



วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันที่มีหลายเอาต์พุต

นายศรีมงคล อุดมแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันที่มีหลายเอาต์พุต

นายศรีมงคล อุดมแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาลัทธิ

ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองโครงงานวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันที่มีหลายเอาต์พุต

โดย นายศรีเมงคล อุดมแก้ว

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนาฤทธิ์ เศรษฐกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.เมธีพจน์ พัฒนศักดิ์)

กรรมการ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ น้อยยิ่ง)

ชื่อ : นายศรัมมิ่ง อุดมแก้ว
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันที่มีหลายเอาต์พุต
 สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศาสตราจารย์ ดร.เมธิพันธ์ พัฒนศักดิ์
 ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนางจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันในรูปแบบโมดูล โดยอิงจากวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันสามระดับ ซึ่งโครงสร้างที่พัฒนาขึ้นช่วยให้สามารถลดพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุและสวิตช์ อีกทั้งยังลดจำนวนตัวเก็บประจุขาเข้าเมื่อเทียบกับการใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันสามระดับต่ออนุกรมกันโดยตรง การควบคุมวงจรใช้ตัวควบคุมโหมดเลื่อนแบบทางอ้อม ซึ่งมีจุดเด่นในด้านความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์และประสิทธิภาพด้านพลวัต

ในงานนี้ได้เสนอการใช้งานร่วมกับโพลดิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนและแหล่งพลังงานหมุนเวียน ซึ่งจำลองการทดลองด้วยโพลิตัวต้านทานและแหล่งจ่ายไฟฟ้าจำลองการออกแบบวงจรและสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับโมดูลแปลงผันไฟฟ้าได้สร้างให้รองรับการต่อใช้งานถึง N โมดูล และถูกจำลองใน MATLAB/Simulink โดยใช้ 3 โมดูล ผลการจำลองแสดงว่าวงจรสามารถทำงานได้ดีในสถานการณ์ต่าง ๆ

เพื่อยืนยันผลการออกแบบ ได้สร้างวงจรต้นแบบจำนวน 3 โมดูลและทดสอบในสถานการณ์เดียวกับการจำลอง พบว่าวงจรสามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าเพื่อจ่ายโพลิตัวต้านทานและรักษาสมดุลแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุขาเข้าได้เป็นอย่างดี ซึ่งแสดงถึงความสอดคล้องระหว่างผลการทดลองและการจำลอง พร้อมทั้งยืนยันประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบโมดูลที่พัฒนาขึ้น

(มีจำนวนทั้งสิ้น 46 หน้า)

คำสำคัญ : วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน, โมดูลแปลงผันไฟฟ้า, โหมดเลื่อนแบบทางอ้อม, อิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน, พลังงานหมุนเวียน

____ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Mr. Srimongkhon Udomkaew
Thesis Title : Multiple-Output Buck Converter
Major Field : Electrical Engineering
King Mongkut's University of Technology North
Bangkok
Thesis Advisor : Professor Dr. Matheepot Phattanasak
Academic Year : 2024

ABSTRACT

This thesis aims to develop a modular buck converter circuit based on a three-level buck converter. The proposed design allows for the use of capacitors with lower voltage ratings than the input supply, reduces the number of input capacitors, enables the use of switches with lower voltage ratings. The control method employed is an indirect sliding mode controller, known for its robustness against parameter variations, and ease of implementation, making it suitable for the developed circuit.

The proposed application involves integrating the converter with a proton exchange membrane electrolyzer and renewable energy sources. Experimental tests were conducted using a resistive load and a simulated power supply with fluctuating voltage to emulate renewable energy sources. A mathematical model for the modular buck converter supporting up to N modules was developed and simulated using MATLAB/Simulink with a three-module configuration. Simulation results demonstrated effective circuit operation under various scenarios.

To validate the design, a prototype consisting of three modules was fabricated and tested under the same conditions as the simulation. The results showed that the circuit maintained a stable current supply to the load and effectively balanced the input capacitor voltage. The consistency between experimental and simulation results confirms the feasibility and performance of the proposed modular buck converter for practical applications.

(Total 46 Pages)

Keywords: Buck Converter, Modular Converter, Indirect Sliding Mode Control, Proton Exchange Membrane Electrolyzer, Renewable Energy

_____ Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยการสนับสนุนที่มีค่าและคำแนะนำที่ทรงคุณค่าจาก ศาสตราจารย์ ดร.เมธีพจน์ พัฒนศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ชี้แนะแนวทางการดำเนินงานด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี ตลอดจนคำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ในทุกขั้นตอนของการทำงาน ผู้จัดทำขอแสดงความขอบคุณจากใจ

นอกจากนี้ ขอขอบคุณ คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า รวมถึงเพื่อน ๆ ที่ได้มอบคำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่และจริงใจ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ที่ได้รับอย่างยิ่ง

ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบุพการีที่เป็นแรงสนับสนุนสำคัญในทุกมิติ ไม่ว่าจะเป็นกำลังใจ ความรัก และพลังแห่งความปรารถนาดี ซึ่งช่วยผลักดันให้ผู้จัดทำก้าวข้ามอุปสรรคและบรรลุเป้าหมายทางการศึกษาได้สำเร็จ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้สละเวลาพิจารณา ให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ตามวัตถุประสงค์และขอบเขตที่กำหนด

ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีคุณค่าและเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ รวมทั้งช่วยเป็นแนวทางในการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคต

ศรัมภ์ อุดมแก้ว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 วิธีการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันสามระดับ	3
2.2 การควบคุมโหมดเลื่อนแบบทางอ้อม	6
2.3 อิเล็กทรอนิกส์เซมิคอนดักเตอร์แบบเปลี่ยนโปรตอน.....	8
2.4 แบบจำลองอิเล็กทรอนิกส์เซมิคอนดักเตอร์แบบเปลี่ยนโปรตอน	9
2.5 การออกแบบความกว้างของแผ่นลายวงจรพิมพ์ความถี่ต่ำ.....	11
บทที่ 3 แบบจำลองคณิตศาสตร์ ตัวควบคุม และการออกแบบวงจร.....	13
3.1 การออกแบบลักษณะโครงสร้างของโมดูลวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน.....	13
3.3 ตัวควบคุมโหมดเลื่อนแบบทางอ้อมสำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน N โมดูล.....	24
3.4 ตัวควบคุมโหมดเลื่อนแบบทางอ้อมสำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน 3 โมดูล.....	26
3.5 จำลองเลียนแบบการทำงานของโมดูลวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink	27
3.6 ออกแบบความกว้างลายวงจรพิมพ์วงจรต้นแบบ	32
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	33
4.1 รายละเอียดลักษณะสมบัติวงจรทดลอง	33
4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง	33
4.3 การทดลอง.....	33
4.4 สรุปผลการทดลอง	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุป และข้อเสนอแนะ	39
5.1 สรุป.....	39
5.2 ข้อเสนอแนะ	40
บรรณานุกรม.....	41
ภาคผนวก.....	44
รายชื่อผลงานตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการนานาชาติ.....	45
ประวัติผู้เขียน	46



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3-1 ความหมายของพารามิเตอร์.....	17
ตารางที่ 3-2 สรุปสมการแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับโมดูลวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน N โมดูล	24
ตารางที่ 3-3 พารามิเตอร์สำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้า.....	28
ตารางที่ 3-4 พารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุม	28
ตารางที่ 3-5 สถานการณ์จำลองที่ 1 กำหนดกระแสอ้างอิงคงที่	28
ตารางที่ 3-6 สถานการณ์จำลองที่ 2 ปรับกระแสอ้างอิงตามที่ต้องการใช้งาน.....	28
ตารางที่ 3-7 สถานการณ์จำลองที่ 3 สมมติแรงดันไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนไม่คงที่	28
ตารางที่ 4-1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	33

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2-1 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันสามระดับ	3
ภาพที่ 2-2 คำสั่งสวิตช์ในสภาวะคงตัว เมื่อ $D < 0.5$	4
ภาพที่ 2-3 การทำงานของวงจรในช่วงเวลา t_0 สวิตช์ S_{11} ปิดวงจร และ S_{12} เปิดวงจร	4
ภาพที่ 2-4 การทำงานของวงจรในช่วงเวลา t_1 สวิตช์ S_{11} และ S_{12} เปิดวงจร	5
ภาพที่ 2-5 การทำงานของวงจรในช่วงเวลา t_2 สวิตช์ S_{12} ปิดวงจร และสวิตช์ S_{11} เปิดวงจร	5
ภาพที่ 2-6 โครงสร้างของตัวควบคุมโหมดเลื่อนแบบทางอ้อม	7
ภาพที่ 2-7 องค์ประกอบของอิเล็กทรอนิกส์เซอร์กิตเมมเบรน [11]	8
ภาพที่ 2-8 วงจรที่ยับเคียงแบบจำลองอิเล็กทรอนิกส์เซอร์กิตเมมเบรนด้วยตัวต้านทาน	10
ภาพที่ 2-9 วงจรที่ยับเคียงแบบจำลองอิเล็กทรอนิกส์เซอร์กิตเมมเบรนแบบจำลองพฤติกรรมคงที่	10
ภาพที่ 2-10 วงจรที่ยับเคียงแบบจำลองอิเล็กทรอนิกส์เซอร์กิตเมมเบรนแบบพลวัต	11
ภาพที่ 3-1 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันต่อ 1 โหมด	13
ภาพที่ 3-2 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันต่อ 2 โหมด	14
ภาพที่ 3-3 วงจรเทียบเคียงอย่างง่ายของตัวเก็บประจุไฟฟ้า [20]	15
ภาพที่ 3-4 ลดจำนวนตัวเก็บประจุขาเข้า	15
ภาพที่ 3-5 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันจำนวน 2 โหมดที่นำเสนอ	15
ภาพที่ 3-6 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันต่อลักษณะโหมด	16
ภาพที่ 3-7 ตัวเก็บประจุขาเข้าที่ต่อใช้ร่วมกัน	16
ภาพที่ 3-8 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ [21]	18
ภาพที่ 3-9 สัญญาณคำสั่งสวิตช์สภาวะคงตัวของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน 2 โหมด	18
ภาพที่ 3-10 การสร้างสัญญาณ PWM สำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันสองโหมด [22] ...	19
ภาพที่ 3-11 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมสำหรับอุปกรณ์และแรงดันตัวเก็บประจุขาเข้า	26
ภาพที่ 3-12 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมสำหรับ 3 โหมด [23]	26
ภาพที่ 3-13 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน 3 โหมด (Simscape)	29
ภาพที่ 3-14 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน 3 โหมด (MATLAB Function)	29
ภาพที่ 3-15 การตอบสนองของกระแสสถานการณ์ที่ 1 (MATLAB Function)	30
ภาพที่ 3-16 การตอบสนองของกระแสสถานการณ์ที่ 1 (Simscape tool)	30
ภาพที่ 3-17 การตอบสนองของแรงดันตัวเก็บประจุขาเข้า สถานการณ์ที่ 1 (MATLAB Function) 30	
ภาพที่ 3-18 การตอบสนองของแรงดันตัวเก็บประจุขาเข้า สถานการณ์ที่ 1 (Simscape tool)	30

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3-19 การตอบสนองของกระแสสถานการณ์ที่ 2 (MATLAB Function)	30
ภาพที่ 3-20 การตอบสนองของกระแสสถานการณ์ที่ 2 (Simscape tool)	30
ภาพที่ 3-21 การตอบสนองของแรงดันตัวเก็บประจุขาเข้า สถานการณ์ที่ 2 (MATLAB Function)	31
ภาพที่ 3-22 การตอบสนองของแรงดันตัวเก็บประจุขาเข้า สถานการณ์ที่ 2 (Simscape tool).....	31
ภาพที่ 3-23 การตอบสนองของกระแสสถานการณ์ที่ 3 (MATLAB Function)	31
ภาพที่ 3-24 การตอบสนองของกระแสสถานการณ์ที่ 3 (Simscape tool)	31
ภาพที่ 3-25 การตอบสนองของแรงดันตัวเก็บประจุขาเข้า สถานการณ์ที่ 3 (MATLAB Function)	31
ภาพที่ 3-26 การตอบสนองของแรงดันตัวเก็บประจุขาเข้า สถานการณ์ที่ 3 (Simscape tool).....	31
ภาพที่ 4-1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	34
ภาพที่ 4-2 การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุขาเข้า ของการทดลองในสถานการณ์ที่ 1 (สัญญาณจาก dSPACE)	34
ภาพที่ 4-3 การตอบสนองของกระแสตัวเหนี่ยวนำ ของการทดลองในสถานการณ์ที่ 1 (สัญญาณจาก dSPACE)	35
ภาพที่ 4-4 การตอบสนองของกระแสตัวเหนี่ยวนำ ของการทดลองในสถานการณ์ที่ 1 (สัญญาณจาก ออสซิลโลสโคป).....	35
ภาพที่ 4-5 การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุขาเข้า ของการทดลองในสถานการณ์ที่ 2 (สัญญาณจาก dSPACE)	36
ภาพที่ 4-6 การตอบสนองของกระแสตัวเหนี่ยวนำ ของการทดลองในสถานการณ์ที่ 2 (สัญญาณจาก dSPACE)	36
ภาพที่ 4-7 แรงดันไฟฟ้าขาเข้าของการทดลองในสถานการณ์ที่ 3 (สัญญาณจาก dSPACE).....	37
ภาพที่ 4-8 การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุขาเข้า ของการทดลองในสถานการณ์ที่ 3 (สัญญาณจาก dSPACE)	37
ภาพที่ 4-9 การตอบสนองของกระแสตัวเหนี่ยวนำ ของการทดลองในสถานการณ์ที่ 3 (สัญญาณจาก dSPACE)	38
ภาพที่ 4-10 การตอบสนองของกระแสตัวเหนี่ยวนำของการทดลองในสถานการณ์ที่ 3	38

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคปัจจุบันที่เทคโนโลยีและพลังงานมีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวัน [1]-[2] การจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพกลายเป็นหัวใจสำคัญของความก้าวหน้าทางอุตสาหกรรมและการดำเนินชีวิต วงจรแปลงผันไฟฟ้าพลังงานกระแสตรง (DC-DC converter) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีหลักที่มีบทบาทสำคัญทั้งในงานทั่วไปและการพัฒนาระบบพลังงานหมุนเวียน โดยวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันนับว่าเป็นหนึ่งในวงจรแปลงผันไฟฟ้าที่ถูกใช้งานบ่อยที่สุดในชีวิตประจำวัน พบได้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลากหลายชนิด เช่น ระบบชาร์จแบตเตอรี่และยานยนต์ไฟฟ้า [3]

ด้านพลังงานหมุนเวียน วงจรแปลงผันไฟฟ้าพลังงานมีความสำคัญในการจัดการพลังงานจากแหล่งพลังงานสะอาด [4]-[6] เช่น แผงโซลาร์เซลล์ กังหันลม ไฟฟ้าพลังน้ำ และไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์เชื้อเพลิง แหล่งพลังงานเหล่านี้มักผลิตไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าไม่คงที่ วงจรแปลงผันไฟฟ้าจะช่วยปรับพลังงานให้เหมาะสมกับระบบโดยตรง ลดการสูญเสียพลังงานในการจัดเก็บและแจกจ่ายให้กับโหลด ทำให้การใช้ไฟฟ้าจากพลังงานสะอาดมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันสามระดับ [7] เป็นวงจรแปลงผันไฟฟ้าลดทอนระดับแรงดันตัวหนึ่งที่น่าสนใจ จากงานศึกษาในเอกสาร [7]-[8] ได้ระบุถึงข้อดีของวงจรแปลงผันไฟฟ้าชนิดนี้ เช่น สามารถลดแรงดันไฟฟ้าสูงให้ต่ำลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีอัตราการกระเพื่อมของกระแสและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ต่ำ นอกจากนี้ วงจรแปลงผันไฟฟ้ายังถูกนำไปประยุกต์ใช้กับอิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Electrolyzers) [6], [8] เพื่อผลิตพลังงานไฮโดรเจนที่สะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

อย่างไรก็ตาม มีข้อจำกัดบางประการเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างที่พบในวรรณกรรม [7] พบว่าในการต่อใช้งานแต่ละโมดูลจำเป็นต้องใช้ตัวเก็บประจุเข้าจำนวนสองตัว และเมื่อมีการต่อโมดูลเพิ่มขึ้นก็ต้องต่อชุดตัวเก็บประจุในรูปแบบอนุกรมมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความจุรวมลดลงและวงจรสามารถเก็บพลังงานได้น้อยลง นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนจากการผลิตทำให้ค่าความจุของตัวเก็บประจุแต่ละตัวไม่เท่ากัน เมื่อนำมาต่ออนุกรมจะทำให้แรงดันตกคร่อมแต่ละตัวไม่เท่ากันและอาจทำให้ตัวที่รับแรงดันสูงสุดเสียหายได้ อีกทั้งตัวเก็บประจุในทางปฏิบัติมีความต้านทานภายในจากวัสดุที่ใช้ผลิต ซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนโดยการต่ออนุกรมหลายตัวจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้น ดังนั้นการแก้ไขปัญหานี้จึงเป็นประเด็นสำคัญที่น่าสนใจ

เนื่องจากวงจรแปลงผันไฟฟ้าที่นำไปใช้กับแหล่งพลังงานหมุนเวียนมีความสำคัญ ไม่เพียงแต่ตอบสนองความต้องการในชีวิตประจำวันเท่านั้น แต่ยังมีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาด ซึ่งวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันสามระดับมีประเด็นความท้าทายที่ต้องพิจารณา โดยเฉพาะการลดจำนวนตัวเก็บประจุเข้า รวมไปถึงการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับโหลดโดยที่จะต้องรักษาความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุเข้า ประเด็นเหล่านี้เป็นพื้นฐานของการทำวิทยานิพนธ์นี้ โดยจุดมุ่งหมายคือเพื่อแก้ไขปัญหานี้และพัฒนาให้วงจรแปลงผันไฟฟ้าบัสสามระดับสามารถต่อได้ N โมดูล

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อออกแบบและสร้างโมดูลวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน และแสดงตัวอย่างการนำไปใช้งาน

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ลักษณะสมบัติภาคกำลังของวงจรแปลงผันไฟฟ้า

1.3.1.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันต่อแบบโมดูล

1.3.1.2 รับแรงดันไฟฟ้าอินพุตจำลองจากแหล่งจ่ายไฟตรงไม่ต่ำกว่า 100 V

1.3.1.3 แรงดันเอาต์พุตไฟตรงของวงจรแต่ละโมดูล ไม่เกิน 20 V

1.3.1.4 กระแสเอาต์พุตไฟตรงของวงจรแต่ละโมดูล ไม่เกิน 10 A

1.3.2 ใช้ชุดควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบดิจิตอล

1.3.2.1 สร้างสัญญาณ PWM ควบคุมสวิตช์ที่ความถี่สวิตช์ไม่ต่ำกว่า 10 kHz

1.4 วิธีการวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน

1.4.2 ออกแบบลักษณะโครงสร้างของโมดูลวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน

1.4.3 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน

1.4.3 จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

1.4.4 ออกแบบวงจรกำลังและวงจรขับเคลื่อน

1.4.5 สร้างแบบวงจรกำลังและวงจรขับเคลื่อน

1.4.6 ออกแบบการทดลองวงจร

1.4.7 เตรียมอุปกรณ์สำหรับบันทึกผลการทดลอง

1.4.8 ทดลองและแก้ไขปัญหา

1.4.9 สรุปผลและจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถลดความจำเป็นการใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าขาเข้า โดยการออกแบบวงจร ทำให้สามารถลดขนาดและจำนวนของตัวเก็บประจุไฟฟ้าขาเข้าได้ ซึ่งช่วยลดต้นทุนและลดขนาดของวงจร

1.5.2 สามารถเพิ่มความยืดหยุ่นในการใช้งาน รองรับการทำงานวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน สามารถปรับมาต่อแบบโมดูล

1.5.3 สามารถใช้แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตเพียงแหล่งเดียวเพื่อจ่ายพลังงานให้กับโหลดหลายตัวพร้อมกันได้

1.5.4 สามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ โดยทำงานควบคู่กับอิเล็กทรอนิกส์อินเวอร์ชันแบบเบรกเปลี่ยนโปรตอน เพื่อผลิตพลังงานไฮโดรเจนสะอาดที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

บทที่ 2

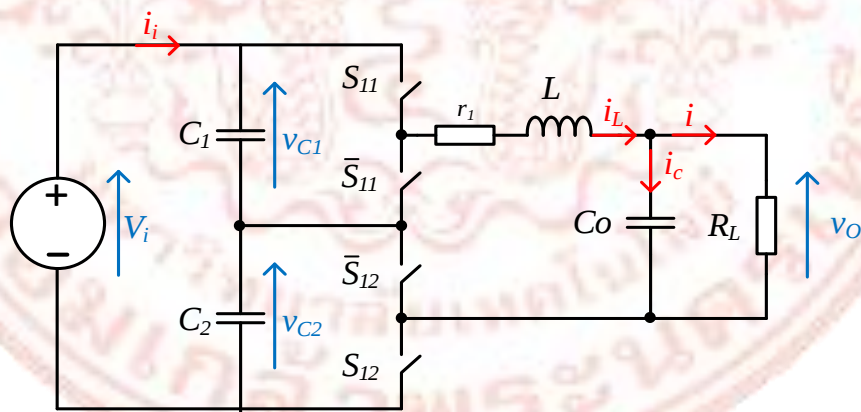
เอกสารและงานที่เกี่ยวข้อง

การจัดทำโมดูลวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันได้ศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

- 2.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันสามระดับ (Three-levels buck converter)
- 2.2 ตัวควบคุมโหมดเลื่อนทางอ้อม (In-direct sliding mode controller)
- 2.3 อิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEM electrolyzer)
- 2.4 แบบจำลองอิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน
- 2.5 การออกแบบความกว้างของแผ่นลายวงจรพิมพ์

2.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันสามระดับ

วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันสามระดับ [7] แสดงดังภาพที่ 2-1 เป็นวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงชนิดหนึ่ง ที่มีจุดเด่นคือ 1) มีประสิทธิภาพสูงถึง 96-98% 2) สามารถเลือกใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำน้อยกว่าและค่าตัวเก็บประจุที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันดั้งเดิม เนื่องจากวงจรสร้างแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่สูงเป็นสองเท่าของความถี่สวิตช์ 3) สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพลดลงมาก 4) มีสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำ 5) มีอัตราการกระเพื่อมของกระแสและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ต่ำ อย่างไรก็ตามวงจรนี้ก็มีข้อเสียที่ต้องพิจารณา คือ วงจรมีความซับซ้อนมากขึ้นเนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์สวิตช์และไดโอดจำนวนมากขึ้นจำเป็นต้องใช้ตัวควบคุมที่มีการทำงานซับซ้อนเพื่อควบคุมสวิตช์ให้จ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ตามต้องการ



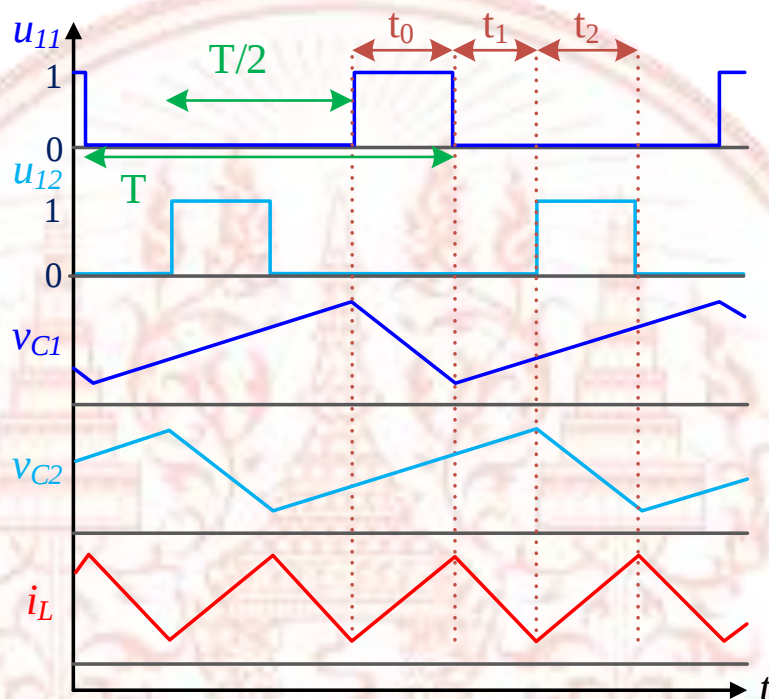
ภาพที่ 2-1 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันสามระดับ

2.2.1 การทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันสามระดับ

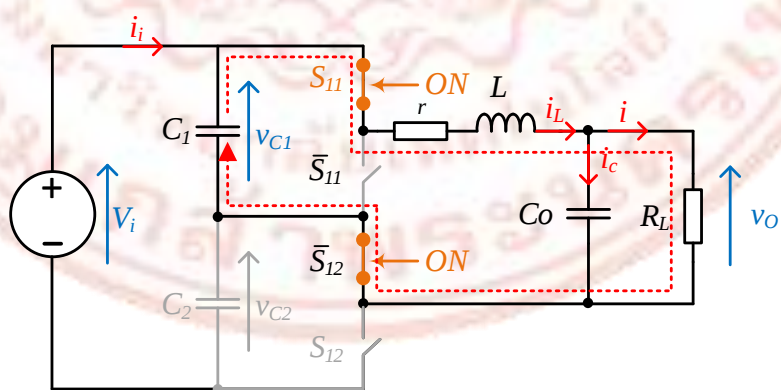
สิ่งสำคัญที่จะทำให้วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันสามระดับจ่ายแรงดันหรือกระแสตามที่ผู้ใช้งานต้องการนั้นขึ้นอยู่กับสัญญาณคำสั่งสวิตช์ จากการทำงานของวงจรตามคำสั่งสวิตช์ดังภาพที่ 2-2 ($u_{1j} = 1$ ทำให้สวิตช์ปิดวงจร และ $u_{1j} = 0$ ทำให้สวิตช์เปิดวงจร เมื่อ $j = 1, 2$) และได้วงจรย่อยแต่ละช่วงเวลาการปิดเปิดของสวิตช์ดังภาพที่ 2-3 และ ภาพที่ 2-5 โดยสัญญาณควบคุมสวิตช์จะเหลื่อมกัน 180 องศา ส่วนไดโอดจะปิดเปิดวงจรในลักษณะตรงข้ามกับสวิตช์ที่ต่อร่วมในกิ่งเดียวกัน และค่าภาระรอบการทำงาน (Duty cycle) หาได้จากอัตราส่วนของช่วงเวลา t_0 กับคาบเวลาในการสวิตช์

$$D = \frac{t_0}{T} \quad (2-1)$$

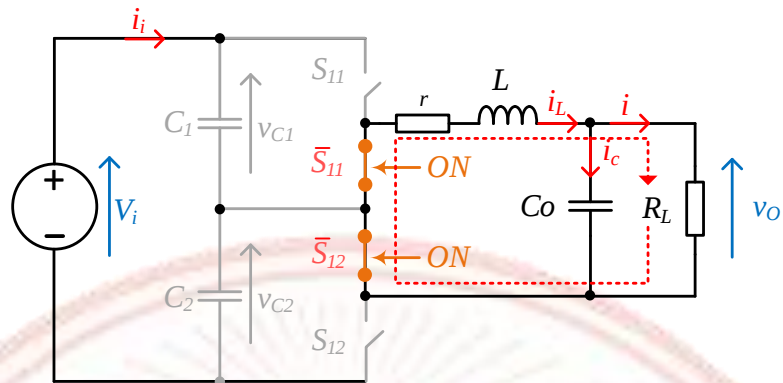
การเปลี่ยนแปลงค่าช่วงเวลา t_0 ทำให้ค่าภาระรอบการทำงานเปลี่ยนแปลงทำให้รูปแบบของวงจรย่อยมีสองแบบโดยแบบแรกจะเกิดในกรณี $D < 0.5$ และ $D > 0.5$ ในภาพที่ 2-2 ถึงภาพที่ 2-5 เป็นกรณีที่ $D < 0.5$ โดย D คือ ภาระรอบการทำงาน (Duty cycle)



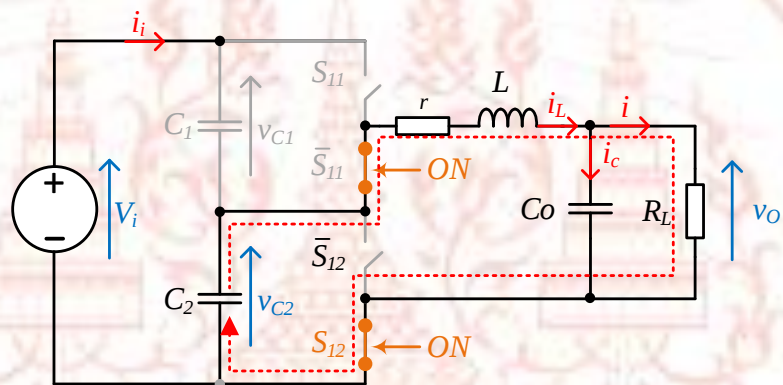
ภาพที่ 2-2 คำสั่งสวิตช์ในสภาวะคงตัว เมื่อ $D < 0.5$



ภาพที่ 2-3 การทำงานของวงจรในช่วงเวลา t_0 ขณะสวิตช์ S_{11} ปิดวงจร และ S_{12} เปิดวงจร



ภาพที่ 2-4 การทำงานของวงจรในช่วงเวลา t_1 สวิตช์ S_{11} และ S_{12} เปิดวงจร



ภาพที่ 2-5 การทำงานของวงจรในช่วงเวลา t_2 สวิตช์ S_{12} ปิดวงจร และสวิตช์ S_{11} เปิดวงจร

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุอินพุตต่อเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปจะได้สมการดังนี้:

$$\frac{dv_{C1}}{dt} = \frac{(i_i - i_L u_{11})}{C_1} \quad (2-2)$$

$$\frac{dv_{C2}}{dt} = \frac{(i_i - i_L u_{12})}{C_2} \quad (2-3)$$

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังโหลดต่อเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปจะได้สมการดังนี้:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{(v_{C1} u_{11} + v_{C2} u_{12} + r i_i - v_o)}{L} \quad (2-4)$$

และการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าขาออกต่อเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C_o} (i_L - i) \quad (2-5)$$

โดย i_i คือ กระแสไฟฟ้าขาเข้า

- v_{C1}, v_{C2} คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุขาเข้า
 i_L คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังโหลด
 i คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไปยังโหลด
 v_o คือ แรงดันไฟฟ้าขาออก
 u_{11} คือ สัญญาณคำสั่งสวิตช์ S_{11}
 u_{12} คือ สัญญาณคำสั่งสวิตช์ S_{12}
 L คือ ตัวเหนี่ยวนำกรองกระแสไฟฟ้าขาออก
 r คือ ค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำกรองกระแสไฟฟ้าขาออก
 C_o คือ ตัวเก็บประจุกรองแรงดันขาออก
 C_1, C_2 คือ ตัวเก็บประจุกรองแรงดันขาเข้า

2.1.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันขาออกต่อขาเข้า

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2-4) ในสภาวะคงตัวดังภาพที่ 2-2 จะได้ว่า

$$v_{C1}u_{11} + v_{C2}u_{12} = v_o - ri_i \quad (2-6)$$

และเมื่อพิจารณาคำสั่งสวิตช์ที่ภาระรอบการทำงาน $D < 0.5$ $u_{12} = u_{11} = \frac{D}{2}$ และกำหนดให้ $v_{C1} = v_{C2} = \frac{V_i}{2}$

$$\frac{V_i}{2}D = v_o - ri_i \quad (2-7)$$

จากสมการที่ (2-7) สามารถนำมาพิจารณาหาสมการคำนวณหาแรงดันขาออกได้ และสมมติให้ค่าความต้านทานในตัวเหนี่ยวนำมีค่าน้อยมาก ๆ จนเข้าใกล้ศูนย์จะได้

$$v_o = \frac{DV_i}{2} \quad (2-8)$$

ในกรณีที่ภาระรอบการทำงาน $D > 0.5$ สามารถพิจารณาหาอัตราส่วนระหว่างแรงดันขาออกและขาเข้าได้เช่นเดียวกันด้วยวิธีทำนองเดียวกันนี้ โดยที่

$$v_o = V_i D \quad (2-9)$$

ดังนั้นในงานที่ต้องการแรงดันขาออกต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของแรงดันขาเข้าจะต้องให้วงจรทำงานในช่วงภาระรอบการทำงาน $D < 0.5$

2.2 การควบคุมโหมดเลื่อนแบบทางอ้อม

การควบคุมโหมดเลื่อนแบบทางอ้อม [6] เป็นเทคนิคการควบคุมที่ใช้ในการควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear system) โดยใช้หลักการของการควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด (Sliding mode control) ซึ่งเป็นการควบคุมที่สามารถทำให้ระบบมีความเสถียรและทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ได้ในระดับหนึ่ง จากการทบทวนวรรณกรรม [6],[9],[10] สามารถเขียนโครงสร้างของตัวควบคุมได้ดังภาพที่ 2-5

เมื่อพิจารณาระบบที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สามารถแทนค่าระบบได้อย่างแม่นยำและครบถ้วนทุกด้าน (Perfect modeling) ในการอธิบายพฤติกรรมของระบบอย่างละเอียด จึงทำให้สามารถคาดการณ์และควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งสามารถเขียนแสดงไว้ได้ดังสมการที่ (2-10)

$$\dot{X} = AX + BU + C \quad (2-10)$$

จากสมการแสดงให้เห็นว่า AX นั้นแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของระบบตามธรรมชาติ BU แสดงถึงผลกระทบของการควบคุมที่เราป้อนเข้าไป และ C แสดงถึงค่าคงที่หรือการรบกวนคงที่ในระบบ

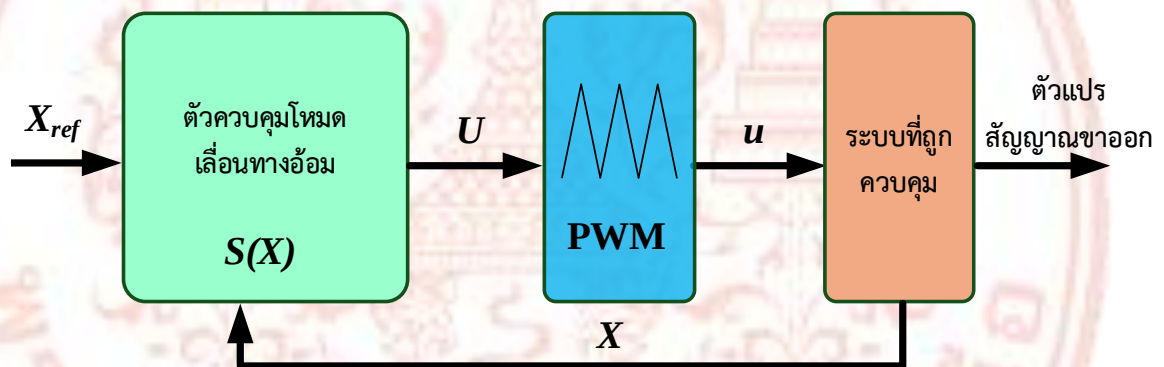
โดย $\dot{X}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของสถานะระบบต่อเวลา

X คือ เวกเตอร์สถานะขนาด n มิติ ที่อธิบายสถานะของระบบ

A คือ เมทริกซ์ขนาด $n \times n$ ที่อธิบายพลวัตภายในของระบบ

B คือ เวกเตอร์ขนาด n มิติ ที่อธิบายผลกระทบของคำสั่งควบคุม

U คือ คำสั่งควบคุม (Command) ขนาด $n \times 1$ มิติ



ภาพที่ 2-6 โครงสร้างของตัวควบคุมโหมดเลื่อนแบบทางอ้อม

ในการควบคุมระบบให้ลู่เข้าสู่จุดอ้างอิงที่ต้องการ เราสามารถกำหนดเส้นทางของระบบที่เรียกว่า พื้นผิวสไลด์ (Sliding surface) ดังสมการที่ (2-11) โดยใช้สัญลักษณ์ S แทนพื้นผิวดังกล่าว ซึ่งพารามิเตอร์สถานะ (X) จะเคลื่อนที่ตามแนววิถีอ้างอิง (X_{ref}) ที่เรากำหนด

$$S(X) = G(X - X_{ref}) \quad (2-11)$$

โดย G คือ ค่าคงที่ซึ่งใช้สำหรับกำหนดลักษณะพลวัตที่ต้องการของระบบควบคุม

ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับพื้นผิวสไลด์ เพื่อให้ระบบลู่เข้าสู่จุดที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วและมีเสถียรภาพ สามารถใช้กฎการเข้าถึง (Reaching law) แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential) เพื่อควบคุมพฤติกรรมของระบบให้เป็นไปตามที่ต้องการสามารถเขียนได้ดังสมการ ที่ (2-12)

$$\dot{S}(X) = -\lambda S \quad (2-12)$$

สำหรับคำสั่งควบคุม (U) ของระบบสามารถหาได้โดยการพิจารณาให้พื้นผิวสไลด์เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นลู่เข้าสู่ศูนย์ดังนี้

$$U = (GB)^{-1} \left((-\lambda G - GA)X + \lambda GX_{ref} + G\dot{X}_{ref} - GC \right) \quad (2-13)$$

การตอบสนองของระบบที่ควบคุมด้วยโหมดเลื่อนแบบทางอ้อมสามารถศึกษาได้จากการพิจารณา ค่า Eigenvalue ที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์การควบคุมซึ่งก็คือ λ และ G ทำการแทนค่า U ของสมการ (2-13) ลงในสมการ (2-10) จะได้การตอบสนองของระบบดังนี้

$$\dot{X} = \underbrace{(A + B(GB)^{-1}(-\lambda G - GA))}_M X + B(GB)^{-1}(\lambda GX_{ref} + G\dot{X}_{ref} - GC) + C \quad (2-14)$$

โดย M คือ เมทริกซ์ของระบบที่ถูกควบคุม (Closed-loop system matrix) ที่ได้จากการแทนค่าตัวควบคุม U จากสมการ (2-13)

เมื่อแปลงลาปลาซสามารถหาค่า Eigenvalue ของระบบที่ถูกควบคุมด้วยดีเทอร์มิแนนต์ดังนี้

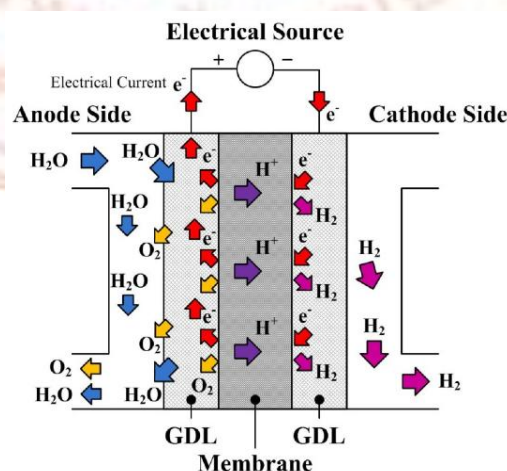
$$\det(sI - M) = 0 \quad (2-15)$$

เมื่อพิจารณาให้ค่า λ และ G เท่ากัน จะได้ค่า Eigenvalue ของตัวควบคุมคือ λ และ G ภายใต้เงื่อนไขที่พิจารณาทำให้ค่า Eigenvalue ของตัวควบคุมจะไม่ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ใดของระบบจากจุดนี้จึงทำให้การควบคุมโหมดเลื่อนแบบทางอ้อมมีความเสถียรและทนทานต่อการรบกวนได้ดี

2.3 อิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

อิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน หรือ Proton exchange membrane electrolyzer [11] เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนผ่านกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Water electrolysis) โดยใช้เมมเบรนชนิดพิเศษที่ยอมให้โปรตอนผ่านได้ เทคโนโลยีนี้ได้รับความสนใจอย่างมากในการผลิตไฮโดรเจนสะอาดสำหรับการใช้งาน

องค์ประกอบหลักของอิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน [11],[12] แสดงดังภาพที่ 2-7 ประกอบด้วย 1) แอโนด (Anode) ทำหน้าที่แยกโมเลกุลน้ำ 2) แคโทด (Cathode) : ทำหน้าที่รวมโปรตอนเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจน 3) เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางนำโปรตอนจากแอโนดไปยังแคโทด 4) ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เช่น แพลทินัมหรืออิริเดียมออกไซด์ ช่วยเร่งปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี



ภาพที่ 2-7 องค์ประกอบของอิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดเมมเบรน [11]

กระบวนการทำงานเริ่มต้นโดยการจ่ายน้ำบริสุทธิ์เข้าสู่ด้านแอโนด เมื่อให้พลังงานไฟฟ้า น้ำจะแตกตัวเป็นโปรตอน (H^+) อิเล็กตรอน (e^-) และก๊าซออกซิเจน (O_2) ตามสมการ :



โปรตอน (H^+) ที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไปยังแคโทด ในขณะที่อิเล็กตรอน (e^-) จะเดินทางผ่านวงจรภายนอก เมื่อถึงแคโทด โปรตอนและอิเล็กตรอนจะรวมตัวกันเพื่อสร้างก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ตามสมการ:



ผลลัพธ์ของกระบวนการนี้คือการได้ก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ที่ด้านแคโทด และก๊าซออกซิเจนที่ด้านแอโนด ซึ่งสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น พลังงานทดแทน ยานยนต์ เป็นต้น

ประสิทธิภาพทางพลังงานของอิเล็กโทรไลเซอร์ [13] สามารถคำนวณได้จากสมการ :

$$\eta = \frac{P_{H_2}}{P_{el}} \quad (2-18)$$

โดย η คือ ประสิทธิภาพทางพลังงาน

P_{H_2} คือ กำลังที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจน (วัตต์)

P_{el} คือ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรไลเซอร์ (วัตต์)

ซึ่งกำลังที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนหาได้จากสมการ [14],[15] ด้านล่างนี้

$$P_{H_2} = \dot{N}H_2 \times H_{HV} \quad (2-19)$$

โดย $\dot{N}H_2$ คือ อัตราการผลิตไฮโดรเจน (mol / s)

H_{HV} คือ ค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value) ของไฮโดรเจนมีค่า 285.8 kJ/mol ที่ 25°C และอัตราการผลิตไฮโดรเจนหาได้จาก [12] ดังสมการ:

$$\dot{N}H_2 = \frac{\eta_F n_c i_{el}}{zF} \quad (2-20)$$

โดย η_F คือ ประสิทธิภาพของฟาราเดย์ (Faraday's efficiency) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของไฮโดรเจนที่วัดได้กับอัตราการไหลของไฮโดรเจนตามทฤษฎีที่สามารถผลิตได้ตามพลังงานที่ป้อนเข้า ประสิทธิภาพของฟาราเดย์มีค่าเท่ากับ 0.96 โดยอิงจากการทดลอง

n_c คือ จำนวนเซลล์ของอิเล็กโทรไลเซอร์

i_{el} คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับของอิเล็กโทรไลเซอร์ มีหน่วยเป็นแอมแปร์

z คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่แลกเปลี่ยนในระหว่างปฏิกิริยา สำหรับไฮโดรเจน (H_2) ค่า $z = 2$

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ เท่ากับ 96,485 ($C. mol^{-1}$)

2.4 แบบจำลองอิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

แบบจำลองอิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน [11] เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือการจำลองด้วยซอฟต์แวร์เพื่อใช้ศึกษา วิเคราะห์ พฤติกรรมและประสิทธิภาพของ

อิเล็กโทรไลเซอร์จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องจาก [11] ถึง [13] พบว่ามีแบบจำลอง 3 รูปแบบดังนี้

2.4.1 แบบจำลองพฤติกรรมตัวต้าน (Resistive model)

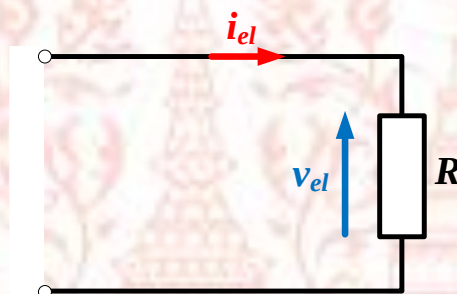
แบบจำลองตัวต้านเป็นแบบจำลองอย่างง่ายในการแสดงพลังงานไฟฟ้าที่ถ่ายโอนไปยังอิเล็กโทรไลเซอร์แสดงดังภาพที่ 2-8 สมการแบบจำลองเขียนไว้ดังนี้:

$$v_{el} = i_{el}R \quad (2-21)$$

โดย R คือ ความต้านทานเทียบเคียงของอิเล็กโทรไลเซอร์โดยพิจารณาจากลักษณะสมบัติ (Characteristic)

v_{el} คือ แรงดันไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลเซอร์ มีหน่วยเป็นโวลต์

i_{el} คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับของอิเล็กโทรไลเซอร์ มีหน่วยเป็นแอมแปร์



ภาพที่ 2-8 วงจรเทียบเคียงแบบจำลองอิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดเมมเบรนด้วยตัวต้านทาน

2.4.2 แบบจำลองพฤติกรรมคงที่ (Static model)

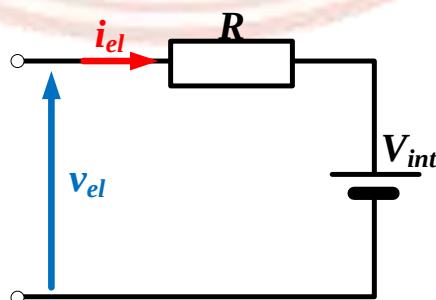
แบบจำลองนี้แสดงดังภาพที่ 2-9 เป็นการจำลองตามคุณลักษณะกระแส-แรงดัน (I-V characteristic curve) ในสภาวะคงตัว ที่ประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับแบบคงที่ (Reversible voltage) ความต้านทานสมมูล (Equivalent resistance) แทนความต้านทานภายในเยื่อเมมเบรน ซึ่งสมการแบบจำลองเขียนไว้ดังนี้

$$v_{el} \cong V_{int} + i_{el}R \quad (2-22)$$

โดย R คือ ความต้านทานสมมูลที่ขาแอโนด (Equivalent resistance)

V_{int} คือ แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับของอิเล็กโทรไลเซอร์ มีหน่วยเป็นโวลต์

i_{el} คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับของอิเล็กโทรไลเซอร์ มีหน่วยเป็นแอมแปร์



ภาพที่ 2-9 วงจรเทียบเคียงแบบจำลองอิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดแบบจำลองพฤติกรรมคงที่

2.4.3 แบบจำลองพฤติกรรมพลวัต (Dynamic model)

วงจรแบบจำลองพฤติกรรมแบบพลวัตแสดงดังภาพที่ 2-10 เป็นการจำลองที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง แบบจำลองแบบนี้ให้ผลการจำลองที่แม่นยำกว่าแบบจำลองพฤติกรรมคงที่ และ ตัวต้านทาน โดยเฉพาะเมื่อใช้งานกับแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวน แม้ว่าจะซับซ้อนกว่าก็ตาม การเลือกแบบจำลองจึงขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน โดยสมการแบบจำลองเขียนไว้ดังนี้

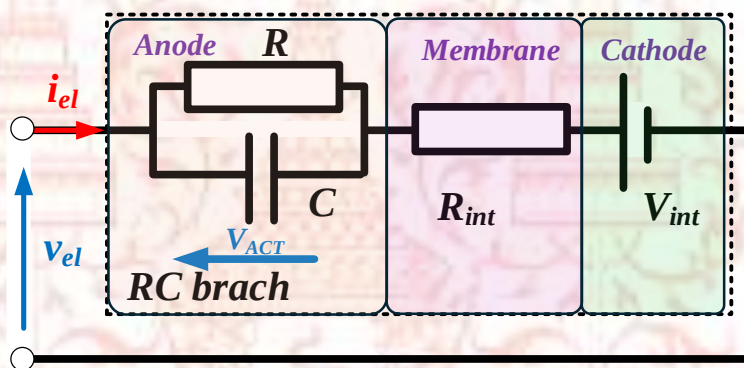
$$v_{el} = V_{int} + v_{ACT} + R_{int}i_{el} \quad (2-23)$$

โดย V_{int} คือ แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับของอิเล็กโทรไลเซอร์ มีหน่วยเป็นโวลต์

V_{ACT} คือ แรงดันไฟฟ้าเกินขณะทำงาน (Activation overvoltage) มีหน่วยเป็นโวลต์

R_{int} คือ ค่าความต้านทานเมมเบรน มีหน่วยเป็นโอห์ม

i_{el} คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับของอิเล็กโทรไลเซอร์ มีหน่วยเป็นแอมแปร์



ภาพที่ 2-10 วงจรเทียบเคียงแบบจำลองอิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดเมมเบรนแบบพลวัต

2.5 การออกแบบความกว้างของแผ่นลายวงจรพิมพ์ความถี่ต่ำ

ในการออกแบบและผลิตแผงวงจรพิมพ์ (PCB) [16] สิ่งสำคัญประการหนึ่งคือการกำหนดความกว้างของลายวงจร (PCB Trace Width) ให้เหมาะสม เพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างเสถียรและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ซึ่งการคำนวณความกว้างลายวงจร PCB นั้นมีปัจจัยหลายอย่างที่ต้องพิจารณา ได้แก่ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านลายวงจร (Maximum current) อุณหภูมิสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum allowable temperature) ความหนาของทองแดงบน PCB (Copper thickness) และอุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature)

ในอุตสาหกรรมการผลิต PCB และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ นิยมใช้มาตรฐานสากล IPC-2221 [17] "Generic Standard on Printed Board Design" ซึ่งพัฒนาโดยสมาคม IPC (Association Connecting Electronics Industries)

2.5.1 ขั้นตอนการออกแบบความกว้างของลายวงจร

จากการศึกษาใน [16] ถึง [19] พบว่ามีขั้นตอนในการออกแบบดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาพื้นที่

$$A = \left(\frac{I}{k \times T_{Rise}^b} \right)^{\frac{1}{c}} \quad (2-24)$$

โดย A คือ พื้นที่ของลายวงจร ใช้หน่วยตารางมิล (mils²)

I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลายวงจรนั้น ๆ ใช้หน่วยแอมแปร์

T_{Rise} คือ อุณหภูมิของแผงวงจรพิมพ์ที่เพิ่มขึ้นใช้หน่วยองศาเซลเซียส

k, b, c คือ เป็นค่าคงที่จากมาตรฐาน IPC-2221

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาความกว้าง

$$W = \frac{A}{t \times 1.378} \quad (2-25)$$

โดย t คือ ความหนาของชั้นทองแดง (Copper thickness) ใช้หน่วยออนซ์



บทที่ 3

แบบจำลองคณิตศาสตร์ ตัวควบคุม และการออกแบบวงจร

วัตถุประสงค์หลักของวิทยานิพนธ์นี้คือการออกแบบและสร้างโมดูลวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันพร้อมทั้งยกตัวอย่างการนำไปใช้งาน เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าวจึงได้ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องมาแล้วในบทที่ 2 ซึ่งบทนี้ได้นำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการออกแบบและสร้างวงจรนี้ขึ้นดังหัวข้อด้านล่างนี้

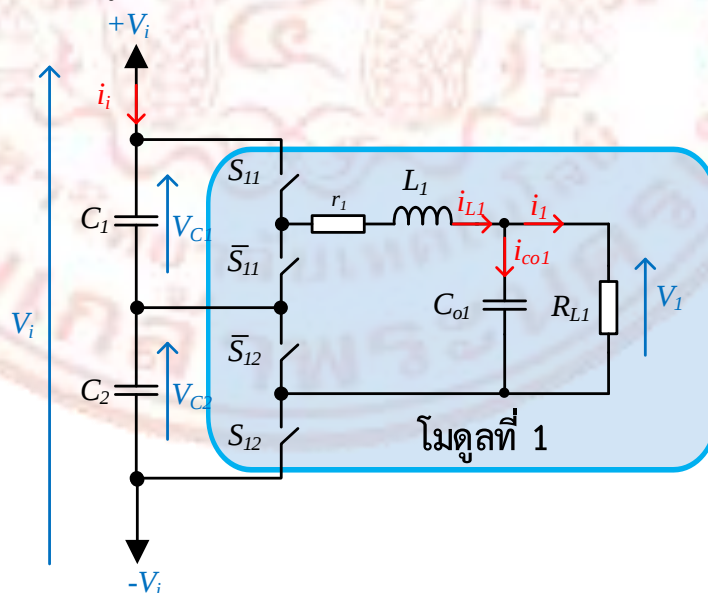
- 3.1 การออกแบบลักษณะโครงสร้างของโมดูลวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน
- 3.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับโมดูลวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน
- 3.3 ตัวควบคุมโหมตเลื่อนแบบทางอ้อมสำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน N โหมด
- 3.4 ตัวควบคุมโหมตเลื่อนแบบทางอ้อมสำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน 3 โหมด
- 3.5 จำลองเลียนแบบการทำงานของโมดูลวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันด้วยโปรแกรม

MATLAB/Simulink

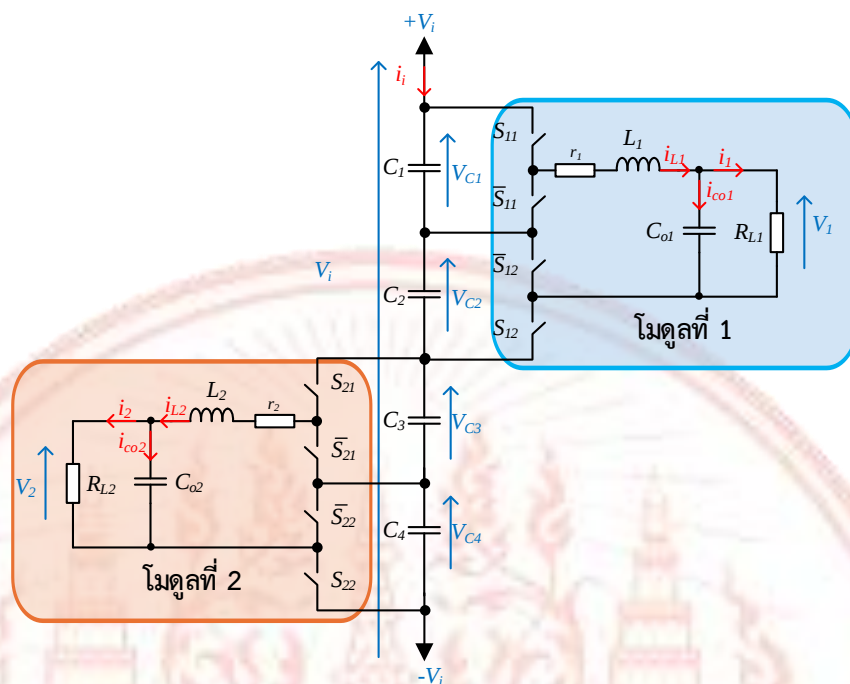
- 3.6 ออกแบบความกว้างลายวงจรพิมพ์วงจรต้นแบบ

3.1 การออกแบบลักษณะโครงสร้างของโมดูลวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน

จากจุดเด่นของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันสามระดับที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.1 นั้นจึงได้นำวงจรมาเป็นตัวตั้งต้นพัฒนาเป็นโมดูลวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน เมื่อพิจารณาวงจรแปลงผันจากภาพที่ 3-1 พบว่าหนึ่งโมดูลนั้นใช้ตัวเก็บประจุเข้าจำนวน 2 ตัว และเมื่อพิจารณาต่อว่าหากต้องการต่อวงจรจำนวน 2 โมดูลจะพบว่าต้องใช้ตัวเก็บประจุต่ออนุกรมถึง 4 ตัว ดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-1 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันต่อ 1 โมดูล



ภาพที่ 3-2 วงจรแปลงไฟฟ้าแบบลดแรงดันต่อ 2 โมดูล

เมื่อพิจารณาจำนวนตัวเก็บประจุขาเข้าต่อจำนวนโมดูลที่ต้องการต่อใช้งานจากภาพที่ 3-1 และภาพที่ 3-2 จะพบว่า

$$\text{จำนวนตัวเก็บประจุขาเข้า} = 2 \times \text{จำนวนโมดูลที่ต้องการต่อใช้งาน} \quad (3-1)$$

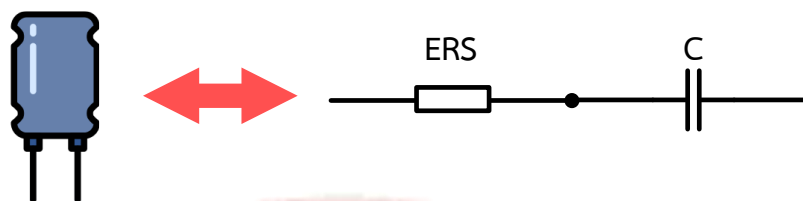
จากสมการ (3-1) แสดงให้เห็นว่ายิ่งต่อโมดูลมากขึ้นจำเป็นต้องใช้ตัวเก็บเก็บประจุต่ออนุกรมที่มากขึ้น

จากสมการ (3-2) แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีตัวเก็บประจุหลายตัวต่ออนุกรมค่าความจุรวมจะน้อยกว่าค่าของตัวเก็บประจุที่มีค่าน้อยที่สุดในชุดนั้นซึ่งส่งผลให้วงจรสามารถเก็บพลังงานได้น้อยลง

$$C_{total} = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N} \right)^{-1} \quad (3-2)$$

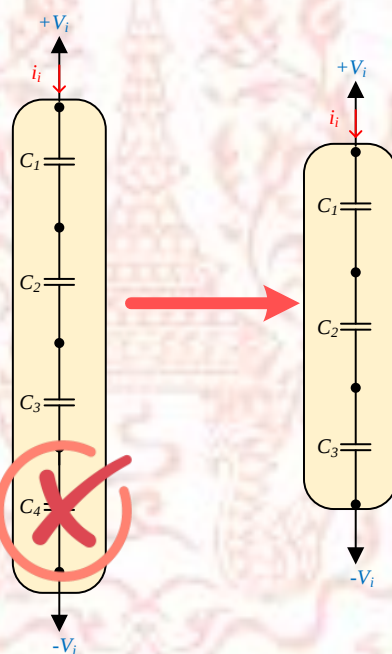
อีกทั้งตัวเก็บประจุในทางปฏิบัติมีความผิดพลาดโดยธรรมชาติจึงทำให้ค่าตัวเก็บประจุไม่เท่ากันทุกตัว เมื่อต่อตัวเก็บประจุหลายตัวแบบอนุกรมและแต่ละตัวมีค่าความจุไม่เท่ากันจะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมแต่ละตัวจะไม่เท่ากันซึ่งอาจทำให้ตัวเก็บประจุที่รับแรงดันสูงสุดเสียหายก่อน

และจากภาพที่ 3-3 เป็นวงจรเทียบเคียงอย่างง่ายของตัวเก็บประจุ จะพบว่าในภาพมีค่าความต้านทานภายในของตัวเก็บประจุ (Equivalent series resistance: ESR) ซึ่งเกิดจากวัสดุที่นำมาทำตัวเก็บประจุทำให้ตัวเก็บประจุไม่ได้เป็นอุดมคติที่มีแต่ค่าความจุเพียงอย่างเดียว แต่มีความต้านทานที่ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายิ่งต่ออนุกรมตัวเก็บประจุหลายตัวจะส่งผลให้สูญเสียพลังงานมากขึ้น

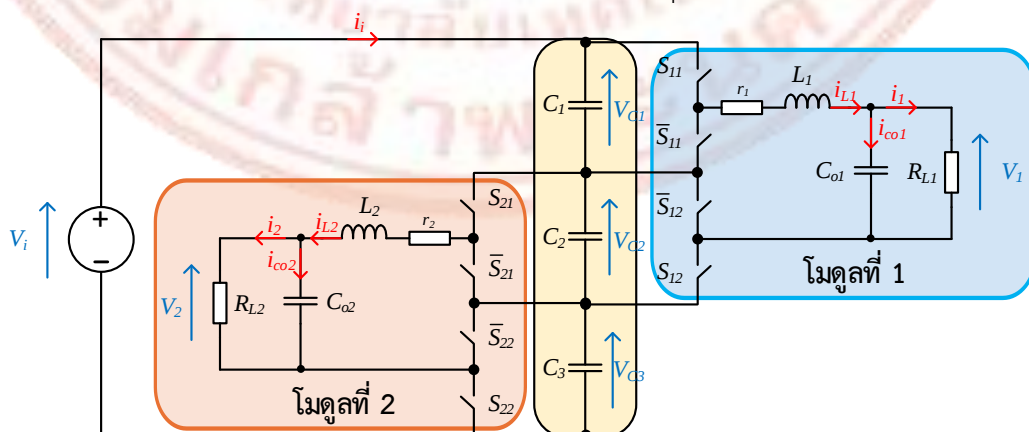


ภาพที่ 3-3 วงจรเทียบเคียงอย่างง่ายของตัวเก็บประจุไฟฟ้า [20]

เพื่อปรับปรุงจุดบกพร่องจากประเด็นปัญหาที่กล่าวมาจึงออกแบบลักษณะวงจรภายใต้แนวคิดที่สามารถนำวงจรมาต่อกันในลักษณะโมดูลได้ และสามารถลดจำนวนตัวเก็บประจุเข้าได้ โดยเริ่มต้นจากการพิจารณาจากภาพที่ 3-2 พบว่า 2 โมดูลนั้นใช้ตัวเก็บประจุจำนวน 4 ตัว ดังนั้นจึงทำการลดจำนวนตัวเก็บประจุลงหนึ่งตัวโดยการนำ C_4 ออกไป ดังแสดงในภาพที่ 3-4

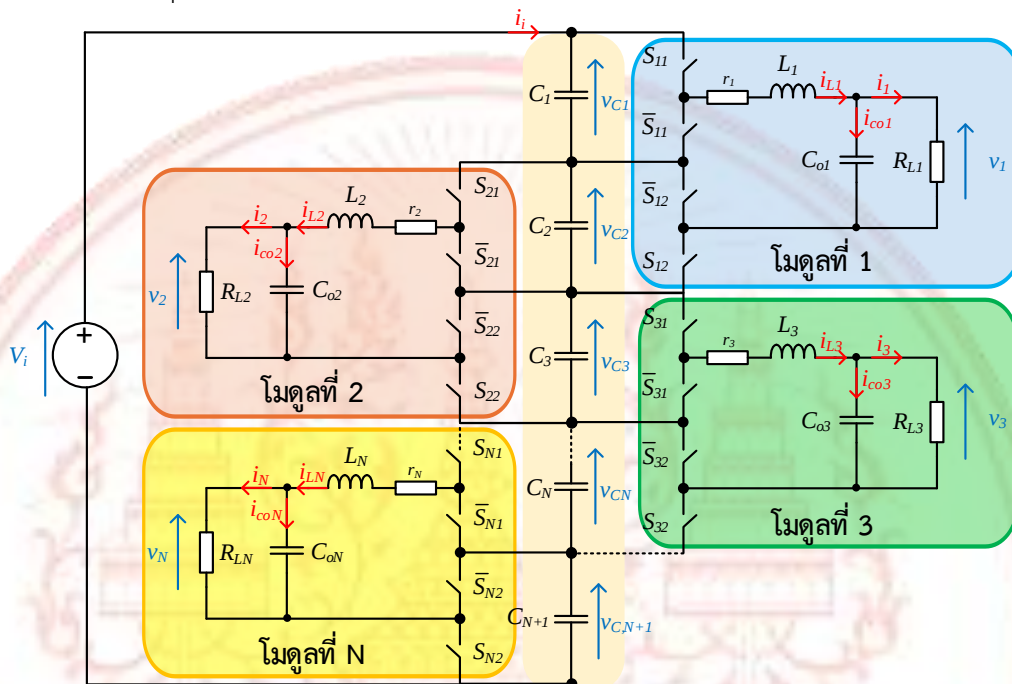


ภาพที่ 3-4 ลดจำนวนตัวเก็บประจุเข้า

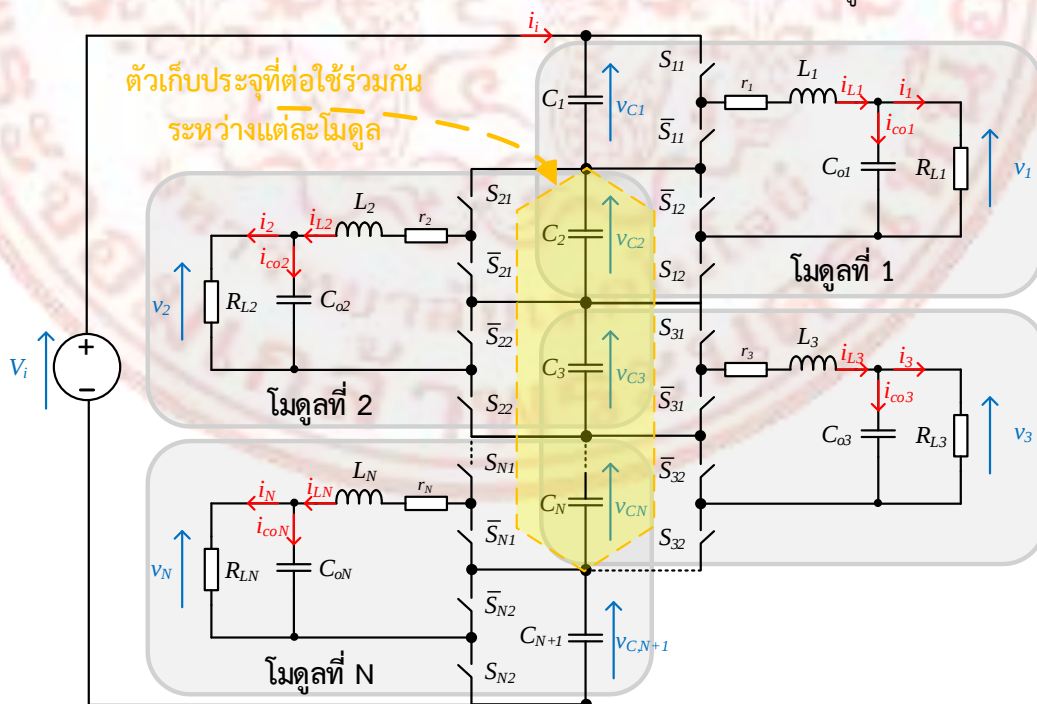


ภาพที่ 3-5 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันจำนวน 2 โมดูลที่น่าเสนอ

แล้วนำวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันสามระดับจำนวนสองโมดูลมาต่อเข้ากับตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกันไว้จะได้วงจรแปลงผันไฟฟ้าภาพที่ 3-5 และเมื่อพิจารณาวงจรในลักษณะทำนองเดียวกันจะทำให้สามารถต่อวงจรแปลงผันไฟฟ้าได้ทั้งสิ้นจำนวน N โมดูลดังแสดงในภาพที่ 3-6 และสามารถใช้งานจำนวนตัวเก็บประจุเข้าได้น้อยลงจำนวน $N-1$ ตัว เมื่อเทียบกับภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-6 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันต่อลักษณะโมดูล



ภาพที่ 3-7 ตัวเก็บประจุเข้าที่ต่อใช้ร่วมกัน

ลักษณะของวงจรแปลงผันที่ออกแบบประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุขาเข้าที่ต่ออนุกรมกันจำนวน $N+1$ ตัว ต่อขนานเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าขาเข้า ตัวเก็บประจุขาเข้าเหล่านี้จะทำหน้าที่แบ่งแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อรอป้อนแรงดันให้กับโหลดด้วยโมดูลวงจรแปลงผันไฟฟ้า ซึ่งแรงดันที่จ่ายให้กับโหลดจะขึ้นอยู่กับการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้าตามสัญญาณคำสั่งควบคุมซึ่งจะกล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2

จากการออกแบบวงจรในลักษณะนี้ทำให้เกิดจุดเด่นดังนี้

- 1) สามารถเลือกใช้ตัวเก็บประจุขาเข้าที่มีพิกัดแรงดันต่ำกว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าขาเข้า
- 2) ลดจำนวนการใช้ตัวเก็บประจุขาเข้า
- 3) สามารถเลือกใช้สวิตช์แต่ละโมดูลที่มีพิกัดแรงดันต่ำกว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าขาเข้า

แต่มีข้อจำกัดคือจำเป็นต้องใช้ตัวควบคุมที่ค่อนข้างซับซ้อนเนื่องจากวงจรมีวงจรแปลงผันไฟฟ้าหลายตัว วงจรทำงานไม่เป็นเชิงเส้น ลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ไม่เป็นอุดมคติ อีกทั้งค่าความผิดพลาดจากอุปกรณ์เช่นค่าความเหนี่ยวนำ ค่าตัวเก็บประจุ ซึ่งมีผลต่อจุดทำงาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ตัวควบคุมที่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบซึ่งตัวควบคุมจะกล่าวไว้ในข้อที่ 3.3

ตารางที่ 3-1 ความหมายของพารามิเตอร์

พารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย
N	จำนวนโมดูลทั้งหมด	
V_i	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	โวลต์ (V)
$v_{o1}, v_{o2}, v_{o3}, \dots, v_{oN}$	แรงดันไฟฟ้าขาออก	โวลต์ (V)
$v_{c1}, v_{c2}, v_{c3}, v_{cN}, \dots, v_{c,N+1}$	แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขาเข้า	โวลต์ (V)
i_i	กระแสไฟฟ้าขาเข้า	แอมแปร์ (A)
$i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}, \dots, i_{LN}$	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังโหลด	แอมแปร์ (A)
$i_{Co1}, i_{Co2}, i_{Co3}, \dots, i_{CoN}$	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุไฟฟ้าขาออก	แอมแปร์ (A)
$i_1, i_2, i_3, \dots, i_N$	กระแสไฟฟ้าที่ไหลไปยังโหลด	แอมแปร์ (A)
$C_1, C_2, C_3, C_N, \dots, C_{N+1}$	ตัวเก็บประจุไฟฟ้าขาเข้า	ฟารัด (F)
$C_{o1}, C_{o2}, C_{o3}, \dots, C_{oN}$	ตัวเก็บประจุไฟฟ้าขาออก	ฟารัด (F)
$L_1, L_2, L_3, \dots, L_N$	ตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่กรองกระแสขาออก	เฮนรี (H)
$r_1, r_2, r_3, \dots, r_N$	ค่าความต้านทานในตัวเหนี่ยวนำ	โอห์ม (Ω)
$R_{L1}, R_{L2}, R_{L3}, \dots, R_{LN}$	ค่าความต้านทานโหลด	โอห์ม (Ω)
$S_{k1}, S_{k2}, \bar{S}_{k1}, \bar{S}_{k2}$	สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ($k = 1, 2, 3, \dots, N$)	

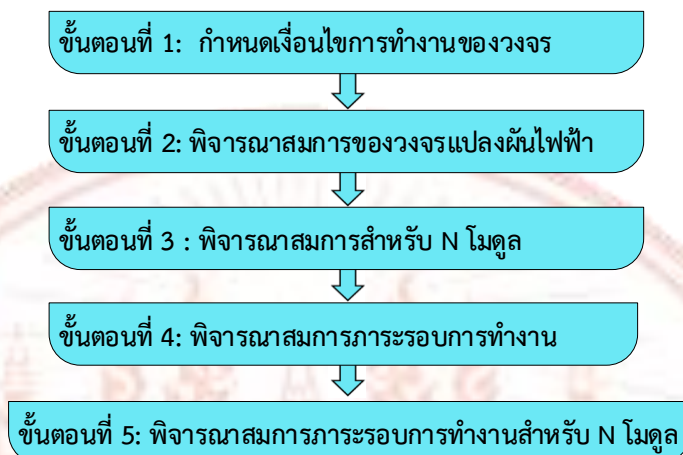
3.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับโมดูลวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน

ในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ได้กำหนดขั้นตอนในการพิจารณาดังภาพที่ 3-8

ขั้นตอนที่ 1: กำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจร

- 1) พิจารณาแบบจำลองเฉลี่ย (Average model)
- 2) วงจรทำงานในสภาวะอยู่ตัว (Steady state)

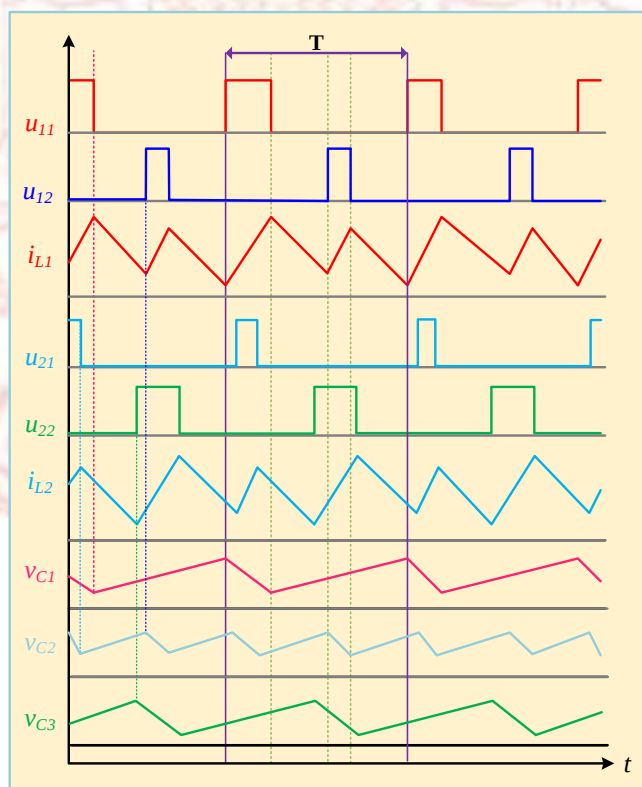
- 3) อุปกรณ์เป็นอุดมคติ
- 4) แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุไฟฟ้าขาเข้าเท่ากันทุกตัว
- 5) กำลังไฟฟ้าขาเข้าเท่ากับไฟฟ้าขาออก



ภาพที่ 3-8 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ [21]

ขั้นตอนที่ 2: พิจารณาสมการของวงจรแปลงผันไฟฟ้า

เพื่อความสะดวกจะเริ่มต้นจากการพิจารณาสมการสำหรับการต่อวงจรแปลงผันไฟฟ้าจำนวน 2 โมดูล วงจรที่ใช้พิจารณาแสดงไว้ดังภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-9 สัญญาณคำสั่งสวิตช์สภาวะคงตัวของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน 2 โมดูล

อันดับแรกจะเริ่มพิจารณาสมการแรงดันที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้าขาเข้าประกอบกับการทำงานของสัญญาณคำสั่งสวิตช์ $u_{11}, u_{12}, u_{21}, u_{22}$ ดังภาพที่ 3-9 จะพบว่าพฤติกรรมของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปต่อเวลาเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{dv_{c1}}{dt} = \frac{i_i - i_{L1}u_{11}}{C_1} \quad (3-3)$$

$$\frac{dv_{c2}}{dt} = \frac{i_i - i_{L1}u_{12} - i_{L2}u_{21}}{C_2} \quad (3-4)$$

$$\frac{dv_{c3}}{dt} = \frac{i_i - i_{L2}u_{22}}{C_3} \quad (3-5)$$

และพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังโหลดต่อเวลาสามารถสมการได้ดังนี้

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{v_{c1}u_{11} + v_{c2}u_{12} - v_{o1}}{L_1} \quad (3-6)$$

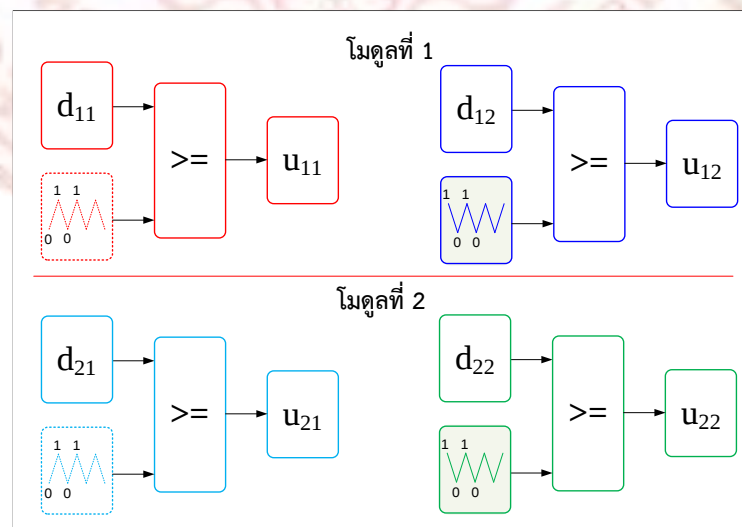
$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{v_{c2}u_{21} + v_{c3}u_{22} - v_{o2}}{L_2} \quad (3-7)$$

โดย u_{11}, u_{12} คือ สัญญาณคำสั่งวงจรแปลงผันไฟฟ้าโมดูลที่ 1

u_{21}, u_{22} คือ สัญญาณคำสั่งวงจรแปลงผันไฟฟ้าโมดูลที่ 2

จากสมการ (3-3) ถึง (3-7) แสดงให้เห็นว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้าที่แสดงในภาพที่ 3-5 ทำงานตามสัญญาณคำสั่งสวิตช์ $u_{11}, u_{12}, u_{21}, u_{22}$ ดังภาพที่ 3-9 ซึ่งจะสั่งงานให้เปิด-ปิดสวิตช์ $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$ ตามความถี่ของสวิตช์ซึ่งทำให้กระแสและแรงดันเปลี่ยนแปลงขึ้นลงเป็นช่วงสั้น ๆ ตลอดหนึ่งคาบเวลา T

สำหรับสัญญาณคำสั่งสวิตช์ $u_{11}, u_{12}, u_{21}, u_{22}$ ใช้เทคนิค Pulse Width Modulation (PWM) ซึ่งความกว้างของสัญญาณคำสั่งสวิตช์จะขึ้นอยู่กับสัญญาณการระรอบการทำงาน $d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}$ ดังแสดงภาพที่ 3-10



ภาพที่ 3-10 การสร้างสัญญาณ PWM สำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันสองโมดูล [22]

การจะวิเคราะห์รูปสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงในทุกช่วงเวลาอาจซับซ้อนมากขึ้นในกรณีต่อจำนวนโมดูลมากขึ้น ดังนั้นจึงเลือกพิจารณาค่าเฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้าภายในหนึ่งคาบเวลา T ซึ่งจะทำให้สมการของระบบง่ายต่อการนำไปออกแบบตัวควบคุม จากสมการหาค่าเฉลี่ยเชิงเวลา

$$x = \frac{1}{T} \int_{nT}^{(n+1)T} x_{\sim}(t) dt \quad (3-8)$$

โดย x คือ ค่าเฉลี่ยของฟังก์ชัน $x(t)$ ในช่วงเวลานั้น ๆ

$x_{\sim}(t)$ คือ ฟังก์ชันของสัญญาณที่เปลี่ยนตามเวลา t

T คือ คาบเวลา

n คือ ดัชนี (index) ระบุช่วงพิจารณา

จากสมการแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ย x หาได้จากการนำสัญญาณ $x_{\sim}(t)$ มาอินทิเกรตในช่วง nT ถึง $(n+1)T$ แล้วหารด้วยช่วงเวลาทั้งหมด T ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการ (3-3) ถึง (3-7) ให้อยู่ในรูปแบบค่าเฉลี่ยได้ดังนี้

$$\frac{dv_{c1}}{dt} = \frac{i_i - i_{L1}d_{11}}{C_1} \quad (3-9)$$

$$\frac{dv_{c2}}{dt} = \frac{i_i - i_{L1}d_{12} - i_{L2}d_{21}}{C_2} \quad (3-10)$$

$$\frac{dv_{c3}}{dt} = \frac{i_i - i_{L2}d_{22}}{C_3} \quad (3-11)$$

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{v_{c1}d_{11} + v_{c2}d_{12} - v_{o1}}{L_1} \quad (3-12)$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{v_{c2}d_{21} + v_{c3}d_{22} - v_{o2}}{L_2} \quad (3-13)$$

โดย d_{11}, d_{12} คือ ภาระรอบการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้าโมดูลที่ 1

d_{21}, d_{22} คือ ภาระรอบการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้าโมดูลที่ 2

เมื่อพิจารณากระแสในรูปแบบอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้าสามารถเขียนสมการได้ว่า

$$i_i = \frac{P_i}{V_i} \quad (3-14)$$

$$i_{L1} = \frac{P_1}{V_1} \quad (3-15)$$

$$i_{L2} = \frac{P_2}{V_2} \quad (3-16)$$

โดย P_i คือ กำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายขาเข้า

P_1 คือ กำลังไฟฟ้าขาออกของโมดูลที่ 1

P_2 คือ กำลังไฟฟ้าขาออกของโมดูลที่ 2

V_1 คือ แรงดันไฟฟ้าขาออกของโมดูลที่ 1

V_2 คือ แรงดันไฟฟ้าขาออกของโมดูลที่ 2

นำค่ากระแสจากสมการ (3-14) ถึง (3-16) ไปแทนลงในสมการที่ (3-9) ถึง (3-11) จะได้

$$C_1 \frac{dv_{c1}}{dt} = \frac{P_i}{V_i} - \frac{P_1}{V_1} d_{11} \quad (3-17)$$

$$C_2 \frac{dv_{c2}}{dt} = \frac{P_i}{V_i} - \frac{P_1}{V_1} d_{12} - \frac{P_2}{V_2} d_{21} \quad (3-18)$$

$$C_3 \frac{dv_{c3}}{dt} = \frac{P_i}{V_i} - \frac{P_2}{V_2} d_{22} \quad (3-19)$$

และพิจารณาสมการแรงดันตัวเก็บประจุขาเข้าในรูปแบบแรงดันไฟฟ้าต่อจำนวนโมดูลที่ต่อใช้งานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ดังขั้นตอนที่ 1 หัวข้อที่ 3) จะได้

$$V_{c1} = V_{c2} = V_{c3} = \frac{V_i}{N+1} \quad (3-20)$$

ซึ่ง N คือจำนวนโมดูลที่ต่อใช้งานในส่วนนี้ $N = 2$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$V_{c1} = V_{c2} = V_{c3} = \frac{V_i}{3} \quad (3-21)$$

นำค่าแรงดันตัวเก็บประจุขาเข้าจากสมการที่ (3-21) แทนลงในสมการที่ (3-12) และ (3-13) จะได้

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = \frac{V_i}{3} d_{11} + \frac{V_i}{3} d_{12} - V_1 \quad (3-22)$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = \frac{V_i}{3} d_{21} + \frac{V_i}{3} d_{22} - V_2 \quad (3-23)$$

ขั้นตอนที่ 3 : พิจารณาสมการสำหรับ N โมดูล

ในการพิจารณาสมการแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับ N โมดูลนั้นจำเป็นอย่างยิ่งในการกำหนดดัชนีของพารามิเตอร์เพื่อบ่งบอกว่าอุปกรณ์อยู่ตำแหน่งไหนของวงจรและสัญญาณคำสั่งวงจรแปลงผันไฟฟ้ากำลังสั่งงานโมดูลได้อยู่ จึงได้กำหนดพารามิเตอร์ดังนี้

N คือ จำนวนโมดูลที่ต้องเชื่อมต่อ

k คือ ตำแหน่งของอุปกรณ์และสัญญาณไฟฟ้า

จากสมการที่ (3-17) และ (3-19) พบว่าสมการทั้งสองมีลักษณะคล้ายกัน และเมื่อพิจารณาเพียงหนึ่งโมดูลดังภาพที่ 2-1 จะพบว่าพจน์ในสมการที่ (3-18) ไม่ปรากฏ ทำให้สมการที่ (3-17) และ (3-19) มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยแตกต่างกันเพียงดัชนีชี้ตำแหน่งของพารามิเตอร์เท่านั้น ดังนั้น สมการสำหรับแรงดันตัวเก็บประจุด้านขาเข้าของตัวเก็บประจุตัวแรก $k = 1$ สามารถเขียนได้ดังนี้:

$$C_k \frac{dv_{ck}}{dt} = \frac{P_i}{V_i} - \frac{P_k}{V_k} d_{k1} \quad (3-24)$$

สมการสำหรับแรงดันตัวเก็บประจุด้านขาเข้าระหว่างตัวเก็บประจุตัวแรกและตัวสุดท้าย สามารถเขียนได้ดังนี้ โดยที่ k มีค่าตั้งแต่ 2 ถึง N

$$C_k \frac{dv_{ck}}{dt} = \frac{P_i}{V_i} - \frac{P_{k-1}}{V_{k-1}} d_{k-1,2} - \frac{P_k}{V_k} d_{k1} \quad (3-25)$$

และสมการสำหรับแรงดันตัวเก็บประจุด้านขาเข้าตัวสุดท้าย โดยที่ $k = N + 1$ คือ

$$C_{N+1} \frac{dv_{cN+1}}{dt} = \frac{P_i}{V_i} - \frac{P_N}{V_N} d_{N2} \quad (3-26)$$

สำหรับสมการกระแสตัวเหนี่ยวนำในรูปแบบ N โมดูลสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (3-22) และ (3-23) เนื่องจากพิจารณาแล้วพบว่าสมการทั้งสองมีลักษณะคล้ายคลึงกัน แตกต่างกันเพียงดัชนีของพารามิเตอร์เท่านั้น จะได้สมการกระแสตัวเหนี่ยวนำดังนี้

$$L_k \frac{di_{Lk}}{dt} = \frac{V_i}{3} d_{k1} + \frac{V_i}{3} d_{k2} - V_k \quad (3-27)$$

เลข 3 แทนจำนวนของตัวเก็บประจุด้านขาเข้า เมื่อพิจารณาจากรูปว่าจำนวนของตัวเก็บประจุด้านขาเข้ามีค่ามากกว่าจำนวนโมดูลที่ต่อใช้งานอยู่หนึ่งตัว ดังนั้นสมการสำหรับจำนวนตัวเก็บประจุด้านขาเข้าจึงเป็นดังนี้

$$\text{จำนวนตัวเก็บประจุด้านขาเข้า} = N + 1 \quad (3-28)$$

เมื่อแทนสมการที่ (3-28) ลงในสมการที่ (3-27) ดังนั้นจะได้สมการกระแสตัวเหนี่ยวนำในรูปแบบ N โมดูลดังแสดงด้านล่าง

$$L_k \frac{di_{Lk}}{dt} = \frac{V_i}{N+1} d_{k1} + \frac{V_i}{N+1} d_{k2} - V_k \quad (3-29)$$

โดยที่ k มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง N

ขั้นตอนที่ 4: พิจารณาสมการ Duty cycle

การหาสมการภาระรอบการทำงานจะใช้สมการที่ (3-24) ถึง (3-26) และสมการ (3-29) โดยจะเริ่มวิเคราะห์จากกรณีที่ต่อวงจร 3 โมดูล เพื่อศึกษารูปแบบและลักษณะของสมการ จากนั้นจึงนำผลการวิเคราะห์ไปสรุปเป็นสมการทั่วไปสำหรับ N โมดูลในขั้นตอนที่ 5 และตรวจสอบความเป็นจริงของสมการที่พิจารณาก่อนหน้า

พิจารณาสมการภาระรอบการทำงาน (d_{11}) สำหรับสวิตช์ตัวที่ 1 (S_{11}) ของโมดูลที่ 1 โดยใช้สมการที่ (3-24) เนื่องจากเป็นโมดูลที่ 1 จึงแทนค่า k ด้วย 1 จะได้

$$d_{11} = \frac{V_1 P_i}{V_i P_1} \quad (3-30)$$

พิจารณาสมการภาระรอบการทำงาน (d_{12}) สำหรับสวิตช์ตัวที่ 2 (S_{12}) ของโมดูลที่ 1 โดยใช้สมการที่ (3-29) เนื่องจากเป็นโมดูลที่ 1 จึงแทนค่า k ด้วย 1 จะได้

$$d_{12} = -\frac{V_1}{V_i P_1} [P_i - (N+1)P_1] \quad (3-31)$$

พิจารณาสมการภาระรอบการทำงาน (d_{21}) สำหรับสวิตช์ตัวที่ 1 (S_{21}) ของโมดูลที่ 2 โดยใช้สมการที่ (3-25) เนื่องจากเป็นโมดูลที่ 2 จึงแทนค่า k ด้วย 2 จะได้

$$d_{21} = \frac{V_2}{V_i P_2} [2P_i - (N + 1)P_1] \quad (3-32)$$

พิจารณาสมการภาระรอบการทำงาน (d_{22}) สำหรับสวิตช์ตัวที่ 2 (S_{22}) ของโมดูลที่ 2 โดยใช้สมการที่ (3-29) เนื่องจากเป็นโมดูลที่ 2 จึงแทนค่า k ด้วย 2 จะได้

$$d_{22} = -\frac{V_2}{V_i P_2} [2P_i - (N + 1)(P_1 + P_2)] \quad (3-33)$$

พิจารณาสมการภาระรอบการทำงาน (d_{31}) สำหรับสวิตช์ตัวที่ 1 (S_{31}) ของโมดูลที่ 3 โดยใช้สมการที่ (3-25) เนื่องจากเป็นโมดูลที่ 3 จึงแทนค่า k ด้วย 3 จะได้

$$d_{31} = \frac{V_3}{V_i P_3} [3P_i - (N + 1)(P_1 + P_2)] \quad (3-34)$$

พิจารณาสมการภาระรอบการทำงาน (d_{32}) สำหรับสวิตช์ตัวที่ 2 (S_{32}) ของโมดูลที่ 3 โดยใช้สมการที่ (3-29) เนื่องจากเป็นโมดูลที่ 3 จึงแทนค่า k ด้วย 3 จะได้

$$d_{32} = -\frac{V_3}{V_i P_3} [3P_i - (N + 1)(P_1 + P_2 + P_3)] \quad (3-35)$$

ขั้นตอนที่ 5: พิจารณาสมการภาระรอบการทำงานสำหรับ N โมดูล

จากการพิจารณาสมการที่ (3-30) ถึง (3-35) พบว่าภาระรอบการทำงาน นั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ แรงดันขาออก ผลรวมของกำลังไฟฟ้าขาออกของแต่ละโมดูล จำนวนโมดูลที่ใช้งาน แรงดันขาเข้า และลำดับตำแหน่งของวงจรแปลงผันไฟฟ้า

เมื่อวิเคราะห์สมการเป็นคู่ ๆ คือ สมการที่ (3-30) กับ (3-31), สมการที่ (3-32) กับ (3-33) และสมการที่ (3-34) กับ (3-35) พบความแตกต่างที่สำคัญสองประการ ประการแรกคือเครื่องหมายของสมการมีความแตกต่างกัน และประการที่สองคือผลรวมของกำลังไฟฟ้าขาออกในสมการที่ (3-30) มีค่าน้อยกว่าในสมการที่ (3-31) ผลรวมของกำลังไฟฟ้าขาออกในสมการที่ (3-32) มีค่าน้อยกว่าในสมการที่ (3-33) และผลรวมของกำลังไฟฟ้าขาออกในสมการที่ (3-34) มีค่าน้อยกว่าในสมการที่ (3-35) เสมอ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าสมการของภาระรอบการทำงาน สามารถแสดงในรูปแบบ N โมดูลได้ดังนี้:

$$d_{k1} = \frac{V_k}{V_i P_k} \left[kP_i - (N + 1) \left(\sum_{j=1}^{k-1} P_j \right) \right] \quad (3-36)$$

$$d_{k2} = -\frac{V_k}{V_i P_k} \left[kP_i - (N + 1) \left(\sum_{j=1}^k P_j \right) \right] \quad (3-37)$$

โดย k มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง N

d_{k1} คือ สมการสำหรับการคำนวณภาระรอบการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้าตัวแรกของโมดูลนั้น ๆ

d_{k2} คือ สมการสำหรับการคำนวณภาระรอบการทำงานของแปลงผันไฟฟ้าตัวที่สองของโมดูลนั้น ๆ

ตารางที่ 3-2 สรุปสมการแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับโมดูลวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน N โมดูล

สมการ	ความหมาย	ข้อกำหนด
$\frac{dv_{ck}}{dt} = \left(\frac{P_i}{V_i} - \frac{P_k}{V_k} d_{k1} \right) C_k^{-1}$	สมการการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ตัวเก็บประจุตัวแรกต่อเวลา	$k = 1$
$\frac{dv_{ck}}{dt} = \left(\frac{P_i}{V_i} - \frac{P_{k-1}}{V_{k-1}} d_{k-1,2} - \frac{P_k}{V_k} d_{k1} \right) C_k^{-1}$	สมการการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ตัวเก็บประจุระหว่างตัวแรกตัวและสุดท้ายต่อเวลา	$\forall k \in \{2, \dots, N\}$
$\frac{dv_{cN+1}}{dt} = \left(\frac{P_i}{V_i} - \frac{P_N}{V_N} d_{N2} \right) C_{N+1}^{-1}$	สมการการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ตัวเก็บประจุตัวสุดท้ายต่อเวลา	
$\frac{di_{Lk}}{dt} = \left(\frac{V_i}{N+1} d_{k1} + \frac{V_i}{N+1} d_{k2} - V_k \right) L_k^{-1}$	สมการการเปลี่ยนแปลงของกระแสตัวเหนี่ยวนำต่อเวลา	
$d_{k1} = \frac{V_k}{V_i P_k} \left[k P_i - (N+1) \left(\sum_{j=1}^{k-1} P_j \right) \right]$	สมการคำนวณภาระรอบการทำงานตัวแรกของโมดูลนั้น ๆ	$\forall k \in \{1, \dots, N\}$
$d_{k2} = -\frac{V_k}{V_i P_k} \left[k P_i - (N+1) \left(\sum_{j=1}^k P_j \right) \right]$	สมการคำนวณภาระรอบการทำงานตัวที่สองของโมดูลนั้น ๆ	

จากสมการทั้งหมดในตารางที่ 3-2 ได้มาจากเงื่อนไขในอุดมคติที่กำหนดให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขาเข้าทุกตัวมีค่าเท่ากัน อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติหากไม่มีการควบคุมแรงดันเหล่านี้ให้เท่ากัน แรงดันจะไม่เท่ากันตามธรรมชาติของอุปกรณ์ที่มีค่าความผิดพลาด และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในวงจรที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องใช้ตัวควบคุมที่มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ ซึ่งในงานนี้เลือกใช้ตัวควบคุมโหมดเลื่อนทางอ้อม ที่มีจุดเด่นสอดคล้องกับงานตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งสมการสำหรับตัวควบคุมกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3 และ 3.4

3.3 ตัวควบคุมโหมดเลื่อนแบบทางอ้อมสำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน N โมดูล

เมื่อนำวงจรโมดูลแปลงผันไฟฟ้าไปใช้งานร่วมกับระบบอิเล็กทรอนิกส์โพลีเซอรจากสมการที่ (2-20) ในบทที่ 2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการผลิตไฮโดรเจนในอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแลกเปลี่ยน

โปรตอน หากกำหนดให้พารามิเตอร์อื่น ๆ มีค่าคงที่ จะพบว่าอัตราการผลิตไฮโดรเจนจะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้า i_{el} ที่จ่ายให้กับโพลต์เท่านั้น

ดังนั้น วัตถุประสงค์หลักของตัวควบคุมจึงมุ่งเน้นไปที่การควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโพลต์เพื่อให้สามารถควบคุมอัตราการผลิตไฮโดรเจนได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ทำงานได้อย่างเสถียรและตอบสนองความต้องการของโพลต์ได้ดี

การทำงานของโมดูลแปลงผันไฟฟ้าในสถานะคงตัว กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุด้านขาออกมีค่าเป็นศูนย์ กระแสเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำจึงมีค่าเท่ากับกระแสเฉลี่ยที่จ่ายให้กับโพลต์อิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นจึงเลือกที่จะควบคุมกระแสตัวเหนี่ยวนำเพื่อจ่ายให้กับอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ตัวควบคุมโหมดเลื่อนแบบทางอ้อมดังนี้

$$S_{ik} = i_{Lk} - i_{Lkref} + k_{ik} \int (i_{Lk} - i_{Lkref}) dt \quad (3-38)$$

โดย k มีค่าตั้งแต่ 1 จนถึง N

และเพื่อให้มั่นใจว่าแรงดันตัวเก็บประจุขาเข้าทุกตัวเท่ากันจึงทำการควบคุมด้วยวิธีเดียวกันดังนี้

$$S_{vk} = V_{Ck} - V_{Ck+1} + K_{vk} \int (V_{Ck} - V_{Ck+1}) dt \quad (3-39)$$

โดย k มีค่าตั้งแต่ 1 จนถึง N

เพื่อให้กระแสไฟฟ้าเข้าสู่ค่าอ้างอิงแบบเอ็กซีโปเนนเชียลจึงใช้ใช้กฎการเข้าถึงดังนี้

$$\dot{S}_{ik} = -\lambda_{ik} S_{ik} \quad (3-40)$$

$$\frac{di_{Lk}}{dt} - \frac{di_{Lkref}}{dt} + K_{ik}(i_{Lk} - i_{Lkref}) = -\lambda_{ik} S_{ik} \quad (3-41)$$

และใช้วิธีเดียวกันเพื่อรักษาความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุขาเข้าจะได้

$$\dot{S}_{vk} = -\lambda_{vk} S_{vk} \quad (3-42)$$

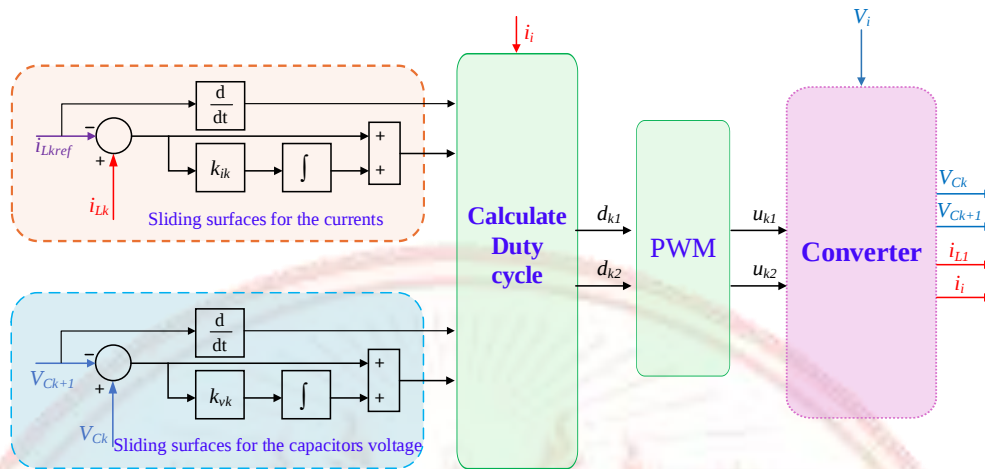
$$\frac{dV_{Ck}}{dt} - \frac{dV_{Ck+1}}{dt} + K_{vk}(V_{Ck} - V_{Ck+1}) = -\lambda_{vk} S_{vk} \quad (3-43)$$

โดย k มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง N

λ_{ik}, K_{ik} คือ ค่าแบนด์วิดท์ซึ่งใช้สำหรับกำหนดลักษณะพลวัตของลูปกระแส

λ_{vk}, K_{vk} คือ ค่าแบนด์วิดท์ซึ่งใช้สำหรับกำหนดลักษณะพลวัตของลูปแรงดันตัวประจุซึ่ง

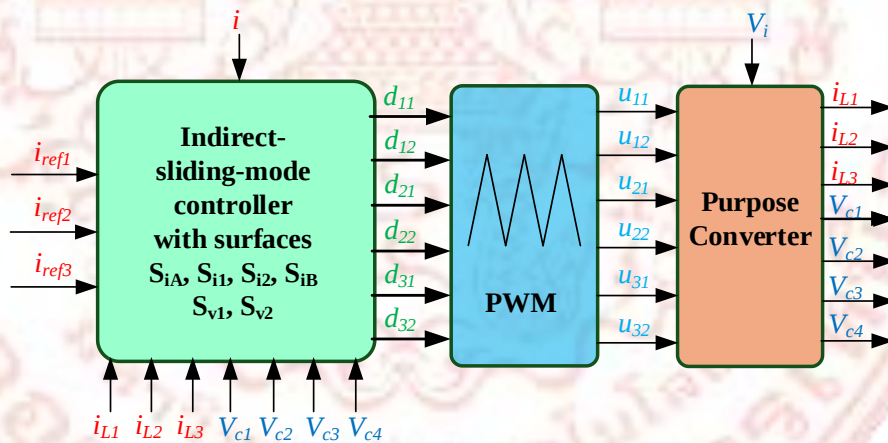
จะต้องกำหนดให้ช้ากว่าลูปกระแส



ภาพที่ 3-11 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมสำหรับลูกระแสและแรงดันตัวเก็บประจุขาเข้า

3.4 ตัวควบคุมโหมดเคลื่อนแบบทางอ้อมสำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน 3 โหมด

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงสมการควบคุมสำหรับ 3 โหมดโดยใช้วงจรดังภาพที่ 3-6 ก่อนหน้าโดยถอดโหมด N ออก และใช้ทฤษฎีตัวควบคุมที่กล่าวไว้ก่อนหน้าและจากภาพที่ 3-11 สามารถเขียนบล็อกควบคุมได้ดังภาพที่ 3-12



ภาพที่ 3-12 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมสำหรับ 3 โหมด [23]

จากสมการที่ (3-38) พื้นผิวสไลด์สำหรับควบคุมกระแสตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} , i_{L3} สามารถเขียนได้ดังนี้

$$S_{i1} = i_{L1} - i_{L1ref} + k_{i1} \int (i_{L1} - i_{L1ref}) dt \quad (3-44)$$

$$S_{i2} = i_{L2} - i_{L2ref} + k_{i2} \int (i_{L2} - i_{L2ref}) dt \quad (3-45)$$

$$S_{i3} = i_{L3} - i_{L3ref} + k_{i3} \int (i_{L3} - i_{L3ref}) dt \quad (3-46)$$

และจากสมการที่ (3-39) พื้นผิวสไลด์สำหรับการรักษาความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุขาเข้าสามารถเขียนได้ดังนี้

$$S_{v1} = V_{c1} - V_{c2} + k_{v1} \int (V_{c1} - V_{c2}) dt \quad (3-47)$$

$$S_{v2} = V_{c2} - V_{c3} + k_{v2} \int (V_{c2} - V_{c3}) dt \quad (3-48)$$

$$S_{v3} = V_{c3} - V_{c4} + k_{v1} \int (V_{c3} - V_{c4}) dt \quad (3-49)$$

สำหรับค่าการรอบการทำงานสามารถใช้ Reaching law ในการแก้สมการหาได้ดังนี้

$$\dot{S}_{i1} = -\lambda_{i1} S_{i1} \quad (3-50)$$

$$\dot{S}_{i2} = -\lambda_{i2} S_{i2} \quad (3-51)$$

$$\dot{S}_{i3} = -\lambda_{i3} S_{i3} \quad (3-52)$$

$$\dot{S}_{v1} = -\lambda_{v1} S_{v1} \quad (3-53)$$

$$\dot{S}_{v2} = -\lambda_{v2} S_{v2} \quad (3-54)$$

$$\dot{S}_{v3} = -\lambda_{v3} S_{v3} \quad (3-55)$$

3.5 จำลองเลียนแบบการทำงานโมดูลวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

ในส่วนนี้เป็นการจำลองผลการการทำงานของระบบที่ต่อวงจรแปลงผันไฟฟ้าจำนวนสามโมดูล เพื่อแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริงร่วมกับตัวควบคุมที่นำเสนอ และเพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการที่ระบุไว้ในตารางที่ 3-2 การจำลองถูกดำเนินการในสองรูปแบบ ได้แก่ 1) การจำลองโดยใช้เครื่องมือ Simscape ดังแสดงในภาพที่ 3-13 ซึ่งมีข้อดีคือสามารถแสดงพฤติกรรมของอุปกรณ์ที่ไม่เป็นอุดมคติ และ 2) การจำลองโดยใช้เครื่องมือ MATLAB Function ดังแสดงในภาพที่ 3-14 ซึ่งมีข้อดีในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้า

การจำลองถูกดำเนินการภายใต้สมมติฐานสามสถานการณ์ ตามรายละเอียดที่ระบุไว้ในตารางที่ 3-5 ถึงตารางที่ 3-7 โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแสดงไว้ในตารางที่ 3-3 และตารางที่ 3-4 ผลการจำลองในสถานการณ์ที่ 1 แสดงในภาพที่ 3-15 ถึงภาพที่ 3-18 สำหรับสถานการณ์ที่ 2 แสดงในภาพที่ 3-19 ถึงภาพที่ 3-22 และสำหรับสถานการณ์ที่ 3 แสดงในภาพที่ 3-23 ถึงภาพที่ 3-26

จากผลการจำลองทั้งสามสถานการณ์ พบว่าตัวควบคุมที่นำเสนอสามารถควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้าให้เป็นไปตามเงื่อนไขของแต่ละสถานการณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการตอบสนองของสัญญาณที่ได้จากการจำลองด้วยเครื่องมือ MATLAB Function และ Simscape มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยมีความแตกต่างกันในด้านอัตราการกระเพื่อมและการเข้าสู่จุดอ้างอิงของสัญญาณ ซึ่งเกิดจากความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์ใน Simscape อย่างไรก็ตามภายใต้ตัวควบคุมที่นำเสนอ วงจรแปลงผันไฟฟ้าสามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขของทุกสถานการณ์ และสามารถรักษาสมดุลแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ระบุในตารางที่ 3-3 มีความถูกต้อง และยืนยันว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้าสามารถนำไปใช้งานได้จริง ทั้งนี้การทดสอบและวิเคราะห์ในสภาพแวดล้อมจริงจะถูกนำเสนอในบทที่ 4 ต่อไป

ตารางที่ 3-3 พารามิเตอร์สำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้า

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
N	3	โมดูล
V_i	50-100	โวลต์ (V)
i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}	4-8	แอมแปร์ (A)
$C_1, C_2, C_3, C_4, C_{o1}, C_{o2}, C_{o3}$	100	ไมโครฟารัด (uF)
L_1, L_2, L_3	100	ไมโครเฮนรี (uH)
r_1, r_2, r_3	0.1	โอห์ม (Ω)
ค่าความต้านทานสมมูลเล็กโทรไลเซอร์ R_{L1}, R_{L2}, R_{L3}	1	โอห์ม (Ω)

ตารางที่ 3-4 พารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุม

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
ความถี่สวิตช์ (f)	20	กิโลเฮิร์ต (kHz)
$k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}, \lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \lambda_{i3}$	2500	$rad \cdot s^{-1}$
$k_{v1}, k_{v2}, k_{v3}, \lambda_{v1}, \lambda_{v2}, \lambda_{v3}$	500	$rad \cdot s^{-1}$

ตารางที่ 3-5 สถานการณ์จำลองที่ 1 กำหนดกระแสอ้างอิงคงที่

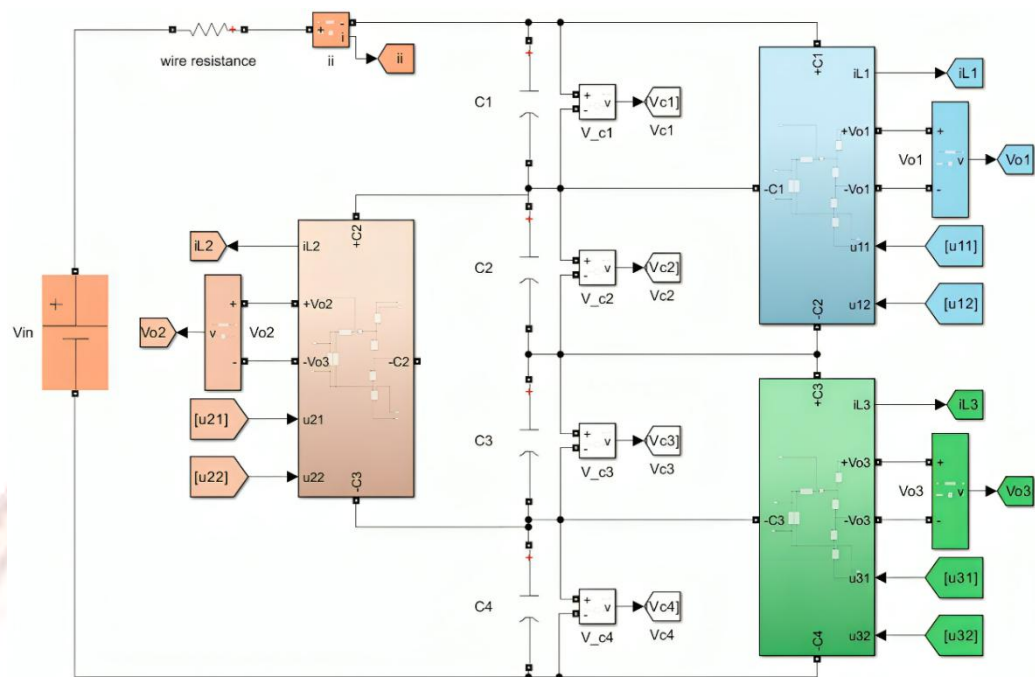
แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V_i)	กระแสอ้างอิง ($i_{L1ref}, i_{L2ref}, i_{L3ref}, i_{ref}$)	เวลาเริ่มควบคุม
40 โวลต์	5 แอมแปร์	0.18 วินาที

ตารางที่ 3-6 สถานการณ์จำลองที่ 2 ปรับกระแสอ้างอิงตามที่ต้องการใช้งาน

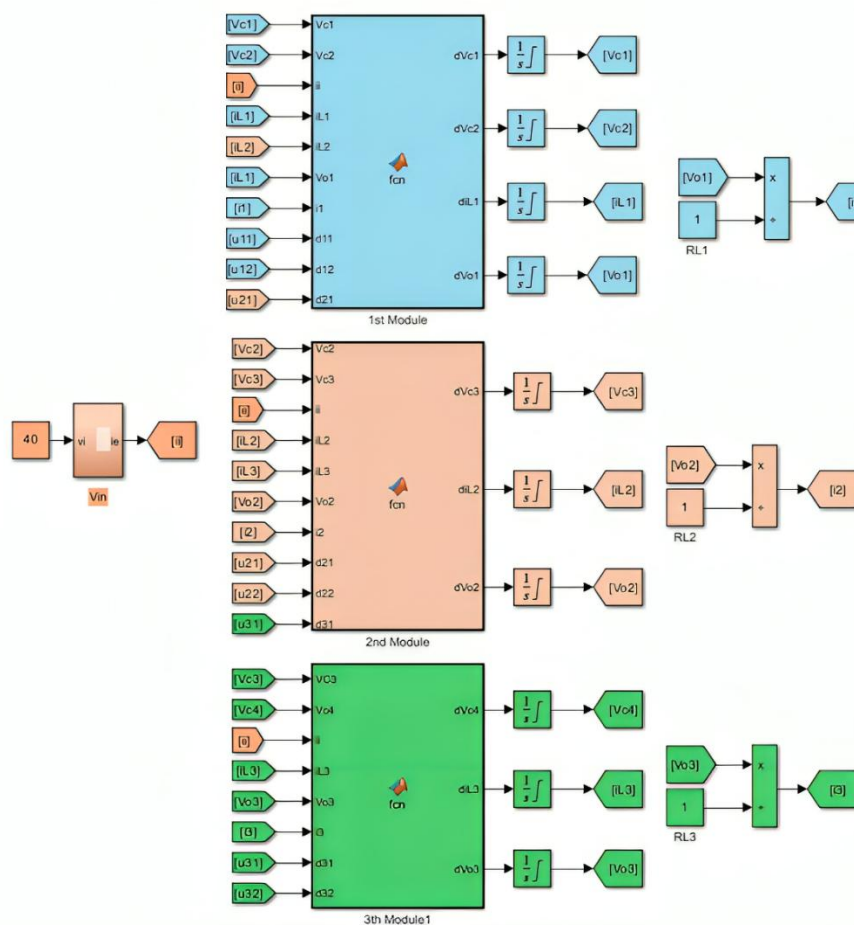
แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V_i)	กระแสอ้างอิง ($i_{L1ref}, i_{L2ref}, i_{L3ref}, i_{ref}$)	เวลาเริ่มควบคุม
40 โวลต์	4 แอมแปร์	0.18 วินาที
	6 แอมแปร์	0.38 วินาที
	8 แอมแปร์	0.58 วินาที
	4 แอมแปร์	0.78 วินาที

ตารางที่ 3-7 สถานการณ์จำลองที่ 3 สมมติแรงดันไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนไม่คงที่

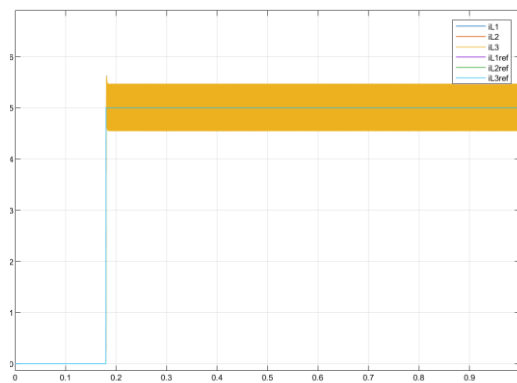
กระแสอ้างอิง ($i_{L1ref}, i_{L2ref}, i_{L3ref}, i_{ref}$)	แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V_i)	เวลาเริ่มควบคุม
5 แอมแปร์	100 โวลต์	0 – 0.1 วินาที
	72 โวลต์	0.1– 0.2 วินาที
	62 โวลต์	0.2 – 0.7 วินาที
	53 โวลต์	0.7 - 1 วินาที



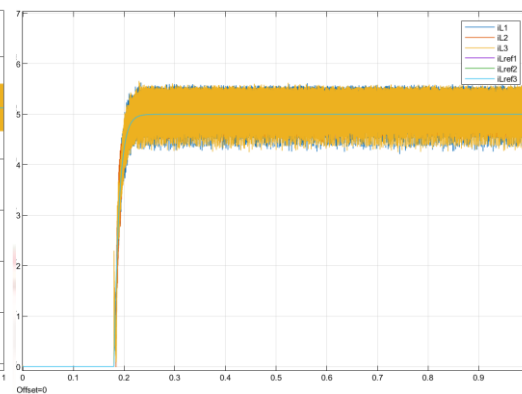
ภาพที่ 3-13 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน 3 โมดูล (Simscape)



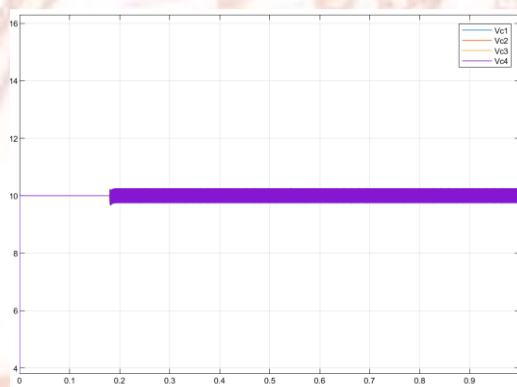
ภาพที่ 3-14 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน 3 โมดูล (MATLAB Function)



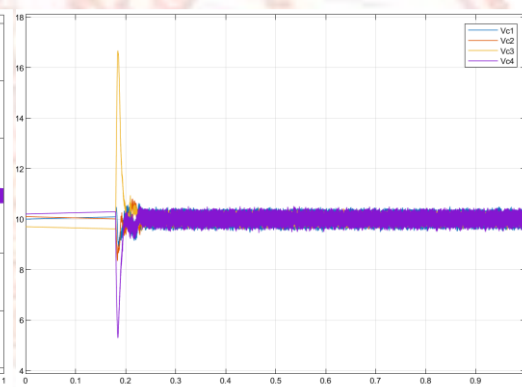
ภาพที่ 3-15 การตอบสนองของกระแส
สถานการณ์ที่ 1 (MATLAB Function)



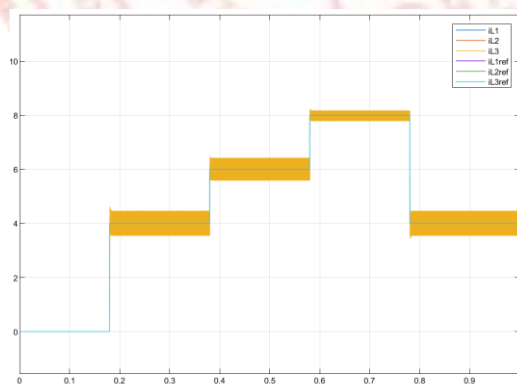
ภาพที่ 3-16 การตอบสนองของกระแส
สถานการณ์ที่ 1 (Simscape tool)



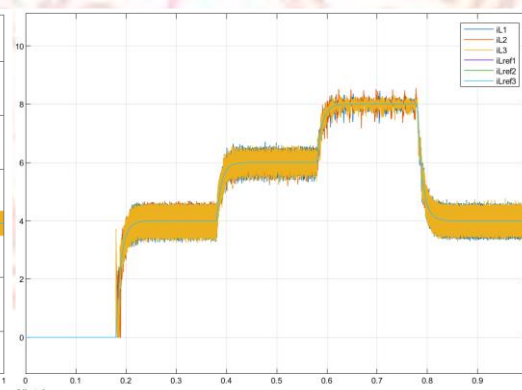
ภาพที่ 3-17 การตอบสนองของแรงดันตัว
เก็บประจุขาเข้า สถานการณ์ที่ 1
(MATLAB Function)



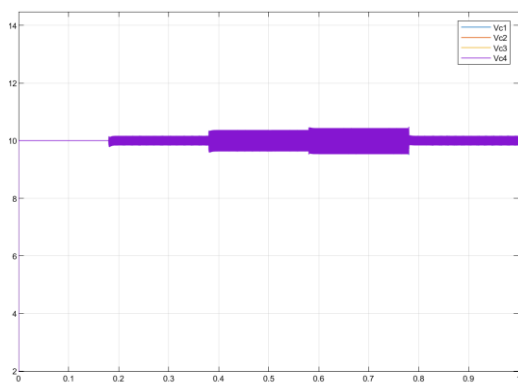
ภาพที่ 3-18 การตอบสนองของแรงดันตัว
เก็บประจุขาเข้า สถานการณ์ที่ 1
(Simscape tool)



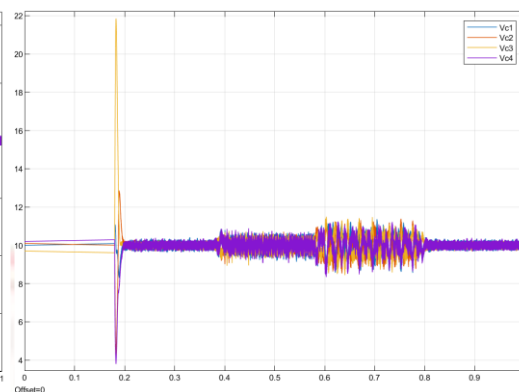
ภาพที่ 3-19 การตอบสนองของกระแส
สถานการณ์ที่ 2 (MATLAB Function)



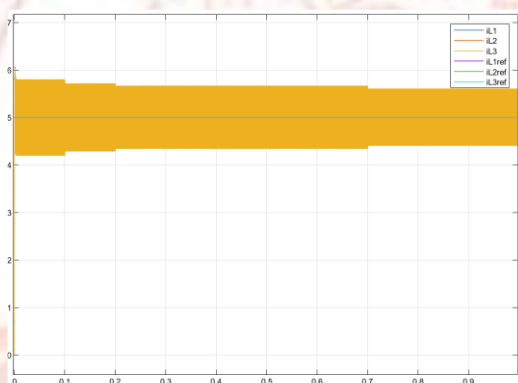
ภาพที่ 3-20 การตอบสนองของกระแส
สถานการณ์ที่ 2 (Simscape tool)



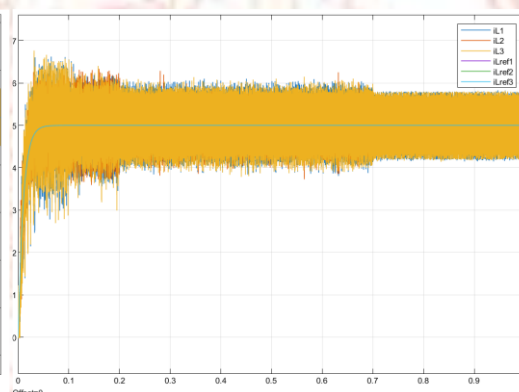
ภาพที่ 3-21 การตอบสนองของแรงดันตัวเก็บประจุขาเข้า สถานการณ์ที่ 2 (MATLAB Function)



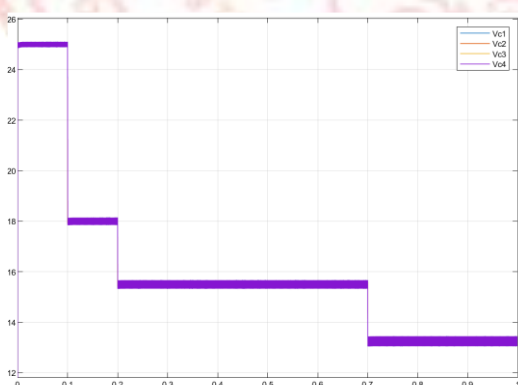
ภาพที่ 3-22 การตอบสนองของแรงดันตัวเก็บประจุขาเข้า สถานการณ์ที่ 2 (Simscape tool)



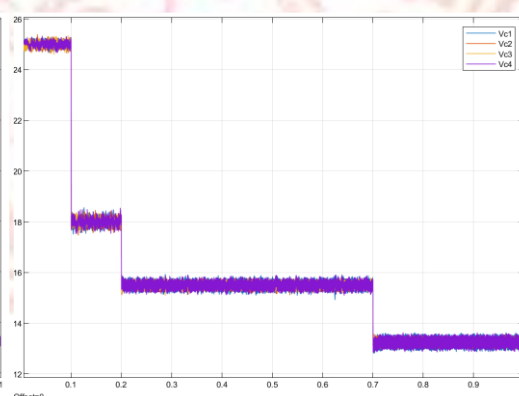
ภาพที่ 3-23 การตอบสนองของกระแส สถานการณ์ที่ 3 (MATLAB Function)



ภาพที่ 3-24 การตอบสนองของกระแส สถานการณ์ที่ 3 (Simscape tool)



ภาพที่ 3-25 การตอบสนองของแรงดันตัวเก็บประจุขาเข้า สถานการณ์ที่ 3 (MATLAB Function)



ภาพที่ 3-26 การตอบสนองของแรงดันตัวเก็บประจุขาเข้า สถานการณ์ที่ 3 (Simscape tool)

3.6 ออกแบบความกว้างลายวงจรพิมพ์วงจรต้นแบบ

จากขอบเขตของงานกระแสสูงสุดที่ใช้คือ 10 แอมแปร์ ดังนั้นจากสมการที่ (2-24) สามารถคำนวณพื้นที่ได้ดังนี้

$$A = \left(\frac{10}{0.024 \times 40^{0.44}} \right)^{\frac{1}{0.725}} \quad (3-56)$$

$$A = 437.7401 \text{ mils}^2 \quad (3-57)$$

นำค่าพื้นที่ไปแทนลงในสมการที่ (2-25) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$W = \frac{437.7401}{1 \times 1.378} \quad (3-58)$$

$$W = 317.66 \text{ mils} \quad (3-59)$$

แปลงหน่วยเป็นมิลลิเมตร (1 มิล = 0.0254 มิลลิเมตร) จะได้

$$W = 317.66 \times 0.0254 \quad (3-60)$$

$$W = 8.07 \text{ mm} \quad (3-61)$$

ดังนั้นจะได้ความกว้างของลายแผ่นทองแดงขั้นต่ำอยู่ที่ 8.07 มิลลิเมตร ซึ่งสำหรับวงจรต้นแบบเลือกใช้ความกว้างที่ 10 มิลลิเมตร

บทที่ 4

ผลการทดลอง

บทนี้กล่าวถึงผลการทดลองกับเครื่องมือจริงและสถานการณ์จริงภายใต้แบบจำลองคณิตศาสตร์ และตัวควบคุมที่นำเสนอในบทที่ 3 โดยการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

4.1 รายละเอียดลักษณะสมบัติวงจรทดลอง

4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.3 การทดลอง

4.4 สรุปผลการทดลอง

4.1 รายละเอียดลักษณะสมบัติวงจรทดลอง

4.1.1 ลักษณะสมบัติภาคกำลังของวงจรแปลงผันไฟฟ้า

4.1.1.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน 3 โมดูล

4.1.1.2 รับแรงดันไฟฟ้าอินพุตจำลองจากแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เกิน 100 V

4.1.1.3 แรงดันเอาต์พุตไฟตรงของวงจรแต่ละโมดูล ไม่เกิน 20 V

4.1.1.4 กระแสเอาต์พุตไฟตรงของวงจรแต่ละโมดูล ไม่เกิน 10 A

4.1.2 ใช้ชุดควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบดิจิทัล

สร้างสัญญาณ PWM ควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้าที่ความถี่สวิตช์ 20 kHz

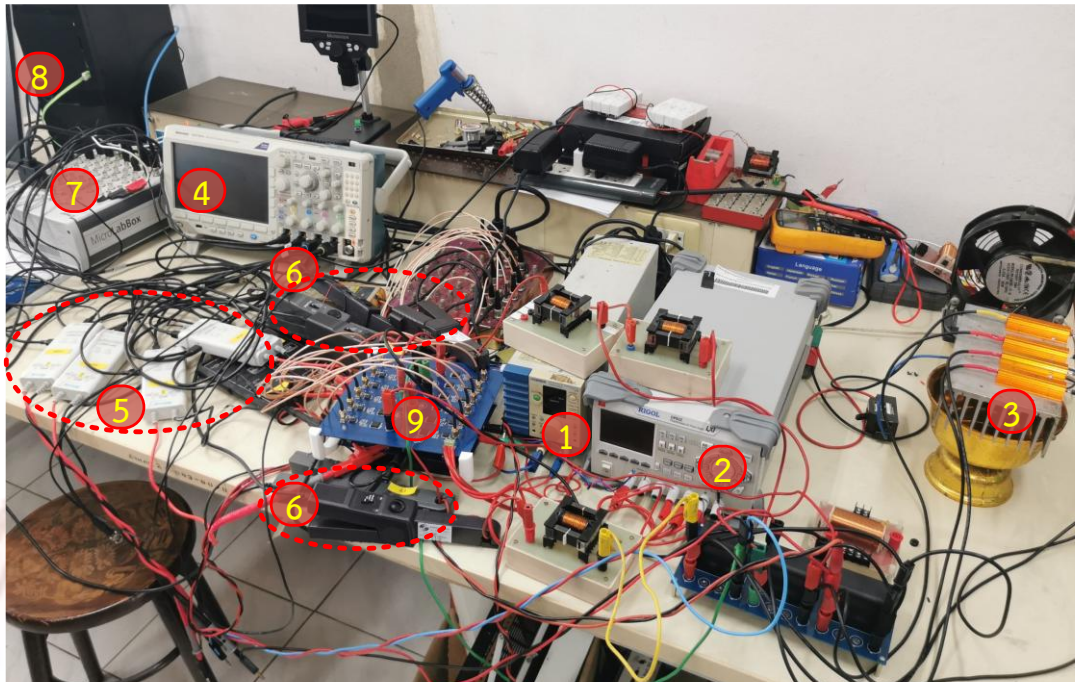
4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

ตารางที่ 4-1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

หมายเลข	อุปกรณ์	ค่า	จำนวน	หน่วย
1	แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้	0 – 80 โวลต์	1	เครื่อง
2	แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	± 5 โวลต์, ± 12 โวลต์	1	เครื่อง
3	ค่าความต้านทานสมมูลอิเล็กทรอนิกส์	1 โอห์ม 100 วัตต์	3	ตัว
4	ออสซิลโลสโคป 4 ช่องสัญญาณ	-	1	เครื่อง
5	โพรบวัดแรงดันไฟฟ้า	-	7	ตัว
6	โพรบวัดกระแสไฟฟ้า	-	4	ตัว
7	dSPACE รุ่น 1202	-	1	เครื่อง
8	คอมพิวเตอร์สำหรับเขียนโปรแกรมตัวควบคุม	-	1	เครื่อง
9	วงจรโมดูลแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดัน	-	3	โมดูล

4.3 การทดลอง

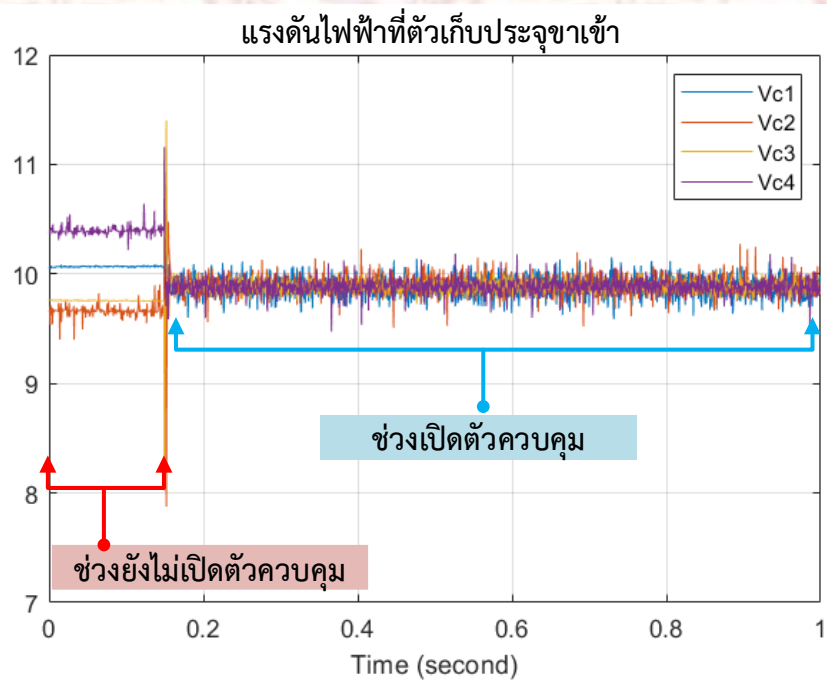
โดยการทดลองนี้ต่อวงจรแปลงผันไฟฟ้าจำนวน 3 โมดูลแสดงดังภาพที่ 4-1 โดยใช้พารามิเตอร์ในตารางที่ 3-3 สำหรับการสร้างวงจร และใช้พารามิเตอร์ตัวควบคุมในตารางที่ 3-4 ซึ่งสถานการณ์ที่ใช้จำลองเหมือนกันกับตารางที่ 3-5 ถึงตารางที่ 3-7



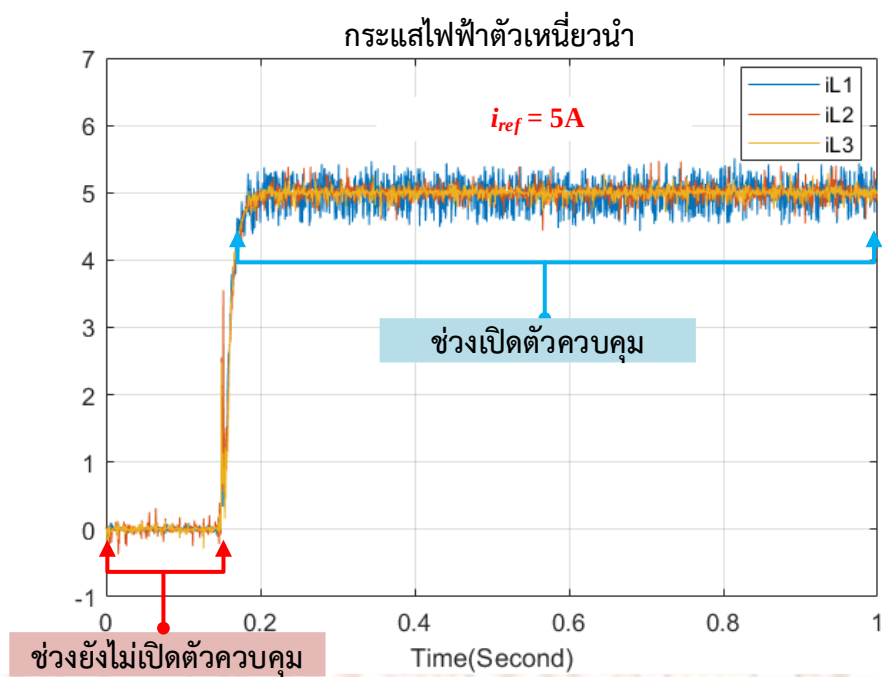
ภาพที่ 4-1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

4.3.1 ทดลองกำหนดกระแสอ้างอิงคงที่ 5 แอมแปร์

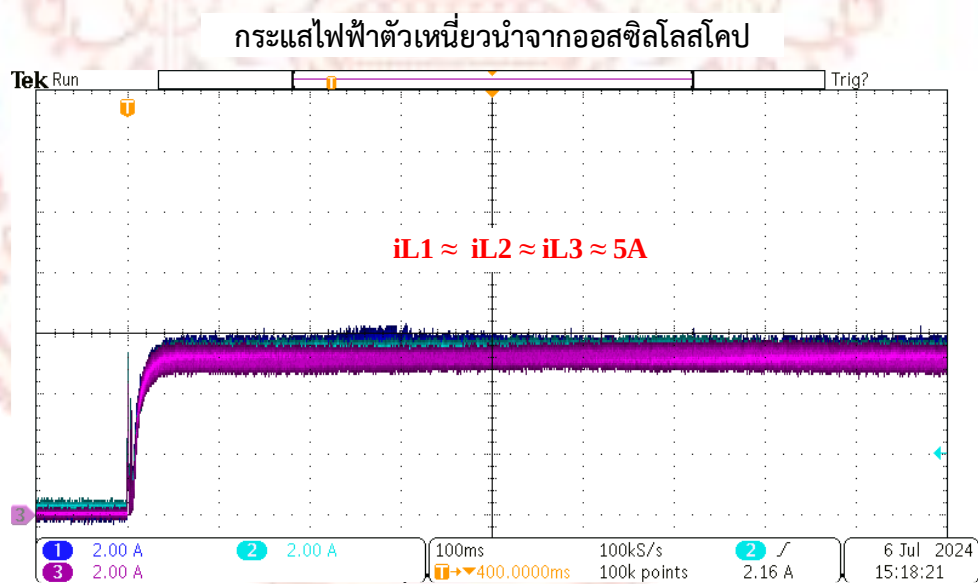
วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้เพื่อแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุขาเข้าขณะที่ยังไม่ได้เริ่มควบคุมและหลังจากควบคุม โดยผลการทดลองจริงผลในสถานการณ์ที่ 1 แสดงในภาพที่ 4-2 ถึงภาพที่ 4-4



ภาพที่ 4-2 การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุขาเข้า
ของการทดลองในสถานการณ์ที่ 1 (สัญญาณจาก dSPACE)



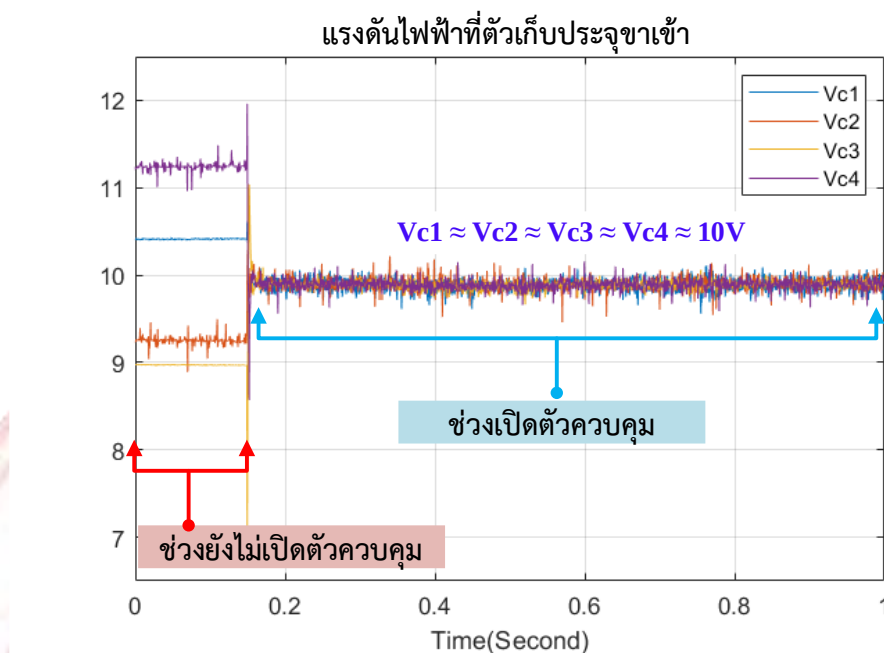
ภาพที่ 4-3 การตอบสนองของกระแสตัวเหนี่ยวนำ
ของการทดลองในสถานการณ์ที่ 1 (สัญญาณจาก dSPACE)



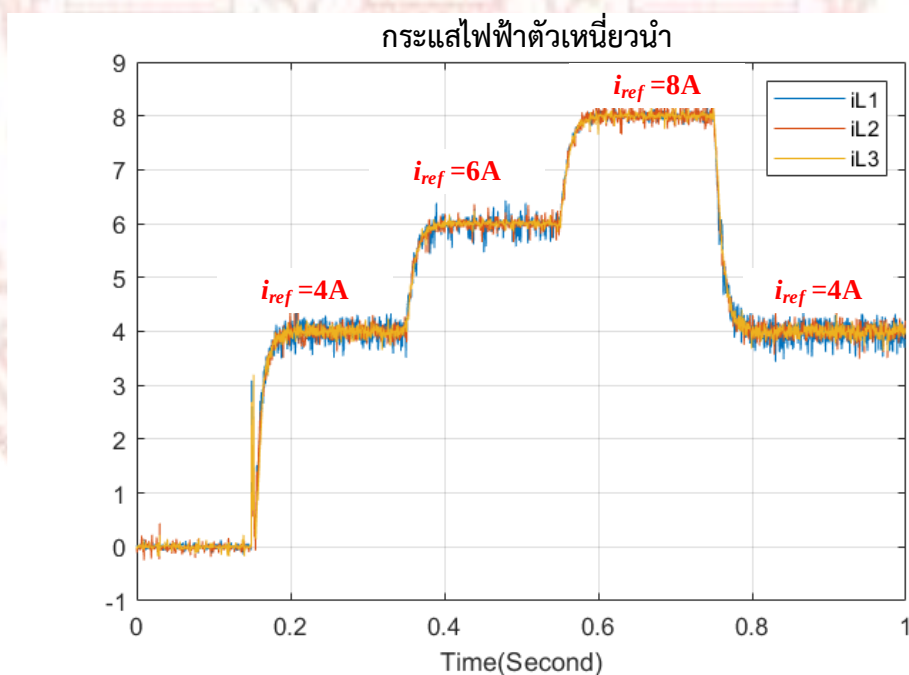
ภาพที่ 4-4 การตอบสนองของกระแสตัวเหนี่ยวนำ
ของการทดลองในสถานการณ์ที่ 1 (สัญญาณจาก ออสซิลโลสโคป)

4.3.2 ทดลองปรับกระแสอ้างอิงตามที่ต้องการใช้งาน

วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของตัวควบคุมที่ทำให้วงจรแปลงผันไฟฟ้าสามารถจ่ายกระแสไปยังโหลดตามที่ต้องการและจะต้องรักษาความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุเข้าโดยผลการทดลองจริงของสถานการณ์ที่ 2 แสดงในภาพที่ 4-5 ถึงภาพที่ 4-6



ภาพที่ 4-5 การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุขาเข้า
ของการทดลองในสถานการณ์ที่ 2 (สัญญาณจาก dSPACE)

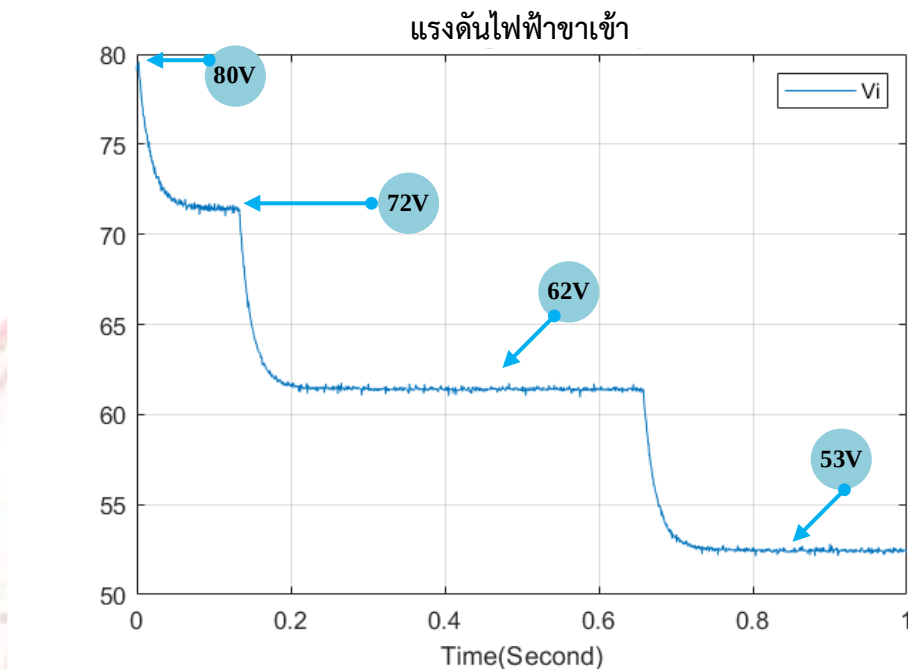


ภาพที่ 4-6 การตอบสนองของกระแสตัวเหนี่ยวนำ
ของการทดลองในสถานการณ์ที่ 2 (สัญญาณจาก dSPACE)

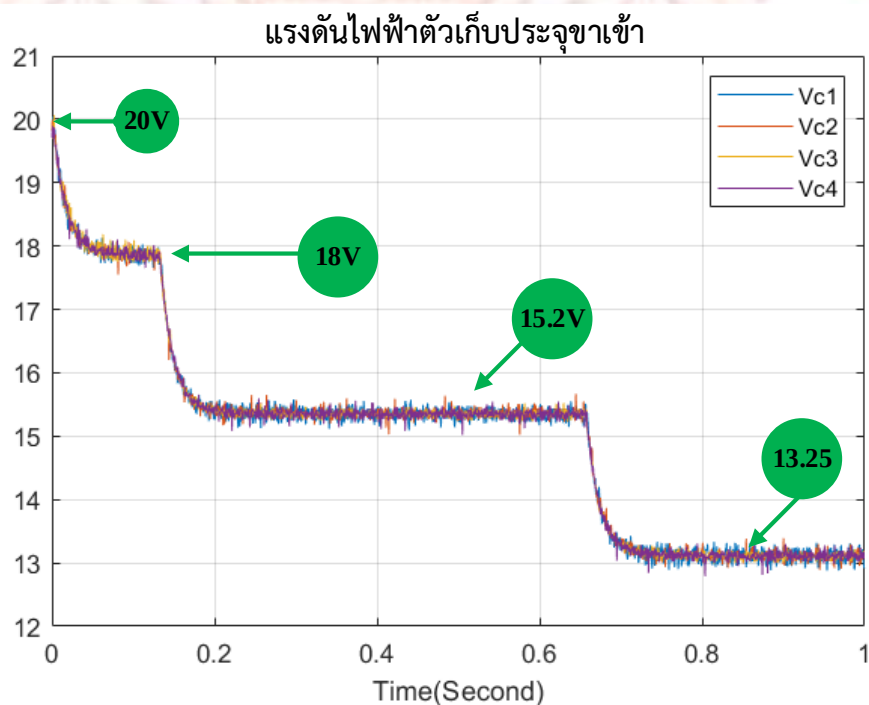
4.3.3 ทดลองภายใต้สถานการณ์สมมติแรงดันไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนไม่คงที่

วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้เพื่อจำลองสถานการณ์เมื่อนำวงจรแปลงผันไฟฟ้าไปใช้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนที่แรงดันไฟฟ้าไม่คงที่เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของตัว

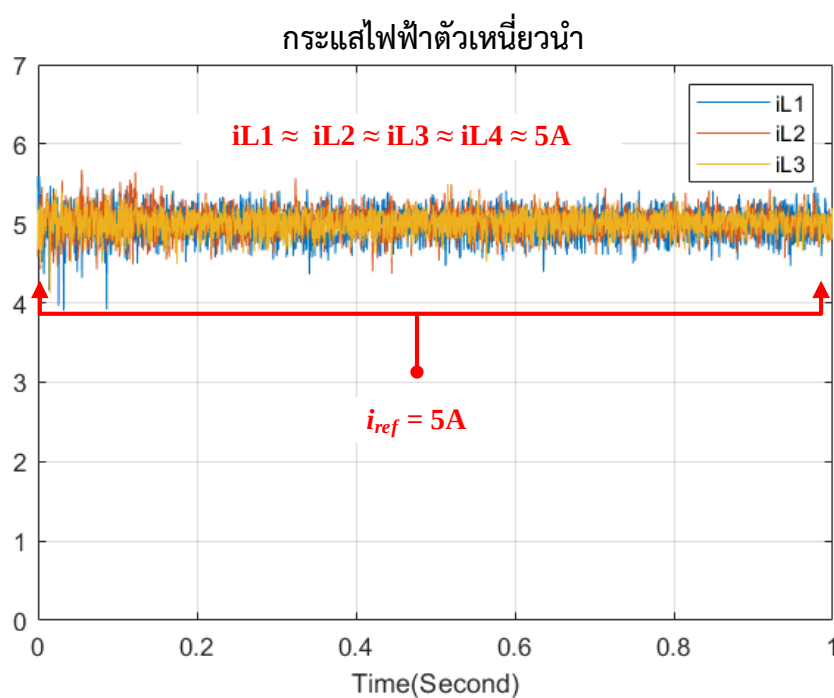
ควบคุมในการจ่ายกระแสให้โหลดและรักษาความสมดุลของแรงดันที่ตัวเก็บประจุขาเข้า โดยผลการทดลองจริงผลในสถานการณ์ที่ 3 แสดงในภาพที่ 4-7 ถึงภาพที่ 4-10



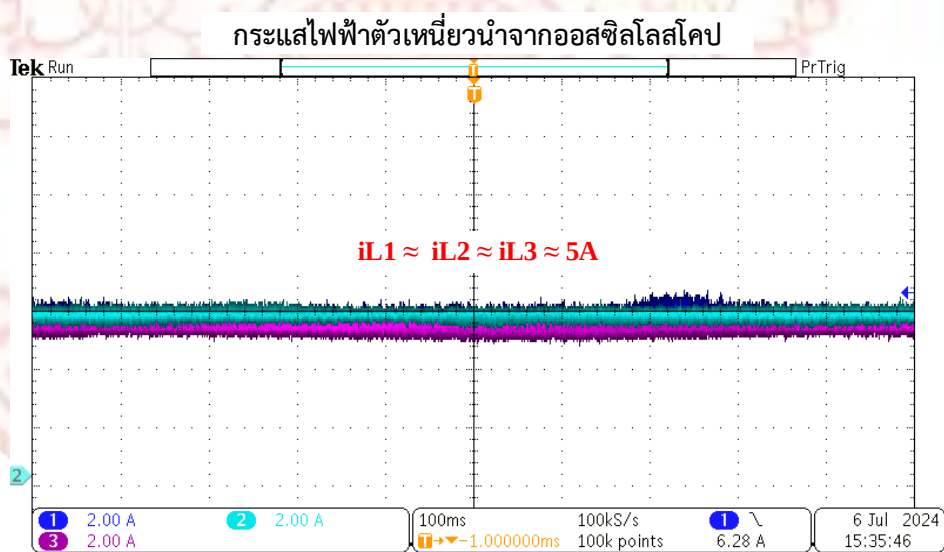
ภาพที่ 4-7 แรงดันไฟฟ้าขาเข้าของการทดลองในสถานการณ์ที่ 3 (สัญญาณจาก dSPACE)



ภาพที่ 4-8 การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุขาเข้าของการทดลองในสถานการณ์ที่ 3 (สัญญาณจาก dSPACE)



ภาพที่ 4-9 การตอบสนองของกระแสตัวเหนี่ยวนำ
ของการทดลองในสถานการณ์ที่ 3 (สัญญาณจาก dSPACE)



ภาพที่ 4-10 การตอบสนองของกระแสตัวเหนี่ยวนำของการทดลองในสถานการณ์ที่ 3

4.4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองของวงจรแปลงผันไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุมที่นำเสนอภายใต้สถานการณ์จำลองทั้ง 3 นั้นพบว่าตัวควบคุมสามารถบังคับกระแสเข้าสู่จุดอ้างอิงที่ต้องการและยังสามารถรักษาความสมดุลของแรงดันตัวเก็บประจุอินพุต จากจุดนี้เมื่อนำไปใช้กับโพลดิเล็กโทรไลเซอร์เพื่อผลิตไฮโดรเจนก็จะสามารถที่จะรักษาอัตราการผลิตให้คงที่ได้ต่อเนื่องภายใต้พารามิเตอร์ที่กำหนด

บทที่ 5

สรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์หลักคือพัฒนางจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันให้สามารถต่อใช้งานในลักษณะโมดูลได้โดยวงจรนี้พัฒนาขึ้นจากวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันสามระดับ โดยลักษณะโครงสร้างของวงจรแปลงผันไฟฟ้าที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นจะมีตัวเก็บประจุที่ต่อในลักษณะอนุกรมกันแล้วนำไปขนานกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าขาเข้า โดยหนึ่งโมดูลจะมีตัวเก็บประจุขาเข้าจำนวน 2 ตัว และแต่ละโมดูลนั้นจะใช้ตัวเก็บประจุร่วมกันหนึ่งตัว

จากการออกแบบดังกล่าวทำให้วงจรแปลงผันไฟฟ้ามีจุดเด่นคือ สามารถเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีพิกัดแรงดันต่ำกว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าขาเข้าได้ สามารถลดจำนวนตัวเก็บประจุขาเข้าได้ สามารถใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้าที่มีพิกัดแรงดันต่ำกว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าขาเข้าได้ เมื่อเทียบกับวงจรแปลงผันแบบลดแรงดันสามระดับดั้งเดิม

ตัวควบคุมในงานนี้เลือกใช้ตัวควบคุมโหมดเลื่อนแบบทางอ้อมจากการศึกษาพบว่ามีความเหมาะสมสำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้าสัญญาณที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยให้ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์มีประสิทธิภาพด้านพลวัตที่ดี และสามารถนำไปใช้ได้ง่าย ซึ่งเหมาะสมกับวงจรแปลงผันที่ได้พัฒนาขึ้น

ตัวอย่างการนำไปใช้งานได้เสนอการนำไปใช้กับโหลดอิเล็กทรอนิกส์ชนิดชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน อิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนผ่านกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการผลิตพลังงานที่สะอาดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

ในการทดลองจริงไม่ได้ทดลองกับโหลดอิเล็กทรอนิกส์และแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนของจริงแต่เป็นการใช้โหลดตัวต้านทานแทนโหลดอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งอ้างอิงจากการศึกษาแบบจำลองของอิเล็กทรอนิกส์ และใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจำลองว่าได้รับแรงดันไฟฟ้าจากพลังงานหมุนที่มีแรงดันไฟฟ้าไม่คงที่

ก่อนดำเนินการทดลองจริงได้สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับวงจรโมดูลแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันที่สามารถใช้งานได้ถึง N โมดูล แล้วนำแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นไปจำลองในเครื่องมือ ซิมูลิงค์ (Simulink) ของโปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB) ซึ่งการจำลองใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้าจำนวน 3 โมดูล จากการจำลองพบว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้าทำงานได้ดีตามสถานการณ์ต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ภายใต้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่กำหนดไว้

เพื่อยืนยันว่าวงจรโมดูลแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันที่เสนอสามารถใช้งานได้จริง จึงดำเนินการออกแบบลายวงจรแผ่นพิมพ์ เพื่อสร้างวงจรต้นแบบจำนวนสามโมดูล และทำการทดสอบวงจรภายใต้สถานการณ์และใช้ค่าพารามิเตอร์เดียวกันกับที่จำลอง พบว่าผลการทดลองนั้นสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยสามารถรักษากระแสไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับโหลดได้ตามที่ต้องการ และรักษาความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุขาเข้าได้เป็นอย่างดี

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลที่ได้จากการดำเนินการ พบว่างานที่ควรปรับปรุงและพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้น ดังต่อไปนี้

- 5.2.1 ศึกษาขั้นตอนการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้าต่อจำนวนโมดูลที่ต่อใช้งาน
- 5.2.2 ศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณค่าความเหนี่ยวนำขั้นต่ำ
- 5.2.3 ศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณค่าตัวเก็บประจุขั้นต่ำ
- 5.2.4 ศึกษาความคงทนในการควบคุมระบบต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ เช่น ค่าตัวเหนี่ยวนำ ค่าความจุของตัวเก็บประจุ
- 5.2.5 เพิ่มกระบวนการรักษาความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุขณะที่ตัวควบคุมจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้โหลดก่อนมีการควบคุมระบบ



บรรณานุกรม

1. V. Sihvonen and S. Honkapuro, "The Role of Energy Storage in Promoting Sustainable Energy Transition in an Island Community," 2024 20th International Conference on the European Energy Market (EEM), Istanbul, Turkey, 2024, pp. 1-7, doi: 10.1109/EEM60825.2024.10608853.
2. L. Chi, Z. Zhao, C. Xia and X. Chang, "A Case Study of Developing an Intelligent Management System for Energy Internet," 2020 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI), Sydney, NSW, Australia, 2020, pp. 69-73, doi: 10.1109/ICEI49372.2020.00021.
3. L. Ntogramatzidis, S. Cuoghi, M. Ricco, R. Mandrioli and G. Grandi, "A Novel MIMO Control for Interleaved Buck Converters in EV DC Fast Charging Applications," in IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 31, no. 4, pp. 1892-1900, July 2023, doi: 10.1109/TCST.2023.3237497.
4. D. Venkatramanan and V. John, "Dynamic Modeling and Analysis of Buck Converter Based Solar PV Charge Controller for Improved MPPT Performance," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 6, pp. 6234-6246, Nov.-Dec. 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2937856.
5. T. Cheng, D. D. -C. Lu and L. Qin, "Non-Isolated Single-Inductor DC/DC Converter With Fully Reconfigurable Structure for Renewable Energy Applications," in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 65, no. 3, pp. 351-355, March 2018, doi: 10.1109/TCSII.2017.2712286.
6. B. Yodwong, D. Guilbert, W. Kaewmanee, M. Phattanasak, M. Hinaje and G. Vitale, "Improved Sliding Mode-Based Controller of a High Voltage Ratio DC-DC Converter for Electrolyzers Supplied by Renewable Energy," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 71, no. 8, pp. 8831-8840, Aug. 2024, doi: 10.1109/TIE.2023.3322009.
7. M. Ilic, B. Hesterman and D. Maksimovic, "Interleaved zero current transition three-level buck converter," Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06., Dallas, TX, USA, 2006, pp. 7 pp.-, doi: 10.1109/APEC.2006.1620518.
8. B. Yodwong et al., "Reliable Control Strategy and Power Switch Failure Analysis of a Three-Level Interleaved Buck Converter for Electrolyzer Applications," 2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Chiang Mai, Thailand, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEMS56177.2022.9983171

9. A. Siangsanoh, M. Bahrami, W. Kaewmanee, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Phattanasak, J.P. Martin, B. Nahid-Mobarakeh, M. Weber, S. Pierfederici, G. Maranzana, S. Didierjean, "Series hybrid Electrolyzer/Supercapacitor power source", ELECTRIMACS 2019 – Salerno, Italy, 21st-23rd May 2019, Best paper award.
10. M. Afkar, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Phattanasak, A. Siangsanoh, J. -P. Martin and S. Pierfederici, "Generalization of a DC–DC Modular Converter Topology for Fuel Cell Applications," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 58, no. 2, pp. 2255-2267, March-April 2022, doi: 10.1109/TIA.2022.3142659.
11. Yodwong, B., Guilbert, D., Phattanasak, M., Kaewmanee, W., Hinaje, M., & Vitale, G. (2020). Proton Exchange Membrane Electrolyzer Modeling for Power Electronics Control: A Short Review. C, 6(2), 29. <https://doi.org/10.3390/c6020029>.
12. Yodwong, B., Guilbert, D., Hinaje, M., Phattanasak, M., Kaewmanee, W., & Vitale, G. (2021). Proton Exchange Membrane Electrolyzer Emulator for Power Electronics Testing Applications. Processes, 9(3), 498. <https://doi.org/10.3390/pr9030498>.
13. Guilbert, D., & Vitale, G. (2019). Dynamic Emulation of a PEM Electrolyzer by Time Constant Based Exponential Model. Energies, 12(4), 750. <https://doi.org/10.3390/en12040750>.
14. Øystein Ulleberg. (2003). Modeling of advanced alkaline electrolyzers: A system simulation approach. International Journal of Hydrogen Energy, 28(1), 21–33. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00033-2](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00033-2).
15. P.M. Diéguez, A. Ursúa, P. Sanchis, C. Sopena, E. Guelbenzu, L.M. Gandía. (2008). Thermal performance of a commercial alkaline water electrolyzer: Experimental study and mathematical modeling. International Journal of Hydrogen Energy, 33(24), 7338–7354.
16. J. Adam, "New correlations between electrical current and temperature rise in PCB traces," Twentieth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (IEEE Cat. No.04CH37545), San Jose, CA, USA, 2004, pp. 292-299, doi: 10.1109/STHERM.2004.1291337.
17. M. R. Jouppi and R. Mason, "Current-carrying capacity of PWB internal conductors in space environments," ITherm 2000. The Seventh Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (Cat. No.00CH37069), Las Vegas, NV, USA, 2000, pp. 255 - 263, doi: 10.1109/ITHERM.2000.866833.
18. Digi-Key Electronics. (n.d.). PCB trace width calculator. Retrieved January 26, 2025, from <https://www.digikey.com/en/resources/conversion-calculators/conversion-calculator-pcb-trace-width>

19. Advanced PCB. (n.d.). *Trace width calculator*. Advanced PCB. Retrieved January 26, 2025, from <https://www.advancedpcb.com/en-us/tools/trace-width-calculator/>
20. Guohui Wang, Y. Guan, J. Zhang, L. Wu, Xueyuan Zheng and W. Pan, "ESR estimation method for DC-DC converters based on improved EMD algorithm," Proceedings of the IEEE 2012 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-2012 Beijing), Beijing, China, 2012, pp. 1-6, doi: 10.1109/PHM.2012.6228949.
21. S. Udomkaew *et al.*, "Generalization of Modular Three-Level Buck Converter," 2024 12th International Electrical Engineering Congress (IEECON), Pattaya, Thailand, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/IEECON60677.2024.10537942.
22. Siangsano, A. Design and control of fuel cell management system with distributed supercapacitors storage element (Doctoral dissertation, Université de Lorraine & King Mongkut's University of Technology North Bangkok).
23. S. Udomkaew, W. Saksiri, K. Sengsui, M. Phattanasak, R. Gavagsaz-Ghoachani and S. Pierfederici, "Modular-three-level buck converter for electrolyzer applications: current control with capacitors voltage balancing control," 2023 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Chiang Mai, Thailand, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ITECAsia-Pacific59272.2023.10372357.



ภาคผนวก

ผลงานตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการนานาชาติของวิทยานิพนธ์

รายชื่อผลงานตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการนานาชาติ

1. S. Udomkaew, K. Sengsui, W. Saksiri, M. Phattanasak, R. Gavagsaz-Ghoachani and S. Pierfederici, "Cascaded control for a Two-output, Three-Level Buck Converter," *2024 International Conference on Materials and Energy: Energy in Electrical Engineering (ICOME-EE)*, Bangkok, Thailand, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICOME-EE64119.2024.10845363.
2. S. Udomkaew *et al.*, "Generalization of Modular Three-Level Buck Converter," *2024 12th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Pattaya, Thailand, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/iEECON60677.2024.10537942.
3. S. Udomkaew, W. Saksiri, K. Sengsui, M. Phattanasak, R. Gavagsaz-Ghoachani and S. Pierfederici, "Modular-three-level buck converter for electrolyzer applications: current control with capacitors voltage balancing control," *2023 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Chiang Mai, Thailand, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ITECAsia-Pacific59272.2023.10372357.
4. S. Udomkaew, K. Sengsui, W. Saksiri, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Phattanasak and S. Pierfederici, "Current and capacitor-voltage balancing controls of three-level buck converter," *2023 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovative Electricals and Electronics (RI2C)*, Bangkok, Thailand, 2023, pp. 360-364, doi: 10.1109/RI2C60382.2023.10355973.
5. S. Udomkaew, K. Sengsui, W. Saksiri, M. Phattanasak, R. Gavagsaz-Ghoachani and S. Pierfederici, "Two-Output Three-Level Buck Converter: Current Control with Capacitors Voltage Balancing Control," *2023 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovative Electricals and Electronics (RI2C)*, Bangkok, Thailand, 2023, pp. 370-374, doi: 10.1109/RI2C60382.2023.10355984.

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ** นายศรีมงคล อุดมแก้ว
- ชื่อวิทยานิพนธ์** วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบลดแรงดันที่มีหลายเอาต์พุต
- สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า
- ประวัติ**
- วัน / เดือน / ปีเกิด : 14 พฤษภาคม 2542
 - ภูมิลำเนา : อุดมราชธานี
 - ที่อยู่ : บ้านเลขที่ 22 หมู่ที่ 4 ตำบลโพรงงาม
อำเภอเดชอุดม จังหวัดอุบลราชธานี
รหัสไปรษณีย์ 34160
 - โทรศัพท์มือถือ : 062-1149826
 - อีเมลล์ : smkhon.u@gmail.com
- ประวัติการศึกษา**
- ปีการศึกษา 2564 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์ อุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 - ปีการศึกษา 2561 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ ชั้นสูง สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคนิค เดชอุดม
 - ปีการศึกษา 2559 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคเดชอุดม
 - ปีการศึกษา 2556 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนเดชอุดม
 - ปีการศึกษา 2553 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา โรงเรียนนิคมสร้างตนเองลำโดมใหญ่