกรณีที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 101 หากแต่จะปรับให้อัตราการไหลของเชื้อเพลิงมีค่าคงที่ที่ 100% จากนั้นจะทำการปรับเพิ่มค่ากระแสโหลดจาก 0 A ไปจนถึงค่าประมาณ 45 A และปรับลดค่ากระแสโหลดจาก 45 A เป็น 0 A โดยจะทำซ้ำกลับไปกลับมาที่ความถี่ประมาณ 50 Hz

ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 106 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าระบบควบคุมทำงานอย่างมีเสถียรภาพ หากแต่ยังมีส่วนของ overshoot และ undershoot ซึ่งมีผลมาจากแบนด์วิดท์ของผลตอบสนองต่อความถี่ที่จำกัด ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นอีกด้วยว่า การเปลี่ยนแปลงของกระแสขาออกและแรงดันขาออกนั้นจะมีการประวิงเนื่องจากเป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับเซลล์เชื้อเพลิงโดยทั่วไป ซึ่งลักษณะดังกล่าวได้ถูกโปรแกรมรวมเอาไว้ในวงจรควบคุมที่นำเสนอด้วย



รูปที่ 106 ผลการทดลองการตอบสนองของแรงดันขาออกของวงจรต้นแบบเมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 A ไปที่ 45 A และในทางกลับกัน โดยมีอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 100% (การตั้งค่าออสซิลโลสโคป: $V_{FC}(t)$: 10V/DIV, $i_{Load}(t)$: 10A/DIV, t: 5ms/DIV)

4.2.3 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งสองกรณีที่ได้ดำเนินการแล้วนั้น ชี้ให้เห็นว่าการทำงานโดยรวมของวงจรที่นำเสนอนั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ดีและสอดคล้องกับวิธีการที่นำเสนอ อย่างไรก็ตามยังมีบางประเด็นที่ควรได้รับการศึกษาและวิจัยเพิ่มเติมในโครงการต่อไป รวมถึงผลการทดลองในด้านการนำระบบต้นแบบไปใช้ในสภาวะแวดล้อมต่างๆกันด้วย

5 ทฤษฎีและข้อมูลเทคนิคที่เกี่ยวข้อง

ก. วิธีการหาเมทริกซ์การแปลงของปาร์ค (Park's Transformation Matrix Derivation)

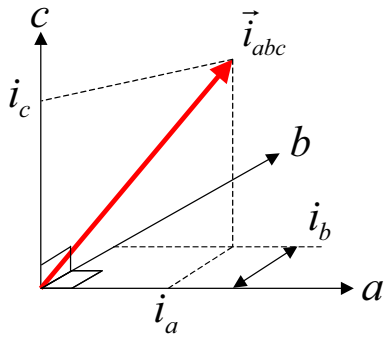
การแปลงของปาร์คนิยมใช้มากในระบบไฟฟ้าสามเฟส จุดประสงค์หลักของการแปลงของปาร์คคือการแปลงพารามิเตอร์ในพิกัด ABC (ABC Coordinates) ไปเป็นพิกัดใหม่ที่กำหนดขึ้นมีชื่อว่า DQ0 (DQ0 Coordinates) ซึ่ง D นั้นย่อมาจาก Direct (แนวตรง) Q ย่อมาจาก Quadrature (แนวตั้งฉาก) ส่วน 0 นั้นคือศูนย์ ประโยชน์ของการแปลงพิกัดด้วยวิธีนี้มีข้อดีคือในระบบไฟฟ้าสามเฟสที่สมดุล พารามิเตอร์สามเฟสกระแสสลับสามารถที่จะแทนได้ด้วยพารามิเตอร์สองเฟสกระแสตรง ข้อดีข้อที่ 1 คือ จำนวนของพารามิเตอร์ลดลงทำให้ระบบมีความซับซ้อนลดลง ข้อดีข้อที่ 2 คือ พารามิเตอร์ที่ได้จากการแปลงจะอยู่ในรูปแบบกระแสตรง (DC) ดังนั้นระบบควบคุมแบบฉบับ (Classical Control) จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในระบบกระแสสลับได้

พิกัด ABC สามารถแทนได้ด้วยเวกเตอร์ที่พุ่งออกจากจุดกำเนิดไปยังพิกัดนั้นๆ ยกตัวอย่างเช่น กระแสในระบบสามเฟสระบบหนึ่งเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการ (ก1)

$$\vec{i}_{abc}(t) = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \qquad \text{(ก1)}$$

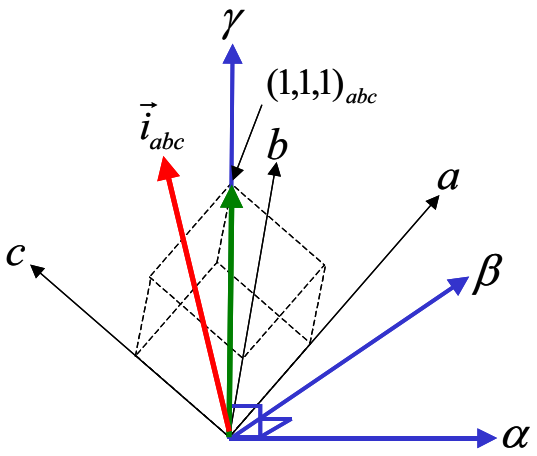
โดยที่ $i_a(t)$, $i_b(t)$ and $i_c(t)$ คือกระแสเฟส a เฟส b และเฟส c ตามลำดับ

รูปที่ ก1 แสดงเวกเตอร์ $\vec{i}_{abc}$ ในปริภูมิ ABC (ABC Space).



รูปที่ ก1 เวกเตอร์ $\vec{i}_{abc}$ แทนกระแสสามเฟสขณะหนึ่ง

ขั้นตอนแรกของการแปลงพิกัดเริ่มต้นที่ การนิยามพิกัดระหว่างกลาง (Intermediate Coordinates) ที่เรียกว่าพิกัด $\alpha\beta\gamma$ โดยตำแหน่งของแกน α แกน β และแกน γ ในปริภูมิ ABC แสดงในรูปที่ ก2 กล่าวคือ แกน γ นั้นมีทิศทางในแนวเวกเตอร์ (1,1,1) ในปริภูมิ ABC



รูปที่ ก2 พิกัด $\alpha\beta\gamma$ ในปริภูมิ ABC

ด้วยความสัมพันธ์ของสองพิกัดนี้ เราจึงสามารถแปลงเวกเตอร์ที่อยู่ในปริภูมิ ABC ให้อยู่ในปริภูมิ $\alpha\beta\gamma$ ได้ด้วยความสัมพันธ์ข้างล่างนี้

$$\vec{i}_{\alpha\beta\gamma}(t) = \vec{T}_{\alpha\beta\gamma/abc} \cdot \vec{i}_{abc}(t)$$

(ก2)

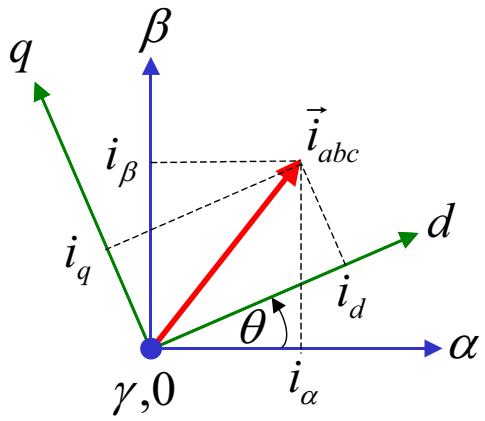
โดยที่

$$\vec{T}_{\alpha\beta\gamma/abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

สังเกตเมทริกซ์ $\vec{T}_{\alpha\beta\gamma/abc}$ จะเห็นได้ว่าในกรณีที่กระแสทั้งสามเฟสสมดุลกัน องค์ประกอบ γ ของเวกเตอร์กระแสจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นเวกเตอร์กระแส $\vec{i}_{\alpha\beta\gamma}(t)$ จะอยู่บนระนาบ $\alpha\beta$ และหมุนรอบแกน γ ด้วยเหตุนี้เองเวกเตอร์ของพารามิเตอร์สามเฟสในพิกัด ABC สามารถแทนได้ด้วยเวกเตอร์ของพารามิเตอร์สองเฟสในพิกัด $\alpha\beta\gamma$ จากจุดนี้เองหากทำให้ระนาบ $\alpha\beta$ หมุนไปด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากับเวกเตอร์กระแส $\vec{i}_{\alpha\beta\gamma}(t)$ องค์ประกอบ $i_\alpha(t)$ และ $i_\beta(t)$ ก็จะมีค่าคงที่ ด้วยหลักการดังกล่าวพิกัด DQ0 จึงถูกนิยามขึ้น รูปที่ ก3 แสดง

เวกเตอร์ $\vec{i}_{abc}$ ในพิกัด DQ0 และ $\alpha\beta\gamma$ แกน D และ Q หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากับ ω หรือ $2\pi f$ โดยที่ f คือความถี่สาย (Line Frequency)

อาศัยแนวคิดข้างต้น เมทริกซ์การแปลงของปาร์ค $\vec{T}_{dq0/abc}$ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จึงถูกนิยามขึ้น และใช้เป็นตัวดำเนินการในการแปลงพารามิเตอร์ในพิกัด ABC ให้อยู่ในพิกัด DQ0 ได้โดยตรง (ไม่ต้องผ่านพิกัด $\alpha\beta\gamma$)



รูปที่ ก2 เวกเตอร์ $\vec{i}_{abc}$ ในพิกัด DQ0 และ $\alpha\beta\gamma$

การแปลงของปาร์คแสดงตามสมการ (ก3) ส่วนเมทริกซ์การแปลงของปาร์คแสดงดังสมการ (ก4)

$$\vec{i}_{dq0} = \vec{T}_{dq0/abc} \cdot \vec{i}_{abc} \qquad \text{(ก3)}$$

$$\vec{T}_{dq0/abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \qquad \text{(ก4)}$$

โดยที่ $\theta = \int_0^t \omega(\tau) d\tau + \theta(0)$

สำหรับการแปลงพารามิเตอร์หรือเวกเตอร์ในพิกัด DQ0 กลับไปยังพิกัด ABC ดังสมการ (ก5) นั้นทำได้โดยอาศัยเมทริกซ์ผกผันการแปลงของปาร์ค (Park's Transformation Matrix), $\vec{T}_{abc/dq0}$

$$\vec{i}_{abc} = \vec{T}^{-1}{}_{dq0/abc} \cdot \vec{i}_{dq0}$$

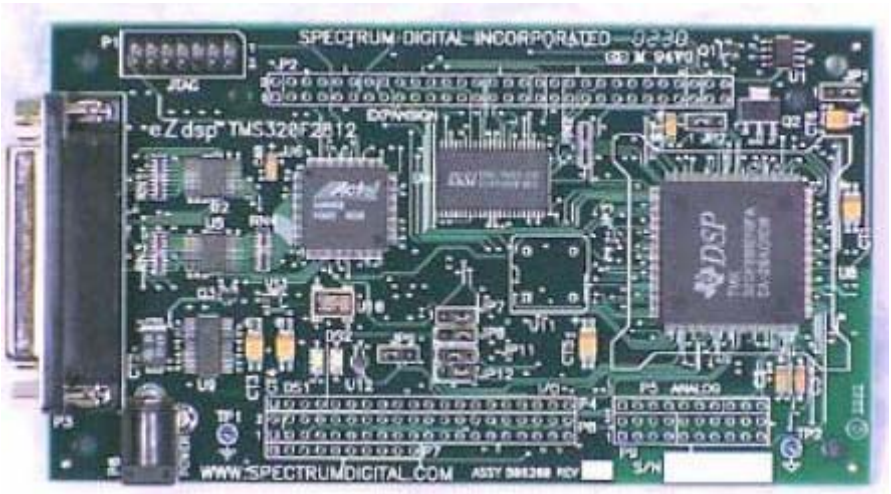
(ก5)

โดยที่

$$\vec{T}^{-1}{}_{dq0/abc} = \vec{T}_{abc/dq0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}^T$$

ข. บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

ในงานวิจัยนี้จะใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเป็นส่วนควบคุมหลักของทั้งวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงและระบบจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง โดยบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่ใช้เป็นบอร์ดรุ่น TMS320F2812 ดังแสดงในรูป ข1 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลผลิตโดยบริษัท Texas Instrument เป็นรุ่นที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในงานควบคุมการทำงานสำหรับอุปกรณ์สวิตช์ชิ่งเช่น ใช้ในงานด้านการควบคุมมอเตอร์หรือเครื่องจักรกลไฟฟ้าหลายชนิด นอกจากนั้นยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการควบคุมพลังงานไฟฟ้าในวงจรอินเวอร์เตอร์และคอนเวอร์เตอร์ได้อีกด้วย นอกจากนี้แล้วความสามารถในการประมวลผลทางด้านคณิตศาสตร์ยังมีความเร็วสูงและเหมาะที่จะนำไปใช้ในงานด้านการควบคุมในเวลาจริง (Real Time) โดยในตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลจะมีลักษณะที่สำคัญดังนี้



รูปที่ ข1 บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัลรุ่น TMS320F2812

- มีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงด้วยเทคโนโลยีซีมอสความเร็วสัญญาณของนาฬิกา 150 MHz (6.6 ns) ประมวลผลคำสั่งได้เร็วถึง 150 MIPS (150 ล้านคำสั่งต่อวินาที) ใช้กำลังงานไฟฟ้าต่ำ โดยตัว CPU จะทำงานที่แรงดัน 1.8 โวลต์ที่สัญญาณนาฬิกา 135 MHz และที่แรงดัน 1.9 โวลต์ที่สัญญาณนาฬิกา 150 MHz ขนาดแรงดันของอินพุตและเอาท์พุตคือ 3.3 โวลต์

- สนับสนุนพอร์ตแบบ JTAG มาตรฐาน IEEE 1149.1 เพื่อทดสอบอุปกรณ์และการแก้ไขตัวโปรแกรม

- CPU มีประสิทธิภาพสูงขนาด 32 บิตซึ่งอยู่ในรุ่น TMS320C28X มีความเข้ากันได้ของชุดคำสั่งของ DSP รุ่น TMS320F24X หรือ LF240X

- หน่วยความจำบนบอร์ดจะประกอบด้วย Flash ขนาด 128K X 16 บิต และ SARAM 18k X 16บิต

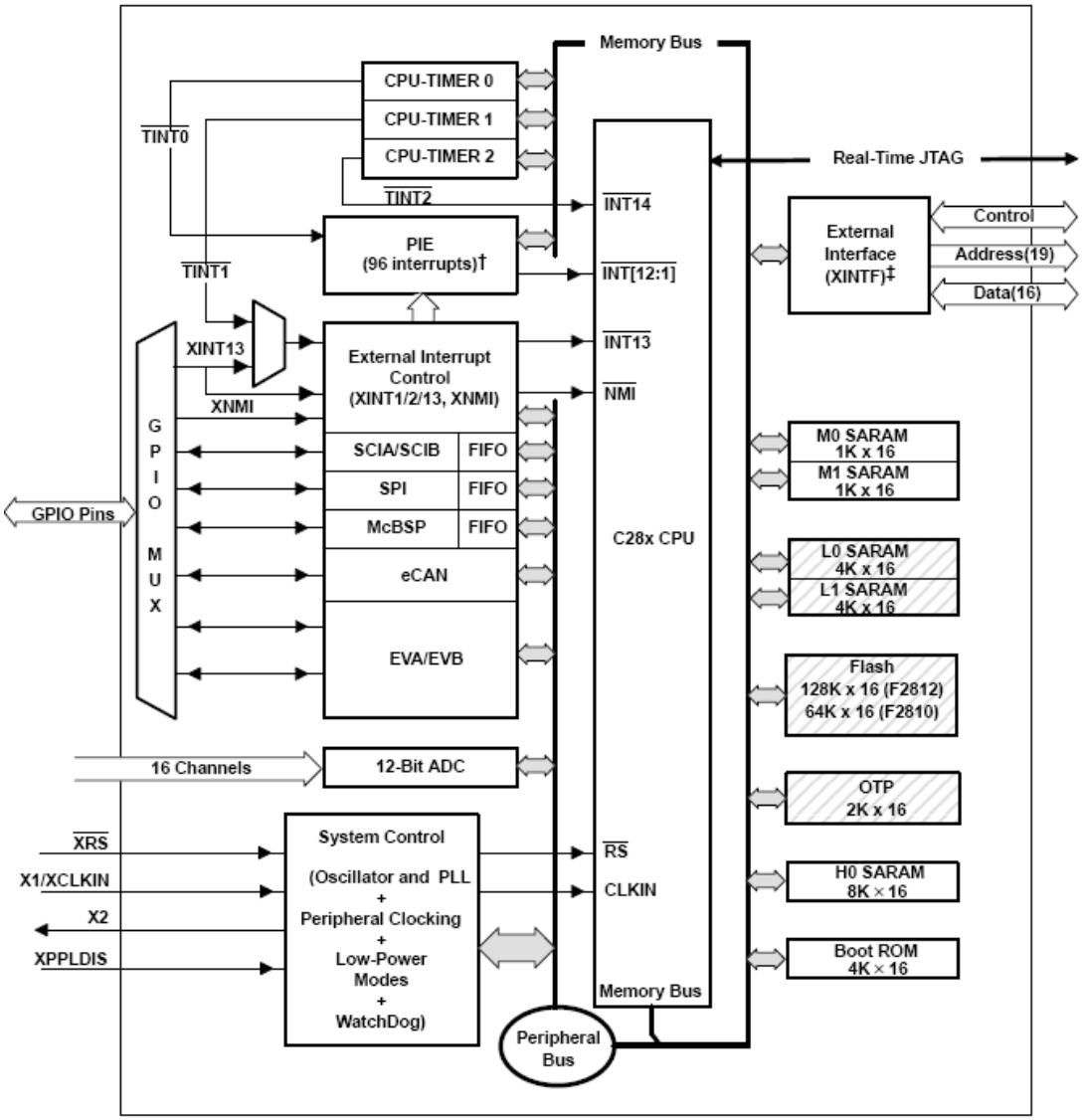
- มี Boot Rom ขนาด 4K x 16 ซึ่งจะประกอบด้วยซอฟแวร์ Boot Mode และตารางคณิตศาสตร์

- มีช่องสำหรับแปลงสัญญาณอานาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลความละเอียด 12 บิต มีจำนวน 16 ช่องเป็นแบบมัลติเพล็กซ์ ความเร็วในการแปลงสัญญาณ 80ns

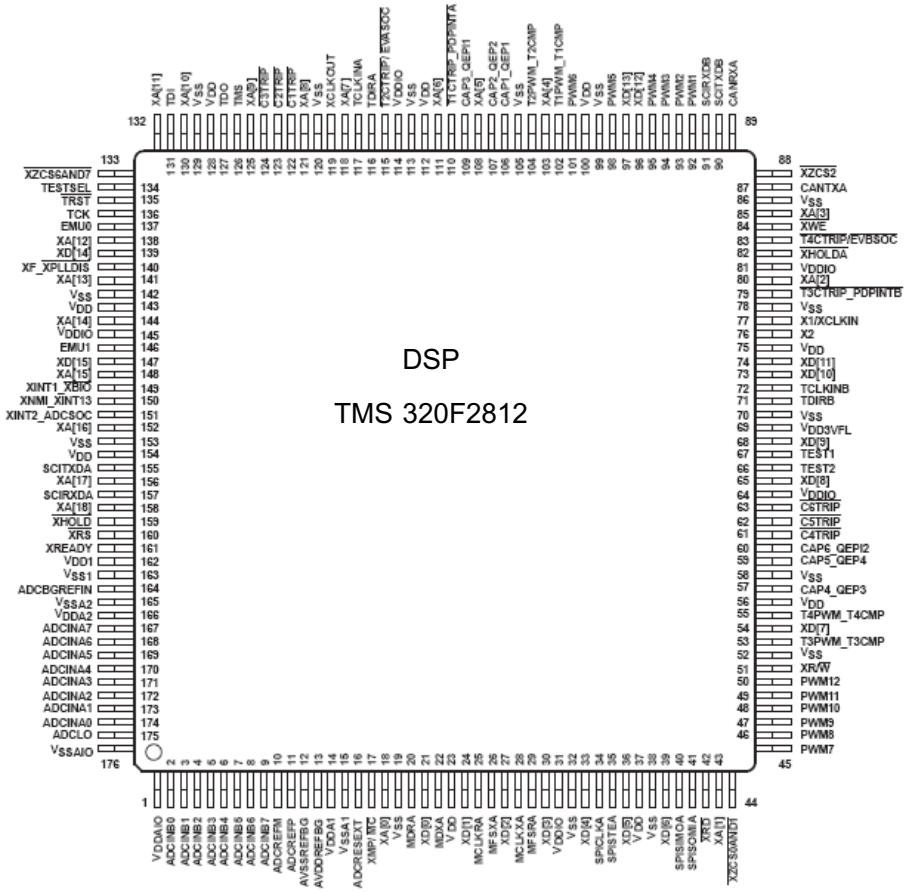
- ช่องสำหรับอินพุตและเอาท์พุตจำนวน 56 ช่อง

- ช่องสำหรับสร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) จำนวน12 ช่องสัญญาณและ PWM สำหรับควบคุมมอเตอร์ที่เป็นแบบ Event manager จำนวน 2 ชุด (EVA, EVB)

- ช่องสำหรับรับสัญญาณอินเตอร์รัพท์จากภายนอกจำนวน 45 ช่อง



รูปที่ ข2 บล๊อกไดอะแกรมตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

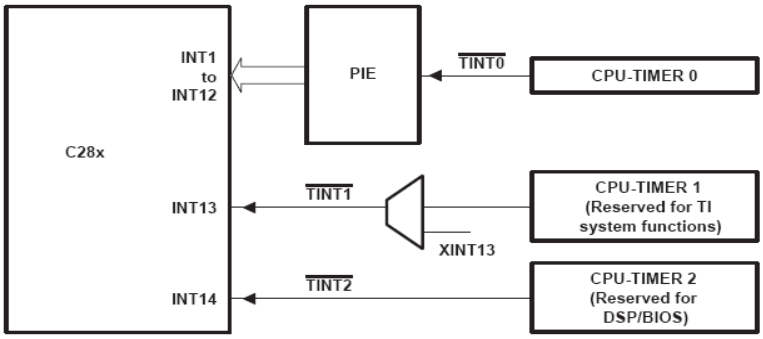


รูปที่ ข3 ลักษณะภายนอกของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320F2812 (176 PIN)

- **ส่วนประกอบของโมดูลต่าง ๆในตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล**

- โมดูลตรวจจับเวลา (Timer) มีอยู่ด้วยกัน 3 ชุดด้วยกันคือ Timer1, 2 และ 3 ดังรูปที่ ข4 ขนาด 32 บิต โดย Timer 1 จะถูกเก็บไว้เพื่อการทำงานของระบบฟังก์ชั่นภายในและ Timer 2 สงวนไว้ใช้ในส่วนของตัวประมวลผลและ BIOS ระบบ ซึ่งในส่วน Timer 0 สามารถให้ผู้พัฒนานำมาประยุกต์ใช้งานได้

- โมดูล Event Manager (EVA, EVB) ในส่วนนี้จะประกอบไปด้วย GP Timer ที่ใช้สำหรับงานทั่วไป, หน่วยเปรียบเทียบสัญญาณหรือสร้างสัญญาณ PWM, หน่วย Capture, วงจร Quadrature-Encoder Pulse (QEP) โดนทั้งหมดนี้สามารถจัดออกมาอยู่ในแต่ละ EVA และ EVB ดังรูปที่ ข5

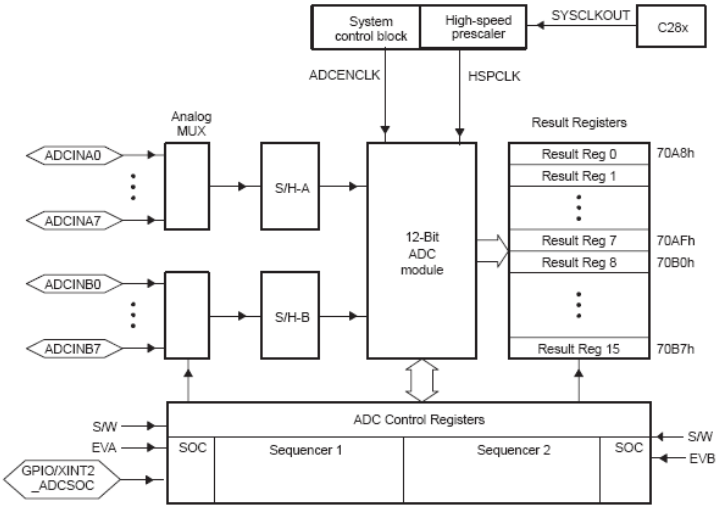


รูปที่ ข4 บล็อกไดอะแกรมของโมดูล Timer

EVENT MANAGER MODULES	EVA		EVB	
	MODULE	SIGNAL	MODULE	SIGNAL
GP Timers	GP Timer 1 GP Timer 2	T1PWM/T1CMP T2PWM/T2CMP	GP Timer 3 GP Timer 4	T3PWM/T3CMP T4PWM/T4CMP
Compare Units	Compare 1 Compare 2 Compare 3	PWM1/2 PWM3/4 PWM5/6	Compare 4 Compare 5 Compare 6	PWM7/8 PWM9/10 PWM11/12
Capture Units	Capture 1 Capture 2 Capture 3	CAP1 CAP2 CAP3	Capture 4 Capture 5 Capture 6	CAP4 CAP5 CAP6
QEP Channels	QEP1 QEP2 QEPI1	QEP1 QEP2	QEP3 QEP4 QEPI2	QEP3 QEP4
External Clock Inputs	Direction External Clock	TDIRA TCLKINA	Direction External Clock	TDIRB TCLKINB
External Trip Inputs	Compare	$\overline{\text{C1TRIP}}$ $\overline{\text{C2TRIP}}$ $\overline{\text{C3TRIP}}$	Compare	$\overline{\text{C4TRIP}}$ $\overline{\text{C5TRIP}}$ $\overline{\text{C6TRIP}}$
External Trip Inputs		$\overline{\text{T1CTRIP_PDPINTA}}^{\dagger}$ $\overline{\text{T2CTRIP/EVASOC}}$		$\overline{\text{T3CTRIP_PDPINTB}}^{\dagger}$ $\overline{\text{T4CTRIP/EVBSOC}}$

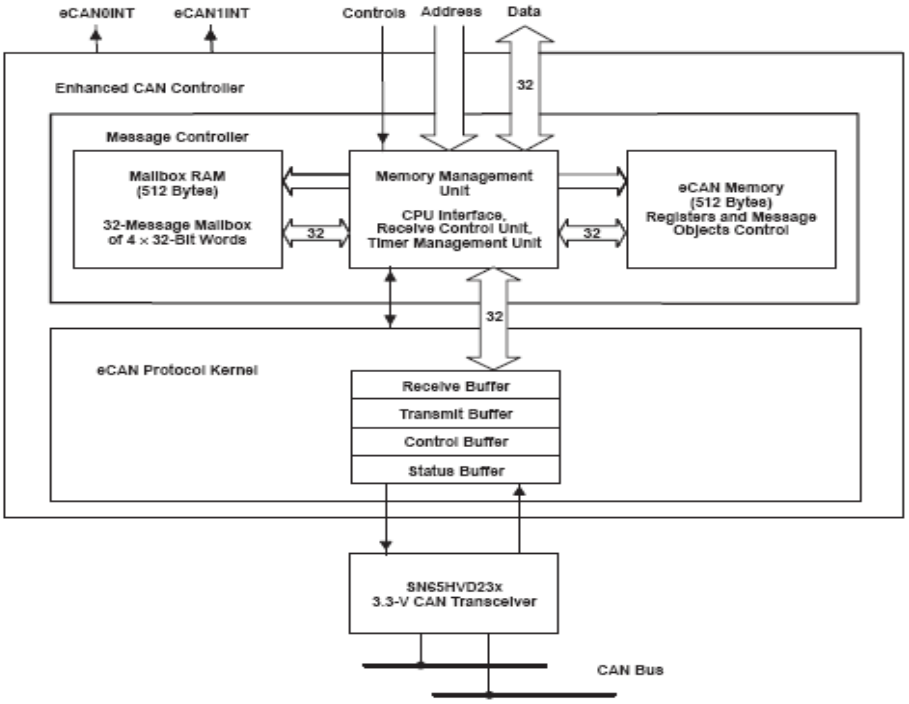
รูปที่ ข5 ชื่อโมดูลและขาสัญญาณต่างของ EVA และ EVB

- โมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล มีความละเอียดขนาด 12 บิตที่แยกทำงานอิสระต่อกันประกอบด้วยวงจร Sample และ Hold (S/H) แบ่งเป็นชุดแปลงสัญญาณ 2 ชุดคือ A และ B รวม 16 ช่องสัญญาณดังรูปที่ 6 ข ทำงานในรูปแบบมัลติเพลกซ์ รับสัญญาณแอนะล็อกในระดับแรงดัน 0 ถึง 3 โวลต์มีความเร็วในการแปลงสัญญาณอยู่ที่ 12.5 MSPS



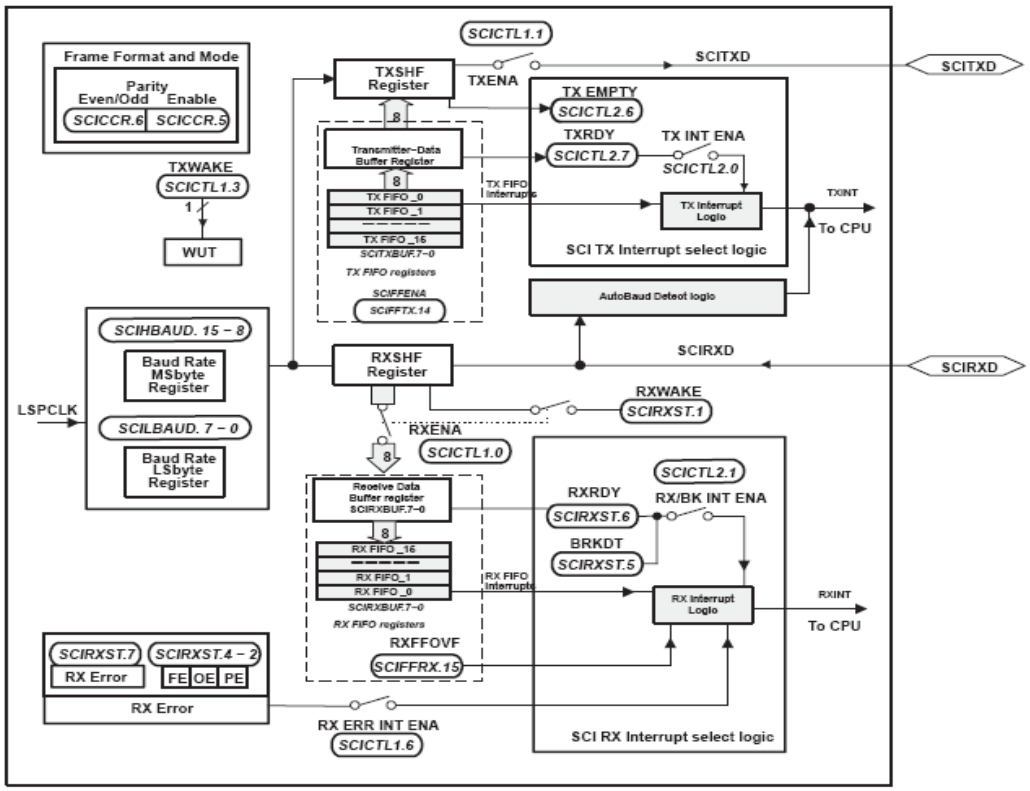
รูปที่ ข6 บล็อกไดอะแกรมของโมดูลแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล

- โมดูลชุด Enhanced Controller Area Network (eCAN) ชุดขาสัญาณนี้จะรับส่งข้อมูลที่เป็นโพโตคอลแบบ CAN เวอร์ชั่น 2.0B อัตราการรับส่งข้อมูลดาต้าอยู่ที่ 1 Mbps ในการรับส่งสัญญาณนี้จะใช้ขนาด 32 บิต เฟรมในการรับส่งสัญญาณจะเป็นแบบมาตรฐานหรือจะเป็นแบบ Extend ได้ สามารถรองรับการสนับสนุนข้อมูลและการทำงานแบบเฟรมรีโมตนอกจากนี้ยังป้องกันการต่อต้านในการรับข้อมูลใหม่ สามารถอธิบายการทำงานของโพโตคอลแบบ CAN ดังรูปที่ ข7



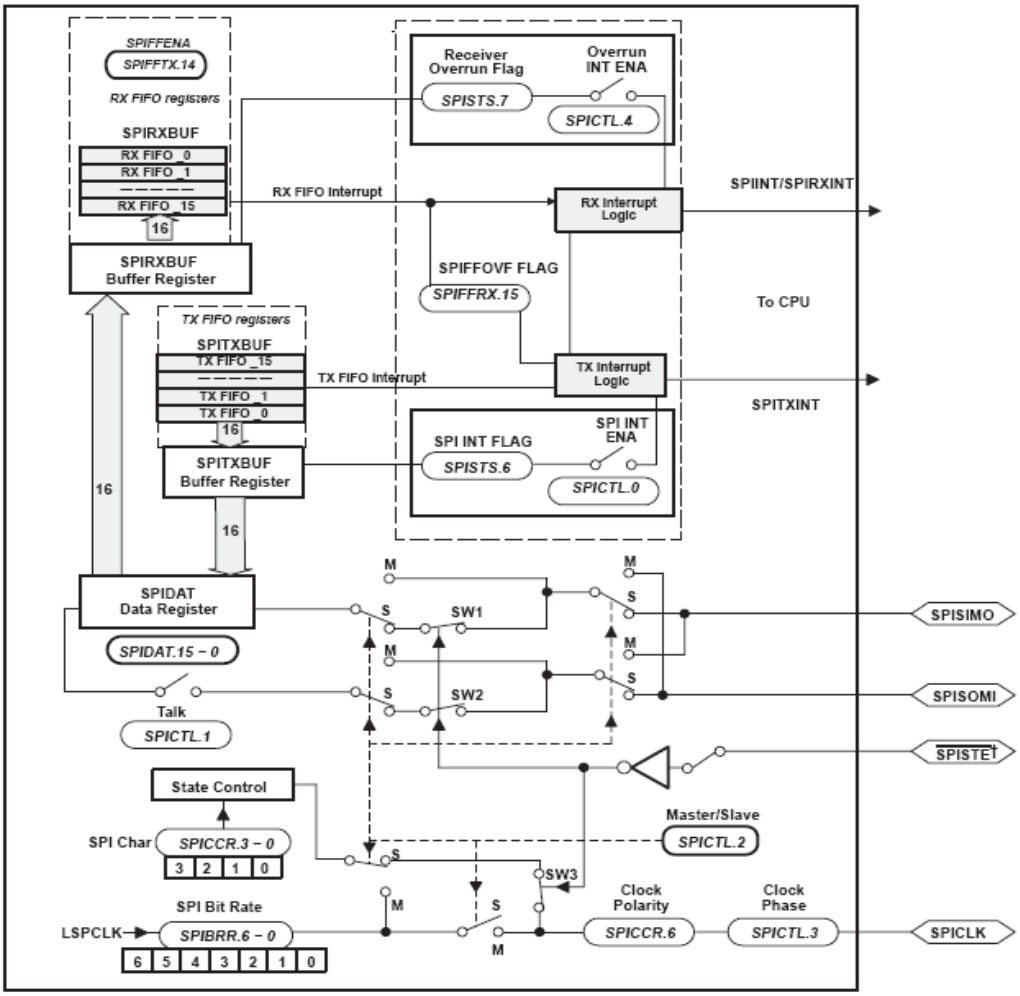
รูปที่ ข7 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของโพโตคอลแบบ CAN

- โมดูลรับส่งข้อมูลแบบอนุกรม (Serial Communications Interface : SCI) ในการรับส่งข้อมูลอนุกรมนี้จะสนับสนุนการรับส่งข้อมูลแบบดิจิทัลระหว่างตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลกับอุปกรณ์ภายนอกใช้รูปแบบมาตรฐาน non-return-to-zero (NRZ) โดยการรับส่งของ SCIนี้จะรับส่งข้อมูลเป็นในลักษณะ Double – buffered สามารถทำงานแบบไป-กลับพร้อมกันได้ (Full Duplex) การทำงานจะแสดงในรูปที่ ข8



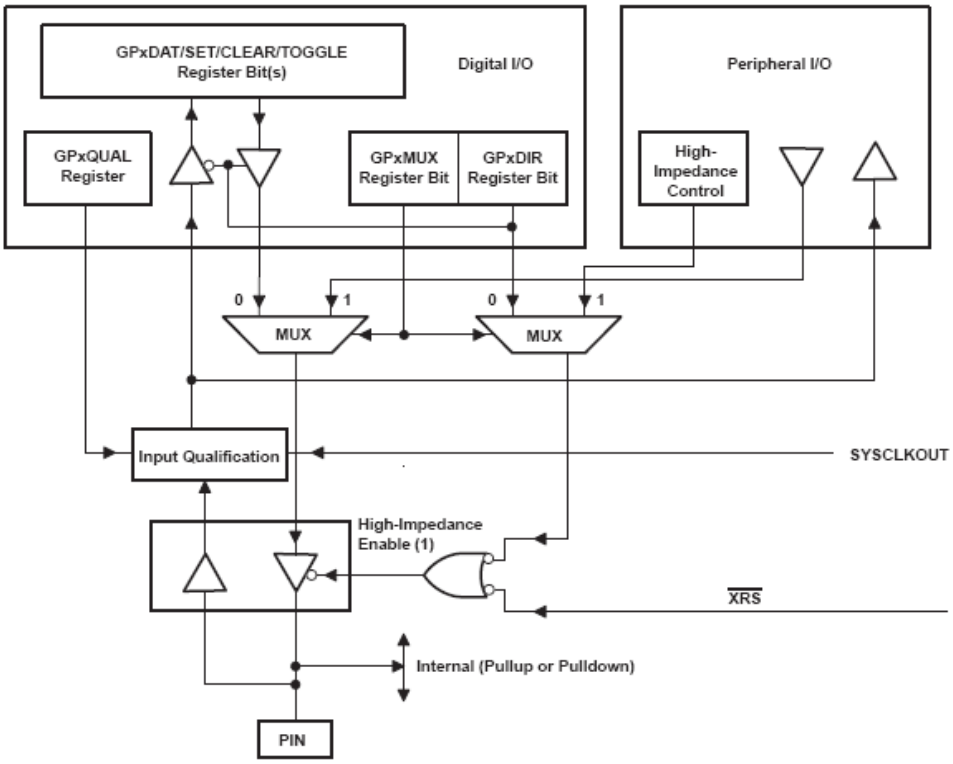
รูปที่ ข8 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของโมดูล SCI

- โมดูลแบบ Serial Peripheral Interface (SPI) ในโมดูลนี้จะประกอบด้วย SPI 4 ขาด้วยกันดังรูปที่ ข9 เป็นการรับส่งข้อมูลแบบความเร็วสูง อินพุตและเอาต์พุตเป็นแบบสมวาร (Synchronous) โดย SPI จะทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารระหว่างตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลกับอุปกรณ์ภายนอกตัวหรือตัวประมวลผลตัวอื่นๆ โดยขาที่ใช้เชื่อมต่อสำหรับการทำงานคือ SPISOMI เป็นขา Slave Out/Master In เป็นขาสัญญาณที่รับส่งข้อมูลแบบอนุกรมแบบไปและกลับพร้อมกันซึ่งสามารถตั้งการทำงานให้เป็นแบบอินพุตและเอาต์พุตได้, SPISIMO เป็นขา Slave In/Master Out การทำงานรับส่งข้อมูลแบบอนุกรมเหมือน SPISOMI, SPISTE เป็นขาที่ใช้กำหนดสถานะของอุปกรณ์ว่าจะทำหน้าที่เป็น Master หรือ Slave ส่วน SPICLK เป็นขาที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณนาฬิการะหว่างอุปกรณ์ นอกจากนี้ยังรับส่งข้อมูลถึง 16 ระดับแบบ FIFO ข้อมูลในการับส่งที่มีขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 16 บิต



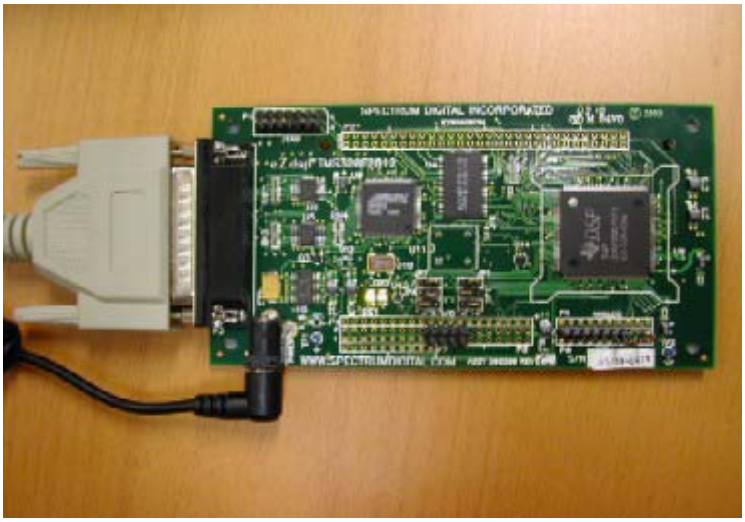
รูปที่ ข9 บล็อกไดอะแกรมของโมดูล SPI

- โมดูลพอร์ตอินพุต/เอาต์พุต (General Purpose Input / Output: GPIO) เป็นช่องสัญญาณสำหรับเป็นอินพุตและเอาท์พุตของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่ทำงานเป็นอิสระต่อกันสามารถแสดงดังรูปที่ ข10 กำหนดการทำงานได้เพื่อเลือกที่จะให้ทำงานในโหมดอินพุตเอาต์พุตแบบดิจิทัลหรือเลือกที่จะให้ติดต่อกับอุปกรณ์อื่นๆภายนอกได้

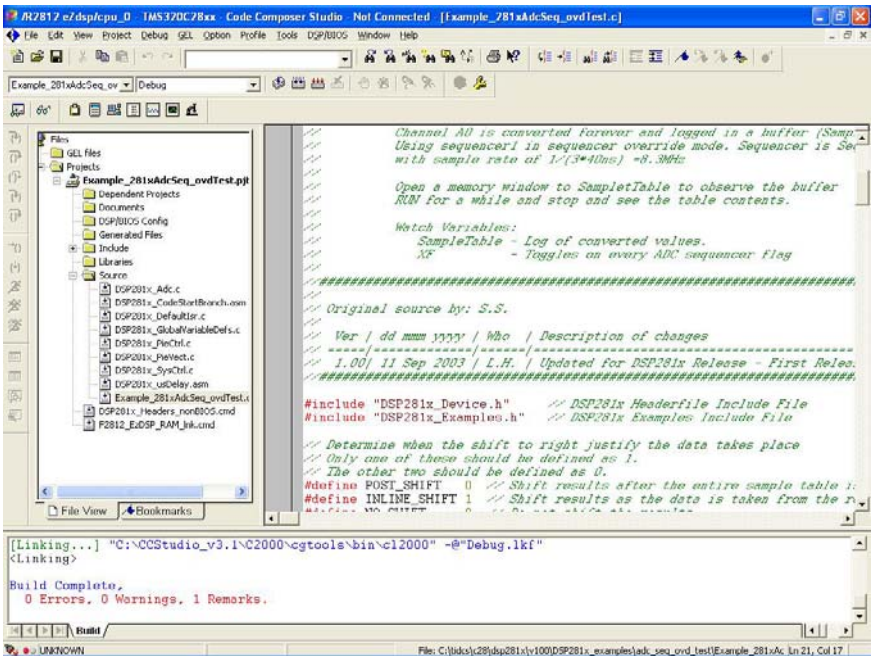


รูปที่ ข10 บล็อกไดอะแกรมของโมดูล GPIO

การใช้งานบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัลจะต้องต่อไฟเลี้ยงที่มีขนาดแรงดัน 5 โวลต์ เพื่อเลี้ยงอุปกรณ์ต่าง ๆในวงจรและติดต่อกับคอมพิวเตอร์ทางพอร์ตขนาน (Parallel port) ดังรูปที่ ข11 การพัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของบอร์ดสามารถเขียนชุดคำสั่งผ่านโปรแกรม Code Composer Studio แสดงดังรูปที่ ข12 โดยภาษาที่ใช้สำหรับการพัฒนาจะเป็นภาษา C C++ หรือ Assembly เป็นต้น



รูปที่ ข11 เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตขนาน (Parallel Port)



รูปที่ ข12 โปรแกรม Code Composer สำหรับเขียนโปรแกรมลงบนบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

6 บทสรุป

รายงานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอผลงานวิจัยที่ได้ดำเนินการมาตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2548 จนถึงวันที่ 30 กันยายน 2550 ซึ่งสรุปใจความสำคัญได้ดังนี้

ศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีใช้ในปัจจุบัน ซึ่งจากผลการศึกษาทำให้ทราบว่าชนิดออกไซด์ของแข็ง และชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดย่อมและบ้านพักอาศัยในประเทศไทยได้เป็นอย่างดี

นำเสนอวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่แก้ไขข้อเสียจากงานวิจัยในอดีต โดยมีข้อดีคือมีประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีขึ้นเนื่องจากใช้รอบทำงานที่มีค่าสูงขึ้น มีความยืดหยุ่นของจุดทำงานที่ดีขึ้น นั่นคือใช้ได้กับเซลล์เชื้อเพลิงทุกชนิด และไม่มีความซับซ้อนในการสร้างวงจรขึ้นใช้งานจริง

ศึกษาบทความเกี่ยวกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงและวงจรควบคุมอาศัยผลการพิจารณาการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวงจรที่เกี่ยวข้องต่างๆ ในการออกแบบภาคกำลังของระบบจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้นำเสนอ ซึ่งประกอบด้วยวงจรแปลงไฟกระแสตรงให้สูงขึ้น วงจรการแปลงแรงดันสูงกระแสตรงให้เป็นแรงดันสูงกระแสสลับ และส่วนสำรองพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ตัวประจุความจุสูง

ระบบต้นแบบของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงและระบบต้นแบบการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกจัดสร้างขึ้นเพื่อยืนยันสมรรถนะของภาคกำลังและประสิทธิภาพของภาคควบคุมที่นำเสนอ ผลจากการทดลองชี้ให้เห็นว่าการทำงานโดยรวมของวงจรที่นำเสนอนั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ดีและสอดคล้องกับวิธีการที่นำเสนอ อย่างไรก็ตามยังมีบางประเด็นที่ควรได้รับการศึกษาและวิจัยเพิ่มเติมในโครงการต่อไป รวมถึงผลการทดลองในด้านการนำระบบต้นแบบไปใช้ในสภาวะแวดล้อมต่างๆกันด้วย

บรรณานุกรม

- **เซลล์เชื้อเพลิงและวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง**

[1] James Larminie and Andrew Dicks,“Fuel Cell Systems Explained (2nd Edition),” John Wiley & Sons, 2003.

[2] ธนารัฐ สิงหา, “เซลล์เชื้อเพลิงกับการนำไปใช้งาน,” วารสารพลังงานโลก, ฉบับที่ 16, กรกฎาคม – ตุลาคม 2545.

[3] S. Yuvarajan and Dachuan Yu, “Characteristics and modeling of PEM fuel cells,” IEEE Proc. on Circuits and Systems Conference, Vol. 5, 23-26 May 2004, pp. 880– 883.

[4] T.W. Lee, S.H. Kim, Y.H. Yoon, S.J. Jang and C.Y. Won, “A 3 kW fuel cell generation system using the fuel cell simulator,“ IEEE Proc. on Industrial Electronics Conference, Vol. 2, 4-7 May 2004, pp. 833-837.

[5] J. Garnier, M.C. Pera, D. Hissel, F. Harel and Member, “Dynamic PEM fuel cell modeling for automotive applications,” IEEE Proc. on Vehicular Technology Conference, Vol. 5, 6-9 Oct. 2003, pp. 3284-3288.

[6] P. Famori, Randall S. Gemmen, IEEE and Senior Member, “ Electrochemical circuit model of a PEM fuel cell,” IEEE Proc. on Power Engineering Conference, Vol. 3, 13-17 July 2003, pp. 1436-1440.

[7] D. Gergakis, S. Papathanassiou and S. Manias, “Modeling and control of a small scale grid-connected PEM fuel cell system,” IEEE Proc. on Power Electronic Specialists Conference, 12 June 2005, pp. 1614-1620.

- **อินเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง**

[8] Yaosuo, X., C. Liuchen, B. K. Søren, B. Josep and S. Toshihisa Topologies of Single-Phase Inverters for Small Distributed Power Generators: An Overview. IEEE Transaction on Power Electroics,vol.19, no.5 September 2004; 1279 – 1288

[9] Andersen, G. K., C. Klumpner, S. B. Kjaer and F. Blaabjerg . A new green power inverter for fuel cells. Power Electronics Specialists Conference 2002; 727 – 733

[10] Rajesh, G., K. Sangsun, H. Jae Hong, N. E. Prasad, B. Y. Mark and W. H. Jo. Development of a Low Cost Fuel Cell Inverter System With DSP Control. IEEE Transaction on Power Electroics,vol.19, no.5 September 2004; 1256 – 1262

[11] Abraham, I. P. Switching Power Supply Design. New York: McGraw-Hill,1992

[12] Hong, M., D. Songquan , W. Yangyang and B. Issa . Unified Steady-State Model and DC Analysis of Half-Bridge DC-DC Converters with Current Doubler Rectifier. Power Electronics Specialists Conference 2004; 727 – 733

[13] Jin, W., Z. P. Fang, A. Joel, J. Alan and B. Ryan. Low Cost Fuel Cell Converter System for Residential Power Generation. IEEE Transaction on Power Electroics,vol.19, no.5 September 2004; 1315 – 1322

[14] http://datasheetarchive.com

[15] A, M. Tuckey, J, N. Krase. A Low-Cost Inverter for Domestic Fuel cell Applications. IEEE EPE-PEMC 2002 Conference, September 2002; 339 – 346

[16] Final Report A 10KW Fuel Cell Inverter System. 2003 International Future Energy Challenge Competition May 2003;

[17] Texas A&M University Fuel Cell Inverter - 10 kW Design & Cost Analysis. 2001 International Future Energy Challenge Competition August 2001;

[18] Sels. T., C. Dragu, C. T. Van and R. Belmans. Overview of New Energy Storage System for an Improved Power Quality and Load Waging on Distribution Level. CIRED2001, Conference Publication No.248 June2001;

[19] Kazimierczuk, M. K. and R. C. Cravens. Application of Super Capacitors for Voltage Regulation in Aircraft; Distributed Power Systems. Power Electronics Specialists Conference, 1996. PESC apos;96 Record., 27th Annual IEEE Volume 1, Issue , 23-27 Jun 1996 Page(s):835 - 841 vol.

[20] “Deep Cycle Battery.” Northern Arizona Wind & Sun Inc. http://www.windsun.com/Batteries/Battery_FAQ.htm#Charge%20controllers

[21] พัฒนพงษ์ สงวนรักษ์,”การออกแบบหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตรอน”.จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545

ผลงานที่ได้จากโครงการ

นับถึงวันที่ 30 กันยายน 2550 ผลงานที่ได้จากโครงการนี้ มีดังนี้

- **บทความที่ได้รับการตีพิมพ์มีดังนี้คือ**

1. Sirirsukprasert S. and Seangsuwan T., “Power Electronics-Based Fuel Cell Emulator,” in Proc. 2007 Electrical Engineering/ Electronics, Computers, Telecommunications and Information Technology (ECTI) International Conference, vol. 1, pp. 281-284

2. วัฒนา สมานจิตร และ ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ, “การวิเคราะห์และออกแบบระบบจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง” การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 45 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เล่มที่ 5 หน้า 172-179, 2550

3. มนูญ บูลย์ประมุข และ ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ, “วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง” การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 45 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เล่มที่ 5 หน้า 164-171, 2550

- **ระบบต้นแบบ**

1. วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงและวิธีการควบคุม

2. ระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง

- **อยู่ระหว่างการดำเนินการ**

ขณะนี้อยู่ในระหว่างการดำเนินการส่งผลงานเพื่อตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ คือ ECTI Transaction on Electrical Engineering, Electronics and Communications