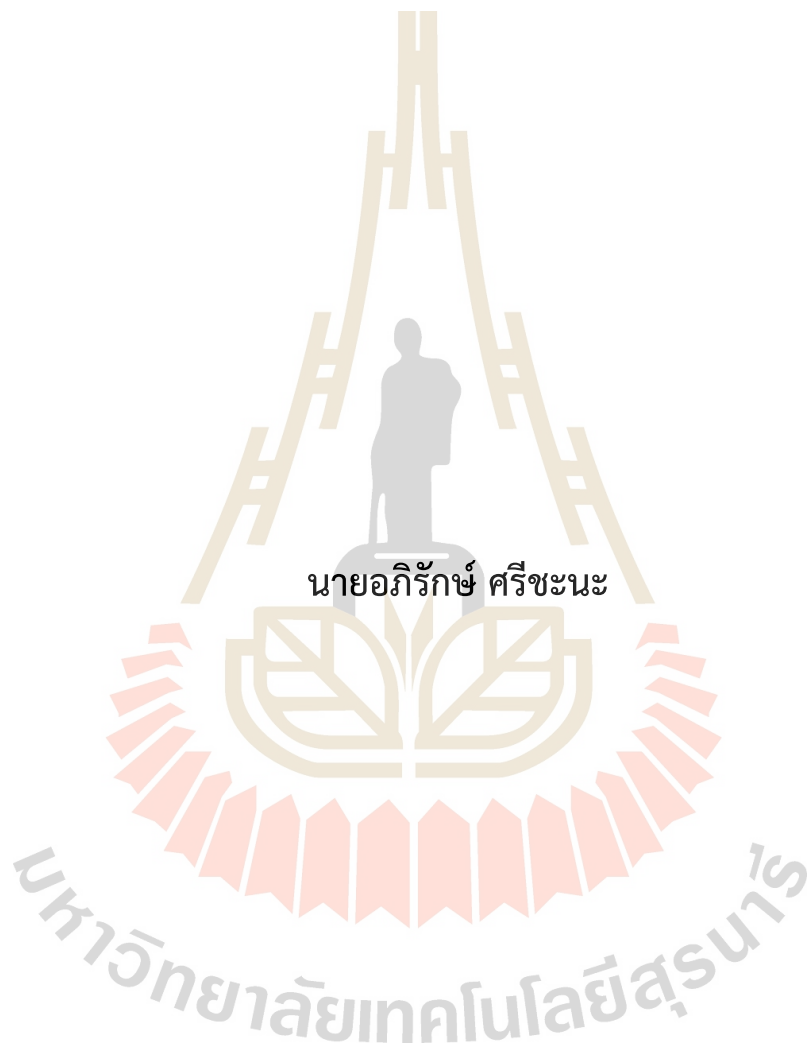


การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยวิธีการค้นหา
แบบตาปูเชิงปรับตัวสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่



นายอภิรักษ์ ศรีชนะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2568

ADAPTIVE SLIDING MODE CONTROLLER DESIGN USING ADAPTIVE
TABU SEARCH METHOD FOR BATTERY ELECTRIC VEHICLE SYSTEM



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2025

การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยวิธีการค้นหา
แบบตาปูเชิงปรับตัวสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

ประธานกรรมการ

(ศ. ดร.กองพัน อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อาจารย์ ดร.อภิชัย สุธะพันธ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)

(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

กรรมการ

(ผศ. ดร.สุดาร์ตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ

(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและ
ประกันคุณภาพ

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

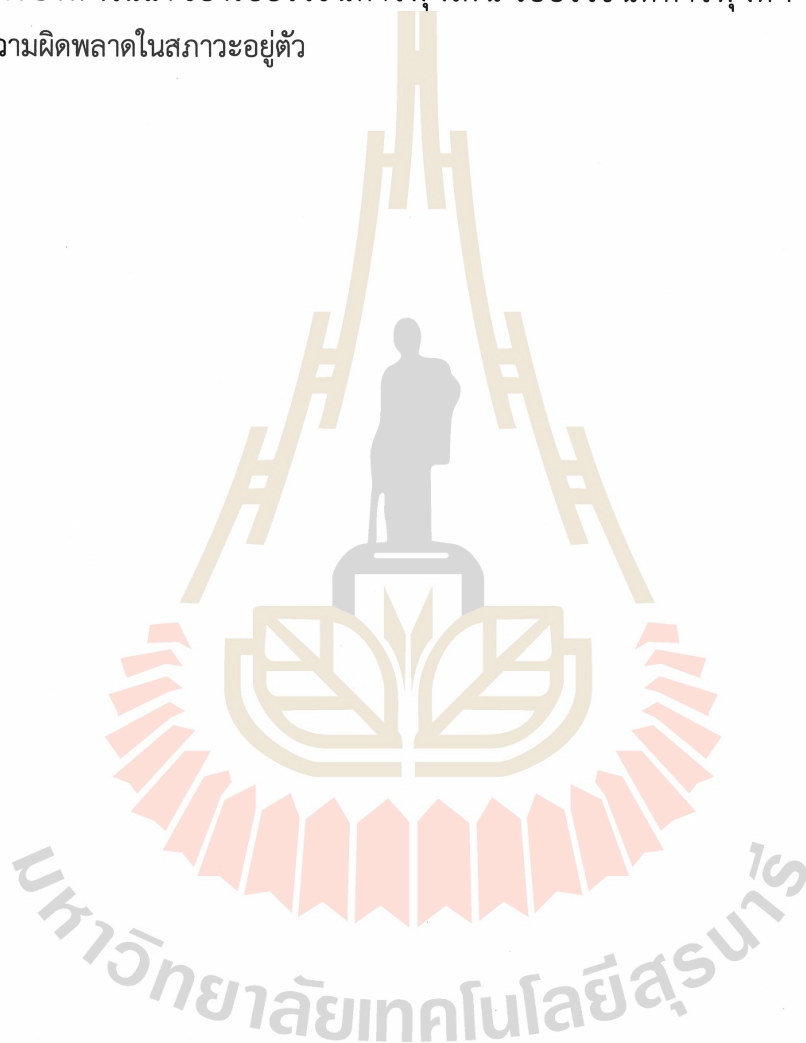
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อภิรักษ์ ศรีชนะ : การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว
ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่
(ADAPTIVE SLIDING MODE CONTROLLER DESIGN USING ADAPTIVE
TABU SEARCH METHOD FOR BATTERY ELECTRIC VEHICLE SYSTEM)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธุ์ อารักษ์, 186 หน้า.

คำสำคัญ: ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว วงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่
แบบสองทิศทาง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
การค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

ยานยนต์ไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่ายพลังงานหลักเป็นแบตเตอรี่จะมีวงจรแปลงผันกำลังทำหน้าที่
ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตีสี่บัสให้คงที่และควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดทั้งหมดของ
ระบบ ดังนั้นวงจรแปลงผันกำลังและระบบควบคุมจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับ
ระบบยานยนต์ไฟฟ้า เพราะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบโดยตรง ด้วยเหตุนี้
งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยวิธีการค้นหา
แบบตาบู่เชิงปรับตัวสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ ซึ่งระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะเป็น
วงจรแปลงผันกำลังตีสี่เป็นตีสี่ชนิดบuck-บูสต์แบบสองทิศทางที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตีสี่บัสด้วย
ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว โดยการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวได้เริ่มต้นจากการพิสูจน์หา
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อนำมาใช้ร่วมกับ
สมการพื้นผิวการเลื่อนที่กำหนดให้เป็นแบบการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะสำหรับการ
การพิสูจน์หาสมการสร้างสัญญาณควบคุม ซึ่งในเบื้องต้นค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน
จะถูกออกแบบโดยอาศัยวิธีการสุ่มค่า จากนั้นได้พัฒนาต่อยอดสู่การออกแบบตัวควบคุม
โหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ซึ่งผลที่ได้จากการการค้นหา
จะถูกนำไปใช้สำหรับการสร้างสมการของตัวควบคุมที่แปรเปลี่ยนค่าได้ตามค่าโหลดของระบบที่มี
การเปลี่ยนแปลงผ่านวิธีการปรับเส้นโค้ง เพื่อให้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าตีสี่บัสให้คงที่และ
มีผลตอบสนองเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2 ภายใต้เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าที่ค่าพิกัดถึงแม้
ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดจะมีการเปลี่ยนแปลง ผลการยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมที่ได้รับ
การออกแบบด้วยวิธีการที่นำเสนอ รวมถึงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมที่นำเสนอกับ
ตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียง ซึ่งเป็นตัวควบคุมพื้นฐานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และตัวควบคุม
โหมดการเลื่อนแบบดั้งเดิมด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม
MATLAB/SIMULINK และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่อาศัย

โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 แสดงให้เห็นและยืนยันได้ว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ซิปส์ให้คงที่ที่ 800 V และมีผลตอบสนองเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2 ได้ แม้ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดจะมีการเปลี่ยนแปลงไปจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าพิกัดของระบบ นอกจากนี้ตัวควบคุมที่นำเสนอยังให้ผลตอบสนองเชิงพลวัตของระบบที่ดีกว่าตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบดั้งเดิมและตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงทั้งในแง่ของเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน เปอร์เซ็นต์การพุ่งต่ำ ช่วงเวลาฟื้นตัว และค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว



สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2568

ลายมือชื่อนักศึกษา..... ณัฏฐ์ สิริพน

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ณัฏฐ์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... ณัฏฐ์ สิริพน

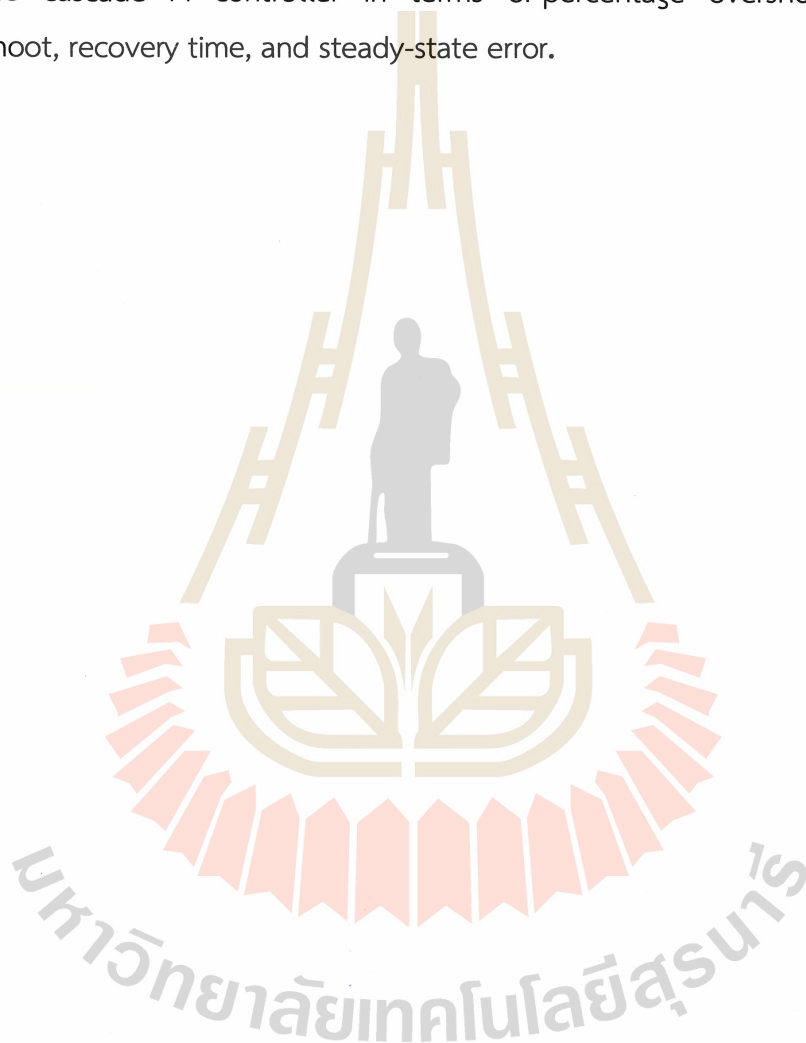
APHIRAK SRICHANA : ADAPTIVE SLIDING MODE CONTROLLER DESIGN USING
ADAPTIVE TABU SEARCH METHOD FOR BATTERY ELECTRIC VEHICLE SYSTEM.

THESIS ADVISOR : PROF. KONGPAN AREERAK, Ph.D., 186 PP.

Keyword: Battery electric vehicle/Adaptive sliding mode controller/Bidirectional
DC-DC converter/Constant power load (CPL)/Mathematical
model/Adaptive Tabu search method

Battery electric vehicles (BEVs) employ power converters to regulate the DC bus voltage and manage the power supplied to all loads within the system. Therefore, the power converter and its controller play a crucial role in electric vehicle systems, as they directly influence the overall system performance. For this reason, this thesis proposes the adaptive sliding mode controller design using adaptive tabu search method for a BEV system. The considered system is a bidirectional buck-boost DC-DC converter used to regulate the DC bus voltage through an adaptive sliding mode control scheme. The controller design begins with the derivation of the mathematical model of the system using the generalized state-space averaging (GSSA) method. This model is then used together with the sliding surface equation which is defined as a linear combination of the state variables to derive the control signal equation. Initially, the parameters of the sliding mode controller are designed using a trial-and-error approach. After that, the design is further developed into an adaptive sliding mode controller based on the adaptive tabu search method. The results obtained from the search process are used to construct a controller equation whose parameters can vary according to the system load through a curve fitting method. Therefore, the resulting controller can maintain a constant DC bus voltage and provide a dynamic response that satisfies the ISO 21498-1,2 standards even when the load power changes up to the rated power of the system. The performance of the proposed controller is evaluated and compared with that of a cascade PI controller, which is a widely used in practice, and a conventional sliding mode controller. The verification is conducted through computer simulations using MATLAB/SIMULINK and hardware-in-the-loop (HIL) simulations using MATLAB/SIMULINK together with

the eZdsp™ F28335 DSP board. The results demonstrate that the proposed adaptive sliding mode controller can maintain the DC bus voltage at 800 V and achieve responses that satisfy the ISO 21498-1,2 standards even when the load power varies up to the rated power of the system. Furthermore, the proposed controller provides better dynamic performance than the conventional sliding mode controller and the cascade PI controller in terms of percentage overshoot, percentage undershoot, recovery time, and steady-state error.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2025

Student's Signature..... ศศิวิทย์ ศิริชนะ

Advisor's Signature..... [Signature]

Co-Advisor's Signature..... อ.ดร. อรุณรัตน์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธุ์ อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.อภิชัย สุยะพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทาง อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย รวมทั้งยังได้สละเวลาเพื่อตรวจทานและแก้ไข รายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนกระทั่งมีความสมบูรณ์ อีกทั้งยังเป็นกำลังใจและแบบอย่างที่ดี ในการดำเนินชีวิตและการทำงานให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด

คณาจารย์ เลขานุการและผู้ช่วยสอนประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ การติดต่อประสานงาน และข้อคิดใน ด้านต่าง ๆ อย่างดียิ่งมาโดยตลอด

บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ อำนวยความสะดวกในการทำงาน การใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั้งขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษา ในกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกลและการควบคุมทุกท่านที่ให้คำปรึกษา ด้านวิชาการ ด้านการดำเนินชีวิต และคอยเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณครูและอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้าน ต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบ ให้แด่นายถวิล – นางศุภร ศรีชนะ บิดาและมารดาของผู้วิจัย รวมถึงครอบครัวของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอดจนทำให้ ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต

อภิรักษ์ ศรีชนะ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ(ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์	4
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัยวิทยานิพนธ์	5
1.5 สมมติฐานของงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	5
1.6 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.8 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	6
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 บทนำ.....	8

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า.....	8
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่ที่ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า	16
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว	20
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมที่ใช้กับวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่	23
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	29
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	33
2.8 สรุป	37
3 ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้า	39
3.1 บทนำ	39
3.2 ระบบยานยนต์ไฟฟ้าที่พิจารณา	39
3.2.1 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่ชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง.....	41
3.3 ทฤษฎีพื้นฐานของการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป	54
3.4 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่ ชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม	55
3.5 การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนของวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่ ชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง	65

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6 สรุป.....	73
4 การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบ เชิงปรับตัว	74
4.1 บทนำ	74
4.2 การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบเชิงปรับตัว	74
4.3 การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบ เชิงปรับตัว	84
4.4 การตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์ บนคอมพิวเตอร์	87
4.5 สรุป.....	93
5 การยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์ แบบฮาร์ดแวร์ในลูป	94
5.1 บทนำ	94
5.2 หลักการพื้นฐานของการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป.....	94
5.3 การยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วย การจำลอง สถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป	96
5.4 สรุป.....	105
6 สรุปและข้อเสนอแนะ	106
6.1 สรุป.....	106
6.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต	109

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง	110
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	118
ภาคผนวก ข. ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB.....	137
ภาคผนวก ค. การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ของค่าตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ที่มีผลต่อการตอบสนองของระบบ	140
ภาคผนวก ง. โปรแกรมการค้นหาพารามิเตอร์ m ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว...	148
ภาคผนวก จ. การออกแบบตัวควบคุมฟิโอบแบบต่อเรียงกันสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้า แบบเตอร์ที่พิจารณา.....	163
ภาคผนวก ฉ. ผลการทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ของ แต่ละช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่า P_{CPL}	166
ภาคผนวก ช. แสดงรายละเอียดขั้นตอนการเชื่อมโยงโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กับ บอร์ด eZdsp™ F28335.....	172
ภาคผนวก ซ. โปรแกรมตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่อัปโหลดลงบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 สำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป	182
ประวัติผู้เขียน	186

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า	9
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางที่ใช้ใน ระบบยานยนต์ไฟฟ้า ..	16
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว	21
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมที่ใช้กับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี	23
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง	30
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง	34
3.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา	63
3.2 ชุดพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน	71
4.1 ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ m ที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว	84
4.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ในกรณี ที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด	89
4.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ในกรณี ที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงโหลดเป็นแบบลาดเอียง	91
5.1 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปใน กรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด	102
5.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์ แบบฮาร์ดแวร์ในรูปใน กรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบลาดเอียง	104

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.1 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ให้เพิ่มขึ้นจากค่าอ้างอิง.....	147
ค.2 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ให้ลดลงจากค่าอ้างอิง.....	147
ฉ.1 การทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ช่วงปฏิบัติงานจาก $P_{CPL} = 5$ kW ไปเป็น 10 kW.....	167
ฉ.2 การทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ช่วงปฏิบัติงานจาก $P_{CPL} = 20$ kW ไปเป็น 30 kW	167
ฉ.3 การทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ช่วงปฏิบัติงานจาก $P_{CPL} = 40$ kW ไปเป็น 50 kW	168
ฉ.4 การทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ช่วงปฏิบัติงานจาก $P_{CPL} = 60$ kW ไปเป็น 70 kW	168
ฉ.5 การทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ช่วงปฏิบัติงานจาก $P_{CPL} = 70$ kW ไปเป็น 80 kW.....	168
ฉ.6 การทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ช่วงปฏิบัติงานจาก $P_{CPL} = 90$ kW ไปเป็น 100 kW	169
ฉ.7 การทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ช่วงปฏิบัติงานจาก $P_{CPL} = 140$ kW ไปเป็น 150 kW	169
ฉ.8 การทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ช่วงปฏิบัติงานจาก $P_{CPL} = 190$ kW ไปเป็น 200 kW	169
ฉ.9 การทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ช่วงปฏิบัติงานจาก $P_{CPL} = 240$ kW ไปเป็น 250 kW	170
ฉ.10 การทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ช่วงปฏิบัติงานจาก $P_{CPL} = 280$ kW ไปเป็น 285 kW.....	170
ฉ.11 ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ m ที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว.....	170

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	สถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด..... 12
2.2	สถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบเสริม..... 13
2.3	สถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่..... 13
2.4	สถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง..... 14
2.5	แผนภาพแสดงประเภทของสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า..... 15
2.6	สถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มีการใช้งานแรงดันไฟฟ้าดีซีบัส 800 V..... 15
2.7	วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง..... 19
2.8	แผนภาพตัวควบคุมที่ใช้กับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี..... 28
3.1	ระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่พิจารณา..... 40
3.2	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์..... 41
3.3	การประมาณการกระแสเพื่อขนาดเล็ก..... 42
3.4	วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน..... 45
3.5	วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง กรณีที่ $S1$ “ON” และ $S2$ “OFF”. 45
3.6	วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง กรณีที่ $S1$ “OFF” และ $S2$ “ON” ... 47
3.7	กราฟ $i_L(t)$ ของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง..... 49
3.8	กราฟ $v_{C_o}(t)$ ของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง..... 50
3.9	กราฟการทำงานของ $i_{C_i}(t)$ ของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง..... 51
3.10	กราฟ $i_{C_i}(t)$ ของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง..... 52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม	56
3.12 วงจรที่พิจารณา กรณีที่สวิตช์ $S1$ “ON” และ $S2$ “OFF”	57
3.13 วงจรที่พิจารณา กรณีที่สวิตช์ $S1$ “OFF” และ $S2$ “ON”	58
3.14 ฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง.....	60
3.15 ผลตอบสนองของระบบกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม	64
3.16 หลักการทำงานของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน	65
3.17 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ a	69
3.18 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ b	70
3.19 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ m	70
3.20 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ K	71
3.21 ผลการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน	72
4.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อใช้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว	75
4.2 แผนภาพการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว	75
4.3 สุ่มค่า S_0 ในขอบเขตการค้นหา	77
4.4 การสุ่มเลือกคำตอบรอบ ๆ S_0	77
4.5 สุ่มค่ารอบ ๆ S_0 ที่เป็นคำตอบของชุดคำตอบของ $S_1(r)$	79
4.6 ตัวอย่างผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะ	80
4.7 กำหนดให้ $best_neighbor = best_neighbor1$	80
4.8 กำหนดค่า $S_0 = best_neighbor$	81
4.9 กระบวนการค้นหาในรอบถัดไป	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 กลไกการเดินย่อนรอย.....	82
4.11 การปรับลดคาร์ซีมี.....	82
4.12 การลู่เข้าของค่า w	83
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P_{CPL} และค่าพารามิเตอร์ m	85
4.14 การสร้างสมการของพารามิเตอร์ m ที่ปรับตัวได้ในช่วง $P_{CPL} \leq 70 \text{ kW}$	86
4.15 การสร้างสมการของพารามิเตอร์ m ที่ปรับตัวได้ในช่วง $70 \text{ kW} < P_{CPL} \leq 285 \text{ kW}$	86
4.16 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด.....	88
4.17 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบลาดเอียง.....	90
4.18 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด เมื่อกำหนดให้ $V_{BATT} = 630 \text{ V}$	92
5.1 แผนภาพการเชื่อมต่อโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335.....	95
5.2 บล็อก RTDX Read และ RTDX Write.....	95
5.3 การยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์แบบ ฮาร์ดแวร์ในลูป.....	97
5.4 การเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ระหว่างโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335.....	98
5.5 ความเร็วในการประมวลผลชุดคำสั่งตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว.....	99
5.6 ผลการยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยการจำลอง สถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเมื่อเปรียบเทียบกับ การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK.....	101

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.7 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ชั้บจากการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป	101
5.8 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ชั้บที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดเป็นแบบลาดเอียง	103
ข.1 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้า ที่พิจารณากรณีไม่มีตัวควบคุม	138
ข.2 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณากรณีมีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน	138
ข.3 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณากรณีมีตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว	139
ค.1 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ a เมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดจาก 10 kW ไปเป็น 20 kW .	142
ค.2 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ b เมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดจาก 10 kW ไปเป็น 20 kW .	143
ค.3 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ m เมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดจาก 10 kW ไปเป็น 20 kW	144
ค.4 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ K เมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดจาก 10 kW ไปเป็น 20 kW.	144
ค.5 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ a เมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดจาก 20 kW ไปเป็น 30 kW .	145
ค.6 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ b เมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดจาก 20 kW ไปเป็น 30 kW .	145
ค.7 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ m เมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดจาก 20 kW ไปเป็น 30 kW	146
ค.8 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ K เมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดจาก 20 kW ไปเป็น 30 kW	146
จ.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อใช้ตัวควบคุมพีโอแบบต่อเรียงกัน	164
ข.1 ซอฟต์แวร์ MATLAB และโปรแกรม CCStudio v3.3	173
ข.2 การตั้งค่าโปรแกรม Code Composer Studio Setup	173

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ช.3 หน้าต่างซอฟต์แวร์ MATLAB และโปรแกรม CCStudio v3.3.....	174
ช.4 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป.....	175
ช.5 การกำหนดค่าพารามิเตอร์บล็อกอินพุต RTDX Write.....	176
ช.6 การกำหนดค่าพารามิเตอร์บล็อกเอาต์พุต RTDX Read.....	176
ช.7 โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปบนโปรแกรม CCStudio v3.3.....	177
ช.8 การกำหนดค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของบอร์ด DSP รุ่น eZdsp TM F28335.....	179
ช.9 การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป.....	180
ช.10 การกำหนดชื่อที่อยู่ของไฟล์โปรเจกต์.....	181

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศนับเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และคุณภาพชีวิตของมนุษย์ในวงกว้าง โดยหนึ่งในสาเหตุหลักคือ การเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศ ซึ่งเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลในภาคการขนส่งที่มีส่วนสำคัญในการเร่งให้เกิดภาวะโลกร้อน (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2565) ดังนั้นแผนพัฒนาเศรษฐกิจและยุทธศาสตร์พลังงานของหลายประเทศจึงได้กำหนดแนวทางส่งเสริมการใชยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicles: EVs) โดยมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับยานยนต์แบบสันดาปคือ การปลดปล่อยมลพิษเป็นศูนย์ขณะใช้งาน และสามารถใช้งานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนได้ (International Energy Agency, 2022) ซึ่งเป็นแนวทางที่สอดคล้องกับเป้าหมายด้านสิ่งแวดล้อมและเป็นการยกระดับความสามารถในภาคการขนส่งได้อีกด้วย

ในปัจจุบันสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ (battery electric vehicles: BEV) ซึ่งจะใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวในการขับเคลื่อนระบบต่าง ๆ ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทนี้มีข้อดีคือ ไม่มีการปลดปล่อยมลพิษ มีประสิทธิภาพด้านพลังงาน อย่างไรก็ตามจะมีต้นทุนแบตเตอรี่ที่สูงและมีความท้าทายด้านการจัดการแบตเตอรี่และอายุการใช้งาน ยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด (hybrid electric vehicle: HEV) จะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีต้นกำลังคือ เครื่องยนต์สันดาปร่วมกับการใช้แบตเตอรี่ในการกักเก็บพลังงานที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทนี้จะไม่มีการสะสมพลังงานไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่จากการชาร์จจากภายนอก ด้วยเหตุนี้จึงมีการปลดปล่อยมลพิษเล็กน้อยขณะใช้งาน ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบเสริม (plug-in hybrid electric vehicle: PHEV) ซึ่งจะมีการใช้งานเครื่องยนต์สันดาปร่วมกับแบตเตอรี่เช่นเดียวกับแบบไฮบริด แต่จะมีการสะสมพลังงานไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่โดยการชาร์จจากภายนอกด้วย ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทนี้มีข้อดีคือ มีการปลดปล่อยมลพิษน้อยลงและใช้แหล่งพลังงานได้หลายรูปแบบ

แต่จำเป็นต้องมีระบบควบคุมแหล่งพลังงานหลายรูปแบบ ซึ่งมีความซับซ้อนและความท้าทายด้านการจัดการพลังงานและการเพิ่มประสิทธิภาพ และยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Electric Vehicles: FCEVs) ซึ่งใช้เซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า โดยเซลล์เชื้อเพลิงจะสร้างพลังงานผ่านปฏิกิริยาเคมีระหว่างไฮโดรเจนและออกซิเจน ส่งผลให้มีการปลดปล่อยมลพิษในระดับต่ำมาก แต่อย่างไรก็ตามยานยนต์ไฟฟ้าประเภทนี้ยังไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากในปัจจุบันยังไม่มีสถานีเติมไฮโดรเจนที่เพียงพอ (Dermot Byrne, 2017; S. J. Rind, Y. Ren, Y. Hu, J. Wang and L. Jiang, 2017; S. Chakrabort, Hai-Nam Vu, M. M. Hasan, Dai-Duong Tran, M. El Baghdadi, O. Hegazy, 2019; M. Ehsani, K. V. Singh, H. O. Bansal and R. T. Mehrjardi, 2021) ดังนั้นจากที่กล่าวมาจึงทำให้ยานยนต์ไฟฟ้าพลังงานแบตเตอรี่เป็นสถาปัตยกรรมที่ได้รับความสนใจและพัฒนา ซึ่งในสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าประเภทนี้จะมีส่วนประกอบหลักเป็นวงจรแปลงผันกำลัง (J. Reimers, L. Dorn-Gomba, C. Mak, A. Emadi, 2019; R. Islam, S. M. S. H. Rafin and O. A. Mohammed, 2023) ที่ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่ตามที่ต้องการ รวมถึงทำหน้าที่ในการจัดการและควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไปยังโหลดทั้งหมดของระบบ สำหรับการทำงานของยานยนต์ไฟฟ้าจะมีอยู่ 2 โหมด ได้แก่ โหมดขับเคลื่อน (driving mode) และโหมดแปลงผันพลังงานสูญเสียขณะห้ามล้อ (regenerative break mode) ดังนั้นวงจรแปลงผันกำลังที่สามารถส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้สองทิศทางจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง โดยวงจรที่น่าสนใจ คือ วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง (buck-boost bidirectional dc-dc converter) เนื่องจากมีข้อดีคือ มีช่วงแรงดันขาเข้าที่กว้าง ง่ายต่อการควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัส มีประสิทธิภาพสูง และสามารถออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัด ซึ่งทำให้ยานยนต์ไฟฟ้ามีน้ำหนักที่เบาลงได้ (S. A. Gorji, H. G. Sahebi, M. Ektesab, and A. B. Rad, 2019; Q. Xu, N. Vafamand, L. Chen, T. Dragicevic, L. Xie and F. Blaabjerg, 2021; L. R. Silva, M. P. Cavaleiro, F. G. Nimitti and A. M. S. S. Andrade, 2024; P. Muthugumar, M. Venkateshkumar, C. S. CHIN, 2024) โดยสถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบันและอนาคตจะมีการใช้แรงดันไฟฟ้าดีซีบัสอยู่ที่ 800 V (A. Poorfakhraei, M. Narimani, A. Emadi, 2021; A. Hern, M. Truntic and F. Mihalic, 2023) ดังนั้นเพื่อให้วงจรแปลงผันกำลังสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่และส่งจ่ายกำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ซึ่งโดยปกติตัวควบคุมที่นิยมใช้จะเป็นตัวควบคุมพีไอ (proportional-integral (PI) controller) เนื่องจากเป็นตัวควบคุมพื้นฐาน

ที่ออกแบบได้ง่าย และสามารถลดความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (steady state error) ได้ แต่มีข้อเสียคือ บางครั้งให้ผลตอบสนองเชิงพลวัต (dynamic response) ที่ช้า และไม่มีความคงทนต่อสัญญาณรบกวนหรือการเปลี่ยนแปลงของระบบ (S. Mohanty, A. Choudhury, S. Pati, Sanjeeb K. Kar and S. Khatua, 2021; A. Suyapan, S. Daengdon and K-N. Areerak, 2024) ในขณะที่ตัวควบคุมอื่น ๆ เช่น ตัวควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส (hysteresis controller) ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก (fuzzy logic controller) ตัวควบคุมแบบทำนายเชิงแบบจำลอง (model predictive controller) ตัวควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียม (neural network controller) ก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป (Q. Xu, N. Vafamand, L. Chen, T. Dragicevic, L. Xie and F. Blaabjerg, 2021; S. Kalson, and S. R. Kar, 2022; P. Muthukumar, M. Venkateshkumar, and C. S. Chin, 2024) โดยหนึ่งในตัวควบคุมที่ได้รับความนิยมคือ ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (sliding mode controller: SMC) เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่สามารถใช้ได้กับทั้งระบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ให้ผลตอบสนองเชิงพลวัตที่รวดเร็ว ส่งผลให้ระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ไว นอกจากนี้ยังมีความคงทน (robustness) ที่ทำให้ยังคงสมรรถนะการควบคุมได้แม้จะมีสัญญาณภายนอกมารบกวนหรือพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลง (M. Bensaada, A. B. Stambouli, M. Bekhti, S. D. Krachai, L. Boukhris, A. Bellar, M. A. Mebrek, and B. Nasri, 2012; S. Chonsatidjamroen, 2013; Z. Farooq, T. Zaman, M. A. Khan, Nasimullah, S. M. Muyeen, and A. Ibeas, 2019; Kanthi M. K. and D. M. Abraham, 2020; Q. Xu, N. Vafamand, L. Chen, T. Dragicevic, L. Xie and F. Blaabjerg, 2021; E. Malev, 2021; L. Wu, J. Liu, S. Vazquez and S. K. Mazumder, 2022; F. Noor, K. Zeb, S. Ullah, Z. Ullah, M. Khalid and A. Al-Durra, 2024; P. Muthugumar, M. Venkateshkumar, C. S. CHIN, 2024; T. Mao, L. Li, and Y. Cao, 2024) แต่อย่างไรก็ตามตัวควบคุมโหมดการเลื่อนไม่มีวิธีการทั่วไปในการออกแบบ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ โดยการออกแบบจะอาศัยสมการพื้นผิวการเลื่อน (sliding surface equation) เป็นแบบการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะ เนื่องจากมีความง่ายในการออกแบบและการนำไปใช้งานจริงในทางปฏิบัติ (สาธิต ชลสถิตจำเริญ. 2556; A. Suyapan, S. Daengdon and K-N. Areerak, 2024) และการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะเริ่มต้นด้วยวิธีการสุ่มค่า (trial-and-error) จากนั้นจะนำเสนอการต่อยอดพัฒนาไปสู่การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว (adaptive sliding mode controller : ASMC) ด้วย

วิธีทางปัญญาประดิษฐ์คือ วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว เพื่อให้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้มีค่าคงที่ตามที่ต้องการ อีกทั้งมีสมรรถนะของผลตอบสนองของระบบในแง่ของช่วงเวลาฟื้นตัว (recovery time) เปอร์เซ็นต์การพุ่งต่ำ (percent undershoot) และเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (percent overshoot) ที่ดี และเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2 ได้จนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าถึงแม้โหลดของระบบจะมีการเปลี่ยนแปลง โดยการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/ SIMULINK และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware in the Loop: HIL) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 เพื่อเป็นการยืนยันว่าวิธีการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอสามารถนำไปใช้งานจริงได้ในทางปฏิบัติ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับสถาปัตยกรรมของระบบยานยนต์ไฟฟ้า
- 1.2.2 เพื่อศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้า
- 1.2.3 เพื่อพัฒนาแนวทางการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

- 1.3.1 ระบบยานยนต์ไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัก-บูสต์แบบสองทิศทางที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว ซึ่งจะพิจารณาในโหมดขับเคลื่อนเท่านั้น
- 1.3.2 แบตเตอรี่จะถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และชุดขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าจะถูกแทนด้วยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ
- 1.3.3 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป และอาศัยการประมาณค่าอันดับศูนย์
- 1.3.4 การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าจะอยู่ในโหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง (continuous conduction mode, CCM)
- 1.3.5 การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะอาศัยวิธีการสุ่มค่า

1.3.6 การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะอาศัยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

1.3.7 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วย SimPowerSystem™ บน SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB เท่านั้น

1.3.8 การยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB /SIMULINK และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปบนโปรแกรม MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 เท่านั้น

1.4 ขอบเขตของการวิจัยวิทยานิพนธ์

1.4.1 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะกำหนดให้มีค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง 800 V และต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2

1.4.2 การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะพิจารณาภายใต้เงื่อนไขที่ค่าพิกัด 285 kW เท่านั้น

1.5 สมมติฐานของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิด บัค-บูสต์แบบสองทิศทางสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบบเตอรี สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่ที่ 800 V และมีผลตอบสนองเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2 ตลอดการทำงานจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ ซึ่งสามารถยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป

1.6 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

ส่วนใหญ่ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจะออกแบบโดยการสุ่มค่าและมีพารามิเตอร์เพียงแค่ชุดเดียว ซึ่งทำให้ไม่สามารถควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสของระบบยานยนต์ไฟฟ้าให้เป็นไปตามมาตรฐานได้ตลอดการทำงาน ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์สำหรับควบคุมวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง ซึ่งหลังจากนำตัวควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มาใช้กับระบบยานยนต์ไฟฟ้าพบว่า แรงดันไฟฟ้าดีซีบัสสามารถควบคุมให้มีค่าคงที่ตามที่ต้องการและอยู่ภายใต้มาตรฐาน ISO 21498-1,2 นอกจากนี้ตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

ที่ได้รับการนำเสนอสามารถให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสได้ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการสุ่มค่าแบบดั้งเดิม โดยผลการศึกษาจะได้รับการยืนยันด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันยังไม่มีงานวิจัยที่ตีพิมพ์ เผยแพร่ใด ๆ ดำเนินการในลักษณะนี้มาก่อน

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับสถาปัตยกรรมของระบบยานยนต์ไฟฟ้า

1.7.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้า

1.7.3 ได้แนวทางการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

1.8 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท แต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย สมมติฐานและจุดเด่น รวมถึงประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ตัวควบคุมที่ใช้กับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง รวมถึงการสรุปองค์ความรู้ที่ได้ของแต่ละส่วนเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการทำวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 3 นำเสนอระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่พิจารณา ซึ่งประกอบด้วยวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนและมีโหลดเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ พร้อมทั้งนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่อาศัยสมการพื้นผิวการเลื่อนร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ โดยการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะอาศัยการสุ่มค่า ซึ่งการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณาด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปและการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง รวมถึงการพิสูจน์หาสมการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางจะได้รับการนำเสนอไว้ในส่วนที่เหมาะสมของบทด้วย

และเนื้อหาในส่วนสุดท้ายจะเป็นการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ พร้อมทั้งการสรุปที่แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจำเป็นต้องได้รับการพัฒนาต่อเพื่อให้สามารถปรับตัวได้ ซึ่งจะได้รับการนำเสนอไว้ในบทถัดไป

บทที่ 4 นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่อาศัยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์คือ วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ซึ่งผลการค้นหาที่ได้จะถูกนำมาใช้ในการสร้างสมการของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตามโหลดของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลง เพื่อให้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสได้ตลอดย่านการทำงานจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า โดยการสร้างสมการดังกล่าวจะอาศัยวิธีการปรับเส้นโค้ง (curve fitting method) พร้อมทั้งนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เพื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสระหว่างตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่นำเสนอทั้งในแง่ของผลตอบสนองเชิงพลวัตและค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว

บทที่ 5 นำเสนอการยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว รวมถึงผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสระหว่างตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป ซึ่งเนื้อหาในตอนต้นของบทจะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของฮาร์ดแวร์ในลูปที่อาศัยการทำงานร่วมกันของโปรแกรม MATLAB และบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ด้วย

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงผลสรุปของการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งนำเสนอข้อเสนอแนะเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ภาคผนวกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มี 6 ส่วน คือ ภาคผนวก ก. แสดงรายการบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา ภาคผนวก ข. แสดงรายละเอียดชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ภาคผนวก ค. แสดงรายละเอียดโปรแกรมการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ภาคผนวก ง. แสดงตารางผลการทดสอบการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ภาคผนวก จ. แสดงรายละเอียดขั้นตอนการเชื่อมต่อโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ภาคผนวก ฉ. แสดงรายละเอียดโปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าดิซีบัส (DC bus voltage) และควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ ดังนั้นในบทที่ 2 จึงนำเสนอการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยแบ่งออกเป็น 6 หัวข้อ ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซีที่ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมที่ใช้กับวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซีและการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พร้อมทั้งสรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งในแต่ละหัวข้อได้นำเสนอโดยเรียงตามลำดับปีที่ตีพิมพ์ รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า

ในปัจจุบันยานยนต์ไฟฟ้าเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นยานพาหนะที่สามารถช่วยลดก๊าซเรือนกระจกและมลพิษทางอากาศ เนื่องจากไม่ต้องพึ่งพาการใช้พลังงานฟอสซิล อีกทั้งยังสามารถใช้ร่วมกับแหล่งพลังงานหมุนเวียนได้ อย่างไรก็ตามสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้ามีทั้งหมด 4 รูปแบบ แต่ละรูปแบบมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเป็นการนำเสนอการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อศึกษาและมุ่งเน้นไปยังสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าที่จะได้รับการพัฒนาและต่อยอดใช้งานในอนาคตและถูกเลือกให้เป็นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2017	D. Byrne	บทความนี้นำเสนอองค์ประกอบต่าง ๆ ในสถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้า พร้อมทั้งอธิบายรายละเอียดในแต่ละองค์ประกอบ ซึ่งองค์ประกอบหลักของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ ได้แก่ แบตเตอรี่ วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง และชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า
2017	S. J. Rind, Y. Ren, Y. Hu, J. Wang, and L. Jiang	บทความนี้นำเสนอการทบทวนสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่และยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด โดยแบ่งโครงสร้างระบบขับเคลื่อนหลักออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ แบบอนุกรมแบบขนาน และแบบผสม ซึ่งแต่ละแบบมีข้อดีและข้อจำกัดที่ต่างกันในด้านประสิทธิภาพ ความซับซ้อน และต้นทุน ซึ่งยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่มีโครงสร้างที่เรียบง่ายและในปัจจุบันแบตเตอรี่มีอายุใช้งานที่นานยิ่งขึ้น จึงทำให้ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น
2019	J. Reimers, L. Dorn-Gomba, C. Mak, and A. Emadi	บทความนี้เสนอมาตรฐานของอินเวอร์เตอร์ทอพอโลยี (topology) ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ซึ่งมีอยู่ 2 แบบคือ แบบที่มีวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี และแบบที่ไม่มีวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี ซึ่งแบบที่มีวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีมีข้อดี คือ สามารถยกระดับแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่และควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสได้ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดทั้งหมดของระบบได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2019	S. Chakraborty, H. N. Vu, M.M. Hasan, D. D. Tran, M. E. Baghdadi, and O. Hegazy	บทความนี้นำเสนอข้อดีและข้อเสียของสถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้าที่มีวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ดีซีบัลลิ่งอีกทั้งนำเสนอวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า พร้อมทั้งข้อดีและข้อเสียของแต่ละวงจร ซึ่งวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีในระบบยานยนต์ไฟฟ้ามีหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัลลิ่งและควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดทั้งหมดของระบบ
2021	A. Poorfahraei, M. Narimani and A. Emadi	บทความนี้แนะนำการใช้งานแรงดันไฟฟ้าดีซีบัลลิ่งของยานยนต์ไฟฟ้าในแต่ละรุ่น ข้อดีและข้อเสียที่มีต่อระบบยานยนต์ไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแรงดันดีซีบัลลิ่งจาก 400 V เป็น 800 V ซึ่งการใช้งานแรงดันไฟฟ้าดีซีบัลลิ่งที่ 800 V ทำให้สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้รวดเร็วขึ้น สายไฟมีขนาดเล็กลงและน้ำหนักเบาลง รวมถึงการสูญเสียพลังงานในระบบก็น้อยลงด้วย
2021	M. Ehsani, K. V. Singh, H. O. Bansal, and R. T. Mehrjardi	บทความนี้แนะนำระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่และยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด พร้อมทั้งนำเสนอข้อดีและข้อเสียของสถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้าในแต่ละประเภท ซึ่งยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่มีโครงสร้างที่เรียบง่าย มีประสิทธิภาพสูงและในปัจจุบันเทคโนโลยีมีความพร้อมในเชิงพาณิชย์มากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า (ต่อ)

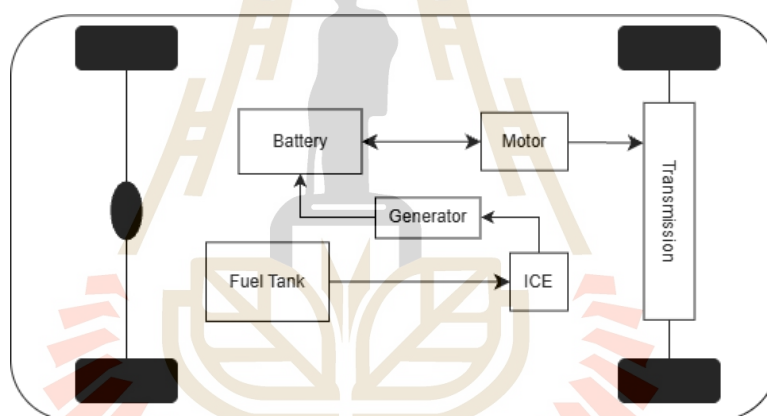
ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2023	A. Hren, M. Truntic, and F. Mihalic	บทความนี้นำเสนอแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่และแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสของยานยนต์ไฟฟ้าในแต่ละรุ่น ข้อดีและข้อเสียที่มีต่อระบบยานยนต์ไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสจาก 400 V เป็น 800 V ซึ่งระบบที่ใช้แรงดันไฟฟ้าดีซีบัส 800 V ทำให้สามารถชาร์จได้รวดเร็วขึ้น ลดน้ำหนักและขนาดของสายไฟได้อีกทั้งยังลดการสูญเสียพลังงาน ส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น
2023	S M S. H. Rafin, R. Islam, and O. A. Mohammed	บทความนี้นำเสนอองค์ประกอบหลักของระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ระบบกักเก็บพลังงานที่นิยมใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแรงดันสูงเชื่อมต่อกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยวงจรเรียงกระแส สำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางเพื่อยกระดับแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสและอินเวอร์เตอร์สำหรับการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าพบว่า สถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้ามีทั้งหมด 4 รูปแบบ ได้แก่ ยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด (hybrid electric vehicles: HEVs) ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบเสริม (plug-in hybrid electric vehicles: PHEVs) ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ (battery electric vehicles: BEVs) และยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Electric Vehicles: FCEVs) ซึ่งแต่ละสถาปัตยกรรมมีโครงสร้างระบบพลังงานที่แตกต่างกัน ทั้งในด้านแหล่งจ่ายพลังงาน

การจัดการพลังงาน การแปลงพลังงานไฟฟ้า และระบบส่งกำลัง ดังนั้นจึงส่งผลให้มีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน เช่น ระยะทางการขับขี่ ความซับซ้อนของระบบ น้ำหนัก และค่าใช้จ่ายในการผลิตและบำรุงรักษา โดยรายละเอียดของสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าในแต่ละรูปแบบแสดงได้ดังต่อไปนี้

1) ยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด

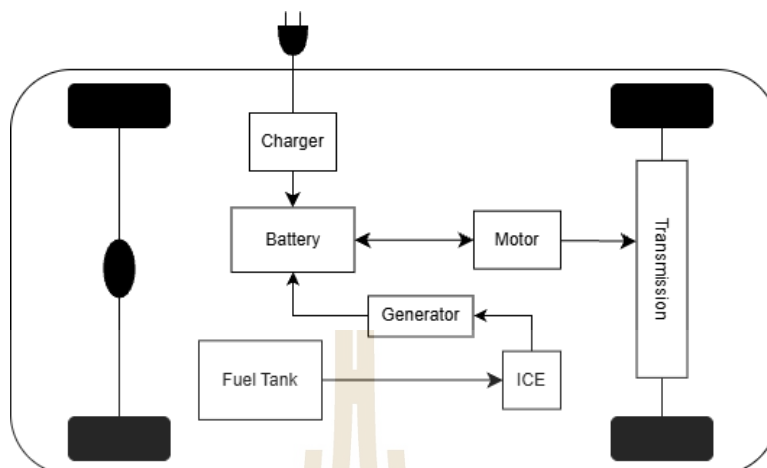
ยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริดจะมีแหล่งพลังงานตั้งแต่ 2 แหล่งขึ้นไป โดยมีเครื่องยนต์แบบสันดาปเป็นแหล่งพลังงานหลัก ในขณะที่แบตเตอรี่และมอเตอร์ไฟฟ้าจะเป็นพลังงานเสริมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงและตอบสนองต่อความต้องการกำลังสูง ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทนี้จะไม่มีการสะสมพลังงานไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่โดยการชาร์จจากภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แต่การห้ามล้อของมอเตอร์ไฟฟ้ายังสามารถแปลงผันพลังงานสูญเสียให้เป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ได้ ซึ่งการทำงานของยานยนต์ไฟฟ้าประเภทนี้ต้องมีการควบคุมและจัดการพลังงานที่ซับซ้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ



รูปที่ 2.1 สถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด

2) ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบเสริม

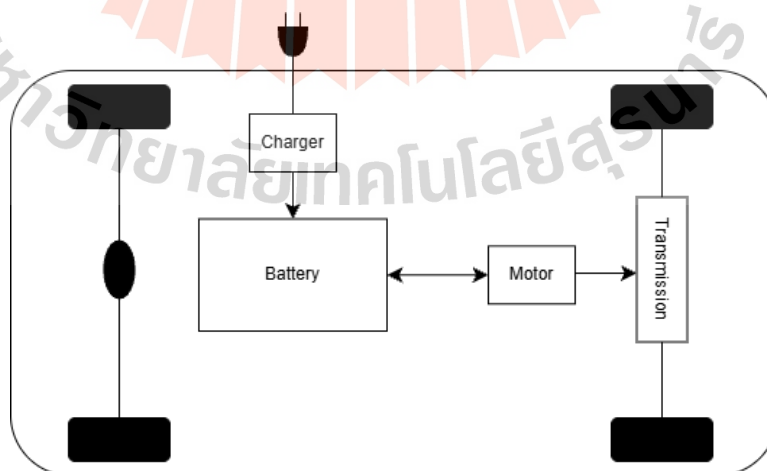
ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบเสริมเป็นยานยนต์ที่มีการใช้งานเครื่องยนต์สันดาปร่วมกับแบตเตอรี่เช่นเดียวกับยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด แต่มีการพัฒนาให้สามารถสะสมพลังงานไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่โดยการชาร์จจากภายนอก ดังสถาปัตยกรรมที่แสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งทำให้มีระยะทางวิ่งได้ไกลมากขึ้น เนื่องจากสามารถสลับใช้พลังงานจากทั้งแบตเตอรี่และเชื้อเพลิงได้ อีกทั้งยังสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากกว่ารถยนต์สันดาปทั่วไป อย่างไรก็ตามระบบโดยรวมของยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบเสริมจะมีความซับซ้อนมากเนื่องจากต้องมีการควบคุมและจัดการพลังงานจากหลายแหล่งจ่าย



รูปที่ 2.2 สถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบเสริม

3) ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่

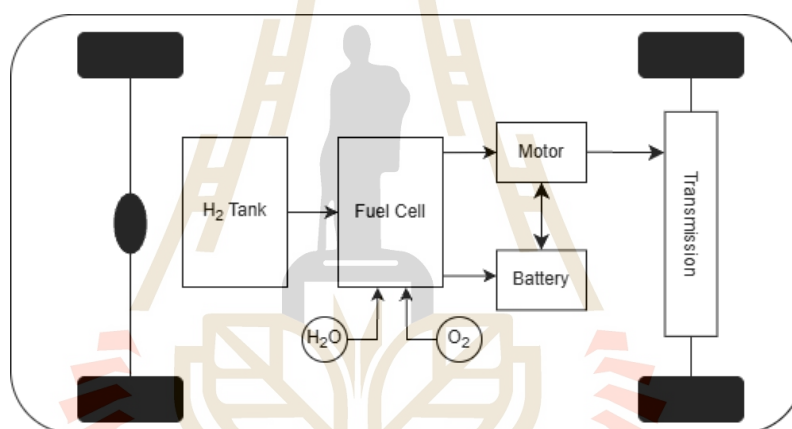
ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่เป็นยานยนต์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว ในการขับเคลื่อนระบบต่าง ๆ โดยสามารถสะสมพลังงานไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่โดยการชาร์จ ซึ่งสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 จากรูปจะพบว่า โครงสร้างของระบบมีความเรียบง่ายเนื่องจากไม่ต้องใช้ระบบส่งกำลังเชิงกลที่ซับซ้อน ส่งผลให้สามารถควบคุมระบบ และจัดการพลังงานได้ง่ายกว่ายานยนต์ไฟฟ้ารูปแบบอื่น ในปัจจุบันเทคโนโลยีแบตเตอรี่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทำให้มีความหนาแน่นพลังงานสูงขึ้นและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นและมีต้นทุนลดลง ส่งผลให้ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังไม่มีมลพิษจากเครื่องยนต์ และยังสามารถชาร์จแบตเตอรี่จากการห้ามล้อของมอเตอร์ไฟฟ้าที่สามารถแปลงผันพลังงานสูญเสียให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.3 สถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่

4) ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง

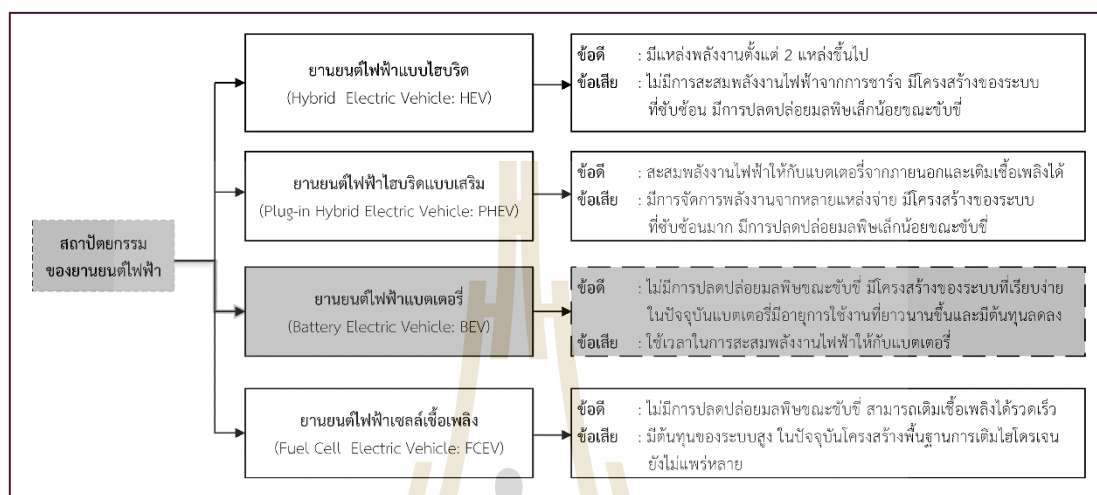
ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงเป็นยานยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีสถาปัตยกรรมดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยเซลล์เชื้อเพลิงจะสร้างกระแสไฟฟ้าผ่านปฏิกิริยาเคมีระหว่างไฮโดรเจนและออกซิเจน ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทนี้มีระบบแหล่งจ่ายพลังงานที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับแบตเตอรี่หรือตัวเก็บประจุแบบยิ่งยวด (supercapacitor) จึงทำให้มีประสิทธิภาพสูง มีระยะทางวิ่งไกลและสามารถเติมเชื้อเพลิงได้รวดเร็ว อีกทั้งยังมีความหนาแน่นของพลังงานสูงกว่ายานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว ดังนั้นยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงจึงถือเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจในอนาคต อย่างไรก็ตามข้อเสียคือ มีต้นทุนของระบบสูง เนื่องจากวัสดุของเซลล์เชื้อเพลิงมีราคาสูง อีกทั้งยังมีข้อจำกัดด้านโครงสร้างพื้นฐานการเติมไฮโดรเจนที่ยังไม่แพร่หลายในปัจจุบัน



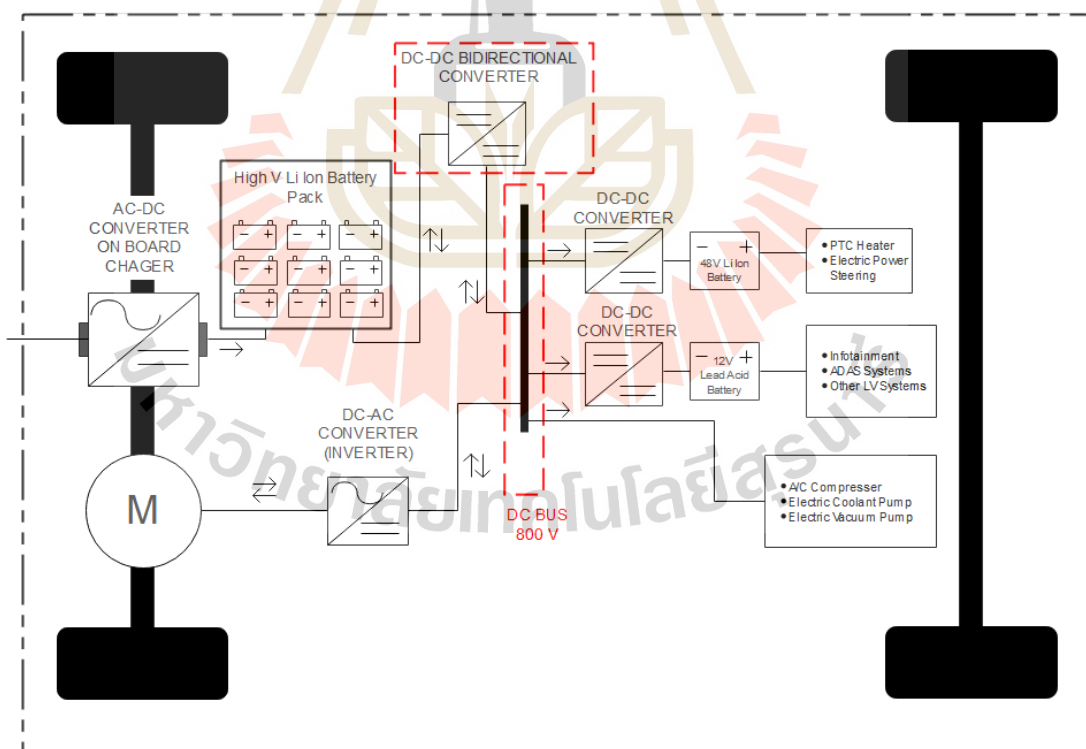
รูปที่ 2.4 สถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง

จากรายละเอียดสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปเป็นแผนภาพของสถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นศึกษาสถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ดังที่แสดงด้วยพื้นที่สีเทาในรูปที่ 2.5 เนื่องจากยานยนต์ไฟฟ้างกล่าวได้รับการต่อยอดพัฒนาและเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบันและอนาคต ประกอบกับการพัฒนาเทคโนโลยีแบตเตอรี่อย่างต่อเนื่องทำให้มีความหนาแน่นของพลังงานที่สูงขึ้น มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นและมีต้นทุนลดลง โดยสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ในปัจจุบันและอนาคตจะใช้งานแรงดันไฟฟ้าดีซีบัส 800 V ซึ่งมีข้อดีคือ การส่งพลังงานมีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากกระแสไฟฟ้าลดลง ส่งผลให้สามารถลดขนาดของสายไฟฟ้า ซึ่งทำให้ยานยนต์ไฟฟ้ามีน้ำหนักเบาและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ อีกทั้งเมื่อแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเพิ่มขึ้นจะสามารถทำให้

เพิ่มกำลังไฟฟ้าในการชาร์จ ซึ่งส่งผลให้ชาร์จเร็วขึ้นได้ ดังนั้นจึงทำให้สามารถใช้งานได้สะดวกและมีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงประเภทของสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า



รูปที่ 2.6 สถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มีการใช้งานแรงดันไฟฟ้าดีซีบัส 800 V

สำหรับสถาปัตยกรรมภายในของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มีการใช้แรงดันดีซีบัส 800 V แสดงได้ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งจากรูปจะพบว่า วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางเป็นองค์ประกอบสำคัญในสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้างกล่าว ดังแสดงด้วยพื้นที่ในกรอบสีแดง ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่ที่ 800 V และทำหน้าที่ควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดต่าง ๆ ของระบบ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางที่ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งจะนำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีที่ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า

วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีที่ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้าจำเป็นต้องมีความสามารถที่ยอมให้ทิศทางกระแสของกระแสสองทางกลับไปได้ เนื่องจากในโหมดขับเคลื่อนกำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจ่ายจากแบตเตอรี่ไปยังโหลดต่าง ๆ ของระบบ ในขณะที่โหมดแปลงผันพลังงานสูญเสียขณะห้ามล้อจะต้องมีการจ่ายพลังงานกลับมากสำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ ซึ่งวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางมีอยู่อย่างมากมาย ดังนั้นการศึกษาข้อดีและข้อเสียของแต่ละวงจรแปลงผันดังกล่าวในแต่ละชนิดจะเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีที่ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้ามีรายละเอียดแสดงได้ดังตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางที่ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2014	M. S. Priya, and R. Balasubramanian	บทความนี้ นำเสนอหลักการทำงานของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบบูสต์ วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบหลายอุปกรณ์ วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบอินเวอร์ลิฟบูสต์ และวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบอินเวอร์ลิฟบูสต์หลายอุปกรณ์ พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการทดลองในแง่ของค่ากระแสพลั่วและแรงดันพลั่วของวงจรแต่ละแบบ

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซีแบบสองทิศทางที่ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2019	F. Wang, Y. Luo, H. Li, and X. Xu	บทความนี้ นำเสนอวิธีการสลับโหมดการทำงานของวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซีแบบสองทิศทางโดยอาศัยเส้นโค้งเบซิเยร์ (Bézier Curve) ที่ได้รับการปรับค่าให้เหมาะสม ซึ่งผลการทดสอบพบว่าสามารถสลับโหมดการทำงานระหว่างโหมดบัคและโหมดบูสต์ได้อย่างรวดเร็ว
2019	S. A. Gorji, H. G Sahebi, M. Ektesabi, and A. B. Rad	บทความนี้ นำเสนอข้อดีและข้อเสียของวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซีแบบสองทิศทางที่แบ่งประเภทวงจรเป็นสองแบบคือ แบบแยกกราวด์ (isolated type) และแบบไม่แยกกราวด์ (non-isolated type) ซึ่งแบบไม่แยกกราวด์จะมีน้ำหนักที่เบาเนื่องจากไม่มีหม้อแปลงและจะมีอัตราส่วนการทบระดับแรงดันที่สูง รวมถึงมีโครงสร้างที่เรียบง่ายกว่าแบบแยกกราวด์
2022	R. K. Pandey, J. N. Mahto, P. Tirkey, and S. Kumar	บทความนี้ นำเสนอวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซีที่ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักคือ แบบไม่แยกกราวด์ มีข้อดีคือ โครงสร้างเรียบง่าย ขนาดกะทัดรัด และน้ำหนักเบา ในขณะที่แบบแยกกราวด์ มีความซับซ้อนและใช้อุปกรณ์มากกว่าเนื่องจากต้องใช้หม้อแปลงความถี่สูง

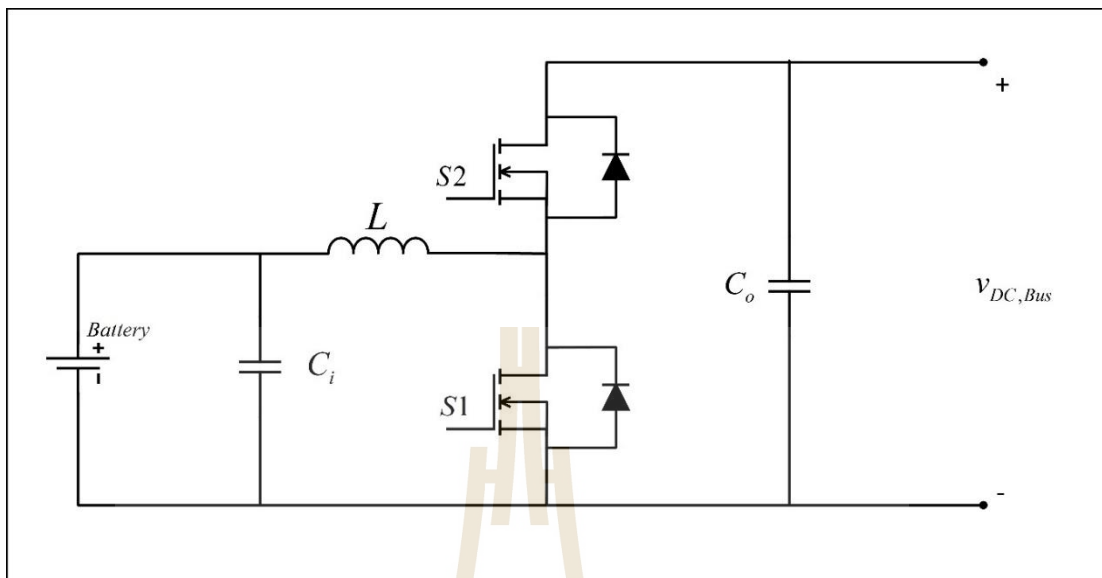
ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางที่ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2023	M. S. Khan, and A. Agrawal	บทความนี้นำเสนอภาพรวมของโครงสร้างวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางที่ใช้ในระบบชาร์จของยานยนต์ไฟฟ้าและสถานีชาร์จเร็ว โดยจำแนกเป็นแบบแยกกราวด์และไม่แยกกราวด์ ซึ่งแบบไม่แยกกราวด์นิยมใช้กับระบบที่มีกำลังไฟฟ้าปานกลางถึงสูงเนื่องจากมีโครงสร้างที่เรียบง่าย ควบคุมได้ง่ายและมีน้ำหนักเบา
2023	G. Nithiyanandham, N. Sudhakar, and K. V. Krishnan	บทความนี้เสนอวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบเชื่อมต่อทางไฟฟ้าหลายอินพุตเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมกับระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริดเนื่องจากสามารถรวมพลังงานจากหลายแหล่งจ่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขนาดกะทัดรัด ไม่จำเป็นต้องใช้หม้อแปลง และออกแบบได้ยืดหยุ่น ดังนั้นจึงเหมาะต่อการใช้งานจริงในระบบพลังงานไฮบริดสมัยใหม่
2024	L. R. Silva, M. P. Cavaleiro, F. G. Nimitti, and A. M. S. S. Andrade	บทความนี้เสนอวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัส-บูสต์แบบสองทิศทางแบบดั้งเดิมและแบบที่มีการพัฒนา เพื่อประเมินประสิทธิภาพในด้านอัตราขยายแรงดันและความเค้นแรงดันบนอุปกรณ์สวิตช์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบที่มีการพัฒนามีประสิทธิภาพในด้านอัตราขยายแรงดันที่ดีกว่าและความเค้นแรงดันไฟฟ้าบนอุปกรณ์สวิตช์ที่น้อยกว่าแบบดั้งเดิม

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางที่ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2024	P. Muthukumar, M. Venkateshkumar, and C. S. Chin	บทความนี้ นำเสนอข้อดีและข้อเสียของ วงจรแปลงผันกำลังแบบสองทิศทางที่ใช้ใน ระบบยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งวงจรแปลงผันดีซีเป็น ดีซีชนิดบuck-บูสต์แบบสองทิศทางมีข้อดีคือ มีประสิทธิภาพสูง รองรับช่วงแรงดันขาเข้าได้ใน ระดับที่กว้าง ควบคุมแรงดันที่ ดีซีบัสได้ง่าย และสามารถออกแบบให้มีโครงสร้างกะทัดรัด ซึ่งทำให้น้ำหนักที่เบาลงได้

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับ
วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีที่ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้างดตารางที่ 2.2 จะพบว่า มีการแบ่งประเภทของ
วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางได้ 2 แบบคือ แบบแยกกราวด์และแบบไม่แยกกราวด์
โดยแบบแยกกราวด์จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงกัลวานิก (galvanic transformer) เพื่อแยกกราวด์
ระหว่างด้านแรงดันต่ำและด้านแรงดันสูง ในขณะที่แบบไม่แยกกราวด์ไม่ต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้า
แต่จะใช้ค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ในการทำงานสูงกว่าแบบแยกกราวด์ และมีค่าความเครียด
แรงดัน (voltage stress) ต่กคร่อมสวิตช์มากกว่า อย่างไรก็ตามแบบไม่แยกกราวด์ไม่จำเป็นต้องใช้
หม้อแปลงไฟฟ้า ทำให้น้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานดีกว่าแบบแยกกราวด์
นอกจากนี้จากข้อมูลที่ได้จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม งานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้และพิจารณา
วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบuck-บูสต์แบบสองทิศทาง (buck-boost bidirectional dc-dc
converters) เนื่องจากมีข้อดีคือ มีช่วงแรงดันขาเข้าที่กว้าง มีความง่ายในการควบคุม
แรงดันไฟฟ้าดีซีบัส มีประสิทธิภาพสูง และมีการออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัดที่เป็นผลดีต่อน้ำหนัก
โดยรวมของยานยนต์ไฟฟ้าได้ โดยวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบuck-บูสต์แบบสองทิศทางแสดงได้ดัง
รูปที่ 2.7 ซึ่งจากรูปจะพบว่า วงจรแปลงผันดังกล่าวจะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสและ
ควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดทั้งหมดของระบบยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งชุดขับเคลื่อน
มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นโหลดหลักของระบบ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมของชุดขับเคลื่อน
มอเตอร์ไฟฟ้าในระบบยานยนต์ไฟฟ้า โดยจะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.7 วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

ปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้รับความนิยมและใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบยานยนต์ไฟฟ้าจะมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ โดยเป็นวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัส รวมถึงวงจรแปลงผันกำลังในชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าที่ต้องควบคุมค่าแรงบิด ค่าความเร็ว และค่ากำลังไฟฟ้าให้คงที่ อย่างไรก็ตามเมื่อชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าถูกเชื่อมต่อเข้ากับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางจะพบว่าชุดขับเคลื่อนดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบควบคุมของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางโดยตรง เนื่องจากชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ามีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (constant power load: CPL) ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ศึกษาค้นคว้างานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2006	A. Emadi, A. Khaligh, C. H. Rivetta, and G. A. Williamson	บทความนี้แนะนำเสนอโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบยานยนต์ไฟฟ้าและพฤติกรรมอิมพีแดนซ์เชิงลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้า
2008	A. Khaligh	บทความนี้แนะนำเสนอการวิเคราะห์ผลของพลังงานสูญเสียจากอุปกรณ์ (loss components) ที่มีผลต่อเสถียรภาพของวงจรแปลงผันตีสื่อเป็นตีสื่อที่ส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยโหลดดังกล่าวมีพฤติกรรมเป็นอิมพีแดนซ์เชิงลบและทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ พร้อมทั้งนำเสนอองค์ประกอบหลักในระบบยานยนต์ไฟฟ้าที่มีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
2011	S. Kim, and S. S. Williamson	บทความนี้แนะนำเสนอเทคนิคชดเชยสำหรับวงจรแปลงผันแบบขับเคลื่อนด้วยวิธีการควบคุมการจัดวางโพลในปริภูมิสถานะ (state space pole placement control) ของระบบอากาศยาน เพื่อแก้ไขปัญหาความไม่เสถียรที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีพฤติกรรมอิมพีแดนซ์เชิงลบ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบควบคุม
2016	S. Arora, P. T. Balsara, and D. K. Bhatia	บทความนี้แนะนำเสนอการสร้างแบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบดิจิทัล เพื่อศึกษาพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังที่ต่อแบบเรียงกันที่มีปัญหาด้านเสถียรภาพจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวซึ่งมีพฤติกรรมเป็นอิมพีแดนซ์เชิงลบ

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2017	Mohammed Kh. A. Nussairi, R. B., S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, and P. Siano	บทความนี้นำเสนอผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบไมโครกริด (microgrid) ที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ และนำเสนอเทคนิคการชดเชยผลกระทบจากโหลดดังกล่าว
2020	G. Tang, T. Zhang, and X. Zhang	บทความนี้เสนอวิธีการควบคุมเพื่อรักษาเสถียรภาพแบบแอ็กทีฟสำหรับวงจรแปลงผันแบบบูสต์ในระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งชุดขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้ามีพฤติกรรมเหมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีลักษณะเป็นตัวต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวม และส่งผลต่อสมรรถนะของระบบควบคุม
2021	B. A. Martínez-Treviño, A. E. Aroudi, A. Cid-Pastor, G. Garcia, and L. Martinez-Salamero	บทความนี้เสนอโหลดกำลังคงตัวด้วยที่เป็นพฤติกรรมของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนโดยโหลดดังกล่าวส่งผลต่อสมรรถนะของระบบควบคุม

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ดังตารางที่ 2.3 พบว่าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งปกติจะประกอบด้วยวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมและมอเตอร์ไฟฟ้าจะมีพฤติกรรมเปรียบเหมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยโหลดดังกล่าวมีลักษณะเป็นค่าความต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวมที่นอกจากจะส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมแล้ว ยังส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบอีกด้วย และนอกจากนี้โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวยังส่งผลทำให้ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นเกิดขึ้น นั่นคือทำให้ระบบเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันในระบบยานยนต์ไฟฟ้าที่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่ได้ถึงแม้ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะมีการเปลี่ยนแปลง ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการศึกษาค้นคว้าตัวควบคุมที่ใช้กับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางเพื่อให้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่และควบคุมการส่งจ่าย

กำลังไฟฟ้าไปยังโหลดของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อถัดไป

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมที่ใช้กับวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่

วงจรแปลงผันกำลังเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างยิ่งในระบบยานยนต์ไฟฟ้าเพราะนอกจากจะต้องควบคุมแรงดันไฟฟ้าตีสี่บัสให้มีค่าคงที่แล้ว จะต้องควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดทั้งหมดของระบบด้วย ดังนั้นตัวควบคุมของวงจรแปลงผันดังกล่าวจึงมีความสำคัญอย่างมาก ด้วยเหตุนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงศึกษางานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมที่ใช้กับวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่แบบสองทิศทาง ซึ่งมีรายละเอียดแสดงได้ดังตารางที่ 2.4 ดังนี้

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมที่ใช้กับวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2012	M. Bekhti, S. D. Krachai, L. Boukhris, A. Bellar, M. A. Mebrek, and B. Nasri	บทความนี้แนะนำเสนอตัวควบคุมโหมดการเลื่อนของวงจรแปลงผันแบบบัก ภายใต้สภาวะการทำงานปกติและสภาวะการทำงานที่มีสัญญาณรบกวน ผลจากการตรวจสอบสมรรถนะพบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันขาเข้าและโหลดในระดับที่กว้าง ตัวควบคุมดังกล่าวสามารถควบคุมแรงดันได้ตามที่ต้องการและให้ผลตอบสนองเชิงพลวัตที่ดี ซึ่งสามารถนำไปใช้งานจริงในทางปฏิบัติได้ง่าย
2019	Z. Farooq, T. Zaman, M. A. Khan, Nasimullah, S. M. Muyeen, and A. Ibeas	บทความนี้ เสนอตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมแบบปรับตัวร่วมกับพีไอ (AANN-PI controller) สำหรับวงจรแปลงผันแบบคูอัลแอกที่ฟบริดจ์ชนิดหนึ่งเฟส (Single phase Dual Active Bridge : DAB) พร้อมทั้งเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมที่แนะนำเสนอกับตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ผลการเปรียบเทียบพบว่า ตัวควบคุมดังกล่าว

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมที่ใช้กับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		มีผลตอบสนองในแง่ของการพุ่งเกิน การพุ่งต่ำ ช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่ที่ดีกว่า ตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ถึงแม้ว่าแรงดันอ้างอิง แรงดันขาเข้า และ ค่าความต้านทานของโหลดจะมีการเปลี่ยนแปลง
2020	K. M. K, and D. M. Abraham	บทความนี้แนะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุม โหมดการเลื่อนของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี ชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางในยานยนต์ไฟฟ้า พร้อมทั้งเปรียบเทียบสมรรถนะกับตัวควบคุม พีไอ ผลการเปรียบเทียบพบว่า ตัวควบคุม โหมดการเลื่อนให้ผลการตอบสนองเชิงพลวัตที่ดีกว่าและมีแรงดันพลั่วที่น้อยกว่า เมื่อเทียบกับ ตัวควบคุมพีไอ ทั้งในโหมดการทำงานแบบบูสต์ และแบบบัค
2021	E. Malev	บทความนี้ แนะนำการสร้างต้นแบบ วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์ แบบสองทิศทางที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุม โหมดการเลื่อน เพื่อศึกษาพฤติกรรม ผลการป้อนกลับในโหมดแปลงพลังงานสูญเสีย ขณะห้ามล้อ ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวสามารถ ควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้อย่างรวดเร็วและ แม่นยำ

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมที่ใช้กับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี (ต่อ)

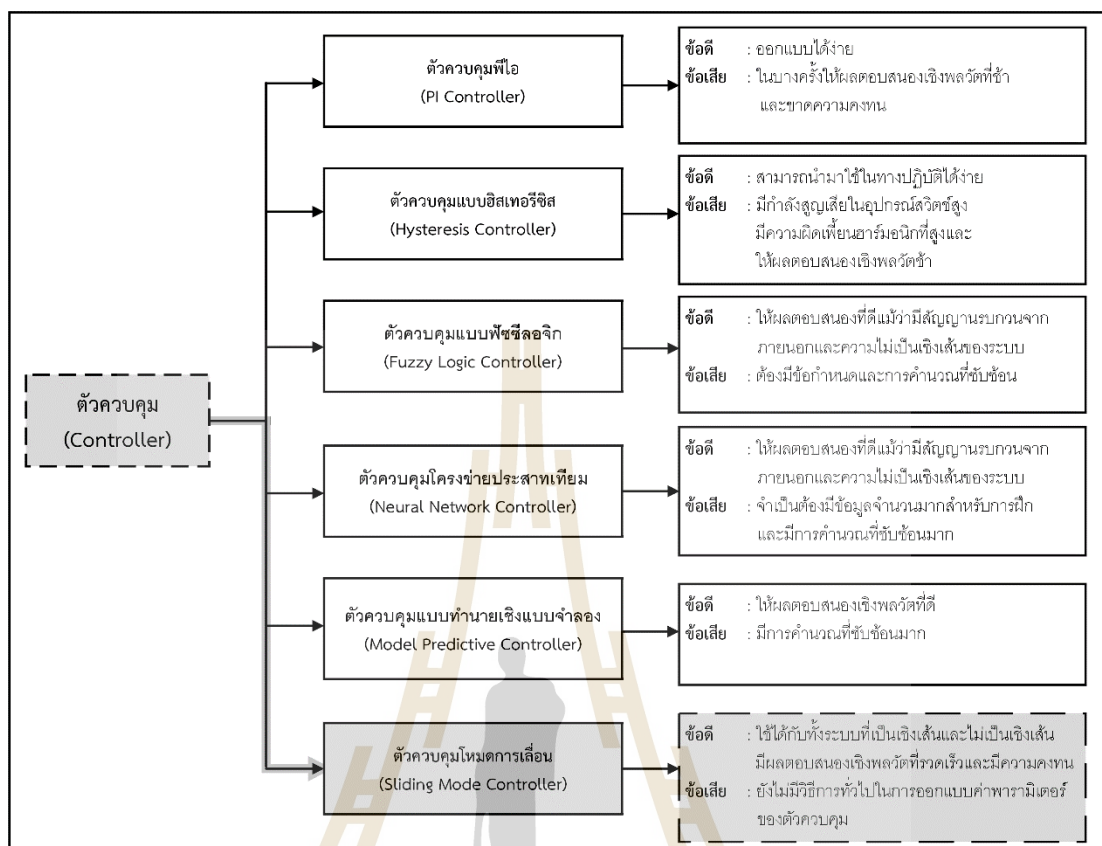
ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2021	S. Mohanty, A, Choudhury, S. Pati, and S, Khatua	บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม 3 แบบ ได้แก่ ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน และตัวควบคุมโหมดการเลื่อนของวงจรแปลงผันแบบบัค ผลการเปรียบเทียบพบว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนมีสมรรถนะที่ดีกว่าในแง่ของผลตอบสนองเชิงพลวัต อีกทั้งยังมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันขาเข้า แรงดันอ้างอิง ค่าความต้านทานของโหลด และค่าพารามิเตอร์ภายในของระบบ
2021	Q. Xu, N. Vafamand, L. Chen, T. Dragičević, L. Xie, and F. Blaabjerg	บทความนี้เสนอข้อดีและข้อเสียของตัวควบคุมที่ใช้กับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางในระบบไมโครกริด ซึ่งระบบดังกล่าวมีโหลดเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยนำเสนอวิธีการควบคุมหลากหลายวิธี เช่น โครงข่ายประสาทเทียม ตัวควบคุมแบบทำนายเชิงแบบจำลอง และตัวควบคุมโหมดการเลื่อนเป็นต้น ซึ่งตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสามารถควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบมีความรวดเร็ว มีความคงทนและนำไปใช้งานจริงได้ง่าย
2022	L. Wu, J. Liu, S. Vazquez, and S. K. Mazumder	บทความนี้เสนอหลักการของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันกำลังและระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า โดยนำเสนอหลักการควบคุมในรูปแบบต่าง ๆ ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนการประยุกต์ใช้ในระบบต่าง ๆ ซึ่งตัวควบคุมโหมดการเลื่อนมีสมรรถนะที่สูง มีความคงทนต่อความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์และสัญญาณรบกวนจากภายนอก

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมที่ใช้กับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2022	S. Kalson, and S. R. Kar	บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอดี ตัวควบคุมแบบฟuzzyลอจิก และตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัก ซึ่งจากการเปรียบเทียบพบว่า ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกมีการพุ่งเกินที่ต่ำที่สุด ตัวควบคุมพีไอดีมีผลตอบสนองเชิงพลวัตที่ช้าที่สุด ในขณะที่ตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมมีผลตอบสนองเชิงพลวัตที่ดีที่สุด
2024	P. Muthukumar, M. Venkateshkumar, and C. S. Chin	บทความนี้นำเสนอหลักการ ข้อดีและข้อเสียของตัวควบคุมต่าง ๆ ที่ใช้กับวงจรแปลงผันกำลังแบบสองทิศทางสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้า เช่น ตัวควบคุมพีไอมีการออกแบบที่ง่าย แต่มีผลตอบสนองเชิงพลวัตที่ช้า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่มีความคงทนและผลตอบสนองเชิงพลวัตที่รวดเร็ว แต่มีการสั่นไหว ตัวควบคุมฟuzzyลอจิก ตัวควบคุมแบบทำนายเชิงแบบจำลอง และตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมที่มีความคงทนต่อความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ แต่มีความซับซ้อนในการคำนวณสูง
2024	A. Suyapan, S. Daengdon, and K-N. Areerak.	บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนของวงจรแปลงผันแบบบักที่มีแหล่งจ่ายเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ พร้อมทั้งนำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมดังกล่าวกับตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสามารถให้

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมที่ใช้กับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		ผลตอบสนองเชิงพลวัตของระบบที่รวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอ ทั้งในแง่ของเวลาขึ้น เวลาเข้าที่ และเปอร์เซ็นต์การฟุ้งเกิน
2024	F. Noor, K. Zeb, S. Ullah, Z. Ullah, M. Khalid, and A. Al-Durra	บทความนี้แนะนำเสนอตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่อิงฟังก์ชันอุปสรรค (barrier function-based adaptive sliding mode controller: BFASMC) เพื่อควบคุมแรงดันบัสในระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมของยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย เซลล์เชื้อเพลิง แบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุ และเซลล์แสงอาทิตย์ โดยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมที่นำเสนอมีความเสถียร คงทน และไม่มีอาการสั่นไหว ซึ่งดีกว่าวิธีควบคุมโหมดการเลื่อนแบบดั้งเดิมอย่างชัดเจน
2024	T. Mao, L. Li, and Y. Cao	บทความนี้แนะนำการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนของวงจรแปลงผันแบบบัสชนิดซิงโครนัส โดยใช้กฎการเข้าถึงแบบความเร็วแปรผันร่วมกับตัวสังเกตสถานะเชิงเส้น เพื่อให้ผลตอบสนองดียิ่งขึ้น ผลจากการจำลองและการทดลองจริง แสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอมีผลตอบสนองเชิงพลวัตที่ดี รวดเร็ว และมีความคงทนต่อสัญญาณรบกวนจากภายนอก



รูปที่ 2.8 แผนภาพตัวควบคุมที่ใช้กับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี

จากการสำรวจบริษัทวิศวกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมที่ใช้กับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีดังตารางที่ 2.4 สามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งจากรูปจะพบว่า ตัวควบคุมที่ใช้กับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีมีหลากหลายวิธีการ ยกตัวอย่างเช่น ตัวควบคุมพีไอ ซึ่งเป็นตัวควบคุมพื้นฐานที่สามารถออกแบบได้ง่าย และสามารถลดความความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้ แต่ในบางครั้งอาจให้ผลตอบแทนเชิงพลวัตที่ช้า และขาดความคงทนต่อสัญญาณรบกวน ตัวควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส (hysteresis controller) เป็นตัวควบคุมที่สามารถนำมาใช้ในทางปฏิบัติได้ง่าย อย่างไรก็ตามจะมีกำลังสูญเสียในอุปกรณ์สวิตช์และมีความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกที่สูง ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก (fuzzy logic controller) สามารถให้ผลตอบแทนที่ดีแม้ว่าจะมีสัญญาณรบกวนจากภายนอกหรือค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในระบบมีการเปลี่ยนแปลง แต่อาจต้องการออกแบบข้อกำหนดหรือกฎและการคำนวณที่ซับซ้อน ตัวควบคุมแบบทำนายเชิงแบบจำลอง (model predictive controller) เป็นตัวควบคุมที่ให้ผลตอบแทนเชิงพลวัตที่ดี แต่มีข้อเสียคือ มีการคำนวณที่ซับซ้อนมาก ตัวควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียม (neural network controller) สามารถให้ผลตอบแทนที่ดีแม้ว่าจะมีสัญญาณรบกวนจากภายนอกหรือค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ภายในระบบ

มีการเปลี่ยนแปลง แต่ตัวควบคุมนี้จำเป็นต้องมีข้อมูลจำนวนมากสำหรับการฝึกและมีการคำนวณที่ซับซ้อนมาก และตัวควบคุมโหมดการเลื่อนเป็นตัวควบคุมที่สามารถใช้ได้กับทั้งระบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น มีผลตอบสนองเชิงพลวัตที่รวดเร็วและมีความคงทนต่อสัญญาณรบกวน แต่มีข้อเสียคือ ยังไม่มีวิธีการทั่วไปในการออกแบบ ดังนั้นจากที่ได้กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงสนใจและเลือกใช้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน เพื่อควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าดีซีบัสของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบuck-บูสต์แบบสองทิศทางในระบบยานยนต์ไฟฟ้ามีผลตอบสนองเป็นไปตามมาตรฐานสากล ISO 21498-1,2 (International Organization for Standardization, 2021a, 2021b) ซึ่งเป็นมาตรฐานข้อกำหนดทางไฟฟ้าและการทดสอบสำหรับระบบและส่วนประกอบของยานยนต์ไฟฟ้าในระดับแรงดันไฟฟ้าคลาสบี (class B) โดย ISO 21498-1 จะเน้นไปที่ข้อกำหนดเฉพาะของประเภทย่อยแรงดันไฟฟ้าและลักษณะเฉพาะ ในขณะที่ ISO 21498-2 จะเน้นไปที่วิธีการทดสอบ เงื่อนไขในการทดสอบ และข้อกำหนดการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบยานยนต์ไฟฟ้า โดยมาตรฐานดังกล่าวกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าดีซีบัสในสภาวะอยู่ตัวมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 0.375\%$ ของระดับแรงดันไฟฟ้าดีซีบัส ดังนั้นในกรณีที่ระดับแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสมีค่าเท่ากับ 800 V จะมีขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเท่ากับ ± 3 V สำหรับการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจำเป็นต้องกำหนดสมการพื้นผิวการเลื่อน (sliding surface equation) และต้องใช้งานร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเพื่อสร้างสมการสัญญาณควบคุม ซึ่งงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อถัดไป

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการออกแบบตัวควบคุม โดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ประกอบด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะเป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาอันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตซ์ในวงจรแปลงผันกำลังซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนสำหรับการออกแบบตัวควบคุม ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อการจัดผลของอุปกรณ์สวิตซ์ดังกล่าว เพื่อให้ได้แบบจำลองของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสามารถนำไปออกแบบตัวควบคุมของระบบได้ง่ายมากยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังแสดงได้ดังตารางที่ 2.5 ดังนี้

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2013	S. Chonsatidjamroen, and K-N. Areerak	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัสที่มีตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมโหมดการเลื่อนด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลที่ได้พบว่า แบบจำลองดังกล่าวมีความถูกต้องและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ได้
2015	A. Bodrov, Y. Nael, R. Todd, and J. Apsley	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปและแบบจำลองดีคิวของระบบสามเฟสที่มีโหลดเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยในกรณีระบบสามเฟสสมดุลผลการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปและแบบจำลองดีคิวมีความถูกต้อง และในกรณีระบบสามเฟสไม่สมดุลสามารถพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเท่านั้น
2018	M. Shahrman, M. Sarif, T. X. Pei, and A.Z. Annur	บทความนี้เสนอการพิสูจน์แบบจำลองโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะเพื่อใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีที่ทำหน้าที่ควบคุมการส่งจ่ายพลังงานระหว่างแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุ ไปยังโหลดความต้านทาน ซึ่งผลจากการตรวจสอบพบว่า

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยอาศัยแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นสามารถควบคุมการส่งจ่ายกำลังของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2020	P. Azer, and A. Emadi	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักชนิดหลายเฟส วงจรแปลงผันแบบบูสต์ และวงจรแปลงผันแบบบัก-บูสต์ พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบกับผลจำลองจากซอฟต์แวร์ PLECS ซึ่งผลที่ได้พบว่าแบบจำลองที่ได้มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้งานต่อไปได้
2021	J. Pakdeeto, A. Thanommuang K. Chaicharoenudomrung K-N. Areerak, and K-L. Areerak	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแปลงผันเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยการพิสูจน์หาแบบจำลองของวงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซีใช้วิธีการแปลงดีคิว ในขณะที่การพิสูจน์หาแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบบักใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองดังกล่าวมีความถูกต้อง

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2022	H. Alrajhi	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีที่ต่อขนานกัน พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และเปรียบเทียบกับแบบจำลองสวิตช์ ซึ่งผลการตรวจสอบพบว่าแบบจำลองมีความถูกต้องและสอดคล้องกัน
2022	K. Chaicharoenaudomrung, J. Pakdeeto, K-N. Areerak, and K-L. Areerak	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก โดยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางและวงจรแปลงผันแบบบูสต์จะพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ในขณะที่วงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซีจะพิสูจน์ด้วยวิธีการแปลงดีคิว ซึ่งผลที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้องด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK พบว่า แบบจำลองดังกล่าวมีความถูกต้อง
2024	S. Bouroju, and A. Tah	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบูสต์ที่มีการหน่วงแบบแอคทีฟและมีโหลดเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว นอกจากนี้ยังนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วย

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก ซึ่งผลที่ได้พบว่าสามารถคาดเดาเหตุการณ์ขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้อง

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังดังตารางที่ 2.5 พบว่าอุปกรณ์สวิตซ์ในวงจรแปลงผันกำลังจะส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time varying model) ซึ่งหากนำไปใช้สำหรับการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้นการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-invariant model) จึงมีความสำคัญ โดยการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging method: GSSA method) เนื่องจากแบบจำลองที่ได้จะมีความถูกต้องแม่นยำและไม่ซับซ้อน ด้วยเหตุนี้การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป อย่างไรก็ตามการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน นอกจากจะใช้สมการพื้นผิวการเลื่อนร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นได้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ต่อยอดพัฒนาการออกแบบโดยอาศัยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของระบบที่ดียิ่งขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งจะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนมีข้อจำกัดที่สำคัญคือ ไม่มีวิธีการทั่วไปในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ ซึ่งโดยปกติได้อาศัยวิธีการสุ่มค่าในการออกแบบ ทำให้ในบางครั้งอาจเกิดความยุ่งยากและตัวควบคุมไม่สามารถให้ผลตอบสนองที่เหมาะสมที่สุดได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาและต่อยอดตัวควบคุมโหมดการเลื่อนเพื่อให้ผลตอบสนองของระบบดียิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงต้องศึกษา

การประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการออกแบบตัวควบคุม โหมดการเลื่อนด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ทั้งนี้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มีหลากหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (adaptive tabu search: ATS) เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถลู่เข้าสู่คำตอบได้อย่างแน่นอนและมีความสามารถออกจากคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น (local solution) ได้ นอกจากนี้วิธีดังกล่าวยังมีการพิสูจน์การลู่เข้าหาคำตอบด้วยคณิตศาสตร์ (D. Puangdownreong, S. Sujitjorn and T. Kulworawanichpong, 2004) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้รับประกันการได้คำตอบวงกว้าง (global solution) ได้เป็นอย่างดี โดยรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังแสดงได้ดังตารางที่ 2.6 ดังนี้

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2004	D. Puangdownreong, S. Sujitjorn and T. Kulworawanichpong	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์การลู่เข้าหาคำตอบของวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว โดยแสดงให้เห็นว่า กระบวนการค้นหาที่ใช้การสุ่มนี้สามารถลู่เข้าหาคำตอบได้อย่างแน่นอน และสามารถนำไปสู่คำตอบที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็ว พร้อมทั้งนำเสนอตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดของฟังก์ชันโบฮาเชฟสกี (Bohachevsky's function) และการระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองลูกตุ้มที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของอัลกอริทึม

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011	S. Udomsuk, and K-L. Areerak	บทความนี้นำเสนอวิธีการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นโดยหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ซึ่งผลจากการทดสอบพบว่าสามารถประหยัดพลังงานได้มากขึ้น
2017	A. Suyapan, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, K-L.	บทความนี้แนะนำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวเพื่อออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบไฟฟ้าในเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น (More Electric Aircraft: MEA) เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสของระบบ ซึ่งพบว่า ผลตอบสนองเชิงพลวัตที่ได้จากการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวดีกว่าวิธีการออกแบบแบบดั้งเดิม แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าของระบบ
2021	K. Chaicharoenaudomrung, S. Wansungnoen, J. Pakdeeto, K-N. Areerak, and K-L. Areerak	บทความนี้แนะนำเสนอการระบุเอกลักษณ์ของค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (brushless DC electric motor: BLDC) ที่ทำงานร่วมกับชุดควบคุมเชิงพาณิชย์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ผลตอบสนองของความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากอัลกอริทึม

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2023	J. Pakdeeto, S. Wansungnoen, K-L. Areerak, and K-N. Areerak	บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบตาปูเชิงปรับตัวเพื่อระบุเอกลักษณ์ของระบบและออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปลงถ่าน ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ผลตอบสนองของความเร็วมอเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ ตัวควบคุมพีไอดีที่ออกแบบด้วยอัลกอริทึมดังกล่าวให้ผลตอบสนองของระบบที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม
2024	R. Phosung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak	บทความนี้นำเสนอออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบตาปูเชิงปรับตัวสำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในอากาศยาน ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีดังกล่าวให้ผลตอบสนองเชิงพลวัตที่ดีกว่าวิธีการออกแบบดั้งเดิม แม้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าของระบบจะมีการเปลี่ยนแปลง
2024	J. Pakdeeto, A. Thanommuang, K-L. Areerak, and K-N. Areerak	บทความนี้เสนอเทคนิคการวางโพลสำหรับการออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาปูเชิงปรับตัว เพื่อการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบและปรับปรุงการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต ซึ่งผลที่ได้

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		แสดงให้เห็นว่า ระบบกลับมามีเสถียรภาพและมีผลตอบสนองเชิงพลวัตที่ดีกว่าวิธีการออกแบบแบบดั้งเดิม

จากตารางที่ 2.6 พบว่า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังมีหลากหลายไม่ว่าจะเป็นการระบุเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ของระบบเพื่อให้ได้พารามิเตอร์ที่ถูกต้องสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำสูง การออกแบบตัวควบคุมของระบบ เพื่อให้มีสมรรถนะที่ดีและมีประสิทธิภาพสูง การลดการสูญเสียของกำลังไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงการทำงานของระบบไฟฟ้าให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุด เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ โดยเลือกใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว เพื่อออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ และจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ดำเนินการในลักษณะนี้กับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ดังนั้นจึงถือได้ว่าเป็นจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

2.8 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 เป็นผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าซึ่งทำให้เห็นถึงองค์ประกอบสำคัญในสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าและนำไปสู่การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อศึกษาข้อดีและข้อเสียของแต่ละวงจร อีกทั้งทำให้เห็นถึงผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมของยานยนต์ไฟฟ้า และการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางที่จำเป็นต้องดำเนินการร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรที่จะต้องได้รับการพิสูจน์ขึ้น อีกทั้งศึกษาการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อพัฒนาและต่อยอดไปสู่การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่เพื่อจะทำให้ระบบสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่และมีผลตอบสนองเชิงพลวัตที่ดียิ่งขึ้น ถึงแม้ว่าโหลดของระบบจะมีค่าเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจะเห็นได้ว่า จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม

ทั้งหมดจึงสามารถสรุปเป็นแนวทางที่ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งรายละเอียดของงานในแต่ละส่วน จะได้รับการนำเสนอไว้ในบทถัด ๆ ไป



บทที่ 3

ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้า

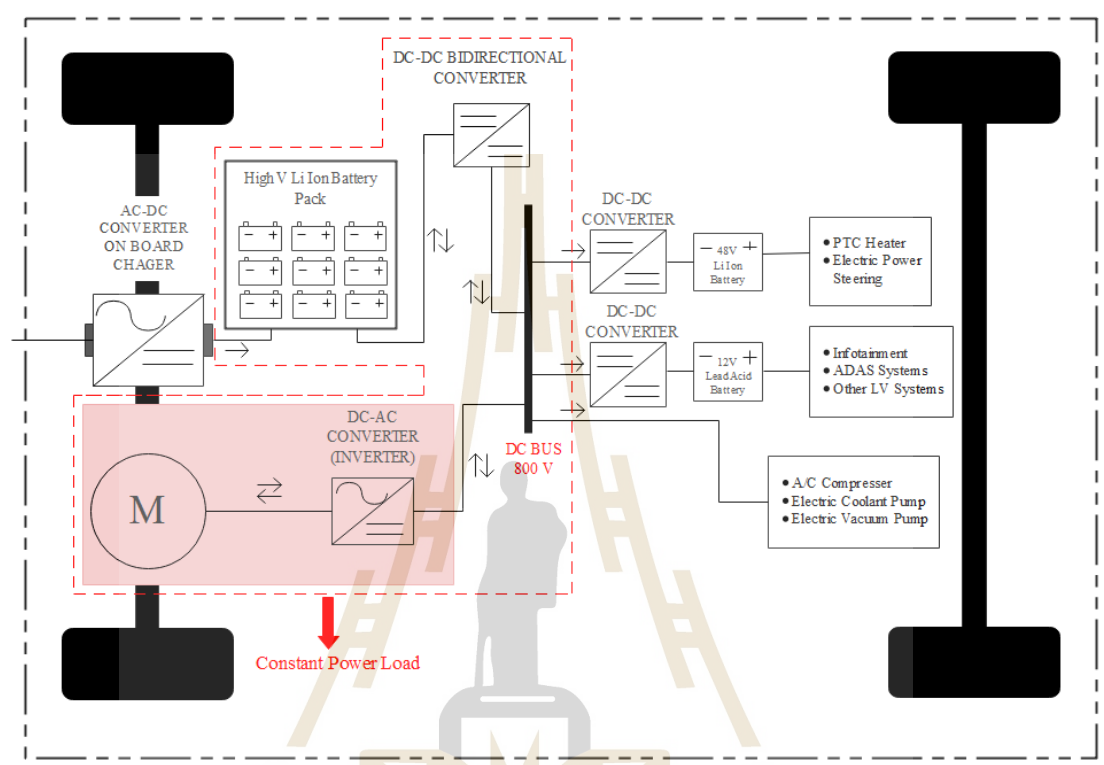
3.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ดำเนินการเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนของวงจรแปลงผันกำลังในระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ ดังนั้นเนื้อหาในบทที่ 3 นี้จะเริ่มต้นด้วยการนำเสนอระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งคือวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง จากนั้นจะเป็นการนำเสนอรายละเอียดการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนของระบบที่พิจารณา ซึ่งประกอบด้วย หลักการพื้นฐานของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน การพิสูจน์หาสมการสร้างสัญญาณควบคุมจากสมการพื้นผิวการเลื่อน และการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีการสุ่มค่า อย่างไรก็ตามสมการสร้างสัญญาณควบคุมจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของระบบด้วย ดังนั้นการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป และการออกแบบค่าพารามิเตอร์อุปกรณ์พาสซีฟของระบบ รวมถึงการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB จะได้รับการนำเสนอไว้ในส่วนที่เหมาะสมของบท และเนื้อหาในส่วนสุดท้ายจะเป็นการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่นำเสนอผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB

3.2 ระบบยานยนต์ไฟฟ้าที่พิจารณา

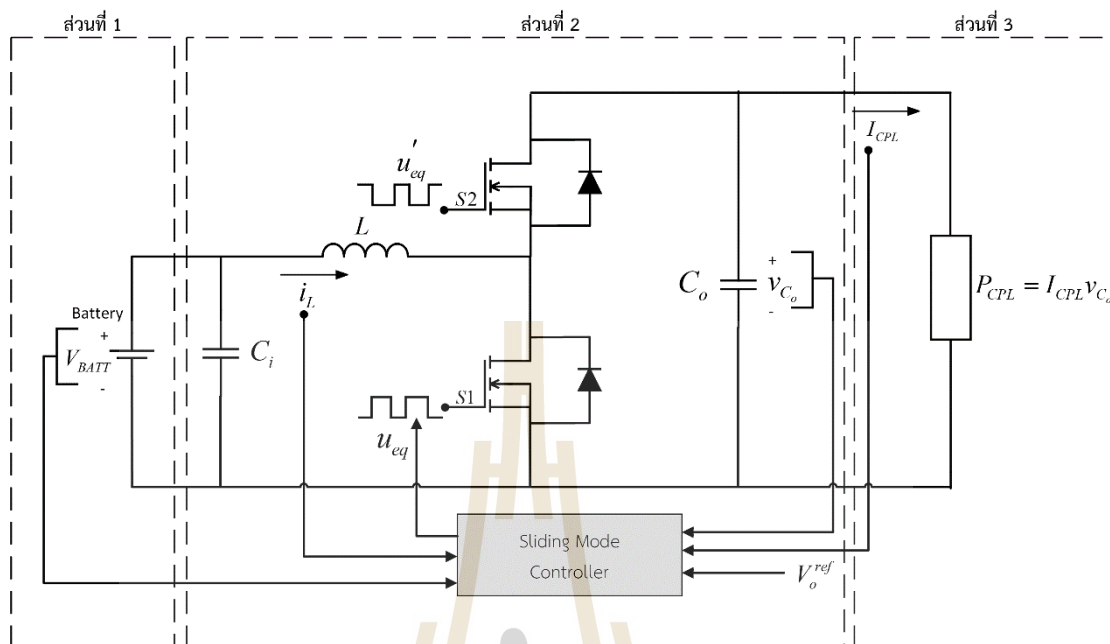
สถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์แสดงได้ดังรูปที่ 3.1 จากรูปจะเห็นว่า มีวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางเป็นองค์ประกอบสำคัญ ซึ่งวงจรดังกล่าวจะทำหน้าที่ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัคให้คงที่และควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไปยังโหลดทั้งหมดของระบบ โดยโหลดหลักของระบบ คือ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ควบคุมการขับเคลื่อนและความเร็วของยานพาหนะ ซึ่งโดยทั่วไปชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าจะประกอบด้วยวงจรแปลงผันดีซีเป็นเอซีหรืออินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้า เพื่อควบคุมค่าแรงบิด ค่าความเร็ว และค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าให้คงที่ กล่าวคือ เป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม ดังนั้นโหลดชุดขับเคลื่อนจึงมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

(Emadi et al., 2006; AL-Nussairi et al., 2017; Tang et al., 2020; Martínez-Treviño et al., 2021) ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะพิจารณาให้แทนด้วยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ



รูปที่ 3.1 ระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่พิจารณา

เมื่อพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบในสถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่แทนด้วยพื้นที่ในกรอบเส้นประสีแดงของรูปที่ 3.1 จะได้เป็นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์แสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งจากรูปจะพบว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งถูกใช้แทนแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานหลักของระบบ และกำหนดให้มีพิกัดแรงดันเท่ากับ 662 V ส่วนที่ 2 วงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่ชนิดบuck-บูสต์แบบสองทิศทางที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตีสี่ด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ทั้งนี้วงจรแปลงผันดังกล่าวสามารถทำงานได้ 2 โหมด คือ โหมดบูสต์ที่เพิ่มแรงดันจากชุดแบตเตอรี่เป็นแรงดันไฟฟ้าตีสี่สำหรับโหมดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า และโหมดบักที่แปลงพลังงานสูญเสียขณะห้ามล้อกลับเข้าสู่แบตเตอรี่ อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์จะพิจารณาเฉพาะโหมดการขับเคลื่อนเท่านั้น เนื่องจากเป็นโหมดการทำงานส่วนใหญ่ของระบบ และส่วนที่ 3 โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวซึ่งเป็นพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม ซึ่งถูกใช้แทนชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าของระบบยานยนต์ไฟฟ้าและมีพิกัดกำลังไฟฟ้า 285 kW



รูปที่ 3.2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์

การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเริ่มต้นจากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ซึ่งได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ เพื่อให้มีค่าแรงดันพัวล์และกระแสพัวล์เป็นไปตามข้อกำหนด ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังหัวข้อที่ 3.2.1

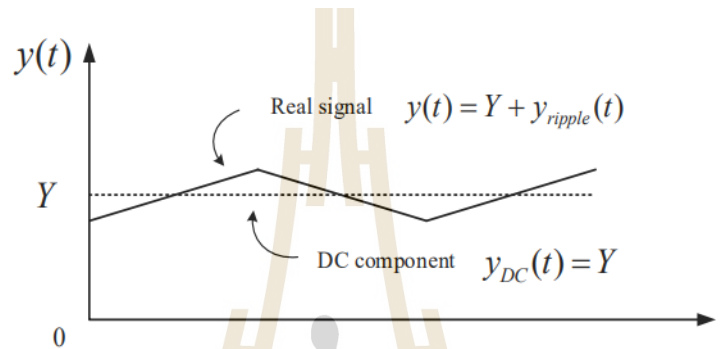
3.2.1 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่ชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

วงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่ชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางดังแสดงในส่วนที่ 2 ของรูปที่ 3.2 จะมีโหมดการทำงาน 2 โหมด คือ โหมดที่สวิตช์ $S1$ อยู่ในสถานะเปิด (OFF) $S2$ อยู่ในสถานะปิด (ON) และโหมดที่สวิตช์ $S1$ อยู่ในสถานะปิด (ON) $S2$ อยู่ในสถานะเปิด (OFF) ซึ่งทั้งสองโหมดการทำงานนี้จะถูกวิเคราะห์โดยอาศัยกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's voltage law: KVL) และกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's current law: KCL รวมถึงอาศัยแบบจำลองที่พิจารณาในสภาวะอยู่ตัวด้วยเทคนิคการประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็ก (small-ripple approximation) สมดุลฟลักซ์เชื่อมโยงในตัวเหนี่ยวนำ (inductor linked-flux balance) และสมดุลประจุในตัวเก็บประจุ (capacitor charge balance) (Erickson & Maksimović, 2001) เพื่อพิสูจน์หาสมการสำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจร โดยมีรายละเอียดแสดงได้ดังนี้

3.2.1.1 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองที่พิจารณาในสถานะอยู่ตัว

ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้สำหรับการพิสูจน์หาสมการการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังมีรายละเอียดดังนี้

1) การประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็ก สามารถแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็ก

$$y(t) = Y + y_{\text{ripple}}(t) \quad (3-1)$$

การประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็กแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งจากรูปเมื่อกำหนดให้สัญญาณ $y(t)$ ใด ๆ คือผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผัน ซึ่งสามารถแสดงได้ดัง สมการที่ (3-1) เมื่ออาศัยการประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็กของสัญญาณใด ๆ จะได้ว่า $y_{\text{ripple}}(t)$ ซึ่งก็คือ สัญญาณกระเพื่อมของผลตอบสนอง $y(t)$ จะมีค่าประมาณศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ (3-1) ทำให้ผลตอบสนอง $y(t)$ มีค่าประมาณ Y แสดงได้ดังสมการที่ (3-2)

$$y(t) \approx Y \quad (3-2)$$

เมื่อ Y คือ ปริมาณกระแสตรงของ $y_{DC}(t)$

จากสมการที่ (3-2) จะเห็นได้ว่า การใช้เทคนิคการประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็กจะอยู่บนสมมติฐานว่าการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองให้แรงดันพลั้วหรือ

กระแสพลั้วที่น้อยมาก จึงไม่พิจารณาสัญญาณกระแสเฟื้อมของผลตอบสนองได้ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจึงเป็นค่าคงที่

2) สมดุลพลั้วซ์เชื่อมโยงในตัวเหนี่ยวนำ

เมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ นั่นคือ $v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$ และทำการหาปริพันธ์ (integrate) ของแรงดันดังกล่าวใน 1 คาบการสวิตช์จะได้

$$i_L(T_s) - i_L(0) = \frac{1}{L} \int_0^{T_s} v_L(t) dt$$

สมดุลพลั้วซ์เชื่อมโยงในตัวเหนี่ยวนำ คือ กระแส $i_L(t)$ สุทธิที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (L) จะมีค่าเท่ากับศูนย์ในหนึ่งคาบการสวิตช์ที่สภาวะอยู่ตัว จะได้ว่า

$$0 = \frac{1}{L} \int_0^{T_s} v_L(t) dt$$

ในสภาวะอยู่ตัว ค่าเฉลี่ยของ $v_L(t) = \langle V_L \rangle = 0$ ดังนั้นจะได้

$$\langle V_L \rangle = \frac{\int_0^{T_s} v_L(t) dt}{T_s} = 0 \quad (3-3)$$

เมื่อ $\int_0^{T_s} v_L(t) dt$ คือ พื้นที่ใต้กราฟของ $v_L(t)$

3) สมดุลประจุในตัวเก็บประจุ

เมื่อพิจารณากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ นั่นคือ $i_C(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt}$ และทำการหาปริพันธ์ของกระแสดังกล่าวใน 1 คาบการสวิตช์จะได้

$$v_C(T_s) - v_C(0) = \frac{1}{C} \int_0^{T_s} i_C(t) dt$$

สมดุลประจุในตัวเก็บประจุ คือ แรงดัน $v_C(t)$ สุทธิที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (C) จะมีค่าเท่ากับศูนย์ในหนึ่งคาบการสวิตช์ที่สภาวะอยู่ตัว จะได้ว่า

$$0 = \frac{1}{C} \int_0^{T_s} i_C(t) dt$$

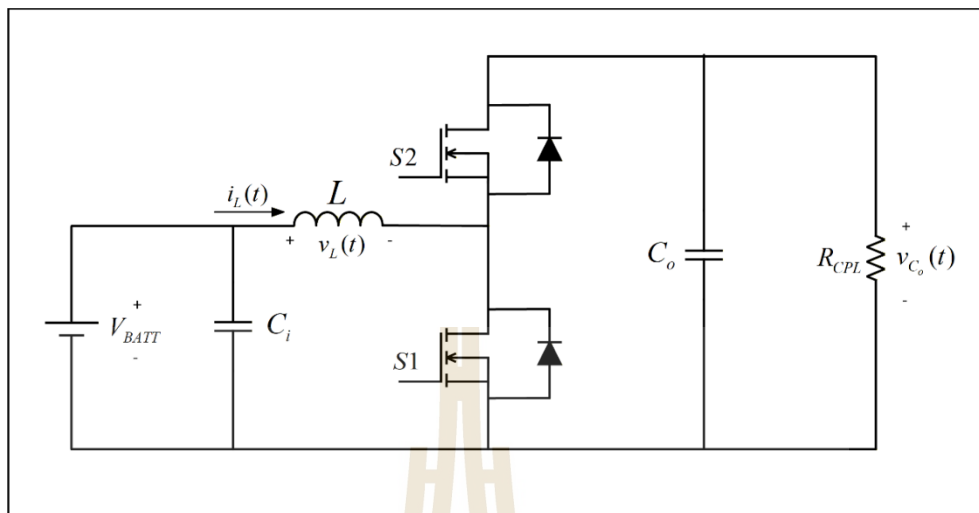
ในสภาวะอยู่ตัว ค่าเฉลี่ยของ $i_C(t) = \langle I_C \rangle = 0$ ดังนั้นจะได้

$$\langle I_C \rangle = \frac{\int_0^{T_s} i_C(t) dt}{T_s} = 0 \quad (3-4)$$

เมื่อ $\int_0^{T_s} i_C(t) dt$ คือ พื้นที่ใต้กราฟของ $i_C(t)$

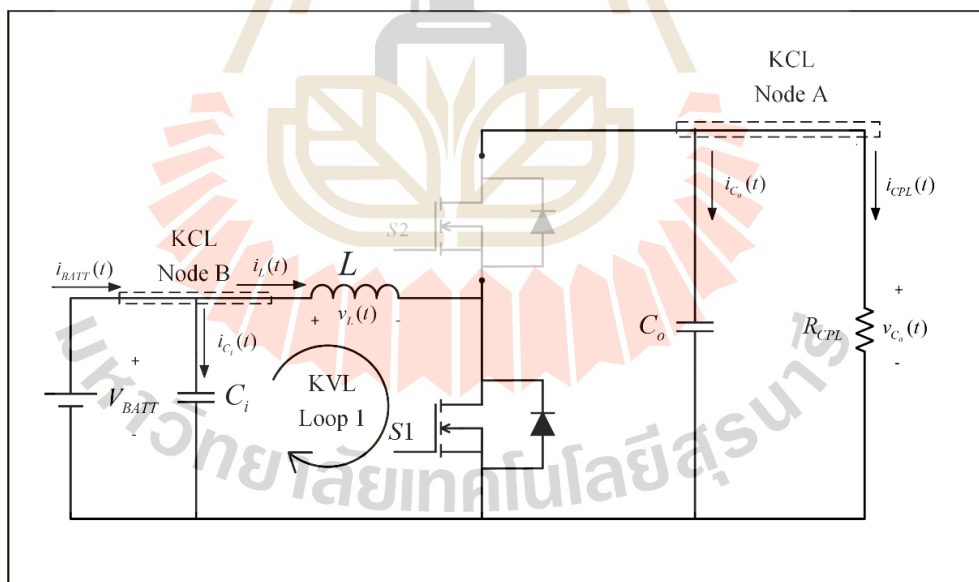
3.2.1.2 การพิสูจน์หาสมการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผัน ดิชีเป็นดิชีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

สำหรับการพิสูจน์หาสมการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันดิชีเป็นดิชีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางจะพิจารณาโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเป็นโหลดตัวต้านทาน เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ การพิจารณาดังกล่าวจะเปลี่ยนจากค่ากำลังไฟฟ้า (P_{CPL}) เป็นค่าความต้านทานของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (R_{CPL}) โดยอาศัยความสัมพันธ์ $R_{CPL} = \frac{V_{CPL}^2}{P_{CPL}}$ ดังนั้นวงจรแปลงผันดิชีเป็นดิชีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางที่มีโหลดเป็นโหลดตัวต้านทานของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งจากรูปเมื่อพิจารณาพฤติกรรมสวิตช์และประยุกต์ใช้กฎกระแสไฟฟ้าและกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ ร่วมกับการประมาณการกระแสเพื่อขนาดเล็ เพื่อวิเคราะห์วงจรสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้



รูปที่ 3.4 วงจรแปลงผันตีสื่อเป็นตีสื่อชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

พิจารณากรณีที่ $S1$ ปิด (ON) และ $S2$ เปิด (OFF) การทำงานของวงจร
แสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรแปลงผันตีสื่อเป็นตีสื่อชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง กรณีที่ $S1$ “ON” และ $S2$ “OFF”

- พิจารณาารอบที่ 1 (Loop 1) โดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้

$$v_L(t) - V_{BATT} = 0$$

$$v_L(t) = V_{BATT} \quad (3-5)$$

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{BATT}$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_{BATT}}{L} \quad (3-6)$$

- พิจารณาโนด A (Node A) โดยใช้กฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์และการประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็กดังสมการที่ (3-2) นั่นคือ $v_{C_o}(t) = V_{C_o}$ จะได้

$$\begin{aligned} -i_{CPL}(t) - i_{C_o}(t) &= 0 \\ i_{C_o}(t) &= -I_{CPL} \end{aligned} \quad (3-7)$$

$$\begin{aligned} C_o \frac{dv_{C_o}(t)}{dt} &= -\frac{V_{C_o}}{R_{CPL}} \\ \frac{dv_{C_o}(t)}{dt} &= -\frac{V_{C_o}}{R_{CPL} C_o} \end{aligned} \quad (3-8)$$

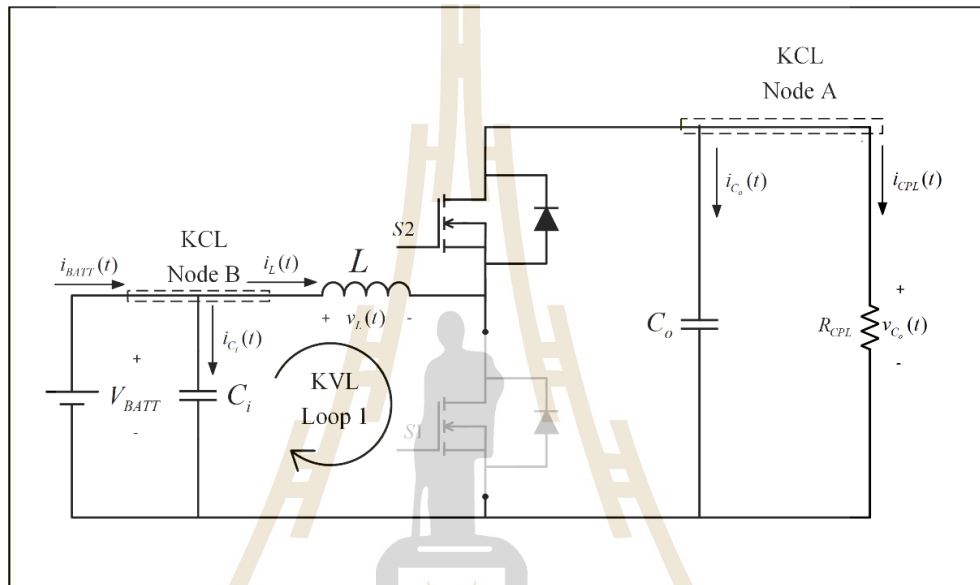
- พิจารณาโนด B (Node B) โดยใช้กฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์และการประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็กดังสมการที่ (3-2) นั่นคือ $i_L(t) = I_L$ จะได้

$$\begin{aligned} i_{BATT}(t) - i_{C_i}(t) - i_L(t) &= 0 \\ i_{C_i}(t) &= I_{BATT} - I_L \end{aligned} \quad (3-9)$$

$$C_i \frac{dv_{C_i}(t)}{dt} = I_{BATT} - I_L$$

$$\frac{dv_{C_i}(t)}{dt} = \frac{I_{BATT} - I_L}{C_i} \quad (3-10)$$

จากนั้นพิจารณากรณีที่ $S1$ เปิด (OFF) และ $S2$ ปิด (ON) การทำงานของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่ชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง กรณีที่ $S1$ “OFF” และ $S2$ “ON”

- พิจารณากรอบที่ 1 โดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์และการประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็กดังสมการที่ (3-2) นั่นคือ $v_{C_o}(t) = V_{C_o}$ จะได้

$$v_L(t) + v_{C_o}(t) - V_{BATT} = 0$$

$$v_L(t) = V_{BATT} - V_{C_o} \quad (3-11)$$

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{BATT} - V_{C_o}$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_{BATT} - V_{C_o}}{L} \quad (3-12)$$

- พิจารณาโนด A โดยใช้กฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์และใช้การประมาณการกระแสเพื่อขนาดเล็กดังสมการที่ (3-2) นั่นคือ $i_L(t) = I_L$ จะได้

$$i_L(t) - i_{CPL}(t) - i_{C_o}(t) = 0$$

$$i_{C_o}(t) = I_L - I_{CPL} \quad (3-13)$$

$$C_o \frac{dv_{C_o}(t)}{dt} = I_L - \frac{V_{C_o}}{R_{CPL}}$$

$$\frac{dv_{C_o}(t)}{dt} = \frac{I_L}{C_o} - \frac{V_{C_o}}{R_{CPL}C_o} \quad (3-14)$$

- พิจารณาโนด B และดำเนินการวิเคราะห์เช่นเดียวกับโนด A จะได้

$$i_{BATT}(t) - i_L(t) - i_{C_i}(t) = 0$$

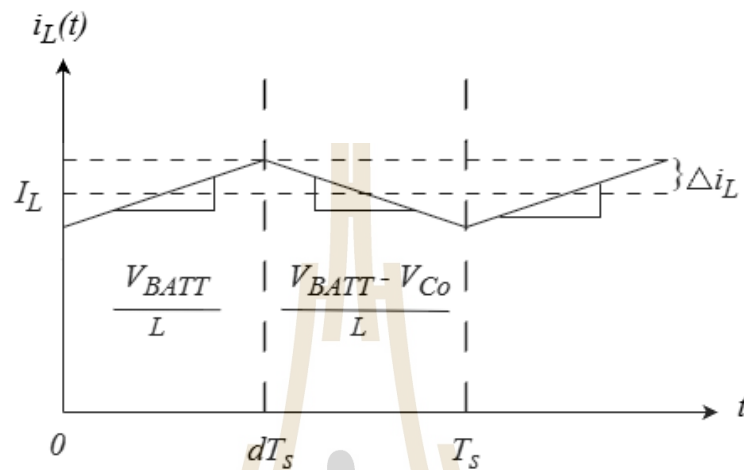
$$i_{C_i}(t) = I_{BATT} - I_L \quad (3-15)$$

$$C_i \frac{dv_{C_i}(t)}{dt} = I_{BATT} - I_L$$

$$\frac{dv_{C_i}(t)}{dt} = \frac{I_{BATT} - I_L}{C_i} \quad (3-16)$$

ดังนั้นจากการวิเคราะห์วงจรดังกล่าวข้างต้นจะได้สมการอนุพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและสมการอนุพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวาดกราฟ $i_L(t)$ และ $v_{C_o}(t)$ จากนั้นหาความชันของกราฟดังกล่าว เพื่อหาสมการการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจร โดยสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

จากสมการอนุพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L)
 ดังสมการที่ (3-6) และสมการที่ (3-12) สามารถแสดงเป็นกราฟของ $i_L(t)$ ได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กราฟ $i_L(t)$ ของวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่ชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

จากรูปที่ 3.7 เมื่อพิจารณาในช่วง $t=0$ ถึง $t=dT_s$ จะสามารถหา
 ความชันของกราฟได้จาก

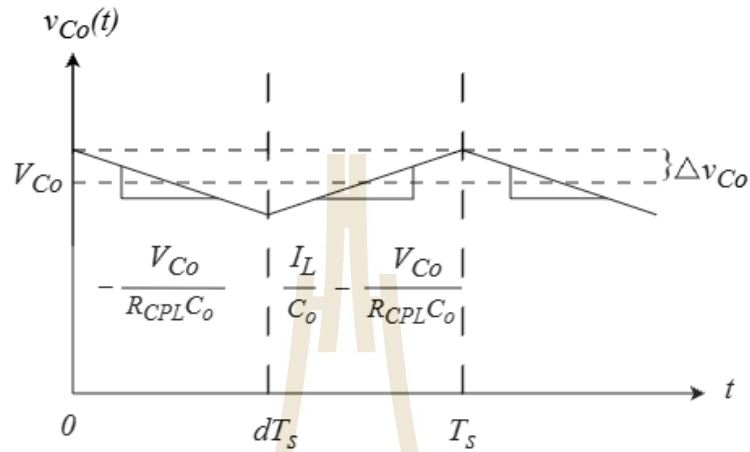
$$\text{slope} = m = \tan(\theta) = \frac{2\Delta i_L}{dT_s} = \frac{V_{BATT}}{L}$$

จากนั้นจัดรูปสมการจะได้สมการสำหรับการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ
 ของวงจรที่พิจารณาแสดงได้ดังสมการที่ (3-17)

$$L \geq \frac{dT_s V_{BATT}}{2\Delta i_L} \quad (3-17)$$

โดยที่ L คือค่าตัวเหนี่ยวนำ T_s คือ คาบในการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลัง (มีค่าเท่ากับ $1/f_s$
 เมื่อ f_s คือความถี่ในการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลัง) และ Δi_L คือ กระแสพลั่วของ
 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

จากสมการอนุพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (v_{C_o})
 ดังสมการที่ (3-8) และสมการที่ (3-14) สามารถแสดงเป็นกราฟของ $v_{C_o}(t)$ ได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 กราฟ $v_{C_o}(t)$ ของวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่ชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

จากรูปที่ 3.8 เมื่อพิจารณาในช่วง $t=0$ ถึง $t=dT_s$ จะสามารถหา
 ความชันของกราฟได้จาก

$$\text{slope} = m = \tan(\theta) = \frac{2\Delta v_{C_o}}{dT_s} = -\frac{V_{C_o}}{R_{CPL}C_o}$$

จากนั้นจัดรูปสมการจะได้สมการสำหรับการออกแบบค่าตัวเก็บประจุ
 ของวงจรที่พิจารณาแสดงดังสมการที่ (3-18)

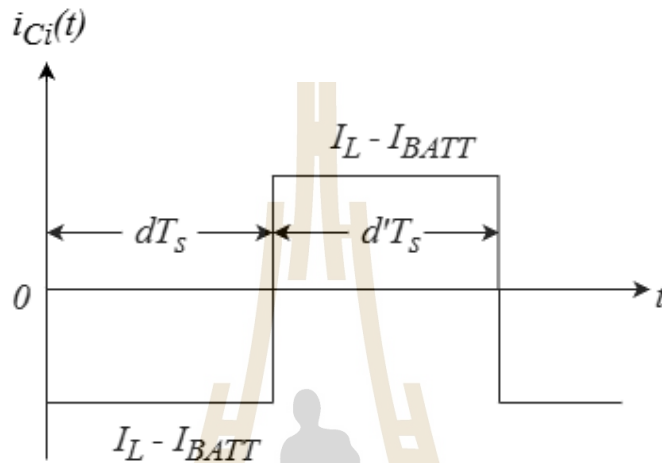
$$C_o \geq \frac{dT_s V_{C_o}}{2\Delta v_{C_o} R_{CPL}} \quad (3-18)$$

$$\text{เมื่อ } V_{C_o} = \frac{V_{BATT}}{(1-d)} \text{ จัดรูปสมการจะได้}$$

$$C_o \geq \frac{dT_s V_{BATT}}{2\Delta v_{C_o} R_{CPL}(1-d)} \quad (3-19)$$

โดยที่ C_o คือ ค่าตัวเก็บประจุทางด้านตีสี่บัส และ Δv_{C_o} คือ แรงดันพลั่วของแรงดันไฟฟ้าตีสี่บัส

ลำดับต่อมาพิจารณาตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่ ซึ่งจากสมการกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่ ดังสมการที่ (3-9) และสมการที่ (3-15) สามารถแสดงเป็นกราฟของ $i_{Ci}(t)$ ได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กราฟการทำงานของ $i_{Ci}(t)$ ของวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่ชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

เมื่อพิจารณาการหาพื้นที่ใต้กราฟของรูปที่ 3.9 และใช้หลักการสมดุลประจุในตัวเก็บประจุตั้งสมการที่ (3-4) นั่นคือ $\langle I_C \rangle = 0$ จะได้

$$\frac{(I_L - I_{BATT})dT_s - (I_L - I_{BATT})(1-d)T_s}{T_s} = 0$$

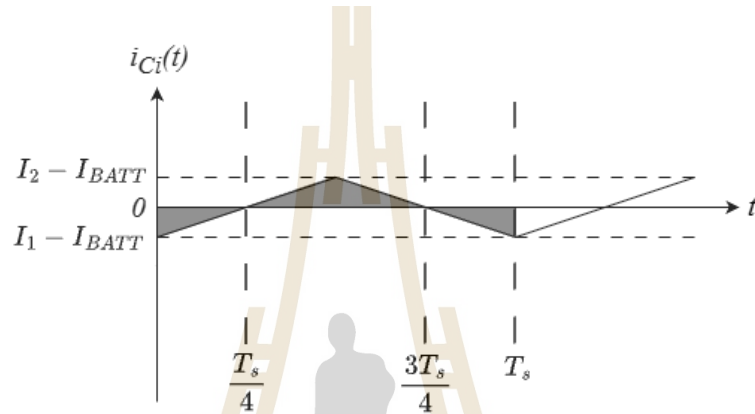
จัดรูปสมการข้างต้นใหม่จะได้ว่า

$$I_L = I_{BATT} \quad (3-20)$$

ดังนั้นจาก $I_L = I_{BATT}$ ดังสมการที่ (3-20) จะทำให้สมการอนุพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่ดังสมการที่ (3-10) และสมการที่ (3-16) มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งนำมาเขียนใหม่แสดงได้ดังสมการที่ (3-21)

$$\frac{dv_{Ci}(t)}{dt} = \frac{I_{BATT} - I_L}{C_i} = 0 \quad (3-21)$$

จากสมการที่ (3-21) ที่มีค่าเท่ากับศูนย์ทำให้ไม่สามารถนำกราฟ $v_{C_i}(t)$ มาใช้พิสูจน์หาสมการออกแบบค่าตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่ได้โดยตรง ดังนั้นการออกแบบจึงจะพิจารณากราฟของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่ $i_{C_i}(t)$ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยอาศัยการหาพื้นที่ใต้กราฟในช่วงที่ตัวเก็บประจุมีการชาร์จและคายกระแสสูงสุด เนื่องจากที่สภาวะคงตัวค่าเฉลี่ยของ $i_{C_i}(t)$ จะมีค่าเท่ากับศูนย์



รูปที่ 3.10 กราฟ $i_{C_i}(t)$ ของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

จากรูปที่ 3.10 เมื่อกำหนดให้ I_1 และ I_2 คือ กระแสของตัวเก็บประจุที่มีการคายและชาร์จสูงสุดตามลำดับ และเมื่อหาพื้นที่ใต้กราฟของกราฟดังกล่าวจะได้ว่า

$$i_{C_i} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_{C_i}(t) dt$$

$$i_{C_i} = \frac{\frac{1}{2} \times \frac{T_s}{2} \times (I_2 - I_{BATT}) - 2 \times \frac{1}{2} \times \frac{T_s}{4} \times (I_1 - I_{BATT})}{T_s}$$

$$i_{C_i} = \frac{(I_2 - I_1)}{4} \quad (3-22)$$

ในสภาวะอยู่ตัวกระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับ กระแสแบตเตอรี่ ($I_L = I_{BATT}$) ดังนั้นผลต่างระหว่างกระแสชาร์จสูงสุดกับกระแสแบตเตอรี่ ($I_2 - I_{BATT}$) จึงมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของ กระแสล้นของตัวเหนี่ยวนำ (Δi_L) จากการพิจารณา

การเปลี่ยนแปลงของกระแสทั้งหมด จะได้ว่า $I_2 - I_1 = 2\Delta i_L$ ซึ่งเมื่อนำความสัมพันธ์ดังกล่าวแทนลงในสมการ (3-22) จะได้ดังแสดงในสมการที่ (3-23)

$$I_{C_i} = \frac{\Delta i_L}{2} \quad (3-23)$$

เมื่อพิจารณาสมการของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่ นั่นคือ $i_{C_i} = C_i \frac{dv_{C_i}(t)}{dt}$ และหาปริพันธ์ใน 1 คาบของการสวิตช์จะได้

$$v_{C_i}(T_s) - v_{C_i}(0) = \frac{1}{C_i} \int_0^{T_s} I_{C_i} dt$$

จากนั้นพิจารณาในช่วงที่ตัวเก็บประจุมีการชาร์จกระแสสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 3.10 นั่นคือ ตั้งแต่เวลา $T_s/4$ ถึง $3T_s/4$ จะได้

$$\Delta v_{C_i} = \frac{\Delta i_L}{2C_i} \int_{T_s/4}^{3T_s/4} 1 dt$$

$$\Delta v_{C_i} = \frac{\Delta i_L}{2C_i} \left(\frac{3T_s}{4} - \frac{T_s}{4} \right)$$

$$\Delta v_{C_i} = \frac{T_s \Delta i_L}{4C_i}$$

ดังนั้นจะได้สมการสำหรับการออกแบบค่าตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่ ดังแสดงสมการที่ (3-24)

$$C_i \geq \frac{T_s \Delta i_L}{4 \Delta v_{C_i}} \quad (3-24)$$

โดยที่ C_i คือ ค่าตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่ และ Δv_{C_i} คือ แรงดันพลีวของแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่

จากการพิสูจน์หาสมการสำหรับออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณาทำให้สามารถออกแบบพารามิเตอร์ของวงจรเพื่อให้มีแรงดันปลั๊กของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสและกระแสพลั๊กของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นตามที่ต้องการได้ อย่างไรก็ตามการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจำเป็นต้องดำเนินการร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ซึ่งสามารถพิสูจน์หาได้ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยรายละเอียดของการพิสูจน์จะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

3.3 ทฤษฎีพื้นฐานของการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเป็นวิธีการที่ใช้สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (complex Fourier series) ของตัวแปรสถานะของวงจรเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง ซึ่งอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนสามารถอธิบายรายละเอียดพอสังเขปได้ดังนี้

โดยทั่วไปสัญญาณ $f(t)$ ใด ๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ ซึ่งมีคาบเป็น T สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (Gamelin, 2001) ได้ดังสมการที่ (3-25)

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_k(t) e^{jk\omega_s t} \quad (3-25)$$

โดยที่ $\omega_s = \frac{2\pi}{T}$ และ $\langle x \rangle_k(t)$ คือ สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อน

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป จะใช้ $\langle x \rangle_k(t)$ ของสัญญาณแทนตัวแปรสถานะของระบบ ซึ่งสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนสามารถหาได้จากสมการที่ (3-26)

$$\langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t) e^{-jk\omega_s t} dt \quad (3-26)$$

คุณสมบัติที่สำคัญ 3 ข้อของสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนสำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลัง (T.W. Gamelin, 2000) โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปแสดงได้ดังนี้

ข้อที่ 1: คุณสมบัติของอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลาแสดงได้ดังสมการที่ (3-27)

$$\frac{d}{dt}\langle x \rangle_k = \left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_k - jk\omega \langle x \rangle_k \quad (3-27)$$

ข้อที่ 2: คุณสมบัติของความสัมพันธ์ของการคูณแสดงได้ดังสมการที่ (3-28)

$$\langle xy \rangle_k = \sum_i \langle x \rangle_{k-i} \langle y \rangle_i \quad (3-28)$$

ข้อที่ 3: ถ้า $f(t)$ คือ ฟังก์ชันค่าจริง (real-value periodic waveform) สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนที่ k เป็นค่าติดลบสามารถหาได้จากสมการที่ (3-29)

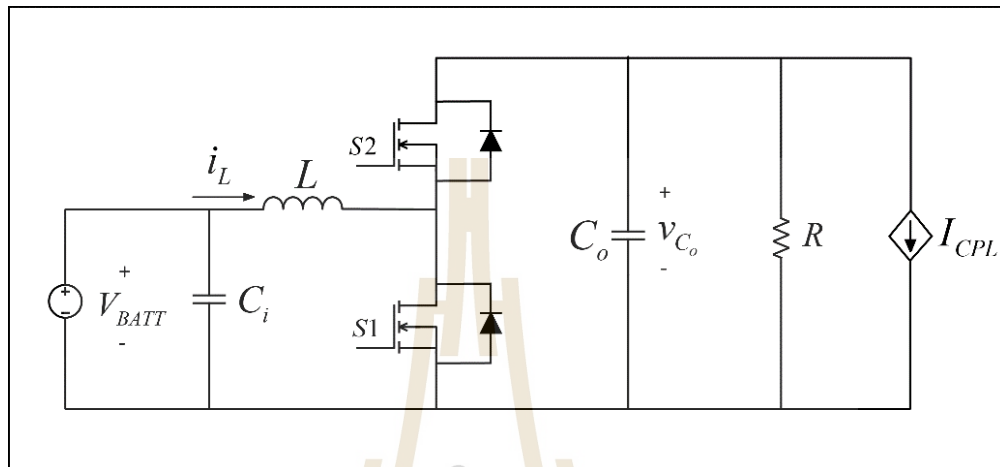
$$\langle x \rangle_{-k} = \overline{\langle x \rangle_k} = \langle x \rangle_k^* \quad (3-29)$$

จากสมการที่ (3-25) และสมการที่ (3-26) ค่า k เป็นตัวบ่งบอกความถูกต้องของการใช้อนุกรมฟูริเยร์ ถ้า k มีค่าเป็นอนันต์ ค่าผิดพลาดจากการประมาณจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และถ้าสัญญาณไม่ปรากฏการสั่นไกวจะสามารถกำหนดให้ค่า $k = 0$ ซึ่งเรียกรวีนีว่า การประมาณค่าอันดับศูนย์ (zero-order approximation) (Mahdavi, Emadi, Bellar, and Ehsani, 1997) หรือถ้าสัญญาณมีการสั่นไกว สามารถกำหนดให้ k มีค่าเป็น -1, 0, 1 ซึ่งจะเรียกรวีนีว่า การประมาณค่าอันดับหนึ่ง (first-order approximation) (A. Emadi, 2004) ดังนั้นการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ยังไม่มีตัวควบคุมสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังหัวข้อที่ 3.4 ดังต่อไปนี้

3.4 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม

วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมและมีโหลดเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแสดงได้ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกใช้แทนแบตเตอรี่ วงจรแปลงผันกำลังที่มีสวิตช์ $S1$ และ $S2$ ที่ทำงานแบบสลับกัน รวมถึงอุปกรณ์พาสซีฟ L คือ ขดลวดเหนี่ยวนำ C_i คือ ตัวเก็บประจุฝั่งขาเข้า C_o คือ ตัวเก็บประจุฝั่งขาออกและ R แทนโหลดต่างๆ ในระบบยานยนต์ไฟฟ้าที่ไม่ใช่ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า และ I_{CPL} คือ

กระแสของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่เป็นพฤติกรรมของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า โดยกระแสดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-30)

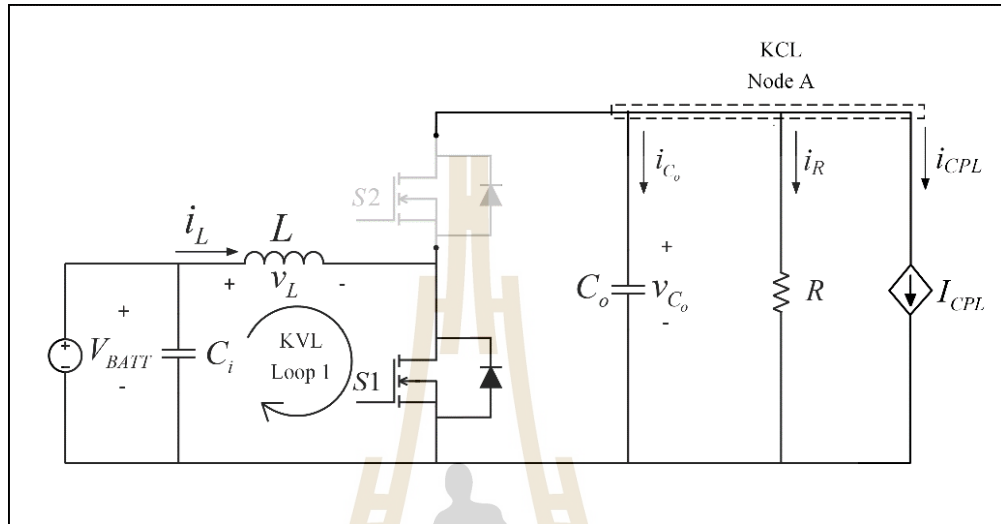


รูปที่ 3.11 วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม

$$I_{CPL} = \frac{P_{CPL}}{v_{C_o}} \quad (3-30)$$

สำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางที่มีโหลดเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในรูปที่ 3.11 จะเริ่มจากการพิสูจน์หาแบบจำลองสวิตช์ (switched model) จากการใช้กฎแรงดันไฟฟ้าและกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ และกำหนดให้ตัวแปรสถานะ คือ $x = \begin{bmatrix} i_L & v_{C_o} \end{bmatrix}^T$ จากนั้นดำเนินการวิเคราะห์ห้วงจรโดยแบ่งโหมดการทำงานเป็นโหมดที่ 1 และโหมดที่ 2 ดังนี้

โหมดที่ 1 : สวิตช์ $S1$ ปิด (ON) และ $S2$ เปิด (OFF) จะได้การทำงานของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรที่พิจารณา กรณีที่สวิตช์ $S1$ “ON” และ $S2$ “OFF”

- พิจารณาวงจรที่ 1 ของวงจรในรูปที่ 3.12 โดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$v_L - V_{BATT} = 0$$

$$i_L = \frac{1}{L} V_{BATT} \quad (3-31)$$

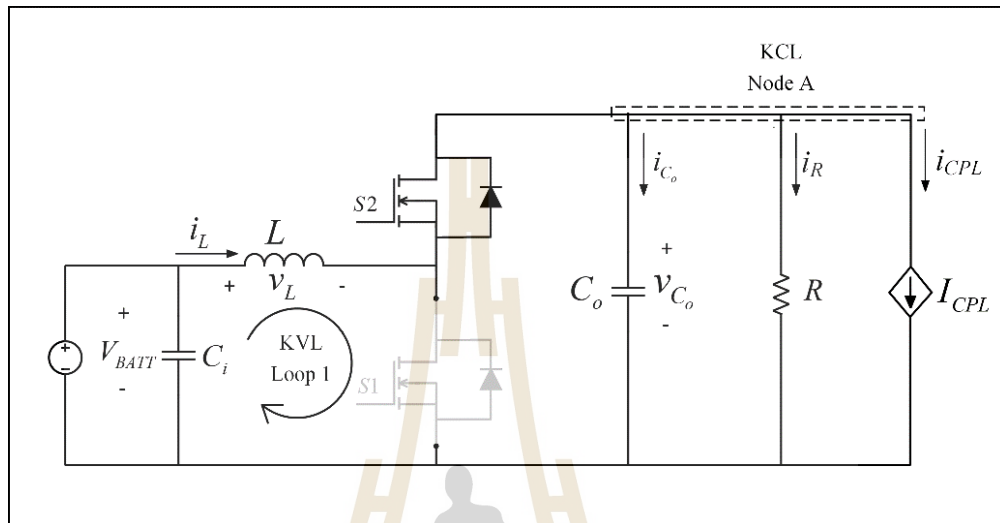
- พิจารณาโนด A ของวงจรในรูปที่ 3.12 โดยใช้กฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$-i_{C_o} - i_R - i_{CPL} = 0$$

$$\dot{v}_{C_o} = -\frac{1}{RC} v_{C_o} - \frac{P_{CPL}}{v_{C_o} C_o} \quad (3-32)$$

ดังนั้นสามารถพิสูจน์หาสมการอนุพันธ์ของ i_L และ v_{C_o} ในโหมดการทำงานที่ 1 ได้ดังสมการที่ (3-31) และสมการที่ (3-32) ตามลำดับ

โหมดที่ 2 : สวิตช์ $S1$ เปิด (OFF) และ $S2$ ปิด (ON) จะได้การทำงานของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรที่พิจารณา กรณีที่สวิตช์ $S1$ “OFF” และ $S2$ “ON”

- พิจารณากรอบที่ 1 ของวงจรในรูปที่ 3.13 โดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$v_L + v_{C_o} - V_{BATT} = 0$$

$$i_L = \frac{1}{L} V_{BATT} - \frac{1}{L} v_{C_o} \quad (3-33)$$

- พิจารณาโนด A ของวงจรในรูปที่ 3.13 โดยใช้กฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$i_L - i_{C_o} - i_R - i_{CPL} = 0$$

$$\dot{v}_{C_o} = \frac{1}{C_o} i_L - \frac{1}{RC_o} v_{C_o} - \frac{P_{CPL}}{v_{C_o} C_o} \quad (3-34)$$

ดังนั้นสามารถพิสูจน์หาสมการอนุพันธ์ของ i_L และ v_{C_o} ในโหมดการทำงานที่ 2 ได้ดังสมการที่ (3-33) และสมการที่ (3-34) ตามลำดับ

จากนั้นนำสมการอนุพันธ์ที่วิเคราะห์ได้ในแต่ละโหมดมาเขียนรวมกันโดยอาศัยฟังก์ชันตรวจสอบ (validation function: h_i) ซึ่งวงจรที่พิจารณามี 2 โหมดการทำงาน ดังนั้นจะมีฟังก์ชันตรวจสอบ 2 ค่า คือ h_1 และ $h_2=1-h_1$ ซึ่งจะกำหนดเงื่อนไขได้ดังนี้

$$S1 \text{ ON และ } S2 \text{ OFF: } h_1=1 \ h_2=0$$

$$S1 \text{ OFF และ } S2 \text{ ON: } h_1=0 \ h_2=1$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3-31) ถึงสมการที่ (3-34) จะสามารถเขียนให้เป็นสมการอนุพันธ์ของ i_L และ v_{C_o} ที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันตรวจสอบได้ดังสมการที่ (3-35) และสมการที่ (3-36)

$$\dot{i}_L = \left(\frac{1}{L} V_{BATT} \right) h_1 + \left(\frac{1}{L} V_{BATT} - \frac{1}{L} v_{C_o} \right) h_2 \quad (3-35)$$

$$\dot{v}_{C_o} = \left(-\frac{1}{RC_o} v_{C_o} - \frac{P_{CPL}}{v_{C_o} C_o} \right) h_1 + \left(\frac{1}{C_o} i_L - \frac{1}{RC_o} v_{C_o} - \frac{P_{CPL}}{v_{C_o} C_o} \right) h_2 \quad (3-36)$$

ลำดับถัดมาจะดำเนินการเปลี่ยนสมการที่ (3-35) และสมการที่ (3-36) ให้เป็นแบบจำลองสวิตช์ในรูปแบบเชิงเส้นคู่ โดยการแทนฟังก์ชันตรวจสอบด้วยฟังก์ชันสวิตช์ (switching function) $u(t)$ เมื่อกำหนดให้ $u(t) = h_1$ และ $h_2 = 1-h_1 = 1-u(t)$ ดังนั้นจะได้สมการอนุพันธ์ที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันการสวิตช์ ($u(t)$) ดังสมการที่ (3-37)

$$\begin{cases} \dot{i}_L = \frac{1}{L} V_{BATT} + \frac{(u(t)-1)}{L} v_{C_o} \\ \dot{v}_{C_o} = \frac{(1-u(t))}{C_o} i_L - \frac{1}{RC_o} v_{C_o} - \frac{P_{CPL}}{C_o v_{C_o}} \end{cases} \quad (3-37)$$

จากสมการที่ (3-37) จะพบว่าเป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาอันเนื่องมาจากการการทำงานของสวิตช์ ซึ่งการนำแบบจำลองดังกล่าวมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมจะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมาจัดผลของการสวิตช์ดังกล่าว เพื่อให้ได้แบบจำลองเป็นแบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมได้ง่ายมากขึ้น

โดยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะเริ่มจากการใช้สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนของ i_L และ v_{C_o} เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง เมื่อพิจารณาการประมาณค่าอันดับศูนย์ ($k = 0$) เนื่องจากมีสมมติฐานว่าการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรที่พิจารณาให้การกระเพื่อมของสัญญาณที่น้อยมาก จึงไม่คิดผลการกระเพื่อมของสัญญาณได้ ดังนั้นจากคุณสมบัติข้อที่ 1 ดังสมการที่ (3-27) สามารถกระจายเทอมของอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อนของ i_L และ v_{C_o} ได้ดังสมการที่ (3-38) และสมการที่ (3-39) และจากสมการทั้งสองสามารถกำหนดตัวแปรสถานะของวงจรได้ดังสมการที่ (3-40) และสมการที่ (3-41)

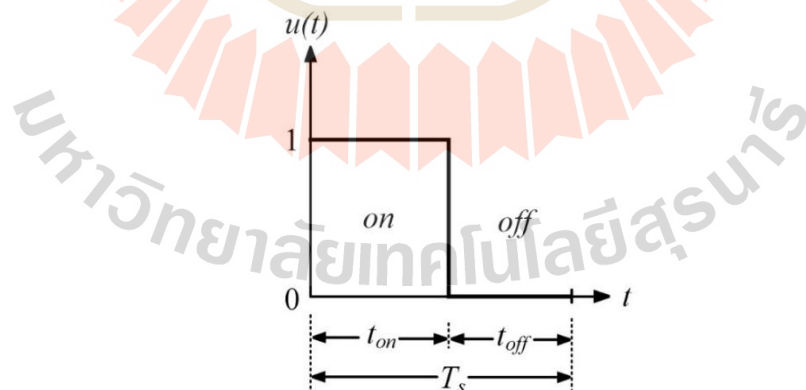
$$i_L = \langle i_L \rangle_0 \quad (3-38)$$

$$v_{C_o} = \langle v_{C_o} \rangle_0 \quad (3-39)$$

$$\langle i_L \rangle_0 = x_1 \quad (3-40)$$

$$\langle v_{C_o} \rangle_0 = x_2 \quad (3-41)$$

จากนั้นพิจารณาฟังก์ชันการสวิตช์ ($u(t)$) ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับเวลา ดังแสดงในรูป 3.14 และฟังก์ชันดังกล่าวสามารถแทนได้ด้วยสมการที่ (3.42)



รูปที่ 3.14 ฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (3-42)$$

โดยที่ d คือ วัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $0 - 1$
 T_s คือ คาบการสวิตช์

จากรูปที่ 3.14 สามารถหาสัมประสิทธิ์การประมาณค่าอันดับศูนย์ของสัญญาณการสวิตช์ได้
 จากการอาศัยการหาสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนดังสมการที่ (3-26) ร่วมกับสมการที่ (3-42) จะได้ว่า

$$\langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T_s} \int_{t-T}^t f(t) e^{-jk\omega_s t} dt$$

$$\langle u \rangle_0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{dT_s} 1 e^0 dt$$

$$\langle u \rangle_0 = \frac{1}{T_s} [t]_0^{t=dT_s}$$

$$\langle u \rangle_0 = \frac{1}{T_s} \cdot dT_s$$

ดังนั้นจะได้สัมประสิทธิ์การประมาณค่าอันดับศูนย์ของฟังก์ชันการสวิตช์แสดงดัง
 สมการที่ (3-43)

$$\langle u \rangle_0 = d \quad (3-43)$$

เมื่ออาศัยคุณสมบัติข้อที่ 1 ของสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนตามสมการที่ (3-27) โดย
 พิจารณาที่ $k = 0$ ร่วมกับแบบจำลองสวิตช์ที่ได้ดังสมการที่ (3-37) จะได้สมการอนุพันธ์ของ
 ตัวแปรสถานะของแบบจำลองดังสมการที่ (3-44) และสมการที่ (3-45)

$$\langle i_L \rangle_0 = \frac{1}{L} \langle V_{BATT} \rangle_0 - \frac{\langle 1-u \rangle_0}{L} \langle v_{C_o} \rangle_0 - j(0)\omega_s \langle i_L \rangle_0 \quad (3-44)$$

$$\langle \dot{v}_{C_o} \rangle_0 = \frac{\langle 1-u \rangle_0}{C_o} \langle i_L \rangle_0 - \frac{1}{RC_o} \langle v_{C_o} \rangle_0 - \frac{P_{CPL}}{C_o \langle v_{C_o} \rangle_0} - j(0)\omega_s \langle v_{C_o} \rangle_0 \quad (3-45)$$

จากสมการที่ (3-44) จะพบว่า มีเทอมของ $\langle v_{C_o} \cdot u \rangle_0$ ซึ่งเมื่ออาศัยคุณสมบัติข้อที่ 2 ดังสมการที่ (3-28) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \langle xy \rangle_k &= \sum_{i=-\infty}^{\infty} \langle v_{C_o} \rangle_{k-i} \langle u \rangle_i \\ \langle v_{C_o} \cdot u \rangle_0 &= \sum_{i=-\infty}^{\infty} \langle v_{C_o} \rangle_{0-i} \langle u \rangle_i \quad ; i=0 \\ \langle v_{C_o} \cdot u \rangle_0 &= \langle v_{C_o} \rangle_0 \cdot \langle u \rangle_0 \end{aligned}$$

จากนั้นแทนสมการที่ (3-40) สมการที่ (3-41) และสมการที่ (3-43) ลงในสมการที่ (3-44) จะสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (3-46)

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{L} V_{BATT} - \frac{(1-d)}{L} x_2 \quad (3-46)$$

จากสมการที่ (3-45) จะพบว่า มีเทอมของ $\langle i_L \cdot u \rangle_0$ ซึ่งเมื่ออาศัยคุณสมบัติข้อที่ 2 ดังสมการที่ (3-28) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \langle xy \rangle_k &= \sum_{i=-\infty}^{\infty} \langle i_L \rangle_{k-i} \langle u \rangle_i \\ \langle i_L \cdot u \rangle_0 &= \sum_{i=-\infty}^{\infty} \langle i_L \rangle_{0-i} \langle u \rangle_i \quad ; i=0 \\ \langle i_L \cdot u \rangle_0 &= \langle i_L \rangle_0 \cdot \langle u \rangle_0 \end{aligned}$$

และเมื่อแทนสมการที่ (3-40) สมการที่ (3-41) และสมการที่ (3-43) ลงในสมการที่ (3-45) จะสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (3-47)

$$\dot{x}_2 = \frac{(1-d)}{C_o} x_1 - \frac{1}{RC_o} x_2 - \frac{P_{CPL}}{C_o x_2} \quad (3-47)$$

จากสมการที่ (3-46) และสมการที่ (3-47) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมและมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งพิสูจน์ได้จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป แสดงดังสมการที่ (3-48)

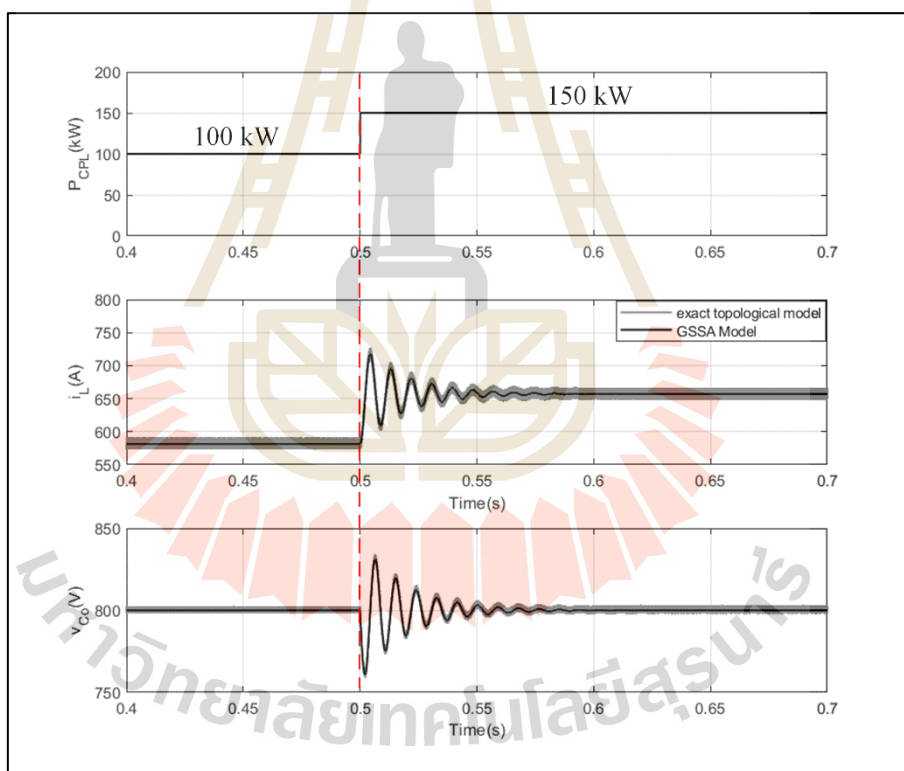
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{L} V_{BATT} - \frac{(1-d)}{L} x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{(1-d)}{C_o} x_1 - \frac{1}{RC_o} x_2 - \frac{P_{CPL}}{C_o x_2} \end{cases} \quad (3-48)$$

อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ได้จำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องก่อนที่จะนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนต่อไป ซึ่งการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับผลการตอบสนองจากชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังใน SimPowerSystem® ของ MATLAB/SIMULINK ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังดังกล่าวสามารถดูรายละเอียดได้จากภาคผนวก ข. โดยค่าความเหนี่ยวนำ (L), ค่าความจุไฟฟ้าทางฝั่งดีซีบัค (C_o) และค่าความจุไฟฟ้าทางฝั่งแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (C_i) สามารถออกแบบได้จากสมการที่ (3-17), (3-18) และ (3-24) และกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 : พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_{BATT}	662 V	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกใช้แทนแบตเตอรี่
L ($\Delta i_L \leq 8.61$ A)	0.663 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันกำลังแบบสองทิศทาง
C_i ($\Delta v_{Ci} \leq 3$ V)	35.877 μ F	ความจุไฟฟ้าทางฝั่งแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
C_o ($\Delta v_{Co} \leq 3$ V)	2 mF	ความจุไฟฟ้าทางฝั่งดีซีบัค
f_s	10 kHz	ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังแบบสองทิศทาง
d	0.1725	วัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังในโหมดบูสต์
R	2.2456 Ω	ความต้านทานโหลดต่าง ๆ ของยานยนต์ไฟฟ้า

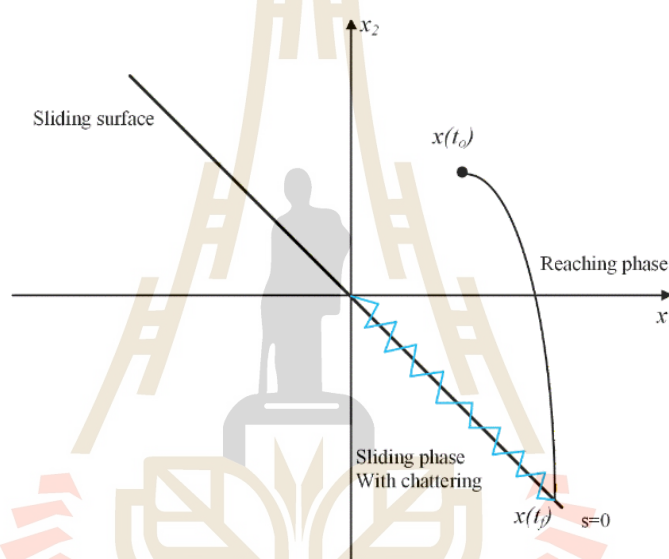
สำหรับเงื่อนไขในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (P_{CPL}) จาก 100 kW ไปเป็น 150 kW ที่เวลา 0.5 วินาที ซึ่งผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ (i_L) และแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ (v_{C_0}) ของวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่ชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.15 ซึ่งจากรูปจะพบว่า ผลตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำและแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (GSSA model) ดังเส้นกราฟสีดำ มีความสอดคล้องและตรงกันกับแบบจำลองแบบแม่นยำ (exact topological model) ดังแสดงด้วยเส้นกราฟสีเทา ทั้งในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นได้ดังสมการที่ (3-48) มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนได้ดังรายละเอียดที่จะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 3.5



รูปที่ 3.15 ผลตอบสนองของระบบกรณีที่ไม่มีความควบคุม

3.5 การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

หัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง โดยในเบื้องต้นจะกล่าวถึง หลักการทำงานพื้นฐานของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน จากนั้นจะเป็นการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่ดำเนินการร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ได้พิสูจน์ไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.4 ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.16 หลักการทำงานของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

หลักการทำงานของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 3.16 เมื่อตัวแปรสถานะของระบบได้แก่ x_1 และ x_2 ซึ่งมีจุดเริ่มต้น $x(t_0)$ จะถูกควบคุมให้มีวิถี (trajectory) เข้าใกล้พื้นผิวการเลื่อนที่ $x(t_f)$ โดยช่วงที่ถูกควบคุมให้มีวิถีเข้าใกล้พื้นผิวการเลื่อนเรียกว่า ระยะการเอื้อม (reaching phase) จากนั้นเมื่อเข้าสู่พื้นผิวการเลื่อนแล้วตัวแปรสถานะจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่สมการพื้นผิวการเลื่อนมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยในที่นี้คือจุดกำเนิด (origin) ซึ่งหมายถึงตัวควบคุมสามารถควบคุมระบบได้ ดังนั้นจากที่กล่าวมาจะสังเกตได้ว่า การใช้งานตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจำเป็นต้องกำหนดสมการพื้นผิวการเลื่อนและตัวแปรสถานะของระบบ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดสมการพื้นผิวการเลื่อนเป็นแบบการรวมกันแบบเชิงเส้นของ

ตัวแปรสถานะ เนื่องจากมีความง่ายในการออกแบบและการนำไปใช้งานจริงในทางปฏิบัติ โดยพื้นผิวการเคลื่อนดังกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ (3-49)

$$S = ae_1 + be_2 + me_3 \quad (3-49)$$

โดยที่ a , b และ m เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุม

จากสมการที่ (3-48) e_1 คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแส e_2 คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า และ e_3 คือ ค่าปริพันธ์ของความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3-50) ดังนี้

$$\begin{cases} e_1 = i_{ref} - i_L \\ e_2 = V_o^{ref} - v_{C_o} \\ e_3 = \int [e_1 + e_2] dt \end{cases} \quad (3-50)$$

เมื่อค่าของกระแสไฟฟ้าอ้างอิง (i_{ref}) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-51)

$$i_{ref} = K [V_o^{ref} - v_{C_o}] \quad (3-51)$$

โดยที่ พารามิเตอร์ K คือ ค่าอัตราขยายความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า

สำหรับการควบคุมโหมดการเลื่อน ในอุดมคติระบบจะเคลื่อนที่บนระนาบพื้นผิวการเลื่อนไปยังตำแหน่งที่สมการพื้นผิวการเลื่อนเท่ากับศูนย์ ($S = 0$) ซึ่งจะทำให้สมการอนุพันธ์ของสมการพื้นผิวการเลื่อนมีค่าเท่ากับศูนย์ ($\dot{S} = 0$) ด้วยเพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะการควบคุม ดังนั้นเมื่อพิจารณาหาสมการอนุพันธ์ของสมการพื้นผิวการเลื่อนของตัวควบคุมที่นำเสนอ โดยอาศัยสมการที่ (3-49) ร่วมกับสมการที่ (3-50) และสมการที่ (3-51) จะได้สมการอนุพันธ์ของสมการพื้นผิวการเลื่อนแสดงได้ดังสมการที่ (3-52)

$$\dot{S} = a\dot{i}_{ref} - a\dot{i}_L + b\dot{V}_o^{ref} - b\dot{v}_{C_o} + m[(K+1)[V_o^{ref} - v_{C_o}] - i_L] \quad (3-52)$$

จากสมการที่ (3-52) จะสังเกตได้ว่า มีอนุพันธ์ของตัวแปรสถานะของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา นั่นคือ i_L และ v_{C_o} ปรากฏอยู่ในสมการ ซึ่งอนุพันธ์ดังกล่าวสามารถหาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิสูจน์หาได้ดังสมการที่ (3-48) ดังนั้นเมื่อแทนแบบจำลองดังกล่าวลงในสมการที่ (3-52) พร้อมกับการพิจารณาภายใต้เงื่อนไข $\dot{S} = 0$ และกำหนดให้ค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ สัญญาณการควบคุม $d = u_{eq}$ จะแสดงได้ดังสมการที่ (3-53)

$$0 = -aK \left[\frac{(1-u_{eq})}{C_o} i_L - \frac{P_{CPL}}{C_o v_{C_o}} \right] - a \left[\frac{1}{L} V_{BATT} + \frac{(u_{eq}-1)}{L} v_{C_o} \right] - b \left[\frac{(1-u_{eq})}{C_o} i_L - \frac{P_{CPL}}{C_o v_{C_o}} \right] + m[(K+1)[V_o^{ref} - v_{C_o}] - i_L] \quad (3-53)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (3-53) ใหม่ จะได้สมการของสัญญาณควบคุมสำหรับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วบัสของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนดังสมการที่ (3-54) ดังนี้

$$u_{eq} = \frac{[aLK + bL]i_L v_{C_o} - [aLK + bL]P_{CPL} + aC_o V_{BATT} v_{C_o} - aC_o v_{C_o}^2 - mLC_o v_{C_o} [(K+1)[V_o^{ref} - v_{C_o}] - i_L]}{[aLK + bL]i_L v_{C_o} - aC_o v_{C_o}^2} \quad (3-54)$$

ในทางปฏิบัติหรือการใช้งานจริงสัญญาณการควบคุม (u_{eq}) ที่ได้จากสมการที่ (3-54) อาจเกินช่วงของสัญญาณเปรียบเทียบหรือสัญญาณพาหะ (carrier signal) ที่มีแอมพลิจูด 0-10 V ซึ่งอาจทำให้การสร้างสัญญาณพัลส์ด้วยวิธีการมอดูเลต (pulse width modulation: PWM) เกิดความคลาดเคลื่อนและส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วบัสได้ตามที่ต้องการ ดังนั้นเพื่อป้องกันสัญญาณการควบคุมไม่ให้เกินขอบเขตของสัญญาณเปรียบเทียบจึงจำเป็นต้องมีการปรับสภาพสัญญาณ (signal conditioning) โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีการแปลงเชิงเส้นซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดการแปลงเชิงเส้นได้ดังนี้

สมการเชิงเส้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-55)

$$Y = \frac{(X - X_{\min})(Y_{\max} - Y_{\min})}{X_{\max} - X_{\min}} + Y_{\min} \quad (3-55)$$

โดยที่ Y คือ ค่าเอาต์พุต

X คือ ค่า u_{eq}

$Y_{\max}$ คือ ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณเปรียบเทียบ

$Y_{\min}$ คือ ค่าแอมพลิจูดต่ำสุดของสัญญาณเปรียบเทียบ

X_{min} คือ ขอบต่ำสุดของ u_{eq}

X_{max} คือ ขอบสูงสุดของ u_{eq}

เมื่อกำหนดให้ค่าแอมพลิจูดต่ำสุดและสูงสุดของสัญญาณเปรียบเทียบกับ 0 และ 10 V ตามลำดับ และขอบต่ำสุดและสูงสุดของ u_{eq} เท่ากับ -100000 และ +100000 ตามลำดับ จะได้สมการเชิงเส้นสำหรับเงื่อนไขดังกล่าวดังสมการที่ (3-56) และเมื่อแทนสมการที่ (3-54) ลงในสมการที่ (3-56) จะได้สมการสัญญาณการควบคุมที่ผ่านการปรับสภาพสัญญาณแสดงดังสมการที่ (3-57)

$$Y = \frac{(X - (-100000))(10 - 0)}{100000 + 100000} + 0$$

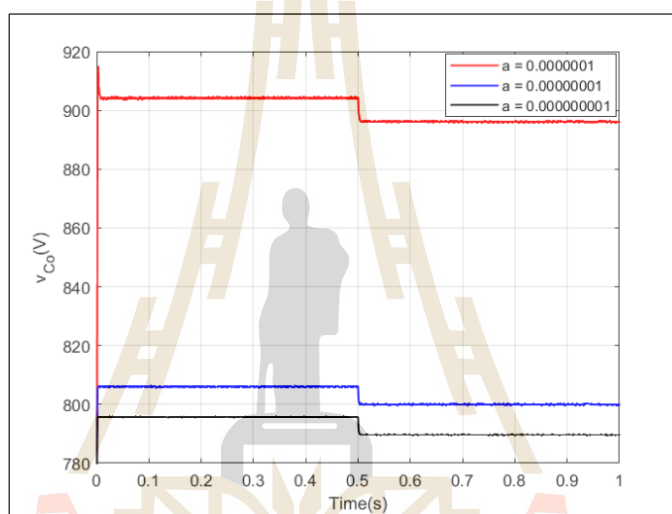
$$Y = 0.00005X + 5 \quad (3-56)$$

$$u_{eq} = 0.00005 \left(\frac{[aLK + bL]i_L v_{Co} - [aLK + bL]P_{CPL} + aC_o V_{BATT} v_{Co} - aC_o v_{Co}^2 - mLC_o v_{Co} [(K+1)[V_o^{ref} - v_{Co}] - i_L]}{[aLK + bL]i_L v_{Co} - aC_o v_{Co}^2} \right) + 5 \quad (3-57)$$

จากสมการที่ (3-57) จะสังเกตได้ว่า มี a , b , m และ K ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมตการเคลื่อนที่จำเป็นต้องมีการออกแบบ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้อาศัยวิธีการสุ่มค่าเนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าวไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการออกแบบ และจะใช้การตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกใน SimPowerSystem® ของ MATLAB/SIMULINK ซึ่งชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังดังกล่าวสามารถดูรายละเอียดได้จากภาคผนวก ข. โดยในการสุ่มค่าพารามิเตอร์และการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมจะกำหนดเงื่อนไขให้โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 10 kW ไปเป็น 20 kW เมื่อเวลาผ่านไป 0.5 วินาที และจะพิจารณาผลการตอบสนองตั้งแต่เวลา 0.5 วินาทีเป็นต้นไป โดยผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมตการเคลื่อนที่ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

- การออกแบบค่าพารามิเตอร์ a

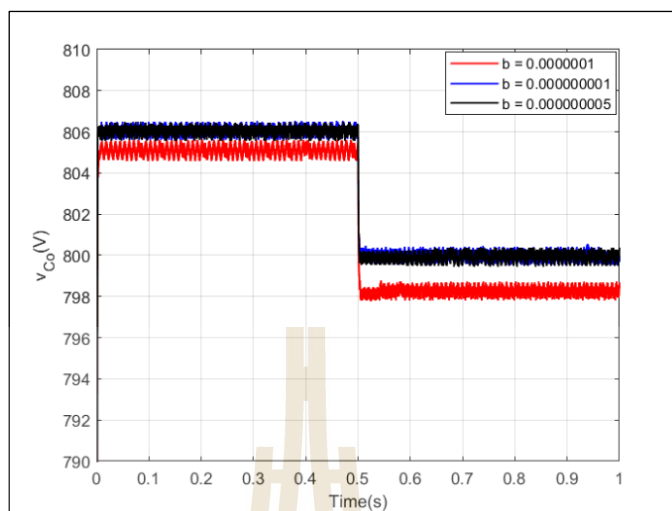
เมื่อกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ a เท่ากับ 0.00000001, 0.00000005 และ 0.000000001 โดยคงค่าพารามิเตอร์ $b = 0.000000001$, $m = 29$ และ $K = 1.5$ ผลการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 3.17 ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่า ถ้าพารามิเตอร์ $a = 0.000000001$ ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าดีซีบัสมีค่าคงที่ที่ 800 V ได้ แต่เมื่อค่าพารามิเตอร์ $a = 0.000000005$ และ 0.000000001 จะไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้เป็นไปตามที่ต้องการที่ 800 V ได้



รูปที่ 3.17 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ a

- การออกแบบค่าพารามิเตอร์ b

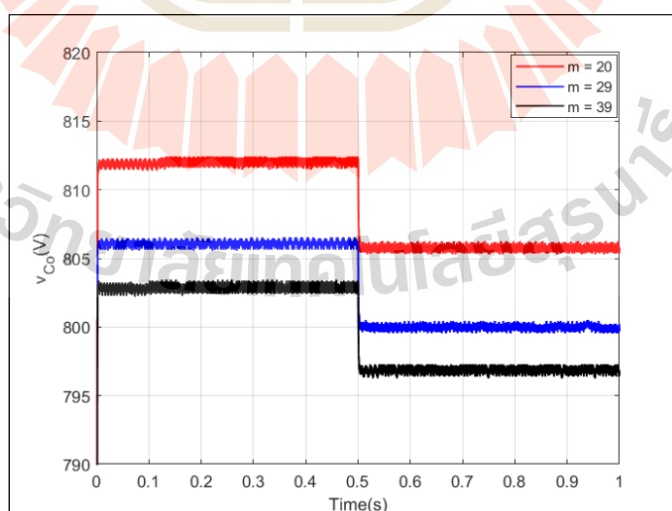
เมื่อกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ b เท่ากับ 0.00000001, 0.000000001 และ 0.000000005 โดยคงค่าพารามิเตอร์ $a = 0.000000001$, $m = 29$ และ $K = 1.5$ ผลการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 3.18 ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่า ถ้าพารามิเตอร์ $b = 0.0000000001$ และ $b = 0.0000000005$ ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าดีซีบัสมีค่าคงที่ที่ 800 V ได้ แต่เมื่อค่าพารามิเตอร์ $b = 0.00000001$ จะไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้เป็นไปตามที่ต้องการที่ 800 V ได้



รูปที่ 3.18 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ b

- การออกแบบค่าพารามิเตอร์ m

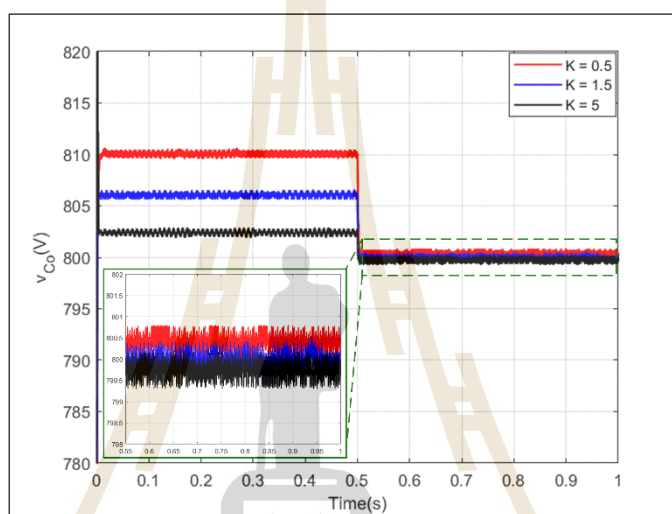
เมื่อกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ m เท่ากับ 20, 29 และ 39 โดยคงค่าพารามิเตอร์ $a = 0.000000001$, $b = 0.0000000001$ และ $K = 1.5$ ผลการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 3.19 ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่า ถ้าพารามิเตอร์ $m = 29$ ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้แรงดันดีซีบัสมีค่าคงที่ที่ 800 V ได้ แต่เมื่อค่าพารามิเตอร์ $m = 20$ และ 39 จะไม่สามารถควบคุมแรงดันดีซีบัสให้เป็นไปตามที่ต้องการที่ 800 V ได้



รูปที่ 3.19 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ m

- การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K

เมื่อกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ K เท่ากับ 0.5, 1.5 และ 5 โดยคงค่าพารามิเตอร์ $a = 0.00000001$, $b = 0.000000001$ และ $m = 29$ ผลการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 3.20 ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่า ถ้าพารามิเตอร์ K ทั้ง 3 ค่าข้างต้น ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้แรงดันดีซีบัสมีค่าคงที่ที่ 800 V ได้ แต่อย่างไรก็ตาม $K = 1.5$ จะมีค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวที่น้อยที่สุด

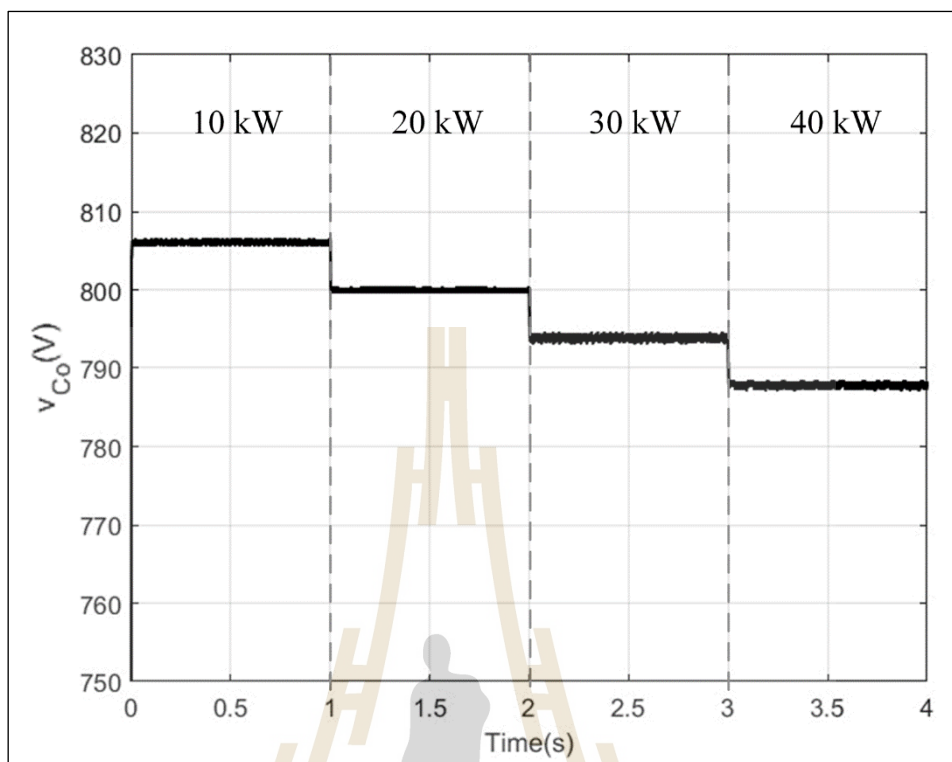


รูปที่ 3.20 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ K

ดังนั้นจากการออกแบบและตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมดังรายละเอียดที่ได้นำเสนอข้างต้นจะได้ชุดพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงได้ดังตารางที่ 3.2 ดังนี้

ตารางที่ 3.2 : ชุดพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

พารามิเตอร์	ขนาด
a	0.000000001
b	0.000000001
m	29
K	1.5



รูปที่ 3.21 ผลการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

ชุดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนดังตารางที่ 3.2 จะได้รับการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบคือ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 10 kW ไปเป็น 20 kW 30 kW และ 40 kW ที่เวลา 1 วินาที 2 วินาที และ 3 วินาที ตามลำดับ ซึ่งผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสแสดงได้ดังรูปที่ 3.21 จากรูปจะสังเกตได้ว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่นำเสนอสามารถควบคุมให้แรงดันดีซีบัสคงที่ที่ 800 V ได้เฉพาะที่ค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเท่ากับ 20 kW เนื่องจากเป็นค่าที่ใช้เป็นเงื่อนไขในการออกแบบสุมค่า ในขณะที่กำลังไฟฟ้าค่าอื่น ๆ ไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสไว้ที่ 800 V ได้ ดังนั้นเพื่อให้สามารถควบคุมระบบได้ในทุก ๆ สภาวะเงื่อนไขการทำงาน ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจำเป็นต้องสามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ได้ตามค่าโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลง โดยจากผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสุมค่าดังรูปที่ 3.19 สำหรับค่าพารามิเตอร์ m แสดงให้เห็นว่า เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ m จะส่งผลต่อการตอบสนองของระบบอย่างเห็นได้ชัดมากที่สุด ซึ่งการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนต่อการตอบสนองของระบบสามารถดูรายละเอียดได้ดังที่นำเสนอไว้ในภาคผนวก ค. ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกนำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ m สำหรับต่อยอดและพัฒนาสู่

การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว (adaptive sliding mode controller) ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว เพื่อนอกจากจะต้องทำให้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสที่ 800 V ได้แล้วยังจะต้องให้ผลตอบสนองของแรงดันที่ดีทั้งในแง่ของช่วงเวลาฟื้นตัว เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน เปอร์เซ็นต์การพุ่งต่ำ และเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2 อีกด้วย ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้าที่พิจารณาจะได้รับการนำเสนอในบทถัดไป

3.6 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 นี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ โดยเนื้อหาในตอนต้นได้กล่าวถึงระบบไฟฟ้าที่พิจารณาและการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของระบบด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป จากนั้นนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่อาศัยสมการพื้นผิวการเลื่อนแบบการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะร่วมกับแบบจำลองที่พิสูจน์ได้ เพื่อสร้างสัญญาณควบคุม และออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีการสุ่มค่า ซึ่งผลจากการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้มีค่าคงที่ที่ 800 V ได้ในทุก ๆ สถานะการทำงานของโหลด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเมื่อค่าโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นการต่อยอดพัฒนาสู่การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว เพื่อนอกจากจะต้องทำให้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสที่ 800 V ได้แล้วยังจะต้องให้ผลตอบสนองของแรงดันที่ดีทั้งในแง่ของช่วงเวลาฟื้นตัว เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน เปอร์เซ็นต์การพุ่งต่ำ และเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2 ได้อีกด้วย โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะปรับเปลี่ยนเฉพาะค่าพารามิเตอร์ m เนื่องจากเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการตอบสนองของระบบมากที่สุด ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่พิจารณาจะได้รับการนำเสนอในบทถัดไป ทั้งนี้การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ด้วยวิธีการสุ่มค่าที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 นี้ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (Suranaree Journal of Science and Technology)

บทที่ 4

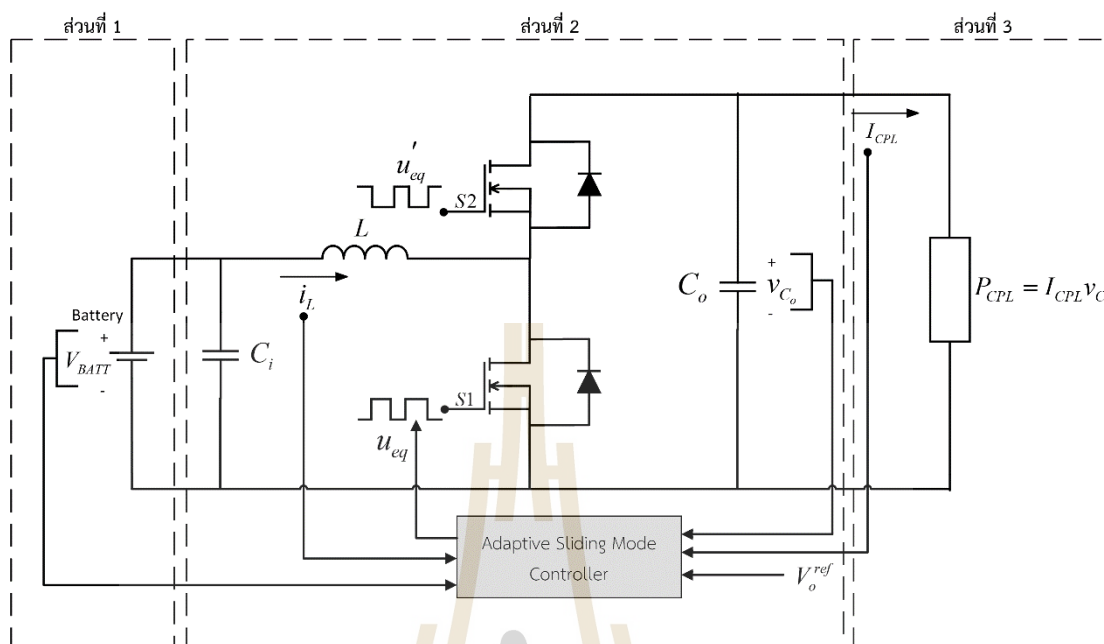
การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยวิธีการค้นหา แบบตาบู่เชิงปรับตัว (ATS)

4.1 บทนำ

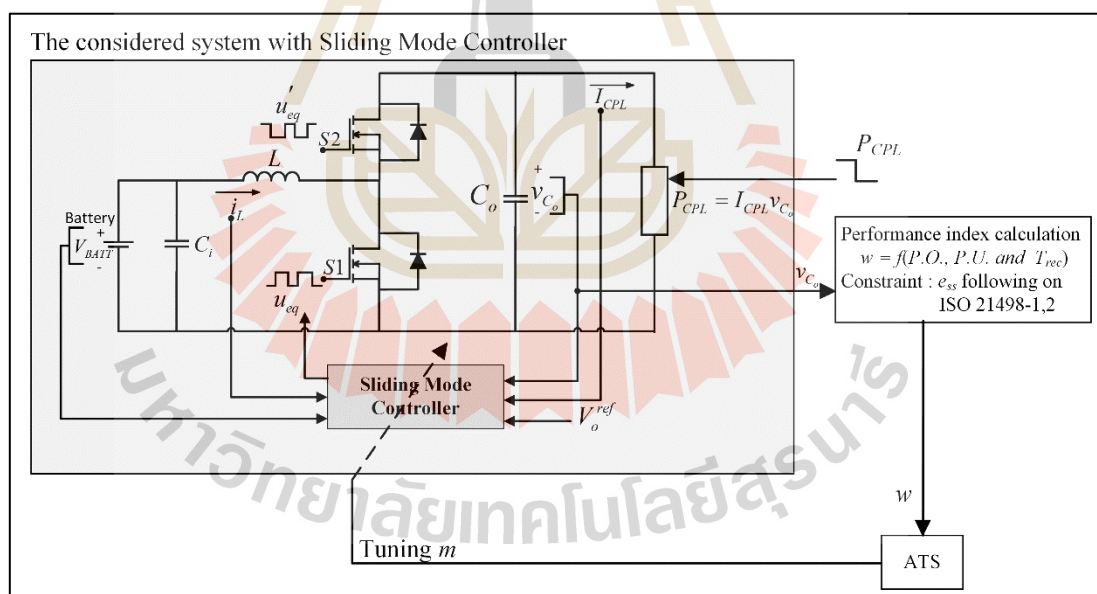
การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทที่ 3 ที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่ออกแบบพารามิเตอร์วิธีการสุ่มค่าไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่ที่ 800 V ได้ เมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องต่อยอดพัฒนาตัวควบคุมดังกล่าวไปสู่การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ได้ตามโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลง เพื่อให้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่ที่ 800 V และได้ผลตอบสนองของระบบที่ดียิ่งขึ้น ดังนั้นบทที่ 4 นี้จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว โดยเริ่มต้นจากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว จากนั้นนำผลการค้นหาที่ได้ไปสร้างสมการสำหรับปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโดยอาศัยวิธีการปรับเส้นโค้ง เพื่อต่อยอดพัฒนาเป็นตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวของระบบยานยนต์ไฟฟ้าที่พิจารณา และเนื้อหาในส่วนสุดท้ายจะเป็นการนำเสนอการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมที่นำเสนอ พร้อมทั้งการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสระหว่างตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน และตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

4.2 การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

ระบบยานยนต์ไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการใช้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจากรูปจะพบว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่ได้รับการต่อยอดพัฒนาให้สามารถปรับตัวได้แทนได้ด้วยพื้นที่ในกรอบสี่เหลี่ยม ในขณะที่องค์ประกอบอื่น ๆ ของระบบยังเหมือนเดิมเช่นเดียวกับระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่อธิบายรายละเอียดและแสดงไว้แล้วดังรูปที่ 3.1 ของบทที่ 3 ที่ผ่านมา



รูปที่ 4.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อใช้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว



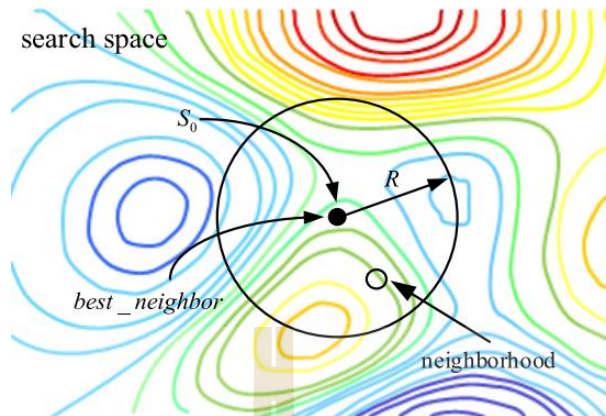
รูปที่ 4.2 แผนภาพการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวสามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจากรูปพบว่า การต่อยอดพัฒนาตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวจะเริ่มต้นจากการวิเคราะห์ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีการสุ่มค่าในบทที่ 3

ที่ผ่านมาที่สรุปได้ว่า มีความจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ m ส่งผลต่อการตอบสนองของระบบมากที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงจะปรับเปลี่ยนเฉพาะค่าพารามิเตอร์ m ในขณะที่พารามิเตอร์อื่น ๆ ของตัวควบคุมจะกำหนดให้คงค่าไว้ คือ a , b และ K ให้เท่ากับ 0.00000001, 0.000000001 และ 1.5 ตามลำดับ ซึ่งกระบวนการออกแบบค่าพารามิเตอร์ m ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวจะเป็นการค้นหาพารามิเตอร์ m จากนั้นจะอาศัยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) คือ ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาใน SimPowerSystem® ของโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ดังแสดงด้วยพื้นที่สีเทาของรูปที่ 4.2 ซึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังกล่าวจะให้ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัส (v_{Co}) ที่จะถูกใช้ในการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (cost value: w) ด้วยสมการประเมินสมรรถนะ (performance index calculation) ที่ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน ($P.O.$) เปอร์เซ็นต์การพุ่งต่ำ ($P.U.$) ช่วงเวลาฟื้นตัว (T_{rec}) และค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (e_{ss}) จากนั้นค่า w ที่คำนวณได้จะถูกส่งไปที่วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวสำหรับการค้นหาพารามิเตอร์ m โดยจะดำเนินการค้นหา m และคำนวณค่า w ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งจะค้นหาพารามิเตอร์ m ที่ให้ค่า w ที่น้อยที่สุดหรือครบรอบการค้นหาสูงสุดของอัลกอริทึม โดยรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนของการค้นหาดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

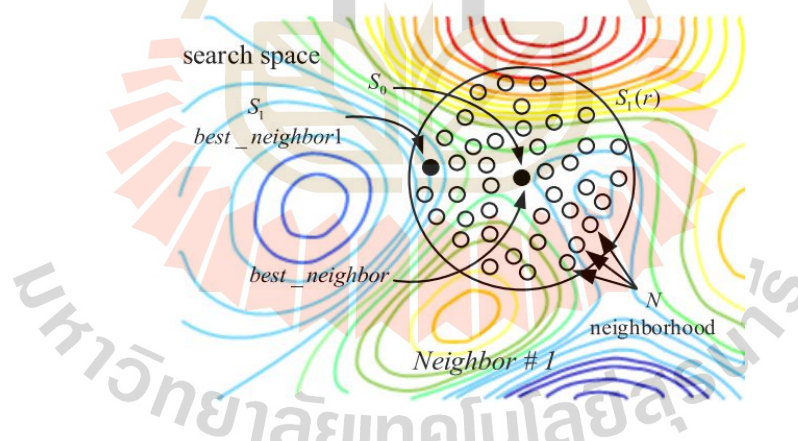
ขั้นตอนที่ 1: กำหนดค่าพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ได้แก่ รัศมีการค้นหา ($radius (R)$) เท่ากับ 50 ตัวประกอบปรับลดค่ารัศมี ($D.F.$) เท่ากับ 1.3 จำนวนคำตอบรอบข้าง ($number\ of\ neighbor$) เท่ากับ 50 รอบการค้นหาสูงสุด ($round_{max}$) เท่ากับ 100 และขอบเขตการค้นหาของค่าพารามิเตอร์ m เท่ากับ 1 ถึง 70 และกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นในการตรวจสอบสมรรถนะคือ การปรับเปลี่ยนค่าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (P_{CPL}) จาก 5 kW ไปเป็น 10 kW

ขั้นตอนที่ 2: สุ่มค่าคำตอบเริ่มต้น (S_0) ภายในขอบเขตของการค้นหา ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 โดยจากรูปคำตอบเริ่มต้น จะเรียกว่า คำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local solution) และกำหนดให้เท่ากับคำตอบรอบข้างที่ดีที่สุด ($best_neighbor$) ดังนั้นเมื่อประยุกต์ใช้งานขั้นตอนดังกล่าวกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ m จะถูกสุ่มค่าภายในขอบเขตการค้นหาที่กำหนด และถูกกำหนดให้เป็นคำตอบรอบข้างที่ดีที่สุด



รูปที่ 4.3 สุ่มค่า S_0 ในขอบเขตการค้นหา

ขั้นตอนที่ 3: สุ่มเลือกคำตอบ (*neighborhood*) จำนวน N คำตอบรอบ ๆ S_0 ภายในขอบเขตของรัศมีการค้นหา และกำหนดให้ $S_I(r)$ คือ ชุดของคำตอบที่มีคำตอบจำนวน N คำตอบ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ดังนั้นเมื่อประยุกต์ใช้งานขั้นตอนดังกล่าวกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จะได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ m จะถูกสุ่มค่าภายในขอบเขตรัศมีการค้นหา เมื่อกำหนดให้ $N = 50$ ดังนั้นจะมีคำตอบคือ ค่าพารามิเตอร์ m มี 50 ค่า



รูปที่ 4.4 การสุ่มเลือกคำตอบรอบ ๆ S_0

ขั้นตอนที่ 4: ประเมินคำตอบที่เป็นสมาชิกของชุดคำตอบ $S_I(r)$ ด้วยสมการประเมินสมรรถนะ โดยกำหนดให้ S_I เป็นคำตอบที่ดีที่สุดของชุดคำตอบ $S_I(r)$ ซึ่ง S_I จะถูกกำหนดให้เป็นคำตอบรอบข้างที่ดีที่สุด 1 (*best_neighbor1*) แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ในขั้นตอนนี้จะประเมินสมาชิกทั้งหมดของชุดคำตอบ $S_I(r)$ และให้คำตอบรอบข้างที่ดีที่สุด 1 ดังนั้นเมื่อประยุกต์ใช้งานขั้นตอนดังกล่าวกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ m ที่สุ่มได้จากขั้นตอนที่ 3 จะถูกประเมินทั้งหมดแล้วให้

คำตอบรอบข้างที่ดีที่สุดของคำตอบรอบ ๆ คำตอบเริ่มต้นภายในขอบเขตของรัศมีการค้นหา ซึ่งในวิทยานิพนธ์จะกำหนดให้การประเมินสมรรถนะพิจารณาจากผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า ดีซีบัสเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 kW ไปเป็น 10 kW ที่เวลา 0.5 วินาที และ จะพิจารณาผลการตอบสนองตั้งแต่วินาทีที่ 0.5 เป็นต้นไปดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.6 โดยการประเมินสมรรถนะจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การประเมินค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวและ ประเมินผลตอบสนองเชิงพลวัตดังนี้

- การประเมินค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว

เพื่อให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2 ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวกำหนดให้มีความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวไม่เกิน $\pm 0.375\%$ ของระดับแรงดันไฟฟ้าดีซีบัส ด้วยเหตุนี้ในกรณีที่ระดับแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสมีค่าเท่ากับ 800 V จะมีขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเท่ากับ ± 3 V ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องประเมินค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัส โดยงานวิทยานิพนธ์กำหนดให้มีเงื่อนไขคือ ถ้าผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสมีค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวนอกเหนือขอบเขต 797-803 V จะกำหนดให้ค่า $w = 10000$ ซึ่งเป็นการปรับโทษ เงื่อนไขดังกล่าวแสดงได้ดังนี้

```

if  $v_{Co} \geq 803$  &  $v_{Co} \leq 797$ 
     $w = 10000$ 
else
     $w = 0$ 
end

```

- การประเมินผลตอบสนองเชิงพลวัต

นอกจากการประเมินค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวแล้ว ผลตอบสนองเชิงพลวัตของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสจะต้องดียิ่งขึ้นด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องประเมินผลตอบสนองเชิงพลวัตของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัส โดยผลตอบสนองดังกล่าวจะถูกประเมินด้วยสมการประเมินสมรรถนะดังสมการที่ (4-1) ดังนี้

$$w = \alpha \left(\frac{T_{rec,ATS}}{T_{rec,CON}} \right) + \beta \left(\frac{P.U. \cdot ATS}{P.U. \cdot CON} \right) + \gamma \left(\frac{P.O. \cdot ATS}{P.O. \cdot CON} \right) \quad (4-1)$$

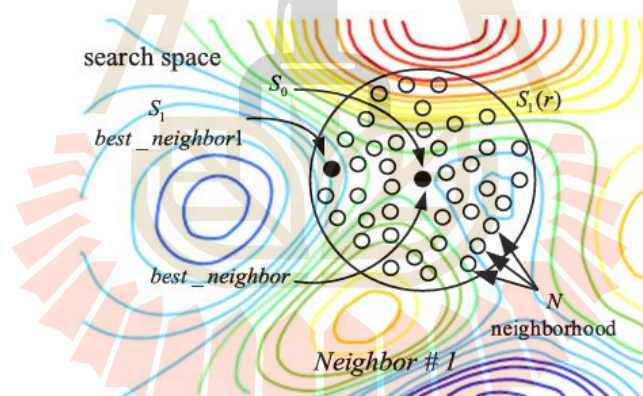
โดยที่ T_{rec} คือ ช่วงเวลาฟื้นตัว

$P.U.$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การฟุ้งต่ำ

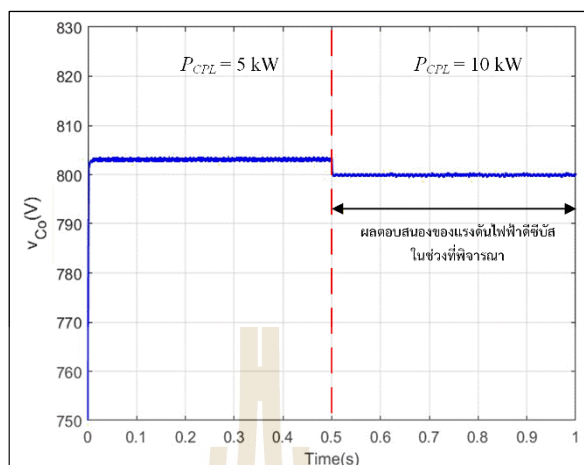
$P.O.$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การฟุ้งเกิน

α, β, γ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความสำคัญ

จากสมการที่ (4-1) งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้กำหนด α , β , γ ให้มีค่าเท่ากับ 0.33, 0.33 และ 0.34 ตามลำดับ ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่า ให้ความสำคัญกับค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน ค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งต่ำ และช่วงเวลาพื้นที่ตัวที่เท่า ๆ กัน โดยที่ $P.O_{ATS}$, $P.U_{ATS}$ และ $T_{rec,ATS}$ เป็นค่าที่ได้จากผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อระบบถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่ค่าพารามิเตอร์ m ได้จากวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ในขณะที่ $P.O_{CON}$, $P.U_{CON}$ และ $T_{rec,CON}$ เป็นค่าที่ได้จากผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อระบบถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมพีโอแบบต่อเรียงกัน ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่โดยทั่วไปนิยมใช้ สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีโอแบบต่อเรียงกันของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัส-บูสต์แบบสองทิศทางสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้จากภาคผนวก จ. ซึ่งสามารถออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีโอแบบต่อเรียงกันได้จาก $K_{pi} = \frac{2\zeta_i \omega_{ni} A_r L}{V_{BATT}}$, $K_{pv} = 2\zeta_v \omega_{nv} C_o$, $K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 A_r L}{V_{BATT}}$ และ $K_{iv} = \omega_{nv}^2 C_o$ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์กำหนดให้ลูปแรงดันไฟฟ้ามีค่า $\zeta_v = 0.85$, $\omega_{nv} = 500$ rad/s และลูปกระแสไฟฟ้ามี่ค่า $\zeta_i = 0.85$, $\omega_{ni} = 5000$ rad/s และ $A_r = 10$ ดังนั้นจะได้ $K_{pi} = 0.8513$, $K_{pv} = 1.7$, $K_{ii} = 2503.7764$ และ $K_{iv} = 500$



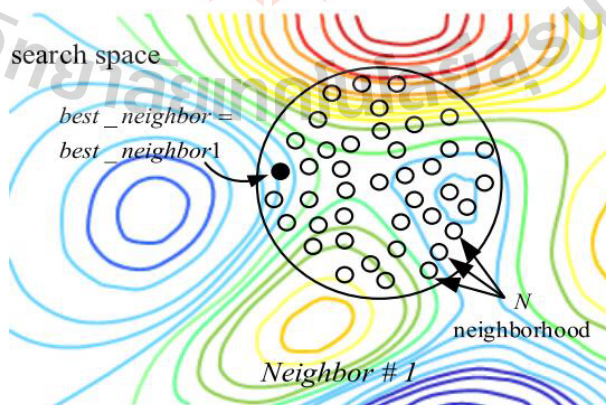
รูปที่ 4.5 สุ่มค่ารอบ ๆ S_0 ที่เป็นคำตอบของชุดคำตอบของ $S_1(r)$



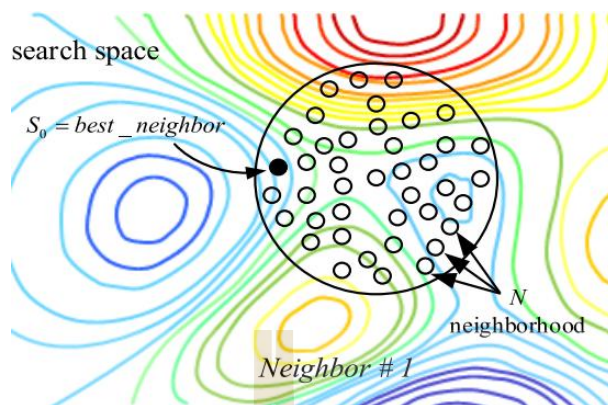
รูปที่ 4.6 ตัวอย่างผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีไซส์ที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะ

ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ m ที่เหมาะสมจะสามารถให้ผลตอบสนองเชิงพลวัตที่ดีและมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัวเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2

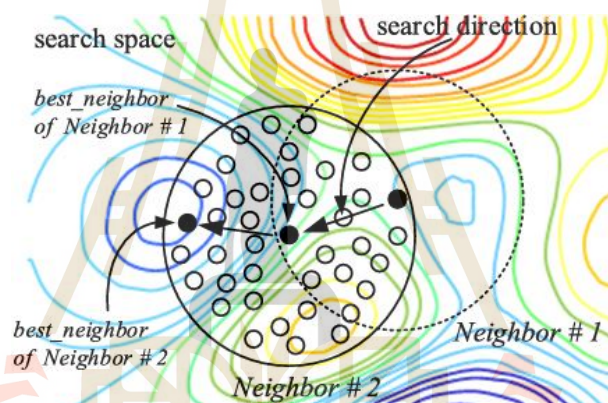
ขั้นตอนที่ 5: ถ้าคำตอบรอบข้างที่ดีที่สุด 1 ($best_neighbor1$) มีค่าที่ดีกว่าคำตอบรอบข้างที่ดีที่สุด ($best_neighbor$) ในขณะนั้นคำตอบรอบข้างที่ดีที่สุดจะเท่ากับคำตอบรอบข้างที่ดีที่สุด 1 ($best_neighbor = best_neighbor1$) ดังนั้นอัลกอริทึมจะกำหนดให้ $S_0 = best_neighbor$ และเก็บค่าไว้ในรายการตาบ (Tabu list) แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าคำตอบรอบข้างที่ดีที่สุด 1 ($best_neighbor1$) ยังคงไม่ใช่คำตอบที่เหมาะสมที่สุด แต่คำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละรอบการค้นหาก็จะเก็บไว้ในรายการตาบและจะใช้เป็นจุดศูนย์กลางของการค้นหาในรอบถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จากนั้นกระบวนการค้นหาจะกลับไปยังขั้นตอนที่ 3 และดำเนินการซ้ำจนกว่าจะได้คำตอบที่ดีที่สุดภายใต้รอบการค้นหาสูงสุด



รูปที่ 4.7 กำหนดให้ $best_neighbor = best_neighbor1$



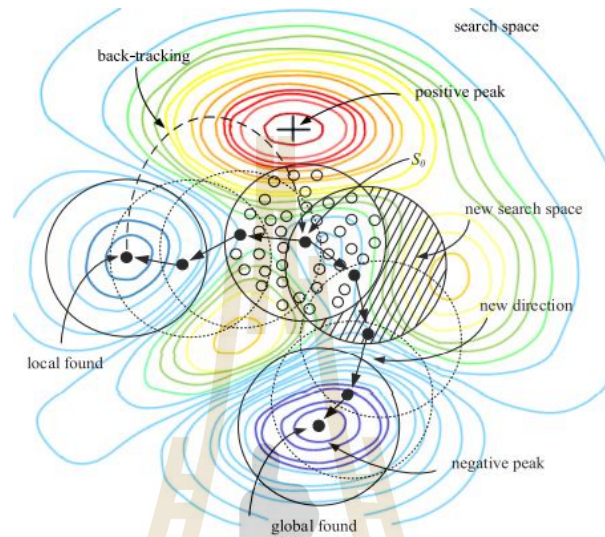
รูปที่ 4.8 กำหนดค่า $S_0 = best_neighbor$



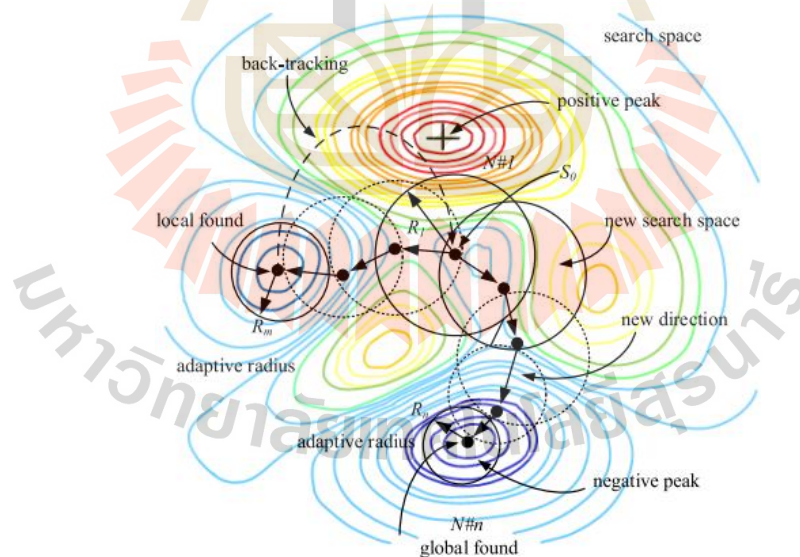
รูปที่ 4.9 กระบวนการค้นหาในรอบถัดไป

ขั้นตอนที่ 6: กระบวนการเดินย้อนรอย (backtracking mechanism) และการปรับตัวของรัศมีของการค้นหา ($radius(R)$) เป็นขั้นตอนที่ถูกเพิ่มเข้ามาในการค้นหาแบบดั้งเดิม ซึ่งในกระบวนการเดินย้อนรอยคำตอบที่ดีที่สุดจากรายการตาบจะถูกเลือกและถูกกำหนดให้เป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับรอบการค้นหาถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยรอบการค้นหาสูงสุดที่จะถูกหาคำตอบซ้ำสำหรับในวิจัยวิทยานิพนธ์จะกำหนดเท่ากับ 10 ดังนั้นกระบวนการเดินย้อนรอยจะกลับไปยังคำตอบที่ดีที่สุดจากรายการตาบหลังจากคำตอบที่ดีที่สุดซ้ำกันมากกว่า 10 ครั้ง ซึ่งกระบวนการนี้สามารถเปลี่ยนทิศทางการค้นหาใหม่ที่เป็นเส้นทางอื่นเพื่อค้นหาคำตอบวงกว้าง ในขณะเดียวกันการปรับรัศมีการค้นหาคือ การปรับลดขอบเขตการค้นหาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งการลดลงของรัศมีสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-2) โดยที่ตัวประกอบปรับลดค่ารัศมีจะเท่ากับ 1.3 เพื่อที่จะหาคำตอบวงกว้างได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น

$$radius_{new}(R_n) = \frac{radius_{old}}{DF} \quad (4-2)$$



รูปที่ 4.10 กลไกการเดินย้อนรอย



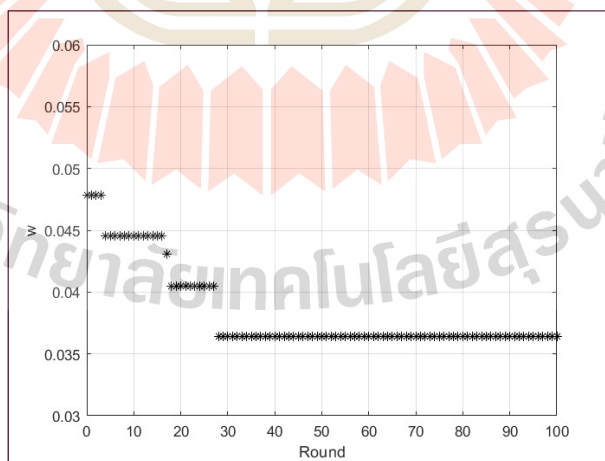
รูปที่ 4.11 การปรับลดค่ารัศมี

ขั้นตอนที่ 7: ทำการปรับเปลี่ยนค่าของโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัวใหม่และเริ่มกระบวนการค้นหาในขั้นตอนที่ 2-6 เพื่อให้สามารถค้นหาค่าพารามิเตอร์ m ในทุก ๆ สถานะการทำงานภายใต้เงื่อนไข

กำลังไฟฟ้าที่ค่าพิกัด (285 kW) โดยการค้นหาจะดำเนินการไปที่ละช่วงและเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของแต่ละช่วงแสดงได้ดังนี้

- ช่วงที่ 1: ปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าจาก 20 kW ไปเป็น 30 kW
- ช่วงที่ 2: ปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าจาก 40 kW ไปเป็น 50 kW
- ช่วงที่ 3: ปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าจาก 60 kW ไปเป็น 70 kW
- ช่วงที่ 4: ปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าจาก 70 kW ไปเป็น 80 kW
- ช่วงที่ 5: ปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าจาก 90 kW ไปเป็น 100 kW
- ช่วงที่ 6: ปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าจาก 140 kW ไปเป็น 150 kW
- ช่วงที่ 7: ปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าจาก 190 kW ไปเป็น 200 kW
- ช่วงที่ 8: ปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าจาก 240 kW ไปเป็น 250 kW
- ช่วงที่ 9: ปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าจาก 280 kW ไปเป็น 285 kW

โปรแกรมการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวสามารถรายละเอียดได้จากภาคผนวก ง. และผลการทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวจำนวน 5 ครั้ง ของแต่ละช่วงการเปลี่ยนแปลงค่า P_{CPL} สามารถดูได้จากภาคผนวก ฉ. ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดกระบวนการจะได้ค่าพารามิเตอร์ m ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจากวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 และกราฟการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดของค่า w แสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การลู่เข้าของค่า w

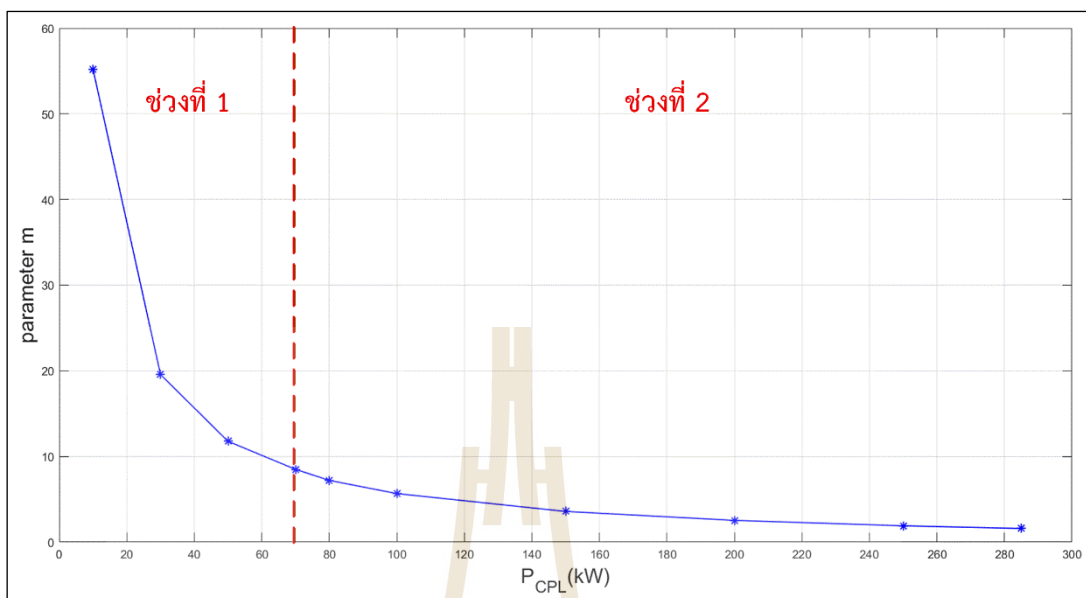
ตารางที่ 4.1 ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ m ที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

การเปลี่ยนแปลงค่า P_{CPL}	ค่าพารามิเตอร์ m	ค่า w
5 kW to 10 kW	56.0895	0.0364
20 kW to 30 kW	19.7998	0.0552
40 kW to 50 kW	11.8473	0.0552
60 kW to 70 kW	8.3302	0.0662
70kW to 80 kW	7.2454	0.0589
90 kW to 100 kW	5.6883	0.0626
140 kW to 150 kW	3.5862	0.0699
190 kW to 200 kW	2.5407	0.0773
240 kW to 250 kW	1.9050	0.0994
280 kW to 285 kW	1.5933	0.0699

จากตารางที่ 4.1 จะพบว่า เมื่อค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าพารามิเตอร์ m จะมีค่าลดลง ซึ่งผลการค้นหาที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่ค่าพารามิเตอร์ m สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามค่าของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลง ดังรายละเอียดที่จะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 4.3

4.3 การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

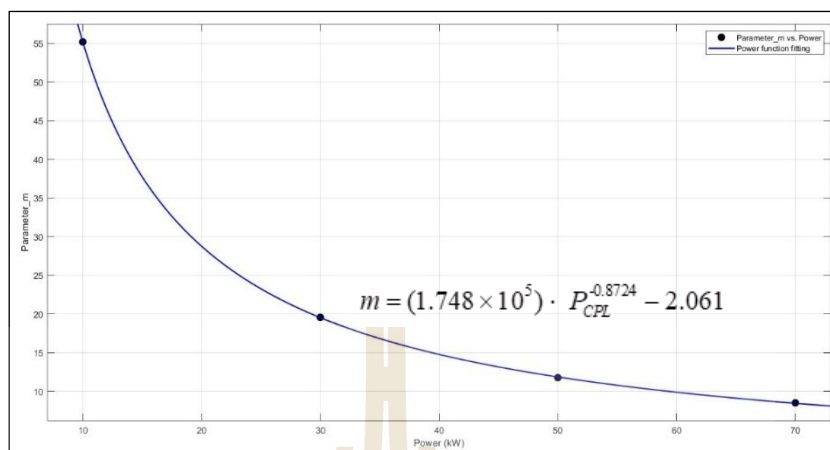
การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว เริ่มต้นด้วยการนำค่าพารามิเตอร์ m ของแต่ละค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ดังตารางที่ 4.1 ไปสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวและค่าพารามิเตอร์ m ซึ่งกราฟดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P_{CPL} และค่าพารามิเตอร์ m

จากรูปที่ 4.13 จะพบว่า สามารถแบ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P_{CPL} และค่าพารามิเตอร์ m ออกเป็น 2 ช่วง ดังแสดงด้วยเส้นประสีแดง โดยช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่ค่ากำลังไฟฟ้าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 70 kW ($P_{CPL} \leq 70$ kW) ซึ่งเป็นช่วงที่มีความชันของกราฟสูงหรือกล่าวคือการเปลี่ยนแปลงของ P_{CPL} ที่เล็กน้อยส่งผลต่อพารามิเตอร์ m ที่ค่อนข้างเยอะ ในขณะที่ช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่ค่ากำลังไฟฟ้ามากกว่า 70 kW ไปจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัด 285 kW (70 kW $< P_{CPL} \leq 285$ kW) ซึ่งเป็นช่วงที่ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงมาก แต่พารามิเตอร์ m มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย ด้วยเหตุนี้จึงเป็นเหตุผลที่งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้แบ่งข้อมูลความสัมพันธ์ดังกล่าว ออกเป็น 2 ช่วง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการสร้างสมการของพารามิเตอร์ m ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยสมการดังกล่าวสามารถสร้างด้วยวิธีการปรับเส้นโค้งที่ใช้สมการกำลัง (power function fitting) ซึ่งมีรูปแบบของสมการคือ $y = a \cdot x^b + c$ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

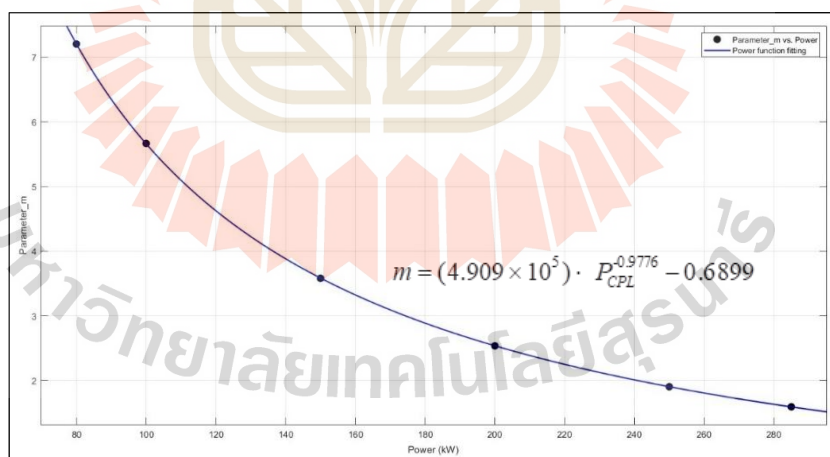
- ช่วงที่ 1 ค่ากำลังไฟฟ้าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 70 kW สามารถสร้างสมการของพารามิเตอร์ m ที่ปรับเปลี่ยนได้ตามค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวดังสมการที่ (4-3) และกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 การสร้างสมการของพารามิเตอร์ m ที่ปรับตัวได้ในช่วง $P_{CPL} \leq 70$ kW

$$m = (1.748 \times 10^5) \cdot P_{CPL}^{-0.8724} - 2.061 \quad (4-3)$$

- ช่วงที่ 2 ค่ากำลังไฟฟ้ามากกว่า 70 kW จนถึงกำลังไฟฟ้าที่ค่าพิกัด 285 kW สามารถสร้างสมการของพารามิเตอร์ m ที่ปรับเปลี่ยนได้ตามค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวดังสมการที่ (4-4) และกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 การสร้างสมการของพารามิเตอร์ m ที่ปรับตัวได้ในช่วง $70 \text{ kW} < P_{CPL} \leq 285 \text{ kW}$

$$m = (4.909 \times 10^5) \cdot P_{CPL}^{-0.9776} - 0.6899 \quad (4-4)$$

จากสมการที่ (4-3) และสมการที่ (4-4) เป็นสมการของพารามิเตอร์ m ที่สามารถแปรเปลี่ยนได้ตามค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีการเปลี่ยนแปลงจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าพิกัดของระบบ ดังนั้นจากรายละเอียดการออกแบบที่ได้นำเสนอมาทั้งหมดจะได้ชุดพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่พิจารณา คือ $a = 0.00000001$ $b = 0.000000001$ และ $K = 1.5$ และที่มีการปรับเปลี่ยนตามค่ากำลังไฟฟ้าด้วยเงื่อนไขคือเมื่อค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 70 kW ค่าพารามิเตอร์ $m = (1.748 \times 10^5) \cdot P_{CPL}^{-0.8724} - 2.061$ ในขณะที่ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดมีค่ามากกว่า 70 kW ค่าพารามิเตอร์ $m = (1.748 \times 10^5) \cdot P_{CPL}^{-0.8724} - 2.061$ ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \text{if } P_{CPL} \leq 70 \text{ kW} \\ & \quad m = (1.748 \times 10^5) \cdot P_{CPL}^{-0.8724} - 2.061 \\ & \text{else} \\ & \quad m = (4.909 \times 10^5) \cdot P_{CPL}^{-0.9776} - 0.6899 \\ & \text{end} \end{aligned}$$

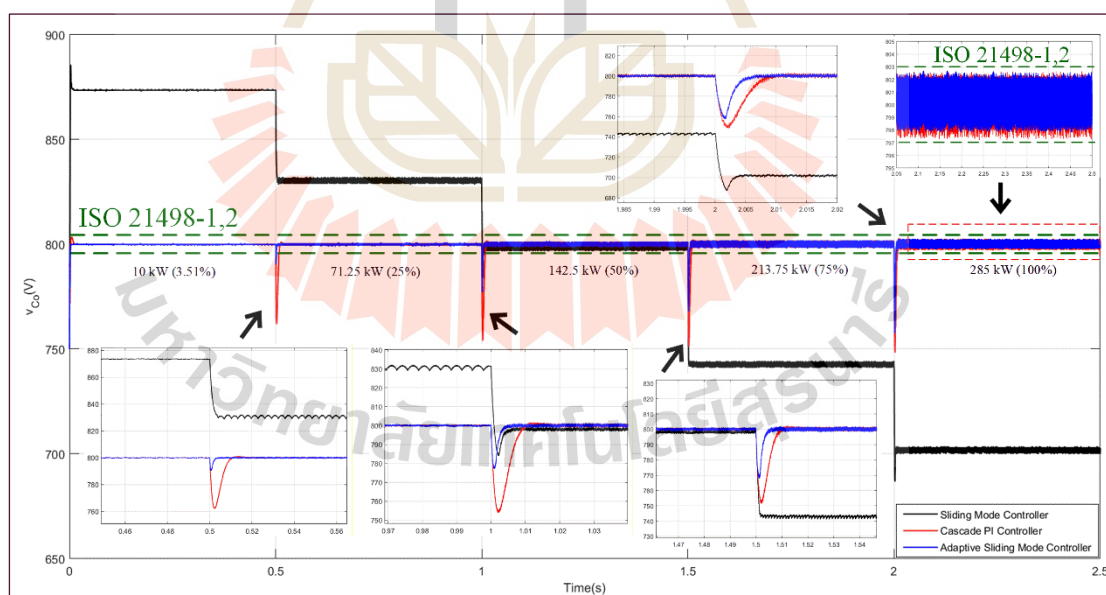
อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการยืนยันว่าตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่นำเสนอสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีไซส์ให้คงที่ที่ 800 V และมีผลตอบสนองเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2 งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงดำเนินการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมดังกล่าวด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังหัวข้อที่ 4.4

4.4 การตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

หัวข้อนี้เป็นการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่นำเสนอสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่พิจารณาด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังใน SimPowerSystem® ของโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของระบบไฟฟ้าและตัวควบคุมที่พิจารณาสามารถดูรายละเอียดได้จากภาคผนวก ข. โดยในการตรวจสอบสมรรถนะจะแบ่งเงื่อนไขออกเป็น 2 กรณี ดังรายละเอียดต่อไปนี้

กรณีที่ 1: การจำลองสถานการณ์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดแบบขั้นบันได (step response) จาก 10 kW (3.51% ของพิกัด) ไปเป็น 71.25 kW (25% ของพิกัด) ไปเป็น 142.5 kW (50% ของพิกัด) ไปเป็น 213.75 kW (75% ของพิกัด) และเป็น 285 kW (100% ของพิกัด) เมื่อเวลาผ่านไปทุกๆ 0.5 วินาที เพื่อจำลองสภาวะการทำงานของยานยนต์ไฟฟ้าในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดหรือกรณีที่เลวร้ายที่สุด (worst-case scenario)

โดยนอกจากจะตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวแล้วจะเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อระบบถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ตัวควบคุมแบบพีโอแบบต่อเรียงกัน และตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วย ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งจากรูปจะพบว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวและตัวควบคุมพีโอแบบต่อเรียงกันสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่ที่ 800 V ได้ และให้ผลการตอบสนองที่เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2 ได้อีกด้วย ในขณะที่ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่ค่าพารามิเตอร์ออกแบบได้จากวิธีการสุ่มค่าไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่ตามที่ต้องการและเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2 ได้ โดยเมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะและผลการตอบสนองระหว่างตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวและตัวควบคุมพีโอแบบต่อเรียงกันสามารถสรุปผลการเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งจากตารางแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อระบบถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่นำเสนอจะมีช่วงเวลาฟื้นตัวที่เร็วขึ้น 61.57% มีเปอร์เซ็นต์การพุ่งต่ำที่น้อยลง 43.29% และมีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินน้อยลง 100% หรือไม่มีการพุ่งเกินเกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีโอแบบต่อเรียงกัน ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวมีสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมพีโอแบบต่อเรียงกัน

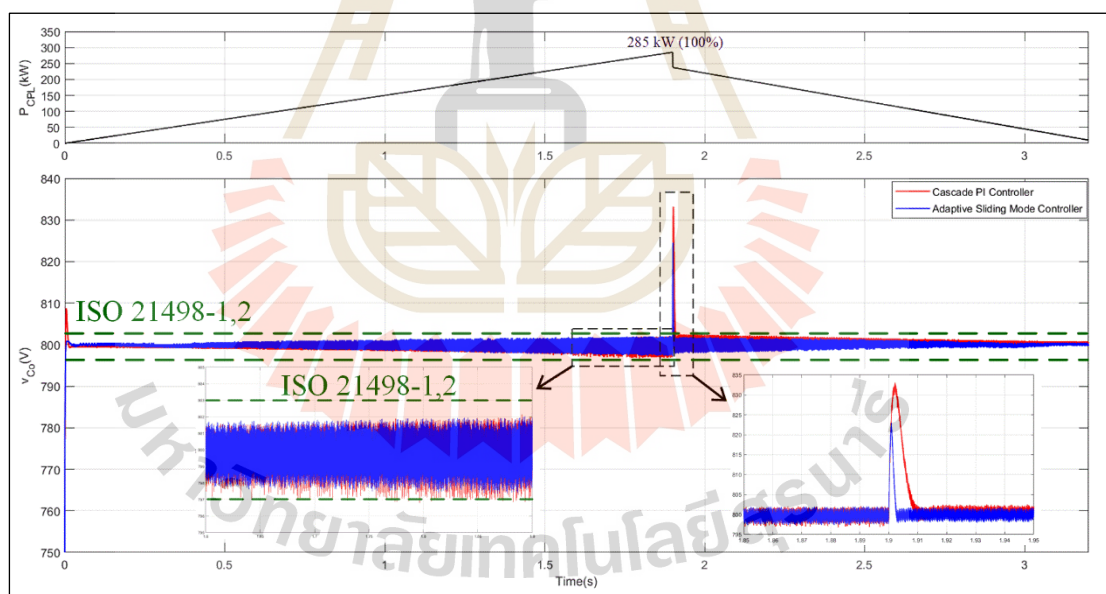


รูปที่ 4.16 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด

ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด

	ตัวควบคุมใหม่ผลการเลื่อนแบบปรับตัว						ตัวควบคุมพีไอที่ต่อแบบเรียงกัน				เปอร์เซ็นต์ สมรรถนะโดยรวม ที่ดีกว่า
	3.51% -> 25%	25% -> 50%	50% -> 75%	75% -> 100%	3.51% -> 25%	25% -> 50%	3.51% -> 25%	25% -> 50%	50% -> 75%	75% -> 100%	
ช่วงการเปลี่ยนแปลง ค่ากำลังไฟฟ้า (% ของพิกัด)	4.8 0	6.1 0	7.4 0	8.6 0	17.5 0.15	17.5 0.21	17.5 0.15	17.5 0.21	17.5 0.30	17.5 0.37	61.57%
ช่วงเวลาฟื้นตัว (ms)	4.8 0	6.1 0	7.4 0	8.6 0	17.5 0.15	17.5 0.21	17.5 0.15	17.5 0.21	17.5 0.30	17.5 0.37	61.57%
เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (%)	0 1.2	0 2.6	0 4.0	0 5.3	0.15 4.8	0.21 5.8	0.15 4.8	0.21 5.8	0.30 6.1	0.37 6.4	100%
เปอร์เซ็นต์การพุ่งต่ำ (%)	0 1.2	0 2.6	0 4.0	0 5.3	0.15 4.8	0.21 5.8	0.15 4.8	0.21 5.8	0.30 6.1	0.37 6.4	43.29%
ค่าความคลาดเคลื่อนใน สภาวะอยู่ตัว (เป็นไปตาม มาตรฐาน)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-

กรณี ที่ 2: การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปภายใต้การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดแบบลาดเอียง (ramp response) ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่ใกล้เคียงกับการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่จริง (realistic scenario) โดยกำหนดให้ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเสมือนกับยานยนต์ไฟฟ้ามีการเร่งความเร็วอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าพิกัด จากนั้นจะกำหนดให้ค่ากำลังไฟฟ้าลดลงอย่างต่อเนื่องคล้ายกับยานยนต์ไฟฟ้ามีการลดความเร็วลงจนกระทั่งหยุดนิ่ง (Liu et al., 2023) โดยนอกจากจะยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวแล้วจะเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อระบบถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอแบบต่อเรียงกัน และตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วย ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.17 ซึ่งจากรูปจะพบว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวและตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่ที่ 800 V และให้ผลการตอบสนองเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2 ได้อีกด้วย โดยเมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะและผลการตอบสนองระหว่างตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวและตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันสามารถสรุปผลการเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.17 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบลาดเอียง

ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์
ในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงโหลดเป็นแบบลาดเอียง

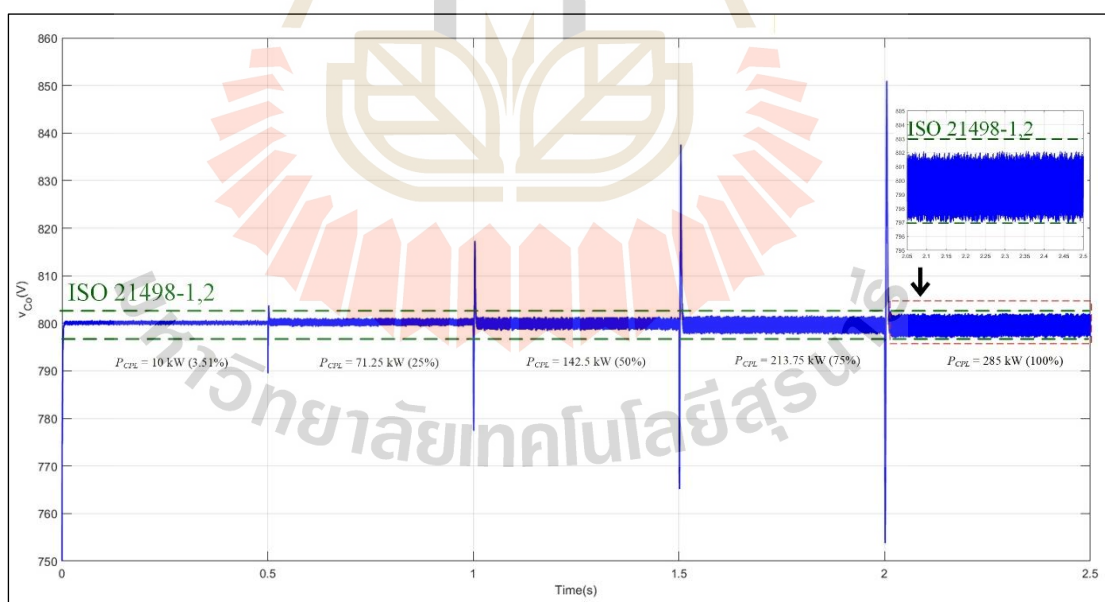
ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน แบบปรับตัว		ตัวควบคุมพีไอ แบบต่อเรียงกัน	เปอร์เซ็นต์ สมรรถนะ โดยรวม ที่ดีกว่า
ช่วงการเปลี่ยนแปลง ค่ากำลังไฟฟ้า		ช่วงการเปลี่ยนแปลงจาก เพิ่มขึ้นเป็นลดลงของ ค่ากำลังไฟฟ้า (ณ วินาทีที่ 1.9)	
ช่วงเวลาฟื้นตัว (ms)	6.2	16.6	62.65%
เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (%)	3.0608	4.1385	26.04%
เปอร์เซ็นต์การพุ่งต่ำ (%)	0	0	0%
ค่าความคลาดเคลื่อนใน สภาวะอยู่ตัว (เป็นไปตาม มาตรฐาน)			-

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อระบบถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่นำเสนอในช่วงการเปลี่ยนแปลงจากเพิ่มขึ้นเป็นลดลงของค่ากำลังไฟฟ้า ณ วินาทีที่ 1.9 จะมีช่วงเวลาฟื้นตัวที่เร็วขึ้น 62.65% มีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่น้อยลง 26.04% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอแบบต่อเรียงกัน ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวมีสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน ถึงแม้ว่าจะเป็นสถานการณ์ที่ใกล้เคียงกับการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่จริง

รูปที่ 4.18 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดในกรณีที่กำหนดให้ V_{BATT} มีค่าเปลี่ยนแปลงจากเดิม 662 V เป็น 630 V ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่พิจารณาพฤติกรรมของแบตเตอรี่ในแง่ของการเปลี่ยนแปลงค่าสถานะการประจุ (state of charge: SOC) ซึ่งทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงโดยจากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่ที่ 800 V และให้ผลการตอบสนองที่เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2 ได้แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องมีการค้นหาค่าพารามิเตอร์ m ใหม่ในทุก ๆ สภาวะการทำงานภายใต้เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าที่ค่าพิกัด (285 kW) จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ m ของแต่ละค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้สำหรับ $V_{BATT} = 630$ V ไปดำเนินการตามวิธีการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่ได้นำเสนอเพื่อให้สามารถควบคุมระบบได้ ซึ่งการที่ต้องออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว

ใหม่เมื่อค่า V_{BATT} เปลี่ยนแปลงไปถือเป็นข้อจำกัดของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตจึงจำเป็นต้องพิจารณาแบบจำลองของแบตเตอรี่มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนเพื่อให้สามารถพิจารณาค่า SOC ของแบตเตอรี่ได้

ดังนั้นจากการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมดังรายละเอียดข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่นำเสนอ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ m ของตัวควบคุมสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตามค่าของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลง สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วบัสให้มีค่าคงที่ตามที่ต้องการ 800 V และให้ผลตอบสนองเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2 ภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่ค่ากำลังไฟฟ้าพิกัดของระบบได้ นอกจากนี้ตัวควบคุมที่นำเสนอยังมีสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันอีกด้วย ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันยังไม่มีงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ใด ๆ ดำเนินการในลักษณะนี้มาก่อน ดังนั้นจึงถือเป็นจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการรับประกันว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวจะสามารถนำไปใช้งานจริงได้ในทางปฏิบัติ งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงดำเนินการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมดังกล่าวด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป ดังรายละเอียดที่จะได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 5



รูปที่ 4.18 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วบัสเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด เมื่อกำหนดให้ $V_{BATT} = 630$ V

4.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 นี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ซึ่งเนื้อหาในตอนต้นได้กล่าวถึงระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว จากนั้นได้นำเสนอรายละเอียดการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวโดยเริ่มต้นจากการออกแบบพารามิเตอร์ m ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ซึ่งผลจากการค้นหาพารามิเตอร์ m ของแต่ละช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างสมการของพารามิเตอร์ m ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีการเปลี่ยนแปลง โดยการสร้างสมการดังกล่าวได้อาศัยวิธีการปรับเส้นโค้ง และเนื้อหาในตอนสุดท้ายเป็นการนำเสนอผลจากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบสมรรถนะและเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อมีการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอแบบต่อเรียงกัน ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน และตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว ซึ่งผลจากการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่ที่ 800 V ได้ และผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัวเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2 อีกทั้งยังมีผลตอบสนองเชิงพลวัตทั้งในแง่ของช่วงเวลาฟื้นตัวที่เร็วขึ้น 61.57% มีเปอร์เซ็นต์การพุ่งต่ำน้อยลง 43.29% และไม่มีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินเกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน ในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด รวมถึงในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบแบบลาดเอียง ซึ่งเป็นกรณีที่ใกล้เคียงกับการใช้งานของยานยนต์ไฟฟ้า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวก็ยังสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่ที่ 800 V ได้ และมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัวเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2 อีกทั้งมีผลตอบสนองเชิงพลวัตทั้งในแง่ของช่วงเวลาฟื้นตัวที่เร็วขึ้น 62.65% มีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินน้อยลง 26.04% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการยืนยันว่าตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่ได้นำเสนอมีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมดังกล่าวด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปซึ่งจะได้รับการนำเสนอไว้ในบทถัดไป

บทที่ 5

การยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว ด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลู

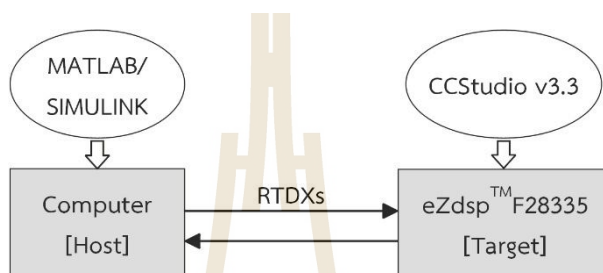
5.1 บทนำ

บทที่ 4 ที่ผ่านมามีได้นำเสนอผลการตรวจสอบสมรรถนะและการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อระบบยานยนต์ไฟฟ้าที่พิจารณาการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน และตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันเพิ่มเติมว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่ได้นำเสนอมีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ เนื้อหาในบทที่ 5 นี้จึงเป็นการนำเสนอการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลู ซึ่งในตอนต้นของบทจะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของการรับส่งข้อมูลของการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูระหว่างโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 จากนั้นจะเป็นการนำเสนอหลักการทำงานของการทำงานการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูด้วยโปรแกรมและบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ดังกล่าว และเนื้อหาในส่วนสุดท้ายจะเป็นการนำเสนอการยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว รวมถึงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสระหว่างตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน และตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลู

5.2 หลักการพื้นฐานของการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลู

การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูเป็นเทคนิคสำหรับการพัฒนาและทดสอบระบบควบคุมที่อาศัยการทำงานร่วมกันของฮาร์ดแวร์จริงของตัวควบคุมและระบบจำลองสถานการณ์ด้วยการจำลองสถานการณ์แบบเวลาจริง (real-time simulation) เทคนิคดังกล่าวทำให้สามารถตรวจสอบความถูกต้องของตัวควบคุมโดยไม่จำเป็นต้องเชื่อมต่อกับระบบจริงในทางปฏิบัติโดยตรง ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงและความเสียหายของอุปกรณ์จริงที่อาจเกิดจากการทำงานของระบบควบคุมที่ผิดพลาดได้ สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 และใช้โปรแกรม

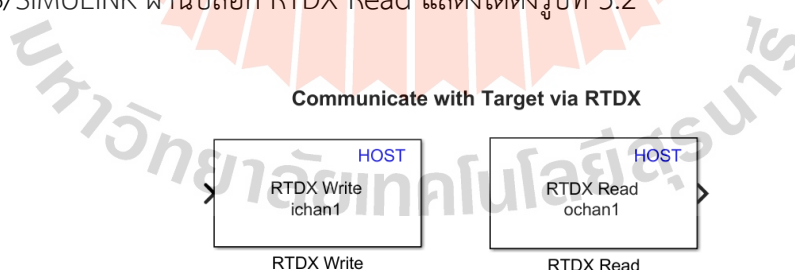
Code Composer Studio เวอร์ชัน 3.3 (CCStudio v3.3) สำหรับการเขียนชุดคำสั่งภาษาซีของ ตัวควบคุมและโปรแกรมลงสู่บอร์ดดังกล่าว ซึ่งสามารถเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ด้วยบัสอนุกรม ส่วนกลาง (universal serial bus: USB) ที่สามารถรับและส่งข้อมูลผ่านทางช่องสื่อสารแบบเวลาจริง (Real Time Data eXchange) แผนภาพการเชื่อมต่อโปรแกรม MATLAB/SIMULINK (Host) กับ บอร์ด DSP รุ่น Zdsp™ F28335 (Target) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แผนภาพการเชื่อมต่อโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335

จากรูปที่ 5.1 การรับส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ผ่านทางช่องสื่อสารแบบเวลาจริงมีทั้งหมด 4 กรณี ดังต่อไปนี้

- กรณีที่ 1 การส่งข้อมูลจากโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ไปยังบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ผ่านบล็อก RTDX Write แสดงได้ดังรูปที่ 5.2
- กรณีที่ 2 การรับข้อมูลจากบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 กลับมายังโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ผ่านบล็อก RTDX Read แสดงได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 บล็อก RTDX Read และ RTDX Write

- กรณีที่ 3 การส่งข้อมูลจากบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ไปยังโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ผ่านการเขียนชุดคำสั่งภาษาซีบนโปรแกรม CCStudio v3.3 ดังนี้

บรรทัดที่ 1: `RTDX_CreateOutputChannel(ochan1);`
 บรรทัดที่ 2: `RTDX_enableOutput(&ochan1);`
 บรรทัดที่ 3: `RTDX_write(&ochan1, ueq, nbuf * sizeof(long));`

โดยบรรทัดที่ 1 คือ ฟังก์ชันคำสั่งการกำหนดสร้างช่องเอาต์พุต RTDX สำหรับใช้ส่งข้อมูลมายังโปรแกรม MATLAB/SIMULINK บรรทัดที่ 2 คือ ฟังก์ชันคำสั่งเปิดใช้งานช่องเอาต์พุต RTDX สำหรับใช้ส่งข้อมูลมายังโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และบรรทัดที่ 3 คือ ฟังก์ชันคำสั่งเขียนส่งข้อมูลมายังโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ผ่านทางช่องเอาต์พุต RTDX

- กรณีที่ 4 การรับข้อมูลจากโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กลับมายังบอร์ด DSP รุ่น eZdspTM F28335 ผ่านการเขียนชุดคำสั่งภาษาซีบนโปรแกรม CCStudio v3.3 ดังนี้

บรรทัดที่ 1: `RTDX_CreateInputChannel (ichan1);`
 บรรทัดที่ 2: `RTDX_enableInput (&ichan1);`
 บรรทัดที่ 3: `RTDX_read(&ichan1, &Vbatt, 1 * sizeof(long));`

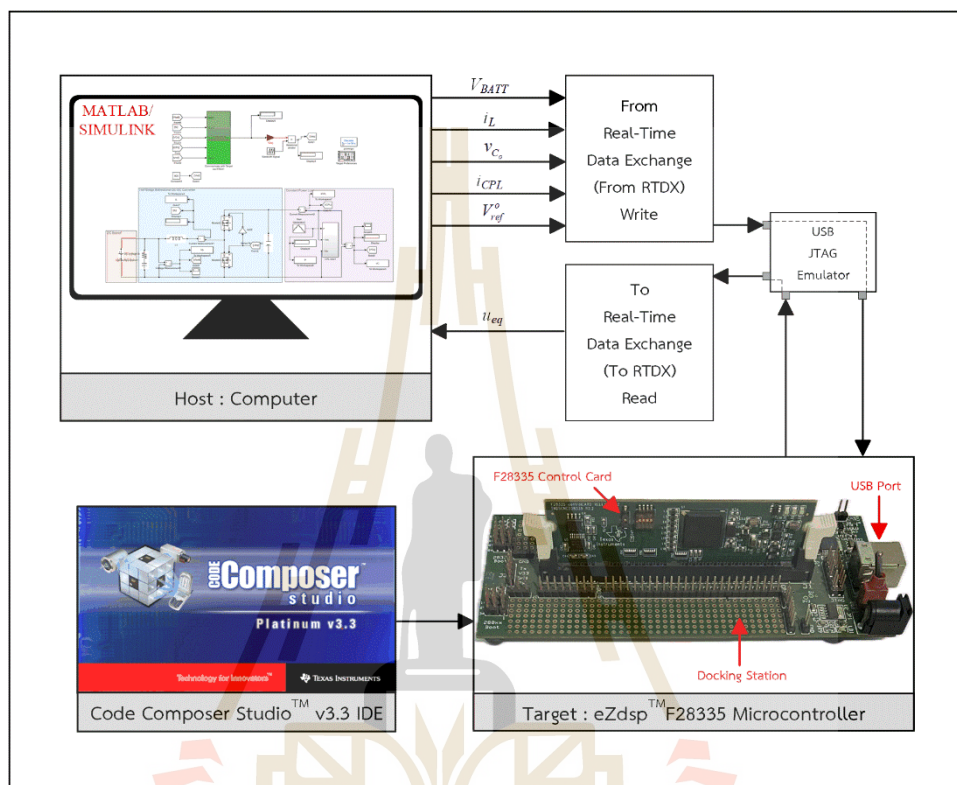
โดยบรรทัดที่ 1 คือ ฟังก์ชันคำสั่งการกำหนดสร้างช่องอินพุต RTDX สำหรับใช้รับข้อมูลจากโปรแกรม MATLAB/SIMULINK บรรทัดที่ 2 คือ ฟังก์ชันคำสั่งเปิดใช้งานช่องอินพุต RTDX สำหรับใช้รับข้อมูลจากโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และบรรทัดที่ 3 คือ ฟังก์ชันคำสั่งอ่านข้อมูลที่รับมาจากช่องอินพุต RTDX

ดังนั้นจากหลักการพื้นฐานการรับส่งข้อมูลของโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กับบอร์ด DSP รุ่น eZdspTM F28335 ที่ได้นำเสนอในข้างต้นเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญสำหรับการยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป ซึ่งจะได้รับการนำเสนอรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 5.3

5.3 การยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป

การยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปจะเริ่มต้นด้วยการกล่าวถึงหลักการทำงานของการทำงานของการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่อาศัยการทำงานร่วมกันของระบบยานยนต์ไฟฟ้าที่พิจารณาที่อยู่บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และบอร์ด DSP รุ่น eZdspTM F28335 จากนั้นจะเป็นการยืนยันสมรรถนะ

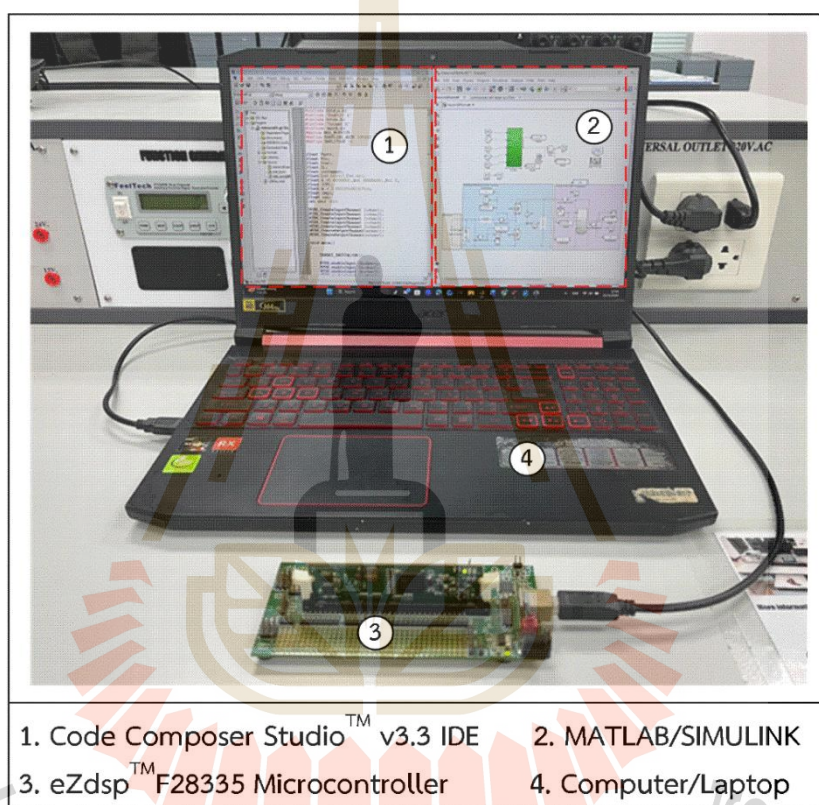
และผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ซิปัสเมื่อระบบใช้ตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน และตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป ซึ่งมีรายละเอียดแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.3 การยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป

การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่อาศัยการทำงานร่วมกันของโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งจากรูปจะพบว่า ระบบยานยนต์ไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะอยู่บนคอมพิวเตอร์ (Host : Computer) นั่นคืออยู่บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยระบบดังกล่าวจะส่งข้อมูลของแรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (V_{BATT}) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันไฟฟ้าที่ซิปัส (v_{C_o}) กระแสไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (i_{CPL}) และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (V_{ref}^o) ผ่านช่องสื่อสารแบบเวลาจริงด้วยสายเชื่อมต่อ USB JTAG Emulator ไปยังบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 เพื่อส่งข้อมูลดังกล่าวไปประมวลผลสำหรับตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่ถูกเขียนเป็นชุดคำสั่งภาษาซิปัสโปรแกรม Code Composer Studio™ v3.3 IDE และถูกโปรแกรมลงในบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 จากนั้นบอร์ดดังกล่าวจะส่งสัญญาณควบคุม (u_{eq}) ของตัวควบคุม

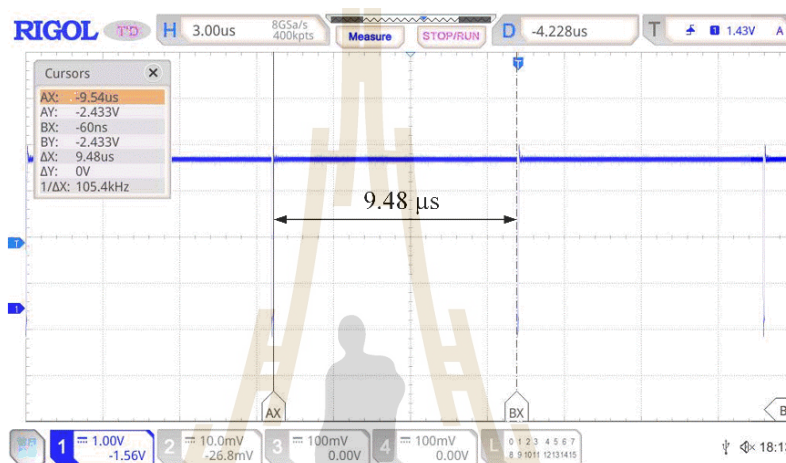
โหมดการเลื่อนแบบปรับตัวกลับไปยังระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เพื่อนำสัญญาณดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ และได้เป็นสัญญาณพัลส์สำหรับควบคุมการทำงานของสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยกระบวนการดังกล่าวจะทำงานแบบวนซ้ำจนกระทั่งจะครบเวลาที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ ซึ่งจากหลักการทำงานดังที่ได้อธิบายสามารถแสดงการเชื่อมต่อทางกายภาพระหว่างโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 การเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ระหว่างโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335

อย่างไรก็ตามสำหรับการรับส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ที่มีการโปรแกรมชุดคำสั่งภาษาซีของตัวควบคุมจำเป็นต้องมีความเร็วในการประมวลผลที่รวดเร็วกว่าเวลาซิกตัวอย่าง (sampling time) เพื่อให้การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูบมีความถูกต้องและแม่นยำ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงดำเนินการตรวจวัดระยะเวลาในการประมวลผลของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวบนบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 โดยกำหนดให้ส่งสัญญาณลอจิกสูง (high) เมื่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

กำลังประมวลผลชุดคำสั่งของตัวควบคุม และส่งสัญญาณลอจิกต่ำ (low) เมื่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กำลังประมวลผลชุดคำสั่งเสร็จเรียบร้อยแล้ว ซึ่งสัญญาณลอจิกดังกล่าวจะถูกส่งออกจากพอร์ตเอาต์พุตดิจิทัล จากนั้นใช้ออสซิลโลสโคปในการตรวจวัดระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณลอจิกสูง-ต่ำ เพื่อหาความเร็วในการประมวลผลชุดคำสั่งตัวควบคุม โหมดการเลื่อนแบบปรับตัว ซึ่งผลการตรวจวัดที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.5

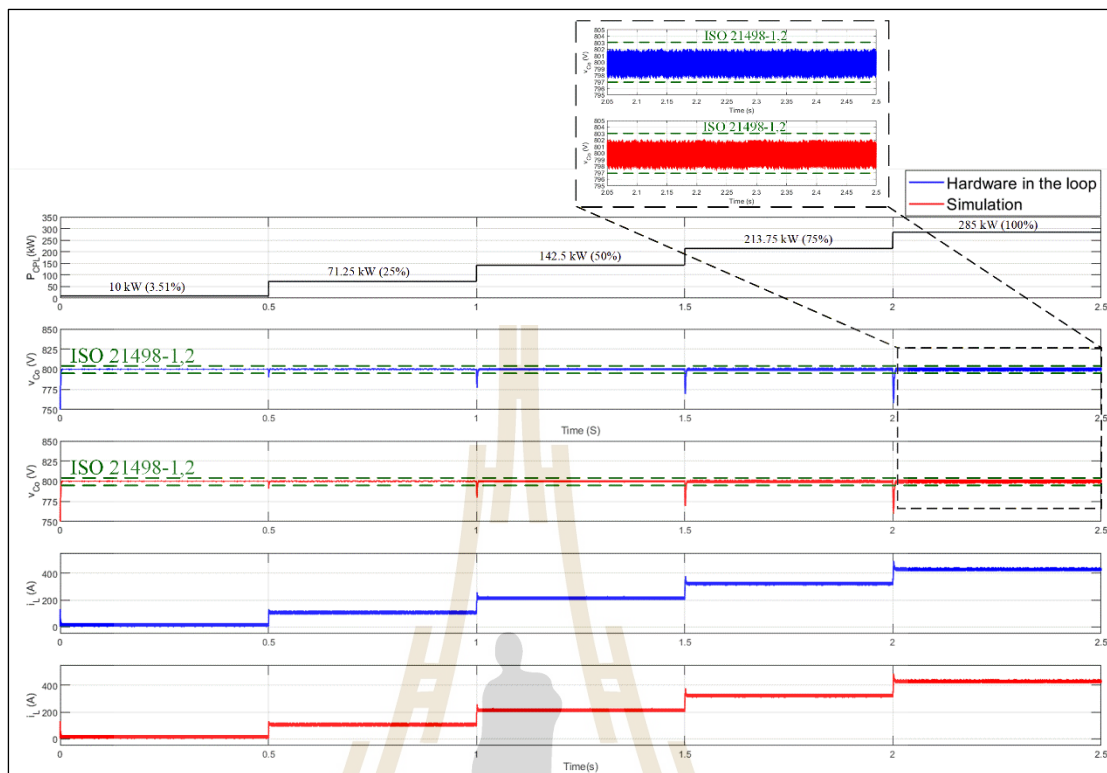


รูปที่ 5.5 ความเร็วในการประมวลผลชุดคำสั่งตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว

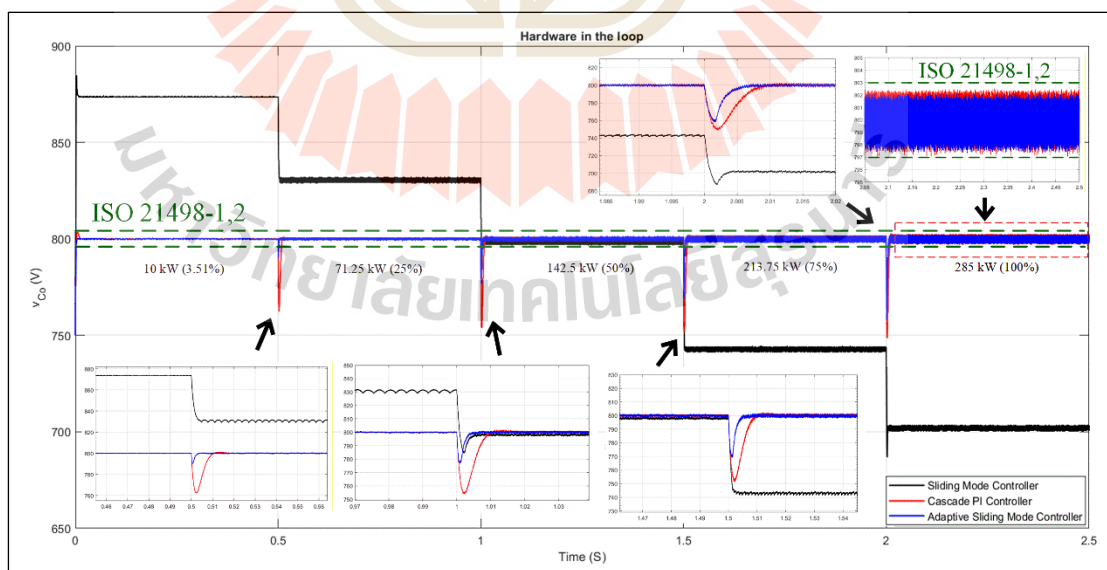
จากรูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่า ความเร็วในการประมวลผลชุดคำสั่งตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวมีค่าเท่ากับ $9.48 \mu s$ ซึ่งรวดเร็วกว่าเวลาชักตัวอย่างในการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ที่กำหนดให้มีค่าเท่ากับ $10 \mu s$ ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่า บอร์ด DSP รุ่น eZdspTM F28335 ที่มีการโปรแกรมชุดคำสั่งภาษาซีของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวจะสามารถรับข้อมูลจากโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และทำการประมวลผลได้สำเร็จ พร้อมทั้งส่งข้อมูลกลับไปยังโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ได้ก่อนที่จะมีการชักตัวอย่างในการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK อีกครั้ง ดังนั้นจึงทำให้การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปมีความถูกต้องและแม่นยำ

สำหรับการยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป จะใช้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของโหลดในลักษณะเดียวกันกับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในบทที่ 4 ที่ผ่านมา เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันของผลตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ทั้งสองแบบ โดยการยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมจะแบ่งเงื่อนไขออกเป็น 2 กรณี ดังรายละเอียดต่อไปนี้

กรณี ที่ 1: การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปภายใต้การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดแบบขั้นบันไดจาก 10 kW (3.51% ของพิกัด) ไปเป็น 71.25 kW (25% ของพิกัด) ไปเป็น 142.5 kW (50% ของพิกัด) ไปเป็น 213.75 kW (75% ของพิกัด) และเป็น 285 kW (100% ของพิกัด) เมื่อเวลาผ่านไปทุก ๆ 0.5 วินาที เพื่อจำลองสภาวะการทำงานของยานยนต์ไฟฟ้าในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดหรือกรณีที่เลวร้ายที่สุด โดยจะยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวและเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อระบบถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ตัวควบคุมแบบพีโอแบบต่อเรียงกัน และตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว ซึ่งผลการยืนยันสมรรถนะและผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7 ตามลำดับ โดยจากรูปที่ 5.6 จะพบว่า การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปให้ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสอดคล้องและตรงกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ทั้งในสภาวะชั่วครู่และในสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่นำเสนอมีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถประยุกต์ใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ นอกจากนี้จากรูปที่ 5.7 พบว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวและตัวควบคุมพีโอแบบต่อเรียงกันสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่ที่ 800 V ได้ และให้ผลการตอบสนองที่เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2 ได้อีกด้วย ในขณะที่ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่ค่าพารามิเตอร์ออกแบบได้จากวิธีการสุ่มค่าไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่ตามที่ต้องการและเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2 ได้ โดยเมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะและผลการตอบสนองระหว่างตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวและตัวควบคุมพีโอแบบต่อเรียงกันสามารถสรุปผลการเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 5.1 ซึ่งจากตารางแสดงให้เห็นว่า ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อระบบถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่นำเสนอจะมีช่วงเวลาฟื้นตัวที่เร็วขึ้น 61.57% มีเปอร์เซ็นต์การพุ่งต่ำที่น้อยลง 43.29% และมีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินน้อยลง 100% หรือไม่มีการพุ่งเกินเกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีโอแบบต่อเรียงกัน ซึ่งผลการเปรียบเทียบดังกล่าวมีความสอดคล้องและตรงกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ดังรายละเอียดที่นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 4 ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวมีสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมพีโอแบบต่อเรียงกัน



รูปที่ 5.6 ผลการยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเปลี่ยนแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูบเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

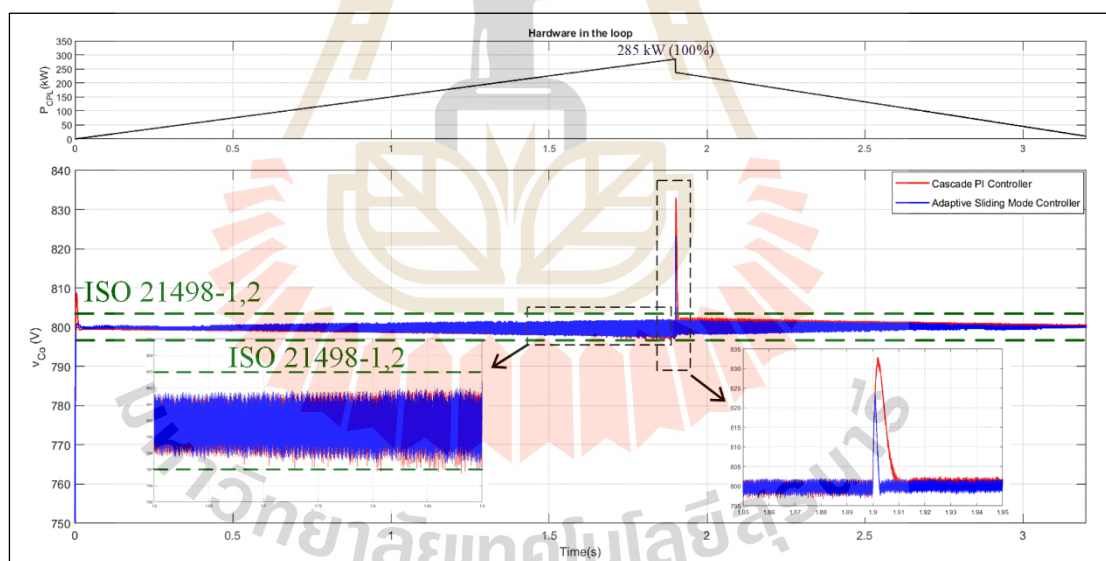


รูปที่ 5.7 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ขับจากการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูบเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด

ตารางที่ 5.1 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในอุปกรณ์ที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด

	ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว					ตัวควบคุมพีโอแบบต่อเนื่องกัน					เปอร์เซ็นต์ สมรรถนะโดยรวม ที่ดีกว่า
	3.51% -> 25%	25% -> 50%	50% -> 75%	75% -> 100%		3.51% -> 25%	25% -> 50%	50% -> 75%	75% -> 100%		
ช่วงการเปลี่ยนแปลง ค่ากำลังไฟฟ้า (% ของพิกัด)	4.8	6.1	7.4	8.6		17.5	17.5	17.5	17.5		61.57%
ช่วงเวลาปรับตัว (ms)	0	0	0	0		0.15	0.21	0.30	0.37		100%
เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (%)	1.2	2.6	4.0	5.3		4.8	5.8	6.1	6.4		43.29%
ค่าความคลาดเคลื่อนใน สถานะอยู่ตัว (เป็นไปตาม มาตรฐาน)	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓		-

กรณีที่ 2: การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปภายใต้การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดแบบลาดเอียง ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่ใกล้เคียงกับการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าแบบเตอร์ริงจริง โดยกำหนดให้ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเหมือนกับยานยนต์ไฟฟ้ามีการเร่งความเร็วอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าพิกัด จากนั้นจะกำหนดให้ค่ากำลังไฟฟ้าลดลงอย่างต่อเนื่องคล้ายกับยานยนต์ไฟฟ้ามีการลดความเร็วลงจนกระทั่งหยุดนิ่ง โดยนอกจากจะยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแล้วจะเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อระบบถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอแบบต่อเรียงกัน และตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วย ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 จากรูปจะพบว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวและตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่ที่ 800 V และให้ผลการตอบสนองเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2 ได้ อีกทั้งยังไม่มี การพุ่งต่ำเกิดขึ้นอีกด้วย โดยเมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะและผลการตอบสนองระหว่างตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวและตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันสามารถสรุปผลการเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.8 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดเป็นแบบลาดเอียง

ตารางที่ 5.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบลาดเอียง

	ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน แบบปรับตัว	ตัวควบคุมพีไอ แบบต่อเรียงกัน	เปอร์เซ็นต์ สมรรถนะ โดยรวมที่ดีกว่า
ช่วงการเปลี่ยนแปลง ค่ากำลังไฟฟ้า	ช่วงการเปลี่ยนแปลงจาก เพิ่มขึ้นเป็นลดลงของค่า กำลังไฟฟ้า (ณ วินาทีที่ 1.9)	ช่วงการเปลี่ยนแปลงจาก เพิ่มขึ้นเป็นลดลงของค่า กำลังไฟฟ้า (ณ วินาทีที่ 1.9)	
ช่วงเวลาฟื้นตัว (ms)	6.2	16.6	62.65%
เปอร์เซ็นต์การฟุ้งเกิน (%)	3.0608	4.1385	26.04%
เปอร์เซ็นต์การฟุ้งต่ำ (%)	0	0	0%
ค่าความคลาดเคลื่อนใน สภาวะอยู่ตัว (เป็นไปตาม มาตรฐาน)	✓	✓	-

จากตารางที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่า ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อระบบถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่นำเสนอในช่วงการเปลี่ยนแปลงจากเพิ่มขึ้นเป็นลดลงของค่ากำลังไฟฟ้า ณ วินาทีที่ 1.9 จะมีช่วงเวลาฟื้นตัวที่เร็วขึ้น 62.65% มีเปอร์เซ็นต์การฟุ้งเกินที่น้อยลง 26.04% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอแบบต่อเรียงกัน ซึ่งผลการเปรียบเทียบดังกล่าวมีความสอดคล้องและตรงกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวมีสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน ถึงแม้ว่าจะเป็นสถานการณ์ที่ใกล้เคียงกับการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่จริง

ดังนั้นจากการยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมและการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปดังรายละเอียดข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถประยุกต์ใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ อีกทั้งยังมีสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันอีกด้วย

5.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 นี้เป็นการนำเสนอการยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่พิจารณา รวมถึงผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อระบบถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน และตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป โดยเนื้อหาในตอนต้นได้กล่าวถึง หลักการพื้นฐานของการรับส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 จากนั้นนำเสนอหลักการของฮาร์ดแวร์ในลูปที่อาศัยการทำงานร่วมกันของโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 และเนื้อหาในตอนสุดท้ายเป็นการนำเสนอผลการตรวจสอบสมรรถนะ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสและผลตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเมื่อระบบถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว รวมถึงผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อระบบมีการควบคุมตัวควบคุมด้วยพีไอแบบต่อเรียงกัน ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน และตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวมีความสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถประยุกต์ใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ รวมถึงสามารถนำไปพัฒนาและต่อยอดสำหรับในงานวิจัยในอนาคตได้



บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสและควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ ซึ่งการศึกษาวินิจฉัยเริ่มต้นจากการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีที่ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ตัวควบคุมที่ใช้กับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีและการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งจากการศึกษาและค้นคว้าพบว่า องค์ประกอบสำคัญในสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าคือ วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางที่มีหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสและควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดทั้งหมดของระบบ นอกจากนี้โหลดหลักของระบบคือ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดดังกล่าวส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมของยานยนต์ไฟฟ้าโดยตรง ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมของระบบจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่สามารถออกแบบด้วยการดำเนินการร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรที่จะต้องได้รับการพิสูจน์ขึ้น อีกทั้งศึกษาการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์สำหรับพัฒนาและต่อยอดไปสู่การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ เพื่อจะทำให้ระบบสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่และมีผลตอบสนองเชิงพลวัตที่ดียิ่งขึ้นถึงแม้ว่าโหลดของระบบจะมีค่าเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจากการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมถือเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญในการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการพัฒนางานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ทั้งหมดได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 2

จากการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 นำมาสู่แนวทางการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ได้เริ่มต้นด้วยการนำเสนอระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่พิจารณาซึ่งคือ วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง จากนั้นได้ออกแบบค่าพารามิเตอร์อุปกรณ์พาสซีฟของวงจรดังกล่าว ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ เพื่อให้มีแรงดันพลั่วของ

แรงดันไฟฟ้าดีซีบัสและกระแสพลั่วของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นไปตามที่กำหนด และได้ดำเนินการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของระบบด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งพบว่าผลตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องและตรงกันกับแบบจำลองแบบแมนตรทั้งในสภาวะชั่วคราวและในสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นได้มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนได้ จากนั้นจึงดำเนินการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่อาศัยสมการพื้นผิวการเลื่อนแบบรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะร่วมกับแบบจำลองที่พิสูจน์ได้เพื่อสร้างสมการสร้างสัญญาณควบคุม และออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีการสุ่มค่า ซึ่งผลจากการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้มีความคงที่ที่ 800 V ได้ในทุก ๆ สภาวะการทำงานของโหลด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเมื่อค่าโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นการต่อยอดพัฒนาสู่การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวโดยรายละเอียดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์และการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 3

การต่อยอดพัฒนาตัวควบคุมโหมดการเลื่อนไปสู่การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ได้ตามโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลง เพื่อให้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่ที่ 800 V และได้ผลตอบสนองของระบบที่ดียิ่งขึ้น โดยการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวได้เริ่มต้นด้วยการออกแบบพารามิเตอร์ m ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ซึ่งผลจากการค้นหาพารามิเตอร์ m ของแต่ละช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างสมการของพารามิเตอร์ m ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีการเปลี่ยนแปลง โดยการสร้างสมการดังกล่าวได้อาศัยวิธีการปรับเส้นโค้ง ซึ่งผลจากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ในการตรวจสอบสมรรถนะและเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อระบบยานยนต์ไฟฟ้าที่พิจารณามีการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอแบบต่อเรียงกัน ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน และตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว ซึ่งผลจากการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่ที่ 800 V ได้ และผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัวเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2 อีกทั้งยังมีผลตอบสนองเชิงพลวัตทั้งในแง่ของช่วงเวลาฟื้นตัวที่เร็วขึ้น 61.57% มีเปอร์เซ็นต์การพุ่งต่ำน้อยลง 43.29% และไม่มีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินเกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอ

แบบต่อเรียงกัน ในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด รวมถึงในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบลาดเอียง ซึ่งเป็นกรณีที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงของยานยนต์ไฟฟ้า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวก็ยังสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่ที่ 800 V ได้ และมีความคลาดเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัวเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1,2 อีกทั้งมีผลตอบสนองเชิงพลวัตทั้งในแง่ของช่วงเวลาฟื้นตัวที่เร็วขึ้น 62.65% มีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินน้อยลง 26.04% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่อาศัยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่เป็นจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เนื่องจากตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันไม่มีการวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ใด ๆ ดำเนินการในลักษณะนี้มาก่อน โดยรายละเอียดของการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 4

การยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่พิจารณา รวมถึงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อระบบถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน และตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเป็นการดำเนินการเพื่อยืนยันว่า ตัวควบคุมที่นำเสนอจะสามารถนำไปใช้งานจริงในทางปฏิบัติ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่อาศัยการทำงานร่วมกันของโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 แสดงให้เห็นว่า ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสและผลตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเมื่อระบบถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว รวมถึงผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อระบบมีการควบคุมด้วยตัวควบคุมด้วยพีไอแบบต่อเรียงกัน ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน และตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวมีความสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถประยุกต์ใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ รวมถึงสามารถนำไปพัฒนาและต่อยอดสำหรับงานวิจัยในอนาคตได้ โดยรายละเอียดของการยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป รวมถึงหลักการพื้นฐานของการรับส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 หลักการของฮาร์ดแวร์ในลูปที่อาศัยการทำงานร่วมกันของโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 5

6.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

1. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณายังคงใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแหล่งพลังงานหลัก ซึ่งในระบบยานยนต์ไฟฟ้าที่มีการใช้งานจริงจะมีแหล่งพลังงานหลักเป็นแบตเตอรี่ ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในอนาคตควรพิจารณาแบบจำลองของแบตเตอรี่มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมของระบบด้วยเพื่อให้สามารถพิจารณาค่า *SOC* ของแบตเตอรี่ได้

2. ระบบยานยนต์ไฟฟ้าในวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะโหมดขับเคลื่อนเนื่องจากเป็นโหมดการทำงานโดยส่วนใหญ่ของระบบ อย่างไรก็ตามการทำงานของยานยนต์ไฟฟ้ายังมีโหมดการแปลงผันพลังงานสูญเสียขณะห้ามล้อ ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในอนาคตควรพิจารณาการออกแบบตัวควบคุมสำหรับโหมดการทำงานการแปลงผันพลังงานสูญเสียขณะห้ามล้อด้วยเพื่อให้ครอบคลุมการทำงานทั้งหมดของระบบยานยนต์ไฟฟ้า

3. การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้อาศัยสมการพื้นผิวการเลื่อนแบบรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะ เนื่องจากสามารถออกแบบและนำไปใช้งานจริงได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามสมการดังกล่าวไม่มีการพิจารณาและออกแบบผลตอบแทนเชิงพลวัตของระบบ ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในอนาคตควรใช้สมการพื้นผิวการเลื่อนที่สามารถออกแบบผลตอบแทนเชิงพลวัตของระบบด้วยเพื่อให้ได้ผลตอบแทนเชิงพลวัตที่ดีมากยิ่งขึ้น



รายการอ้างอิง

- กองพัน อารีรักษ์. (2564). แบบจำลองวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: บริษัท จรัสสินทวงศ์ จำกัด
- ปวินท์ สีสาลี, กองพัน อารีรักษ์ และจักรกริช ภัคดีโต. (2567). การออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซี-ดีซีแบบสองทิศทาง สำหรับระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า. ใน *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47 (EECON-47)* (หน้า 217-220). อุดรธานี.
- ศศิยา อุดมสุข. (2554). *การประหยัดพลังงานสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- สาธิต ชลสถิตจำเริญ. (2556). *แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่รวมพารามิเตอร์ของตัวควบคุม* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- อภิชัย สุยะพันธ์, สุรบดินทร์ แดงด่อน, กองพัน อารีรักษ์. (2567). การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีแหล่งจ่ายเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์. *การประชุมวิชาการงานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 16 (ECTI-CARD)* (หน้า 166-170). สุรินทร์.
- องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก. (2566). การใช้อยานพาหนะไฟฟ้า. เข้าถึงได้จาก <https://ghgreduction.tgo.or.th/th/tver-method/t-ver-classify-methodology/t-ver-methodology4.html> [เข้าถึงเมื่อ 15 มีนาคม 2568].
- AL-Nussairi, M. Kh., Bayindir, R., Padmanaban, S., Mihet-Popa, L., & Siano, P. (2017). Constant Power Loads (CPL) with Microgrids: Problem Definition, Stability Analysis and Compensation Techniques. *Energies*, 10(12), 1993.
- Alrajhi, H. (2022). A generalized state space average model for parallel DC-to-DC converters. *Computer Systems Science & Engineering*, 41(2), 717–734. doi:10.32604/csse.2022.021279

- Arora, S., Balsara, P. T., & Bhatia, D. K. (2016). Digital implementation of constant power load (CPL), active resistive load, constant current load and combinations. In *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst. (ISCAS)* (pp. 1–4). doi:10.1109/ISCAS.2016.7527585
- Azer, P., & Emadi, A. (2020). Generalized State Space Average Model for Multi-Phase Interleaved Buck, Boost and Buck-Boost DC-DC Converters: Transient, Steady-State and Switching Dynamics. *IEEE Access*, 8, 77735–77745. doi:10.1109/ACCESS.2020.2987277
- Bensaada, M., Stambouli, A. B., Bekhti, M., Krachai, S. D., Boukhris, L., Bellar, A., Mebrek, M. A., & Nasri, B. (2012). Sliding Mode Controller for Buck DC-DC Converter. In *2012 9th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices (SSD)* (pp. 1–6). doi:10.1109/SSD.2012.6198089.
- Bodrov, A., Nauel, Y., Todd, R., & Apsley, J. (2015). Equivalence of Generalized State-Space Averaging with DQ Modelling Methods in a Balanced Three-Phase System. In *2015 European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)* (pp. 5519–5524). doi:10.1109/EPE.2015.7310065
- Bouroju, S. & Tah, A. (2024). Modeling and Analysis of Actively-Damped DC-DC Boost Converter with Constant Power Load. In *2024 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*. doi:10.1109/SCEECS61402.2024.10481852
- Byrne, D. (n.d.). *An engineer's guide to the DC power train architecture of an electric vehicle* (White Paper). TTI Europe. Retrieved March 15, 2025, from <https://www.ttieurope.com>
- Chakraborty, S., Vu, H. N., Hasan, M. M., Tran, D.-D., El Baghdadi, M., & Hegazy, O. (2019). DC–DC Converter Topologies for Electric Vehicles, Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Fast Charging Stations: State of the Art and Future Trends. *Energies*, 12(8), 1569. doi:10.3390/en12081569

- Chaicharoenaudomrung, K., Wansungnoen, S., Pakdeeto, J., Areerak, K., & Areerak, K. (2021). Parameter Identification of BLDC Motor by using Adaptive Tabu Search. In *2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*. Nakhon Ratchasima, Thailand.
- Chaicharoenaudomrung, K., Pakdeeto, J., Areerak, K-N., & Areerak, K-L. (2022). Mathematical model of DCMGs with PV arrays feeding the parallel constant power loads. *2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. IEEE. doi:10.1109/ICEMS56177.2022.9983107
- Ehsani, M., Singh, K. V., Bansal, H. O., & Mehrjardi, R. T. (2021). State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 109(6), 967–981. doi:10.1109/JPROC.2021.3072788
- Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C. H., & Williamson, G. A. (2006). Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Automotive Systems: Definition, Modeling, Stability, and Control of Power Electronic Converters and Motor Drives. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 55(4), 1116–1125.
- Farooq, Z., Zaman, T., Khan, M. A., Nasimullah, M., Muyeen, S. M., & Ibeas, A. (2019). Artificial Neural Network Based Adaptive Control of Single Phase Dual Active Bridge With Finite Time Disturbance Compensation. *IEEE Access*, 7, 112229–112239.
- Gorji, S. A., Sahebi, H. G., Ektesabi, M., & Rad, A. B. (2019). Topologies and Control Schemes of Bidirectional DC–DC Power Converters: An Overview. *IEEE Access*, 7, 117997–118017. doi:10.1109/ACCESS.2019.2937239
- Gamelin, T. W. (2001). Complex analysis. Springer.
- Hren, A., Truntic, M., & Mihalic, F. (2023). A Survey on the State-of-the-Art and Future Trends of Multilevel Inverters in EVs. *Electronics*, 12(14), 3122.
- International Organization for Standardization. (2021a). ISO 21498-1: *Electrically propelled road vehicles — Electrical specifications and tests for voltage class B systems and components: Part 1: Voltage sub-classes and characteristics*.

- International Organization for Standardization. (2021b). *ISO 21498-2: Electrically propelled road vehicles — Electrical specifications and tests for voltage class B systems and components: Part 2: Electrical tests for components*.
- International Energy Agency. (2022). Global EV Outlook 2022. Retrieved March 15, 2025, from <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>
- Islam, R., Rafin, S. M. S. H., & Mohammed, O. A. (2023). Comprehensive review of power electronic converters in electric vehicle applications. *Forecasting*, 5(1), 22–80. doi:10.3390/forecast5010002
- Kalson, S., & Kar, S. R. (2022). Comparison of Buck Converter Control Methods. In *2022 2nd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT)* (pp. 1-8). Hubli, India.
- Kanthi, M. K., & Abraham, D. M. (2020). PWM-Based Sliding Mode Current Controller for Bidirectional DC-DC Converters in Electric Vehicles. In *2020 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)* (pp. 1–6). Kerala, India.
- Khaligh, A. (2008). Realization of Parasitics in Stability of DC-DC Converters Loaded by Constant Power Loads in Advanced Multiconverter Automotive Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(6), 2295–2305. doi:10.1109/TIE.2008.918395
- Khan, M. S., & Agrawal, A. (2023). An Overview of Bi-Directional Charging Converter Topologies for Electric Vehicles and Fast Charging Stations analysis using Neural Network. In *2023 International Conference on Computational Intelligence, Communication Technology and Networking (CICTN)*. doi:10.1109/CICTN57981.2023.10141203
- Kim, S., & Williamson, S. S. (2011). Negative Impedance Instability Compensation in More Electric Aircraft DC Power Systems using State Space Pole Placement Control. In *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition* (pp. 247–252). Phoenix, AZ, USA. doi:10.1109/ECCE.2011.6048596

- Mao, T., Li, L., & Cao, Y. (2024). Sliding mode control of synchronous Buck converter based on variable speed reaching law. In *Proceedings of the 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)* (pp. 1057–1063). IEEE. doi:10.1109/ACPEE60788.2024.10532374
- Malev, E. (2021). Study of Bidirectional DC-DC Converter for Regenerating Braking for Ultralight Electric Vehicle. In *2021 12th National Conference with International Participation* (pp. 1-7). Sofia, Bulgaria.
- Martínez-Treviño, B. A., El Aroudi, A., Cid-Pastor, A., Garcia, G., & Martinez-Salamero, L. (2021). Synthesis of constant power loads using switching converters under sliding-mode control. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 68(1), 524–533.
- Mohanty, S., Kar, S. K., Choudhury, A., Pati, S., & Khatua, S. (2021). A comparative analysis between a single loop PI, double loop PI and Sliding Mode Control structure for a buck converter. In *2021 1st Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology (ODICON)* (pp. 1–6). doi:10.1109/ODICON50556.2021.9428986
- Muthukumar, P., Venkateshkumar, M., & Chin, C. S. (2024). A Comparative Study of Cutting-Edge Bi-Directional Power Converters and Intelligent Control Methodologies for Advanced Electric Mobility. *IEEE Access*, 12, 28711–28714.
- Nithiyanandham, G., & Sudhakar, N. (2023). An overview of electrically coupled multi-input DC-DC converters for hybrid electric vehicles. In *2023 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*. doi:10.1109/I-PACT58649.2023.10434386
- Noordi, F., Zeb, K., Ullah, S., Ullah, Z., Khalid, M., & Al-Durra, A. (2024). Design and validation of adaptive barrier function sliding mode controller for a novel multisource hybrid energy storage system based electric vehicle. *IEEE Access*, 12, 145285. doi:1109/ACCESS.2024.3471893

- Pandey, R. K., Mahto, J. N., Tirkey, P., & Kumar, S. (2022). A Review on DC-DC Converters Used in Electric Vehicles. *2022 2nd International Symposium on Sustainable Energy, Signal Processing and Cyber Security (iSSSC)* (pp. 1–7). Dhanbad, India.
- Pakdeeto, J., Thanommuang, A., Areerak, K-L., & Areerak, K-N. (2024). Pole placement technique optimized gains by adaptive tabu search for instability mitigation of AC-DC power system feeding a controlled buck converter. *IEEE Access*. doi:10.1109/ACCESS.2024.3438791
- Pakdeeto, J., Wansungnoen, S., Areerak, K-L., & Areerak, K-N. (2023). Optimal speed controller design of commercial BLDC motor by adaptive tabu search algorithm. *IEEE Access*, 11, 3300233. doi:10.1109/ACCESS.2023.3300233
- Pakdeeto J, Thanommuang A, Chaicharoenudomrung K, Areerak K, AreerakK. (2021). The Effect of Parameter Variations of System Stability for AC-DC Power System Feeding Controlled Buck Converter. *International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)* (pp. 61-64). Nakhon Ratchasima, Thailand.
- Phosung, R., Areerak, K-N., & Areerak, K-L. (2024). Design and optimization of control system for more electric aircraft power systems using adaptive tabu search algorithm based on state-variables-averaging model. *IEEE Access*. doi:10.1109/ACCESS.2024.3406855
- Poorfakhraei, A., Narimani, M., & Emadi, A. (2021). A Review of Multilevel Inverter Topologies in Electric Vehicles: Current Status and Future Trends. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 2, 139–158.
- Priya, M. S., & Balasubramanian, R. (2014). Analysis of multidevice interleaved boost converter for high power applications. In *2014 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*.
- Puangdownreong, D., Sujitjorn, S., & Kulworawanichpong, T. (2004). Convergence Analysis of Adaptive Tabu Search. *ScienceAsia*, 30, 183–190.

- Reimers, J., Dorn-Gomba, L., Mak, C., & Emadi, A. (2019). Automotive Traction Inverters: Current Status and Future Trends. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
- Rind, S. J., Ren, Y., Hu, Y., Wang, J., & Jiang, L. (2017). *Configurations and control of traction motors for electric vehicles: A review. Chinese Journal of Electrical Engineering*, 3(3), 1–17.
- Sarif, M. S. M., & Pei, T. X. (2018). Modeling, Design and Control of Bidirectional DC-DC Converter Using State-Space Average Model. In *2018 IEEE International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT)*, Kuala Terengganu, Malaysia, 2018, pp. 416–421. doi:10.1109/ICACDOT.2018.8602936
- Seesamlee, P., Pakdeeto, J., Suyapan, A., & Areerak, K. (2026). Optimal controller design for bidirectional DC-DC converter in battery electric vehicle system using the adaptive Tabu search algorithm. *IEEE Access*, 14, 27381–27393. doi:10.1109/ACCESS.2026.3665222
- Silva, L. R., Cavaleiro, M. P., Nimitti, F. G., & Andrade, A. M. S. S. (2024). *Study of Bidirectional DC-DC Converters Based on the Buck-Boost Topology*. 2024 16th Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC). IEEE. doi:10.1109/SEPOC63090.2024.10747444
- Suyapan, A., Areerak, K-N., & Areerak, K-L. (2017). A Controller Design of More Electric Aircraft Power Systems Using an Adaptive Tabu Search Algorithm. In *5th International Electrical Engineering Congress*. Pattaya, Thailand.
- Tang, G., Zhang, T., & Zhang, X. (2020). An active stabilization control strategy for DC-DC converter feeding constant power load in electric vehicle. *Proceedings of the 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)* (pp. 375–379), China.
- Wang, F., Luo, Y., Li, H., & Xu, X. (2019). Switching characteristics optimization of two-phase interleaved bidirectional DC/DC for electric vehicles. *Energies*, 12(3), 378. doi:10.3390/en12030378

- Wu, L., Liu, J., Vazquez, S., & Mazumder, S. K. (2022). Sliding Mode Control in Power Converters and Drives: A Review. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 9(3), 392–406.
- Xu, Q., Vafamand, N., Chen, L., Dragičević, T., Xie, L., & Blaabjerg, F. (2021). Review on Advanced Control Technologies for Bidirectional DC/DC Converters in DC Microgrids. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9(2), 1205. doi:10.1109/JESTPE.2020.2978064



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a golden-yellow stupa-like structure with a silhouette of a person standing inside. Below the stupa is a circular emblem with a book and a gear. At the bottom, the university's name is written in Thai script within a semi-circular banner.

ภาคผนวก ก.

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

อภิชัย สุยะพันธ์, อภิรักษ์ ศรีชนะ, และ กองพันธ์ อารีรักษ์. (2567). การออกแบบตัวควบคุม โหมดการเลื่อนของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีชนิดบัก-บูสต์แบบสองทิศทางที่มี โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47, 233-237, พฤศจิกายน.

Srichana, A., Suyapan, A., and Areerak, K-N. Sliding mode controller design based on averaging model for electric vehicle systems. **Suranaree Journal of Science and Technology**. (copyediting process)



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47
The 47th Electrical Engineering Conference (EECON-47)
วันที่ 13-15 พฤศจิกายน 2567 ณ โรงแรมเซ็นทาราและคอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดอุดรธานี



การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนของวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่แบบสองทิศทางชนิดอาร์ฟบริดจ์ ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

The Sliding Mode Controller Design of Half Bridge Bidirectional DC-DC Converter having Constant Power Load for Electric Vehicles

อภิชัย สุยะพันธ์¹ อภิรักษ์ ศรีชนะ² และ กองพันธ์ อารีรักษ์^{2*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี *Corresponding author : kongpan@sut.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันได้มีการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ามาใช้กับระบบต่างๆ อย่างแพร่หลาย ซึ่งโดยทั่วไปวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าจะมีตัวควบคุมเพื่อให้ได้สัญญาณเอาต์พุตเป็นไปตามต้องการ ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน สำหรับวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่แบบสองทิศทางชนิดอาร์ฟบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าที่ตีสี่บัสมีค่าคงที่ โดยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจะใช้วิธีการสุ่มค่า และการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ใน SimPowerSystem™ บน SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่าตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสามารถควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าที่ตีสี่บัสมีค่าคงที่ ถึงแม้ว่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวของระบบจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีสมรรถนะของการควบคุมในแง่ของเวลาขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่ และเปอร์เซ็นต์การฟุ้งเกินที่ดี

คำสำคัญ: ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน วงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่แบบสองทิศทางชนิดอาร์ฟบริดจ์ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ยานยนต์ไฟฟ้า

Abstract

Nowadays, power converters with their controllers are widely used in several systems to achieve the desired outputs. Therefore, this paper presents the sliding mode controller design of half bridge bidirectional DC-DC converter having constant power load for electric vehicle to regulate the system DC bus voltage. The controller parameters design is based on a trial and error method. The intensive time-domain simulation using SimPowerSystem™ on SIMULINK/MATLAB is used to examine the controller performances. The results show that the proposed sliding mode controller can regulate the DC bus voltage to be a constant even the constant power loads of the system are changed. In addition, the good controller

performances in terms of rise time, settling time, and percent overshoot can be achieved.

Keywords: Sliding Mode Controller, Half Bridge Bidirectional DC-DC Converter, Constant Power Load, Electric Vehicle

1. บทนำ

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า (power converter) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบไฟฟ้ากำลังของยานยนต์ไฟฟ้า (electric vehicle : EV) ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังมีหน้าที่แปลงและควบคุมแรงดันไฟฟ้าและ/หรือกระแสไฟฟ้าและ/หรือกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดทั้งหมดของยานยนต์ไฟฟ้า โดยวงจรที่น่าสนใจ คือ วงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่แบบสองทิศทางชนิดอาร์ฟบริดจ์ เนื่องจากมีข้อดี คือ มีช่วงแรงดันขาเข้าที่กว้าง มีความง่ายต่อการควบคุมแรงดันที่ตีสี่บัส มีประสิทธิภาพสูง และสามารถออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัด ซึ่งทำให้อานยนต์ไฟฟ้ามีน้ำหนักที่เบาลงได้ [1-3] ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (sliding mode controller : SMC) ของวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่แบบสองทิศทางชนิดอาร์ฟบริดจ์เพื่อควบคุมและรักษาแรงดันที่ตีสี่บัสในยานยนต์ไฟฟ้าให้คงที่ ซึ่งตัวควบคุมโหมดการเลื่อนถูกเลือกใช้เพราะเป็นตัวควบคุมที่สามารถใช้ได้กับทั้งระบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ให้ผลตอบสนองเชิงพลวัตที่รวดเร็ว ส่งผลให้ระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ไว นอกจากนี้ยังมีความคงทน (robustness) ที่ทำให้อย่างคงสมรรถนะการควบคุมได้แม้จะมีสัญญาณภายนอกมารบกวนหรือพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลง [2-4] อย่างไรก็ตามงานวิจัยในอดีตได้นำเสนอเฉพาะการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนของวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่แบบสองทิศทางชนิดอาร์ฟบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานเท่านั้น [2-4] แต่ในบทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบในกรณีที่มีโหลดของระบบเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยโหลดดังกล่าวเป็นพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม [5-6] และเป็นโหลดโดยส่วนใหญ่ของระบบไฟฟ้าในยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งโหลดดังกล่าวจะมีค่าไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลด ณ ขณะนั้น สำหรับการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่นำเสนอ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47

The 47th Electrical Engineering Conference (EECON-47)

วันที่ 13-15 พฤศจิกายน 2567 ณ โรงแรมเซ็นทาราและคอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดอุดรธานี



จะกำหนดสมการพื้นผิวการเลื่อน (sliding surface equation) เป็นแบบการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะ เนื่องจากมีความง่ายในการออกแบบและการนำไปใช้งานจริงในทางปฏิบัติ [4] การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะอาศัยวิธีการสุ่มค่า (trial and error) สำหรับการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ใน SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งจากผลที่ได้พบว่าการออกแบบตัวควบคุมใหม่โดยการเลื่อนที่นำเสนอสามารถควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุถึงแม้ว่าโหลดกำลังไฟฟ้าของตัวระบบจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยมีสมรรถนะของการควบคุมในแง่ของเวลาขึ้น (rise time) ช่วงเวลาเข้าที่ (setting time) และเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (percent overshoot) ที่ดี

บทความนี้ประกอบด้วย 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เป็นบทนำ ส่วนที่ 2 เป็นการอธิบายระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ส่วนที่ 3 เป็นการออกแบบตัวควบคุมใหม่โดยการเลื่อน ส่วนที่ 4 เป็นการแสดงผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์สำหรับการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุม และส่วนที่ 5 เป็นสรุปผลเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยในอนาคต

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทความนี้แสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 แบตเตอรี่ ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนที่ 2 วงจรแปลงแรงดันเป็นดิซีสแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์ที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขับด้วยตัวควบคุมใหม่โดยการเลื่อน และส่วนที่ 3 โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวซึ่งเป็นพฤติกรรมของวงจรแปลงแรงดันกำลังที่มีการควบคุมและถูกใช้แทนโหลดทั้งหมดในระบบไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้า และค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า

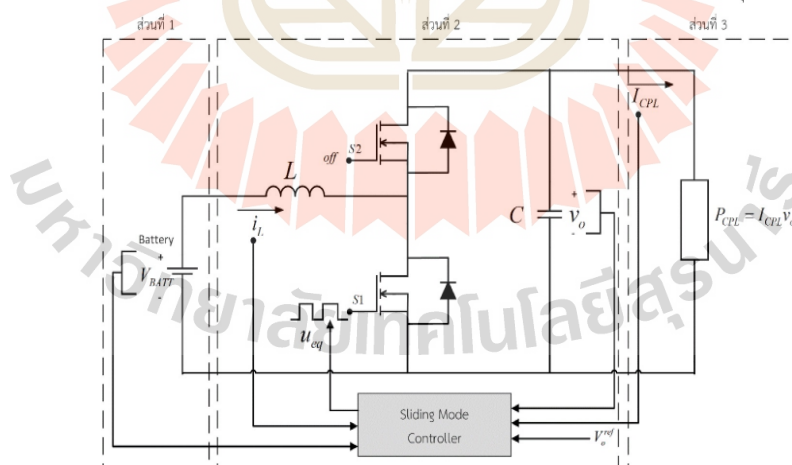
ที่พิจารณาในรูปที่ 1 สำหรับการออกแบบตัวควบคุมในบทความนี้แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_{BATT}	662 V	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง [7]
L	15 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงแรงดันแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์
C	100 mF	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงแรงดันแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์
f_s	10 kHz	ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรแปลงแรงดันแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์
V_o^{ref}	800 V	แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุอ้างอิง [8]

3. การออกแบบตัวควบคุมใหม่โดยการเลื่อน

การออกแบบตัวควบคุมใหม่โดยการเลื่อนจะเริ่มต้นจากการพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงแรงดันเป็นดิซีสแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งแบบจำลองแสดงได้ดังสมการที่ (1) เมื่อ i_L คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงแรงดันเป็นดิซีสแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์ v_o คือ แรงดันไฟฟ้าขาออก (output) ของวงจรแปลงแรงดันเป็นดิซีสแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์ ซึ่งก็คือแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุของยานยนต์ไฟฟ้า V_{BATT} คือแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (input) P_{CPL} คือ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และ $u(t)$ คือ สัญญาณพัลส์เบรียเอม (Pulse Width Modulation : PWM) ที่ได้จากตัวควบคุม [2-4]

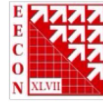


รูปที่ 1 วงจรแปลงแรงดันเป็นดิซีสแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์ที่จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47

The 47th Electrical Engineering Conference (EECON-47)

วันที่ 13-15 พฤศจิกายน 2567 ณ โรงแรมเซ็นทาราและคอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดอุดรธานี



$$\begin{cases} \dot{i}_L = \frac{(u(t)-1)v_o}{L} + \frac{V_{BATT}}{L} \\ \dot{v}_o = \frac{(1-u(t))i_L}{C} - \frac{P_{CPL}}{v_o C} \end{cases} \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) จะพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันตีสเป็นตีสเป็นสองทิศทางชนิดฮาร์ตบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยพจน์ที่ไม่เป็น

เชิงเส้นคือ $\frac{P_{CPL}}{v_o C}$ ดังนั้นจำเป็นต้องทำให้เป็นเชิงเส้นก่อน ซึ่งทำได้โดย

ใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น (linearization) โดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) อันดับหนึ่ง [5] ซึ่งจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาตามสมการที่ (2) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{(u(t)-1)}{L} \\ \frac{(1-u(t))}{C} & \frac{P_{CPL}}{v_o^2 C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{BATT} \quad (2)$$

การออกแบบตัวควบคุมใหม่สำหรับการควบคุมแรงดันที่ตีสของวงจรแปลงผันตีสเป็นตีสเป็นสองทิศทางชนิดฮาร์ตบริดจ์จำเป็นต้องกำหนดสมการพื้นผิวการเคลื่อน (S) ซึ่งบทความนี้กำหนดให้สมการพื้นผิวการเคลื่อนเป็นแบบการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะที่อาศัยความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟและแรงดันไฟฟ้า ดังที่แสดงในสมการที่ (3) เมื่อ a, b และ m เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุม

$$S = ae_1 + be_2 + me_3 \quad (3)$$

จากสมการที่ (3) e_1 คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้า e_2 คือค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า และ e_3 คือ ค่าปริพันธ์ของความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้ากับค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า เพื่อปรับปรุงให้ระบบมีค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัวเท่ากับศูนย์ [4] ซึ่งแสดงดังสมการที่ (4)

$$\begin{cases} e_1 = i_{ref} - i_L \\ e_2 = V_o^{ref} - v_o \\ e_3 = \int [e_1 + e_2] dt \end{cases} \quad (4)$$

โดยที่ $i_{ref} = K[V_o^{ref} - v_o]$ ซึ่งพารามิเตอร์ K คือ ค่าอัตรา

การขยายความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้า

ในอุดมคติระบบจะเคลื่อนที่บนระนาบพื้นผิวการเคลื่อนไปที่ตำแหน่งที่สมการพื้นผิวการเคลื่อนเท่ากับศูนย์ ($S=0$) และสมการอนุพันธ์ของสมการพื้นผิวการเคลื่อนเท่ากับศูนย์ ($\dot{S}=0$) ซึ่งเป็นการเข้าสู่สภาวะการควบคุมให้ค่าแรงดันที่ตีสกับค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ในอีกความหมายหนึ่งคือ ความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะสามารถหาสมการอนุพันธ์ของสมการพื้นผิวการเคลื่อนได้จากสมการที่ (3) ร่วมกับสมการที่ (2) และสมการที่ (4) ซึ่งจะได้สมการอนุพันธ์ของพื้นผิวการเคลื่อนแสดงดังสมการที่ (5) ดังนี้

$$\dot{S} = -\frac{2bP_{CPL}}{V_{BATT}C} + \frac{2bu(t)P_{CPL}}{V_{BATT}C} - \frac{2aKP_{CPL}}{V_{BATT}C} + \frac{2aKu(t)P_{CPL}}{V_{BATT}C} + m[(K+1)[V_o^{ref} - v_o] - i_L] \quad (5)$$

สำหรับการควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าที่ตีสมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงจะอาศัยสัญญาณควบคุม (u_{eq}) ภายใต้เงื่อนไข ($\dot{S}=0$) และเมื่อกำหนดให้ $u(t) = u_{eq}$ ดังนั้นจะได้สมการสำหรับการสร้างสัญญาณ PWM เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันตีสเป็นตีสเป็นสองทิศทางชนิดฮาร์ตบริดจ์ด้วยตัวควบคุมใหม่ตามการเคลื่อนดังสมการที่ (6) ซึ่งจากสมการจำเป็นต้องมีการออกแบบค่าพารามิเตอร์ a, b, m และ K โดยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป และแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (V_{BATT}) จะต้องได้รับการตรวจวัดเพื่อนำมาใช้สำหรับการคำนวณ u_{eq} ตามสมการที่ (6) เพื่อให้มีความแม่นยำในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง

$$u_{eq} = \frac{(2b + 2aK)P_{CPL} - mV_{BATT}C[(K+1)[V_o^{ref} - v_o] - i_L]}{(2b + 2aK)P_{CPL}} \quad (6)$$

4. การตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุม

จากสมการที่ (6) จะพบว่า ตัวควบคุมใหม่การเคลื่อนที่นำเสนอประกอบด้วยพารามิเตอร์ a, b, m และ K ซึ่งในบทความนี้จะออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวโดยใช้วิธีการสุ่มค่าและทำการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์บน SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB โดยกำหนดเงื่อนไขให้มีการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 50 kW ไปเป็น 100 kW เมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

- การออกแบบค่าพารามิเตอร์ a

เมื่อกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ a เท่ากับ 0.1, 5 และ 50 โดยคงค่าพารามิเตอร์ $b = 3600$, $m = 500000$ และ $K = 5$ พบว่า ผลการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เป็นดังรูปที่ 2 โดยถ้าพารามิเตอร์ $a = 0.1$ และ $a = 5$ ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าที่ตีสมีค่าเท่ากับ 800 V ได้ แต่

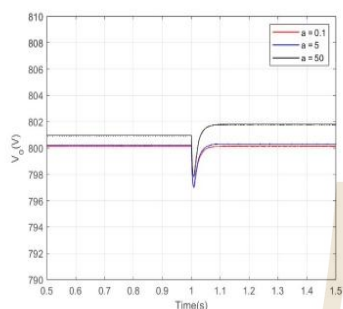
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47

The 47th Electrical Engineering Conference (EECON-47)

วันที่ 13-15 พฤศจิกายน 2567 ณ โรงแรมเซ็นทาราและคอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดอุดรธานี



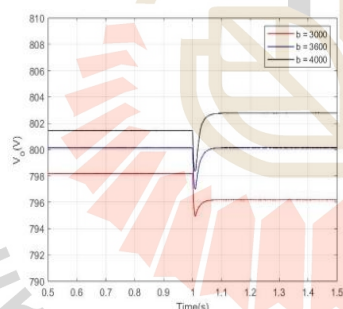
เมื่อค่าพารามิเตอร์ $\alpha = 50$ จะไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ติดตั้งให้เป็นไปตามที่ต้องการที่ 800 V ได้



รูปที่ 2 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ a

• การออกแบบค่าพารามิเตอร์ b

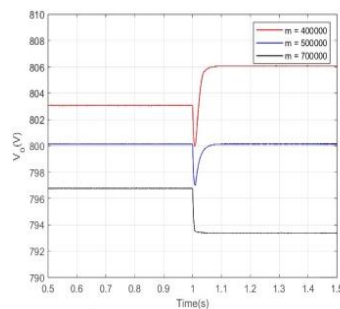
เมื่อกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ b เท่ากับ 3000, 3600 และ 4000 โดยคงค่าพารามิเตอร์ $a = 0.1$, $m = 500000$ และ $K = 5$ พบว่า ผลการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมเป็นดังรูปที่ 3 โดยถ้าพารามิเตอร์ $b = 3600$ ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าที่ติดตั้งมีค่าคงที่ที่ 800 V ได้ แต่เมื่อค่าพารามิเตอร์ b เท่ากับ 3000 และ 4000 จะไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ติดตั้งให้เป็นไปตามที่ต้องการที่ 800 V ได้



รูปที่ 3 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ b

• การออกแบบค่าพารามิเตอร์ m

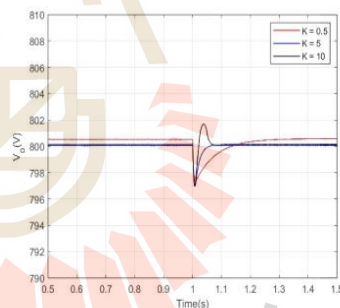
เมื่อกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ m เท่ากับ 400000, 500000 และ 700000 โดยคงค่าพารามิเตอร์ $a = 0.1$, $b = 3600$ และ $K = 5$ พบว่า ผลการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมเป็นดังรูปที่ 4 โดยถ้าพารามิเตอร์ $m = 500000$ ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าที่ติดตั้งมีค่าคงที่ที่ 800 V ได้ แต่เมื่อค่าพารามิเตอร์ m เท่ากับ 400000 และ 700000 จะไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ติดตั้งให้เป็นไปตามที่ต้องการที่ 800 V ได้



รูปที่ 4 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ m

• การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K

เมื่อกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ K เท่ากับ 0.5, 5 และ 10 โดยคงค่าพารามิเตอร์ $a = 0.1$, $b = 3600$ และ $m = 500000$ พบว่า ผลการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมเป็นดังรูปที่ 5 โดยหากพารามิเตอร์ K มีค่ามากจะทำให้ผลการตอบสนองเชิงพลวัตของระบบมีแนวโน้มทำให้การพุ่งเกินเพิ่มขึ้น ในขณะที่ช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่มีแนวโน้มลดลง ส่วนค่าพารามิเตอร์ K ที่น้อยไปจะส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ติดตั้งให้เป็นไปตามที่ต้องการที่ 800 V ได้



รูปที่ 5 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ K

จากการออกแบบและตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมดังรายละเอียดที่ได้นำเสนอไปข้างต้น จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมใหม่คือการเลือกสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา คือ $a = 0.1$, $b = 3600$, $m = 500000$ และ $K = 5$ ซึ่งเมื่อตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมดังกล่าวด้วยเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 50 kW ไปเป็น 100 kW, 150 kW และจาก 150 kW มาเป็น 125 kW ที่เวลา 1 วินาที, 2 วินาที และ 3 วินาทีตามลำดับ ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ติดตั้งแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งจากรูปจะสังเกตได้ว่า ตัวควบคุมใหม่การเลือกที่นำเสนอสามารถควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าที่ติดตั้งมีผลการตอบสนองที่ดีทั้งในแง่ของช่วงเวลาที่ขึ้น

PE

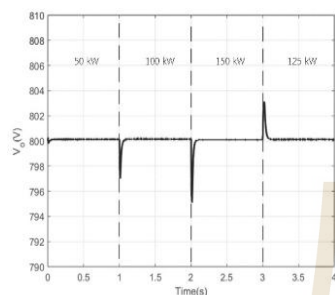
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47

The 47th Electrical Engineering Conference (EECON-47)

วันที่ 13-15 พฤศจิกายน 2567 ณ โรงแรมเซ็นทราและคอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดอุดรธานี



ช่วงเวลาเข้าที่และเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินถึงแม้ว่าโหลดของระบบจะมี
การเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6 ผลการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับ
วงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่แบบสองทิศทางชนิดฮาร์ดฟิวรีดจ์ที่มี
โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนด้วย
อาศัยวิธีการสุ่มค่า ซึ่งผลการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมด้วย
การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์พบว่า ระบบที่พิจารณาสามารถ
ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ตีสี่เป็นตีสี่ได้คงที่ถึงแม้ว่าโหลดของระบบจะมีค่า
เปลี่ยนแปลงไป อีกทั้งยังมีช่วงเวลาที่สั้น ช่วงเวลาเข้าที่ และเปอร์เซ็นต์
การพุ่งเกินที่เป็นผลตอบสนองเชิงพลวัตที่ดี แต่อย่างไรก็ตาม
การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนในบทความนี้ยัง
อาศัยค่าที่ได้จากการสุ่ม และไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการออกแบบ
ตัวควบคุมดังกล่าว ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนด้วย
วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI) จะเป็นแนวทาง
ที่ช่วยให้ระบบมีผลตอบสนองที่ดี โดยจะเป็นงานวิจัยที่จะศึกษาและพัฒนา
ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Muthukumar, M. Mohan and Cheng Siong Chin, "A Comparative Study of Cutting-Edge Bi-Directional Power Converters and Intelligent Control Methodologies for Advanced Electric Mobility," *IEEE Access*, vol.12, pp. 28711 -28714, 2024.
- [2] Kanthi M. K. and D. M. Abraham, "PWM-Based Sliding Mode Current Controller for Bidirectional DC-DC Converters in Electric Vehicles," *2020 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*, Kerala, India, 2020, pp. 1-6

- [3] Evgeni Malev, " Study of Bidirectional DC-DC Converter for Regenerating Braking for Ultraligh Electric Vehicle," *2021 12th National Conference with International Participation*, Sofia, Bulgaria, 2021, pp. 1-7.
- [4] สาธิต ชลสถิตจำเริญ (2556), แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักที่รวมพารามิเตอร์ของตัวควบคุม, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [5] อภิชัย สุธะพันธ์ (2558), การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นตีสี่ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [6] A. Emadi, A. Khaligh, C. H. Rivetta and G. A. Williamson, "Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Automotive Systems: Definition, Modeling, Stability, and Control of Power Electronic Converters and Motor Drives," *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, vol. 55, no. 4, 2016, pp.1116-1117
- [7] "Audi Q6 e-tron quattro," *ev-database.org*. Accessed: Jun. 25, 2024. [Online.] Available: <https://ev-database.org/car/2146/Audi-Q6-e-tron-quattro>
- [8] A. Hern, M. Truntic and F. Mihalic, Jul. 2023, "A Survey on the State-of-the-Art and Future Trends of Multilevel Inverters in EVs", *Electronics* 2023.

PE

3/3/69 18:05

Gmail - [SUJST] Editor Decision



Aphirak Srichana <as.aphirak@gmail.com>

[SUJST] Editor Decision

1 ข้อความ

Suranaree Journal via <admin@tcj-thaijo.org>

2 มีนาคม 2569 เวลา 09:21

ตอบกลับไปยัง: Suranaree Journal <journal@g.sut.ac.th>

ถึง: Apichai Suyapan <apichai.suya@kmutt.ac.th>, Aphirak Srichana <as.aphirak@gmail.com>, "Prof.Kongpan Areerak" <kongpan@sut.ac.th>

Dear Apichai Suyapan, Aphirak Srichana, Prof.Kongpan Areerak:

We have reached a decision regarding your submission to Suranaree Journal of Science and Technology, "SLIDING MODE CONTROLLER DESIGN BASED ON AVERAGING MODEL FOR ELECTRIC VEHICLE SYSTEMS".

Our decision is to: Accept Submission

Dear Authors,

I am pleased to confirm that your paper "SLIDING MODE CONTROLLER DESIGN BASED ON AVERAGING MODEL FOR ELECTRIC VEHICLE SYSTEMS" has been accepted for publication in the Suranaree Journal of Science and Technology since **March 02, 2026**.

This acceptance is subject to the assumption that you meet all the conditions to publish in this journal. In particular, you have yet to submit your manuscript to another journal. Please inform me immediately if you cannot meet these conditions.

We will soon create the galley proof of your paper. We will let you know if we need additional information to generate the evidence. If not, you will be contacted again with a request to approve the proof.

Thank you for submitting your paper to the Suranaree Journal of Science and Technology.

Sincerely,

Suksun Horpibulsuk, Ph.D., Professor
Editor-in-Chief
Suranaree Journal of Science and Technology, Thailand

Suranaree Journal of Science and Technology Office
Suranaree University of Technology
111 University Avenue, Muang,
Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.
Tel: 0-4422-4756
E-mail: journal@g.sut.ac.th

SLIDING MODE CONTROLLER DESIGN BASED ON AVERAGING MODEL FOR ELECTRIC VEHICLE SYSTEMS

Aphirak Srichana¹, Apichai Suyapan², and Kongpan Areerak^{1,*}

Received:; Revised:; Accepted:

Abstract

Driven by increasing concerns over greenhouse gas emissions from conventional combustion vehicles, electric vehicles (EVs) have gained rapid popularity. Their efficient operation depends on a control system for the power electronic circuits integrated within the vehicle architecture. This article presents a sliding mode controller design for a bidirectional half-bridge DC–DC converter deployed in battery EV (BEV) systems. The design is based on a sliding surface equation formulated as a linear combination of state variables and a mathematical model derived from the generalized state-space averaging method for computing the control signal equation. The controller parameters are selected via a trial-and-error approach. Simulations using MATLAB/SIMULINK demonstrate that the proposed sliding mode controller regulates the DC bus voltage in compliance with ISO 21498-1,2 standards under varying load conditions and exhibits robustness against system parameter variations. This confirms that the electric powertrain system of the vehicle can operate effectively.

Keywords: Sliding Model Controller, Battery Electric Vehicles, Bidirectional DC–DC Converter, Mathematical Model, GSSA Method.

Nomenclature

BEV	Battery Electric Vehicle	V_{BATT}	DC voltage source
SMC	Sliding Mode Controller	R_{CPL}	Resistance of constant power load
L	Inductance of converter	d	Duty cycle of the converter
C_i	Capacitance of converter at DC voltage source side	T_s	Switching period
C_o	Capacitance of converter at DC bus voltage side	Δi_L	Ripple current
		Δv_{C_o}	Ripple voltage across C_o
		Δv_{C_i}	Ripple voltage across C_i

¹ School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. Email: as.aphirak@gmail.com; kongpan@sut.ac.th

² Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand. Email: apichai.suya@kmutt.ac.th

* Corresponding author

f_s	Switching frequency
A_r	Amplitude of the carrier signal for PWM
V_o^{ref}	Voltage reference
i_L	Inductor current
v_L	Voltage across L
i_{C_o}	Current through C_o
v_{C_o}	DC bus voltage
I_{CPL}	Current through constant power load
P_{CPL}	Constant Power Load
$u(t)$	The switching function of the converter
S	Sliding surface equation
a	Parameter a of the SMC
b	Parameter b of the SMC
m	Parameter m of the SMC
K	Parameter K of the SMC
e_1	The current error
e_2	The voltage error
e_3	The integral of the current and voltage errors
i_{ref}	The reference current
u_{eq}	The control signal

Introduction

Over the past decade, electric vehicles (EVs) have gained global attention, as most national policies are aimed at reducing greenhouse gas emissions in the transportation sector. Consequently, battery electric vehicles (BEVs), which rely on batteries as their primary energy source, have experienced steadily rising annual sales (Chakraborty et al., 2019). This growth is driven by several factors, including increased affordability, improved efficiency, extended driving range per charge, and, most importantly, zero operational greenhouse gas emissions (Malik et al., 2025).

In BEV architectures, the power converter represents a critical component responsible for bidirectional energy management: conversion and transfer of electrical power from the battery to system loads in driving mode and/or recuperation of electrical energy from the electric motor in the regenerative braking mode. The power converter also plays a crucial role in regulating the DC bus voltage thereby maintaining a desired constant level with current and emerging BEV architectures typically employing an 800 V DC bus (Reimers et al., 2019; Ehsani et al., 2021; Poorfakhraei et al., 2021; Hern et al., 2023; Islam et al., 2023). Consequently, the controller of the power converter is essential for stable DC bus voltage regulation and efficient BEV powertrain operation. The proportional–integral (PI) controller is commonly used in these applications owing to its facile design and ability to eliminate steady-state errors. However, PI

controllers may exhibit slow dynamic responses and limited robustness against external disturbances (Farooq et al., 2019; Mohanty et al., 2021). Conversely, advanced control techniques, such as hysteresis, fuzzy-logic, space vector modulation, and neural network–based controls, offer superior performance under disturbances and system nonlinearities, although they typically demand more complex designs and computational processes (Xu et al., 2021; Muthukumar et al., 2024). Notably, sliding mode control (SMC) has recently emerged as an effective approach owing to its distinct advantages, including applicability across linear and nonlinear systems, fast dynamic responses, and high robustness against external disturbances (Mathew K et al., 2020; Wu et al., 2022; Noor et al., 2024).

Therefore, this article presents the design of a sliding mode controller for a bidirectional half-bridge DC–DC converter deployed in BEV systems. The controller is formulated using a sliding surface equation defined as a linear combination of state variables, ensuring design and implementation simplicity. Additionally, the mathematical model of the system, which is derived via the generalized state-space averaging (GSSA) method, is employed to define the control signal equation. Further, a trial-and-error approach is adopted for parameter selection since there is no general approach for such a controller. The intensive time-domain simulations were performed in MATLAB/SIMULINK to evaluate the performance of the proposed controller. The results reveal that the designed SMC effectively regulates the DC bus voltage to the desired constant value, maintaining compliance with ISO 21498-1,2 across varying load conditions and exhibiting robustness against system parameter variations.

The remainder of this article is organized as follows; Section II presents the BEV system under consideration. Section III describes the proposed SMC design, where the GSSA-based model derivation is also presented in the appropriate subsection. Section IV presents the evaluation of the performance of the controller via simulations. Finally, Section V concludes the study, outlining directions for future research.

Considered BEV System

The BEV system under consideration is illustrated in Figure 1. It comprises three main components: the battery, which serves as the primary source of electrical power; a bidirectional half-bridge DC–DC converter, which regulates the DC bus voltage and manages

power delivery via SMC; and the EV driving unit, which comprises the electric motor and a controlled power load (CPL) (Emadi et al., 2006; AL-Nussairi et al., 2017; Tang et al., 2020; Martínez-Treviño et al., 2021). Therefore, it is modeled as an ideal CPL in this study.

Generally, EVs operate in two modes: the driving and regenerative braking modes. However, only the driving mode is explored in this study, as it represents the primary operating condition of the system. Further, the passive components of the system include the inductor (L) and capacitor (C), as illustrated in part II of Figure 1. These elements can be designed based on the principles of the linked-flux balance in the

inductors, the charge balance in the capacitors, and small-signal approximation, as expressed in (1), (2), and (3). Consequently, the resulting parameters of the considered BEV system are summarized in Table 1.

$$L \geq \frac{dT_s V_{BATT}}{2\Delta i_L} \quad (1)$$

$$C_i \geq \frac{\Delta i_L T_s}{8\Delta v_{C_i}} \quad (2)$$

$$C_o \geq \frac{dT_s V_{BATT}}{2\Delta v_{C_o} R_{CPL}(1-d)} \quad (3)$$

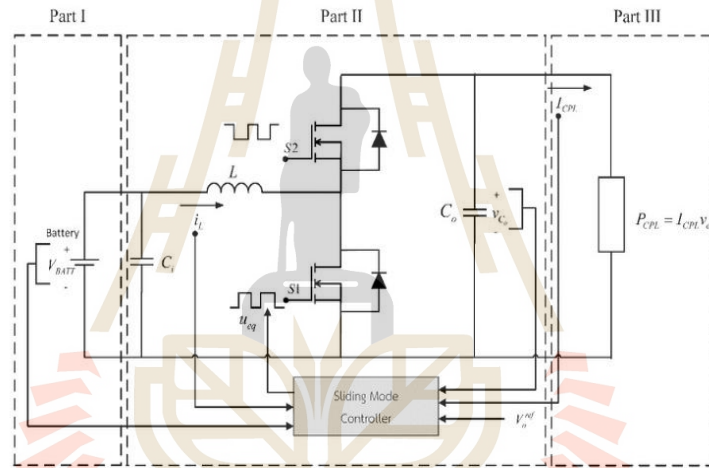


Figure 1. The considered BEV system.

Table 1. The parameters of the considered BEV system

Parameters	Values	Descriptions
V_{BATT}	662 V	DC voltage source
L ($\Delta i_L \leq 8.61$ A)	0.663 mH	The inductances of the bidirectional half-bridge DC-DC converter
C_i ($\Delta v_{C_i} \leq 3$ V)	35.877 μ F	The input capacitance of the bidirectional half-bridge DC-DC converter
C_o ($\Delta v_{C_o} \leq 3$ V)	2 mF	The output capacitance of the bidirectional half-bridge DC/DC converter
f_s	10 kHz	Switching frequency
A_r	10	Amplitude of the carrier signal for PWM
V_o^{ref}	800 V	Voltage reference

SMC Design

The SMC design begins with an overview of its operating principles, followed by the derivation of a time-invariant mathematical model for the BEV system using the GSSA method. The resulting model is subsequently integrated with the sliding surface equation to compute the control signal equation. The details are presented as follows.

The SMC principles are illustrated in Figure 2. The system state variables, denoted here as x_1 and x_2 , with an initial condition at $x(t_0)$, are controlled to follow a trajectory that converges toward the sliding surface at $x(t_f)$. The phase in which the trajectory is driven toward the sliding surface is referred to as the reaching phase. Once the trajectory reaches the sliding surface, the state variables track along the surface toward the origin, where the sliding surface equation equals zero. This highlights the capability of the controller to regulate the system. Consequently, designing the SMC requires defining the sliding surface equation and the system state variables. In this study, the sliding surface equation is defined as a linear combination of the state variables, and the system state variables are the inductor current (i_L) and the DC bus voltage (v_{C_o}), which are obtained from the GSSA-based time-invariant mathematical model of the bidirectional half-bridge DC-DC converter.

The time-invariant model derivation begins with formatting the switched model by analyzing the circuit operation in each mode.

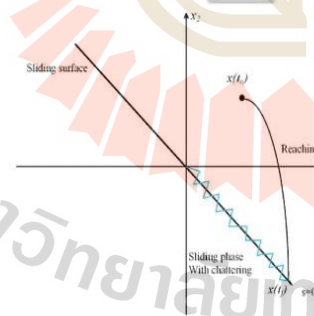


Figure 2. Concept of SMC

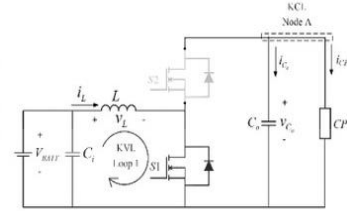


Figure 3. Bidirectional half-bridge DC-DC converter operates in Mode 1

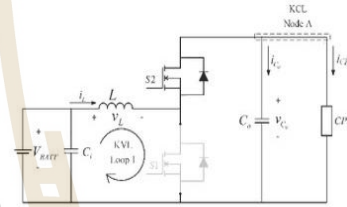


Figure 4. Bidirectional half-bridge DC-DC converter operates in Mode 2

In Mode 1, Switches $S1$ and $S2$ are turned ON and OFF, respectively as shown in Figure 3, whereas in Mode 2, $S1$ and $S2$ are turned OFF and ON, respectively as shown in Figure 4. Applying Kirchhoff's voltage and current laws to the analysis of the circuit in each mode yields the differential equations governing the inductor current (i_L) and the DC bus voltage ($\dot{v}_{C_o}$) for Modes 1 and 2, as expressed in (4) and (5), respectively.

$$\begin{cases} \dot{i}_L = \frac{1}{L} V_{BATT} \\ \dot{v}_{C_o} = -\frac{P_{CPL}}{v_{C_o} C_o} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{i}_L = \frac{1}{L} V_{BATT} - \frac{1}{L} v_{C_o} \\ \dot{v}_{C_o} = \frac{1}{C_o} i_L - \frac{P_{CPL}}{v_{C_o} C_o} \end{cases} \quad (5)$$

Thereafter, $\dot{i}_L$ and $\dot{v}_{C_o}$ for each mode are combined using a validation functions (h_i). As the circuit under consideration operates in two modes, two validation functions, h_1 and $h_2 = 1 - h_1$, are utilized, with the following specific conditions;

S1 ON and S2 OFF: $h_1 = 1$ and $h_2 = 0$
 S1 OFF and S2 ON: $h_1 = 0$ and $h_2 = 1$

Therefore, $\dot{i}_L$ and $\dot{v}_{C_o}$ are expressed in (6) in validation function forms.

$$\begin{cases} \dot{i}_L = \left(\frac{1}{L} V_{BATT} \right) h_1 + \left(\frac{1}{L} V_{BATT} - \frac{1}{L} v_{C_o} \right) h_2 \\ \dot{v}_{C_o} = \left(-\frac{P_{CPL}}{v_{C_o} C_o} \right) h_1 + \left(\frac{1}{C_o} i_L - \frac{P_{CPL}}{v_{C_o} C_o} \right) h_2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \dot{i}_L = \frac{1}{L} V_{BATT} + \frac{(u(t)-1)}{L} v_{C_o} \\ \dot{v}_{C_o} = \frac{(1-u(t))}{C_o} i_L - \frac{P_{CPL}}{C_o v_{C_o}} \end{cases} \quad (7)$$

where $u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases}$

Subsequently, equation (6) is converted into a bilinear form of the switched model by replacing the validation functions with the switching function ($u(t)$), where $u(t) = h_1$ and $h_2 = 1 - h_1 = 1 - u(t)$. This yields the differential equations expressed in terms of the switching function as shown in (7), still representing a time-varying model. Directly employing this model to design an SMC complicates the procedure. Therefore, the GSSA method is employed to eliminate the switching effects and realize a time-invariant model. An overview is given as follows:

Generally, any periodic signal $f(t)$ with a period T can be expressed in the form of a complex Fourier series (Gamelin, 2001), as shown in (8).

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_k(t) e^{jk\omega_s t} \quad (8)$$

where $\omega_s = \frac{2\pi}{T}$ and $\langle x \rangle_k(t)$ is the complex Fourier coefficients.

The GSSA method employs the $\langle x \rangle_k(t)$ of the signal to represent the system state variables.

The $\langle x \rangle_k(t)$ is obtained as follows.

$$\langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t) e^{-jk\omega_s t} dt \quad (9)$$

The essential properties of the complex Fourier coefficients for deriving the mathematical model of power converters (Sanders et al., 1991) can be summarized in three points:

Property 1: The time-derivative property, which can be expressed as shown in (10).

$$\frac{d}{dt} \langle x \rangle_k = \left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_k - jk\omega \langle x \rangle_k \quad (10)$$

Property 2 : The property of the multiplication relationship, which can be expressed as shown in (11).

$$\langle xy \rangle_k = \sum_i \langle x \rangle_{k-i} \langle y \rangle_i \quad (11)$$

Property 3: Assuming $f(t)$ is a real value, the complex Fourier coefficients for negative k can be expressed using (12).

$$\langle x \rangle_{-k} = \overline{\langle x \rangle_k} = \langle x \rangle_k^* \quad (12)$$

Index k in (8) and (9) indicates model accuracy. The model error becomes zero assuming k approaches infinity. For signals not exhibiting notable oscillations, k can be set to zero, and this is called the zero-order approximation (Mahdavi et al., 1997; Emadi et al., 2004). If the signal exhibits oscillations, k can be set to -1, 0, 1, which is known as the first-order approximation (Mahdavi et al., 1997; Emadi et al., 2004). In this study, the zero-order approximation ($k = 0$) is applied based on the assumption that the passive components of the considered system are designed to produce negligible signal ripple, allowing for the neglect of the effects of such ripples. Therefore, under the zero-order approximation of (8), the state variables, $\dot{i}_L$ and $\dot{v}_{C_o}$, of the model can be expressed by distributing the terms of the complex Fourier series as shown in (13) and (14), respectively.

$$\dot{i}_L = \langle \dot{i}_L \rangle_0 \quad (13)$$

$$\dot{v}_{C_o} = \langle \dot{v}_{C_o} \rangle_0 \quad (14)$$

Following (7), applying Property 1 of the complex Fourier coefficients and considering $k = 0$ can transform the expression into (15).

$$\begin{cases} \langle i_L \rangle_0 = \frac{1}{L} \langle V_{BATT} \rangle_0 - \frac{(1-u)}{L} \langle v_{C_o} \rangle_0 - j(0)\omega_s \langle i_L \rangle_0 \\ \langle \dot{v}_{C_o} \rangle_0 = \frac{(1-u)}{C_o} \langle i_L \rangle_0 - \frac{P_{CPU}}{C_o \langle v_{C_o} \rangle_0} - j(0)\omega_s \langle v_{C_o} \rangle_0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} e_1 = i_{ref} - i_L \\ e_2 = V_o^{ref} - v_{C_o} \\ e_3 = \int [e_1 + e_2] dt \end{cases} \quad (19)$$

Additionally, from (9), the complex Fourier coefficient of $u(t)$ for $k = 0$ is derived in (16).

$$\langle u \rangle_0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u dt = d \quad (16)$$

where d denotes the duty cycle

Consequently, based on (13) to (16), the GSSA-derived time-invariant mathematical model of the considered BEV can be obtained in (17).

$$\begin{cases} \dot{i}_L = \frac{1}{L} V_{BATT} - \frac{(1-d)}{L} v_{C_o} \\ \dot{v}_{C_o} = \frac{(1-d)}{C_o} i_L - \frac{P_{CPU}}{C_o v_{C_o}} \end{cases} \quad (17)$$

By analyzing the sliding surface equation, which is defined as a linear combination of state variables, the equation can be written as (18).

$$S = ae_1 + be_2 + me_3 \quad (18)$$

where a , b , and m are the parameters of the SMC.

Based on (18), e_1 and e_2 denote the current and voltage errors, respectively, and e_3 represents the integral of e_1 and e_2 , which are obtained from (19).

where the reference current (i_{ref}) is determined using (20), with K denoting the gain of e_2 .

$$i_{ref} = K [V_o^{ref} - v_{C_o}] \quad (20)$$

In SMC, the ideal system behavior is to move along the sliding surface toward the point where the sliding surface equation is zero ($S = 0$). This state consequently yields a zero derivative of the sliding surface ($\dot{S} = 0$). This condition ensures the system enters the control regime. Consequently, deriving the sliding surface for the proposed controller using (18) in conjunction with (19) and (20) allows the derivative to be expressed as (21).

$$\dot{S} = a\dot{i}_{ref} - a\dot{i}_L + b\dot{V}_o^{ref} - b\dot{v}_{C_o} + m[(K+1)[V_o^{ref} - v_{C_o}] - i_L] \quad (21)$$

Notably, (21) reveals that the system state variables of the BEV under consideration, $\dot{i}_L$ and $\dot{v}_{C_o}$, appear in the equation. These

variables can be substituted using the proposed model as given in (17). This substitution yields (22) under condition $\dot{S} = 0$, and by setting the duty cycle to be equal to the control signal ($d = u_{eq}$).

By rearranging (22), the control signal for regulating the DC bus voltage of the BEV system using the proposed SMC is obtained as expressed in (23).

$$0 = -aK \left[\frac{(1-u_{eq})}{C_o} i_L - \frac{P_{CPU}}{C_o v_{C_o}} \right] - a \left[\frac{1}{L} V_{BATT} + \frac{(u_{eq}-1)}{L} v_{C_o} \right] - b \left[\frac{(1-u_{eq})}{C_o} i_L - \frac{P_{CPU}}{C_o v_{C_o}} \right] + m[(K+1)[V_o^{ref} - v_{C_o}] - i_L] \quad (22)$$

$$u_{eq} = \frac{[aLK + bL]i_L v_{C_o} - [aLK + bL]P_{CPU} + aC_o V_{BATT} v_{C_o} - aC_o v_{C_o}^2 - mLC_o v_{C_o} [(K+1)[V_o^{ref} - v_{C_o}] - i_L]}{[aLK + bL]i_L v_{C_o} - aC_o v_{C_o}^2} \quad (23)$$

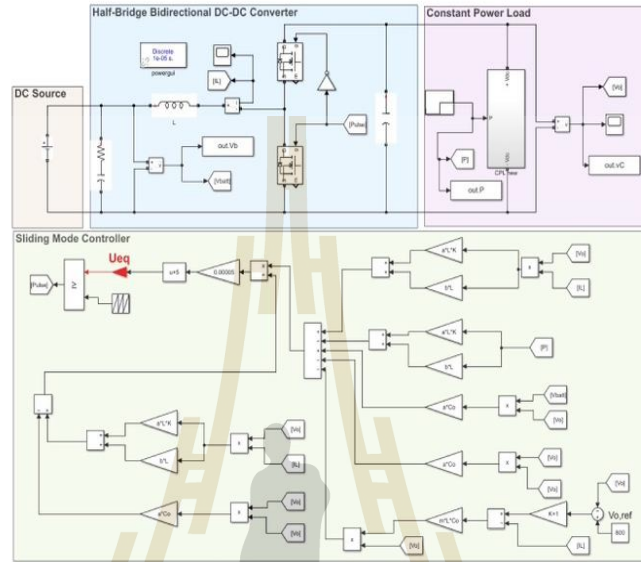


Figure 5. The SimPowerSystem® block of the considered BEV system

According to (23), the SMC parameters (a , b , m , and K) must be defined. As there is no general design method, these parameters are determined in this study via a trial-and-error approach. The performance of the controller is evaluated via intensive time-domain simulations using the SimPowerSystem® blockset in MATLAB/SIMULINK. The block diagram of the BEV system is illustrated in Figure 5. To assess the performance, the CPL step change from 10 kW to 10.5 kW is applied at $t = 0.5$ s., and the transient system response is examined. The resulting controller parameters configuration is detailed as follows:

- **Design of the parameter a**

The performance of the controller obtained by setting parameter a to 0.00000001, 0.00000001, and 0.000000001 while maintaining $b = 0.000000001$, $m = 55$, and $K = 25$ is shown in Figure 6. The result reveals that at $a = 0.00000001$, the controller effectively maintains the DC bus voltage value of 800 V. Conversely, for $a = 0.00000001$ and 0.000000001, the controller fails to regulate the DC bus voltage at the 800 V point.

- **Design of the parameter b**

The performance obtained by setting parameter b to 0.00000001, 0.000000001, and 0.000000005 while maintaining $a = 0.00000001$, $m = 55$, and $K = 25$ is illustrated in Figure 7.

- **Design of the parameter m**

The performance of the controller obtained by varying parameter m to 30, 55, and 70 while maintaining $a = 0.00000001$, $b = 0.000000001$, and $K = 25$ is shown in Figure 8. The results indicate that at $m = 55$, the controller effectively regulates the DC bus voltage at the 800 V setpoint. Conversely, at $m = 30$ and $m = 70$, the controller fails to maintain the DC bus voltage at 800 V.

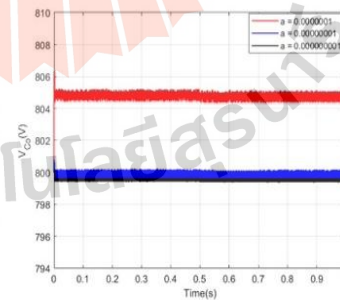


Figure 6. Design results of the parameter a

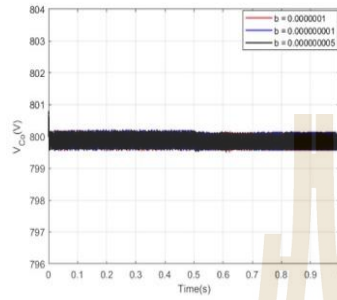


Figure 7. Design results of the parameter b

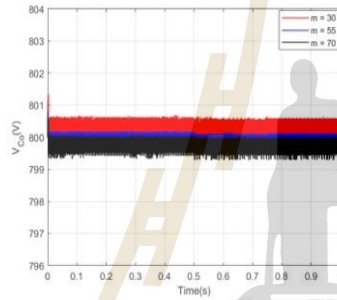


Figure 8. Design results of the parameter m

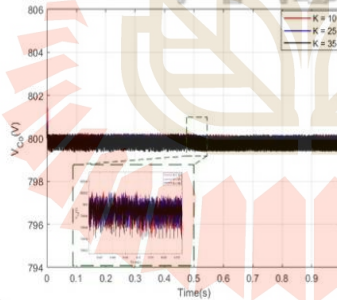


Figure 9. Design results of the parameter K

• Design of the parameter K

The performance of the controller obtained by varying parameter K to 10, 25, and 35 while maintaining $a = 0.00000001$, $b = 0.000000001$, and $m = 55$ is shown in Figure 9. The results reveal that all three K values effectively regulate the v_{C_o} at the desired 800 V setpoint. However, the $K = 25$ case yields the smallest steady-state error.

The above design procedure reveals that parameter a exerts the strongest influence on the system response. The control signal equation given in (23) reveals that a appears almost across all terms and is multiplied by all system parameters. Consequently, the following SMC parameters are selected for the considered BEV system: $a = 0.00000001$, $b = 0.000000001$, $m = 55$, and $K = 25$. The control performance of the system under load variations, using the designed parameters, is evaluated and presented in the next section.

Simulation Results

This section evaluates the control performance under load variations via simulation. The evaluation is performed under three cases, as described in the following.

Case I - Step change in load power (worst-case scenario): The test conditions are defined by a CPL decrease from 9.5 kW to 9 kW at $t = 0.5$ s., followed by increases from 9 kW to 10 kW at $t = 1$ s. and 10 kW to 11 kW at $t = 1.5$ s. The evaluation results are shown in figure 10.

As observed from the DC bus voltage response (v_{C_o}), the proposed SMC effectively regulates the voltage of the considered BEV system at the desired value of 800 V. The controller also delivers excellent dynamic performances, with a recovery time of only 0.6 ms. and almost 0% undershoot and overshoot. Additionally, the controller maintains the DC bus voltage within the ranges specified by ISO 21498-1,2, the standards that designers and manufacturers of EV systems must follow, even under varying load conditions.

Case II - Gradual power variations: A realistic EV operating scenario is simulated, where acceleration increases the power demand of the electric motor, whereas deceleration reduces the required power (Liu et al., 2023). Accordingly, the simulation conditions are defined such that the vehicle accelerates from 1 s. to 2 s., resulting in a gradual increase in load power. Afterward, the vehicle operates at a constant speed until 4 s., followed by a deceleration phase until 6 s., reducing the load power. The simulation results in Figure 11 indicate that the proposed sliding mode controller effectively regulates the DC bus voltage at 800 V, maintaining compliance with the ISO 21498-1,2 standards despite the gradual load power variations.

Case III - Robustness: The controller performance is evaluated under constant load power variations similar to Case I, whereas the system parameters, L and C_o , are varied by $\pm 20\%$ from their nominal values. The simulation

results shown in figure 12 indicate that the proposed sliding mode controller effectively regulates the DC bus voltage at 800 V despite parameter variations. These results maintain compliance with the ISO standards, confirming the robustness of the proposed sliding mode controller.

Consequently, it can be confirmed that the SMC design based on the GSSA-derived mathematical model and the trial-and-error parameter selection approach effectively regulates the DC bus voltage to meet the required standards, thereby ensuring the efficient operation of BEV powertrain systems.

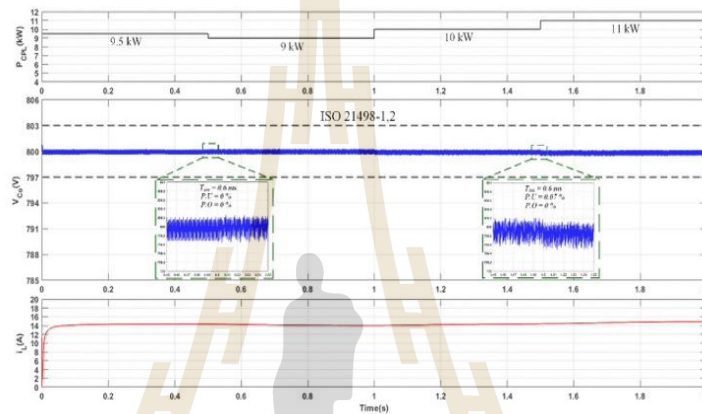


Figure 10. Simulation result for the proposed controller performance evaluation (Case I)

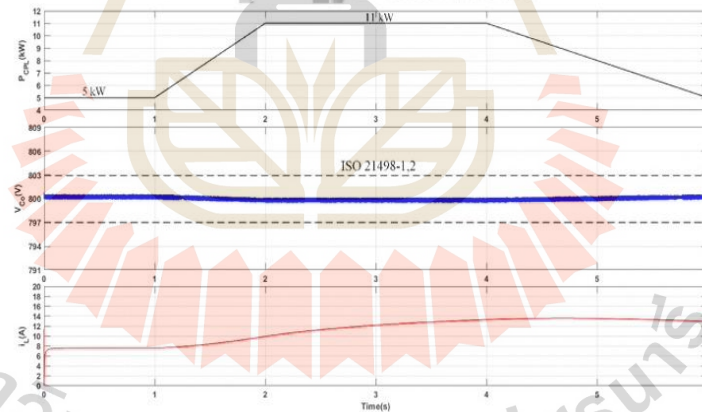


Figure 11. Simulation result for the proposed controller performance evaluation (Case II)

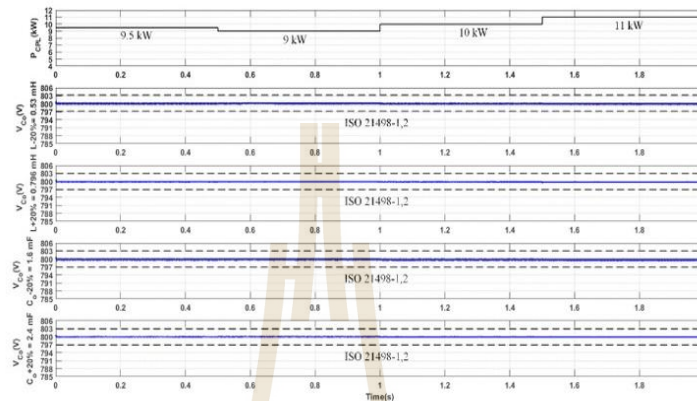


Figure 12. Simulation result for the proposed controller performance evaluation (Case III)

Conclusion

This article presents the design of a SMC for a bidirectional half-bridge DC–DC converter within a BEV system. The design is based on a sliding surface defined as a linear combination of state variables in conjunction with a GSSA-derived time-invariant mathematical model for formulating the control signal equation. Further, the controller parameters are selected via a trial-and-error approach. Simulations in MATLAB/SIMULINK demonstrate that the proposed SMC effectively regulates the DC bus voltage of the considered BEV system to a constant value of 800 V in compliance with ISO 21498-1,2. The proposed controller also exhibits excellent dynamic performances, characterized by rapid recovery and negligible percent overshoot/undershoot, even under considerable load and system parameter variations (robustness). Therefore, the proposed design effectively ensures DC bus voltage regulation in compliance with the required standards, supporting the efficient operation of the BEV powertrain. However, a major disadvantage of SMC remains the lack of a general procedure for selecting parameters. Thus, applying artificial intelligence (AI) techniques to SMC parameter design represents a notable direction for future research. Such approaches can provide systematic design guidelines and further enhance overall control performance.

Acknowledgement

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT)

References

- AL-Nussairi, M.K., Bayindir, R., Padmanaban, S., Mihet-Popa, L., and Siano, P. (2017). Constant power loads (CPL) with microgrids: Problem definition, stability analysis, and compensation techniques. *Energies*, 10(10):1656. <https://doi.org/10.3390/en10101656>
- Chakraborty, S., Yu, H.N., Hasan, M.M., Tran, D.-D., El Baghdadi, M., and Hegazy, O. (2019). DC-DC converter topologies for electric vehicles, plug-in hybrid electric vehicles and fast charging stations: State of the art and future trends, 12(8):1569. <https://doi.org/10.3390/en12081569>
- Erickson, R. W., & Maksimović, D. (2001). *Fundamentals of power electronics*. Kluwer Academic Publishers.
- Emadi, A. (2004). Modeling and analysis of multiconverter DC power electronic systems using the generalized state-space averaging method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(3), 661–668. <https://doi.org/10.1109/TIE.2004.825339>
- Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C.H., and Williamson, G.A. (2006). Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: Definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives. *IEEE Transaction Vehicular Technology*, 55(4):1112–1125. <https://doi.org/10.1109/TVT.2006.877483>
- Ehsani, M., Singh, K.V., Bansal, H.O., and Mehriardi, R.T. (2021). State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles. *Proc. IEEE*, 109(6):967–984. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2021.3072788>
- Farooq, Z., Zaman, T., Khan, M.A., Nasimullah, Mueen, S.M., and Ibeas, A. (2019). Artificial neural network based adaptive control of single phase dual active bridge with finite time disturbance compensation. *IEEE Access*, 7:112239–112249. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2934253>
- Gamelin, T. W. (2001). *Complex analysis*. Springer.
- Hren, A., Trunti, M., and Mihalić, F. (2023). A survey on the state-of-the-art and future trends of multilevel inverters in BEVs. *Electronics*, 12(13):2993. <https://doi.org/10.3390/electronics12132993>
- Islam, R., Rafin, S.M.S.H., and Mohammed, O.A. (2023). Comprehensive review of power electronic converters in electric vehicle applications. *Forecasting*, 5(1):22–80. <https://doi.org/10.3390/forecast5010002>

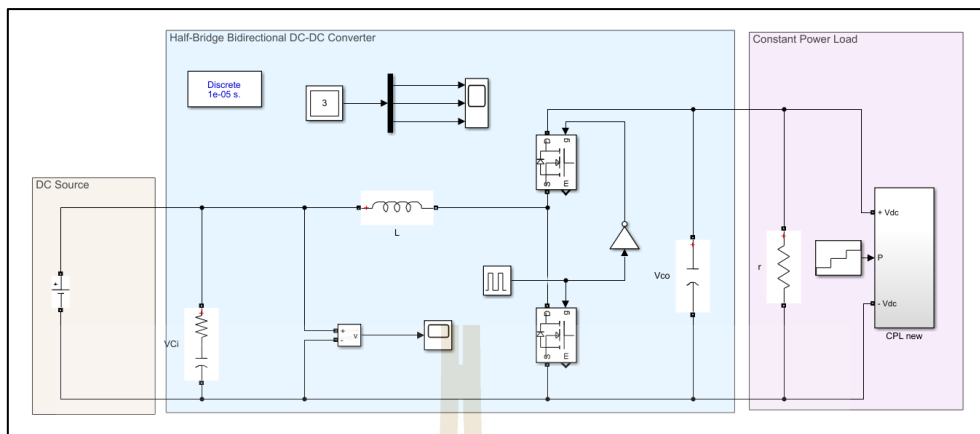
- Kanthi, M.K. and Abraham, D.M. (2020). PWM-based sliding mode current controller for bidirectional DC-DC converters in electric vehicles. *Proceedings of the 2020 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*; December 17-19, 2020; Kottayam, India, p. 1-6. <https://doi.org/10.1109/PICC51425.2020.9362431>.
- Liu, Y., Liu, K., Zhou, Y., Chen, Y., Wei, D., Zhou, S. and Luan, H. (2023). Study on the design and speed ratio control strategy of continuously variable transmission for electric vehicle. *IEEE Access*, 11:107880-107891. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3318323>
- Mahdavi, J., Emaadi, A., Bellar, M.D., and Ehsani, M. (1997). Analysis of power electronic converters using the generalized state-space averaging approach. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 44(8), 767–770. <https://doi.org/10.1109/81.611257>
- Mohanty, S., Kar, S.K., Choudhury, A., Pati, A., and Khatua, S. (2021). A comparative analysis between a single loop PI, double loop PI and sliding mode control structure for a buck converter. *Proceedings of the 2021 1st Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology (ODICON)*; January 8-9, 2021; Bhubaneswar, India, p. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ODICON50556.2021.9428986>
- Martínez-Treviño, B.A., El Aroudi, A., Cid-Pastor, A., García, G., and Martínez-Salamero, L. (2021). Synthesis of constant power loads using switching converters under sliding-mode control. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I, Regular Papers*, 68(1):524-536. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2020.3031332>
- Muthukumar, P., Venkateshkumar, M., and Chin, C.S. (2024). A comparative study of cutting-edge bi-directional power converters and intelligent control methodologies for advanced electric mobility. *IEEE Access*, 12:28752-28776. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3360267>
- Malik, M. A. I., Kalam, M. A., Ikram, A., Zeeshan, S., and Zahidi, S. Q. R. (2025). Energy transition towards electric vehicle technology: Recent advancements. *Energy Reports*, 13: 2958-2996. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.02.029>
- Noor, F., Zeh, K., Ullah, S., Ullah, Z., Khalid, M., and Al-Durra, A. (2024). Design and Validation of Adaptive Barrier Function Sliding Mode Controller for a Novel Multisource Hybrid Energy Storage System Based Electric Vehicle. *IEEE Access*, 12 : 145270-145285. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3471893>
- Poorfakhraei, A., Narimani, M., and Emadi, A. (2021). A review of multilevel inverter topologies in electric vehicles: Current status and future trends. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 2:155-170. <https://doi.org/10.1109/OJPEL.2021.3063550>
- Reimers, J., Dorn-Gomba, L., Mak, C., and Emadi, A. (2019). Automotive traction inverters: Current status and future trends. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(4):3337-3350. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2897899>
- Sanders, S.R., Noworolski, J.M., Liu, X.Z., and Verghese, G.C. (1991). Generalized averaging method for power conversion circuits. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 6(2), 251–259. <https://doi.org/10.1109/63.76811>
- Tang, G., Zhang, T., and Zhang, X. (2020). An active stabilization control strategy for DC-DC converter feeding constant power load in electric vehicle. *Proceedings of the 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*; June 12-14, 2020; Chongqing, China, p. 375-379.
- Wu, L., Liu, J., Vazquez, S., and Mazumder, S.K. (2022). Sliding mode control in power converters and drives: A review. *IEEE/CAA J. Autom. Sin.*, 9(3):392-409. <https://doi.org/10.1109/IAS.2021.1004380>
- Xu, Q., Vafamand, N., Chen, L., Dragičević, T., Xie, L., and Blaabjerg, F. (2021). Review on advanced control technologies for bidirectional DC/DC converters in DC microgrids. *IEEE J. Emerg. Selected Topics in Power Electronics*, 9(2):1205-1221. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2020.2978064>



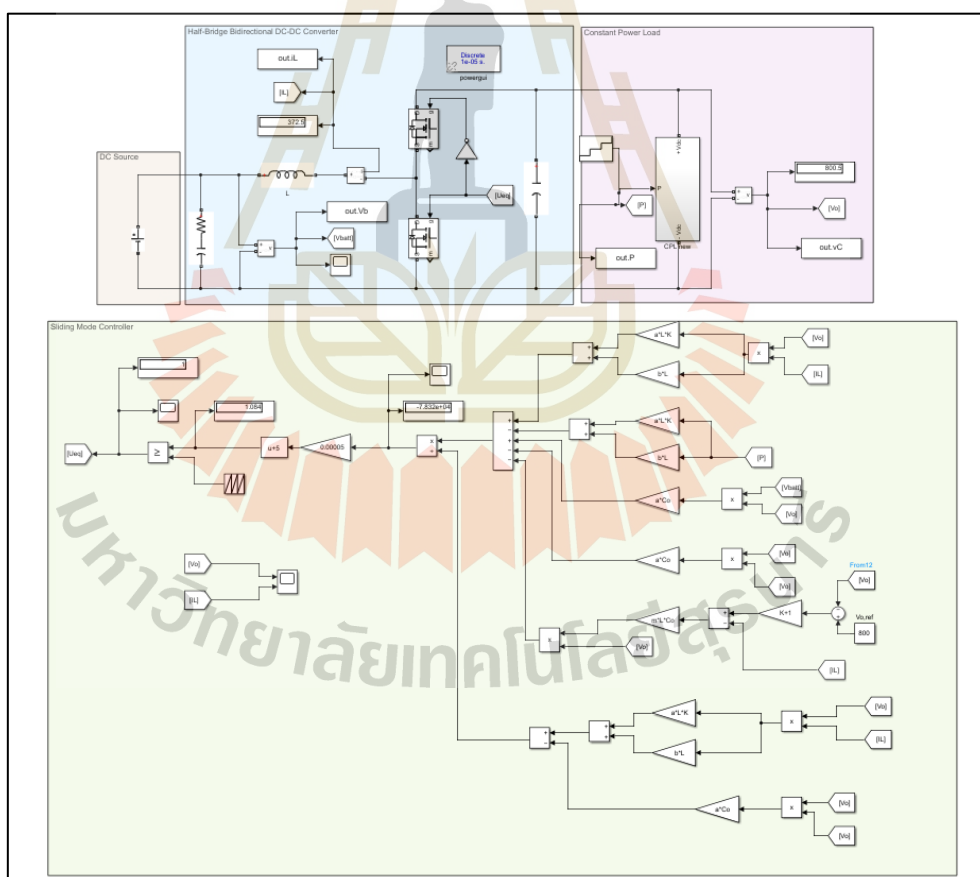
ภาคผนวก ข.

ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB

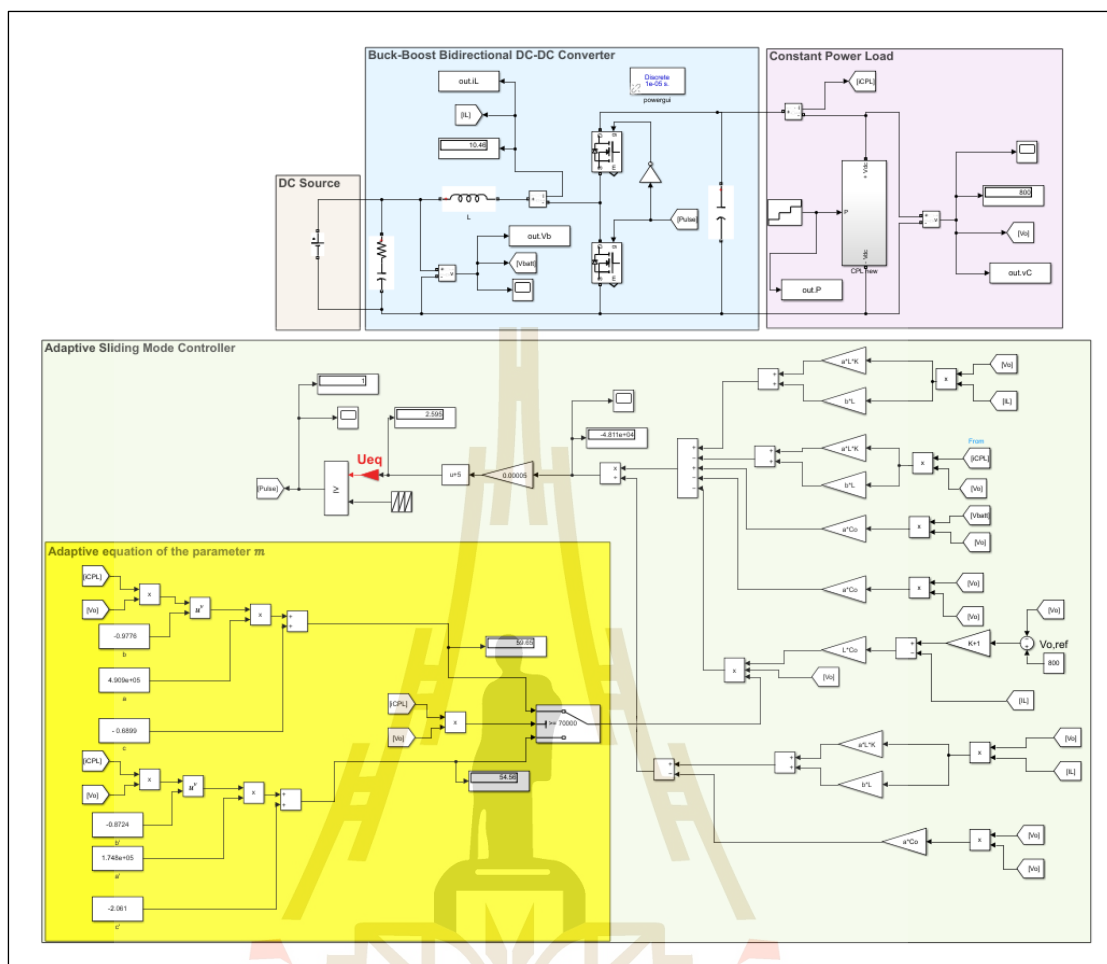
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ข.1 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้า
ที่พิจารณากรณีไม่มีตัวควบคุม



รูปที่ ข.2 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้า
ที่พิจารณากรณีมีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน



รูปที่ ข.3 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้า
ที่พิจารณากรณีมีตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a golden-yellow stylized 'H' shape that forms a triangular frame. Inside this frame is a grey silhouette of a person standing. Below the person is a circular emblem containing a stylized tree or plant. The entire logo is surrounded by a ring of red, pointed shapes, resembling a sunburst or a traditional Thai decorative element.

ภาคผนวก ค.

การวิเคราะห์ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน
ที่มีผลต่อการตอบสนองของระบบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดเลื่อนที่มีผลต่อการตอบสนองของระบบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ (ค-1) ถึงสมการที่ (ค-3) ดังต่อไปนี้

$$\Delta x = |x_1 - x_2| \quad (\text{ค-1})$$

$$\% \Delta x = \frac{\Delta x}{x_1} \times 100\% \quad (\text{ค-2})$$

$$\Delta v_{C_o} = |v_{C_o}(x_1) - v_{C_o}(x_2)| \quad (\text{ค-3})$$

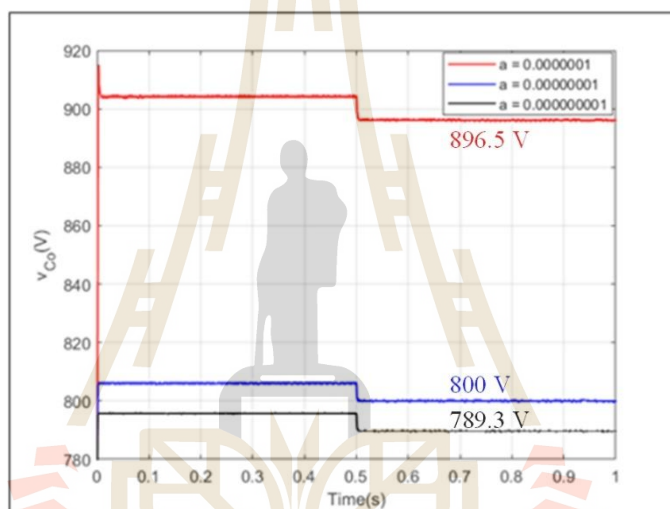
โดยที่	x_1	คือ ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่ทำให้ระบบสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสให้คงที่ที่ 800 V ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าพารามิเตอร์อ้างอิง
	x_2	คือ ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่ปรับเปลี่ยนไป
	Δx	คือ ผลต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์อ้างอิงกับค่าพารามิเตอร์ที่ปรับเปลี่ยนไป
	$\% \Delta x$	คือ เปอร์เซ็นต์ของผลต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์อ้างอิงกับค่าพารามิเตอร์ที่ปรับเปลี่ยนไป
	$v_{C_o}(x_1)$	คือ ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ x_1
	$v_{C_o}(x_2)$	คือ ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ x_2
	Δv_{C_o}	คือ ผลต่างของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ x_1 และ x_2

การวิเคราะห์ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดเลื่อนสามารถพิจารณาได้จากค่าความไว (sensitivity) ของแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดังสมการที่ (ค-4) ซึ่งหากมีค่าความไวสูงแสดงว่าค่าพารามิเตอร์ตัวนั้นส่งผลกระทบต่อการตอบสนองของระบบอย่างมีนัยสำคัญ ในทางกลับกันหากมีค่าความไวต่ำแสดงว่าค่าพารามิเตอร์ตัวนั้นส่งผลกระทบต่อการตอบสนองของระบบน้อย

$$sensitivity = \frac{\Delta v_{C_o}}{\% \Delta x} \quad (\text{ค-4})$$

ดังนั้นจากรายละเอียดที่ได้อธิบายข้างต้นสามารถแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดเลื่อนที่มีผลต่อการตอบสนองของระบบได้ดังต่อไปนี้

เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ a ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการสุ่มค่าและการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 10 kW ไปเป็น 20 kW ที่เวลา 0.5 วินาที และพิจารณาผลการตอบสนองตั้งแต่เวลา 0.5 วินาทีเป็นต้นไป ซึ่งผลการออกแบบแสดงได้ดังรูปที่ ค.1 จะพบว่า เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ a ให้เพิ่มขึ้น (เส้นสีแดง) จากค่าอ้างอิง (เส้นสีน้ำเงิน) จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าดีซีบัสมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 800 V และเมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ a โดยอาศัยสมการที่ (ค-1) ถึงสมการที่ (ค-4) จะได้ว่า



รูปที่ ค.1 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ a เมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดจาก 10 kW ไปเป็น 20 kW

$$\Delta a = |0.00000001 - 0.00000001| = 0.00000009$$

$$\% \Delta a = \frac{|0.00000001 - 0.00000001|}{0.00000001} \times 100\% = 900\%$$

$$\Delta v_{C_o} = |800 - 896.5| = 96.5$$

$$sensitivity = \frac{\Delta v_{C_o}}{\% \Delta a} = \frac{96.5}{900\%} = 0.11$$

ดังนั้นจะได้ค่าความไวเท่ากับ 0.11 ซึ่งหมายถึงพารามิเตอร์ a มีการเปลี่ยนแปลงไปแบบเพิ่มค่ามากขึ้น 1% จะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเปลี่ยนแปลงไป 0.11 V

ในทำนองกลับกันเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ a ให้ลดลง (เส้นสีดำ) จากค่าอ้างอิง (เส้นสีน้ำเงิน) จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าดีซีบัสมีค่าลดลงน้อยกว่า 800 V ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ a ด้วยสมการที่ (ค-1) ถึงสมการที่ (ค-4) จะได้ว่า

$$\Delta a = |0.00000001 - 0.000000001| = 0.000000009$$

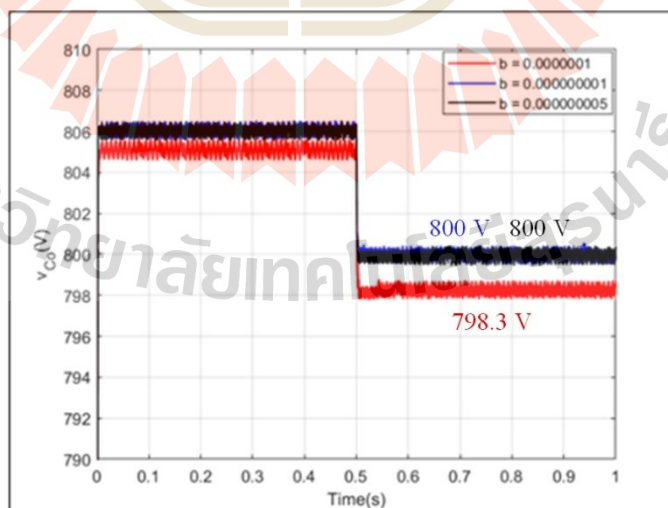
$$\% \Delta a = \frac{|0.00000001 - 0.000000001|}{0.00000001} \times 100\% = 90\%$$

$$\Delta v_{C_o} = |800 - 789.7| = 10.3$$

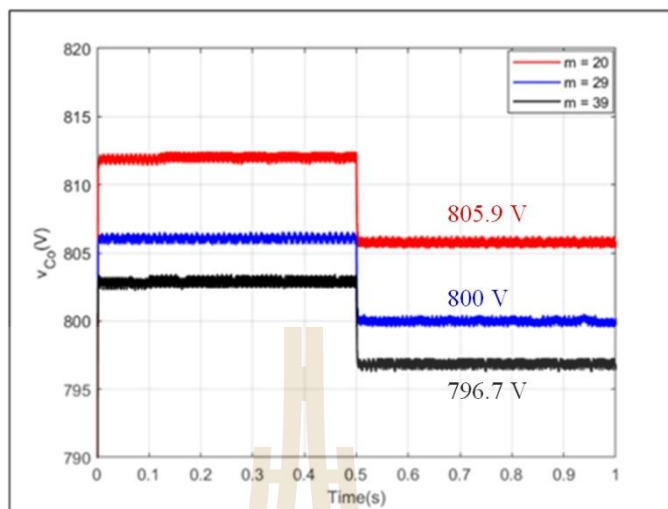
$$sensitivity = \frac{\Delta v_{C_o}}{\% \Delta a} = \frac{10.3}{90\%} = 0.11$$

ดังนั้นจะได้ค่าความไวเท่ากับ 0.11 ซึ่งหมายถึงพารามิเตอร์ a มีการเปลี่ยนแปลงไปแบบลดค่าน้อยลง 1% จะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าดีซีบัสเปลี่ยนแปลงไป 0.11 V

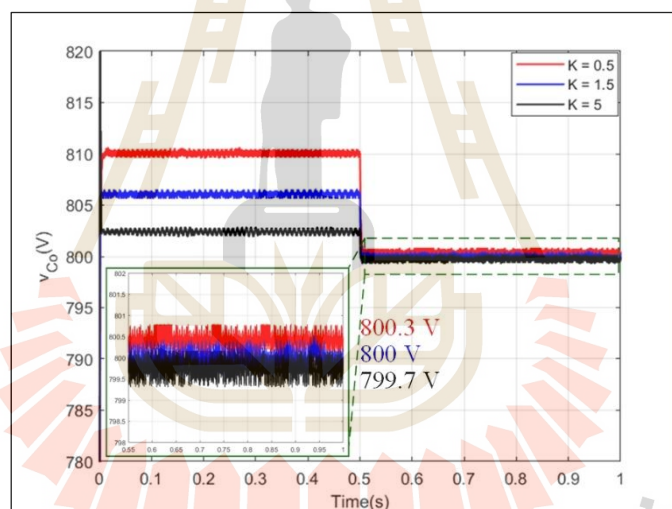
สำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ b , m และ K ที่ได้ดังแสดงในรูปที่ ค.2 ถึงรูปที่ ค.4 ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่อการตอบสนองของระบบในทำนองเดียวกับที่แสดงรายละเอียดสำหรับค่าพารามิเตอร์ a จะสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังตารางที่ ค.1 และตารางที่ ค.2



รูปที่ ค.2 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ b เมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดจาก 10 kW ไปเป็น 20 kW

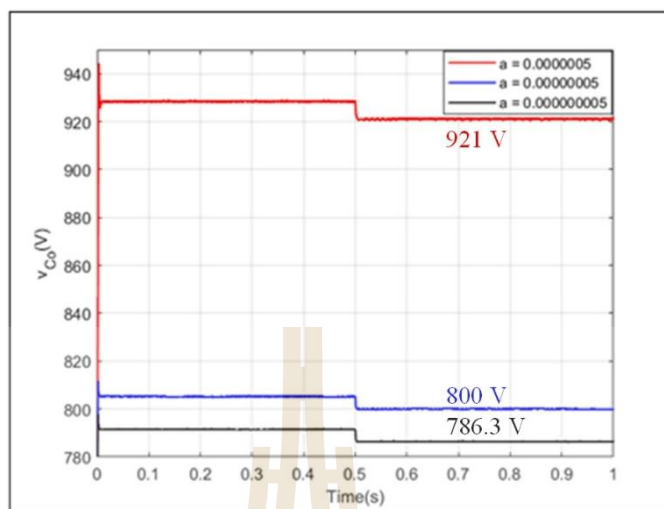


รูปที่ ค.3 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ m เมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดจาก 10 kW ไปเป็น 20 kW

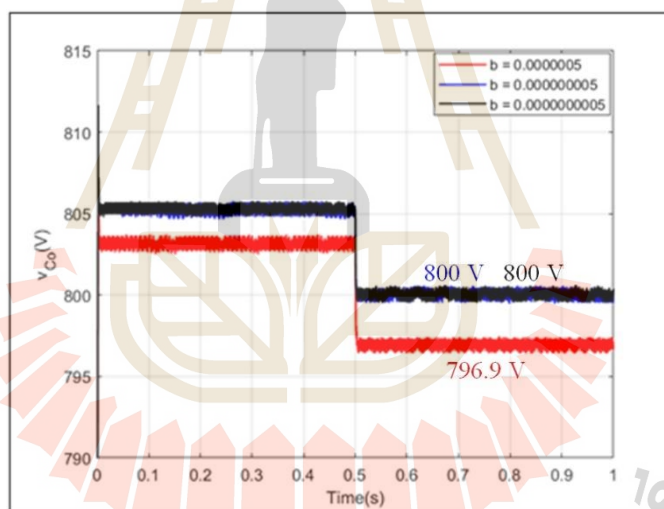


รูปที่ ค.4 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ K เมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดจาก 10 kW ไปเป็น 20 kW

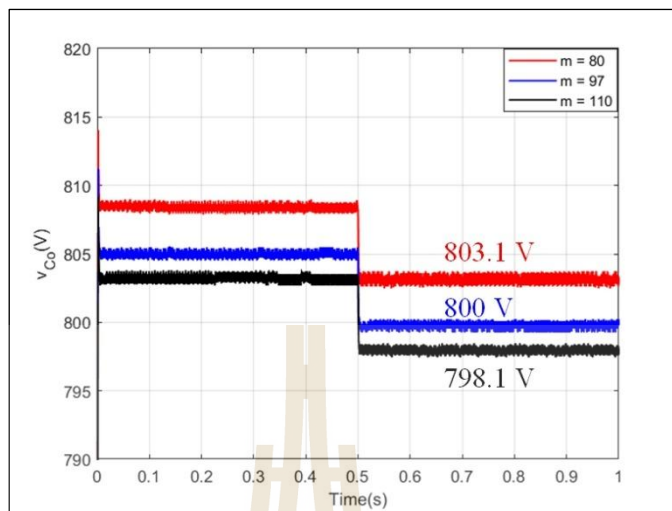
นอกจากนี้เมื่อกำหนดเงื่อนไขให้โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 20 kW ไปเป็น 30 kW เมื่อเวลาผ่านไป 0.5 วินาที และพิจารณาผลการตอบสนองตั้งแต่เวลา 0.5 วินาทีเป็นต้นไป ซึ่งผลการออกแบบแสดงได้ดังรูปที่ ค.5 ถึงรูปที่ ค.8 เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่อการตอบสนองของระบบดังรายละเอียดที่นำเสนอในข้างต้นจะได้สรุปผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ ค.1 และตารางที่ ค.2



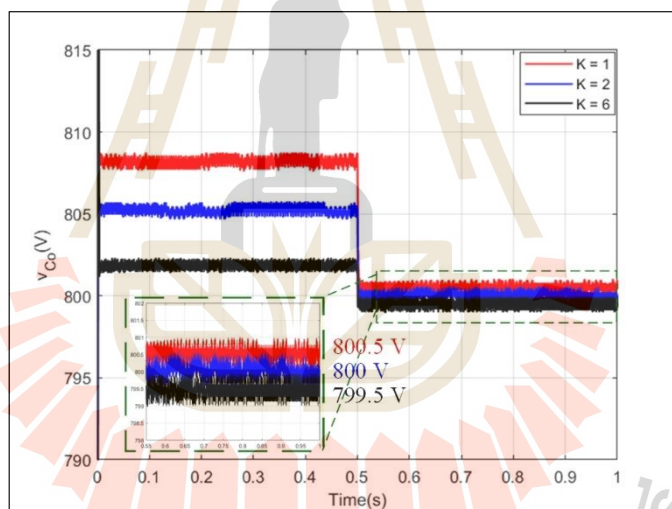
รูปที่ ค.5 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ a เมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดจาก 20 kW ไปเป็น 30 kW



รูปที่ ค.6 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ b เมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดจาก 20 kW ไปเป็น 30 kW



รูปที่ ค.7 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ m เมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดจาก 20 kW ไปเป็น 30 kW



รูปที่ ค.8 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ K เมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดจาก 20 kW ไปเป็น 30 kW

ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โหมดการเลื่อนที่มีผลต่อการตอบสนองของระบบที่ได้ดังตารางที่ ค.1 และตารางที่ ค.2 แสดงให้เห็นว่า การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ m มีความไวมากที่สุด กล่าวคือ การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ m ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบมากที่สุด ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้นำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ m ไปใช้ในการพัฒนาและต่อยอดเป็นตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่นำเสนอรายละเอียดไว้ในบทที่ 4

ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ให้เพิ่มขึ้นจากค่าอ้างอิง

พารามิเตอร์	x_2	x_1	Δx	$\% \Delta x$	$v_{C_o}(x_2)(V)$	$v_{C_o}(x_1)(V)$	$\Delta v_{C_o}(V)$	<i>Sensitivity</i> ($V / \%$)
<i>a</i> (20 kW)	0.0000001	0.00000001	0.00000009	900	896.5	800	96.5	0.11
<i>a</i> (30 kW)	0.0000005	0.00000005	0.00000045	900	921	800	121	0.13
<i>b</i> (20 kW)	0.0000001	0.000000001	0.000000099	9900	798.3	800	1.7	0.0002
<i>b</i> (30 kW)	0.0000005	0.000000005	0.00000000495	9900	796.9	800	3.1	0.0003
<i>m</i> (20 kW)	39	29	10	34.48	796.7	800	3.3	0.10
<i>m</i> (30 kW)	110	97	13	13.40	798.1	800	1.9	0.14
<i>K</i> (20 kW)	5	1.5	3.5	233.33	799.7	800	0.3	0.0013
<i>K</i> (30 kW)	6	2	4	200	799.5	800	0.5	0.0025

ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ให้ลดลงจากค่าอ้างอิง

พารามิเตอร์	x_2	x_1	Δx	$\% \Delta x$	$v_{C_o}(x_2)(V)$	$v_{C_o}(x_1)(V)$	$\Delta v_{C_o}(V)$	<i>Sensitivity</i> ($V / \%$)
<i>a</i> (20 kW)	0.000000001	0.00000001	0.000000009	90	789.3	800	10.3	0.11
<i>a</i> (30 kW)	0.000000005	0.00000005	0.000000045	90	786.3	800	13.7	0.15
<i>b</i> (20 kW)	0.000000005	0.000000001	0.000000004	400	800	800	0	0
<i>b</i> (30 kW)	0.0000000005	0.000000005	0.0000000045	90	800	800	0	0
<i>m</i> (20 kW)	20	29	9	31.04	805.9	800	5.9	0.19
<i>m</i> (30 kW)	80	97	17	17.53	803.1	800	3.1	0.18
<i>K</i> (20 kW)	0.5	1.5	1	66.67	800.3	800	0.3	0.0045
<i>K</i> (30 kW)	1	2	1	50	800.5	800	0.5	0.01

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a golden-yellow stupa-like structure with a central figure, surrounded by a circular border with red and orange segments. The university's name is written in Thai script at the bottom.

ภาคผนวก ง.

โปรแกรมการค้นหาพารามิเตอร์ m ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

```

*****
โปรแกรมการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว
*****

โปรแกรม
L = 0.663e-3;
Ci = 35.877e-6;
Co = 2e-3;
a = 0.00000001;
b = 0.000000001;
K = 1.5;
%function
[count,best_error,best_neighbor,best_error_list]=ATS_Bidirectional(round)
round = 100;
N=1;
xlimit=[70;
        1];
for r=1:50
S(r,:)=((xlimit(1,:)-xlimit(2,:)).*rand(1,N))+xlimit(2,:);
End
for k=1:size(S,1)
    g=TestW(S(k,1));
    costvalue(k,1)=g;
end
[best_error,index]=min(costvalue);
S0=S(index,:);
max_count=round;

```

% N คือ จำนวนพารามิเตอร์ที่ 4 ต้องการค้นหา
 % แถวที่ 1 ของ xlimit คือ ขอบเขตบนของพารามิเตอร์
 % แถวที่ 2 ของ xlimit คือ ขอบเขตบนของพารามิเตอร์
 % สุ่มคำตอบ S0 เริ่มต้นภายในขอบเขตการค้นหาของ
 ค่าพารามิเตอร์ m แต่ละตัวจำนวน 50 ชุด
 % ประเมินคำตอบเริ่มต้นด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
 % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดใน costvalue
 และเก็บไว้ใน best_error
 % เก็บค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
 น้อยที่สุดไว้ใน S0
 % กำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการค้นหา

```

best_neighbor=S0; % เก็บค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่า
                  % น้อยที่สุด

neighbor_list=zeros(6,N); % รีเซตค่าใน neighbor_list

radius=50; %กำหนดรัศมีการค้นหาเริ่มต้นภายในพื้นที่
Number_neighb=50; %กำหนดการสุ่มค่าใกล้เคียง
overall_best_error=best_error; % ปรับค่า overall_best_error = best_error
overall_neighbor=best_neighbor; % ปรับค่า overall_neighbor = best_neighbor
n=0; % กำหนดค่าเริ่มต้นของจำนวนการซ้ำของคำตอบ
t=0; % กำหนดค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
tt=0; % กำหนดค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list
ttt=0; % กำหนดค่าตัวเลื่อนสำหรับ best_error_list
count=0; % กำหนดค่าเริ่มต้นของจำนวนรอบการค้นหา
n_backtracking=0; % กำหนดค่าเริ่มต้นของจำนวนการเรียกใช้กลไกการ
                  % เดินย้อนรอย

tic; % เริ่มต้นคำนวณเวลาในการค้นหา

% เริ่มโปรแกรม ATS
t=t+1; % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
tt=tt+1; % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list
ttt=ttt+1; % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ best_error_list
local(t,1)=count; % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ local
local(t,2:5)=best_neighbor; % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 22 ของ
                           % local
local(t,6)=best_error; % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 23 ของ local
tabu_list(tt,1)=count; % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ tabu_list
tabu_list(tt,2:5)=best_neighbor; % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 22
                                % ของ tabu_list
tabu_list(tt,6)=best_error; % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 23 ของ
                             % tabu_list

```

```

best_error_list(ttt,1)=count;          % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ
                                         best_error_list
best_error_list(ttt,2:5)=best_neighbor; % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 22
                                         ของ best_error_list
best_error_list(ttt,6)=best_error;      % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 23 ของ
                                         best_error_list

for count=1:max_count
    S1=random_neigh(Number_neighb,radius,xlimit,S0);
    % เรียกใช้โปรแกรม random_neigh เพื่อสุ่มค่า
    % ใกล้เคียงรอบคำตอบ S0 ภายในปริภูมิการค้นหาปัจจุบัน
    % อินพุตของโปรแกรมนี้อือ Number_neighb, radius,
    % xlimit, และ S0
    % เอาต์พุต คือ ค่าใกล้เคียง (S1) จำนวนเท่ากับจำนวน
    % Number_neighb (50 ตัว)
    [best_error1,best_neighbor1,best_error,best_neighbor]=objective1(S1,best_error,S0);
    % เรียกใช้โปรแกรม objective1 เพื่อประเมินค่า
    % ใกล้เคียงที่สุ่มได้
    % อินพุตของโปรแกรมนี้อือ S1, best_error, และ S0
    % เอาต์พุตคือ best_error1, best_neighbor1,
    % best_error, และ best_neighbor
    neighbor_list(k,1:size(S0,2))=[best_neighbor1];
    % เก็บค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่า
    % น้อยที่สุดภายในปริภูมิการค้นหาปัจจุบันไว้ในคอลัมน์ที่
    % 1 และ 2 ของ neighbor_list
    neighbor_list(k,size(S0,2)+1)=best_error1;
    % เก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุด
    % ภายในปริภูมิการค้นหาปัจจุบันไว้ในคอลัมน์ที่ 3 ของ
    % neighbor_list

    if (count>1)

```

```

if (tabu_list(count,6)>best_error)
n=n+1;
else
n=0;
end
end
% ตรวจสอบการซ้ำของค่าคำตอบโดยการเปรียบเทียบ
% ระหว่าง best_error1 และ best_error ถ้ามีการซ้ำของ
% ค่าคำตอบ ให้ปรับเพิ่มค่า n

tt=tt+1; % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list
tabu_list(tt,1)=count; % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ tabu_list
tabu_list(tt,2:5)=best_neighbor1; % เก็บค่า best_neighbor1 ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 5
% ของ tabu_list
tabu_list(tt,6)=best_error1; % เก็บค่า best_error1 ไว้ในคอลัมน์ที่ 6 ของ
% tabu_list
ttt = ttt+1; % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ best_error_list
best_error_list(ttt,1)=count; % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ
% best_error_list
best_error_list(ttt,2:5)=best_neighbor; % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 5 ของ
% best_error_list
best_error_list(ttt,6)=best_error; % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 6 ของ
% best_error_list

disp([count tabu_list(count,6) best_error n n_backtracking ])
% แสดงค่า count, tabu_list(count,6), best_error,
% n และ n_backtracking % เริ่มกลไกการปรับลดรัศมี

% เริ่มกลไกการปรับลดรัศมี
rsys=1.3;
if best_error<=1 && radius>10 % เงื่อนไขที่ 3) ถ้า best_error <= 1 และ
% radius > 10 ให้ลดขนาดรัศมีลง
radius=radius/rsys;

```

```

end
if (best_error<0.0001)           % ตรวจสอบเกณฑ์การยุติการค้นหาค้นหาเมื่อ best_error <
                                0.0001
t=t+1;                           % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
tt=tt+1;                         % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list
disp([count best_error overall_best_error])
                                % แสดงค่า count, best_error, และ
                                overall_best_error
local(t,1)=count;               % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ local
local(t,2)=tabu_list(count,2);  % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 2 ของ count ไว้ใน
                                คอลัมน์ที่ 2 ของ local
local(t,3)=tabu_list(count,3);  % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 3 ของ count ไว้ใน
                                คอลัมน์ที่ 3 ของ local
local(t,4)=tabu_list(count,4);  % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 4 ของ count ไว้ใน
                                คอลัมน์ที่ 4 ของ local
local(t,5)=tabu_list(count,5);  % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 5 ของ count ไว้ใน
                                คอลัมน์ที่ 5 ของ local
local(t,6)=tabu_list(count,6);  % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 6 ของ count ไว้ใน
                                คอลัมน์ที่ 6 ของ local
break;                           % ยุติการค้นหา
end
% เริ่มกลไกการเดินย้อนรอย
if n>=15                         % จะทำงานเมื่อจำนวนการซ้ำของคำตอบ (n) มีค่า
                                ตั้งแต่ 15 ขึ้นไป
    radius=2;                    % รีเซ็ตค่ารัศมี
    n_backtracking=n_backtracking+1; % เพิ่มค่า n_back_tracking
    TEMP=tabu_list(count-3:count+1,:); % ทำการจัดลำดับ (ranking) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                                และค่าพารามิเตอร์ 5 ชุดสุดท้ายก่อนมีการเรียกใช้
                                กลไกย้อนรอยการค้นหา
                                % TEMP จะเก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ
                                ค่าพารามิเตอร์ 5 ชุดสุดท้ายก่อนทำการจัดลำดับ

```

```

[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6));

% หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่า
% ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด

RANK(5,:) = TEMP(INDEX,:); % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด
% และค่าพารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 5 ใน RANK

TEMP(INDEX,6)=0; % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
ด้วยศูนย์
% ดังนั้นใน TEMP ขณะนี้จะเหลือค่าฟังก์ชัน
% วัตถุประสงค์เพียง 4 ค่า

[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6));

% หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของ
% ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด

RANK(4,:) = TEMP(INDEX,:); % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และ
% ค่าพารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 4 ใน RANK

TEMP(INDEX,6)= 0; % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
ด้วยศูนย์
% ดังนั้นใน TEMP ขณะนี้จะเหลือค่าฟังก์ชัน
% วัตถุประสงค์เพียง 3 ค่า

[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6)); % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของ
% ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด

RANK(3,:) = TEMP(INDEX,:); % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และ
% ค่าพารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 3 ใน RANK

TEMP(INDEX,6)= 0; % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
ด้วยศูนย์
% ดังนั้นใน TEMP ขณะนี้จะเหลือค่าฟังก์ชัน
% วัตถุประสงค์เพียง 2 ค่า

[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6)); % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของ
% ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด

RANK(2,:) = TEMP(INDEX,:); % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และ
% ค่าพารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 2 ใน RANK

```

```

TEMP(INDEX,6)= 0; % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
                    ด้วยศูนย์
                    % ดังนั้นใน TEMP ขณะนี้จะเหลือค่าฟังก์ชัน
                    วัตถุประสงค์เพียง 1 ค่า

[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6)); % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของ
                                ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด

RANK(1,:) = TEMP(INDEX,:); % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และ
                             ค่าพารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 1 ใน RANK

TEMP(INDEX,6)= 0; % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
                    ด้วยศูนย์
                    % ดังนั้นใน TEMP ขณะนี้จะไม่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                    ให้ทำการจัดลำดับอีกต่อไป

neighbor=RANK(5,2:5); % แทนค่า neighbor ด้วยค่าพารามิเตอร์ลำดับที่ 5 ใน
                       RANK ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชัน
                       วัตถุประสงค์แตกต่างจากค่าคำตอบที่ซ้ำมากที่สุดเมื่อ
                       เทียบกับอีก 4 ลำดับที่เหลือใน RANK

S0=neighbor; % ปรับค่า S0 = neighbor

if best_error<overall_best_error
overall_best_error=best_error;
overall_best_neighbor=best_neighbor;

% ถ้า best_error < overall_best_error ให้ปรับค่า
% overall_best_error โดยแทนค่า overall_best_error
% ด้วย best_error และแทนค่าพารามิเตอร์
% overall_best_neighbor ด้วย best_neighbor

t=t+1; % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
local(t,1)=count; % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ local
local(t,2:5)=best_neighbor; % เก็บค่า bestneighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 5 ของ
                             local

local(t,6)=best_error; % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 6 ของ local

end

```

```

best_error=RANK(5,6);           % แทนค่า best_error ด้วยค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                                % ลำดับที่ 5 ใน RANK ซึ่งเป็นค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่
                                % แตกต่างจากค่าคำตอบที่ซ้ำมากที่สุดเมื่อเทียบกับอีก 4
                                % ลำดับที่เหลือใน RANK

n=0;                             % ปรับค่า n = 0
else                             % ไม่เช่นนั้นแล้ว
S0=best_neighbor;               % แทนค่า S0 ด้วย best_neighbor
best_error=best_error;         % แทนค่า best_error ด้วย best_error
end

end

if overall_best_error<best_error
best_error=overall_best_error;
best_neighbor=overall_best_neighbor; % ปรับค่า best_error
                                % ถ้า overall_best_error < best_error
                                % ให้แทนค่า best_error ด้วย
                                % overall_best_error และแทนค่าพารามิเตอร์
                                % best_neighbor ด้วย overall_best_neighbor

end
time=toc;
m=best_neighbor(1);             % แสดงค่าพารามิเตอร์ m

figure(1)
plot([0:1:count],best_error_list(:,6)) % พล็อตกราฟระหว่าง count กับ best_error_list
xlabel(' Round')                 % แสดงชื่อแกน x เป็น Round
ylabel('W')                     % แสดงชื่อแกน y เป็น W
return                          % กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน

```

โปรแกรม random_neigh.m

```
function S1=random_neigh(Number_neighb,radius,xlimit,S0)

% โปรแกรม random_neigh เป็นโปรแกรมสุ่มค่า
% ใกล้เคียงรอบคำตอบ S0
% อินพุตของโปรแกรมนี้นี้คือ Number_neighb, radius,
% xlimit, และ S0
% เอาต์พุตคือค่าใกล้เคียง (S1) จำนวนเท่ากับ
% Number_neighb

for u=1:Number_neighb
    for k=1:size(xlimit,2)
        S1(u,k)=S0(1,k)+(radius*(xlimit(1,k)-xlimit(2,k))*rand1(-1,1));
        % ทำการสุ่มค่าใกล้เคียงโดยเรียกใช้โปรแกรม rand1
        % โดยให้ทำการสุ่มค่าในช่วง -1 ถึง 1
        while ( S1(u,k)>xlimit(1,k) | S1(u,k)<xlimit(2,k) )
            % ค่าใกล้เคียงที่สุ่มได้จะต้องอยู่ภายในขอบเขตบนและ
            % ขอบเขตล่างของค่าพารามิเตอร์ ถ้าค่าใกล้เคียงที่สุ่มได้
            % มีค่าเกินขอบเขตบนและขอบเขตล่างที่กำหนดให้ทำการ
            % สุ่มค่าใกล้เคียงใหม่
            S1(u,k)=S0(1,k)+(radius*(xlimit(1,k)-xlimit(2,k))*rand1(-1,1));
        end
    end
end
end
return % กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน
```

โปรแกรม rand1.m

```
function x=rand1(a,b)

% โปรแกรม rand1 เป็นโปรแกรมสุ่มค่าพารามิเตอร์
% ในช่วงที่กำหนด
% อินพุตของโปรแกรม คือ ขอบเขตบนของพารามิเตอร์
% a และขอบเขตล่างของพารามิเตอร์ b
% เอาต์พุตของโปรแกรม คือ ผลของการสุ่ม
% ค่าพารามิเตอร์ในช่วง a ถึง b
```

```
x=a+rand*(b-a); % สุ่มค่าพารามิเตอร์โดยอาศัยความสัมพันธ์ a rand b
return % กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน
```

โปรแกรม objective1.m

```
function[best_error1,best_neighbor1,best_error,best_neighbor]=objective1(S1,
best_error,S0) % โปรแกรม objective เป็นโปรแกรมประเมินค่า
% โกล์เดียวที่สุ่มได้รอบ S0
% อินพุตของโปรแกรมนี้อคือ S1, best_error, และ S0
% เอาต์พุตคือ best_error1, best_neighbor1,
best_error, และ best_neighbor
error=[]; % ตัวแปร error สำหรับรองรับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
% ของค่าโกล์เดียวที่ได้จากการสุ่ม
for k=1:size(S1,1)
    g=TestW(S1(k,1)); % ประเมินค่าโกล์เดียวใน S1 ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
% ในโปรแกรม TestW
    error(k,1)=g; % เก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของค่าโกล์เดียวทั้งหมด
end
[best_error1,index]=min(error); % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดในบรรดา
% ค่าโกล์เดียวและเก็บไว้ใน best_error1
best_neighbor1=S1(index,:); % เก็บค่าพารามิเตอร์ของค่าโกล์เดียวที่ทำให้ค่าฟังก์ชัน
% วัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุดไว้ใน best_neighbor1
if best_error1<best_error % ปรับค่า best_error
    best_error=best_error1; % ถ้า best_error1 < best_error
    % ให้แทนค่า best_error ด้วย best_error1
    best_neighbor=S1(index,:); % และแทนค่าพารามิเตอร์ best_neighbor ด้วย
    % S1(index,:)
else % ไม่เช่นนั้นแล้ว
    best_neighbor=S0; % แทนค่า best_neighbor ด้วย S0
end
return % กลับสู่หน้าโปรแกรมที่4เรียกใช้ฟังก์ชัน
```

โปรแกรม TestW.m

```
function g = TestW(var1)           % โปรแกรมรับอินพุต 1 ค่า คือ พารามิเตอร์ m ของตัว
ควบคุม

                                โหมดการเลื่อน

m_a = var1;
clc;
assignin('base', 'm', m_a);       % ส่งค่า m_a ไปยัง Workspace ในชื่อตัวแปร 'm'
                                เพื่อให้ Simulink (ASMC1) มองเห็นและนำไปใช้
sim('ASMC', [0 1]);              % สร้างไฟล์ Simulink ของระบบที่พิจารณา
                                ชื่อ 'ASMC' ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 1 วินาที
P = ans.P;                       % ดึงค่า P (Power)
V_out = ans.vC.Data;             % ดึงค่าแรงดันไฟฟ้าดีซีบัส (VCo)
time = ans.vC.Time;             % ดึงค่าเวลา
I = ans.iL;                     % ดึงค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
t = 0:1e-5:1;                   % สร้างเวกเตอร์เวลาอ้างอิง (sampling time 1e-5)
N = length(t);                  % หาจำนวนข้อมูล
Vref = 800;                     % กำหนดค่าแรงดันอ้างอิง 800V
tr_ov = 0;                      % กำหนดค่าเริ่มต้นของเวลา recovery time
V_Co = [V_out,time];            % สร้างเมทริกซ์รวมแรงดันและเวลาไว้ด้วยกัน
t_min = 0.6;                    % กำหนดช่วงเวลา Steady state (0.6 ถึง 1 วินาที)
t_max = 1;
V_ripple = V_out(t >= t_min & t <= t_max); % ดึงค่าแรงดันเฉพาะในช่วงเวลานั้นมา
                                วิเคราะห์
% คำนวณค่าแรงดันปลิว
Vmax = max(V_ripple);
Vmin = min(V_ripple);
ripple = ((Vmax - Vmin) / 2) + 0.2;

% กำหนดคช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวที่ยอมรับได้
if all(Vmin >= Vref - ripple & Vmax <= Vref + ripple)
    w = 0;
```



```
% ค้นหาช่วงเวลาสำหรับการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน
```

```
index_range = (t >= time_at_min) & (t <= tmax);
```

```
% ค้นหาค่ามากที่สุดของ V_out เฉพาะในช่วงที่กำหนด
```

```
V_out_max = max(V_out(index_range));
```

```
disp(['Vmax = ', num2str(V_out_max)]);
```

```
% คำนวณเปอร์เซ็นต์การพุ่งต่ำของระบบ
```

```
if V_out_min <= Vref-ripple
```

```
    PU = (100*abs(Vref-V_out_min))/Vref;
```

```
else
```

```
    PU = 0;
```

```
end
```

```
% คำนวณเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินของระบบ
```

```
if V_out_max >= Vref+ripple
```

```
    PO = (100*abs(Vref - V_out_max))/Vref;
```

```
else
```

```
    PO = 0;
```

```
end
```

```
% คำนวณช่วงเวลาฟื้นตัวของระบบ
```

```
for i = size(V_Co,1):-1:1
```

```
    c = V_Co(i,1);
```

```
    d = V_Co(i,2);
```

```
if c <= Vref - ripple | c >= Vref + ripple
```

```
    disp(['Vs = ', num2str(c)]);
```

```
    disp(['tr_ov = ', num2str(d)]);
```

```
    tr_ov = V_Co(i,2)- 0.5;
```

```
end
```

```
if tr_ov ~= 0
```

```
    break;
```

```
end
```

```
end

% กำหนดค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการปรับคูน
Tr_ov_w = abs(tr_ov / 0.009240000000000);
PO_w = abs(PO / 0.0000000000000001);
PU_w = abs(PU / 0.398622836139623);
w = Tr_ov_w * 0.34 + PO_w*0.33+ PU_w*0.33;
g = w;

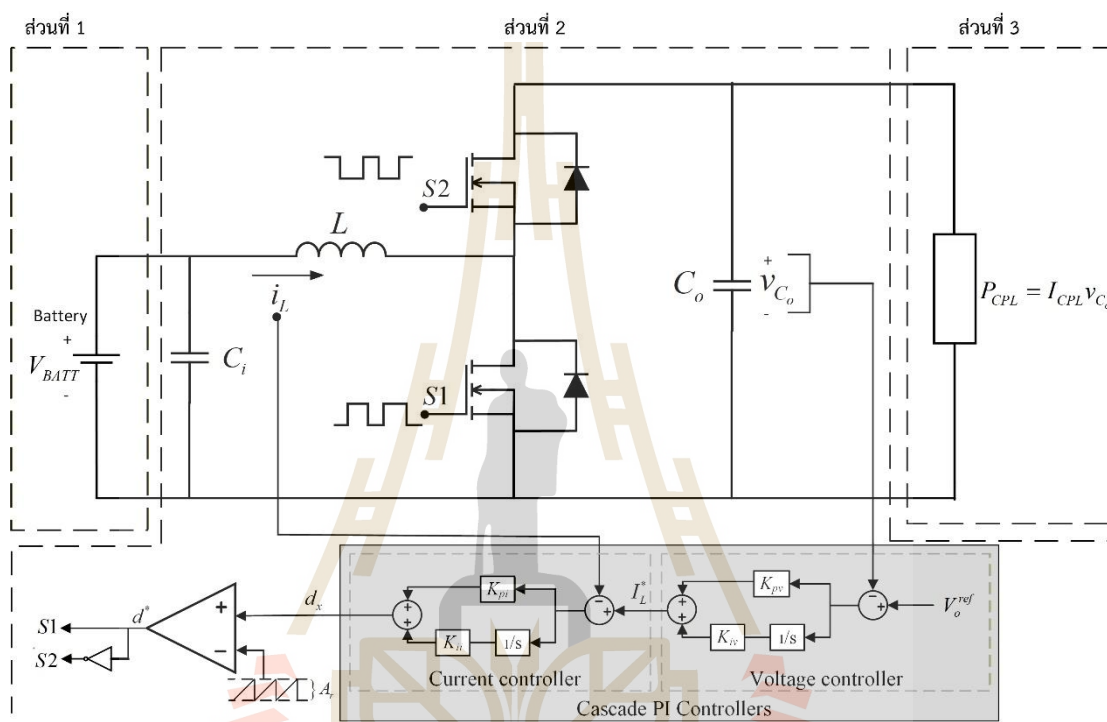
end
```



ภาคผนวก จ.
การออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้า
แบตเตอรี่ที่พิจารณา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่พิจารณาเมื่อมีการใช้ตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันแสดงได้ดังรูปที่ จ.1 ซึ่งจากรูปจะพบว่า ตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันแทนได้ด้วยพื้นที่สี่เหลี่ยม ในขณะที่องค์ประกอบอื่น ๆ ของระบบยังเหมือนเดิมเช่นเดียวกับระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่อธิบายรายละเอียดและแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 ของบทที่ 3



รูปที่ จ.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน

จากรูปที่ จ.1 จะพบว่า ตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันจะมีการควบคุม 2 ลูป คือ ลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าและลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า โดยลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าพารามิเตอร์ K_{pv} , K_{iv} ในขณะที่ลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าจะมีค่าพารามิเตอร์ K_{pi} , K_{ii} ที่จำเป็นต้องได้รับการออกแบบ ซึ่งการออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถดำเนินการได้โดยการเปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิดกับฟังก์ชันถ่ายโอนระบบมาตรฐานอันดับ 2 โดยสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้จากบทความของ ปวินท์ สีสาลี และคณะ (2567) และบทความของ Seesamlee et al. (2026) ซึ่งจากการศึกษารายละเอียดดังกล่าวจะได้สมการออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$\begin{cases} K_{pi} = \frac{2\zeta_i \omega_{ni} A_r L}{V_{BATT}} \\ K_{pv} = 2\zeta_v \omega_{nv} C_o \\ K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 A_r L}{V_{BATT}} \\ K_{iv} = \omega_{nv}^2 C_o \end{cases}$$

โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้กำหนดให้ลู่อุปแรงดันไฟฟ้ามีค่า $\zeta_v = 0.85$, $\omega_{nv} = 500$ rad/s และลู่อุปกระแสไฟฟ้ามีค่า $\zeta_i = 0.85$, $\omega_{ni} = 5000$ rad/s และ $A_r = 10$ ดังนั้นจะได้ $K_{pi} = 0.8513$, $K_{pv} = 1.7$, $K_{ii} = 2503.7764$ และ $K_{iv} = 500$ ซึ่งตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันจะถูกนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวได้ดังรายละเอียดที่นำเสนอในบทที่ 4



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, stylized emblem in the background. It features a central figure of a person standing within a triangular frame made of horizontal bars. Below this, there is a circular base with a gear-like or sunburst pattern. The entire logo is rendered in a light, semi-transparent gold or beige color.

ภาคผนวก จ.

ผลการทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว
ของแต่ละช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่า P_{CPL}

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลการทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ดำเนินการค้นหาพารามิเตอร์ m ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวของแต่ละช่วงการเปลี่ยนแปลงค่า P_{CPL} โดยแต่ละช่วงได้ดำเนินการทำซ้ำ 5 ครั้ง เพื่อตรวจสอบการลู่เข้าของคำตอบและให้ได้ค่าพารามิเตอร์ m ที่ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (w) ที่น้อยที่สุด ซึ่งจะถูกนำไปออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว ซึ่งผลการทดสอบแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ ฉ.1 การทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ช่วงปฏิบัติงานจาก $P_{CPL} = 5$ kW ไปเป็น 10 kW

ครั้งที่	w	ค่าพารามิเตอร์ m
1	0.0451	54.8821
2	0.0364	56.0534
3	0.0364	56.1020
4	0.0364	56.0896
5	0.0364	56.0895

ตารางที่ ฉ.2 การทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ช่วงปฏิบัติงานจาก $P_{CPL} = 20$ kW ไปเป็น 30 kW

ครั้งที่	w	ค่าพารามิเตอร์ m
1	0.0629	19.6970
2	0.0589	19.8369
3	0.0585	19.7701
4	0.0552	19.7998
5	0.0589	19.8369

ตารางที่ ฉ.3 การทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ช่วงปฏิบัติงานจาก $P_{CPL} = 40$ kW ไปเป็น 50 kW

ครั้งที่	w	ค่าพารามิเตอร์ m
1	0.0810	11.7809
2	0.0552	11.8473
3	0.0662	11.7586
4	0.0662	11.8429
5	0.0552	11.8473

ตารางที่ ฉ.4 การทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ช่วงปฏิบัติงานจาก $P_{CPL} = 60$ kW ไปเป็น 70 kW

ครั้งที่	w	ค่าพารามิเตอร์ m
1	0.0773	8.3285
2	0.0736	8.3199
3	0.0626	8.3247
4	0.0662	8.3125
5	0.0662	8.3302

ตารางที่ ฉ.5 การทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ช่วงปฏิบัติงานจาก $P_{CPL} = 70$ kW ไปเป็น 80 kW

ครั้งที่	w	ค่าพารามิเตอร์ m
1	0.0662	7.2367
2	0.0662	7.2376
3	0.0589	7.2454
4	0.0662	7.2367
5	0.0662	7.2376

ตารางที่ ๕.6 การทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ช่วงปฏิบัติงานจาก $P_{CPL} = 90$ kW ไปเป็น 100 kW

ครั้งที่	w	ค่าพารามิเตอร์ m
1	0.0883	5.6705
2	0.0773	5.6822
3	0.0626	5.6883
4	0.0736	5.6716
5	0.0883	5.6705

ตารางที่ ๕.7 การทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ช่วงปฏิบัติงานจาก $P_{CPL} = 140$ kW ไปเป็น 150 kW

ครั้งที่	w	ค่าพารามิเตอร์ m
1	0.0699	3.5862
2	0.1104	3.5893
3	0.0920	3.5891
4	0.1104	3.5860
5	0.0736	3.5891

ตารางที่ ๕.8 การทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ช่วงปฏิบัติงานจาก $P_{CPL} = 190$ kW ไปเป็น 200 kW

ครั้งที่	w	ค่าพารามิเตอร์ m
1	0.0957	2.5404
2	0.0773	2.5407
3	0.0957	2.5394
4	0.0846	2.5389
5	0.0883	2.5375

ตารางที่ ฉ.9 การทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ช่วงปฏิบัติงานจาก $P_{CPL} = 240$ kW ไปเป็น 250 kW

ครั้งที่	w	ค่าพารามิเตอร์ m
1	0.1067	1.9066
2	0.1325	1.9035
3	0.0994	1.9050
4	0.1067	1.9066
5	0.1325	1.9035

ตารางที่ ฉ.10 การทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ m ช่วงปฏิบัติงานจาก $P_{CPL} = 280$ kW ไปเป็น 285 kW

ครั้งที่	w	ค่าพารามิเตอร์ m
1	0.0846	1.5945
2	0.0699	1.5933
3	0.0699	1.5933
4	0.0699	1.5933
5	0.0699	1.5933

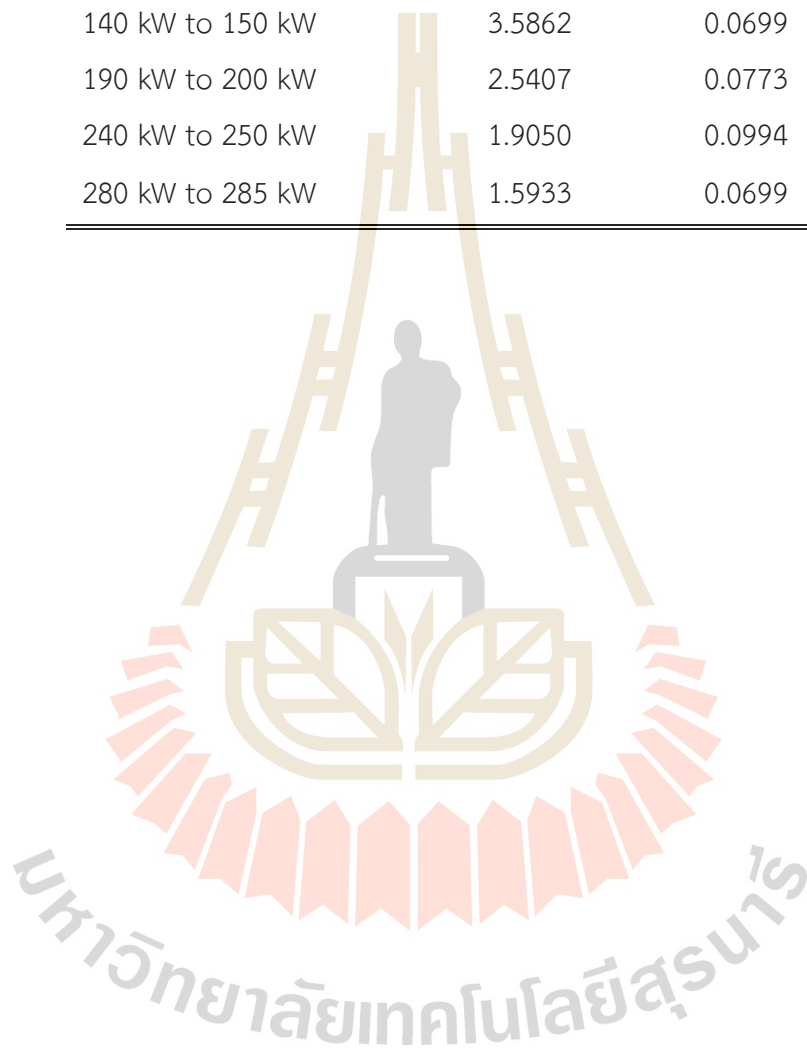
ดังนั้นจากการดำเนินการทดสอบข้างต้นจะได้ค่าพารามิเตอร์ m ที่จะนำมาใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวแสดงดังตารางที่ ค.11 ดังนี้

ตารางที่ ฉ.11 ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ m ที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

การเปลี่ยนแปลงค่า P_{CPL}	ค่าพารามิเตอร์ m	ค่า w
5 kW to 10 kW	56.0895	0.0364
20 kW to 30 kW	19.7998	0.0552
40 kW to 50 kW	11.8473	0.0552
60 kW to 70 kW	8.3302	0.0662
70kW to 80 kW	7.2454	0.0589

ตารางที่ จ.11 ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ m ที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (ต่อ)

การเปลี่ยนแปลงค่า P_{CPL}	ค่าพารามิเตอร์ m	ค่า w
90 kW to 100 kW	5.6883	0.0626
140 kW to 150 kW	3.5862	0.0699
190 kW to 200 kW	2.5407	0.0773
240 kW to 250 kW	1.9050	0.0994
280 kW to 285 kW	1.5933	0.0699





ภาคผนวก ช.

แสดงรายละเอียดขั้นตอนการเชื่อมโยงโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กับ

บอร์ด eZdsp™ F28335

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขั้นตอนการเชื่อมโยงโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กับบอร์ด eZdsp™ F28335

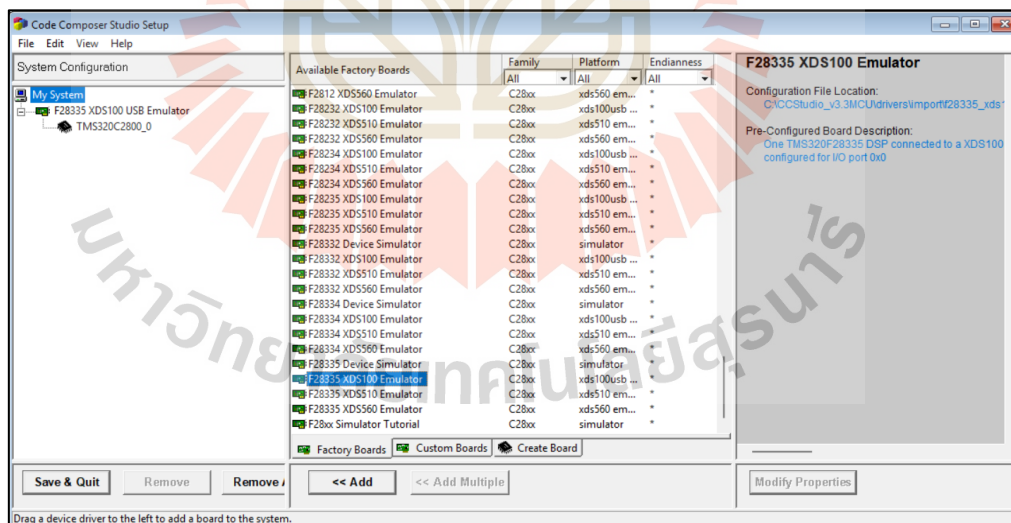
1. เชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับบอร์ด eZdsp™ F28335

สำหรับซอฟต์แวร์ MATLAB ที่สามารถทำงานเชื่อมโยงกับบอร์ด eZdsp™ F28335 คือ ซอฟต์แวร์ MATLAB เวอร์ชันปี 2011 ขึ้นไป และโปรแกรม CCStudio v3.3 ที่ใช้เชื่อมโยงแสดงดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 ซอฟต์แวร์ MATLAB และโปรแกรม CCStudio v3.3

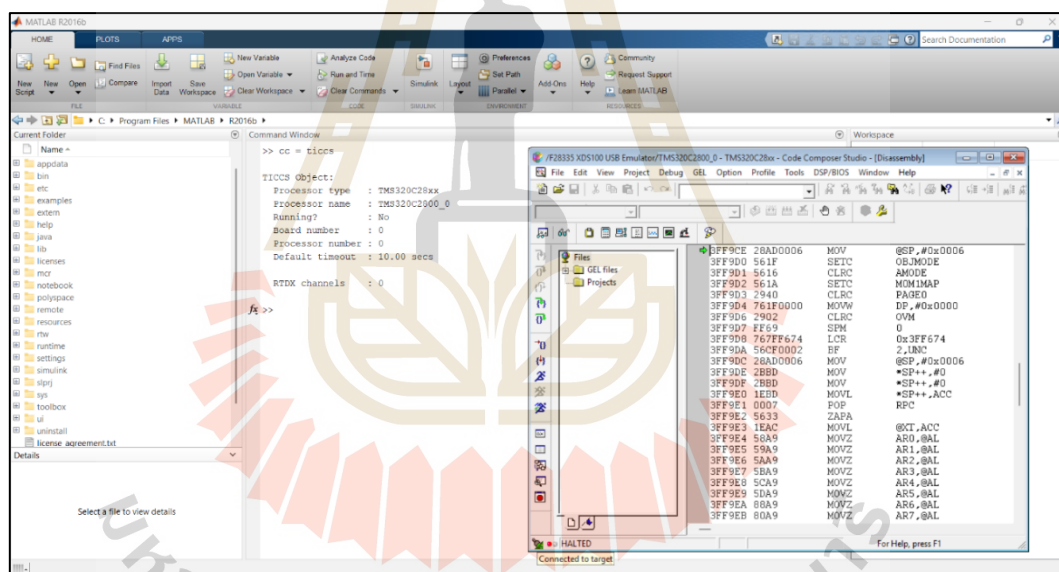
สำหรับการเชื่อมโยงโปรแกรม SIMULINK กับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 จะต้องดำเนินการเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ก่อน ซึ่งสามารถดำเนินการได้โดยเริ่มจากเชื่อมต่อบอร์ด eZdsp™ F28335 เข้ากับคอมพิวเตอร์ด้วยพอร์ต USB และเปิดโปรแกรม MATLAB จากนั้นเปิดโปรแกรม Code Composer Studio Setup และเลือกบอร์ดให้ตรงกับรุ่นที่ใช้งานดังรูปที่ ข.2 ใน และกด Save & Quit



รูปที่ ข.2 การตั้งค่าโปรแกรม Code Composer Studio Setup

ลำดับถัดไปดำเนินการเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ด้วยการคีย์คำสั่ง `cc = ticcs` บนหน้าต่าง Command Window ของซอฟต์แวร์ MATLAB ซึ่งหลังจากคีย์

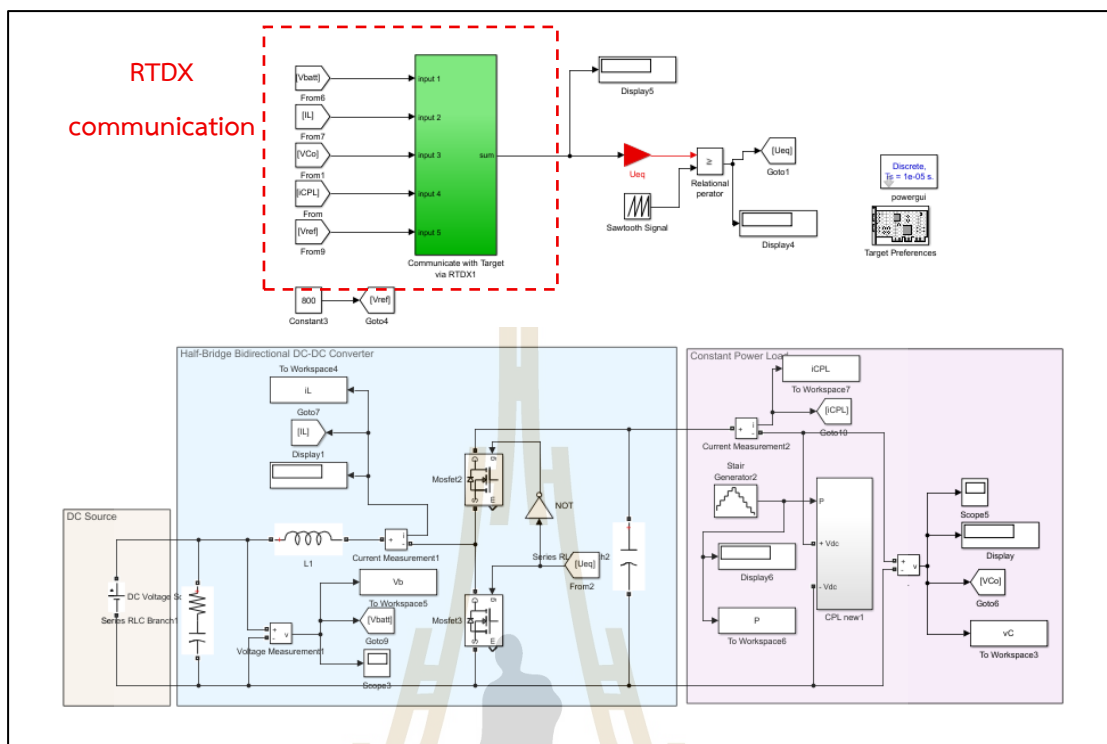
คำสั่งจะปรากฏรายละเอียดที่หน้าต่าง Command Window ดังนี้ ชนิดของตัวประมวลผล คือ TMS320C28xx (Processor type: TMS320C28xx) ชื่อของตัวประมวลผล คือ 0 (Processor name: 0) หมายเลขของบอร์ด eZdspTMF28335 คือ cpu_0 (Board number: cpu_0) และหมายเลขของตัวประมวลผล คือ 0 (Processor number: 0) สถานะการทำงานของโปรแกรม SIMULINK ในขณะนั้น คือ โปรแกรมไม่ได้ทำงาน (Running?: No) เวลาสำหรับการจำลองสถานการณ์ โดยปกติจะเท่ากับ 10 s (default CCStudio running timeout: 10.00 secs) และจำนวนช่องสื่อสารแบบเวลาจริง ที่ใช้รับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม SIMULINK กับบอร์ด eZdspTMF28335 ในขณะนั้น เท่ากับ 0 ช่อง (RTDX channels: 0) ซึ่ง รายละเอียดที่แสดงดังกล่าว ได้ถูกกำหนดโดยบริษัทผู้ผลิต อีกทั้งแสดงสถานะการเชื่อมต่อบนโปรแกรม Code Composer Studio v3.3 แสดงดังรูปที่ ข.3 จากข้อมูลดังกล่าวซอฟต์แวร์ MATLAB ได้เชื่อมโยงกับบอร์ด eZdspTMF28335 ผ่านทางโปรแกรม CCStudio v3.3 เป็นผลสำเร็จแล้ว



รูปที่ ข.3 หน้าต่างซอฟต์แวร์ MATLAB และโปรแกรม CCStudio v3.3

2. การเชื่อมโยงโปรแกรม SIMULINK กับบอร์ด eZdspTMF28335

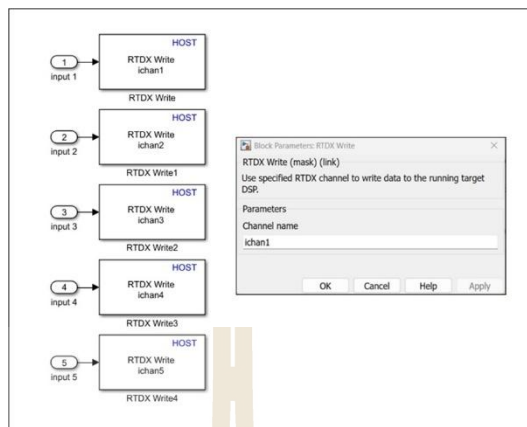
เมื่อดำเนินการเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับบอร์ด eZdspTMF28335 สำเร็จแล้ว จากนั้นดำเนินการเชื่อมโยงโปรแกรม SIMULINK กับบอร์ด eZdspTMF28335 โดยเริ่มจากเปิดโปรแกรม SIMULINK ที่เป็นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.4 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป

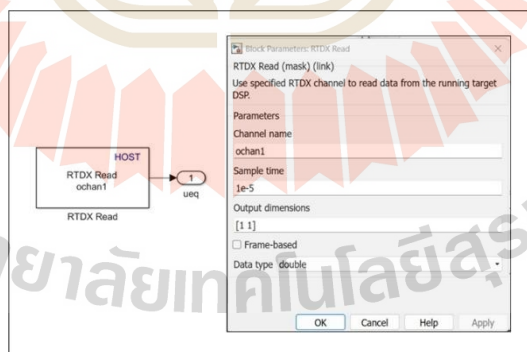
จากนั้นกำหนดช่องทางการสื่อสารแบบเวลาจริงสำหรับการรับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม SIMULINK กับบอร์ด eZdsp™F28335 โดยรายละเอียดการกำหนดแสดงได้ดังนี้

กรณีที่ 1 การส่งข้อมูลจากโปรแกรม SIMULINK ไปยังบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ผ่านบล็อก RTDX Write สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีข้อมูลที่ต้องส่งไปยังบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ทั้งหมด 5 ชุดข้อมูล ได้แก่ แรงดันตกคร่อมแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (V_{BATT}) เชื่อมต่อเข้ากับบล็อก RTDX Write ที่ 1 และกำหนดค่าพารามิเตอร์บล็อกอินพุตเป็น in1 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) เชื่อมต่อเข้ากับบล็อก RTDX Write ที่ 2 และกำหนดค่าพารามิเตอร์บล็อกอินพุตเป็น in2 แรงดันไฟฟ้าดีซีบัส (v_{Co}) เชื่อมต่อเข้ากับบล็อก RTDX Write ที่ 3 และกำหนดค่าพารามิเตอร์บล็อกอินพุตเป็น in3 กระแสที่ไหลผ่านโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (i_{CPL}) เชื่อมต่อเข้ากับบล็อก RTDX Write ที่ 4 และกำหนดค่าพารามิเตอร์บล็อกอินพุตเป็น in4 และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (V_{ref}) เชื่อมต่อเข้ากับบล็อก RTDX Write ที่ 5 และกำหนดค่าพารามิเตอร์บล็อกอินพุตเป็น in5 แสดงดังรูปที่ ข.5



รูปที่ 4.5 การกำหนดค่าพารามิเตอร์บล็อกอินพุต RTDX Write

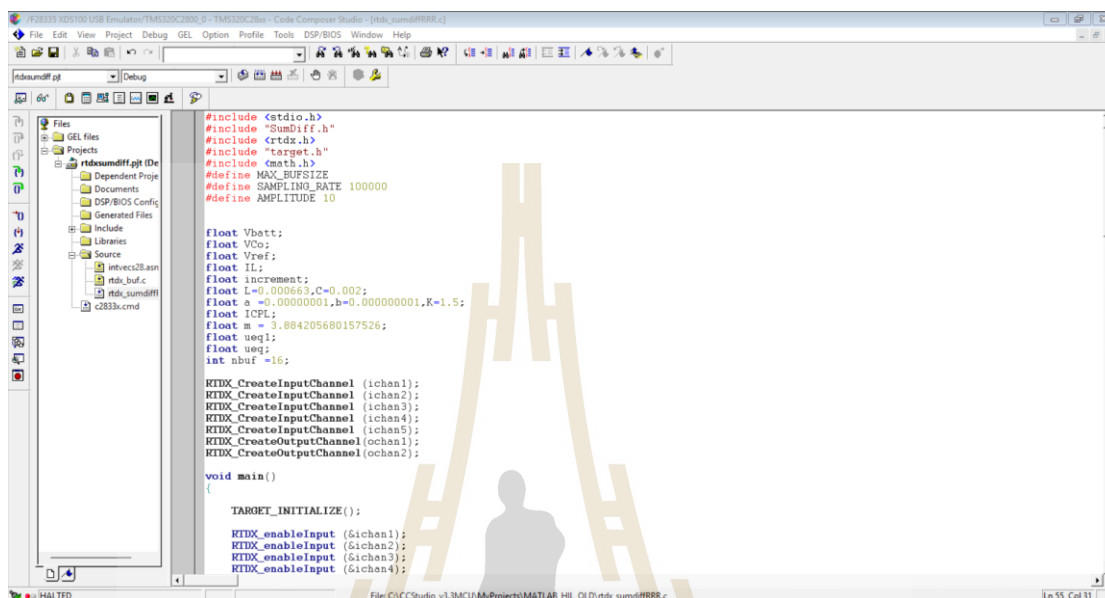
กรณีที่ 2 การรับข้อมูลของโปรแกรม SIMULINK จากบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ผ่านบล็อก RTDX Read สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีข้อมูลที่ต้องรับจากบอร์ด eZdsp™ F28335 คือ สัญญาณควบคุมของตัวควบคุมโหมดการเปลี่ยนแบบปรับตัว (u_{eq}) และกำหนดค่าพารามิเตอร์บล็อกเอาต์พุตได้แก่ ชื่อของช่องเอาต์พุต (Channel name) เป็น out1 ช่วงเวลาในการชักตัวอย่าง สำหรับการรับข้อมูล (Sample time) เป็น $1e-5$ (10 μ s) ขนาดของข้อมูลที่ส่งมาจากบอร์ด eZdsp™ F28335 (Output dimensions) เป็น [1 1] และชนิดของข้อมูล (Data type) เป็น double แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การกำหนดค่าพารามิเตอร์บล็อกเอาต์พุต RTDX Read

จากนั้นสร้างไฟล์โปรเจกต์งานสำหรับเขียนโปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปบนโปรแกรม CCStudio v3.3 ดังรูปที่ 4.7 (การอธิบายโปรแกรมสำหรับการจำลอง

สถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 สามารถดูได้จากภาคผนวก ซ.)



รูปที่ ๗.7 โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปบนโปรแกรม CCStudio v3.3

โดยรายละเอียดในไฟล์โปรเจกต์งานสำหรับเขียนชุดคำสั่งภาษาซีของตัวควบคุม โหมดการเลื่อนแบบปรับตัวบนโปรแกรม CCStudio v3.3 ประกอบด้วยการเขียนฟังก์ชันชุดคำสั่ง ภาษาซีสำหรับการรับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม SIMULINK กับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ดังกรณีที่ 3 และ 4 ดังนี้

กรณีที่ 3 การส่งข้อมูลจากบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ไปยัง โปรแกรม SIMULINK ผ่านการเขียนชุดคำสั่งภาษาซีบนโปรแกรม CCStudio v3.3 สำหรับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 จะมีข้อมูลที่ต้องส่งไปยังโปรแกรม SIMULINK คือ สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม โหมดการเลื่อนแบบปรับตัว (u_{eq}) ซึ่งสามารถเขียนชุดคำสั่งภาษาซีได้ดังนี้

```
RTDX_CreateOutputChannel(out1);
RTDX_enableOutput (&out1);
RTDX_write( &out1, &ueq, 1 * sizeof(long) );
```

กรณีที่ 4 การรับข้อมูลของบอร์ด eZdsp™ F28335 จากโปรแกรม SIMULINK ผ่านการเขียนชุดคำสั่งภาษาซีบนโปรแกรม CCStudio v3.3 สำหรับบอร์ด eZdsp™ F28335 จะมีข้อมูลที่ต้องรับจากโปรแกรม SIMULINK ทั้งหมด 5 ชุดข้อมูล เพื่อใช้สำหรับการประมวลผลของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว ได้แก่

- แรงดันตกคร่อมแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (V_{BATT}) เขียนชุดคำสั่งภาษาซีได้ดังนี้

```
RTDX_CreateInputChannel (in1);
RTDX_enableInput (&in1);
RTDX_read(&in1, &Vbatt, 1 * sizeof(long));
```

- กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) เขียนชุดคำสั่งภาษาซีได้ดังนี้

```
RTDX_CreateInputChannel (in2);
RTDX_enableInput (&in2);
RTDX_read(&in2, &iL, 1 * sizeof(long));
```

- แรงดันไฟฟ้าดีซีบัส (V_{Co}) เขียนชุดคำสั่งภาษาซีได้ดังนี้

```
RTDX_CreateInputChannel (in3);
RTDX_enableInput (&in3);
RTDX_read(&in3, &VCo, 1 * sizeof(long));
```

- กระแสที่ไหลผ่านโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (i_{CPL}) เขียนชุดคำสั่งภาษาซีได้ดังนี้

```
RTDX_CreateInputChannel (in4);
RTDX_enableInput (&in4);
RTDX_read(&in4, &iCPL, 1 * sizeof(long));
```

- แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (V_{ref}) เขียนชุดคำสั่งภาษาซีได้ดังนี้

```
RTDX_CreateInputChannel (in5);
```

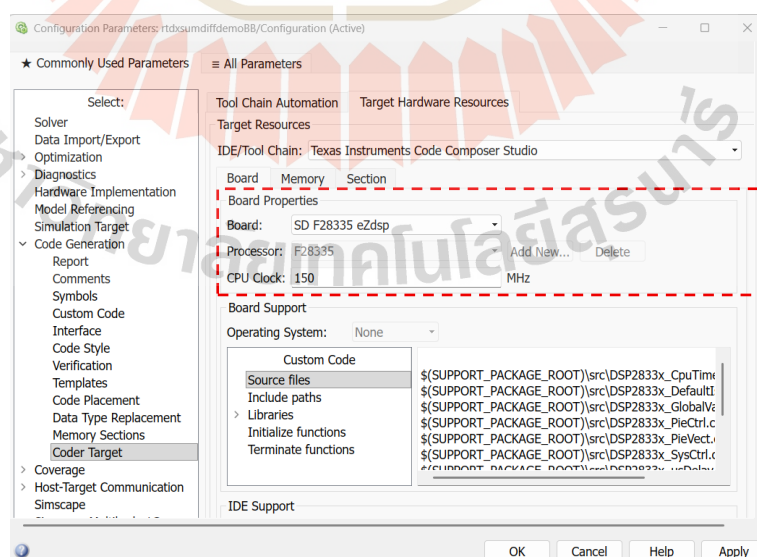
```
RTDX_enableInput (&in5);
RTDX_read(&in5, &Vref, 1 * sizeof(long));
```

ลำดับถัดไปจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรม SIMULINK สำหรับการเชื่อมโยงกับบอร์ด DSP รุ่น eZdspTMF28335 ดังนี้

3. การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรม SIMULINK สำหรับการเชื่อมโยงกับบอร์ด eZdspTMF28335

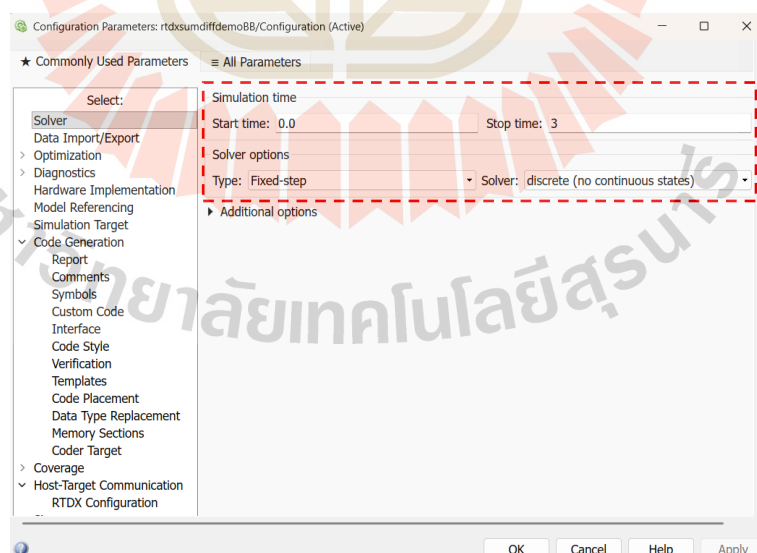
การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรม SIMULINK สำหรับการเชื่อมโยงกับบอร์ด DSP รุ่น eZdspTMF28335 จำเป็นต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของบอร์ด DSP รุ่น eZdspTMF28335 (target preference) และกลุ่มค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป (simulation configuration parameters) ดังนี้

กลุ่มพารามิเตอร์ที่ 1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของบอร์ด DSP รุ่น eZdspTMF28335 ในโปรแกรม SIMULINK สามารถทำได้โดยการเปิดบล็อก Target Preference จากนั้นกำหนดค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของบอร์ด (Board properties) ดังนี้ กำหนดให้ Board: SD F28335 eZdsp (สำหรับบอร์ด DSP รุ่น eZdspTMF28335) ซึ่งเป็นรุ่นของบอร์ด DSP ที่ใช้เชื่อมโยงกับโปรแกรม SIMULINK โดยหลังจากกำหนดรุ่นของบอร์ดแล้ว หน้าต่างของบล็อก Target Preference จะปรากฏคุณสมบัติต่าง ๆ ของบอร์ด eZdspTMF28335 แบบอัตโนมัติ ได้แก่ Processer: F28335 และ CPU clock: 150 MHz ดังแสดงในรูปที่ ข.8

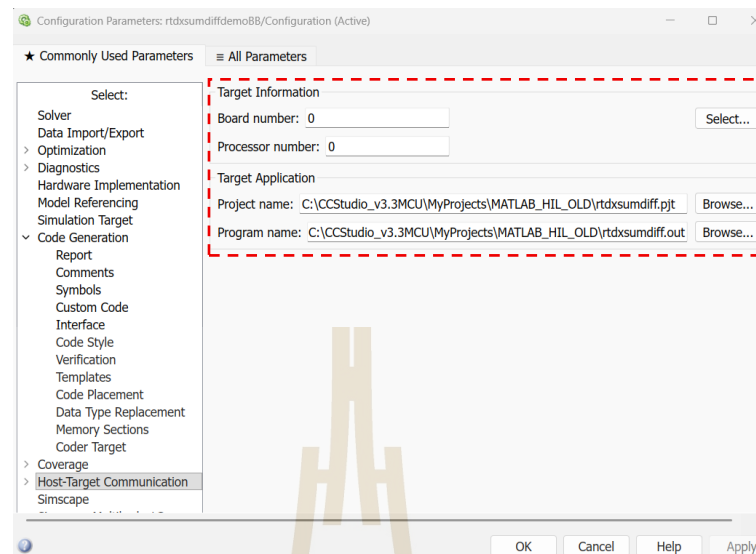


รูปที่ ข.8 การกำหนดค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของบอร์ด DSP รุ่น eZdspTMF28335

กลุ่มพารามิเตอร์ที่ 2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปของโปรแกรม SIMULINK สามารถกำหนดได้จากหน้าต่าง Configuration Parameters ของระบบจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปบนโปรแกรม SIMULINK ตัวอย่างการกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงได้ดังรูปที่ ข.9 จากรูปดังกล่าว ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการหาผลเฉลยของการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป (Solver) ได้แก่ เวลาในการจำลองสถานการณ์ (Simulation time) และรูปแบบการหาค่าผลเฉลย (Solver option) สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา จะกำหนดให้เวลาในการจำลองสถานการณ์ คือ start time: 0 (0 s) และ stop time: 3 (3 s) ส่วนรูปแบบการหาค่าผลเฉลย คือ Solver: discrete และ Type: Fixed-step ดังแสดงในรูปที่ ข.9 นอกจากนี้ ค่าพารามิเตอร์สำหรับการเชื่อมโยงระหว่างโปรแกรม SIMULINK ของบอร์ด DSP รุ่น eZdspTMF28335 (Host-Target Communication) ได้แก่ ข้อมูลของบอร์ด (Target information) และการประยุกต์ใช้งานร่วมกับบอร์ด (Target application) โดยการกำหนดข้อมูลของบอร์ดจะต้องกำหนดให้เหมือนกับข้อมูลของบอร์ด eZdspTMF28335 แสดงดังรูปที่ ข.10 คือ Board number: cpu_0 และ Processor number: 0 ส่วนการกำหนดข้อมูลการประยุกต์ใช้งานร่วมกับบอร์ดจะต้องกำหนดชื่อที่อยู่ของไฟล์โปรเจกต์และชื่อที่อยู่ไฟล์โปรแกรมที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม CCStudio v3.3 สำหรับในวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะการกำหนดชื่อที่อยู่ไฟล์โปรเจกต์ คือ Projectname: C:\CCStudio_v3.3MCU\MyProjects\MATLAB_HIL_OLD\ rtdxsumdiff.pjt และชื่อที่อยู่ไฟล์โปรแกรม คือ Program name: C:\CCStudio_v3.3MCU\MyProjects\MATLAB_HIL_OLD\rtdx_sumdiff.out ดังแสดงในรูปที่ ข.10



รูปที่ ข.9 การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป



รูปที่ ข.10 การกำหนดชื่อที่อยู่ของไฟล์โปรเจกต์

ลำดับสุดท้ายทำการกด Run บนโปรแกรม SIMULINK เพื่อจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ซึ่งเป็นการยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 4



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a golden-yellow triangular structure with a silhouette of a person standing inside. Below the triangle is a circular emblem with a book and a sunburst. At the bottom, the university's name is written in Thai script.

ภาคผนวก ซ.

โปรแกรมตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัวที่อัปโหลดลงบอร์ด DSP รุ่น
eZdsp™ F28335 สำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป

```

*****
โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน
แบบปรับตัว
*****

%เรียกใช้ไลบรารีของโปรแกรม
#include <stdio.h>
#include "SumDiff.h"
#include <rtdx.h>
#include "target.h"
#include <math.h>

%กำหนดตัวแปร และค่าเริ่มต้นของตัวแปรต่าง ๆ
float Vbatt;
float VCo;
float Vref;
float IL;
float ICPL;
float ueq1;
float ueq;
int nbuf =16;
float L=0.000663,C=0.002, Ci=0.000035877; %ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี
ชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง
float a =0.00000001,b=0.000000001,K=1.5; %ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน
float Ts = 0.00001; %ค่า Sampling time สำหรับใช้คำนวณร่วมกับระบบที่พิจารณา

%กำหนดช่องรับสัญญาณเข้าจากโปรแกรม MATLAB
RTDX_CreateInputChannel (in1);
RTDX_CreateInputChannel (in2);
RTDX_CreateInputChannel (in3);
RTDX_CreateInputChannel (in4);
RTDX_CreateInputChannel (in5);

```

```

%กำหนดช่องส่งสัญญาณขาออกไปยังโปรแกรม MATLAB
RTDX_CreateOutputChannel(out1);

void main() {
%เปิดการใช้งานช่องรับสัญญาณขาเข้า
TARGET_INITIALIZE();
RTDX_enableInput (&in1);
RTDX_enableInput (&in2);
RTDX_enableInput (&in3);
RTDX_enableInput (&in4);
RTDX_enableInput (&in5);
%เปิดการใช้งานช่องส่งสัญญาณขาออก
RTDX_enableOutput (&out1);

%เปิดใช้การคำนวณสัญญาณการควบคุมของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว
while (1) {
%กำหนดตัวแปรสำหรับจัดเก็บข้อมูลที่ได้จากช่องสัญญาณขาเข้าจากโปรแกรม MATLAB
RTDX_read( &in1, &Vbatt, 1 * sizeof(long) );
RTDX_read( &in2, &IL, 1 * sizeof(long) );
RTDX_read( &in3, &VCo, 1 * sizeof(long) );
RTDX_read( &in4, &ICPL, 1 * sizeof(long) );
RTDX_read( &in5, &Vref, 1 * sizeof(long) );

%เงื่อนไขการเปลี่ยนสมการของพารามิเตอร์ m ที่ปรับตัวได้
if ((VCo*ICPL) < 70000) {
    m = (float)((1.748e+05 * pow((VCo*ICPL), -0.8724)) - 2.061);
}
else {
    m = (float)((4.909e+05 * pow((VCo*ICPL), -0.9776)) - 0.6899); }
}

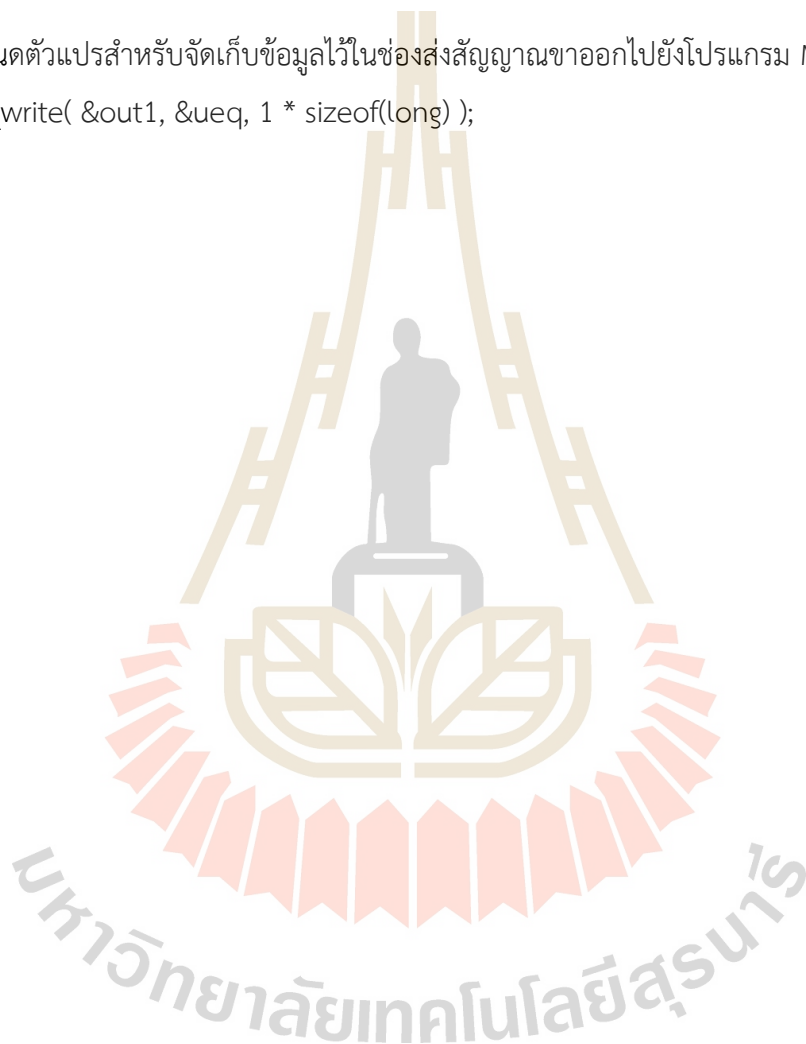
```

```

%คำนวณสัญญาณการควบคุมของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบปรับตัว
ueq1 = ((a*L*K+b*L)*IL*VCo - (a*L*K+b*L)*(VCo*ICPL) + (a*C*Vbatt*VCo) -
        (a*C*VCo*VCo) - m*L*C*VCo*((K+1)*(Vref-VCo)- IL))/((a*L*K+b*L)*IL*VCo-
        (a*C*VCo*VCo));
ueq = 0.00005*ueq1 + 5;

%กำหนดตัวแปรสำหรับจัดเก็บข้อมูลไว้ในช่องส่งสัญญาณขาออกไปยังโปรแกรม MATLAB
RTDX_write( &out1, &ueq, 1 * sizeof(long) );
}
}

```



ประวัติผู้เขียน

นายอภิรักษ์ ศรีชนะ เกิดเมื่อวันที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2544 ที่จังหวัดร้อยเอ็ด เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนบ้านโนนสำราญ ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนวาปีปทุม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2567 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันเดิม

ในการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้รับทุนกิตติบัณฑิตซึ่งเป็นทุนการศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึงได้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าจำนวน 8 รายวิชา ดังนี้

- 1) ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม
- 2) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า
- 3) วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน
- 4) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง
- 5) การอ่านแบบสำหรับงานไฟฟ้า
- 6) วงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน
- 7) ตัวควบคุมตรรกะที่โปรแกรมได้
- 8) สัญญาณและระบบควบคุม

สำหรับผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่มีจำนวน 2 บทความดังที่ได้รวบรวมไว้แล้วในภาคผนวก ก.