



วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต

นายกฤตยชญ์ เส็งสุย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต

นายกฤตยชญ์ แสงสุย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาลัทธิ

ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองโครงงานวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต

โดย นายกฤตยชญ์ แสงสุย

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

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

อาจารย์ที่ปรึกษา

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

กรรมการ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณี น้อยยิ่ง)

ชื่อ : นายกฤตยชญ์ แสงสุข
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลาย
 แหล่งจ่ายอินพุต
 สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศาสตราจารย์ ดร.เมธิพจน์ พัฒนศักดิ์
 ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต โดยมีต้นแบบในการศึกษาและพัฒนาจากวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับที่นำมาต่อใช้งานร่วมกันจำนวนสองโมดูลเพื่อให้สามารถรับแหล่งจ่ายอินพุตที่มีมากกว่าหนึ่งแหล่งจ่ายในการจ่ายให้กับโหลดที่ต้องการใช้งาน ซึ่งในการออกแบบนั้นมีแนวคิดมาจากวงจรต้นแบบนั้นมีข้อจำกัดในด้านความร้อนสะสมอันเนื่องมาจากความเครียดของอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่เท่ากันเพราะ Duty cycle ที่ใช้กำหนดสัญญาณคำสั่งสวิตช์นั้นไม่สมดุลกันเมื่อใช้งานไปนาน ๆ อาจทำให้อุปกรณ์สวิตช์เกิดความเสียหายได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุตเพื่อแก้ปัญหาที่กล่าวมานี้ โดยการนำวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันดั้งเดิมเป็นแหล่งจ่ายช่วยแก้ตัวเก็บประจุเพื่อให้ได้รับความถี่ในการกระเพื่อมของแรงดันเท่ากับตัวเก็บประจุตรงกลางที่ได้รับความถี่เป็นสองเท่าจากทั้งสองโมดูลด้วยเทคนิคนี้จะสามารถทำให้ Duty cycle ที่ใช้กำหนดสัญญาณคำสั่งสวิตช์นั้นมีความสมดุลกัน พร้อมทั้งควบคุมกระแสด้านเข้าและควบคุมให้แรงดันตัวเก็บประจุเอาต์พุตทุกตัวมีค่าเท่ากันด้วยตัวควบคุมโหมดเลื่อนแบบทางอ้อม ซึ่งมีจุดเด่นในด้านความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์และประสิทธิภาพด้านพลวัต ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอการใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายด้านเข้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งจำลองการทดลองด้วยโหลดตัวต้านทานและแหล่งจ่ายไฟฟ้าจำลอง การออกแบบวงจรและสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ถูกทดสอบใน MATLAB/Simulink ผลการจำลองแสดงว่าวงจรสามารถทำงานได้ดีในสถานการณ์ต่าง ๆ เพื่อยืนยันผลการออกแบบได้สร้างวงจรต้นแบบและทดสอบในสถานการณ์เดียวกับการจำลอง ซึ่งสามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าเพื่อจ่ายแก่โหลดและรักษาสมดุลแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุได้เป็นอย่างดี ซึ่งแสดงถึงความสอดคล้องระหว่างผลการทดลองและการจำลอง พร้อมทั้งยืนยันประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ในการใช้งานจริง

(มีจำนวนทั้งสิ้น 55 หน้า)

คำสำคัญ : วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต, Duty cycle สมดุล, โหมดเลื่อนแบบทางอ้อม, เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน, พลังงานหมุนเวียน
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Mr. Krittayot Sengsui
Thesis Title : Multi-input DC-DC boost 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 presents the design and development of a multi-input Boost converter based on a three-level boost topology. The proposed circuit integrates two modules to accommodate multiple input sources and supply power efficiently to the load. A key challenge in conventional designs is heat accumulation due to imbalanced Duty cycles, which degrades performance and may damage switching components over time. To address this, a novel multi-input boost converter is proposed, utilizing a conventional boost converter to assist capacitor charging and ensure balanced switching signals. An indirect sliding mode controller is implemented to regulate input current and balance the output capacitor voltages, enhancing robustness against parameter variations and improving dynamic performance. The proposed converter is evaluated with a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) as the input source. MATLAB/Simulink simulations confirm its effectiveness under various conditions, and experimental validation with a prototype demonstrates strong agreement with simulation results, verifying the circuit's practical feasibility and performance.

(Total 55 Pages)

Keywords: multi-input Boost Converter, Balance Duty cycle, Indirect Sliding Mode Control, proton exchange membrane fuel cell, Renewable Energy

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีอันเนื่องด้วยการได้รับคำแนะนำ การให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากศาสตราจารย์ ดร.เมธิพจน์ พัฒนศักดิ์ ท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตากรุณาให้การสนับสนุนช่วยเหลือและคำปรึกษาในการจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง อันเป็นประโยชน์ในทุกขั้นตอนของการทำงาน ผู้จัดทำขอแสดงความขอบคุณจากใจอย่างสุดซึ้งและขอขอบพระคุณคณะครู อาจารย์ บุคลากรที่ประจำภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้าทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชา และได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ โดยตลอดขณะที่ศึกษาอยู่ และขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นมิตรภาพที่ดีตลอดมา

ท้ายนี้ผู้จัดทำใคร่ขอกราบขอบพระคุณ นายสมโชค แสงสุย (บิดา) และนางสุกานดา แสงสุย (มารดา) ซึ่งได้อุปการะเลี้ยงดูอบรมสั่งสอนให้ โอกาสทางการศึกษา สนับสนุนในด้านการเงิน และเป็นที่ยึดเหนี่ยวจิตใจรวมถึงการเป็นแรงบันดาลใจให้ตั้งใจทำวิทยานิพนธ์และคอยให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจ และเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

กฤตยชญ์ แสงสุย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูปภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์โครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตโครงการ.....	1
1.4 วิธีการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง (Boost Converter).....	3
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cell) .	13
2.3 ตัวควบคุมโหมดเลื่อนทางอ้อม (In-direct Sliding mode controller).....	15
บทที่ 3 การดำเนินงาน.....	17
3.1 ออกแบบภาคกำลังของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต .	17
3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต	19
3.3 การควบคุมของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต	23
3.4 จำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต โดยใช้ MATLAB/Simulink.....	25
3.5 จำลองความไม่เป็นอุดมคติของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่าย อินพุต.....	38
บทที่ 4 ผลการทดลอง	40
4.1 รายละเอียดลักษณะสมบัติระบบ	40
4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	40
4.3 การทดลอง	41
4.4 สรุปผลการทดลอง	47

บทที่ 5 สรุป และข้อเสนอแนะ.....	48
5.1 สรุป.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	48
บรรณานุกรม.....	49
ภาคผนวก.....	52
ประวัติผู้เขียน.....	56



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3 - 1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่าย อินพุต.....	19
ตารางที่ 3 - 2 พารามิเตอร์วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต และตัวควบคุม.....	25
ตารางที่ 3 - 3 การเปลี่ยนแปลงกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์.....	27
ตารางที่ 3 - 4 การเปลี่ยนแปลงกระแสอ้างอิง i_{ref}	31
ตารางที่ 3 - 5 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานโหลด R_L ตามช่วงเวลา.....	34
ตารางที่ 3 - 6 การเปลี่ยนแปลงความต้านแฝงในตัวเหนี่ยวนำ	38
ตารางที่ 4 - 1 พารามิเตอร์วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต และตัวควบคุม.....	41
ตารางที่ 4 - 2 การกำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์	42
ตารางที่ 4 - 3 การเปลี่ยนแปลงกระแสอ้างอิง i_{ref} ตามช่วงเวลา.....	43
ตารางที่ 4 - 4 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานโหลด R_L ตามช่วงเวลา.....	45

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 2 - 1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันดั้งเดิม	3
ภาพที่ 2 - 2 แรงดันไฟฟ้าและกระแสในสภาวะคงตัวของวงจร	4
ภาพที่ 2 - 3 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส t_{on}	4
ภาพที่ 2 - 4 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส t_{off}	5
ภาพที่ 2 - 5 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับ	6
ภาพที่ 2 - 6 สภาวะการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับ	7
ภาพที่ 2 - 7 รูปคลื่นที่การทำงานของสวิตช์ u_{11} , u_{12} ทำงานพร้อมกัน	8
ภาพที่ 2 - 8 รูปคลื่นที่การทำงานของสวิตช์ u_{11} , u_{12} ทำงานไม่พร้อมกันที่ $d_1 = d_2 < 0.5$	9
ภาพที่ 2 - 9 รูปคลื่นที่การทำงานของสวิตช์ u_{11} , u_{12} ทำงานไม่พร้อมกันที่ $d_1 = d_2 > 0.5$	10
ภาพที่ 2 - 10 การเปรียบเทียบกระแสกระเพื่อม (Ripple current) จากเทคนิคการ Switching.....	11
ภาพที่ 2 - 11 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับจำนวนสองโมดูล ที่มีตัวเก็บประจุร่วม [4]	12
ภาพที่ 2 - 12 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับจำนวนสองโมดูล [12]	13
ภาพที่ 2 - 13 แผนผังการทำงานของ PEMFC [15].....	14
ภาพที่ 3 - 1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับจำนวนสองโมดูล [4]	18
ภาพที่ 3 - 2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต [22]	18
ภาพที่ 3 - 3 การสร้างสัญญาณ PWM สำหรับระบบ.....	20
ภาพที่ 3 - 4 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมระบบ	24
ภาพที่ 3 - 5 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต Simscape	26
ภาพที่ 3 - 6 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต MATLAB Function	26
ภาพที่ 3 - 7 สมการและบล็อกควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง แบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายอินพุต.....	27
ภาพที่ 3 - 8 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} , i_{LT} และ i_{LB} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่กำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์	28
ภาพที่ 3 - 9 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ V_{C1} , V_{C2} , และ V_{C3} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่กำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์ ..	28

ภาพที่ 3 - 10	Duty cycle $d_T, d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}, d_B$ ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่กำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์.....	29
ภาพที่ 3 - 11	Duty cycle เฉลี่ย $d_T, d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}, d_B$ ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่กำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์.....	29
ภาพที่ 3 - 12	แรงดันไฟฟ้าด้านขาออก V_{dc} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่กำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์.....	30
ภาพที่ 3 - 13	กระแสไฟฟารวม i_{ch} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่กำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์.....	30
ภาพที่ 3 - 14	กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1}, i_{L2}, i_{LT} และ i_{LB} และ i_{ref} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสอ้างอิง i_{ref}	31
ภาพที่ 3 - 15	แรงดันที่ตัวเก็บประจุ V_{C1}, V_{C2} , และ V_{C3} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสอ้างอิง i_{ref}	32
ภาพที่ 3 - 16	Duty cycle $d_T, d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}, d_B$ ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสอ้างอิง i_{ref}	32
ภาพที่ 3 - 17	Duty cycle เฉลี่ย $d_T, d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}, d_B$ ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสอ้างอิง i_{ref}	33
ภาพที่ 3 - 18	แรงดันไฟฟ้าด้านขาออก V_{dc} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสอ้างอิง i_{ref}	33
ภาพที่ 3 - 19	กระแสไฟฟารวม i_{ch} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสอ้างอิง i_{ref}	34
ภาพที่ 3 - 20	กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1}, i_{L2}, i_{LT} และ i_{LB} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานโหลด R_L	35
ภาพที่ 3 - 21	แรงดันที่ตัวเก็บประจุ V_{C1}, V_{C2} , และ V_{C3} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานโหลด R_L	35

ภาพที่ 3 - 22 Duty cycle $d_T, d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}, d_B$ ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานโหลด R_L	36
ภาพที่ 3 - 23 Duty cycle เฉลี่ย $d_T, d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}, d_B$ ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานโหลด R_L	36
ภาพที่ 3 - 24 แรงดันไฟฟ้าด้านขาออก V_{dc} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานโหลด R_L ...	37
ภาพที่ 3 - 25 กระแสไฟฟารวม i_{ch} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานโหลด R_L	37
ภาพที่ 3 - 26 Duty cycle เฉลี่ย $d_T, d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}, d_B$ ในสถานการณ์ที่ความต้านทานแฝงในตัวเหนี่ยวนำ r_{i1}, r_{i2} ไม่เท่ากัน.....	39
ภาพที่ 3 - 27 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1}, i_{L2}, i_{LT} และ i_{LB} และแรงดันที่ตัวเก็บประจุ V_{C1}, V_{C2} , และ V_{C3} ในสถานการณ์ที่ความต้านทานแฝงในตัวเหนี่ยวนำ r_{i1}, r_{i2} ไม่เท่ากัน.....	39
ภาพที่ 4 - 1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	41
ภาพที่ 4 - 2 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1}, i_{L2}, i_{LT} และ i_{LB} และค่ากระแสอ้างอิง i_{ref} ในสถานการณ์ที่กำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์.....	42
ภาพที่ 4 - 3 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ V_{C1}, V_{C2} , และ V_{C3} ในสถานการณ์ที่กำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์	42
ภาพที่ 4 - 4 Duty cycle $d_T, d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}, d_B$ ในสถานการณ์ที่กำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์	43
ภาพที่ 4 - 5 แรงดันด้านขาออก V_{dc} ในสถานการณ์ที่กำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์.....	43
ภาพที่ 4 - 6 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1}, i_{L2}, i_{LT} และ i_{LB} และค่ากระแสอ้างอิง i_{ref} ในสถานการณ์ที่กระแสอ้างอิง i_{ref} เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา.....	44
ภาพที่ 4 - 7 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ V_{C1}, V_{C2} , และ V_{C3} ในสถานการณ์ที่กระแสอ้างอิง i_{ref} เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา	44
ภาพที่ 4 - 8 Duty cycle $d_T, d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}, d_B$ ในสถานการณ์ที่กระแสอ้างอิง i_{ref} เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา	44
ภาพที่ 4 - 9 แรงดันด้านขาออก V_{dc} ในสถานการณ์ที่กระแสอ้างอิง i_{ref} เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา.....	45
ภาพที่ 4 - 10 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1}, i_{L2}, i_{LT} และ i_{LB} ในสถานการณ์ที่ความต้านทานโหลด R_L เกิดการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา.....	45

- ภาพที่ 4 - 11 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ V_{C1} , V_{C2} , และ V_{C3} ในสถานะการณ์ที่ความต้านทานโหลด R_L เกิดการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา..... 46
- ภาพที่ 4 - 12 Duty cycle d_T , d_{11} , d_{12} , d_{21} , d_{22} , d_B ในสถานะการณ์ที่ความต้านทานโหลด R_L เกิดการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา 46
- ภาพที่ 4 - 13 แรงดันด้านขาออก V_{dc} ในสถานะการณ์ที่ความต้านทานโหลด R_L เกิดการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา..... 46



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันราคาพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้นและมีความผันผวนทำให้เกิดวิกฤตพลังงานที่มนุษยชาติต้องเผชิญในตลาด ตัวอย่างหนึ่งที่น่าสนใจคือสถานการณ์ในยุโรป เนื่องจากการหยุดชะงักของการขนส่งพลังงานระหว่างการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัส และสงครามในยูเครนที่มีสถานการณ์รุนแรงขึ้นทำให้ไม่สามารถจัดหาเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้ในการผลิตพลังงานได้และเพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้หลายประเทศในยุโรปตั้งใจที่จะเปลี่ยนจากการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิลในการผลิตพลังงานไปเป็นการผลิตพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy Sources : RES) และเพื่อลดการนำเข้าพลังงานจากรัสเซียหลายประเทศในยุโรปถือว่าการลงทุนในการพัฒนา RES มีความสำคัญเชิงกลยุทธ์ [1]

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells : FC) กลายเป็นทางเลือกที่มีความคุ้มค่าในภาคของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน FC ถือว่าเป็นพลังงานที่สามารถนำมาใช้งานได้ฟรีและมีการบำรุงรักษาที่ต่ำ สิ่งนี้ชี้ให้เห็นว่า FC มีศักยภาพที่จะมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนไปสู่ระบบพลังงานที่ยั่งยืน [2] แต่ในระบบ FC มีข้อจำกัดก็คือให้แรงดันเอาต์พุตต่ำและเพื่อที่จะให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นจึงจำเป็นต้องใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดเพิ่มแรงดันเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้กับ FC [3] ใน [4]-[5] มีการนำเสนอโมดูลาร์แบบใหม่ที่ใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับที่มีการควบคุมกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำและสมดุลแรงดันของตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุตโดยมีแหล่งจ่ายอินพุตจำนวนสองอินพุตนั้นเมื่อมีการควบคุมให้กระแสอินพุตที่เท่ากันและควบคุมแรงดันที่ตัวเก็บประจุเอาต์พุตให้สมดุลกันได้นั้นจะทำให้ Duty cycle ของสวิตช์ไม่เท่ากันทำให้เกิดความร้อนภายในสวิตช์แต่ละตัวไม่เท่ากัน

ดังนั้นจากความสำคัญและข้อจำกัดของวงจรแปลงผันไฟฟ้าที่กล่าวมาจึงมีแนวคิดในการปรับปรุงวงจรดังกล่าวโดยนำวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับจำนวนสองอินพุตแบบเดิมต่อร่วมกับวงจรแปลงผันวงจรไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันดั้งเดิมจำนวนสองอินพุต การต่อในลักษณะนี้จะมีเงื่อนไขบางประการที่สามารถทำให้ Duty cycle ของสวิตช์เท่ากันทั้งหมด

1.2 วัตถุประสงค์โครงการ

เพื่อออกแบบและสร้าง วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต

1.3 ขอบเขตโครงการ

1.3.1. ลักษณะสมบัติภาคกำลังของวงจรแปลงผันไฟฟ้า

- 1.3.1.1. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามจำนวน 2 อินพุตต่อร่วมกับวงจรไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันดั้งเดิมจำนวน 2 อินพุต
- 1.3.1.2. รับแรงดันไฟฟ้าอินพุตจากแหล่งจ่ายไฟตรงไม่ต่ำกว่า 12 V
- 1.3.1.3. แรงดันเอาต์พุตไฟตรงของวงจรไม่เกิน 100 V
- 1.3.1.4. กระแสเอาต์พุตไฟตรงของวงจรไม่เกิน 10 A

1.3.2. ใช้ชุดควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบดิจิตอล

1.3.2.1. สร้างสัญญาณ PWM ควบคุมสวิทช์ที่ความถี่สวิทช์ไม่ต่ำกว่า 20 kHz

1.4 วิธีการวิจัย

1.4.1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต

1.4.1. ออกแบบลักษณะโครงสร้างของโมดูลวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต

1.4.1. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต

1.4.1. จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

1.4.1. ออกแบบวงจรกำลังและวงจรขับเคลื่อน

1.4.1. สร้างแบบวงจรกำลังและวงจรขับเคลื่อน

1.4.1. ออกแบบการทดลองวงจร

1.4.1. เตรียมอุปกรณ์สำหรับบันทึกผลการทดลอง

1.4.1. ทดลองและแก้ไขปัญหา

1.4.1. สรุปผลและจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถรับอินพุตได้สี่แหล่งจ่าย และสามารถนำแหล่งพลังงานจำนวนสี่แหล่งในการจ่ายไฟฟ้าให้กับเอาต์พุตร่วม และมี Duty cycle ของสวิทช์ที่เท่ากันภายใต้สภาวะการทำงานที่กำหนด

บทที่ 2

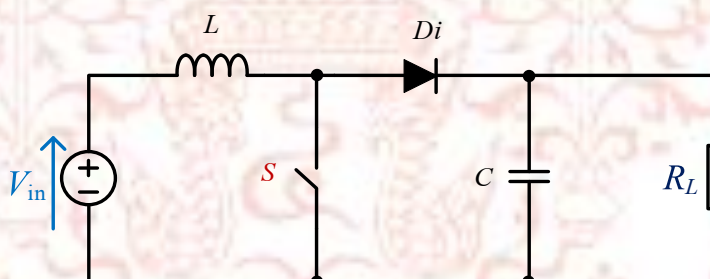
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรม และศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการจัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง “วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต” โดยมีรายละเอียดตามหัวข้อดังนี้

- 2.1. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง (Boost converter)
- 2.2. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (proton exchange membrane fuel cell)
- 2.3. ตัวควบคุมโหมดเลื่อนทางอ้อม (In-direct sliding mode controller)

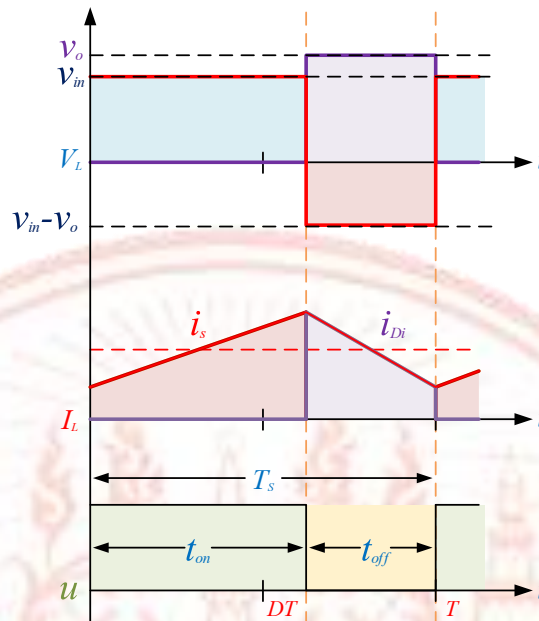
2.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง (Boost Converter)

2.1.1. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันดั้งเดิม (Basic boost converter) [6] แสดงดังภาพที่ 2 - 1 เป็นวงจรที่ทำหน้าที่เพิ่มแรงดันไฟฟ้าจากระดับหนึ่งไปอีกระดับหนึ่งโดยที่แรงดันด้านขาออกจะมีค่าสูงกว่าแรงดันด้านขาเข้าเสมอ วงจรนี้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานหลากหลายด้าน เนื่องจากความสามารถในการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าได้ และเหมาะสำหรับอุปกรณ์หรือระบบที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแหล่งจ่ายที่มีอยู่ เช่น การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ เซลล์เชื้อเพลิง อุปกรณ์ทางการแพทย์ และยานยนต์ไฟฟ้า เป็นต้น

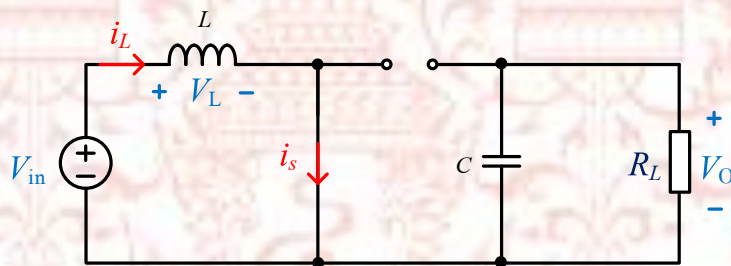


ภาพที่ 2 - 1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันดั้งเดิม

พิจารณาวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันดั้งเดิมในอุดมคติและมีแรงดันอินพุตคงที่ ค่าความจุของตัวเก็บประจุมีค่ามากจนแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ วงจรนี้ทำงานโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำและการสวิตชิง ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 4 ส่วนสำคัญ ได้แก่ 1. ตัวเหนี่ยวนำ L ทำหน้าที่สะสมพลังงานในรูปของสนามแม่เหล็กเมื่อสวิตช์ปิด 2. สวิตช์ S ทำหน้าที่เปิด - ปิดวงจรเพื่อควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้า 3. ไดโอด D_i ทำหน้าที่บังคับให้กระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวเพื่อป้องกันไม่ให้กระแสไหลย้อนกลับ 4. ตัวเก็บประจุ C ทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้าและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ โดยช่วงการทำงานในสภาวะคงตัวสามารถแบ่งเป็น 2 ช่วงตามสถานะของสวิตช์ได้ดังนี้



ภาพที่ 2 - 2 แรงดันไฟฟ้าและกระแสในสภาวะคงตัวของวงจร



ภาพที่ 2 - 3 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส t_{on}

2.1.1.1. ช่วงที่สวิตช์นำกระแส t_{on} ในภาพที่ 2 - 3 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส t_{on} วงจรจะเชื่อมต่อแหล่งจ่ายแรงดันขาเข้า V_{in} กับตัวเหนี่ยวนำ L ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ $i_L = i_s$ ดังกราฟ I_L ในภาพที่ 2 - 2 และเกิดการสะสมพลังงานในรูปของสนามแม่เหล็ก ขณะเดียวกัน ไดโอด Di จะถูกไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias) ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านไปยังตัวเก็บประจุ C และโหลด R ได้ ส่งผลให้ตัวเก็บประจุ C ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานชั่วคราวให้กับโหลด R ทำให้แรงดันขาออก V_o ลดลง โดยที่สามารถเขียนเป็นสมการจากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ได้ดังนี้

$$-V_{in} + v_L = 0 \quad (2-1)$$

$$v_L = V_{in} = L \frac{di_L}{dt} \quad (2-2)$$

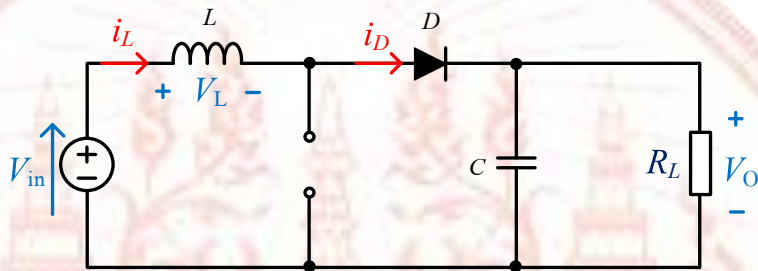
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} \quad (2-3)$$

ขณะที่สวิตช์นำกระแส $dt = DT$ เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสคงที่ เนื่องจากวงจรมีลักษณะเป็นอุดมคติการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้ดังสมการด้านล่างนี้

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_{in}}{L} \quad (2-4)$$

$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_{in}DT}{L} \quad (2-5)$$

$\Delta i_{L,on}$ หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแส



ภาพที่ 2 - 4 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส t_{off}

2.1.1.2. ช่วงที่สวิตช์ไม่นำกระแส t_{off} ในภาพที่ 2 - 4 วงจรจะตัดเส้นทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสวิตช์ ส่งผลให้สนามแม่เหล็กในตัวเหนี่ยวนำยุบตัวลงและเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งมีทิศทางเสริมกับแรงดันขาเข้า V_{in} ทำให้แรงดันรวมมีค่าสูงกว่าแรงดันขาเข้า V_{in} ผลที่ตามมาคือ ไดโอด D_i จะถูกไบอัสตรง (Forward Bias) และนำกระแสไฟฟ้าจากตัวเหนี่ยวนำ $i_L = i_{Di}$ ดังกราฟ I_L ในภาพที่ 2 - 2 ผ่านไดโอด D_i ไปยังตัวเก็บประจุ C และโหลด L ทำให้ตัวเก็บประจุ C เก็บประจุและแรงดันขาออก V_o เพิ่มขึ้น โดยที่สามารถเขียนเป็นสมการจากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ได้ดังนี้

$$-V_{in} + v_L + V_o = 0 \quad (2-6)$$

$$v_L = V_{in} - V_o \quad (2-7)$$

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2-8)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in} - V_o}{L} \quad (2-9)$$

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส $dt = (1 - D)T$ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ และจะถือว่าการลดลงของกระแสเป็นเชิงเส้นดังภาพที่ 2 - 2 ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta i_{L,off} = \frac{V_{in} - V_o}{L} (1 - D)T \quad (2-10)$$

ที่สภาวะคงตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์ จากสมการที่ (2-5) และสมการที่ (2-10) จะได้ว่า

$$\Delta i_{L,off} + \Delta i_{L,on} = 0 \quad (2-11)$$

$$\left(\frac{V_{in}}{L}\right)DT + \frac{(V_{in} - V_o)}{L}(1-D)T = 0 \quad (2-12)$$

$$V_{in}D + (V_{in} - V_o)(1-D) = 0 \quad (2-13)$$

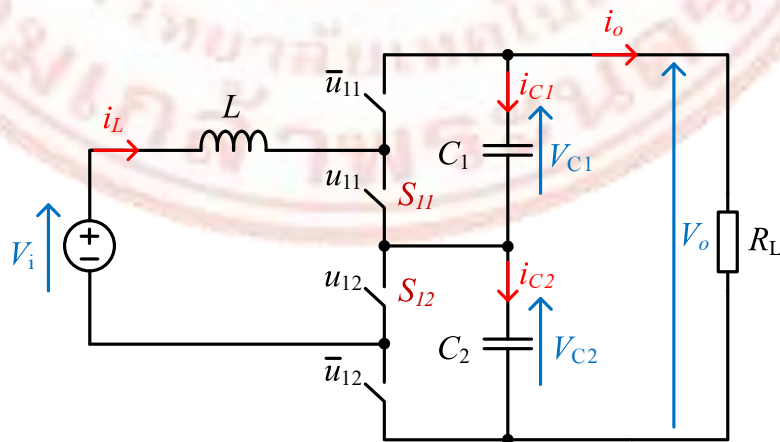
$$V_{in}D + V_{in} - V_{in}D - V_o + V_oD = 0 \quad (2-14)$$

$$V_{in} - V_o(1-D) = 0 \quad (2-15)$$

จากความสัมพันธ์ของการทำงานของวงจรสามารถหาค่าอัตราส่วนการถ่ายโอนแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้จากสมการที่ (2-16)

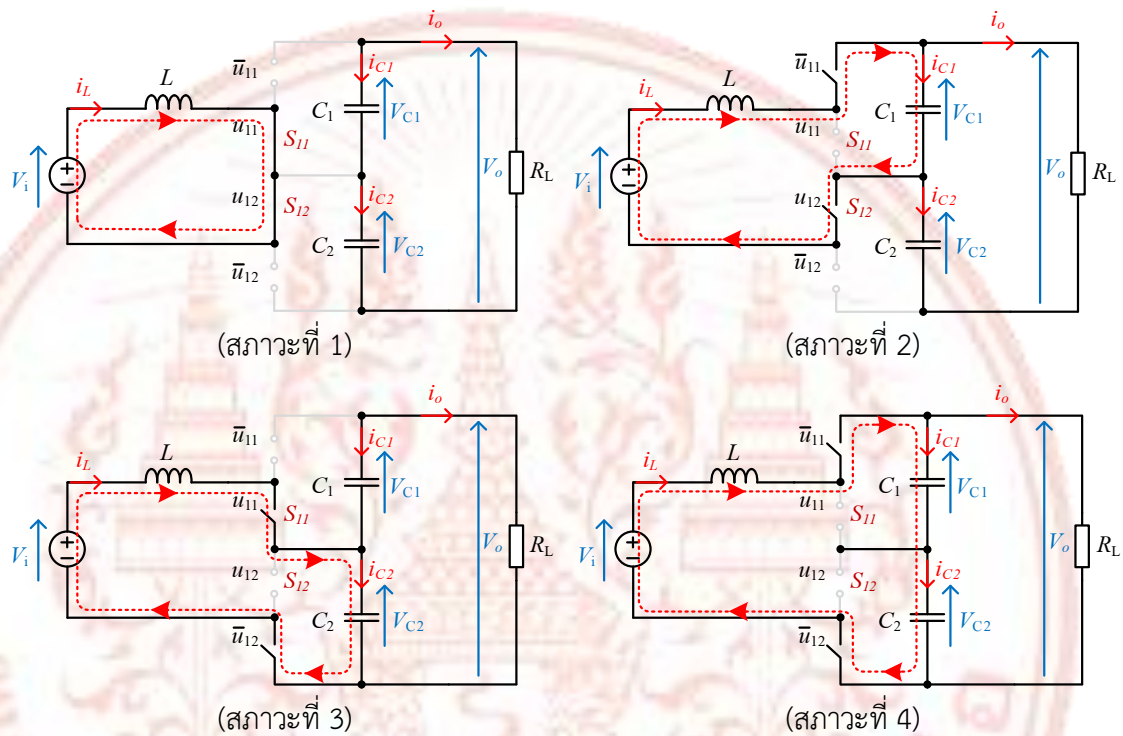
$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (2-16)$$

2.1.2. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับ (Three-level boost converter) [7]-[9] ในภาพที่ 2 - 5 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับ เป็นวงจรที่พัฒนามาจากวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันดั้งเดิม โดยมีจุดเด่นคือสามารถลดความเครียดของอุปกรณ์สวิตชิง และลดการสูญเสียพลังงานได้ดีขึ้น เนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิตชิงมีค่าลดลงครึ่งหนึ่ง เมื่อเทียบกับวงจรแบบดั้งเดิมทำให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่า วงจรนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในระบบที่ต้องการประสิทธิภาพสูง



ภาพที่ 2 - 5 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับ

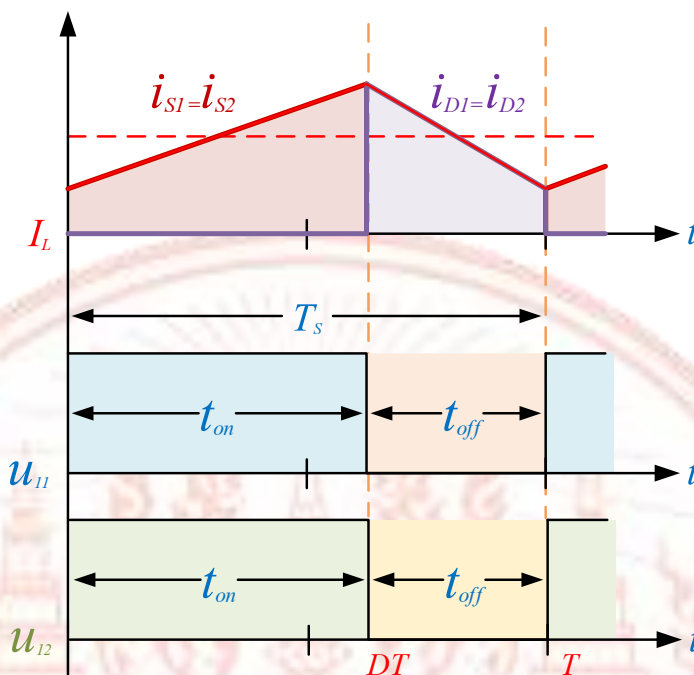
วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับแสดงในภาพที่ 2 - 5 สวิตช์ S_{11} และ S_{12} สามารถทำงานพร้อมกันหรือต่างเฟสกันระหว่างสวิตช์ได้โดยขึ้นอยู่กับ Duty cycle ที่ใช้ควบคุม u_{11} , u_{12} ของสวิตช์โดยแบ่งเป็นสถานะการทำงานได้ทั้งหมด 4 สถานะดังแสดงในภาพที่ 2 - 6 และ u_{11} , u_{12} จะแทนด้วยอุปกรณ์ไดโอดโดยมีการทำงานที่ตรงข้ามกับสวิตช์ S_{11} และ S_{12} เสมอ



ภาพที่ 2 - 6 สถานะการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับ

2.1.2.1. สวิตช์ S_{11} และ S_{12} ทำงานพร้อมกัน (In-Phase Switching) และค่า Duty cycle เท่ากัน วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับจะทำงานเหมือนกับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันดั้งเดิม และวงจรจะมีสถานะการทำงานระหว่างสถานะที่ 1 และสถานะที่ 4 ดังภาพที่ 2 - 6 ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตของวงจรจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-17)

$$V_o = \frac{1}{1-D} V_i \quad (2-17)$$



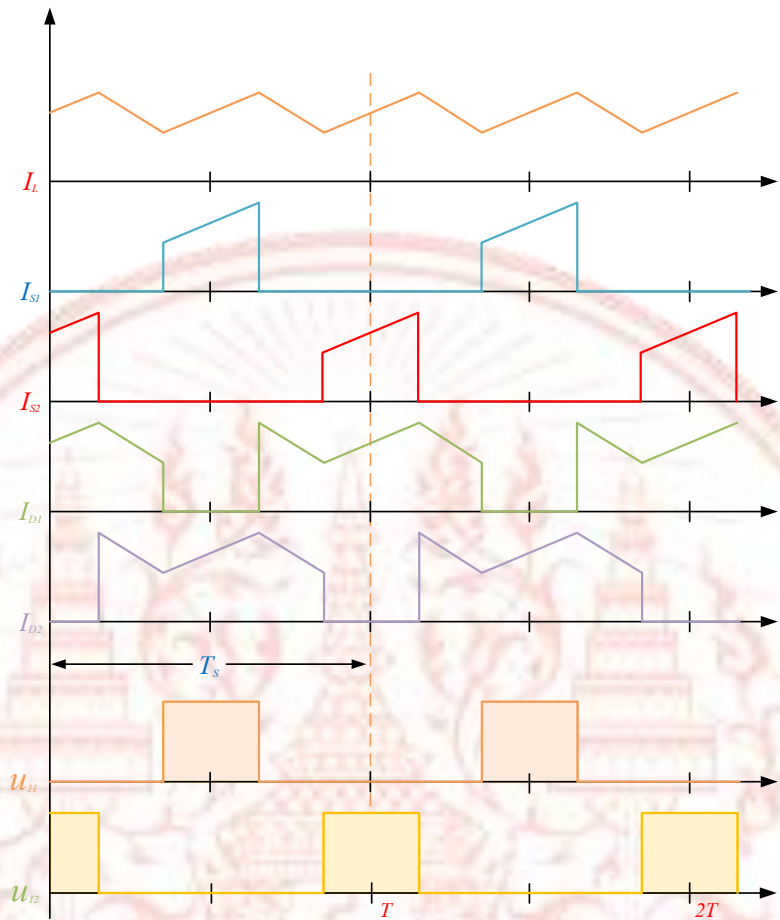
ภาพที่ 2 - 7 รูปคลื่นที่การทำงานของสวิตช์ u_{11} , u_{12} ทำงานพร้อมกัน

เวลาในการสวิตช์ u_{11} , u_{12} และรูปคลื่นกระแสของตัวเหนี่ยวนำ i_L สวิตช์ i_{S1} , i_{S2} และไดโอด i_{D1} , i_{D2} ที่แสดงในภาพที่ 2 - 7 สำหรับรูปแบบการสวิตช์ในกรณีนี้กระแสกระเพื่อม (Ripple current) ของตัวเหนี่ยวนำจะเท่ากับค่าการสวิตช์ f_s และค่ากระแสกระเพื่อม (Ripple current) peak to peak สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-18)

$$\Delta I_L = \frac{V_i \left(1 - \frac{V_o}{V_i}\right)}{L f_s} \quad (2-18)$$

2.1.2.2. สวิตช์ทำงานไม่พร้อมกัน (Out-of-Phase Switching) สถานะการทำงานของวงจรจะขึ้นอยู่กับค่า Duty cycle โดยแบ่งเป็น 2 กรณีดังนี้ กรณีที่ 1 หากเวลาการสวิตช์ u_{11} , u_{12} รวมกันแล้วมีค่าน้อยกว่า 1 สถานะการทำงานของวงจรคือสถานะที่ 2, 3 และ 4 กรณีที่ 2 หากเวลาการสวิตช์ u_{11} , u_{12} รวมกันแล้วมีค่ามากกว่า 1 สถานะการทำงานของวงจรสถานะที่ 1, 2 และ 3

2.1.2.2.1. กรณีแรกแสดงในภาพที่ 2 - 8 เวลาในการสวิตช์ u_{11} , u_{12} และรูปคลื่นกระแสของตัวเหนี่ยวนำ i_L ในที่นี้สิ่งสำคัญคือการใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าเท่ากับที่เอาต์พุตเพื่อแบ่งแรงดันเอาต์พุตเท่า ๆ กัน

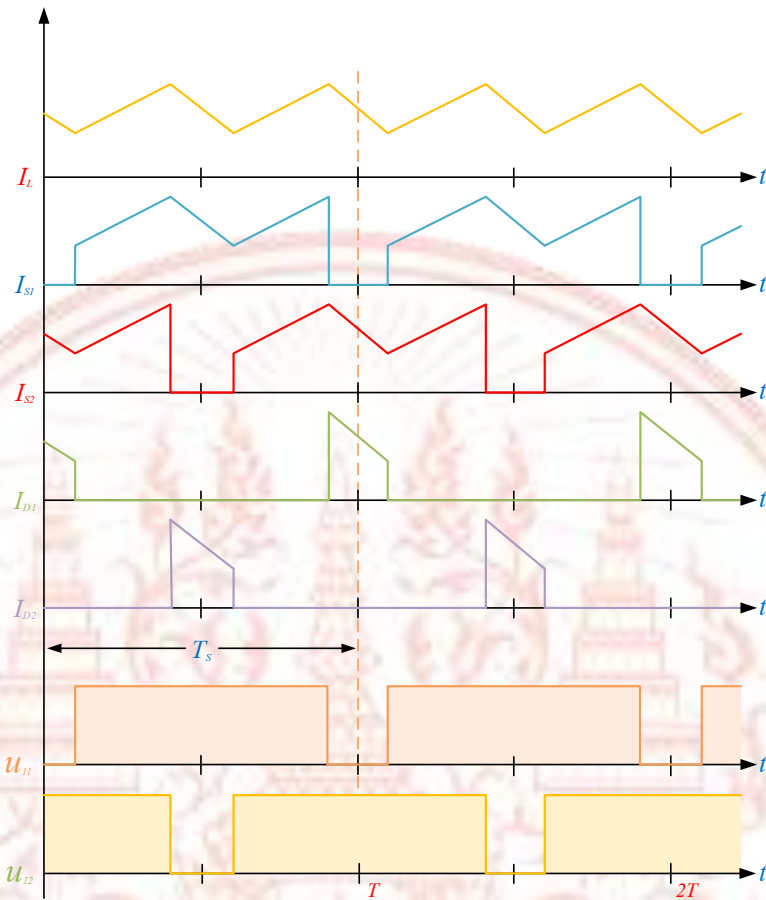


ภาพที่ 2 - 8 รูปคลื่นที่การทำงานของสวิตช์ u_{11} , u_{12} ทำงานไม่พร้อมกันที่ $d_1 = d_2 < 0.5$

การวิเคราะห์นี้สมมติว่าการทำงานเป็นไปตามอุดมคติ ดังที่แสดงในภาพที่ 2 - 8 ตัวเหนี่ยวนำจะสะสมพลังงานในสถานะที่ 2 และ 3 ด้วยแรงดัน $V_i - \frac{V_o}{2}$ ในขณะที่คายพลังงานในสถานะที่ 4 ซึ่งแรงดันของตัวเหนี่ยวนำคือ $(V_i - V_o)$ ดังนั้นอัตราส่วนการถ่ายโอนแรงดันของวงจรจะเขียนเป็นสมการได้โดยการใช้สมดุลแรงดัน - เวลา (Volt-Second balance) ของตัวเหนี่ยวนำที่เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงคงที่จะถือเป็นการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นดังแสดงในสมการ (2-19) และ (2-20) ซึ่งอัตราส่วนการถ่ายโอนที่ได้จะเหมือนกับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันดั้งเดิม

$$\left(V_{in} - \frac{V_o}{2}\right)(2D) + (V_{in} - V_o)(1 - 2D) = 0 \quad (2-19)$$

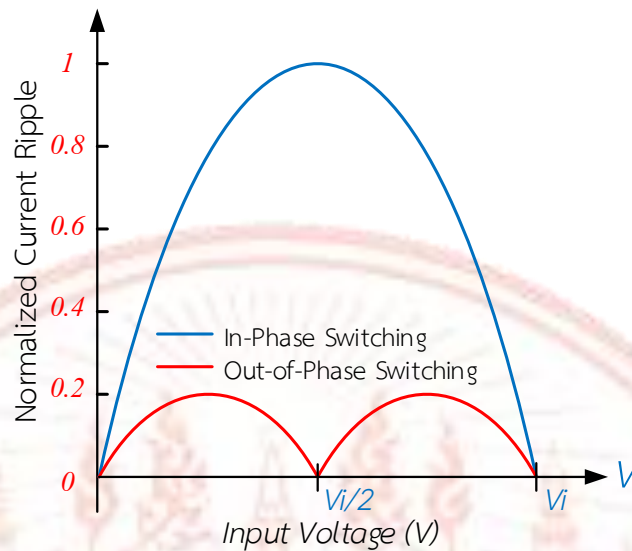
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - D} \quad (2-20)$$



ภาพที่ 2 - 9 รูปคลื่นที่การทำงานของสวิตช์ u_{11} , u_{12} ทำงานไม่พร้อมกันที่ $d_1 = d_2 > 0.5$

2.1.2.2.2. กรณีที่สองในรูปที่ 3.5 ในสถานะที่ 1 การสะสมพลังงานของตัวเหนี่ยวนำคือแรงดันที่ V_i สถานะที่ 2 และ 3 จะคายประจุตัวเหนี่ยวนำด้วยแรงดัน $V_i - \frac{V_o}{2}$ ในกรณีนี้ อัตราส่วนการถ่ายโอนแรงดันของวงจรจะเขียนเป็นสมการได้เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงคงที่จะถือเป็นการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นดังแสดงในสมการ (2-21) ซึ่งอัตราส่วนการถ่ายโอนแรงดันที่ได้จะเท่ากับกรณีแรกดังสมการที่ (2-20)

$$(V_i)(2D - 1) + \left(V_i - \frac{V_o}{2}\right)(2 - 2D) = 0 \quad (2-21)$$

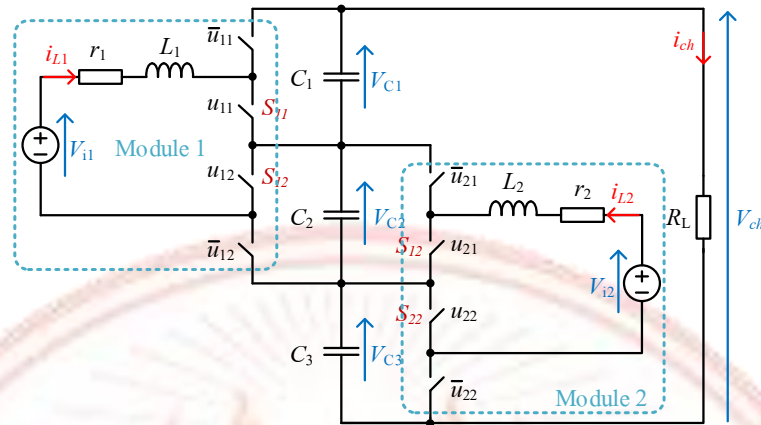


ภาพที่ 2 - 10 การเปรียบเทียบกระแสกระเพื่อม (Ripple current) จากเทคนิคการ Switching

จากกราฟกระแสตัวเหนี่ยวนำทั้งสองกรณีจะเห็นได้ว่าความถี่ที่มีประสิทธิภาพของกระแสเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเนื่องจากการที่สวิตช์ทำงานไม่พร้อมกัน (Out-of-Phase Switching) ค่ากระแสกระเพื่อม (Ripple current) peak-to-peak สามารถคำนวณได้จากสมการ (2-22) สำหรับรูปแบบการสวิตช์นี้ สมมติว่าระบบไม่มีพลังงานสูญเสีย การเปรียบเทียบกระแสกระเพื่อม (Ripple current) ที่แสดงในภาพที่ 2 - 10 การที่สวิตช์ทำงานไม่พร้อมกัน (Out-of-Phase Switching) ช่วยลดกระแสกระเพื่อม (Ripple current) ลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ลักษณะของกราฟของการสวิตช์ที่ทำงานพร้อมกัน (In-Phase Switching) ทำให้เกิด ripple สูงสุดที่ $d=0.5$ ซึ่งแรงดันอินพุตเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันเอาต์พุต สำหรับเงื่อนไขการที่สวิตช์ทำงานไม่พร้อมกัน (Out-of-Phase Switching) จะกำจัด ripple ในตัวเหนี่ยวนำ และค่ากระแสกระเพื่อม (Ripple current) สูงสุดเกิดขึ้นที่ $d=0.25$ และ $d=0.75$ ซึ่งทั้งหมดน้อยกว่าค่า ripple ของการสวิตช์ที่ทำงานพร้อมกัน (In-Phase Switching)

$$\Delta I_L = \begin{cases} \frac{(2V_i - V_o) \left(1 - \frac{V_i}{V_o}\right)}{2f_s L} & \text{if } V_i > 2V_o \\ \frac{(V_o - 2V_i) \left(\frac{V_i}{V_o}\right)}{2f_s L} & \text{if } V_i < 2V_o \end{cases} \quad (2-22)$$

2.1.3. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับจำนวนสองโมดูลที่มีตัวเก็บประจุร่วม [4]-[5], [10]-[14] ที่ได้แสดงดังภาพที่ 2 - 11 เป็นวงจรที่ถูกพัฒนาจากวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับขึ้นเพื่อให้สามารถเพิ่มแหล่งจ่ายให้กับระบบที่มีแหล่งจ่ายมากกว่าหนึ่งแหล่งขึ้นไป



ภาพที่ 2 - 11 วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับจำนวนสองโมดูล
ที่มีตัวเก็บประจุร่วม [4]

2.1.3.1. สมการสถานะของวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับจำนวนสองโมดูลที่มีตัวเก็บประจุร่วมที่ได้จากการหาอนุพันธ์ของกระแสภายในตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์เพื่อ ตามลำดับซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = V_{i1} - r_1 i_{L1} - (1 - u_{11})V_{C1} - (1 - u_{12})V_{C2} \quad (2-23)$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = V_{i2} - r_2 i_{L2} - (1 - u_{21})V_{C2} - (1 - u_{22})V_{C3} \quad (2-24)$$

หาอนุพันธ์ของแรงดันภายในตัวเก็บประจุ C_1 และ C_3 ได้ดังสมการต่อไปนี้

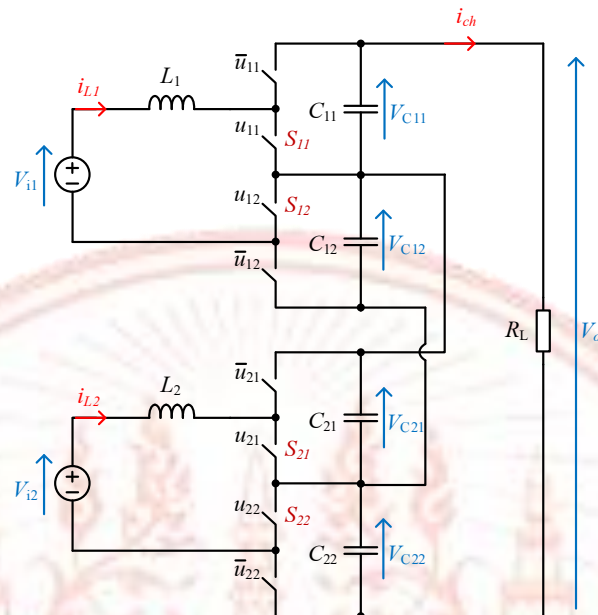
$$C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} = i_{L1}(1 - u_{11}) - i_{ch} \quad (2-25)$$

$$C_3 \frac{dV_{C3}}{dt} = i_{L2}(1 - u_{22}) - i_{ch} \quad (2-26)$$

และหาอนุพันธ์สำหรับตัวเก็บประจุร่วม C_2 จะได้ดังสมการนี้

$$C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} = i_{L1}(1 - u_{12}) + i_{L2}(1 - u_{21}) - i_{ch} \quad (2-27)$$

2.1.3.2. การใช้ตัวเก็บประจุร่วมดังแสดงในภาพที่ 2 - 11 พบว่าตัวเก็บประจุ C_2 มีการใช้งานร่วมกันโดยที่มีความแตกต่างจากการนำวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับที่นำมีต่ออนุกรมดังภาพที่ 2 - 12



ภาพที่ 2 - 12 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับจำนวนสองโมดูล [12]

เนื่องจากใน [4] กล่าวว่าตัวเก็บประจุ C_{12} และ C_{21} ที่ต่อแบบขนานกันนั้นจะถือว่าเป็นตัวเก็บประจุเพียงตัวเดียว $C_x = C_{12} + C_{21}$ เนื่องจากเทคนิคการ Interleaved PWM Modulation ทำให้ C_x นั้นเห็นกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่เป็นสองเท่า $f_s C_x = 2f_s = \frac{2}{T}$ ของตัวเก็บประจุ C_{11} และ C_{22} และค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุดที่ C_x จำเป็นต่อการรักษาการกระเพื่อมของกระแส $\Delta v_{C_x} = \Delta V$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-28)

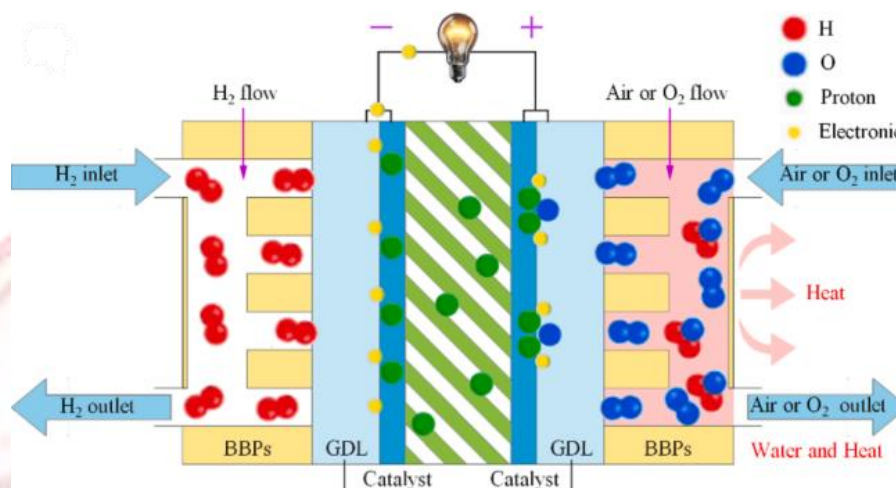
$$C_x = \frac{1 - \left(1 - r \frac{P}{V_i^2}\right) \cdot \frac{V_i}{\sqrt{2P \cdot R_{out}}}}{2\Delta V f_s} \cdot \frac{P_{out}}{V_{out}} = \frac{C}{2} \quad (2-28)$$

ดังนั้น $C_{12} = C_{21} = \frac{C}{4}$ หรือเท่ากับ $\frac{C_x}{2}$ จะเห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าสำหรับ C_{12} และ C_{21} เป็นหนึ่งในสี่ของ C_{11} และ C_{22} พบว่าการใช้ตัวเก็บประจุร่วมกันนั้นมีข้อดีหลายอย่าง เช่น ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น ลดต้นทุนในการจัดซื้อกรณีที่ผลิตระบบสำหรับใช้งาน และการควบคุมความสมดุลแรงดันไฟฟ้าภายในตัวเก็บประจุทุกตัวได้ง่ายขึ้น

2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cell)

เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิดตามเอกสารอ้างอิง [15]-[16] ในวิทยานิพนธ์นี้สนใจเซลล์เชื้อเพลิงแบบแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cell - PEMFC) ที่ทำงานโดยการแปลงพลังงานเคมีจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีระหว่างไฮโดรเจน (H_2) และออกซิเจน (O_2) ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า มีข้อดีหลายประการ เช่น ประสิทธิภาพสูง ความหนาแน่นกำลังสูง การตอบสนองที่รวดเร็ว และอุณหภูมิการทำงานที่ประมาณ $80^\circ C$ ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของ PEMFC ซึ่งหมายถึงการแปลงพลังงานจากไฮโดรเจนเป็นไฟฟ้า อยู่ที่ประมาณ 40-70% โดยพลังงานที่เหลือนั้นจะถูกปล่อยออกมาในรูปของ

ความร้อน PEMFC เป็นประเภทเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการส่งเสริมและนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับยานพาหนะ เนื่องจากสามารถเริ่มทำงานได้รวดเร็ว ทำงานที่อุณหภูมิต่ำ และมีความสามารถในการปรับตามโหลด [15]-[16] มีประสิทธิภาพสูง และมีลักษณะแบบโมดูลาร์



ภาพที่ 2 - 13 แผนผังการทำงานของ PEMFC [15].

นอกจากนี้ PEMFC ยังมีพฤติกรรมการเริ่มต้นที่ดีที่อุณหภูมิต่ำ มีขนาดเล็กและกะทัดรัด จึงถูกพิจารณาให้เป็นแหล่งพลังงานทั้งในอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กจนถึงโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ ข้อดีอีกประการหนึ่งคือใช้โอเลโทโรลด์เมมเบรนที่เป็นของแข็งทำให้การออกแบบแพ็คเกจเพื่อป้องกันการรั่วไหลของแก๊สนั้นทำได้ง่ายและมีความซับซ้อนต่ำเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ แต่อุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำระหว่างการทำงานที่ 80°C ทำให้ PEMFC ไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานกับวัตถุประสงค์บางอย่างที่ต้องการอุณหภูมิสูงๆ ในการทำงาน นอกจากนั้นแพลทินัมที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาขั้วแอโนดและขั้วแคโทดจนทำให้อิเล็กตรอนและโปรตรอนในไฮโดรเจนมีการแยกตัวออกจากกันนั้นมีราคาสูงส่งผลให้อาจจะเพิ่มต้นทุนในการผลิต [17].

การผลิตไฟฟ้าของ PEMFC นั้นเกิดจากการออกซิเดชันของไฮโดรเจนที่จ่ายผ่านขั้วแอโนดซึ่งจะทำให้โปรตรอนและอิเล็กตรอนเกิดการแตกตัวดังสมการที่ (2-29) จากนั้นโปรตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตรอนไปยังขั้วแคโทด ขณะเดียวกันอิเล็กตรอนจะเดินทางผ่านวงจรภายนอกเพื่อจ่ายพลังงานให้กับโหลดและรวมตัวกับออกซิเจนที่ด้านแคโทดผ่านปฏิกิริยารีดักชันออกซิเจนดังสมการที่ (2-30) และ (2-31) [18]-[19].

ขั้วแอโนด :



ขั้วแคโทด :



ปฏิกิริยารวม :



2.3 ตัวควบคุมโหมดเลื่อนทางอ้อม (In-direct Sliding mode controller)

ระบบควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด (Sliding Mode Control) เป็นเทคนิคการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นที่ได้มาจากทฤษฎีระบบควบคุมโครงสร้างแบบแปรผันและพัฒนาโดย Vladim UTKIN [20] การควบคุมดังกล่าวมีข้อดีหลายประการ เช่น การนำไปใช้งานง่าย ความทนทาน และการตอบสนองแบบไดนามิกที่ดี นอกจากนี้การควบคุมดังกล่าวยังสอดคล้องกับลักษณะไม่เชิงเส้นของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์โหมด [21] การควบคุมแบบโครงสร้างผันแปรมีความเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้า เนื่องจากวงจรเหล่านี้มีลักษณะการทำงานแบบสวิตช์ ซึ่งสวิตช์ตัดต่อกระแสไฟฟ้าจะถูกใช้ในการควบคุมการไหลของพลังงาน ในแต่ละสถานะของการสวิตช์ (สวิตช์เปิดหรือปิด) โครงสร้างของวงจรจะเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของโครงสร้างผันแปร

เมื่อพิจารณาระบบที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ดังสมการที่ (2-32)

$$\dot{x} = f(x, t) + b(x, t)u \quad (2-32)$$

โดย $\dot{x}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของสถานะระบบต่อเวลา
 x คือ ตัวแปรสถานะที่อธิบายสถานะของระบบ
 b คือ ค่าที่สัมพันธ์กับคำสั่งควบคุม
 u คือ คำสั่งควบคุม

ในการควบคุมระบบให้ลู่เข้าสู่จุดอ้างอิงที่ต้องการ สามารถกำหนดเส้นทางของระบบที่เรียกว่าพื้นผิวสไลด์ (Sliding surface) ดังสมการที่ (2-33) โดยใช้สัญลักษณ์ s แทนพื้นผิวดังกล่าว ซึ่งตัวแปรสถานะ (x) จะเคลื่อนที่ตามแนววิถีอ้างอิง (x_{ref}) ที่กำหนด โดย G คือค่าคงที่ซึ่งใช้สำหรับกำหนดลักษณะพลวัตที่ต้องการของระบบควบคุม

$$s(x) = G(x - x_{ref}) \quad (2-33)$$

ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับพื้นผิวสไลด์ เพื่อให้ระบบลู่เข้าสู่จุดที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วและมีเสถียรภาพ สามารถใช้กฎการเข้าถึง (Reaching law) เพื่อควบคุมพฤติกรรมของระบบให้เป็นไปตามที่ต้องการสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2-34)

$$\dot{s}(x) = -\lambda s - Q \text{Sign}(s(x)) \quad (2-34)$$

โดย Q เป็นค่าคงที่ ส่วน $\text{Sign}(s(x))$ จะเปลี่ยนแปลงตามเครื่องหมายของ $s(x)$ ซึ่งอาจทำให้เกิดการแกว่งของสัญญาณควบคุม เพื่อลดปัญหาดังกล่าวอาจใช้กฎการเข้าถึงแบบแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential)

$$\dot{s}(x) = -\lambda s \quad (2-35)$$

คำสั่งควบคุม (u) ของระบบสามารถหาได้โดยการพิจารณา (2-32) ดังนี้

$$\dot{s}(x) = G(\dot{x} - \dot{x}_{ref}) = -\lambda G(x - x_{ref}) \quad (2-36)$$

แทน $\dot{x}$ ด้วย (2-32) จะได้

$$u = (Gb(x, t))^{-1}(-Gf(x, t) - \lambda Gx + G\dot{x}_{ref} + \lambda Gx_{ref}) \quad (2-37)$$

การตอบสนองของระบบที่ควบคุมด้วยโหมดเลื่อนแบบทางอ้อมสามารถศึกษาได้จากการพิจารณาค่า Eigenvalue ที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์การควบคุมซึ่งก็คือ λ และ G ทำการแทนค่า u ของสมการ (2-37) ลงในสมการ (2-32) จะได้การตอบสนองของระบบดังนี้

$$\dot{x} = f(x, t) + b(x, t)(Gb(x, t))^{-1}(-Gf(x, t) - \lambda Gx + G\dot{x}_{ref} + \lambda Gx_{ref}) \quad (2-38)$$

ถ้าระบบที่พิจารณาเป็นสเกลาร์จะได้ว่า

$$\dot{x} = \lambda x + \dot{x}_{ref} - \lambda x_{ref} \quad (2-39)$$

ค่า Eigenvalue ของตัวควบคุมคือ λ ภายใต้เงื่อนไขที่ดังพิจารณาทำให้ค่า Eigenvalue ของตัวควบคุมจะไม่ขึ้นอยู่กัพารามิเตอร์ใดของระบบ จึงทำให้การควบคุมโหมดเลื่อนแบบทางอ้อมมีความเสถียรและทนทานต่อการรบกวนได้ดี

บทที่ 3

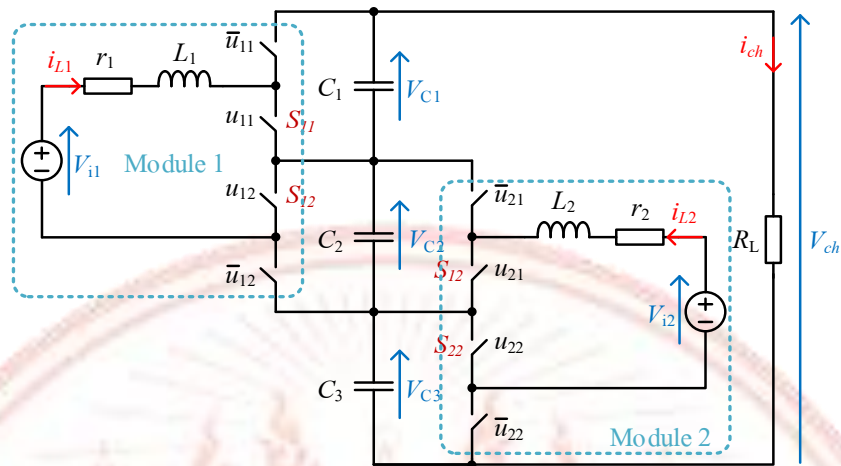
การดำเนินงาน

บทนี้แสดงวิธีการดำเนินงานจัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง“วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต”โดยมีรายละเอียดการออกแบบวงจรภาคกำลัง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ วิธีการควบคุม และการสร้างแบบทดลองวงจรจริงตามลำดับดังหัวข้อต่อไปนี้

- 3.1. ออกแบบภาคกำลังของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต
- 3.2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต
- 3.3. การควบคุมของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต
- 3.4. จำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุตโดยใช้ MATLAB/Simulink
- 3.5. สร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต

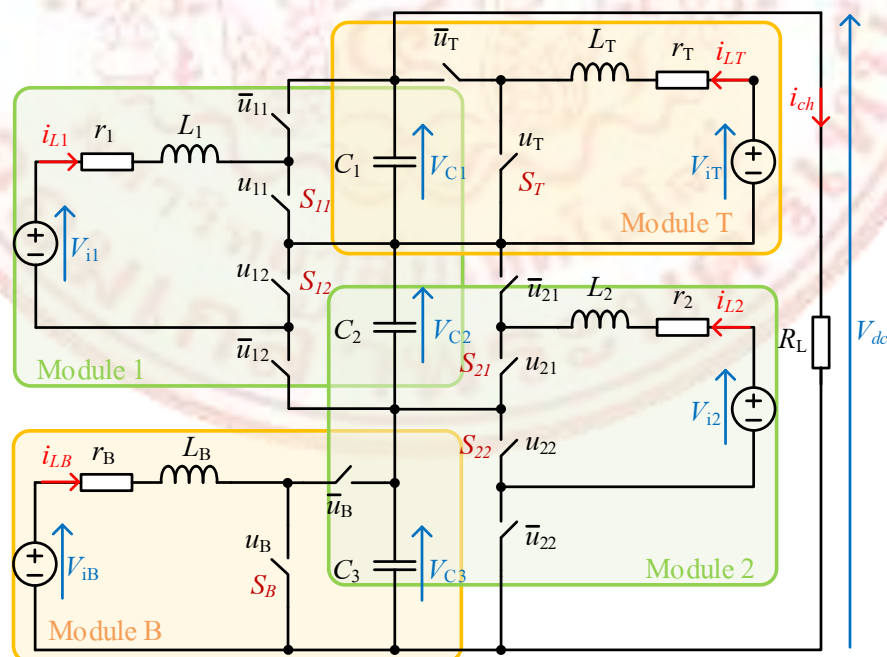
3.1 ออกแบบภาคกำลังของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้กล่าวถึงวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามจำนวนสองโมดูลที่ต่อร่วมกันนั้นพบว่ามิชข้อได้เปรียบในเรื่องของการเพิ่มจำนวนแหล่งจ่ายอินพุตให้กับระบบและสามารถใช้ตัวเก็บประจุ C_2 ร่วมกันเพื่อให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น ลดต้นทุนในการจัดซื้อกรณีที่ผลิตระบบสำหรับใช้งาน และการควบคุมความสมดุลแรงดันไฟฟ้าภายในตัวเก็บประจุทุกตัวได้ง่ายขึ้นได้ดังภาพที่ 3 - 1 แต่อย่างไรก็ตามระบบนี้ยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับ Duty cycle ของอุปกรณ์สวิตช์นั้นยังไม่สมดุลกันอาจทำให้อุปกรณ์เหล่านี้เกิดความเสียหายเนื่องจากภาระการทำงานที่ไม่เท่ากันและเกิดความร้อนสะสมภายในของอุปกรณ์แต่ละตัวไม่เท่ากันอาจทำให้ระบบเกิดความเสียหายได้



ภาพที่ 3 - 1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามระดับจำนวนสองโมดูล [4]

วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาของ Duty cycle ของอุปกรณ์สวิตช์นั้นให้สมดุลกัน โดยใช้ตัวแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแหล่งจ่ายเพื่อจ่ายกระแสให้ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_3 เพื่อให้เห็นความถี่กระแสไฟฟ้าเป็นสองเท่าเช่นเดียวกับตัวเก็บประจุ C_2 และยังสามารถเพิ่มแหล่งจ่ายอินพุตให้กับระบบนี้ได้ด้วยดังแสดงในภาพที่ 3 - 2 และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบทั้งหมดนี้จะถูกแสดงในตารางที่ 3 - 1



ภาพที่ 3 - 2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต [22]

ตารางที่ 3 - 1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต

พารามิเตอร์	ความหมาย
$V_{i1}, V_{i2}, V_{iT}, V_{iB}$	แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า
L_1, L_2, L_T, L_B	ตัวเหนี่ยวนำ
C_1, C_2, C_3	ตัวเก็บประจุ
R_L	ความต้านทานโหลด
$iref_{L1}, iref_{L2}, iref_{LT}, iref_{LB}$	กระแสไฟฟ้าอ้างอิงของ L_1, L_2, L_T และ L_B
V_{C1}, V_{C2}, V_{C3}	แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1, C_2, C_3
i_{ch}, V_{ch}	กระแสโหลดและแรงดันไฟฟ้าโหลด
$i_{L1}, i_{L2}, i_{LT}, i_{LB}$	กระแสภายในตัวเหนี่ยวนำ L_1, L_2, L_T และ L_B
$S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}, S_T, S_B$	สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์
$u_{11}, u_{12}, u_{21}, u_{22}, u_T, u_B$	สัญญาณคำสั่งสวิตช์

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต

3.2.1. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุตนี้ที่ได้มีการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องนั้น ในการพิจารณาเงื่อนไขการทำงานของวงจรจำเป็นต้องให้วงจรทำงานบนความเป็นอุดมคติ สภาวะคงตัว กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่ามากกว่าศูนย์ และกำลังไฟฟ้าขาออกเท่ากับกำลังไฟฟ้าขาเข้าในส่วนถัดไปจะเป็นการพิจารณาสมการสถานะของวงจรโดยการหาอนุพันธ์ของตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = V_{i1} - (1 - u_{11})V_{C1} - (1 - u_{12})V_{C2} \quad (3-1)$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = V_{i2} - (1 - u_{21})V_{C2} - (1 - u_{22})V_{C3} \quad (3-2)$$

สมการอนุพันธ์ของตัวเหนี่ยวนำ L_T และ L_B ที่มีผลในการทำให้ Duty cycle ของอุปกรณ์สวิตช์นั้นให้สมดุลกันตามลำดับดังสมการต่อไปนี้

$$L_T \frac{di_{LT}}{dt} = V_{iT} - (1 - u_T)V_{C1} \quad (3-3)$$

$$L_B \frac{di_{LB}}{dt} = V_{iB} - (1 - u_B)V_{C3} \quad (3-4)$$

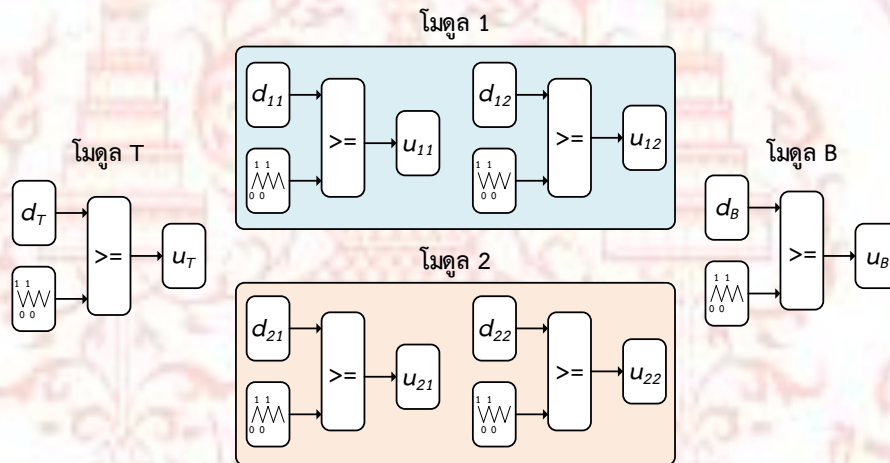
ส่วนต่อไปจะเป็นการหาอนุพันธ์ของตัวเก็บประจุ C_1, C_2 และ C_3 จากกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ตามลำดับได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} = i_{L1}(1 - u_{11}) + i_{LT}(1 - u_T) - i_{ch} \quad (3-5)$$

$$C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} = i_{L1}(1 - u_{12}) + i_{L2}(1 - u_{21}) - i_{ch} \quad (3-6)$$

$$C_3 \frac{dV_{C3}}{dt} = i_{L2}(1 - u_{22}) + i_{LB}(1 - u_B) - i_{ch} \quad (3-7)$$

3.2.2. การทำงานของสวิตช์ $S_T, S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}, S_B$ ควบคุมโดยการใช้เทคนิค Interleaved-Pulse Width Modulation (PWM) ด้วยวิธีการใช้สัญญาณ $u_T, u_{11}, u_{12}, u_{21}, u_{22}, u_B$ ซึ่งความกว้างของสัญญาณคำสั่งสวิตช์จะขึ้นอยู่กับสัญญาณ Duty cycle ของ $d_T, d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}, d_B$ ดังแสดงในภาพที่ 3 - 3



ภาพที่ 3 - 3 การสร้างสัญญาณ PWM สำหรับระบบ

3.2.3. คำนวณ Duty cycle $d_T, d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}, d_B$ การคำนวณหา Duty cycle ของสวิตช์ในสภาวะคงตัวในที่นี่จะกำหนดให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเป็นศูนย์

โดยเริ่มพิจารณากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าได้ดังนี้

$$i_{LT} = \frac{P_T}{V_{iT}} \quad (3-8)$$

$$i_{L1} = \frac{P_1}{V_{i1}} \quad (3-9)$$

$$i_{L2} = \frac{P_2}{V_{i2}} \quad (3-10)$$

$$i_{LB} = \frac{P_B}{V_{iB}} \quad (3-11)$$

และพิจารณากระแสไหลในสถานะคงตัวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบกำลังไฟฟ้ารวมต่อแรงดันไฟฟ้ารวมโดยจะได้สมการดังนี้

$$i_{ch} = \frac{P_T + P_1 + P_2 + P_B}{V_{dc}} = \frac{P_{ch}}{V_{dc}} \quad (3-12)$$

แรงดันไฟขาออกในสถานะคงตัวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการที่ (3-13) ได้เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุจะสมมติให้มีค่าเท่ากันและสามารถเขียนได้ดังนี้

$$V_C = \frac{V_{dc}}{3} \quad (3-13)$$

เริ่มจากคำนวณหา Duty cycle ของสวิตช์ที่โมดูล T ในทางอุดมคติและกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ โดยนำสมการที่ (3-13) แทนค่าลงในสมการที่ (3-3) จะได้สมการดังนี้

$$1 - d_T = \frac{V_{iT}}{V_{C1}} = \frac{V_{iT}}{\frac{V_{dc}}{3}} = \frac{3V_{iT}}{V_{dc}} = d_T^* \quad (3-14)$$

ทำนองเดียวกันสามารถนำสมการที่ (3-14) คำนวณ Duty cycle ของสวิตช์ที่โมดูล B ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$1 - d_B = \frac{V_{iB}}{V_{C3}} = \frac{3V_{iB}}{V_{dc}} = d_B^* \quad (3-15)$$

ในสมการที่ (3-14) และ (3-15) นิพจน์ของ $1 - d_T$ กำหนดให้อยู่ในรูปแบบของ d_T^* และนิพจน์ของ $1 - d_B$ กำหนดให้อยู่ในรูปแบบของ d_B^* เพื่อความไม่ซับซ้อน

จากสมการที่ (3-5) สามารถคำนวณหา d_{11}^* โดยแทนค่าสมการที่ (3-14) ลงไปและ $\frac{P_{TB}}{P_T + P_B}$ จะได้ดังสมการด้านล่างนี้

$$d_{11}^* = - \left[\frac{\frac{P_{TB}}{2} \cdot 3V_{iT}}{V_{iT} \cdot V_{dc}} \right] + \frac{P_{ch} V_{i1}}{V_{dc} \cdot P_1} = - \left[\frac{3 \frac{P_{TB}}{2} - P_{ch}}{V_{dc} \cdot P_1} \right] V_{i1} \quad (3-16)$$

จากสมการที่ (3-1) สามารถคำนวณหา d_{12}^* โดยแทนค่า d_{11}^* ลงไปจะได้ดังสมการด้านล่างนี้

$$d_{12}^* = \frac{3V_{i1}}{V_{dc}} - d_{11}^* = \frac{3V_{i1}}{V_{dc}} - \left[- \left[\frac{3 \frac{P_{TB}}{2} - P_{ch}}{V_{dc} \cdot P_1} \right] V_{i1} \right] = \frac{\left[3 \left(\frac{P_{TB}}{2} + P_1 \right) - P_{ch} \right] V_{i1}}{V_{dc} \cdot P_1} \quad (3-17)$$

จากสมการที่ (3-6) สามารถคำนวณหา d_{21}^* โดยแทนค่า d_{12}^* ลงไปจะได้ดังสมการด้านล่างนี้

$$d_{21}^* = - \frac{\left[3 \left(\frac{P_{TB}}{2} + P_1 \right) - 2P_{ch} \right] V_{i2}}{V_{dc} \cdot P_2} \quad (3-18)$$

จากสมการที่ (3-2) สามารถคำนวณหา d_{22}^* โดยแทนค่า d_{21}^* ลงไปจะได้ดังสมการด้านล่างนี้

$$d_{22}^* = \frac{\left[3 \left(\frac{P_{TB}}{2} + P_1 + P_2 \right) - 2P_{ch} \right] V_{i2}}{V_{dc} \cdot P_2} \quad (3-19)$$

ในทางอุดมคติกำลังไฟฟ้าด้านเข้าจะเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออกและกำลังไฟฟ้าด้านเข้าจะถูกกำหนดได้ดังนี้

$$P_1 + P_2 + \underbrace{P_{TB}}_{P_T + P_B} = P_{ch} \quad (3-20)$$

โดย P_1 คือ กำลังไฟฟ้าของโมดูล 1
 P_2 คือ กำลังไฟฟ้าของโมดูล 2
 P_T คือ กำลังไฟฟ้าของโมดูล T
 P_B คือ กำลังไฟฟ้าของโมดูล B
 P_{TB} คือ กำลังไฟฟารวมของโมดูล T และโมดูล B

จากเงื่อนไขดังกล่าวแบ่งกำลังไฟฟ้าด้านเข้าเป็นสามชุดโดยมี P_{TB} เป็นกำลังไฟฟ้าชุดที่ช่วยเป็นแหล่งจ่ายให้ตัวเก็บประจุได้รับความถี่ของสวิตช์เท่ากับตัวเก็บประจุ C_2 โดยที่ กำลังไฟฟ้า P_{TB} คือ กำลังไฟฟ้า $P_T + P_B$ จะเขียนเป็นสมการกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

$$P_{TB} = P_T + P_B \quad (3-21)$$

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสามารถเขียนเป็นสมการในรูปแบบของแรงดันและกระแสได้ดังนี้

$$P_1 = V_{i1} \cdot I_1 \quad (3-22)$$

$$P_2 = V_{i2} \cdot I_2 \quad (3-23)$$

$$P_{TB} = V_{iT} \cdot I_T + V_{iB} \cdot I_B \quad (3-24)$$

และเมื่อกำหนดให้พลังงานด้านเข้าเท่ากันจะได้ว่า

$$P_1 = P_2 = P_{TB} \quad (3-25)$$

และ

$$V_{i1} \cdot I_1 = V_{i2} \cdot I_2 = V_{iT} \cdot I_T + V_{iB} \cdot I_B \quad (3-26)$$

ดังนั้นเมื่อกำหนดให้กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} , i_{LT} และ i_{LB} เท่ากัน ขนาดที่แรงดัน V_{i1} เท่ากับ V_{i2} หากต้องการให้ P_{TB} ยังเท่ากับ P_1 และ P_2 เพื่อให้เข้าเงื่อนไขดังสมการที่ 3-25 จะต้องลดแรงดันไฟฟ้าที่ V_{iT} และ V_{iB} ลงครึ่งหนึ่งของแรงดัน V_{i1} และ V_{i2} และสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_{iT} = \frac{V_{i1}}{2} = \frac{V_{i2}}{2} = V_{iB} \quad (3-27)$$

3.2.4. เงื่อนไขในการทำให้ค่า Duty cycle สมดุลกันจากการทบทวนวรรณกรรม [4]-[5], [10]-[14] วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามจำนวนสองโมดูลที่ต่อรวม เนื่องจากเทคนิคการ Interleaved PWM Modulation ทำให้ตัวเก็บประจุที่ใช้ร่วมกันระหว่างโมดูล C_2 นั้นเห็นกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่เป็นสองเท่า $f_s C_x = 2f_s = \frac{2}{T}$ ของตัวเก็บประจุ C_1 และ C_3 จากนั้นเมื่อนำวงจรแปลงผันไฟฟ้าชนิดเพิ่มแรงดันแบบดั้งเดิมต่อเข้าไปเพื่อช่วยจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_3 ดังภาพที่ 3-2 นั้นจะสามารถเห็นความถี่เป็นสองเท่าด้วยเทคนิคการ Interleaved PWM Modulation เช่นเดียวกันและเมื่ออยู่ในสถานะคงตัวสามารถกำหนดเงื่อนไข Duty cycle ได้จากสมการต่อไปนี้

$$(1 - d_{11}) = \frac{i_{ch}}{i_{L1}} - \frac{i_{LT}}{i_{L1}}(1 - d_T) \quad (3-28)$$

สถานะคงตัวเมื่อกำหนดให้แรงดันที่ตัวเก็บประจุ $V_{C1} = V_{C2} = V_c$ Duty cycle $d_{12} = d_{21} = d_1$ ในสมการที่ (3-6) เท่ากัน และกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ $i_{L1} = i_{L2} = i$ จะนำไปสู่สมการด้านล่างนี้

$$1 - d_1 = \frac{i_{ch}}{2i} \quad (3-29)$$

และเมื่อกำหนดให้สมการที่ (3-29) เท่ากับสมการที่ (3-28) จะได้สมการดังนี้

$$i_{LT} = \frac{1}{2} \frac{i_{ch} V_c}{V_{iT}} \quad (3-30)$$

จากสมมติฐาน $P_{TB} = P_1 = P_2 = P$ และ $V_{i1} = V_{i2} = V_i$ จะได้ว่า

$$i_{LT} = \frac{1}{2} \left(\frac{i_{ch} V_{dc}}{3V_{iT}} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{P_{dc}}{3V_{iT}} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{P}{V_{iT}} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{iV_i}{V_{iT}} \right) \quad (3-31)$$

ในกรณีที่ต้องการให้ $i_{LT} = i_{L1} = i_{L2} = i_{LB} = i$ จะเห็นว่า แรงดันอินพุต V_{iT} และ V_{iB} ต้องมีค่าต่ำกว่าแรงดันอินพุตของโมดูลหลัก $V_{i1} = V_{i2} = V_i$ สองเท่า

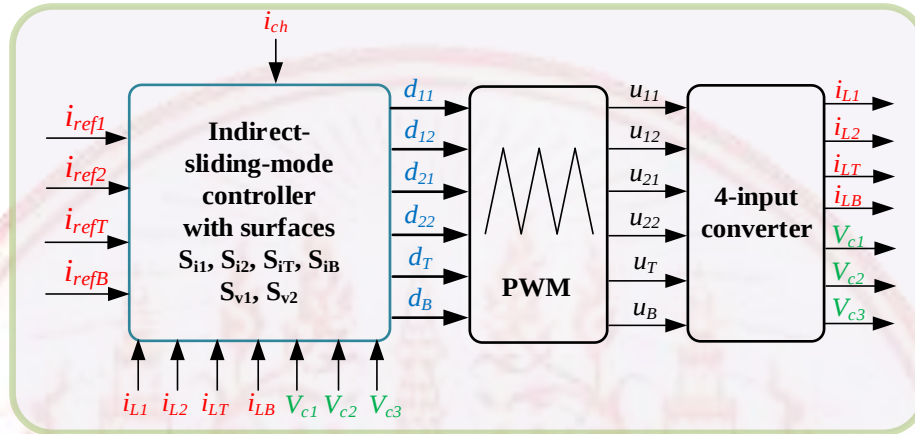
$$V_{iT} = V_{iB} = \frac{V_i}{2} \quad (3-32)$$

3.3 การควบคุมของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง [15]-[19] พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานสะอาดที่มีประสิทธิภาพสูง การควบคุมกระแสไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะเมื่อโหลดมีการดึงกระแสที่ไม่สม่ำเสมออาจทำให้เซลล์เชื้อเพลิงเสียหาย ประสิทธิภาพลดลง และอายุการใช้งานสั้นลง เนื่องจากความผันผวนของกระแสไฟฟ้าสร้างความเครียดต่อส่วนประกอบภายใน นอกจากนี้ความร้อนที่มากเกินไปจากการดึงกระแสสูงยังเป็นอันตรายต่อเซลล์เชื้อเพลิงอีกด้วย เพื่อแก้ไขปัญหาจึง

ต้องมีระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ การควบคุมกระแสไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพจะช่วยให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้อย่างปลอดภัย มีประสิทธิภาพ และมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น

ดังนั้นจึงเลือกที่จะควบคุมกระแสตัวเหนี่ยวนำเพื่อจ่ายให้กับโหลดโดยใช้ตัวควบคุมโหมดเลื่อนแบบทางอ้อมโดยมีภาพประกอบบล็อกไดอะแกรมในการทำงานดังภาพที่ 3 - 4



ภาพที่ 3 - 4 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมระบบ

การควบคุมกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} , i_{LT} และ i_{LB} สามารถเขียนสมการ Sliding Surfaces ตามลำดับได้ดังนี้

$$S_{i1} = i_{L1} - i_{ref1} + K_{i1} \int (i_{L1} - i_{ref1}) dt \quad (3-33)$$

$$S_{i2} = i_{L2} - i_{ref2} + K_{i2} \int (i_{L2} - i_{ref2}) dt \quad (3-34)$$

$$S_{iT} = i_{LT} - i_{refT} + K_{iT} \int (i_{LT} - i_{refT}) dt \quad (3-35)$$

$$S_{iB} = i_{LB} - i_{refB} + K_{iB} \int (i_{LB} - i_{refB}) dt \quad (3-36)$$

และการรักษาความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ V_{c1} , V_{c2} และ V_{c3} สามารถเขียนสมการ Sliding Surfaces ได้ดังนี้

$$S_{v1} = V_{c1} - V_{c2} + K_{v1} \int (V_{c1} - V_{c2}) dt \quad (3-37)$$

$$S_{v2} = V_{c2} - V_{c3} + K_{v2} \int (V_{c2} - V_{c3}) dt \quad (3-38)$$

จาก Reaching law $\dot{S} = -\lambda S$ สามารถแก้สมการ (3-33) ถึง (3-38) ตามลำดับได้ดังนี้

$$\dot{S}_{i1} = -\lambda_{i1} S_{i1} \quad (3-39)$$

$$\dot{S}_{i2} = -\lambda_{i2} S_{i2} \quad (3-40)$$

$$\dot{S}_{iT} = -\lambda_{iT} S_{iT} \quad (3-41)$$

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

$$\dot{S}_{v1} = -\lambda_{v1} S_{v1} \quad (3-43)$$

$$\dot{S}_{v2} = -\lambda_{v2} S_{v2} \quad (3-44)$$

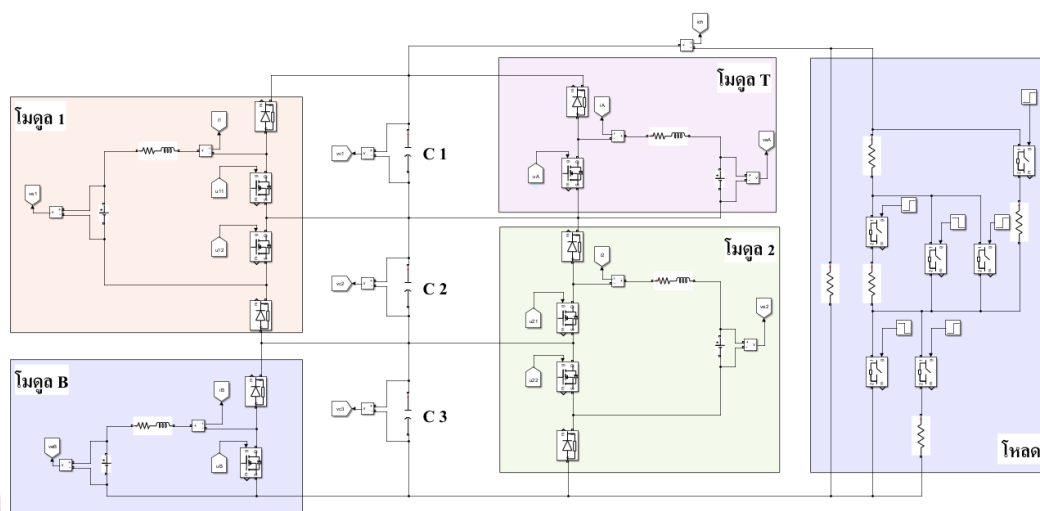
3.4 จำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุตโดยใช้

MATLAB/Simulink

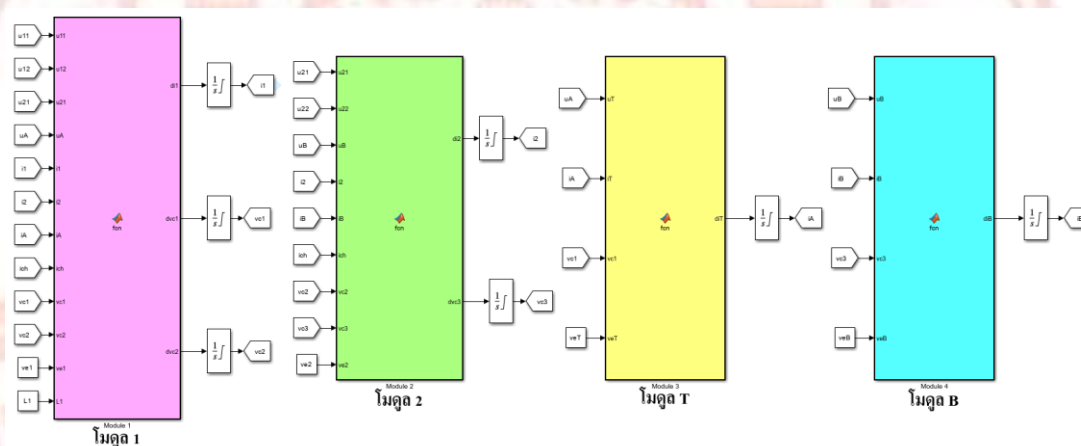
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำเป็นต้องมีการตรวจสอบ เพื่อแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของระบบที่ได้จัดทำขึ้นมานี้ว่าสามารถใช้งานได้จริงตามที่ได้รับการออกแบบด้วยการจำลองบนคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink Simscape ดังแสดงในภาพที่ 3 - 5 และ MATLAB Function ในภาพที่ 3 - 6 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของระบบและวิธีการควบคุมที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ การจำลองจะถูกดำเนินการภายใต้สถานการณ์สมมติซึ่งจะแบ่งเป็น 3 สถานการณ์โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะถูกกำหนดไว้ในตารางที่ 3 - 2 ดังต่อไปนี้ เซลล์เชื้อเพลิงจะจำลองด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสค่าคงที่

ตารางที่ 3 - 2 พารามิเตอร์วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุตและตัวควบคุม

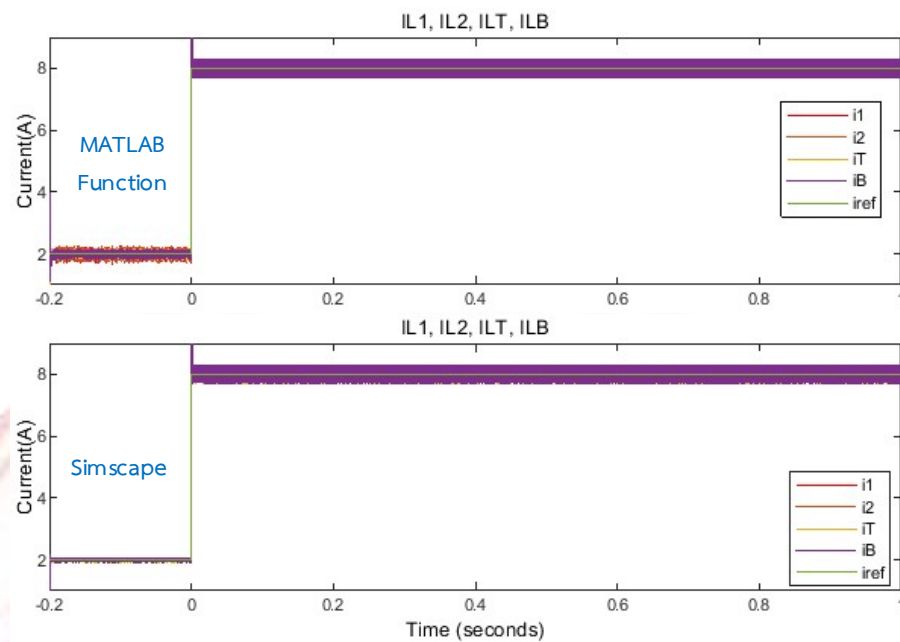
พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
พารามิเตอร์วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต		
V_{i1}, V_{i2}	12	โวลต์ (V)
V_{iT}, V_{iB}	6	โวลต์ (V)
$i_{L1}, i_{L2}, i_{LT}, i_{LB}$	2-8	แอมแปร์ (A)
C_1, C_2, C_3	100	ไมโครฟารัด (μF)
L_1, L_2, L_T, L_B	260	ไมโครเฮนรี (μH)
r_1, r_2, r_T, r_B	0.01	โอห์ม (Ω)
ความต้านทานโหลด R_L	5.2	โอห์ม (Ω)
พารามิเตอร์ควบคุม		
ความถี่สวิตช์ (f_s)	20	กิโลเฮิร์ต(KHz)
$k_{i1}, k_{i2}, k_{iT}, k_{iB}, \lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \lambda_{iT}, \lambda_{iB}$	5000	$rad \cdot s^{-1}$
$k_{v1}, k_{v2}, \lambda_{v1}, \lambda_{v2}$	500	$rad \cdot s^{-1}$



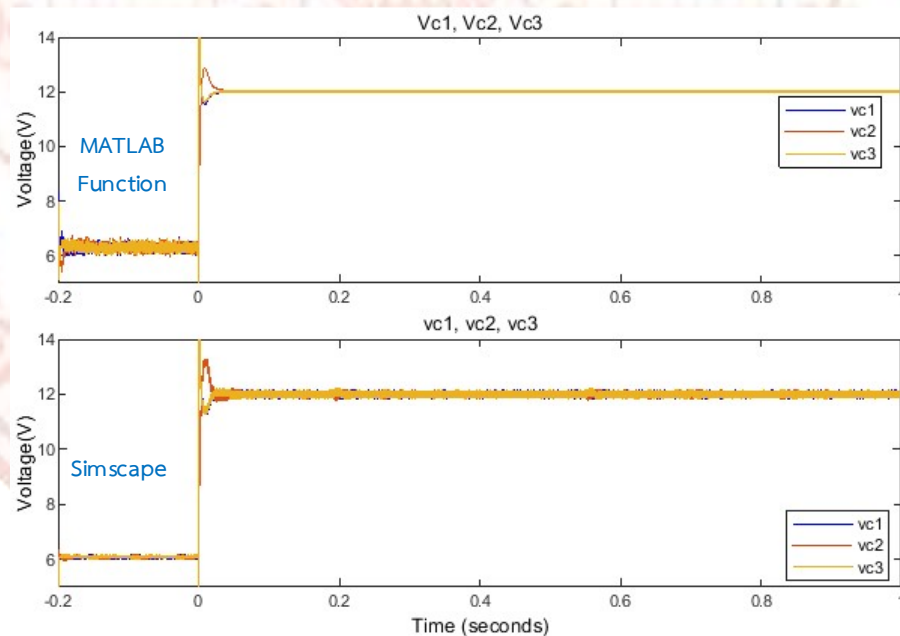
ภาพที่ 3 - 5 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต Simscape



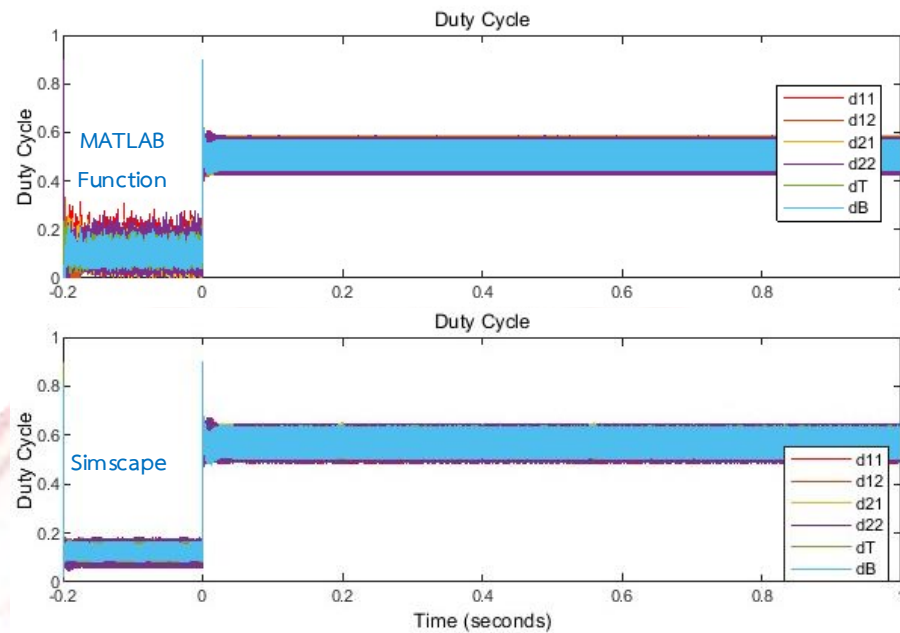
ภาพที่ 3 - 6 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต MATLAB Function



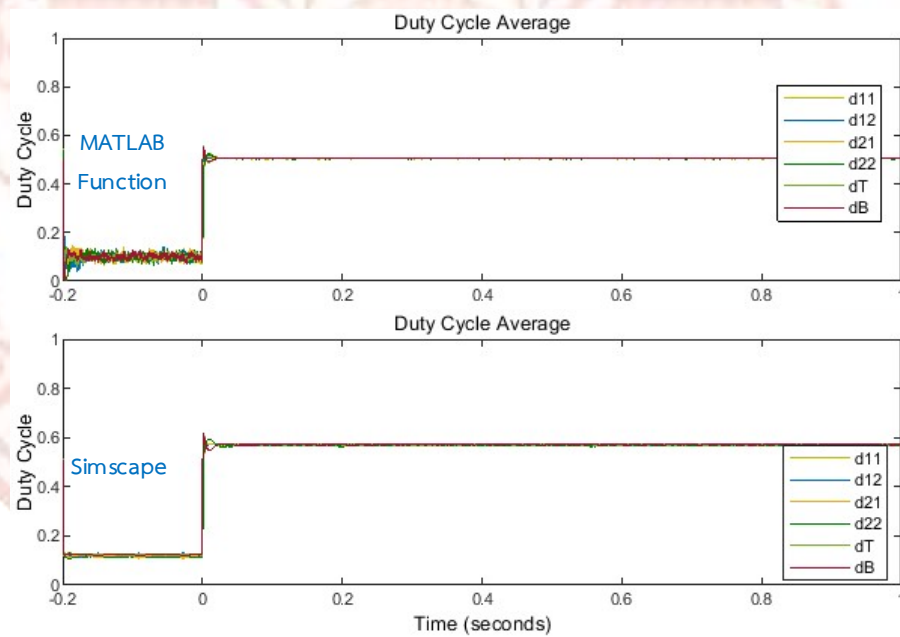
ภาพที่ 3 - 8 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} , i_{LT} และ i_{LB} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่กำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์



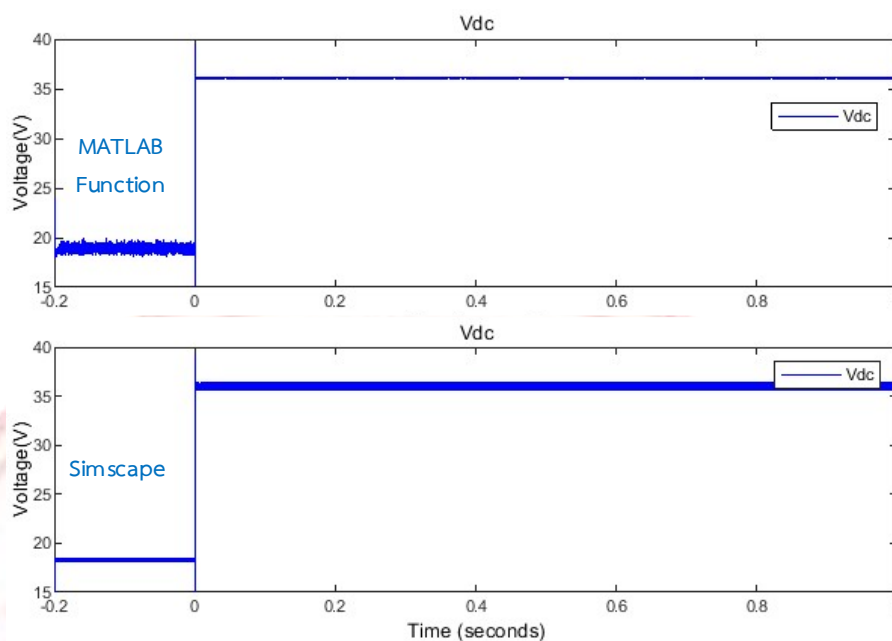
ภาพที่ 3 - 9 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ V_{C1} , V_{C2} , และ V_{C3} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่กำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์



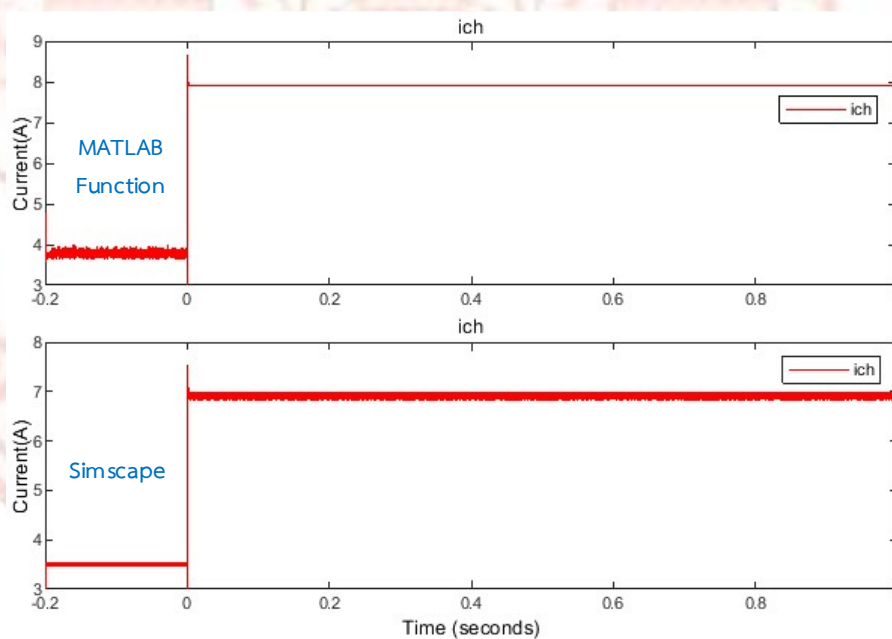
ภาพที่ 3 - 10 Duty cycle $d_T, d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}, d_B$ ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่กำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์



ภาพที่ 3 - 11 Duty cycle เฉลี่ย $d_T, d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}, d_B$ ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่กำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์



ภาพที่ 3 - 12 แรงดันไฟฟ้าด้านขาออก V_{dc} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่กำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์

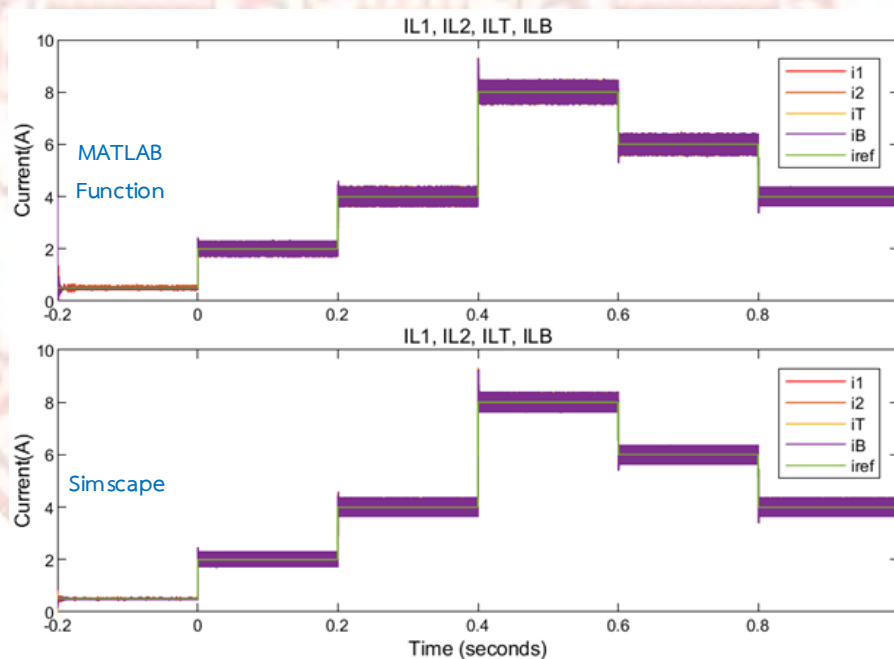


ภาพที่ 3 - 13 กระแสไฟฟ้ารวม i_{ch} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่กำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์

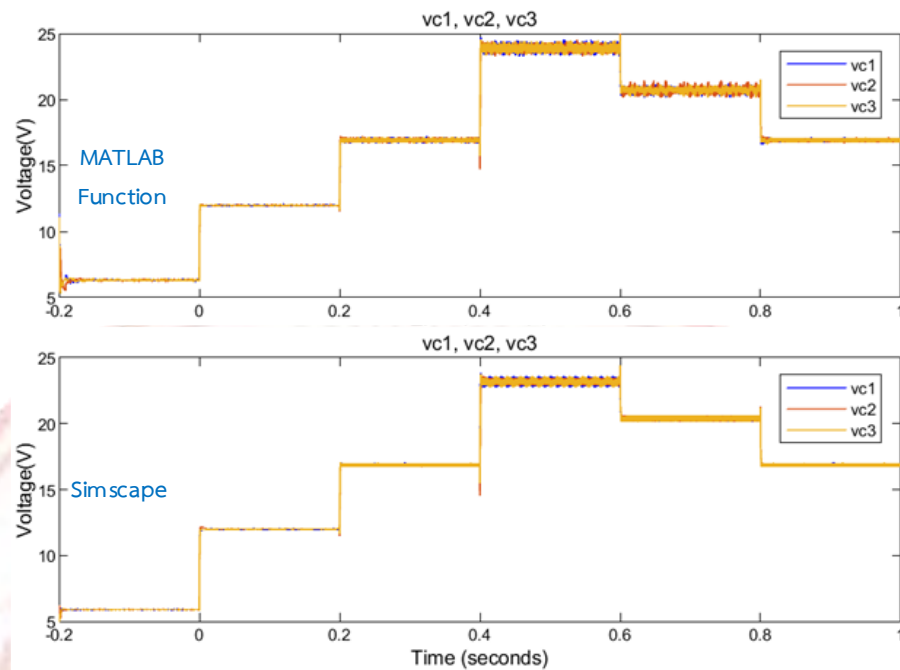
3.4.2. จำลองการควบคุมกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} , i_{LT} และ i_{LB} ให้เป็นไปตามค่ากระแสอ้างอิง i_{ref} ตามช่วงเวลาดังตารางที่ 3 - 4 การเปลี่ยนแปลงกระแสอ้างอิง i_{ref} ตามช่วงเวลาและรักษาสมดุลของแรงดันในตัวเก็บประจุ V_{C1} , V_{C2} และ V_{C3} ผลจำลองโดยการเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ดังแสดงในภาพที่ 3 - 14 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำสามารถเปลี่ยนแปลงค่าตามกระแสอ้างอิงในช่วงเวลาที่กำหนด อีกทั้งสามารถรักษาสมดุลของแรงดันไฟฟ้าระหว่างตัวเก็บประจุดังแสดงในภาพที่ 3 - 15 และจะเห็นได้ว่าในสภาวะคงตัวค่าเฉลี่ย Duty cycle มีค่าเท่ากันเช่นเดียวกับการจำลองในหัวข้อที่ 3.4.1 ดังที่แสดงในภาพที่ 3 - 16 และภาพที่ 3 - 17

ตารางที่ 3 - 4 การเปลี่ยนแปลงกระแสอ้างอิง i_{ref} ตามช่วงเวลา

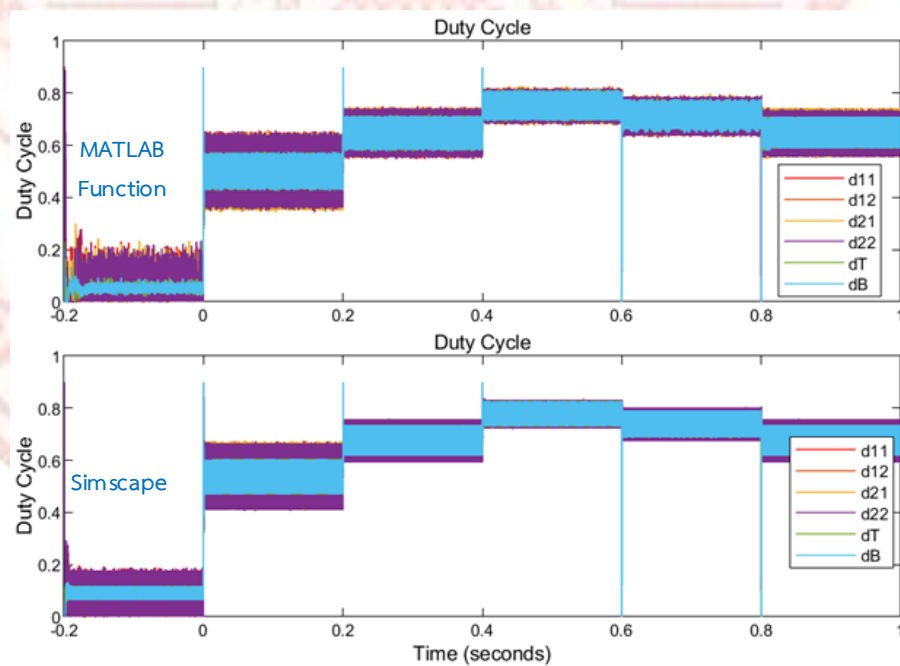
ช่วงเวลา (Seconds)	กระแสอ้างอิง (i_{ref})	ความต้านทานโหลด (R_L)	แรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า (V_{i1}, V_{i2})	แรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า (V_{iT}, V_{iB})
0 - 0.2 วินาที	2 แอมป์	5.2 โอห์ม	12 โวลต์	6 โวลต์
0.2 - 0.4 วินาที	4 แอมป์			
0.4 - 0.6 วินาที	8 แอมป์			
0.6 - 0.8 วินาที	6 แอมป์			
0.8 - 1 วินาที	4 แอมป์			



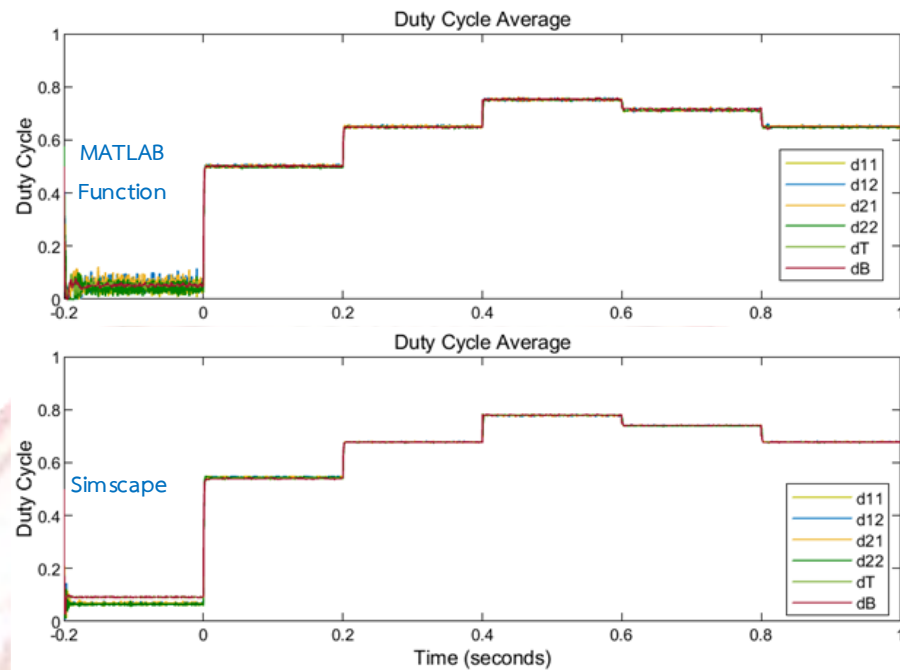
ภาพที่ 3 - 14 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} , i_{LT} และ i_{LB} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสอ้างอิง i_{ref}



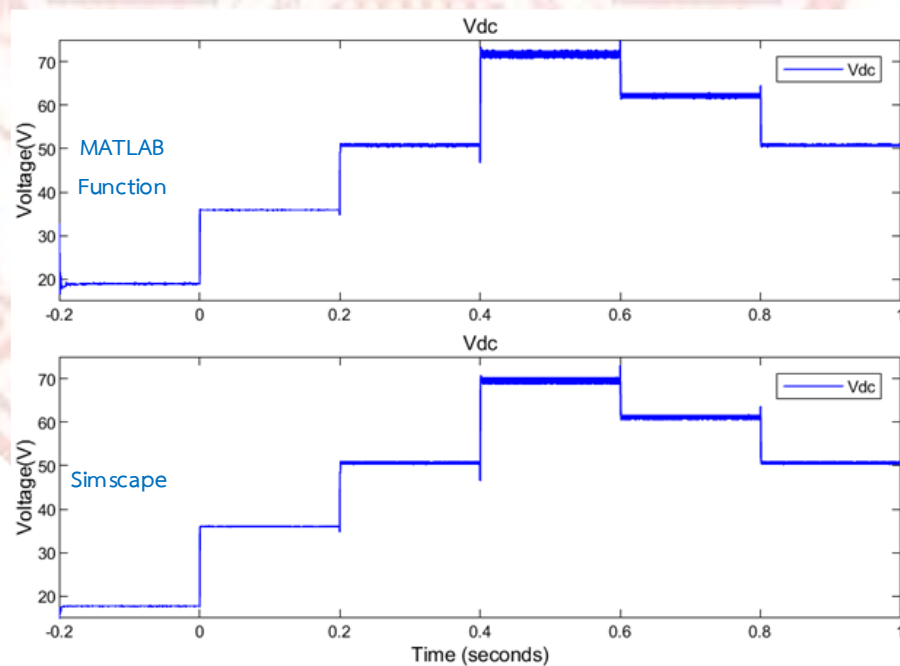
ภาพที่ 3 - 15 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ V_{C1} , V_{C2} , และ V_{C3} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสอ้างอิง i_{ref}



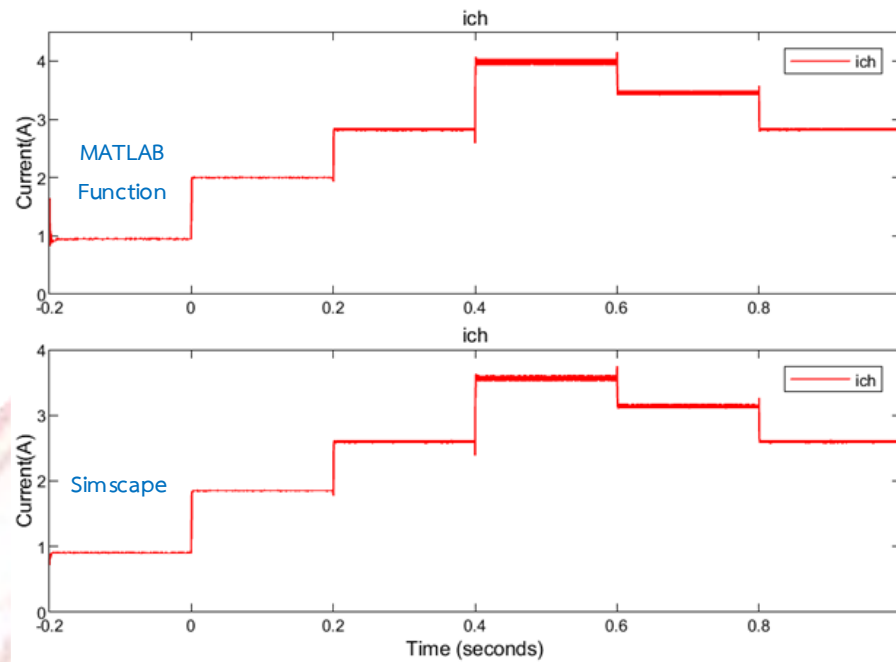
ภาพที่ 3 - 16 Duty cycle d_T , d_{11} , d_{12} , d_{21} , d_{22} , d_B ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสอ้างอิง i_{ref}



ภาพที่ 3 - 17 Duty cycle เฉลี่ย $d_T, d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}, d_B$ ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสอ้างอิง i_{ref}



ภาพที่ 3 - 18 แรงดันไฟฟ้าด้านขาออก V_{dc} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสอ้างอิง i_{ref}

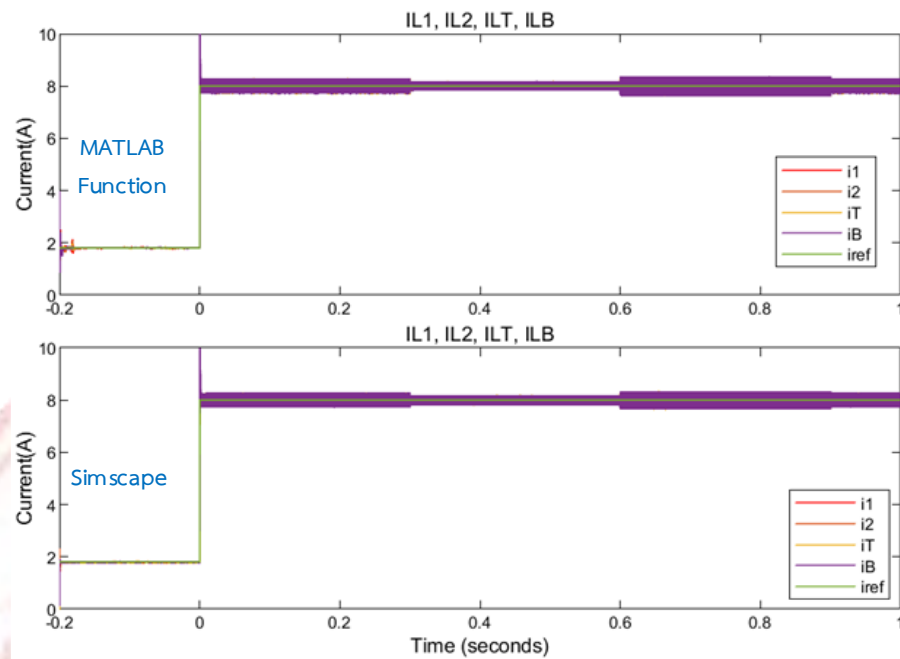


ภาพที่ 3 - 19 กระแสไฟฟ้ารวม i_{ch} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสอ้างอิง i_{ref}

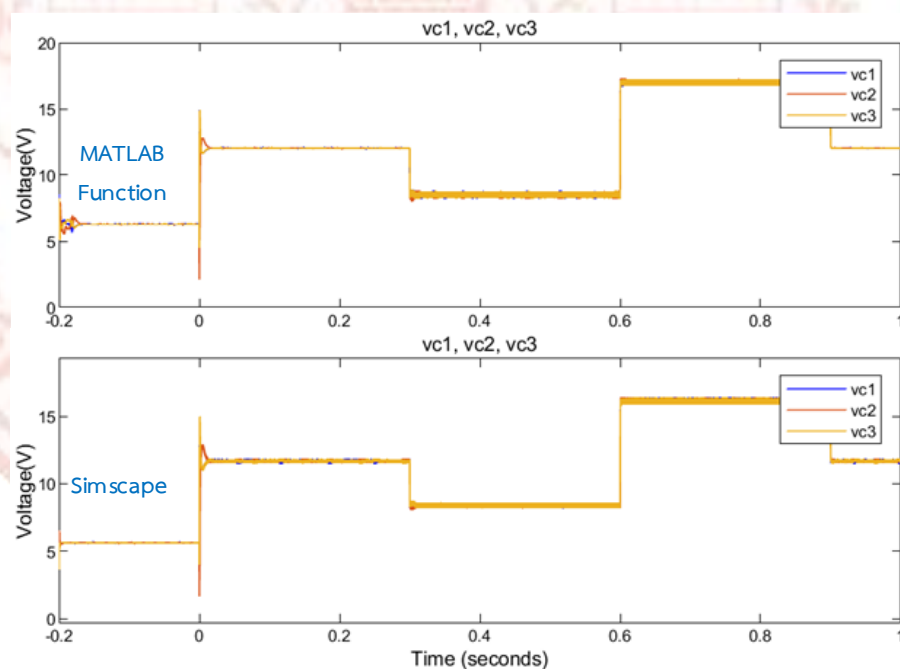
3.4.3. จำลองการควบคุมกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1}, i_{L2}, i_{LT} และ i_{LB} โดยกำหนดให้ค่ากระแสอ้างอิง i_{ref} คงที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานโหลด R_L ตามช่วงเวลาที่กำหนดดังตารางที่ 3 - 5 และรักษาสมดุลของแรงดันในตัวเก็บประจุ V_{C1}, V_{C2} และ V_{C3} ผลจำลองโดยการเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ดังแสดงในภาพที่ 3 - 20 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำยังคงที่ตามค่ากระแสอ้างอิงที่กำหนด ในขณะที่ความต้านทานโหลดมีการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาที่กำหนด อีกทั้งสามารถรักษาสมดุลของแรงดันไฟฟ้าระหว่างตัวเก็บประจุดังแสดงในภาพที่ 3 - 21 และจะเห็นได้ว่าในสภาวะคงตัวค่าเฉลี่ย Duty cycle มีค่าเท่ากัน ดังที่แสดงในภาพที่ 3 - 22 และภาพที่ 3 - 23

ตารางที่ 3 - 5 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานโหลด R_L ตามช่วงเวลา

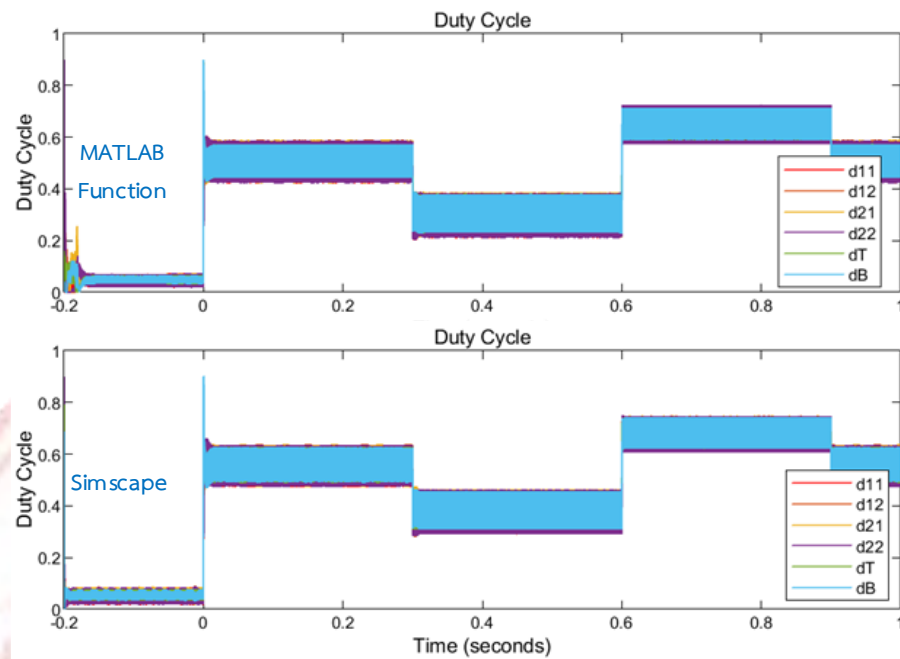
ช่วงเวลา (Seconds)	กระแสอ้างอิง (i_{ref})	ความต้านทานโหลด ($R_L = 5.2 \Omega$)	แรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า (V_{i1}, V_{i2})	แรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า (V_{iT}, V_{iB})
0 - 0.3 วินาที	8 แอมป์	R_L	12 โวลต์	6 โวลต์
0.3 - 0.6 วินาที		$\frac{R_L}{2}$		
0.6 - 0.9 วินาที		$R_L * 2$		
0.9 - 1 วินาที		R_L		



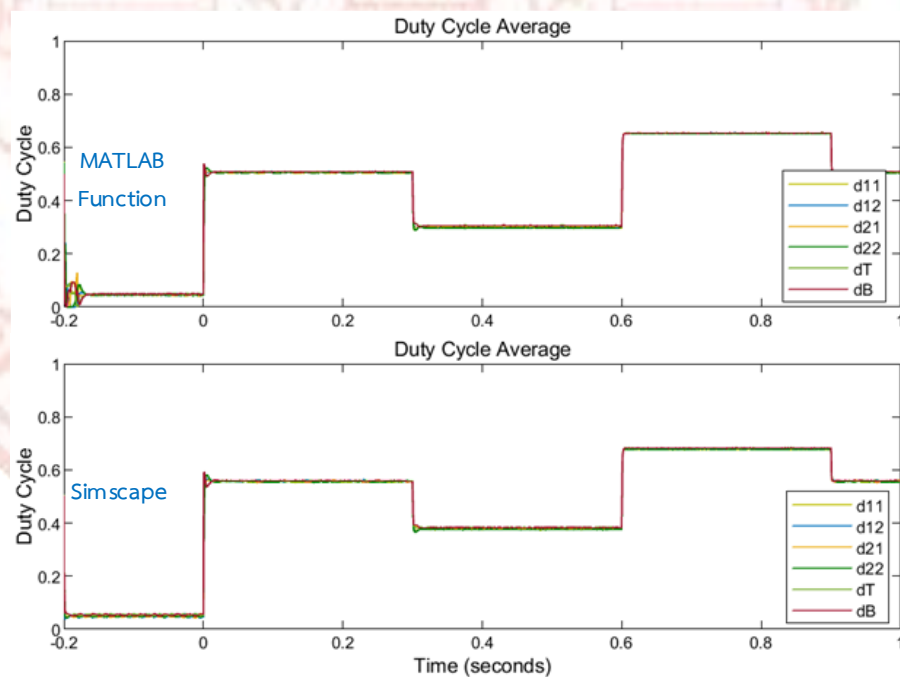
ภาพที่ 3 - 20 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1}, i_{L2}, i_{LT} และ i_{LB} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานโหลด R_L



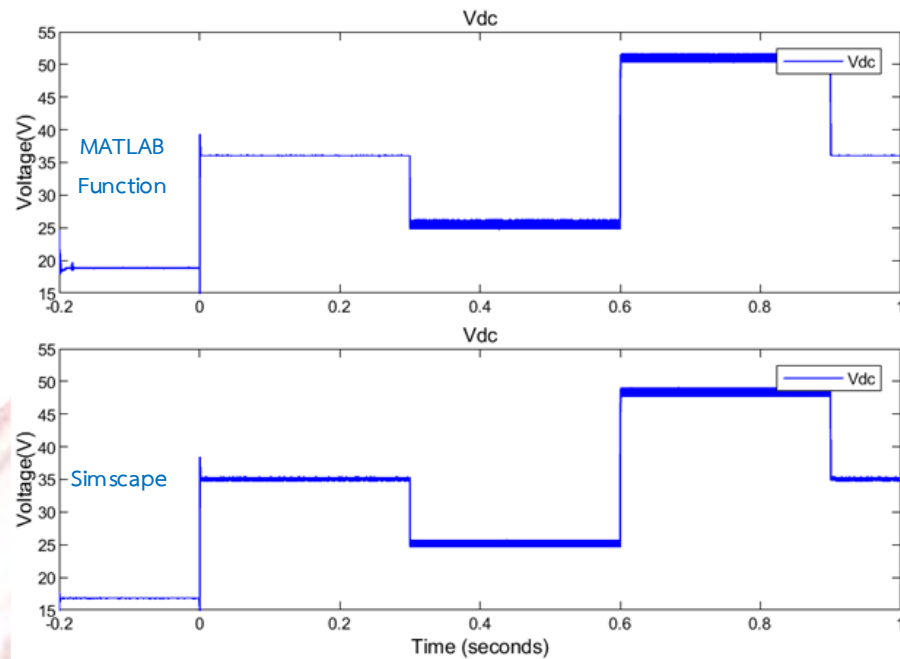
ภาพที่ 3 - 21 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ V_{C1}, V_{C2} , และ V_{C3} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานโหลด R_L



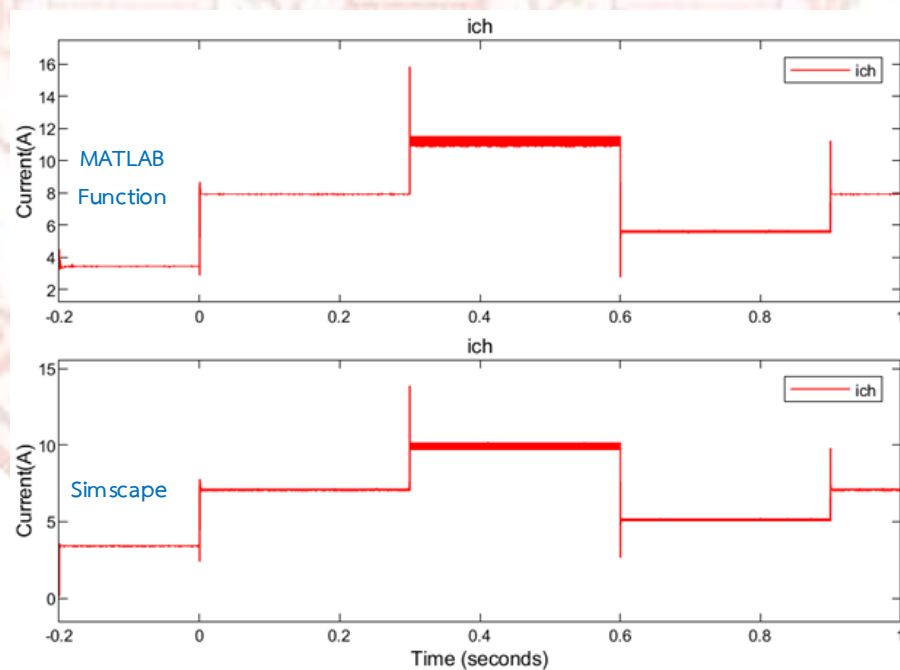
ภาพที่ 3 - 22 Duty cycle $d_T, d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}, d_B$ ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานโหลด R_L



ภาพที่ 3 - 23 Duty cycle เฉลี่ย $d_T, d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}, d_B$ ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานโหลด R_L



ภาพที่ 3 - 24 แรงดันไฟฟ้าด้านขาออก V_{dc} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานโหลด R_L



ภาพที่ 3 - 25 กระแสไฟฟ้ารวม i_{ch} ในการจำลองเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB Function และ Simscape ในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานโหลด R_L

ผลการจำลองควบคุมกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} , i_{LT} และ i_{LB} ให้เป็นไปตามค่ากระแสอ้างอิง i_{ref} และรักษาสมดุลของแรงดันในตัวเก็บประจุ V_{C1} , V_{C2} และ V_{C3} ในสถานการณ์สมมติทั้ง 3 สถานการณ์นี้ได้รับการยืนยันผลดังที่แสดงในภาพที่ 3 - 8 ถึงภาพที่ 3 - 25 โดยที่ตรวจสอบความถูกต้องของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุตที่ได้จัดทำขึ้นมานี้ว่าสามารถใช้งานได้จริงตามที่ได้รับการออกแบบด้วยการจำลองบนคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink Simscape และ MATLAB Function

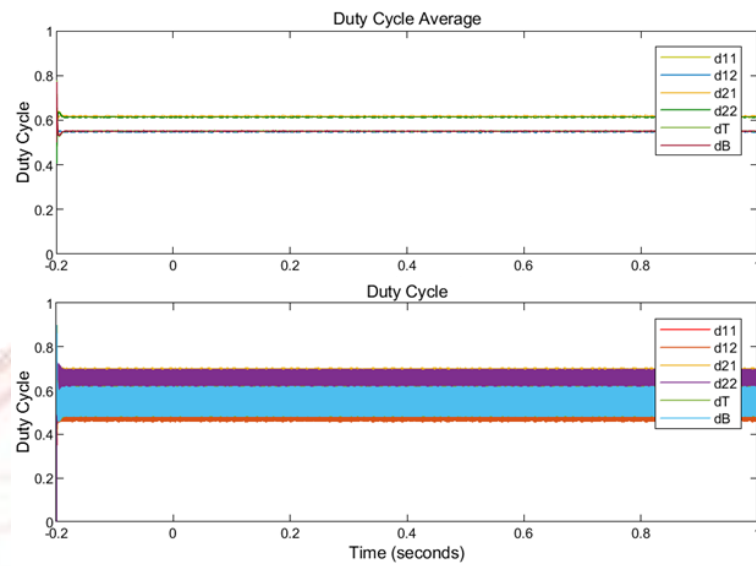
จากการจำลองพบว่าตัวควบคุมกระแสอินพุตนั้นสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงได้เป็นอย่างดี ทำให้มั่นใจได้ว่าเมื่อใช้เซลล์เชื้อเพลิงจะสามารถควบคุมพลวัตของกระแสและค่ากระแสสูงสุดได้เป็นอย่างดี

3.5 จำลองความไม่เป็นอุดมคติของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต

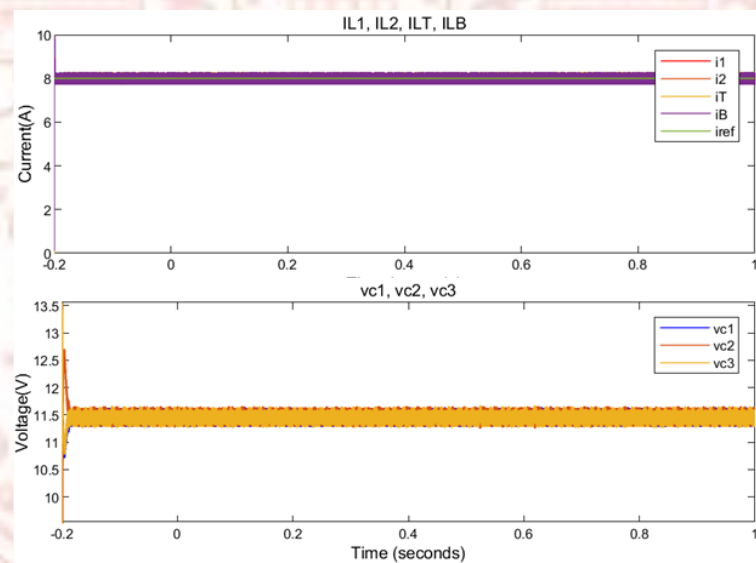
ในส่วนนี้จะเป็นการจำลองความไม่เป็นอุดมคติ ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุตด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink Simscape ดังแสดงดังภาพที่ 3-5 ที่มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตารางที่ 3 - 6 โดยที่มีการกำหนดสถานการณ์ให้ค่าความต้านทานแฝงในตัวเหนี่ยวนำไม่เท่ากันเพื่อสังเกตพฤติกรรมของ Duty cycle ผลการจำลองจากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นพบว่าค่าความต้านทานแฝงภายในตัวเหนี่ยวนำ r_{i1} , r_{i2} , r_{iT} และ r_{iB} มีผลทำให้ Duty cycle เปลี่ยนเกิดความไม่สมดุลกันเนื่องจากการเปลี่ยนค่าความต้านทานแฝงภายในตัวเหนี่ยวนำ r_{i1} , r_{i2} เพื่อจำลองและสังเกตผลและได้ยืนยันผลดังภาพที่ 3 - 26 แต่ยังสามารถควบคุมกระแสในตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} , i_{LT} และ i_{LB} และความสมดุลของตัวเก็บประจุ V_{C1} , V_{C2} และ V_{C3} ได้ตามปกติดังภาพที่ 3 - 27

ตารางที่ 3 - 6 การเปลี่ยนแปลงความต้านแฝงในตัวเหนี่ยวนำ

ช่วงเวลา (Seconds)	กระแส อ้างอิง (i_{ref})	ความ ต้านทาน โหลด (R_L)	แรงดันไฟฟ้า ด้านขาเข้า (V_{i1} , V_{i2})	แรงดันไฟฟ้า ด้านขาเข้า (V_{iT} , V_{iB})	ความต้านทานแฝง			
					r_{i1}	r_{i2}	r_{iT}	r_{iB}
0.2 – 1 วินาที	8 แอมป์	5.2 โอห์ม	12 โวลต์	6 โวลต์	0.1 โอห์ม	0.2 โอห์ม	0.01 โอห์ม	0.01 โอห์ม



ภาพที่ 3 - 26 Duty cycle เฉลี่ย $d_T, d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}, d_B$ ในสถานการณ์ที่ความต้านทานแฝงในตัวเหนี่ยวนำ r_{i1}, r_{i2} ไม่เท่ากัน



ภาพที่ 3 - 27 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1}, i_{L2}, i_{LT} และ i_{LB} และแรงดันที่ตัวเก็บประจุ V_{C1}, V_{C2} , และ V_{C3} ในสถานการณ์ที่ความต้านทานแฝงในตัวเหนี่ยวนำ r_{i1}, r_{i2} ไม่เท่ากัน

บทที่ 4

ผลการทดลอง

หลังจากจำลองผลของระบบที่ได้นำเสนอในบทก่อนหน้านี้ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและเก็บผลด้วยอุปกรณ์จริงโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1. รายละเอียดลักษณะสมบัติของระบบ

4.2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.3. การทดลอง

4.4. สรุปผลการทดลอง

4.1 รายละเอียดลักษณะสมบัติระบบ

4.2.1. ลักษณะสมบัติภาคกำลังของวงจรระบบ

4.1.1.1. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต

4.1.1.2. แรงดันไฟฟ้าอินพุตจากแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เกิน 12 โวลต์

4.1.1.3. แรงดันเอาต์พุตไฟตรงของวงจรไม่เกิน 100 โวลต์

4.1.1.4. กระแสเอาต์พุตไฟตรงของวงจรแต่ละโมดูลไม่เกิน 10 แอมป์

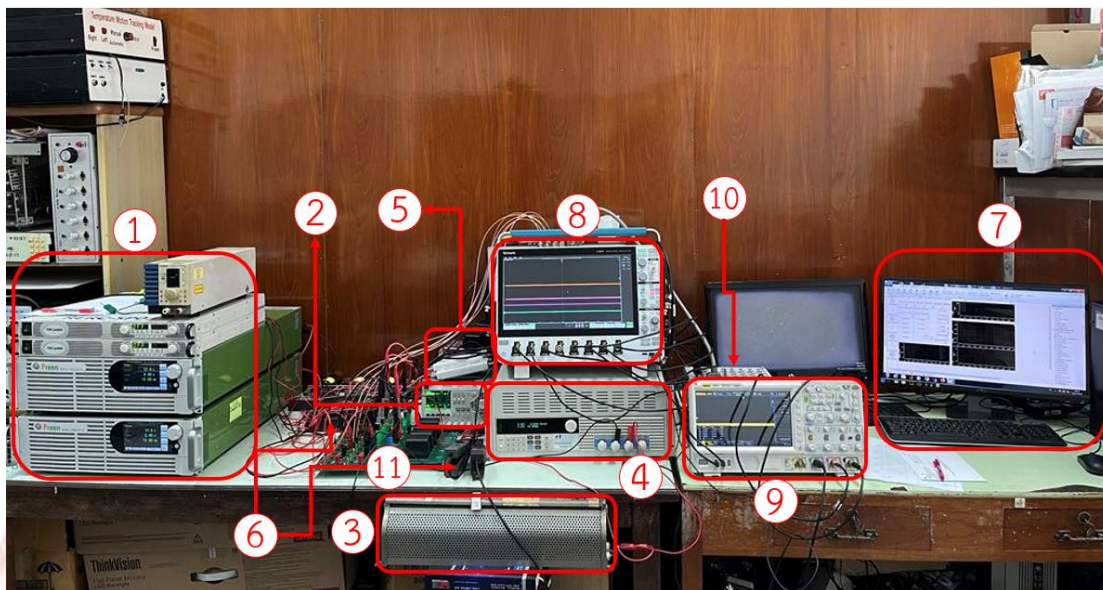
4.2.2. ใช้ชุดควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบดิจิตอล

สร้างสัญญาณ PWM ควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้าที่ความถี่วงจรแปลงผันไฟฟ้า 20 KHz

4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

การทดลองนี้มีเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองตามภาพที่ 4 - 1 ดังลำดับต่อไปนี้

1 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้	0 – 12 โวลต์	4	เครื่อง
2 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	5 โวลต์, 12 โวลต์	1	เครื่อง
3 ตัวต้านทานโหลด	100 โอห์ม 100 วัตต์	1	ตัว
4 โหลดอิเล็กทรอนิกส์		1	เครื่อง
5 Sensor แรงดันไฟฟ้า		3	ตัว
6 Sensor กระแสไฟฟ้า		5	ตัว
7 เครื่องคอมพิวเตอร์		1	เครื่อง
8 สโคป 8 ช่องรับสัญญาณ		1	เครื่อง
9 สโคป 4 ช่องรับสัญญาณ		1	เครื่อง
10 dSPACE		1	เครื่อง
11 วงจรการทดลอง		1	ชุด



ภาพที่ 4 - 1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

4.3 การทดลอง

การทดลองต่อไปนี้จะใช้ค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 4 - 1 และสถานการณ์เป็น 3 กรณี เช่นเดียวกับการจำลองระบบโดยใช้ MATLAB/Simulink และใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อจำลอง เซลล์เชื้อเพลิง เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองจริงโดยมีการทดลองผลดังนี้

ตารางที่ 4 - 1 พารามิเตอร์วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่าย อินพุตและตัวควบคุม

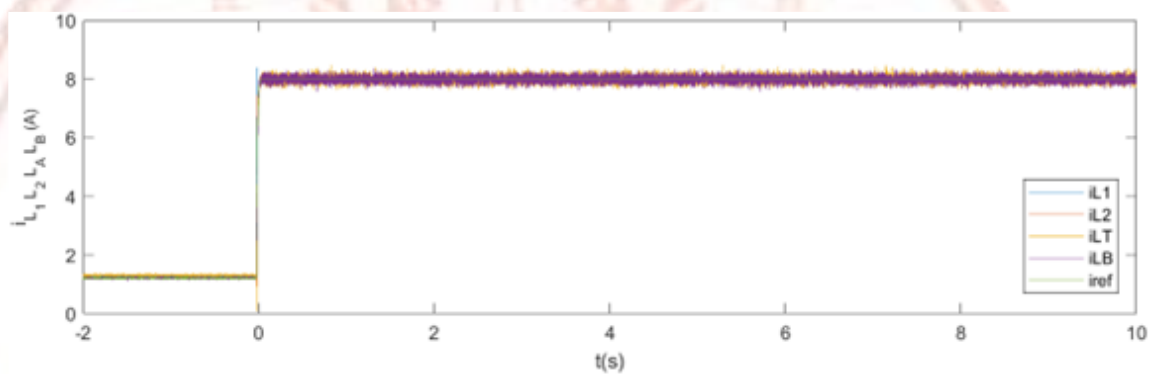
พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
พารามิเตอร์วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต		
V_{i1}, V_{i2}	12	โวลต์ (V)
V_{iT}, V_{iB}	6	โวลต์ (V)
$i_{L1}, i_{L2}, i_{LT}, i_{LB}$	2-8	แอมแปร์ (A)
C_1, C_2, C_3	100	ไมโครฟารัด (μF)
L_1, L_2, L_T, L_B	260	ไมโครเฮนรี (μH)
r_1, r_2, r_T, r_B	0.01	โอห์ม (Ω)
ความต้านทานโหลด R_L	6.4	โอห์ม (Ω)
พารามิเตอร์ควบคุม		
ความถี่สวิตช์ (f_s)	20	กิโลเฮิร์ต(KHz)
$k_{i1}, k_{i2}, k_{iT}, k_{iB}, \lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \lambda_{iT}, \lambda_{iB}$	5000	$rad \cdot s^{-1}$
$k_{v1}, k_{v2}, \lambda_{v1}, \lambda_{v2}$	500	$rad \cdot s^{-1}$

4.3.1. ทดลองควบคุมกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} , i_{LT} และ i_{LB} ให้เป็นไปตามค่ากระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์ และรักษาสมดุลของแรงดันในตัวเก็บประจุ V_{C1} , V_{C2} และ V_{C3} โดยมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ใน

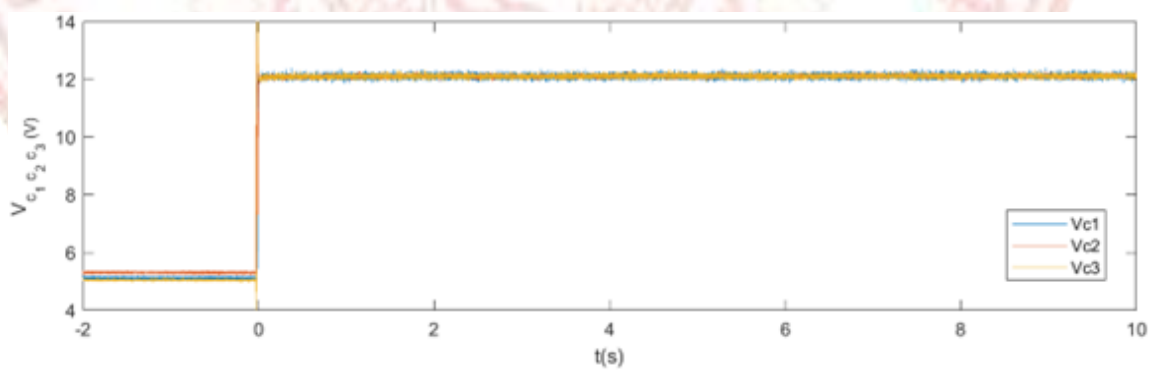
4.3.2. ตารางที่ 4 - 2 เพื่อสังเกตพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันที่ตัวเก็บประจุ โดยผลการทดลองจะแสดงในภาพที่ 4 - 2 ถึงภาพที่ 4 - 5

ตารางที่ 4 - 2 การกำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์

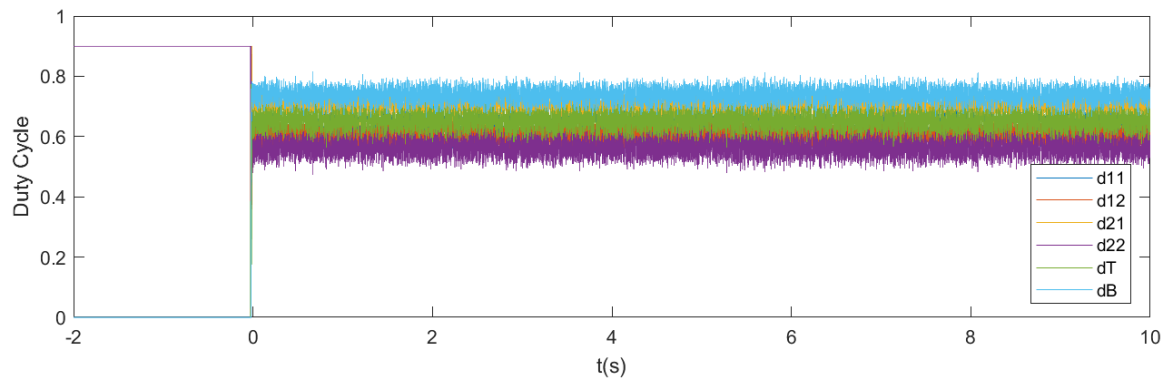
ช่วงเวลา (Seconds)	กระแสอ้างอิง (i_{ref})	ความต้านทานโหลด (R_L)	แรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า (V_{i1} , V_{i2})	แรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า (V_{iT} , V_{iB})
0 - 10 วินาที	8 แอมป์	5.2 โอห์ม	12 โวลต์	6 โวลต์



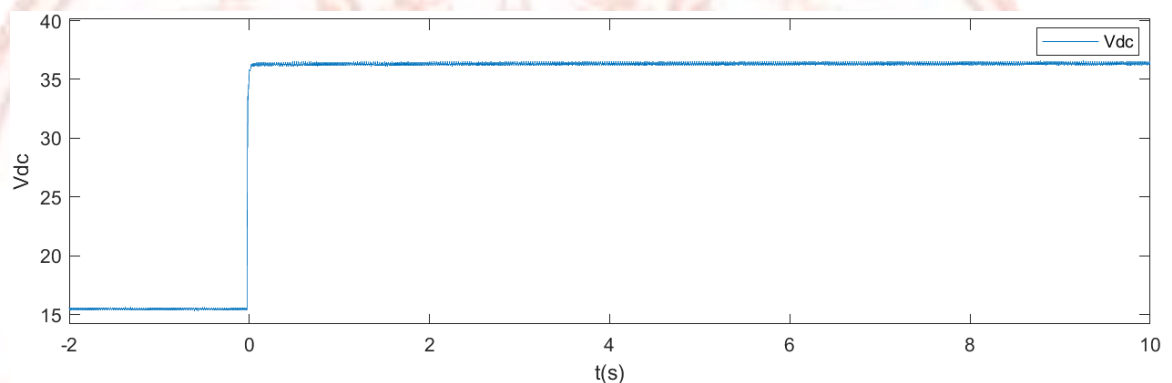
ภาพที่ 4 - 2 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} , i_{LT} และ i_{LB} และค่ากระแสอ้างอิง i_{ref} ในสถานะการณ์ที่กำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์



ภาพที่ 4 - 3 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ V_{C1} , V_{C2} , และ V_{C3} ในสถานะการณ์ที่กำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์



ภาพที่ 4 - 4 Duty cycle $d_T, d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}, d_B$ ในสถานการณ์ที่กำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์

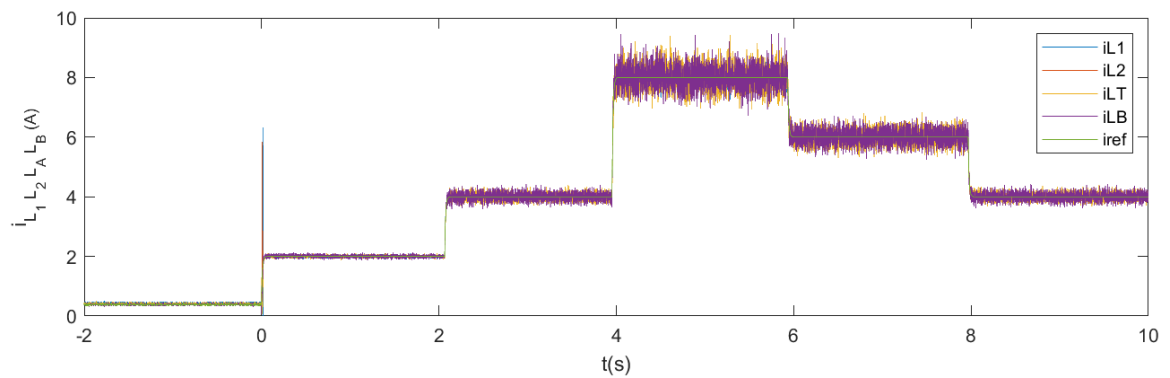


ภาพที่ 4 - 5 แรงดันด้านขาออก V_{dc} ในสถานการณ์ที่กำหนดกระแสอ้างอิง i_{ref} เท่ากับ 8 แอมป์

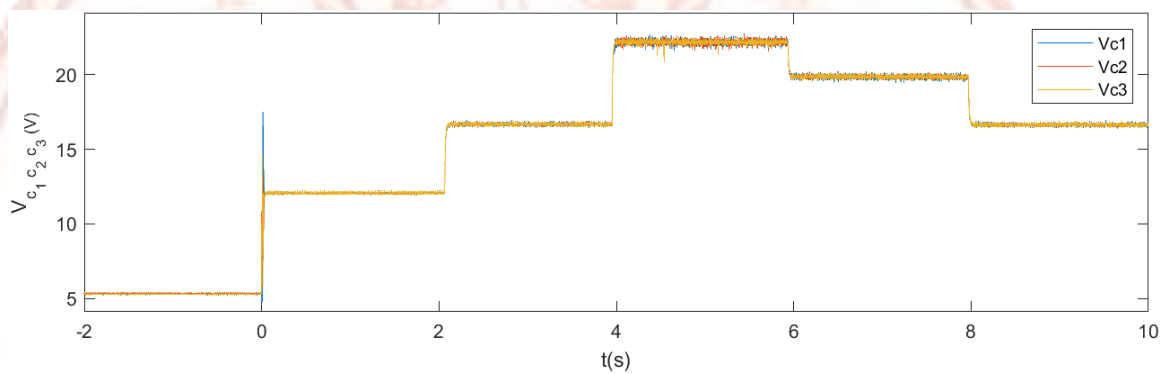
4.3.2 ทดลองควบคุมกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1}, i_{L2}, i_{LT} และ i_{LB} ให้เป็นไปตามค่ากระแสอ้างอิง i_{ref} ตามช่วงเวลา และรักษาสมดุลของแรงดันในตัวเก็บประจุ V_{C1}, V_{C2} และ V_{C3} โดยมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตารางที่ 4 - 3 เพื่อสังเกตพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันที่ตัวเก็บประจุ โดยผลการทดลองจะแสดงในภาพที่ 4 - 6 ถึงภาพที่ 4 - 9

ตารางที่ 4 - 3 การเปลี่ยนแปลงกระแสอ้างอิง i_{ref} ตามช่วงเวลา

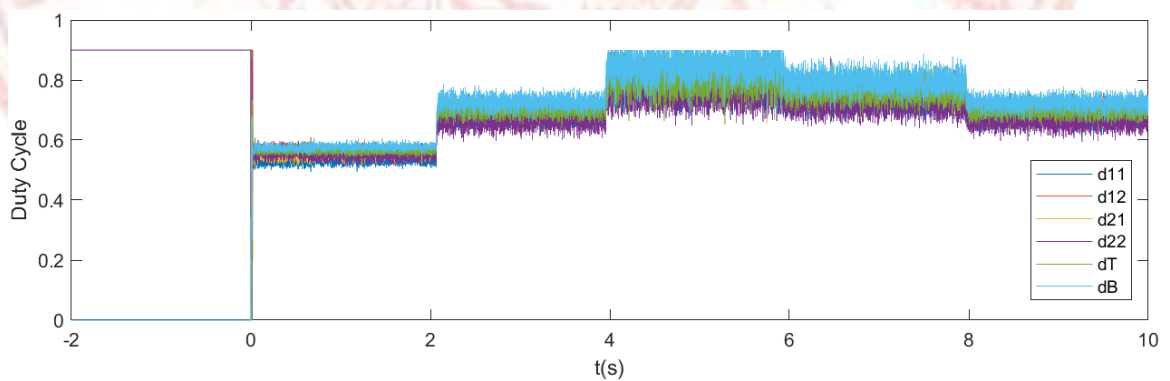
ช่วงเวลา (Seconds)	กระแสอ้างอิง (i_{ref})	ความต้านทานโหลด (R_L)	แรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า (V_{i1}, V_{i2})	แรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า (V_{iT}, V_{iB})
0 - 2 วินาที	2 แอมป์	5.2 โอห์ม	12 โวลต์	6 โวลต์
2 - 4 วินาที	4 แอมป์			
4 - 6 วินาที	8 แอมป์			
6 - 8 วินาที	6 แอมป์			
8 - 1 วินาที	4 แอมป์			



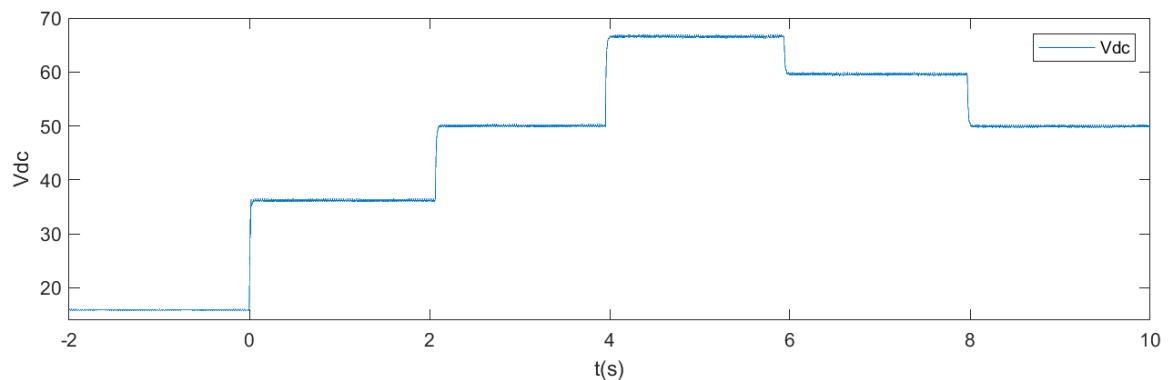
ภาพที่ 4 - 6 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} , i_{LT} และ i_{LB} และค่ากระแสอ้างอิง i_{ref} ในสถานการณ์ที่กระแสอ้างอิง i_{ref} เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา



ภาพที่ 4 - 7 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ V_{c1} , V_{c2} , และ V_{c3} ในสถานการณ์ที่กระแสอ้างอิง i_{ref} เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา



ภาพที่ 4 - 8 Duty cycle d_T , d_{11} , d_{12} , d_{21} , d_{22} , d_B ในสถานการณ์ที่กระแสอ้างอิง i_{ref} เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา

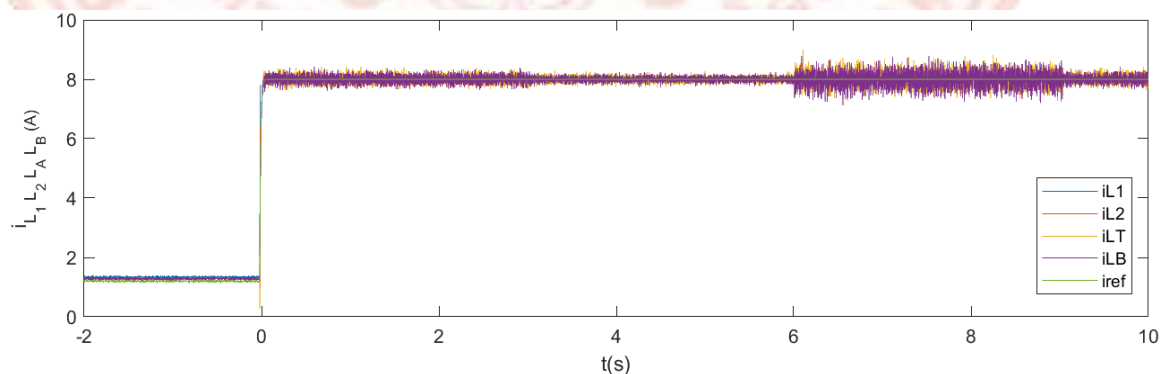


ภาพที่ 4 - 9 แรงดันด้านขาออก V_{dc} ในสถานการณ์ที่กระแสอ้างอิง i_{ref} เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา

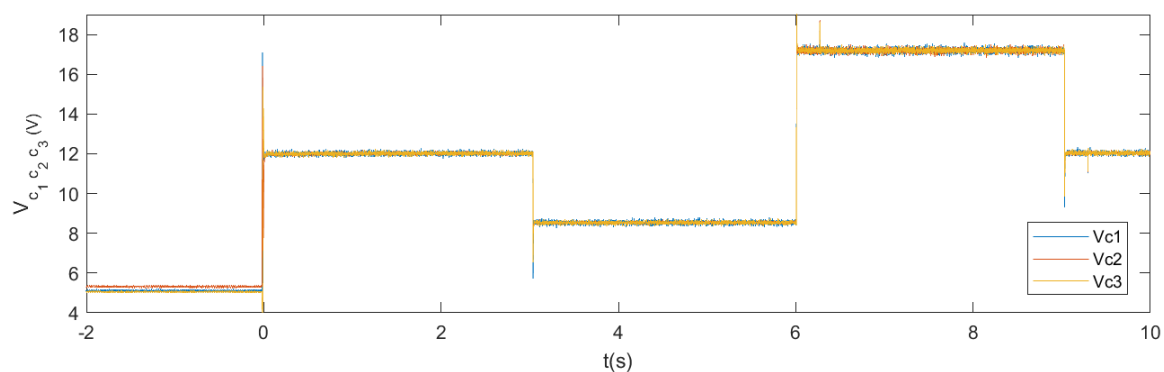
4.3.3 ทดลองควบคุมกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1}, i_{L2}, i_{LT} และ i_{LB} โดยกำหนดให้ค่ากระแสอ้างอิง i_{ref} คงที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานโหลด R_L ตามช่วงเวลา และรักษาสมดุลของแรงดันในตัวเก็บประจุ V_{C1}, V_{C2} และ V_{C3} โดยมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตารางที่ 4 - 4 เพื่อสังเกตพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันที่ตัวเก็บประจุ โดยผลการทดลองจะแสดงในภาพที่ 4 - 10 ถึงภาพที่ 4 - 13

ตารางที่ 4 - 4 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานโหลด R_L ตามช่วงเวลา

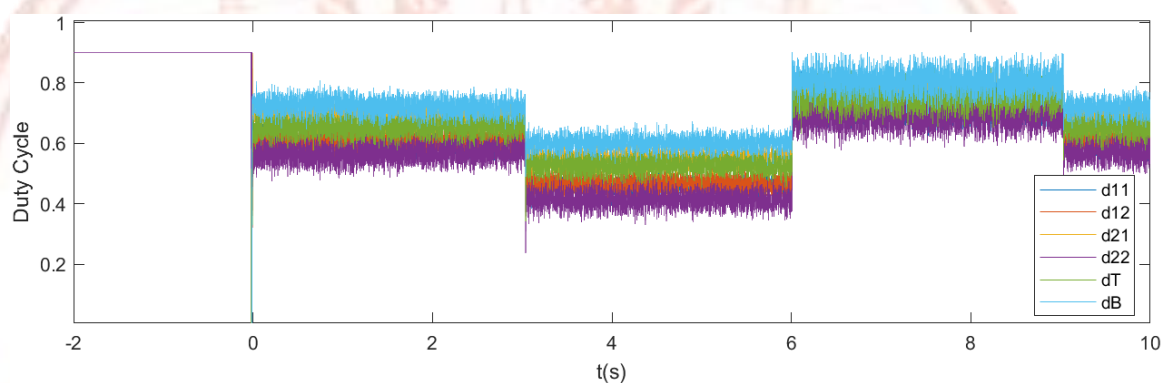
ช่วงเวลา (Seconds)	กระแสอ้างอิง (i_{ref})	ความต้านทานโหลด ($R_L = 6.4 \Omega$)	แรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า (V_{i1}, V_{i2})	แรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า (V_{iT}, V_{iB})
0 - 3 วินาที	8 แอมป์	R_L	12 โวลต์	6 โวลต์
3 - 6 วินาที		$\frac{R_L}{2}$		
6 - 9 วินาที		$R_L * 2$		
9 - 10 วินาที		R_L		



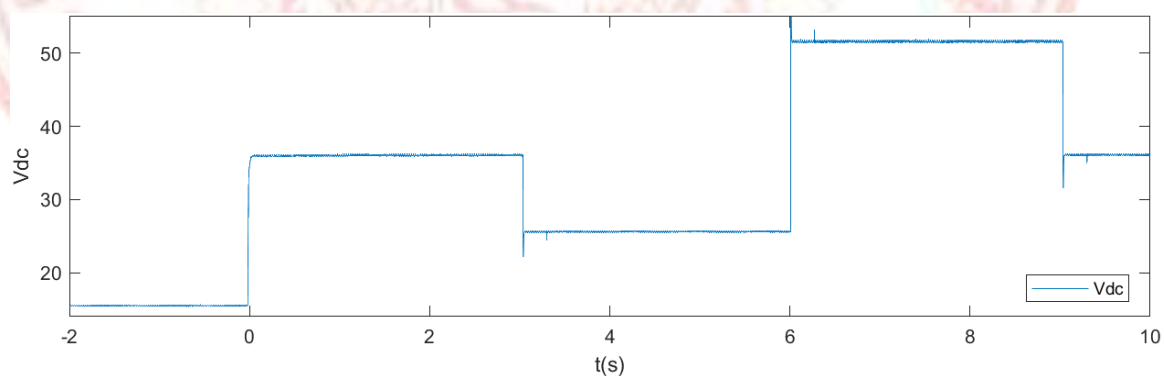
ภาพที่ 4 - 10 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ i_{L1}, i_{L2}, i_{LT} และ i_{LB} ในสถานการณ์ที่ความต้านทานโหลด R_L เกิดการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา



ภาพที่ 4 - 11 แรงดันที่ตัวเก็บประจุ V_{c1} , V_{c2} , และ V_{c3} ในสถานะการณ์ที่ความต้านทานโหลด R_L เกิดการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา



ภาพที่ 4 - 12 Duty cycle $d_T, d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}, d_B$ ในสถานะการณ์ที่ความต้านทานโหลด R_L เกิดการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา



ภาพที่ 4 - 13 แรงดันด้านขาออก V_{dc} ในสถานะการณ์ที่ความต้านทานโหลด R_L เกิดการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา

4.4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต ภายใต้สถานการณ์สมมติทั้ง 3 กรณี พบว่าในการควบคุมกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำให้ตามกระแสอ้างอิง นั้นเป็นไปตามที่ต้องการ อีกทั้งยังสามารถแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุให้มีความสมดุลกัน และควบคุม ให้ค่า Duty cycle มีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของวงจร เช่น ค่าความต้านทานแฝงในวงจรจึงมีความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นอุดมคติ ผลการทดลองโดยรวมยังสามารถควบคุมกระแสให้เป็นไปตามค่ากระแสอ้างอิงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานโหลด



บทที่ 5

สรุป และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์เรื่อง วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต ได้ดำเนินการเสร็จสิ้นตามขอบเขตงานแล้ว บทนี้จะกล่าวถึงข้อสรุป ปัญหาและข้อเสนอแนะที่เกิดขึ้นระหว่างดำเนินงาน

5.1 สรุป

วิทยานิพนธ์ที่จัดทำนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนางจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่ายอินพุต สำหรับเพิ่มจำนวนแหล่งจ่ายอินพุตให้แก่วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสามที่ต่อร่วมกันสองโมดูล และปรับ Duty cycle ของระบบที่กล่าวมานี้ให้มีความสมดุลกัน เพื่อลดความเครียดของอุปกรณ์สวิตช์ และความร้อนสะสมในอุปกรณ์ที่ไม่เท่ากันทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานวงจรได้ และได้ศึกษาวิธีการควบคุมโหมดเลื่อนแบบทางอ้อมพบว่ามีจุดเด่นสำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้าสัญญาณที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยให้ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์มีประสิทธิภาพด้านพลวัตที่ดี และสามารถนำไปใช้ได้ง่ายซึ่งเหมาะสมกับวงจรแปลงผันที่ได้พัฒนาขึ้น ก่อนการทดลองจริงได้มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจำลองผลเพื่อศึกษาและตรวจสอบผลลัพธ์ว่าเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้แล้วจึงได้ดำเนินการทดลองผลจริงโดยการสร้างสถานการณ์สมมติพบว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้าทำงานได้ดีตามสถานการณ์ต่าง ๆ ที่กำหนดภายใต้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่กำหนดไว้แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานโหลด กระแสภายในตัวเหนี่ยวนำสามารถรักษาค่าตามกระแสอ้างอิง และยังสามารถรักษาความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุและ Duty cycle ทั้งหมดได้ดี ทำให้มั่นใจได้ว่าเมื่อใช้เซลล์เชื้อเพลิงจะสามารถควบคุมพลวัตของกระแสและค่ากระแสสูงสุดได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลที่ได้จากการดำเนินการ พบว่างานที่ควรปรับปรุงและพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้น ดังต่อไปนี้

- 5.2.1. ศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายอินพุต
- 5.2.2. ศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณค่าความเหนี่ยวนำขั้นต่ำ
- 5.2.3. ศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณค่าตัวเก็บประจุขั้นต่ำ
- 5.2.4. ศึกษาความคงทนในการควบคุมระบบต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ เช่น ค่าตัวเหนี่ยวนำ ค่าความจุของตัวเก็บประจุ
- 5.2.5. ศึกษาการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกที่จ่ายให้กับโหลด
- 5.2.6. ใช้เซลล์เชื้อเพลิงจริง

บรรณานุกรม

- [1] Trunina, K. Pryakhina and S. Yakymets, "Research on the Development of Renewable Energy Sources in the World Due to the War in Ukraine," 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2022, pp. 1-5.
- [2] K. B. Samal, S. Pati, R. Sharma and A. M. Nayak, "Power Control in an PV – Fuel Cell Based Hybrid Isolated Microgrid," 2022 IEEE 2nd International Symposium on Sustainable Energy, Signal Processing and Cyber Security (iSSSC), Gunupur, Odisha, India, 2022, pp. 1-5.
- [3] M. Afkar, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Phattanasak and S. Pierfederici, "Evaluation of the performance of a controller based on indirect-sliding mode in a renewable system," 2021 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovation Electricals and Electronics (RI2C), Bangkok, Thailand, 2021, pp. 262-267.
- [4] M. Afkar, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Phattanasak, J. -P. Martin and S. Pierfederici, "Proposed System Based on a Three-Level Boost Converter to Mitigate Voltage Imbalance in Photovoltaic Power Generation Systems," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 2, pp. 2264-2282, Feb. 2022.
- [5] M. Afkar, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Phattanasak, A. Siangsano, 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.
- [6] B. M. Hasaneen and A. A. Elbaset Mohammed, "Design and simulation of DC/DC boost converter," 2008 12th International Middle-East Power System Conference, Aswan, Egypt, 2008, pp. 335-340.
- [7] O. M. Faloye and P. Barendse, "A Three Level DC-DC Converter for Battery Impedance Spectroscopy," 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA, 2019, pp. 2682-2689.
- [8] Z. Shahruei, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Phattanasak and S. Pierfederici, "A three-level converter for supercapacitor in electric vehicles," 2022 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovative Electricals and Electronics (RI2C), Bangkok, Thailand, 2022, pp. 54-57.
- [9] C. H. Tran, F. Nollet, N. Essounbouli and A. Hamzaoui, "Modeling and Simulation of Stand-Alone Photovoltaic System using Three Level Boost Converter," 2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Tangier, Morocco, 2017, pp. 1-6.

- [10] M. Afkar, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Phattanasak, P. Sethakul and S. Pierfederici, "Ripple capacitor's voltage analysis on two-input three-level boost converter," 2022 19th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Prachuap Khiri Khan, Thailand, 2022, pp. 1-4.
- [11] M. Afkar, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Phattanasak and S. Pierfederici, "Performing pulse-width modulation using two different methods in a modular topology," 2022 IEEE International Power and Renewable Energy Conference (IPRECON), Kollam, India, 2022, pp. 1-6.
- [12] M. Afkar, S. A. S. Sakkak, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Phattanasak and S. Pierfederici, "Operation and Analysis of a Modular Converter for Photovoltaic or Fuel cell systems," 2021 IEEE International Power and Renewable Energy Conference (IPRECON), Kollam, India, 2021, pp. 1-6.
- [13] M. Afkar, P. Karimi, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Phattanasak and S. Pierfederici, "Effect of the parasitic resistances on the voltage gain in a dc-dc modular system," 2022 19th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Prachuap Khiri Khan, Thailand, 2022, pp. 1-4.
- [14] M. Afkar, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Phattanasak and S. Pierfederici, "Commandability of a modular Three-Level Boost Converter in Fuel-cell Systems," 2019 Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG), Tehran, Iran, 2019, pp. 1-5.
- [15] Hong Wang, Liang Yang, Analysis of proton exchange membranes for fuel cells based on statistical theory and data mining, iScience, Volume 27, Issue 4, 2024,
- [16] Daniel Akinyele, Elijah Olabode, Abraham Amole. Fuel Cell Technologies and Applications for Sustainable Microgrid Systems. MDPI. 2020.
- [17] F.C. Lee, M.S. Ismail, D.B. Ingham, K.J. Hughes, L Ma, S.M. Lyth, M. Pourkashanian. Alternative architectures and materials for PEMFC gas diffusion layers: A review and outlook, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 166, 2022.
- [18] Zihao Wan, Feng Liu, Hongfei Xu, Shuaili Zhao, Zhen An, Zizai Ma, Zhonghua Zhang, Yun Wu, Xiaoguang Wang. Recent advances and trends of single-atom catalysts for proton exchange membrane fuel cell cathodes. Chem Phys Mater, Volume 3, Issue 2, 2024, Pages 143-156.
- [19] Jiansheng Liu, Lijie Zhang, Bin Yuan, Ying Zhang, Zan Yang, Jihui Huang. Design and development of coating for metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC): A review, Materials & Design, Volume 246, 2024.

- [20] Kamel Ben Saad, Abdelaziz Sahbani and Mohamed Benrejeb. Sliding Mode Control and Fuzzy Sliding Mode Control for DC-DC Converters. National engineering school of Tunis (ENIT), Tunis, Tunisia.
- [21] Heide Brandtstädter. Sliding Mode Control of Electromechanical Systems. 2009.
- [22] K. Sengsui, S. Udomkaew, W. Saksiri, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Phattanasak and S. Pierfederici, "Four-Input Boost Converter for Renewable Energy Applications," 2023 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovative Electricals and Electronics (RI2C), Bangkok, Thailand, 2023, pp. 365-369.

This is Mendeley biography





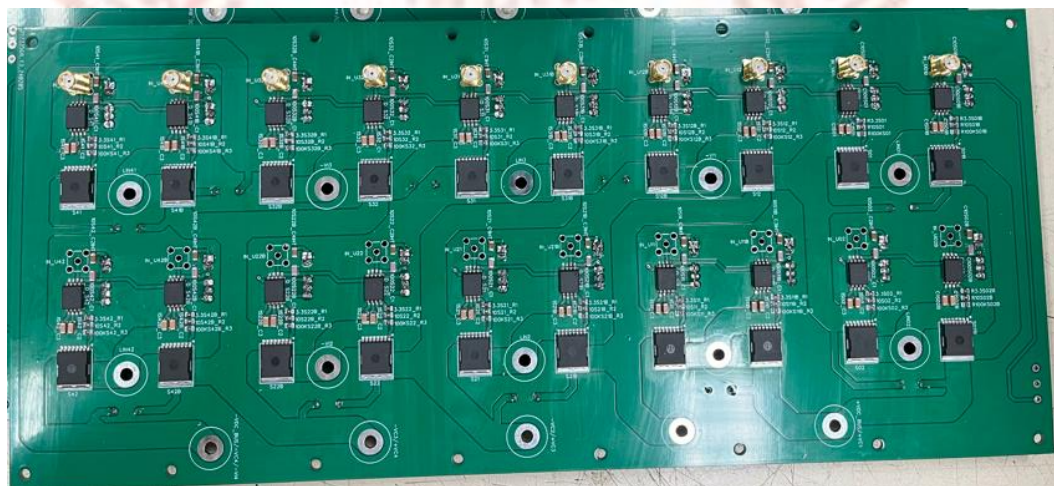
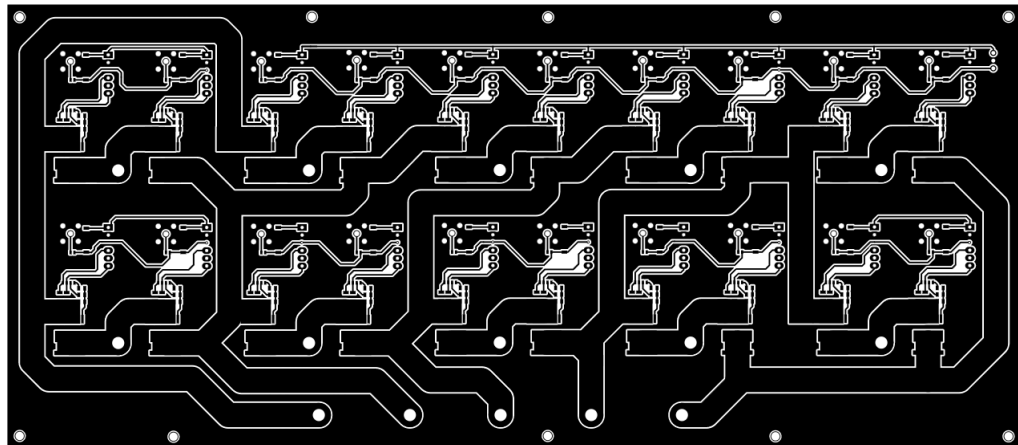
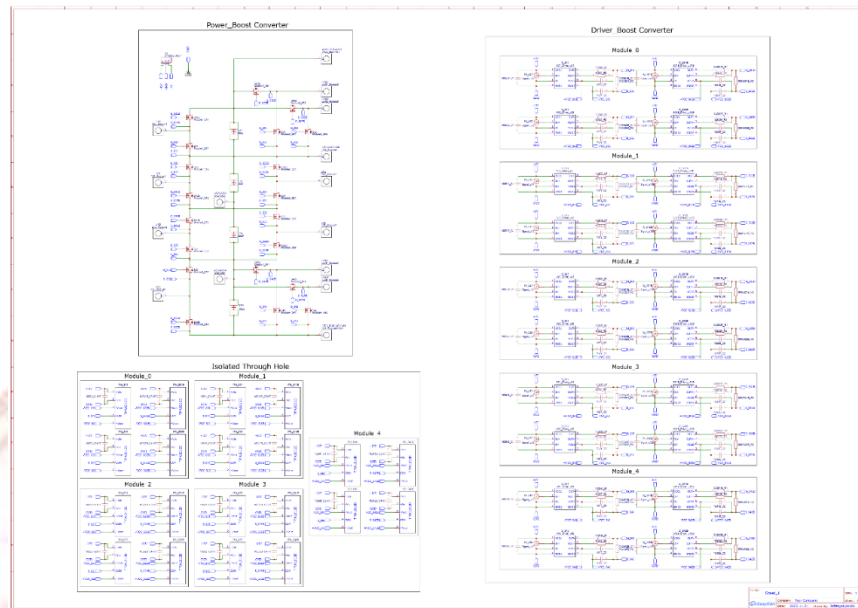
ภาคผนวก ก

ผลการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์

รายชื่อผลงานการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติเกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

- [1] K. Sengsui, S. Udomkaew, W. Saksiri, M. Phattanasak, R. Gavagsaz-Ghoachani and S. Pierfederici, "Two-loop control in a three-level boost Converter Module with balanced Duty cycles for renewable energy systems," *2024 International Conference on Materials and Energy: Energy in Electrical Engineering (ICOME-EE)*, Bangkok, Thailand, 2024, pp. 1-5.
- [2] K. Sengsui *et al.*, "Improved Three-Level Boost Converter to Balance Duty cycles for Fuel Cell and Photovoltaic Applications," *2024 12th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Pattaya, Thailand, 2024, pp. 1-6.
- [3] K. Sengsui, S. Udomkaew, W. Saksiri, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Phattanasask and S. Pierfederici, "Four-Input Boost Converter for Renewable Energy Applications," *2023 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovative Electricals and Electronics (RI2C)*, Bangkok, Thailand, 2023, pp. 365-369.





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายกฤตยชญ์ เสงส์สุข
ชื่อวิทยานิพนธ์	วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันที่มีหลายแหล่งจ่าย อินพุต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ประวัติ	วัน / เดือน / ปีเกิด : 22 พฤศจิกายน 2541 ภูมิลำเนาเดิม : อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่อยู่ : บ้านเลขที่ 91 หมู่ที่ 1 ตำบลถ้ำใหญ่ อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช รหัสไปรษณีย์ 80110 โทรศัพท์มือถือ : 064-0585333 E-mail: krittayot.pk100@gmail.com ประวัติการศึกษา - ปริญญาตรี (คอบ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า - อิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2564 - ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคโนโลยีภาคใต้ (เอส.เทค.) ปีการศึกษา 2561 - ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคโนโลยีภาคใต้ (เอส.เทค.) ปีการศึกษา 2559 - มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนรัตนศึกษาชนปรีดา ปีการศึกษา 2556 - ประถมศึกษา โรงเรียนรัตนศึกษาชนปรีดา ปีการศึกษา 2553