

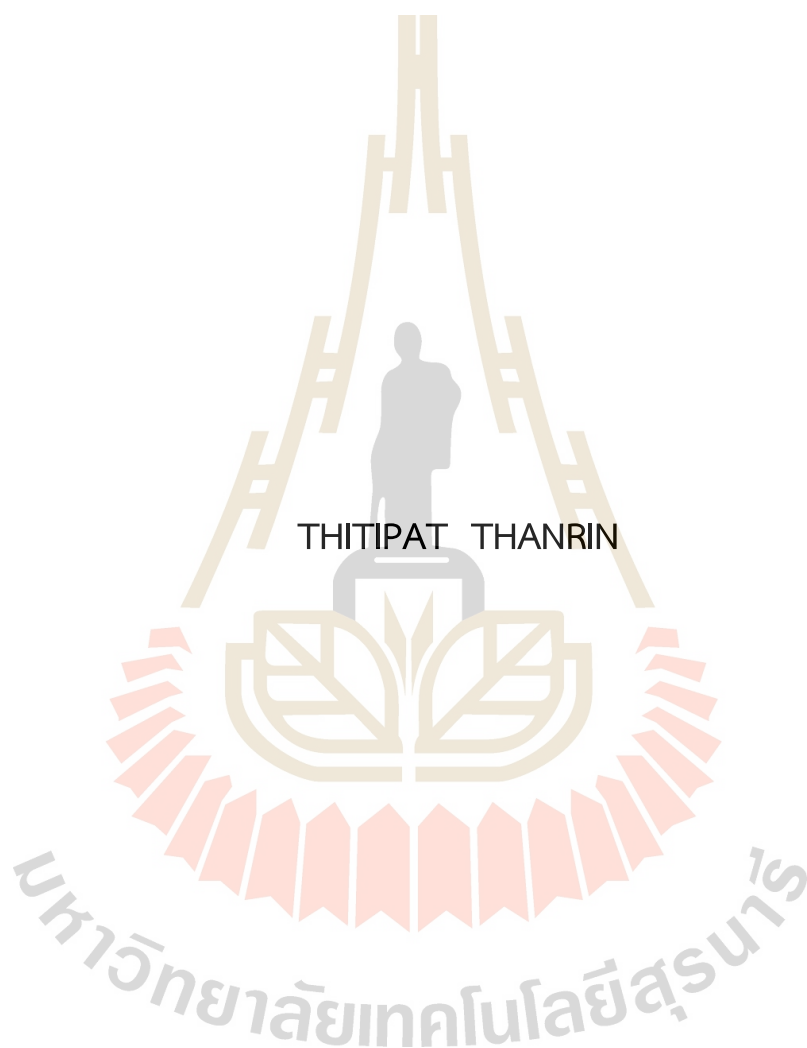
การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่
โดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง



นายอิทธิพัทธ์ แทนรินทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2568

STABILITY ANALYSIS OF BATTERY ELECTRIC VEHICLE SYSTEMS
USING THE EIGENVALUE THEOREM

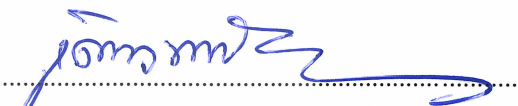


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2025

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่
โดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

ประธานกรรมการ


(ศ. ดร.ก้องพันธุ์ อารีรักษ์)

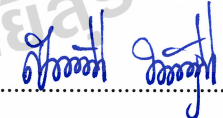
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)


(ผศ. ดร.จักรกริช ภักดีโต)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)


(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

กรรมการ


(ผศ. ดร.สุดาร์ตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ



(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลวัฒน์)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและ
ประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

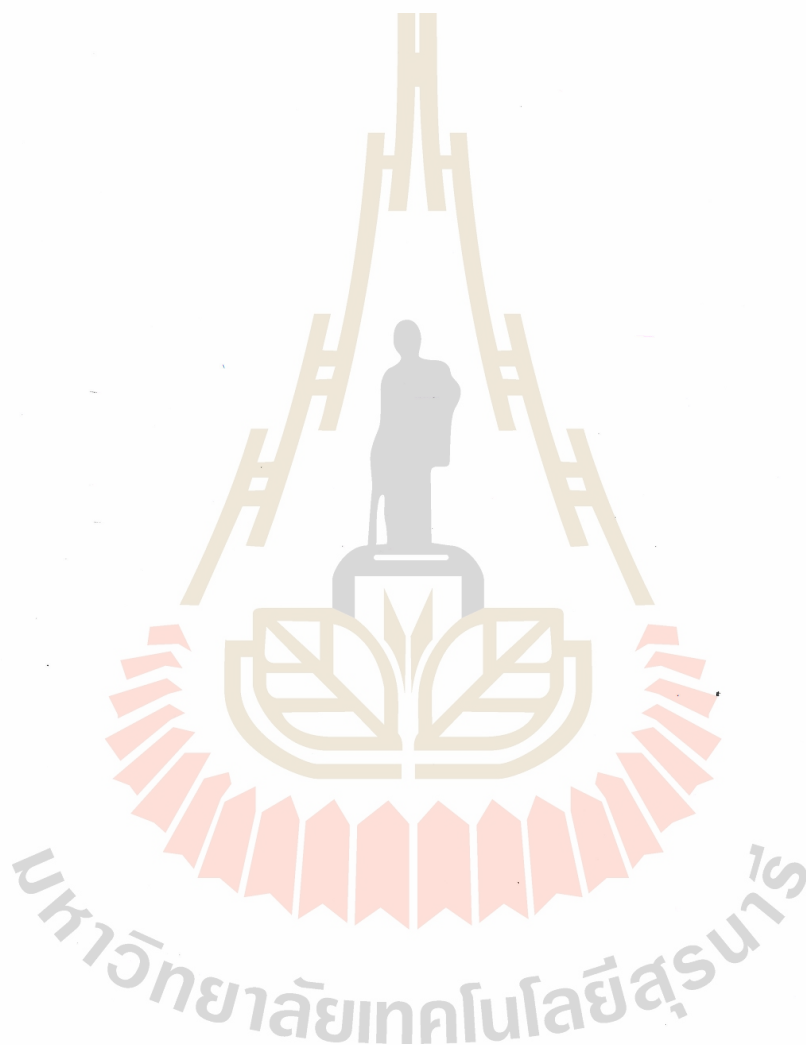
ธิดิพัทธ์ แทนรินทร์ : การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่โดยใช้
ทฤษฎีบทค่าเจาะจง (STABILITY ANALYSIS OF BATTERY ELECTRIC VEHICLE SYSTEMS
USING THE EIGENVALUE THEOREM)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธุ์ อารีย์รักษ์, 165 หน้า

คำสำคัญ: ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่, โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์,
การวิเคราะห์เสถียรภาพ

ปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะ
ในระบบของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเกือบทั้งหมด เช่น ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์
ของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้อินเวอร์เตอร์เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ วงจรอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวจะมีการ
ควบคุมเพื่อให้ความเร็วมอเตอร์คงที่ พฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังที่ถูกควบคุมมีลักษณะเป็น
โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (constant power load, CPL) ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า
กำลังในสภาวะการทำงานภายใต้พิกัดของระบบ การขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าอาจกระทบต่อ
สมรรถนะของระบบควบคุม หรือก่อให้เกิดความเสียหายต่อยานยนต์ไฟฟ้า ทั้งนี้หากปัญหาดังกล่าว
เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งานจริงจะกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้และส่งผลต่อความน่าเชื่อถือใน
การใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าในระยะยาว ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอแนวทางการวิเคราะห์
เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่โดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง (eigenvalue theorem)
แนวทางดังกล่าวจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้าที่ได้จากวิธีค่าเฉลี่ย
ปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging method, GSSA) นอกจากนี้ยังได้
นำเสนอการประมาณแบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่ายที่ปรากฏอยู่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะ
ช่วยให้สามารถพิจารณาพฤติกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ในสภาวะที่เสมือนจริง และสามารถ
พิจารณาพฤติกรรมของแบตเตอรี่โดยเฉพาะอย่างยิ่งสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ (state of charge,
SOC) รวมถึงผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่อเสถียรภาพของระบบ เพื่อใช้
เป็นแนวทางในการออกแบบของวิศวกรทางด้านยานยนต์ไฟฟ้า งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วงจรแปลง
ผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่เชื่อมต่อกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
ในอุดมคติ วงจรดังกล่าวถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมพีโอที่ต่อแบบเรียงกัน เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า
ที่ดีซีบัสแรงดันสูงให้คงที่และเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1 และ ISO 21498-2 การยืนยัน
ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม

MATLAB/Simulink และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (hardware-in-the-loop, HIL) ผลการจำลองสถานการณ์สามารถยืนยันแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถคาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำ



สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2568

ลายมือชื่อนักศึกษา..... **นิติพัทธ์ แทนรินทร์**
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... **KT**
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... **[Signature]**

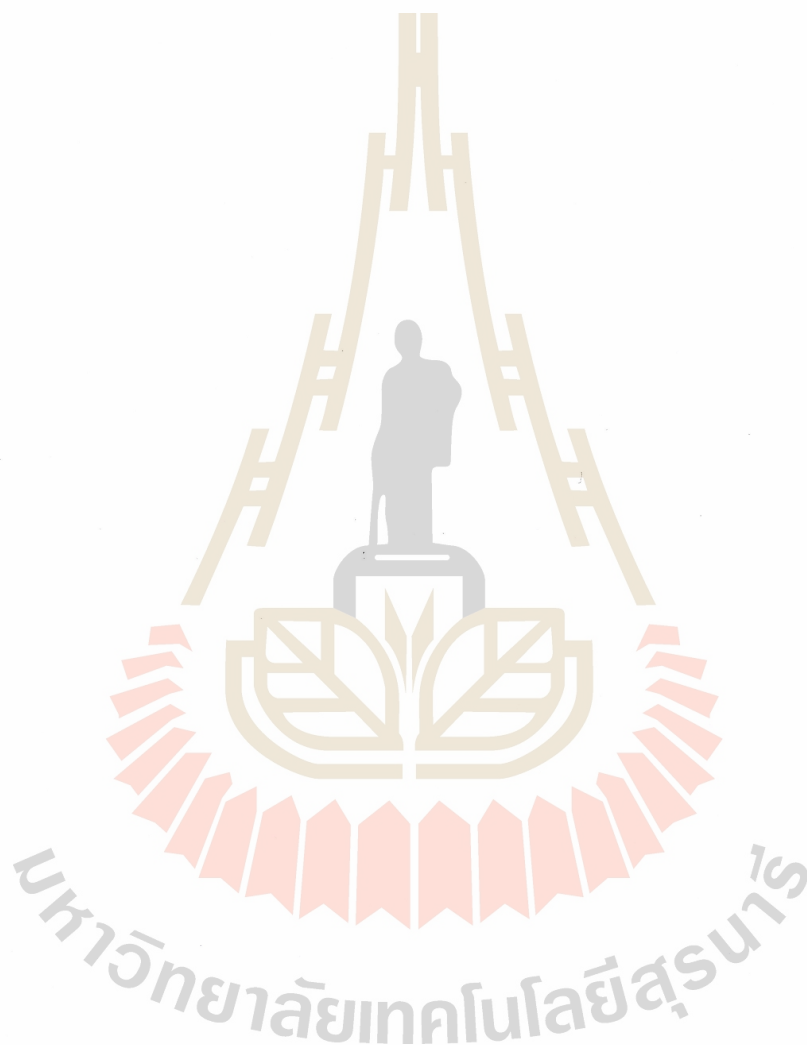
THITIPAT THANRIN : STABILITY ANALYSIS OF BATTERY ELECTRIC VEHICLE SYSTEMS USING THE EIGENVALUE THEOREM.

THESIS ADVISOR : PROF. KONGPAN AREERAK, Ph.D., 165 PP.

Keyword: Battery electric vehicle, Constant power load (CPL), Mathematical model, Stability analysis

Currently, power electronic circuits are widely used in industrial applications, particularly in electric vehicle (EV) systems, where almost all systems rely on power electronics. For example, the traction drive system in EV employs the inverters to operate the motor, this inverter is controlled to maintain motor speed. The controlled power converters behave as a constant power load (CPL), which can affect the system stability under rated power. System instability may degrade controller performance or cause severe damage to the EV users. If such an instability occurs during operation, it may affect user safety and reduce the long-term reliability of EV applications. Therefore, this thesis presents the stability analysis of battery EV systems using the eigenvalue theorem based on a linearized mathematical model. This model can be obtained from the generalized state-space averaging (GSSA) method. In addition, a simplified battery model is proposed to evaluate the dynamic behavior of EV under realistic operating conditions, considering the battery state of charge (*SOC*). This analysis also demonstrates the influence of parameter variations on system stability to provide the valuable insights for engineers in the design process. For this thesis, a bidirectional DC-DC power converter is connected with the battery source feeding the power to an ideal CPL. This converter is controlled by cascaded proportional-integral (PI) controllers to regulate the high-voltage DC bus in compliance with ISO 21498-1 and ISO 21498-2 standards. For stability assessment, it is confirmed through computer-based using MATLAB/Simulink program, and hardware-in-the-loop (HIL)

simulations. The results can confirm that the stability analysis accurately predict the instability points of the power system.



School of Electrical Engineering
Academic Year 2025

Student's Signature..... อติพัทธ์ แทนอินทร์
Advisor's Signature..... [Signature]
Co-Advisor's Signature..... [Signature]

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ศาสตราจารย์ ดร.กองพัน อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกริช ภักดีโต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย รวมทั้งยังได้สละเวลาเพื่อตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนกระทั่งมีความสมบูรณ์ อีกทั้งยังเป็นกำลังใจและแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตและการทำงานให้กับผู้วิจัยเสมอมา

คณาจารย์ เลขานุการและผู้ช่วยสอนประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ การติดต่อประสานงาน และข้อคิดในด้านต่าง ๆ อย่างดียิ่งมาโดยตลอด

บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน การใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั้งขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษาในกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกลและการควบคุมทุกท่านที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการด้านการดำเนินชีวิต และคอยเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณครูและอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้นายนามบุญ – นางสุพัสชา แทนรินทร์ บิดาและมารดาของผู้วิจัย รวมถึงครอบครัวของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต

ธิดิพัทธ์ แทนรินทร์

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.....	6
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	6
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	7
1.6 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	7
1.7 การจัดรูปเล่มงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	7
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 บทนำ.....	9
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า.....	9
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง.....	13
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ ของระบบไฟฟ้า.....	16
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้า	20
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า.....	24
2.7 สรุป.....	30
3 สถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้า.....	31
3.1 บทนำ.....	31

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2	โครงสร้างยานยนต์ไฟฟ้า	31
3.2.1	ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่	32
3.2.2	ยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด	32
3.2.3	ยานยนต์ไฟฟ้าแบบปลั๊กอินไฮบริด	33
3.2.4	ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง	34
3.3	ระบบทางไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่	35
3.4	โหมดการทำงานของวงจรแปลงผันชนิดบัส-บูสต์แบบสองทิศทาง และการออกแบบค่าพารามิเตอร์	37
3.4.1	สมดุลพลักซ์เชื่อมโยงในตัวเหนี่ยวนำ	42
3.4.2	สมดุลประจุในตัวเก็บประจุ	44
3.4.3	การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ L	47
3.4.4	การออกแบบตัวเก็บประจุ C	48
3.5	สรุป	51
4	การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่	52
4.1	บทนำ	52
4.2	แบบจำลองแบตเตอรี่ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า	52
4.3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มี โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว	56
4.3.1	ระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ที่ไม่มีตัวควบคุม	56
4.3.2	ทฤษฎีพื้นฐานวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป	58
4.3.3	การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป	59
4.3.4	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	68
4.4	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มีตัวควบคุม แรงดันเอาต์พุต	72

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.1	ระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติที่มีตัวควบคุม.....	72
4.4.2	การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป	73
4.4.3	การออกแบบตัวควบคุมพีไอของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่.....	75
4.4.4	การทำให้เป็นเชิงเส้น	79
4.4.5	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	81
4.5	สรุป.....	83
5	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่	85
5.1	บทนำ.....	85
5.2	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่	85
5.2.1	ทฤษฎีบทค่าเจาะจง.....	88
5.2.2	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา	89
5.2.3	การตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ	91
5.3	ผลกระทบของพารามิเตอร์ต่อเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่	93
5.3.1	ผลกระทบจากตัวเก็บประจุของวงจรกรอง	93
5.3.2	ผลกระทบจากตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง.....	95
5.3.3	ผลกระทบของแบนด์วิดท์ความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม.....	97
5.3.4	ผลกระทบของสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ต่อเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่	101
5.4	สรุป.....	103
6	การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป	104
6.1	บทนำ.....	104
6.2	การเชื่อมต่ออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ในรูป	104

สารบัญ (ต่อ)

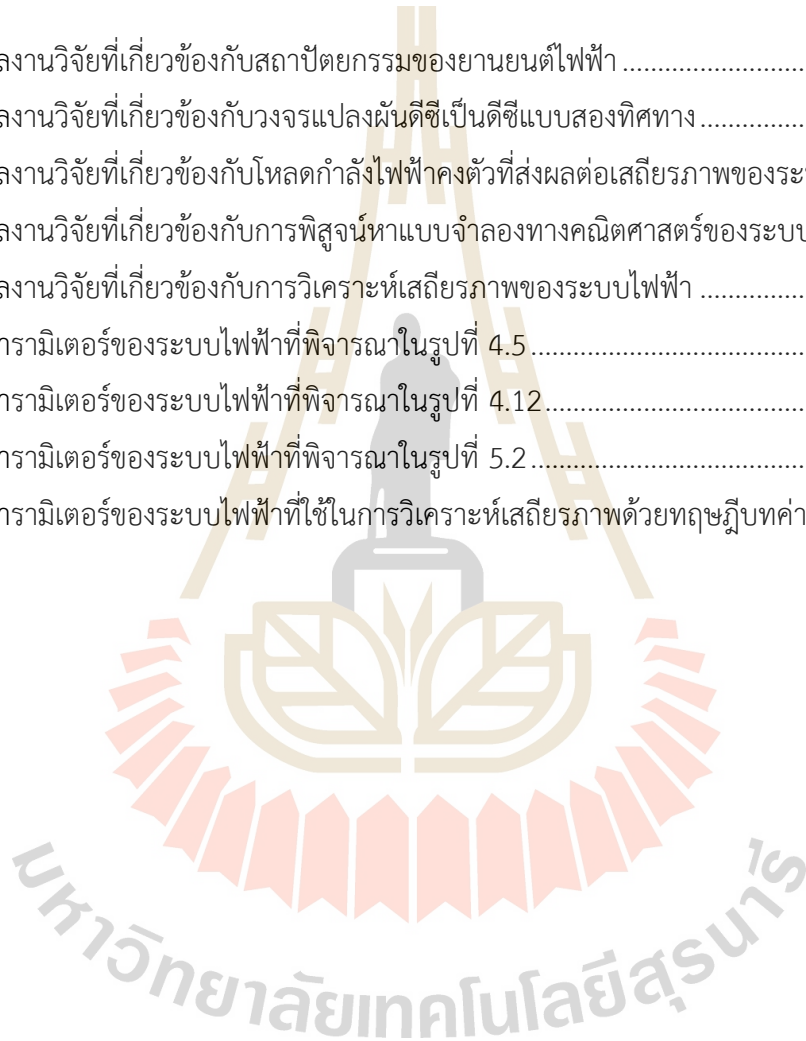
หน้า

6.2.1	ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	
	TMDSDOCK28335	105
6.2.2	การเชื่อมต่ออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ในรูปและโปรแกรม MATLAB	106
6.3	ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป	109
6.4	สรุป	117
7	สรุปและข้อเสนอแนะ	118
7.1	สรุป	118
7.2	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	121
	รายการอ้างอิง	123
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB	130
	ภาคผนวก ข. โค้ดที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	133
	ภาคผนวก ค. โปรแกรมภาษาซีสำหรับจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป	
	ในบอร์ด TMDSDOCK28335	140
	ภาคผนวก ง. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	144
	ประวัติผู้เขียน	165

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า	2
2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง	14
2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า	17
2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้า	20
2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า	25
4.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.5	69
4.2 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.12	81
5.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.2	89
6.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง	110



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 สถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่.....	2
1.2 กราฟคุณลักษณะค่าอิมพีแดนซ์ติดลบ.....	3
2.1 วงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง.....	16
2.2 แผนภาพสรุปการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า.....	29
3.1 โครงสร้างยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่.....	32
3.2 โครงสร้างยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด.....	33
3.3 โครงสร้างยานยนต์ไฟฟ้าแบบปลั๊กอินไฮบริด.....	33
3.4 โครงสร้างยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง.....	34
3.5 แผนภาพแสดงสถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้า.....	35
3.6 องค์ประกอบภายในยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่.....	36
3.7 ระบบทางไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่พิจารณา.....	36
3.8 ระบบไฟฟ้าที่ใช้สำหรับออกแบบค่าพารามิเตอร์.....	38
3.9 การประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็ก.....	38
3.10 ระบบไฟฟ้ากรณี $S1$ “OFF” และ $S2$ “ON”.....	39
3.11 ระบบไฟฟ้ากรณี $S1$ “ON” และ $S2$ “OFF”.....	41
3.12 กราฟโหมดการทำงานของ $v_L(t)$ ของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง.....	43
3.13 กราฟโหมดการทำงานของ $i_C(t)$ ของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง.....	45
3.14 กราฟโหมดการทำงานของ $i_{C_{Batt}}(t)$ ของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง.....	46
3.15 กราฟ $i_L(t)$ ของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง.....	47
3.16 กราฟ $v_H(t)$ ของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง.....	48
3.17 กราฟ $i_{C_{Batt}}(t)$ ของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง.....	49
4.1 แบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่าย.....	53
4.2 การต่อล๊อคไฟฟ้ากำลังเพื่อใช้สร้างเส้นโค้งแรงดัน-กระแสของแบตเตอรี่ ใน MATLAB/Simulink.....	54

สารบัญรูป (ต่อ)

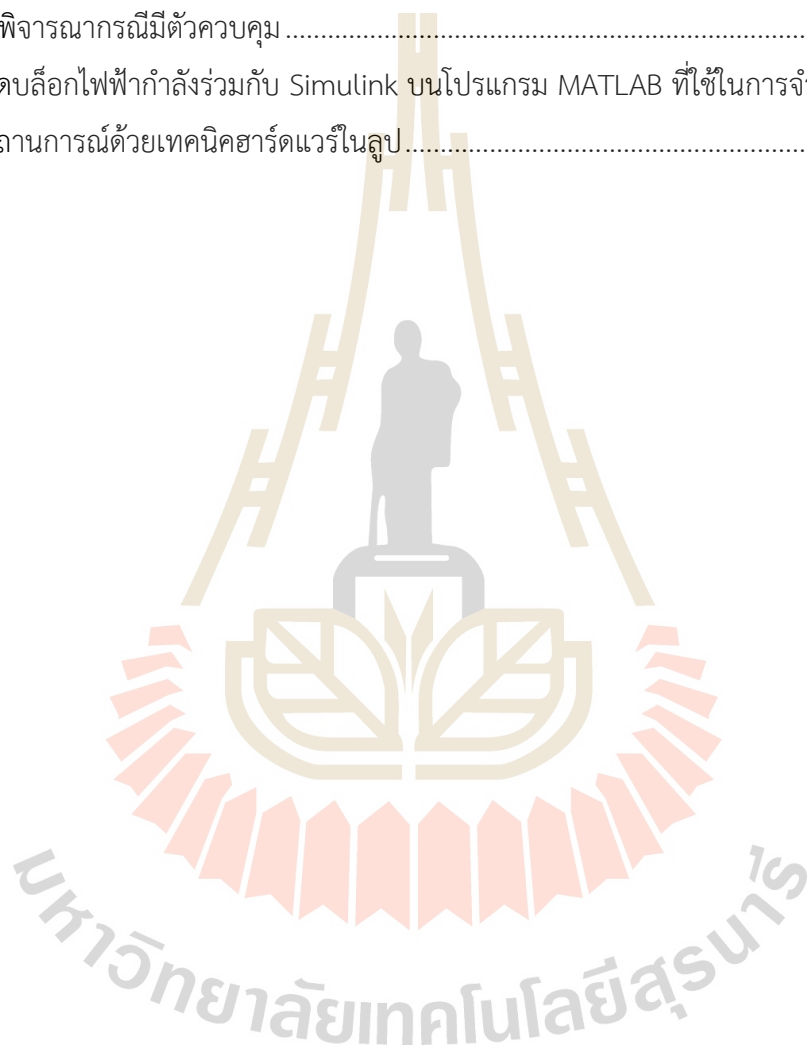
รูปที่	หน้า
4.3 กราฟเส้นโค้งแรงดัน-กระแสของแบตเตอรี่จากการจำลองสถานการณ์ ใน MATLAB/Simulink.....	55
4.4 กราฟเส้นโค้งแรงดัน-กระแสที่ได้จากการปรับเส้นโค้งด้วยสมการเชิงเส้น	55
4.5 ระบบไฟฟ้าสำหรับพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่ไม่มีตัวควบคุม	57
4.6 โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว	57
4.7 ระบบไฟฟ้ากรณีที่ไม่มีตัวควบคุม เมื่อสวิตช์ S_1 “OFF” และ S_2 “ON”	60
4.8 ระบบไฟฟ้ากรณีที่ไม่มีตัวควบคุม เมื่อสวิตช์ S_1 “ON” และ S_2 “OFF”	61
4.9 ฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันชนิดบัส-บูสต์แบบสองทิศทาง.....	65
4.10 ผลการตอบสนองของระบบไฟฟ้ากรณีที่ไม่มีตัวควบคุม เมื่อค่า $SOC = 97\%$	70
4.11 ผลการตอบสนองของระบบไฟฟ้ากรณีที่ไม่มีตัวควบคุม เมื่อค่า $SOC = 60\%$	71
4.12 ระบบไฟฟ้าสำหรับพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีตัวควบคุม.....	72
4.13 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอที่ต่อแบบเรียงกัน	73
4.14 โครงสร้างรูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ดัดแปลงแรงดันสูงของระบบยานยนต์ไฟฟ้า	76
4.15 โครงสร้างรูปควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของระบบยานยนต์ไฟฟ้า	78
4.16 ผลการตอบสนองของระบบไฟฟ้ากรณีที่มีตัวควบคุม เมื่อค่า $SOC = 97\%$	82
4.17 ผลการตอบสนองของระบบไฟฟ้ากรณีที่มีตัวควบคุม เมื่อค่า $SOC = 60\%$	83
5.1 องค์ประกอบภายในยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่.....	86
5.2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ	87
5.3 ขอบเขตแรงดันไฟฟ้าที่ดัดแปลงแรงดันสูงของมาตรฐาน ISO 21498-1 และ ISO 21498-2	87
5.4 ค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา	90
5.5 โพล λ_2 , λ_3 และ λ_4 ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อ $SOC = 97\%$	91
5.6 ผลการจำลองสถานการณ์ของการวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อ $SOC = 97\%$	92
5.7 เส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า C ของวงจรกรอง	94
5.8 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า C ของวงจรกรอง.....	94
5.9 เส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า L ของวงจรกรอง	95
5.10 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า L ของวงจรกรอง.....	96

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11	เส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า ω_m ของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า..... 97
5.12	ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า ω_m ของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า 98
5.13	เส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า ω_{ni} ของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า..... 99
5.14	ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า ω_{ni} ของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า 100
5.15	เส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า SOC ของแบตเตอรี่..... 101
5.16	ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า SOC ของแบตเตอรี่..... 102
6.1	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สมรรถนะสูง TMDSDOCK28335..... 105
6.2	ผังการรับ-ส่งข้อมูลสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป 107
6.3	การเชื่อมต่ออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ในลูป 108
6.4	ผลการทดสอบระยะเวลาในการประมวลผลของโค้ดควบคุมพีไอ..... 109
6.5	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากคู่มือของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา กรณี $SOC = 97\%$ 110
6.6	ผลการยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยฮาร์ดแวร์ในลูปเทียบกับ MATLAB/Simulink กรณี $SOC = 97\%$ 111
6.7	การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเทียบกับ MATLAB/Simulink กรณีผลกระทบของค่า C 112
6.8	การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเทียบกับ MATLAB/Simulink กรณีผลกระทบของค่า L 113
6.9	การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเทียบกับ MATLAB/Simulink กรณีผลกระทบของค่า ω_m 114
6.10	การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเทียบกับ MATLAB/Simulink กรณีผลกระทบของค่า ω_{ni} 115
6.11	การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเทียบกับ MATLAB/Simulink กรณีผลกระทบของค่า SOC 116
ก.1	ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้า ที่พิจารณากรณีไม่มีตัวควบคุม 131

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.2 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้า ที่พิจารณากรณีมีตัวควบคุม	131
ก.3 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการจำลอง สถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป	132



บทที่ 1

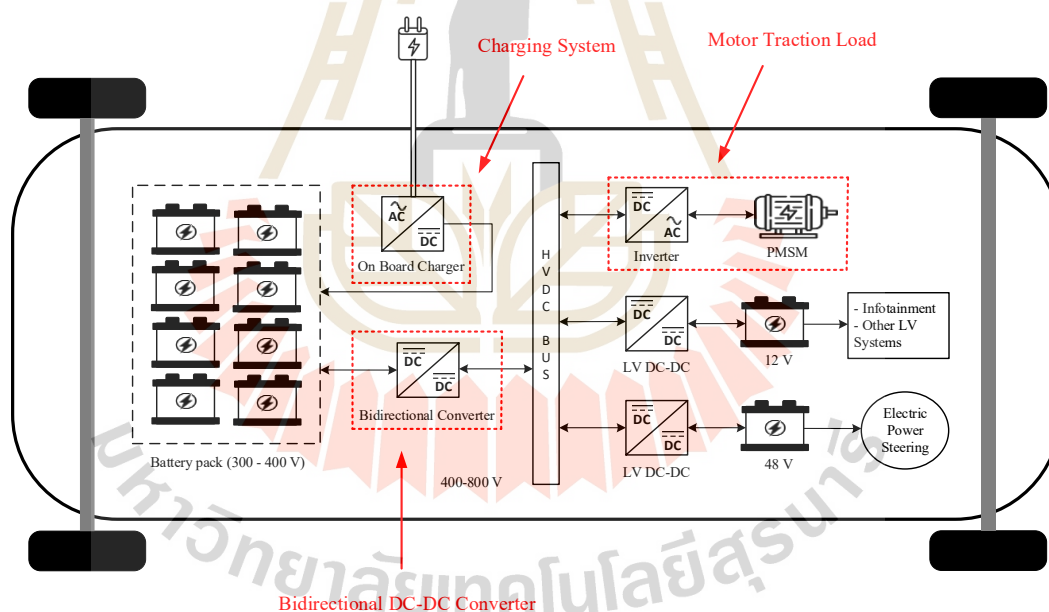
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันยานยนต์ไฟฟ้า (electric vehicles, EVs) มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมยานยนต์ทั่วโลก เนื่องจากความต้องการลดการปล่อยมลพิษและลดการใช้พลังงานฟอสซิล โดยหลายประเทศได้ให้ความสำคัญกับการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ซึ่งรวมถึงการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านสถานีชาร์จไฟฟ้าและเทคโนโลยีแบตเตอรี่ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทั้งนี้ในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและยุทธศาสตร์พลังงานของหลายประเทศได้กำหนดเป้าหมายให้มีการเปลี่ยนผ่านจากระบบเชื้อเพลิงฟอสซิลไปสู่นานยนต์ไฟฟ้าเพื่อสนับสนุนการใช้พลังงานสะอาด ลดก๊าซเรือนกระจก และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (International Energy Agency, 2021) สำหรับประเทศไทยได้มีการส่งเสริมอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าผ่านนโยบายและมาตรการต่าง ๆ เช่น การสนับสนุนด้านภาษี การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านสถานีชาร์จ และการส่งเสริมให้ภาคเอกชนเข้ามาลงทุน ซึ่งคาดการณ์ว่าจำนวนยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในอนาคต (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2565) นอกจากนี้การพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง เช่น แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า และการจัดการพลังงานอัจฉริยะเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและความแพร่หลายของยานยนต์ไฟฟ้าในตลาดโลก (Yuksel & Michalek, 2015) อีกทั้งยังส่งผลต่อการยกระดับความสามารถในการผลิตและการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าในระดับอุตสาหกรรมเพื่อเสริมสร้างความยั่งยืนในด้านการขนส่งและการใช้พลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

การศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่าสถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้ามีทั้งหมดอยู่ 4 รูปแบบ (Un-Noor et al., 2017; Sanguesa et al., 2021; Ehsani et al., 2021) คือ ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ (battery electric vehicle, BEV) ที่อาศัยพลังงานของแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว สามารถสะสมพลังงานในแบตเตอรี่จากการชาร์จ และในบางรุ่นสามารถสะสมพลังงานในช่วงสั้น ๆ จากการเบรกเพื่อป้อนกลับสู่แบตเตอรี่ ยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด (hybrid electric vehicle, HEV) เป็นรถที่ยังใช้เครื่องยนต์สันดาปร่วมกับแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นการใช้เชื้อเพลิงในการปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ที่ไม่ได้อาศัยแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอก พลังงานที่สะสมในแบตเตอรี่อาจรวมไปถึงพลังงานที่เกิดจากการเบรกของยานยนต์ที่ถูกนำมาเก็บในแบตเตอรี่ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ยานยนต์ไฟฟ้าแบบปลั๊กอินไฮบริด (plug-in hybrid electric vehicle, PHEV) ที่มีการใช้งานเครื่องยนต์ที่เป็น

สันดาปร่วมกับแบตเตอรี่เช่นเดียวกับแบบไฮบริด แต่สามารถชาร์จพลังงานให้แบตเตอรี่ได้จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอก ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทนี้มีประสิทธิภาพในการวิ่งด้วยโหมดไฟฟ้าได้ไกลกว่า ยานยนต์แบบไฮบริด เนื่องจากมีขนาดแบตเตอรี่ที่ใหญ่กว่า และในลำดับสุดท้ายยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell electric vehicle, FCEV) ที่มีการใช้เซลล์เชื้อเพลิงจากไฮโดรเจนที่บรรจุในถังเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ยานยนต์ประเภทนี้เป็นทางเลือกหนึ่งของพลังงานสะอาดในอนาคต แม้จะมีข้อจำกัดในเรื่องความปลอดภัยของการผลิตและจัดเก็บไฮโดรเจน สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอข้อมูลที่เป็นการศึกษาของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มีการใช้งานดีซีบีเอสแรงดันสูง 800 V (Jung et al., 2017; Poorfakhraei et al., 2021; Husain et al., 2021; Aghabali et al., 2021; Wang et al., 2023; Hren et al., 2023) เนื่องจากเป็นระบบไฟฟ้าที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน อีกทั้งยังสามารถลดกระแสที่ไหลในระบบ ส่งผลให้อุปกรณ์ต่าง ๆ มีขนาดเล็กลง รวมถึงเป็นการลดขนาดและน้ำหนักของสายไฟ นอกจากนี้ยังสามารถลดระยะเวลาในการชาร์จให้สามารถชาร์จได้เร็วยิ่งขึ้น สถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 1.1

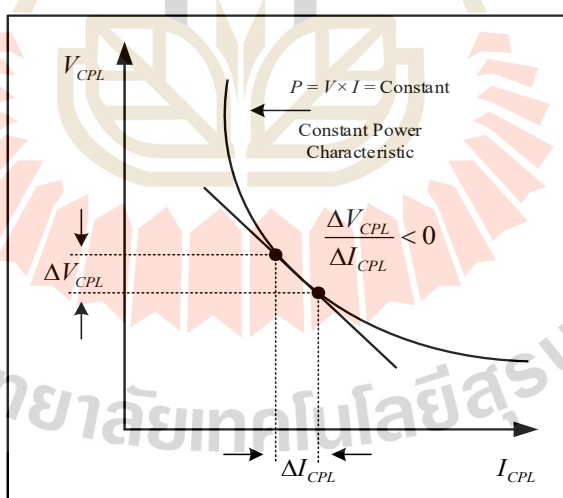


รูปที่ 1.1 สถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่

ระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ ระบบการชาร์จแบตเตอรี่ (charging system) วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง (bidirectional dc-dc converter) สำหรับระบบส่งกำลัง และโหลดขับเคลื่อนมอเตอร์ (motor traction load) นอกจากนี้ยังมีวงจรแปลงผันสำหรับระบบอินโฟเทนเมนต์ (infotainment systems)

เพื่ออำนวยความสะดวก เมื่อพิจารณาจากสถาปัตยกรรมดังรูปที่ 1.1 ส่วนประกอบที่ถือเป็นหัวใจสำคัญในการแปลงผันกำลังไฟฟ้าคือวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง ซึ่งปัจจุบันได้มีการพัฒนาวงจรดังกล่าวหลากหลายรูปแบบ (Wang et al., 2022; Tuluhong et al., 2025; Keerthi & Dhanamjayulu, 2025) เช่น วงจรแปลงผันชนิดชุก (bidirectional cuk converter) วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบอินเทอร์ลีฟ (interleaved bidirectional dc-dc converter) วงจรแปลงผันชนิดฟลายแบ็ค (bidirectional flyback converter) วงจรแปลงผันชนิดพุช-พูลล์ (bidirectional push-pull converter) เป็นต้น อย่างไรก็ตามในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นไปที่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีชนิดบัก-บูสต์แบบสองทิศทาง (bidirectional buck-boost converter) เนื่องจาก มีโครงสร้างเรียบง่าย ไม่ซับซ้อน และมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง (Zhang et al., 2007; Wang et al., 2022; Nimitti et al., 2023; Tuluhong et al., 2025)

ทั้งนี้พบว่าชุดขับเคลื่อนในยานยนต์ไฟฟ้าต้องมีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ พฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมแบบวงปิดจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Emadi et al., 2006; Khaligh et al., 2008; Khaligh, 2008; Anun et al., 2015) ผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวทำให้เกิดค่าอิมพีแดนซ์ติดลบ (negative impedance) (Jusoh, 2004; Emadi et al., 2006; Areerak et al., 2018) ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 กราฟคุณลักษณะค่าอิมพีแดนซ์ติดลบ

จากรูปที่ 1.2 แสดงกราฟคุณลักษณะค่าอิมพีแดนซ์ติดลบ จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามกัน เพื่อรักษากำลังไฟฟ้าให้คงที่ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบทางไฟฟ้าขาดเสถียรภาพ (Jusoh, 2004; Emadi et al., 2006; Zhang et al., 2013;

Pakdeeto et al., 2021; Phosung et al., 2022) โดยเฉพาะในช่วงโหมดขับเคลื่อน (driving mode) ของยานยนต์ไฟฟ้าเนื่องจากในช่วงที่ดึงกำลังไฟฟ้าสูง เมื่อเกิดสภาวะระบบขาดเสถียรภาพ อุปกรณ์ในระบบอาจได้รับความเสียหายและเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน นอกจากนี้การขาดเสถียรภาพยังส่งผลกระทบทำให้สมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมลดลง ส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ ทั้งนี้หากปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นในระหว่างการใช้งานจริง จะกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้ยานยนต์ไฟฟ้า อีกทั้งในด้านสังคมและเศรษฐกิจที่มีผลต่อความน่าเชื่อถือในการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าในระยะยาว ด้วยเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบบเตอร์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า เนื่องจากแบบจำลองที่มีความถูกต้องสามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ ผ่านสมการเชิงอนุพันธ์ทำให้สามารถคาดการณ์การตอบสนองของระบบได้ นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพรวมถึงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบบเตอร์ได้อีกด้วย โดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังมักจะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time varying model) เนื่องจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร (Mahdavi et al., 1997) ส่งผลให้การวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบตัวควบคุมมีความซับซ้อน เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงอาศัยวิธีการทางคณิตศาสตร์ทำให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) ได้แก่วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Sanders et al., 1991; Mahdavi et al., 1997; Emadi, 2004; Emadi, 2004; Wang et al., 2019; Azer & Emadi, 2020) โดยการใช้การประมาณค่าอันดับศูนย์ (Mahdavi et al., 1997; Pakdeeto et al., 2024) เนื่องจากการละทิ้งฮาร์มอนิกอันดับสูง ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ อีกทั้งยังช่วยลดความซับซ้อนในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบได้อย่างมาก วิธีดังกล่าวเป็นการพิสูจน์หาสมการเชิงอนุพันธ์ของตัวแปรสถานะในรูปของสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (complex fourier series) และกำจัดพจน์ตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับเวลาของแบบจำลอง ซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา เหมาะกับการนำไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเป็นลำดับถัดไป

งานวิจัยในอดีตมีแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีหลายวิธี ได้แก่ การใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง (Areerak et al., 2011; Areerak et al., 2012; Amin & Molinas, 2017) เกณฑ์ของมิดเดิลบรูค (middlebrook's criteria) (Riccobono & Santi, 2014) และการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ (impedance-based) (Gao & Bozhko, 2016; Amin & Molinas, 2017) วิธีการเหล่านี้เหมาะสำหรับระบบที่ทำงานในช่วงแคบ ๆ และช่วยวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่ซับซ้อนและตอบสนองในระดับสัญญาณขนาดเล็กได้ แม้ว่าจะมีข้อจำกัดเมื่อใช้กับระบบ

ที่มีพฤติกรรมซับซ้อน ซึ่งกลุ่มวิธีนี้มักเรียกว่า “การวิเคราะห์เสถียรภาพของสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal stability analysis)” ในทางกลับกันการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น สามารถใช้วิธีต่าง ๆ เช่น การใช้ทฤษฎีเลียปูนอฟ (Lyapunov stability theory) (Kabalan et al., 2017) การวิเคราะห์ระนาบเฟส (phase plane approach) (Suyapan et al., 2021; Phosung et al., 2024) และการวิเคราะห์ขอบเขตการลู่เข้าสู่สมดุล (region of attraction analysis) (Hosseinpour et al., 2023; Li et al., 2024) กลุ่มวิธีนี้เหมาะสำหรับการศึกษาระบบที่มีพฤติกรรมในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงมาก มักเรียกว่า “การวิเคราะห์เสถียรภาพของสัญญาณขนาดใหญ่ (large-signal stability analysis)” เนื่องจากสามารถระบุพฤติกรรมและประเมินขอบเขตการมีเสถียรภาพของระบบได้ สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และแสดงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ชัดเจน อีกทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่อยู่ในรูปสมการสถานะ (state-space equation) มีความเหมาะสมกับการนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เริ่มต้นด้วยการศึกษาสถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ โดยผู้วิจัยมุ่งเน้นไปที่สถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่ใช้ดีซีบัสแรงดันสูง 800 V เนื่องจากเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่สามารถประยุกต์ใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าแบบต่าง ๆ จากนั้นได้ดำเนินการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปภายใต้การประมาณค่าอันดับศูนย์ เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับการเวลา เหมาะกับการนำมาใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง พร้อมทั้งพิจารณาพฤติกรรมของแบตเตอรี่ในระบบยานยนต์ไฟฟ้าวรรณถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ *SOC* ที่มีต่อระบบ ทั้งนี้แบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นมีการพัฒนาโดยเพิ่มเติมรายละเอียดของแบบจำลองแบตเตอรี่ เพื่อเพิ่มความถูกต้องให้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิสูจน์ขึ้น การออกแบบค่าพารามิเตอร์จะกำหนดระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 21498-1 และ ISO 21498-2 เพื่อให้แรงดันอยู่ในขอบเขตที่เหมาะสม และทำให้ระบบสามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ที่ผลิตตามมาตรฐานเดียวกันได้ จากนั้นได้มีการวิเคราะห์พฤติกรรมและผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อระบบไฟฟ้า เนื่องจากโหลดขับเคลื่อนมอเตอร์มีลักษณะเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวทำให้เกิดค่าอิมพีแดนซ์ติดลบ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้ระบบไฟฟ้าขาดเสถียรภาพ โดยเฉพาะในช่วงโหมดขับเคลื่อน การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะดำเนินการผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB ควบคู่กับการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลู

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาสถาปัตยกรรมของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อเสถียรภาพในระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่
- 1.2.3 เพื่อประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ในระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ต่อเสถียรภาพของระบบ สำหรับเป็นแนวทางในการออกแบบของวิศวกรทางด้านยานยนต์ไฟฟ้า

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.3.1 วงจรแปลงผันกำลังที่ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่จะอาศัยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางที่มีการทำงานเป็นโหมดนำกระแสต่อเนื่อง (continuous conduction mode, CCM)
- 1.3.2 โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติจะนำมาใช้แทนชุดขับเคลื่อนในระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่
- 1.3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพจะไม่คำนึงถึงผลของระยะเวลาในการปล่อยพลังงานของแบตเตอรี่
- 1.3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณาจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นผ่านการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง
- 1.3.5 การยืนยันจุดขาดเสถียรภาพของระบบที่พิจารณาจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ผ่าน Simulink บนโปรแกรม MATLAB และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ค่าสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ถูกกำหนดให้มีค่าเริ่มต้นตั้งแต่ 14% และไม่เกิน 97% สำหรับเป็นกรณีศึกษาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้
- 1.4.2 พิกัดของยานยนต์ไฟฟ้ามีแรงดันแบตเตอรี่ขนาด 569 V ดีซีบัสแรงดันสูงขนาด 800 V และพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 380 kW
- 1.4.3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบจะออกแบบให้ระดับแรงดันไฟฟ้าของดีซีบัสแรงดันสูงสอดคล้องกับข้อกำหนดของมาตรฐานอ้างอิงตาม ISO 21498-1 และ ISO 21498-2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์

- 1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับสถาปัตยกรรมของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่
- 1.5.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ รวมถึงการนำแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นไปใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของระบบ
- 1.5.3 ได้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่โดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงที่สามารถคาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างแม่นยำ พร้อมทั้งแนวโน้มผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ

1.6 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

- 1.6.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง พิสูจน์จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปภายใต้การประมาณค่าอันดับศูนย์และแบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่าย สามารถนำไปใช้คาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพของระบบและแนวโน้มผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีต่อเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ รวมถึงพารามิเตอร์สถานะการชาร์จแบตเตอรี่
- 1.6.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งช่วยให้สามารถคาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างชัดเจน

1.7 การจัดรูปเล่มงานวิจัยวิทยานิพนธ์

รูปเล่มงานวิจัยวิทยานิพนธ์ประกอบด้วยเนื้อหาจำนวน 8 บท โดยในแต่ละบทได้นำเสนอรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 นำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 นำเสนอการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่แบบสองทิศทางที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้า และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

บทที่ 3 นำเสนอข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา และออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันชนิดบับ-บูสต์แบบสองทิศทาง

บทที่ 4 นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบ และสามารถนำไปใช้คาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพที่เกิดจากผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

บทที่ 5 นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่โดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง และการประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ต่อเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่

บทที่ 6 นำเสนอผลการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

บทที่ 7 นำเสนอสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีทั้งหมด 4 ส่วน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ภาคผนวก ก. แสดงชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB
- ภาคผนวก ข. แสดงโค้ดที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- ภาคผนวก ค. แสดงโปรแกรมภาษาซีสำหรับจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ใน

รูปในบอร์ด TMDSDOCK28335

- ภาคผนวก ง. แสดงบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

บทนำเสนอการศึกษาปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์ โดยจะเรียงลำดับการเริ่มต้นค้นคว้าและศึกษาหาข้อมูล สามารถแบ่งรายละเอียดได้เป็น 5 หัวข้อ ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันตีสีเป็นตีสีแบบสองทิศทางที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้า และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยในแต่ละหัวข้อได้นำเสนองานวิจัยตามลำดับปีที่ตีพิมพ์ รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของงานวิจัยนั้น อีกทั้งยังได้สรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องในแต่ละงานไว้พอสังเขป ในส่วนท้ายของการศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องนี้ได้นำเสนอแนวทางที่จะพัฒนาต่อยอดเพื่อนำไปใช้เป็นงานวิจัยวิทยานิพนธ์

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า

ในปัจจุบันยานยนต์ไฟฟ้าเริ่มเป็นที่นิยมและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากแนวโน้มการใช้พลังงานโลกที่มุ่งไปสู่การผลิตและการใช้พลังงานที่มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้น้อยลง จึงทำให้รัฐบาลจากหลายประเทศทั่วโลก รวมถึงประเทศไทยสนับสนุนให้ประชาชนหันมาใช้ยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิง โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าเหล่านี้ เพื่อเลือกข้อมูลที่จะนำมาใช้เป็นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์ รายละเอียดดังกล่าวแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานนี้
2017	Jung, C.	บทความนี้เสนอการประยุกต์ใช้ระบบไฟฟ้าตีสีบัสแรงดันสูงขนาด 800 V ในระบบยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อเพิ่ม

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานนี้
		ประสิทธิภาพ ลดน้ำหนักและขนาดอุปกรณ์ ลดเวลาการชาร์จแบตเตอรี่ และเพิ่มความสะดวกสบายในการใช้งาน ระบบดังกล่าวยังช่วยให้การออกแบบยานยนต์มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพโดยรวมสูงขึ้น และยังตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานได้ดียิ่งขึ้น
2017	Un-Noor, F., Padmanaban, S., Mihet-Popa, L., Mollah, M. N., & Hossain, E.	บทความนี้นำเสนอภาพรวมของเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ รวมถึงแหล่งพลังงานแบตเตอรี่มอเตอร์ไฟฟ้า ระบบแปลงกำลัง และเทคนิคการชาร์จแบตเตอรี่ พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและระบบยานยนต์ไฟฟ้าที่มีศักยภาพในการสนับสนุนการพัฒนาระบบกริด (smart grid) เพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก อีกทั้งยังวิเคราะห์ข้อจำกัดและแนวทางแก้ไขเพื่อการพัฒนาในอนาคต
2021	Poorfakhraei, A., Narimani, M., & Emadi, A.	บทความนี้นำเสนอแรงดันไฟฟ้าดีซีบัสแรงดันสูงในยานยนต์ไฟฟ้า โดยประยุกต์ใช้ระบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับแรงดันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดขนาดสายไฟ และลดเวลาการชาร์จแบตเตอรี่ ระบบดังกล่าวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณแรงดันและกระแส และเพิ่มความทนทานต่อความผิดปกติของระบบ พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์สองระดับแรงดัน รวมถึงวิเคราะห์ข้อดี ข้อจำกัด และแนวโน้มการวิจัยในอนาคต
2021	Sanguesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F. J., & Marquez-Barja, J. M.	บทความนี้เสนอความก้าวหน้าของยานยนต์ไฟฟ้าทั้งด้านเทคโนโลยีแบตเตอรี่ วิธีการชาร์จ และแนวโน้มการวิจัยในอนาคต พร้อมวิเคราะห์สถานการณ์ตลาดยานยนต์ไฟฟ้าทั่วโลก โดยเน้นบทบาทของแบตเตอรี่ในการกำหนดระยะทางการใช้งาน รวมถึงทบทวนเทคโนโลยีแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ ตั้งแต่แบตเตอรี่ตะกั่ว-

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานนี้
		กรดจนถึงลิเทียมไอออน มาตรฐานการชาร์จ การควบคุมพลังงาน และระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่ (battery management system, BMS) รวมทั้งเสนอแนวทางการพัฒนาในอนาคต เพื่อรองรับเทคโนโลยีใหม่และการขับเคลื่อนไปสู่สมาร์ทซิตี้ (smart city)
2021	Ehsani, M., Singh, K. V., Bansal, H. O., & Mehrjardi, R. T.	บทความนี้นำเสนอภาพรวมเทคโนโลยีระบบขับเคลื่อนในยานยนต์ไฟฟ้าและไฮบริด ครอบคลุมสถาปัตยกรรมระบบขับเคลื่อน มอเตอร์ไฟฟ้า อุปกรณ์เก็บและฟื้นฟูพลังงาน อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการบริหารจัดการแบตเตอรี่ พร้อมวิเคราะห์ข้อดีข้อเสียของโครงสร้างและเทคนิคการปรับสมดุลพลังงาน รวมถึงเสนอแนวทางวิจัย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ระยะทาง และความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
2021	Husain, I., Ozpineci, B., Islam, M. S., Gurpinar, E., Su, G. J., Yu, W., Chowdhury, S., Xue, L., Rahman, D., & Sahu, R.	บทความนี้เสนอแนวโน้มเทคโนโลยีระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าและไฮบริด ครอบคลุมวัสดุ มอเตอร์ไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์ การระบายความร้อน ความหนาแน่นพลังงาน และประสิทธิภาพ พร้อมวิเคราะห์ความท้าทายและโอกาสในการออกแบบเพื่อตอบสนองเป้าหมายของยานยนต์ไฟฟ้าต่อไปในอนาคต รวมถึงเสนอแนวคิดการใช้วัสดุและเทคโนโลยีใหม่ เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มความน่าเชื่อถือ
2021	Aghabali, I., Bauman, J., Kollmeyer, P. J., Wang, Y., Bilgin, B., & Emadi, A.	บทความนี้เสนอการออกแบบระบบไฟฟ้าดีซีบัสแรงดันสูง 800 V สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อรองรับการชาร์จแบตเตอรี่ที่รวดเร็ว ลดขนาดและน้ำหนักสายไฟ และเพิ่มความหนาแน่นพลังงานของมอเตอร์ ครอบคลุมในการวิเคราะห์ข้อดีข้อเสียของแบตเตอรี่ มอเตอร์ อินเวอร์เตอร์ อุปกรณ์เสริม และเครื่องชาร์จ พร้อมทั้ง

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานนี้
		แนวทางสำหรับในการออกแบบและแนวโน้มในอนาคตเพื่อตอบสนองความต้องการของยานยนต์ไฟฟ้ารุ่นใหม่
2023	Wang, C., Zheng, P., & Bauman, J.	บทความนี้นำเสนอการทบทวนเทคโนโลยีโมดูลพลังงานเสริม (auxiliary power module, APM) ในยานยนต์ไฟฟ้า ครอบคลุมโครงสร้างและรูปแบบวงจรแปลงผันชนิดต่าง ๆ (converter topology) ทั้งแบบทิศทางเดียวและสองทิศทาง แบบขั้นเดียวและสองขั้น รวมถึงการทำงานที่หลากหลาย พร้อมวิเคราะห์ความท้าทายปัจจุบัน และแนวโน้มการพัฒนาในอนาคต เช่น การเพิ่มกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ลดขนาดและน้ำหนัก รวมถึงการปรับปรุงความน่าเชื่อถือของระบบ
2023	Hren, A., Truntić, M., & Mihalić, F.	บทความนี้นำเสนอสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าแบบเตอรีขนาดเล็กที่ใช้ดีซีบัสแรงดันสูง 800 V โดยมีการประยุกต์ใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับแรงดัน (multilevel inverter, MLI) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและขยายระยะทาง รวมถึงรองรับการชาร์จด้วยความเร็วสูง อีกทั้งระบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับแรงดันยังช่วยลดความเครียดต่อสวิตช์ ลดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interference, EMI) และเพิ่มความหนาแน่นพลังงานรวมถึงความทนต่อความผิดพลาดของระบบ นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์สองระดับแรงดันทั่วไป พร้อมวิเคราะห์ข้อดีข้อเสียของแต่ละโครงสร้างและแนวโน้มงานวิจัยในอนาคต

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าในตารางที่ 2.1 พบว่าสถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้ามีทั้งหมด 4 รูปแบบ คือ 1) ยานยนต์ไฟฟ้าแบบเตอรีที่อาศัยพลังงานของแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว สามารถสะสม

พลังงานในแบตเตอรี่จากการชาร์จ และในบางรุ่นสามารถสะสมพลังงานในช่วงสั้น ๆ จากการเบรก 2) ยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริดเป็นรถที่ยังใช้เครื่องยนต์สันดาปร่วมกับแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นการใช้เชื้อเพลิงในการปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ที่ไม่ได้อาศัยแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอก โดยพลังงานที่สะสมในแบตเตอรี่อาจรวมไปถึงพลังงานที่เกิดจากการเบรกของยานยนต์ ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในช่วงระยะทางสั้น ๆ 3) ยานยนต์ไฟฟ้าแบบปลั๊กอินไฮบริดที่มีการใช้งานเครื่องยนต์สันดาปร่วมกับแบตเตอรี่เช่นเดียวกับแบบไฮบริด แต่สามารถชาร์จพลังงานของแบตเตอรี่ได้จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอก ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทนี้มีประสิทธิภาพในการวิ่งด้วยโหมดไฟฟ้าได้ไกลกว่ายานยนต์แบบไฮบริด เนื่องจากมีขนาดแบตเตอรี่ที่ใหญ่กว่า และ 4) ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการใช้เซลล์เชื้อเพลิงจากไฮโดรเจนที่บรรจุในถังเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ยานยนต์ประเภทนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของพลังงานสะอาดในอนาคต แม้จะมีข้อจำกัดในเรื่องการผลิตและจัดเก็บไฮโดรเจน นอกจากนี้ยังพบว่าสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าที่มีการใช้งานดีซีบีเอสแรงดันสูง 800 V มีข้อดีคือ การลดกระแสที่ไหลเข้าไปสู่มอเตอร์ ส่งผลให้อุปกรณ์ต่าง ๆ มีขนาดเล็กลง รวมถึงเป็นการลดขนาดและน้ำหนักของสายเคเบิลที่จำเป็นสำหรับการถ่ายโอนพลังงาน แต่มีข้อจำกัดบางประการ เช่น การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และความเครียดแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นในอุปกรณ์แปลงผันกำลังไฟฟ้า ข้อจำกัดดังกล่าวสามารถใช้เทคโนโลยีในปัจจุบันลดผลกระทบได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอกรณีศึกษาของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มีการใช้งานดีซีบีเอสแรงดันสูง 800 V เนื่องจากข้อดีที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้า อีกทั้งยานยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ยังเป็นระบบที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน และสามารถใช้เป็นโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการประยุกต์กับยานยนต์ไฟฟ้าประเภทอื่นได้

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง

สถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้ามีแนวโน้มที่หันมาใช้งานดีซีบีเอสแรงดันสูง 800 V มากขึ้น ตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 2.2 ส่งผลให้วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางมีความสำคัญและจำเป็นอย่างมากในระบบยานยนต์ไฟฟ้า โดยมีหน้าที่หลัก คือ แปลงผันกำลังไฟฟ้าโดยช่วยเพิ่มระดับของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากชุดแบตเตอรี่ที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าให้เป็นระดับแรงดันไฟฟ้าที่ดีซีบีเอสแรงดันสูง เพื่อให้สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ได้ ดังนั้นการศึกษาข้อดีและข้อเสียของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางในแต่ละชนิดเพื่อเลือกข้อมูลที่จะนำมาใช้เป็นวงจรแปลงผันในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงมีความสำคัญ รายละเอียดดังกล่าวแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง

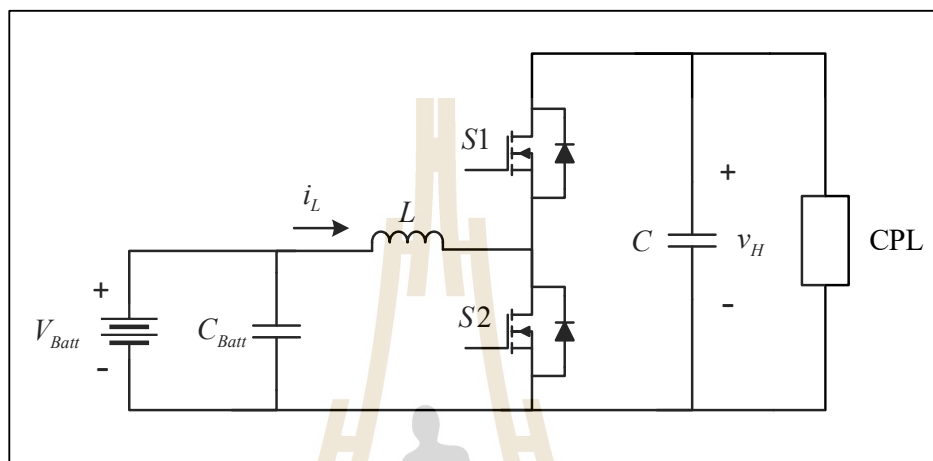
ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานนี้
2007	Zhang, J., Lai, J.-S., Kim, R.-Y., & Song, W.	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางชนิดอินเทอร์ลิฟหลายเฟส เพื่อให้สวิตช์ทำงานแบบนุ่มนวล (soft switching) ส่งผลให้กระแสกระแสเพื่อมและการสูญเสียลดลง พร้อมเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวม ลดขนาดตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ เหมาะสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดและยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงกำลังสูงที่ต้องการความหนาแน่นพลังงานสูง
2022	Wang, J., Wang, B., Zhang, L., Wang, J., Shchurov, N. I., & Malozyomov, B. V.	บทความนี้ได้นำเสนอวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางสำหรับระบบเก็บพลังงานไฮบริด (hybrid energy storage system, HESS) ครอบคลุมโครงสร้างวงจรแบบแยกกราวด์และไม่แยกกราวด์ วิเคราะห์ข้อดีข้อเสีย พร้อมเสนอแนวทางปรับปรุงประสิทธิภาพและการกู้คืนพลังงาน รวมถึงแนวทางวิจัยในอนาคต เช่น การใช้สารกึ่งตัวนำแถบพลังงานกว้าง (wide bandgap, WBG) ในการจัดการการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติของระบบ
2023	Nimitti, F. G., Giacomini, J. C., & Andrade, A. M. S. S.	บทความนี้เสนอโครงสร้างวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางชนิดไม่แยกกราวด์ ซึ่งได้มีการรวมวงจรบัคและวงจรบูสต์สองชุดเข้าด้วยกัน ช่วยเพิ่มอัตราขยายแรงดัน ลดความเค้นแรงดันและกระแสของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ลดกระแสเพื่อม และใช้สวิตช์ที่มีความต้านทานต่ำ ส่งผลให้มีประสิทธิภาพสูง ขณะเดียวกันโครงสร้างยังใช้จำนวนชิ้นส่วนน้อย ทำให้ควบคุมได้ง่าย และเหมาะสมกับการใช้งานจริง
2025	Tuluhong, A., Xu, Z., Chang, Q., & Song, T.	บทความนี้ได้ทบทวนหลักการและโครงสร้างของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (photovoltaic system, PV)

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานนี้
		พร้อมวิเคราะห์เทคนิคการควบคุมและการสวิตช์ซึ่งรวมถึงข้อดีข้อเสียในแต่ละวิธี อีกทั้งยังมุ่งเน้นในการปรับปรุงประสิทธิภาพ ความหนาแน่นกำลัง และความน่าเชื่อถือ โดยแนวโน้มในอนาคตเน้นการลดการสูญเสีย น้ำหนัก และต้นทุน ควบคู่กับการพัฒนาเทคนิคสวิตช์แบบนุ่มนวล และการออกแบบที่กะทัดรัดมากขึ้น
2025	Keerthi, A., & Dhanamjayulu, C.	บทความนี้ได้นำเสนอวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางในระบบยานยนต์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมด้วยเทคนิคต่าง ๆ เช่น การควบคุมแบบโหมดการเลื่อน (sliding mode control, SMC) การควบคุมแบบเชิงทำนายของแบบจำลอง (model predictive control, MPC) และการควบคุมฟังก์ชันเชิงทำนาย (predictive function control, PFC) พร้อมวิเคราะห์ข้อดีข้อเสีย และการประยุกต์ในงานกักเก็บพลังงาน การชาร์จ และการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าในตารางที่ 2.2 พบว่าวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางมีความจำเป็นและมีความสำคัญเป็นอย่างมากในยานยนต์ไฟฟ้า เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบส่งกำลัง รวมไปถึงการทำงานของวงจรดังกล่าวจะมีอยู่สองโหมดการทำงาน โดยโหมดการทำงานแรกเป็นโหมดบูสต์ที่คอยเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าจากชุดแบตเตอรี่ให้เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ดีขึ้นสำหรับโหมดการขับเคลื่อนมอเตอร์ ส่วนในโหมดการทำงานที่สองจะเป็นโหมดบัก ซึ่งทำหน้าที่แปลงผันพลังงานสูญเสียขณะห้ามล้อ (regenerative break mode) เพื่อชาร์จพลังงานกลับเข้าสู่แบตเตอรี่ โดยวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางจะมีอยู่ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่เป็นระบบแยกกราวด์ (isolate system) และกลุ่มที่ไม่เป็นระบบแยกกราวด์ (non-isolate system) ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีชนิดบัก-บูสต์แบบสองทิศทาง วงจรนี้มีข้อดีคือโครงสร้างเรียบง่าย ไม่ซับซ้อน และใช้สวิตช์จำนวนน้อย ส่งผลให้การ

วิเคราะห์โหมดการทำงานทำได้ง่ายกว่าในรูปแบบอื่น ๆ อีกทั้งวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางจัดอยู่ในกลุ่มที่ไม่แยกกราวด์ทำให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานดีกว่ากลุ่มที่เป็นระบบแยกกราวด์ วงจรดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าในรูปที่ 2.1 มีส่วนประกอบ สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำนวน 2 ตัว ทำงานสลับกันตลอดเวลา อีกทั้งยังมีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ซึ่งใช้สำหรับกรองกระแสและแรงดันตามลำดับ อย่างไรก็ตามวงจรดังกล่าวมีโหนดเป็นจุดขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งมีลักษณะเป็นโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัว อาจส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ผลกระทบของโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้านำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

ในระบบของยานยนต์ไฟฟ้ามีส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเกือบทั้งหมด วงจรดังกล่าวมักมีการควบคุมการทำงาน ทำให้มีพฤติกรรมเป็นโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัว ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งอาจทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ในบางสภาวะการทำงานภายใต้พิกัด การขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมหรืออาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบของยานยนต์ไฟฟ้าได้ ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับผลกระทบของโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า รายละเอียดดังกล่าวแสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานนี้
2004	Jusoh, A. B.	บทความนี้นำเสนอระบบไฟฟ้าย่อย (distributed power system, DPS) ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งอาจทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อวงจรกรอง LC และการตอบสนองระหว่างวงจรแปลงผัน อีกทั้งยังได้มีการนำเสนอวิธีการตอบสนองด้วยการหน่วงแบบพาสซีฟ (passive damping) และยืนยันผลลัพธ์ด้วยการจำลองใน MATLAB/Simulink
2006	Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C. H., & Williamson, G. A.	บทความนี้นำเสนอปัญหาความไม่เสถียรภาพที่เกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ พร้อมทบทวนสถาปัตยกรรมของวงจรแปลงผันกำลังและมอเตอร์ รวมทั้งเสนอวิธีวิเคราะห์และควบคุมด้วยการควบคุมแบบโหมดการเลื่อน การทำให้ระบบตอบสนองเชิงเส้น (feedback linearization) และการวิเคราะห์ระนาบเฟสของสัญญาณขนาดใหญ่ เพื่อประเมินเสถียรภาพของระบบ รวมถึงการออกแบบตัวควบคุมให้เหมาะสมกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
2013	Zhang, X., Vilathgamuwa, D. M., Tseng, K.-J., Singh, B., & Gajanayake, C. J.	บทความนี้เสนอระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริดที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ โดยได้ทำการปรับปรุงเสถียรภาพผ่านเพาเวอร์บัฟเฟอร์ (power buffer) ร่วมกับแบตเตอรี่ เพื่อแยกการตอบสนองระหว่างแหล่งจ่ายและโหลด พร้อมใช้การควบคุมเชิงทำนายของแบบจำลองสองโหมด ปรับสมดุลแรงดันของโหลด แรงดันดีซีบัส และกระแสกระแสเหนี่ยวนำของแบตเตอรี่ รวมทั้งวิเคราะห์กรณีแรงดันสูงแรงดันต่ำ และยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า
(ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานนี้
2018	Areerak, K.-N., Sopapirm, T., Bozhko, S., Hill, C. I., Suyapan, A., & Areerak, K.-L.	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซีที่ใช้ตัวเรียงกระแสแบบดั้งเดิมที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ โดยได้เสนอเทคนิคปรับเสถียรภาพเชิงปรับตัว (adaptive stabilization) เพื่อช่วยลดผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว พร้อมใช้สมการจากแบบจำลองเฉลี่ย (averaging model) ในการคำนวณอัตราขยายสำหรับเทคนิคลูปยกเลิก (loop-cancellation technique) ทำให้ระบบมีเสถียรภาพภายใต้โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และยืนยันผลด้วยการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งสัญญาณขนาดเล็กและสัญญาณขนาดใหญ่ผ่านการจำลองสถานการณ์
2021	Pakdeeto, J., Areerak, K.-N., Bozhko, S., & Areerak, K.-L.	บทความนี้นำเสนอระบบไฟฟ้าไมโครกริดกระแสตรง (DC microgrid, DCMG) ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพ โดยเน้นการปรับเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปยกเลิก เพื่อลดผลกระทบจากอิมพีแดนซ์ติดลบ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าถูกพิสูจน์ด้วยวิธีดีคิว (direct quadrature, DQ) และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เหมาะสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ผลลัพธ์ที่ได้ยืนยันว่าระบบสามารถรักษาเสถียรภาพได้ภายใต้พิกัดของระบบ
2022	Phosung, R., Areerak, K.-N., Sopapirm, T., & Areerak, K.-L.	บทความนี้นำเสนอระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพ โดยมีการบรรเทาเสถียรภาพด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์แบบตาบู่เชิงปรับตัว (adaptive tabu search, ATS) ซึ่งประยุกต์ผ่านลูปป้อนไปหน้า (feedforward loop)

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า
(ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานนี้
		ช่วยลดผลกระทบเชิงลบต่อเสถียรภาพและรักษาประสิทธิภาพของโหลดได้ดีกว่าวิธีดั้งเดิม แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถรักษาเสถียรภาพได้จนถึงกำลังไฟฟ้าที่กำหนด นอกจากนี้ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ การจำลอง และทดลองจริงมีความสอดคล้องกัน อีกทั้งยังสามารถต่อยอดใช้กับโหลดที่มีจำนวนหลายชุดหรือเทคนิคปัญหาประดิษฐ์อื่น ๆ ได้

จากการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพในตารางที่ 2.3 พบว่าวงจรแปลงผันที่มีการควบคุมการทำงานจะมีค่ากำลังไฟฟ้าคงที่ในสภาวะการทำงานต่าง ๆ จึงกล่าวได้ว่าโหลดของวงจรแปลงผันดังกล่าวมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่จุดการทำงานหนึ่ง โดยโหลดในลักษณะนี้จะมีค่าอิมพีแดนซ์ติดลบส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ เมื่อพิจารณาในระบบของยานยนต์ไฟฟ้ามีหลายอุปกรณ์ที่อาจได้รับผลกระทบจากโหลดกำลังคงตัว เช่น ชุดแบตเตอรี่ที่อาจมีอายุการใช้งานสั้นลงและเสื่อมสภาพเร็วขึ้น เมื่อมีการใช้งานในสภาวะที่ระบบขาดเสถียรภาพ ส่วนสำคัญในหัวข้อนี้เป็นการเน้นย้ำให้คำนึงถึงดีซีบัสแรงดันสูงที่อาจเกิดการขาดเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว นอกจากนี้หากระบบเกิดการขาดเสถียรภาพยังส่งผลกระทบทำให้สมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมลดลงหรืออาจทำให้อุปกรณ์ภายในระบบของยานยนต์ไฟฟ้าเกิดความเสียหายได้ ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันที่มีการควบคุมผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องเพื่อให้สามารถคาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังนำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้า

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการอธิบายพฤติกรรมของระบบภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ ผ่านสมการเชิงอนุพันธ์ ทำให้สามารถคาดการณ์การตอบสนองของระบบได้ นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพรวมถึงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในระบบไฟฟ้า โดยรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าแสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานนี้
1991	Sanders, S. R., Noworolski, J. M., Liu, X. Z., & Verghese, G. C.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์แบบจำลองด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ (state-space averaging, SSA) ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้กับวงจรและระบบหลากหลาย โดยพบว่าวิธีดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูง อีกทั้งยังได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสมต่อการวิเคราะห์และออกแบบในกรณีที่สัญญาณรบกวนขนาดเล็กไม่เป็นไปตามสมมติฐาน นอกจากนี้ยังช่วยให้การจำลองและออกแบบทำได้ง่ายกว่าวงจรเชิงพลวัตโดยตรง พร้อมรองรับการประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ
1997	Mahdavi, J., Emadi, A., Bellar, M. D., & Ehsani, M.	บทความนี้นำเสนอวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับการพิสูจน์แบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าให้เป็นระบบที่ไม่ขึ้นอยู่กับการสวิตช์ ซึ่งสามารถแทนพฤติกรรมของรูปคลื่นแรงดันและกระแสในวงจรพร้อมทั้งใช้ในการออกแบบตัวควบคุมได้ โดยพบว่าความแม่นยำของแบบจำลองขึ้นอยู่กับลำดับการประมาณค่าและความถี่ในการสวิตช์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพและออกแบบตัวควบคุมได้อย่างสะดวก

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานนี้
2004	Emadi, A.	บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจ่ายไฟเอซี โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อวิเคราะห์ความไม่เสถียรภาพของระบบที่เกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โหลดเหล่านี้มักเป็นวงจรแปลงผันกำลังและชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีตัวเรียงกระแสควบคุม พร้อมแสดงผลการทดลองเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ รวมทั้งให้ข้อเสนอแนะแนวทางการออกแบบระบบเอซีเพื่อหลีกเลี่ยงจุดขาดเสถียรภาพ
2004	Emadi, A.	บทความนี้แนะนำการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกระแสตรงหลายตัว (multiconverter DC) ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปแบบโมดูลาร์ วิธีนี้ช่วยให้วิเคราะห์ระบบขนาดใหญ่ได้ง่ายขึ้น ลดเวลาคำนวณและใช้หน่วยความจำน้อยลง พร้อมนำเสนอผลลัพธ์จากระบบตัวอย่าง และยืนยันว่าการจำลองสามารถใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมและวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบดังกล่าวได้
2019	Wang, L., Deng, X., Han, P., Qi, X., Wu, X., Li, M., & Xu, H.	บทความนี้แนะนำแบบจำลองค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปแบบแบ่งช่วงเวลา (piecewise generalized state-space averaging, P-GSSA) สำหรับวงจรแปลงผันกำลังที่เชื่อมต่อกับกริดในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ ซึ่งรวมเทคนิคแบบแบ่งช่วงเวลาเข้ากับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ช่วยให้สามารถจำลองระบบได้หลายช่วงเวลาและหลายโหมดการทำงาน แบบจำลองสามารถสะท้อนสถานะชั่วคราวและสถานะคงตัวของวงจรได้อย่างแม่นยำ

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานนี้
2020	Azer, P., & Emadi, A.	บทความนี้นำเสนอแบบจำลองค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สำหรับวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่ชนิดอินเทอร์ลิฟหลายเฟส เพื่อแทนพฤติกรรมเชิงพลวัตของแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้ รองรับระบบที่มีการสั่นไกวชัดเจน และคาดการณ์กระแสและแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของระบบได้ ผลการจำลองยืนยันความถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเชิงพลวัตจากซอฟต์แวร์ PLECS
2022	Motwani, J. K., Xue, Y., Nazari, A., Dong, D., Cvetkovic, I., & Boroyevich, D.	บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้สัญญาณปรับความกว้างพัลส์ โดยใช้วิธีปริภูมิสถานะฮาร์โมนิก (harmonic state-space, HSS) เพื่ออธิบายพฤติกรรมเชิงพลวัตของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในสภาวะไม่เชิงเส้น แบบจำลองสามารถพิจารณาผลของฮาร์โมนิกหลายลำดับได้อย่างมีประสิทธิภาพ เหมาะสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบตัวควบคุม โดยผลการจำลองได้รับการยืนยันความถูกต้องด้วยการเปรียบเทียบกับซอฟต์แวร์ PLECS
2023	Lyu, X., Wang, X., Che, Y., & Li, L.	บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่เชื่อมต่อระหว่างยานยนต์ไฟฟ้าและโครงข่ายไฟฟ้าแบบเฟสเดียว (vehicle-to-grid, V2G) โดยใช้วิธีเฟสเซอร์เชิงพลวัต (dynamic phasor model, DPM) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเกิดการสั่นไกวของระบบที่ความถี่ต่ำ แบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมเชิงพลวัตของแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ เหมาะสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบตัวควบคุม

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานนี้
2024	Du, W., Nguyen, Q. H., Wang, S., Kim, J., Liu, Y., & Zhu, S.	บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยวิธีลำดับบวก (positive-sequence model, PSM) สำหรับระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ควบคุมด้วยการควบคุมแบบดรู๊ป (droop control) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลังแบบจำลองเหมาะสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงสัญญาณขนาดเล็กและการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ควบคุมต่อพฤติกรรมของระบบ
2024	Pakdeeto, J., Thanommuang, A., Areerak, K.-L., & Areerak, K.-N.	บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของไมโครกริดกระแสตรงที่เชื่อมกับแผงโซลาร์เซลล์ในสถานีย่อยรถไฟ โดยใช้วิธีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อแปลงแบบจำลองเชิงเวลาให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับเวลา ผลการจำลองยืนยันความแม่นยำทั้งสภาวะชั่วคราว (transient) และสภาวะคงตัว (steady-state) นอกจากนี้ยังใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าแบบจำลองเชิงพลวัต และสามารถต่อยอดสู่การวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบตัวควบคุมได้
2024	Pakdeeto, J., Thanommuang, A., Areerak, K.-L., & Areerak, K.-N.	บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแปลงผันเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก (buck converter) โดยใช้วิธีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป พร้อมนำเทคนิคการวางโพล (pole placement) ไปใช้แก้ปัญหาความไม่เสถียรภาพที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และใช้อัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัวในการปรับพารามิเตอร์ควบคุมให้เหมาะสม ผลการจำลองและการทดลองยืนยันว่าวิธีดังกล่าวช่วยรักษาเสถียรภาพได้ถึงกำลังพิกัดและมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีดั้งเดิม

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานนี้
2025	Daengdon, S., Suyapan, A., Areerak, K.-N., & Pakdeeto, J.	บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ วงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผัน แบบบัก ซึ่งมีตัวควบคุมแบบโหมดการเลื่อน โดยใช้วิธี ดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป พร้อมทั้งยังได้ นำทฤษฎีบทค่าเจาะจงมาวิเคราะห์เสถียรภาพ และ ประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์วงจรกรอง LC ผลการจำลองด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบและการ ทดลองยืนยันว่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวและพารามิเตอร์ วงจรกรองมีผลโดยตรงต่อเสถียรภาพของระบบ

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าในตารางที่ 2.4 โดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังมักจะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time varying model) เนื่องจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร ส่งผลให้การวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบตัวควบคุมมีความซับซ้อน เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงอาศัยวิธีการที่ทำให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปภายใต้การประมาณค่าอันดับศูนย์ เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซี วิธีดังกล่าวเป็นการหาสมการเชิงอนุพันธ์ของตัวแปรสถานะในรูปของสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน และกำจัดพจน์ตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับเวลาของแบบจำลอง ซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาเหมาะกับการนำไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเป็นลำดับถัดไป

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

หัวข้อนี้ได้นำเสนอานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือในการคาดการณ์จุดที่อาจเกิดการขาดเสถียรภาพ เพื่อให้ทราบถึงจุดที่ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพและหลีกเลี่ยงการทำงานในสภาวะดังกล่าว โดยรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าแสดงได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานนี้
2011	Areerak, K.-N., Wu, T., Bozhko, S. V., Asher, G. M., & Thomas, D. W. P.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กของวงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซี สำหรับระบบไฟฟ้าของอากาศยานโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา พัฒนาขึ้นโดยอาศัยการแปลงเชิงแกนหมุนหรือการแปลงดีคิว เพื่อศึกษาคุณลักษณะเชิงพลวัตของระบบ และวิเคราะห์เสถียรภาพโดยมุ่งเน้นการประเมินตำแหน่งคู่อโพลเด่นบนระนาบเชิงซ้อน
2012	Areerak, K.-N., Bozhko, S., Asher, G. M., De Lillo, L., & Thomas, D. W. P.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กของระบบไฟฟ้าแบบไฮบริดเอซีเป็นดีซีของอากาศยานโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยใช้วิธีการดีคิวในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อสร้างรูปแบบทั่วไปที่เชื่อมต่อกับส่วนประกอบตามสถาปัตยกรรมต่าง ๆ เหมาะกับระบบที่มีตัวควบคุมและโหลดหลายชุด รวมถึงบัลที่ซับซ้อน ผลการจำลองเชิงพลวัตและการทดลองยืนยันความถูกต้อง พร้อมคาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพที่เกิดจากการเปลี่ยนจุดทำงานหรือพารามิเตอร์ของระบบ
2014	Riccobono, A., & Santi, E.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยใช้เกณฑ์ของมิตเดิลบรูกผ่านอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ และบริเวณข้อจำกัดเชิงเสถียรภาพในแผนภาพโพลาร์ (polar plot) นอกจากนี้ยังนำเสนอวิธีการใหม่ที่อาศัยแนวคิดการควบคุมแบบพาสซีฟของอิมพีแดนซ์บัล (passivity-based bus impedance control, PBSC) เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการออกแบบระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานนี้
2016	Gao, F., & Bozhko, S.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแหล่งจ่ายและโหลดหลายชุด (multi-source multi-load) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์สำหรับระบบควบคุมรูป พร้อมพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (permanent magnet synchronous generator, PMSG) รวมถึงวงจรแปลงผัน และวิเคราะห์ผลกระทบของค่ารูปอัตราขยายกับพารามิเตอร์ควบคุมต่อเสถียรภาพของระบบ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและลดการสูญเสียพลังงาน
2017	Amin, M., & Molinas, M.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์กำลังในโดเมนความถี่ โดยเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์กับทฤษฎีบทค่าเจาะจง พร้อมวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสมการคุณลักษณะของค่าเจาะจงกับโพลและซีโรของลู่วควบคุมย่อย (minor-loop gain) ผลการวิเคราะห์ยืนยันว่าทั้งสองวิธีสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพได้ อีกทั้งยังสามารถประเมินผลกระทบของตัวควบคุมและอุปกรณ์พาสซีฟต่อระบบได้อย่างแม่นยำ
2017	Kabalan, M., Singh, P., & Niebur, D.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของไมโครกริดโดยใช้ทฤษฎีเลียปูนอฟ ครอบคลุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดแต่ละประเภท ตลอดจนอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมรูป วงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซี ดีซีเป็นดีซี และชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ การสำรวจพบว่างานวิจัยสัญญาณขนาดใหญ่โดยใช้ทฤษฎีเลียปูนอฟยังมีจำกัด จึงยังมีโอกาสศึกษาเพิ่มเติม

ตารางที่ 2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (ต่อ)

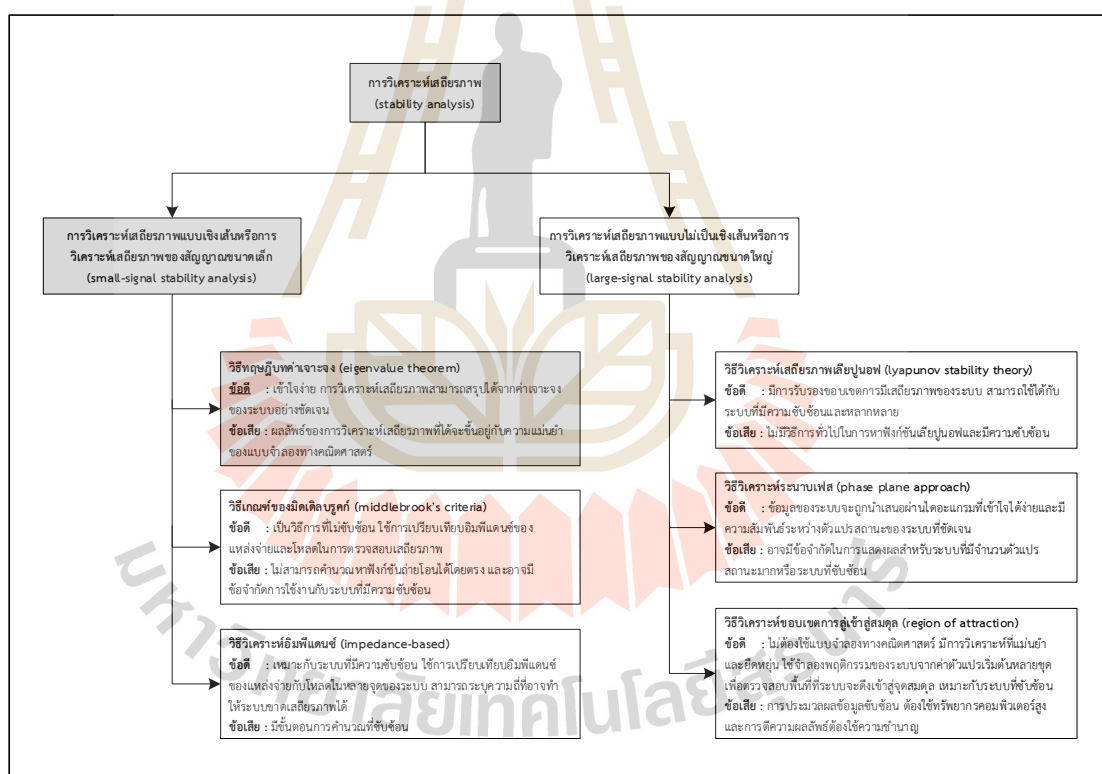
ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานนี้
		เพื่อเข้าใจเสถียรภาพของไมโครกริด ซึ่งช่วยให้ประเมินพฤติกรรมช่วงเปลี่ยนผ่านและออกแบบระบบควบคุมได้อย่างแม่นยำ
2021	Suyapan, A., Areerak, K.-N., Bozhko, S., Shen, S. Y., & Areerak, K.-L.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนอสชนิดแม่เหล็กถาวรในอากาศยานระบบไฟฟ้าเสริม (more electric aircraft, MEA) ภายใต้โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงและการวิเคราะห์ระนาบเฟส พร้อมนำเทคนิคคลุยกเล็กและสมการป้อนกลับแบบง่ายมาช่วยลดผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวและปรับให้ระบบทำงานมั่นคงทุกช่วงกำลังไฟฟ้า ผลการวิเคราะห์และทดลองยืนยันว่าระบบสามารถรักษาเสถียรภาพจนถึงกำลังไฟฟ้าที่พิกัด อีกทั้งแรงดันดีซีบัสยังเป็นไปตามมาตรฐาน MIL-STD-704F
2023	Hosseinpour, H., MansourLakouraj, M., Ben-Idris, M., & Livani, H.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของไมโครกริดแบบเอซีที่ใช้อินเวอร์เตอร์ โดยเปรียบเทียบวิธีเลียบุนอฟแบบผลรวมกำลังสอง (sum of squares, SOS) กับวิธีของคราซอฟสกีและเกณฑ์ของปอปอฟ-ลูรี ผลการศึกษาพบว่าวิธีเลียบุนอฟแบบผลรวมกำลังสองให้ขอบเขตการมีเสถียรภาพที่แม่นยำกว่า แต่ต้องใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์สูงกว่า ขณะที่วิธีของคราซอฟสกีและเกณฑ์ของปอปอฟ-ลูรีให้ความแม่นยำน้อยกว่า เหมาะสมกับระบบขนาดใหญ่
2024	Li, J., Wu, H., Zhan, X., & Gan, D.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้วิธีวิเคราะห์ขอบเขตการลู่อู่เข้าสู่สมดุลของระบบไฟฟ้าผ่านโปรแกรมผลรวมกำลังสอง ซึ่งอาศัยคุณสมบัติพหุนามของสมการแกว่ง (swing equation) สำหรับ

ตารางที่ 2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานนี้
		ระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องเดียวและหลายเครื่อง พร้อมสมการฉายภาพเครื่องจักรกลเดียว (single-machine projection) เพื่อตรวจสอบมุมโรเตอร์สูงสุด ผลการวิเคราะห์ยืนยันว่าวิธีนี้สามารถระบุขอบเขตเสถียรภาพของระบบได้อย่างแม่นยำ
2024	Phosung, R., Areerak, K.-N., & Areerak, K.-L.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในอากาศยานระบบไฟฟ้าเสริมภายใต้โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงและการวิเคราะห์ระนาบเฟส พร้อมนำเทคนิคลูบยกเล็กและค่าป้อนกลับที่เหมาะสมมาช่วยลดผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ทำให้ระบบกลับมาเสถียรภาพ สามารถทำงานที่กำลังสูงได้ อีกทั้งแรงดันดีซีบัสยังเป็นไปตามมาตรฐาน MIL-STD-704F

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า พบว่าแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ประเภทแรกคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น หรือการวิเคราะห์เสถียรภาพของสัญญาณขนาดเล็ก ซึ่งประกอบด้วยหลายวิธี เช่น การใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยมีข้อดีคือ เข้าใจง่าย การวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถสรุปได้จากค่าเจาะจงของระบบอย่างชัดเจน ข้อเสียคือ ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จะขึ้นอยู่กับความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ต่อมาคือวิธีเกณฑ์ของมิตเดิลบรูก์ ซึ่งมีข้อดีคือ เป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ใช้การเปรียบเทียบอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดในการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ ข้อเสียคือ ไม่สามารถคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนได้โดยตรง และอาจมีข้อจำกัดการใช้งานกับระบบที่มีความซับซ้อน ในขณะที่วิธีวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ มีข้อดีคือ เหมาะกับระบบที่มีความซับซ้อน ใช้การเปรียบเทียบอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกับโหลดในหลายจุดของระบบ สามารถระบุความถี่ที่อาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ แต่ข้อเสียคือ มีขั้นตอนการคำนวณที่ซับซ้อน ในลำดับถัดมาเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้น หรือการวิเคราะห์ของสัญญาณขนาดใหญ่ มีหลายวิธีเช่นกัน ได้แก่ การใช้ทฤษฎีเลียปูนอฟ ซึ่งเป็นวิธีนิยม

สำหรับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากสามารถประมาณขอบเขตการมีเสถียรภาพได้ อีกทั้งยังสามารถใช้ได้กับระบบที่มีความซับซ้อนและหลากหลาย ข้อเสียคือ ไม่มีวิธีทั่วไปในการหาฟังก์ชันเลียปูนอฟและมีความซับซ้อนสูง วิธีการวิเคราะห์ระบบเฟส มีข้อดีคือ ข้อมูลระบบถูกนำเสนอผ่านไดอะแกรมที่เข้าใจง่ายและชัดเจนในความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะ แต่ข้อเสียคือ อาจจำกัดการแสดงผลสำหรับระบบที่มีตัวแปรสถานะจำนวนมากหรือซับซ้อน วิธีการวิเคราะห์ขอบเขตการลู่เข้าสู่สมดุล มีข้อดีคือ ไม่ต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีการวิเคราะห์ที่แม่นยำและยืดหยุ่น ใช้จำลองพฤติกรรมของระบบจากค่าตัวแปรเริ่มต้นหลายชุด เพื่อตรวจสอบพื้นที่ที่ระบบจะลู่เข้าสู่จุดสมดุล เหมาะกับระบบที่ซับซ้อน ข้อเสียคือ การประมวลผลข้อมูลซับซ้อน ต้องใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์สูง และการตีความผลลัพธ์ต้องใช้ความชำนาญ ข้อมูลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าสามารถสรุปเป็นแผนภาพแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพสรุปการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพสรุปแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็นสองกลุ่มหลัก ได้แก่ การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น และการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเน้นไปที่การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น

โดยใช้วิธีทฤษฎีบทค่าเจาะจง เนื่องจากมีความเข้าใจง่าย ไม่ซับซ้อน วิธีดังกล่าวให้ความถูกต้องเฉพาะช่วงการทำงานที่แคบ (small range operation) เท่านั้น แต่ก็สามารถให้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพในลักษณะนี้ช่วยให้สามารถคาดการณ์จุดหรือเงื่อนไขที่อาจทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ อีกทั้งยังสามารถประเมินแนวโน้มผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อเสถียรภาพของระบบได้ ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์เสถียรภาพนี้สามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับวิศวกรในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของระบบ เพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ ปลอดภัย ภายใต้พิกัดของระบบ

2.7 สรุป

บริษัทวิศวกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 เป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งในการนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ องค์ความรู้ที่ได้นี้ทำให้เกิดความเข้าใจในเรื่องของสถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้า โดยได้เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างกรณีการใช้งานดีซีบัสแรงดันสูง (HVDC bus) ที่ค่าแรงดันต่าง ๆ ซึ่งพบว่าสถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้าที่มีการใช้งานดีซีบัสแรงดันสูง 800 V นั้นค่อนข้างที่จะมีข้อดีมากกว่า เช่น ลดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ส่งผลให้ขนาดสายไฟหรือแบตเตอรี่ที่ใช้มีขนาดลดลง หรือเพิ่มความเร็วในการชาร์จแบตเตอรี่ให้เร็วขึ้น เป็นต้น ซึ่งเป็นระบบที่น่าสนใจในการพัฒนาต่อยอด นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาความสำคัญ หลักการทำงาน และข้อดีและข้อเสียของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางในแต่ละประเภท เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกระบบไฟฟ้าที่พิจารณา อีกทั้งยังทำให้เข้าใจความเป็นมาของผลกระทบที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อระบบยานยนต์ไฟฟ้า ส่งผลให้มีความจำเป็นที่จะต้องมีการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังช่วยให้เกิดความเข้าใจในเรื่องของการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการเลือกวิธีการที่เหมาะสมสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ทำให้สามารถคาดการณ์จุดที่ระบบขาดเสถียรภาพได้ การคาดการณ์นี้ยังช่วยให้สามารถหลีกเลี่ยงจุดทำงานที่ไม่ปลอดภัย รวมทั้งสามารถประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ได้ ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบของวิศวกรด้านยานยนต์ไฟฟ้า

บทที่ 3

สถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้า

3.1 บทนำ

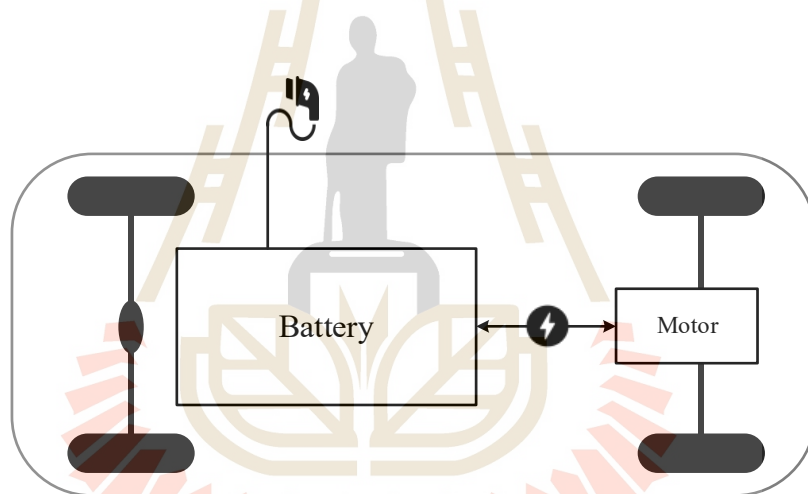
การใช้ยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบันได้รับการยอมรับและสนับสนุนจากหลายประเทศทั่วโลก เนื่องจากสามารถลดการใช้พลังงานและมลพิษจากการขนส่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในประเทศไทยที่กำลังมีการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมยานยนต์อย่างต่อเนื่อง ยานยนต์ไฟฟ้าจึงถูกมองเป็นทางเลือกสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมขนส่งทางถนนในอนาคต ยานยนต์ไฟฟ้าเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของมลพิษทางอากาศและภาวะโลกร้อน การพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าได้รับการสนับสนุนอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าและแบตเตอรี่พลังงานสูงเพื่อแทนที่เครื่องยนต์สันดาปภายใน สถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบันเริ่มนิยมใช้แรงดันไฟฟ้าที่ตีสี่สิบแรงดันสูง 800 V เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการส่งกำลังดีกว่า ช่วยลดขนาดของสายไฟและอุปกรณ์ต่าง ๆ ทำใหยานยนต์มีน้ำหนักเบาและประหยัดพื้นที่ การพัฒนาเทคโนโลยีแบตเตอรี่และระบบแปลงพลังงานไฟฟ้าช่วยเพิ่มสมรรถนะของยานยนต์ไฟฟ้าในด้านระยะทางที่วิ่งได้ต่อการชาร์จหนึ่งครั้ง ยานยนต์ไฟฟ้าไม่เพียงแต่มีข้อดีด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงานและการลดมลพิษ แต่ยังเป็นก้าวสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีการขนส่งในอนาคตที่จะทำให้ประเทศไทยสามารถยกระดับอุตสาหกรรมยานยนต์สู่ระดับโลกได้ รายละเอียดสถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้าแบ่งเป็นหัวข้อสำคัญได้ดังนี้

3.2 โครงสร้างยานยนต์ไฟฟ้า

ยานยนต์ไฟฟ้าคือยานพาหนะที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อน โดยมีรูปแบบที่แตกต่างกันตามการผสมผสานระหว่างระบบขับเคลื่อนและแหล่งกักเก็บพลังงาน โดยทั่วไปใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานหลัก แต่สามารถใช้แหล่งเก็บพลังงานอื่น เช่น ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (supercapacitor) ร่วมได้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ขณะที่การขับเคลื่อนจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นหลัก แต่บางกรณีอาจมีการผสมผสานการทำงานกับเครื่องยนต์ร่วมได้เช่นกัน ยานยนต์ไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทดังนี้ (Un-Noor et al., 2017; Sanguesa et al., 2021; Ehsani et al., 2021)

3.2.1 ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่

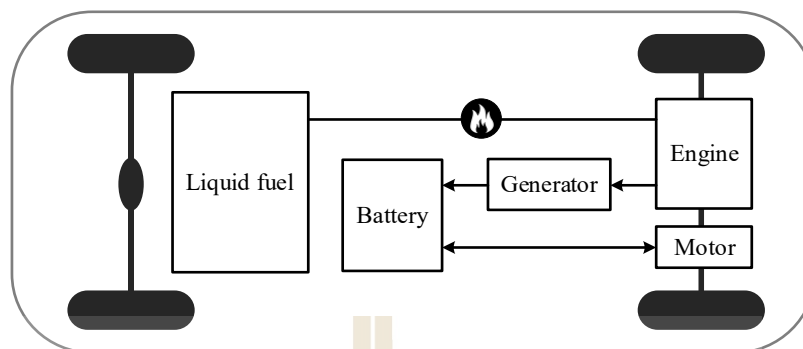
ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่เป็นยานยนต์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานหลัก โดยอาศัยมอเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนเพียงอย่างเดียว ไม่มีเครื่องยนต์สันดาปภายใน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โครงสร้างของระบบมีความเรียบง่ายเนื่องจากไม่ต้องใช้ระบบส่งกำลังเชิงกลที่ซับซ้อน ประสิทธิภาพของยานยนต์ประเภทนี้ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของแบตเตอรี่ วงจรแปลงผันรวมถึงน้ำหนักบรรทุก ในขณะที่ยานยนต์มีการเบรกมอเตอร์ไฟฟ้าจะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อแปลงพลังงานจลน์ของยานยนต์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าและส่งกลับไปเก็บในแบตเตอรี่ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและเพิ่มระยะทางการขับขี่ของยานยนต์ไฟฟ้าได้ ปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่มีความจุพลังงานสูงขึ้นและต้นทุนลดลง ส่งผลให้ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ได้รับความนิยมและมีการผลิตเพิ่มขึ้นในหลายประเทศ เช่น ญี่ปุ่น สหภาพยุโรป และสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นตลาดหลักของยานยนต์ไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 โครงสร้างยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่

3.2.2 ยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด

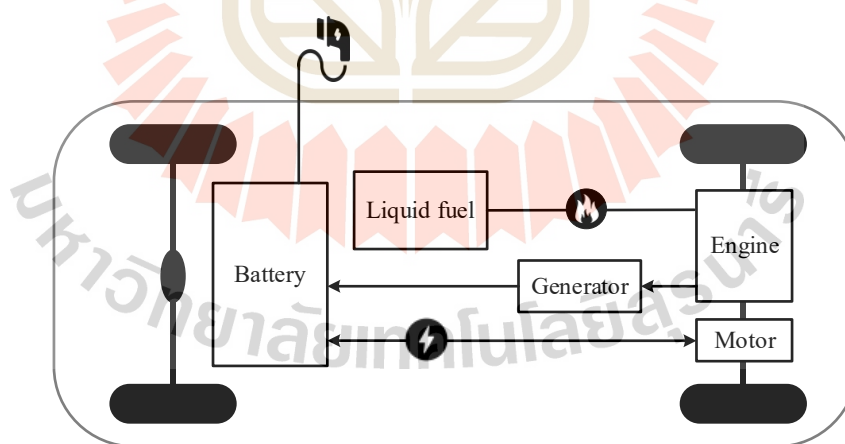
ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดคือยานยนต์ที่ใช้ทั้งเครื่องยนต์สันดาปภายในและมอเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ระบบสามารถทำงานสลับกันหรือร่วมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ หนึ่งในเทคโนโลยีสำคัญของยานยนต์ประเภทนี้คือระบบเบรกที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจากการเบรกให้กลับมาเป็นไฟฟ้าและเก็บไว้ในแบตเตอรี่ ซึ่งช่วยลดการสูญเสียพลังงานโดยไม่จำเป็น การทำงานของเครื่องยนต์ร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงเมื่อเทียบกับรถยนต์ทั่วไป อีกทั้งยังช่วยเพิ่มสมรรถนะของยานยนต์ เช่น การเร่งความเร็วที่ดีขึ้น นอกจากนี้เครื่องยนต์ที่ใช้ในยานยนต์ไฮบริดมักได้รับการออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงและช่วยประหยัดพลังงาน



รูปที่ 3.2 โครงสร้างยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด

3.2.3 ยานยนต์ไฟฟ้าแบบปลั๊กอินไฮบริด

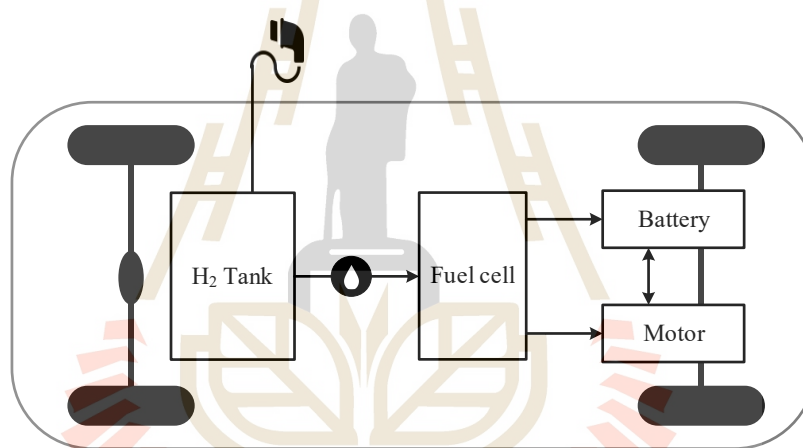
ยานยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริดเป็นรูปแบบที่พัฒนาต่อยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด โดยสามารถชาร์จพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งภายนอกได้ ซึ่งช่วยให้สามารถใช้พลังงานจากทั้งแบตเตอรี่และน้ำมันเชื้อเพลิงร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ยานยนต์ประเภทนี้มักมีแบตเตอรี่ขนาดใหญ่กว่ายานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดทั่วไป ทำให้สามารถขับเคลื่อนโดยใช้พลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวได้ระยะทางไกลขึ้น การทำงานแบ่งเป็นสองแบบ ได้แก่ แบบที่ใช้ไฟฟ้าก่อนแล้วเปลี่ยนเป็นเครื่องยนต์เมื่อพลังงานหมด และแบบที่ใช้ทั้งไฟฟ้าและเครื่องยนต์ร่วมกันตลอดเวลา



รูปที่ 3.3 โครงสร้างยานยนต์ไฟฟ้าแบบปลั๊กอินไฮบริด

3.2.4 ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง

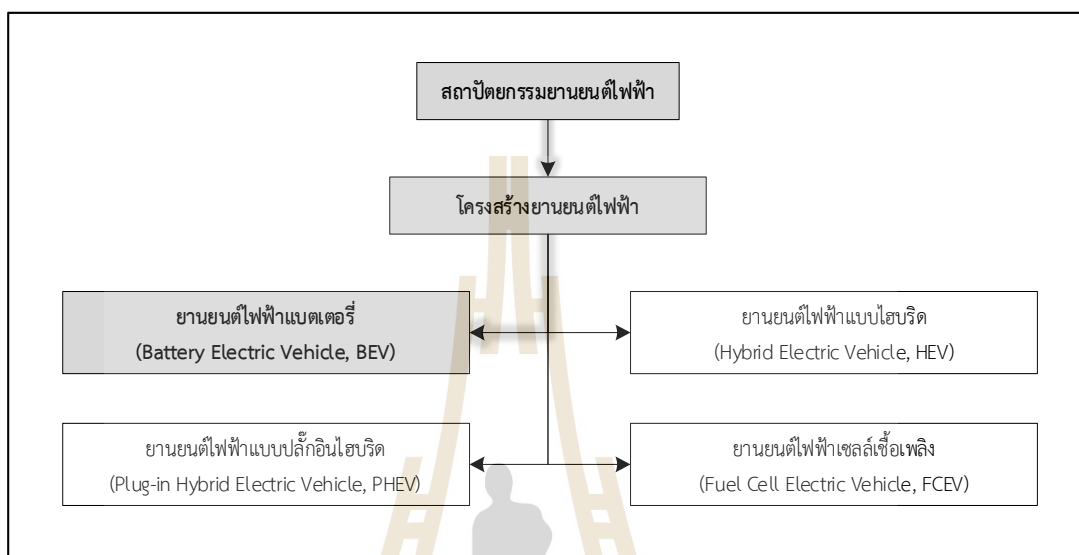
ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงเป็นยานพาหนะที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยตรงจากก๊าซไฮโดรเจนที่บรรจุในถัง โดยพลังงานที่ได้จะถูกส่งไปขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า และพลังงานส่วนเกินจะนำไปชาร์จแบตเตอรี่เพื่อสำรองไว้ใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงและสามารถนำพลังงานไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังมีข้อดีด้านสิ่งแวดล้อมเนื่องจากไม่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมาโดยตรง ยานยนต์ไฟฟ้าชนิดนี้มีความจุพลังงานสูงกว่ายานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ทั่วไป ทำให้เหมาะกับยานยนต์ที่ต้องการเดินทางระยะไกล ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงจึงถือเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจในอนาคตสำหรับการใช้พลังงานสะอาด อย่างไรก็ตามปัญหาหลักในปัจจุบันคือการผลิตและการจัดเก็บไฮโดรเจนยังมีต้นทุนสูง อีกทั้งยังขาดโครงสร้างพื้นฐานที่รองรับอย่างเพียงพอสำหรับการใช้งานในวงกว้าง



รูปที่ 3.4 โครงสร้างยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง

จากที่ได้กล่าวถึงโครงสร้างของยานยนต์ไฟฟ้าในแต่ละประเภท งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการศึกษาสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ เนื่องจากมีโครงสร้างที่เรียบง่ายกว่าเมื่อเทียบกับระบบยานยนต์ไฟฟ้ารูปแบบอื่น โดยไม่จำเป็นต้องมีชุดส่งกำลังที่ซับซ้อน ทั้งนี้สถาปัตยกรรมดังกล่าวจะเลือกการใช้งานดิสชาร์จแรงดันสูง 800 V (Jung et al., 2017; Poorfakhraei et al., 2021; Husain et al., 2021; Aghabali et al., 2021; Wang et al., 2023; Hren et al., 2023) ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการส่งพลังงานสูงกว่า เนื่องจากกระแสไฟฟ้าลดลง ส่งผลให้ลดการสูญเสียพลังงานในสายไฟและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง นอกจากนี้ยังช่วยให้สามารถใช้สายไฟที่มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ยานยนต์มีน้ำหนักเบาและมีพื้นที่ภายในเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดระยะเวลาในการชาร์จแบตเตอรี่

ทำให้การใช้งานสะดวกและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ข้อมูลสถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้าสามารถสรุปเป็นแผนภาพแสดง ดังที่แสดงในรูปที่ 3.5

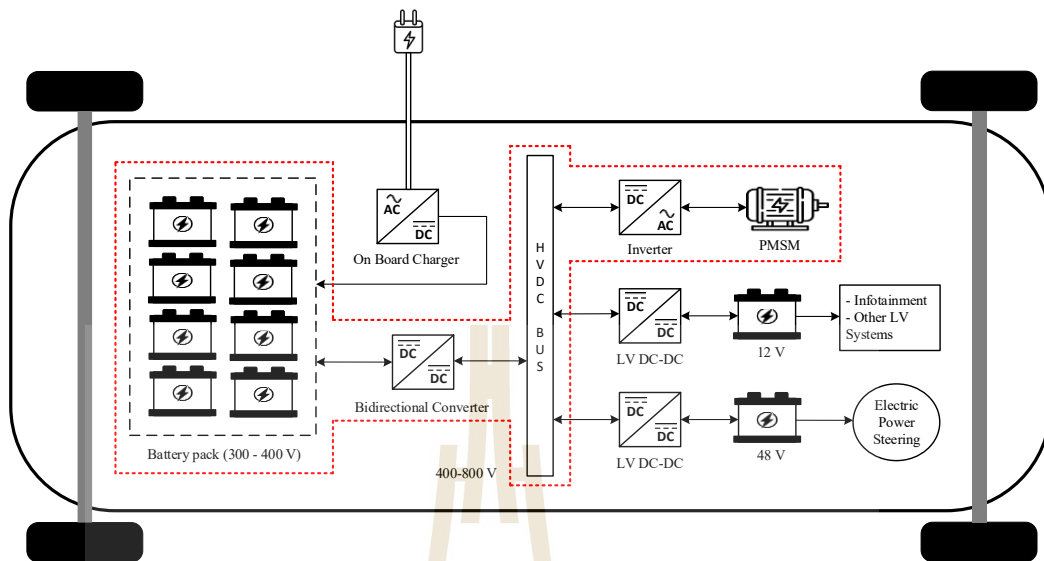


รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงสถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้า

พิจารณาในรูปที่ 3.5 พบว่าเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้ามีหลายรูปแบบในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นไปที่ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ เนื่องจากเป็นระบบที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน อีกทั้งยังมีองค์ประกอบหลักครบถ้วน เช่น ชุดแบตเตอรี่ วงจรแปลงผันกำลัง และโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นต้นแบบในการวิเคราะห์และพัฒนาไปสู่ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทอื่น รายละเอียดของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่จะกล่าวไว้ในหัวข้อถัดไป

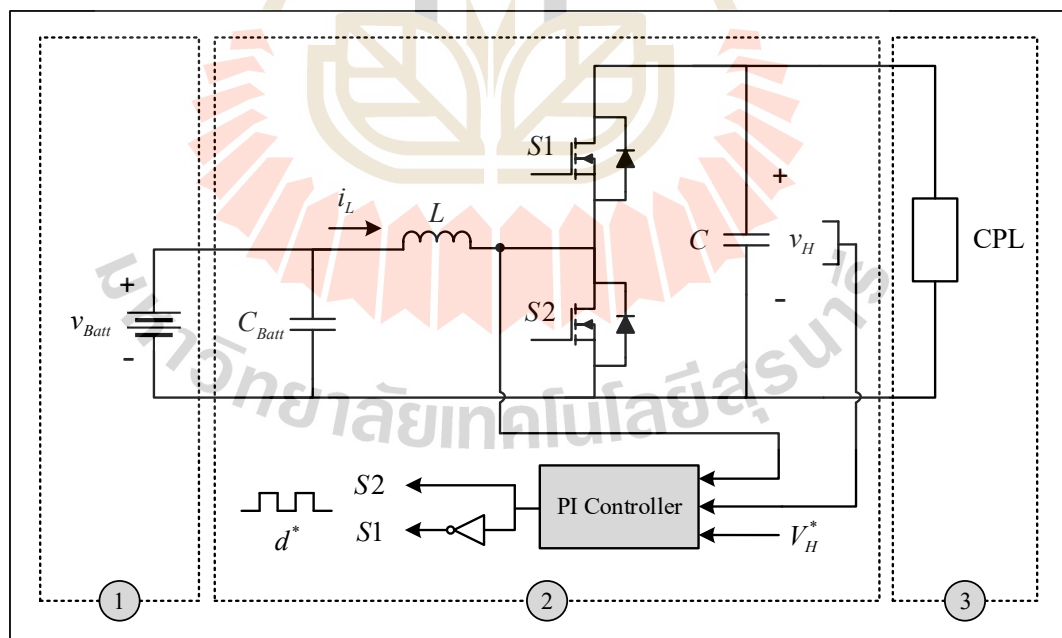
3.3 ระบบทางไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของระบบไฟฟ้าภายในยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ ซึ่งประกอบด้วยหลายส่วนแสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 องค์ประกอบภายในยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่

จากรูปที่ 3.6 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะถูกเน้นไว้ในกรอบเส้นประ ซึ่งจำกัดขอบเขตไว้ที่ 3 ส่วนหลักสามารถพิจารณาจรรยาบรรณสมมูลได้ดังรูปที่ 3.7



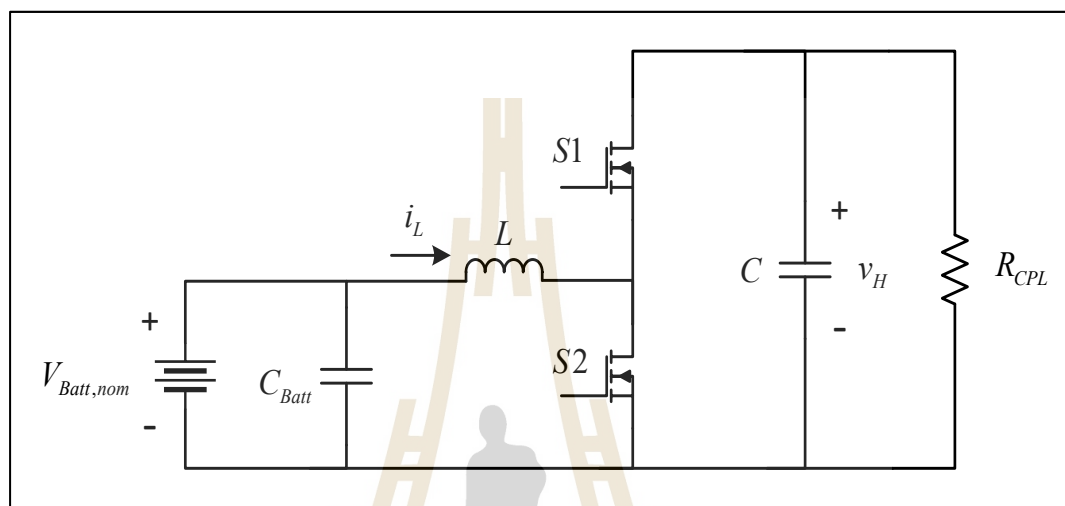
รูปที่ 3.7 ระบบทางไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่พิจารณา

พิจารณาในรูปที่ 3.7 แสดงวงจรสมมูลของระบบทางไฟฟ้าที่พิจารณา ซึ่งมีพิกัดระบบขับเคลื่อนอยู่ที่ 380 kW ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนที่หนึ่ง คือ ชุดแบตเตอรี่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลักของระบบ มีพิกัดแรงดันอยู่ที่ 569 V และความจุ 155 Ah ส่วนที่สอง คือ วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ดีซีบัสแรงดันสูงให้คงที่ วงจรแปลงผันดังกล่าวเลือกใช้โครงสร้างแบบบัค-บูสต์มีลักษณะเรียบง่าย ประกอบด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำนวน 2 ตัวที่ทำงานสลับกัน นอกจากนี้ยังมีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุทำหน้าที่กรองกระแสและแรงดันตามลำดับ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางทำงานได้ในสองโหมดหลัก (Zhang et al., 2007; Wang et al., 2022; Nimitti et al., 2023; Tuluhong et al., 2025) ได้แก่ โหมดบูสต์ที่เพิ่มแรงดันจากชุดแบตเตอรี่เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ดีซีบัสแรงดันสูงสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ และโหมดบัคที่แปลงพลังงานสูญเสียขณะห้ามล้อกลับเข้าสู่แบตเตอรี่ ส่วนที่สาม คือ โหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งถูกแทนที่ด้วยบล็อกโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ เนื่องจากโหลดดังกล่าวโดยส่วนใหญ่เป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ ซึ่งมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ทั้งนี้โหลดแรงดันต่ำระดับ 12 V และ 48 V จะไม่ถูกนำมาพิจารณา เนื่องจากมีผลกระทบต่อระบบโดยรวมน้อยกว่าเมื่อเทียบกับโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อให้เข้าใจถึงโหมดการทำงานของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง ซึ่งถือเป็นตัวแปลงกำลังไฟฟ้าหลักในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา รายละเอียดแสดงในหัวข้อถัดไป

3.4 โหมดการทำงานของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางและการออกแบบค่าพารามิเตอร์

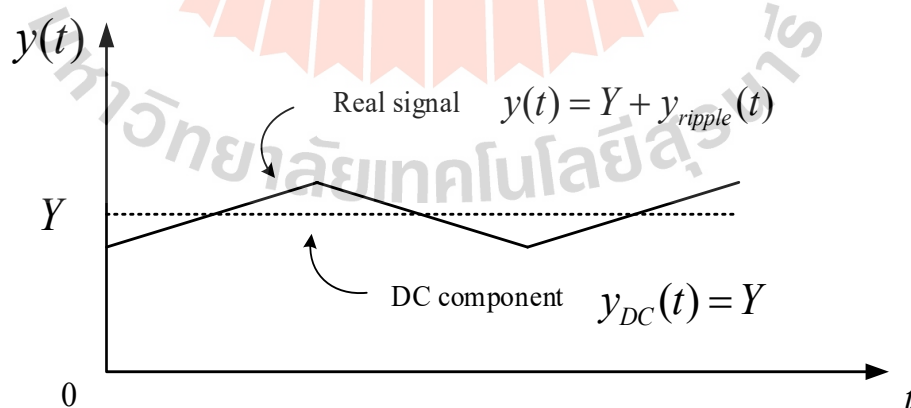
วงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางในรูปที่ 3.7 (ส่วนที่ 2) สามารถแยกการวิเคราะห์ในกรณีที่ยังไม่มีตัวควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งสามารถแบ่งโหมดการทำงานออกเป็นสองช่วง ได้แก่ ช่วงที่สวิตช์ S_1 อยู่ในสถานะ “OFF” S_2 อยู่ในสถานะ “ON” และช่วงที่สวิตช์ S_1 อยู่ในสถานะ “ON” S_2 อยู่ในสถานะ “OFF” ทั้งสองโหมดการทำงานนี้จะถูกนำมาวิเคราะห์โดยอาศัยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (kirchhoff's voltage law, KVL) และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (kirchhoff's current law, KCL) เพื่อหาสมการที่อธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (v_C) ภายในวงจร สมการที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบหาพารามิเตอร์ของวงจรกรอง ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) ให้เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา การออกแบบทำได้โดยการนำสมการอนุพันธ์ของ i_L และ v_C ที่ได้จากการวิเคราะห์วงจรมาหาสมการสำหรับคำนวณค่าการกระเพื่อมของกระแสและ

แรงดัน (Erickson & Maksimović, 2001) ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันจะขึ้นอยู่กับค่ากระแส กระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (Δi_L) และแรงดันกระเพื่อมที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (Δv_C) โดย รายละเอียดสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 3.8 ระบบไฟฟ้าที่ใช้สำหรับออกแบบค่าพารามิเตอร์

จากรูปที่ 3.8 กำหนดให้แหล่งจ่ายเป็นแรงดันไฟฟ้าพิกัดของแบตเตอรี่ ($V_{Batt,nom}$) ส่วนโหลดเป็นตัวต้านทานของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (R_{CPL}) ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์จะใช้แบบจำลองที่พิจารณาในสภาวะคงตัว โดยอาศัยเทคนิคการประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็กดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็ก

พิจารณาในรูปที่ 3.9 เมื่อกำหนดให้สัญญาณใด ๆ $y(t)$ คือผลการตอบสนองของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผัน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-1)

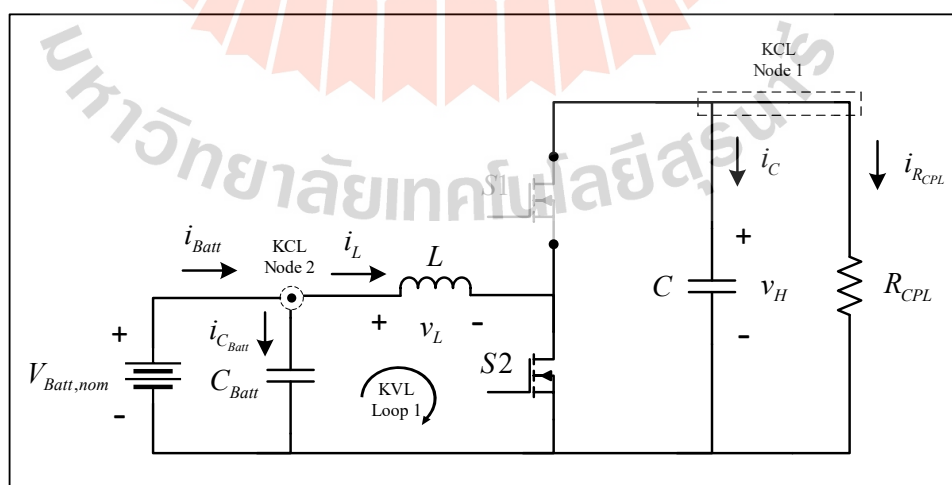
$$y(t) = Y + y_{\text{ripple}}(t) \quad (3-1)$$

จากการประมาณการกระแสเพื่อขนาดเล็กลงของสัญญาณใด ๆ จะได้ว่า $y_{\text{ripple}}(t)$ ซึ่งเป็นสัญญาณกระแสเพื่อของผลตอบสนอง $y(t)$ มีค่าประมาณศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ (3-1) ทำให้ผลตอบสนอง $y(t)$ มีค่าประมาณ Y (เมื่อ Y คือปริมาณกระแสตรงของ $y_{DC}(t)$) ดังสมการประมาณที่ (3-2)

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

จากสมการประมาณที่ (3-2) จะเห็นได้ว่าการใช้เทคนิคการประมาณการกระแสเพื่อขนาดเล็กลงไม่ได้พิจารณาสัญญาณกระแสเพื่อของผลตอบสนอง ซึ่งหมายความว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุถือเป็นค่าคงที่ สำหรับการวิเคราะห์โหมดการทำงานของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.8 จะใช้กฎแรงดันและกฎกระแสของเคอร์ซอพฟ์ตามที่เคยกล่าวไปแล้ว โดยสามารถสรุปการวิเคราะห์ได้ดังนี้

พิจารณาโหมดที่สวิตช์ $S1$ อยู่ในสถานะ “OFF” และ $S2$ อยู่ในสถานะ “ON” วงจรในโหมดนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ระบบไฟฟ้ากรณี $S1$ “OFF” และ $S2$ “ON”

- พิจารณา Loop 1 โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$v_L(t) - V_{Batt,nom} = 0$$

$$v_L(t) = V_{Batt,nom} \quad (3-3)$$

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{Batt,nom}$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_{Batt,nom}}{L} \quad (3-4)$$

- พิจารณา Node 1 โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$-i_C(t) - i_{R_{CPL}}(t) = 0$$

$$i_C(t) = -I_{R_{CPL}} \quad ; \text{การประมาณการกระแสเพื่อขนาดเล็ก} \quad (3-5)$$

$$C \frac{dv_H(t)}{dt} = -\frac{V_H}{R_{CPL}}$$

$$\frac{dv_H(t)}{dt} = -\frac{V_H}{R_{CPL}C} \quad (3-6)$$

- พิจารณา Node 2 โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

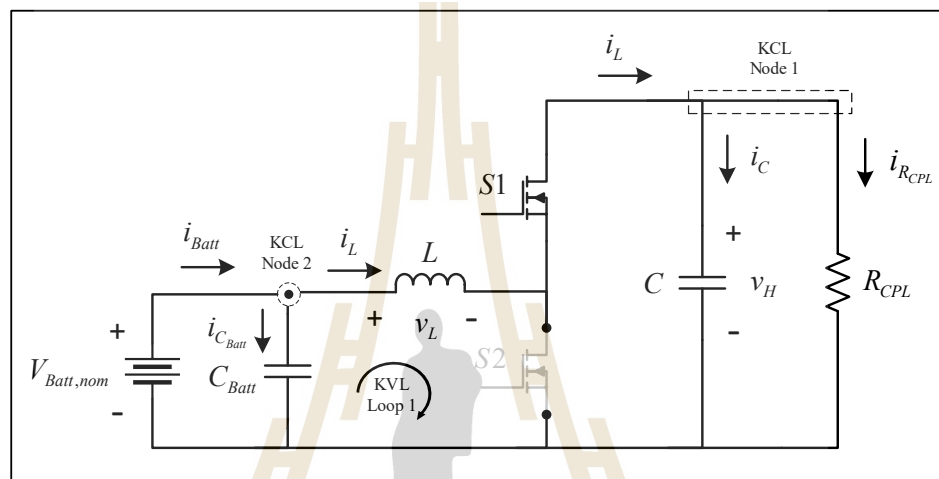
$$i_{Batt}(t) - i_{C_{Batt}}(t) - i_L(t) = 0$$

$$i_{C_{Batt}}(t) = I_{Batt} - I_L \quad ; \text{การประมาณการกระแสเพื่อขนาดเล็ก} \quad (3-7)$$

$$C_{Batt} \frac{dv_{C_{Batt}}(t)}{dt} = I_{Batt} - I_L$$

$$\frac{dv_{C_{Batt}}(t)}{dt} = \frac{I_{Batt} - I_L}{C_{Batt}} \quad (3-8)$$

พิจารณาโหมดที่สวิตช์ $S1$ อยู่ในสถานะ “ON” และ $S2$ อยู่ในสถานะ “OFF” การวิเคราะห์วงจรในโหมดนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ระบบไฟฟ้ากรณี $S1$ “ON” และ $S2$ “OFF”

- พิจารณา Loop 1 โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$v_L(t) + v_H(t) - V_{Batt,nom} = 0$$

$$v_L(t) = V_{Batt,nom} - V_H \quad ; \text{การประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็ก} \quad (3-9)$$

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{Batt,nom} - V_H$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_{Batt,nom} - V_H}{L} \quad (3-10)$$

- พิจารณา Node 1 โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

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

$$i_C(t) = I_L - I_{R_{CPL}} \quad ; \text{การประมาณการกระแสเพื่อขนาดเล็ก} \quad (3-11)$$

$$C \frac{dv_H(t)}{dt} = I_L - \frac{V_H}{R_{CPL}}$$

$$\frac{dv_H(t)}{dt} = \frac{I_L}{C} - \frac{V_H}{R_{CPL}C} \quad (3-12)$$

- พิจารณา Node 2 โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$i_{Batt}(t) - i_{C_{Batt}}(t) - i_L(t) = 0$$

$$i_{C_{Batt}}(t) = I_{Batt} - I_L \quad ; \text{การประมาณการกระแสเพื่อขนาดเล็ก} \quad (3-13)$$

$$C_{Batt} \frac{dv_{C_{Batt}}(t)}{dt} = I_{Batt} - I_L$$

$$\frac{dv_{C_{Batt}}(t)}{dt} = \frac{I_{Batt} - I_L}{C_{Batt}} \quad (3-14)$$

3.4.1 สมดุลพลังก์เชื่อมโยงในตัวเหนี่ยวนำ

ที่สถานะอยู่ตัวของกระแส $i_L(t)$ สุทธิที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L จะมีค่าเท่ากับศูนย์ในหนึ่งคาบการสวิตช์

จาก $v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$ และเมื่ออินทิเกรตใน 1 คาบการสวิตช์จะได้

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

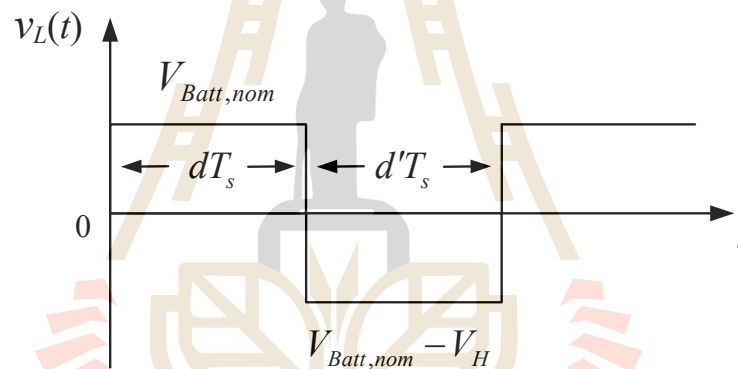
$$0 = \frac{1}{L} \int_0^{T_s} v_L(t) dt$$

ดังนั้น ในสถานะอยู่ตัว ค่าเฉลี่ยของ $v_L(t) = \langle V_L \rangle = 0$ จะได้

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

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

จากสมการที่ (3-3) และ (3-9) ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรสามารถแสดงกราฟโหมดการทำงานของ $v_L(t)$ ได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กราฟโหมดการทำงานของ $v_L(t)$ ของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

จากสมการ $\langle V_L \rangle = 0$ จะได้

$$\frac{V_{Batt,nom}(dT_s) + (V_{Batt,nom} - V_H)(d'T_s)}{T_s} = 0$$

จัดรูปสมการจะได้

$$M(d) = \frac{V_H}{V_{Batt,nom}} = \frac{1}{(1-d)} \quad (3-15)$$

โดยที่ $M(d)$ คือ อัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผัน d คือ วัฏจักรหน้าที่สวิตช์ของวงจรแปลงผัน V_H คือแรงดันไฟฟ้าที่ดิสชาร์จแรงดันสูง

จากสมการที่ (3-15) เมื่อแทนค่า $V_H = 800 \text{ V}$ และ $V_{Batt,nom} = 569 \text{ V}$ จะทำให้สามารถหาค่า วัฏจักรหน้าที่สวิตช์ได้เท่ากับ 0.2888 ค่าดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรกรองในหัวข้อที่ 3.4.3 และ 3.4.4 เป็นลำดับถัดไป

3.4.2 สมดุลประจุในตัวเก็บประจุ

ที่สถานะอยู่ตัวของแรงดัน $v_H(t)$ สุทธิที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C จะมีค่าเท่ากับ ศูนย์ในหนึ่งคาบการสวิตช์

จาก $i_C(t) = C \frac{dv_H(t)}{dt}$ และเมื่ออินทิเกรตใน 1 คาบการสวิตช์จะได้

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

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

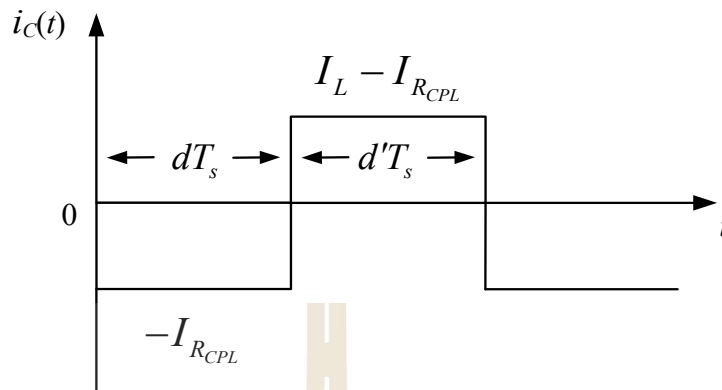
ดังนั้น ในสถานะอยู่ตัว ค่าเฉลี่ยของ $i_C(t) = \langle I_C \rangle = 0$ จะได้

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

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

- 1) เมื่อพิจารณาตัวเก็บประจุทางด้านดิสชาร์จแรงดันสูง

จากสมการที่ (3-5) และ (3-11) ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์โหมดการทำงานของ วงจรสามารถแสดงกราฟโหมดการทำงานของ $i_C(t)$ ได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 กราฟโหมดการทำงานของ $i_C(t)$ ของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

จากสมการ $\langle I_C \rangle = 0$ จะได้

$$\frac{-I_R(dT_s) + (I_L - I_R)(d'T_s)}{T_s} = 0$$

จัดรูปสมการจะได้

$$I_L = \frac{V_H}{R_{CPL}(1-d)}$$

หรือ

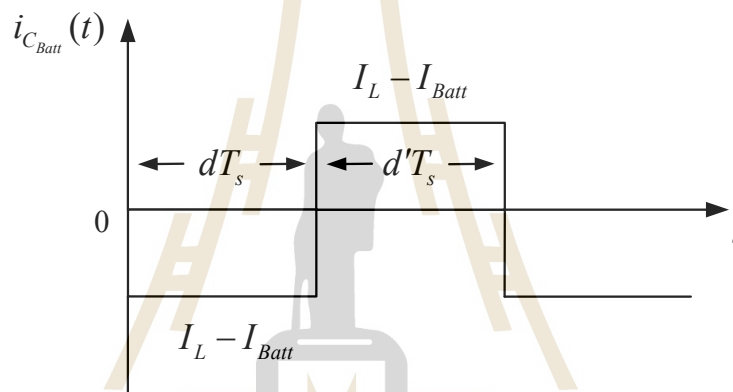
$$I_L = \frac{V_{Batt,nom}}{R_{CPL}(1-d)^2} \quad (3-16)$$

โดยที่ $V_H = \frac{V_{Batt,nom}}{(1-d)}$ I_L คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และ R_{CPL} คือค่าความต้านทานของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (มีค่าเท่ากับ V_H^2 / P_{CPL} เมื่อ P_{CPL} คือค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว สำหรับการคำนวณหาค่า I_L ในสภาวะคงตัวจะกำหนดให้ค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับพิกัดสูงสุดของระบบคือ 380 kW)

จากสมการที่ (3-16) จะทำให้สามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ I_L ในสภาวะคงตัวได้เท่ากับ 668 A ค่ากระแสดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการกำหนดกระแสกระแสเพื่อมของตัวเหนี่ยวนำ Δi_L เพื่อใช้สำหรับออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง ซึ่งรายละเอียดของการออกแบบจะนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.4.3

2) เมื่อพิจารณาตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่

จากสมการที่ (3-7) และ (3-13) ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรสามารถแสดงกราฟโหมดการทำงานของ $i_{C_{Batt}}(t)$ ได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 กราฟโหมดการทำงานของ $i_{C_{Batt}}(t)$ ของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

จากสมการ $\langle i_{C_{Batt}} \rangle = 0$ จะได้

$$\frac{(I_L - I_{Batt})(dT_s) + (I_L - I_{Batt})(d'T_s)}{T_s} = 0$$

จัดรูปสมการจะได้

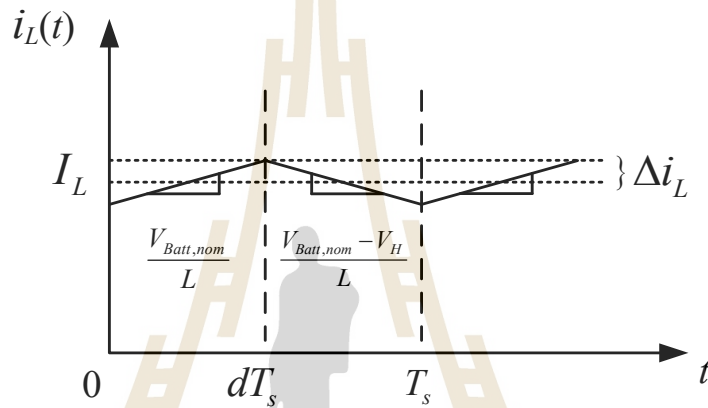
$$I_L = I_{Batt} \quad (3-17)$$

ดังนั้นจาก $I_L = I_{Batt}$ ดังสมการที่ (3-17) จะทำให้สมการอนุพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่จากสมการที่ (3-8) และ (3-14) มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังที่แสดงในสมการที่ (3-18)

$$\frac{dv_{C_{Batt}}(t)}{dt} = \frac{I_{Batt} - I_L}{C_{Batt}} = 0 \quad (3-18)$$

3.4.3 การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ L

จากสมการที่ (3-4) และ (3-10) ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจร สามารถแสดงกราฟ $i_L(t)$ ได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 กราฟ $i_L(t)$ ของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

พิจารณาในช่วง $t=0$ ถึง $t=dT_s$ จะได้

$$m = \tan(\theta) = \frac{2\Delta i_L}{dT_s} = \frac{V_{Batt,nom}}{L}$$

จัดรูปสมการจะได้

$$L = \frac{dT_s V_{Batt,nom}}{2\Delta i_L} \quad (3-19)$$

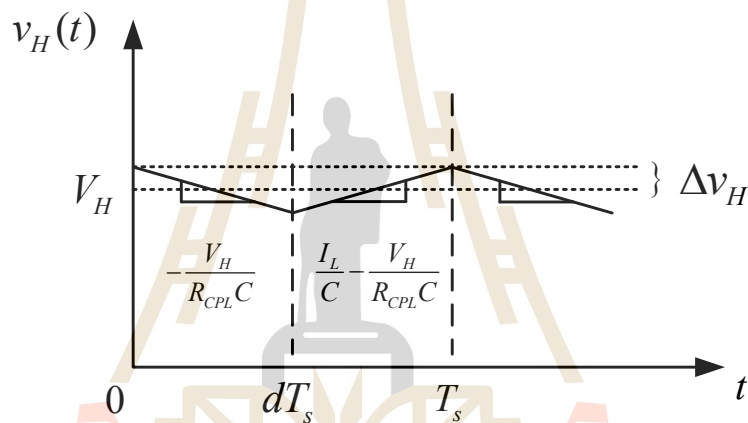
โดยที่ L คือค่าตัวเหนี่ยวนำ และ T_s คือคาบในการสวิตช์ของวงจรแปลงผัน (มีค่าเท่ากับ $1/f_s$ เมื่อ f_s คือความถี่ในการสวิตช์ของวงจรแปลงผัน สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10 kHz)

จากสมการที่ (3-19) กำหนดให้กระแสกระแสเพิ่มของตัวเหนี่ยวนำ Δi_L มีค่าเท่ากับ 0.3566% ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในสภาวะคงตัวที่พิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ (668 A) ทำให้ได้ค่า Δi_L เท่ากับ 2.382 A ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบทำให้ได้ค่าตัวเหนี่ยวนำ L เท่ากับ 3.45 mH

3.4.4 การออกแบบตัวเก็บประจุ C

1) เมื่อพิจารณาตัวเก็บประจุทางด้านดีซีบัสแรงดันสูง

จากสมการที่ (3-6) และ (3-12) ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรสามารถแสดงกราฟ $v_H(t)$ ได้ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 กราฟ $v_H(t)$ ของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

พิจารณาในช่วง $t = 0$ ถึง $t = dT_s$ จะได้

$$m = \tan(\theta) = -\frac{2\Delta v_H}{dT_s} = -\frac{V_H}{R_{CPL}C}$$

จัดรูปสมการจะได้

$$C = \frac{dT_s V_H}{2\Delta v_H R_{CPL}}$$

หรือ

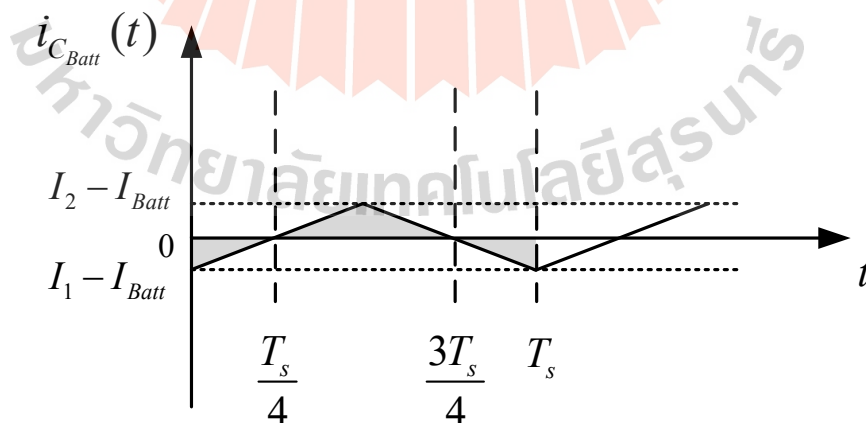
$$C = \frac{dT_s V_{Batt,nom}}{2\Delta v_H R_{CPL}(1-d)} \quad (3-20)$$

โดยที่ C คือค่าตัวเก็บประจุทางด้านดีซีบัสแรงดันสูง

จากสมการที่ (3-20) กำหนดให้แรงดันกระเพื่อมของเก็บประจุ Δv_H มีค่าเท่ากับ 0.375% ของแรงดันไฟฟ้าที่ดีซีบัสแรงดันสูง ($V_H = 800 \text{ V}$) ทำให้ได้ค่า Δv_H เท่ากับ 3 V ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21498-1 และ ISO 21498-2 ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบทำให้ได้ค่าตัวเก็บประจุทางด้านดีซีบัสแรงดันสูง C เท่ากับ 2.287 mF

2) เมื่อพิจารณาตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่

จากการวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางและเมื่อใช้หลักการสมดุลประจุในตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่ พบว่าสมการอนุพันธ์ของ $v_{C_{Batt}}$ จากสมการที่ (3-8) และ (3-14) มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายความว่าไม่สามารถนำกราฟ $v_{C_{Batt}}(t)$ มาใช้หาสมการออกแบบค่าตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่ได้โดยตรง ดังนั้นการออกแบบจึงพิจารณา กราฟของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่ $i_{C_{Batt}}(t)$ ดังแสดงในรูปที่ 3.17 โดยใช้หลักการหาพื้นที่ใต้กราฟในช่วงที่ตัวเก็บประจุมีการชาร์จหรือคายกระแสสูงสุด เนื่องจากที่สภาวะคงตัว ค่าเฉลี่ยของ $i_{C_{Batt}}(t)$ มีค่าเท่ากับศูนย์ รายละเอียดของการออกแบบพารามิเตอร์แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 3.17 กราฟ $i_{C_{Batt}}(t)$ ของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

จากรูปที่ 3.17 แสดงกราฟ $i_{C_{Batt}}(t)$ ของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง โดยที่ I_1 และ I_2 แทนค่ากระแสของตัวเก็บประจุที่มีการคายกระแสและชาร์จกระแสสูงสุดตามลำดับ และเมื่อนำกราฟดังกล่าวมาหาพื้นที่ใต้กราฟจะได้ว่า

$$I_{C_{Batt}} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_{C_{Batt}}(t) dt$$

$$I_{C_{Batt}} = \frac{\frac{1}{2} \times \frac{T_s}{2} \times (I_2 - I_{Batt}) - 2 \times \frac{1}{2} \times \frac{T_s}{4} \times (I_1 - I_{Batt})}{T_s}$$

$$I_{C_{Batt}} = \frac{(I_2 - I_1)}{4} \quad (3-21)$$

ที่สถานะอยู่ตัวกระแสแบตเตอรี่จะมีค่าเท่ากับกระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ($I_{Batt} = I_L$) ดังนั้นผลต่างระหว่างกระแสชาร์จสูงสุดกับกระแสแบตเตอรี่ $I_2 - I_{Batt}$ จึงมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของกระแสกระเพื่อมของตัวเหนี่ยวนำ Δi_L จากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสทั้งหมดจะได้ว่า $I_2 - I_1 = 2\Delta i_L$ เมื่อนำความสัมพันธ์ดังกล่าวไปแทนในสมการ (3-21) จะเป็นไปตามสมการที่ (3-22)

$$I_{C_{Batt}} = \frac{\Delta i_L}{2} \quad (3-22)$$

จาก $I_{C_{Batt}} = C_{Batt} \frac{dv_{C_{Batt}}(t)}{dt}$ และเมื่ออินทิเกรตใน 1 คาบการสวิตช์จะได้

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

พิจารณาในช่วงที่ตัวเก็บประจุมีการชาร์จกระแสสูงสุดตั้งแต่ $T_s/4$ ถึง $3T_s/4$ จะได้

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

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

$$\Delta v_{C_{Batt}} = \frac{T_s \Delta i_L}{4C_{Batt}}$$

ดังนั้น

$$C_{Batt} = \frac{T_s \Delta i_L}{4 \Delta v_{C_{Batt}}} \quad (3-23)$$

โดยที่ C_{Batt} คือค่าตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่

จากสมการที่ (3-23) ในการออกแบบค่าตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่จะอ้างอิงมาตรฐานเดียวกันกับกรณีออกแบบค่าตัวเก็บประจุทางด้านดีซีบัสแรงดันสูง โดยจะมีการกำหนดให้ค่า $\Delta v_{C_{Batt}}$ เท่ากับ 3 V ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบทำให้ได้ C_{Batt} เท่ากับ 19.846 μF

3.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าในประเภทต่าง ๆ โดยมุ่งเน้นไปที่สถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่ใช้งานดีซีบัสแรงดันสูง 800 V ซึ่งมีข้อดีหลายประการตามที่ได้นำเสนอไว้ในรายละเอียด นอกจากนี้ยังได้นำเสนอระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยมีขอบเขตกำหนดไว้อย่างชัดเจน ได้แก่ ชุดแบตเตอรี่ วงจรแปลงผันชนิดบuck-บูสต์แบบสองทิศทางที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ และพิกัดโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ที่พิจารณาเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ในส่วนของการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้อาศัยเทคนิคการประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็กในสภาวะคงตัว เพื่อให้ได้สมการออกแบบที่สามารถใช้กำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา นอกจากนี้ยังได้นำเสนอหลักการของสมดุลฟลักซ์เชื่อมโยงในตัวเหนี่ยวนำและสมดุลประจุในตัวเก็บประจุ ทำให้ได้สมการของอัตราขยายแรงดันและสมการของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในสภาวะคงตัว ที่ขึ้นอยู่กับค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ของวงจรแปลงผัน ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทนี้จะถูกนำไปใช้ในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งรายละเอียดจะนำเสนอในบทถัดไป

บทที่ 4

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่

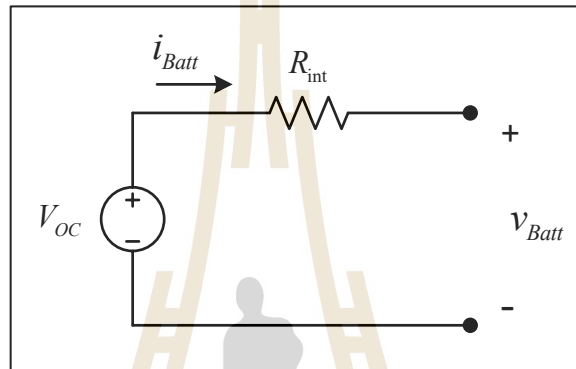
4.1 บทนำ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือที่ช่วยอธิบายพฤติกรรมของระบบภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ ผ่านสมการเชิงอนุพันธ์ทำให้สามารถคาดการณ์ผลตอบสนองของระบบได้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ รวมถึงการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ได้อีกด้วย โดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังมักเปลี่ยนแปลงตามเวลาเนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร ส่งผลให้เกิดความซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบตัวควบคุม จากสาเหตุดังกล่าวงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอแนวทางการพิสูจน์หาแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาโดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปภายใต้การประมาณค่าอันดับศูนย์ วิธีการที่นำเสนอนี้ใช้การแทนตัวแปรสถานะในรูปสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาแนวทางการประมาณแบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่าย เพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายพฤติกรรมแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าได้ถูกต้องยิ่งขึ้น เนื้อหาในบทนี้เป็นองค์ความรู้พื้นฐานสำคัญในการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพเป็นลำดับถัดไป

4.2 แบบจำลองแบตเตอรี่ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า

แบบจำลองแบตเตอรี่มีความสำคัญ เนื่องจากพฤติกรรมของแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการใช้งาน โดยสามารถพิจารณาในรูปของสถานะการชาร์จ (state of charge, *SOC*) ซึ่งจะลดลงเมื่อมีการจ่ายพลังงานให้แก่โหลด การเปลี่ยนแปลงของพลังงานแบตเตอรี่อาจส่งผลต่อพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบที่อาจกระทบต่อเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากระบบควบคุมจำเป็นต้องปรับการทำงานเพื่อรักษาระดับแรงดันที่ตีสับสแรงดันสูง 800 V ให้คงที่ หากระบบควบคุมไม่สามารถควบคุมผลตอบสนองของแรงดันดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม อาจทำให้เกิดการสั่นไหว (oscillation) และนำไปสู่การขาดเสถียรภาพของระบบได้ ทั้งนี้การใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบคงที่ไม่สามารถสะท้อนผลกระทบของแบตเตอรี่ที่เกิดจาก *SOC* ได้ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการประมาณแบบจำลองของแบตเตอรี่อย่างง่ายในการวิเคราะห์พฤติกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่และสะท้อนสภาวะการทำงานของแบตเตอรี่ โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้

แบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่าย (simplified battery model) (Susanna et al., 2019; Yang et al., 2020; Thakkar, 2022) แสดงในรูปที่ 4.1 การประมาณแบบจำลองแบตเตอรี่อาศัยการประมาณค่าทางคณิตศาสตร์ผ่านวิธีการปรับเส้นโค้ง (curve fitting) ด้วยสมการเชิงเส้น เพื่อให้สามารถระบุค่าตัวแปรของแบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่ายผ่านการเปรียบเทียบจากผลการจำลองสถานการณ์



รูปที่ 4.1 แบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่าย

จากรูปที่ 4.1 แรงดันแบตเตอรี่ (v_{Batt}) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4-1)

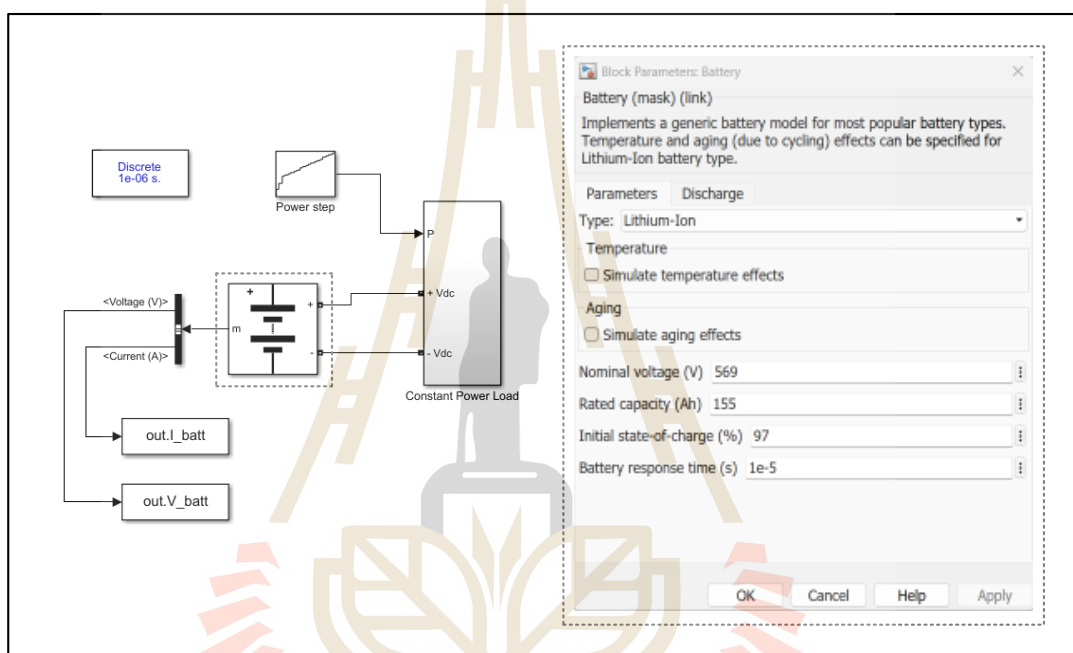
$$v_{Batt} = V_{OC} - i_{Batt} R_{int} \quad (4-1)$$

โดยที่ v_{Batt} คือ แรงดันแบตเตอรี่ (V)
 V_{OC} คือ แรงดันเปิดวงจรของแบตเตอรี่ (V)
 i_{Batt} คือ กระแสแบตเตอรี่ (A)
 R_{int} คือ ความต้านทานภายในแบตเตอรี่ (Ω)

จากสมการที่ (4-1) โดยทั่วไปเมื่อ SOC สูงขึ้น จะทำให้ค่า V_{OC} สูงและ R_{int} ต่ำ ในทางตรงกันข้าม หาก SOC ต่ำลง จะทำให้ค่า V_{OC} ต่ำและ R_{int} สูง สำหรับในหัวข้อนี้ค่า V_{OC} และ R_{int} ถูกกำหนดจากการเปรียบเทียบสมการเชิงเส้นที่ได้จากกระบวนการปรับเส้นโค้ง โดยอาศัยการจำลองสถานการณ์การคายประจุของแบตเตอรี่ ทั้งนี้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะถูกจำกัดขอบเขตของค่า SOC อยู่ในช่วง 14% ถึง 97% เท่านั้น เนื่องจากพฤติกรรมของแบตเตอรี่นอกเหนือจากช่วงดังกล่าวมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง อาจส่งผลให้แบบจำลองมีความคลาดเคลื่อน สำหรับการประมาณ

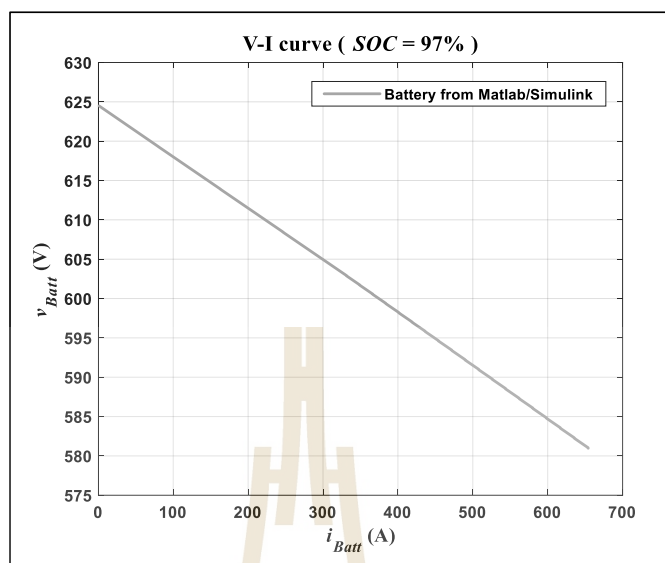
แบบจำลองแบตเตอรี่จะยกตัวอย่างกรณีที่ SOC เท่ากับ 97% เพื่อความสอดคล้องกับการนำไปใช้งานจริงในช่วงที่แบตเตอรี่มีพลังงานสูง ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่ายแสดงได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : สร้างกราฟความสัมพันธ์เส้นโค้งแรงดัน-กระแส (V-I curve) ของแบตเตอรี่ โดยจำลองสถานการณ์ให้แบตเตอรี่จ่ายพลังงานไปยังโหลดด้วยการเชื่อมต่อบล็อกแบตเตอรี่กับบล็อกโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าจนถึงพิกัด 380 kW ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ที่ใช้และการต่อบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB/Simulink แสดงไว้ในรูปที่ 4.2



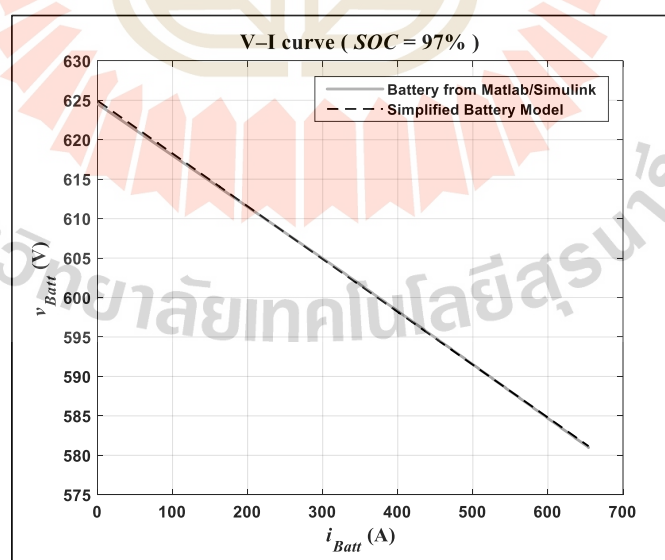
รูปที่ 4.2 การต่อบล็อกไฟฟ้ากำลังเพื่อใช้สร้างเส้นโค้งแรงดัน-กระแสของแบตเตอรี่
ใน MATLAB/Simulink

พิจารณาในรูปที่ 4.2 ค่ากระแสและแรงดันของแบตเตอรี่จะถูกส่งออกไปยัง Workspace บนโปรแกรม MATLAB จากนั้นนำค่าดังกล่าวมาสร้างกราฟความสัมพันธ์เส้นโค้งแรงดัน-กระแสของแบตเตอรี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟเส้นโค้งแรงดัน-กระแสของแบตเตอรี่จากการจำลองสถานการณ์ใน MATLAB/Simulink

ขั้นตอนที่ 2: เมื่อได้กราฟความสัมพันธ์เส้นโค้งแรงดัน-กระแสของแบตเตอรี่ตามที่แสดงในรูปที่ 4.3ให้นำกราฟดังกล่าวมาปรับเส้นโค้งด้วยสมการเชิงเส้น เพื่อสร้างแบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่ายที่สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของแบตเตอรี่เมื่อ SOC เท่ากับ 97% ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟเส้นโค้งแรงดัน-กระแสที่ได้จากการปรับเส้นโค้งด้วยสมการเชิงเส้น

พิจารณาในรูปที่ 4.4 เส้นประแสดงกราฟเส้นโค้งแรงดัน-กระแสของแบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่ายที่ได้จากการปรับเส้นโค้งด้วยสมการเชิงเส้น โดยมีความชัน -0.0669 และจุดตัดแกนตั้งที่ 624.947 ซึ่งสมการเชิงเส้นดังกล่าวแสดงไว้ในสมการที่ (4-2)

$$y = -0.0669x + 624.947 \quad (4-2)$$

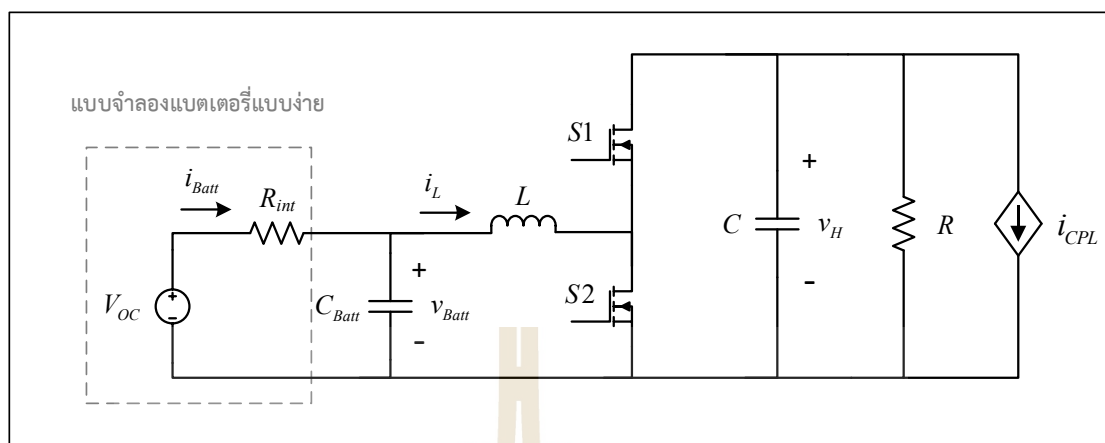
ขั้นตอนที่ 3: เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างสมการที่ (4-1) และ (4-2) ทำให้ได้ค่าของ V_{OC} เท่ากับ 624.947 V และ R_{int} เท่ากับ 0.0669 Ω สำหรับกรณีที่ SOC มีค่าเท่ากับ 97%

จากการประมาณแบบจำลองแบตเตอรี่โดยอาศัยวิธีการปรับเส้นโค้งด้วยสมการเชิงเส้นทำให้ได้ค่า V_{OC} และ R_{int} ซึ่งจะถูกใช้เป็นค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่ายตามรูปที่ 4.1 ที่ขึ้นอยู่กับค่า SOC ที่พิจารณา นอกจากนี้ยังได้มีการพิจารณากรณี SOC เท่ากับ 60% เพิ่มเติม โดยใช้กระบวนการปรับเส้นโค้งเพื่อหาค่า V_{OC} และ R_{int} เช่นเดียวกับกรณี SOC เท่ากับ 97% ทำให้ได้ค่า V_{OC} เท่ากับ 614.4 V และ R_{int} เท่ากับ 0.082 Ω สำหรับกรณีที่ SOC มีค่าเท่ากับ 60% สมการแบบจำลองแบตเตอรี่ดังกล่าวจะถูกนำไปรวมเข้ากับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้า โดยจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

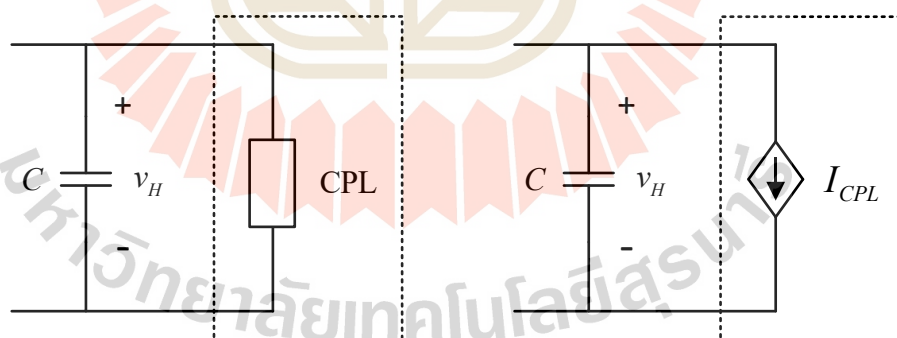
4.3.1 ระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติที่ไม่มีตัวควบคุม

สำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติที่ไม่มีตัวควบคุม ถูกนำมาใช้เพื่อการวิเคราะห์และพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าในหัวข้อนี้ แสดงดังรูปที่ 4.5 โดยแหล่งจ่ายพิจารณาเป็นแบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่ายที่ได้จากหัวข้อที่ 4.2 ขณะที่ตัวควบคุมฟีดแบ็คแบบเรียงกันจะยังไม่ถูกนำมาพิจารณา แบบจำลองในหัวข้อนี้ถือเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการนำไปต่อยอดเพื่อวิเคราะห์ระบบในกรณีมีตัวควบคุมเป็นลำดับถัดไป



รูปที่ 4.5 ระบบไฟฟ้าสำหรับพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่ไม่มีความควบคุม

จากรูปที่ 4.5 โหลดตัวต้านทาน R ทำหน้าที่แทนโหลดทั่วไปของยานยนต์ไฟฟ้า สำหรับโหลดระบบขับเคลื่อนจะอาศัยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสามารถสะท้อนพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดทำงาน ดังนั้นการใช้แบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจึงมีความจำเป็น โดยโหลดดังกล่าวถูกแทนที่ด้วยแหล่งจ่ายกระแสไม่อิสระ (dependent current source) (Rivetta et al., 2006; Solsona et al., 2015) ดังแสดงในรูปที่ 4.6



(ก) บล็อกโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

(ข) โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ใช้แหล่งจ่ายกระแสไม่อิสระ

รูปที่ 4.6 โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

สมการกระแสของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4-3)

$$i_{CPL} = \frac{P_{CPL}}{v_H} \quad (4-3)$$

โดยที่ P_{CPL} คือ กำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และ v_H คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตีซีบัสแรงดันสูง

พิจารณาระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.5 หากทำการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะได้แบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เนื่องจากผลกระทบจากการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรแปลงผัน ส่งผลให้การวิเคราะห์เสถียรภาพมีความซับซ้อน เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยมีวัตถุประสงค์กำจัดตัวแปรที่ขึ้นกับเวลา รายละเอียดของวิธีการดังกล่าวแสดงได้ดังนี้

4.3.2 ทฤษฎีพื้นฐานวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Sanders et al., 1991; Mahdavi et al., 1997; Emadi, 2004; Wang et al., 2019; Azer & Emadi, 2020) เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี วิธีดังกล่าวจะใช้สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

โดยทั่วไปสัญญาณ $f(t)$ ใด ๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ ซึ่งมีคาบของสัญญาณเป็น T สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (Gamelin, 2000) ได้ดังสมการที่ (4-4)

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_k e^{jk\omega t} \quad (4-4)$$

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

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป จะใช้ $\langle x \rangle_k(t)$ ของสัญญาณแทนตัวแปรสถานะของระบบซึ่งสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนสามารถหาได้จากสมการที่ (4-5)

$$\langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_{1-T}^t f(t) e^{-jk\omega t} dt \quad (4-5)$$

คุณสมบัติที่จำเป็นของการหาสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน $\langle x \rangle_k(t)$ โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป มีรายละเอียดดังนี้ (กองพัน อารีรักษ์, 2564)

- คุณสมบัติของอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลา แสดงได้ดังสมการที่ (4-6)

$$\frac{d}{dt} \langle x \rangle_k = \left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_k - jk\omega \langle x \rangle_k \quad (4-6)$$

- คุณสมบัติของความสัมพันธ์ของการคูณ แสดงได้ดังสมการที่ (4-7)

$$\langle xy \rangle_k = \sum_i \langle x \rangle_{k-i} \langle y \rangle_i \quad (4-7)$$

- คุณสมบัติของการสมมาตรเชิงซ้อน สำหรับฟังก์ชันค่าจริง $f(t)$ แสดงได้ดังสมการที่ (4-8)

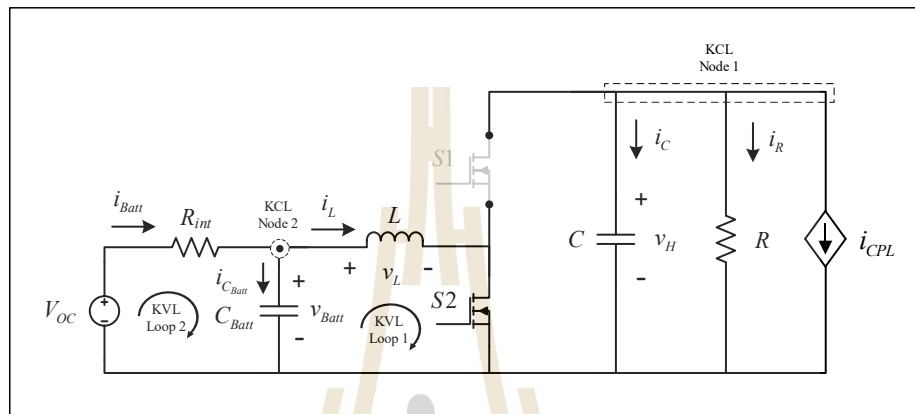
$$\langle x \rangle_{-k} = \overline{\langle x \rangle_k} = \langle x \rangle_k^* \quad (4-8)$$

การพิจารณาแบบจำลองของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเน้นองค์ประกอบค่าเฉลี่ยไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นฮาร์โมนิกที่มีอันดับสูงกว่าศูนย์จะไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากไม่มีผลกระทบต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ (Pakdeeto et al., 2018; Pakdeeto et al., 2021) แนวทางที่ใช้ในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ คือ การใช้การประมาณค่าอันดับศูนย์ (zero-order approximation) ของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน โดยเลือกพิจารณาเฉพาะสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบที่ความถี่มูลฐาน ทั้งนี้สามารถดำเนินการได้โดยกำหนดค่า k ในอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนให้เท่ากับศูนย์ ส่งผลให้แบบจำลองที่ได้จะไม่มีองค์ประกอบที่ความถี่สูง

4.3.3 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าในกรณีที่ยังไม่มีตัวควบคุมจะเริ่มจากวิเคราะห์วงจรในรูปที่ 4.5 โดยอาศัยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์และกฎกระแสของ

เคอร์ซอพฟ์ สำหรับการวิเคราะห์ห้วงจรในโหมดที่ 1 และโหมดที่ 2 กำหนดให้ตัวแปรสถานะของระบบ คือ $\mathbf{X} = [i_L \ v_H \ v_{Batt}]^T$ สำหรับการวิเคราะห์ห้วงจรในโหมดที่ 1 สวิตช์ $S1$ “OFF” และ $S2$ “ON” สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ระบบไฟฟ้ากรณีที่ไม่มีความควบคุม เมื่อสวิตช์ $S1$ “OFF” และ $S2$ “ON”

- พิจารณา Loop 1 โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ซอพฟ์จะได้

$$v_L - v_{Batt} = 0$$

$$\dot{i}_L = \frac{1}{L} v_{Batt}$$

(4-9)

- พิจารณา Loop 2 โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ซอพฟ์จะได้

$$v_{Batt} = V_{OC} - i_{Batt} R_{int}$$

(4-10)

- พิจารณา Node 1 โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ซอพฟ์จะได้

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

$$\dot{v}_H = -\frac{1}{RC} v_H - \frac{P_{CPL}}{v_H C}$$

(4-11)

- พิจารณา Node 2 โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$i_{Batt} - i_{C_{Batt}} - i_L = 0$$

$$\dot{v}_{Batt} = \frac{i_{Batt}}{C_{Batt}} - \frac{i_L}{C_{Batt}}$$

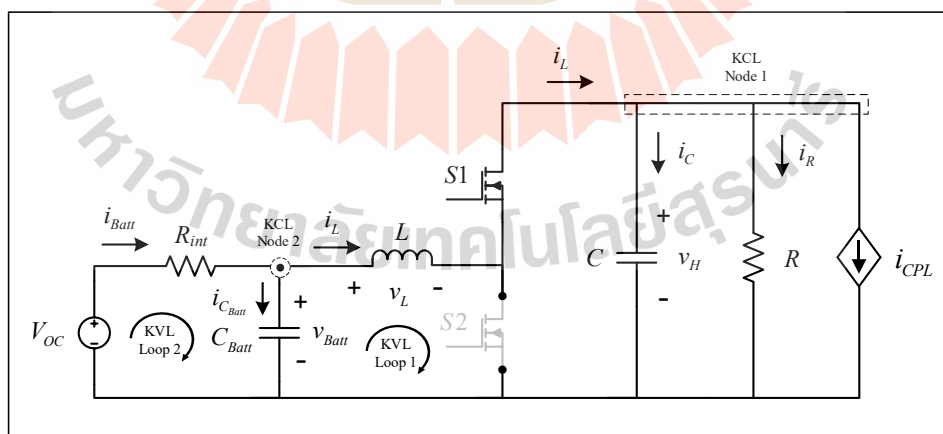
และจากสมการที่ (4-10) เมื่อจัดรูปในเทอมของกระแสแบตเตอรี่จะได้

$$i_{Batt} = \frac{V_{OC} - v_{Batt}}{R_{int}}$$

ดังนั้น

$$\dot{v}_{Batt} = \left(\frac{V_{OC} - v_{Batt}}{R_{int} C_{Batt}} \right) - \frac{1}{C_{Batt}} i_L \quad (4-12)$$

จากสมการที่ (4-9) ถึง (4-12) เป็นสมการอนุพันธ์ของ i_L , v_H และ v_{Batt} ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์วงจรในรูปที่ 4.7 ในโหมดที่ 1 เมื่อสวิตช์ $S1$ “OFF” และ $S2$ “ON” ในลำดับถัดไปจะเป็นการวิเคราะห์วงจรในโหมดที่ 2 สวิตช์ $S1$ “ON” และ $S2$ “OFF” สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ระบบไฟฟ้าการันตีที่ไม่มีตัวควบคุม เมื่อสวิตช์ $S1$ “ON” และ $S2$ “OFF”

- พิจารณา Loop 1 โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$v_L + v_H - v_{Batt} = 0$$

$$\dot{i}_L = \frac{1}{L} v_{Batt} - \frac{1}{L} v_H \quad (4-13)$$

- พิจารณา Loop 2 โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$v_{Batt} = V_{OC} - i_{Batt} R_{int} \quad (4-14)$$

- พิจารณา Node 1 โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

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

$$\dot{v}_H = \frac{1}{C} i_L - \frac{1}{RC} v_H - \frac{P_{CPL}}{v_H C} \quad (4-15)$$

- พิจารณา Node 2 โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$i_{Batt} - i_{C_{Batt}} - i_L = 0$$

$$\dot{v}_{Batt} = \frac{i_{Batt}}{C_{Batt}} - \frac{i_L}{C_{Batt}}$$

และจากสมการที่ (4-14) เมื่อจัดรูปในเทอมของกระแสแบตเตอรี่จะได้

$$\dot{v}_{Batt} = \left(\frac{V_{OC} - v_{Batt}}{R_{int} C_{Batt}} \right) - \frac{1}{C_{Batt}} i_L \quad (4-16)$$

จากสมการที่ (4-13) ถึง (4-16) เป็นสมการอนุพันธ์ของ i_L , v_H และ v_{Batt} ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์วงจรในรูปที่ 4.8 ในโหมดที่ 2 เมื่อสวิตช์ $S1$ “ON” และ $S2$ “OFF” จากนั้นนำสมการอนุพันธ์ของแต่ละโหนดมาเขียนรวมกันโดยใช้ฟังก์ชันตรวจสอบ h_i กำหนดให้เป็นดังนี้

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

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

จะได้สมการอนุพันธ์ของ i_L , v_H และ v_{Batt} ที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันตรวจสอบดังสมการที่ (4-17) ถึง (4-19)

$$\dot{i}_L = \left(\frac{1}{L} v_{Batt} \right) \cdot h_1 + \left(-\frac{1}{L} v_H + \frac{1}{L} v_{Batt} \right) \cdot h_2 \quad (4-17)$$

$$\dot{v}_H = \left(-\frac{1}{RC} v_H - \frac{P_{CPL}}{v_H C} \right) \cdot h_1 + \left(\frac{1}{C} i_L - \frac{1}{RC} v_H - \frac{P_{CPL}}{v_H C} \right) \cdot h_2 \quad (4-18)$$

$$\dot{v}_{Batt} = \left[\left(\frac{V_{OC} - v_{Batt}}{R_{int} C_{Batt}} \right) - \frac{1}{C_{Batt}} i_L \right] \cdot h_1 + \left[\left(\frac{V_{OC} - v_{Batt}}{R_{int} C_{Batt}} \right) - \frac{1}{C_{Batt}} i_L \right] \cdot h_2 \quad (4-19)$$

จากสมการที่ (4-17) ถึง (4-19) สามารถเขียนแทนด้วยฟังก์ชันการสวิตช์ u เพื่อให้ได้แบบจำลองในรูปแบบเชิงเส้นคู่โดยกำหนดให้ $h_1 = u$ และ $h_2 = 1 - h_1 = 1 - u$ เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้แบบจำลองสวิตช์ดังสมการที่ (4-20)

$$\begin{cases} \dot{i}_L = \frac{1}{L} v_{Batt} - \frac{1}{L} (1-u) \cdot v_H \\ \dot{v}_H = \frac{1}{C} (1-u) \cdot i_L - \frac{1}{RC} v_H - \frac{P_{CPL}}{v_H C} \\ \dot{v}_{Batt} = \left(\frac{V_{OC} - v_{Batt}}{R_{int} C_{Batt}} \right) - \frac{1}{C_{Batt}} i_L \end{cases} \quad (4-20)$$

จากสมการที่ (4-20) เป็นแบบจำลองสวิตช์ของระบบที่พิจารณากรณีที่ยังไม่มีตัวควบคุม ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปภายใต้การประมาณค่าอันดับศูนย์ ขั้นตอนการพิสูจน์แสดงได้ดังนี้

พิจารณาอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนในสมการที่ (4-4) โดยใช้การประมาณค่าอันดับศูนย์ กำหนดให้ค่า $k=0$ ดังนั้น ค่า i_L , v_H และ v_{Batt} สามารถกระจายเทอมของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนได้ดังสมการที่ (4-21) ถึง (4-23) ดังนี้

$$i_L = \langle i_L \rangle_0 \quad (4-21)$$

$$v_H = \langle v_H \rangle_0 \quad (4-22)$$

$$v_{Batt} = \langle v_{Batt} \rangle_0 \quad (4-23)$$

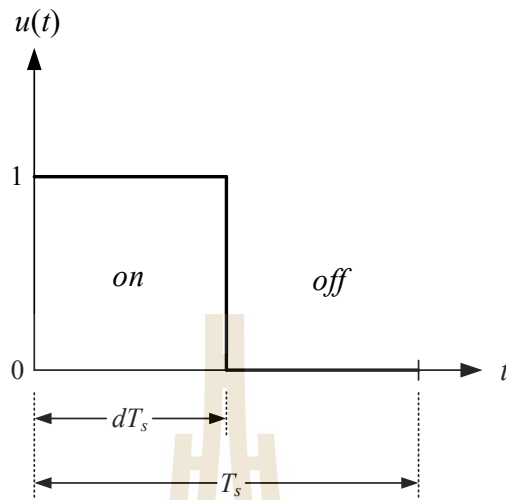
ตามหลักการของวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสามารถกำหนดให้ $\langle i_L \rangle_0$, $\langle v_H \rangle_0$ และ $\langle v_{Batt} \rangle_0$ เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง ดังนั้นตัวแปรสถานะของแบบจำลองดังกล่าวสามารถกำหนดได้ดังสมการที่ (4-24) ถึง (4-26) ดังนี้

$$\langle i_L \rangle_0 = x_1 \quad (4-24)$$

$$\langle v_H \rangle_0 = x_2 \quad (4-25)$$

$$\langle v_{Batt} \rangle_0 = x_3 \quad (4-26)$$

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันการสวิตช์ในวงจรแปลงผันชนิดบuck-บูสต์แบบสองทิศทาง ลักษณะการทำงานในโหมดการนำกระแสและหยุดนำกระแสในหนึ่งคาบการสวิตช์ T_s แสดงได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

จากรูปที่ 4.9 สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง แสดงดังสมการที่ (4-27)

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (4-27)$$

เมื่อพิจารณาช่วงเวลานำกระแส t_{on} คำนวณได้ดังสมการที่ (4-28)

$$t_{on} = dT_s \quad (4-28)$$

ดำเนินการพิจารณาหาสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนของฟังก์ชันการสวิตช์ โดยอาศัยสมการที่ (4-5) เมื่อกำหนดให้ค่า $k=0$ จะได้ดังสมการที่ (4-29)

$$\langle u \rangle_0(t) = \frac{1}{T_s} \int_0^{dT_s} u(t) e^{j0t} dt = \frac{dT_s}{T_s} = d \quad (4-29)$$

อาศัยคุณสมบัติของอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจากสมการที่ (4-6) โดยพิจารณาที่ $k=0$ กับแบบจำลองสวิตช์ในสมการที่ (4-20) จะได้ดังสมการที่ (4-30) ถึง (4-32)

$$\langle i_L \rangle_0 = \frac{1}{L} v_{Batt} - \frac{(1 - \langle u \rangle_0(t))}{L} \cdot \langle v_H \rangle_0 \quad (4-30)$$

$$\langle \dot{v}_H \rangle_0 = \frac{(1 - \langle u \rangle_0(t))}{C} \cdot \langle i_L \rangle_0 - \frac{1}{RC} \cdot \langle v_H \rangle_0 - \frac{P_{CPL}}{\langle v_H \rangle_0 C} \quad (4-31)$$

$$\langle \dot{v}_{Batt} \rangle_0 = \left(\frac{V_{OC} - \langle v_{Batt} \rangle_0}{R_{int} C_{Batt}} \right) - \frac{1}{C_{Batt}} \cdot \langle i_L \rangle_0 \quad (4-32)$$

นำตัวแปรสถานะของแบบจำลองค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจากสมการที่ (4-24) ถึง (4-26) แทนลงในสมการที่ (4-30) จะได้

$$\langle i_L \rangle_0 = \frac{1}{L} v_{Batt} - \frac{(1 - \langle u \rangle_0(t))}{L} \cdot \langle v_H \rangle_0$$

$$\dot{x}_1 = \frac{v_{Batt}}{L} - \frac{\langle v_H \rangle_0}{L} + \frac{\langle v_H \cdot u(t) \rangle_0}{L}$$

เมื่อพิจารณาพจน์ $\langle v_H \cdot u(t) \rangle_0$ จะอาศัยคุณสมบัติของความสัมพันธ์ของการคูณจากสมการที่ (4-7) จะได้

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

$$\langle v_H \cdot u(t) \rangle_0 = \sum_i \langle v_H \rangle_{0-i} \langle u \rangle_i(t)$$

$$i = 0 ; \quad \langle v_H \cdot u(t) \rangle_0 = \langle v_H \rangle_0 \langle u \rangle_0(t)$$

ดังนั้น $\langle v_H \cdot u(t) \rangle_0 = \langle v_H \rangle_0 \langle u \rangle_0(t)$ (สำหรับการประมาณค่าอันดับศูนย์) จะได้

$$\dot{x}_1 = \frac{v_{Batt}}{L} - \frac{\langle v_H \rangle_0}{L} + \frac{\langle v_H \rangle_0 \langle u \rangle_0(t)}{L}$$

$$\dot{x}_1 = \frac{x_3}{L} - \frac{x_2}{L} + \frac{x_2 d}{L}$$

$$\dot{x}_1 = -\frac{(1-d)}{L} \cdot x_2 + \frac{1}{L} \cdot x_3$$

นำตัวแปรสถานะของแบบจำลองค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจากสมการที่ (4-24) ถึง (4-26) แทนลงในสมการที่ (4-31) จะได้

$$\langle \dot{v}_H \rangle_0 = \frac{(1 - \langle u \rangle_0(t))}{C} \cdot \langle i_L \rangle_0 - \frac{1}{RC} \cdot \langle v_H \rangle_0 - \frac{P_{CPL}}{\langle v_H \rangle_0 C}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{\langle i_L \rangle_0}{C} - \frac{\langle i_L \cdot u(t) \rangle_0}{C} - \frac{\langle v_H \rangle_0}{RC} - \frac{P_{CPL}}{\langle v_H \rangle_0 C}$$

เมื่อพิจารณาพจน์ $\langle i_L \cdot u(t) \rangle_0$ จะอาศัยคุณสมบัติของความสัมพันธ์ของการคูณจากสมการที่ (4-7) จะได้

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

$$\langle i_L \cdot u(t) \rangle_0 = \sum_i \langle i_L \rangle_{0-i} \langle u \rangle_i(t)$$

$$i = 0 ; \quad \langle i_L \cdot u(t) \rangle_0 = \langle i_L \rangle_0 \langle u \rangle_0(t)$$

ดังนั้น $\langle i_L \cdot u(t) \rangle_0 = \langle i_L \rangle_0 \langle u \rangle_0(t)$ (สำหรับการประมาณค่าอันดับศูนย์) จะได้

$$\dot{x}_2 = \frac{\langle i_L \rangle_0}{C} - \frac{\langle i_L \rangle_0 \langle u \rangle_0(t)}{C} - \frac{\langle v_H \rangle_0}{RC} - \frac{P_{CPL}}{\langle v_H \rangle_0 C}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{x_1}{C} - \frac{x_1 d}{C} - \frac{x_2}{RC} - \frac{P_{CPL}}{x_2 C}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{(1-d)}{C} \cdot x_1 - \frac{1}{RC} \cdot x_2 - \frac{P_{CPL}}{x_2 C}$$

นำตัวแปรสถานะของแบบจำลองค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจากสมการที่ (4-24) ถึง (4-26) แทนลงในสมการที่ (4-32) จะได้

$$\langle \dot{v}_{Batt} \rangle_0 = \left(\frac{V_{OC} - \langle v_{Batt} \rangle_0}{R_{int} C_{Batt}} \right) - \frac{1}{C_{Batt}} \cdot \langle i_L \rangle_0$$

$$\dot{x}_3 = \left(\frac{V_{OC} - x_3}{R_{int} C_{Batt}} \right) - \frac{1}{C_{Batt}} \cdot x_1$$

จากการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปภายใต้การประมาณค่าอันดับศูนย์ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ไม่มีความควบคุมจะได้ดังสมการที่ (4-33) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{(1-d)}{L} \cdot x_2 + \frac{1}{L} \cdot x_3 \\ \dot{x}_2 = \frac{(1-d)}{C} \cdot x_1 - \frac{1}{RC} \cdot x_2 - \frac{P_{CPL}}{x_2 C} \\ \dot{x}_3 = \left(\frac{V_{OC} - x_3}{R_{int} C_{Batt}} \right) - \frac{1}{C_{Batt}} \cdot x_1 \end{cases} \quad (4-33)$$

สมการที่ (4-33) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณากรณีไม่มีความควบคุม ซึ่งได้จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปภายใต้การประมาณค่าอันดับศูนย์ สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองดังกล่าวนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.3.4

4.3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

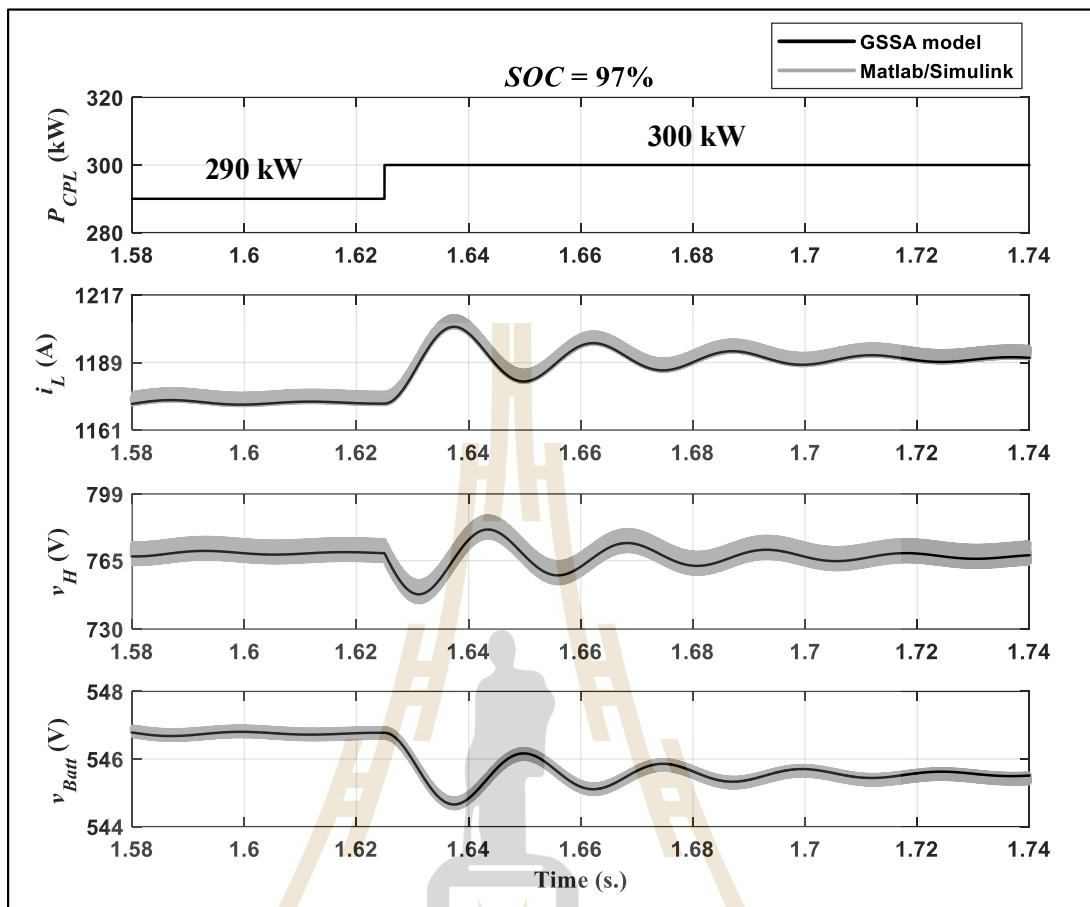
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-33) จำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณากรณีไม่มีความควบคุมในรูปที่ 4.5 ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB รายละเอียดการเชื่อมต่อบล็อกอุปกรณ์ต่าง ๆ และโค้ดที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ แสดงไว้ในภาคผนวก ก.1 และ ข. ตามลำดับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.5

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$V_{Batt,nom}$	569 V	แรงดันไฟฟ้าปกติของแบตเตอรี่
$Q_{Batt,nom}$	155 Ah	ความจุพิกัดของแบตเตอรี่
C_{Batt}	19.846 μ F	ค่าตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่
C	2.287 mF	ค่าตัวเก็บประจุทางด้านดีซีบัสแรงดันสูง
L	3.45 mH	ค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผัน
R	1.684 Ω	ความต้านทานโหลดทั่วไปของยานยนต์ไฟฟ้า
d	0.2888	วัฏจักรหน้าที่สวิตช์ของวงจรแปลงผัน
f_s	10 kHz	ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรแปลงผัน

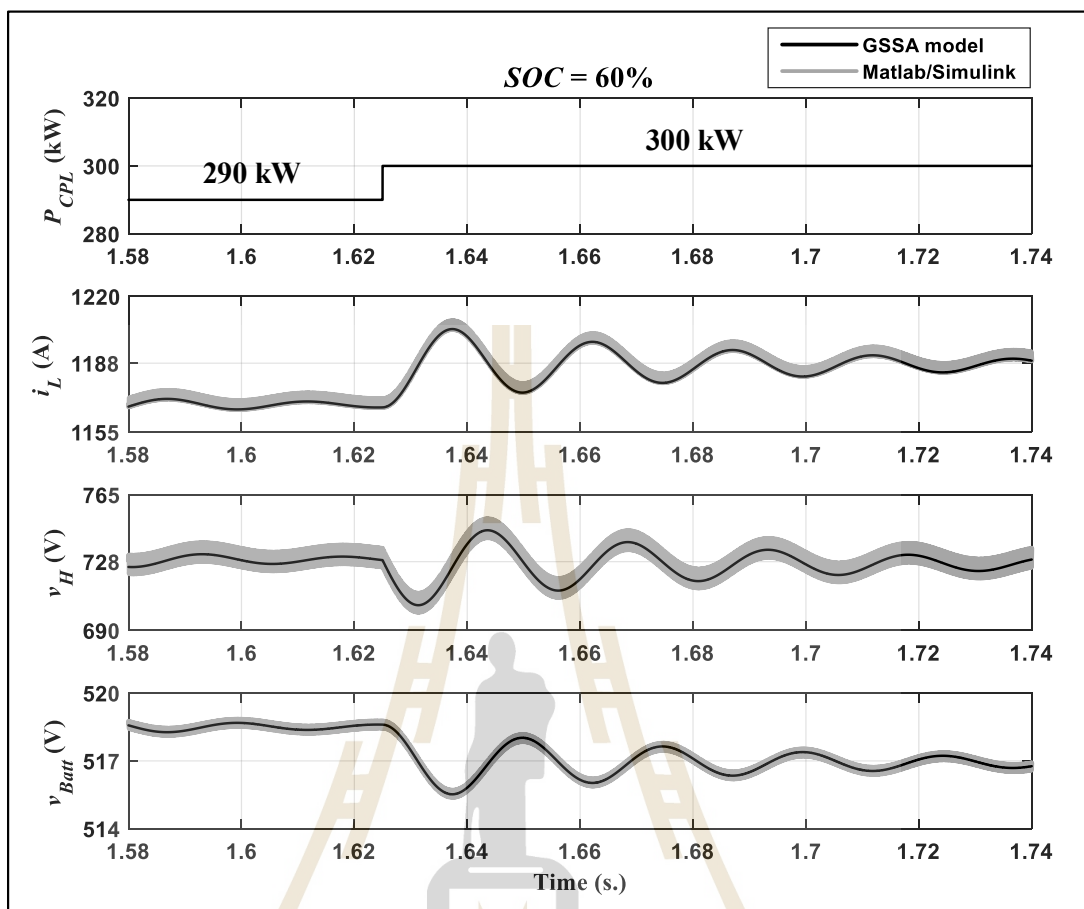
ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะพิจารณาอยู่ทั้งหมด 2 กรณี คือ SOC เท่ากับ 97% และ SOC เท่ากับ 60% เมื่อพิจารณาแบบจำลองแบตเตอรี่ในรูปที่ 4.1 ค่า V_{OC} และ R_{int} ได้มาจากการปรับเส้นโค้งด้วยสมการเชิงเส้นตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2 โดยในแต่ละกรณี ค่า SOC จะถูกใช้กำหนดค่า V_{OC} และ R_{int} ที่แตกต่างกัน การตรวจสอบความถูกต้อง จะทำการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของโหลดจาก 290 kW ไปเป็น 300 kW ที่เวลา 1.625 s. สำหรับวงจรแปลงผันชนิดบuck-บูสต์แบบสองทิศทาง กำหนดให้วัฏจักรหน้าที่สวิตช์มีค่าเท่ากับ 28.88% และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่ไม่มีตัวควบคุม แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

กรณี SOC เท่ากับ 97% ทำให้ได้ค่า V_{OC} เท่ากับ 624.947 V และค่า R_{int} เท่ากับ 0.0669 Ω ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันไฟฟ้าที่ ดีซีบัสแรงดันสูง (v_H) และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่ (v_{Batt}) แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ผลการตอบสนองของระบบไฟฟ้ากรณีที่ไม่มีตัวควบคุม เมื่อค่า $SOC = 97\%$

กรณี SOC เท่ากับ 60% ทำให้ได้ค่า V_{OC} เท่ากับ 614.4 V และค่า R_{int} เท่ากับ 0.082 Ω ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันไฟฟ้าที่ดิสชาร์จแรงดันสูง (v_H) และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่ (v_{Batt}) แสดงดังรูปที่ 4.11



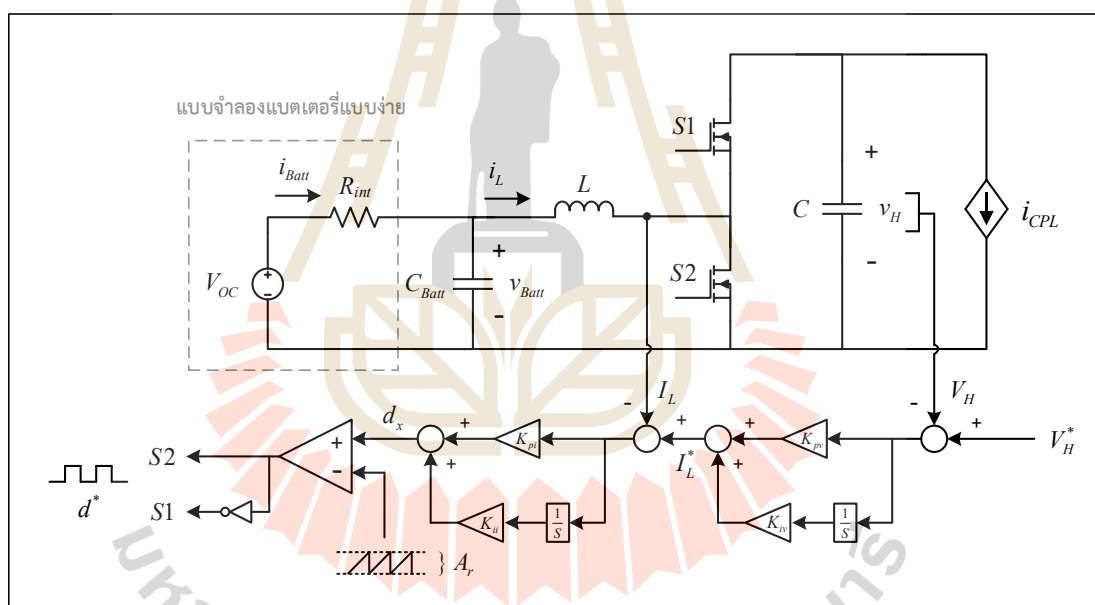
รูปที่ 4.11 ผลการตอบสนองของระบบไฟฟ้ากรณีที่ไม่มีตัวควบคุม เมื่อค่า $SOC = 60\%$

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงผลการตอบสนองของ i_L , v_H และ v_{Batt} กรณีที่สถานะการชาร์จแบตเตอรี่ SOC เท่ากับ 97% และ 60% ตามลำดับ ผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ไม่มีตัวควบคุมมีความสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB ทั้งในสถานะชั่วครู่และในสถานะคงตัว ในหัวข้อถัดไปจะนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติที่มีตัวควบคุมสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเป็นลำดับถัดไป

4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มีตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต

4.4.1 ระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติที่มีตัวควบคุม

สำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มีการควบคุมแสดงดังรูปที่ 4.12 ซึ่งมีองค์ประกอบเช่นเดียวกับระบบในรูปที่ 4.5 แต่มีการเพิ่มตัวควบคุมพีไอต่อแบบเรียงกัน โดยมีสองลูป ได้แก่ ลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า (voltage control loop) และลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า (current control loop) ทั้งนี้ระบบไฟฟ้าที่มีตัวควบคุมจะไม่พิจารณาโหลดตัวต้านทาน (R) เนื่องจากโหลดดังกล่าวไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบ ซึ่งเป็นผลมาจากตัวควบคุมพีไอทำให้พฤติกรรมของระบบแตกต่างจากกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม



รูปที่ 4.12 ระบบไฟฟ้าสำหรับพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีตัวควบคุม

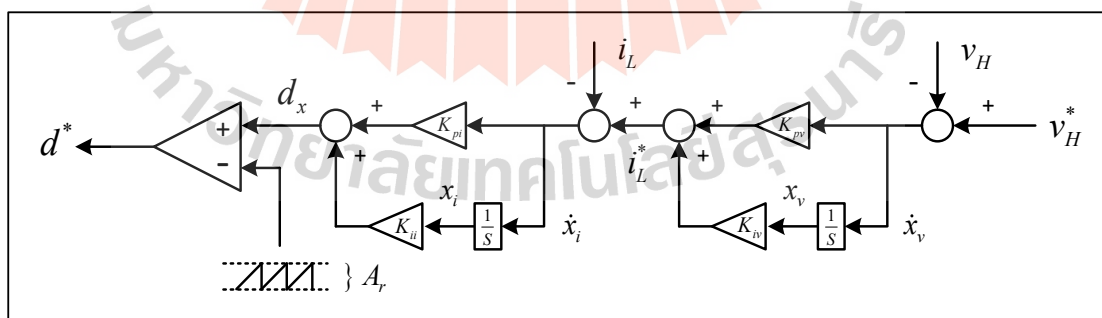
พิจารณาระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.12 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถอาศัยความรู้เกี่ยวกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปภายใต้การประมาณค่าอันดับศูนย์จากหัวข้อ 4.3.3 รายละเอียดการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติที่มีตัวควบคุมนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.4.2

4.4.2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

พื้นฐานวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.3.2 นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมที่อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปภายใต้การประมาณค่าอันดับศูนย์แสดงไว้แล้วดังสมการที่ (4-33) ซึ่งพบว่าพจน์ที่เกี่ยวข้องกับโหลด R ในสมการของตัวแปรสถานะ $\dot{x}_2$ จะหายไป ดังเหตุผลที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ส่งผลให้สมการแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากรณีที่ไม่มีตัวควบคุมสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (4-34)

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{(1-d)}{L} \cdot x_2 + \frac{1}{L} \cdot x_3 \\ \dot{x}_2 = \frac{(1-d)}{C} \cdot x_1 - \frac{P_{CPL}}{x_2 C} \\ \dot{x}_3 = \left(\frac{V_{OC} - x_3}{R_{int} C_{Batt}} \right) - \frac{1}{C_{Batt}} \cdot x_1 \end{cases} \quad (4-34)$$

สมการที่ (4-34) แสดงสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากรณีที่ไม่มีตัวควบคุม ทั้งนี้ระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.12 เป็นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเพิ่มตัวควบคุมพีไอต่อแบบเรียงกัน จึงทำให้มีสมการตัวแปรสถานะเพิ่มเติมสำหรับลู่วควบคุมแรงดันไฟฟ้าและลู่วควบคุมกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีกสองสมการ การพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอที่ต่อแบบเรียงกันดังรูปที่ 4.13 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.13 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอที่ต่อแบบเรียงกัน

จากรูปที่ 4.13 กำหนดให้ x_v และ x_i เป็นตัวแปรสถานะของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุมกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถแสดงสมการ $\dot{x}_v$ และ $\dot{x}_i$ ได้ดังสมการที่ (4-35) และ (4-36)

$$\dot{x}_v = v_H^* - v_H \quad (4-35)$$

$$\dot{x}_i = i_L^* - i_L \quad (4-36)$$

โดยที่ v_H^* คือ แรงดันอ้างอิงของดีซีบัสแรงดันสูง และ i_L^* คือ กระแสอ้างอิงที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

พิจารณาอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าสามารถหา i_L^* ได้ดังสมการที่ (4-37)

$$\begin{aligned} i_L^* &= (v_H^* - v_H) K_{pv} + x_v K_{iv} \\ i_L^* &= K_{pv} v_H^* - K_{pv} v_H + K_{iv} x_v \end{aligned} \quad (4-37)$$

พิจารณาอุปกรณ์ควบคุมกระแสไฟฟ้าสามารถหา d_x ได้ดังสมการที่ (4-38)

$$\begin{aligned} d_x &= (i_L^* - i_L) K_{pi} + x_i K_{ii} \\ d_x &= K_{pi} K_{pv} v_H^* - K_{pi} K_{pv} v_H + K_{pi} K_{iv} x_v - K_{pi} i_L + K_{ii} x_i \end{aligned} \quad (4-38)$$

ดังนั้นสมการของตัวควบคุมพีไอในรูปของ d^* แสดงได้ดังสมการที่ (4-39)

$$d^* = \frac{d_x}{A_r} = \frac{1}{A_r} (K_{pi} K_{pv} v_H^* - K_{pi} K_{pv} v_H + K_{pi} K_{iv} x_v - K_{pi} i_L + K_{ii} x_i) \quad (4-39)$$

โดยที่ K_{pv} และ K_{iv} คือ พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไออุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้า

K_{pi} และ K_{ii} คือ พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไออุปกรณ์ควบคุมกระแสไฟฟ้า

A_r คือ ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยมของตัวควบคุมพีไอ

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณากรณีที่มีตัวควบคุม สามารถดำเนินการได้โดยการแทนค่า d ในสมการที่ (4-34) ด้วย d^* จากสมการที่ (4-39) และเพิ่มสมการของตัวแปรสถานะของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าและลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าเข้าไปในแบบจำลอง จากนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบในรูปที่ 4.12 ที่ได้จากการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปภายใต้การประมาณค่าอันดับศูนย์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4-40) ดังนี้

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{1}{L}x_2 + \frac{K_{pi}K_{pv}}{A_rL}x_2x_2^* - \frac{K_{pi}K_{pv}}{A_rL}x_2^2 \\ &\quad + \frac{K_{pi}K_{iv}}{A_rL}x_vx_2 - \frac{K_{pi}}{A_rL}x_1x_2 + \frac{K_{ii}}{A_rL}x_ix_2 + \frac{1}{L}x_3 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{C}x_1 - \frac{K_{pi}K_{pv}}{A_rC}x_1x_2^* + \frac{K_{pi}K_{pv}}{A_rC}x_1x_2 \\ &\quad - \frac{K_{pi}K_{iv}}{A_rC}x_vx_1 + \frac{K_{pi}}{A_rC}x_1^2 - \frac{K_{ii}}{A_rC}x_ix_1 - \frac{P_{CPL}}{x_2C} \\ \dot{x}_3 &= \frac{V_{OC}}{R_{int}C_{Batt}} - \frac{1}{R_{int}C_{Batt}}x_3 - \frac{1}{C_{Batt}}x_1 \\ \dot{x}_v &= x_2^* - x_2 \\ \dot{x}_i &= -x_1 - K_{pv}x_2 + K_{iv}x_v + K_{pv}x_2^* \end{aligned} \right. \quad (4-40)$$

จากสมการที่ (4-40) พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณากรณีที่มีตัวควบคุมพีไอจะปรากฏพารามิเตอร์ของตัวควบคุม (K_{pi} , K_{ii} , K_{pv} , K_{iv}) ภายในแบบจำลอง นอกจากนี้ยังพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-40) อยู่ในรูปไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากประกอบด้วยพจน์ที่มีการคูณกันของตัวแปรสถานะ สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองเชิงเส้น ดังนั้นรายละเอียดของการทำแบบจำลองให้อยู่ในรูปเชิงเส้นจะนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.4.4

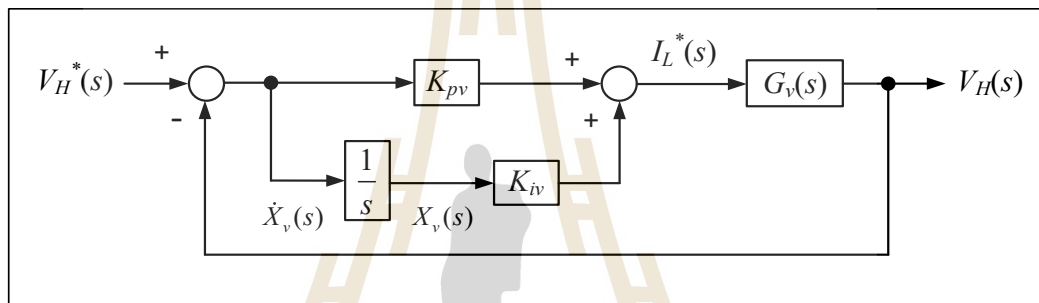
4.4.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่

การออกแบบตัวควบคุมพีไอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยวิธีการแบบดั้งเดิมซึ่งสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการมาตรฐานของระบบอันดับสอง (Beraki et al., 2017) โดยตัวควบคุมที่ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ดักจับแรงดันสูงเป็นลูปนอก (outer loop) และส่วนของตัวควบคุม

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นลูปใน (inner loop) ซึ่งรายละเอียดของการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 2 ส่วนมีดังนี้

1) การออกแบบตัวควบคุมลูปแรงดัน

โครงสร้างลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ดีซีบัสแรงดันสูงของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.14 พลาเน็ตของตัวควบคุม $G_v(s)$ หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $I_L(s)$ กับ $V_H(s)$ โดยโครงสร้างดังกล่าวจะมี $I_L^*(s)$ เป็นสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุม และ $V_H(s)$ เป็นสัญญาณที่ใช้ป้อนกลับ



รูปที่ 4.14 โครงสร้างลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ดีซีบัสแรงดันสูงของระบบยานยนต์ไฟฟ้า

พลาเน็ตของตัวควบคุม $G_v(s)$ สามารถหาได้จากสมการตัวแปรสถานะของแรงดันไฟฟ้าที่ดีซีบัสแรงดันสูงแสดงดังสมการที่ (4-41) จากนั้นทำการการแปลงลาปลาซสมการดังกล่าว จะได้ผลลัพธ์การแปลงลาปลาซแสดงดังสมการที่ (4-42) และเมื่อทำการจัดรูปสมการเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของ $V_H(s)/I_L(s)$ ทำให้สามารถหา $G_v(s)$ ได้ดังสมการที่ (4-43)

$$\dot{V}_H(t) = \frac{1}{C} I_L(t) \quad (4-41)$$

$$sV_H(s) = \frac{1}{C} I_L(s) \quad (4-42)$$

$$G_v(s) = \frac{V_H(s)}{I_L(s)} = \frac{1}{sC} \quad (4-43)$$

ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ดีซีบัสแรงดันสูงได้ดังสมการที่ (4-44) และทำการจัดรูปสมการเป็นสมการที่ (4-45)

$$T_v(s) = \frac{V_H(s)}{V_H^*(s)} = \frac{\left(\frac{K_{pv}s + K_{iv}}{s} \right) \cdot G_v(s)}{1 + \left(\frac{K_{pv}s + K_{iv}}{s} \right) \cdot G_v(s)} \quad (4-44)$$

$$T_v(s) = \frac{\left(\frac{K_{pv}s + K_{iv}}{C} \right)}{s^2 + \left(\frac{K_{pv}}{C} \right)s + \left(\frac{K_{iv}}{C} \right)} \quad (4-45)$$

จากสมการมาตรฐานของระบบอันดับสองแสดงดังสมการที่ (4-46)

$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4-46)$$

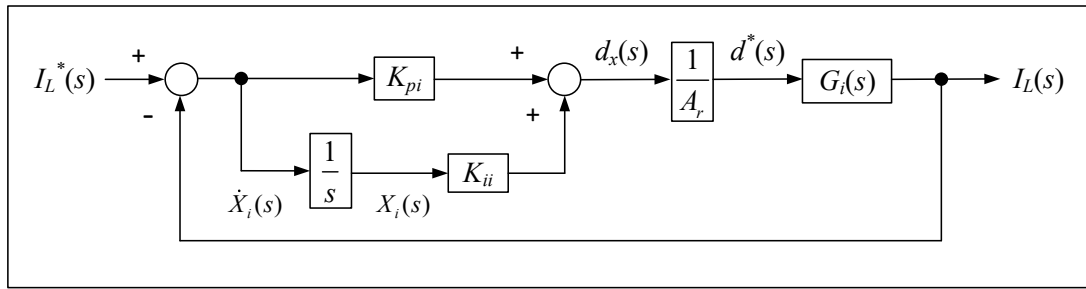
ทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามตัวหารของ $T_v(s)$ ในสมการที่ (4-45) กับสมการมาตรฐานของระบบอันดับสองในสมการที่ (4-46) จะได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ดีซีบัสแรงดันสูงแสดงดังสมการที่ (4-47) และ (4-48) ตามลำดับ

$$K_{pv} = 2\zeta_v\omega_{nv}C \quad (4-47)$$

$$K_{iv} = \omega_{nv}^2 C \quad (4-48)$$

2) การออกแบบตัวควบคุมลูปกระแส

โครงสร้างลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.15 พลาเน็ตของตัวควบคุม $G_i(s)$ หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $I_L(s)$ กับ $d(s)$ โดยโครงสร้างดังกล่าวมี $d_x(s)$ เป็นสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมลูปกระแส จากนั้นจะถูกปรับคูณด้วย $1/A_r$ ได้เป็นค่าวัฏจักรหน้าที่ $d^*(s)$



รูปที่ 4.15 โครงสร้างลูควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของระบบยานยนต์ไฟฟ้า

พลานต์ของตัวควบคุม $G_i(s)$ สามารถหาได้จากสมการตัวแปรสถานะของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงดังสมการที่ (4-49) จากนั้นทำการแปลงลาปลาซสมการดังกล่าว จะได้ผลลัพธ์การแปลงลาปลาซแสดงดังสมการที่ (4-50) และเมื่อทำการจัดรูปสมการเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของ $I_L(s)/d(s)$ โดยพิจารณาให้ $V_H(s)$ เท่ากับศูนย์เสมือนเป็นสัญญาณรบกวน ทำให้สามารถหา $G_i(s)$ ได้ดังสมการที่ (4-51)

$$\dot{I}_L(t) = \frac{d(t)}{L} V_{Batt,nom} - \frac{1}{L} V_H(t) \quad (4-49)$$

$$sI_L(s) = \frac{d(s)}{L} V_{Batt,nom} - \frac{1}{L} V_H(s) \quad (4-50)$$

$$G_i(s) = \frac{I_L(s)}{d(s)} = \frac{V_{Batt,nom}}{sL} \quad (4-51)$$

ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของลูควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้ดังสมการที่ (4-52) และทำการจัดรูปสมการเป็นสมการที่ (4-53)

$$T_i(s) = \frac{I_L(s)}{I_L^*(s)} = \frac{\left(\frac{K_{pi}s + K_{ii}}{s} \right) \cdot \left(\frac{G_i(s)}{A_r} \right)}{1 + \left(\frac{K_{pi}s + K_{ii}}{s} \right) \cdot \left(\frac{G_i(s)}{A_r} \right)} \quad (4-52)$$

$$T_i(s) = \frac{\left(\frac{K_{pi}s + K_{ii}}{A_r L} \right) V_{Batt,nom}}{s^2 + \left(\frac{K_{pi} V_{Batt,nom}}{A_r L} \right) s + \left(\frac{K_{ii} V_{Batt,nom}}{A_r L} \right)} \quad (4-53)$$

ทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามตัวหารของ $T_i(s)$ ในสมการที่ (4-53) กับสมการมาตรฐานของระบบอันดับสองในสมการที่ (4-46) จะได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงได้ดังสมการที่ (4-54) และ (4-55) ตามลำดับ

$$K_{pi} = \frac{2\zeta_i \omega_{ni} A_r L}{V_{Batt,nom}} \quad (4-54)$$

$$K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 A_r L}{V_{Batt,nom}} \quad (4-55)$$

สมการออกแบบตัวควบคุมพีไอของลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้จากการนำสัมประสิทธิ์ของพหุนามตัวหารในฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของแต่ละลูบควบคุมมาเทียบสัมประสิทธิ์กับสมการมาตรฐานของระบบอันดับสอง เมื่อพิจารณาสมการออกแบบตัวควบคุมของลูบแรงดันไฟฟ้า พบว่าสมการที่ได้จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการหน่วงของลูบแรงดันไฟฟ้า (ζ_v) และแบนด์วิดท์ความถี่ของลูบแรงดันไฟฟ้า (ω_{mv}) ในขณะที่สมการสำหรับลูบกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการหน่วงของลูบกระแสไฟฟ้า (ζ_i) และแบนด์วิดท์ความถี่ของลูบกระแสไฟฟ้า (ω_{mi}) ซึ่งเป็นค่าที่สำคัญเพื่อใช้ในการกำหนดพฤติกรรมการตอบสนองของระบบควบคุม ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ $\zeta_v = 0.95$ $\zeta_i = 0.85$ $\omega_{mv} = 2\pi \times 27$ rad/s และ $\omega_{mi} = 2\pi \times 300$ rad/s สำหรับรายละเอียดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ แสดงดังตารางที่ 4.2 ในหัวข้อที่ 4.4.5

4.4.4 การทำให้เป็นเชิงเส้น

หัวข้อที่ผ่านมาเป็นการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่และการออกแบบตัวควบคุมของระบบ อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-40) เป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการทำให้แบบจำลองให้เป็นเชิงเส้นเป็นขั้นตอนที่มีความจำเป็น เพื่อให้สามารถนำแบบจำลองไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงได้ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการขยายอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง ซึ่งเป็นการประมาณค่ารอบจุดปฏิบัติการของระบบ โดยผลลัพธ์จากการทำให้เป็นเชิงเส้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรสถานะของแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กได้ดังสมการที่ (4-56)

$$\begin{cases} \delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (4-56)$$

โดยที่ ตัวแปรสถานะ: $\delta \mathbf{x} = [\delta x_1 \ \delta x_2 \ \delta x_3 \ \delta x_v \ \delta x_i]^T$

ตัวแปรอินพุต: $\delta \mathbf{u} = [\delta x_2^* \ \delta P_{CPL} \ \delta V_{OC}]^T$

ตัวแปรเอาต์พุต: $\delta \mathbf{y} = [\delta x_1 \ \delta x_2 \ \delta x_3]^T$

รายละเอียดของ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ในสมการที่ (4-56) แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} -\frac{K_{pi}}{A_r L} x_{2_0} & a(1,2) & \frac{1}{L} & \frac{K_{pi} K_{iv}}{A_r L} x_{2_0} & \frac{K_{ii}}{A_r L} x_{2_0} \\ a(2,1) & \frac{K_{pi} K_{pv}}{A_r C} x_{1_0} + \frac{P_{CPL_0}}{C x_{2_0}^2} & 0 & -\frac{K_{pi} K_{iv}}{A_r C} x_{1_0} & -\frac{K_{ii}}{A_r C} x_{1_0} \\ -\frac{1}{C_{Batt}} & 0 & -\frac{1}{R_{int} C_{Batt}} & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -K_{pv} & 0 & K_{iv} & 0 \end{bmatrix}_{5 \times 5}$$

$$a(1,2) = -\frac{1}{L} + \frac{K_{pi} K_{pv}}{A_r L} x_{2_0}^* - \frac{2K_{pi} K_{pv}}{A_r L} x_{2_0} + \frac{K_{pi} K_{iv}}{A_r L} x_{v_0} - \frac{K_{pi}}{A_r L} x_{1_0} + \frac{K_{ii}}{A_r L} x_{i_0}$$

$$a(2,1) = \frac{1}{C} - \frac{K_{pi} K_{pv}}{A_r C} x_{2_0}^* + \frac{K_{pi} K_{pv}}{A_r C} x_{2_0} - \frac{K_{pi} K_{iv}}{A_r C} x_{v_0} - \frac{2K_{pi}}{A_r C} x_{1_0} + \frac{K_{ii}}{A_r C} x_{i_0}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} \frac{K_{pi} K_{pv}}{A_r L} x_{2_0} & 0 & 0 \\ -\frac{K_{pi} K_{pv}}{A_r C} x_{1_0} & -\frac{1}{C x_{2_0}^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_{int} C_{Batt}} \\ 1 & 0 & 0 \\ K_{pv} & 0 & 0 \end{bmatrix}_{5 \times 3}$$

$$\mathbf{C}(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 5}$$

$$\mathbf{D}(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (4-57)$$

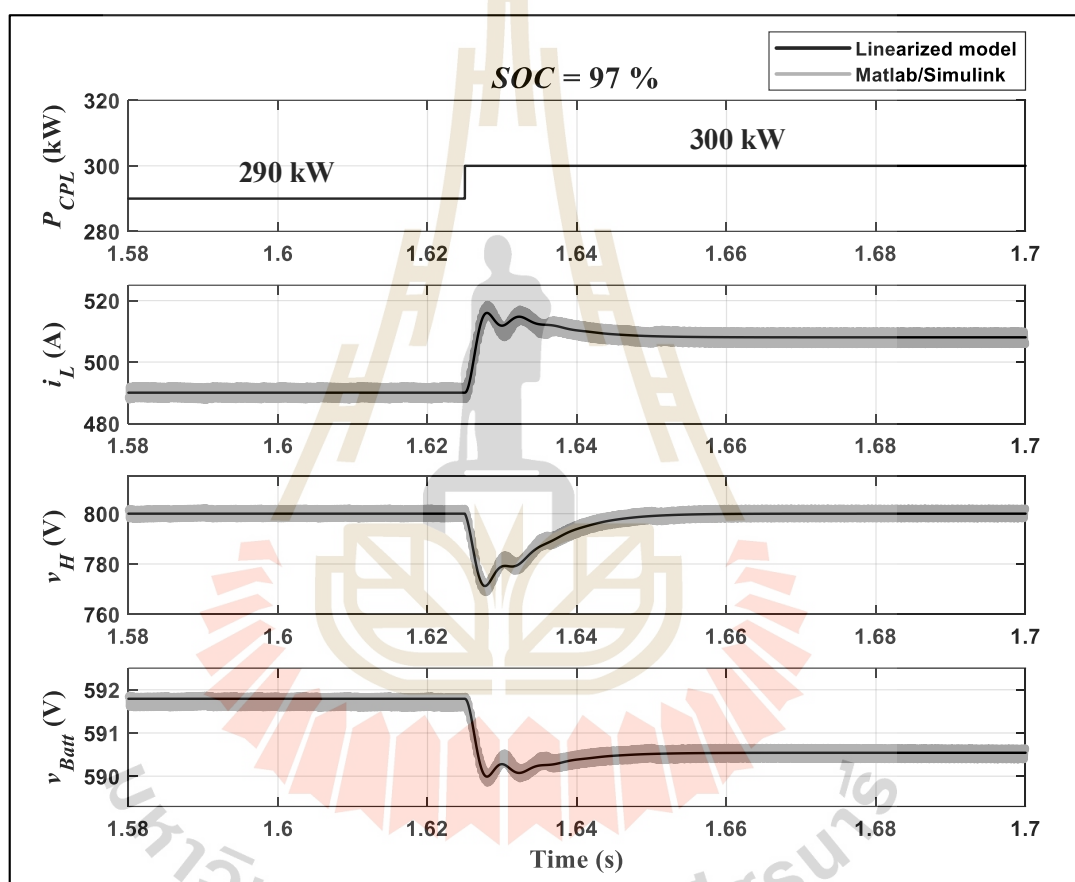
4.4.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (4-56) จำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.12 ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB รายละเอียดการเชื่อมต่อบล็อกอุปกรณ์ต่าง ๆ และโค้ดที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ แสดงไว้ในภาคผนวก ก.2 และ ข. ตามลำดับ เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบสามารถแสดงดังตารางที่ 4.2

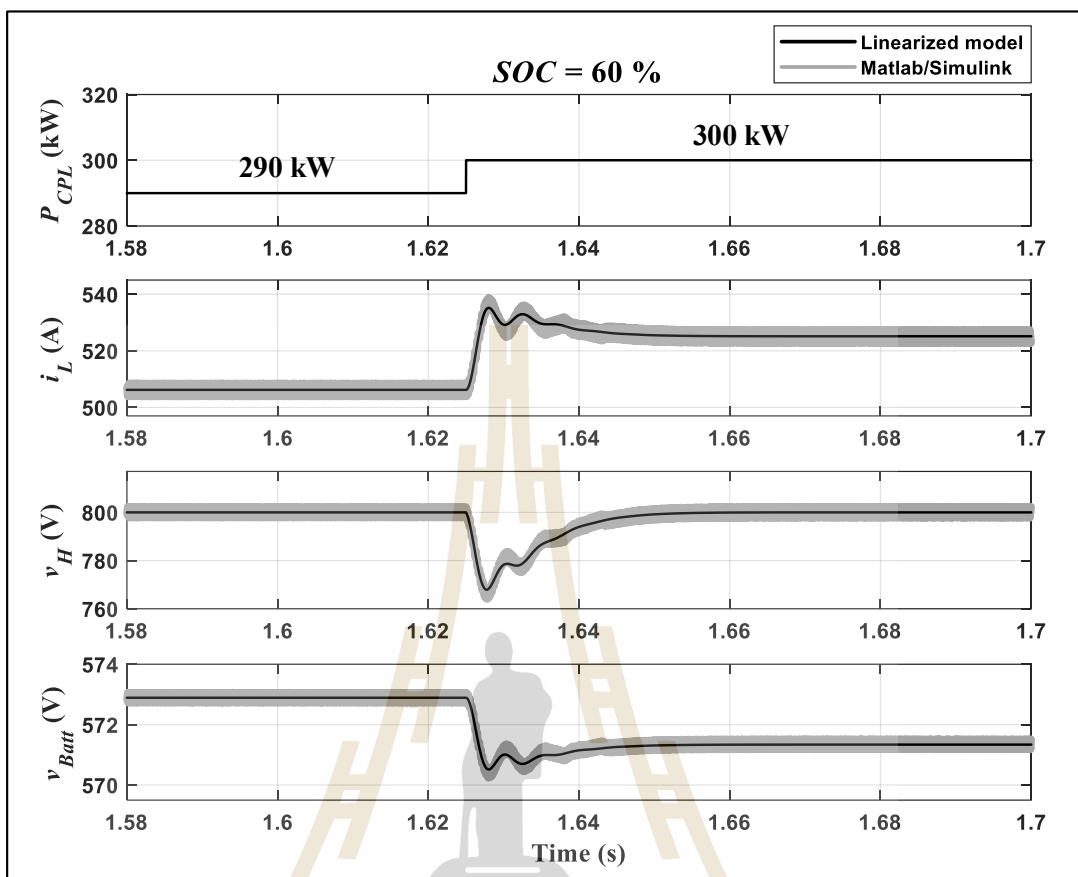
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.12

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$V_{Batt,nom}$	569 V	แรงดันไฟฟ้าปกติของแบตเตอรี่
$Q_{Batt,nom}$	155 Ah	ความจุปกติของแบตเตอรี่
C_{Batt}	19.846 μ F	ค่าตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่
C	2.287 mF	ค่าตัวเก็บประจุทางด้านดีซีบัสแรงดันสูง
L	3.45 mH	ค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผัน
f_s	10 kHz	ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรแปลงผัน
A_r	10	ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยมสำหรับตัวควบคุมพีไอ
K_{pv}	0.73718	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีสำหรับลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า
K_{iv}	65.8224	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมไอสำหรับลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า
K_{pi}	0.19430	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีสำหรับลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า
K_{ii}	215.442	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมไอสำหรับลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาอยู่ทั้งหมด 2 กรณี คือ SOC เท่ากับ 97% และ SOC เท่ากับ 60% และจะทำการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของโหลดจาก 290 kW ไปเป็น 300 kW ที่เวลา 1.625 s. โดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตารางที่ 4.2 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผัน (i_L) แรงดันไฟฟ้าที่ติชชีบัสแรงดันสูง (v_H) และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่ (v_{Batt}) ดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 ในกรณีที่ SOC เป็น 97% และ 60% ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 ผลการตอบสนองของระบบไฟฟ้ากรณีที่มีตัวควบคุม เมื่อค่า $SOC = 97\%$



รูปที่ 4.17 ผลการตอบสนองของระบบไฟฟ้ากรณีที่มีตัวควบคุม เมื่อค่า $SOC = 60\%$

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 เป็นผลการตอบสนองของ i_L , v_H และ v_{Batt} ในกรณีที่สถานะการชาร์จแบตเตอรี่ SOC เท่ากับ 97% และ 60% ตามลำดับ ผลการตอบสนองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นมีความสอดคล้องกับผลการตอบสนองจากแบบจำลองแม่นยำที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB ทั้งในสถานะชั่วคราวและในสถานะคงตัว ทำให้ยืนยันได้ว่าแบบจำลองที่ได้พิสูจน์มามีความถูกต้อง แบบจำลองที่พิสูจน์นี้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงในลำดับถัดไป

4.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 ได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปภายใต้การประมาณค่าอันดับศูนย์ ทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา ส่งผลให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มีตัวควบคุม เป็นแบบจำลองที่ไม่เป็น

เชิงเส้น ส่งผลให้การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบมีความยุ่งยากและซับซ้อน จึงได้อาศัยวิธีอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง ทำให้ได้แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นที่เหมาะสมต่อการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวิธีการประมาณแบบจำลองแบบเตอร์ ซึ่งมีความสำคัญต่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้แบบจำลองแบบเตอร์อย่างง่ายที่ได้จากกระบวนการปรับเส้นโค้ง เพื่อให้สามารถพิจารณาสถานะการชาร์จแบบเตอร์ SOC ที่ปรากฏเป็นตัวแปร V_{oc} และ R_{int} สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นดำเนินการโดยเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB ซึ่งพบว่าผลการจำลองมีความสอดคล้องกันทั้งในสถานะชั่วคราวและในสถานะคงตัว ดังนั้นแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นในบทนี้จึงมีความถูกต้องเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเป็นลำดับถัดไป รายละเอียดการวิเคราะห์เสถียรภาพจะถูกนำเสนอในบทที่ 5 ต่อไป

เนื้อหาในบทที่ 4 นี้ได้ถูกจัดทำเป็นบทความวิจัยและได้ตอบรับให้ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ ดังแสดงร่างบทความวิจัยในภาคผนวก ง. โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Thanrin, T., Pakdeeto, J., Seesamlee, P., & Areerak, K.-N. Mathematical model for bidirectional DC-DC converter within battery electric vehicle system using generalized state space averaging approach. Suranaree Journal of Science and Technology. (copyediting process)



บทที่ 5

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่

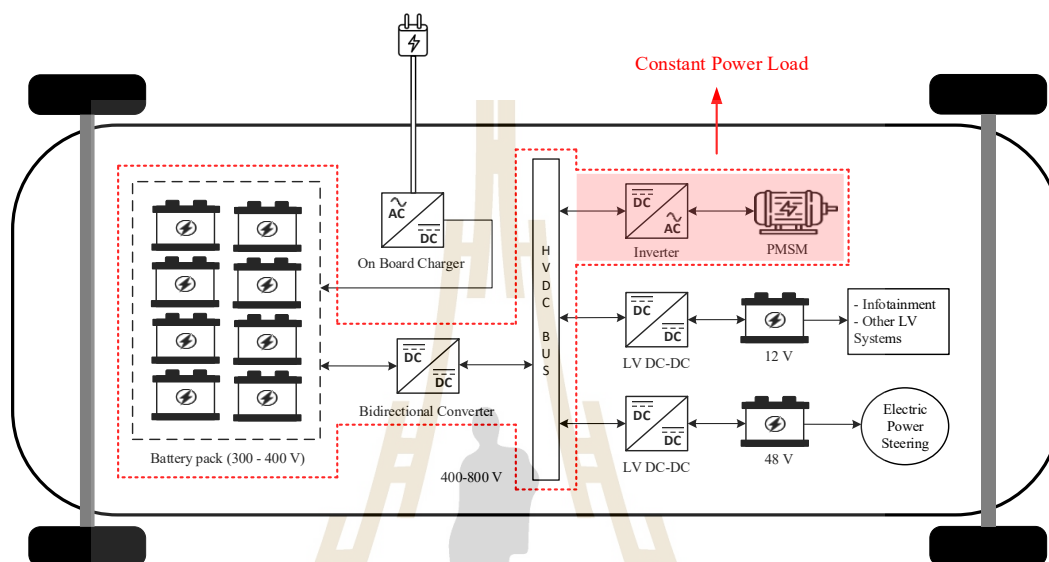
5.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง จากการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่าชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้ามีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า หากระบบเกิดการขาดเสถียรภาพอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น มอเตอร์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังอาจได้รับความเสียหาย การขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ามีผลต่อสมรรถนะโดยรวมของระบบอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างรวดเร็ว เช่น การเร่งแซงหรือการขับเคลื่อนทางลาดชัน เป็นต้น ปัญหาการขาดเสถียรภาพดังกล่าวยังส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้งานและลดความน่าเชื่อถือของเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อคาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพที่อาจเกิดขึ้นภายใต้พิกัดของยานยนต์ นอกจากนี้ยังได้มีการนำเสนอแนวทางการประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ต่อเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ โดยจะมุ่งเน้นไปที่พารามิเตอร์ในระบบทางไฟฟ้าที่ได้จากวิศวกรผู้ออกแบบระบบ รวมถึงสถานะการทำงานของแบตเตอรี่ การประเมินผลกระทบดังกล่าวถูกนำเสนอในรูปแบบเส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพ พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/Simulink ข้อมูลการวิเคราะห์เสถียรภาพและการประเมินผลกระทบจากพารามิเตอร์มีความสำคัญสำหรับวิศวกรในการออกแบบระบบยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อให้สามารถหลีกเลี่ยงจุดทำงานที่อาจทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้

5.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่

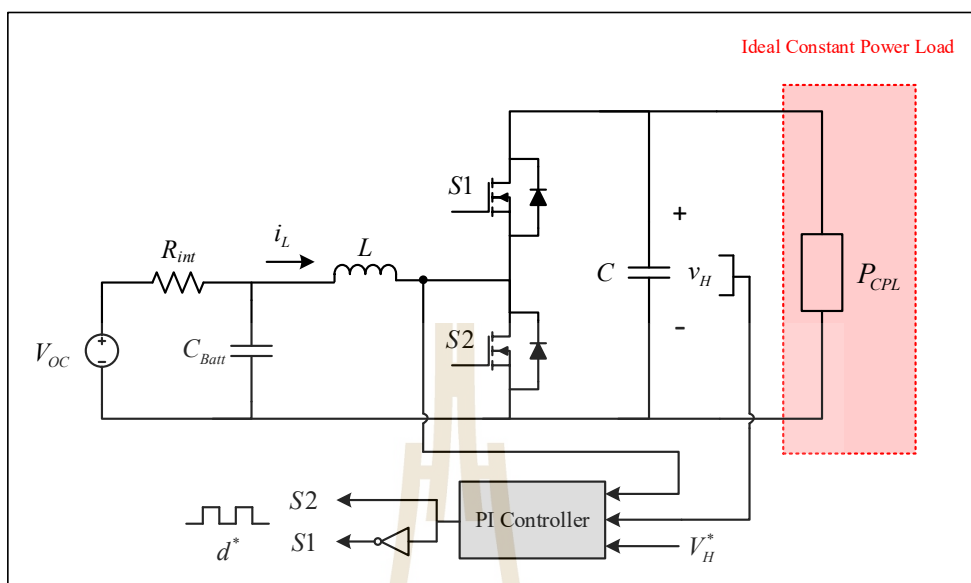
ระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มีโหลดเป็นชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 5.1 อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับมอเตอร์ รวมถึงการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ในบางโหมดการทำงาน งานวิจัยในอดีตพบว่าวงจรแปลงผันที่มีการควบคุมจะแสดงพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ยานยนต์มีการเร่งความเร็วชุดขับเคลื่อนจำเป็นต้องใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในการจ่ายกระแสให้กับมอเตอร์ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่

ดีซีบัสแรงดันสูงลดลง พฤติกรรมดังกล่าวทำให้ความหน่วงของระบบลดลงเพื่อรักษาจุดสมดุลกำลังไฟฟ้า ซึ่งก่อให้เกิดการสั้นไกวของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ดีซีบัสแรงดันสูงเพิ่มขึ้น หากระบบไม่สามารถกลับเข้าสู่สภาวะสมดุลได้นั้นจะนำไปสู่การขาดเสถียรภาพในที่สุด



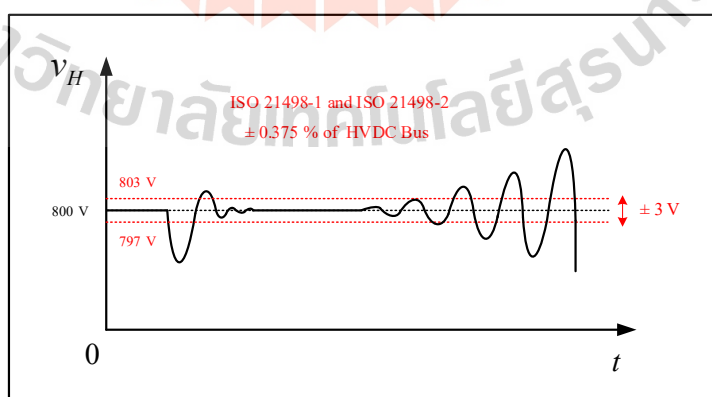
รูปที่ 5.1 องค์ประกอบภายในยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่

พิจารณาในรูปที่ 5.1 แสดงองค์ประกอบภายในยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเน้นส่วนที่อยู่ในกรอบเส้นประซึ่งประกอบด้วย ชุดแบตเตอรี่ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า และโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่จะพิจารณาโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แทนที่ด้วยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติแสดงได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

จากรูปที่ 5.2 แสดงระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง เพื่อคาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพของระบบที่เกิดจากผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว อย่างไรก็ตามยังจำเป็นต้องพิจารณาเพิ่มเติมเกี่ยวกับมาตรฐานระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนเพื่อให้ผลตอบสนองของระบบเป็นไปตามมาตรฐานที่มีการกำหนดไว้ ทั้งนี้จะพิจารณาเฉพาะแรงดันไฟฟ้าที่ดิสซิปส์แรงดันสูง มาตรฐานระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนจะอาศัยมาตรฐาน ISO 21498-1 และ ISO 21498-2 (International Organization for Standardization, 2021a, 2021b) ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ขอบเขตแรงดันไฟฟ้าที่ดิสซิปส์แรงดันสูงของมาตรฐาน ISO 21498-1 และ ISO 21498-2

พิจารณาในรูปที่ 5.3 แสดงขอบเขตแรงดันไฟฟ้าที่ดีซีแรงดันสูงของมาตรฐาน ISO 21498-1 และ ISO 21498-2 มาตรฐานดังกล่าวกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าในสภาวะอยู่ตัวมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 0.375\%$ ของระดับแรงดันไฟฟ้าที่ดีซีแรงดันสูง หรือเท่ากับ $\pm 3\text{ V}$ (ในกรณีที่แรงดันบัสดังกล่าวเป็น 800 V) หากระบบเกิดการขาดเสถียรภาพจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ดีซีบัสแรงดันสูงเกินขอบเขตมาตรฐานสภาวะดังกล่าวเป็นสาเหตุสำคัญที่อาจทำให้ระบบหรืออุปกรณ์ภายในยานยนต์ไฟฟ้าได้รับความเสียหาย ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบควบคุมและความปลอดภัยของผู้ใช้งาน สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถดำเนินการได้โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (4-56) ของบทที่ 4 ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง ทฤษฎีบทค่าเจาะจงจะถูกอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.2.1

5.2.1 ทฤษฎีบทค่าเจาะจง

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น ทั้งนี้วิธีการดังกล่าวต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงสามารถดำเนินการได้โดยเริ่มต้นจากการนำเมทริกซ์จาโคเบียน $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ (Areerak et al., 2011; Areerak et al., 2012; Amin & Molinas, 2017) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-56) มาคำนวณหาค่าเจาะจงทั้งหมดในระบบไฟฟ้าตามสมการที่ (5-1)

$$\det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \quad (5-1)$$

เมื่อแทนค่าเมทริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ลงในสมการที่ (5-1) จะสามารถคำนวณค่าเจาะจงหรือโพลทั้งหมดของระบบไฟฟ้า โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพจะพิจารณาตามเงื่อนไขการมีเสถียรภาพให้เป็นไปตามสมการที่ (5-2)

$$\text{real}(\lambda_i) < 0 \quad (5-2)$$

โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ (n คือ จำนวนตัวแปรสถานะทั้งหมดของระบบ)

จากสมการที่ (5-2) สามารถอธิบายได้ว่า ระบบไฟฟ้าจะมีเสถียรภาพได้ก็ต่อเมื่อค่าเจาะจงของระบบทั้งหมดต้องมีส่วนจริง (real part) น้อยกว่าศูนย์ ซึ่งในทางปฏิบัติหมายความว่าโพลทุกตัวของระบบจะต้องอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบเอส เงื่อนไขนี้ถือเป็นเกณฑ์พื้นฐานที่ใช้ตรวจสอบเสถียรภาพของ

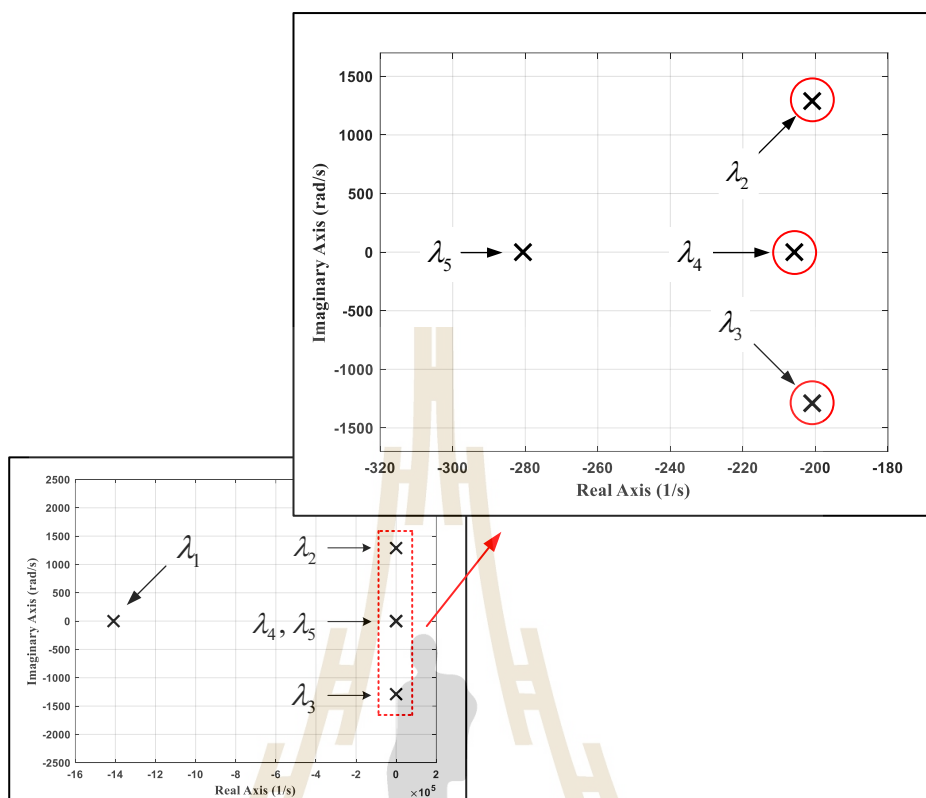
ระบบไฟฟ้า อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมสามารถพิจารณาเพียงคู่โพลเด่น (dominant poles) ซึ่งเป็นโพลที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพมากที่สุด เนื่องจากโพลคู่นี้เป็นตัวที่มีผลต่อผลตอบสนองของระบบควบคุมมากที่สุด การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะถูกนำเสนอในหัวข้อที่ 5.2.2

5.2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

การวิเคราะห์เสถียรภาพจะเริ่มจากการคำนวณหาค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังแสดงในรูปที่ 5.2 ผ่านแบบจำลองเชิงเส้นตามสมการที่ (4-56) และใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงตามสมการที่ (5-1) โดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.1 ค่าเจาะจงที่คำนวณได้รวมทั้งหมด 5 ค่า ได้แก่ λ_1 ถึง λ_5 แสดงได้ดังรูปที่ 5.4

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.2

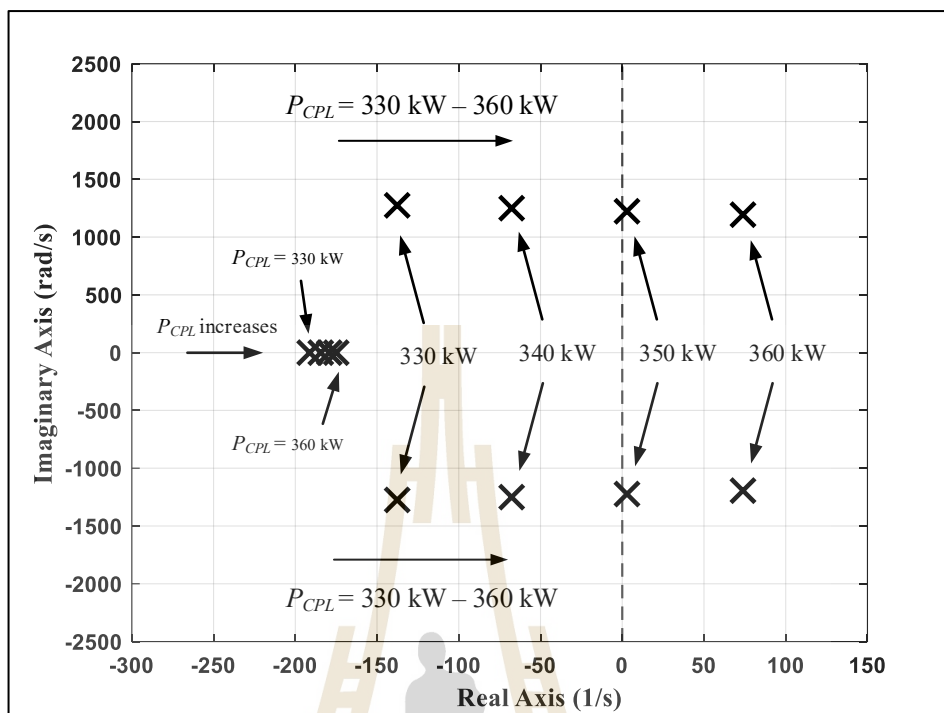
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$V_{Batt,nom}$	569 V	แรงดันไฟฟ้าปกติของแบตเตอรี่
$Q_{Batt,nom}$	155 Ah	ความจุปกติของแบตเตอรี่
SOC	97%	สถานะการชาร์จแบตเตอรี่
C_{Batt}	19.846 μ F	ค่าตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่
C	2.287 mF	ค่าตัวเก็บประจุทางด้านดีซีบัสแรงดันสูง
L	3.45 mH	ค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผัน
f_s	10 kHz	ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรแปลงผัน
A_r	10	ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยมสำหรับตัวควบคุมพีไอ
K_{pv}	0.73718	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีสำหรับลู่วควบคุมแรงดันไฟฟ้า
K_{iv}	65.8224	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมไอสำหรับลู่วควบคุมแรงดันไฟฟ้า
K_{pi}	0.19430	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีสำหรับลู่วควบคุมกระแสไฟฟ้า
K_{ii}	215.442	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมไอสำหรับลู่วควบคุมกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 5.4 ค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

จากรูปที่ 5.4 แสดงค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา การวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะให้ความสำคัญกับค่าเจาะจงที่อยู่ใกล้แกนจินตภาพมากที่สุดหรือที่เรียกว่า “โพลเด่น” เนื่องจากโพลดังกล่าวมีผลต่อพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบมากที่สุด เมื่อพิจารณาพบว่า โพล λ_2 λ_3 และ λ_4 (โพลในวงกลมสีแดง) เป็นโพลที่อยู่ใกล้แกนจินตภาพ จึงสันนิษฐานได้ว่าการพิจารณาตำแหน่งของโพลเหล่านี้จะสามารถใช้เพื่อคาดการณ์จุดทำงานที่อาจทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะกำหนดให้ SOC มีค่าเริ่มต้นอยู่ที่ 97% และมีการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดเพิ่มขึ้นทีละ 10 kW ตั้งแต่ 330 kW ถึง 360 kW ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีการพิจารณาเฉพาะโพล λ_2 λ_3 และ λ_4 ดังรูปที่ 5.5

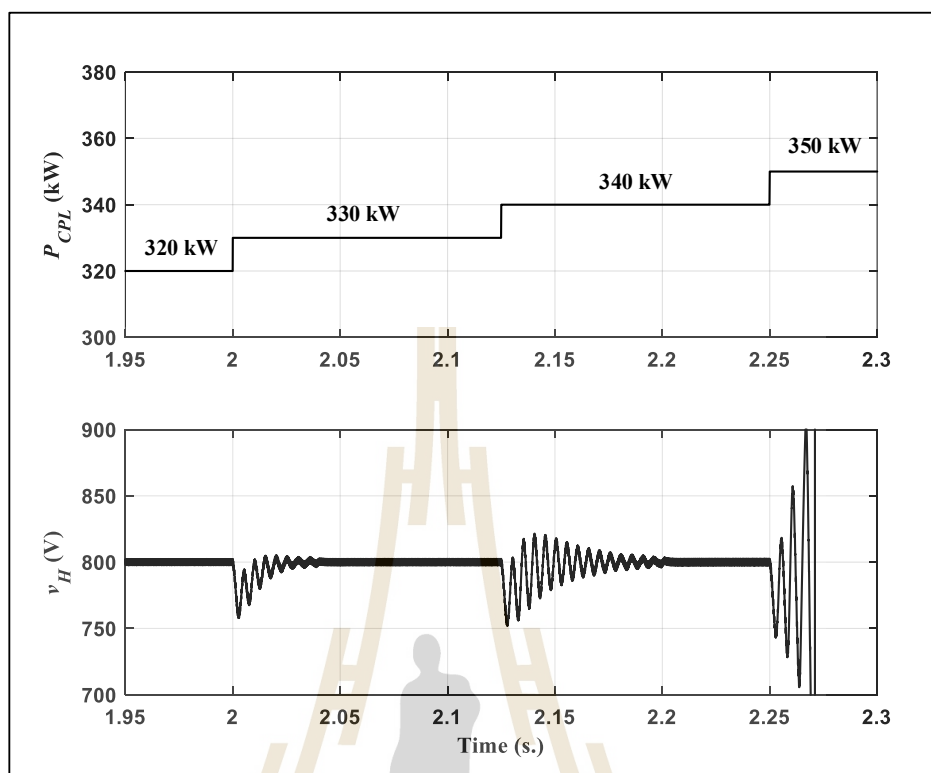


รูปที่ 5.5 โพล λ_2 , λ_3 และ λ_4 ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อ $SOC = 97\%$

พิจารณาในรูปที่ 5.5 สังเกตได้ว่าเมื่อค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดเพิ่มขึ้นจนถึง 350 kW ตำแหน่งของโพล λ_2 และ λ_3 ซึ่งเดิมอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบเอสได้เคลื่อนย้ายไปทางฝั่งขวาของระนาบเอส ทำให้สามารถคาดการณ์ได้ว่าที่ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลด 350 kW เป็นจุดการทำงานที่ทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพ ขณะที่โพล λ_4 ไม่ได้เคลื่อนย้ายไปทางฝั่งขวาของระนาบเอส จึงสามารถกล่าวได้ว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.2 จะมีเพียงโพล λ_2 และ λ_3 เป็นคู่โพลเด่นของระบบ ทั้งนี้แม้ว่าการเคลื่อนที่ของคู่โพลเด่นจะสามารถใช้เป็นเกณฑ์บ่งชี้จุดที่อาจทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ในทางทฤษฎีอย่างชัดเจน แต่เพื่อความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์จำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องเพื่อยืนยันผลดังกล่าว ซึ่งจะนำเสนอรายละเอียดในหัวข้อที่ 5.2.3

5.2.3 การตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในรูปที่ 5.5 จำเป็นต้องนำไปตรวจสอบความถูกต้องดำเนินการได้จากการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.2 ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB รายละเอียดการเชื่อมต่อบล็อกอุปกรณ์ต่าง ๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ก.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 5.1 ผลการจำลองสถานการณ์ของการวิเคราะห์เสถียรภาพจะได้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า v_H ดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ผลการจำลองสถานการณ์ของการวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อ $SOC = 97\%$

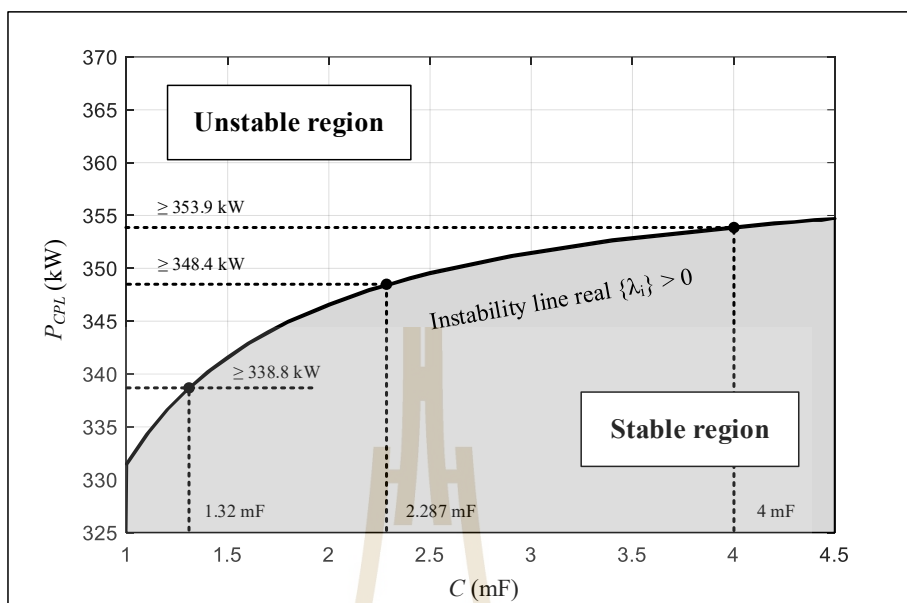
ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.6 เป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพกรณี $SOC = 97\%$ ที่แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 5.5 พบว่าในช่วงที่ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดมีค่าเท่ากับ 340 kW ระบบยังคงมีเสถียรภาพ โดยสามารถสังเกตได้จากผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า v_H ที่มีการลู่เข้าสู่สภาวะคงตัว แสดงให้เห็นถึงระบบยังคงมีความสามารถในการปรับตัวกลับคืนสู่จุดสมดุลหลังจากโหลดเกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้พฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับตำแหน่งของคูโพลเด่นในรูปที่ 5.5 ซึ่งยังคงอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบเอส แต่เมื่อค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดเพิ่มขึ้นเป็น 350 kW ที่ช่วงเวลา 2.25 s. จะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองของ v_H มีการสั่นไกวมากขึ้นและลู่ออกอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียความสามารถในการรักษาสมดุลของระบบสอดคล้องกับลักษณะการเคลื่อนที่ของคูโพลเด่นในรูปที่ 5.5 ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจึงสามารถคาดการณ์จุดที่ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้อง องค์ความรู้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการนี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ต่อเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ ซึ่งรายละเอียดนำเสนอในหัวข้อที่ 5.3

5.3 ผลกระทบของพารามิเตอร์ต่อเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่

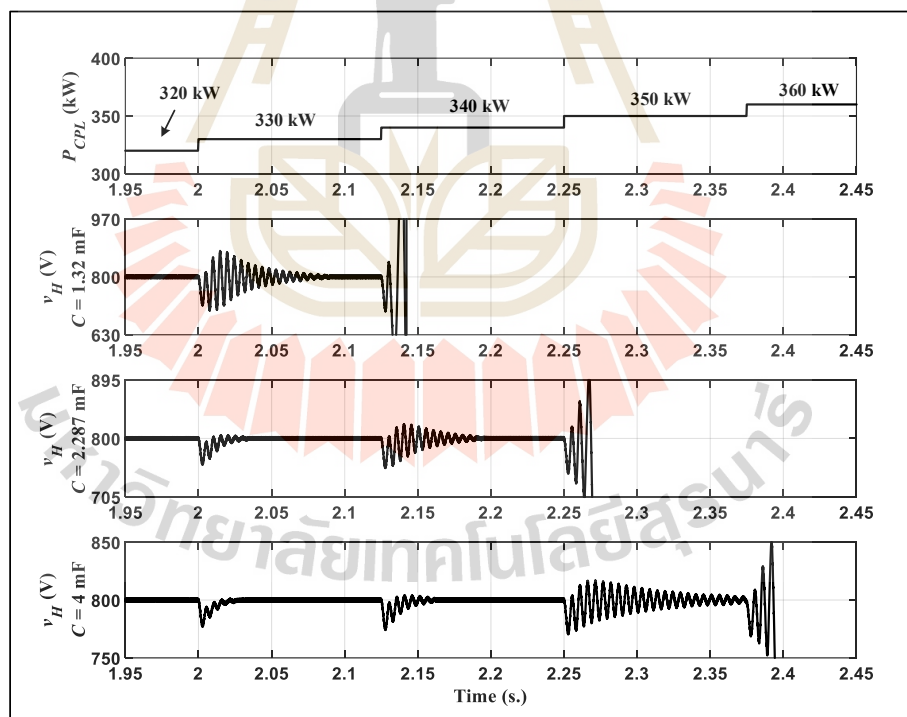
การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงในหัวข้อก่อนหน้านี้ เป็นการพิจารณาดำเนินงานของโพลเด้นบนระนาบเอสเพื่อคาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพในแต่ละจุดการทำงาน วิธีดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ต่อเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ การประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ในหัวข้อนี้มีความสำคัญเพื่อให้ผู้ออกแบบได้คำนึงถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในระบบ รายละเอียดสำหรับการประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์แสดงดังต่อไปนี้

5.3.1 ผลกระทบจากตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

การประเมินผลกระทบจากตัวเก็บประจุของวงจรกรองต่อเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ เนื่องจากตัวเก็บประจุมีหน้าที่หลักในการกรองแรงดันไฟฟ้าที่ติดซึบสแรงดันสูงให้มีการกระเพื่อมของสัญญาณลดลง โดยทั่วไปเมื่อค่า C เพิ่มขึ้น แรงดันกระเพื่อม (ripple voltage) จะลดลง ส่งผลให้สัญญาณแรงดันมีความเรียบมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามหากค่า C ลดลง แรงดันกระเพื่อมจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเกิดการสั่นไหวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดลงของค่า C เสมือนการหน่วงของระบบลดลง ทั้งนี้ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า C ของวงจรกรองสามารถนำเสนอเส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพ เส้นแนวโน้มดังกล่าวใช้แบ่งขอบเขตระหว่างบริเวณที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพ (stable region) และบริเวณที่ระบบขาดเสถียรภาพ (unstable region) ดังแสดงในรูปที่ 5.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า C ของวงจรกรองเพิ่มขึ้น ระบบจะมีแนวโน้มเสถียรภาพเพิ่มขึ้นสังเกตได้จากความชันของกราฟที่มีค่าเป็นบวก ในทางกลับกันหากค่า C ลดลง ระบบจะมีเสถียรภาพลดลงส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่าโวลตกำลังไฟฟ้าคงตัวน้อยลงตามไปด้วย เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการประเมินผลกระทบจากค่า C งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สุ่มเลือกจุดที่ค่าพารามิเตอร์ C เท่ากับ 1.32 mF, 2.287 mF และ 4 mF ไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.7 เส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า C ของวงจรกรอง

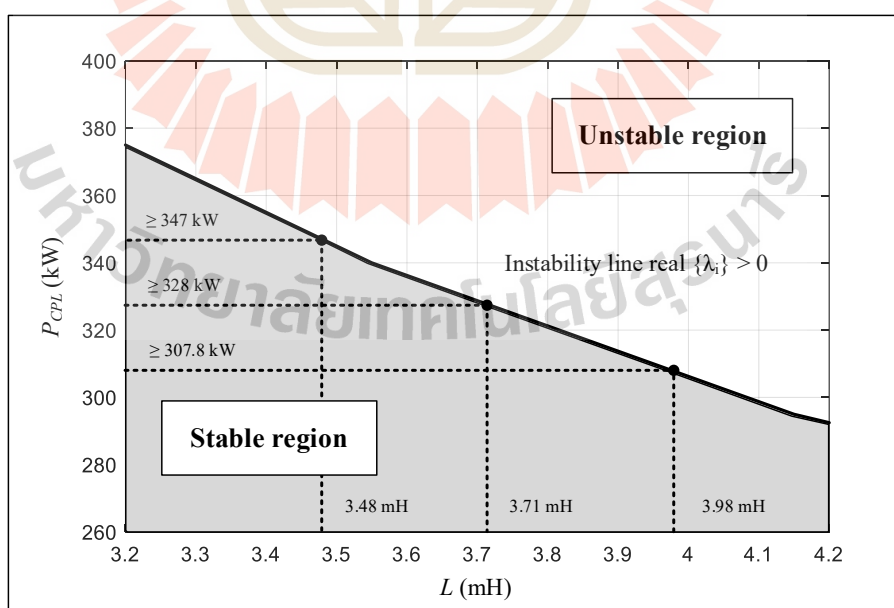


รูปที่ 5.8 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า C ของวงจรกรอง

พิจารณาผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.8 เมื่อกำหนดค่า C ของวงจรกรองมีค่าเท่ากับ 1.32 mF พบว่าระบบเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวเท่ากับ 340 kW ซึ่งสอดคล้องกับเส้นแนวโน้มที่มีขอบเขตการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวมากกว่าหรือเท่ากับ 338.8 kW สำหรับกรณีที่เพิ่มค่า C เป็น 2.287 mF และ 4 mF ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าระบบเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวเพิ่มขึ้นเป็น 350 kW และ 360 kW ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวสอดคล้องกับเส้นแนวโน้มในรูปที่ 5.7 ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าเส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพในรูปที่ 5.7 มีความถูกต้อง อย่างไรก็ตามหากต้องการทำให้ระบบมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น จำเป็นต้องเพิ่มค่า C ในปริมาณมาก ซึ่งถือเป็นข้อเสียของระบบ เนื่องจากการเพิ่มค่า C มากเกินไป ไม่เพียงแต่ทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้น แต่ยังเพิ่มน้ำหนักของยานยนต์ไฟฟ้า การออกแบบหาค่า C ที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการใช้งานพร้อมทั้งคำนึงถึงจุดขาดเสถียรภาพของระบบจึงเป็นส่วนที่วิศวกรออกแบบระบบควบคุมจำเป็นต้องพิจารณา

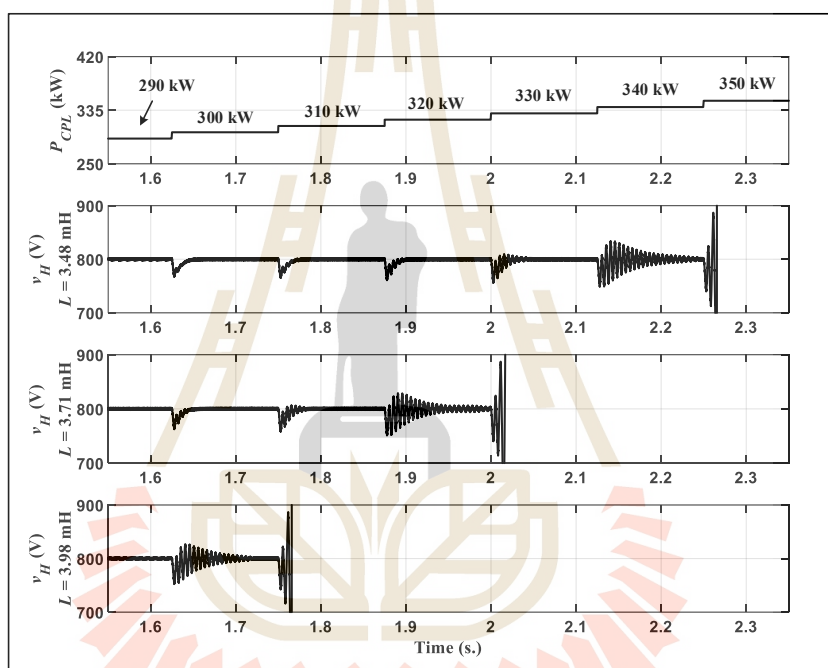
5.3.2 ผลกระทบจากตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง

ตัวเหนี่ยวนำช่วยกรองกระแสไฟฟ้าให้มีความเรียบ แม้การเพิ่มค่า L จะช่วยลดกระแสกระเพื่อม (ripple current) แต่หากค่า L มีค่ามากเกินไป อาจมีความเสี่ยงที่จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ ในทางกลับกันการลดค่า L จะทำให้การตอบสนองของระบบเร็วขึ้น แต่ก็ทำให้กระเพื่อมสูงขึ้น เส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพที่เป็นผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า L ดังแสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 เส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า L ของวงจรกรอง

จากเส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพในรูปที่ 5.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า L ของวงจรกรองเพิ่มขึ้น ระบบจะมีแนวโน้มเสถียรภาพลดลง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากความชันของกราฟที่มีค่าเป็นลบ ในทางกลับกันหากค่า L ลดลง ระบบจะมีแนวโน้มเสถียรภาพเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมากขึ้น เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการประเมินผลกระทบจากค่า L จะเลือกค่าพารามิเตอร์เท่ากับ 3.48 mH, 3.71 mH และ 3.98 mH ไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า L ของวงจรกรอง

พิจารณาผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.10 เมื่อกำหนดค่า L ของวงจรกรองมีค่าเท่ากับ 3.48 mH พบว่าระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวเท่ากับ 350 kW ซึ่งสอดคล้องกับเส้นแนวโน้มที่มีขอบเขตการขาดเสถียรภาพ สำหรับกรณีที่เพิ่มค่า L เป็น 3.71 mH และ 3.98 mH ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าระบบเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวน้อยลงเท่ากับ 330 kW และ 310 kW ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวสอดคล้องกับเส้นแนวโน้มในรูปที่ 5.9 เช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าเส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพในรูปที่ 5.9 มีความถูกต้อง อย่างไรก็ตามพบว่า การเพิ่มค่า L ของวงจรกรองเพียงเล็กน้อยส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพลดลง การเลือก L จึงเป็นความท้าทายสำหรับวิศวกร ไม่เพียงแต่ต้องเพิ่มค่า L เพื่อให้กระแสกระเพื่อมลดลงเท่านั้น

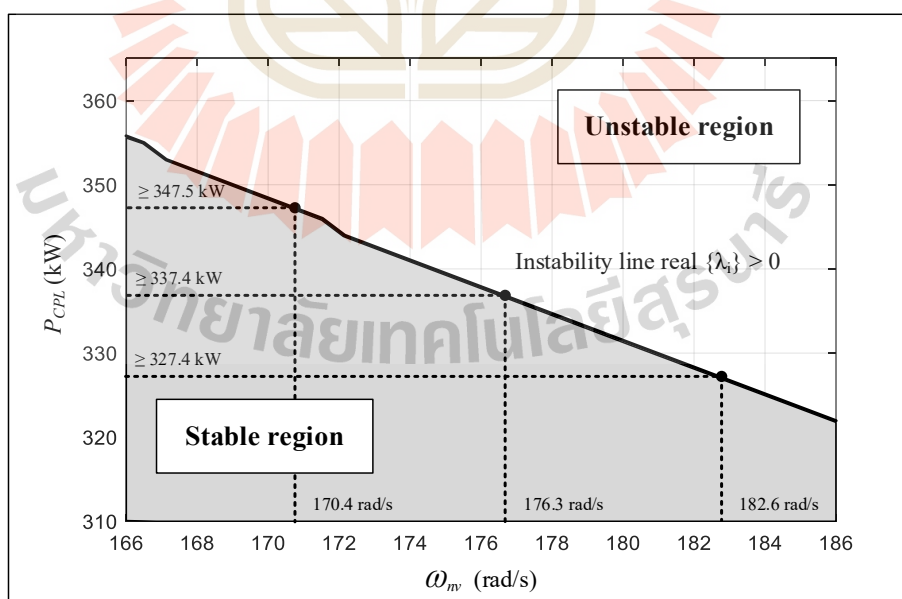
แต่ยังต้องคำนึงถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการเพิ่มค่า L ซึ่งอาจนำไปสู่การขาดเสถียรภาพของระบบได้ ข้อมูลนี้เป็นส่วนสำคัญสำหรับการตัดสินใจในการออกแบบระบบยานยนต์ไฟฟ้าให้เหมาะสม

5.3.3 ผลกระทบของแบนด์วิดท์ความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

การประเมินผลกระทบของแบนด์วิดท์ความถี่ธรรมชาติมีความสำคัญ เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อความเร็วของผลการตอบสนองของระบบไฟฟ้า เช่น เวลาเข้าที่ (settling time, T_s) ค่าดังกล่าวใช้สำหรับออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ (K_p และ K_i) ให้เหมาะสมกับการทำงานของระบบ หากเลือกแบนด์วิดท์ความถี่ธรรมชาติไม่เหมาะสมระบบอาจเกิดการสั่นไกวจนทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ สำหรับการประเมินผลกระทบดังกล่าวสามารถแบ่งออกเป็นสองประเด็นหลัก ได้แก่ แบนด์วิดท์ความถี่ธรรมชาติของลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้าและลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า สามารถกล่าวรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

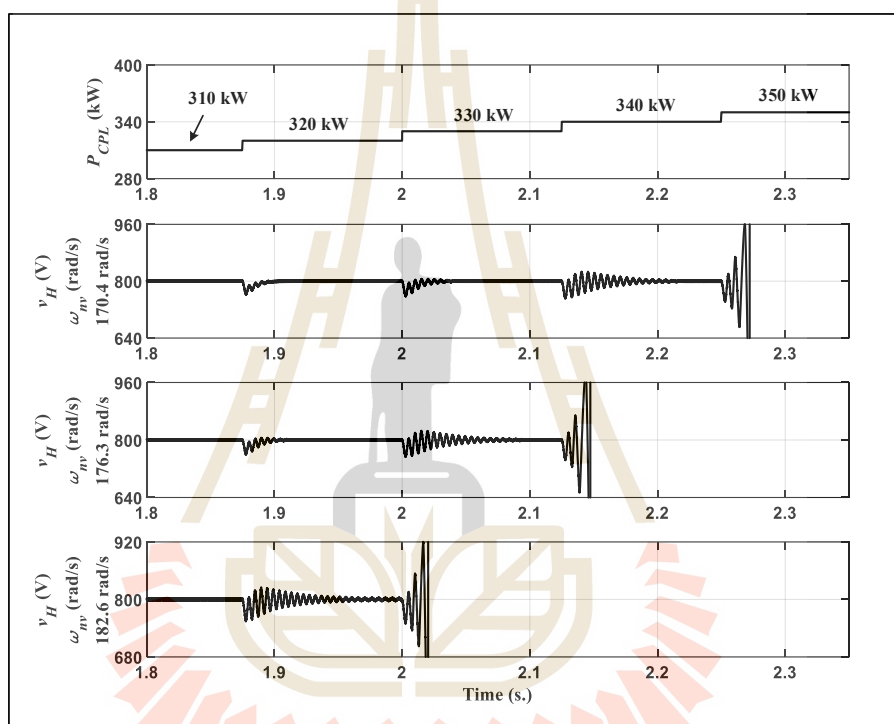
1) ผลกระทบของแบนด์วิดท์ความถี่ธรรมชาติของลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้า

โดยทั่วไปลูบแรงดันจะถูกออกแบบให้มีแบนด์วิดท์ต่ำกว่าลูบกระแสอย่างน้อยประมาณ 10 เท่า เพื่อให้ลูบกระแสมีความไวในการคำนวณมากกว่า ลูบควบคุมแรงดันทำหน้าที่เป็นลูบนอกของตัวควบคุมพีไอ หากเลือกแบนด์วิดท์สูงเกินไประบบอาจเกิดการสั่นไกวได้ อย่างไรก็ตาม หากเลือกค่าแบนด์วิดท์ต่ำเกินไประบบจะตอบสนองช้า สามารถนำเสนอเส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพของแบนด์วิดท์ความถี่ธรรมชาติของลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้างambarkanที่ 5.11



รูปที่ 5.11 เส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า ω_{mv} ของลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้า

จากเส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพในรูปที่ 5.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า ω_{mv} ของรูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ระบบจะมีแนวโน้มเสถียรภาพลดลง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากความชันของกราฟที่มีค่าเป็นลบ เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{mv} จะเลือกค่าพารามิเตอร์ ω_{mv} เท่ากับ 170.4 rad/s, 176.3 rad/s และ 182.6 rad/s ไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.12

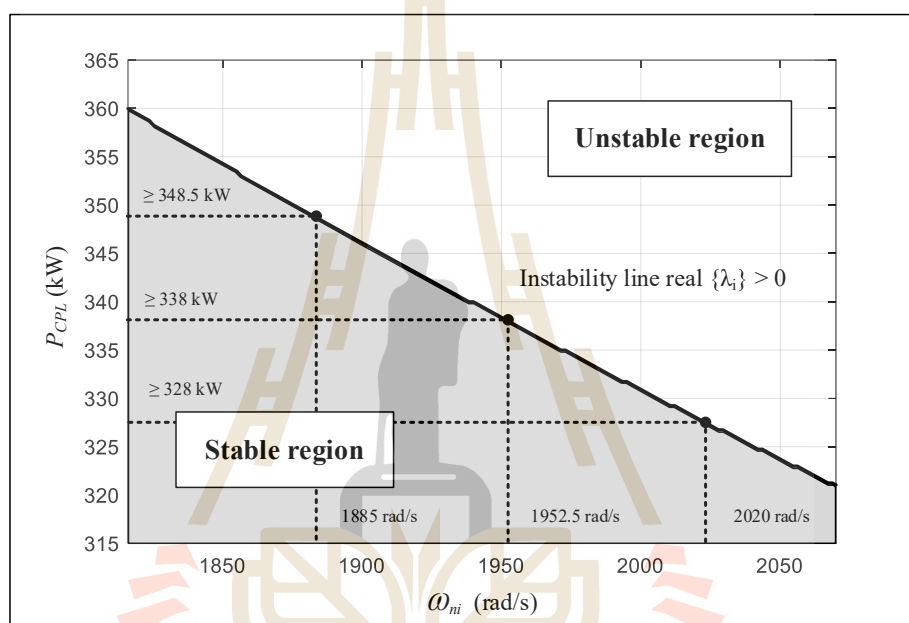


รูปที่ 5.12 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า ω_{mv} ของรูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า

ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.12 เมื่อกำหนดค่า ω_{mv} เท่ากับ 170.4 rad/s พบว่าระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวเท่ากับ 350 kW ซึ่งสอดคล้องกับเส้นแนวโน้มที่มีขอบเขตการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวมากกว่าหรือเท่ากับ 347.5 kW สำหรับกรณีที่ค่า ω_{mv} เป็น 176.3 rad/s และ 182.6 rad/s ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าระบบเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวน้อยลงเท่ากับ 340 kW และ 330 kW ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวสอดคล้องกับเส้นแนวโน้มในรูปที่ 5.11 ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าเส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพในรูปที่ 5.11 มีความถูกต้อง

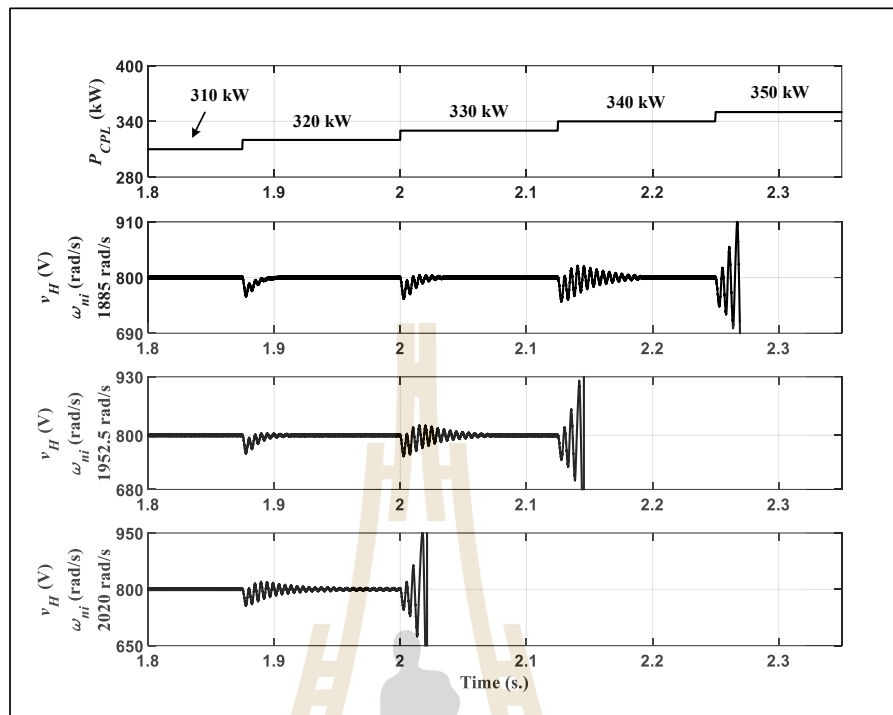
2) ผลกระทบของแบนด์วิดท์ความถี่ธรรมชาติของลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า

แบนด์วิดท์ความถี่ของลูบควบคุมกระแสไฟฟ้าเป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยทั่วไปลูบควบคุมกระแสจะถูกออกแบบให้มีแบนด์วิดท์มากกว่าลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้าประมาณ 10 เท่า เพื่อให้สามารถคำนวณค่าได้รวดเร็วกว่าลูบแรงดัน เนื่องจากลูบควบคุมกระแสทำหน้าที่เป็นลูบในของตัวควบคุมพีไอ ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{ni} ของลูบควบคุมกระแสไฟฟ้าสามารถนำเสนอเส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 เส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า ω_{ni} ของลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า

จากเส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพในรูปที่ 5.13 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า ω_{ni} ของลูบควบคุมกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ระบบจะมีแนวโน้มเสถียรภาพลดลง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากความชันของกราฟที่มีค่าเป็นลบ ผลกระทบดังกล่าวจะเลือกค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเท่ากับ 1885 rad/s, 1952.5 rad/s และ 2020 rad/s ไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์ได้ดังรูปที่ 5.14



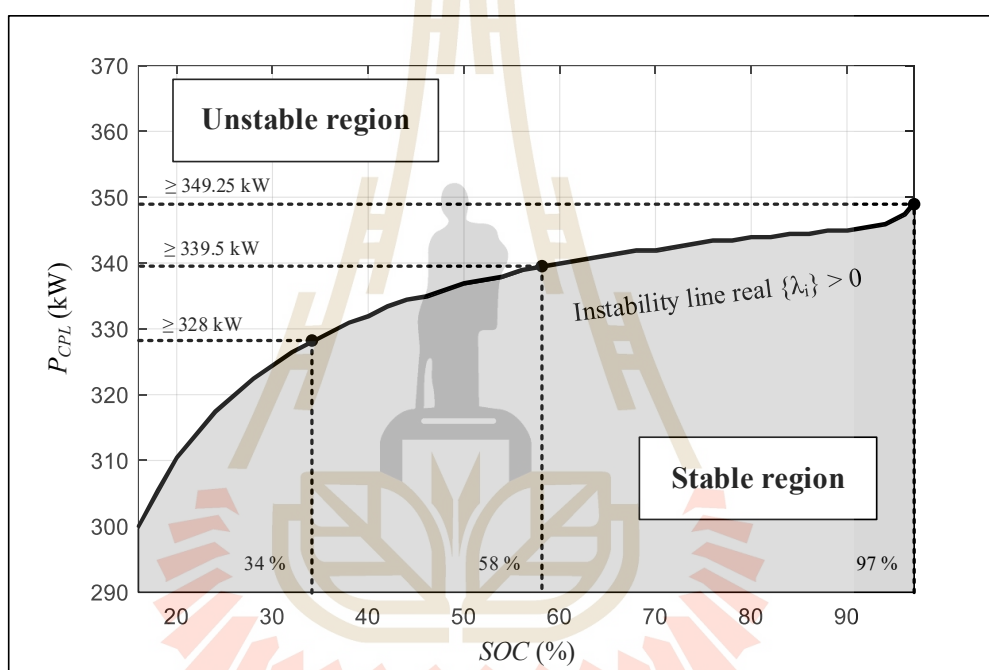
รูปที่ 5.14 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า ω_{ni} ของลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า

ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.14 เมื่อกำหนดค่า ω_{ni} เท่ากับ 1885 rad/s พบว่าระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวเท่ากับ 350 kW ซึ่งสอดคล้องกับเส้นแนวโน้มที่มีขอบเขตการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวมากกว่าหรือเท่ากับ 348.5 kW สำหรับกรณีที่ค่า ω_{ni} เป็น 1952.5 rad/s และ 2020 rad/s ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าระบบเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวน้อยลงเท่ากับ 340 kW และ 330 kW ตามลำดับ สอดคล้องกับเส้นแนวโน้มในรูปที่ 5.13

จากการประเมินผลกระทบของแบนด์วิดท์ความถี่ของลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้า ω_m และลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า ω_{ni} พบว่าหากออกแบบให้ระบบตอบสนองเร็วเกินไป อาจทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ การกำหนดค่าแบนด์วิดท์ความถี่อย่างเหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ระบบสามารถตอบสนองได้รวดเร็ว พร้อมทั้งยังคงรักษาเสถียรภาพของระบบไว้ภายใต้พิกัดยานยนต์ไฟฟ้า

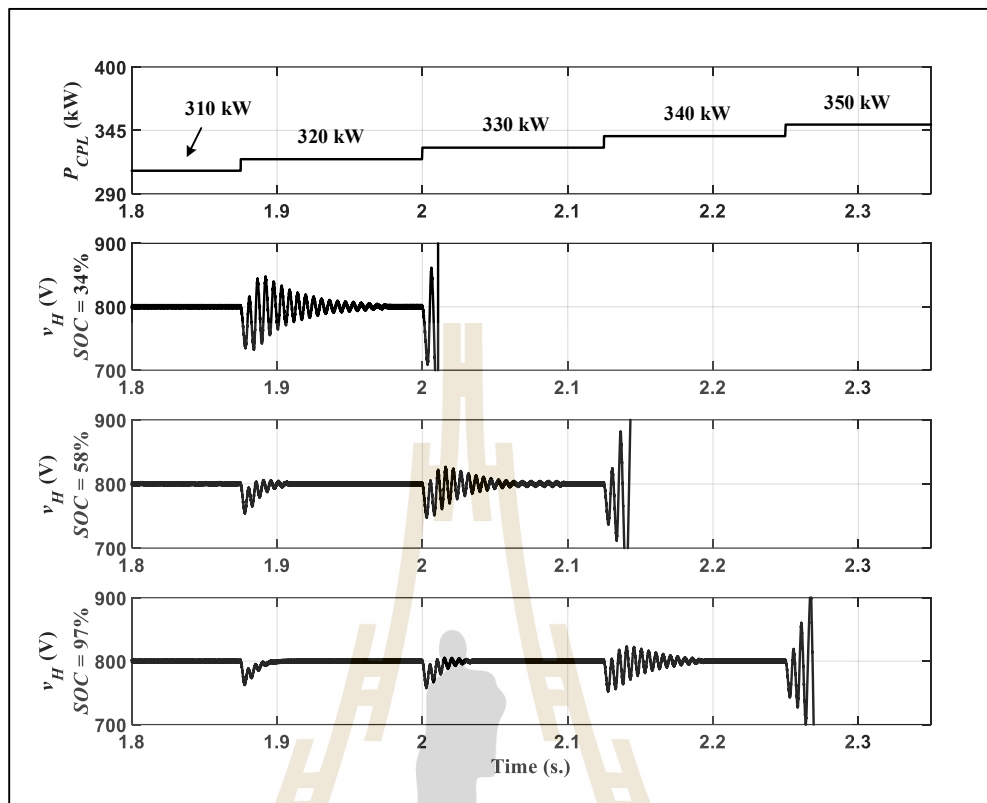
5.3.4 ผลกระทบของสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ต่อเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่

สถานะการชาร์จแบตเตอรี่หรือค่า “ SOC ” แสดงถึงปริมาณพลังงานที่พร้อมใช้งานของแบตเตอรี่ ซึ่งค่าดังกล่าวเปลี่ยนแปลงตามการจ่ายพลังงานให้แก่โหลด หาก SOC อยู่ในระดับสูง หมายความว่าแบตเตอรี่มีความจุพลังงานสูง ในทางตรงกันข้ามหาก SOC ต่ำ หมายความว่ามีความจุพลังงานขณะนั้นน้อยกว่าปกติของแบตเตอรี่ ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า SOC ของแบตเตอรี่สามารถนำเสนอเส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 เส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า SOC ของแบตเตอรี่

จากเส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพในรูปที่ 5.15 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า SOC ของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น ระบบจะมีแนวโน้มเสถียรภาพเพิ่มขึ้นสังเกตได้จากความชันของกราฟที่มีค่าเป็นบวก กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ระบบจะขาดเสถียรภาพที่ค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมากขึ้น ในทางกลับกันหากค่า SOC ลดลง ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพลดลง เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการประเมินผลกระทบจากค่า SOC จะเลือกค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเท่ากับ 34%, 58% และ 97% ไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า SOC ของแบตเตอรี่

ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.16 เมื่อกำหนดค่า SOC เท่ากับ 34% พบว่าระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวเท่ากับ 330 kW ซึ่งสอดคล้องกับเส้นแนวโน้มที่มีขอบเขตการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวมากกว่าหรือเท่ากับ 328 kW สำหรับกรณีที่เพิ่มค่า SOC เป็น 58% และ 97% ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าระบบเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวมากขึ้นเป็น 340 kW และ 350 kW ตามลำดับ สอดคล้องกับเส้นแนวโน้มในรูปที่ 5.15 ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าเส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพในรูปที่ 5.15 มีความถูกต้อง เพื่อเป็นกรณีศึกษาสามารถยกตัวอย่างกรณีการใช้งานจริงได้ดังนี้:

สมมติว่าผู้ขับขี่ยานยนต์ไฟฟ้ากำลังเหยียบคันเร่ง ทำให้ระบบต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าคงตัวเท่ากับ 340 kW ในช่วงที่ SOC ของแบตเตอรี่อยู่ที่ 97% ระบบยังคงรักษาเสถียรภาพได้อย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตามหากผู้ขับขี่ยังคงเหยียบคันเร่งที่ความเร็วเดิมอย่างต่อเนื่อง ซึ่งหมายถึงการใช้กำลังไฟฟ้าเท่าเดิมอยู่ที่ 340 kW และ SOC ลดลงเหลือ 58% ระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพกรณีนี้อาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ขับขี่ได้ ดังนั้นการประเมินผลกระทบของ SOC จึงมีความสำคัญเพื่อความปลอดภัยและเป็นข้อมูลให้กับผู้ใช้งานยานยนต์ไฟฟ้า ทั้งนี้เส้นแนวโน้มการขาด

เสถียรภาพที่นำเสนอในรูปที่ 5.15 ไม่ได้นำผลของระยะเวลา (time scale) มาพิจารณา เนื่องจากใช้แบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่ายที่ไม่ขึ้นกับเวลา ในความเป็นจริงแล้วลักษณะพฤติกรรมจริงของแบตเตอรี่สามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับปริมาณประจุ (V-Q curve) (Tremblay & Dessaint, 2009) กราฟดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับเวลาเนื่องจากปริมาณประจุไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่ที่มีการเปลี่ยนแปลง เพื่อให้เหมาะสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ จึงมีความจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่ายในบทที่ผ่านมา แต่แบบจำลองแบตเตอรี่ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับจุดการทำงาน ณ จุดการทำงานต่าง ๆ โดยผลการตรวจสอบความถูกต้องพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นมีความถูกต้องเพียงพอต่อการนำไปใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพในบทนี้

5.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบได้ ทั้งนี้วิธีการดังกล่าวสามารถใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพจากตำแหน่งของคูโพลเด่นบนระนาบเอส พร้อมพิจารณาเงื่อนไขการมีเสถียรภาพ คือ ส่วนจริงของคูโพลเด่นต้องมีค่าน้อยกว่าศูนย์ หากคูโพลเด่นอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบเอส ระบบจะยังคงมีเสถียรภาพ แต่หากคูโพลเด่นอยู่ทางฝั่งขวา หมายถึงระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพ เนื้อหาในบทนี้ยังได้นำทฤษฎีบทค่าเจาะจงมาประยุกต์ใช้สำหรับการประเมินผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่อเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ การประเมินผลกระทบดังกล่าวได้ถูกนำเสนอเป็นเส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพ ผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่อค่า L , ω_{nv} และ ω_{ni} เพิ่มขึ้น ระบบจะมีแนวโน้มขาดเสถียรภาพไวขึ้น ในทางกลับกันหากค่า C และ SOC เพิ่มขึ้นระบบจะมีแนวโน้มขาดเสถียรภาพที่ช้าลง สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องได้ดำเนินการโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกับแนวโน้มเชิงทฤษฎีที่คาดการณ์ไว้ แสดงถึงความถูกต้องของการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

เนื้อหาในบทที่ 5 บางส่วนได้ถูกจัดทำเป็นบทความวิจัยในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ดังแสดงในภาคผนวก ง. โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ธิติพัทธ์ แทนรินทร์, กองพันธ์ อารีรักษ์ และ จักรกริช ภักดีโต, "การประเมินผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบยานยนต์ไฟฟ้า," การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47, หน้า 213-216, พฤศจิกายน 2567.

บทที่ 6

การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

6.1 บทนำ

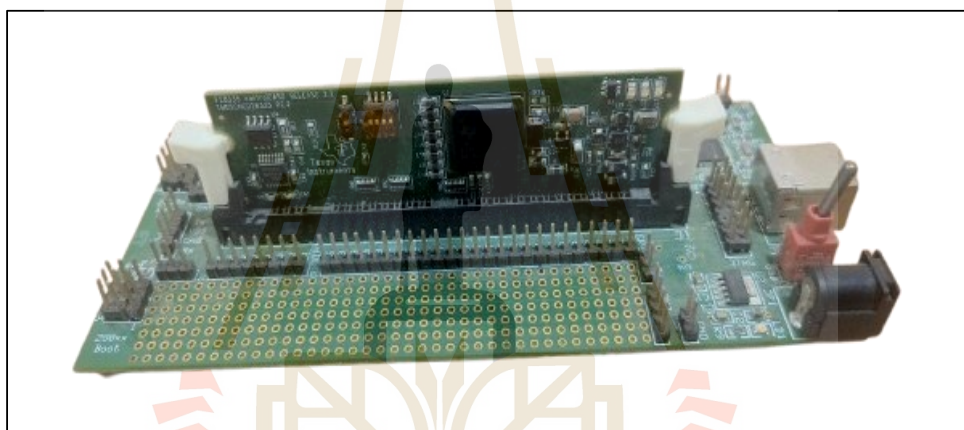
เนื้อหาในบทที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น สามารถคาดการณ์จุดทำงานที่ทำให้ระบบอาจเกิดการขาดเสถียรภาพได้ เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพว่ามีความถูกต้องจึงได้นำเสนอการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สมรรถนะสูง TMDSDOCK28335 ซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ประมวลผลตัวควบคุมพีโอที่ต่อแบบเรียงกัน ผลการจำลองด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์จากชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB วิธีการดังกล่าวไม่เพียงช่วยยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ แต่ยังทำให้มั่นใจได้ว่าระบบควบคุมจะไม่เกิดความผิดพลาดหากนำตัวควบคุมดังกล่าวไปใช้งานจริงในระบบยานยนต์ไฟฟ้า การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปถือเป็นขั้นตอนเสมือนการทดสอบระบบจริงในระดับฮาร์ดแวร์ที่มีความเชื่อถือได้

6.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ในลูป

การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปเป็นการโปรแกรมตัวควบคุมลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สมรรถนะสูง TMDSDOCK28335 จำลองสถานการณ์ร่วมกับชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB โดยไม่จำเป็นต้องสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบทั้งหมด เทคนิคดังกล่าวเหมาะสมกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ใช้พิกัดกำลังไฟฟ้าสูง ช่วยลดความซับซ้อนในการทดสอบจริงและไม่เป็นอันตรายจากการสร้างชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นการจำลองด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปจึงถือเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยให้วิศวกรสามารถตรวจสอบ วิเคราะห์ และปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบควบคุมได้อย่างแม่นยำก่อนนำไปใช้งานจริง พื้นฐานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMDSDOCK28335 รวมถึงหลักการเชื่อมต่อระหว่างบอร์ด TMDSDOCK28335 และโปรแกรม MATLAB จะอธิบายในหัวข้อที่ 6.2.2

6.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMDSDOCK28335

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMDSDOCK28335 ของบริษัท Texas Instruments ใช้ชิพไมโครคอนโทรลเลอร์ F28335 ตระกูล C2000™ 32 บิต รองรับการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล และการควบคุมแบบเวลาจริง สามารถเขียนโปรแกรมด้วย Code Composer Studio (CCS) ซึ่งช่วยให้การพัฒนาโปรแกรมสำหรับงานควบคุมง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังมีพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตหลายชนิด เช่น พอร์ตดิจิทัล พอร์ตแอนะล็อก พอร์ตสร้างสัญญาณปรับความกว้างพัลส์ (PWM) และพอร์ตการสื่อสารอนุกรม พร้อมหน่วยความจำแฟลช 512 KB และ RAM 68 KB ซึ่งเพียงพอต่อการประมวลผลสำหรับการทดสอบฮาร์ดแวร์ในลูบของระบบยานยนต์ไฟฟ้า บอร์ดดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สมรรถนะสูง TMDSDOCK28335

คุณสมบัติที่สำคัญสำหรับบอร์ด TMDSDOCK28335

1) ไมโครคอนโทรลเลอร์และสถาปัตยกรรม

- ใช้ชิพ F28335 ตระกูล C2000™ 32 บิต รองรับการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลและการควบคุมแบบเวลาจริง
- ใช้สถาปัตยกรรม Harvard-based CPU (C28x) พร้อมชุดคำสั่งที่มีประสิทธิภาพสูง และมีหน่วยประมวลผลทศนิยม (floating-point unit, FPU) ในตัว รองรับการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลและการควบคุมแบบเวลาจริง

2) หน่วยความจำ

- แฟลช ขนาด 512 กิโลไบต์ สำหรับเก็บโปรแกรม
- แรม (RAM) ขนาด 68 กิโลไบต์ สำหรับเก็บตัวแปรและข้อมูลระหว่างการประมวลผล

3) การเขียนโปรแกรมและดีบั๊ก

- รองรับการพัฒนาโปรแกรมด้วย CCS
- รองรับ JTAG สำหรับดีบั๊กและโหลดโปรแกรม

4) อินพุต/เอาต์พุต และตัวจับสัญญาณ

- พอร์ตดิจิทัลและแอนะล็อกหลายช่อง
- พอร์ตสร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) หลายช่องสัญญาณ สำหรับควบคุมมอเตอร์และอุปกรณ์อื่น ๆ
- ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (analog-to-digital converter, ADC) ขนาด 12 บิต จำนวน 16 ช่องสัญญาณ (channel)
- ตัวตั้งเวลาและตัวนับ (CPU-Timer) ขนาด 32 บิต จำนวน 3 ตัว รองรับโหมด Prescaler, Capture, Compare และ Interrupt

5) การสื่อสารอนุกรม

- รองรับ RS-232, CAN, SPI, I2C
- สามารถทำงานทั้ง Master/Slave ในบางโปรโตคอล
- สามารถตั้งค่าอัตราการรับ/ส่ง (Baud rate) ได้

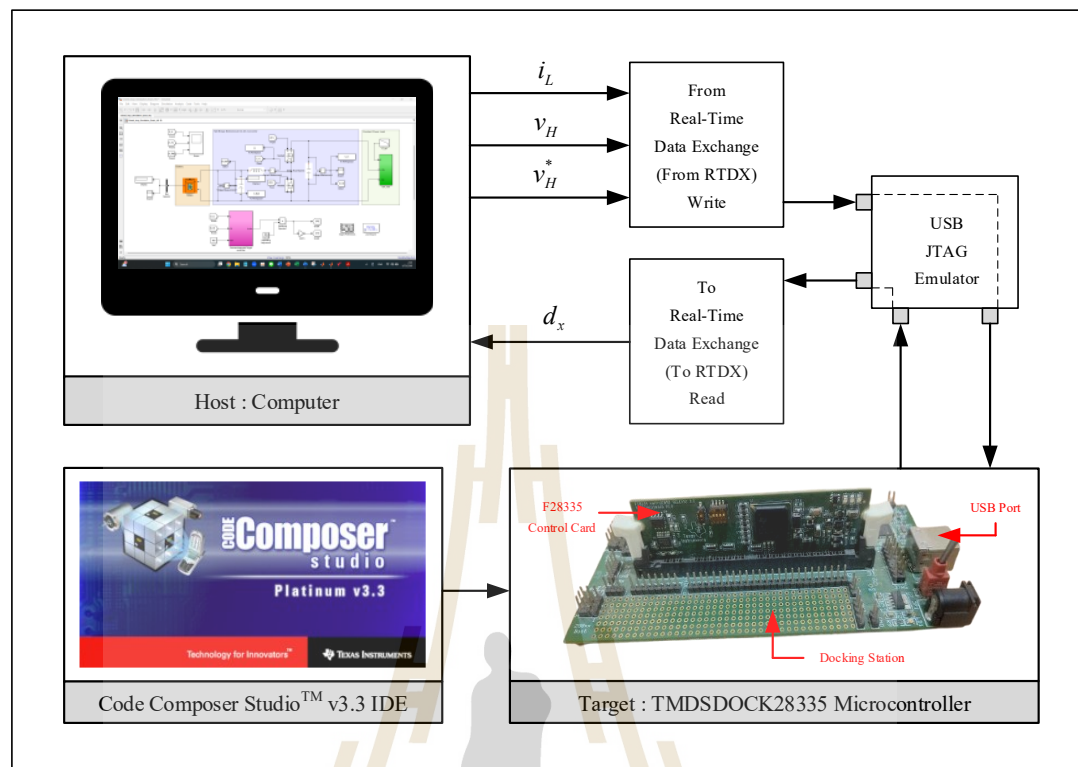
6) ฟังก์ชันพิเศษและความปลอดภัย

- ระบบ Watchdog Timer สำหรับรีเซ็ตอัตโนมัติ
- รองรับโหมดสลีปหลายรูปแบบ เช่น Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby เป็นต้น เพื่อประหยัดพลังงาน
- ตรวจจับ Brown-out และความผิดปกติของออสซิลเลเตอร์

7) ช่วงอุณหภูมิที่ชิพทำงานได้ -40°C ถึง 85°C

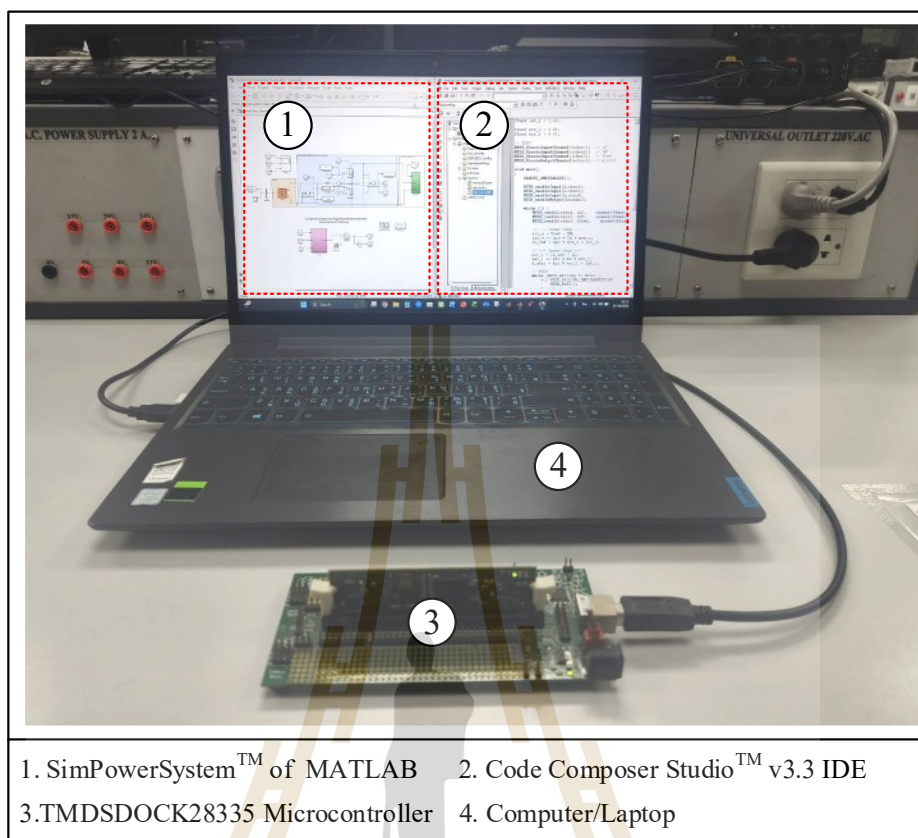
6.2.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ในรูปและโปรแกรม MATLAB

ในการเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สมรรถนะสูง TMDSDOCK28335 สามารถดำเนินการผ่านโปรแกรม CCS ได้โดยตรง อย่างไรก็ตามหากต้องการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปจะดำเนินการให้บอร์ดดังกล่าวรับส่งข้อมูลกับชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบน MATLAB/Simulink แบบเวลาจริงดังแสดงในรูปที่ 6.2



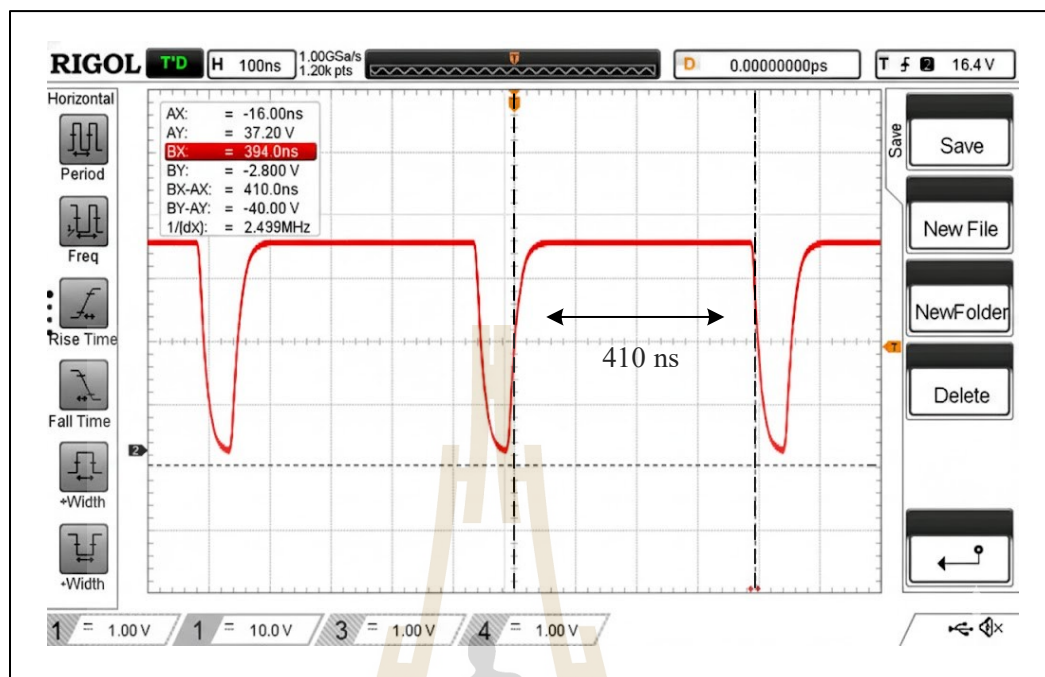
รูปที่ 6.2 ผังการรับ-ส่งข้อมูลสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป

จากรูปที่ 6.2 แสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ในลูป การเชื่อมต่อดังกล่าวจะใช้พอร์ต USB JTAG Emulator ในการสื่อสารระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สมรรถนะสูง TMDSDOCK28335 กับ ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบน MATLAB/Simulink ชุดบล็อกนี้จะทำหน้าที่ส่งสัญญาณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผัน (i_L) แรงดันไฟฟ้าที่ตีชีบัสแรงดันสูง (v_H) และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (v_H^*) ไปยังบอร์ด TMDSDOCK28335 ผ่านช่องทางการสื่อสารแบบเวลาจริง (real-time data exchange, RTDX) บอร์ดดังกล่าวถูกเขียนโปรแกรมด้วย CCS เพื่อประมวลผลตัวควบคุมพีไอที่ต่อแบบเรียงกัน สำหรับคำนวณสัญญาณควบคุม (d_x) สัญญาณควบคุมที่ได้จะถูกส่งไปยัง MATLAB/Simulink เพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม ทำให้ได้ค่า d^* ที่ใช้ควบคุมการทำงานของสวิตช์วงจรแปลงผันกำลัง ภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ในลูปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ในรูป

จากรูปที่ 6.3 แสดงการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ในรูปจริง โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMSDOCK28335 ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมพีไอที่ต่อแบบเรียงกันของชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนโปรแกรม MATLAB และใช้โปรแกรม CCS สำหรับการอัปโหลดโปรแกรมตัวควบคุมพีไอ ทั้งนี้การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปจำเป็นต้องกำหนดค่าช่วงเวลาในการสุ่มตัวอย่าง (sampling time) ที่มีผลต่อความละเอียดของการจำลองการตอบสนองของระบบไฟฟ้า อย่างไรก็ตามหากกำหนดค่าดังกล่าวไม่เหมาะสม อาจทำให้ผลการจำลองไม่เป็นไปตามการสร้างใช้งานจริง ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวและยังคงรักษาความถูกต้องของผลการตอบสนอง จึงได้ทำการทดสอบเพื่อหาค่าช่วงเวลาในการสุ่มตัวอย่างที่เหมาะสม โดยใช้วิธีจับระยะเวลาในการประมวลผลของโค้ดควบคุมพีไอบนบอร์ด TMSDOCK28335 ด้วยการอัปโหลดโปรแกรมตัวควบคุม หลังจากนั้นจับสัญญาณลอจิกสูง-ต่ำที่พอร์ตดิจิทัลด้วยออสซิลโลสโคปเพื่อประเมินระยะเวลาในการทำงานของบอร์ดต่อหนึ่งรอบการประมวลผล ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 ผลการทดสอบระยะเวลาในการประมวลผลของโค้ดควบคุมพีไอ

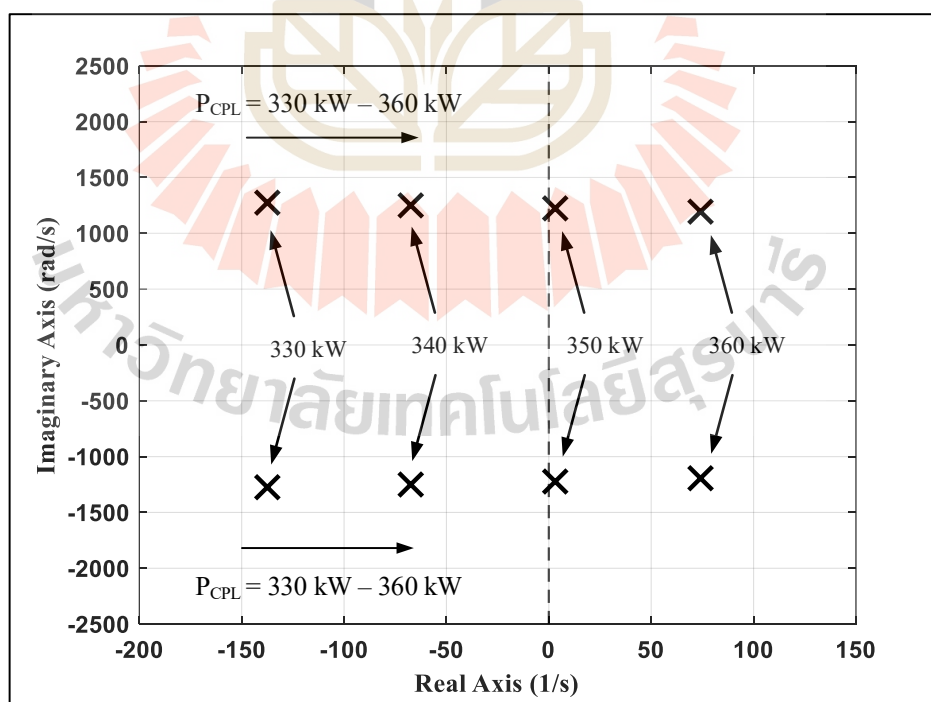
พิจารณาผลการทดสอบระยะเวลาในการประมวลผลของโค้ดควบคุมพีไอในรูปที่ 6.4 จะเห็นว่าบอร์ดใช้ระยะเวลาในการประมวลผลโค้ดควบคุมพีไอต่อหนึ่งรอบประมาณ $0.4 \mu\text{s}$ ซึ่งหมายความว่า การกำหนดค่าช่วงเวลาในการสุ่มตัวอย่างต้องมีค่าไม่น้อยกว่า $0.4 \mu\text{s}$ สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ค่า $10 \mu\text{s}$ เนื่องจากเป็นตัวเลขที่เพียงพอต่อการประมวลผลใน 1 รอบการทำงาน รายละเอียดของการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

6.3 ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นได้กล่าวรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ผ่านมา ทั้งนี้การวิเคราะห์เสถียรภาพจากคูโพลเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณากรณีนี้ที่ $SOC = 97\%$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.5 โดยอาศัยค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 6.1

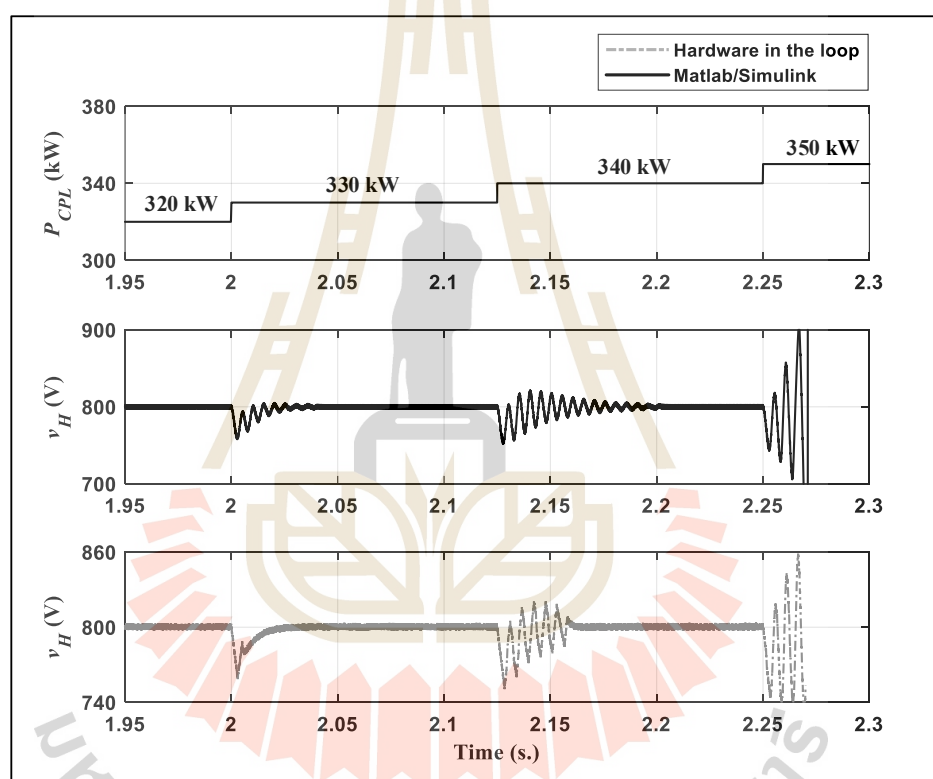
ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$V_{Batt,nom}$	569 V	แรงดันไฟฟ้าปกติของแบตเตอรี่
$Q_{Batt,nom}$	155 Ah	ความจุปกติของแบตเตอรี่
SOC	97%	สถานะการชาร์จแบตเตอรี่
C_{Batt}	19.846 μ F	ค่าตัวเก็บประจุทางด้านแบตเตอรี่
C	2.287 mF	ค่าตัวเก็บประจุทางด้านดีซีบัสแรงดันสูง
L	3.45 mH	ค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผัน
f_s	10 kHz	ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรแปลงผัน
A_r	10	ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยมสำหรับตัวควบคุมพีไอ
K_{pv}	0.73718	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้า
K_{iv}	65.8224	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้า
K_{pi}	0.19430	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีสำหรับควบคุมกระแสไฟฟ้า
K_{ii}	215.442	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมไอสำหรับควบคุมกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 6.5 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากคู่โพลเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณากรณี $SOC = 97\%$

จากรูปที่ 6.5 สามารถคาดการณ์ได้ว่าระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อกำลังไฟฟ้าของโหลดเพิ่มขึ้นเป็น 350 kW เนื่องจากตำแหน่งของคูโพลเด่นเดิมอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบเอสได้เคลื่อนย้ายไปยังฝั่งขวา ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB ที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ผ่านมา ทั้งนี้เพื่อยืนยันความถูกต้องและเพิ่มความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์ดังกล่าว จึงได้มีการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปแสดงได้ดังรูปที่ 6.6 รายละเอียดการเชื่อมต่อบล็อกอุปกรณ์ต่าง ๆ และโปรแกรมภาษาซีสำหรับจำลองฮาร์ดแวร์ในลูป แสดงไว้ในภาคผนวก ก.3 และ ค. ตามลำดับ



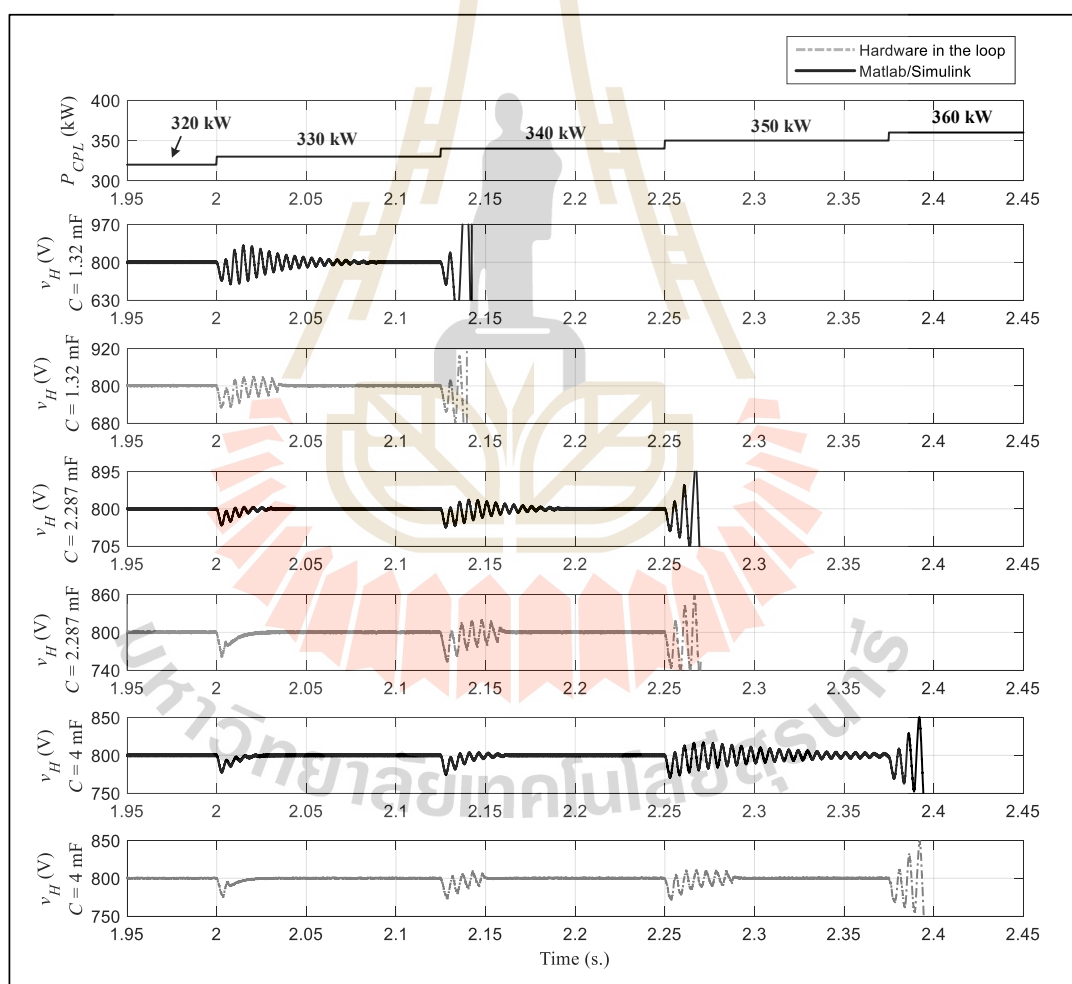
รูปที่ 6.6 ผลการยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยฮาร์ดแวร์ในลูปเทียบกับ MATLAB/Simulink
กรณี $SOC = 97\%$

จากรูปที่ 6.6 จะเห็นว่าผลการยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากฮาร์ดแวร์ในลูปมีความสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB โดยพบว่าระบบเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อกำลังไฟฟ้าของโหลดเพิ่มขึ้นเป็น 350 kW ที่ช่วงเวลา 2.25 s. นอกจากนี้ในบทที่ผ่านมา ยังได้มีการนำทฤษฎีบทค่าเจาะจงไปประยุกต์ใช้ในการประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ต่อเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ โดยเน้นพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ ตัวเก็บประจุและตัว

เหนี่ยวนำของวงจรกรอง แบบตัวเก็บประจุความถี่ธรรมชาติของรูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า รวมถึงสถานะการชาร์จของแบตเตอรี่ โดยสามารถแสดงรายละเอียดผลการจำลองสถานการณ์ ฮาร์ดแวร์ในรูปของแต่ละกรณีได้ดังนี้

1) ผลกระทบจากตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

การประเมินผลกระทบจากตัวเก็บประจุของวงจรกรองต่อเสถียรภาพของระบบ ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ สามารถพิจารณาแนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า C ได้จากรูปที่ 5.7 (ในบทที่ 5) ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากโปรแกรม MATLAB แสดงได้ดังรูปที่ 6.7

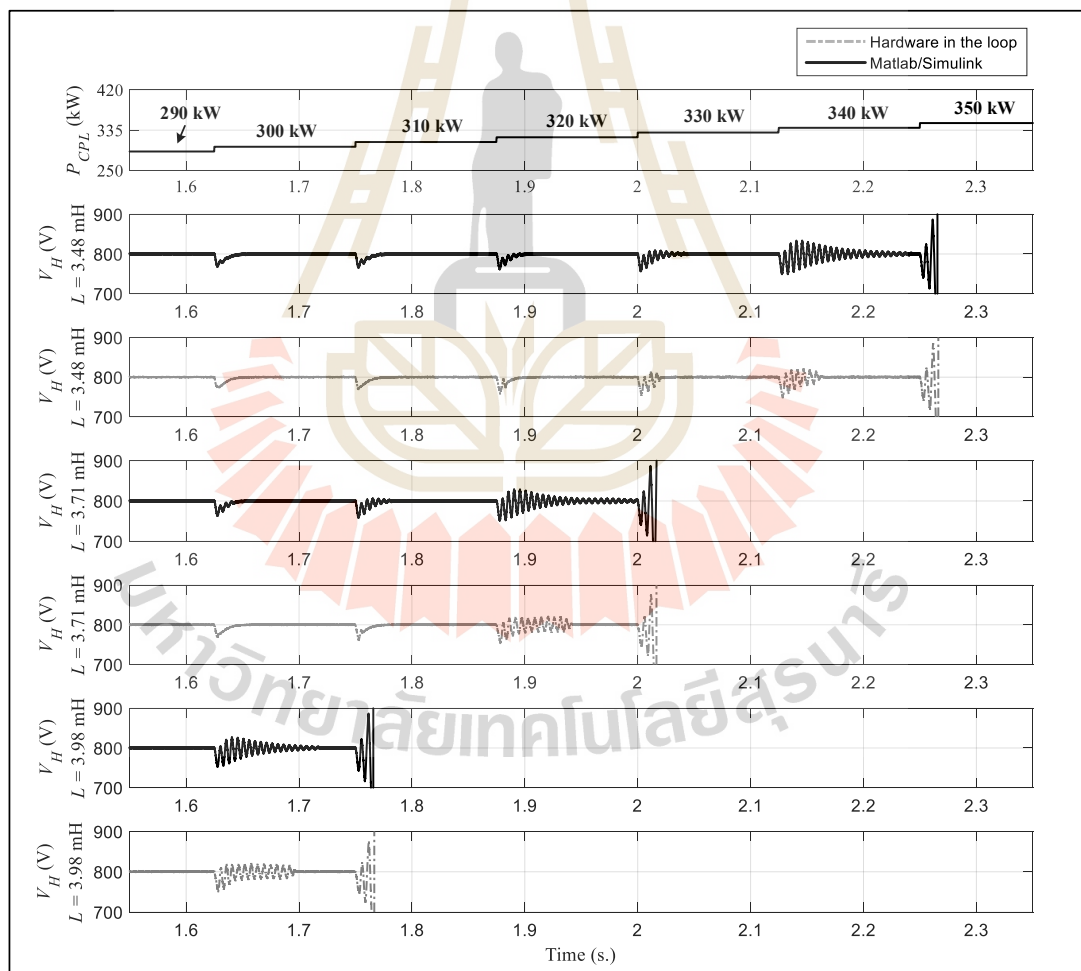


รูปที่ 6.7 การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปเทียบกับ MATLAB/Simulink
กรณีผลกระทบของค่า C

ผลกระทบของค่า C เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์บน MATLAB/Simulink ดังแสดงในรูปที่ 6.7 พบว่าผลจากทั้งสองกรณีสอดคล้องกัน โดยระบบเกิดการขาดเสถียรภาพในจุดเดียวกันที่ค่ากำลังไฟฟ้า 340 kW, 350 kW และ 360 kW เมื่อค่า C เท่ากับ 1.32 mF, 2.287 mF และ 4 mF ตามลำดับ

2) ผลกระทบจากตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง

การประเมินผลกระทบจากตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองต่อเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ สามารถพิจารณาเส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า L ได้จากรูปที่ 5.9 (ในบทที่ 5) ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากโปรแกรม MATLAB แสดงได้ดังรูปที่ 6.8



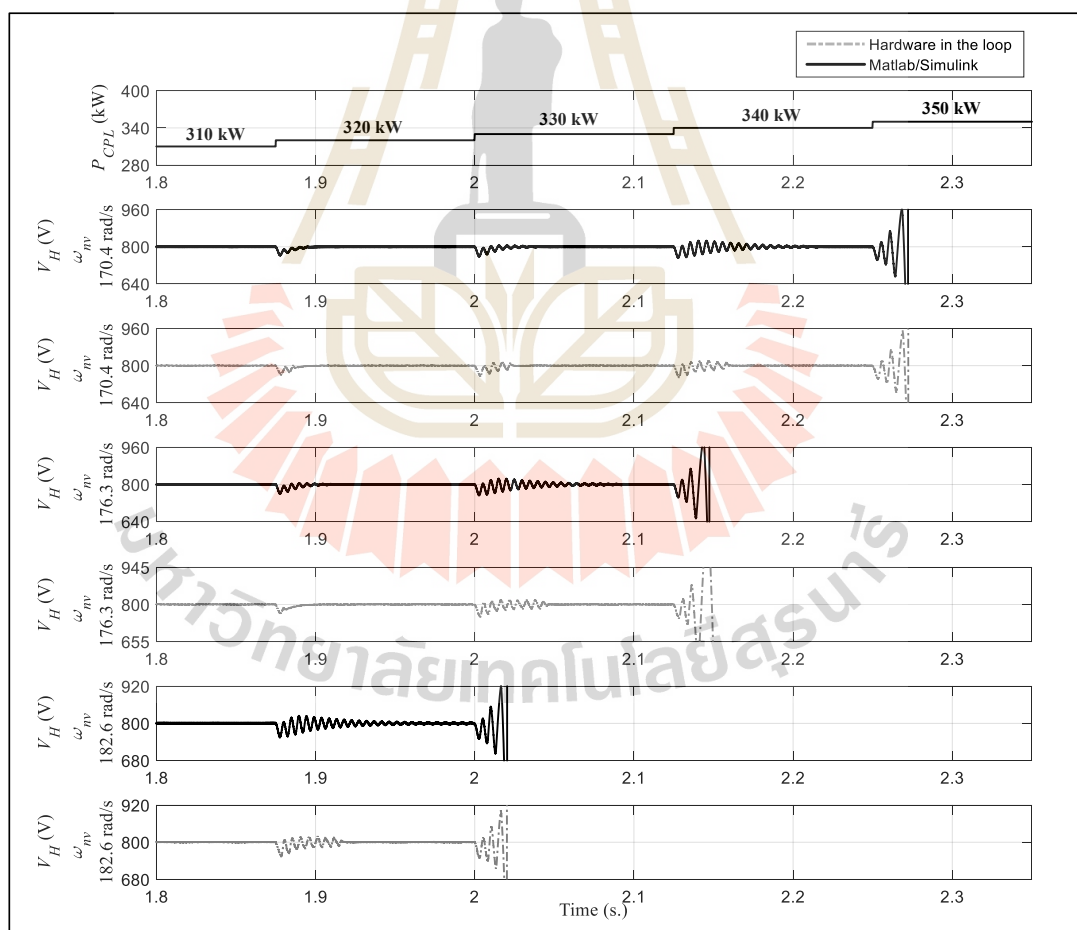
รูปที่ 6.8 การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเทียบกับ MATLAB/Simulink

กรณีผลกระทบของค่า L

ผลกระทบของค่า L เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์บน MATLAB/Simulink ดังแสดงในรูปที่ 6.8 พบว่าผลจากทั้งสองกรณีสอดคล้องกัน โดยระบบเกิดการขาดเสถียรภาพในจุดเดียวกันที่ค่ากำลังไฟฟ้า 350 kW, 330 kW และ 310 kW เมื่อค่า L เท่ากับ 3.48 mH, 3.71 mH และ 3.98 mH ตามลำดับ

3) ผลกระทบของแบนด์วิดท์ความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้า

การประเมินผลกระทบของแบนด์วิดท์ความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าต่อเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ สามารถพิจารณาเส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า ω_{nv} ได้จากรูปที่ 5.11 (ในบทที่ 5) ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากโปรแกรม MATLAB แสดงได้ดังรูปที่ 6.9

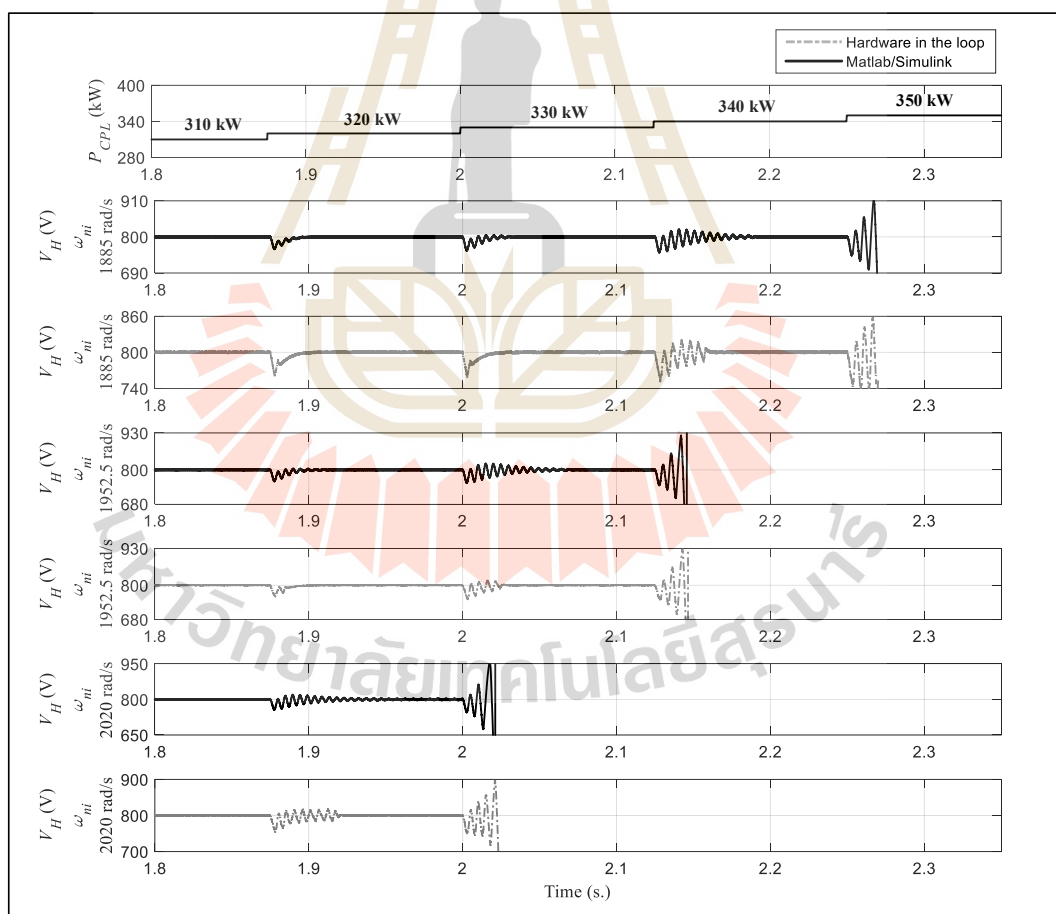


รูปที่ 6.9 การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเทียบกับ MATLAB/Simulink
กรณีผลกระทบของค่า ω_{nv}

ผลกระทบของค่า ω_m เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์บน MATLAB/Simulink ดังแสดงในรูปที่ 6.9 พบว่าผลจากทั้งสองกรณีสอดคล้องกัน โดยระบบเกิดการขาดเสถียรภาพในจุดเดียวกันที่ค่ากำลังไฟฟ้า 350 kW, 340 kW และ 330 kW เมื่อค่า ω_m เท่ากับ 170.4 rad/s, 176.3 rad/s และ 182.6 rad/s ตามลำดับ

4) ผลกระทบของแบนด์วิดท์ความถี่ธรรมชาติของลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า

การประเมินผลกระทบของแบนด์วิดท์ความถี่ธรรมชาติของลูบควบคุมกระแสไฟฟ้าต่อเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ สามารถพิจารณาเส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า ω_{ni} ได้จากรูปที่ 5.13 (ในบทที่ 5) ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากโปรแกรม MATLAB แสดงได้ดังรูปที่ 6.10



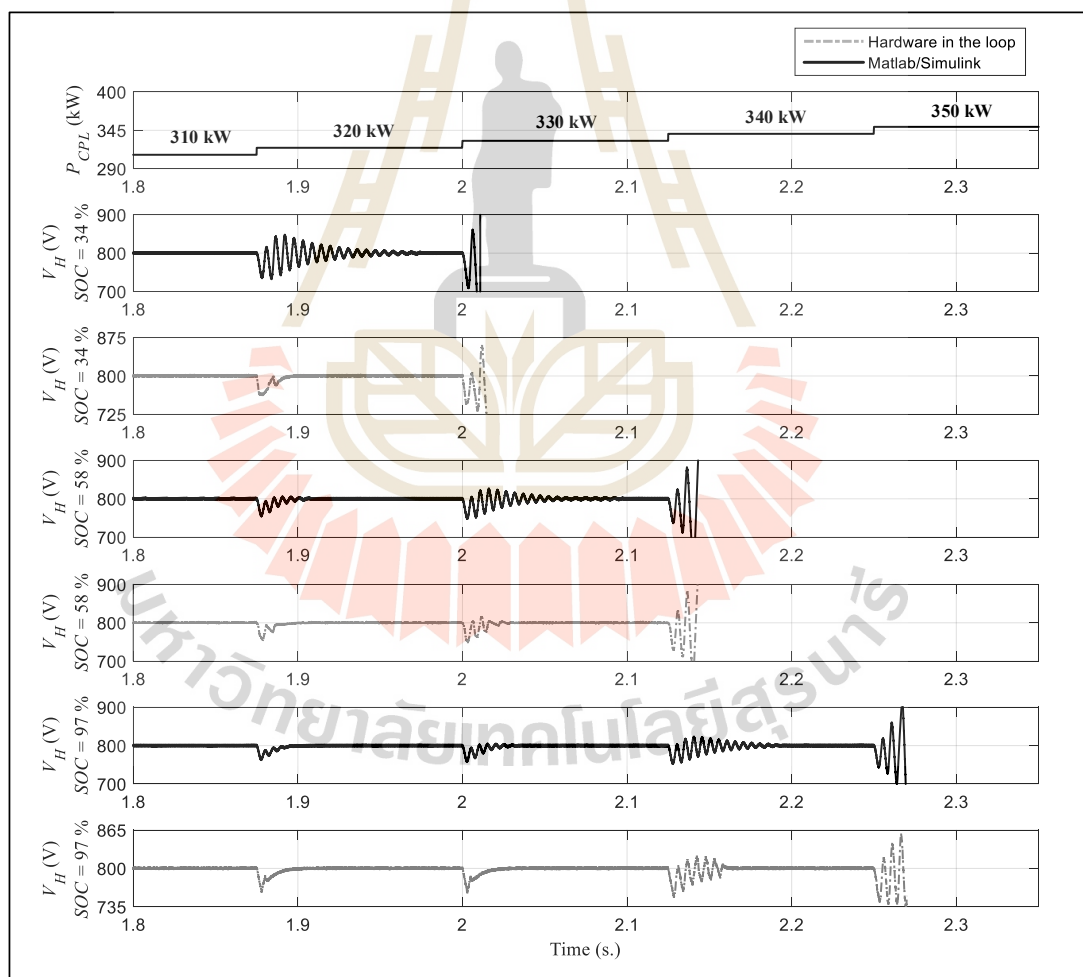
รูปที่ 6.10 การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูบเทียบกับ MATLAB/Simulink

กรณีผลกระทบของค่า ω_{ni}

ผลกระทบของค่า ω_{ni} เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์บน MATLAB/Simulink ดังแสดงในรูปที่ 6.10 พบว่าผลจากทั้งสองกรณีสอดคล้องกัน โดยระบบเกิดการขาดเสถียรภาพในจุดเดียวกันที่ค่ากำลังไฟฟ้า 350 kW, 340 kW และ 330 kW เมื่อค่า ω_{ni} เท่ากับ 1885 rad/s, 1952.5 rad/s และ 2020 rad/s ตามลำดับ

5) ผลกระทบของสถานะการชาร์จแบตเตอรี่

การประเมินผลกระทบของสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ต่อเสถียรภาพของระบบ ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ สามารถพิจารณาเส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า SOC สามารถดูได้จากรูปที่ 5.15 (ในบทที่ 5) ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากโปรแกรม MATLAB แสดงได้ดังรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.11 การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเทียบกับ MATLAB/Simulink
กรณีผลกระทบของค่า SOC

ผลกระทบของค่า SOC เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์บน MATLAB/Simulink ดังแสดงในรูปที่ 6.11 พบว่าผลจากทั้งสองกรณีสอดคล้องกัน โดยระบบเกิดการขาดเสถียรภาพในจุดเดียวกันที่ค่ากำลังไฟฟ้า 330 kW, 340 kW และ 350 kW เมื่อค่า SOC เท่ากับ 34%, 58% และ 97% ตามลำดับ

6.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบบเตอรี ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สมรรถนะสูง TMDSDOCK28335 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมพีไอที่ต่อแบบเรียงกัน ผลการยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการดังกล่าว พบว่าการจำลองด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปมีความสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์จากชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB โดยระบบเกิดการขาดเสถียรภาพที่จุดทำงานเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปสามารถสะท้อนพฤติกรรมและการตอบสนองเชิงพลวัตของระบบได้ใกล้เคียงกับการทำงานจริง อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้จากการประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ต่อเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบบเตอรียังสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาาระบบยานยนต์ไฟฟ้า พร้อมทั้งสามารถนำไปต่อยอดสำหรับงานวิจัยในอนาคตได้อีกด้วย



บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ โดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เริ่มต้นจากการศึกษาค้นคว้าปรัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ซึ่งพบว่าปัญหาสำคัญที่อาจเกิดขึ้นสำหรับระบบของยานยนต์ไฟฟ้า คือ แนวโน้มการขาดเสถียรภาพภายใต้พิกัดการทำงานของระบบ เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีการควบคุมจะมีลักษณะอิมพีแดนซ์ติดลบ ยังมีการเพิ่มกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นจะส่งผลให้ความหน่วงโดยรวมของระบบลดลงจนอาจเกิดการขาดเสถียรภาพได้ ทั้งนี้โหลดขับเคลื่อนในยานยนต์ไฟฟ้าจะมีพฤติกรรมดังที่กล่าวมาเนื่องจากเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจึงมีความจำเป็นเพื่อหลีกเลี่ยงจุดที่ระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพ งานวิจัยในอดีตถือเป็นพื้นฐานและองค์ความรู้ที่สำคัญในการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับพัฒนางานวิจัยวิทยานิพนธ์ รายละเอียดที่เกี่ยวกับผลงานวิจัยและการพัฒนาระบบสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

สถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้าที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ได้มีการกล่าวถึงโครงสร้างหลักของยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่ ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ ยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด ยานยนต์ไฟฟ้าแบบปลั๊กอินไฮบริด และยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำโครงสร้างของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่มาใช้เป็นกรณีศึกษา เนื่องจากมีโครงสร้างที่เรียบง่ายและเป็นระบบที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการประยุกต์กับยานยนต์ไฟฟ้าประเภทอื่นได้ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาของสถาปัตยกรรมยานยนต์ไฟฟ้างกล่าวว่ามีขอบเขตกำหนดไว้อย่างชัดเจน ได้แก่ ชุดแบตเตอรี่ วงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ และพิกัดโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ที่พิจารณาเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว นอกจากนี้ยังได้นำเสนอโหมดการทำงานของวงจรแปลงผันชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางและการออกแบบค่าพารามิเตอร์ ซึ่งได้อาศัยเทคนิคการประมาณ

การกระเพื่อมขนาดเล็กในสภาวะคงตัว เพื่อให้ได้สมการออกแบบที่สามารถใช้กำหนดค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันที่ใช้ในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา อีกทั้งยังได้นำหลักการของสมดุลพลังค์เชื่อมโยงในตัวเหนี่ยวนำและสมดุลประจุในตัวเก็บประจุ ทำให้ได้สมการของอัตราขยายแรงดันและสมการของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในสภาวะคงตัวที่ขึ้นอยู่กับค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ของวงจรแปลงผันระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทนี้จะถูกนำไปใช้ในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นลำดับถัดไป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ถูกนำเสนอไว้ในบทที่ 4 การพิสูจน์หาแบบจำลองจะเริ่มต้นจากการพิจารณาการประมาณแบบจำลองแบตเตอรี่ให้เป็นแบบจำลองอย่างง่าย โดยอาศัยการประมาณค่าทางคณิตศาสตร์ผ่านวิธีการปรับเส้นโค้งให้เหมาะสมด้วยสมการเชิงเส้น เพื่อให้สามารถระบุค่าตัวแปรของแบบจำลองผ่านการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ แบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่ายที่ได้จะถูกนำไปรวมเข้ากับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เพื่อใช้ในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งจะช่วยให้สามารถพิจารณาพฤติกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ในสภาวะที่เสมือนจริง และสามารถพิจารณาพฤติกรรมของแบตเตอรี่โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เกิดสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ (*SOC*) มีการเปลี่ยนแปลงจากนั้นได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปภายใต้การประมาณค่าอันดับศูนย์ วิธีดังกล่าวสามารถกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจรแปลงผัน ทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาเหมาะต่อการนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบ นอกจากนี้การพิจารณาการประมาณค่าอันดับศูนย์ยังทำให้การคำนวณหรือการพิสูจน์หาแบบจำลองมีความง่ายและไม่ซับซ้อน เนื่องจากไม่พิจารณาผลกระทบของฮาร์มอนิกอันดับสูงด้วยเหตุผลที่ว่าฮาร์มอนิกส์ไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพ การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเริ่มจากการพิจารณาระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดำเนินการโดยเปรียบเทียบผลตอบสนองจากแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นกับผลตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้างำลังของ Simulink บนโปรแกรม MATLAB ผลการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นให้ผลตอบสนองที่มีความถูกต้องและมีความสอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้าที่ติชชีบัสแรงดันสูงยังคงไม่สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ 800 V เนื่องจากไม่มีตัวควบคุม ดังนั้นจึงได้มีการนำเสนอตัวควบคุมพีไอที่ต่อแบบเรียงกันเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ การต่อยอดและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจากกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมโดยการเพิ่มตัวควบคุมเข้าไปในระบบ โดยมีสองรูปแบบ ได้แก่ รูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ติชชีบัสแรงดันสูงและรูปควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ การออกแบบตัวควบคุมพีไอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้อาศัยวิธีการแบบดั้งเดิม ซึ่งสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการ

มาตรฐานของระบบอันดับสอง วิธีดังกล่าวเริ่มจากการหาพลาเน็ตของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เพื่อนำไปหาฟังก์ชันถ่ายโอน จากนั้นนำสัมประสิทธิ์ของพหุนามตัวหารในฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของแต่ละลูปควบคุมมาเทียบสัมประสิทธิ์กับสัมประสิทธิ์ตัวหารของสมการมาตรฐานระบบอันดับสอง ทำให้ได้สมการออกแบบตัวควบคุมพีไอของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากประกอบด้วยพจน์กำลังสองและผลคูณของตัวแปรสถานะ ไม่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เนื่องจากใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงซึ่งต้องอาศัยแบบจำลองเชิงเส้น ดังนั้นการทำให้แบบจำลองเป็นเชิงเส้นจึงมีความจำเป็น เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพได้อย่างเหมาะสม งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีขยายอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งเพื่อประมาณค่ารอบจุดปฏิบัติการของระบบ ผลลัพธ์ของแบบจำลองที่ได้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการตัวแปรสถานะของแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของระบบที่มีเมทริกซ์จาโคเบียน $A(x_0, u_0)$, $B(x_0, u_0)$, $C(x_0, u_0)$ และ $D(x_0, u_0)$ จากนั้นได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองดังกล่าว โดยเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของ Simulink บนโปรแกรม MATLAB ผลการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเชิงเส้นให้ผลตอบสนองที่มีความถูกต้องทั้งในสภาวะชั่วครู่และสภาวะคงตัว อีกทั้งยังสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ตีสืบสแรงดันสูงให้อยู่ในระดับ 800 V ได้อย่างเหมาะสม แม้ในกรณีที่ค่า SOC ของแบตเตอรี่จะลดลงก็ตาม การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ในบทที่ 4 นี้จึงมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งจะช่วยให้สามารถคาดการณ์จุดที่ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ถูกนำเสนอไว้ในบทที่ 5 โดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และแสดงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้วิธีการดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น สามารถดำเนินการได้โดยเริ่มต้นจากการนำเมทริกซ์จาโคเบียนหรือเมทริกซ์ $A(x_0, u_0)$ ที่ได้มาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาคำนวณหาค่าเจาะจงหรือโพลของระบบ การวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถพิจารณาเฉพาะคู่โพลเด่น เนื่องจากเป็นโพลที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพมากที่สุดและเป็นตัวกำหนดลักษณะของผลการตอบสนองหลักของระบบ ซึ่งการวิเคราะห์ตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของคู่โพลเด่นจะช่วยบ่งบอกหรือคาดการณ์จุดที่ระบบอาจเกิดการขาดเสถียรภาพได้ สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องจากการวิเคราะห์เสถียรภาพอาศัยการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของ Simulink บนโปรแกรม MATLAB เพื่อแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ตีสืบสแรงดันสูงเกิดการขาดเสถียรภาพตรงตามผลการวิเคราะห์ในทางทฤษฎี การคาดการณ์จุดที่อาจทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพสามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง

เพื่อหลีกเลี่ยงการทำงานที่จุดดังกล่าว อีกทั้งการขาดเสถียรภาพยังทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่นอกขอบเขตมาตรฐาน ISO 21498-1 และ ISO 21498-2 ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ในระบบยานยนต์และเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน นอกจากนี้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่อเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ ซึ่งถือเป็นแนวทางสำคัญสำหรับวิศวกรในการออกแบบระบบยานยนต์ไฟฟ้า การประเมินผลกระทบดังกล่าวช่วยให้สามารถคาดการณ์จุดทำงานที่อาจทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงที่ค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่าง ๆ ผลจากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อค่า L เพิ่มขึ้น ระบบจะมีแนวโน้มการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวน้อยลง เช่นเดียวกับค่าความถี่ธรรมชาติของลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้า ω_m และลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า ω_{ni} ที่แสดงพฤติกรรมในลักษณะเดียวกันกับค่า L ในทางตรงข้ามหากค่า C หรือ SOC เพิ่มขึ้น ระบบจะมีแนวโน้มการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวมากขึ้น สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องดำเนินการโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของ Simulink บนโปรแกรม MATLAB ผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์มีความสอดคล้องกับเส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพที่คาดการณ์ไว้จากทฤษฎี อย่างไรก็ตามเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์เสถียรภาพจึงได้นำเสนอการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ อีกทั้งยังเพิ่มความมั่นใจในการนำไปต่อยอดงานวิจัยในอนาคต

ส่วนสุดท้ายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ทำการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ ซึ่งนำเสนอเนื้อหาไว้ในบทที่ 6 เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ ในการยืนยันผลดังกล่าวจะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMDSDOCK28335 ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมพีไอต่อแบบเรียงกัน เพื่อทดสอบการตอบสนองของระบบในสถานการณ์เดียวกันกับการจำลองสถานการณ์ด้วย Simulink ผลจากฮาร์ดแวร์ในลูบยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยแสดงให้เห็นว่าการขาดเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าที่ดิสชาร์จแรงดันสูง สอดคล้องกับผลการจำลองบน MATLAB/Simulink ทำให้มั่นใจได้ว่าองค์ความรู้ที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพ รวมไปถึงการประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ต่อเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่มีความถูกต้อง และสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับวิศวกรในการออกแบบและพัฒนาระบบทางด้านยานยนต์ไฟฟ้าได้ในอนาคต

7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

งานวิจัยในอนาคตควรมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ เนื่องจากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจะเป็นเพียงกระบวนการวิเคราะห์เพื่อคาดการณ์จุดที่ระบบเกิดการขาด

เสถียรภาพเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพหรือทำงานอย่างมีเสถียรภาพตลอดย่านพิกัดของระบบ

งานวิจัยในอนาคตควรมีการวิเคราะห์ความคงทนต่อเสถียรภาพของระบบ (stability robustness) และประเมินเสถียรภาพของระบบเมื่อพารามิเตอร์ที่สำคัญในระบบยานยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่มีการเปลี่ยนแปลง ภายใต้ผลกระทบที่เกิดจากสภาวะความไม่แน่นอนของระบบ



รายการอ้างอิง

- กองพัน อารีรักษ์ (2564). **แบบจำลองวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลัง**. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: บริษัท จรัสสินทวงศ์ จำกัด
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2568). **แนวทางการส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้า**. เข้าถึงได้จาก <https://www.eppo.go.th/index.php/en/component/k2/item/17415-ev-charging-221064-04> [เข้าถึงเมื่อ 1 มีนาคม 2568].
- Aghabali, I., Bauman, J., Kollmeyer, P. J., Wang, Y., Bilgin, B., & Emadi, A. (2021). 800-V electric vehicle powertrains: Review and analysis of benefits, challenges, and future trends. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, 7(3), 927–948.
- Amin, M., & Molinas, M. (2017). Small-signal stability assessment of power electronics based power systems: A discussion of impedance- and eigenvalue-based methods. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 53(5), 5014–5030.
- Anun, M., Ordonez, M., Zurbriggen, I. G., & Oggier, G. G. (2015). Circular switching surface technique: High-performance constant power load stabilization for electric vehicle systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 30(8), 4560–4572.
- Areerak, K.-N., Bozhko, S., Asher, G. M., De Lillo, L., & Thomas, D. W. P. (2012). Stability study for a hybrid AC-DC more-electric aircraft power system. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, 48(1), 329–347.
- Areerak, K.-N., Sopapirm, T., Bozhko, S., Hill, C. I., Suyapan, A., & Areerak, K.-L. (2018). Adaptive stabilization of uncontrolled rectifier based AC-DC power systems feeding constant power loads. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 33(10), 8927–8935.
- Areerak, K.-N., Wu, T., Bozhko, S. V., Asher, G. M., & Thomas, D. W. P. (2011). Aircraft power system stability study including effect of voltage control and actuators dynamic. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, 47(4), 2574–2589.

- 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.
- Beraki, M. W., Trovão, J. P. F., Perdigão, M. S., & Dubois, M. R. (2017). Variable inductor based bidirectional DC–DC converter for electric vehicles. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 66(10), 8764–8772.
- Daengdon, S., Suyapan, A., Areerak, K.-N., & Pakdeeto, J. (2025). Stability investigation of an AC-DC power system feeding a buck converter controlled by sliding mode controller. **IEEE Access**, 13, 116234–116245.
- Du, W., Nguyen, Q. H., Wang, S., Kim, J., Liu, Y., & Zhu, S. (2024). Positive-sequence modeling of droop-controlled grid-forming inverters for transient stability simulation of transmission systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 39(3), 1736–1748.
- 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), 967–984.
- 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.
- Emadi, A. (2004). Modeling of power electronic loads in AC distribution systems using the generalized state-space averaging method. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 51(5), 992–1000.
- 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), 1112–1125.
- Erickson, R. W., & Maksimović, D. (2001). **Fundamentals of power electronics (2nd ed.)**. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer.
- Gamelin, T. W. (2001). **Complex Analysis**. Springer.

- Gao, F., & Bozhko, S. (2016). Modeling and impedance analysis of a single DC bus-based multiple-source multiple-load electrical power system. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, 2(3), 335–346.
- Hosseinpour, H., MansourLakouraj, M., Ben-Idris, M., & Livani, H. (2023). Large-signal stability analysis of inverter-based AC microgrids: A critical and analytical review. **IEEE Access**, 11, 111466–111491.
- Hren, A., Truntiĉ, M., & Mihaliĉ, F. (2023). A survey on the state-of-the-art and future trends of multilevel inverters in BEVs. **Electronic Journal**, 12(13), 1–25.
- Husain, I., Ozpineci, B., Islam, M. S., Gulpinar, E., Su, G. J., Yu, W., Chowdhury, S., Xue, L., Rahman, D., & Sahu, R. (2021). Electric drive technology trends, challenges, and opportunities for future electric vehicles. **Proceedings of the IEEE**, 109(6), 1039–1059.
- International Energy Agency. (2021). **Global EV Outlook 2021**. Retrieved March 1, 2025, from <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>
- 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**.
- Jung, C. (2017). Power up with 800-V systems: The benefits of upgrading voltage power for battery electric passenger vehicles. **IEEE Electrification Magazine**, 5(1), 53–58.
- Jusoh, A. B. (2004). The instability effect of constant power loads. In **Proceedings of the 2004 National Power and Energy Conference (PECon)**, 175–179.
- Kabalan, M., Singh, P., & Niebur, D. (2017). Large signal Lyapunov-based stability studies in microgrids: A review. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 8(5), 2287–2295.

- Keerthi, A., & Dhanamjayulu, C. (2025). A thorough review of energy management and advanced control techniques for bi-directional DC-DC converters in electric vehicle applications. **Results in Engineering**, 27, Article 106726.
- 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.
- Khaligh, A., Rahimi, M., & Emadi, A. (2008). Modified pulse-adjustment technique to control DC/DC converters driving variable constant-power loads. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 55(3), 1133–1146.
- Li, J., Wu, H., Zhan, X., & Gan, D. (2024). Estimation of the region of attraction of polynomial swing equation using sum of squares theory. **Energies**, 17(5), Article 1050.
- Lyu, X., Wang, X., Che, Y., & Li, L. (2023). Dynamic phasor modeling and low-frequency oscillation analysis of single-phase vehicle-grid system. **CSEE Journal of Power and Energy Systems**, 9(1), 158–171.
- Mahdavi, J., Emadi, A., Bellar, M. D., & 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.
- Motwani, J. K., Xue, Y., Nazari, A., Dong, D., Cvetkovic, I., & Boroyevich, D. (2022). Modeling of power electronics systems and PWM modulators in harmonic-state space. **IEEE Open Journal of Power Electronics**, 3, 689–704.
- Nimitti, F. G., Giacomini, J. C., & Andrade, A. M. S. S. (2023). Dual-stacked bidirectional boost/buck DC-DC converter. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 70(9), 8873–8882.
- Pakdeeto, J., Areerak, K.-N., & Areerak, K.-L. (2018). Modelling and stability analysis of AC-DC power systems feeding a speed controlled DC motor. **Journal of Electrical Engineering & Technology**, 13(4), 1566–1577.
- Pakdeeto, J., Areerak, K.-N., Bozhko, S., & Areerak, K.-L. (2021). Stabilization of DC microgrid systems using the loop-cancellation technique. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, 9(3), 2652–2663.

- Pakdeeto, J., Thanommuang, A., Chaicharoenudomrung, K., Areerak, K., & Areerak, K. (2021). The Effect of Parameter Variations of System Stability for AC-DC Power System Feeding Controlled Buck Converter. In **2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)**, 524–527.
- Pakdeeto, J., Thanommuang, A., Areerak, K.-L., & Areerak, K.-N. (2024). Averaged model of DCMGS with PV arrays for traction substation in heavy rail systems. **Suranaree Journal of Science and Technology**, 30(6), Article 010265.
- 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**, 12, 107704–107718.
- Phosung, R., Areerak, K.-N., & Areerak, K.-L. (2024). Improvement in the stability of DC electrical power distribution systems in more electric aircraft. **IEEE Access**, 12, 100908–100920.
- Phosung, R., Areerak, K.-N., Sopapirm, T., & Areerak, K.-L. (2022). Design and optimization of instability mitigation for AC–DC feeder systems with constant power loads using artificial intelligence techniques. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 37(5), 5385–5397.
- 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, 155–170.
- Riccobono, A., & Santi, E. (2014). Comprehensive review of stability criteria for DC power distribution systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 50(5), 3525–3535.
- Rivetta, C. H., Emadi, A., Williamson, G. A., Jayabalan, R., & Fahimi, B. (2006). Analysis and control of a buck DC–DC converter operating with constant power load in sea and undersea vehicles. **IEEE Transactions on Industrial Applications**, 42(2), 559–572.
- Sanders, S. R., Noworolski, J. M., Liu, X. Z., & Verghese, G. C. (1991). Generalized averaging method for power conversion circuits. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 6(2), 251–259.

- Sanguesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F. J., & Marquez-Barja, J. M. (2021). A review on electric vehicles: Technologies and challenges. **Smart Cities**, 4(1), 372–404.
- Solsona, J. A., Jorge, S. G., & Busada, C. A. (2015). Nonlinear control of a buck converter which feeds a constant power load. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 30(12), 7193–7201.
- Susanna, S., Dewangga, B. R., Wahyungoro, O., & Cahyadi, A. I. (2019). Comparison of simple battery model and Thevenin battery model for SOC estimation based on OCV method. In **2019 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)**, 738–743.
- Suyapan, A., Areerak, K.-N., Bozhko, S., Shen, S. Y., & Areerak, K.-L. (2021). Adaptive stabilization of a permanent magnet synchronous generator-based DC electrical power system in more electric aircraft. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, 7(4), 2965–2975.
- Thakkar, R. R. (2022). Electrical equivalent circuit models of lithium-ion battery. In K. E. Okedu (Ed.), **Management and applications of energy storage devices**. IntechOpen.
- Tremblay, O., & Dessaint, L.-A. (2009). Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. **World Electric Vehicle Journal**, 3(2), 289–298.
- Tuluhong, A., Xu, Z., Chang, Q., & Song, T. (2025). Recent developments in bidirectional DC-DC converter topologies, control strategies, and applications in photovoltaic power generation systems: A comparative review and analysis. **Electronics**, 14(2), Article 389.
- Un-Noor, F., Padmanaban, S., Mihet-Popa, L., Mollah, M. N., & Hossain, E. (2017). A comprehensive study of key electric vehicle (EV) components, technologies, challenges, impacts, and future direction of development. **Energies**, 10(8), Article 1217.
- Wang, C., Zheng, P., & Bauman, J. (2023). A review of electric vehicle auxiliary power modules: Challenges, topologies, and future trends. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 38(9), 11233–11244.

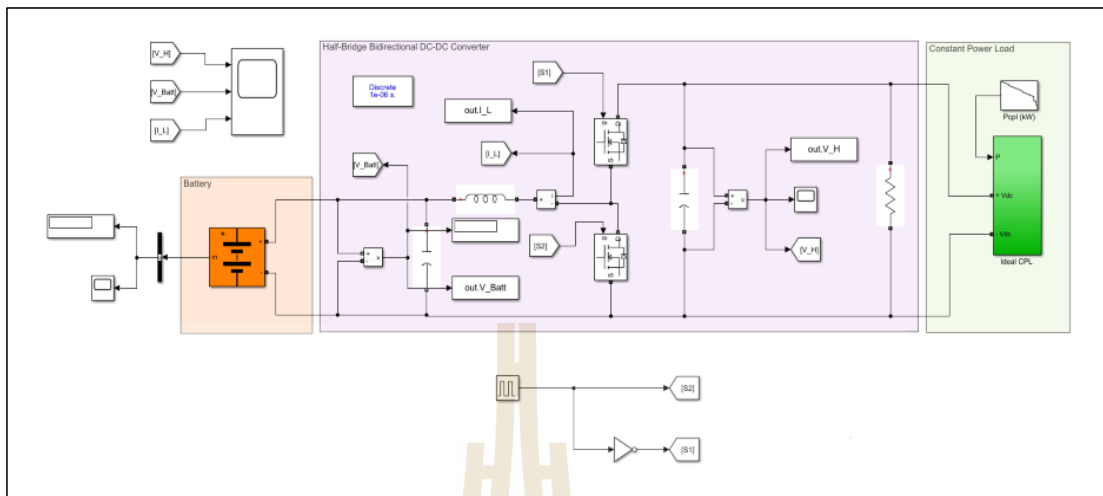
- Wang, J., Wang, B., Zhang, L., Wang, J., Shchurov, N. I., & Malozyomov, B. V. (2022). Review of bidirectional DC–DC converter topologies for hybrid energy storage system of new energy vehicles. **Green Energy & Intelligent Transportation**, 1(2), Article 100010.
- Wang, L., Deng, X., Han, P., Qi, X., Wu, X., Li, M., & Xu, H. (2019). Electromagnetic transient modeling and simulation of power converters based on a piecewise generalized state space averaging method. **IEEE Access**, 7, 12241–12251.
- Yang, W., Ruan, J., Yang, J., & Zhang, N. (2020). Investigation of integrated uninterrupted dual input transmission and hybrid energy storage system for electric vehicles. **Applied Energy**, 262, 114446.
- Yuksel, T., & Michalek, J. J. (2015). Effects of regional temperature on electric vehicle efficiency, range, and emissions in the United States. **Environmental Science & Technology**, 49, 3974–3980.
- Zhang, J., Lai, J.-S., Kim, R.-Y., & Song, W. (2007). High-power density design of a soft-switching high-power bidirectional dc–dc converter. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 22(4), 1145–1153.
- Zhang, X., Vilathgamuwa, D. M., Tseng, K.-J., Singh, B., & Gajanayake, C. J. (2013). Power buffer with model predictive control for stability of vehicular power systems with constant power loads. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 28(12), 5804–5812.



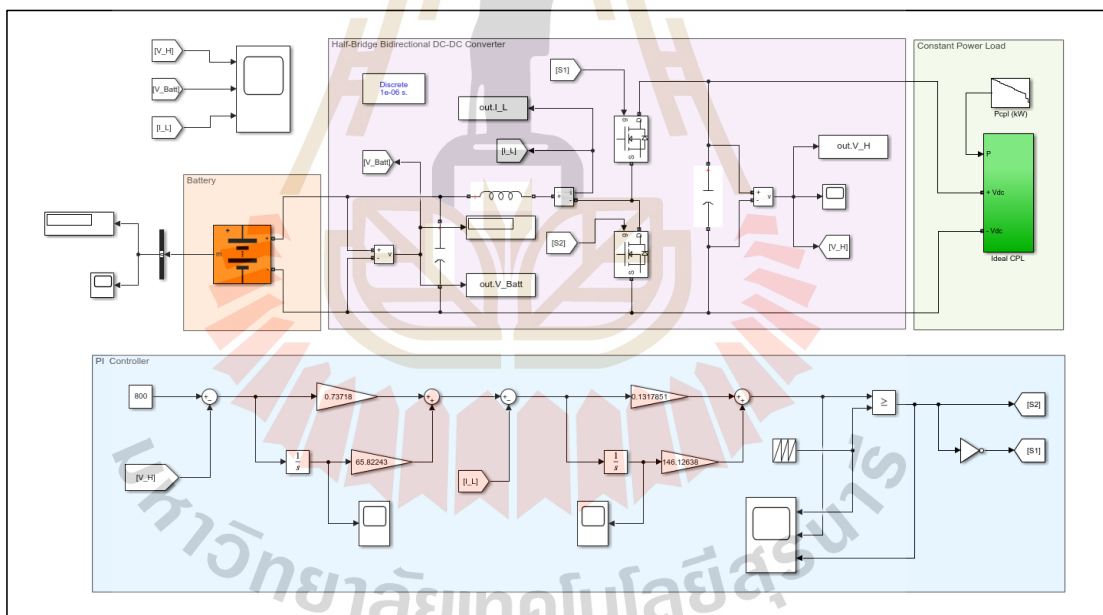
ภาคผนวก ก

ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB

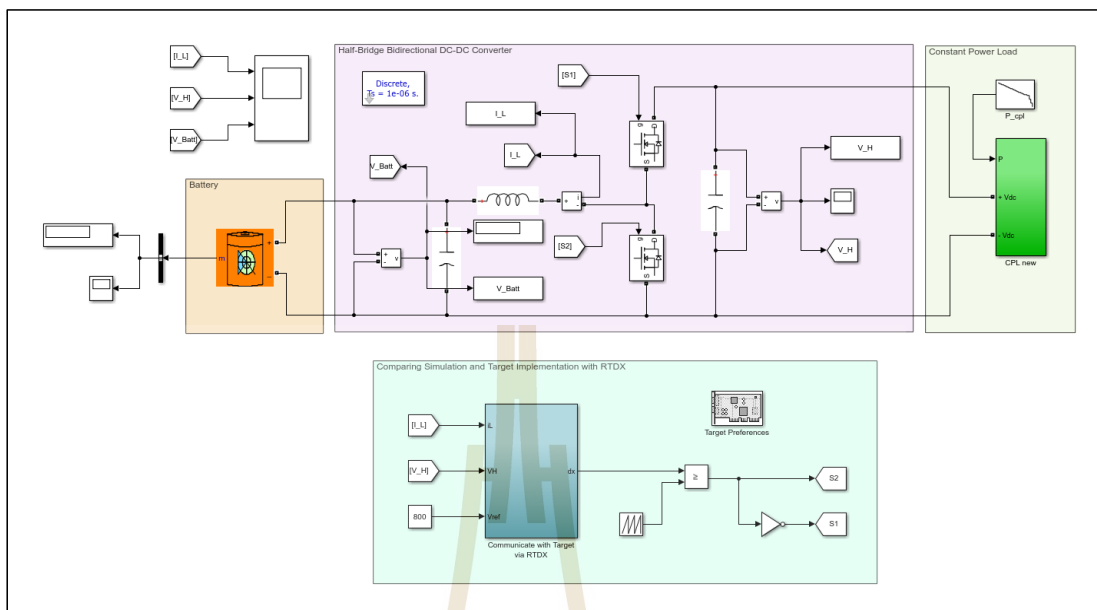
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ก.1 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้า
ที่พิจารณากรณีไม่มีตัวควบคุม



รูปที่ ก.2 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้า
ที่พิจารณากรณีมีตัวควบคุม



รูปที่ ก.3 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person sitting on a pedestal, surrounded by a circular emblem with a book and a sunburst. The entire logo is encircled by a ring of red and orange triangular shapes.

ภาคผนวก ข

โค้ดที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โค้ดที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่
กรณีที่ไม่มีตัวควบคุม

%% กำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบ

Voc = 624.947;

Rint = 0.0669;

Rload = 1.684;

L = 3.45e-3;

C = 2287e-6;

CBatt = 19.846e-6;

d = 0.2888;

%% ช่วงเวลาสแต็ปโพลด์ที่ค่ากำลังไฟฟ้าต่าง ๆ

timeSteps = [0, 0.125, 0.25, 0.375, 0.5, 0.625, 0.75, 0.875, ...

1, 1.125, 1.25, 1.375, 1.5, 1.625, 1.75, 1.875, ...

2, 2.125, 2.25, 2.375, 2.5, 2.625];

PcplValues = [50e3, 100e3, 150e3, 200e3, 210e3, 220e3, 230e3, 240e3, ...

250e3, 260e3, 270e3, 280e3, 290e3, 300e3, 310e3, 320e3, ...

330e3, 340e3, 350e3, 360e3, 370e3, 380e3];

%% ฟังก์ชันที่ใช้ในการสแต็ปโพลด์

P_star_func = @(t) interp1(timeSteps, PcplValues, t, 'previous', 'extrap');

%% ตั้งค่าเวลาที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

tsamp = 1e-6; % sampling time

tend = 1.74;

tspan = 0: tsamp: tend;

x0 = [0; 800; 0];

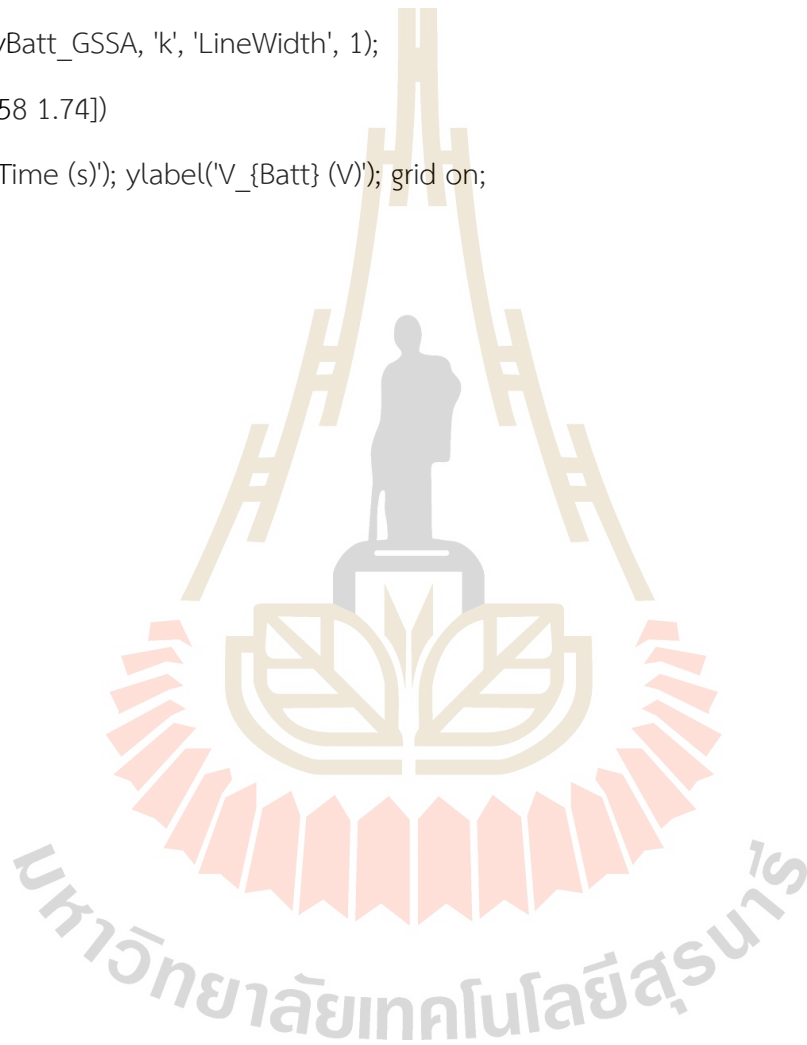
%% ฟังก์ชัน ODE

```

dxdt = @(t, x) [
    ((d * x(2)) - x(2) + x(3)) / L ;
    (x(1) - (x(1) * d) - (x(2) / Rload) - (P_star_func(t) / x(2))) / C ;
    - (x(1) / CBatt) + (Voc / (Rint * CBatt)) - (x(3) / (Rint * CBatt)) ;
];
%% ตั้งค่าตัวเลือก ODE
options = odeset('RelTol',1e-6, 'AbsTol',1e-4);
%% แก้สมการ ODE เพื่อหาคำตอบ
tic;
[t, x] = ode15s(dxdt, tspan, x0, options);
odeTime = toc; % เวลาในการแก้สมการ ODE
fprintf('ODE simulation time: %.6f seconds\n', odeTime);
%% ผลลัพธ์ของ iL, vH และ vBatt ที่ได้จากการแก้สมการ ODE
iL_GSSA = x(:, 1);
vH_GSSA = x(:, 2);
vBatt_GSSA = x(:, 3);
%% พล็อตกราฟของผลลัพธ์ที่ได้
figure(10)
subplot(4,1,1) % subplot 1
plot(t, P_star_func(t)/1000, 'k','LineWidth',1);
xlim([1.58 1.74])
title('SOC = 97%')
ylabel('P_{CPL} (kW)'); grid on;
subplot(4, 1, 2); % subplot 2
plot(t, iL_GSSA, 'k', 'LineWidth', 1);
xlim([1.58 1.74])
ylabel('i_{L} (A)'); grid on;

```

```
subplot(4, 1, 3);      % subplot 3
plot(t, vH_GSSA, 'k', 'LineWidth', 1);
xlim([1.58 1.74])
ylabel('V_{H} (V)'); grid on;
subplot(4, 1, 4);      % subplot 4
plot(t, vBatt_GSSA, 'k', 'LineWidth', 1);
xlim([1.58 1.74])
xlabel('Time (s)'); ylabel('V_{Batt} (V)'); grid on;
```



โค้ดที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่
กรณีที่มีตัวควบคุม

%% กำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบ

Voc = 624.947;

Rint = 0.0669;

L = 3.45e-3;

C = 2287e-6;

CBatt = 19.846e-6;

%% กำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ

Kpv = 0.73718;

Kiv = 65.8224;

Kpi = 0.19430;

Kii = 215.442;

Vo_star = 800;

Ar = 10;

%% ช่วงเวลาสแต็ปโพลด์ที่ค่ากำลังไฟฟ้าต่าง ๆ

timeSteps = [0, 0.125, 0.25, 0.375, 0.5, 0.625, 0.75, 0.875, ...

1, 1.125, 1.25, 1.375, 1.5, 1.625, 1.75, 1.875, ...

2, 2.125, 2.25, 2.375, 2.5, 2.625];

PcplValues = [50e3, 100e3, 150e3, 200e3, 210e3, 220e3, 230e3, 240e3, ...

250e3, 260e3, 270e3, 280e3, 290e3, 300e3, 310e3, 320e3, ...

330e3, 340e3, 350e3, 360e3, 370e3, 380e3];

%% ฟังก์ชันที่ใช้ในการสแต็ปโพลด์

P_star_func = @(t) interp1(timeSteps, PcplValues, t, 'previous', 'extrap');

%% ตั้งค่าเวลาที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

```

tsamp = 1e-6;          % sampling time

tend = 1.74;

tspan = 0:tsamp:tend;

x0 = [0; 800; 0; 0; 0];

%% ฟังก์ชัน ODE สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่มีตัวควบคุม
dxdt = @(t, x) [
    (x(3) / L) - (x(2) / L) + (((Kpi * Kpv * Vo_star - Kpi * Kpv * x(2) + Kpi * Kiv ...
    * x(4) - Kpi * x(1) + Kii * x(5))) * x(2) / (Ar * L));
    (x(1) / C) + ((- Kpi * Kpv * Vo_star + Kpi * Kpv * x(2) - Kpi * Kiv * x(4) ...
    + Kpi * x(1) - Kii * x(5)) * x(1) / (Ar * C)) - (P_star_func(t) / (x(2) * C));
    - (x(1) / CBatt) + (Voc / (Rint * CBatt)) - (x(3) / (Rint * CBatt));
    - (x(2)) + (Vo_star);
    - (x(1)) - (Kpv * x(2)) + (Kiv * x(4)) + (Kpv * Vo_star);
];

%% แก้สมการ ODE เพื่อหาคำตอบ
tic;

[t, x] = ode15s(dxdt, tspan, x0);

odeTime = toc; % เวลาในการ solve ODE

% แสดงผลเวลา ODE
fprintf('ODE simulation time: %.6f seconds\n', odeTime);

%% ผลลัพธ์ของ iL, vH และ vBatt ที่ได้จากการแก้สมการ ODE
iL_GSSA = x(:, 1);
vH_GSSA = x(:, 2);
vBatt_GSSA = x(:, 3);

%% พล็อตกราฟของผลลัพธ์ที่ได้
figure(10)

subplot(4,1,1)          % subplot 1

```

```

plot(t, P_star_func(t)/1000, 'k','LineWidth',1);
xlim([1.58 1.74])
title('SOC = 97%')
ylabel('P_{CPL} (kW)'); grid on;
subplot(4, 1, 2);      % subplot 2
plot(t, iL_GSSA, 'k', 'LineWidth', 1);
xlim([1.58 1.74])
ylabel('i_{L} (A)'); grid on;
subplot(4, 1, 3);      % subplot 3
plot(t, vH_GSSA, 'k', 'LineWidth', 1);
xlim([1.58 1.74])
ylabel('V_{H} (V)'); grid on;
subplot(4, 1, 4);      % subplot 4
plot(t, vBatt_GSSA, 'k', 'LineWidth', 1);
xlim([1.58 1.74])
xlabel('Time (s)'); ylabel('V_{Batt} (V)'); grid on;

```

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a golden-yellow structure resembling a traditional Thai temple roof or a stylized 'A' shape. Inside this structure is a grey silhouette of a person standing on a pedestal. Below the person is a circular emblem with a lotus-like design. At the bottom of the logo is a semi-circular border with red and orange triangular segments.

ภาคผนวก ค

โปรแกรมภาษาซีสำหรับจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป
ในบอร์ด TMDSDOCK28335

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

 โปรแกรมภาษาซีสำหรับจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในบอร์ด TMDSDOCK28335

// ประกาศไฟล์ส่วนหัว

#include "target.h" // ไฟล์ header

#include <rtdx.h> // ไบบริารี RTDX สื่อสารระหว่าง MATLAB/Simulink กับบอร์ด DSP

// กำหนดค่าช่วงเวลาในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 10 μ s

#define Ts 1e-5

// ประกาศตัวแปรสัญญาณของตัวควบคุมพีไอ

float VH;

float Vref;

float iL;

float d_x;

float iL_ref;

// กำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ

const float kp_v = 0.651795, kiv = 51.4575;

const float kpi = 0.1717754, kii = 168.39045;

// ตัวแปรเก็บค่าความคลาดเคลื่อนและผลรวมของตัวควบคุมพีไอ

float int_v = 0.0;

float int_i = 0.0;

float err_v = 0.0;

float err_i = 0.0;

// ช่องสื่อสาร RTDX อินพุตสำหรับรับข้อมูล iL, VH, Vref จาก MATLAB/Simulink

RTDX_CreateInputChannel(ichan1); // iL

RTDX_CreateInputChannel(ichan2); // VH

RTDX_CreateInputChannel(ichan3); // Vref

// ช่องสื่อสาร RTDX เอาต์พุตสำหรับส่งข้อมูล d_x กลับไปยัง MATLAB/Simulink

RTDX_CreateOutputChannel(ochan1); // d_x

```

void main()
{
    // ตั้งค่า target ของบอร์ด eZdsp™ F28335 (TMS320F28335)
    TARGET_INITIALIZE();
    // เปิดใช้งานช่อง RTDX ทั้งหมด
    RTDX_enableInput(&ichan1);
    RTDX_enableInput(&ichan2);
    RTDX_enableInput(&ichan3);
    RTDX_enableOutput(&ochan1);
    // ลูปหลัก (real-time loop)
    while (1) {
        // อ่านข้อมูล iL, VH, Vref จาก RTDX
        RTDX_read(&ichan1, &iL, sizeof(float));
        RTDX_read(&ichan2, &VH, sizeof(float));
        RTDX_read(&ichan3, &Vref, sizeof(float));
        // === ลูปควบคุมแรงดัน (ลูปนอก) ===
        err_v = Vref - VH;
        int_v += kiv * Ts * err_v;
        iL_ref = kpv * err_v + int_v;
        // === ลูปควบคุมกระแส (ลูปใน) ===
        err_i = iL_ref - iL;
        int_i += kii * Ts * err_i;
        d_x = kpi * err_i + int_i;
        // เช็คสถานะการทำงานของช่องสื่อสาร RTDX
        while (RTDX_writing != NULL) {
            #if RTDX_POLLING_IMPLEMENTATION // ใช้เรียก RTDX_Poll() เพื่ออัปเดตสถานะ
                RTDX_Poll();
            #endif
        }
    }
}

```

```
#endif  
  
}  
  
// ส่งข้อมูล d_x กลับไปยัง MATLAB/Simulink  
RTDX_write(&ochan1, &d_x, sizeof(float));  
  
}  
}
```



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person sitting on a pedestal, surrounded by a circular emblem with a book and a sunburst. The entire logo is encircled by a ring of red and orange triangular shapes.

ภาคผนวก ง

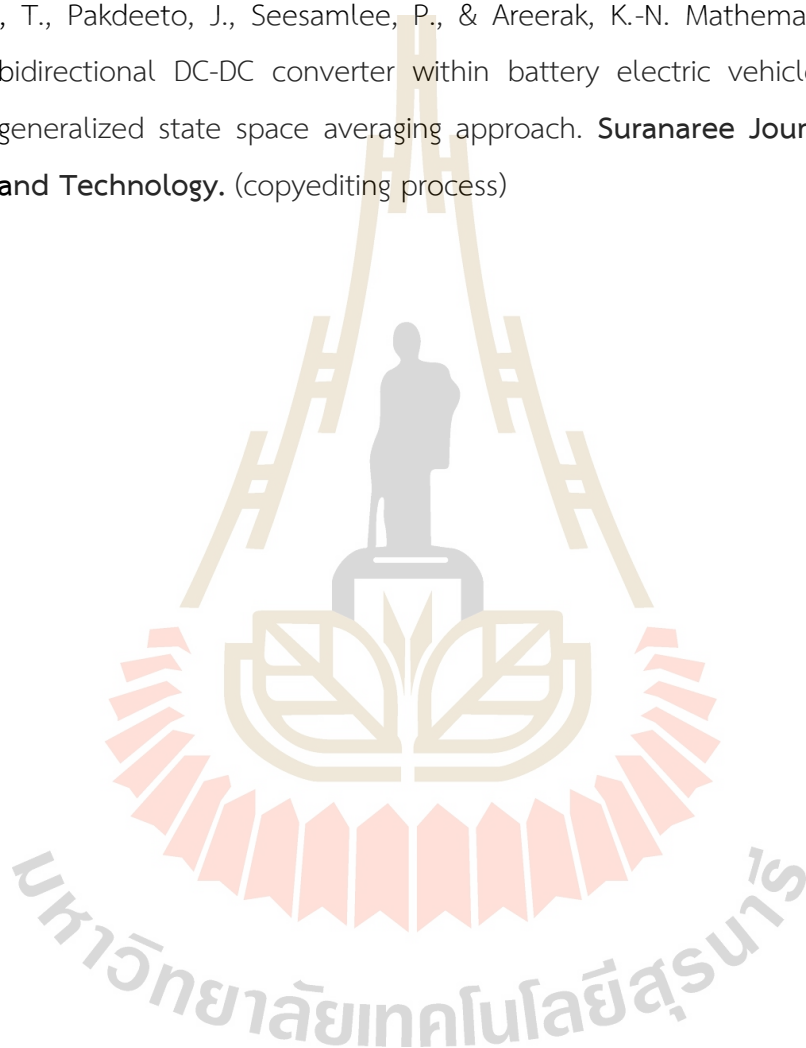
บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ธิตีพัทธ์ แทนรินทร์, กองพันธ์ อารีรักษ์, และ จักรกริช ภัคดีโต. (2567). การประเมินผลกระทบของ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบยานยนต์ไฟฟ้า. **การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47**, 213–216, พฤศจิกายน.

Thanrin, T., Pakdeeto, J., Seesamlee, P., & Areerak, K.-N. Mathematical model for bidirectional DC-DC converter within battery electric vehicle system using generalized state space averaging approach. **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



การประเมินผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบยานยนต์ไฟฟ้า Constant Power Load Effect Assessment on Electric Vehicle Systems

จิตติพัทธ์ แทนรินทร์¹ กองพันธ์ อารีรักษ์¹ และ จักรกฤษ กักดีโต^{2*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

*Corresponding author: jakkritpa@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ระบบทางไฟฟ้าของยานยนต์ดังกล่าวใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเกือบทั้งหมด วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีระบบควบคุมแบบวงปิดจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ซึ่งอาจทำให้ระบบของยานยนต์ดังกล่าวเกิดการขาดเสถียรภาพที่บางสภาวะการทำงานภายใต้ที่กีด วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนเป็นสองทิศทางที่มีตัวควบคุมมักถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมทิศทางของพลังงานที่ส่งผ่าน ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอการประเมินผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบยานยนต์ไฟฟ้า โดยอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยบล็อก SimPowerSystem บนโปรแกรม MATLAB ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในที่กีดการทำงานที่ 380 kW สำหรับการทดสอบได้มีการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดและทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรอง (C) ค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง (L) และสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ (SOC) เพื่อสังเกตผลตอบสนองของทิศทางพลังงานสูง จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าเมื่อค่า C ลดลง ค่า L เพิ่มขึ้น และ SOC ลดลง ระบบจะมีจุดขาดเสถียรภาพเร็วขึ้น

คำสำคัญ: ยานยนต์ไฟฟ้า โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ทิศเป็นทิศทางสองทิศทาง

Abstract

Currently, the trend of electric vehicle (EV) usage has increased. Almost all electrical systems in these vehicles might be power electronic circuits. The controlled power converters as the closed loop system behave as a constant power load (CPL) which affects the system stability. The operated system might be unstable under the rated power. The controlled bidirectional DC/DC converter may be used for high voltage DC (HVDC) bus regulation as a constant. Thus, this paper presents the constant power load effect assessment on EV Systems using the simulation results via the SimPowerSystem block set on the MATLAB program. The considered system in this paper has a rated power equal to 380 kW. For the evaluation process, the capacitance (C) and inductance (L) of the filter circuit are varied the state of charge (SOC) will be also changed in order to observe the HVDC bus response. The results show that the

system will be less stable operation when the values of C and SOC are decreased likewise the increasing value of L .

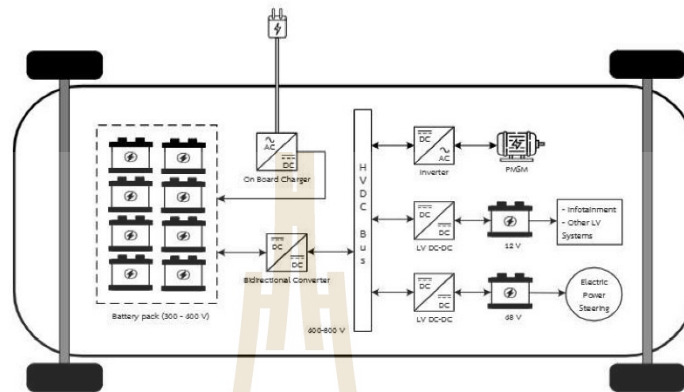
Keywords: Electric Vehicle, Constant Power Load, Bidirectional DC-DC Converter

1. บทนำ

ปัจจุบันยานยนต์ไฟฟ้ากำลังเป็นที่นิยมและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากแนวโน้มการใช้พลังงานโลกที่มุ่งไปสู่การใช้พลังงานที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้ลดลง รัฐบาลจากหลายประเทศทั่วโลก รวมถึงประเทศไทยสนับสนุนประชาชนให้หันมาใช้ยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากยานยนต์ดังกล่าวถือเป็นแนวทางที่สามารถช่วยลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่มาจากฟอสซิล สถาบันการขนส่งของยานยนต์ไฟฟ้ามี 3 รูปแบบ [1] คือ ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ (battery electric vehicles, BEV) ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด (hybrid electric vehicle, HEV) และยานยนต์ไฟฟ้าแบบปลั๊กอินไฮบริด (plug-in hybrid electric vehicle, PHEV) ในบทความนี้นำเสนอสถาบันการขนส่งของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่มีการใช้งานทิศทางพลังงานสูง 800 V [2-4] แสดงได้ดังรูปที่ 1 องค์ประกอบหลักที่สำคัญ คือ วงจรเรียงกระแส (rectifier) สำหรับรับกระแสไฟฟ้าจากยานยนต์ไฟฟ้า ชุดแบตเตอรี่สำหรับรับกระแสไฟฟ้าและแปลงเป็นแหล่งพลังงานหลักเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนรวมถึงอุปกรณ์ในส่วนต่าง ๆ ของยานยนต์ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเป็นทิศทางสองทิศทางใช้ในการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่ให้เป็นระดับแรงดันไฟฟ้าของทิศทางพลังงานสูงเพื่อให้ง่ายต่อการขับเคลื่อนมอเตอร์ วงจรอินเวอร์เตอร์ (inverter) สำหรับการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากทิศทางพลังงานสูงเป็นระดับไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ นอกจากนี้ยังมีวงจรแปลงผันสำหรับระบบอินโฟเทนเมนต์ (infotainment) เพื่ออำนวยความสะดวก พิจารณาจากสถาบันการขนส่งที่พบในระบบส่งกำลังของยานยนต์ไฟฟ้า (powertrain) เกือบทั้งหมดจะใช้วงจรแปลงผันกำลังเพื่อแปลงพลังงานให้กับส่วนต่าง ๆ ภายในยานยนต์ไฟฟ้า วงจรแปลงผันกำลังเหล่านี้มักถูกควบคุมให้มีแรงดันคงที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของการขับเคลื่อนที่จำเป็นต้องมีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ พฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังในรูปแบบระบบควบคุมวงปิดจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์แบบติดลบ [5] เป็นสาเหตุที่อาจส่งผลให้ระบบทางไฟฟ้าขาดเสถียรภาพ เมื่อเกิดสภาวะดังกล่าวอุปกรณ์ในระบบของยานยนต์ไฟฟ้าอาจได้รับความเสียหายและเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน นอกจากนี้การขาดเสถียรภาพยังส่งผลกระทบต่อ

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ: jakkritpa@kmutnb.ac.th

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



รูปที่ 1 สถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่

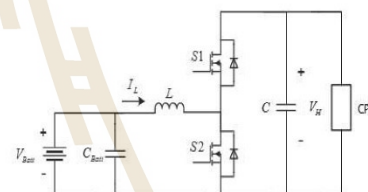
สมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมลดลง [6] ดังนั้นบทความนี้จึงได้ทำการประเมินผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในยานยนต์ไฟฟ้าผ่านการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB เพื่อคาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพของยานยนต์ไฟฟ้าแบบเตอรี่ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการนำไปปรับปรุงหรือพัฒนาให้ยานยนต์ไฟฟ้ามีเสถียรภาพและสมรรถนะที่ดีตลอดการทำงานภายใต้พิกัด

บทความนี้ประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงที่มาและความสำคัญ ส่วนที่ 2 เป็นการอธิบายระบบทางไฟฟ้าที่พิจารณา ส่วนที่ 3 เป็นการประเมินผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยการจำลองสถานการณ์ผ่านโปรแกรม MATLAB และส่วนที่ 4 เป็นการสรุปผล

2. ระบบที่พิจารณา

พิจารณาจากสถาปัตยกรรมของยานยนต์ไฟฟ้าในรูปที่ 1 จะตีกรอบเฉพาะส่วนของชุดแบตเตอรี่ วงจรแปลงผันกำลังซึ่งเป็นดิซีสเป็นสองทิศทาง และโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีตัวควบคุมจะถูกมองเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (constant power load, CPL) อย่างไรก็ตามในส่วนของโหลดที่มีระดับแรงดันต่ำ 12 V และ 48 V จะยังไม่ถูกพิจารณาในการประเมินผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว เนื่องจากมีผลกระทบไม่มากเมื่อเทียบกับโหลดขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีกำลังไฟฟ้าสูง [7] และถือเป็นส่วนสำคัญในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า สำหรับวงจรแปลงผันกำลังเป็นดิซีสเป็นสองทิศทางเป็นแบบฮาล์ฟบริดจ์ (half bridge bidirectional dc-dc converters) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 วงจรดังกล่าวมีการทำงานอยู่ 2 โหมดการทำงาน [8 - 9] คือ โหมดบูสต์ (boost mode) ที่เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าจากชุดแบตเตอรี่ให้เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ดิซีสแรงดันสูงใช้สำหรับโหมดการขับเคลื่อนมอเตอร์ (driving mode) และโหมดบัค (buck mode) ทำหน้าที่แปลงผันพลังงานสูญเสียขณะห้ามล้อ (regenerative break mode) เพื่อชาร์จพลังงานกลับเข้าสู่แบตเตอรี่ บทความนี้จะพิจารณาเฉพาะในโหมดบูสต์เท่านั้นเนื่องจากผลกระทบของโหลด

กำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อความเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้าโดยส่วนมากจะเกิดขึ้นเมื่ออยู่ในโหมดขับเคลื่อน



รูปที่ 2 วงจรแปลงผันกำลังดิซีสเป็นดิซีสฮาล์ฟบริดจ์

สำหรับตัวควบคุมที่ใช้กับระบบไฟฟ้าเป็นตัวควบคุมพีไอแบบ เรียงกัน ซึ่งจะมีอยู่สองรูปแบบการควบคุม คือ ควบคุมแรงดันไฟฟ้า ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ดิซีสแรงดันสูง และควบคุมกระแสไฟฟ้า ทำหน้าที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ โดยสมการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบเรียงกันของทั้งสองรูปแบบการควบคุมจะเป็นการออกแบบด้วยวิธีการเทียบสัมประสิทธิ์ [10] จากการออกแบบจะได้สมการเป็นไปตามสมการที่ (1) - (4)

สมการของลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้า

$$K_{pv} = 2C_s \omega_m C \quad (1)$$

$$K_{nv} = \omega_m^2 C \quad (2)$$

โดยที่ K_{pv} และ K_{nv} คือค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอและโอสำหรับลูบแรงดันไฟฟ้า และ C คือค่าความจุไฟฟ้า

สมการของลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า

$$K_{pi} = \frac{2C_s \omega_m A L}{V_{Batt}} \quad (3)$$

$$K_{ii} = \frac{\omega_m^2 A L}{V_{Batt}} \quad (4)$$

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



โดยที่ K_{pi} และ K_{H_i} คือค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีและไอ สำหรับรูปกระแสไฟฟ้า และ L คือค่าความเหนี่ยวนำ

การออกแบบตัวควบคุมของรูปแรงดันไฟฟ้าดังสมการที่ (1) และ (2) พบว่าค่า K_{pi} และ K_{H_i} จะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ ω_m , ζ_i และ C สำหรับการออกแบบตัวควบคุมรูปกระแสไฟฟ้าดังสมการที่ (3) และ (4) พบว่าค่า K_{pi} และ K_{H_i} จะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ ω_m , ζ_i , L และ V_{Bat} อย่างไรก็ตามบทความนี้พิจารณาแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่คงที่ 569 V เนื่องจากแบตเตอรี่จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเพียงเล็กน้อยเมื่อค่า SOC เปลี่ยนแปลง [11] ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอจะขึ้นอยู่กับค่า C และ L เป็นสำคัญ ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังตารางที่ 1 [4]

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบที่พิจารณา

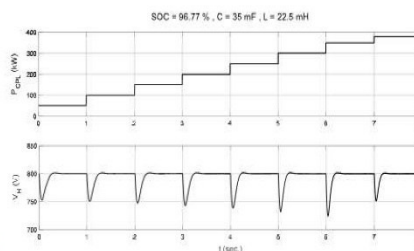
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_{Bat}	569 V	ระดับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่
V_H	800 V	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ชิปส์แรงดันสูง
f_{sw}	20 kHz	ความถี่การสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลัง
A_i	10	ค่าพิสัยสัญญาณสามเหลี่ยม
ω_m	20 rad/s	แบนด์วิธของรูปแรงดันไฟฟ้า
ω_{H_i}	200 rad/s	แบนด์วิธของรูปกระแสไฟฟ้า
ζ_i	0.85	อัตราส่วนการหน่วงของรูปแรงดันไฟฟ้า
ζ_i	0.85	อัตราส่วนการหน่วงของรูปกระแสไฟฟ้า

3. การประเมินผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

การประเมินผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์มีพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ 380 kW การเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดเปลี่ยนแปลงครั้งละ 50 kW ทุก ๆ 1 วินาที โดยเริ่มจาก 50 kW จนกระทั่ง 350 kW จากนั้นโหลดจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็น 380 kW ซึ่งเป็นพิกัดของระบบ การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าในรูปที่ 2 กำหนดให้สวิตช์ S2 ทำงาน ขณะที่สวิตช์ S1 หยุดการทำงาน

วงจรแปลงผันกำลังอาร์ฟบริดจ์จะเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่ 569 V ไปเป็น 800 V โดยอาศัยตัวควบคุมพีไอและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตารางที่ 1 ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ชิปส์แรงดันสูงที่สภาวะคงตัว (steady state) จะต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 3 V ตามมาตรฐาน ISO 21498-1:2021(E) [12] การทดสอบเพื่อประเมินผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การทดสอบแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 การทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงค่า C กรณีที่ 2 เป็นการทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงค่า L และกรณีที่ 3 การเปลี่ยนแปลงค่า SOC ซึ่งเป็นค่าที่ระบุสถานะในการชาร์จของแบตเตอรี่ อย่างไรก็ตามก่อนการประเมินผลกระทบในแต่ละกรณีกำหนดให้ค่า C เป็น 35 mF ค่า L เป็น 22.5 mH และ SOC เป็น 96.77 % ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ได้จากการออกแบบ เมื่อนำค่าที่กำหนดนี้ไปจำลองสถานการณ์พบว่าระบบไม่

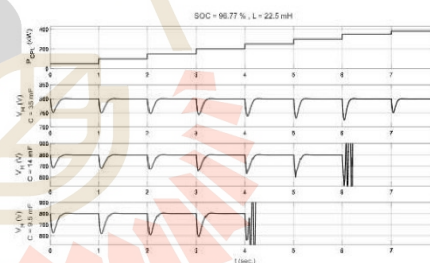
มีจุดขาดเสถียรภาพภายใต้การทำงานที่พิกัดดังผลตอบสนองของ V_H ในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลตอบสนอง V_H ก่อนการประเมินผลกระทบ

ผลตอบสนอง V_H ในรูปที่ 4 พบว่าระบบไม่มีจุดขาดเสถียรภาพ ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์อ้างอิงก่อนการทดสอบในแต่ละกรณีดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุจากเดิม C มีค่า 35 mF เป็นค่า C เท่ากับ 14 mF และ 9.5 mF ตามลำดับ ส่วนค่า L และ SOC ใช้ค่าเดียวกับการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 4 ผลตอบสนองที่ได้ในกรณีที่ 1 แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลตอบสนอง V_H เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า

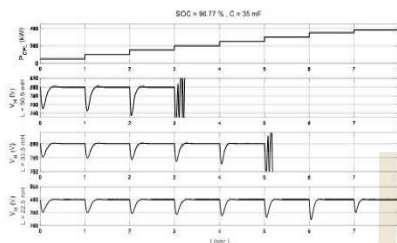
ผลตอบสนอง V_H เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุในรูปที่ 5 พบว่าเมื่อค่าของ C เท่ากับ 14 mF ระบบมีจุดขาดเสถียรภาพ 350 kW ที่เวลา 6 วินาที ส่วนที่ค่า C เท่ากับ 9.5 mF ระบบมีจุดขาดเสถียรภาพที่ 250 kW ที่เวลา 4 วินาที ดังนั้นการลดค่า C ส่งผลทำให้ระบบมีจุดขาดเสถียรภาพเร็วขึ้น

กรณีที่ 2 เปลี่ยนแปลงค่า L จากเดิม 22.5 mH เป็น 33.5 mH และ 50.5 mH ตามลำดับ ส่วนค่า C และ SOC ใช้ค่าเท่ากับการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 4 ผลตอบสนองที่ได้ในกรณีที่ 2 แสดงในรูปที่ 6

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47

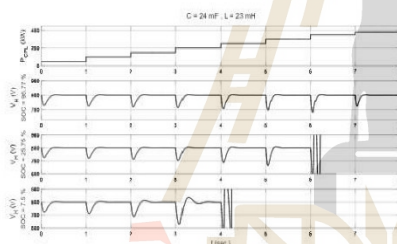
The 47th Electrical Engineering Conference (EECON-47)

วันที่ 13-15 พฤศจิกายน 2567 ณ โรงแรมเซ็นทาราและคอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดอุดรธานี



รูปที่ 6 ผลตอบสนองของ V_H เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ
ผลตอบสนอง V_H เมื่อเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำพบว่าระบบมีจุดขาด
เสถียรภาพเร็วขึ้น หากมีการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำ

กรณีที่ 3 เปลี่ยนแปลงค่า SOC จากเดิม 96.77 % เป็น 25.75 %
และ 7.5 % ตามลำดับ ส่วนค่า C มีค่า 24 mF และ L มีค่า 23 mH
ผลตอบสนองที่ได้ในกรณีที่ 3 แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผลตอบสนอง V_H เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า SOC

ผลตอบสนอง V_H ในรูปที่ 7 พบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า SOC ให้ลดลง
ระบบจะมีจุดขาดเสถียรภาพเร็วขึ้น

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอการประเมินผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวอาจทำให้
ระบบของยานยนต์ไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพ จึงได้อาศัยการจำลอง
สถานการณ์ด้วยบล็อก SimPowerSystem บนโปรแกรม MATLAB โดยใช้
วงจรแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นดิจิทัลซึ่งปรับจูนด้วยตัวควบคุม
ที่โอเวอร์โหลดมีความเหมาะสมต่อการใช้งานกับระบบของยานยนต์
ไฟฟ้า เนื่องจากสามารถแปลงระดับแรงดันค่าเป็นแรงดันสูงได้ในโหมดการ
ขับเคลื่อน นอกจากนี้ยังสามารถทำงานในโหมดลดทอนแรงดันสำหรับการ
ชาร์จแบตเตอรี่ได้อีกด้วย สำหรับการทดสอบจะทำการเปลี่ยนค่า C
ค่า L และ SOC เพื่อสังเกตผลตอบสนองของตัวบัสแรงดันสูง ผลการ
ทดสอบพบว่าระบบมีจุดขาดเสถียรภาพเร็วขึ้นเมื่อค่า C และ SOC

ลดลง ในทำนองเดียวกันเมื่อค่า L เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้มีจุดขาดเสถียรภาพ
เร็วขึ้นเช่นกัน ข้อสรุปดังกล่าวเป็นแนวทางที่สำคัญสำหรับวิศวกรเพื่อใช้ในการ
ออกแบบระบบไฟฟ้าในยานยนต์ไฟฟ้า ทั้งนี้การทดสอบดังกล่าวได้อาศัย
ฟังก์ชันของยานยนต์ไฟฟ้าตามท้องตลาดในประเทศ อีกทั้งยังคงเป็นเพียง
การประเมินผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวและการเปลี่ยนแปลง
ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้จากผลการจำลองสถานการณ์
เท่านั้น การต่อยอดงานวิจัยในอนาคตจะอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพ
ด้วยทฤษฎีระบบควบคุมเป็นลำดับถัดไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Byrne, D. I. Marketing and Transportation, "An engineer's guide to the DC power train architecture of an electric vehicle" Retrieved Mar 15, 2024, <https://www.tti.com/content/dam/ttiinc/resources/literature/TTIWO 1 8 - DC power train architecture for EVs-EN-FINAL.pdf>
- [2] A. Poorfakhraei, M. Narimani, and A. Emadi, "A Review of Multilevel Inverter Topologies in Electric Vehicles: Current Status and Future Trends", IEEE Open Journal of Power Electron., vol. 2, pp. 155-170, Mar. 2021.
- [3] I. Hussain, B. Ozpineci, M. S. Islam, E. Gurpinar, G. J. Su, W. Yu, S. Chowdhury, L. Xue, D. Rahman and R. Sahu, "Electric drive technology trends, challenges, and opportunities for future electric vehicles", Proceedings of the IEEE, vol. 109, no. 6, Jun. 2021.
- [4] A. Hren, M. Truntić and F. Mihalčić, "A Survey on the State-of-the-Art and Future Trends of Multilevel Inverters in BEVs", Electronic Journal, vol. 12, no. 13, pp. 1-25, Jul. 2023.
- [5] 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 Trans. Veh. Technol., vol. 55, no. 4, pp. 1112-1125, Jul. 2004.
- [6] S. Moussa, M. J. B. Ghorbal, I. Slama-Bellkhodja, J. P. Martin and S. Pierfederici, "DC bus voltage instability detection and stabilization under Constant Power Load variation", 2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC), Mar. 2018.
- [7] A. Roy, C. Dutta, Chiranjeev and S. Samanta, "Performance Analysis and Control of Bi-Directional Converter-Inverter Interfaced Battery System for Electric Transportation", 2023 IEEE 3rd International Conf. on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET), Sep. 2023.
- [8] B. Cao, X. Jin, J. Chen, W. Qin and C. Fan, "A high efficiency DC-DC converter based on bidirectional half-bridge", 2016 IEEE 11th Conf. on Ind. Electron. and Applications (ICIEA), pp. 763-768, Oct. 2016.
- [9] N. Dias and A. J. Naik, "Electric Vehicle Drive with Half Bridge Configuration based Bidirectional DC-DC Converter", 2022 International Conf. on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON), pp. 1-7, Dec. 2022.
- [10] M. Beraki, J. P. Trovao, M. Perdigao, and F. Machado, "Bidirectional DC-DC Converter Using Variable Inductor Concept for Electric Vehicle Applications", 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Dec. 2016.
- [11] X. Yu, S. Lin, and R. Xu, "Online Estimation of the State of Charge by the Unscented Kalman Filter Method for Lithium-ion Batteries of Electric Vehicles", 2023 3rd International Conference on New Energy and Power Engineering (ICNEPE), pp. 930-934, Nov. 2023.
- [12] J. Smith, J. Doe, H. Tanaka, H. Müller and M. Garcia, "Electrically propelled road vehicles Electrical specifications and tests for voltage class B systems and components Part 1 and 2," Reference number ISO 21498-1,2:2021(E)

1/13/26, 4:09 PM

Inbox - JAKKRIT PAKDEETO - Outlook



[SUJST] Editor Decision

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

Date Tue 1/13/2026 2:13 PM

To JAKKRIT PAKDEETO <jakkritpa@kmutnb.ac.th>; Prof. Dr. Kongpan Areerak <kongpan@sut.ac.th>; Thitipat Tanrin <best.dankwian@gmail.com>; Pawin Seesamlee <pawinboss44@gmail.com>

Dear Asst. Prof. Dr. Jakkrit Pakdeeto, Prof. Dr. Kongpan Areerak, Thitipat Tanrin, Pawin Seesamlee:

We have reached a decision regarding your submission to Suranaree Journal of Science and Technology, "MATHEMATICAL MODEL FOR BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTER WITHIN BATTERY ELECTRIC VEHICLE SYSTEM USING GENERALIZED STATE SPACE AVERAGING APPROACH".

Our decision is to: **Accept Submission**

Dear Authors,

I am pleased to confirm that your paper "MATHEMATICAL MODEL FOR BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTER WITHIN BATTERY ELECTRIC VEHICLE SYSTEM USING GENERALIZED STATE SPACE AVERAGING APPROACH" has been accepted for publication in the Suranaree Journal of Science and Technology since **January 13, 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

MATHEMATICAL MODEL FOR BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTER WITHIN BATTERY ELECTRIC VEHICLE SYSTEM USING GENERALIZED STATE SPACE AVERAGING APPROACH

Thitipat Thanrin¹, Jakkrit Pakdeeto², Pawin Seesamlee¹, and Kongpan Areerak^{1,*}

Received:; Revised:; Accepted:

Abstract

This paper presents the derivation of a mathematical model for a battery electric vehicle (BEV) system in which a bidirectional buck-boost converter is used to regulate the high-voltage DC bus. This converter operates in two modes—step-up (boost) and step-down (buck). The proposed model was developed using the generalized state-space averaging approach, which eliminates time-dependent variables, to obtain a time-invariant model that would accurately represent the averaged dynamic behavior of the system. In addition, a simplified battery model was integrated into the overall dynamic model of the BEV system to enhance accuracy. The proposed model was validated by comparing its responses with those provided by SimPowerSystem simulations in MATLAB/Simulink. The results confirm that the proposed model accurately reproduces both transient and steady-state responses, indicating its effectiveness and suitability for future applications, such as stability analysis, controller design, and performance evaluation under various operating conditions.

Keywords: mathematical model; generalized state space averaging method; battery electric vehicle; bidirectional buck-boost converter

Nomenclature

SOC	State of charge of the battery	L	Inductance of the converter
V_{OC}	Open-circuit voltage of the battery	C	Capacitance of the converter at the HVDC bus side
$V_{Batt,nom}$	Nominal voltage of the battery	C_{Batt}	Capacitance of the converter at the battery side
$Q_{Batt,nom}$	Nominal capacity of the battery		

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

² Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding author

Mathematical Model Derivation for Bidirectional Buck-Boost Converter

R_{int}	Internal resistance of the battery
d	Duty cycle of the converter
T_s	Switching period of the converter
f_s	Switching frequency of the converter
f_r	Resonant frequency
ω_{nv}	Natural frequency of the voltage loop
ω_{ni}	Natural frequency of the current loop
ζ_v	Damping ratio of the voltage loop
ζ_i	Damping ratio of the current loop
A_c	Peak of the carrier signal
K_{pv}	P-gain of the voltage loop
K_{nv}	I-gain of the voltage loop
K_{pi}	P-gain of the current loop
K_{ni}	I-gain of the current loop
i_{Batt}	Battery current
i_L	Current inductor of the converter
v_H	HVDC bus voltage
v_{Batt}	Battery voltage
Δi_L	Ripple current through L
Δv_C	Ripple voltage across C
$\Delta v_{C_{Batt}}$	Ripple voltage across C_{Batt}

Introduction

In recent years, electric vehicles (EVs) have rapidly advanced worldwide because of the increasing need to reduce dependence on fossil fuels. Fossil fuels are a major contributor to climate change and various environmental issues. The advancement of EV technology also aligns with clean energy policies and environmental protection initiatives put forth by many governments. The global goal of reducing greenhouse gas emissions and mitigating air pollution in urban areas has positioned EVs as a key component of modern, sustainable, and environmentally friendly transportation systems (Gnanavendan et al., 2024; Jiang et al., 2024). Currently, EVs can be classified into several types (Sanguesa et al., 2021; Ehsani et al., 2021), including hybrid EVs, plug-in hybrid EVs, fuel cell EVs, and battery EVs (BEVs). Among these, the BEV powertrain is commonly used to represent other EV configurations because it adopts a fundamental electrical architecture and relies on electricity as the sole energy source. In terms of electrical architecture, BEVs typically possess a high-voltage DC (HVDC) bus with a voltage of around 800 V (Jung, 2017; Poorfakhraei et al., 2021) to enhance power transmission efficiency, reduce system current, and shorten battery charging time. This

configuration improves the overall system efficiency and ensures a faster dynamic response, as shown in Figure 1. The electrical system of a BEV (Figure 1) consists of several major components. The battery pack serves as the primary energy source, supplying power to the traction system and other onboard electrical systems. The bidirectional DC-DC converter boosts the DC voltage from the battery to a higher bus level suitable for the electric motor drive system. The inverter converts the HVDC bus power into AC power to drive the traction motor. In addition, an auxiliary power converter supplies energy to low-voltage subsystems, including infotainment, lighting, and comfort-supporting equipment. Power converters in BEV systems are typically controlled in closed-loop configurations to regulate voltage levels, particularly in the motor drive stage (Emadi et al., 2006; Khaligh et al., 2008). As the motor drive typically maintains the motor speed constant, it behaves as a constant power load (CPL) with a negative impedance (Emadi et al., 2006; Areerak et al., 2012; Areerak et al., 2018).

Previous studies (Emadi et al., 2006; Phosung et al., 2022) have shown that CPLs considerably affect system stability, which is primarily analyzed through mathematical modeling. Mathematical models are utilized not only for stability analysis but also for controller design and studying system responses under various operating conditions. Therefore, deriving an accurate mathematical model is crucial, as it enables more effective dynamic behavior analysis. Moreover, the use of mathematical models can substantially reduce the simulation time.

Figure 1 shows that the main power conversion component is the bidirectional DC-DC converter. Several types of bidirectional DC-DC converters have been previously developed (Wang et al., 2022; Tuluhong et al., 2025), including bidirectional Čuk converters, interleaved bidirectional converters, bidirectional flyback converters, and bidirectional push-pull converters. However, the present study focused on the bidirectional buck-boost converter because of its simple structure and high energy conversion efficiency (Wang et al., 2022; Tuluhong et al., 2025).

Previous studies (Mahdavi et al., 1997) reported that the dynamic models of power converters are generally time-dependent because of internal switching devices, which complicates the analysis of system stability and controller design. However, time-invariant mathematical models have been developed to facilitate system response analysis, controller design, and system stability assessment based on

Mathematical Model Derivation for Bidirectional Buck-Boost Converter

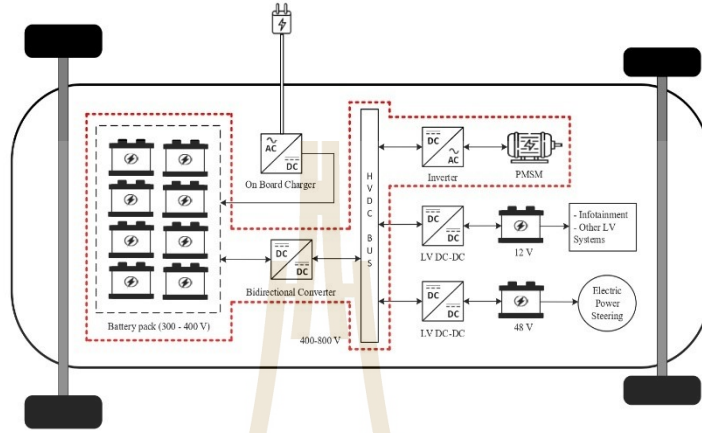


Figure 1. Architecture of a battery electric vehicle

classical control theory. In recent literature, several modeling approaches have been widely adopted, including the harmonic state-space model (HSSM) (Motwani et al., 2022) and the dynamic phasor model (DPM) (Shah et al., 2021; Lyu et al., 2023). Both approaches are inherently complex. The HSSM is based on the concept of linear time-periodic systems and employs Fourier series expansion to characterize the harmonic components of system signals in the frequency domain. In contrast, the DPM is derived from the generalized averaging framework and utilizes phasor-based state variables to eliminate the effects of time-varying switching dynamics. Nevertheless, the dynamic phasor model is difficult to apply to small-signal stability analysis. Both methods suffer from high computational complexity, as their resulting state-space representations are typically high-dimensional. In addition, a positive-sequence model (PSM) has been introduced (Shah et al., 2021; Du et al., 2024). This approach relies on the assumption of a balanced three-phase system operating at the fundamental frequency, yielding a time-invariant representation. Despite its simplicity, the PSM cannot capture harmonic order and is therefore unsuitable for applications involving DC-DC power converters. Therefore, the present study adopted the generalized state-space averaging (GSSA) approach (Sanders et al., 1991; Mahdavi et al., 1997; Emadi, 2004) to derive the mathematical model. Mahdavi et al. (1997) have shown that the GSSA method employs a zero-order approximation, considering only the DC term while neglecting higher-order harmonics. The GSSA approach effectively eliminates time-dependent terms while maintaining high accuracy because

higher-order harmonics do not affect the overall stability of the system (Pakdeeto et al., 2018; Pakdeeto et al., 2021). In addition, higher-order harmonics do not affect the controller design. Previous studies have confirmed that these harmonics do not substantially impact stability analysis and are typically ignored in advanced controller designs. Therefore, herein, the zero-order GSSA method was adopted to remove time-dependent variables. The derived model simplifies the analysis and reduces the computation time for obtaining system responses. Moreover, the present study employed a simplified battery model integrated into the proposed system model to evaluate the behavior of BEVs under realistic operating conditions. The proposed model also considers the state-of-charge (SOC) of the battery, which is a key feature of the stability study. The accuracy of the proposed model was validated against the simulations using SimPowerSystem blocks in MATLAB/Simulink. The results showed that the model accurately captures both transient and steady-state responses. Furthermore, the computation time of the proposed model is substantially lower than that of the SimPowerSystem simulations. The main contributions of the present study are summarized as follows:

- The derived mathematical model reduces the computation time required to obtain system responses.
- The proposed model, which incorporates the SOC from the simplified battery model, can be used to analyze the future impact of battery dynamics on the overall system performance.

This paper is organized into six parts. Part I presents the background, motivation, and

Mathematical Model Derivation for Bidirectional Buck-Boost Converter

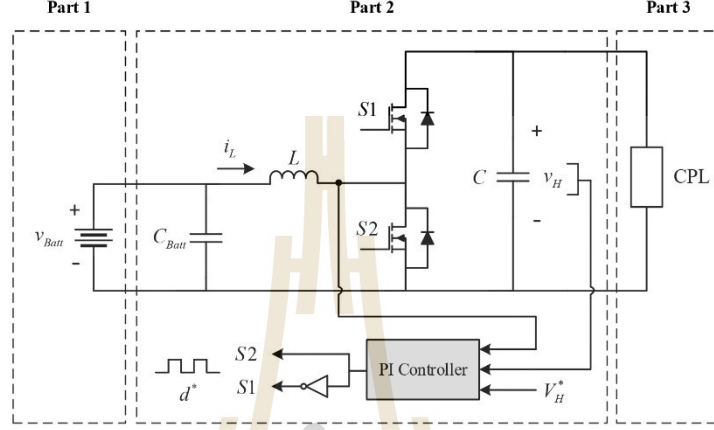


Figure 2. Scheme of the considered BEV system.

significance of the study, as well as a review of related literature and previous research. Part II describes the considered BEV system. Part III details the derivation of the mathematical model of the electrical system using the GSSA method. Part IV focuses on model validation. Part V compares the computation time required to obtain system responses from the proposed model with that from detailed simulations. Finally, Part VI concludes the study.

Considered BEV system

The considered BEV system with a rated power of 380 kW is shown in Figure 2. The critical electrical parameters required for practical hardware design under the worst-case operating conditions are summarized as follows. The maximum current flowing through the inductor is approximately 996 A; therefore, the inductor current rating was conservatively specified as 1000 A. In addition, the maximum voltage across the capacitor on the side of the HVDC bus, under transient overshoot conditions, is approximately 850 V. Accordingly, the capacitor voltage rating was selected as 1000 V. Similarly, the voltage rating of the capacitor on the battery side was specified as 1000 V because the battery-side voltage is inherently lower than that of the HVDC bus under normal operating conditions.

The system consists of the following three main parts. The first part is the battery pack, which serves as the main power source, providing a nominal voltage of 569 V and a capacity of 155 Ah. The second part is the

bidirectional DC–DC converter, controlled by a cascaded proportional–integral (PI) controller to regulate the HVDC bus voltage. In the present study, a buck–boost converter with two power electronic switches operating alternately was employed. The converter also includes an inductor and a DC filter capacitor to reduce current and voltage ripples. It can operate in two main modes (Tuluhong et al., 2025): in the boost mode, the converter steps up the battery voltage to the HVDC bus during driving conditions, and in the buck mode, it returns regenerative braking energy back to the battery. However, herein, we primarily focused on the boost mode, as it plays an important role in system stability for future analysis. The third part is the load or “motor drive system,” which includes a speed controller represented by an ideal CPL. Low-voltage loads at 12 and 48 V were neglected because their effects on the overall system are smaller than the traction motor drive load.

The converter parameters (L and C) depend on the ripple current (Δi_L) and the voltage ripple (Δv_c) (Erickson & Maksimović, 2001). These parameters can be calculated using Equations (1)–(2). In addition, C_{Batt} represents the battery-side capacitor used to reduce the battery voltage ripple, which can be determined using Equation (3).

$$L = \frac{dT_s V_{Batt, nom}}{2\Delta i_L} \quad (1)$$

$$C = \frac{dT_s V_{Batt, nom}}{2\Delta v_c R(1-d)} \quad (2)$$

Mathematical Model Derivation for Bidirectional Buck-Boost Converter

$$C_{Batt} = \frac{T_s \Delta i_L}{4 \Delta V_{C_{Batt}}} \quad (3)$$

where T_s is the switching period of the converter, defined as $1/f_s$ where f_s is the switching frequency of the converter; d is the duty cycle; $V_{Batt,nom}$ is the nominal battery voltage; and R is the equivalent resistance corresponding to the CPL, which can be calculated as $R = V_H^2 / P_{CPL}$.

The control system employed in the considered BEV configuration is a cascaded PI controller. It consists of two main control loops: a voltage control loop that regulates the HVDC bus voltage and a current control loop that controls the inductor current. The parameters of the PI controller for both loops were designed by comparing the coefficients of the closed-loop transfer function with those of a standard second-order system (Beraki et al., 2017; Pakdeeto et al., 2024). The operation of the PI controllers in both the voltage and current loops is governed by Equations (4)–(7).

$$K_{pv} = 2\zeta_v \omega_v C \quad (4)$$

$$K_{iv} = \omega_v^2 C \quad (5)$$

$$K_{pi} = \frac{2\zeta_i \omega_i A_r L}{V_{Batt,nom}} \quad (6)$$

$$K_{ii} = \frac{\omega_i^2 A_r L}{V_{Batt,nom}} \quad (7)$$

where K_{pv} and K_{iv} are the proportional and integral gains of the voltage control loop; ω_v is the natural frequency of the voltage loop; and ζ_v is the damping ratio of the voltage loop. Similarly, K_{pi} and K_{ii} denote the proportional and integral gains of the current control loop; ω_i is the natural frequency of the current loop; ζ_i is the damping ratio of the current loop; and A_r is the peak value of the triangular carrier signal.

Derivation of the Mathematical Model

Herein, the mathematical model was derived using the GSSA approach under the zero-order approximation. In this method, the state variables are expressed as coefficients of the

complex Fourier series (Gamelin, 2001). This approach eliminates time-dependent variables, yielding a time-invariant mathematical model. In addition, a simplified battery model was incorporated to enhance the accuracy of the proposed mathematical model. The model derivation assumes that the bidirectional buck-boost converter operates only in continuous conduction mode. The derivation of the mathematical model for the considered electrical system is presented below.

A. Battery model

The battery plays a crucial role in EVs. Therefore, the analysis of battery dynamics is essential. Herein, the battery model was incorporated as a part of the proposed mathematical model. Generally, the behavior of a battery changes over time and can be evaluated by the decrease in its *SOC* when supplying energy to the load. Tremblay & Dessaint (2009) reported that the realistic characteristic of a battery is defined by the relationship between the terminal voltage (V) and the extracted capacity (Q , in Ah). However, the objective of the present study was to derive a simplified battery model that is independent of time variation and suitable for future stability analysis. Hence, a simplified V - I curve independent of time was adopted to determine the operating point of the system because an ideal voltage source cannot reflect the effect of *SOC*. A simplified battery model (Susanna et al., 2019) was employed to improve the accuracy of the overall mathematical model, as shown in Figure 3. This simplified battery model relies on a linear approximation.

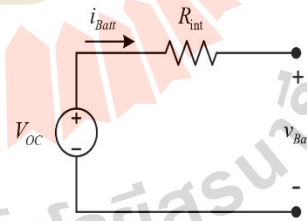


Figure 3. Simplified battery model.

As shown in Figure 3, the battery voltage can be calculated using Equation (8), where v_{Batt} is the battery voltage, i_{Batt} is the battery current, V_{OC} is the open-circuit voltage of the battery, and R_{int} is the internal resistance of the battery.

Mathematical Model Derivation for Bidirectional Buck-Boost Converter

$$v_{Batt} = V_{OC} - i_{Batt} R_{int} \quad (8)$$

The values of V_{OC} and R_{int} were obtained by comparing the linear equation derived through curve fitting with the results of the battery discharge simulation. Herein, the case where the SOC equals 97% was considered in the following procedure.

Step 1: The $V-I$ curve was obtained from the battery simulation while the battery supplied power to the load. The battery block was connected to an ideal CPL, and the load power was gradually increased up to the rated value of 380 kW. In this simulation, the nominal battery parameters were $V_{Batt,nom} = 569$ V and $SOC = 97\%$.

Step 2: The obtained $V-I$ curve was fitted with a linear equation to obtain a simplified battery model that accurately represents the approximated battery behavior at $SOC = 97\%$, as shown in Figure 4.

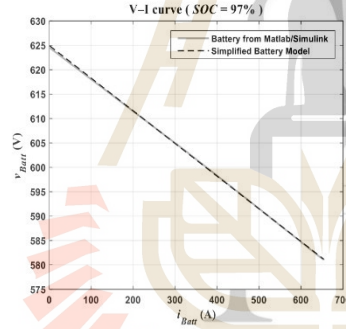


Figure 4. Curve fitting for the simplified battery model.

In Figure 4, the dashed line is the $V-I$ curve of the simplified battery model, obtained by fitting a linear equation with a slope of -0.0669 and a y -intercept of 624.947 . The corresponding linear equation is given in (9).

$$y = -0.0669x + 624.947 \quad (9)$$

Step 3: The coefficients in Equations (8) and (9) were compared for the case where $SOC = 97\%$, yielding $V_{OC} = 624.947$ V and $R_{int} = 0.0669 \Omega$. However, the validity of the battery model is limited to the SOC range of 14%–97% because the battery behavior outside this range becomes highly nonlinear. Within this SOC range, the converter duty cycle was found to operate between 0.275 and 0.509 under

worst-case operating conditions. Therefore, the present study considered only the specified SOC range to ensure modeling accuracy.

B. Ideal CPL model

This section discusses the ideal CPL, which accurately reflects the system behavior under varying load power conditions at each operating point. The ideal CPL is represented by a controlled DC source, as shown in Figure 5 (Rivetta et al., 2006; Solsona et al., 2015). The current of this power source is defined as $i_{CPL} = P_{CPL} / v_H$, where P_{CPL} is the CPL.

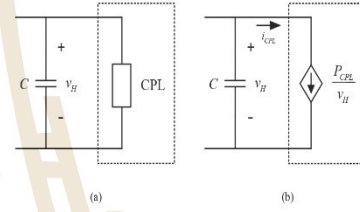


Figure 5. Ideal CPL model

After applying the battery and ideal CPL models to the considered BEV system, the equivalent circuit under open-loop control is shown in Figure 6.

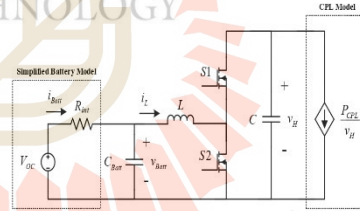


Figure 6. Bidirectional DC-DC converter (open-loop control)

C. Bidirectional DC-DC converter

To elucidate the operating principles of the bidirectional buck-boost converter, its operation was divided into two switching modes. In the first mode, switch $S1$ is off, and switch $S2$ is on. In the second mode, switch $S1$ is on, and switch $S2$ is off. The converter operation in each mode was analyzed (Figure 7) by applying Kirchhoff's laws to derive the differential equations of the state variables involved in the switching states. This representation is referred to as a switched model, which serves as the GSSA model. The state variables of the system can be defined as $X = [i_L \ v_H \ v_{Batt}]^T$.

Mathematical Model Derivation for Bidirectional Buck-Boost Converter

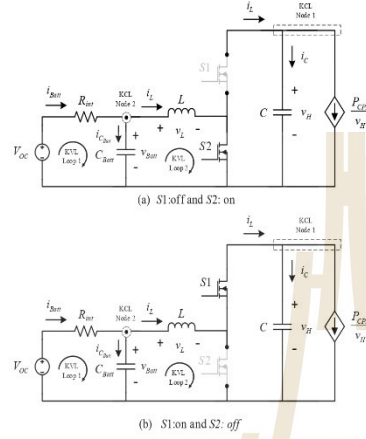


Figure 7. Operating modes of the bidirectional DC-DC converter

The circuit analysis in Figure 7 provides a switched model that describes the relationship between the derivatives of i_L , v_H , v_{Batt} , and the switching function $u(t)$, as expressed in Equation (10).

$$\begin{cases} \dot{i}_L = \frac{1}{L} v_{Batt} - \frac{1}{L} (1-u(t)) \cdot v_H \\ \dot{v}_H = \frac{1}{C} (1-u(t)) \cdot i_L - \frac{P_{CPL}}{v_H C} \\ \dot{v}_{Batt} = \left(\frac{V_{OC} - v_{Batt}}{R_{int} C_{Batt}} \right) - \frac{1}{C_{Batt}} i_L \end{cases} \quad (10)$$

After the switched model in Equation (10) was obtained, the GSSA method based on the consideration of a periodic signal $f(t)$ with a period time (T_s) was applied. The periodic function can be expressed as a complex Fourier series (Equation (11)), where $\omega = 2\pi / T_s$ and $\langle x \rangle_k(t)$ are the complex Fourier coefficients of the state variables to be determined, as calculated in Equation (12).

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_k e^{jk\omega t} \quad (11)$$

$$\langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t) e^{-jk\omega t} dt \quad (12)$$

To analyze the switching function of the bidirectional buck-boost converter, the

switching pattern was represented as shown in Figure 8 and mathematically expressed in Equation (13). After the application of GSSA, the complex Fourier coefficients of the switching function were obtained from Equation (13) at $k=0$, as shown in (14). The d value was then calculated as t_{on} / T_s .

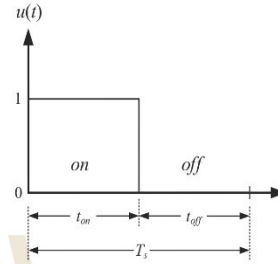


Figure 8. Switching function of the bidirectional DC-DC converter

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (13)$$

$$\langle u \rangle_0(t) = \frac{1}{T_s} \int_0^{dT_s} u(t) e^{j0t} dt = \frac{dT_s}{T_s} = d \quad (14)$$

To derive the state variables using the GSSA method, two properties of the complex Fourier series described in (Sanders et al., 1991; Wang et al., 2019) were applied as follows:

- The properties of the time-derivative are shown in (15).

$$\frac{d}{dt} \langle x \rangle_k = \left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_k - jk\omega \langle x \rangle_k \quad (15)$$

- The properties of multiplication are shown in (16).

$$\langle xy \rangle_k = \sum_l \langle x \rangle_{k-l} \langle y \rangle_l \quad (16)$$

If k is set to 0, the model excludes high-frequency components but can still accurately represent the dynamic behavior of the system. As for the switched model in Equation (10), i_L , v_H and v_{Batt} can be expressed in terms of complex Fourier coefficients, as shown in Equation (17), where $\langle i_L \rangle_0$, $\langle v_H \rangle_0$ and $\langle v_{Batt} \rangle_0$ are defined as the state variables of the model in Equation (18).

Mathematical Model Derivation for Bidirectional Buck-Boost Converter

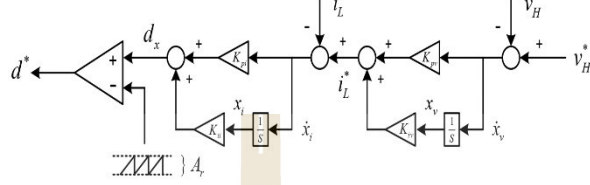


Figure 9. Cascade PI controller

$$\begin{cases} i_L = \langle i_L \rangle_0 = x_1 \\ v_H = \langle v_H \rangle_0 = x_2 \\ v_{Batt} = \langle v_{Batt} \rangle_0 = x_3 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \langle i_L \rangle_0 = \frac{1}{L} v_{Batt} - \frac{(1-\langle u \rangle_0(t))}{L} \cdot \langle v_H \rangle_0 \\ \langle \dot{v}_H \rangle_0 = \frac{(1-\langle u \rangle_0(t))}{C} \cdot \langle i_L \rangle_0 - \frac{P_{CPL}}{\langle v_H \rangle_0 C} \\ \langle \dot{v}_{Batt} \rangle_0 = \left(\frac{V_{OC} - \langle v_{Batt} \rangle_0}{R_{int} C_{Batt}} \right) - \frac{1}{C_{Batt}} \cdot \langle i_L \rangle_0 \end{cases} \quad (18)$$

After $\langle u \rangle_0(t)$ from Equation (14) is substituted into Equation (18), and the multiplication property from (16) is applied, the mathematical model of the bidirectional buck-boost power converter (open-loop control) becomes Equation (19) using the GSSA method under the zero-order approximation.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{(1-d)}{L} \cdot x_2 + \frac{1}{L} \cdot x_3 \\ \dot{x}_2 = \frac{(1-d)}{C} \cdot x_1 - \frac{P_{CPL}}{x_2 C} \\ \dot{x}_3 = \left(\frac{V_{OC} - x_3}{R_{int} C_{Batt}} \right) - \frac{1}{C_{Batt}} \cdot x_1 \end{cases} \quad (19)$$

D. Cascade PI controller

The cascade PI controller structurally consists of voltage and current loops (Figure 9). From Figure 9, x_v and x_i are the state variables of the voltage and current control loops, as shown in Equations (20) and (21), respectively; v_H^* is the reference voltage of the HVDC bus; and i_L^* is the reference current flowing through the inductor. In addition, d^* can be expressed as shown in Equation (22).

$$\dot{x}_v = v_H^* - v_H \quad (20)$$

$$\dot{x}_i = i_L^* - i_L \quad (21)$$

$$d^* = \frac{1}{A_r} (K_{pv} K_{pv}^* v_H^* - K_{pi} K_{pv} v_H + K_{pi} K_{iv} x_v - K_{pi} i_L^* + K_{ii} x_i) \quad (22)$$

E. Considered system mathematical model

The dynamic model of the considered system was obtained by integrating the simplified battery model, ideal CPL model, open-loop bidirectional DC-DC converter, and cascade PI controller. However, d in Equation (19) was substituted by d^* from Equation (22). The complete dynamic model of the proposed BEV system is presented in Equation (23).

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1}{L} x_2 + \frac{K_{pi} K_{pv}}{A_r L} x_2^* - \frac{K_{pi} K_{pv}}{A_r L} x_2^2 + \frac{K_{pi} K_{iv}}{A_r L} x_1 x_2 - \frac{K_{pi}}{A_r L} x_1 x_2 + \frac{K_{ii}}{A_r L} x_i x_2 + \frac{1}{L} \cdot x_3 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{C} x_1 - \frac{K_{pi} K_{pv}}{A_r C} x_1 x_2^* + \frac{K_{pi} K_{pv}}{A_r C} x_1 x_2 - \frac{K_{pi} K_{iv}}{A_r C} x_v x_1 + \frac{K_{pi}}{A_r C} x_1^2 - \frac{K_{ii}}{A_r C} x_i x_1 - \frac{P_{CPL}}{x_2 C} \\ \dot{x}_3 = \frac{V_{OC}}{R_{int} C_{Batt}} - \frac{1}{R_{int} C_{Batt}} x_3 - \frac{1}{C_{Batt}} x_1 \\ \dot{x}_v = x_2^* - x_2 \\ \dot{x}_i = -x_1 - K_{pv} x_2 + K_{iv} x_v + K_{pi} x_2^* \end{cases} \quad (23)$$

Mathematical Model Derivation for Bidirectional Buck-Boost Converter

The proposed model in Equation (23) represents the mathematical model of the considered BEV system derived using the GSSA method under the zero-order approximation. However, the mathematical model in Equation (23) is nonlinear. To enable the use of this model as a tool for future stability analysis based on linear control theory, a linearized model was derived using a first-order Taylor series expansion (Daengdon et al., 2025), which provides a local approximation around the system operating point. The resulting linearized equations can be expressed in the state-space form of a small-signal model, as given in Equation (24). The detailed expressions of the system Jacobian matrices $\mathbf{A}(x_0, u_0)$, $\mathbf{B}(x_0, u_0)$, $\mathbf{C}(x_0, u_0)$, and $\mathbf{D}(x_0, u_0)$ are provided in the Appendix.

$$\begin{cases} \delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(x_0, u_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(x_0, u_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(x_0, u_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(x_0, u_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (24)$$

State-space variables:

$$\delta \mathbf{x} = [\delta x_1 \ \delta x_2 \ \delta x_3 \ \delta x_4 \ \delta x_5]^T$$

$$\text{Input variables: } \delta \mathbf{u} = [\delta x_2^* \ \delta P_{CPL} \ \delta V_{OC}]^T$$

$$\text{Output variables: } \delta \mathbf{y} = [\delta x_1 \ \delta x_2 \ \delta x_3]^T$$

Model Validation

To confirm the accuracy of the mathematical model expressed in Equation (23), the dynamical responses from the proposed model were compared with the simulation responses from a power system block in MATLAB/SIMULINK. The system parameters are listed in Table 1. For model validation, the voltage of the HVDC

bus was regulated at 800 V, and the ideal CPL was changed from 290 to 300 kW, with the SOC value varied at 97%, 60%, and 35%. The system responses of i_L , v_H , and v_{Batt} are shown in Figures 10–12, respectively. In addition, for the buck mode, the system response at SOC = 60% is provided in Figure 13.

Table 1. System parameters

Symbol	Descriptions	Values
$V_{Batt,nom}$	Nominal Battery Voltage	569 V
$Q_{Batt,nom}$	Nominal Battery Capacity	155 Ah
C_{Batt}	Capacitance (Battery Side) of the Converter	19.846 μ F
C	Capacitance (HVDC Bus Side) of the Converter	2.287 mF
L	Inductance of the Converter	3.45 mH
f_s	Switching frequency of the converter	10 kHz
ω_{nv}	Natural frequency of the voltage loop	$2\pi \times 27$ rad/s
ω_n	Natural frequency of the current loop	$2\pi \times 300$ rad/s
ζ_v	Damping ratio of the voltage loop	0.95
ζ_i	Damping ratio of the current loop	0.85
A	Peak of the Triangular Wave Form	10
K_{pv}	Parameter of the Voltage Loop P-Controller	0.73718
K_{iv}	Parameter of the Voltage Loop I-Controller	65.8224
K_{pi}	Parameter of the Current Loop P-Controller	0.19430
K_{ii}	Parameter of the Current Loop I-Controller	215.442

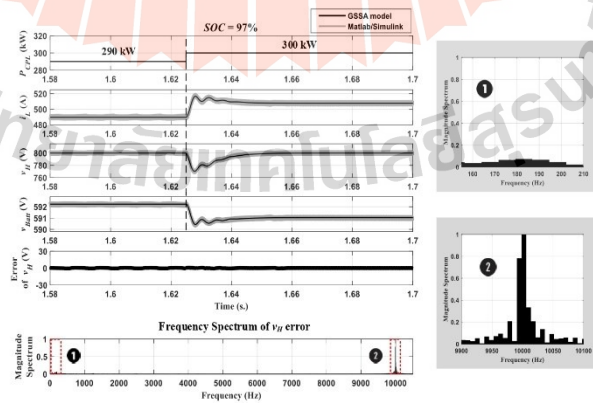


Figure 10. System responses in the boost mode at a SOC of 97%

Mathematical Model Derivation for Bidirectional Buck-Boost Converter

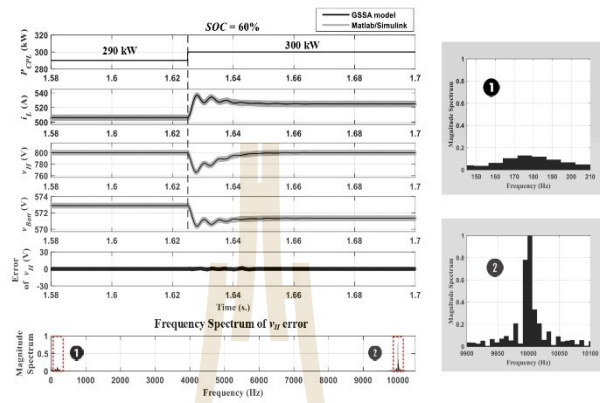


Figure 11. System responses in the boost mode at a SOC of 60%

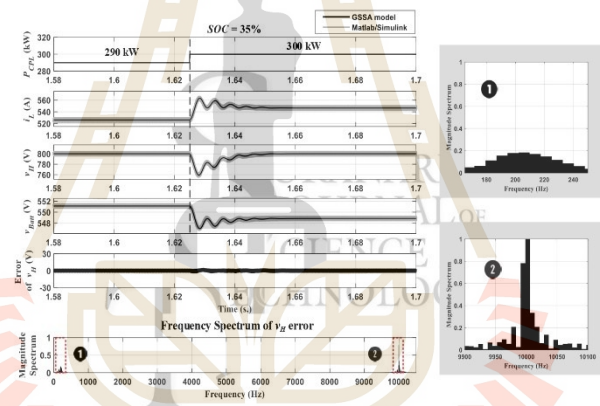


Figure 12. System responses in the boost mode at a SOC of 35%

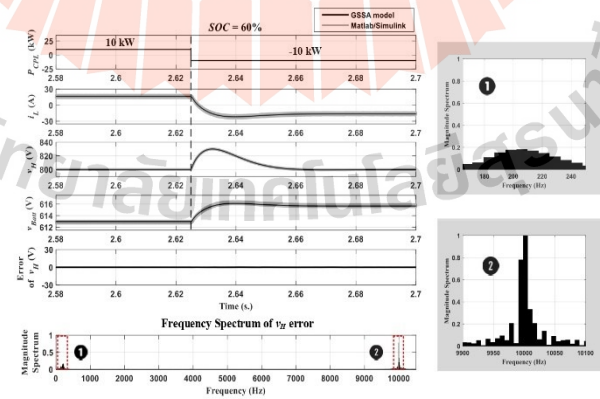


Figure 13. System responses in the buck mode at a SOC of 60%

The simulation results (Figures 10–13) verify that the proposed mathematical model of the BEV system in both boost and buck modes, derived using the GSSA method under the zero-order approximation, is highly accurate. However, the present study primarily analyzed the boost operating mode, as it directly affects the stability of the BEV system and is an important topic for future research. The simplified battery model used herein was formulated based only on the boost mode. As a result, the accuracy of the model in the buck mode is limited to the *SOC* range of 40%–60%. To improve the accuracy of the model in the buck mode, the *V–I* characteristic of the simplified battery model in the buck mode can be further considered in future work.

As shown in Figures 10–13, the proposed model responses closely match those obtained from MATLAB/Simulink simulations under both transient and steady-state conditions. The errors of v_H in these figures are negligible and approximately zero. When the load power changes from 290 to 300 kW in the boost mode and from 10 to –10 kW in the buck mode, the PI controller effectively maintains the HVDC bus voltage at 800 V, even as the *SOC* of the battery decreases. Moreover, the spectral analysis of v_H in Figures 10–13 shows an amplitude of approximately 10 kHz, which corresponds to the switching frequency of the power converter. Another frequency component appears in the range of 180–200 Hz, which was attributed to the zero-order approximation used in the GSSA method. Nevertheless, these frequency components do not affect the stability analysis of the system or the controller design. This is because the frequencies in this range do not coincide with the resonance frequency of the system, which is approximately 56.66 Hz and represents the dominant frequency. The resonance frequency can be calculated using Equation (25) (Li, 2009).

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \approx 56.66 \text{ Hz} \quad (25)$$

Time Saving

The validated mathematical model developed herein is not only accurate and suitable for future applications but also considerably faster to compute. To compare the performance of the proposed model with that of the MATLAB/Simulink power block simulation, these two simulations were conducted on a

computer equipped with an Intel(R) Core(TM) i5-9300H CPU (2.40 GHz), 16 GB RAM, and Windows 11 (64-bit) operating system using MATLAB R2022a. The comparison of simulation times is presented in Table 2, and the percentage of time reduction was calculated using Equation (26), where t_{exact} is the time required for simulation using MATLAB/Simulink, and t_{math} is the time required to obtain the response from the proposed mathematical model.

$$\%t_{\text{saving}} = \frac{t_{\text{exact}} - t_{\text{math}}}{t_{\text{exact}}} \times 100\% \quad (26)$$

Table 2 indicates that the proposed mathematical model offers 87.089% lower computation time, indicating its excellent computational efficiency while maintaining response accuracy. Therefore, the model derived herein is an effective tool for future studies, including stability analysis, parameter sensitivity investigation, and controller design.

Conclusions

The proposed study presents a mathematical model for a BEV system operated with an internal bidirectional buck–boost power converter. This converter can operate in both buck and boost modes. The proposed model was derived using the GSSA method under a zero-order approximation to eliminate the time variable. In addition, a simplified battery model was employed to represent the effect of *SOC* and to improve model accuracy. However, the proposed model is valid only when the power converter operates in the continuous conduction mode. The main advantage of the proposed model is its ability to substantially reduce the computation time required to obtain system responses. The proposed mathematical model was validated against the MATLAB/Simulink simulation. The results confirmed that the proposed model accurately provides both transient and steady-state responses, making it suitable for future applications, such as stability analysis and controller design. Moreover, the GSSA model requires an average simulation time of only 10.228 s, whereas the exact topological model implemented in MATLAB/Simulink requires 86.894 s. As a result, the GSSA model reduces computation time by approximately 87.089% compared with the exact topological model.

Mathematical Model Derivation for Bidirectional Buck-Boost Converter

Table 2. Comparison of the simulation time

Operating mode	SOC (%)	Exact model (s)	GSSA model (s)	Time saving (%)
Boost	97	64.230	9.241	85.613
	60	64.502	9.937	84.594
	35	73.368	10.227	86.061
Buck	60	145.474	11.509	92.089
Average		86.894	10.228	87.089

Appendix

The Jacobian matrices of the linear model in Equation (24) are as follows:

$$A(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} -\frac{K_{pi}}{A_r L} x_{2_0} & a(1,2) & \frac{1}{L} & \frac{K_{pi} K_{iv}}{A_r L} x_{2_0} & \frac{K_{ii}}{A_r L} x_{2_0} \\ a(2,1) & \frac{K_{pi} K_{pv}}{A_r C} x_{1_0} + \frac{P_{CPL_0}}{C x_{2_0}^2} & 0 & -\frac{K_{pi} K_{iv}}{A_r C} x_{1_0} & -\frac{K_{ii}}{A_r C} x_{1_0} \\ -\frac{1}{C_{Batt}} & 0 & -\frac{1}{R_{int} C_{Batt}} & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -K_{pv} & 0 & K_{iv} & 0 \end{bmatrix}_{5 \times 5}$$

$$a(1,2) = -\frac{1}{L} + \frac{K_{pi} K_{pv}}{A_r L} x_{2_0} - \frac{2K_{pi} K_{pv}}{A_r L} x_{2_0} + \frac{K_{pi} K_{iv}}{A_r L} x_{1_0} - \frac{K_{pi}}{A_r L} x_{1_0} + \frac{K_{ii}}{A_r L} x_{1_0}$$

$$a(2,1) = \frac{1}{C} - \frac{K_{pi} K_{pv}}{A_r C} x_{2_0} + \frac{K_{pi} K_{pv}}{A_r C} x_{2_0} - \frac{K_{pi} K_{iv}}{A_r C} x_{1_0} - \frac{2K_{pi}}{A_r C} x_{1_0} + \frac{K_{ii}}{A_r C} x_{1_0}$$

$$B(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} \frac{K_{pi} K_{pv}}{A_r L} x_{2_0} & 0 & 0 \\ \frac{K_{pi} K_{pv}}{A_r C} x_{1_0} & -\frac{1}{C x_{2_0}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_{int} C_{Batt}} \\ 1 & 0 & 0 \\ K_{pv} & 0 & 0 \end{bmatrix}_{5 \times 3}$$

$$C(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 5}$$

$$D(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

Acknowledgement

Kongpan Areerak would like to acknowledge Suranaree University of Technology (SUT) for research funding. Jakkrit Pakdeeto appreciates the support from the King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB) Contract No. FTE-2568-09.

References

- Areerak, K.-N., Bozhko, S., Asher, G. M., De Lillo, L., & Thomas, D. W. P. (2012). Stability study for a hybrid AC-DC more-electric aircraft power system. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 48(1), 329–347. <https://doi.org/10.1109/TAES.2012.6129630>
- Areerak, K.-N., Sopapirm, T., Bozhko, S., Hill, C. I., Suyapan, A., & Areerak, K.-L. (2018). Adaptive stabilization of uncontrolled rectifier-based AC-DC power systems feeding constant power loads. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(10), 8927–8935. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2774826>

Mathematical Model Derivation for Bidirectional Buck-Boost Converter

- Beraki, M. W., Trovão, J. P. F., Perdigão, M. S., & Dubois, M. R. (2017). Variable inductor-based bidirectional DC-DC converter for electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(10), 8764–8772. <https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2711818>
- Daengdon, S., Suyapan, A., Areerak, K.-N., & Pakdeeto, J. (2025). Stability investigation of an AC-DC power system feeding a buck converter controlled by sliding mode controller. *IEEE Access*, 13, 116234–116245. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3585767>
- Du, W., Nguyen, Q. H., Wang, S., Kim, J., Liu, Y., & Zhu, S. (2024). Positive-sequence modeling of droop-controlled grid-forming inverters for transient stability simulation of transmission systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 39(3), 1736–1748. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2024.3376245>
- 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), 967–984. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2021.3060484>
- 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.2004.825345>
- 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), 1112–1125. <https://doi.org/10.1109/TVT.2006.877480>
- Erickson, R. W., & Maksimović, D. (2001). *Fundamentals of power electronics*. Kluwer Academic Publishers.
- Gamelin, T. W. (2001). *Complex analysis*. Springer.
- Gnanavendan, S., Selvaraj, S. K., Dev, S. J., Mahato, K. K., Swathish, R. S., Sundaramali, G., et al. (2024). Challenges, solutions, and future trends in EV-technology: A review. *IEEE Access*, 12, 17242–17260. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3350000>
- Jiang, B.-H., Hsu, C.-C., Su, N.-W., & Lin, C.-C. (2024). A review of modern electric vehicle innovations for energy transition. *Energies*, 17(12), 2906. <https://doi.org/10.3390/en17122906>
- Jung, C. (2017). Power up with 800-V systems: The benefits of upgrading voltage power for battery-electric passenger vehicles. *IEEE Electrification Magazine*, 5(1), 53–58. <https://doi.org/10.1109/MELE.2017.2666440>
- Khaligh, A., Rahimi, M., & Emadi, A. (2008). Modified pulse-adjustment technique to control DC/DC converters driving variable constant-power loads. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(3), 1133–1146. <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.911946>
- Li, Y. W. (2009). Control and resonance damping of voltage-source and current-source converters with LC filters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(5), 1511–1521. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2009562>
- Lyu, X., Wang, X., Che, Y., & Li, L. (2023). Dynamic phasor modeling and low-frequency oscillation analysis of single-phase vehicle-grid system. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 9(1), 158–171. <https://doi.org/10.17775/CSEEJES.2020.03160>
- Mahdavi, J., Emadi, A., Bellar, M. D., & 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>
- Motwani, J. K., Xue, Y., Nazari, A., Dong, D., Cvetkovic, I., & Boroyevich, D. (2022). Modeling of power electronics systems and PWM modulators in harmonic-state space. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 3, 689–704. <https://doi.org/10.1109/OJPEL.2022.3205893>
- Pakdeeto, J., Areerak, K.-N., & Areerak, K.-L. (2018). Modelling and stability analysis of AC-DC power systems feeding a speed controlled DC motor. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 13(4), 1566–1577. <https://doi.org/10.5370/JEET.2018.13.4.1566>
- Pakdeeto, J., Thanommuang, A., Chaicharoenudomrung, K., Areerak, K., & Areerak, K. (2021). The Effect of Parameter Variations of System Stability for AC-DC Power System Feeding Controlled Buck Converter. In *2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*, 524–527. <https://doi.org/10.1109/ICPEI52436.2021.9690662>
- Pakdeeto, J., Thanommuang, A., & Areerak, K. (2024). The DC voltage controller design of traction substation in heavy rail systems. In *Proceedings of the 2024 12th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEECON60677.2024.10537888>
- Phosung, R., Areerak, K.-N., Sopairm, T., & Areerak, K.-L. (2022). Design and optimization of instability mitigation for AC-DC feeder systems with constant power loads using artificial intelligence techniques. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(5), 5385–5397. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3120673>
- 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, 155–170. <https://doi.org/10.1109/OJPEL.2021.306650>
- Rivetta, C. H., Emadi, A., Williamson, G. A., Jayabalan, R., & Fahimi, B. (2006). Analysis and control of a buck DC-DC converter operating with constant power load in sea and undersea vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42(2), 559–572. <https://doi.org/10.1109/TIA.2006.870095>
- Sanders, S. R., Noworolski, J. M., Liu, X. Z., & 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>
- Sanguesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F. J., & Marquez-Barja, J. M. (2021). A review on electric vehicles: Technologies and challenges. *Smart Cities*, 4(1), 372–404. <https://doi.org/10.3390/smartcities4010022>
- Shah, C., Vasquez-Plaza, J. D., Campo-Ossa, D. D., Pataroyo-Montenegro, J. F., Guruwacharya, N., Bhujel, N., Trevizan, R. D., Rengifo, F. A., Shirazi, M., Tonkoski, R., Hansen, T. M., Wies, R., & Cicilio, P. (2021). Review of dynamic and transient modeling of power electronic converters for converter dominated power systems. *IEEE Access*, 9, 82094–82117. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3086420>
- Solsona, J. A., Jorge, S. G., & Busada, C. A. (2015). Nonlinear control of a buck converter which feeds a constant power load. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(12), 7193–7201. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2388781>
- Susanna, S., Dewangga, B. R., Wahyungoro, O., & Cahyadi, A. I. (2019). Comparison of simple battery model and Thevenin battery model for SOC estimation based on OCV method. In *2019 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIAC)*, 738–743. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICOIAC46704.2019.8938495>

Mathematical Model Derivation for Bidirectional Buck-Boost Converter

- Tremblay, O., & Dessaint, L.-A. (2009). Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. *World Electric Vehicle Journal*, 3(2), 289–298. <https://doi.org/10.3390/wevj3020289>
- Tuluhong, A., Xu, Z., Chang, Q., & Song, T. (2025). Recent developments in bidirectional DC–DC converter topologies, control strategies, and applications in photovoltaic power generation systems: A comparative review and analysis. *Electronics*, 14(2), 389. <https://doi.org/10.3390/electronics14020389>
- Wang, J., Wang, B., Zhang, L., Wang, J., Shchurov, N. I., & Malozyomov, B. V. (2022). Review of bidirectional DC–DC converter topologies for hybrid energy storage systems of new energy vehicles. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 1(2), 100010. <https://doi.org/10.1016/j.geits.2022.100010>
- Wang, L., Deng, X., Han, P., Qi, X., Wu, X., Li, M., & Xu, H. (2019). Electromagnetic transient modeling and simulation of power converters based on a piecewise generalized state-space averaging method. *IEEE Access*, 7, 12241–12251. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2892549>



ประวัติผู้เขียน

นายธิตัพพ์ แทนรินทร์ เกิดเมื่อวันที่ 3 พฤศจิกายน พ.ศ. 2544 เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1-2 ที่โรงเรียนอนุบาลมหาสารคาม ระดับประถมศึกษาปีที่ 3-6 ที่โรงเรียนอนุบาลแสนสุข ระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนด้านเกวียนวิทยา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2567 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันเดิม

ในการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้รับทุนกิตติบัณฑิตซึ่งเป็นทุนการศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึงได้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าจำนวน 6 รายวิชา ดังนี้

- 1) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ามูลฐาน
- 2) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า
- 3) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง
- 4) วงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน
- 5) ระบบไฟฟ้ากำลังและการป้องกัน
- 6) ตัวควบคุมตรรกะที่โปรแกรมได้

สำหรับผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่มีจำนวน 2 บทความดังที่ได้รวบรวมไว้แล้วในภาคผนวก ก.