

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์	4
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น	4
1.4 ขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	5
1.5 สมมติฐานการวิจัย.....	5
1.6 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.8 การจัดรูปแบบรายงานวิทยานิพนธ์	6
2 บรรณานุกรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 บทนำ	8
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า	8
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง	15
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของ ระบบไฟฟ้ากำลัง	18
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ ระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	23
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	28
2.7 สรุป.....	34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	ระบบจํกรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาและการพิสูจน์หาแบบจํลองทางคณิตศาสตร์	35
3.1	บทนำ	35
3.2	ระบบจํกรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณา	35
3.3	แบบจํลองของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน	36
3.3.1	การสร้างแบบจํลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน	38
3.3.2	การประมาณค่าพารามิเตอร์จําเพาะที่อาศัยข้อมูลจากผู้ผลิต	40
3.3.3	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจํลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน	42
3.4	การวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังตีสเป็นตีสชนิดบัส-บัสตแบบสองทิศทางและการออกแบบค่าพารามิเตอร์ภายในวงจร	44
3.4.1	หลักการสมดุลพลังค์เชื่อมโยงในตัวเหนี่ยวนำ	48
3.4.2	หลักการสมดุลประจุในตัวเก็บประจุ	50
3.4.3	การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ L	52
3.4.4	การออกแบบค่าตัวเก็บประจุ C	53
3.5	ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการพิสูจน์หาแบบจํลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป	54
3.6	การพิสูจน์หาแบบจํลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจํกรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม	56
3.6.1	การพิสูจน์หาแบบจํลองทางคณิตศาสตร์	56
3.6.2	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจํลองทางคณิตศาสตร์	62
3.7	การพิสูจน์หาแบบจํลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจํกรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีตัวควบคุม	65
3.7.1	การออกแบบตัวควบคุมพีไอของระบบจํกรยานไฟฟ้าที่พิจารณา	65
3.7.2	การพิสูจน์หาแบบจํลองทางคณิตศาสตร์	69
3.7.3	การทำให้เป็นเชิงเส้นของแบบจํลองทางคณิตศาสตร์	72
3.7.4	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจํลองทางคณิตศาสตร์	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	การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูกควบคุม.....	86
4.3.4	การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูกควบคุม	90
4.4	สรุป.....	94
5	การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป	95
5.1	บทนำ	95
5.2	การเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับการทดสอบฮาร์ดแวร์ในรูป.....	95
5.2.1	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335	96
5.2.2	การเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับโปรแกรม MATLAB/SIMULINK	96
5.3	การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป.....	99
5.3.1	ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ	101
5.3.2	ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ	102
5.3.3	ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูกควบคุมแรงดันไฟฟ้า	103

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3.4	ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุม กระแสไฟฟ้า	104
5.3.5	ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุม แรงดันไฟฟ้า	105
5.3.6	ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุม กระแสไฟฟ้า	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 โปรแกรมภาษาซีสำหรับการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป บนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335	146
	ประวัติผู้เขียน	149

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า 9
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง 15
2.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของ ระบบไฟฟ้ากำลัง..... 19
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ ระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง 24
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง 28
3.1	พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.16 62
3.2	พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.24 74

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	สถาปัตยกรรมของระบบจํการยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณา..... 14
2.2	วงจรแปลงผันกําลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง 18
2.3	เส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโหลดกําลังไฟฟ้าคงตัว..... 22
2.4	ระบบจํการยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่มีโหลดกําลังไฟฟ้าคงตัว..... 23
2.5	แผนภาพสรุปการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากําลัง 32
3.1	ระบบจํการยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์..... 36
3.2	เส้นโค้งโพลาริเซชันทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน 37
3.3	วงจรสมมูลอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน 38
3.4	การประมาณค่าพารามิเตอร์จำเพาะบนเส้นโค้งโพลาริเซชันทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิง 40
3.5	เส้นโค้งโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนรุ่น H-500..... 42
3.6	ชุดบล็อกสำเร็จรูปของ Fuel Cell Model ใน SimPowerSystem™ 43
3.7	การเปรียบเทียบเส้นโค้งโพลาริเซชันของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงอย่างง่าย กับชุดบล็อกสำเร็จรูปใน SimPowerSystem™..... 43
3.8	วงจรแปลงผันกําลังที่พิจารณาสำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ ของอุปกรณ์พาสซีฟ 44
3.9	การประมาณการกระแสเพื่อขนาดเล็ก 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	ระบบจํการยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม 57
3.17	ระบบจํการยานไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ 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-ส่งข้อมูลสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป 97
5.3	การเชื่อมต่ออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335 กับโปรแกรม MATLAB/SIMULINK..... 98
5.4	ผลการทดสอบระยะเวลาในการประมวลผลชุดคำสั่งของตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกัน 99
5.5	ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปเมื่อเปรียบเทียบกับ ผลการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK..... 100
5.6	ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง สถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า C_o 101
5.7	ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง สถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า L 102
5.8	ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง สถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{nv} 103
5.9	ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง สถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{ni} 104
5.10	ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง สถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า ζ_i 105
5.11	ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง สถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า ζ_i 106
ข.1	ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ของ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม..... 136
ข.2	ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ของ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีตัวควบคุม 136
ข.3	ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ของ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับใช้ในการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป..... 137