การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน ที่ได้รับผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

นายกฤษดา ทองอร่าม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2568

STABILITY ANALYSIS OF HYDROGEN-POWERED ELECTRIC BICYCLE SYSTEM AFFECTED BY CONSTANT POWER LOAD

KITSADA THONGARAM

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน
ที่ได้รับผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)
ประธานกรรมการ

.....

(ศ. ดร.กองพัน อารีรักษ์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

.....

(ดร.อภิชัย สุยะพันธ์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)

.....

(รศ. ดร.กิตติ อัตถกิจมงคล)
กรรมการ

.....

(ผศ. ดร.สุดารัตน์ ขวัญอ่อน)
กรรมการ

.....

(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)
รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
และประกันคุณภาพ

.....

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กฤษดา ทองอร่าม : การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่ได้รับผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (STABILITY ANALYSIS OF HYDROGEN-POWERED ELECTRIC BICYCLE SYSTEM AFFECTED BY CONSTANT POWER LOAD) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.กองพัน อารีรักษ์, 149 หน้า

คำสำคัญ : จักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน, โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, การวิเคราะห์เสถียรภาพ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่ได้รับผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านของระบบจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ด้วยเหตุนี้การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบดังกล่าวจึงมีความจำเป็นและสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพื่อหลีกเลี่ยงการทำงานของระบบที่จุดการขาดเสถียรภาพ การศึกษาวิจัยของวิทยานิพนธ์ได้เริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่อาศัยการประมาณข้อมูลจากเอกสารของผู้ผลิต จากนั้นดำเนินการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางที่มีตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันสำหรับควบคุมและรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงให้มีค่าคงที่และเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21780:2020 ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปซึ่งทำให้ได้แบบจำลองของระบบจักรยานไฟฟ้าที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมต่อการนำไปศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบ ในลำดับต่อมาเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพที่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจงเพื่อคาดการณ์จุดการทำงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์ถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบให้กับวิศวกร สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งหมดจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่อาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335 ร่วมกับโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

โดยผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพทางทฤษฎี การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป มีความสอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่า องค์ความรู้ สมมติฐาน และวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนักศึกษา ฤทธิดา ทองอร่าม

ปีการศึกษา 2568 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

KITSADA THONGARAM : STABILITY ANALYSIS OF HYDROGEN-POWERED ELECTRIC BICYCLE SYSTEM AFFECTED BY CONSTANT POWER LOAD. THESIS ADVISOR : PROF. KONGPAN AREERAK, Ph.D., 149 PP.

Keyword : Hydrogen-powered electric bicycle, Constant power load (CPL), Mathematical model, Stability analysis

The thesis presents stability analysis of hydrogen powered electric bicycle system affected by constant power loads. The brushless DC motor and its drive behave as a constant power load which can cause system instability. Therefore, the study on the stability of such system is necessary and important in order to avoid operating conditions that may lead to instability. The study begins with the derivation of a simplified hydrogen fuel cell model based on data approximation from the manufacturer's documentation. After that, a mathematical model of a bidirectional DC-DC converter with cascaded PI controllers is derived. The controller is designed to regulate and maintain the output voltage of the fuel cell at a constant level in accordance with ISO 21780:2020 standards. The generalized state-space averaging method is used to obtain a time-invariant model of the considered electric bicycle system which is suitable for stability studies. Next, the system stability is analyzed using the derived mathematical model together with eigenvalue theory to predict the system unstable point. In addition, the effects of variations in system parameters on stability are also investigated in order to provide design guidelines for engineers. To verify the theoretical analysis and confirm all stability analysis results, the intensive simulations are carried out using MATLAB/SIMULINK. The hardware-in-the-loop (HIL) is also performed using the TMDSDOCK28335 microcontroller board together with

MATLAB/SIMULINK. The results show that the theoretical stability analysis, simulations, and HIL are consistent. Consequently, the knowledge, assumptions, and methods presented in the thesis are proven to be accurate, reliable, and applicable in practical applications.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Electrical Engineering
Academic Year 2025

Student's Signature กฤษดา ทองอร่าม
Advisor's Signature
Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ ด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ศาสตราจารย์ ดร.กองพัน อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.อภิชัย สุยะพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทาง อันเป็นประโยชน์อย่างดียิ่งต่องานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งยังได้ช่วยสละเวลาเพื่อตรวจทานและแก้ไข รายงานวิจัยวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จนกระทั่งมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นกำลังใจและเป็นแบบอย่าง ที่ดีในการดำเนินชีวิตและการทำงานให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด

คณาจารย์ เลขานุการและผู้ช่วยสอนประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ การติดต่อประสานงาน และข้อคิด ในด้านต่าง ๆ อย่างดีมาโดยตลอด

บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน การใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ และขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษา ในกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกลและการควบคุม ทุกท่านที่ให้คำปรึกษา ด้านวิชาการ ด้านการดำเนินชีวิต และคอยเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณครูและอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้แด่ นายณรงค์ ทองอร่าม และนางสาวจันทร์เพ็ญ เสน่ห์ทอง ผู้เป็นบิดาและมารดา ของผู้วิจัย รวมถึงครอบครัวของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุน ในด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต

กฤษดา ทองอร่าม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ค
กิตติกรรมประกาศ ..... จ
สารบัญ ..... ฉ
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญรูป ..... ฏ

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ 4
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น 4
1.4 ขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ 5
1.5 สมมติฐานการวิจัย 5
1.6 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ 5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5
1.8 การจัดรูปเล่มรายงานวิทยานิพนธ์ 6

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 8
2.1 บทนำ 8
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า 8
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง 15
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง 18
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง 23
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง 28
2.7 สรุป 34

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3 ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาและการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 35

3.1 บทนำ 35

3.2 ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณา 35

3.3 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน 36

3.3.1 การสร้างแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน 38

3.3.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์จำเพาะที่อาศัยข้อมูลจากผู้ผลิต 40

3.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน 42

3.4 การวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางและการออกแบบค่าพารามิเตอร์ภายในวงจร 44

3.4.1 หลักการสมดุลฟลักซ์เชื่อมโยงในตัวเหนี่ยวนำ 48

3.4.2 หลักการสมดุลประจุในตัวเก็บประจุ 50

3.4.3 การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ L 52

3.4.4 การออกแบบค่าตัวเก็บประจุ C 53

3.5 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป 54

3.6 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม 56

3.6.1 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 56

3.6.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 62

3.7 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีตัวควบคุม 65

3.7.1 การออกแบบตัวควบคุมพีไอของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณา 65

3.7.2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 69

3.7.3 การทำให้เป็นเชิงเส้นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 72

3.7.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 74

3.8 สรุป 77

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน.....78

4.1 บทนำ 78

4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน 78

4.2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง 79

4.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ 82

4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน 83

4.3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลัง 83

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันกำลัง 85

4.3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุม 86

4.3.4 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุม 90

4.4 สรุป 94

5 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป 95

5.1 บทนำ 95

5.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับการทดสอบฮาร์ดแวร์ในลูป 95

5.2.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335 96

5.2.2 การเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับโปรแกรม MATLAB/SIMULINK 96

5.3 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป 99

5.3.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ 101

5.3.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ 102

5.3.3 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า 103

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3.4 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า 104
5.3.5 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า 105
5.3.6 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า 106
5.4 สรุป 107
6 สรุปและข้อเสนอแนะ 108
6.1 สรุป 108
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต 111
รายการอ้างอิง 112
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา 119
ภาคผนวก ข ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB 135
ภาคผนวก ค โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 138
ภาคผนวก ง โปรแกรมภาษาซีสำหรับการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335 146
ประวัติผู้เขียน 149

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า 9
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง 15
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง..... 19
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง 24
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง..... 28
3.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.16 62
3.2 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.24 74

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 สถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณา 14
2.2 วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง 18
2.3 เส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว 22
2.4 ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว 23
2.5 แผนภาพสรุปการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง 32
3.1 ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ 36
3.2 เส้นโค้งโพลาไรเซชันทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน 37
3.3 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน 38
3.4 การประมาณค่าพารามิเตอร์จำเพาะบนเส้นโค้งโพลาไรเซชันทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิง 40
3.5 เส้นโค้งโพลาไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนรุ่น H-500 42
3.6 ชุดบล็อกสำเร็จรูปของ Fuel Cell Model ใน SimPowerSystem™ 43
3.7 การเปรียบเทียบเส้นโค้งโพลาไรเซชันของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงอย่างง่าย กับชุดบล็อกสำเร็จรูปใน SimPowerSystem™ 43
3.8 วงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณาสำหรับใช้ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ ของอุปกรณ์พาสซีฟ 44
3.9 การประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็ก 45
3.10 วงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณาในกรณีที่ S_1 OFF และ S_2 ON 46
3.11 วงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณาในกรณีที่ S_1 ON และ S_2 OFF 47
3.12 กราฟแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ $v_L(t)$ 49
3.13 กราฟกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ $i_{Co}(t)$ 51
3.14 กราฟกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ $i_L(t)$ ของวงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณา 52
3.15 กราฟแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ $v_o(t)$ ของวงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณา 53
3.16 ระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม 57
3.17 ระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ S_1 ไม่นำกระแส (OFF) และ S_2 นำกระแส (ON) 57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.18 ระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ S_1 นำกระแส (ON) และ S_2 ไม่นำกระแส (OFF) 58
3.19 ฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง 61
3.20 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อ d = 50% 64
3.21 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อ d = 70% 64
3.22 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ 65
3.23 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ 67
3.24 ระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีตัวควบคุม 70
3.25 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน 70
3.26 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในกรณีที่มีตัวควบคุม เมื่อมีการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าจาก 340 W ไปเป็น 350 W 75
3.27 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในกรณีที่มีตัวควบคุม เมื่อมีการลดค่ากำลังไฟฟ้าจาก 380 W ไปเป็น 370 W 76
4.1 ขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุตามมาตรฐาน ISO 21780:2020 79
4.2 ค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อ P_{CPL} = 370 W 81
4.3 ค่าเจาะจงเด่นของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณา 81
4.4 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ 82
4.5 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า C_o 84
4.6 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า C_o 84
4.7 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า L 85
4.8 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า L 86
4.9 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{nv} 87
4.10 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{nv} 88
4.11 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{ni} 89
4.12 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{ni} 89
4.13 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ζ_v 91
4.14 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ζ_v 91
4.15 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ζ_i 92

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.16 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ζ_i 93
5.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335 ของบริษัท Texas Instruments 96
5.2 แผนผังการรับ-ส่งข้อมูลสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป 97
5.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335 กับโปรแกรม MATLAB/SIMULINK 98
5.4 ผลการทดสอบระยะเวลาในการประมวลผลชุดคำสั่งของตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน 99
5.5 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเมื่อเปรียบเทียบกับ ผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK 100
5.6 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง สถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า C_o 101
5.7 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง สถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า L 102
5.8 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง สถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{nv} 103
5.9 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง สถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{ni} 104
5.10 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง สถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า ζ_v 105
5.11 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง สถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า ζ_i 106
ข.1 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINL บนโปรแกรม MATLAB ของ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม 136
ข.2 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINL บนโปรแกรม MATLAB ของ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีตัวควบคุม 136
ข.3 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINL บนโปรแกรม MATLAB ของ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับใช้ในการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป 137

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการขยายตัวทางเศรษฐกิจและการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรส่งผลให้ความต้องการใช้พลังงานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่แหล่งพลังงานที่ใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่ยังคงพึ่งพาพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่มีจำกัดและใช้แล้วหมดไป อีกทั้งยังเป็นสาเหตุสำคัญของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและภาวะโลกร้อน ด้วยเหตุนี้ความต้องการนำพลังงานสะอาดมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลจึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยแหล่งพลังงานสะอาดที่ได้รับความสนใจและมีแนวโน้มถูกนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลทั้งในปัจจุบันและในอนาคต คือ พลังงานไฮโดรเจน เนื่องจากมีความหนาแน่นของพลังงานที่สูงเมื่อเทียบกับพลังงานอื่น ๆ และไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม (international energy agency, 2024; Mellino, S., Petrillo, A., Cigolotti, V., Autorino, C., Jannelli, E., and Ulgiati, S. 2017) จากแนวโน้มดังกล่าวทำให้นโยบายด้านพลังงานของประเทศได้ส่งเสริมการใช้พลังงานไฮโดรเจนในภาคส่วนต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาคการขนส่ง ซึ่งเป็นภาคส่วนที่มีการใช้พลังงานและการปล่อยมลพิษในปริมาณสูง การนำพลังงานไฮโดรเจนมาใช้ในระบบขับเคลื่อนถือเป็นแนวทางสำคัญที่จะช่วยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ส่งผลให้ในปัจจุบันพลังงานไฮโดรเจนได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้ในระบบยานยนต์สมัยใหม่ เช่น จักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน (hydrogen-powered electric bicycles) ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell electric vehicles : FCEVs) รถบรรทุกพลังงานไฮโดรเจนขนาดใหญ่ (heavy-duty hydrogen trucks) รถไฟพลังงานไฮโดรเจน (hydrogen-powered trains) และเครื่องบินพลังงานไฮโดรเจน (hydrogen-powered aircraft) เป็นต้น โดยการใช้พลังงานไฮโดรเจนในภาคการขนส่งได้รับการคาดการณ์ว่าจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงมากยิ่งขึ้นในอนาคต (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2564; คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน, 2566) ซึ่งจากแนวโน้มดังกล่าวการพัฒนาระบบขับเคลื่อนที่ใช้พลังงานไฮโดรเจนจึงมีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนผ่านจากพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลไปสู่พลังงานสะอาด ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกพิจารณาระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน เนื่องจากเป็นยานพาหนะที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและสามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนได้ง่าย ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับ

การศึกษาและพัฒนาระบบยานยนต์ไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนได้ โดยระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ชุดเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน (hydrogen fuel cell stack) ทำหน้าที่ผลิตและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านกระบวนการปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่อาศัยไฮโดรเจนและออกซิเจน ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับโหลดของผู้ใช้งาน ส่วนที่ 2 วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี (dc-dc power converter) ที่มีการควบคุม ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตให้คงที่และเหมาะสมกับโหลดชุดขับเคลื่อนของระบบ และส่วนที่ 3 โหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (BLDC motor drive system) ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ตามความต้องการของผู้ใช้งาน (Kheirandish, A., Kazemi, M. S., and Dahari, M. 2014) โดยจากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะพบว่า โหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปลงถ่านของระบบที่พิจารณาประกอบด้วยวงจรแปลงผันกำลังที่มีตัวควบคุมเชื่อมต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (constant power loads, CPLs) โหลดดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ติดลบ (negative impedance) ต่อระบบโดยรวม ซึ่งส่งผลทำให้ระบบเกิดความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearities) กล่าวคือ เป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear system) อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ โดยเฉพาะการทำงานในช่วงโหมดการขับเคลื่อน (driving mode) ของจักรยานไฟฟ้า ซึ่งเมื่อระบบเกิดการขาดเสถียรภาพนอกจากจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมที่ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบลดลงแล้ว ยังส่งผลทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบได้รับความเสียหายและเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานอีกด้วย (Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C. H., and Williamson, G. A. 2006; Rahimi, A. M., and Emadi, A. 2008; Kim, S., and Williamson, S. S. 2012; Daengdon, S., Suyapan, A., Areerak, K-N., and Pakdeeto, J. 2025) ด้วยเหตุนี้การตรวจสอบและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบดังกล่าวจึงมีความสำคัญอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจำเป็นที่จะต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง ซึ่งโดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังจะเป็นแบบจำลองที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (time varying model) เนื่องจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร หากนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพจะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องพิสูจน์หาแบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-invariant model) โดยวิธีที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายสำหรับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี ได้แก่ วิธีค่าเฉลี่ย-ปริภูมิสถานะทั่วไป (generalize state-space averaging method, GSSA) (Emadi, A. 2004; Azer, P., and Emadi, A. 2020) ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นการนำสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (complex Fourier series) ของแบบจำลองมากำจัดพจน์ตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาและเหมาะสำหรับการนำไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของ

ระบบ โดยแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจะถูกจำแนกออกเป็น 2 แนวทาง คือ แนวทางแรก การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นหรือการวิเคราะห์เสถียรภาพของสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal stability analysis) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่อาศัยทฤษฎีบทควบคุมที่เป็นเชิงเส้น ได้แก่ การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง (eigenvalue theorem) (Areerak, K-N., Wu, T., Bozhko, S. V., Asher, G. M., and Thomas, D. W. 2011) และการวิเคราะห์เสถียรภาพบนโดเมนความถี่ด้วยเกณฑ์ของมิดเดิลบรูค (middlebrook's criteria) (Riccobono A. and Santi E., 2014) การวิเคราะห์เสถียรภาพลักษณะนี้จะมีความถูกต้องเฉพาะเมื่อระบบมีการทำงานในช่วงที่แคบ (small range operating) ถ้าโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดอาจส่งผลให้การวิเคราะห์เกิดความผิดพลาดได้ สำหรับแนวทางที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นหรือการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ (large-signal stability analysis) เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยตรง โดยใช้การวิเคราะห์ระนาบเฟส (phase plane analysis) (อภิชัย สุยะพันธ์, 2558) หรือวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ (Lyapunov's direct method) (Mansour, M. Z., Me, S. P., Hadavi, S., Badrzadeh, B., Karimi, A., and Bahrani, B. 2021; Zhang, Y., Zhang, C., and Cai, X. 2021; Andic, C., Ozturk, A., and Turkay, B. 2022) ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพลักษณะนี้เหมาะสำหรับระบบที่มีความซับซ้อนไม่เป็นเชิงเส้น และสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเมื่อมีการทำงานในช่วงที่กว้างได้แต่ก็มีความยุ่งยากและซับซ้อน

ดังนั้นจากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดดังข้างต้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่ได้รับผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยจะเริ่มต้นจากการศึกษาระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน รวมถึงศึกษาพฤติกรรมและผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว เนื่องจากโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ของระบบมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งเป็นสาเหตุที่ส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ จากนั้นจะพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปภายใต้การประมาณค่าอันดับศูนย์เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา และการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงเพื่อคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบ นอกจากนี้การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของระบบจะต้องอยู่ภายใต้มาตรฐาน ISO 21780:2020 ซึ่งเป็นมาตรฐานข้อกำหนดระดับแรงดันไฟฟ้าขนาด 48 V ในระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องและยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณาจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK รวมถึงการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปโดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335 ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์ทางทฤษฎีและการตรวจสอบความถูกต้องให้ผลที่สอดคล้องและ

ตรงกัน ซึ่งยืนยันได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพที่นำเสนอสามารถคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน

1.2.3 เพื่อประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ สำหรับเป็นแนวทางให้วิศวกรในการออกแบบระบบ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางที่มีตัวควบคุมพีไอ ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะโหมดการขับเคลื่อนเท่านั้น

1.3.2 แหล่งจ่ายเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนร่วมกับข้อมูลจากเอกสารผู้ผลิต

1.3.3 การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังในระบบจะพิจารณาเฉพาะโหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง (continuous conduction mode : CCM) เท่านั้น

1.3.4 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านจะถูกแทนที่ด้วยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

1.3.5 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปภายใต้การประมาณค่าอันดับศูนย์

1.3.6 การทำให้เป็นเชิงเส้น (linearization) จะอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง

1.3.7 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณาจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจง

1.3.8 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการพิสูจน์จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในขณะที่การยืนยันจุดการขาดเสถียรภาพจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปบน SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ร่วมกับบอร์ด TMDSDOCK28335

1.4 ขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนขนาด 500 W และระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตขนาด 48 V

1.4.2 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะอ้างอิงเซลล์เชื้อเพลิงรุ่น H-500 จากบริษัท Horizon Fuel Cell Technologies ซึ่งมีพิกัดกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 500 W

1.4.3 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ในระบบที่พิจารณาจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 21780:2020 เพื่อให้ระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน

1.5 สมมติฐานการวิจัย

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยการอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจงสามารถคาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพของระบบที่เกิดจากผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้อย่างถูกต้องแม่นยำ อีกทั้งการออกแบบพารามิเตอร์ของระบบจะมีผลตอบสนองที่เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21780:2020 ซึ่งสามารถยืนยันผลทั้งหมดได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

1.6 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่อาศัยแบบจำลองของระบบ ซึ่งเป็นการพิจารณาพลวัตของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนร่วมกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางที่มีตัวควบคุมเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ภายใต้มาตรฐาน ISO 21780:2020 โดยยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป ซึ่งยังไม่มีงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ใด ๆ ดำเนินการในลักษณะนี้มาก่อน

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้พิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ

1.7.2 ได้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน

1.7.3 ได้ประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ สำหรับเป็นแนวทางให้วิศวกรในการออกแบบระบบ

1.8 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์

รูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์ประกอบด้วยเนื้อหาจำนวน 6 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ สมมติฐานการวิจัย จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 นำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า พร้อมทั้งสรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการทำวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 3 นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณา ทั้งในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมและในกรณีที่มีตัวควบคุม เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบ พร้อมทั้งนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะได้รับการนำเสนอไว้ในส่วนที่เหมาะสมของบทนี้ด้วยเช่นกัน

บทที่ 4 นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน และการประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ พร้อมทั้งการยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

บทที่ 5 นำเสนอการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ ซึ่งกล่าวถึงบทสรุปของการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ สรุปจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งข้อเสนอแนะสำหรับเป็นแนวทางต่อยอดงานวิจัยในอนาคต

ภาคผนวกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีทั้งหมด 4 ส่วน ได้แก่ ภาคผนวก ก แสดงรายการบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา ภาคผนวก ข แสดงรายละเอียดชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ภาคผนวก ค แสดงรายละเอียด

โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และภาคผนวก ง แสดงรายละเอียดโปรแกรมภาษาซี สำหรับการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินงานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่ได้รับผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งในอดีตที่ผ่านมางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ได้มีผู้ศึกษาค้นคว้าและพัฒนางานวิจัยมาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ดังนั้นในบทที่ 2 จึงนำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อ ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งในแต่ละหัวข้อได้นำเสนองานวิจัยโดยเรียงลำดับตามปีที่ตีพิมพ์ รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป พร้อมทั้งสรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการทำวิจัยวิทยานิพนธ์

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า

ในปัจจุบัน การนำพลังงานสะอาดมาประยุกต์ใช้ในระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีเป้าหมายหลักเพื่อลดการพึ่งพาพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล รวมถึงลดผลกระทบต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม จากแนวโน้มดังกล่าวทำให้ยานยนต์ไฟฟ้าได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบจักรยานไฟฟ้า ซึ่งเป็นยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีการนำพลังงานสะอาดมาประยุกต์ร่วมกับระบบขับเคลื่อน ส่งผลให้ระบบดังกล่าวได้มีการปรับปรุงและพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้าเพื่อเป็นข้อมูลที่จะนำมาเลือกเป็นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งสามารถแสดงเป็นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2017	Mellino, S., Petrillo, A., Cigolotti, V., Autorino, C., Jannelli, E., and Ulgiati, S.	บทความนี้นำเสนอการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการผลิตและใช้งานพลังงานจากแบตเตอรี่ลิเธียม (lithium) และเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (proton exchange membrane fuel cell : PEMFC) ด้วยวิธีการประเมินวัฏจักรชีวิต (life cycle assessment : LCA) โดยครอบคลุมตั้งแต่กระบวนการผลิตไปจนถึงการใช้งานจักรยานไฟฟ้า ซึ่งผลการประเมินพบว่า ระบบที่ใช้พลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ นอกจากนี้ได้มีการเสนอให้ประเมินต้นทุนการผลิตตลอดอายุการใช้งานเพื่อสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนในอนาคต
2020	Hung, N. B., and Lim, O.	บทความนี้ทบทวนองค์ความรู้เกี่ยวกับประวัติการพัฒนา การออกแบบ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบจักรยานไฟฟ้าไว้อย่างละเอียด โดยเริ่มจากนำเสนอสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้าในปัจจุบัน ซึ่งจำแนกออกเป็น 3 ประเภท คือ ระบบจักรยานไฟฟ้าแบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าผ่านคันเร่ง ระบบจักรยานไฟฟ้าแบบช่วยปั่น และระบบจักรยานไฟฟ้าแบบสองโหมดการขับเคลื่อน นอกจากนี้ได้กล่าวถึงแหล่งพลังงานที่ใช้ในระบบขับเคลื่อนและประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาของเทคโนโลยีระบบขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้าในอนาคต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2021	Isorna Llerena, F., López González, E., Caparrós Mancera, J. J., Segura Manzano, F., and Andújar, J. M.	บทความนี้นำเสนอการออกแบบและทดสอบระบบจักรยานไฟฟ้าระหว่างระบบที่ใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวกับระบบไฮบริดที่มีเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับแบตเตอรี่ โดยทำการทดสอบภายใต้น้ำหนักรวมที่ใกล้เคียงกันเพื่อประเมินสมรรถนะต่าง ๆ ของระบบ ได้แก่ ประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงาน ระยะทางในการขับขี่ ระยะเวลาการเติมพลังงาน และความยืดหยุ่นในการตอบสนองต่อโหลด ซึ่งผลการทดสอบพบว่า ระบบไฮบริดมีสมรรถนะที่ดีกว่าระบบที่ใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว ทั้งในแง่ความหนาแน่นของพลังงานที่สูงกว่า ระยะทางการขับขี่ที่ไกลกว่า รวมถึงระยะเวลาการเติมพลังงานที่สั้นกว่า ทำให้ระบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบจักรยานไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว
2022	Modesti, D. M.	งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบระบบจักรยานไฟฟ้าขนส่งสินค้าพลังงานไฮโดรเจนแบบไฮบริดที่มีการใช้เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนร่วมกับแบตเตอรี่และอาศัยตัวควบคุมฟัซซีลอจิก สำหรับจัดการพลังงานของระบบอย่างมีประสิทธิภาพ ผลจากสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์พบว่า ระบบจักรยานไฟฟ้าแบบไฮบริดมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าทั้งการใช้พลังงานและระยะทางการขับขี่เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้เพียงแบตเตอรี่อย่างเดียว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2022	Sahwal, C. P., Dinh, T. Q., and Sengupta, S.	บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบจัดการความร้อน (thermal management system : TMS) ขั้นสูงที่รองรับทั้งการระบายความร้อนและการทำความร้อนแบบพาสซีฟ (passive) และแอคทีฟ (active) สำหรับระบบจักรยานไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อรักษาอุณหภูมิของส่วนประกอบหลักภายในระบบขับเคลื่อน ได้แก่ ชุดแบตเตอรี่ วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี อินเวอร์เตอร์ ชุดชาร์จแบตเตอรี่ และมอเตอร์ไฟฟ้า นอกจากนี้ได้มีการสร้างแบบจำลองพลวัตของระบบส่งกำลังจักรยานไฟฟ้าที่รวมระบบการเบรกแบบสร้างพลังงานกลับคืน (regenerative braking) เข้ากับระบบจัดการความร้อน เพื่อรองรับการพัฒนาและประเมินผลการควบคุม
2022	Contò, C., and Bianchi, N.	บทความนี้นำเสนอองค์ความรู้และแนวโน้มในปัจจุบันของระบบจักรยานไฟฟ้า โดยเน้นข้อดีของระบบจักรยานไฟฟ้าแบบช่วยปั่น (pedal-assisted bicycle) อีกทั้งได้นำเสนอเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานที่ใช้ในระบบ โดยมุ่งเน้นไปที่แบตเตอรี่ลิเธียม ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานกับระบบจักรยานไฟฟ้าแบบช่วยปั่น นอกจากนี้ได้นำเสนอตำแหน่งการติดตั้งและประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งพบว่าตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมคือ ส่วนตรงกลางของจักรยานไฟฟ้าเนื่องจากช่วยกระจายน้ำหนักได้ดี และประเภทของมอเตอร์-ไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร (permanent magnet synchronous motor : PMSM)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

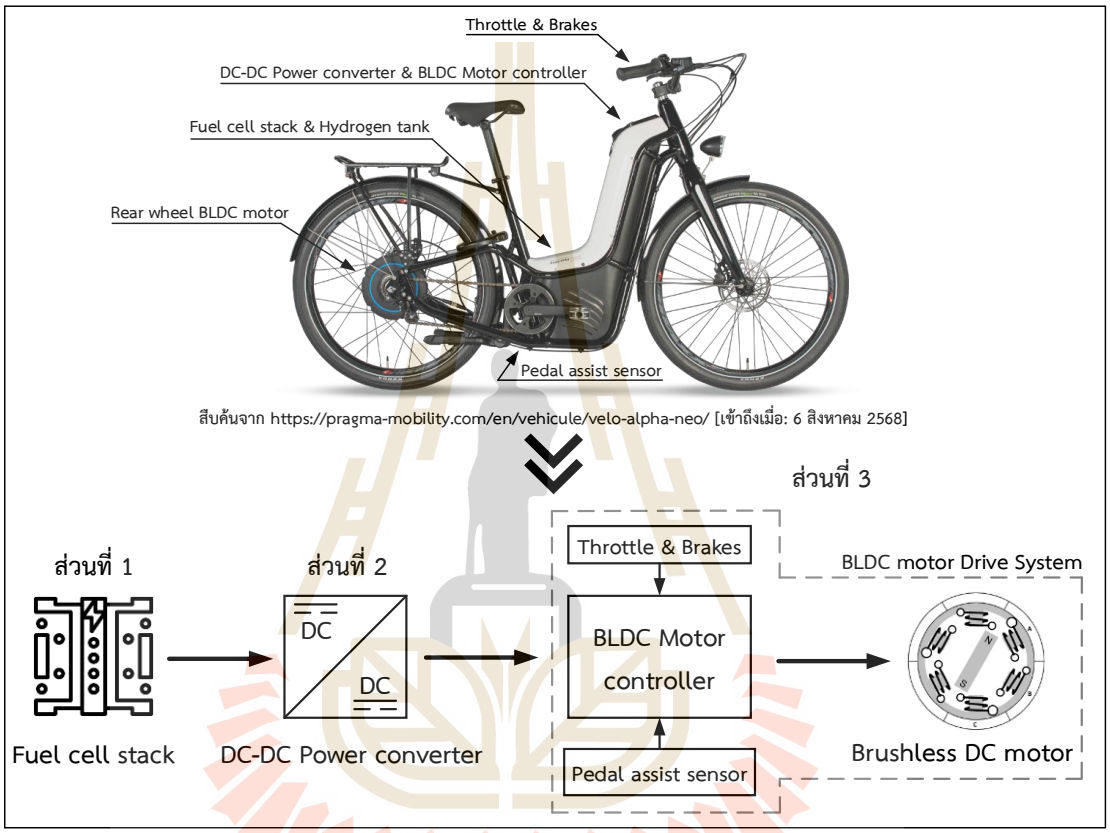
ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2024	Mittal, U., Varshney, G., Yadav, S., Pawar, A., Singh, S., and Roy, A. K.	บทความนี้นำเสนอการออกแบบระบบจักรยาน-ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นการพัฒนาและปรับปรุงมาจากระบบจักรยานไฟฟ้าแบตเตอรี่แบบดั้งเดิม โดยระบบดังกล่าวจะประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ วงจรแปลงผันกำลัง-ดีซีเป็นดีซี และโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (brushless DC motor : BLDC motor) ที่มีการควบคุม ซึ่งถูกติดตั้งบริเวณล้อหลังของจักรยานไฟฟ้า อีกทั้งได้มีการคำนวณแรงต้าน กำลังไฟฟ้าที่ต้องใช้ การเลือกขนาดแบตเตอรี่ และสมรรถนะการทำงานภายใต้น้ำหนักของผู้ขับขี่ที่แตกต่างกัน
2025	Kumai, A., Sonkar, K., Chaudhari, C., Jindal, T., Katiyar, A., Singh, S., Bera, T., Badhe, M. R., Srivastva, U., and Sharma, A.	บทความนี้นำเสนอแนวคิด การพัฒนา และการออกแบบระบบควบคุมจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนแบบไฮบริด โดยมุ่งเน้นไปที่การออกแบบขนาดความจุของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนร่วมกับชุดแบตเตอรี่ เพื่อให้สามารถลดการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบโดยรวม อีกทั้งได้มีการยืนยันผลโดยเปรียบเทียบระหว่างการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการสร้างชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้าดังตารางที่ 2.1 พบว่า สถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้าในปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ ประเภทแรกคือ ระบบจักรยานไฟฟ้าแบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าโดยตรง (pure electric bicycle) เป็นระบบที่ผู้ขับขี่ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าผ่านคันเร่ง (throttle) ที่บริเวณแฮนด์ของจักรยานไฟฟ้า

เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปยังมอเตอร์ไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งทำให้จักรยานไฟฟ้าประเภทนี้สามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่จำเป็นต้องออกแรงปั่น ประเภทที่สองคือ ระบบจักรยานไฟฟ้าแบบช่วยปั่น จักรยานไฟฟ้าประเภทนี้เป็นระบบที่ผสมผสานระหว่างกำลังการปั่นจากผู้ขับขี่ร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้า โดยอาศัยเซ็นเซอร์ตรวจวัดความเร็วรอบหรือแรงบิดของการปั่น เพื่อส่งสัญญาณควบคุมไปยังหน่วยควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (electronic control unit : ECU) สำหรับประมวลผลและสั่งการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าให้ส่งกำลังที่เหมาะสมขณะผู้ขับขี่กำลังปั่น และประเภทที่สามคือ ระบบจักรยานไฟฟ้าแบบสองโหมดการขับเคลื่อน (dual-mode electric bicycle) เป็นระบบที่รวมโหมดการทำงานของสองประเภทแรกเข้าด้วยกัน โดยที่ผู้ขับขี่สามารถเลือกใช้งานได้ทั้งโหมดขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าผ่านคันเร่งหรือโหมดช่วยปั่นผ่านเซ็นเซอร์ตรวจวัดความเร็วรอบของการปั่น และเมื่อพิจารณาไปที่แหล่งพลังงานที่ใช้ในระบบจักรยานไฟฟ้าสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ระบบที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นระบบที่ในปัจจุบันเป็นที่นิยมและใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีระบบรองรับการชาร์จแบตเตอรี่อย่างกว้างขวาง แต่ยังมีข้อจำกัดที่สำคัญคือ ระยะทางวิ่งต่อการชาร์จที่จำกัด น้ำหนักโดยรวมของระบบ ระยะเวลาการชาร์จแบตเตอรี่ยาวนาน ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลงเมื่อใช้งานผ่านไปแล้วในระยะยาว รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตและการใช้งานของแบตเตอรี่ ในส่วนถัดมาจะเป็นระบบที่ใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยระบบดังกล่าวมักมีลักษณะเป็นระบบแบบไฮบริดที่มีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บริเวณด้านบนของจักรยานเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าและนำไปเก็บสะสมในแบตเตอรี่ แนวทางนี้ช่วยลดการพึ่งพาพลังงานจากโครงข่ายสำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ แต่อย่างไรก็ตามการผลิตพลังงานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความเข้มแสงของพื้นที่การติดตั้ง รวมถึงประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลให้ยังไม่สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานหลักได้อย่างต่อเนื่องในทุกสภาวะการใช้งาน จากข้อจำกัดที่ได้กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นจึงได้มีการพัฒนาและปรับปรุงมาเป็นระบบที่ใช้พลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน ซึ่งมีข้อได้เปรียบหลายประการ เช่น ระยะเวลาการเติมเชื้อเพลิงที่รวดเร็วกว่าการชาร์จแบตเตอรี่ ระยะทางในการขับขี่ที่ยาวนานกว่า และน้ำหนักโดยรวมที่เบา ซึ่งทำให้ระบบที่ใช้พลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ แต่อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวยังมีข้อเสียในแง่ของต้นทุนการผลิตที่สูง ความปลอดภัยสำหรับการจัดเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจน รวมถึงสถานที่เติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่น้อย ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกศึกษาระบบขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้าที่ใช้แหล่งพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน เนื่องจากมีข้อดีเกี่ยวกับประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ อีกทั้งยังเป็นระบบที่มีแนวโน้มจะได้รับการพัฒนาและต่อยอดได้ในอนาคต โดยระบบดังกล่าวมีองค์ประกอบหลักอยู่ 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 แหล่งจ่ายเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน มีหน้าที่ผลิตและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในระบบ ส่วนที่ 2 วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี ทำหน้าที่ควบคุม

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงให้เหมาะสมกับโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าของระบบซึ่งเป็นองค์ประกอบในส่วนที่ 3 และโดยทั่วไปจะเป็นโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มีการควบคุมความเร็วรอบ โดยสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 ดังนี้



รูปที่ 2.1 สถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณา

จากสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาดังแสดงในรูปที่ 2.1 จะสังเกตได้ว่า พลังงานหลักของระบบมาจากแหล่งจ่ายเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน ซึ่งโดยทั่วไปแหล่งจ่ายประเภทนี้จะผลิตแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าไม่คงที่ และขึ้นอยู่กับความต้องการของโหลด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ให้มีค่าคงที่และเหมาะสมกับโหลดชุดขับเคลื่อน สำหรับงานงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางเนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังดังกล่าวสามารถทำงานได้ทั้งในโหมดขับเคลื่อนและโหมดแปลงผันพลังงานสูญเสียขณะห้ามล้อ โดยพลังงานสูญเสียที่ได้จะถูกนำมากักเก็บไว้ในอุปกรณ์เสริม เช่น แบตเตอรี่ หรือตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitor) เป็นต้น

ส่งผลให้ระบบโดยรวมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาวิจัยทั้งหมดในวิทยานิพนธ์จะพิจารณาเฉพาะโหมดการขับเคลื่อนเท่านั้น ซึ่งการเลือกใช้วงจรแปลงผันกำลังแบบสองทิศทางเพื่อเป็นสถาปัตยกรรมที่สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นระบบไฟฟ้าแบบไฮบริดได้สำหรับงานวิจัยในอนาคต โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางที่ใช้ในระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง

วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีมีความสำคัญอย่างมากต่อระบบขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน เนื่องจากทำหน้าที่ควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ให้มีค่าคงที่และเหมาะสมกับโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าของระบบ หากไม่มีการใช้งานวงจรแปลงผันกำลังดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนโดยรวมได้ และเพื่อให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถต่อยอดเป็นระบบไฟฟ้าแบบไฮบริดได้สำหรับงานวิจัยในอนาคต ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงศึกษาค้นคว้าข้อดีและข้อเสียที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางที่ใช้ในระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนเพื่อเป็นข้อมูลที่จะนำมาเลือกใช้เป็นวงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งสามารถแสดงเป็นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2019	Gorji, S. A., Sahebi, H. G., Ektesabi, M., and Rad, A. B.	บทความนี้ได้ทบทวนโทโพโลยี (topology) ของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง โดยจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทแบบแยกกราวด์ (isolated type) และประเภทแบบไม่แยกกราวด์ (non-isolated type) พร้อมทั้งนำเสนอข้อดีและข้อเสียของวงจรแต่ละประเภท
2020	Keshavarzi, M. D., and Ali, M. H.	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางสำหรับใช้ในระบบกักเก็บพลังงานของดีซีไมโครกริด (DC microgrid) และไมโครกริดแบบผสม (hybrid microgrid) โดยใช้วงจรแปลงผันแบบบูสต์จำนวนสองชุดที่ต่อ

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง (ต่อ)

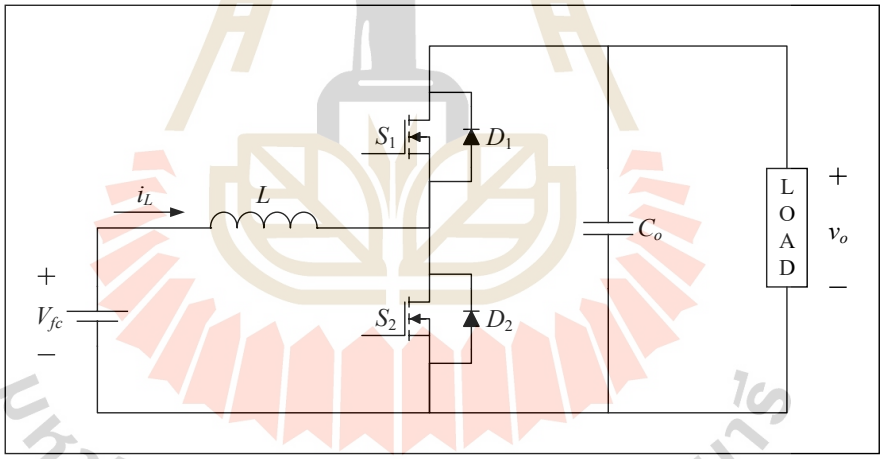
ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		แบบหันหลังชนกัน (back-to-back) ซึ่งมีการปรับการทำงานแบบสมมาตรและมีอัตราขยายแรงดันเท่ากันทั้งในโหมดการชาร์จประจุและโหมดคายประจุพร้อมทั้งนำเสนอการวิเคราะห์ระบบโดยอาศัยผลตอบสนองเชิงความถี่และการประมาณค่าความต้านทานโหลดสมมูลเพื่อปรับปรุงสมรรถนะการทำงานของวงจรให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
2022	Wang, J., Wang, B., Zhang, L., Wang, J., Shchurov, N. I., and Malozyomov, B. V.	บทความนี้นำเสนอการทบทวนโทโพโลยีของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางสำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด (hybrid energy storage system : HESS) ในยานยนต์ไฟฟ้าทั้งแบบที่มีการแยกกราวด์และแบบไม่มีการแยกกราวด์ เพื่อประเมินและเปรียบเทียบสมรรถนะของวงจรทั้งในด้านการแปลงผันพลังงาน ความเค้นของอุปกรณ์ การกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้า ประสิทธิภาพ ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า และจำนวนอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร
2023	Nimitti, F. G., Giacomini, J. C., and Andrade, A. M. S. S.	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางชนิดไม่แยกกราวด์ โดยรวมวงจรแปลงผันแบบบัคและแบบบูสต์เข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มอัตราขยายแรงดันและลดความเค้นทางไฟฟ้าของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร ซึ่งส่งผลให้วงจรมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น
2025	Tuluhong, A., Xu, Z., Chang, Q., and Song, T.	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางทั้งประเภทแบบแยกกราวด์และแบบไม่แยกกราวด์สำหรับใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (photovoltaic : PV)

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		พร้อมทั้งวิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรแต่ละประเภท นอกจากนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมตั้งแต่วิธีแบบดั้งเดิมไปจนถึงวิธีขั้นสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดการสูญเสียภายในวงจร
2026	Seesamlee, P., Pakdeeto, J., Suyapan, A., and Areerak, K-N.	บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางที่ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบระหว่างการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ และยืนยันผลการออกแบบด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางดังตารางที่ 2.2 พบว่า วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากสามารถควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปยังโหลดของระบบได้และนอกจากนี้ยังมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบ เพราะจากวงจรแปลงผันกำลังดังกล่าวสามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 2 โหมด คือ โหมดการทำงานแบบบูสต์ที่จะเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนและส่งจ่ายกำลังให้กับโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ส่วนโหมดการทำงานแบบบัค ซึ่งทำหน้าที่แปลงผันพลังงานสูญเสียขณะห้ามล้อเพื่อนำไปกักเก็บไว้ในอุปกรณ์เสริม เช่น แบตเตอรี่ โดยวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ วงจรประเภทแบบแยกกราวด์ และวงจรประเภทแบบไม่แยกกราวด์ โดยวงจรแบบแยกกราวด์จะอาศัยหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อแยกกราวด์ระหว่างด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำ ซึ่งเหมาะสำหรับระบบที่ต้องการแปลงระดับแรงดันในช่วงที่กว้างและต้องการความน่าเชื่อถือสูง แต่จะมีข้อจำกัดทางด้านโครงสร้างที่ซับซ้อน ต้นทุนสูง รวมถึงการสูญเสียต่าง ๆ

ที่เกิดจากหม้อแปลง ในขณะที่วงจรแบบไม่แยกกราวด์จะอาศัยการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อแปลงระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งวงจรประเภทนี้มีจุดเด่นคือ มีน้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพสูง เหมาะสำหรับระบบที่ต้องการแปลงแรงดันไฟฟ้าในระดับที่ไม่สูงมากนัก ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกพิจารณาวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง (bidirectional buck-boost dc-dc converter) ซึ่งเป็นวงจรประเภทแบบไม่แยกกราวด์ โดยวงจรดังกล่าวมีข้อดีคือ เป็นวงจรที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน มีอุปกรณ์ภายในวงจรน้อย ทำให้การวิเคราะห์และการออกแบบอุปกรณ์ภายในวงจรสามารถดำเนินการได้ง่าย ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 โดยจากรูปจะพบว่า วงจรแปลงผันดังกล่าวมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบ สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำนวน 2 ตัว ที่มีการทำงานแบบสลับกัน ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุภายในวงจรสำหรับใช้กรองสัญญาณกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าตามลำดับ และโหลดซึ่งสำหรับระบบจักรยานไฟฟ้าจะเป็นชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน



รูปที่ 2.2 วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ในปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบจักรยานไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบหลักสำคัญเป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับโหลดของระบบ หรือโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ ซึ่งอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังและระบบควบคุม แต่อย่างไรก็ตาม

วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดดังกล่าวนอกจากจะส่งผลทำให้ระบบเกิดความไม่เป็นเชิงเส้นแล้ว ยังส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังอีกด้วย เมื่อระบบเกิดการขาดเสถียรภาพจะส่งผลทำให้สมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมลดลง หรืออาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบโดยรวมได้ สำหรับระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสามารถแสดงเป็นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	**คณะผู้วิจัย**	**สาระสำคัญของงานวิจัย**
2006	Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C. H., and Williamson, G. A.	บทความนี้นำเสนอนิยามของโหลดกำลังไฟฟ้า-คงตัวในระบบไฟฟ้า ซึ่งหมายถึงโหลดที่มีการรักษาค่ากำลังไฟฟ้าให้คงที่ เช่น วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ หรือโหลด-ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ โดยโหลดในลักษณะดังกล่าวจะทำให้เกิดค่าอิมพีแดนซ์เชิงลบต่อระบบโดยรวม และเป็นสาเหตุทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพ
2008	Khaligh, A.	บทความนี้นำเสนอผลกระทบของโหลดกำลัง-ไฟฟ้าคงตัวต่อเสถียรภาพในระบบยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังเมื่อมีการควบคุมที่แสดงถึงค่าอิมพีแดนซ์เชิงลบต่อระบบโดยรวม และนำไปสู่การขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2010	Rahimi, A. M., Williamson, G. A., and Emadi, A.	บทความนี้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยเทคนิคลูปยกเลิก (loop cancellation) ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นการป้อนกลับแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อชดเชยผลกระทบที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวและสามารถทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพ
2020	Wu, H., Pickert, V., Ma, M., Ji, B., and Zhang, C.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยวิธีเมทริกซ์แบบครบหนึ่งคาบ (complete-cycle matrix) เพื่อวิเคราะห์ความไม่เสถียรของระบบในช่วงเวลาเร็ว (fast timescale instability) ที่เกิดจากค่าความต้านทานติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวภายในระบบ
2022	Phosung, R., Areerak, K-N., Sopapirm, T., and Areerak, K-L.	บทความนี้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยวิธีการชดเชยลูปป้อนไปหน้า (feedforward loop) ร่วมกับเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ด้วยอัลกอลิทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (adaptive tabu search : ATS) ซึ่งวิธีการดังกล่าวถูกนำมาใช้เพื่อบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบอันเนื่องมาค่าอิมพีแดนซ์เชิงลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

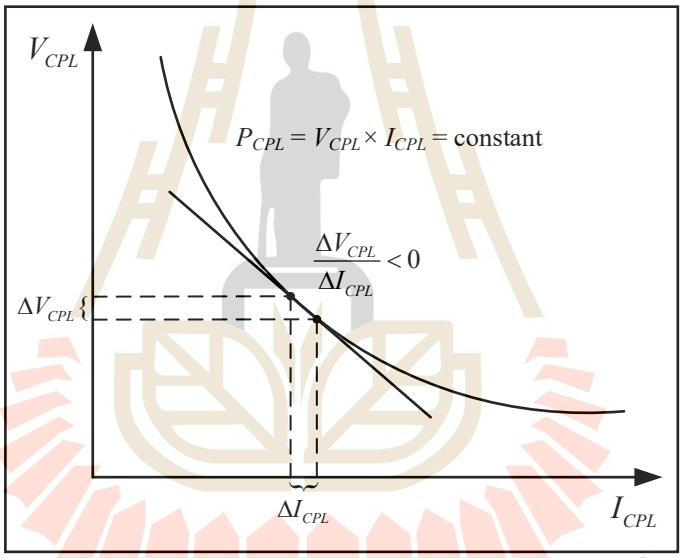
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2023	Alipour, M., Zarei, J., Razavi-Far, R., Saif, M., Mijatovic, N., and Dragičević, T.	บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบดีซีไมโครกริดที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยผสมผสานระหว่างเทคนิคการทำให้เป็นเชิงเส้นแบบป้อนกลับที่แม่นยำ (exact feedback linearization) การควบคุมโหมดการเลื่อน (sliding mode control) และการควบคุมแบบย้อนกลับทีละขั้น (backstepping control) ร่วมกับตัวสังเกตการรบกวนแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear disturbance observe : NDO) เพื่อกำจัดผลกระทบต่อเสถียรภาพที่เกิดจากค่าอิมพีแดนซ์เชิงลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
2024	Hassan, M. A., Su, C. L., Pou, J., Almakhles, D., Zhan, T. S., and Lo, K. Y.	บทความนี้นำเสนอการควบคุมแบบพาสซีฟที่มีความคงทน (robust passivity-base control) สำหรับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางชนิดอินเตอร์ลีฟในระบบดีซีไมโครกริดบนเรือ (DC shipboard microgrid) เพื่อแก้ปัญหาความไม่เสถียรภาพที่เกิดจากค่าความต้านทานติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบ นอกจากนี้ยังได้มีการเพิ่มตัวสังเกตการรบกวนแบบไม่เป็นเชิงเส้น (NDO) เข้าไปในระบบเพื่อกำจัดความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวของแรงดันบัสไฟตรง (DC bus)

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังดังตารางที่ 2.3 พบว่าวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงานซึ่งในสภาวะคงตัว (steady state) จะมีค่ากำลังไฟฟ้าคงที่ที่ค่าหนึ่งโดยขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติงานของ

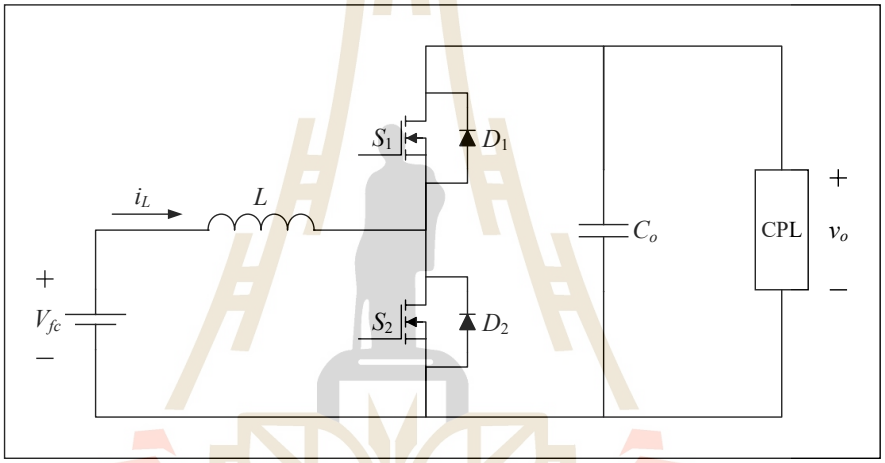
ระบบ (operating points) ดังนั้นการทำงานของวงจรแปลงผันดังกล่าวจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยโหลดในลักษณะนี้จะมีเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากรูปจะสังเกตได้ว่า เมื่อกระแสไฟฟ้าของโหลด (I_{CPL}) มีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด (V_{CPL}) มีค่าลดลง ในทางกลับกันหากกระแสไฟฟ้าของโหลดมีค่าลดลง แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดจะมีค่าเพิ่มขึ้น เพื่อให้กำลังไฟฟ้าของโหลดมีค่าคงที่ จึงส่งผลทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของโหลดมีค่าติดลบ ($\frac{\Delta V_{CPL}}{\Delta I_{CPL}} < 0$) กล่าวคือโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะมีลักษณะเป็นค่าความต้านทานหรือค่าอิมพีแดนซ์แบบติดลบ (negative resistance/negative impedance) ต่อระบบโดยรวม ซึ่งเมื่อนำโหลดดังกล่าวนี้มาต่อกับระบบผ่านวงจรกรองจะทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพได้



รูปที่ 2.3 เส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

เมื่อพิจารณาระบบขับเคลื่อนของจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนในรูปที่ 2.1 จะพบว่าโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มีการควบคุมความเร็วรอบให้คงที่จะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว เนื่องจากภายในโหลดดังกล่าวจะมีวงจรแปลงผันกำลังที่ทำหน้าควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าตามความต้องการของผู้ขับขี่ หากนำมาต่อเข้ากับระบบโดยรวมผ่านวงจรกรองจะส่งผลทำให้ความหน่วง (damping) ของวงจรกรองที่มีค่าเป็นบวกมีค่าลดลง เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ติดลบของโหลด ซึ่งทำให้เกิดการกระเพื่อมของสัญญาณกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าภายในระบบเพิ่มสูงขึ้น จนนำไปสู่การลู่ออกจาก

จุดปฏิบัติงานเดิม โดยเป็นสภาวะที่เรียกว่า ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพและเมื่อระบบจักรยานไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมและอาจเป็นสาเหตุทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบได้รับความเสียหาย ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนโดยระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อแทนโหลดชุดขับเคลื่อนด้วยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้สามารถคาดการณ์จุดการทำงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.4 ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมและผลตอบสนองของระบบภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ รวมถึงใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ แต่โดยทั่วไปแบบจำลองของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังมักเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาอันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าวและได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสามารถนำไปใช้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ง่ายมากยิ่งขึ้น โดยสามารถแสดงเป็นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.4 ดังนี้

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1997	Mahdavi, J., Emaadi, A., Bellar, M. D., and Ehsani, M.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี ได้แก่ วงจรแปลงผันแบบบัค วงจรแปลงผันแบบบูสต์ และวงแปลงผันแบบบัค-บูสต์ ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging : GSSA) เพื่อกำจัดพจน์ตัวแปรเวลาอันเนื่องมาจากการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถอธิบายพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ
2004	Emadi, A.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันดีซีแบบหลายตัว (multiconverter DC power electronic systems) ต่อขนานกัน โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK
2004	Emadi, A.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเอซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวขนานกับโหลดตัวต้านทานด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป และได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กของระบบโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้น

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2007	Han, L., Wang, J., and Howe, D.	บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบหกพัลส์และสิบสองพัลส์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะเพื่อกำจัดผลของสวิตช์ไดโอดภายในวงจรและได้แบบจำลองของระบบที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา อีกทั้งได้นำเสนอผลการเปลี่ยนแปลงมุมเหลื่อมของวงจรเรียงกระแสที่ส่งผลต่อความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้น
2020	Azer, P., and Emadi, A.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดหลายเฟสแบบอินเตอร์ลีฟ (multi-phase interleaved) ทั้งประเภทแบบบัค แบบบูสต์ และแบบบัค-บูสต์ ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อจำลองพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบ อีกทั้งได้มีการตรวจสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบกับแบบจำลองสวิตช์บนโปรแกรม PLECS
2021	Lu, Z., Song, J., Zheng, C., Xu, W., and Wang, X.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรบริดจ์แอคทีฟชนิดฮาล์ฟบริดจ์หลายชุดที่ต่อเรียงกัน (Cascade H-bridge Multiple Active Bridge : CHB-MAB) ที่มีการต่อแบบอินพุตอนุกรมเอาต์พุตขนาน (Input Series Output Parallel : ISOP) โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับแบบจำลองแม่นตรง

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2022	Chaicharoenaudomrung, K., Pakdeeto, J., Areerak, K-N., and Areerak, K-L.	บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant) ของระบบดีซีไมโครกริดที่มีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV arrays) จ่ายให้กับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ต่อแบบขนาน โดยใช้วิธีดีคิวร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิ-สถานะทั่วไป เพื่อกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ของอุปกรณ์ภายในวงจร พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์
2022	Alrajhi, H.	บทความนี้นำเสนอแบบจำลองเฉลี่ยของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบบัค แบบบูสต์ และแบบบัค-บูสต์ที่มีการต่อขนานกันสำหรับระบบดีซีไมโครกริด โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิ-สถานะทั่วไป เพื่อกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK
2024	Mokhtari, K., Shokri-Kojori, S., and Aliyari-Shoorehdeli, M.	บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งควอไซต์ (quasi Z-source : qZSI) โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อใช้ออกแบบตัวควบคุมของระบบ และได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีอสมการเมทริกซ์แบบเชิงเส้น (linear matrix inequality) พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2025	Daengdon, S., Suyapan, A., Areerak, K-N., and Pakdeeto, J.	บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคซึ่งควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (sliding mode controller : SMC) โดยใช้วิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา และได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงมาวิเคราะห์ผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบ พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป และจากชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังดังตารางที่ 2.4 พบว่าโดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying model) อันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร หากนำแบบจำลองดังกล่าวไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมและการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบจะส่งผลให้เกิดความยุ่งยากและความซับซ้อนอย่างมาก ด้วยเหตุนี้การกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์และได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวสามารถนำไปใช้ออกแบบระบบควบคุมและศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบได้ง่ายมากยิ่งขึ้น โดยการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาที่นิยมใช้กับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีคือ วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ สำหรับงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ซึ่งมีระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีที่มีการควบคุม ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมต่อการออกแบบระบบควบคุมและการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบ โดยรายละเอียดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบไฟฟ้ากำลังไม่เพียงแต่ทำให้ระบบเกิดความไม่เป็นเชิงเส้นแต่ยังส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวมอีกด้วย ด้วยเหตุนี้การตรวจสอบและการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจึงเป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพื่อให้สามารถคาดการณ์จุดทำงานของระบบที่อาจส่งผลทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และหลีกเลี่ยงการทำงาน ณ จุดดังกล่าวได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสามารถแสดงเป็นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.5 ดังนี้

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011	Areerak, K-N., Wu, T., Bozhko, S. V., Asher, G. M., and Thomas, D. W. P.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น เพื่อคาดการณ์จุดการทำงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ นอกจากนี้ได้นำเสนอผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ และยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2012	Riccobono, A., and Santi, E.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยใช้เกณฑ์ของมิดเดิลบรูคก์ เกณฑ์อัตราขยายเผื่อและเฟสเผื่อ (gain margin phase margin criteria) เกณฑ์การใช้ข้อโต้แย้งฝั่งตรงข้าม (opposing argument criteria) และเกณฑ์การวิเคราะห์พลังงาน (energy analysis criteria) เพื่อกำหนดขอบเขตการมีเสถียรภาพของระบบบนแผนภาพโพลาร์ โดยอาศัยอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ทางฝั่งอินพุตและเอาต์พุตของวงจร นอกจากนี้ได้นำเสนอเกณฑ์การวิเคราะห์แบบพาสซีฟโดยใช้อิมพีแดนซ์รวมที่บัสไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับใช้ในการออกแบบระบบ
2015	Lu, X., Sun, K., Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Huang, L., and Wang, J.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กสำหรับระบบดีซีไมโครกริดที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยพิจารณาจากอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ทางฝั่งอินพุตและเอาต์พุตของระบบ พร้อมทั้งนำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการสร้างอิมพีแดนซ์เสมือน (virtual-impedance based stabilizers) เพื่อเพิ่มการหน่วง (damping) ให้กับระบบ นอกจากนี้ได้ยืนยันผลการวิเคราะห์และการสร้างเสถียรภาพผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2017	Amin, M., and Molinas, M.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี โดยเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ระหว่างวิธีการวิเคราะห์แบบอิมพีแดนซ์และทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีสามารถใช้ประเมินความไม่เสถียรของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2021	Pakdeeto, J., Areerak, K-N., Bozhko, S., and Areerak, K-L.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงสำหรับระบบดีซีไมโครกริดที่จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และได้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพของระบบโดยใช้เทคนิคการชดเชยแบบแอคทีฟทางฝั่งโหลดด้วยเทคนิคลูปยกเลิก นอกจากนี้ได้ยืนยันผลการวิเคราะห์และการสร้างเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ
2021	Suyapan, A., Areerak, K-N., Bozhko, S., Yeoh, S. S., and Areerak, K-L.	บทความนี้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีลูปยกเลิกร่วมกับสมการป้อนกลับอย่างง่ายสำหรับระบบไฟฟ้ากระแสตรงบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น (more electric aircraft : MEA) ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว พร้อมทั้งนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กและสัญญาณขนาดใหญ่ โดยอาศัยทฤษฎีบท-ค่าเจาะจงและการวิเคราะห์ระนาบเฟส ตามลำดับ นอกจากนี้ได้มีการยืนยันผลการวิเคราะห์และการสร้างเสถียรภาพของระบบดังกล่าวด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

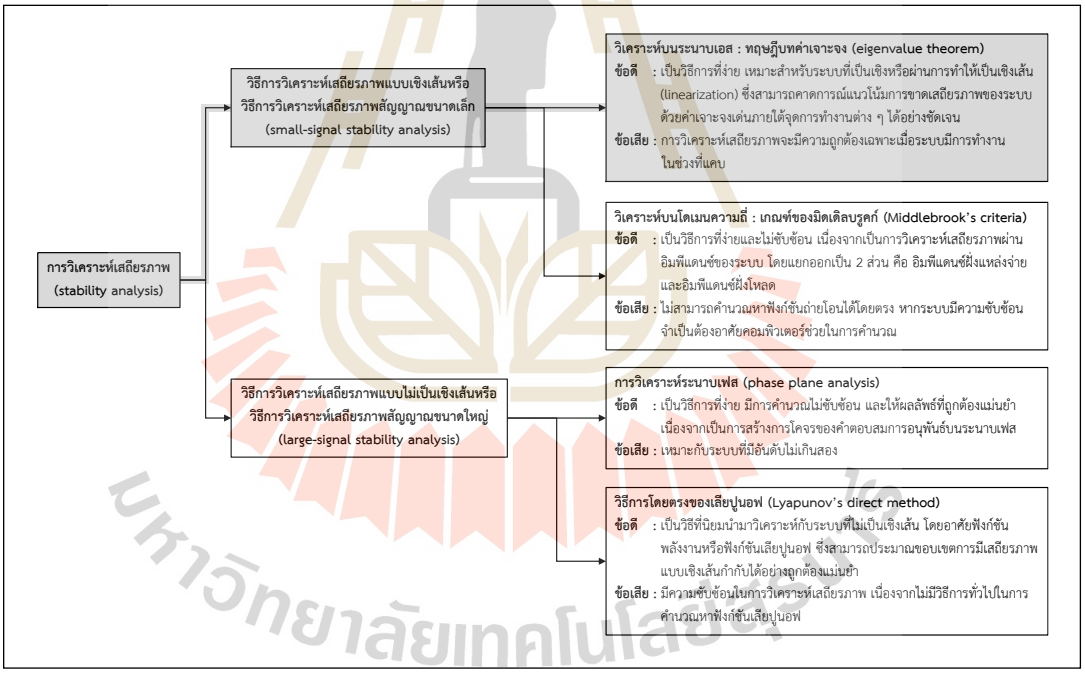
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2022	Zhang, Y., Zhang, C., and Cai, X.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของการซิงโครไนซ์กริด (grid-synchronization stability : GSS) ที่มีการป้อนกลับแบบเฟสล็อกลูป (phase-locked loop) โดยอาศัยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟผ่านการสร้างฟังก์ชันเลียปูนอฟเพื่อประเมินขอบเขตการมีเสถียรภาพของระบบได้อย่างแม่นยำ
2024	Phosung, R., Areerak, K-N., and Areerak, K-L.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้นของระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสตรงบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยอาศัยทฤษฎีบท-ค่าเจาะจงและการวิเคราะห์ระนาบเฟส และได้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบโดยใช้เทคนิคลูปยกเลิกร่วมกับค่าอัตราขยายแบบป้อนกลับที่เหมาะสมเพื่อกำจัดความไม่เสถียรที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว พร้อมทั้งยืนยันผลการวิเคราะห์และการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป
2025	Liu, P., Zeng, X., Xi, J., Feehally, T., He, Y., and Pei, X.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโครงข่ายไฟฟ้ากระแสตรงบนเครื่องบินที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell-powered electric aircraft : FCEA) ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงร่วมกับทฤษฎีการแตกแขนง (bifurcation theory) เพื่อประเมินความไม่เสถียรที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2026	Zeng, X., Cao, L., Ye, Y., Loo, K. H., and Huang, X.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงและสัญญาณขนาดใหญ่ด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ สำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบดูอัล-แอกทีฟบริดจ์ (dual-active bridge : DAB) ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และประเมินขอบเขตการมีเสถียรภาพของระบบ พร้อมทั้งยืนยันผลการวิเคราะห์จากชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 2.5 แผนภาพสรุปการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังดังตารางที่ 2.5 สามารถสรุปเป็นแผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งจากรูป จะพบว่า วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถจำแนกได้เป็น 2 วิธีการหลัก ๆ ได้แก่ วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นหรือวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณ

ขนาดเล็ก (small-signal stability analysis) ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการสำหรับระบบที่เป็นเชิงเส้น แต่ในกรณีที่ระบบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถอาศัยการทำให้เป็นเชิงเส้น (linearization) ด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) อันดับหนึ่ง เพื่อให้แบบจำลองของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น และการวิเคราะห์เสถียรภาพมี 2 แนวทาง คือ แนวทางที่ 1 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง (eigenvalue theorem) เป็นวิธีการวิเคราะห์ค่าเจาะจงเด่น (dominant poles) ของระบบบนระนาบเอส ในขณะที่แนวทางที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์ของมิดเดิลบรูคก์ เป็นวิธีการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ทางฝั่งแหล่งจ่ายหรืออินพุตอิมพีแดนซ์ (input impedance) และอิมพีแดนซ์ทางฝั่งโหลดหรือเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (output impedance) ของระบบบนโดเมนความถี่ โดยแนวทางทั้งสองที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ง่ายไม่ซับซ้อนและสามารถคาดการณ์จุดการขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างแม่นยำ แต่จะมีข้อจำกัดคือการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะมีความถูกต้องในช่วงการทำงานที่แคบ (small range operation) เท่านั้น สำหรับวิธีที่สองเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นหรือวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ (large-signal stability analysis) วิธีดังกล่าวเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ ซึ่งจะมีอยู่ด้วยกัน 2 แนวทางที่นิยมใช้ คือ แนวทางที่ 1 การวิเคราะห์ระนาบเฟส (phase plane analysis) เป็นวิธีการทางกราฟิกที่จะสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ (trajectory) ลงบนระนาบเฟส จากนั้นจะดำเนินการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบจากการโคจรดังกล่าว ซึ่งเป็นแนวทางที่ง่ายและให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามแนวทางดังกล่าวมีข้อจำกัดคือ สามารถนำมาวิเคราะห์กับระบบที่มีอันดับไม่เกิน 2 เท่านั้น ในขณะที่แนวทางที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ (Lyapunov's direct method) เป็นแนวทางที่อาศัยการสร้างฟังก์ชันพลังงาน (energy-like function) หรือฟังก์ชันเลียปูนอฟเพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง และยังสามารถประมาณขอบเขตการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ (region of asymptotic stability : RAS) ได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามแนวทางดังกล่าวจะมีความยุ่งยากและซับซ้อน เนื่องจากไม่มีวิธีการทั่วไปในการคำนวณหาฟังก์ชันพลังงานหรือฟังก์ชันเลียปูนอฟ สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ดังแสดงด้วยพื้นที่สีเทาในรูปที่ 2.4 เนื่องจากวิธีดังกล่าวเป็นวิธีการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และสามารถคาดการณ์จุดปฏิบัติงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบที่ส่งผลต่อเสถียรภาพได้อีกด้วย

2.7 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 เป็นการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า ผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง พร้อมทั้งสรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม ซึ่งถือเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญสำหรับนำไปใช้เป็นแนวทางของการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่ได้รับผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว เพื่อให้ทราบถึงจุดการทำงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และหลีกเลี่ยงการทำงาน ณ จุดดังกล่าว อีกทั้งสามารถประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบเพื่อใช้เป็นแนวทางการออกแบบระบบให้กับวิศวกร ซึ่งจะได้รับการนำเสนอไว้ในบทต่อ ๆ ไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณา และการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

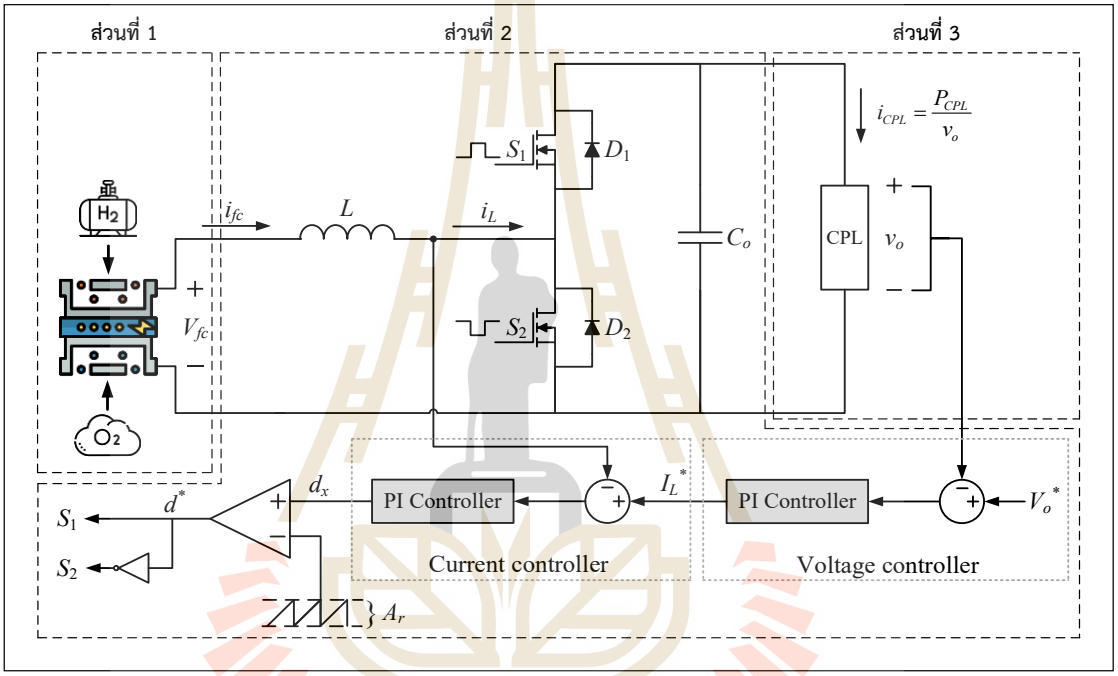
3.1 บทนำ

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่ใช้อธิบายผลตอบสนองเชิงพลวัตของระบบ อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบได้ แต่โดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาอันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในระบบ ซึ่งเมื่อนำไปใช้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพจะส่งผลทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้นเนื้อหาในบทที่ 3 นี้จะนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยเริ่มต้นด้วยการนำเสนอระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จากนั้นเป็นการนำเสนอรายละเอียดการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งประกอบด้วย แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์พาสซีฟในระบบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ทั้งในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมและในกรณีที่มีตัวควบคุม พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB สำหรับเนื้อหาในบทที่ 3 นี้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญในการนำไปต่อยอดสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบซึ่งจะได้รับการนำเสนอในบทที่ 4 เป็นลำดับถัดไป

3.2 ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณา

ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์แสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 แหล่งจ่ายเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน ทำหน้าที่ผลิตและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบ ส่วนที่ 2 วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน (cascade PI controller) ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงให้มีค่าคงที่ และส่วนที่ 3 โหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ ซึ่งมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวและถูก

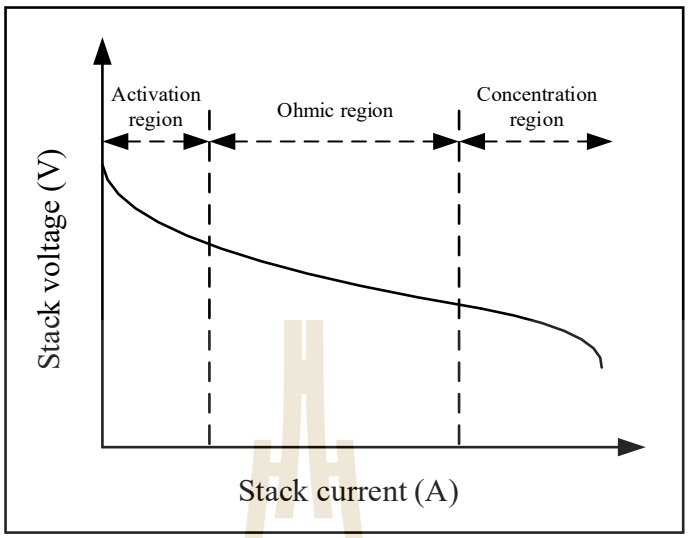
แทนด้วยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ โดยโหลดดังกล่าวมีลักษณะเป็นค่าความต้านทานหรือค่าอิมพีแดนซ์ติดลบที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยรวม ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน โดยเริ่มจากส่วนที่ 1 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนดังแสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 3.3



รูปที่ 3.1 ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

3.3 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน (hydrogen fuel cell model) มีความสำคัญอย่างมากสำหรับการอธิบายพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากการผลิตและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจะมีการสูญเสียอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน (Chen, M., and Rincón-Mora, G. A. 2008; Saleh, I. M., Ali, R., and Zhang, H. 2016; Xu, H., Wang, L., Liu, Z., Su, H., and Ortega, R. 2025) ส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้มีค่าลดลงเมื่อมีการจ่ายพลังงานให้กับโหลดเพิ่มขึ้น ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยเส้นโค้งโพลาไรเซชันทั่วไป (typical polarization curve) ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ดังนี้



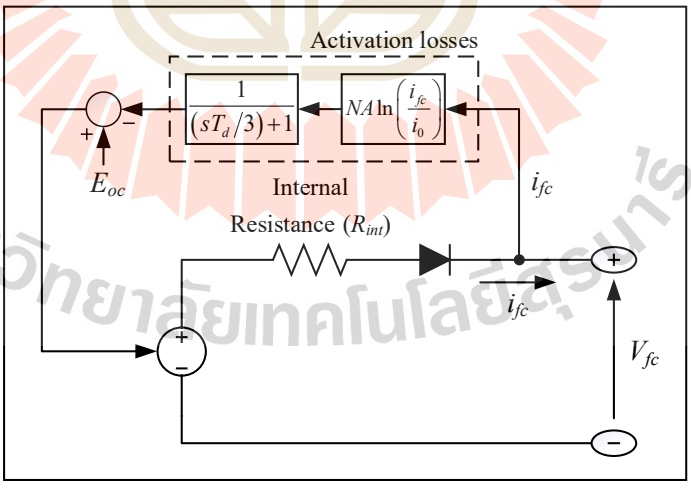
รูปที่ 3.2 เส้นโค้งโพลาไรเซชันทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

จากรูปที่ 3.2 จะสังเกตได้ว่า พฤติกรรมการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะมีการสูญเสียอยู่ 3 ย่าน ได้แก่ การสูญเสียในย่านกระตุ้น (activation region) เป็นการสูญเสียที่เกิดจากความหน่วงขณะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าบางส่วนที่ผลิตได้จะสูญเสียเพื่อไปเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรดของเซลล์เชื้อเพลิง โดยการสูญเสียในย่านนี้จะเกิดขึ้นในช่วงแรกและมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น การสูญเสียในย่านถัดมาเป็นการสูญเสียที่เกิดจากความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิง (ohmic region) ซึ่งเกิดจากองค์ประกอบภายในของเซลล์เชื้อเพลิง เช่น ความต้านทานบริเวณขั้วอิเล็กโทรด ความต้านทานจากสารละลายอิเล็กโทร-ไลต์ รวมถึงความต้านทานจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาต่อร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง และการสูญเสียในย่านความเข้มข้น (concentration region) เป็นการสูญเสียที่เกิดจากข้อจำกัดในการจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนและสารออกซิไดซ์เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะที่มีการจ่ายโหลดที่สูงมาก ทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นดังกล่าวที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรดลดลง ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้มีค่าลดลงอย่างมาก (นิรุตติ์ นิ่มอ่อน, 2555; วัฒนา แก้วมณี, 2556) ด้วยเหตุนี้แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจึงมีความสำคัญต่อการนำไปพิจารณาร่วมกับระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณา เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้อาจส่งผลต่อพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงดำเนินการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับข้อมูลจำเพาะจากเอกสารของผู้ผลิต ซึ่งรายละเอียดการสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนอย่างง่ายมีวิธีดำเนินการดังต่อไปนี้

3.3.1 การสร้างแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

แบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน (simplified hydrogen fuel cell model) สามารถแสดงเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งจากวงจรดังกล่าวจะประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเซลล์เชื้อเพลิง (E_{oc}) การสูญเสียในย่านกระตุ้น (activation losses) จะถูกแทนด้วยชุดบล็อกในกรอบเส้นประสีดำ และการสูญเสียที่เกิดจากความต้านทานภายใน (internal resistance) จะถูกแทนด้วยตัวต้านทานภายในวงจร (R_{int}) โดยแบบจำลองดังกล่าวจะอยู่ภายใต้สมมติฐานดังต่อไปนี้ (Tremblay, O., and Dessaint, L. A. 2009)

1) ก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นก๊าซในอุดมคติ
2) เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะถูกป้อนด้วยก๊าซไฮโดรเจนและอากาศเท่านั้น
3) เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนมีระบบระบายความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิภายในคงที่
4) เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนมีระบบจัดการน้ำเพื่อรักษาความชื้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมในทุกสภาวะการทำงาน
5) การสูญเสียเนื่องจากความดันตกระหว่างการไหลของก๊าซจะไม่ถูกพิจารณา
6) การสูญเสียในย่านความเข้มข้นจะไม่ถูกพิจารณา เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงส่วนใหญ่ไม่ได้ทำงานในย่านการสูญเสียดังกล่าว
7) ค่าความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าคงที่ในทุกสภาวะการทำงาน



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

จากวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบบจำลองอย่างง่ายเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่แสดงดังรูปที่ 3.3 สามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงได้ดังสมการที่ (3-1)

$$V_{fc} = E_{oc} - V_{act} - i_{fc}R_{int} \tag{3-1}$$

โดยที่ V_{fc} คือ แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

E_{oc} คือ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

V_{act} คือ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการสูญเสียในย่านกระตุ้น

i_{fc} คือ กระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

R_{int} คือ ความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

จากรูปที่ 3.3 เมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการสูญเสียในย่านกระตุ้นในกรอบเส้นประสีดำจะพบว่า ผลตอบสนองเชิงพลวัต (dynamic response) หรือผลตอบสนองในสภาวะชั่วครู่ (transient response) ของแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน ซึ่งถูกจำลองด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่ง ดังพจน์ $\frac{1}{(sT_d/3)+1}$ เพื่อใช้จำลองการหน่วงขณะเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการสูญเสียในย่านกระตุ้น โดยที่ T_d คือระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล (settling time) (Tremblay, O., and Dessaint, L. A. 2009) ส่งผลให้แบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา หากนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าจะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนในการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงพิจารณาเฉพาะผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัว (steady-state response) เท่านั้น ดังนั้นพจน์ฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวจะไม่ถูกนำมาพิจารณา ซึ่งแบบจำลองในสภาวะอยู่ตัว (steady-state model) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-2) โดยแบบจำลองนี้จะถูกนำไปใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์จำเพาะที่อาศัยเส้นโค้งโพลาไรเซชันจากผู้ผลิตเป็นลำดับถัดไป

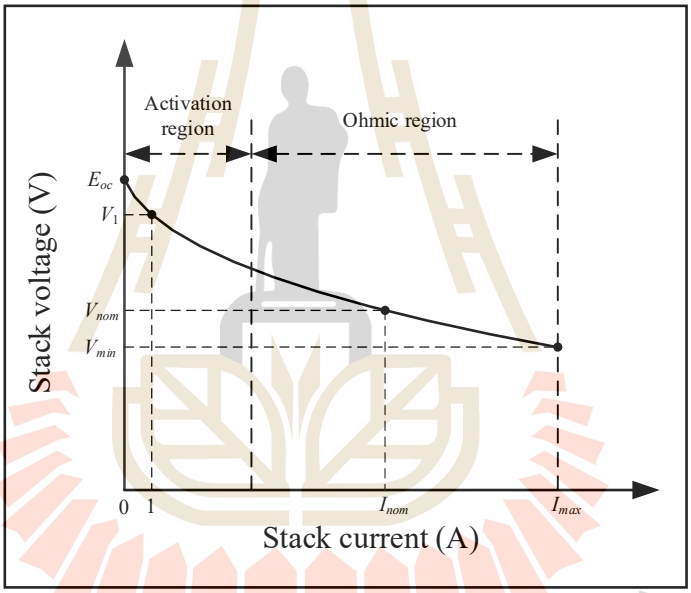
$$V_{fc} = E_{oc} - NA\ln\left(\frac{i_{fc}}{i_0}\right) - i_{fc}R_{int} \tag{3-2}$$

โดยที่ NA คือ ค่าคงที่ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

i_0 คือ กระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทด

3.3.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์จำเพาะที่อาศัยข้อมูลจากผู้ผลิต

เมื่อพิจารณาแบบจำลองอย่างง่ายเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจากสมการที่ (3-2) จะพบว่ามีพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องทราบหรือดำเนินการประมาณค่า ได้แก่ NA, R_{int} และ i_0 ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะอาศัยการประมาณค่าพารามิเตอร์จำเพาะบนเส้นโค้งโพลาไรเซชันทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งจากรูปจะประกอบไปด้วยจุดการทำงานทั้งหมด 4 จุด ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร แรงดันไฟฟ้า ณ จุดทำงานที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1 A แรงดันไฟฟ้า ณ จุดทำงานปกติ และแรงดันไฟฟ้า ณ จุดทำงานที่ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด (Tremblay, O., and Dessaint, L. A. 2009) โดยค่าพารามิเตอร์จำเพาะในแต่ละจุดการทำงานมีทั้งหมด 6 ค่า ได้แก่ E_{oc}, V_1, V_{nom}, I_{nom}, V_{min} และ I_{max} ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 การประมาณค่าพารามิเตอร์จำเพาะบนเส้นโค้งโพลาไรเซชันทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิง

เมื่อพิจารณาการประมาณค่าพารามิเตอร์จำเพาะจากรูปที่ 3.4 ร่วมกับแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจากสมการที่ (3-2) จะสามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้จุดการทำงานต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ (3-3) ถึงสมการที่ (3-5) ดังนี้

$$V_1 = E_{oc} - NA\ln\left(i_0\right) - R_{int} \tag{3-3}$$

$$V_{nom} = E_{oc} - NA\ln\left(\frac{I_{nom}}{i_0}\right) - I_{nom}R_{int} \tag{3-4}$$

$$V_{min} = E_{oc} - NA\ln\left(\frac{I_{max}}{i_0}\right) - I_{max}R_{int} \quad (3\text{-}5)$$

โดยที่ V_1 คือ แรงดันไฟฟ้า ณ จุดทำงานที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1 A

V_{nom} คือ แรงดันไฟฟ้า ณ จุดทำงานปกติ

I_{nom} คือ กระแสไฟฟ้า ณ จุดทำงานปกติ

V_{min} คือ แรงดันไฟฟ้า ณ จุดทำงานที่ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด

I_{max} คือ กระแสไฟฟ้าที่ค่าสูงสุด

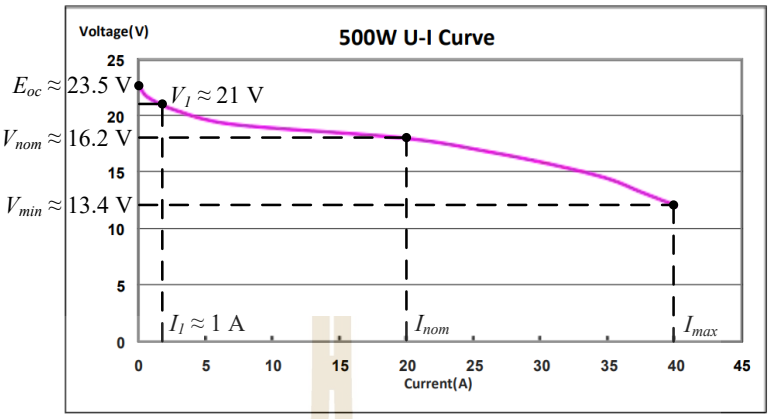
เมื่อทำการจัดรูปสมการที่ (3-3) ถึงสมการที่ (3-5) ใหม่จะได้สมการสำหรับคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนแสดงได้ดังสมการที่ (3-6) ถึงสมการที่ (3-8) ดังนี้

$$NA = \frac{(V_1 - V_{nom})(I_{max} - 1) - (V_1 - V_{min})(I_{nom} - 1)}{\ln(I_{nom})(I_{max} - 1) - \ln(I_{max})(I_{nom} - 1)} \quad (3\text{-}6)$$

$$R_{int} = \frac{V_1 - V_{nom} - NA\ln(I_{nom})}{I_{nom} - 1} \quad (3\text{-}7)$$

$$i_0 = exp\left(\frac{V_1 - E_{oc} + R_{int}}{NA}\right) \quad (3\text{-}8)$$

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกพิจารณาเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนรุ่น H-500 จากบริษัทผู้ผลิต Horizon Fuel cell Technologies (Horizon Educational, 2024) ซึ่งมีพิกัดกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 500 W สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์จำเพาะที่อาศัยเส้นโค้งโพลาไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนรุ่นดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 จากรูปจะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (E_{oc}) เท่ากับ 23.5 V ค่าแรงดันไฟฟ้า ณ จุดทำงานที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1 A (V_1) เท่ากับ 21 V ค่าแรงดันไฟฟ้า ณ จุดทำงานปกติ (V_{nom}) เท่ากับ 16.2 V ค่ากระแสไฟฟ้า ณ จุดทำงานปกติ (I_{nom}) เท่ากับ 20 A ค่าแรงดันไฟฟ้า ณ จุดทำงานที่ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด (V_{min}) เท่ากับ 13.4 V และค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{max}) เท่ากับ 40 A



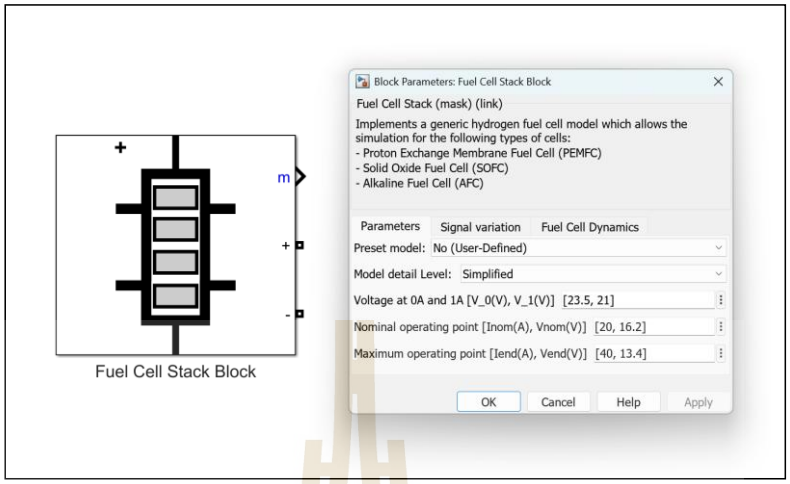
รูปที่ 3.5 เส้นโค้งโพลาไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนรุ่น H-500

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์จำเพาะที่ได้จากการประมาณค่าบนเส้นโค้งโพลาไรเซชันแทนลงในสมการที่ (3-6) ถึงสมการที่ (3-8) เพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในแบบจำลองจะได้ค่าคงที่ทางเคมีไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน (NA) เท่ากับ 0.9156 ค่ากระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทด (i_0) เท่ากับ 0.0734 A และค่าความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิง (R_{int}) เท่ากับ 0.1083 Ω โดยจะสามารถแสดงแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ดังสมการที่ (3-9) ซึ่งจากแบบจำลองที่ได้จะถูกนำไปตรวจสอบความถูกต้องโดยอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

$$V_{fc} = 23.5 - 0.9156 \ln\left(\frac{i_{fc}}{0.0734}\right) - 0.1083 i_{fc} \qquad (3\text{-}9)$$

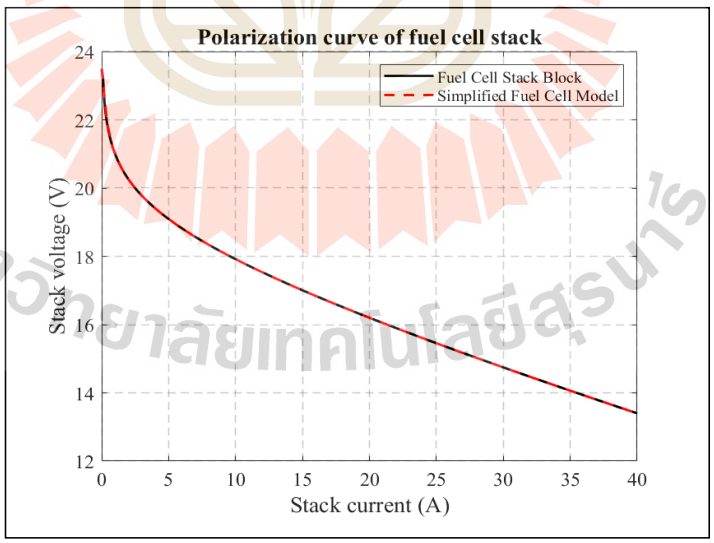
3.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะอาศัยการเปรียบเทียบเส้นโค้งโพลาไรเซชันที่ได้จากสมการที่ (3-9) กับชุดบล็อกสำเร็จรูปของ Fuel Cell Model ใน SimPowerSystem™ เพื่อเป็นการยืนยันว่าแบบจำลองที่ได้มีความถูกต้องและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาได้ โดยชุดบล็อกสำเร็จรูปดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ชุดบล็อกสำเร็จรูปของ Fuel Cell Model ใน SimPowerSystem™

จากรูปที่ 3.6 ชุดบล็อกสำเร็จรูปจะถูกปรับตั้งโดยเลือก Model detail Level เป็นแบบ Simplified และกรอกค่าพารามิเตอร์จำเพาะที่ได้จากการประมาณทั้ง 6 ค่าลงในชุดบล็อกดังกล่าว จากนั้นดำเนินการนำค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของชุดบล็อกสำเร็จรูปมาสร้างเส้นโค้งโพลาไรเซชันและเปรียบเทียบกับแบบจำลองในสมการที่ (3-9) ซึ่งผลการเปรียบเทียบเส้นโค้งโพลาไรเซชันแสดงได้ดังรูปที่ 3.7

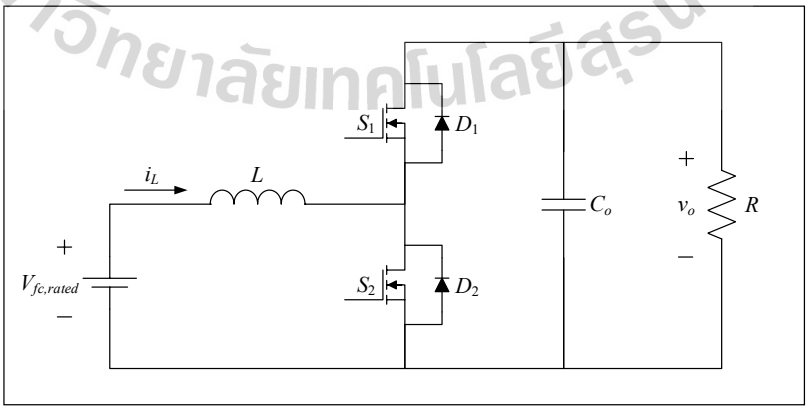


รูปที่ 3.7 การเปรียบเทียบเส้นโค้งโพลาไรเซชันของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงอย่างง่ายกับชุดบล็อกสำเร็จรูปใน SimPowerSystem™

จากรูปที่ 3.7 จะสังเกตได้ว่า เส้นโค้งโพลาไรเซชันที่ได้จากแบบจำลองในสมการที่ (3-9) ให้ผลที่สอดคล้องและตรงกับชุดบล็อกสำเร็จรูป ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองที่ได้นำเสนอมีความถูกต้องและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณาต่อไปได้ ซึ่งในลำดับถัดไปจะเป็นการนำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์พาสซีฟในวงจรแปลงผันกำลังดังแสดงในส่วนที่ 2 ของรูปที่ 3.1 ซึ่งได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) เพื่อให้การกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน ISO 21780:2020 โดยรายละเอียดการออกแบบสามารถแสดงได้ดังหัวข้อที่ 3.4

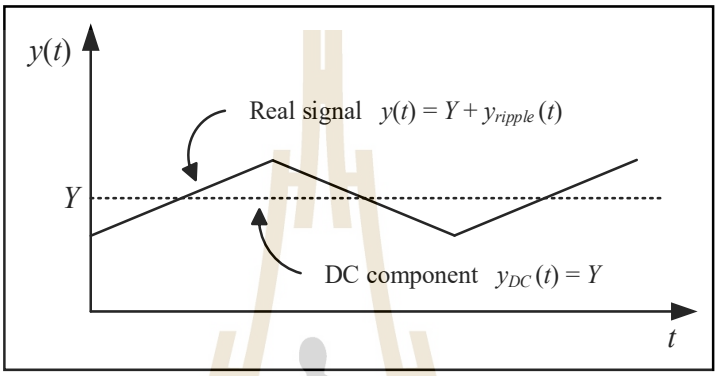
3.4 การวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางและการออกแบบค่าพารามิเตอร์ภายในวงจร

วงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณาดังแสดงในส่วนที่ 2 ของรูปที่ 3.1 สามารถแยกการวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรได้เป็นสองโหมดคือ โหมดที่ 1 เป็นการทำงานในกรณีที่สวิตช์ S_1 อยู่ในสถานะไม่นำกระแส (OFF) และสวิตช์ S_2 อยู่ในสถานะนำกระแส (ON) ในขณะที่โหมดที่ 2 เป็นการทำงานกรณีที่สวิตช์ S_1 อยู่ในสถานะนำกระแส (ON) และสวิตช์ S_2 อยู่ในสถานะไม่นำกระแส (OFF) หรือกล่าวได้ว่าสวิตช์ทั้งสองมีการทำงานสลับกันในแต่ละโหมดการทำงาน สำหรับการวิเคราะห์โหมดการทำงานดังกล่าวจะอาศัยกฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's laws) เพื่อวิเคราะห์หาสมการเชิงอนุพันธ์ที่แสดงถึงผลตอบสนองของวงจรไม่ว่าจะเป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (v_o) ซึ่งสมการที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์พาสซีฟในวงจร อย่างไรก็ตามเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์และออกแบบค่าพารามิเตอร์จะพิจารณาให้แหล่งจ่ายเป็นแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน และโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะพิจารณาเป็นโหลดตัวต้านทาน ซึ่งวงจรดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณาสำหรับใช้ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์พาสซีฟ

การออกแบบค่าพารามิเตอร์จะพิจารณาผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัวโดยอาศัยเทคนิคการประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็ก (small-ripple approximation) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ร่วมกับหลักการสมดุลฟลักซ์เชื่อมโยงในตัวเหนี่ยวนำ (inductor linked-flux balance) และหลักการสมดุลประจุในตัวเก็บประจุ (capacitor charge balance) (Erickson & Maksimović, 2001) ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.9 การประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็ก

$$y(t) = Y + y_{ripple}(t) \tag{3-10}$$

การประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 3.9 จะกำหนดให้สัญญาณ $y(t)$ ใด ๆ เป็นผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัวของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณา ดังสมการที่ (3-10) เมื่อพิจารณาการประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็กของสัญญาณ $y(t)$ ใด ๆ ซึ่งในที่นี้คือ $y_{ripple}(t)$ จะได้ว่า การกระเพื่อมของสัญญาณจะมีค่าน้อยกว่าปริมาณกระแสตรง Y มาก ๆ กล่าวคือ $y_{ripple}(t)$ สามารถประมาณค่าเป็นศูนย์ได้ ดังนั้นผลตอบสนองของสัญญาณ $y(t)$ ใด ๆ จะมีค่าประมาณ Y ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-11)

$$\left\| y_{ripple}(t) \right\| \ll Y$$

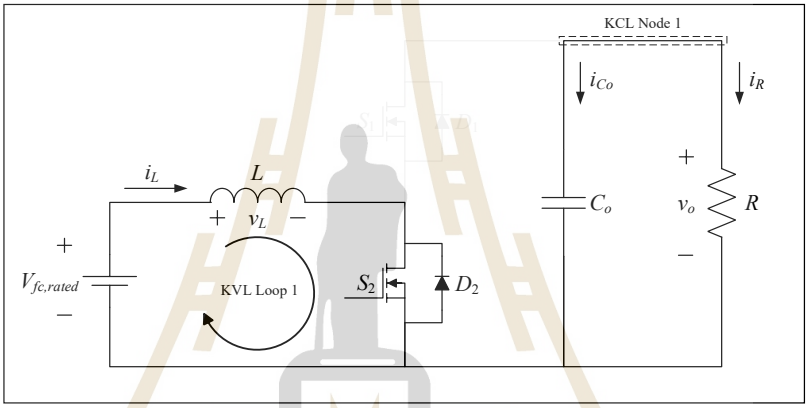
$$y(t) \approx Y \tag{3-11}$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3-11) จะพบว่า การใช้เทคนิคการประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็กจะอยู่บนสมมติฐานที่ว่าการออกแบบพารามิเตอร์ของวงจรกรองจะให้การกระเพื่อมของสัญญาณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ที่น้อยมาก ๆ จึงไม่ถูกนำมาพิจารณาได้ ดังนั้นค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจึงมีค่าคงที่ สำหรับการวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณาในรูปที่ 3.8 จะอาศัยกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's voltage law : KVL) และกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's current law : KCL) โดยแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

โหมดการทำงานที่ 1: กรณีที่สวิตช์ S_1 อยู่ในสถานะไม่นำกระแส (OFF) และสวิตช์ S_2 อยู่ในสถานะนำกระแส (ON) ซึ่งสามารถแสดงโหมดการทำงานดังกล่าวได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณาในกรณีที่ S_1 OFF และ S_2 ON

เมื่อวิเคราะห์วงรอบที่ 1 (Loop 1) โดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$v_L(t) - V_{fc,rated} = 0$$

$$v_L(t) = V_{fc,rated} \tag{3-12}$$

$$L\frac{di_L(t)}{dt} = V_{fc,rated}$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_{fc,rated}}{L} \tag{3-13}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อวิเคราะห์โนดที่ 1 (Node 1) โดยใช้กฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์และใช้เทคนิคการประมาณการเพื่อมขนาดเล็กดังสมการที่ (3-11) นั่นคือ $v_o(t) = V_o$ จะได้

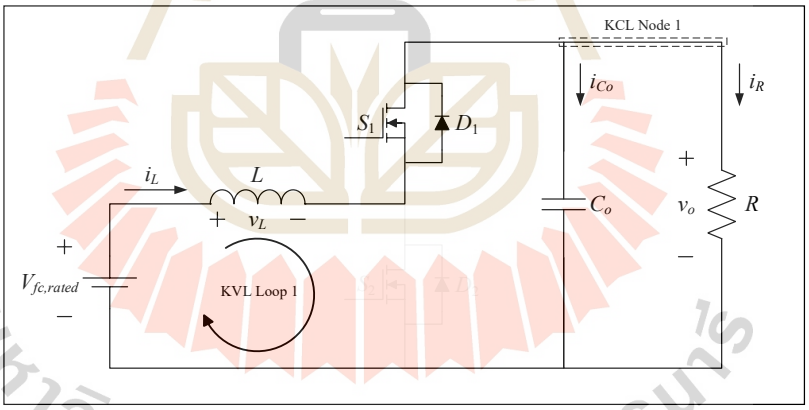
$$-i_{Co}(t) - i_R(t) = 0$$

$$i_{Co}(t) = -I_R \tag{3-14}$$

$$C_o \frac{dv_o(t)}{dt} = -\frac{V_o}{R}$$

$$\frac{dv_o(t)}{dt} = -\frac{V_o}{RC_o} \tag{3-15}$$

โหมดการทำงานที่ 2: กรณีที่สวิตช์ S_1 อยู่ในสถานะนำกระแส (ON) และสวิตช์ S_2 อยู่ในสถานะไม่นำกระแส (OFF) ซึ่งสามารถแสดงโหมดการทำงานดังกล่าวได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณาในกรณีที่ S_1 ON และ S_2 OFF

เมื่อวิเคราะห์วงรอบที่ 1 (Loop 1) โดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์และใช้เทคนิคการประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็กดังสมการที่ (3-11) นั่นคือ $v_o(t) = V_o$ จะได้

$$v_L(t) + v_o(t) - V_{fc,rated} = 0$$

$$v_L(t) = V_{fc,rated} - V_o \tag{3-16}$$

$$L\frac{di_L(t)}{dt} = V_{fc,rated} - V_o$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_{fc,rated} - V_o}{L} \tag{3-17}$$

เมื่อวิเคราะห์โนดที่ 1 (Node 1) โดยใช้กฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์และใช้เทคนิคการประมาณการกระเพื่อมขนาดเล็กดังสมการที่ (3-11) นั่นคือ $i_L(t) = I_L$ และ $v_o(t) = V_o$ จะได้

$$i_L(t) - i_{Co}(t) - i_R(t) = 0$$

$$i_{Co}(t) = I_L - I_R \tag{3-18}$$

$$C_o\frac{dv_o(t)}{dt} = I_L - \frac{V_o}{R}$$

$$\frac{dv_o(t)}{dt} = \frac{I_L}{C_o} - \frac{V_o}{RC_o} \tag{3-19}$$

ดังนั้นจากการวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังดังข้างต้นจะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ $v_L(t)$ และสมการของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ $i_{Co}(t)$ ดังสมการที่ (3-12) ถึงสมการที่ (3-19) โดยสมการดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการพิสูจน์หาสมการสำหรับคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (I_L) และค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_o) ในสภาวะอยู่ตัว โดยอาศัยหลักการสมดุลฟลักซ์เชื่อมโยงในตัวเหนี่ยวนำและหลักการสมดุลประจุในตัวเก็บประจุ จากนั้นสมการที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ภายในวงจร ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

3.4.1 หลักการสมดุลฟลักซ์เชื่อมโยงในตัวเหนี่ยวนำ

เมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ นั่นคือ $v_L(t) = L\frac{di_L(t)}{dt}$ และทำการปริพันธ์ (integrate) ของแรงดันดังกล่าวในหนึ่งคาบการสวิตช์ (T_s) จะได้

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

จากหลักการสมดุลฟลักซ์เชื่อมโยงในตัวเหนี่ยวนำที่กล่าวว่า ผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัวของกระแสไฟฟ้า $i_L(t)$ สุทธิที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (L) เมื่อพิจารณาในหนึ่งคาบการสวิตช์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

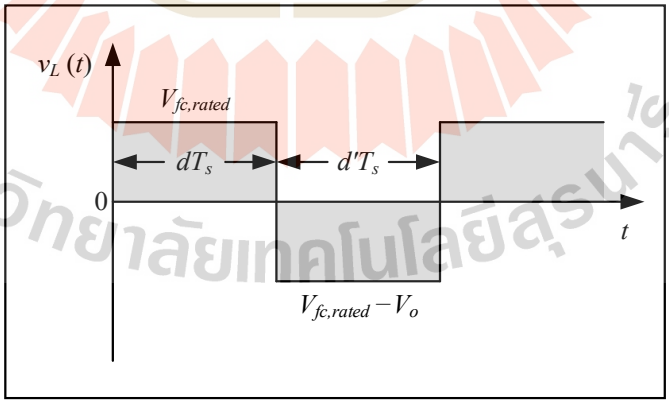
$$0 = \frac{1}{L}\int_0^{T_s} v_L(t)\,dt$$

ดังนั้นค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในสภาวะอยู่สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-20)

$$\langle v_L \rangle = \frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} v_L(t)\,dt = 0 \qquad (3\text{-}20)$$

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

จากสมการที่ (3-12) และสมการที่ (3-16) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรเมื่อนำมาแสดงเป็นกราฟแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ $v_L(t)$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กราฟแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ $v_L(t)$

จากรูปที่ 3.12 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (3-20) นั่นคือ $\langle v_L \rangle = 0$ จะได้

$$\langle v_L \rangle = \frac{\left(V_{fc,rated}\right)\left(dT_s\right)+\left(V_{fc,rated}-V_o\right)\left(d'T_s\right)}{T_s} = 0$$

เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุในสภาวะอยู่ตัวแสดงได้ดังสมการที่ (3-21) และอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า $M(d)$ ของวงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณาสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-22)

$$V_o = \frac{V_{fc,rated}}{\left(1-d\right)} \tag{3-21}$$

$$M\left(d\right) = \frac{V_o}{V_{fc,rated}} = \frac{1}{\left(1-d\right)} \tag{3-22}$$

โดยที่ V_o คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

$V_{fc,rated}$ คือ แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่พิกัด

d คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ของวงจรแปลงผันกำลัง

$M(d)$ คือ อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลัง

3.4.2 หลักการสมดุลประจุในตัวเก็บประจุ

เมื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ นั่นคือ $i_{Co}(t) = C_o \frac{dv_o(t)}{dt}$ และทำการปริพันธ์ (integrate) ของแรงดันดังกล่าวในหนึ่งคาบการสวิตช์จะได้

$$v_o\left(T_s\right) - v_o\left(0\right) = \frac{1}{C_o}\int_0^{T_s} i_{C_o}\left(t\right)dt$$

จากหลักการสมดุลประจุในตัวเก็บประจุที่กล่าวว่า ผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัวของแรงดันไฟฟ้า $v_o(t)$ สุทธิที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (C_o) เมื่อพิจารณาในหนึ่งคาบการสวิตช์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

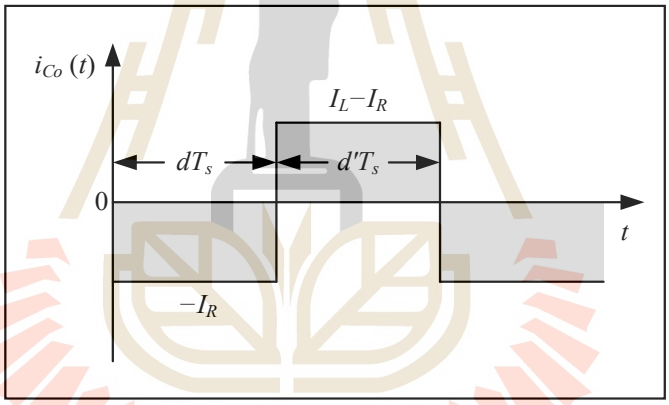
$$0 = \frac{1}{C_o}\int_0^{T_s} i_{C_o}\left(t\right)dt$$

ดังนั้นค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในสภาวะอยู่สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-23)

$$\left\langle i_{C_o} \right\rangle = \frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} i_{C_o}(t)\,dt = 0 \tag{3-23}$$

โดยที่พจน์ $\int_0^{T_s} i_{C_o}(t)\,dt$ คือ พื้นที่ใต้กราฟของ $i_{Co}(t)$

จากสมการที่ (3-14) และสมการที่ (3-18) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรเมื่อนำมาแสดงเป็นกราฟกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ $i_{Co}(t)$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 กราฟกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ $i_{Co}(t)$

จากรูปที่ 3.13 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุดังสมการที่ (3-23) นั่นคือ $\left\langle i_{Co} \right\rangle = 0$ จะได้

$$\left\langle i_{C_o} \right\rangle = \frac{(-I_R)(dT_s) + (I_L - I_R)(d'T_s)}{T_s} = 0$$

เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในสภาวะอยู่ตัวแสดงได้ดังสมการที่ (3-24)

$$I_L = \frac{V_o}{R(1-d)} \tag{3-24}$$

และจากสมการที่ (3-21) สามารถจัดรูปสมการใหม่จะได้ดังสมการที่ (3-25)

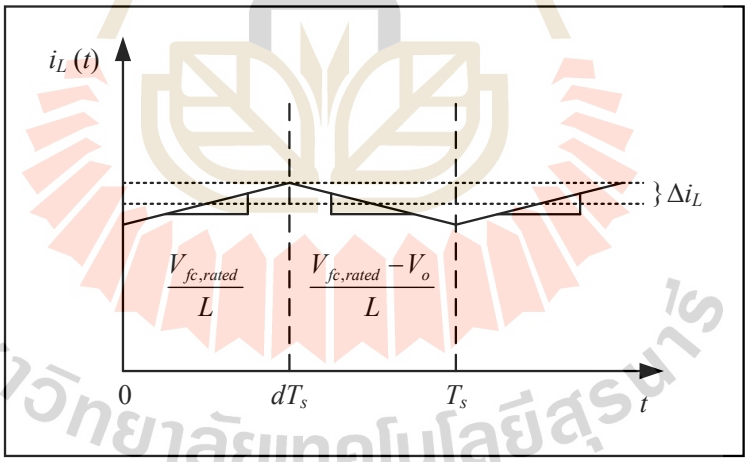
$$I_L = \frac{V_{fc,rated}}{R(1-d)^2} \tag{3-25}$$

โดยที่ I_L คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

R คือ โหลดตัวต้านทานของวงจรแปลงผันกำลัง

3.4.3 การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ L

จากสมการเชิงอนุพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ($\dot{i}_L$) ที่ได้จากการวิเคราะห์วงจรดังสมการที่ (3-13) และสมการที่ (3-17) สามารถแสดงเป็นกราฟกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ $i_L(t)$ ได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 กราฟกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ $i_L(t)$ ของวงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณา

จากรูปที่ 3.14 เมื่อพิจารณาในช่วงเวลา $t = 0$ ถึง $t = dT_s$ จะสามารถหาความชัน (slope) ของกราฟได้จาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\text{slope} = \tan(\theta) = \frac{2\Delta i_L}{dT_s} = \frac{V_{fc,rated}}{L}$$

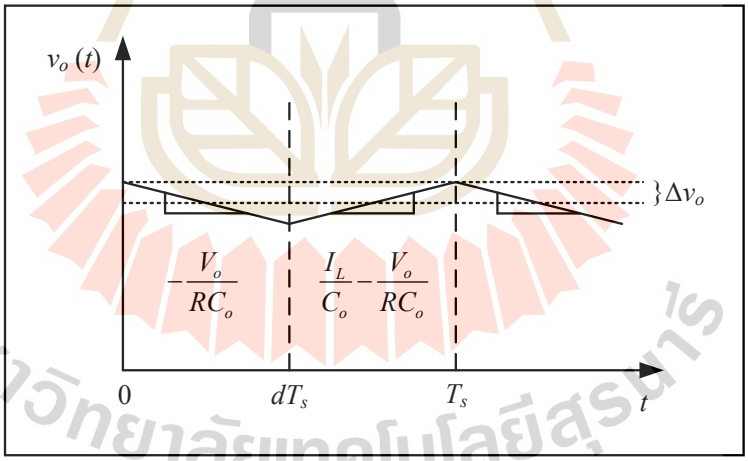
จากนั้นทำการจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการที่ใช้ออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณาแสดงได้ดังสมการที่ (3-26) ดังนี้

$$L = \frac{dT_s V_{fc,rated}}{2\Delta i_L} \tag{3-26}$$

โดยที่ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ T_s คือ คาบในการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลัง ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1/f_s$ เมื่อ f_s คือ ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลัง และ Δi_L คือ การกระเพื่อมหรือค่ากระแสพริ้ว (ripple) ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

3.4.4 การออกแบบค่าตัวเก็บประจุ C

จากสมการเชิงอนุพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ($\dot{v}_o$) ที่ได้จากการวิเคราะห์วงจรดังสมการที่ (3-15) และสมการที่ (3-19) สามารถแสดงเป็นกราฟแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ $v_o(t)$ ได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 กราฟแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ $v_o(t)$ ของวงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณา

จากรูปที่ 3.15 เมื่อพิจารณาในช่วงเวลา $t = 0$ ถึง $t = dT_s$ จะสามารถหาความชันของกราฟได้จาก

$$\text{slope} = \tan(\theta) = -\frac{2\Delta v_o}{dT_s} = -\frac{V_o}{RC_o}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากนั้นทำการจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการที่ใช้ออกแบบค่าตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณาแสดงได้ดังสมการที่ (3-27)

$$C_o = \frac{dT_s V_o}{2\Delta v_o R} \tag{3-27}$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3-21) จะสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (3-28) ดังนี้

$$C_o = \frac{dV_{fc,rated}}{2f_s \Delta v_o R(1-d)} \tag{3-28}$$

โดยที่ C_o คือ ค่าตัวเก็บประจุทางฝั่งโหลด และ Δv_o คือ การกระเพื่อมหรือแรงดันพลิ้วของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

ดังนั้นจากที่ได้นำเสนอมาแล้วทั้งหมดดังข้างต้นเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับใช้ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณาเพื่อให้การกระเพื่อมของสัญญาณกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามที่ผู้ออกแบบกำหนด โดยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณา สามารถออกแบบได้จากสมการที่ (3-26) และสมการที่ (3-28) ตามลำดับ ในหัวข้อถัดไปจะเป็นการนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งพิสูจน์หาได้ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

3.5 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี (Mahdavi, J., Emaadi, A., Bellar, M. D., and Ehsani, M. 1997; Emadi, A. 2004; Azer, P., and Emadi, A. 2020; Alrajhi, H. 2022) ซึ่งวิธีดังกล่าวจะใช้สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (complex Fourier series) ของตัวแปรสถานะในวงจรเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง โดยอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนสามารถอธิบายรายละเอียดพอสังเขปได้ดังนี้

โดยทั่วไป สัญญาณ *f(t)* ใด ๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ (periodic signal) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (Gamelin, 2001) ได้ดังสมการที่ (3-29)

$$f(t)=\sum_{k=-\infty}^{\infty}\langle x\rangle_k(t)e^{jk\omega t} \tag{3-29}$$

โดยที่ $\langle x\rangle_k(t)$ คือ สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อน และ ω คือ ความถี่เชิงมุม ซึ่งคำนวณได้จาก $\omega=\frac{2\pi}{T}$ เมื่อ T คือ คาบของสัญญาณ *f(t)* ใด ๆ

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะกำหนดให้ $\langle x\rangle_k(t)$ ของสัญญาณแทนตัวแปรสถานะของระบบ โดยสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนสามารถหาได้จากสมการที่ (3-30)

$$\langle x\rangle_k(t)=\frac{1}{T}\int_{t-T}^{t}f(t)e^{-jk\omega t}dt \tag{3-30}$$

สำหรับคุณสมบัติที่สำคัญของสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อน $\langle x\rangle_k(t)$ ในการพิสูจน์หาแบบจำลองมีรายละเอียดดังนี้

1. คุณสมบัติของอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลาแสดงได้ดังสมการที่ (3-31)

$$\frac{d}{dt}\langle x\rangle_k=\left\langle\frac{dx}{dt}\right\rangle_k-jk\omega\langle x\rangle_k \tag{3-31}$$

2. คุณสมบัติของความสัมพันธ์ของการคูณแสดงได้ดังสมการที่ (3-32)

$$\langle xy\rangle_k=\sum_i\langle x\rangle_{k-i}\langle y\rangle_i \tag{3-32}$$

3. ถ้า *f(t)* คือ ค่าจริง สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนที่ค่า k ติดลบ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-33)

$$\langle x\rangle_{-k}=\overline{\langle x\rangle_k}=\langle x\rangle_k^* \tag{3-33}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4. คุณสมบัติเวลาเหลื่อมแสดงได้สมการที่ (3-34)

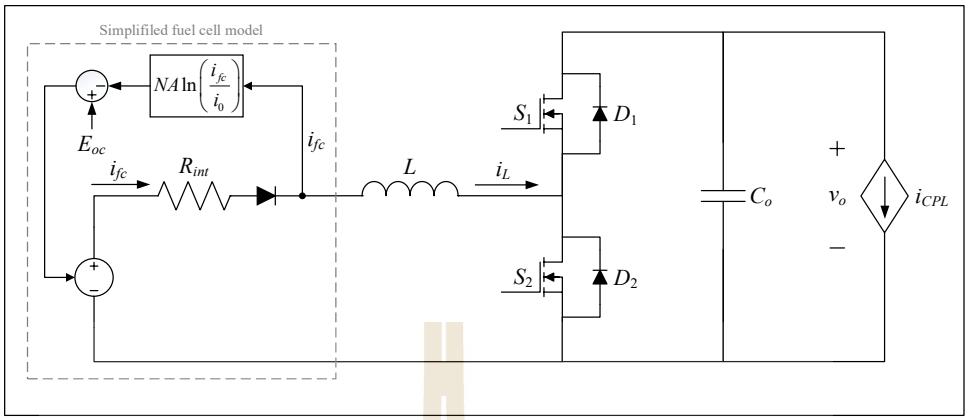
$$\text{ถ้า } f(t) \rightarrow f(t-\tau) \text{ จะได้ } \langle x \rangle_k \rightarrow \langle x \rangle_k e^{-\left(j\frac{2\pi k\tau}{T}\right)} \tag{3-34}$$

จากสมการที่ (3-29) และสมการที่ (3-30) ค่า k จะบ่งบอกถึงความถูกต้องของการใช้อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน ถ้า k มีค่าเป็นอนันต์ ค่าความผิดพลาดจากการประมาณจะมีค่าเท่ากับศูนย์ กล่าวคือแบบจำลองมีความถูกต้องเป็นอย่างมาก แต่ถ้าหากสัญญาณไม่ปรากฏการสั่นไกวจะสามารถกำหนดให้ k มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า การประมาณค่าอันดับศูนย์ (zero-order approximation) หากสัญญาณมีการสั่นไกวสามารถกำหนดให้ k มีค่าเป็น -1, 0, 1 ซึ่งจะเรียกวิธีนี้ว่าการประมาณค่าอันดับหนึ่ง (first-order approximation) (กองพัน อารีรักษ์, 2564) อย่างไรก็ตามงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะการประมาณค่าอันดับศูนย์เท่านั้น เนื่องจากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองให้การกระเพื่อมของสัญญาณที่น้อยมาก สำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ยังไม่มีตัวควบคุมสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังหัวข้อที่ 3.6 ดังต่อไปนี้

3.6 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม

3.6.1 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.16 ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ถูกแทนด้วยวงจรสมมูลของแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ได้จากหัวข้อที่ 3.3 วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางที่มีสวิตช์ S_1 และ S_2 ทำงานสลับกัน รวมถึงอุปกรณ์พาสซีฟในวงจรและโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งจะถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสไม่อิสระ (dependent current source) โดยค่ากระแสของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-35)

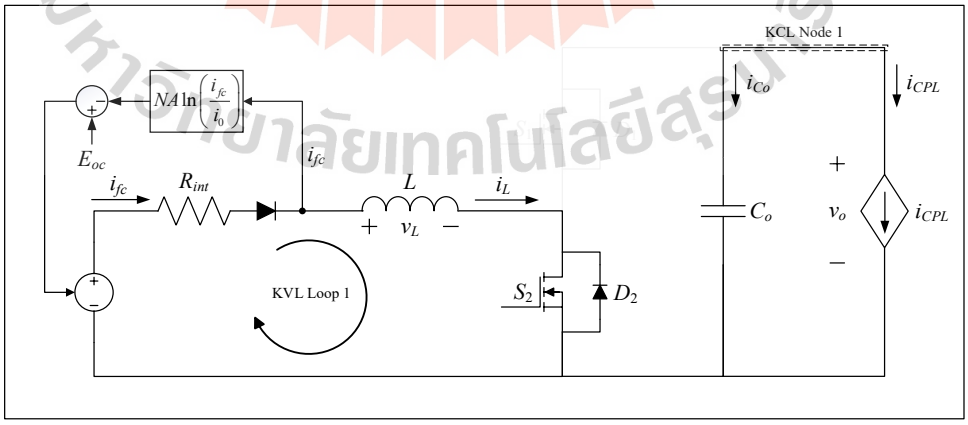


รูปที่ 3.16 ระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม

$$i_{CPL} = \frac{P_{CPL}}{v_o} \tag{3-35}$$

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.16 จะเริ่มจากการวิเคราะห์โหมดการทำงานวงจรโดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าและกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ ซึ่งจะกำหนดให้ตัวแปรสถานะของวงจร คือ $X = \begin{bmatrix} i_L & v_o \end{bmatrix}^T$ จากนั้นดำเนินการวิเคราะห์การทำงานของวงจรโดยแบ่งโหมดการทำงานออกเป็น 2 โหมดดังนี้

โหมดการทำงานที่ 1: กรณีสวิตช์ S_1 อยู่ในสถานะไม่นำกระแส (OFF) และสวิตช์ S_2 อยู่ในสถานะนำกระแส (ON) จะได้การทำงานของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ S_1 ไม่นำกระแส (OFF) และ S_2 นำกระแส (ON)

เมื่อพิจารณาวงรอบที่ 1 (Loop 1) ในรูปที่ 3.17 โดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$v_L - E_{oc} + NA\ln\left(\frac{i_L}{i_0}\right) - i_L R_{int} = 0$$

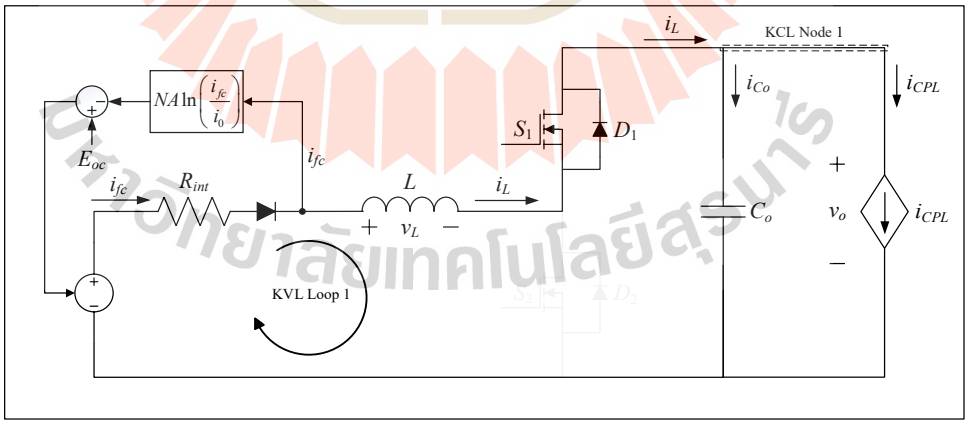
$$\dot{i}_L = \frac{E_{oc}}{L} - \frac{NA}{L}\ln\left(\frac{i_L}{i_0}\right) - \frac{R_{int}}{L} i_L \tag{3-36}$$

เมื่อพิจารณาโนดที่ 1 (Node 1) ในรูปที่ 3.17 โดยใช้กฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$-i_{Co} - i_{CPL} = 0$$

$$\dot{v}_o = -\frac{P_{CPL}}{v_o C_o} \tag{3-37}$$

โหมดการทำงานที่ 2: กรณีสวิตช์ S_1 อยู่ในสถานะนำกระแส (ON) และสวิตช์ S_2 อยู่ในสถานะไม่นำกระแส (OFF) จะได้การทำงานของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ S_1 นำกระแส (ON) และ S_2 ไม่นำกระแส (OFF)

เมื่อพิจารณาวงรอบที่ 1 (Loop 1) ในรูปที่ 3.18 โดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$E_{oc} - NA\ln\left(\frac{i_L}{i_0}\right) - i_L R_{int} + v_L + v_o = 0$$

$$\dot{i}_L = \frac{E_{oc}}{L} - \frac{NA}{L}\ln\left(\frac{i_L}{i_0}\right) - \frac{R_{int}}{L} i_L - \frac{1}{L} v_o \qquad (3\text{-}38)$$

เมื่อพิจารณาโนดที่ 1 (Node 1) ในรูปที่ 3.18 โดยใช้กฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$i_L - i_{Co} - i_{CPL} = 0$$

$$\dot{v}_o = \frac{1}{C_o} i_L - \frac{P_{CPL}}{v_o C_o} \qquad (3\text{-}39)$$

จากการวิเคราะห์ข้างต้นจะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (v_o) แสดงได้ดังสมการที่ (3-36) ถึงสมการที่ (3-39) ตามลำดับ จากนั้นนำสมการเชิงอนุพันธ์ดังกล่าวในแต่ละโหมดการทำงานมาเขียนรวมกันโดยอาศัยฟังก์ชันตรวจสอบ (validation function : h_i) ซึ่งจะกำหนดเงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$S_1 = \text{OFF}\ ,\ S_2 = \text{ON} \longrightarrow h_1 = 1,\ h_2 = 0$$

$$S_1 = \text{ON}\ ,\ S_2 = \text{OFF} \longrightarrow h_1 = 0,\ h_2 = 1$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3-36) ถึงสมการที่ (3-39) จะสามารถเขียนให้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ของ i_L และ v_o ที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันตรวจสอบแสดงได้ดังสมการที่ (3-40) และสมการที่ (3-41)

$$\dot{i}_L = \left(\frac{E_{oc}}{L} - \frac{NA}{L}\ln\left(\frac{i_L}{i_0}\right) - \frac{R_{int}}{L} i_L\right) h_1 + \left(\frac{E_{oc}}{L} - \frac{NA}{L}\ln\left(\frac{i_L}{i_0}\right) - \frac{R_{int}}{L} i_L - \frac{1}{L} v_o\right) h_2 \qquad (3\text{-}40)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\dot{v}_o = \left(-\frac{P_{CPL}}{v_o C_o} \right) h_1 + \left(\frac{1}{C_o} i_L - \frac{P_{CPL}}{v_o C_o} \right) h_2 \tag{3-41}$$

จากนั้นดำเนินการเปลี่ยนสมการที่ (3-40) และสมการที่ (3-41) ให้อยู่ในรูปของแบบจำลองเชิงเส้นคู่ (bilinear model) โดยแทนด้วยฟังก์ชันการสวิตช์ (switching function : $u(t)$) เมื่อกำหนดให้ $h_1 = u(t)$ และ $h_2 = 1 - h_1 = 1 - u(t)$ ดังนั้นจะได้สมการเชิงอนุพันธ์ที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันการสวิตช์ $u(t)$ ดังสมการที่ (3-42) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{i}_L = \dfrac{1}{L}\left(E_{oc} - NA\ln\left(\dfrac{i_L}{i_0}\right) - i_L R_{int} \right) - \dfrac{1}{L}\left(1-u(t)\right)v_o \\ \dot{v}_o = \dfrac{1}{C_o}\left(1-u(t)\right)i_L - \dfrac{P_{CPL}}{v_o C_o} \end{cases} \tag{3-42}$$

จากสมการที่ (3-42) จะพบว่า เป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาอันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจร ($u(t)$) ซึ่งหากนำแบบจำลองดังกล่าวไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมหรือนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพจะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้นในลำดับถัดไปจะนำวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมากำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าวเพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมหรือวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ง่ายมากยิ่งขึ้น สำหรับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะเริ่มจากนำสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนของ i_L และ v_o แทนเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง เมื่อพิจารณาการประมาณค่าอันดับศูนย์ โดยกำหนดให้ค่า $k = 0$ จะสามารถกระจายเทอมของอนุกรมฟูริเยร์ได้ดังสมการที่ (3-43)

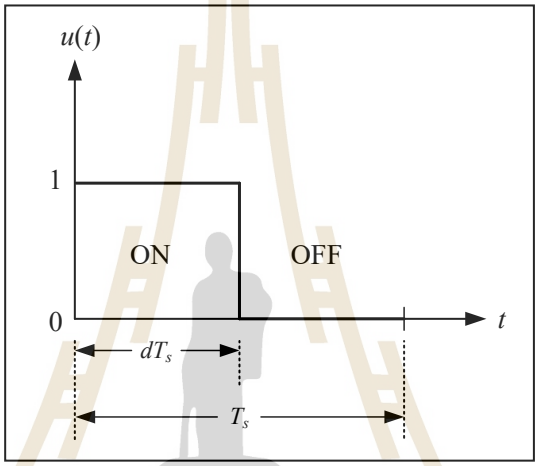
$$\begin{cases} i_L = \langle i_L \rangle_0 \\ v_o = \langle v_o \rangle_0 \end{cases} \tag{3-43}$$

จากหลักการของวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะกำหนดให้ $\langle i_L \rangle_0$ และ $\langle v_o \rangle_0$ เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง ดังนั้นตัวแปรสถานะของแบบจำลองดังกล่าวจะสามารถกำหนดได้ดังสมการที่ (3-44) ดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\begin{cases} \langle i_L \rangle_0 = x_1 \\ \langle v_o \rangle_0 = x_2 \end{cases} \tag{3-44}$$

ลำดับถัดมาจะพิจารณาฟังก์ชันการสวิตช์ ($u(t)$) ของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง ซึ่งฟังก์ชันดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 3.19 และสามารถเขียนฟังก์ชันดังกล่าวได้ดังสมการที่ (3-45)



รูปที่ 3.19 ฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases} \tag{3-45}$$

จากรูปที่ 3.19 พิจารณาหาสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนของฟังก์ชันการสวิตช์ $u(t)$ โดยอาศัยสมการที่ (3-29) เมื่อกำหนดให้ k มีค่าเท่ากับศูนย์จะได้ดังสมการที่ (3-46)

$$\langle u \rangle_0 (t) = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u(t) e^0 dt = \frac{dT_s}{T_s} = d \tag{3-46}$$

เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับฟังก์ชันการสวิตช์ในสมการที่ (3-42) ร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปที่ได้ในสมการที่ (3-43) โดยอาศัยคุณสมบัติของอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนดังสมการที่ (3-31) โดยพิจารณาที่ค่า k เท่ากับศูนย์จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองแสดงได้ดังสมการที่ (3-47) และสมการที่ (3-48)

$$\left\langle \dot{i}_L \right\rangle_0 = \frac{1}{L}\left(E_{oc} - NA\ln\left(\frac{\left\langle i_L \right\rangle_0}{i_0} \right) - \left\langle i_L \right\rangle_0 R_{int} \right) - \frac{1}{L}\left(1 - \left\langle u \right\rangle_0 (t)\right)\left\langle v_o \right\rangle_0 \qquad (3\text{-}47)$$

$$\left\langle \dot{v}_o \right\rangle_0 = \frac{1}{C_o}\left(1 - \left\langle u \right\rangle_0 (t)\right)\left\langle i_L \right\rangle_0 - \frac{P_{CPL}}{\left\langle v_o \right\rangle_0 C_o} \qquad (3\text{-}48)$$

จากนั้นนำตัวแปรสถานะของแบบจำลองที่ได้ในสมการที่ (3-44) และ $\left\langle u \right\rangle_0 (t)$ ในสมการที่ (3-46) แทนค่าลงในสมการที่ (3-47) และสมการที่ (3-48) และจัดรูปใหม่โดยอาศัยคุณสมบัติของความสัมพันธ์ของการคูณดังสมการที่ (3-32) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม ซึ่งพิสูจน์ได้ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปภายใต้การประมาณค่าอันดับศูนย์แสดงได้ดังสมการที่ (3-49) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dfrac{1}{L}\left(E_{oc} - NA\ln\left(\dfrac{x_1}{i_0} \right) - x_1 R_{int} \right) - \dfrac{(1-d)}{L} x_2 \\ \dot{x}_2 = \dfrac{(1-d)}{C_o} x_1 - \dfrac{P_{CPL}}{x_2 C_o} \end{cases} \qquad (3\text{-}49)$$

3.6.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นดังสมการที่ (3-49) จะได้รับการตรวจสอบความถูกต้องด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์โดยอาศัยการเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ซึ่งรายละเอียดการต่อชุดบล็อกดังกล่าวและโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์สามารถดูได้จากภาคผนวก ข1. และภาคผนวก ค. ตามลำดับ สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.16

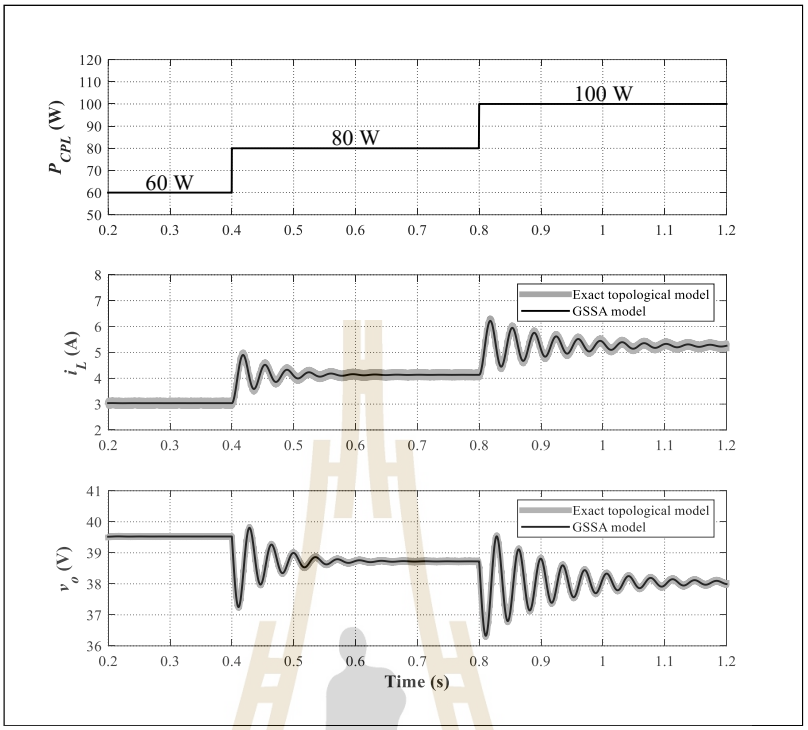
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
E_{oc}	23.5 V	แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน
NA	0.9156	ค่าคงที่ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน
R_{int}	0.1083 Ω	ความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน
i_0	0.0734 A	กระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.16 (ต่อ)

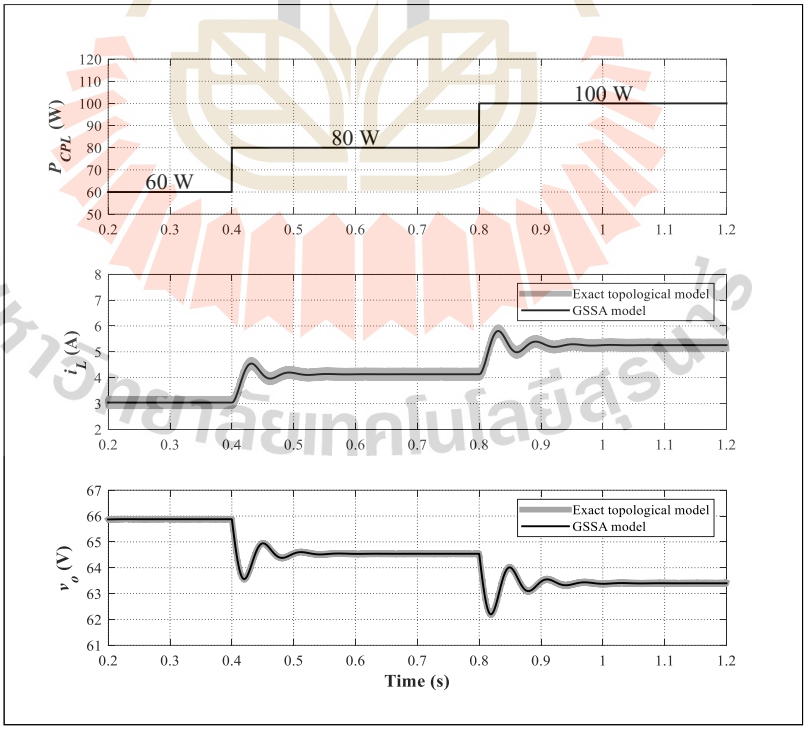
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$L\ (\Delta i_L \leq 0.1\ \text{A})$	4.6 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันกำลัง
$C_o\ (\Delta v_o \leq 240\ \text{mV})$	1600 μF	ความจุไฟฟ้าทางด้านโหลด สำหรับการกำหนดให้ Δv_o = 240 mV เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21780:2020
f_s	10 kHz	ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลัง

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 3.20 และรูปที่ 3.21 เมื่อกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (P_{CPL}) จาก 60 W ไปเป็น 80 W และจาก 80 W ไปเป็น 100 W ที่เวลา 0.4 วินาที และที่เวลา 0.8 วินาที ตามลำดับ โดยในรูปที่ 3.20 กำหนดให้ d มีค่าเท่ากับ 50% ในขณะที่รูปที่ 3.21 d มีค่าเท่ากับ 70% ซึ่งจากผลการตรวจสอบที่ได้ทั้งสองรูปจะพบว่า ผลตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทางฝั่งโหลด (v_o) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (GSSA model) ดังกราฟเส้นสีดำ ให้ผลตอบสนองที่สอดคล้องและตรงกันกับแบบจำลองในรูปแบบแม่นตรง (Exact topological model) ดังกราฟเส้นสีเทา ทั้งในสภาวะชั่วครู่ และในสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นดังสมการที่ (3-49) มีความถูกต้องและสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นแบบจำลองในกรณีที่มีตัวควบคุมต่อไปได้ โดยการพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบที่พิจารณาในกรณีที่มีตัวควบคุมจะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.7

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.20 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อ d = 50%



รูปที่ 3.21 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อ d = 70%

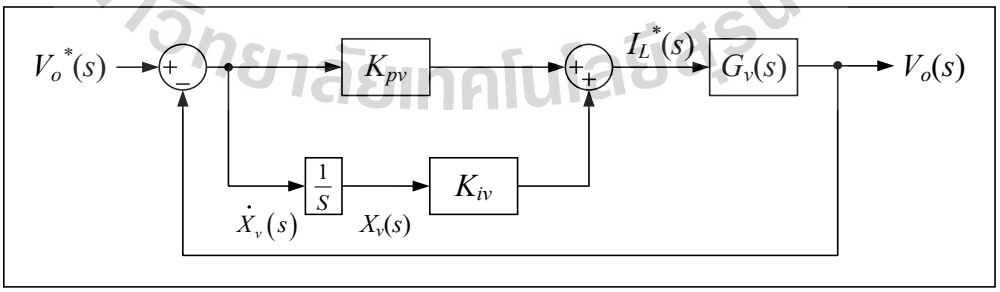
3.7 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีตัวควบคุม

3.7.1 การออกแบบตัวควบคุมพีไอของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณา

ตัวควบคุมของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน โดยมีลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นลูปภายใน (inner loop) และลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็นลูปภายนอก (outer loop) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมพีไอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะอาศัยวิธีการแบบดั้งเดิม (Beraki, M. W., Trovão, J. P. F., Perdigão, M. S., and Dubois, M. R. 2017; Pakdeeto, J., Thanommuang, A., and Areerak, K-N. 2024) เนื่องจากเป็นวิธีการที่ให้ผลตอบสนองที่ดีและมีขั้นตอนการออกแบบที่ไม่ซับซ้อน การออกแบบทำได้ด้วยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์กับฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบอันดับสองมาตรฐาน (standard second-order system) โดยรายละเอียดของการออกแบบตัวควบคุมทั้งสองแสดงได้ดังต่อไปนี้

1) การออกแบบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทางฝั่งโหลดของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางแสดงได้ดังรูปที่ 3.22 ซึ่งจากรูปจะสังเกตได้ว่า สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ คือ $I_L^*(s)$ และมีสัญญาณป้อนกลับ คือ $V_o(s)$ ดังนั้นจำเป็นต้องหาสมการความสัมพันธ์ระหว่าง $I_L(s)$ กับ $V_o(s)$ เพื่อให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอน $G_v(s)$ ในที่นี่คือพลานต์ของระบบ ซึ่งพิจารณาได้จากสมการตัวแปรสถานะของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุดังสมการที่ (3-50) และกำหนดให้ K_{pv} และ K_{iv} คือ พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอของลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.22 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

$$\dot{v}_o(t) = \frac{1-d(t)}{C_o} i_L(t) \tag{3-50}$$

จากนั้นทำการแปลงลาปลาซสมการที่ (3-50) จะได้ผลการแปลงลาปลาซแสดงได้ดังสมการที่ (3-51)

$$sV_o(s) = \frac{1-d(s)}{C_o} I_L(s) \tag{3-51}$$

สำหรับการหาฟังก์ชันถ่ายโอน $G_v(s)$ สามารถดำเนินการได้โดยพิจารณาให้ $d(s)$ ในสมการที่ (3-51) เปรียบเสมือนสัญญาณรบกวน (disturbance) ซึ่งจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอน $G_v(s)$ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-52)

$$G_v(s) = \frac{V_o(s)}{I_L(s)} = \frac{1}{sC_o} \tag{3-52}$$

เมื่อพิจารณาการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-53) และทำการจัดรูปใหม่จะได้ดังสมการที่ (3-54)

$$T_v(s) = \frac{V_o(s)}{V_o^*(s)} = \frac{\left(\frac{K_{pv}s + K_{iv}}{s}\right) G_v(s)}{1 + \left(\frac{K_{pv}s + K_{iv}}{s}\right) G_v(s)} \tag{3-53}$$

$$T_v(s) = \frac{\left(\frac{K_{pv}s + K_{iv}}{C_o}\right)}{s^2 + \left(\frac{K_{pv}}{C_o}\right)s + \left(\frac{K_{iv}}{C_o}\right)} \tag{3-54}$$

$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \tag{3-55}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากนั้นดำเนินการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามตัวหารที่ได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดดังสมการที่ (3-54) กับฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบอันดับสองมาตรฐานสมการที่ (3-55) ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทางฝั่งโหลดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-56)

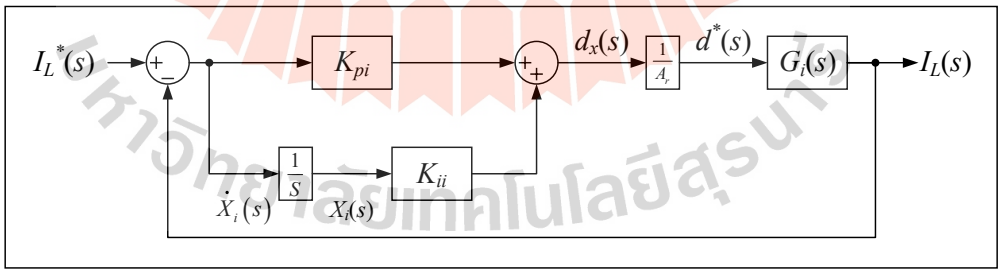
$$\begin{cases} K_{pv} = 2\zeta_v \omega_{nv} C_o \\ K_{iv} = \omega_{nv}^2 C_o \end{cases} \tag{3-56}$$

โดยที่ ζ_v คือ อัตราส่วนการหน่วง (damping ratio) ของลูปแรงดันไฟฟ้า

ω_{nv} คือ ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของลูปแรงดันไฟฟ้า

2) การออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางแสดงได้ดังรูปที่ 3.23 จากรูปจะสังเกตได้ว่า สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ คือ $d_x(s)$ ซึ่งจะถูกปรับคูณด้วย $1/A_r$ ได้เป็นค่าวัฏจักรหน้าที่ $d^*(s)$ และมีสัญญาณป้อนกลับ คือ $I_L(s)$ ดังนั้นจำเป็นต้องหาสมการความสัมพันธ์ระหว่าง $d(s)$ กับ $I_L(s)$ เพื่อให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอน $G_i(s)$ ในที่นี้คือ พลานต์ของระบบ ซึ่งพิจารณาได้จากสมการตัวแปรสถานะของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (3-57) และกำหนดให้ K_{pi} และ K_{ii} คือ พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอของลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.23 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

$$\dot{i}_L(t) = \frac{1}{L} V_{fc,rated} - \frac{1-d(t)}{L} v_o(t) \tag{3-57}$$

จากนั้นทำการแปลงลาปลาซสมการที่ (3-57) จะได้ผลการแปลงลาปลาซแสดงได้ดังสมการที่ (3-58)

$$sI_L(s) = \frac{V_o(s)}{L}d(s) + \frac{V_{fc,rated} - V_o(s)}{L} \tag{3-58}$$

สำหรับการหาฟังก์ชันถ่ายโอน $G_i(s)$ สามารถดำเนินการได้โดยพิจารณาให้เทอม $\left(\frac{V_{fc,rated} - V_o(s)}{L}\right)$ ในสมการที่ (3-58) เปรียบเสมือนสัญญาณรบกวน ซึ่งจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-59) ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอน $G_i(s)$ แสดงได้ดังสมการที่ (3-60)

$$sI_L(s) = \frac{V_o}{L}d(s) \tag{3-59}$$

$$G_i(s) = \frac{I_L(s)}{d(s)} = \frac{V_o}{sL} \tag{3-60}$$

เมื่อพิจารณาการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-61) และทำการจัดรูปใหม่จะได้ดังสมการที่ (3-62)

$$T_i(s) = \frac{I_L(s)}{I_L^*(s)} = \frac{\left(\frac{K_{pi}s + K_{ii}}{s}\right)\left(\frac{G_i(s)}{A_r}\right)}{1 + \left(\frac{K_{pi}s + K_{ii}}{s}\right)\left(\frac{G_i(s)}{A_r}\right)} \tag{3-61}$$

$$T_i(s) = \frac{\left(\frac{K_{pi}s + K_{ii}}{A_r L}\right)V_o}{s^2 + \left(\frac{K_{pi}V_o}{A_r L}\right)s + \left(\frac{K_{ii}V_o}{A_r L}\right)} \tag{3-62}$$

จากนั้นดำเนินการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามตัวหารที่ได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดดังสมการที่ (3-62) กับฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบอันดับสองมาตรฐานดังแสดงได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ดังสมการที่ (3-55) ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-63)

$$\begin{cases} K_{pi} = \dfrac{2\zeta_i \omega_{ni} A_r L}{V_o} \\ K_{ii} = \dfrac{\omega_{ni}^2 A_r L}{V_o} \end{cases} \tag{3-63}$$

โดยที่ ζ_i คือ อัตราส่วนการหน่วงของลูปกระแสไฟฟ้า

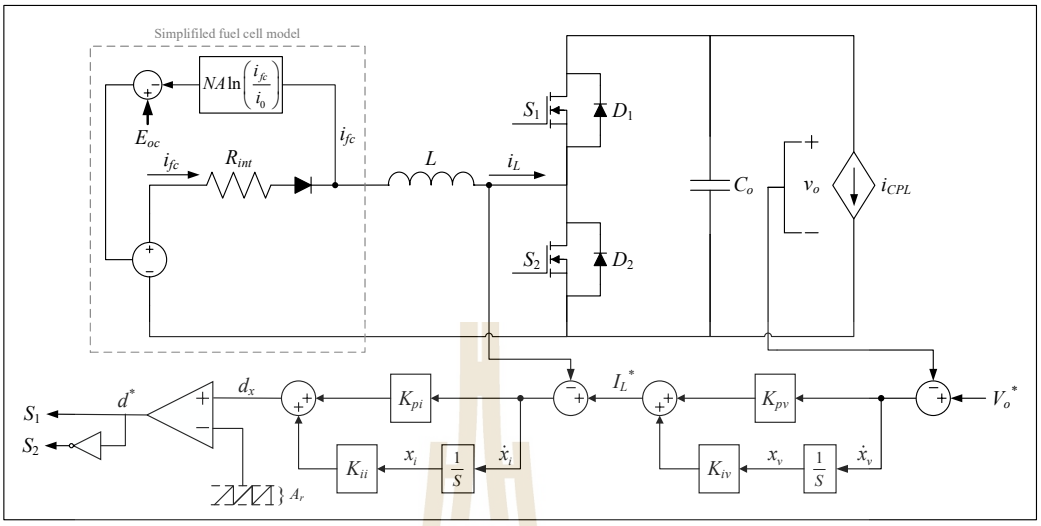
ω_{ni} คือ ความถี่ธรรมชาติของลูปกระแสไฟฟ้า

A_r คือ ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยม

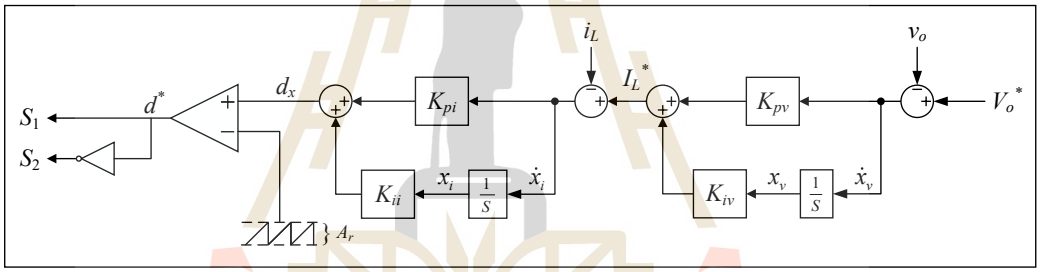
สำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าและลูปกระแสไฟฟ้าสามารถออกแบบได้จากสมการที่ (3-56) และ (3-63) ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาสมการออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะพบว่า การออกแบบลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการหน่วง (ζ_v) และความถี่ธรรมชาติ (ω_{nv}) ของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า ในขณะที่การออกแบบลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการหน่วง (ζ_i) และความถี่ธรรมชาติ (ω_{ni}) ของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโดยกำหนดให้ เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (percent overshoot : P.O.) ของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1% และลูปควบคุมกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 5% ซึ่งทำให้ได้ค่า ζ_v = 0.8261 และ ζ_i = 0.6901 ตามลำดับ ในขณะที่ระยะเวลาเข้าที่ (settling time : T_s) ของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้ากำหนดให้มีค่าเท่ากับ 30.26 ms ซึ่งทำให้ได้ค่า ω_{nv} = 160 rad/s และได้กำหนดให้ ω_{ni} = 10 ω_{nv} ซึ่งทำให้ได้ ω_{ni} = 1600 rad/s ดังนั้นจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คือ K_{pv} = 0.4229, K_{iv} = 40.96, K_{pi} = 2.1163 และ K_{ii} = 2453.333

3.7.2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีตัวควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.24 ซึ่งจากรูปจะพบว่า ระบบดังกล่าวจะมีองค์ประกอบเช่นเดียวกับระบบในรูปที่ 3.16 แต่จะมีการเพิ่มในส่วนของตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันเข้ามา โดยโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันแสดงได้ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.24 ระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีตัวควบคุม



รูปที่ 3.25 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน

พิจารณาโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันดังแสดงในรูปที่ 3.25 เมื่อกำหนดให้ x_v และ x_i เป็นตัวแปรสถานะที่เกิดจากลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าและลูปกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (3-64) และ สมการที่ (3-65) ตามลำดับ

$$\dot{x}_v = V_o^* - v_o \tag{3-64}$$

$$\dot{x}_i = I_L^* - i_L \tag{3-65}$$

โดยที่ V_o^* คือ แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ และ I_L^* คือ กระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อพิจารณาลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าจะสามารถคำนวณหา I_L^* ได้ดังสมการที่ (3-66)

$$I_L^* = \left(V_o^* - v_o\right)K_{pv} + x_v K_{iv}$$

$$I_L^* = K_{pv}V_o^* - K_{pv}v_o + K_{iv}x_v \tag{3-66}$$

และเมื่อพิจารณาการลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าสามารถคำนวณหา d_x ได้ดังสมการที่ (3-67)

$$d_x = \left(I_L^* - i_L\right)K_{pi} + x_i K_{ii}$$

$$d_x = K_{pi}K_{pv}V_o^* - K_{pi}K_{pv}v_o + K_{pi}K_{iv}x_v - K_{pi}i_L + K_{ii}x_i \tag{3-67}$$

ดังนั้นสมการของตัวควบคุมพีไอในรูปของค่าวัฏจักรหน้าที่เมื่อระบบมีการควบคุม (d^*) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-68)

$$d^* = \frac{d_x}{A_r} = \frac{1}{A_r}\left(K_{pi}K_{pv}V_o^* - K_{pi}K_{pv}v_o + K_{pi}K_{iv}x_v - K_{pi}i_L + K_{ii}x_i\right) \tag{3-68}$$

สำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีตัวควบคุมในรูปที่ 3.24 สามารถดำเนินการได้โดยแทนค่า d ในแบบจำลองของระบบในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมในสมการที่ (3-49) ด้วย d^* จากสมการที่ (3-68) จากนั้นนำสมการตัวแปรสถานะของลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากสมการที่ (3-64) และสมการที่ (3-65) ตามลำดับ เพิ่มเข้าไปในแบบจำลองของระบบ ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีตัวควบคุมซึ่งได้จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปภายใต้การประมาณค่าอันดับศูนย์แสดงได้ดังสมการที่ (3-69) อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากปรากฏพจน์การคูณและการหารกันระหว่างตัวแปรสถานะ ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎี-บทค่าเจาะจงได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องดำเนินการทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวเป็น

แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น โดยอาศัยการทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งดังรายละเอียดที่จะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 3.7.3 เป็นลำดับถัดไป

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dfrac{1}{L}\left(E_{oc} - NA\ln\left(\dfrac{x_1}{i_0}\right) - x_1 R_{int} \right) - \dfrac{1}{L}x_2 + \dfrac{K_{pi}K_{pv}}{A_r L}x_2 V_o^* - \dfrac{K_{pi}K_{pv}}{A_r L}x_2^2 \\ \qquad + \dfrac{K_{pi}K_{iv}}{A_r L}x_v x_2 - \dfrac{K_{pi}}{A_r L}x_1 x_2 + \dfrac{K_{ii}}{A_r L}x_i x_2 \\ \dot{x}_2 = \dfrac{1}{C_o}x_1 - \dfrac{K_{pi}K_{pv}}{A_r C_o}x_1 V_o^* + \dfrac{K_{pi}K_{pv}}{A_r C_o}x_1 x_2 - \dfrac{K_{pi}K_{iv}}{A_r C_o}x_v x_1 + \dfrac{K_{pi}}{A_r C_o}x_1^2 \\ \qquad - \dfrac{K_{ii}}{A_r C_o}x_i x_1 - \dfrac{P_{CPL}}{x_2 C_o} \\ \dot{x}_v = V_o^* - x_2 \\ \dot{x}_i = -x_1 - K_{pv}x_2 + K_{iv}x_v + K_{pv}V_o^* \end{cases} \tag{3-69}$$

3.7.3 การทำให้เป็นเชิงเส้นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากหัวข้อที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีตัวควบคุมดังสมการที่ (3-69) เป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำแบบจำลองดังกล่าวให้เป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้ได้แบบจำลองที่เหมาะสำหรับการนำไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นโดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง ซึ่งแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กหรือแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นแสดงได้ดังสมการที่ (3-70)

$$\begin{cases} \delta\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)\delta\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)\delta\mathbf{u} \\ \delta\mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)\delta\mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)\delta\mathbf{u} \end{cases} \tag{3-70}$$

โดยที่ ตัวแปรสถานะ คือ $\delta\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \delta x_1 & \delta x_2 & \delta x_v & \delta x_i \end{bmatrix}^T$

ตัวแปรอินพุต คือ $\delta\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \delta V_o^* & \delta P_{CPL} \end{bmatrix}^T$

ตัวแปรเอาต์พุต คือ $\delta\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \delta x_1 & \delta x_2 \end{bmatrix}^T$

เมื่อเมทริกซ์จาโคเบียน $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)$ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-71)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)=\begin{bmatrix} \frac{\delta\dot{x}_1}{\delta x_1} & \frac{\delta\dot{x}_1}{\delta x_2} & \frac{\delta\dot{x}_1}{\delta x_v} & \frac{\delta\dot{x}_1}{\delta x_i} \\ \frac{\delta\dot{x}_2}{\delta x_1} & \frac{\delta\dot{x}_2}{\delta x_2} & \frac{\delta\dot{x}_2}{\delta x_v} & \frac{\delta\dot{x}_2}{\delta x_i} \\ \frac{\delta\dot{x}_v}{\delta x_1} & \frac{\delta\dot{x}_v}{\delta x_2} & \frac{\delta\dot{x}_v}{\delta x_v} & \frac{\delta\dot{x}_v}{\delta x_i} \\ \frac{\delta\dot{x}_i}{\delta x_1} & \frac{\delta\dot{x}_i}{\delta x_2} & \frac{\delta\dot{x}_i}{\delta x_v} & \frac{\delta\dot{x}_i}{\delta x_i} \end{bmatrix}_{4\times4} \quad \mathbf{B}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)=\begin{bmatrix} \frac{\delta\dot{x}_1}{\delta V_o^*} & \frac{\delta\dot{x}_1}{\delta P_{CPL}} \\ \frac{\delta\dot{x}_2}{\delta V_o^*} & \frac{\delta\dot{x}_2}{\delta P_{CPL}} \\ \frac{\delta\dot{x}_v}{\delta V_o^*} & \frac{\delta\dot{x}_v}{\delta P_{CPL}} \\ \frac{\delta\dot{x}_i}{\delta V_o^*} & \frac{\delta\dot{x}_i}{\delta P_{CPL}} \end{bmatrix}_{4\times2} \tag{3-71}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)=\begin{bmatrix} \frac{\delta x_1}{\delta x_1} & \frac{\delta x_1}{\delta x_2} & \frac{\delta x_1}{\delta x_v} & \frac{\delta x_1}{\delta x_i} \\ \frac{\delta x_2}{\delta x_1} & \frac{\delta x_2}{\delta x_2} & \frac{\delta x_2}{\delta x_v} & \frac{\delta x_2}{\delta x_i} \end{bmatrix}_{2\times4} \quad \mathbf{D}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)=\begin{bmatrix} \frac{\delta x_1}{\delta V_o^*} & \frac{\delta x_1}{\delta P_{CPL}} \\ \frac{\delta x_2}{\delta V_o^*} & \frac{\delta x_2}{\delta P_{CPL}} \end{bmatrix}_{2\times2}$$

ดังนั้นเมื่อใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นโดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งกับแบบจำลองในสมการที่ (3-69) จะได้เมทริกซ์จาโคเบียน $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)$ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นและไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีตัวควบคุมแสดงได้ดังสมการที่ (3-72)

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)=\begin{bmatrix} -\frac{NA}{x_{1,0}L}-\frac{R_{int}}{L}-\frac{K_{pi}}{A_rL}x_{2,0} & a(1,2) & \frac{K_{pi}K_{iv}}{A_rL}x_{2,0} & \frac{K_{ii}}{A_rL}x_{2,0} \\ a(2,1) & \frac{K_{pi}K_{pv}}{A_rC_o}x_{1,0}+\frac{P_{CPL}}{x_{2,0}^2C_o} & -\frac{K_{pi}K_{iv}}{A_rC_o}x_{1,0} & -\frac{K_{ii}}{A_rC_o}x_{1,0} \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -K_{pv} & K_{iv} & 0 \end{bmatrix}_{4\times4}$$

เมื่อ

$$a(1,2)=-\frac{1}{L}+\frac{K_{pi}K_{iv}}{A_rL}V_{o,0}^*-\frac{2K_{pi}K_{pv}}{A_rL}x_{2,0}+\frac{K_{pi}K_{iv}}{A_rL}x_{v,0}-\frac{K_{pi}}{A_rL}x_{1,0}+\frac{K_{ii}}{A_rL}x_{i,0}$$

$$a(2,1)=\frac{1}{C_o}-\frac{K_{pi}K_{pv}}{A_rC_o}V_{o,0}^*+\frac{K_{pi}K_{pv}}{A_rC_o}x_{2,0}-\frac{K_{pi}K_{iv}}{A_rC_o}x_{v,0}+\frac{2K_{pi}}{A_rC_o}x_{1,0}-\frac{K_{ii}}{A_rC_o}x_{i,0}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)=\begin{bmatrix} \frac{K_{pi}K_{pv}}{A_rL}x_{2,0} & 0 \\ -\frac{K_{pi}K_{pv}}{A_rC_o}x_{1,0} & -\frac{1}{x_{2,0}C_o} \\ 1 & 0 \\ K_{pv} & 0 \end{bmatrix}_{4\times 2} \qquad \mathbf{C}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{2\times 4}$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)=\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{2\times 2} \qquad (3\text{-}72)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3-72) จะสังเกตได้ว่า เมทริกซ์จาโคเบียน $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)$ มีค่าขึ้นอยู่กับ $x_{1,0}, x_{2,0}, x_{v,0}$ และ $x_{i,0}$ ซึ่งค่าดังกล่าวนี้เป็นค่าในสภาวะอยู่ตัว ณ จุดปฏิบัติงานที่พิจารณา ซึ่งการคำนวณค่าในสภาวะอยู่ตัว ณ จุดปฏิบัติงานของระบบสามารถทำได้โดยกำหนดให้ $\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_v$ และ $\dot{x}_i$ ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ (3-69) มีค่าเท่ากับศูนย์

3.7.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

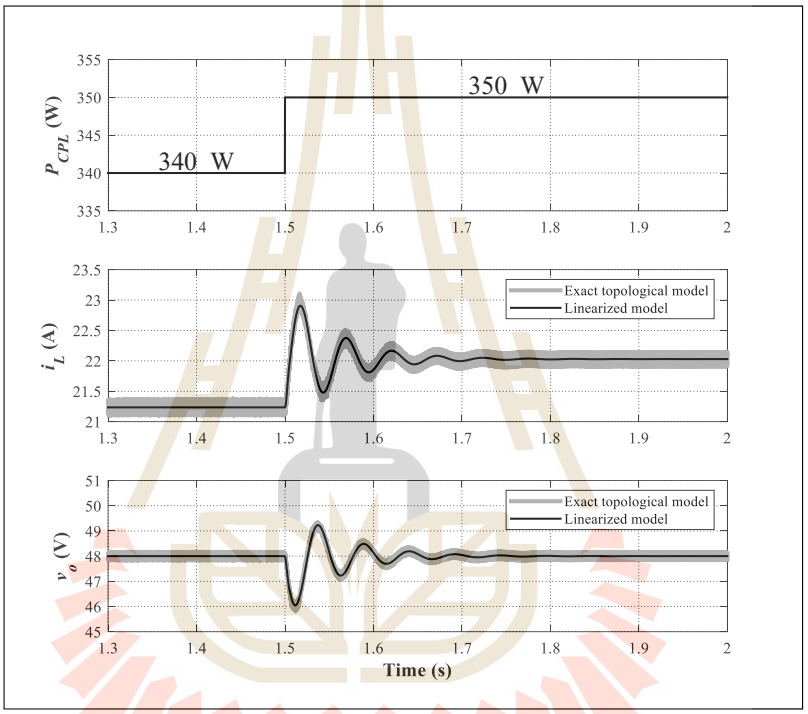
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นจะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้นดังสมการที่ (3-72) กับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งชุดบล็อกดังกล่าวสามารถดูได้จากภาคผนวก ข2. และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.24

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
E_{oc}	23.5 V	แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน
NA	0.9156	ค่าคงที่ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน
R_{int}	0.1083 Ω	ความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน
i_0	0.0734 A	กระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน
L ($\Delta i_L \leq 0.1$ A)	4.6 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันกำลัง
C_o ($\Delta v_o \leq 240$ mV)	1600 μF	ความจุไฟฟ้าทางด้านโหลด สำหรับการกำหนดให้ Δv_o = 240 mV เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21780:2020
f_s	10 kHz	ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลัง
A_r	10	ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยมสำหรับตัวควบคุมพีไอ

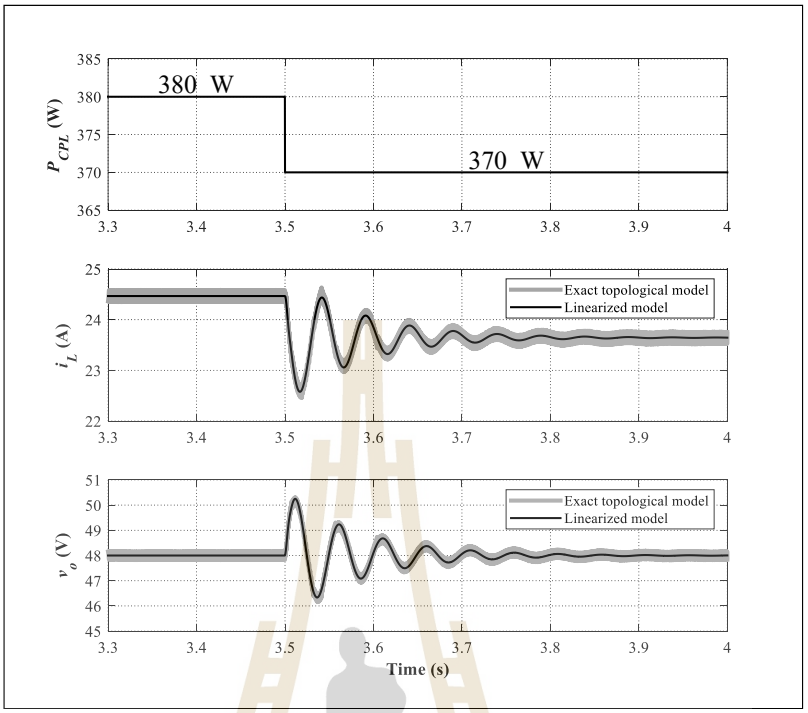
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.24 (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
K_{pv}	0.4229	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีสำหรับลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า
K_{iv}	40.96	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมไอสำหรับลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า
K_{pi}	2.1163	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีสำหรับลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า
K_{ii}	2453.333	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมไอสำหรับลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.26 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในกรณีที่มีตัวควบคุม เมื่อมีการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าจาก 340 W ไปเป็น 350 W

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.27 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในกรณีที่มีตัวควบคุม เมื่อมีการลดค่ากำลังไฟฟ้าจาก 380 W ไปเป็น 370 W

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในกรณีที่มีตัวควบคุมจะพิจารณา 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่มีการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าจาก 340 W ไปเป็น 350 W ที่เวลา 1.5 วินาที และกรณีที่มีการลดค่ากำลังไฟฟ้าจาก 380 W ไปเป็น 370 W ที่เวลา 3.5 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.26 และรูปที่ 3.27 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการตรวจสอบที่ได้ทั้งสองรูปจะพบว่าผลตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทางฝั่งโหลด (v_o) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น (Linearized model) ดังกราฟเส้นสีดำให้ผลตอบสนองที่สอดคล้องและตรงกันกับแบบจำลองในรูปแบบแม่นตรง (Exact topological model) ดังกราฟเส้นสีเทา ทั้งในสภาวะชั่วครู่และในสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีตัวควบคุมดังสมการที่ (3-72) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา มีความถูกต้อง แม่นยำ และสามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาได้

3.8 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 ได้นำเสนอระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาและการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ โดยเนื้อหาในตอนต้นได้กล่าวถึงรายละเอียดของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณา แบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน และการพิสูจน์หาสมการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์พาสซีฟในระบบ จากนั้นเป็นการนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของระบบทั้งในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมและในกรณีที่มีตัวควบคุมโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง SIMULINK ร่วมกับโปรแกรม MATLAB นอกจากนี้การออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางได้รับการนำเสนอไว้ในส่วนที่เหมาะสมของบทที่ 3 ด้วยเช่นกัน โดยผลที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้องแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองเชิงพลวัตที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องและตรงกับผลตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอมีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาได้ โดยรายละเอียดการวิเคราะห์เสถียรภาพจะได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 4 เป็นลำดับถัดไป

สำหรับการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในบทที่ 3 ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่เป็นบทความวิจัยจำนวน 2 ฉบับ ได้แก่ บทความการประชุมวิชาการระดับชาติและบทความวารสารวิชาการระดับนานาชาติ คือ

กฤษดา ทองอร่าม, กองพัน อารีรักษ์, อภิชัย สุยะพันธ์ และ จักรกริช ภักดีโต. (2568). การสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่อาศัยข้อมูลจากผู้ผลิต. *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48 (EECON-48)*. หน้า 861-866. เชียงใหม่.

Thongaram, K., Areerak, K-N., & Suyapan, A. (2025). MATHEMATICAL MODEL OF HYDROGEN-POWERED BICYCLE ELECTRIFICATION. *Suranaree Journal of Science and Technology, 32*(6), 1-8. https://doi.org/10.55766/sujst9783

โดยรายละเอียดของบทความวิจัยทั้ง 2 ฉบับแสดงได้ดังภาคผนวก ก

บทที่ 4
การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน

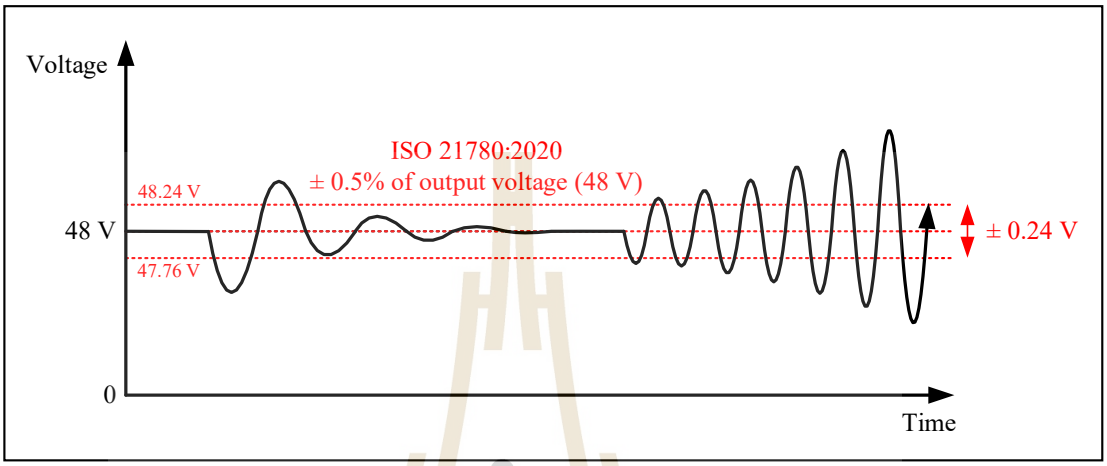
4.1 บทนำ

การศึกษาและค้นคว้างานวิจัยในอดีตพบว่า โหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ ซึ่งหากระบบเกิดการขาดเสถียรภาพไม่เพียงแต่จะทำให้สมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมลดลง แต่อาจส่งผลทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบได้รับความเสียหายและเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานได้ ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนจึงเป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพื่อให้สามารถคาดการณ์จุดทำงานที่อาจเกิดการขาดเสถียรภาพภายใต้พิกัดของระบบ และหลีกเลี่ยงการทำงาน ณ จุดดังกล่าวได้ ดังนั้นในบทที่ 4 จึงนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจง พร้อมทั้งนำเสนอการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งต่อเสถียรภาพของระบบ สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งหมดจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพและการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ได้จะเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับเป็นแนวทางให้วิศวกรในการออกแบบระบบจักรยานไฟฟ้าเพื่อให้สามารถหลีกเลี่ยงจุดทำงานที่อาจเกิดการขาดเสถียรภาพของระบบได้

4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นดังแสดงในสมการที่ (3-72) ในบทที่ 3 ที่ผ่านมา ร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจง (อภิชัย สุยะพันธ์, 2558) เพื่อใช้คาดการณ์จุดการทำงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพและเพื่อหลีกเลี่ยงการทำงาน ณ จุดดังกล่าว อย่างไรก็ตามการพิจารณาข้อกำหนดของมาตรฐานเป็นสิ่งที่สำคัญ ทั้งนี้เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุด้วยมาตรฐาน ISO 21780:2020 ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับระบบไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้

ระดับแรงดัน 48 V โดยขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐานดังกล่าว (International Organization for Standardization, 2020) แสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุตามมาตรฐาน ISO 21780:2020

จากรูปที่ 4.1 จะพบว่าขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุตามมาตรฐาน ISO 21780:2020 จะถูกกำหนดให้การกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าในสภาวะอยู่ตัวมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 0.5 % ของระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 48 V หรือคิดเป็น ± 0.24 V อย่างไรก็ตามหากระบบเกิดการขาดเสถียรภาพจะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีขนาดสูงเกินขอบเขตที่มาตรฐานกำหนด อีกทั้งยังเป็นสาเหตุทำให้สมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมลดลง รวมถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบอาจได้รับความเสียหายและเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังหัวข้อที่ 4.2.1 ดังนี้

4.2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น จากนั้นดำเนินการพิจารณาค่าเจาะจง (eigenvalues) ทั้งหมดของระบบ ซึ่งค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4-1) เมื่อ λ คือ ค่าเจาะจงของระบบ $\mathbf{I}$ คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์ (identity matrix) และ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)$ คือ เมทริกซ์จาโคเบียนของระบบที่เป็นเชิงเส้น

$$\det\left[\lambda\mathbf{I}-\mathbf{A}\right]=0 \tag{4-1}$$

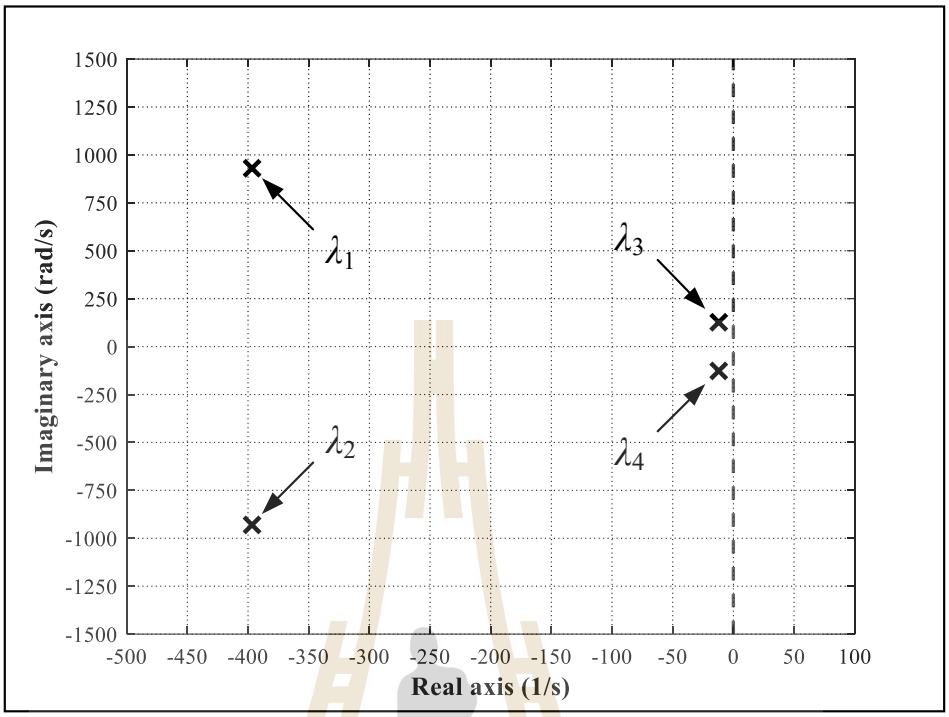
สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถพิจารณาได้จากเงื่อนไขการมีเสถียรภาพตามอสมการที่ (4-2) ดังนี้

$$\mathrm{Re}(\lambda_i) < 0 \tag{4-2}$$

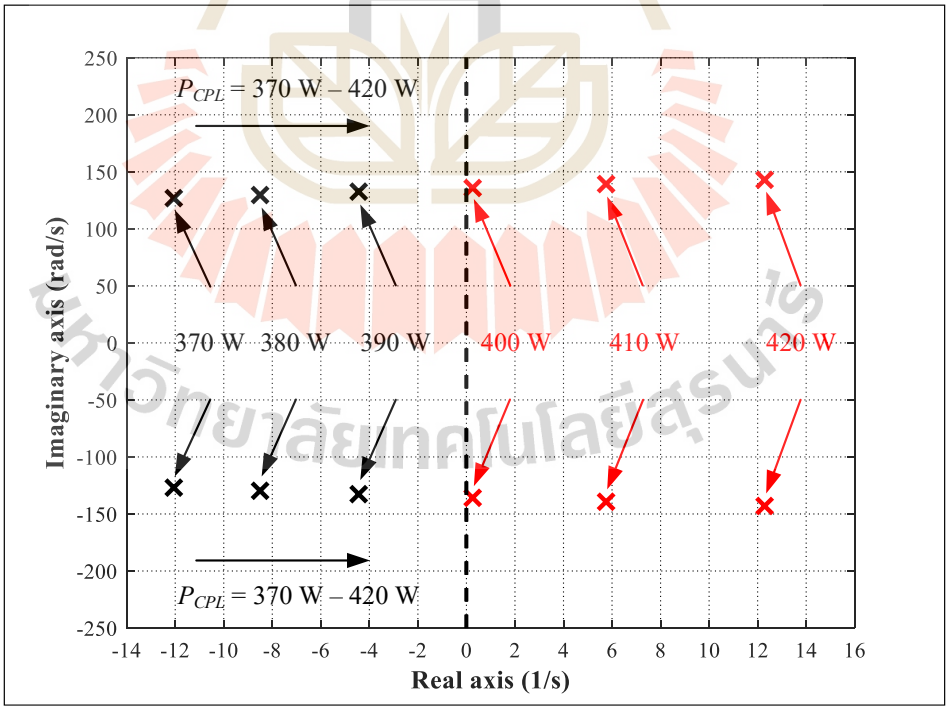
โดยที่ $i = 1, 2, 3, \ldots, \mathrm{n}$ (n คือ จำนวนตัวแปรสถานะทั้งหมดของระบบ)

พิจารณาอมสมการที่ (4-2) สามารถอธิบายได้ว่า ระบบจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อค่าเจาะจงของระบบทั้งหมดต้องมีส่วนจริง (real roots) น้อยกว่าศูนย์ กล่าวคือ ค่าเจาะจงของระบบทุกตัวจะต้องอยู่ทางฝั่งซ้ายมือ (left-hand side) ของระนาบเอส (s-plane) ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวถือเป็นเกณฑ์พื้นฐานสำคัญที่ใช้ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถพิจารณาเฉพาะค่าเจาะจงเด่นของระบบ (dominant eigenvalues) หรือโพลเด่นของระบบ (dominant poles) ได้ เนื่องจากค่าเจาะจงเด่นหรือโพลเด่นดังกล่าวจะมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบมากที่สุด (อภิชัย สุยะพันธ์, 2558)

พิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาโดยเมื่อนำเมทริกซ์จาโคเบียน $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)$ ดังสมการที่ (3-72) และค่าพารามิเตอร์ของระบบดังตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3 แทนลงในสมการที่ (4-1) จะสามารถคำนวณหาค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (P_{CPL}) มีค่าเท่ากับ 370 W ผ่านคำสั่ง “eig(A)” ของโปรแกรม MATLAB ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งจากรูปจะพบว่า ค่าเจาะจงของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาประกอบด้วยค่าเจาะจง λ_1 ถึง λ_4 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างส่วนจริงของค่าเจาะจง λ_1 และ λ_2 กับส่วนจริงของค่าเจาะจง λ_3 และ λ_4 จะมีค่าเท่ากับ 32.89 ซึ่งมีค่ามากกว่า 5 เท่า ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ค่าเจาะจง λ_3 และ λ_4 เป็นค่าเจาะจงเด่นของระบบหรือเป็นขั้วเด่นของระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบสามารถวิเคราะห์ได้จากค่าเจาะจงเด่น λ_3 และ λ_4 ได้ โดยเส้นทางเดินของค่าเจาะจงเด่น λ_3 และ λ_4 ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณา เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 370 W ถึง 420 W สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อ P_{CPL} = 370 W

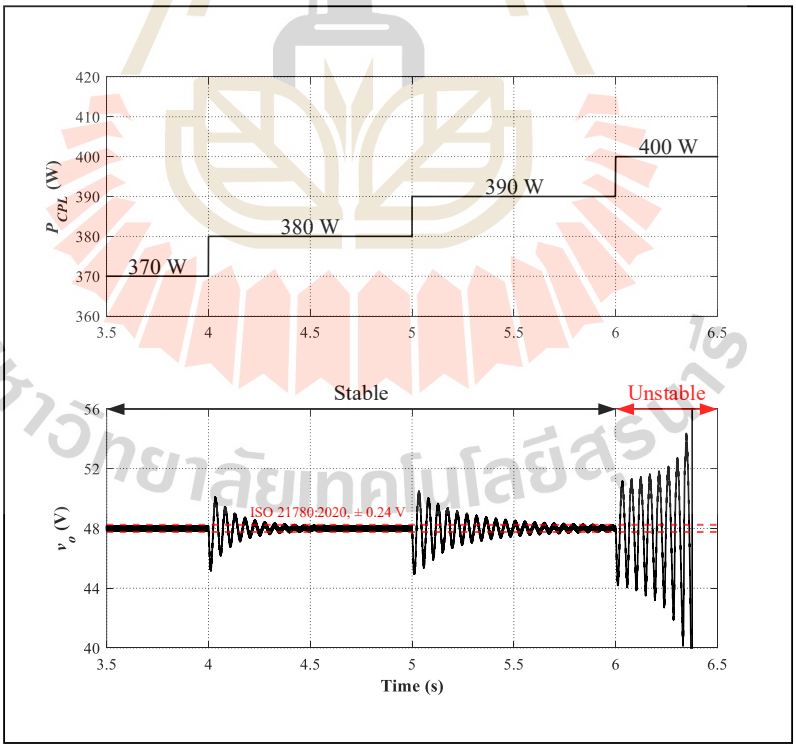


รูปที่ 4.3 ค่าเจาะจงเด่นของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณา

จากรูปที่ 4.3 จะสังเกตได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 400 W ส่วนจริงของค่าเจาะจงเด่นของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีค่ามากกว่าศูนย์ ซึ่งไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของอสมการที่ (4-2) ที่ระบุไว้ว่า ระบบจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ดังนั้นที่จุดการทำงานนี้ระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าน้อยกว่า 400 W และจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 400 W ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณางานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังหัวข้อที่ 4.2.2

4.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ

การตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ซึ่งรายละเอียดการต่อชุดบล็อกดังกล่าวสามารถดูได้จากภาคผนวก ข2. และผลการตรวจสอบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

จากรูปที่ 4.4 เป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยจะพบว่าในช่วงเวลาที่ 3.5 วินาที ถึง 6 วินาที เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (P_{CPL}) มีการเปลี่ยนแปลงจาก 370 W ไปจนถึง 390 W ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า (v_o) สามารถลู่เข้าสู่สภาวะสมดุลได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบยังคงสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ แต่อย่างไรก็ตามในช่วงเวลาที่ 6 วินาที ถึง 6.5 วินาที เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 390 W ไปเป็น 400 W พบว่าผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเกิดการสั่นไกวเพิ่มมากขึ้นจนไม่สามารถลู่เข้าสู่สภาวะสมดุลได้และยิ่งไปกว่านั้นผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21780:2020 อีกด้วย ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงการสูญเสียความสามารถในการรักษาสมดุลของระบบโดยสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางทฤษฎีในรูปที่ 4.3 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาจะเกิดการขาดเสถียรภาพขึ้นจริง โดยจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 400 W ซึ่งเกิดขึ้นก่อนค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดของระบบ ($P_{CPL,rated}$ = 500 W) ในลำดับถัดไปจะเป็นการดำเนินการวิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาซึ่งมีรายละเอียดสามารถแสดงได้ดังหัวข้อที่ 4.3

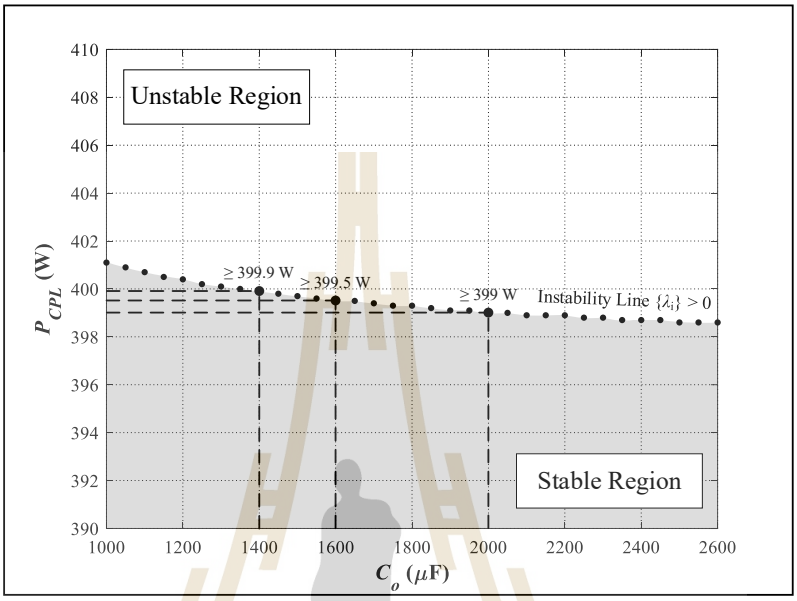
4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน

การศึกษาวิจัยถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบเป็นสิ่งที่จำเป็นและสำคัญไม่ต่างไปจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางให้วิศวกรผู้ออกแบบระบบได้คำนึงถึงผลกระทบต่อเสถียรภาพที่อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ในระบบ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงดำเนินการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนโดยใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจงผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ที่ได้จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

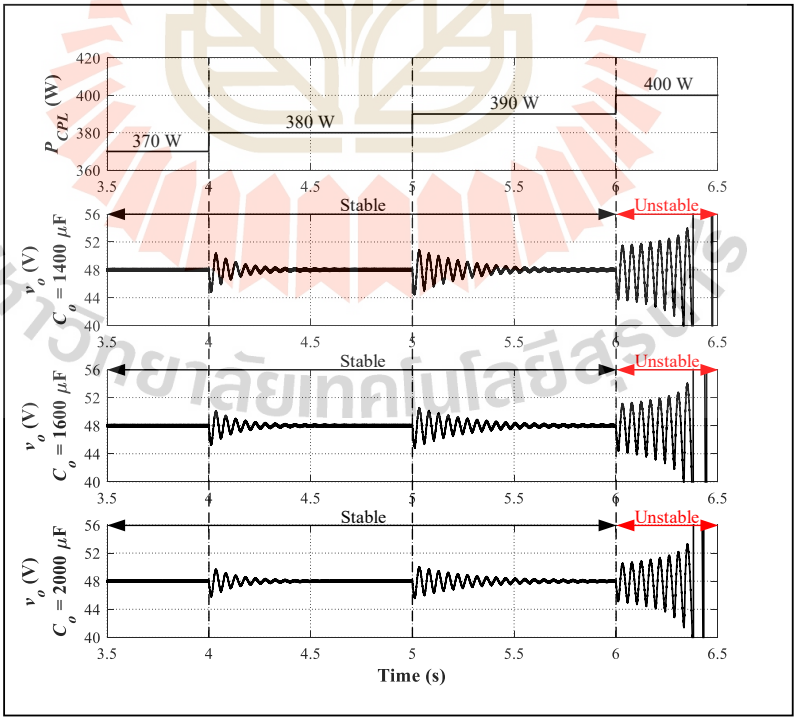
4.3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลัง

ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลังที่ต่อขนานกับโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า (C_o) มีหน้าที่ลดการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า (ripple voltage) ทางฝั่งโหลดให้มีลักษณะรูปสัญญาณที่เรียบมากยิ่งขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุจะพิจารณาการเปลี่ยนจาก 1000 μF ถึง 2600 μF ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ของระบบยังคงมีค่าเท่าเดิม

ดังตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงสามารถสร้างเป็นเส้นอเสถียรภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า C_o

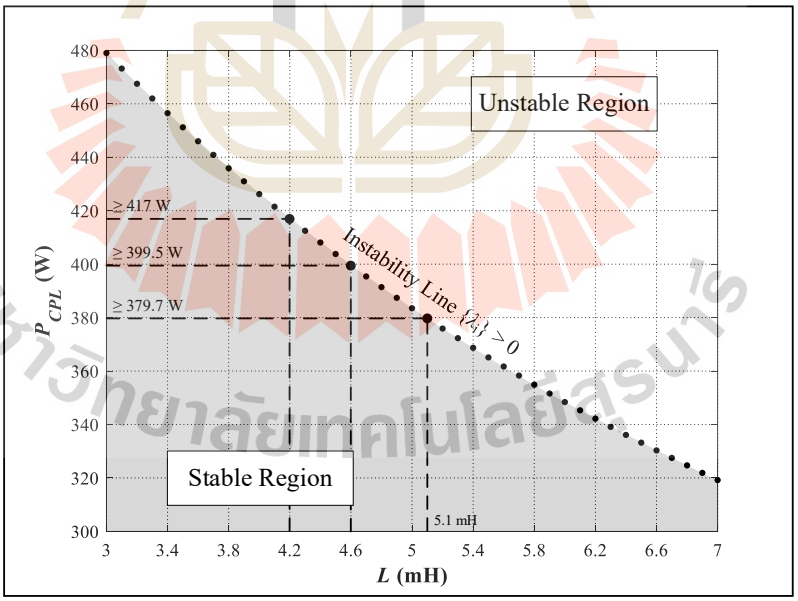


รูปที่ 4.6 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า C_o

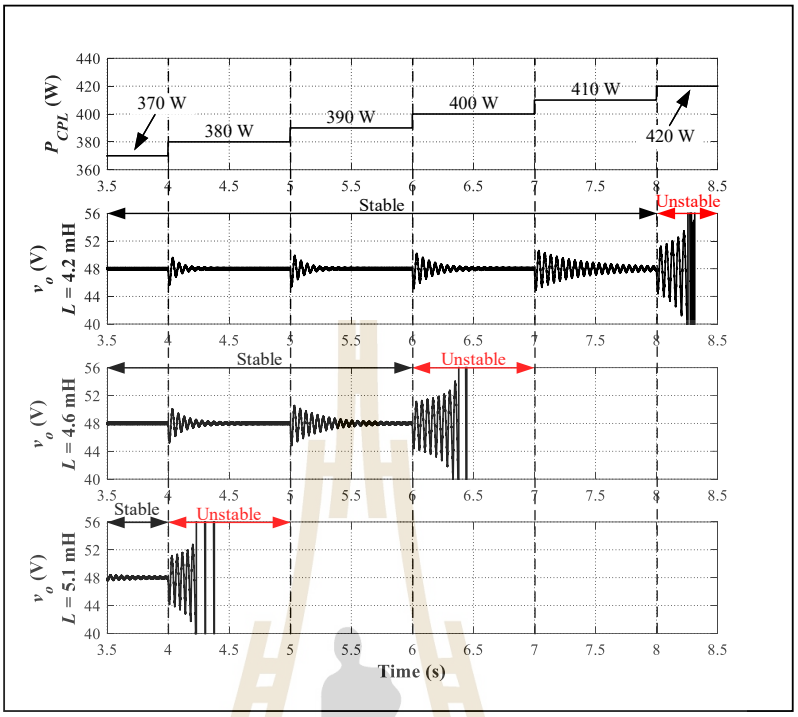
จากรูปที่ 4.5 เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ (C_o) มีค่าเท่ากับ 1400 μF 1600 μF และ 2000 μF ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (P_{CPL}) มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 399.9 W 399.5 W และ 399 W ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่า ให้ผลที่สอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงค่า C_o ของวงจรแปลงผันกำลังจะส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบน้อยมากหรือแทบไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพ อย่างไรก็ตามแม้ว่าการเพิ่มค่า C_o ในปริมาณที่สูงขึ้นจะมีข้อดีคือการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าลดลง แต่ต้องแลกกับน้ำหนักของจักรยานไฟฟ้าและต้นทุนการผลิตที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย ดังนั้นการออกแบบค่า C_o ที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการนำไปใช้งานจึงเป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็นสำหรับวิศวกรผู้ออกแบบระบบที่ควรพิจารณา

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันกำลัง

ตัวเหนี่ยวนำ (L) ของวงจรแปลงผันกำลัง ทำหน้าที่ลดการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้า (ripple current) ให้มีรูปสัญญาณที่เรียบมากยิ่งขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงจาก 3 mH ถึง 7 mH ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ของระบบยังคงมีค่าเท่าเดิมดังตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงสามารถสร้างเป็นเส้นอเสถียรภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า L



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า L

จากรูปที่ 4.7 เมื่อค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ (L) มีค่าเท่ากับ 4.2 mH 4.6 mH และ 5.1 mH ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (P_{CPL}) มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 417 W 399.5 W และ 379.7 W ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่า ให้ผลที่สอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อค่า L มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ระบบจักรยานไฟฟ้ามีเสถียรภาพลดลง (less stable) ในทางกลับกัน หากค่า L มีค่าที่ลดลงจะส่งผลทำให้ระบบจักรยานไฟฟ้ามีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น (more stable) อย่างไรก็ตามแม้ว่าการเพิ่มค่า L จะทำให้การกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง แต่กลับทำให้ระบบมีเสถียรภาพลดลงด้วย ด้วยเหตุนี้การเลือกค่า L ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจึงเป็นความท้าทายที่วิศวกรผู้ออกแบบระบบจำเป็นต้องพิจารณา ไม่เพียงแต่พิจารณาเฉพาะการกระเพื่อมของกระแสที่ลดลงเท่านั้น แต่ยังต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อเสถียรภาพด้วย ซึ่งข้อมูลดังกล่าวนี้เป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการออกแบบระบบจักรยานไฟฟ้า

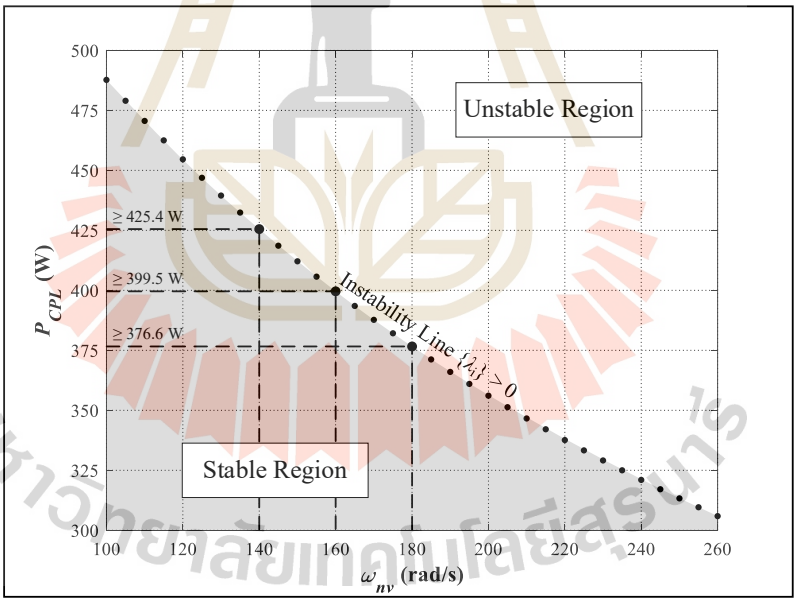
4.3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุม

การเปลี่ยนแปลงความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุม (ω_n) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความเร็วของผลตอบสนองของระบบจักรยานไฟฟ้า อันเนื่องมาจากเวลาเข้าที่ (settling time : T_s) ทำให้ค่าอัตราขยายสัดส่วน (K_p) และอัตราขยายปริพันธ์ (K_i) ของตัวควบคุมพีไอมีค่าเปลี่ยนแปลง

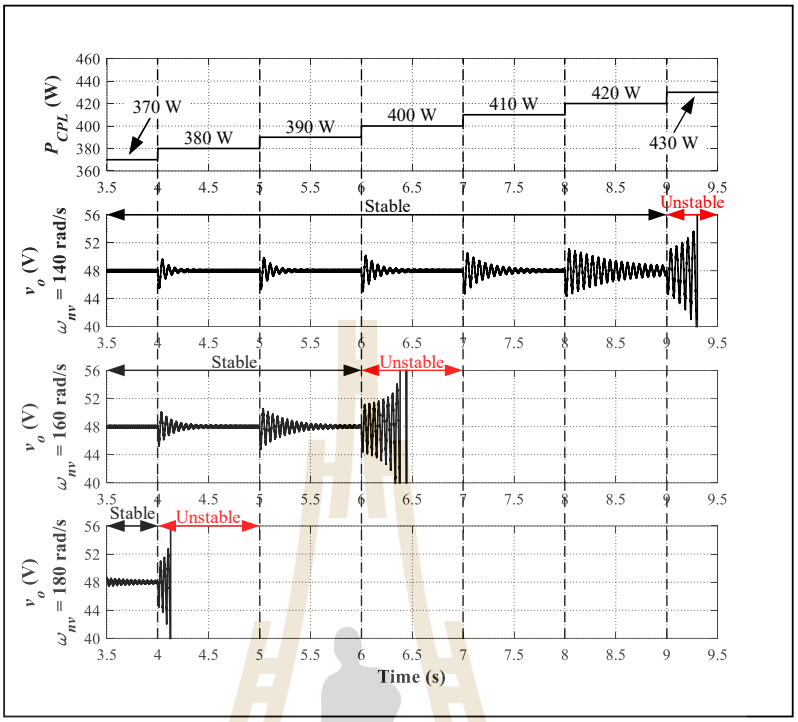
โดยตัวควบคุมของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันที่มีตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าเป็นลูปควบคุมภายในและมีตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าเป็นลูปควบคุมภายนอก สำหรับเงื่อนไขการออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันจะกำหนดให้ลูปควบคุมภายในต้องทำงานเร็วกว่าลูปควบคุมภายนอกอย่างน้อย 10 เท่า นั่นคือ ($\omega_{ni} \geq 10\omega_{nv}$) (Pakdeeto, J., Chanpittayagit, R., Areerak, K-N., and Areerak, K-L., 2017) เพื่อให้การออกแบบเป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าว ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าและลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

1) การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า

การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า (ω_{nv}) จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงจาก 100 rad/s ถึง 260 rad/s ในขณะที่กำหนดให้ $\omega_{ni} = 10\omega_{nv}$ ผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถสร้างเป็นเส้นอเสถียรภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{nv}

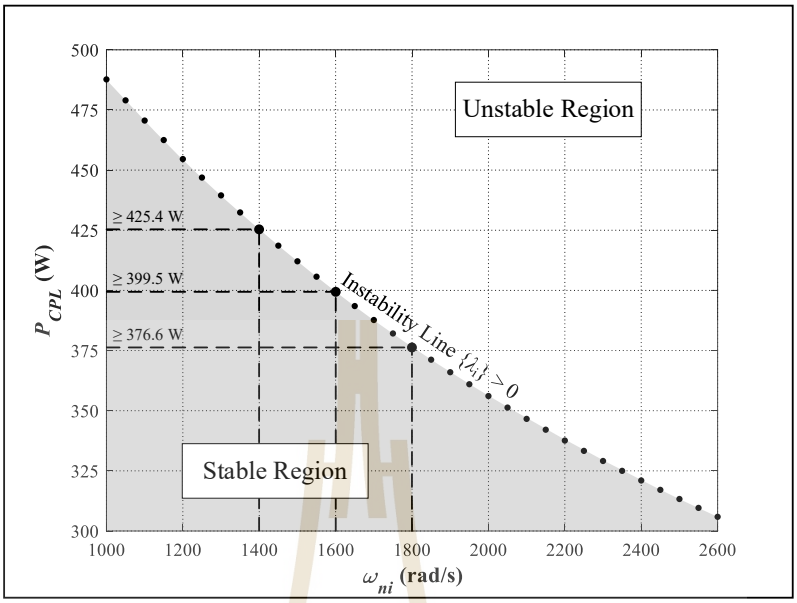


รูปที่ 4.10 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{nv}

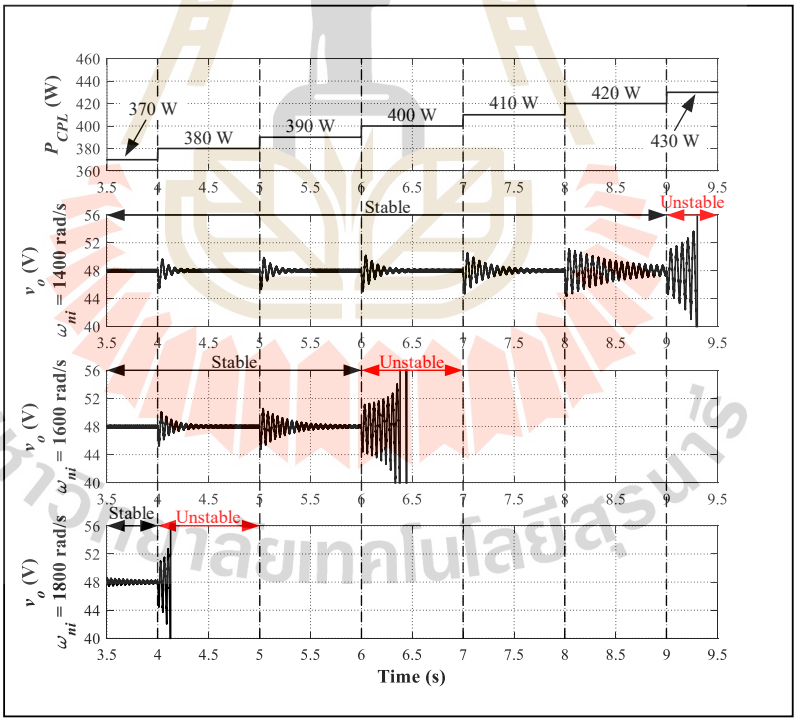
จากรูปที่ 4.10 จะพบว่า เมื่อความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า (ω_{nv}) มีค่าเท่ากับ 140 rad/s 160 rad/s และ 180 rad/s ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (P_{CPL}) มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 425.4 W 399.5 W และ 376.6 W ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าให้ผลที่สอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อ ω_{nv} มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ระบบจักรยานไฟฟ้ามีเสถียรภาพลดลง ในทางตรงกันข้ามหาก ω_{nv} มีค่าที่ลดลงจะส่งผลทำให้ระบบจักรยานไฟฟ้ามีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่ได้ดังรูปที่ 4.9

2) การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า

การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า (ω_{ni}) จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงจาก 1000 rad/s ถึง 2600 rad/s ในขณะที่ได้กำหนดให้ $\omega_{nv} = \frac{1}{10}\omega_{ni}$ ผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถสร้างเป็นเส้นอเสถียรภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{ni}



รูปที่ 4.12 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{ni}

จากรูปที่ 4.11 จะพบว่า เมื่อความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า (ω_{ni}) มีค่าเท่ากับ 1400 rad/s 1600 rad/s และ 1800 rad/s ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (P_{CPL}) มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 425.4 W 399.5 W และ 376.6 W ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า ให้ผลที่สอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อ ω_{ni} มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ระบบจักรยานไฟฟ้ามีเสถียรภาพลดลง ในทางตรงกันข้ามหาก ω_{ni} มีค่าลดลงจะส่งผลทำให้ระบบจักรยานไฟฟ้ามีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น

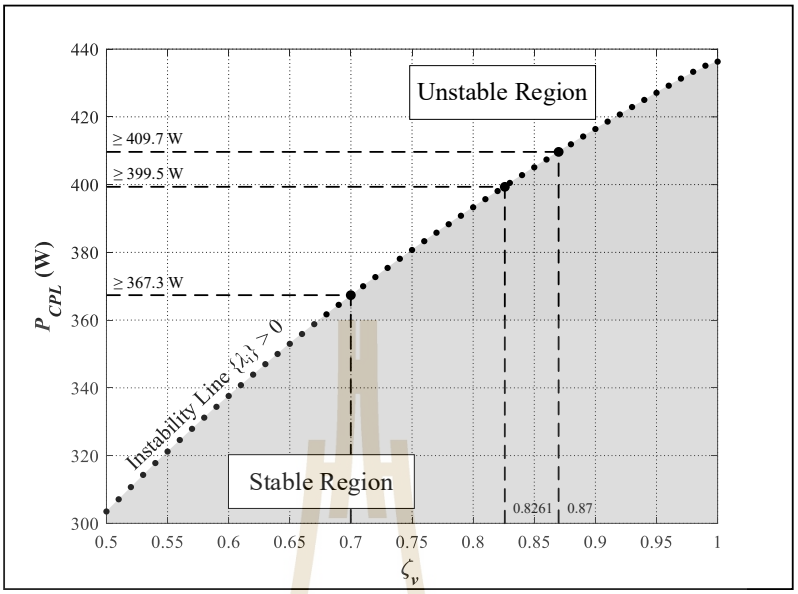
ดังนั้นจากการวิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า (ω_{nv}) และลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า (ω_{ni}) พบว่า หากมีการออกแบบให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วมากเกินไปจะส่งผลทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ไวมากยิ่งขึ้น ในทางกลับกันหากออกแบบให้ความถี่ธรรมชาติมีค่าลดลงระบบอาจมีเสถียรภาพที่เพิ่มขึ้น แต่ต้องแลกมากับผลตอบสนองของระบบที่ช้า ดังนั้นการออกแบบค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นสำหรับวิศวกรผู้ออกแบบระบบ ทั้งนี้เพื่อให้ระบบมีผลตอบสนองที่รวดเร็วและยังคงรักษาเสถียรภาพของระบบไว้ภายใต้การทำงานที่พิกัดได้

4.3.4 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุม

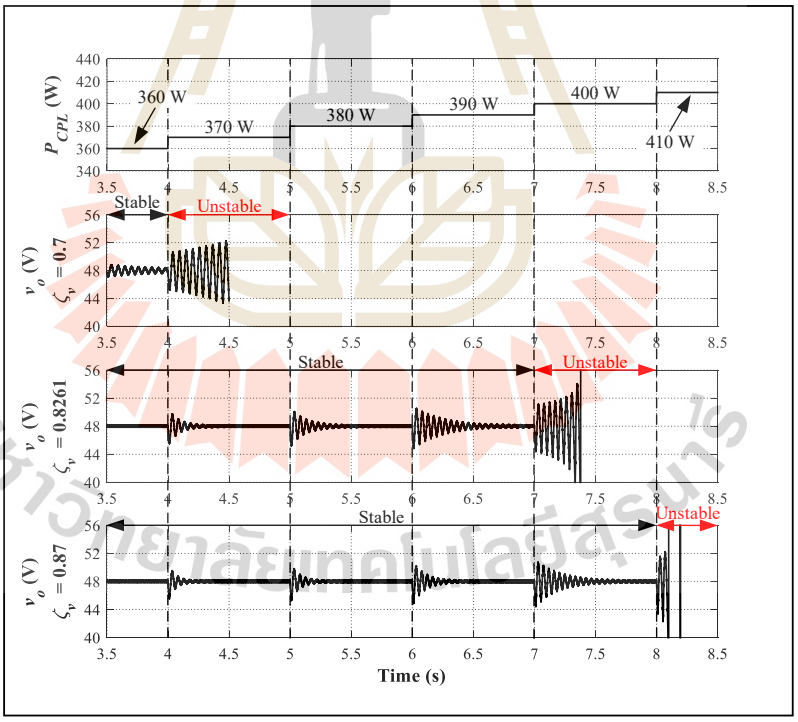
การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุม (ζ) เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (percent overshoot : P.O.) ของผลตอบสนองของระบบจักรยานไฟฟ้า ทำให้ค่าอัตราขยายสัดส่วน (K_p) ของตัวควบคุมพีไอมีการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปแรงดันไฟฟ้า (ζ_v) และอัตราส่วนการหน่วงของลูปกระแสไฟฟ้า (ζ_i) ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

1) การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า

การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า (ζ_v) จะดำเนินการเปลี่ยนแปลงจาก 0.5 ถึง 1 ในขณะที่ค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า (ζ_i) จะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.6901 (P.O. = 5%) ผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถนำมาสร้างเป็นเส้นอเสถียรภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ζ_v

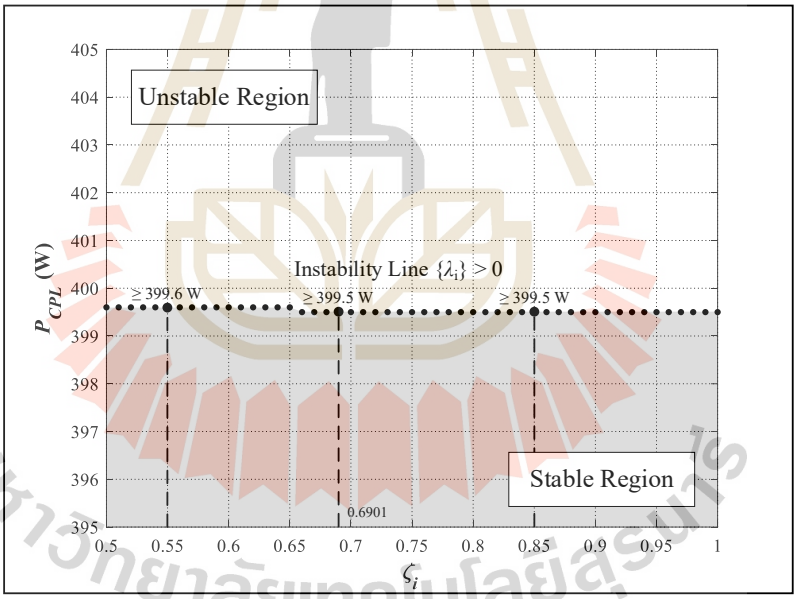


รูปที่ 4.14 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ζ_v

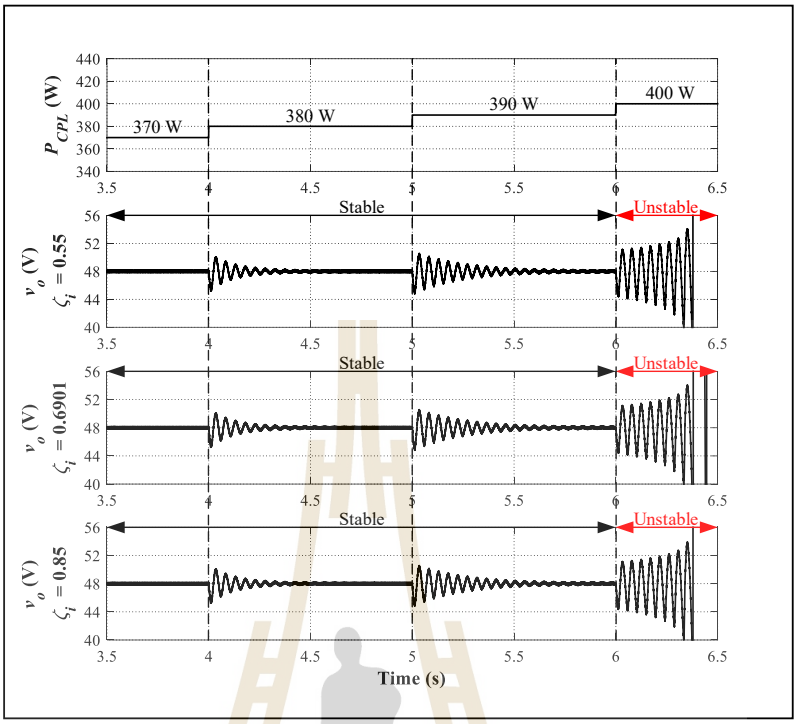
จากรูปที่ 4.13 จะสังเกตได้ว่า เมื่อค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า (ζ_v) มีค่าเท่ากับ 0.7 0.8261 และ 0.87 ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (P_{CPL}) มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 367.3 W 399.5 W และ 409.7 W ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่า ให้ผลที่สอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อ ζ_v มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ระบบจักรยานไฟฟ้ามีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันหาก ζ_v มีค่าลดลงจะส่งผลทำให้ระบบจักรยานไฟฟ้ามีเสถียรภาพที่ลดลงด้วยเช่นกัน

2) การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า

การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า (ζ_i) จะดำเนินการเปลี่ยนแปลงจาก 0.5 ถึง 1 ในขณะที่ค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า (ζ_v) จะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.8261 (P.O. = 1%) ผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถนำมาสร้างเป็นเส้นอเสถียรภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ζ_i



รูปที่ 4.16 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ζ_i

จากรูปที่ 4.15 จะสังเกตได้ว่า เมื่อค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า (ζ_i) มีค่าเท่ากับ 0.55 0.6901 และ 0.85 ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (P_{CPL}) มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 399.6 W 399.5 W และ 399.5 W ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่า ให้ผลที่สอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจะไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า (ζ_v) และลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า (ζ_i) พบว่า หากมีการออกแบบให้อัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นหรือมีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่น้อยลงจะส่งผลทำให้ระบบจักรยานไฟฟ้าที่เสถียรภาพที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การออกแบบให้อัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้า ซึ่งข้อมูลดังกล่าวที่ได้นำเสนอถือเป็นข้อมูลที่สำคัญและมีประโยชน์ต่อการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมให้มีความเหมาะสม

ดังนั้นจากการดำเนินการวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบจะเป็นข้อมูลที่สำคัญและเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับวิศวกรในการออกแบบระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่ต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของระบบด้วย

4.4 สรุป

ในบทที่ 4 เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพและการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะพิจารณาไปที่ค่าเจาะจงเด่นของระบบเนื่องจากค่าเจาะจงดังกล่าวมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบมากที่สุด ทั้งนี้เพื่อคาดเดาปริมาณโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ พร้อมทั้งนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีทั้งหมดด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและการจำลองสถานการณ์มีความสอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบ ซึ่งวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้นำเสนอสามารถคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ อีกทั้งการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จะเป็นข้อมูลที่สำคัญและมีประโยชน์ต่อการออกแบบและเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ให้มีความเหมาะสมกับระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการยืนยันว่าวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นมีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป ซึ่งจะได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 5 เป็นลำดับถัดไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป

5.1 บทนำ

เนื้อหาในบทที่ 4 ที่ผ่านมาได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพและการวิเคราะห์ถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิ-สถานะทั่วไป ซึ่งได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ดังกล่าวด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอว่ามีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และวิธีการที่นำเสนอสามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ เนื้อหาในบทที่ 5 นี้จึงเป็นการนำเสนอการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปโดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335 ซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ประมวลผลสัญญาณการควบคุมของตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน นอกจากนี้ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปดังกล่าวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ซึ่งวิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้นนี้ไม่เพียงแต่ช่วยยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพได้เท่านั้น แต่ยังทำให้เชื่อมั่นได้ว่าระบบควบคุมจะไม่เกิดข้อผิดพลาดหากนำตัวควบคุมดังกล่าวไปใช้งานจริง ดังนั้นการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปถือเป็นการทดสอบเสมือนจริงในระดับฮาร์ดแวร์ที่มีความเชื่อถือได้

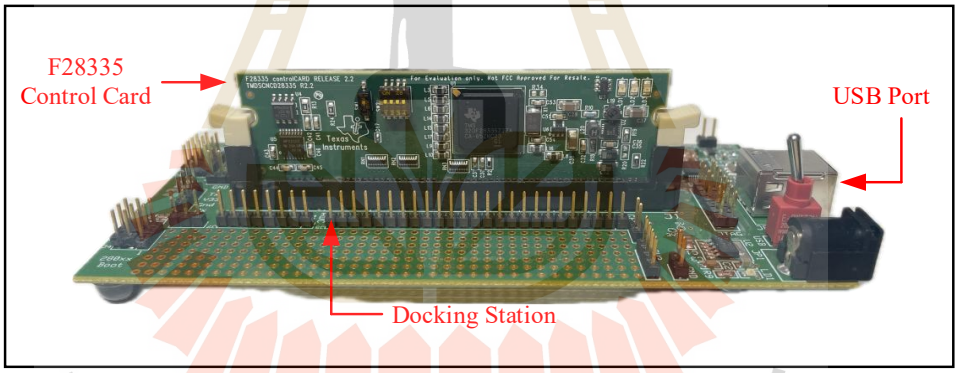
5.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับการทดสอบฮาร์ดแวร์ในลูป

การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเป็นเทคนิคสำหรับการทดสอบระบบควบคุมที่อาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างฮาร์ดแวร์จริงของตัวควบคุมกับชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB เทคนิคดังกล่าวทำให้สามารถตรวจสอบความถูกต้องของตัวควบคุมได้โดยไม่จำเป็นต้องเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์จริงทั้งระบบ ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงและความเสียหายต่ออุปกรณ์จริงที่อาจเกิดจากการทำงานผิดพลาดของระบบควบคุมได้ ดังนั้นการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปจึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญที่ช่วยให้วิศวกรสามารถตรวจสอบ วิเคราะห์ และปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบ

ควบคุมก่อนนำไปใช้งานจริงได้ สำหรับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์และหลักการเชื่อมต่อระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กับโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังหัวข้อที่ 5.2.1 และ 5.2.2 ดังนี้

5.2.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335

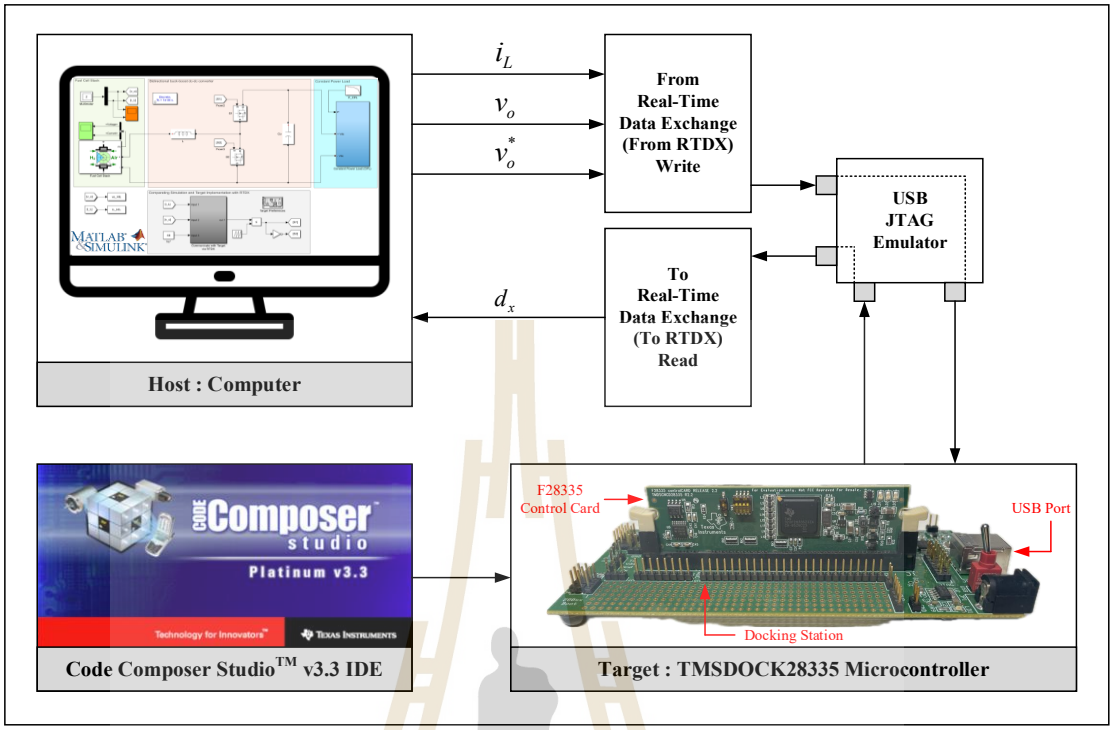
งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335 ของบริษัท Texas Instruments ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ดังกล่าวมีหน่วยประมวลผลกลาง TMS320C28x ตระกูล C2000™ ขนาด 32 บิต ที่มีความเร็วในการประมวลผลสูงสุด 150 MHz รองรับการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (digital) และการจำลองสถานการณ์แบบเวลาจริง (real-time simulation) โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์นี้ถูกใช้สำหรับประมวลผลสร้างสัญญาณตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันดังสมการที่ (3-67) ในบทที่ 3 ซึ่งจะถูกเขียนเป็นชุดคำสั่งภาษาซีด้วยโปรแกรม Code Composer Studio เวอร์ชัน 3.3 (CCStudio v3.3 IDE) และโปรแกรมลงบนบอร์ดดังกล่าวเพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณการควบคุมให้กับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์



รูปที่ 5.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335 ของบริษัท Texas Instruments

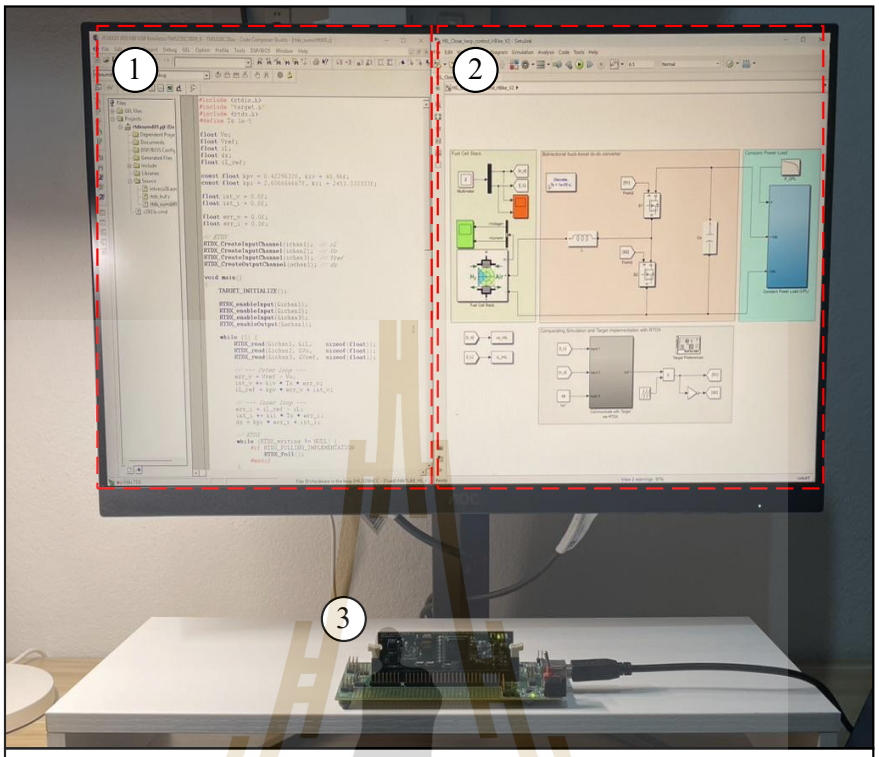
5.2.2 การเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

หลักการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่อาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335 ผ่านโปรแกรม CCStudio v3.3 IDE สามารถแสดงเป็นแผนผังการรับ-ส่งข้อมูลสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แผนผังการรับ-ส่งข้อมูลสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป

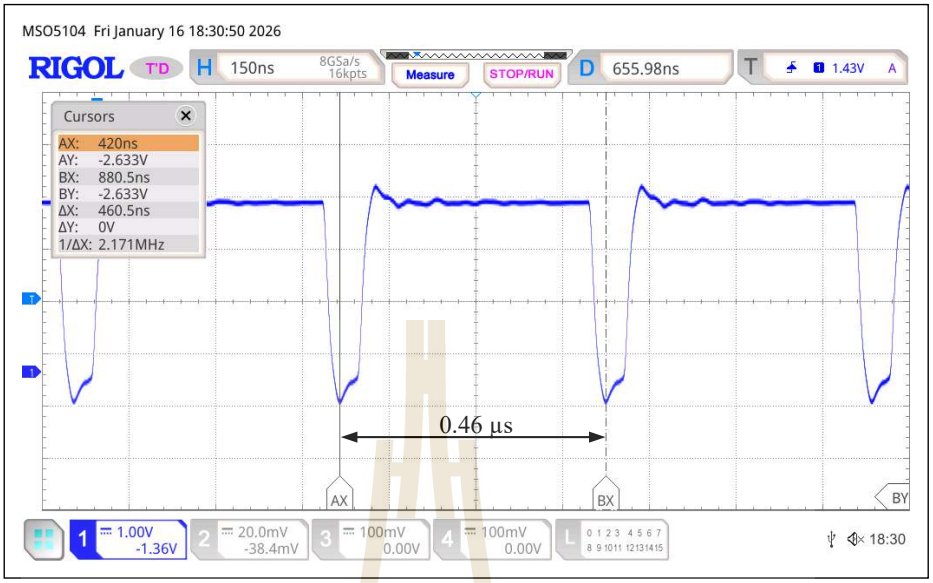
จากรูปที่ 5.2 จะสังเกตได้ว่า ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาจะอยู่บนคอมพิวเตอร์ (Host : Computer) นั่นคือชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยระบบดังกล่าวจะส่งข้อมูลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (v_o) และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (v_o^*) ผ่านช่องทางการสื่อสารแบบเวลาจริง (real-time data exchange : RTDX) ด้วยการเชื่อมต่อผ่าน USB JTAG Emulator ไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335 เพื่อส่งข้อมูลดังกล่าวไปประมวลผลตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน ซึ่งถูกเขียนเป็นชุดคำสั่งภาษาซีบนโปรแกรม CCStudio v3.3 IDE และถูกโปรแกรมลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณการควบคุม (d_x) ของตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันไปยังระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาเพื่อนำสัญญาณดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม ซึ่งทำให้ได้สัญญาณพัลส์ (d^*) สำหรับควบคุมการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณา โดยกระบวนการดังกล่าวจะทำงานแบบวนซ้ำจนครบเวลาที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335 กับโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3



1. Code Composer Studio™ v3.3 IDE 2. SimPowerSystem™ of MATLAB
3. TMDSDOCK28335 Microcontroller

รูปที่ 5.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335 กับโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

การเชื่อมต่ออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ดังแสดงในรูปที่ 5.3 เพื่อรับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335 ที่มีการโปรแกรมคำสั่งภาษาซีของตัวควบคุมจำเป็นต้องกำหนดช่วงระยะเวลาในการชักตัวอย่าง (sampling time) ที่มีผลต่อความละเอียดของผลตอบสนองของระบบ ดังนั้นเพื่อให้การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปมีความถูกต้องและแม่นยำ งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงดำเนินการทดสอบระยะเวลาในการประมวลผลชุดคำสั่งของตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน โดยกำหนดให้ส่งสัญญาณลอจิกสูง (high) ในขณะที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กำลังประมวลผลชุดคำสั่งของตัวควบคุม และส่งสัญญาณลอจิกต่ำ (low) เมื่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลชุดคำสั่งของตัวควบคุมเสร็จเรียบร้อยแล้ว ซึ่งสัญญาณลอจิกดังกล่าวจะถูกส่งผ่านทางพอร์ตเอาต์พุตดิจิทัลของบอร์ด จากนั้นนำออสซิลโลสโคปมาจับสัญญาณที่พอร์ตดังกล่าวเพื่อหาระยะเวลาในการประมวลผลชุดคำสั่งของตัวควบคุมซึ่งผลการทดสอบที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 5.4

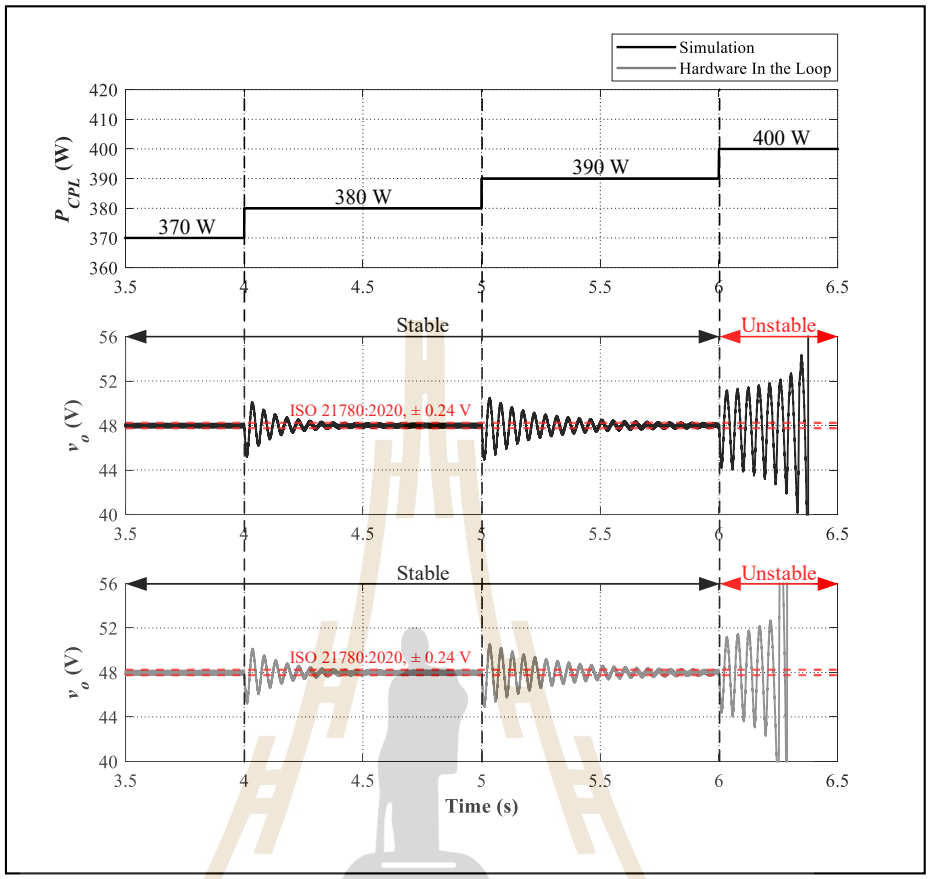


รูปที่ 5.4 ผลการทดสอบระยะเวลาในการประมวลผลชุดคำสั่งของตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน

จากรูปที่ 5.4 สังเกตได้ว่า ระยะเวลาในการประมวลผลชุดคำสั่งของตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันในหนึ่งรอบการทำงานจะใช้เวลาเท่ากับ 0.46 µs นั่นหมายความว่า การกำหนดช่วงเวลาในการชักตัวอย่างสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.46 µs ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกช่วงเวลาในการชักตัวอย่างเท่ากับ 10 µs เนื่องจากเป็นค่าที่เพียงพอต่อการประมวลผลในหนึ่งรอบการทำงานของโปรแกรม สำหรับรายละเอียดของการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

5.3 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป

การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปจะใช้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวของระบบในลักษณะเดียวกันกับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ที่ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 4 ที่ผ่านมา เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องและตรงกันของจุดการขาดเสถียรภาพ ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นดังตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3 และการวิเคราะห์ทางทฤษฎีด้วยค่าเจาะจงเด่นของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเป็นดังรูปที่ 4.3 ในบทที่ 4 โดยผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5

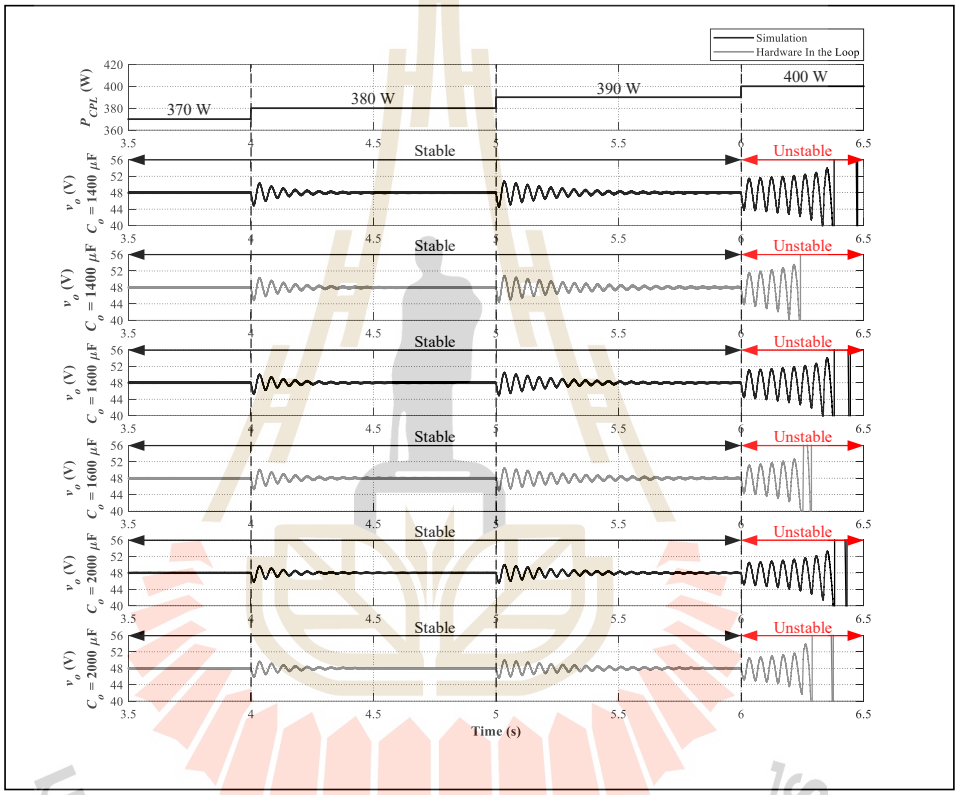


รูปที่ 5.5 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

จากรูปที่ 5.5 จะพบว่า การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปให้ผลที่สอดคล้องและตรงกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK รวมถึงสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีดังรูปที่ 4.3 ในบทที่ 4 โดยระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดมีค่าเท่ากับ 400 W ที่เวลา 6 วินาที ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าที่นำเสนอมีความถูกต้อง และน่าเชื่อถือ ในลำดับถัดไปจะเป็นการยืนยันผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ ค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า และค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า โดยสามารถแสดงรายละเอียดของผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปในแต่ละกรณีได้ดังหัวข้อที่ 5.3.1 ถึงหัวข้อที่ 5.3.6 ดังต่อไปนี้

5.3.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุสามารถพิจารณาได้จากเส้นอเสถียรภาพซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า C_o ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ในบทที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเพื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณี C_o มีการเปลี่ยนแปลงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.6



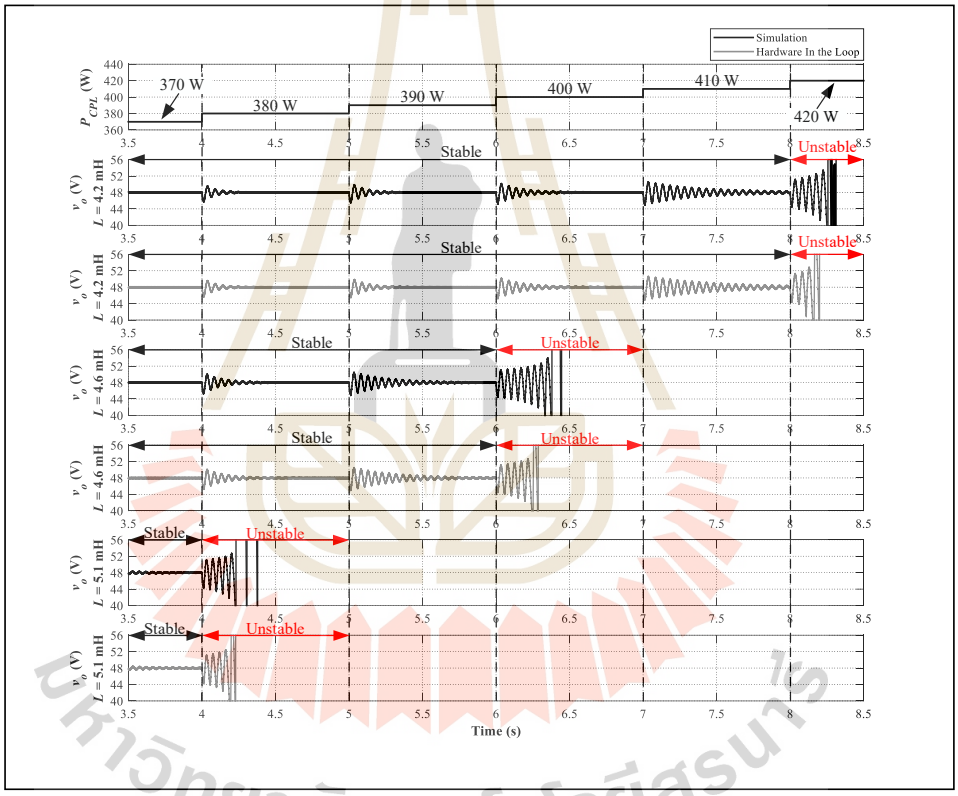
รูปที่ 5.6 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า C_o

จากรูปที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า C_o จะพบว่า ผลที่ได้ทั้งสองกรณีให้ผลที่สอดคล้องและตรงกัน รวมถึงสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.5 ในบทที่ 4 โดยระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพ ณ จุดเดียวกันที่ค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 400 W เมื่อค่า C_o มีค่าเท่ากับ 1400 μF 1600 μF และ 2000 μF ตามลำดับ ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้นำเสนอมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ

นอกจากนี้ยังยืนยันได้อีกว่าการเปลี่ยนแปลง C_o ไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณา

5.3.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำสามารถพิจารณาได้จากเส้นอเสถียรภาพซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า L ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ในบทที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่ L มีการเปลี่ยนแปลงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.7



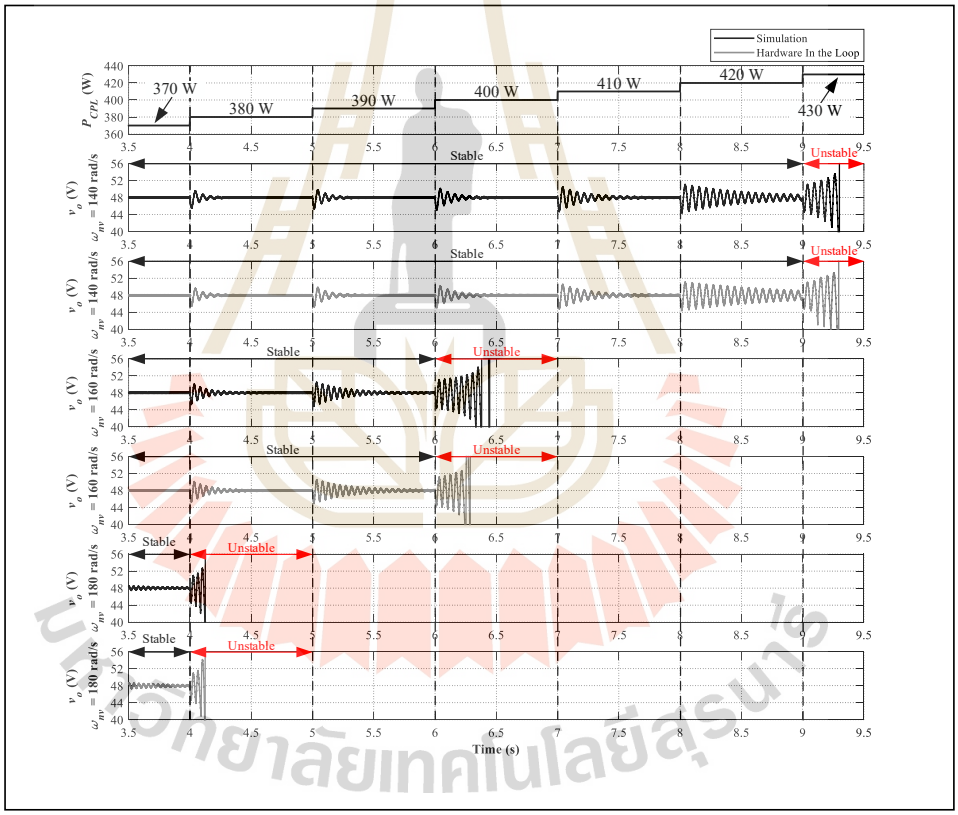
รูปที่ 5.7 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า L

จากรูปที่ 5.7 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า L พบว่า ผลที่ได้ทั้งสองสอดคล้องและตรงกัน รวมถึงสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.7 ในบทที่ 4 โดยระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพ ณ จุดเดียวกันที่ค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 420 W 400 W

และ 380 W เมื่อค่า L มีค่าเท่ากับ 4.2 mH 4.6 mH และ 5.1 mH ตามลำดับ ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้นำเสนอมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ นอกจากนี้ยังยืนยันได้อีกว่าการเพิ่มขึ้นของค่า L จะส่งผลทำให้ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณามีเสถียรภาพลดลง

5.3.3 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากเส้นอเสถียรภาพซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{nv} ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ในบทที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.8



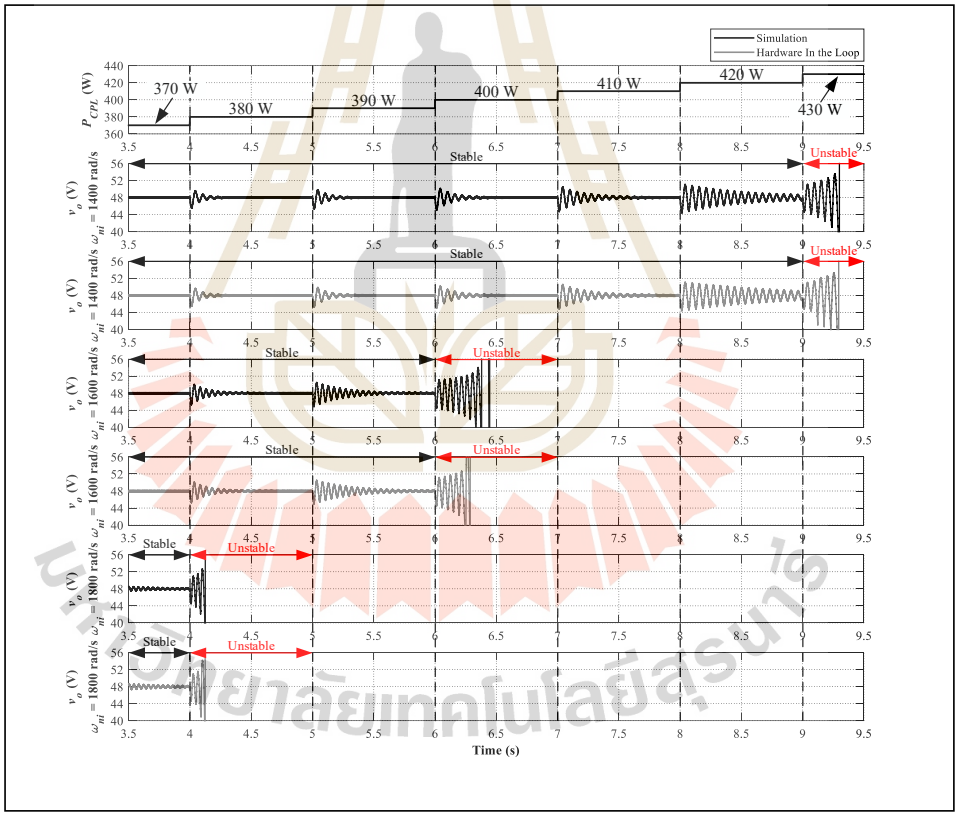
รูปที่ 5.8 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{nv}

จากรูปที่ 5.8 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{nv} พบว่า ผลที่ได้ทั้งสองสอดคล้องและตรงกัน รวมถึงสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.9

ในบทที่ 4 โดยระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพ ณ จุดเดียวกันที่ค่ากำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 430 W 400 W และ 380 W เมื่อค่า ω_{nv} มีค่าเท่ากับ 140 rad/s 160 rad/s และ 180 rad/s ตามลำดับ ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ นอกจากนี้ยังยืนยันได้อีกว่าการเพิ่มค่า ω_{nv} จะส่งผลทำให้ระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณามีเสถียรภาพลดลง

5.3.4 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากเส้นอเสถียรภาพซึ่งได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{ni} ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ในบทที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่ ω_{ni} มีการเปลี่ยนแปลงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.9



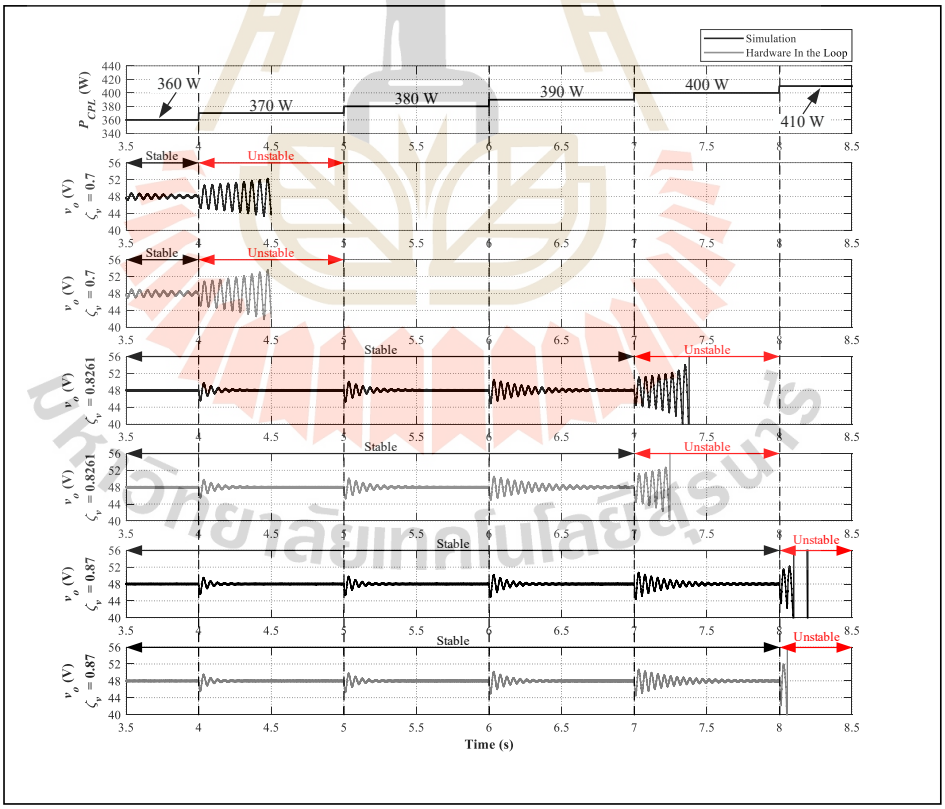
รูปที่ 5.9 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{ni}

จากรูปที่ 5.9 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{ni}

จะพบว่า ผลที่ได้ทั้งสองสอดคล้องและตรงกัน รวมถึงสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.11 ในบทที่ 4 โดยระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพ ณ จุดเดียวกันที่ค่ากำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 430 W 400 W และ 380 W เมื่อค่า ω_{ni} มีค่าเท่ากับ 1400 rad/s 1600 rad/s และ 1800 rad/s ตามลำดับ ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่นำเสนอมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ นอกจากนี้ยังยืนยันได้อีกว่าการเพิ่มขึ้นของค่า ω_{ni} จะส่งผลทำให้ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณามีเสถียรภาพลดลง

5.3.5 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากเส้นอเสถียรภาพซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ζ_v ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ในบทที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.10

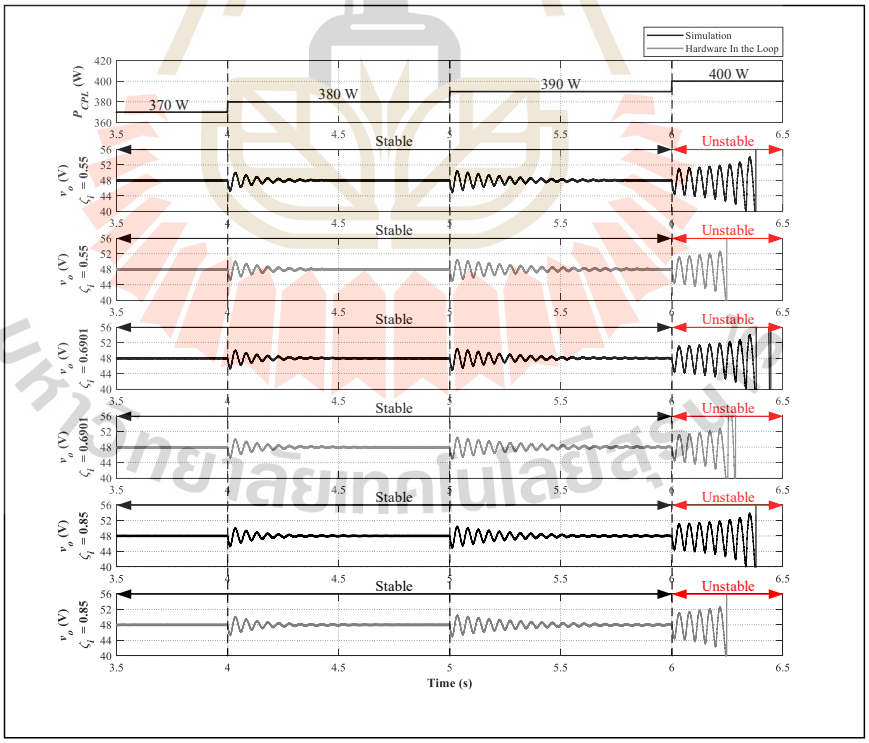


รูปที่ 5.10 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า ζ_v

จากรูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า ζ_v พบว่า ผลที่ได้ทั้งสองสอดคล้องและตรงกัน รวมถึงสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.13 ในบทที่ 4 โดยระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพ ณ จุดเดียวกันที่ค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 370 W 400 W และ 410 W เมื่อค่า ζ_v มีค่าเท่ากับ 0.7 0.8261 และ 0.87 ตามลำดับ ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้นำเสนอมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ นอกจากนี้ยังยืนยันได้อีกว่าการเพิ่มขึ้นของ ζ_v จะส่งผลให้ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณามีเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้น

5.3.6 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากเส้นอเสถียรภาพซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า ζ_i ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ในบทที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า ζ_i

จากรูปที่ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า ζ_i พบว่า ผลที่ได้ทั้งสองที่สอดคล้องและตรงกัน รวมถึงสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.15 ในบทที่ 4 โดยระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพ ณ จุดเดียวกันที่ค่ากำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 400 W เมื่อค่า ζ_i มีค่าเท่ากับ 0.55 0.6901 และ 0.85 ตามลำดับ ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้นำเสนอมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ นอกจากนี้ยังยืนยันได้อีกว่าการเปลี่ยนแปลง ζ_i ไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณา

ดังนั้นจากที่ได้นำเสนอรายละเอียดทั้งหมดจะพบว่า ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้น ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปมีความสอดคล้องและตรงกัน จึงเป็นการยืนยันได้อย่างดีว่าวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีความถูกต้องแม่นยำ น่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ

5.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 นี้เป็นการนำเสนอการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยาน-ไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน รวมถึงการยืนยันผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ส่งผลต่อเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป โดยเนื้อหาในตอนต้นของบทได้กล่าวถึงหลักการของฮาร์ดแวร์ในลูปที่อาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335 กับโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และเนื้อหาในตอนท้ายเป็นการนำเสนอการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งหมด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปให้ผลที่สอดคล้องและตรงกับผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK รวมถึงสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่า วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีความถูกต้อง และน่าเชื่อถือ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ถือเป็นแนวทางที่สำคัญในการออกแบบและพัฒนาระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน รวมถึงสามารถนำไปต่อยอดสำหรับงานวิจัยในอนาคตได้อีกด้วย

บทที่ 6
สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่ได้รับผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยการศึกษาวิจัยในเบื้องต้นได้เริ่มจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางที่ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า ผลของโหลดกำลังคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจากการศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวพบว่า โหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีลักษณะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ติดลบต่อระบบโดยรวม ซึ่งเมื่อนำโหลดดังกล่าวมาเชื่อมต่อกับระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาจะส่งผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวไปลดทอนค่าความหน่วงของระบบลงจนทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาจึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อคาดการณ์จุดการทำงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และหลีกเลี่ยงการทำงาน ณ จุดดังกล่าวได้ โดยงานวิจัยในอดีตถือเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญสำหรับนำมาใช้ต่อยอดและพัฒนางานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ทั้งหมดได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 2

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 นำมาสู่แนวทางการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ได้เริ่มต้นด้วยการนำเสนอระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณา ซึ่งมีองค์ประกอบ คือ แหล่งจ่ายเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง และโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่พิจารณาเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ จากนั้นได้ดำเนินการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของแบบจำลองโดยอาศัยข้อมูลจากเอกสารผู้ผลิต ซึ่งแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ได้จะถูกนำไปรวมกับระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณา เพื่อนำไปใช้พิสูจน์หาแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งจะช่วยอธิบายพฤติกรรมของจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่เสมือนจริงมากยิ่งขึ้น จากนั้นได้ดำเนินการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์พาสซีฟของวงจรดังกล่าว ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเพื่อให้การกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็นไปตามการออกแบบที่อ้างอิงมาตรฐาน ISO 21780:2020 อย่างไรก็ตามอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณาส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งเมื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพจะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้พิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนโดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปภายใต้การประมาณค่าอันดับศูนย์เพื่อกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร และได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้วิเคราะห์พฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบได้ สำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะเริ่มต้นจากการพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบจักรยานไฟฟ้าในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้ไปพัฒนาต่อยอดเป็นแบบจำลองของระบบจักรยานไฟฟ้าในกรณีที่มีตัวควบคุม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาแบบจำลองที่ได้จะพบว่าเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงได้ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งมาทำการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้น โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยรอบจุดปฏิบัติงานของระบบ ซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กหรือแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น จากนั้นดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์พบว่า แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นให้ผลตอบสนองเชิงพลวัตที่สอดคล้องและตรงกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ทั้งในสภาวะชั่วครู่และในสภาวะอยู่ตัว อีกทั้งยังสามารถควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุให้อยู่ในระดับ 48 V ได้อย่างเหมาะสมและเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21780:2020 ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นมีความถูกต้อง แม่นยำ และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ สำหรับรายละเอียดการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 3

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้อาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งสามารถดำเนินการได้โดยนำเมทริกซ์จาโคเบียน $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0,\mathbf{u}_0)$ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาวิเคราะห์หาค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพ

สามารถพิจารณาเฉพาะค่าเจาะจงเด่นของระบบได้ เนื่องจากค่าเจาะจงเด่นดังกล่าวมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบมากที่สุด ซึ่งการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของค่าเจาะจงเด่นจะสามารถบ่งบอกหรือคาดการณ์จุดการทำงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ โดยการขาดเสถียรภาพจะทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้ามีการสั่นไกวที่สูงเพิ่มมากขึ้นและไม่อยู่ภายใต้ขอบเขตของมาตรฐาน ISO 21780:2020 ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ภายในระบบและเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยผลที่ได้แสดงจุดการขาดเสถียรภาพที่สอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสรุปและยืนยันได้ว่าระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และจุดการขาดเสถียรภาพเกิดก่อนค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดของระบบ โดยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้นำเสนอสามารถคาดการณ์จุดการขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ นอกจากนี้ได้มีการนำเสนอการวิเคราะห์และการตรวจสอบความถูกต้องด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เกี่ยวกับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ ซึ่งถือเป็นแนวทางที่สำคัญสำหรับวิศวกรในการออกแบบระบบที่ต้องคำนึงถึงเสถียรภาพด้วย โดยผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลัง (C_o) ไม่ว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ ในขณะที่เมื่อค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันกำลัง (L) ค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า (ω_{nv}) และค่าความถี่ธรรมชาติของลูปกระแสไฟฟ้า (ω_{ni}) มีค่าเพิ่มขึ้น ระบบจะมีแนวโน้มการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวของโหลดมีค่าลดลง ในทางตรงกันข้ามเมื่อค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า (ζ_v) มีค่าเพิ่มขึ้น ระบบจะมีแนวโน้มการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า (ζ_i) จะไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ถือเป็นประโยชน์และมีความสำคัญต่อวิศวกรในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของระบบโดยมีการคำนึงถึงผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบโดยรวมอีกด้วย สำหรับรายละเอียดการวิเคราะห์เสถียรภาพและการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ทั้งหมดได้รับการนำเสนอรายละเอียดไว้ในบทที่ 4

การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน รวมถึงการยืนยันผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ส่งผลต่อเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเป็นการดำเนินการเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยในการยืนยันผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจะอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันและได้เปรียบเทียบกับการจำลอง

สถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผลจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ผลจากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปแสดงถึงจุดการขาดเสถียรภาพที่ตรงกัน ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่า วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงที่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถนำไปต่อยอดพัฒนาใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ สำหรับรายละเอียดของการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป รวมถึงการเชื่อมต่ออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ในลูปได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 5

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

6.2.1 ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะโหมดการขับเคลื่อนเท่านั้นเนื่องจากเป็นโหมดการทำงานโดยส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามการทำงานของระบบจักรยานไฟฟ้ายังมีโหมดการแปลงผันพลังงานสูญเสียขณะห้ามล้อ ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตควรมีการพิจารณาโหมดการทำงานการสูญเสียขณะห้ามล้อเพื่อให้ครอบคลุมการทำงานทั้งหมดของระบบจักรยานไฟฟ้า

6.2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงเป็นเพียงการวิเคราะห์เพื่อคาดการณ์จุดการขาดเสถียรภาพของระบบเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและทำงานต่อได้อย่างมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานภายใต้เงื่อนไขพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตควรมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพหรือการสร้างเสถียรภาพเพื่อทำให้ระบบมีเสถียรภาพได้จนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

กองพัน อารีรักษ์. (2564). *แบบจำลองวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลัง*. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพ บริษัท จรัลสนิทวงศ์ จำกัด

คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน. (2566). *บทความด้านพลังงานเรื่อง ไฮโดรเจน: อนาคตแห่งพลังงานโลก (ตอนที่ 3)*. สืบค้นจาก https://www.erc.or.th/th/energy-articles/2890

นิรุตติ์ นิ่มอ่อน. (2555). *วิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดด* (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

วัฒนา แก้วมณี. (2556). แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM อย่างง่ายสำหรับวิศวกรไฟฟ้า. *วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, *4*(1), 122-129.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2564). *โครงการศึกษาแนวทางการพัฒนาการผลิตและการใช้ไฮโดรเจนเพื่อส่งเสริมพลังงานหมุนเวียน*. สืบค้นจาก https://www.eppo.go.th/index.php/th/conservation/item/21376-hydrogen

อภิชัย สุยะพันธ์. (2558). *การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว* (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

Alipour, M., Zarei, J., Razavi-Far, R., Saif, M., Mijatovic, N., & Dragičević, T. (2022). Observer-based backstepping sliding mode control design for microgrids feeding a constant power load. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 70*(1), 465–473.

Alrajhi, H. (2022). A Generalized State Space Average Model for Parallel DC-to-DC Converters. *Computer Systems Science & Engineering, 41*(2).

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.

Andic, C., Ozturk, A., & Turkay, B. (2022, June). Rotor angle stability analysis by using Lyapunov's direct method of a SMIB power system. In *2022 4th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)* (pp. 296–300). IEEE.

Areerak, K-N., Wu, T., Bozhko, S. V., Asher, G. M., & Thomas, D. W. (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.

Chaicharoenaudomrung, K., Pakdeeto, J., Areerak, K-N., & Areerak, K-L. (2022, November). Mathematical model of DCMGs with PV arrays feeding the parallel constant power loads. In *2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* (pp. 1–4). IEEE.

Chen, M., & Rincón-Mora, G. A. (2008). A Compact Electrical Model for Microscale Fuel Cells Capable of Predicting Runtime and I–V Polarization Performance. *IEEE Transactions on Energy Conversion, 23*(3), 842–850.

Contò, C., & Bianchi, N. (2022). E-bike motor drive: A review of configurations and capabilities. *Energies, 16*(1), 160.

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*.

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.

Gorji, S. A., Sahebi, H. G., Ektesabi, M., & Rad, A. B. (2019). Topologies and control schemes of bidirectional DC–DC power converters: An overview. *IEEE Access, 7*, 117997–118019.

Han, L., Wang, J., & Howe, D. (2007, September). State-space average modelling of 6- and 12-pulse diode rectifiers. In *2007 European Conference on Power Electronics and Applications* (pp. 1–10). IEEE.

Hassan, M. A., Su, C. L., Pou, J., Almakhles, D., Zhan, T. S., & Lo, K. Y. (2023). Robust passivity-based control for interleaved bidirectional DC–DC power converter with constant power loads in DC shipboard microgrid. *IEEE Transactions on Transportation Electrification, 10*(2), 3590–3602.

Horizon Educational. (2024). *H-500 PEM fuel cell – 500 W*. Horizon Educational. Retrieved from https://www.horizoneducational.com/h-500-pem-fuel-cell-500w/p1353.

Hung, N. B., & Lim, O. (2020). A review of history, development, design and research of electric bicycles. *Applied Energy, 260*, 114323.

International Energy Agency. (2024). *World Energy Outlook 2024*. Retrieved from https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024.

International Organization for Standardization. (2020). *ISO 21780: Road vehicles — Supply voltage of 48 V — Electrical requirements and tests*.

Isorna Llerena, F., López González, E., Caparrós Mancera, J. J., Segura Manzano, F., & Andújar, J. M. (2021). Hydrogen vs. battery-based propulsion systems in unipersonal vehicles—Developing solutions to improve the sustainability of urban mobility. *Sustainability, 13*(10), 5721.

Keshavarzi, M. D., & Ali, M. H. (2020). A Novel Bidirectional DC–DC Converter for Dynamic Performance Enhancement of Hybrid AC/DC Microgrid. *Electronics, 9*(10), 1653.

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.

Kheirandish, A., Kazemi, M. S., & Dahari, M. (2014). Dynamic performance assessment of the efficiency of fuel cell-powered bicycle: An experimental approach. *International Journal of Hydrogen Energy, 39*(25), 13276–13284.

Kim, S., & Williamson, S. S. (2012, April). Negative impedance instability compensation in buck converter using state space pole placement control. In *2012 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)* (pp. 1–5). IEEE.

Kumari, A., Sonkar, K., Chaudhari, C., Jindal, T., Katiyar, A., Singh, S., & Sharma, A. (2025). Optimization of air-cooled PEM fuel cell system with battery hybridization and experimental validation on hydrogen powered fuel cell bike. *Renewable Energy, 250*, 123340.

Liu, P., Zeng, X., Xi, J., Feehally, T., He, Y., & Pei, X. (2025). Stability Analysis of Multiple-Source DC Network in Fuel Cell-Powered Electric Aircraft. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 13*(4), 4551–4562.

Lu, X., Sun, K., Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Huang, L., & Wang, J. (2015). Stability enhancement based on virtual impedance for DC microgrids with constant power loads. *IEEE Transactions on Smart Grid, 6*(6), 2770–2783.

Lu, Z., Song, J., Zheng, C., Xu, W., & Wang, X. (2021, December). Generalized state space average-value model of MAB based power electrical transformer. In *2021 5th International Conference on Power and Energy Engineering (ICPEE)* (pp. 46–52). IEEE.

Mahdavi, J., Emaadi, 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.

Mansour, M. Z., Me, S. P., Hadavi, S., Badrzadeh, B., Karimi, A., & Bahrani, B. (2021). Nonlinear transient stability analysis of phased-locked loop-based grid-following voltage-source converters using Lyapunov's direct method. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 10*(3), 2699–2709.

Mellino, S., Petrillo, A., Cigolotti, V., Autorino, C., Jannelli, E., & Ulgiati, S. (2017). A Life Cycle Assessment of lithium battery and hydrogen-FC powered electric bicycles: Searching for cleaner solutions to urban mobility. *International Journal of Hydrogen Energy, 42*(3), 1830–1840.

Mittal, U., Varshney, G., Yadav, S., Pawar, A., Singh, S., & Roy, A. K. (2024, November). Solar-powered bicycle: A Pathway to Sustainable Urban Transportation. In *2024 3rd Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology (ODICON)* (pp. 1–6). IEEE.

Modesti, D. M. (2022). *Design and modeling of a fuel cell hybrid eCargo bike prototype* (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino).

Mokhtari, K., Shokri-Kojori, S., & Aliyari-Shoorehdeli, M. (2024). A new generalized state-space averaged model, control design and stability analysis for three phase grid-connected quasi-Z-source inverters. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 158*, 109932.

Nimitti, F. G., Giacomini, J. C., & Andrade, A. M. S. S. (2022). Dual-stacked bidirectional boost/buck DC–DC converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 70*(9), 8873–8882.

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., Chanpittayagit, R., Areerak, K-N., & Areerak, K-L. (2017). The optimal controller design of buck-boost converter by using adaptive tabu search algorithm based on state-space averaging model. *Journal of Electrical Engineering & Technology, 12*(3), 1146–1155.

Phosung, R., Areerak, K-N., Sopapirm, T., & Areerak, K-L. (2021). 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.

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.

Rahimi, A. M., & Emadi, A. (2008). An analytical investigation of DC/DC power electronic converters with constant power loads in vehicular power systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology, 58*(6), 2689–2702.

Rahimi, A. M., Williamson, G. A., & Emadi, A. (2009). Loop-cancellation technique: A novel nonlinear feedback to overcome the destabilizing effect of constant-power loads. *IEEE Transactions on Vehicular Technology, 59*(2), 650–661.

Riccobono, A., & Santi, E. (2012, September). Comprehensive review of stability criteria for DC distribution systems. In *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 3917–3925). IEEE.

Riccobono, A., & Santi, E. (2014). Comprehensive review of stability criteria for DC power distribution systems. *IEEE Transactions on Industry Applications, 50*(5), 3525–3535.

Sahwal, C. P., Dinh, T. Q., & Sengupta, S. (2022). Controller development of thermal management system for electric bikes. *Energy Reports, 8*, 437–446.

Saleh, I. M., Ali, R., & Zhang, H. (2016). Simplified mathematical model of proton exchange membrane fuel cell based on Horizon fuel cell stack. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 4*(4), 668–679.

Seesamlee, P., Pakdeeto, J., Suyapan, A., & Areerak, K-N. (2026). Optimal Controller Design for Bidirectional DC-DC converter in Battery Electric Vehicle System using the Adaptive Tabu Search Algorithm. *IEEE Access*.

Suyapan, A., Areerak, K-N., Bozhko, S., Yeoh, S. S., & 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.

Tremblay, O., & Dessaint, L. A. (2009, September). A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell vehicles. In *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (pp. 1722–1729). IEEE.

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.

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 and Intelligent Transportation, 1*(2), 100010.

Wu, H., Pickert, V., Ma, M., Ji, B., & Zhang, C. (2020). Stability study and nonlinear analysis of DC–DC power converters with constant power loads at the fast timescale. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 8*(4), 3225–3236.

Xu, H., Wang, L., Liu, Z., Su, H., & Ortega, R. (2025). Online identification of PEMFC polarization curves with nonlinear concentration loss. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 72*(7), 7544–7552.

Zeng, X., Cao, L., Ye, Y., Loo, K. H., & Huang, X. (2026). Stability Characterization of ADRC-Controlled DAB Converters Supplying Constant Power Loads. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics.*

Zhang, Y., Zhang, C., & Cai, X. (2021). Large-signal grid-synchronization stability analysis of PLL-based VSCs using Lyapunov's direct method. *IEEE Transactions on Power Systems, 37*(1), 788–791.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Thongaram, K., Areerak, K-N., and Suyapan, A. (2025). MATHEMATICAL MODEL OF HYDROGEN-POWERED BICYCLE ELECTRIFICATION. *Suranaree Journal of Science and Technology*, *32*(6), 1-8. https://doi.org/10.55766/sujst9783

กฤษดา ทองอร่าม, กองพัน อารีรักษ์, อภิชัย สุยะพันธ์ และ จักรกริช ภักดีโต. (2568). การสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่อาศัยข้อมูลจากผู้ผลิต. *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48 (EECON-48)*. หน้า 861-866. เชียงใหม่.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

MATHEMATICAL MODEL OF HYDROGEN-POWERED BICYCLE ELECTRIFICATION

Kitsada Thongaram[1], Kongpan Areerak[1], and Apichai Suyapan[2*]

Received: May 08, 2025; Revised: July 02, 2025; Accepted: July 02, 2025

Abstract

Mathematical modeling plays an essential role in investigating the behavior, design, and analysis of power systems. This article proposes a time-invariant mathematical model of the power system of a hydrogen-powered electric bicycle. The proposed mathematical model is derived using the generalized state-space averaging method. The proposed model is validated through computer-based simulation using MATLAB/SIMULINK. The system responses obtained using the proposed model agree well with the simulation results under both transient and steady-state conditions. Furthermore, the proposed mathematical model significantly reduces the computation time compared with direct simulation. Thus, the proposed model is both accurate and efficient. The proposed averaging model is also suitable for artificial intelligence applications requiring iterative searching due to its fast computational time.

Keywords: **Bidirectional DC/DC Converter; Cascade PI Controller; Constant Power Load; Electric Bike; Generalized State-Space Averaging Method; Hydrogen Fuel cell; Mathematical Model**

Introduction

The use of fossil fuels has led to numerous environmental issues, particularly global warming, which has become a critical concern worldwide. Consequently, both current and future trends indicate an increasing demand for clean energy. Hydrogen-based electricity is a promising clean energy source because hydrogen provides a higher energy density than other energy sources. In addition, the electricity generation process using hydrogen fuel cells is an electrochemical reaction that delivers high efficiency, produces only water as a byproduct, and emits no carbon dioxide (Bai *et al*., 2022; Sharma and Garg, 2023; Hamedani *et al*., 2024; Putala and Ferencey, 2025). The application of hydrogen energy in vehicle propulsion systems presents a potential solution for reducing dependency on fossil fuels in the transportation sector. Hydrogen-powered electric bicycles represent an early stage in the development of hydrogen- powered electric vehicles. The primary components responsible for power generation, distribution, and control in such systems are the hydrogen fuel cell and the power conversion circuit. The hydrogen fuel cell generates electrical

[1] *School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand. Email: kitsada.thongaram@gmail.com; kongpan@sut.ac.th*
[2] *Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand. Email: apichai.suya@kmutt.ac.th**
* *Corresponding author*

DOI: https://doi.org/10.55766/sujst9783

Suranaree J. Sci. Technol. 32(6):010385(1-8)

energy from hydrogen, and the power converter ensures that the power supplied to the system load is appropriate (Touahria *et al*., 2024; Mtumka and Krishnamurthy, 2025). Therefore, the design, behavioral study, and analysis of this type of power system are essential aspects in advancing hydrogen-powered electric vehicles. However, such studies rely on accurate mathematical models of the system. In practical applications, the power system exhibits time-varying behavior because of the switching operations of the bidirectional DC/DC converter, which introduces considerable complexity to the analysis (Emadi, 2004; Azer and Emadi, 2020; Chaicharoenaudomrung *et al*., 2022). To address this issue, this article proposes a time-invariant mathematical model for the power system of a hydrogen-powered electric bicycle. The proposed model can subsequently be used for system analysis and design purposes. The derivation of the mathematical model employs the generalized state-space averaging (GSSA) method to eliminate the switching effects of the bidirectional DC/DC converter with cascaded proportional-integral (PI) control used in the powertrain system. The hydrogen fuel cell is modeled using a polynomial equation derived by curve fitting, based on manufacturer-provided characteristic data. The drivetrain, which consists of a brushless DC motor and its associated controller, is assumed to behave as an ideal constant power load (CPL) (Emadi *et al*., 2006; Cespedes *et al*., 2011; Hossain *et al*., 2018). The proposed mathematical model is validated by computer-based simulations using the SimPowerSystem® toolbox in MATLAB/SIMULINK. The system responses obtained from the proposed time-invariant model agree well with the simulation results under both transient and steady-state conditions. In addition, the proposed model significantly reduces computation time by up to 99.98% compared with the direct simulation of the MATLAB/SIMULINK exact topology model. In conclusion, the proposed mathematical model provides high accuracy and computational efficiency.

This paper is organized as follows: Section II describes the configuration of the hydrogen-powered electric bicycle under consideration. Section III presents the derivation of the mathematical model. Section IV discusses the model validation through computer simulations.

Finally, Section V concludes the study and suggests directions for future research.

Considered Hydrogen-Powered Bicycle Electrification

The power system of the hydrogen-powered electric bicycle considered in this study is illustrated in Figure 1. The system comprises three primary components. The first component is the hydrogen fuel cell, which is used to generate electrical energy from hydrogen.

In this study, a commercially available 500 W hydrogen fuel cell (model H-500, Horizon Fuel Cell Technologies) is selected as the power source. The second component comprises a bidirectional half-bridge DC/DC converter, which is regulated by a cascaded PI controller. The converter regulates power delivery and maintains a constant output voltage of 48 V, which is essential for the brushless DC motor used in the propulsion system. The drivetrain, which consists of a brushless DC motor, is the third component. In this study, the motor with its speed control is assumed to behave as an ideal CPL (Emadi *et al*., 2006; Cespedes *et al*., 2011; Hossain *et al*., 2018). Typically, an electric bicycle operates in the driving mode. Therefore, the operation of the DC/DC converter is analyzed under this condition. The detailed derivation of the proposed mathematical model for the power system is presented in the following section.

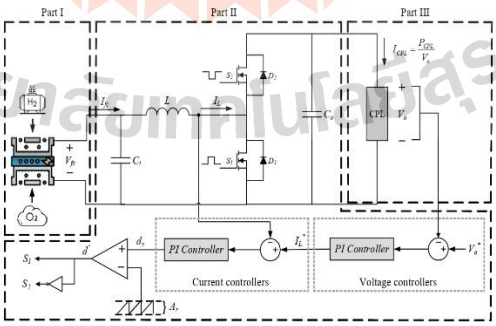


Figure 1. The considered hydrogen-powered bicycle electrification

Mathematical Model Derivation

The derivation of the proposed mathematical model of the power system under consideration is divided into two parts. The first part focuses on the modeling of the hydrogen fuel cell. The output voltage of the fuel cell is not constant and varies depending on the load current; thus, this study uses an appropriate simplified model. The fuel cell behavior is represented by a polynomial equation obtained by curve fitting, which is based on the characteristic data provided by the manufacturer. The second part involves the derivation of the mathematical model for the bidirectional DC/DC converter. The GSSA method eliminates the switching behavior and derives a time-invariant representation of the converter. The detailed modeling procedure for both components is presented in following section.

A. Simplified Hydrogen Fuel Cell Model

Based on the characteristic data of current and voltage for the Horizon Fuel Cell Technologies H-500 model (rated at 500 W) (Horizon Educational, 2024), the following key parameters are obtained:

- Voltage at 0 A and 1 A [E_{oc}, V_1] = [23.5, 21]
- Nomimal operating point [I_{nom} (A), V_{nom} (V)] = [20, 16.2]
- Maximum operating point [I_{end} (A), V_{end} (V)] = [40, 13.4]

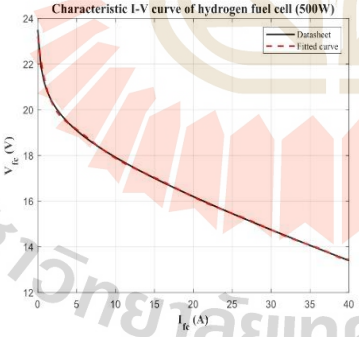


Figure 2. I-V characteristic of the considered hydrogen fuel cell

These data are applied to the Fuel Cell Stack block in SimPowerSystem®, a toolbox of MATLAB/SIMULINK, to construct the current-voltage (I-V) characteristic curve, which is represented by the black line in Figure 2. Subsequently, a polynomial curve fitting method is used to derive an appropriate mathematical representation of the I-V relationship. Consequently, a 10th-order polynomial equation (1) is obtained, where I_{fc} denotes the current of the fuel cell stack. The corresponding fitted curve (the red line in Figure 2) shows strong agreement with the manufacturer-provided characteristic curve. Therefore, (1) is considered the simplified mathematical model of the hydrogen fuel cell used in this study. In addition, the 10th-order polynomial representing the fuel cell stack model is the minimum order required to achieve satisfactory accuracy. This order ensures accurate dynamic responses compared with the exact topological model.

B. Half-Bridge Bidirectional DC/DC Converter Model

The mathematical model of the bidirectional half-bridge DC/DC converter (part II of Figure 1) begins with the analysis of the circuit without the cascaded PI controller. In this modeling process, two state variables are defined: the inductor current (I_L) and the output capacitor voltage (V_o). The converter operates in boost mode because the operation of the converter is limited to the driving mode, as discussed in Section II. Under this condition, the two power switches S_1 and S_2 alternate between conducting (ON) and non-conducting (OFF) states, which can be categorized into two operating modes:

Mode 1: Switch S_1 is conducting (ON), whereas switch S_2 is non-conducting (OFF), as shown in Figure 3.

Mode 2: Switch S_1 is non-conducting (OFF), whereas switch S_2 is conducting (ON), as shown in Figure 4.

The mathematical model for each mode is detailed in the following section. As shown in Figure 3, when switch S_1 is conducting (ON) and switch S_2 is non-conducting (OFF), the hydrogen

$$V_{fc} = 3.10351 \cdot 10^{-12} I_{fc}^{10} - 6.5893 \cdot 10^{-10} I_{fc}^{9} + 6.0226 \cdot 10^{-8} I_{fc}^{8} - 3.09986 \cdot 10^{-6} I_{fc}^{7} + 9.86889 \cdot 10^{-5} I_{fc}^{6} - 20.10212 \cdot 10^{-4} I_{fc}^{5} + 26.20722 \cdot 10^{-3} I_{fc}^{4} - 21.30091 \cdot 10^{-2} I_{fc}^{3} + 10.25093 \cdot 10^{-1} I_{fc}^{2} - 28.95844 \cdot 10^{-1} I_{fc} + 23.19806 \quad (1)$$

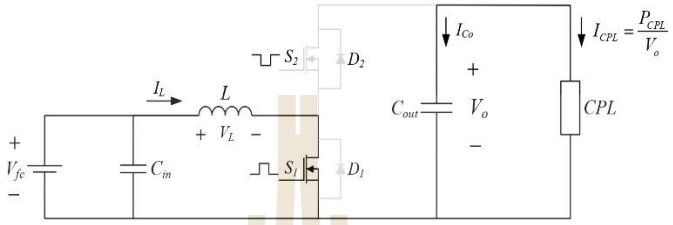


Figure 3. Bidirectional half-bridge DC/DC converter operates in mode 1

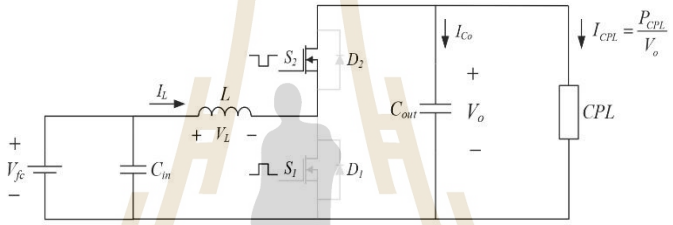


Figure 4. Bidirectional half-bridge DC/DC converter operates in mode 2

fuel cell supplies electrical energy to the inductor L, which stores the energy in the form of a magnetic field. The charge stored in the capacitor C_{out} is discharged to supply energy to the load, which is considered an ideal *CPL*. Accordingly, the circuit analysis of the configuration shown in Figure 3 yields the following differential equations that describe the system behavior in Model 1, as expressed in (2) and (3).

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{fc}}{L} \tag{2}$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{-P_{CPL}}{V_o C_o} \tag{3}$$

As shown in Figure 4, when switch S_1 is non-conducting (OFF) and switch S_2 is conducting (ON), both the hydrogen fuel cell and the energy previously stored in the inductor L supply electrical energy to charge the capacitor C_{out} to deliver power to the *CPL*. Based on the circuit analysis of the configuration shown in Figure 4, the differential equations that describe the system behavior in Mode 2 can be derived and are expressed as (4) and (5).

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{fc} - V_o}{L} \tag{4}$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{i_L}{C_o} - \frac{P_{CPL}}{V_o C_o} \tag{5}$$

The switching function of the bidirectional DC/DC converter is then considered, which describes the relationship expressed in (6) as follows:

$$u(t) = \begin{cases} 1 & ; 0 < t < dT_s \\ 0 & ; dT_s < t < T_s \end{cases} \tag{6}$$

The switched model of the considered DC/DC converter can be obtained by combining the differential equations of both operating modes, utilizing a validation function (h_i) that depends on the operational mode of the circuit. In this case, two functions are involved: h_1 and h_2. For Mode 1, when switch S_1 is conducting and switch S_2 is non-conducting, the values of h_1 and h_2 are 1 and 0, respectively. For Mode 2, when switch S_1 is non-conducting and switch S_2 is conducting, the values of h_1 and h_2 are 0 and 1, respectively. Based on these relationships, the system can be expressed in a pair of linear equations $h_1 = u(t)$ and $h_2 = 1 - u(t)$. Therefore, the switched model of the converter is described by (7).

$$\begin{cases} \dot{i_L} = \frac{1}{L} \cdot V_{fc} - \frac{1}{L}\left(1 - u(t)\right) \cdot v_o \\ \dot{v_o} = \frac{1}{C_o}\left(1 - u(t)\right) \cdot i_L - \frac{P_{CPL}}{v_o C_o} \end{cases} \tag{7}$$

Based on (7), the obtained switched model is time-dependent due to the behavior of the switching devices in the circuit, as indicated by the switching function *u(t)*. Therefore, this study employs the GSSA method to eliminate the effects of the switching action, resulting in a time-invariant model. The GSSA method uses the complex Fourier coefficients of the state variables of the circuit as the state variables for the model. The process is briefly described as follows:

In general, *f(t)*, any periodic signal with a period *T* can be expressed in the form of a complex Fourier series, as expressed in (8).

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

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

The GSSA method uses the Fourier series coefficients $\langle x \rangle_k(t)$ of the signal to represent the state variables of the system. The complex Fourier coefficients in (8) can be obtained using (9) as follows:

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

The following properties of the complex Fourier coefficient $\langle x \rangle_k(t)$ are required for deriving the mathematical model:

Property 1: The property of the time rate of change can be expressed as shown in (10).

$$\frac{d}{dt}\langle x \rangle_k = \left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_k - jk\omega_s \langle x \rangle_k \tag{10}$$

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

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

Property 3: If *f(t)* is the real value, the complex Fourier coefficient with a negative value of k can be expressed as shown in (12).

$$\langle x \rangle_{-k} = \overline{\langle x \rangle_k} = \langle x \rangle_k^* \tag{12}$$

Based on (8) and (9), the value of *k* depends on the accuracy of the model. In theory, if *k* approaches infinity, the model error will approach zero. However, assuming that the filter of the proposed system is well-designed and there are no signal ripples, *k* can be set to 0, a method known as zero-order approximation. If the signal oscillates with the fundamental frequency and ignores harmonics, *k* can be set to -1, 0, or 1, known as a first-order approximation (Emadi, 2004; Ngamkong *et al*., 2012; Azer and Emadi, 2020). In this study, the mathematical model is derived using a zero-order approximation, which is sufficient for system analysis and design. Therefore, based on (8), when considering the zero-order approximation, the state variables of the circuit can be expanded into the terms of the complex Fourier series, as shown in (13).

$$\begin{cases} I_L = \langle I_L \rangle_0 e^{j0\omega_s t} = \langle I_L \rangle_0 \\ V_o = \langle V_o \rangle_0 e^{j0\omega_s t} = \langle V_o \rangle_0 \end{cases} \tag{13}$$

Based on (7), by applying Property 1 of the complex Fourier coefficients and considering the zero-order approximation (k = 0), it can be expressed as shown in (14).

$$\begin{cases} \dot{\langle I_L \rangle}_0 = \frac{1}{L} \cdot V_{fc} - \frac{1}{L} \cdot \langle V_o \rangle_0 + \frac{1}{L} \cdot \langle V_o \rangle_0 \langle u(t) \rangle_0 \\ \dot{\langle V_o \rangle}_0 = \frac{1}{C_o} \cdot \langle I_L \rangle_0 - \frac{1}{C_o} \cdot \langle I_L \rangle_0 \langle u(t) \rangle_0 - \frac{P_{CPL}}{\langle V_o \rangle_0 C_o} \end{cases} \tag{14}$$

Based on (9), the complex Fourier coefficients can be obtained by considering the zero-order approximation (k = 0) of the switching function *u(t)*, as shown in (15).

$$\langle u(t) \rangle_0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{dT_s} 1 e^0 dt = d \tag{15}$$

where *d* is the duty cycle of the bidirectional DC/DC power converter.

Therefore, based on (13) and (15), (14) can be rewritten in terms of the state variables of the model, as shown in (16). Equation (16) represents the time-invariant mathematical model of the bidirectional DC/DC power converter in the case without a cascade PI controller.

$$\begin{cases} \dot{I_L} = \frac{1}{L} \cdot V_{fc} - \frac{(1-d)}{L} \cdot V_o \\ \dot{V_o} = \frac{(1-d)}{C_o} \cdot I_L - \frac{P_{CPL}}{V_o C_o} \end{cases} \tag{16}$$

Consider the controller; the cascade PI controller for the system shown in Figure 5 is analyzed. The controller comprises two control loops. The first loop (the inner loop) regulates the current flowing through the inductor, and the second loop (the outer loop) controls the voltage across the output capacitor. This controller is responsible for managing the power supply and maintaining a stable output voltage of 48 V, which is appropriate for a brushless DC motor in the drive system, serving as the load of the electrical system under consideration. The details of the controller design can be found in (Surakan *et al*., 2025).

As shown in Figure 5, when the value X_v is defined as the state variable of the voltage loop and X_i is defined as the state variable of the current loop, the equation of the control signal can be expressed as shown in (17).

The mathematical model derivation of a bidirectional DC/DC converter circuit with a controller can be performed by substituting d of (16) with d^* from (17) and incorporating the differential equations arising from the control loop into the model. The time-invariant mathematical model of the electrical system shown in Figure 1 can be expressed in (18), where V_{fc} (the voltage generated by the fuel cell) can be calculated from (1).

Model Validation and Discussion

The validation of the mathematical model, as demonstrated through the proposed method, relies on computer simulation using the SimPowerSystem® block set in MATLAB/SIMULINK. The hardware computer specifications are AMD Ryzen 7 6800 H CPU @ 3.20 GHz, 32 GB RAM, and a 64-bit operating system on Windows 11. The power system block set for the hydrogen-powered electric bicycle under consideration is shown in Figure 6. Table 1 lists the parameters of the electrical system under consideration.

The validation of the mathematical model involves comparing the responses obtained from the simulation (the exact topological model) with the responses obtained from the proposed model (GSSA model). The conditions are set such that the constant power load (P_{CPL}) is increased from 400 to 450 W at time t = 2.5 s and from 450 W to 500 W at time t = 3 s.

Figure 7 presents the validation results, where the red dashed line represents the response obtained from the simulation, and the black line represents the response obtained from the mathematical model. The responses of the current flowing through the inductor (I_L) and the voltage across the output capacitor (V_o) are consistent both under transient and steady-state conditions. When the simulation time and the calculation time of the mathematical model are compared, the simulation took 118.916 s, whereas the mathematical model took 0.020 s, representing a 99.98% time saving, as indicated by (19). This demonstrates that using the mathematical model significantly reduces the computation time for determining the response of the system compared to the simulation. The proposed mathematical model, developed using the GSSA method, exhibits high accuracy. In addition, its computational efficiency makes it suitable for artificial intelligence applications requiring iterative searching. The proposed averaging model can also be used for future stability analysis due to the *CPL* effects.

$$\%\ t_{saving} = \frac{t_{fs} - t_{av}}{t_{fs}} \times 100\% \tag{19}$$

where t_{fs} and t_{av} are the time spent on simulation and the time spent on computation using mathematical models, respectively.

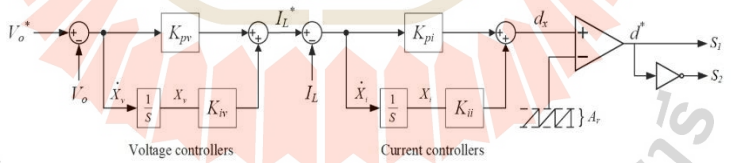


Figure 5. The structure of the cascade PI controller for the considered system

$$d^* = \frac{1}{A_r}\left[K_{pi}K_{pv}V_o^* - K_{pi}K_{pv}V_o + K_{pi}K_{iv}X_v - K_{pi}I_L + K_{ii}X_i\right] \tag{17}$$

$$\begin{cases} \dot{I}_L = \frac{1}{L}V_{fc} - \frac{1}{L}V_o + \frac{K_{pv}K_{pi}}{A_rL}V_o^*V_o - \frac{K_{pv}K_{pi}}{A_rL}V_o^2 + \frac{K_{pi}K_{iv}}{A_rL}V_oX_v - \frac{K_{pi}}{A_rL}I_LV_o + \frac{K_{ii}}{A_rL}V_oX_i \\ \dot{V}_o = \frac{1}{C_o}I_L - \frac{K_{pv}K_{pi}}{A_rC_o}V_o^*I_L + \frac{K_{pv}K_{pi}}{A_rC_o}V_oI_L - \frac{K_{pi}K_{iv}}{A_rC_o}I_LX_v + \frac{K_{pi}}{A_rC_o}I_L^2 - \frac{K_{ii}}{A_rC_o}I_LX_i - \frac{P_{CPL}}{V_oC_o} \\ \dot{X}_i = K_{pv}V_o^* + K_{iv}X_v - K_{pv}V_o - I_L \\ \dot{X}_v = V_o^* - V_o \end{cases} \tag{18}$$

Table 1. The parameters of the system

Parameter	Values	Descriptions
V_{fc}	14.4 V	Fuel cell stack voltage of the rated power 500 W
V_o^r	48 V	Output voltage
L (ΔI_L = 0.69 A)	0.7258 mH	The inductance of the bidirectional half-bridge DC/DC converter
C_i (ΔV_i = 2.48 V)	1.5 μF	The input capacitance of the bidirectional half-bridge DC/DC converter
C_o (ΔV_o = 0.24 V)	1519.097 μF	The output capacitance of the bidirectional half-bridge DC/DC converter
A_r	10	Amplitude of the carrier signal (sawtooth) for PWM
K_{pv}	0.373697911	Proportional gain of the voltage loop
K_{pi}	1.239908333	Proportional gain of the current loop
K_{iv}	34.179687	Integral gain of the voltage loop
K_{ii}	1134.0625	Integral gain of the current loop

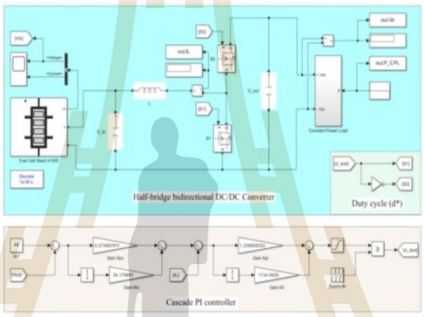


Figure 6. The SimPowerSystem® block for the considered hydroge-powered electric bicycle

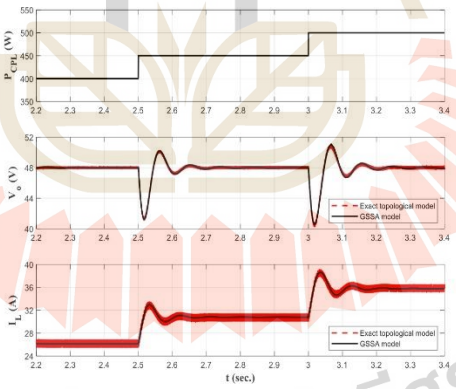


Figure 7. The responses of I_L and V_o when the P_{CPL} is changed

Conclusions

This study presents the derivation of a time-invariant mathematical model of the power system of a hydrogen-powered electric bicycle. The model of the hydrogen fuel cell was derived by polynomial equation fitting using characteristic data provided by the manufacturer. The model of the bidirectional DC/DC converter circuit was derived using the GSSA method. The results of the validation of the model, which involves comparing the responses calculated from the derived model with those obtained from a computer simulation using MATLAB/SIMULINK, demonstrate that the proposed model yields system responses consistent with the simulation results under both transient and steady-state conditions. In addition, the use of the mathematical model significantly reduces the

computation time compared to the simulation. Therefore, the derived model is accurate and suitable for use in related studies. In future studies, the proposed mathematical model will be used to analyze the stability and predict instability points of the system. This is important because it contributes to the research of modern electric vehicle systems, specifically in terms of stability, an area that has not been extensively studied or published.

Acknowledgement

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

References

Azer, P., and 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. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2987277

Bai, H., Chen, H., and Shi, W. (2022). Hydrogen production by renewable energy and future trend in China. In 2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2) (pp. 676-680). IEEE. https://doi.org/10.1109/EI256261.2022.10116157

Cespedes, M., Xing, L., and Sun, J. (2011). Constant-power load system stabilization by passive damping. IEEE Transactions on Power Electronics, 26(7):1832-1836. https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2151880

Chaicharoenaudomrung, K., Pakdeeto, J., Areerak, K., and Areerak, K. (2022). Mathematical model of DCMGs with PV arrays feeding the parallel constant power loads. In 2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (pp. 1-4). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICEMS56177.2022.9983107

Emadi, A. (2004). Modeling and analysis of multiconverter DC power electronic systems using the generalized state-space averaging method. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 51(3):661-668. https://doi.org/10.1109/TIE.2004.825339

Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C.H., and Williamson, G.A. (2006). Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: Definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 55(4):1112-1125. https://doi.org/10.1109/TVT.2006.877483

Hamedani, E.A., Alenabi, S.A., and Talebi, S. (2024). Hydrogen as an energy source: A review of production technologies and challenges of fuel cell vehicles. Energy Reports, 12:3778-3794. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.09.030

Horizon Educational. (2024, January). H-500 PEM fuel cell - 500 W. Horizon Educational. Retrieved April 5, 2025, from https://www.horizoneducational.com/h-500-pemfuel-cell-500w/p1353

Hossain, E., Perez, R., Nasiri, A., and Padmanaban, S. (2018). A comprehensive review on constant power loads compensation techniques. IEEE Access, 6:33285-33305. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2849065

Mtumka, O., and Krishnamurthy, S. (2025). Modeling and simulating more efficient and reliable fuel cell vehicles through enhancing the integration of the 6 kW PEM fuel cell stack with DC/DC boost converter and BLDC motor. In 2025 33rd Southern African Universities Power Engineering Conference (SAUPEC) (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/SAUPEC65723.2025.10944329

Ngamkong, P., Kochcha, P., Areerak, K., Sujitjorn, S., and Areerak, K. (2012). Applications of the generalized state-space averaging method to modelling of DC-DC power converters. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, 18(3):243-260. https://doi.org/10.1080/13873954.2011.635377

Putala, R., and Ferencey, V. (2025). Hydrogen fuel cell system modeling approaches. In Proceedings of the 2025 Cybernetics & Informatics (K&I) (pp. 1-7). IEEE. https://doi.org/10.1109/KI64036.2025.10916424

Sharma, A., and Garg, R. (2023). New technology for harnessing energy: Future of hydrogen. In 2023 International Conference on Recent Trends in Electronics and Communication (ICRTEC) (pp. 1-7). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICRTEC56977.2023.10111878

Surakan, W., Niyomthai, M., Suyapan, A., Narongrit, T., and Areerak, K. (2025). The cascade PI controller design for hydrogen electric bike systems. In 2025 13th International Electrical Engineering Congress (iEECON) (pp. 1-4). IEEE. https://doi.org/10.1109/iEECON64081.2025.10987674

Touahria, D., Bouchemha, A., and Kahla, S. (2024). PEM fuel cell powered BLDC motor control for electric vehicle. In 2024 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control (ICEEAC) (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICEEAC61226.2024.10576224

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48
The 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)
วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2568 ณ โรงแรมฟูราม่า จังหวัดเชียงใหม่

การสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่อาศัยข้อมูลจากผู้ผลิต

Modeling of Hydrogen Fuel Cell Stack Based on Manufacturer Information

กฤษดา ทองอร่าม[1] กองพัน อารีรักษ์[1] อภิชัย สุยะพันธ์[2*] และ จักรกริช ภักดีโต[3]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
[2]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
[3]ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
*Corresponding author : apichai.suya@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตและการใช้พลังงานไฟฟ้าจากไฮโดรเจนจำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอการสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงโดยอาศัยข้อมูลจำเพาะจากบริษัทผู้ผลิตสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในสมการกึ่งประจักษ์ของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ด้วยการเปรียบเทียบเส้นโค้งโพลาไรเซชันและผลการตอบสนองของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนให้ผลที่สอดคล้องและตรงกับชุดบล็อกสำเร็จรูปใน SimPowerSystem™ ดังนั้นแบบจำลองที่ได้จึงมีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้สำหรับการศึกษาวิจัยต่อในอนาคต

คำสำคัญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน, เส้นโค้งโพลาไรเซชัน, จักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน

Abstract

The study regarding the production and utilization of electrical energy from hydrogen requires a mathematical model of hydrogen fuel cells. Therefore, this article presents the derivation of a fuel cell model based on the specifications provided by manufacturers, which are used to estimate the key parameters in the semi-empirical equations of the fuel cell. The accuracy of the proposed model is validated by comparing the polarization curves and the dynamic response of a hydrogen-powered electric bicycle system through intensive time-domain simulation using MATLAB/SIMULINK. The results demonstrate that the proposed model can provide the consistent and accurate results compared with the built-in blocks in SimPowerSystem™. Therefore, the model is precise and can be effectively applied in future research.

Keywords: Mathematical Model, Hydrogen Fuel Cell, Polarization Curve, Hydrogen-Powered Electric Bicycle

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและภาวะโลกร้อนเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่หลายประเทศทั่วโลกกำลังเผชิญ สาเหตุหลักของปัญหาดังกล่าวมาจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศ โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความต้องการนำพลังงานสะอาดมาใช้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในปัจจุบันและอนาคต หนึ่งในพลังงานสะอาดที่ได้รับความสนใจได้แก่ การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากไฮโดรเจน เนื่องจากพลังงานไฮโดรเจนมีความหนาแน่นสูงเมื่อเทียบกับพลังงานชนิดอื่น ๆ โดยการผลิตพลังงานไฟฟ้าดังกล่าวจะอาศัยเซลล์เชื้อเพลิงทำหน้าที่แปลงพลังงานจากไฮโดรเจนและสารออกซิไดซ์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงโดยมีเพียงน้ำและความร้อนเป็นผลพลอยได้และไม่มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศ [1-2] เมื่อพิจารณาไปที่ ภาคส่วนคมนาคมและการขนส่ง การนำพลังงานไฮโดรเจนมาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบขับเคลื่อนจึงเป็นแนวทางที่สำคัญในการช่วยลดการพึ่งพาพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล พลังงานไฮโดรเจนได้ถูกนำมาใช้ในยานพาหนะหลากหลายประเภท เช่น รถบรรทุก เครื่องบิน เรือ และจักรยานไฟฟ้า เป็นต้น [3] ดังนั้นการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการผลิตและการใช้พลังงานไฟฟ้าจากไฮโดรเจนจึงเป็นส่วนที่สำคัญในการพัฒนาระบบขับเคลื่อนที่ใช้พลังงานไฮโดรเจน ซึ่งโดยทั่วไปการศึกษาวิจัยดังกล่าวจำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองของระบบ ด้วยเหตุนี้บทความจึงมุ่งเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน ซึ่งจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนสามารถจำแนกได้ 3 ประเภท ได้แก่ แบบจำลองกึ่งประจักษ์ (semi-empirical model) แบบจำลองเชิงวิเคราะห์ (analytical model) และแบบจำลองเชิงกลไก (mechanistic model) [4-5] อย่างไรก็ตาม บทความนี้จะนำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบกึ่งประจักษ์ เนื่องจากเป็นแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน (simplified hydrogen fuel cell model) ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองได้ด้วยการนำข้อมูลจำเพาะจากผู้ผลิตมาใช้ร่วมกับสมการกึ่งประจักษ์ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน โดยไม่จำเป็นต้องดำเนินการทดสอบจริง [6] อีกทั้งยังมีจุดเด่นในเรื่องของโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลจากผู้ผลิต ในขณะที่การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ: apichai.suya@kmutt.ac.th

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48
The 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)
วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2568 ณ โรงแรมฟูราม่า จังหวัดเชียงใหม่

จะอาศัยการเปรียบเทียบเส้นโค้งโพลาไรเซชันและผลการตอบสนองของระบบจักรยานไฟฟ้าจากการใช้แบบจำลองที่ได้กับชุดบล็อกสำเร็จรูปในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนมีความถูกต้อง ดังนั้นแบบจำลองที่ได้จะถูกนำไปต่อยอดในการประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน เพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุมและวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบต่อไปในอนาคต

บทความนี้ประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 บทนำ กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา ส่วนที่ 2 เป็นการอธิบายการหาแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน ส่วนที่ 3 นำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK พร้อมทั้งการอภิปรายผล และส่วนที่ 4 เป็นสรุปเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการต่อยอดงานวิจัยในอนาคต

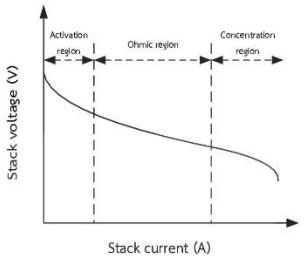
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนในบทความนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกเป็นการนำเสนอแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่มีการพิจารณาถึงพฤติกรรมที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าไม่คงที่ ซึ่งการผลิตพลังงานไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าของโหลดและการสูญเสียที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง [7] และส่วนที่ 2 เป็นการประมาณค่าพารามิเตอร์จำเพาะที่อาศัยข้อมูลจากผู้ผลิต โดยบทความนี้เลือกใช้เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนรุ่น H-500 จากบริษัท Horizon Fuel cell Technologies [8] มีพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ 500 W ซึ่งการหาแบบจำลองแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

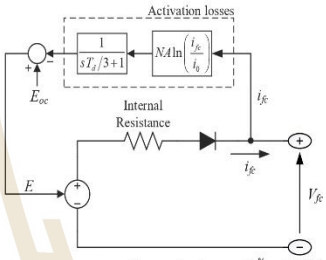
2.1 แบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

พฤติกรรมการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนสามารถอธิบายได้ด้วยเส้นโค้งโพลาไรเซชันทั่วไป (typical polarization) แสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวจะมีการสูญเสียอยู่ 3 ย่าน ได้แก่ การสูญเสียในย่านกระตุ้น (activation region) การสูญเสียในย่านความต้านทานภายใน (ohmic region) และการสูญเสียในย่านความเข้มข้น (concentration region) [9-10] ซึ่งส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนมีค่าไม่คงที่ แต่อย่างไรก็ตามเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการใช้งานจริงจะถูกออกแบบและควบคุมเพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียในย่านความเข้มข้น เนื่องจากการทำงานที่กระแสไฟฟ้าสูงเกินขีดจำกัดจะส่งผลให้อุปกรณ์เกิดความเสียหาย [5] ดังนั้นบทความนี้จะไม่พิจารณาการสูญเสียในย่านดังกล่าว

แบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนสามารถแสดงเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งวงจรดังกล่าวประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเซลล์เชื้อเพลิง (E_{oc}) การสูญเสียในย่านกระตุ้นที่ถูกแทนด้วยชุดบล็อกในกรอบเส้นประสีดำ และการสูญเสียที่เกิดจากความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งถูกแทนด้วยค่าความต้านทานภายใน (internal resistance) โดยสมการแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)



รูปที่ 1 เส้นโค้งโพลาไรเซชันทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของแบบจำลองอย่างง่ายเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

$$V_{fc} = E_{oc} - V_{act} - V_{ohmic} \quad (1)$$

โดยที่

V_{fc} คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของเซลล์เชื้อเพลิง (V)
E_{oc} คือ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเซลล์เชื้อเพลิง (V)
V_{act} คือ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการสูญเสียในย่านกระตุ้น (V)
V_{ohmic} คือ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการสูญเสียจากความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิง (V)

จากรูปที่ 2 จะสังเกตได้ว่า ผลตอบสนองเชิงพลวัต (dynamic response) หรือผลตอบสนองในสภาวะชั่วครู่ (transient response) จากการสูญเสียในย่านกระตุ้นจะถูกจำลองด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 1 ดังพจน์ $\frac{1}{sT_d/3+1}$ เพื่อใช้ในการหน่วงเวลาขณะเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า [6] โดยที่ T_d คือระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุล (settling time) แต่อย่างไรก็ตามเพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองบทความนี้จะพิจารณาเฉพาะผลการตอบสนองในสภาวะอยู่ตัว (steady-state response) จากการสูญเสียในย่านกระตุ้นเท่านั้น ดังนั้นพจน์ดังกล่าวจะไม่ถูกนำมาพิจารณา ซึ่งแรงดันไฟฟ้าจากการสูญเสียในย่านกระตุ้นในสภาวะอยู่ตัวแสดงดังสมการที่ (2) และแรงดันไฟฟ้าจากการสูญเสียจากความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนแสดงดังสมการที่ (3)

$$V_{act} = NA\ln\left(\frac{i_{fc}}{i_0}\right) \quad (2)$$

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48
The 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)
วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2568 ณ โรงแรมฟูราม่า จังหวัดเชียงใหม่

$$V_{ohmic} = R_{ohm} \cdot i_{fc} \quad (3)$$

โดยที่

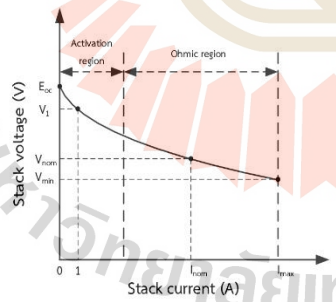
- N คือ จำนวนเซลล์ของเซลล์เชื้อเพลิง
- A คือ ค่าความชันของทาเฟล (V)
- i_{fc} คือ กระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง (A)
- i_0 คือ กระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิง (A)
- R_{ohm} คือ ความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิง (Ω)

ดังนั้นเมื่อแทนสมการที่ (2) และสมการที่ (3) ลงในสมการที่ (1) จะได้สมการแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนในสภาวะอยู่ตัวแสดงได้ดังสมการที่ (4) ดังนี้

$$V_{fc} = E_{oc} - NA\ln\left(\frac{i_{fc}}{i_0}\right) - R_{ohm} \cdot i_{fc} \quad (4)$$

2.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์จำเพาะที่อาศัยข้อมูลจากผู้ผลิต

จากแบบจำลองที่ได้ดังสมการที่ (4) จะพบว่ามีพารามิเตอร์ E_{oc}, NA, R_{ohm} และ i_0 ที่จำเป็นต้องทราบหรือดำเนินการประมาณค่า ซึ่งค่าพารามิเตอร์จำเพาะของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนสามารถประมาณได้จากเส้นโค้งโพลาไรเซชันโดยอาศัยข้อมูลจากผู้ผลิตดังแสดงได้ในรูปที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยจุดการทำงานทั้งหมด 4 จุด ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร แรงดันไฟฟ้าที่กระแสไฟฟ้า 1 A (V_1) แรงดันไฟฟ้าที่จุดทำงานปกติ (V_{nom}) และแรงดันไฟฟ้าที่จุดทำงานกระแสไฟฟ้าสูงสุด (V_{min}) โดยค่าพารามิเตอร์จำเพาะที่ได้ในแต่ละจุดทำงานมีทั้งหมด 6 ค่า ได้แก่ E_{oc}, V_1, V_{nom}, I_{nom}, V_{min} และ I_{max}



รูปที่ 3 การประมาณค่าพารามิเตอร์จำเพาะจากเส้นโค้งโพลาไรเซชัน [6]

เมื่อพิจารณาแบบจำลองในสมการที่ (4) ร่วมกับจุดการทำงานทั้ง 4 จุดจะสามารถคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้จุดการทำงานต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ (5) ถึงสมการที่ (7)

$$V_1 = E_{oc} - NA\ln(i_0) - R_{ohm} \quad (5)$$

$$V_{nom} = E_{oc} - NA\ln\left(\frac{I_{nom}}{i_0}\right) - R_{ohm} \cdot I_{nom} \quad (6)$$

$$V_{min} = E_{oc} - NA\ln\left(\frac{I_{max}}{i_0}\right) - R_{ohm} \cdot I_{max} \quad (7)$$

โดยที่

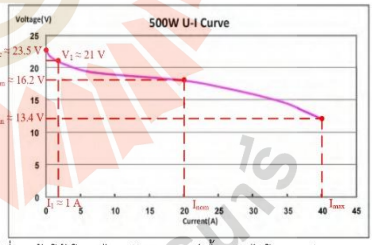
- V_{nom} คือ แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ณ จุดทำงานปกติ
- I_{nom} คือ กระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ณ จุดทำงานปกติ
- V_{min} คือ แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ณ จุดทำงานที่ค่ากระแสสูงสุด
- I_{max} คือ กระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ณ จุดทำงานสูงสุด
- V_1 คือ แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ที่กระแส 1 A

ดังนั้นจากสมการที่ (5) ถึงสมการที่ (7) สามารถจัดรูปใหม่เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน ซึ่งได้แก่ NA, R_{ohm} และ i_0 แสดงได้ดังสมการที่ (8) ถึงสมการที่ (10) โดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์จำเพาะของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ได้จากการประมาณค่าบนเส้นโค้งโพลาไรเซชันซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้มาจากบริษัทผู้ผลิต

$$NA = \frac{(V_1 - V_{nom})(I_{max} - 1) - (V_1 - V_{min})(I_{nom} - 1)}{\ln(I_{nom})(I_{max} - 1) - \ln(I_{max})(I_{nom} - 1)} \quad (8)$$

$$R_{ohm} = \frac{V_1 - V_{nom} - NA\ln(I_{nom})}{I_{nom} - 1} \quad (9)$$

$$i_0 = exp\left(\frac{V_1 - E_{oc} + R_{ohm}}{NA}\right) \quad (10)$$



รูปที่ 4 เส้นโค้งโพลาไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนรุ่น H-500

เมื่อพิจารณาเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนรุ่น H-500 จากบริษัท Horizon Fuel cell Technologies ซึ่งมีเส้นโค้งโพลาไรเซชันแสดงดังรูปที่ 4 จะสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์จำเพาะของเซลล์เชื้อเพลิงได้ดังต่อไปนี้

- [E_{oc} (V), V_1 (V)] = [23.5, 21]
- [I_{nom} (A), V_{nom} (V)] = [20, 16.2]
- [I_{max} (A), V_{min} (V)] = [40, 13.4]

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48
The 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)
วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2568 ณ โรงแรมฟูราม่า จังหวัดเชียงใหม่

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์จำเพาะที่ได้ดังข้างต้นแทนลงในสมการที่ (8) ถึงสมการที่ (10) จะสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ NA, R_{ohm} และ i_0 ในแบบจำลองได้ จากนั้นเมื่อนำค่าดังกล่าวแทนลงในสมการที่ (4) จะได้แบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่พิจารณาแสดงได้ดังสมการที่ (11) โดยแบบจำลองดังกล่าวจะได้รับการตรวจสอบความถูกต้องดังที่จะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

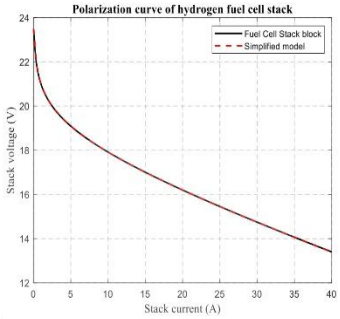
$$V_{fc} = 23.5 - 0.9156 \ln\left(\frac{i_{fc}}{0.0734}\right) - 0.1083 \cdot i_{fc} \qquad (11)$$

3. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนในบทความนี้แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 การเปรียบเทียบเส้นโค้งโพลาไรเซชันที่ได้จากแบบจำลองกับชุดบล็อกสำเร็จรูปของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนใน SimPowerSystem™ และกรณีที่ 2 การเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบโดยรวมเมื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองร่วมกับระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

3.1 การตรวจสอบเส้นโค้งโพลาไรเซชัน

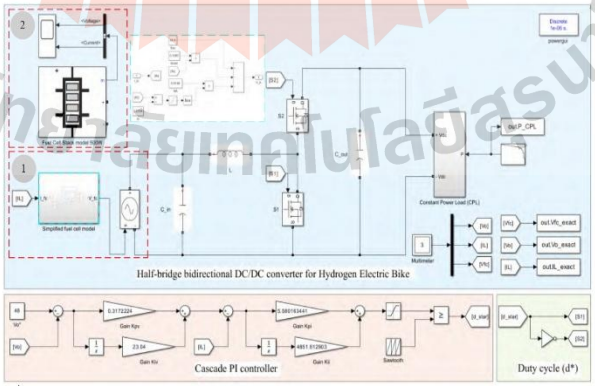
แบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ได้ดังสมการที่ (11) ถูกนำมาใช้ในการสร้างเส้นโค้งโพลาไรเซชันและเปรียบเทียบกับเส้นโค้งที่ได้จากชุดบล็อกสำเร็จรูปใน SimPowerSystem™ โดยค่าพารามิเตอร์จำเพาะจะถูกกำหนดลงในชุดบล็อกดังกล่าว ผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งจากรูปจะสังเกตได้ว่า เส้นโค้งโพลาไรเซชันที่ได้จากแบบจำลองให้ผลที่สอดคล้องและตรงกับชุดบล็อกสำเร็จรูปจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่ได้มีความถูกต้องและสามารถใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนในสภาวะอยู่ตัวได้



รูปที่ 5 เส้นโค้งโพลาไรเซชันของแบบจำลองอย่างง่ายเปรียบเทียบกับชุดบล็อกสำเร็จรูปใน SimPowerSystem™

3.2 การประยุกต์ใช้แบบจำลองอย่างง่ายร่วมกับระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน

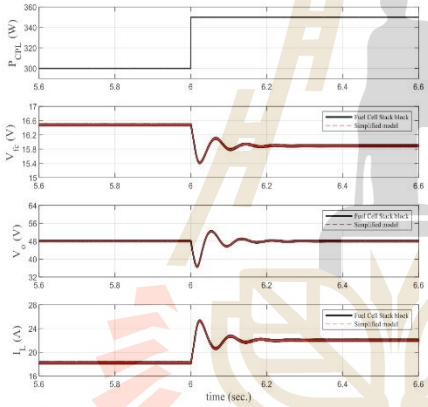
ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนแสดงได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับระบบ ส่วนที่ 2 วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางที่มีตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน ทำหน้าที่ควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้คงที่ และส่วนที่ 3 โหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกแทนด้วยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว [12] ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของระบบแสดงได้ดังตารางที่ 1 สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องในกรณีที่ 2 นี้แบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะถูกนำมาสร้างเป็นชุดบล็อกเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับระบบ (กรอบสีแดงหมายเลข 1) และจะถูกเปรียบเทียบกับผลการตอบสนองเมื่อใช้ชุดบล็อกสำเร็จรูปของเซลล์เชื้อเพลิงใน SimPowerSystem™ (กรอบสีแดงหมายเลข 2) โดยการจำลองสถานการณ์ของระบบจักรยานไฟฟ้าจะดำเนินการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 300 W เป็น 350 W ที่เวลา t = 6 วินาที ซึ่งการเปรียบเทียบผลการตอบสนองแสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_o	48 V	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต
L ($\Delta I_L \leq 0.11A$)	4.7 mH	ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผัน
C_o($\Delta V_o \leq 0.24V$)	1600 µF	ค่าความจุไฟฟ้าทางฝั่งเอาต์พุตของวงจรแปลงผัน
C_i ($\Delta V_i \leq 2.48V$)	1.5 µF	ค่าความจุไฟฟ้าทางฝั่งอินพุตของวงจรแปลงผัน
A_r	10	ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยม
K_{pv}	0.3172	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีสำหรับลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า [11]
K_{iv}	23.04	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมไอสำหรับลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า [11]
K_{pi}	5.5802	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีสำหรับลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า [11]
K_{ii}	4851.61	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมไอสำหรับลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า [11]



รูปที่ 7 ผลการตอบสนองของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน

จากรูปที่ 7 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ได้ดังสมการที่ (11) มีความสอดคล้องกับชุดบล็อกสำเร็จรูปทั้งในช่วงสภาวะชั่วครู่และในสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้สำหรับการศึกษาวิจัยต่อได้ในอนาคต

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน โดยอาศัยข้อมูลจำเพาะจากบริษัทผู้ผลิตเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของแบบจำลองดังกล่าว ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ความต้านทานภายใน และค่าคงที่ทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งถูกนำมาใช้ในสมการแบบจำลองกึ่งประจักษ์เพื่ออธิบายพฤติกรรมการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะอยู่ตัว โดยผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่ได้มีความถูกต้องและสอดคล้องกับชุดบล็อกสำเร็จรูปใน SimPowerSystem™ ทั้งในการเปรียบเทียบเส้นโค้งโพลาไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงและผลการตอบสนองของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน ดังนั้นแบบจำลองดังกล่าวที่ได้จะถูกนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าเพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุมและวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบสำหรับงานวิจัยต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

[1] Y. Chang, Y. Qin, Y. Yin, J. Zhang, and X. Li, "Humidification strategy for polymer electrolyte membrane fuel cells – A review," Applied Energy, vol. 230, Sep. 2018, pp. 643–662.

[2] A. Sharma and R. Garg, "New Technology for Harnessing Energy: Future of Hydrogen," 2023 International Conference on Recent Trends in Electronics and Communication (ICRTEC), Mysore, India, 2023, pp. 1-7.

[3] P. Fragiacomo, M. Genovese, F. Piraino, O. Corigliano, and G. De Lorenzo, "Hydrogen-Fuel Cell Hybrid Powertrain: Conceptual Layouts and Current Applications," Machines, vol. 10, no. 12, art. 1121, Nov. 2022.

[4] S. Hamdollahi and J. Luo, "A review on modeling of proton exchange membrane fuel cell," Chem. Ind. Chem. Eng. Q., vol. 29, no. 1, Jan. 2023, pp. 61–74.

[5] R. Putala and V. Ferencey, "Hydrogen Fuel Cell System Modeling Approaches," 2025 Cybernetics & Informatics (K&I), Mikulov na Morave, Czech Republic, 2025, pp. 1-7.

[6] S. N. M., O. Tremblay and L. -A. Dessaint, "A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell vehicles," 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Dearborn, MI, USA, 2009, pp. 1722-1729.

[7] I. M. M. Saleh, R. Ali and H. Zhang, "Simplified mathematical model of proton exchange membrane fuel cell based on horizon fuel cell stack," in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 4, no. 4, pp. 668-679, October 2016.

[8] Horizon Educational, "H-500 PEM Fuel Cell – 500 W." Accessed: Jun. 15, 2025. [Online]. Available: http://www.horizoneducational.com/h-500-pem-fuel-cell-500W/p1353

[9] X. Yang, P. Wang, Q. Li, W. Nie and M. Sun, "Modeling and Simulation Analysis of Fuel Cell Stack Model," 2024 5th International Conference on Clean Energy and Electric Power Engineering (ICCEPE), Yangzhou, China, 2024, pp. 125-128.

[10] N. Nim-on, "วิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแยกโดด," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2012.

[11] W. Surakan, M. Niyomthai, A. Suyapan, T. Narongrit and K. Areerak, "The Cascade PI Controller Design for Hydrogen Electric Bike Systems," 2025 13th International Electrical Engineering Congress (iEECON), Hua Hin, Thailand, 2025, pp. 1-4.

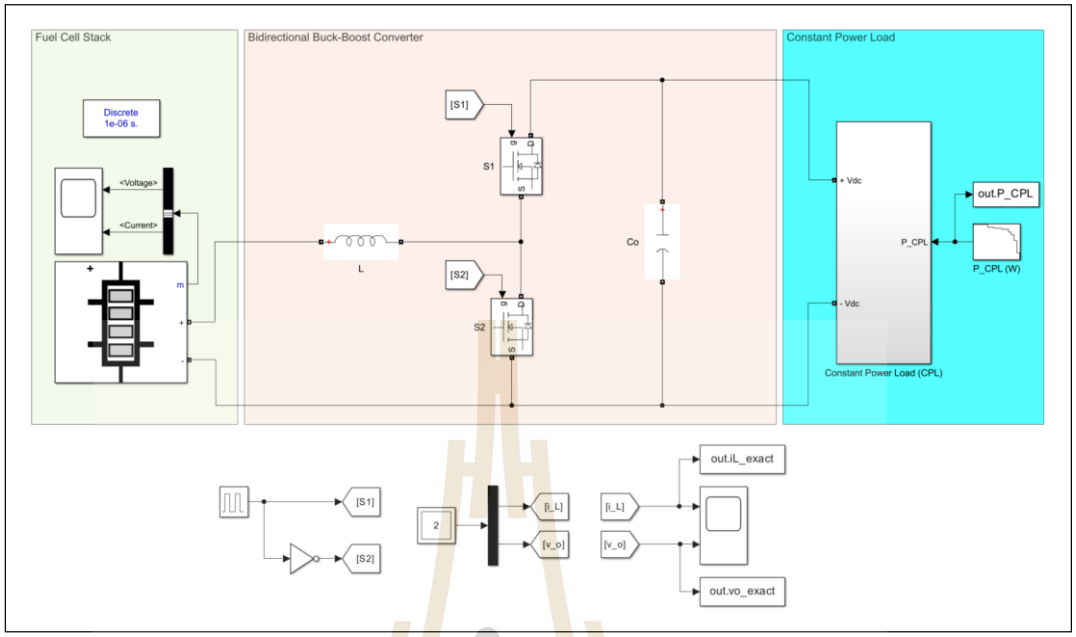
[12] A. Emadi, A. Khaligh, C. H. Rivetta and G. A. Williamson, "Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 55, no. 4, pp. 1112-1125, July 2006.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

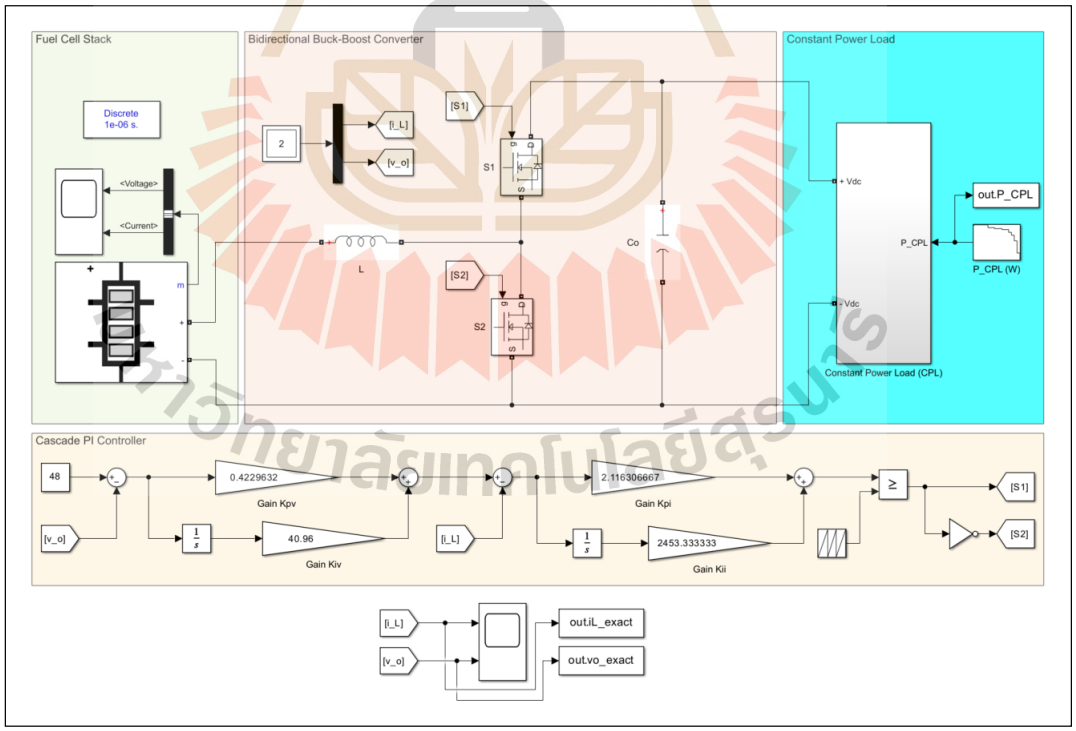
ภาคผนวก ข

ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB

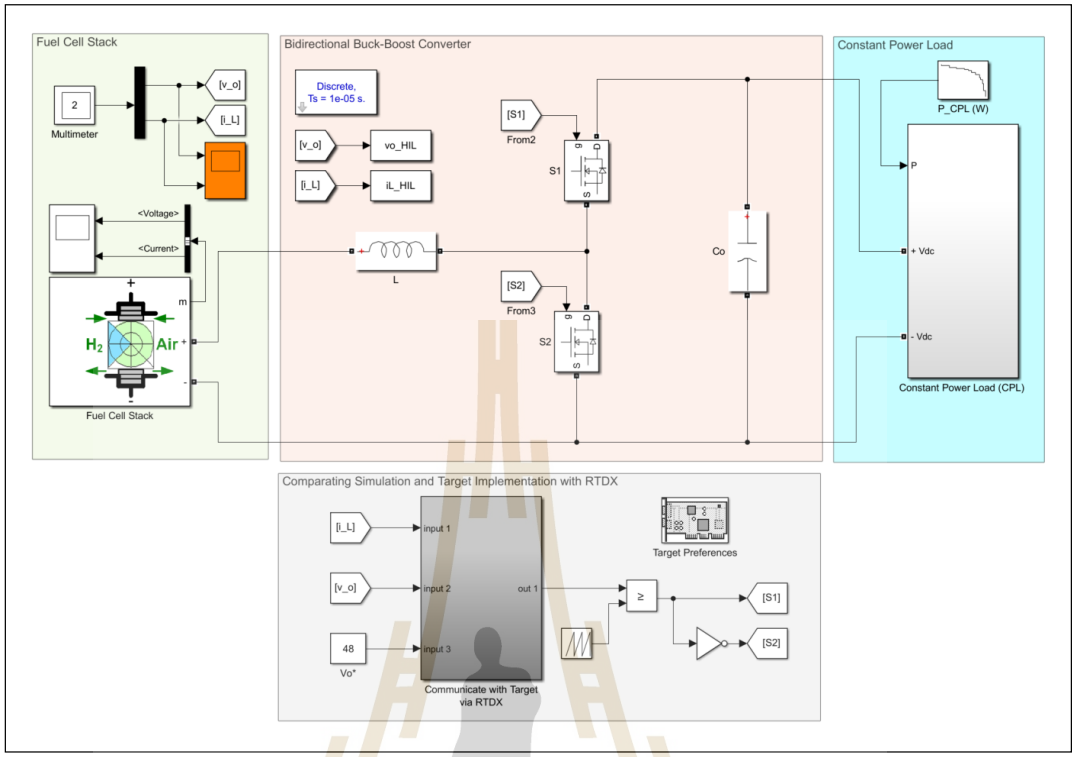
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ข.1 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม



รูปที่ ข.2 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่มีตัวควบคุม



รูปที่ ข.3 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับใช้ในการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ค

โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
**********************************************************************************************
โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม
**********************************************************************************************
% กำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน
NA = 0.9156;            % ค่าคงที่ทางเคมีไฟฟ้า
R_int = 0.1083;         % ความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิง (Ω)
i0 = 0.0734;            % ค่ากระแสแลกเปลี่ยนของเซลล์เชื้อเพลิง (A)
Eoc = 23.5;             % แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V)
L = 4.6e-3;             % ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (mH)
Co = 1600e-6;           % ค่าความจุไฟฟ้า (μF)
d = 0.5;                % ค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle)
% กำหนดช่วงเวลาและการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ค่าต่าง ๆ
time_intervals = [0 0.4;0.4 0.8;0.8 1.2];       % กำหนดช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงโหลด
Step_PCPL = [60, 80, 100];                      % กำหนดค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวในแต่ละช่วง
x0 = [1e-12; 48];                               % กำหนดค่าเริ่มต้นของระบบ
% ตัวแปรสำหรับเก็บค่าผลลัพธ์
t_total = [];
x_total = [];
p_total = [];
%% แก้สมการ ODE โดยใช้คำสั่ง ode45
tic
for i = 1:length(Step_PCPL)
    P_CPL = Step_PCPL(i);
    tspan = time_intervals(i, :);
    dxdt = @(t, x) [
        ((Eoc - NA * log(x(1)/i0) - R_int * x(1)) / L) - ((x(2) - d * x(2)) / L);
        ((x(1) - d * x(1)) / Co) - (P_CPL / (x(2) * Co));
    ];
    % ตั้งค่าตัวเลือก ODE
    options = odeset('RelTol',1e-12, 'AbsTol',1e-12);
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
    % แก้สมการ ODE เพื่อหาคำตอบ
    [t, x] = ode45(dxdt, tspan, x0, options);
    % เก็บค่าการสเต็ปโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
    p = P_CPL * ones(length(t),1);
    % บันทึกค่าที่ได้
    t_total = [t_total; t];
    x_total = [x_total; x];
    p_total = [p_total; p];
    % ผลตอบสนองของ iL และ vo ที่ได้จากการแก้สมการ ODE
    iL_GSSA = x_total(:,1);
    vo_GSSA = x_total(:,2);
    % กำหนดให้ค่าสุดท้ายเป็นค่าเริ่มต้นของช่วงถัดไป
    x0 = x(end, :);
end
ODE_time = toc;          % ระยะเวลาในการแก้สมการ ODE
fprintf('ODE simulation time: %.6f seconds\n',ODE_time);
%% พล็อตกราฟผลตอบสนองของระบบ
figure;
% พล็อตการสเต็ปโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (PCPL)
subplot(3,1,1);
plot(t_total, p_total, 'k', 'LineWidth', 1.25);
ylabel('\it\bfP_{CPL} \rm\bf(W)')
xlim([0.2 1.2]);
ylim([50 120]);
yticks(50:10:120); grid on;
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 10);
set(gca, 'GridLineStyle', ':');
set(gca, 'GridColor', [0 0 0], 'GridAlpha', 1);
% พล็อตผลตอบสนองของ iL
subplot(3,1,2);
plot(t_total, iL_GSSA, 'k', 'LineWidth', 1.25);
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
ylabel({'\it\bfi_{L} \rm\bf(A)'});
legend('GSSA model', 'Location', 'northeast');
xlim([0.2 1.2]);
ylim([2 8]);
yticks(2:1:8); grid on;
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 10);
set(gca, 'GridLineStyle', ':');
set(gca, 'GridColor', [0 0 0], 'GridAlpha', 1);
% พล็อตผลตอบสนองของ vo
subplot(3,1,3);
plot(t_total, vo_GSSA,'k', 'LineWidth', 1.25);
ylabel({'\it\bfv_{o} \rm\bf(V)'});
xlabel('\bfTime (s)');
legend('GSSA model', 'Location', 'northeast');
xlim([0.2 1.2]);
ylim([36 41]);
yticks(36:1:41); grid on;
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 10);
set(gca, 'GridLineStyle', ':');
set(gca, 'GridColor', [0 0 0], 'GridAlpha', 1);
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
**********************************************************************************************
โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนในกรณีที่มีตัวควบคุม
**********************************************************************************************
% กำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน
NA = 0.9156;            % ค่าคงที่ทางเคมีไฟฟ้า
R_int = 0.1083;         % ความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิง (Ω)
i0 = 0.0734;            % ค่ากระแสแลกเปลี่ยนของเซลล์เชื้อเพลิง (A)
Eoc = 23.5;             % แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V)
L = 4.6e-3;             % ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (mH)
Co = 1600e-6;           % ค่าความจุไฟฟ้า (μF)
% กำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ
Kpv = 0.4229632;        % ค่าอัตราขยายสัดส่วนของลูปแรงดันไฟฟ้า
Kiv = 40.96;            % ค่าอัตราขยายปริพันธ์ของลูปแรงดันไฟฟ้า
Kpi = 2.116306667;      % ค่าอัตราขยายสัดส่วนของลูปกระแสไฟฟ้า
Kii = 2453.333333;      % ค่าอัตราขยายปริพันธ์ของลูปกระแสไฟฟ้า
Vo_star = 48;           % ค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง
Ar = 10;                % ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณฟันเลื่อย
% กำหนดช่วงเวลาและการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ค่าต่าง ๆ
time_intervals = [0 0.5;0.5 1;1 1.5;1.5 2];     % กำหนดช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงโหลด
Step_PCPL = [100, 150, 200, 250];               % กำหนดค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวในแต่ละช่วง
x0 = [1e-12; 48; 0; 0];                         % กำหนดค่าเริ่มต้นของระบบ
% ตัวแปรสำหรับเก็บค่าผลลัพธ์
t_total = [];
x_total = [];
p_total = [];
%% แก้สมการ ODE โดยใช้คำสั่ง ode15s
tic
for i = 1:length(Step_PCPL)
    P_CPL = Step_PCPL(i);
    tspan = time_intervals(i, :);
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
dxdt = @(t, x) [
    ((Eoc - NA * log(x(1) / i0) - R_int * x(1)) / L) - (1 / L) * x(2) ...
    + (Kpi * Kpv * Vo_star * x(2)) / (Ar * L) ...
    - (Kpi * Kpv * x(2)^2) / (Ar * L) ...
    + (Kpi * Kiv * x(3) * x(2)) / (Ar * L) ...
    - (Kpi * x(1) * x(2)) / (Ar * L) ...
    + (Kii * x(4) * x(2)) / (Ar * L);
    x(1)/Co - (Kpi * Kpv * Vo_star * x(1)) / (Ar * Co) ...
    + (Kpi * Kpv * x(1) * x(2)) / (Ar * Co) ...
    - (Kpi * Kiv * x(3) * x(1)) / (Ar * Co) ...
    + (Kpi * x(1)^2) / (Ar * Co) ...
    - (Kii * x(4) * x(1)) / (Ar * Co) ...
    - (P_CPL) / (x(2) * Co);
    Vo_star - x(2);
    - x(1) - Kpv * x(2) + Kiv * x(3) + Kpv * Vo_star
];
% ตั้งค่าตัวเลือก ODE
options = odeset('RelTol',1e-12, 'AbsTol',1e-12);
% แก้สมการ ODE เพื่อหาคำตอบ
[t, x] = ode15s(dxdt, tspan, x0, options);
% เก็บค่าการสเต็ปโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
p = P_CPL * ones(length(t),1);
% บันทึกค่าที่ได้
t_total = [t_total; t];
x_total = [x_total; x];
p_total = [p_total; p];
% ผลตอบสนองของ iL และ vo ที่ได้จากการแก้สมการ ODE
iL_GSSA = x_total(:,1);
vo_GSSA = x_total(:,2);
% กำหนดให้ค่าสุดท้ายเป็นค่าเริ่มต้นของช่วงถัดไป
x0 = x(end, :);
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
end
ODE_time = toc;          % ระยะเวลาในการแก้สมการ ODE
fprintf('ODE simulation time: %.6f seconds\n',ODE_time);
%% พล็อตกราฟผลตอบสนองของระบบ
figure;
% พล็อตการสเต็ปโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
subplot(3,1,1);
plot(t_total, p_total, 'k', 'LineWidth', 1.25);
ylabel('\it\bfP_{CPL} \rm\bf(W)')
xlim([0.8 2]);
ylim([100 300]);
yticks(100:50:300); grid on;
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 10);
set(gca, 'GridLineStyle', ':');
set(gca, 'GridColor', [0 0 0], 'GridAlpha', 1);
% พล็อตผลตอบสนองของ iL
subplot(3,1,2);
plot(t_total, iL_GSSA, 'k', 'LineWidth', 1.25);
ylabel({'\it\bfi_{L} \rm\bf(A)'});
legend('GSSA model', 'Location', 'northeast');
xlim([0.8 2]);
ylim([6 18]);
yticks(6:2:18); grid on;
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 10);
set(gca, 'GridLineStyle', ':');
set(gca, 'GridColor', [0 0 0], 'GridAlpha', 1);
% พล็อตผลตอบสนองของ vo
subplot(3,1,3);
plot(t_total, vo_GSSA, 'k', 'LineWidth', 1.25);
ylabel({'\it\bfv_{o} \rm\bf(V)'});
xlabel('\bfTime (s)');
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
legend('GSSA model', 'Location', 'northeast');
xlim([0.8 2]);
ylim([40 52]);
yticks(40:2:52); grid on;
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 10);
set(gca, 'GridLineStyle', ':');
set(gca, 'GridColor', [0 0 0], 'GridAlpha', 1);
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ง

โปรแกรมภาษาซีสำหรับการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป บนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
**********************************************************************************************
โปรแกรมภาษาซีสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปบนบอร์ด TMDSDOCK28335
**********************************************************************************************
// เรียกใช้ไลบรารี่ของโปรแกรม
#include <stdio.h>      // ส่วนหัวของโปรแกรม (header)
#include "target.h"
#include <rtdx.h>       // ไลบรารี RTDX สื่อสารระหว่าง MATLAB/SIMULINK กับบอร์ด DSP
// กำหนดค่าช่วงเวลาในการชักตัวอย่างเท่ากับ 10 µs
#define Ts 1e-5
// ประกาศตัวแปรสัญญาณของตัวควบคุมพีไอ
float Vo;
float Vref;
float iL;
float dx;
float iL_ref;
// กำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ
const float kpv = 0.4229632f, kiv = 40.96f;
const float kpi = 2.606666667f, kii = 2453.333333f;
// ตัวแปรเก็บค่าผลรวมของตัวควบคุมพีไอและค่าความคลาดเคลื่อน
float int_v = 0.0f;
float int_i = 0.0f;
float err_v = 0.0f;
float err_i = 0.0f;
// ช่องทางการสื่อสาร RTDX อินพุตสำหรับรับข้อมูล iL, Vo, Vref จาก MATLAB/SIMULINK
RTDX_CreateInputChannel(ichan1);  // iL
RTDX_CreateInputChannel(ichan2);  // Vo
RTDX_CreateInputChannel(ichan3);  // Vref
// ช่องทางการสื่อสาร RTDX เอาต์พุตสำหรับส่งข้อมูล dx กลับไปยัง MATLAB/SIMULINK
RTDX_CreateOutputChannel(ochan1); // dx
void main()
{
```

```
    // ตั้งค่า target ของบอร์ด eZdsp F28335 (TMS320F28335)
    TARGET_INITIALIZE();
    RTDX_enableInput(&ichan1);
    RTDX_enableInput(&ichan2);
    RTDX_enableInput(&ichan3);
    RTDX_enableOutput(&ochan1);
    // real-time loop
    while (1) {
        // รับข้อมูล iL, Vo, Vref จาก RTDX
        RTDX_read(&ichan1, &iL,    sizeof(float));
        RTDX_read(&ichan2, &Vo,    sizeof(float));
        RTDX_read(&ichan3, &Vref,  sizeof(float));
        // --- ลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า (outer loop) ---
        err_v = Vref - Vo;
        int_v += kiv * Ts * err_v;
        iL_ref = kpv * err_v + int_v;
        // --- ลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า (inner loop) ---
        err_i = iL_ref - iL;
        int_i += kii * Ts * err_i;
        dx = kpi * err_i + int_i;
        // RTDX
        while (RTDX_writing != NULL) {
            #if RTDX_POLLING_IMPLEMENTATION
                RTDX_Poll();
            #endif
        }
        // ส่งข้อมูล dx กลับไปยัง MATLAB/SIMULINK
        RTDX_write(&ochan1, &dx, sizeof(float));
    }
}
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายกฤษดา ทองอร่าม เกิดเมื่อวันที่ 9 มกราคม พ.ศ. 2545 ที่จังหวัดลพบุรี เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1-3 ที่โรงเรียนรัตนศึกษา ระดับประถมศึกษาปีที่ 4 ที่โรงเรียนบ้านสันหีบ ระดับประถมศึกษาปีที่ 5 ที่โรงเรียนอนุบาลศรีสัชนาลัย ระดับประถมศึกษาปีที่ 6 และระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1-3 ที่โรงเรียนพระวรสาร ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 4-6 ที่โรงเรียนพิบูลวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) ด้วยเกียรตินิยมอันดับหนึ่ง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2567 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) ณ สถาบันเดิม

ในการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้รับทุนกิตติบัณฑิตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยระหว่างการศึกษาได้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จำนวน 8 รายวิชา ดังนี้

1. ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering Laboratory)
2. ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ามูลฐาน (Fundamental of Electrical Engineering Laboratory)
3. ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม (Engineering Electronics Laboratory)
4. ปฏิบัติการขับเคลื่อนด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic Drives Laboratory)
5. ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Electrical Machines Laboratory)
6. ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง (Electrical Power Engineering Laboratory)
7. วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน (Electrical Engineering and Basic Electronics)
8. เครื่องจักรกลไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์กำลังและระบบฝังตัว (Electrical Machines, Power Electronics and Embedded Systems)

สำหรับผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่มีจำนวน 2 บทความดังที่ได้รวบรวมไว้แล้วในภาคผนวก ก