

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป	ฐ
บทที่	

1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์	5
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	5
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.6 การจัดรูปแบบรายงาน	7
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 กล่าวนำ.....	9
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....	9
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟ แบบขนาน	14
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรอก กำลังแอกทีฟ	18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน	22
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน	26
2.7 สรุป	28
3 การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม	30
3.1 กล่าวนำ	30
3.2 ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาจำลองสถานการณ์การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิก	31
3.3 การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม	33
3.4 การประยุกต์ใช้วิธีวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อนในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ สำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม	38
3.5 การตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน	40
3.6 การทดสอบเปรียบเทียบการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม	43
3.6.1 การทดสอบกรณีที่ 1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์	44
3.6.2 การทดสอบกรณีที่ 2 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกปะปน	47
3.7 สรุป	51
4 การออกแบบวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานและระบบควบคุมสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม	52
4.1 กล่าวนำ	52
4.2 โครงสร้างของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....	53
4.4 การออกแบบตัวเก็บประจุของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....	57
4.5 การออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชย.....	58
4.6 การออกแบบระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง	60
4.7 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบ เฟสรวม	62
4.8 สรุป.....	67
5 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฟัซซีลอจิก	69
5.1 กล่าวนำ.....	69
5.2 ฟัซซีเซต.....	69
5.3 การดำเนินการทางฟัซซีเซต.....	71
5.4 ฟังก์ชันสมาชิก	73
5.5 ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา	76
5.6 กฎฟัซซี.....	77
5.7 การอนุมานฟัซซี.....	78
5.7.1 การอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani.....	78
5.7.2 การอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno	81
5.8 สรุป.....	84
6 การออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิก	85
6.1 กล่าวนำ.....	85
6.2 ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิก	85
6.3 การทดสอบรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสำหรับใช้ควบคุมกระแส ชดเชย.....	86

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.4 การทดสอบจำนวนฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyลอจิกสำหรับใช้ควบคุมกระแส ชุดเซย์.....	88
6.5 การทดสอบวิธีการอนุมานฟuzzyของตัวควบคุมฟuzzyลอจิกสำหรับระบบควบคุมกระแส ชุดเซย์.....	889
6.6 การออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา.....	90
6.7 การออกแบบกฎฟuzzy.....	94
6.7.1 การออกแบบกฎฟuzzyกรณีพิจารณาใช้เฉพาะอินพุต error.....	94
6.7.2 การออกแบบกฎฟuzzyกรณีพิจารณาใช้เฉพาะอินพุต error และ error rate	98
6.7.3 การออกแบบกฎฟuzzyกรณีพิจารณาใช้เฉพาะอินพุต error และ sum error.....	101
6.8 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมฟuzzyลอจิก.....	104
6.9 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเพื่อทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแส ชุดเซย์ของตัวควบคุมฟuzzyลอจิก	112
6.10 สรุป.....	119
7 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป	120
7.1 กล่าวนำ.....	120
7.2 การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป	120
7.3 ระบบจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป	122
7.4 ระบบจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปกรณีทดสอบให้กระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง	127
7.5 สรุป.....	145
8 การทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าจำลองในห้องปฏิบัติการ	146
8.1 กล่าวนำ.....	146

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

8.2 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลอง	147
8.2.1 ระบบรางไฟฟ้าจำลอง.....	148
8.2.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน	152
8.2.3 การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกและระบบควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	156
8.3 การออกแบบระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับฮาร์ดแวร์ ระบบรางไฟฟ้าจำลอง	168
8.4 การทดสอบสมรรถนะการจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานบน ฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลอง.....	168
8.5 สรุป.....	175
9 สรุปและข้อเสนอแนะ	176
9.1 สรุป.....	176
9.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต	178
รายการอ้างอิง	179
ภาคผนวก ก โค้ดโปรแกรมภาษาซีการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในอุปกรณ์ใช้ ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฟuzzyลอจิกกรณีใช้อินพุต error.....	188
ภาคผนวก ข โค้ดโปรแกรมภาษาซีการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในอุปกรณ์ใช้ ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฟuzzyลอจิกกรณีใช้อินพุต error และ error rate	199
ภาคผนวก ค โค้ดโปรแกรมภาษาซีการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในอุปกรณ์ใช้ ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฟuzzyลอจิกกรณีใช้อินพุต error และ sum error	212
ภาคผนวก ง โค้ดโปรแกรมภาษาซีการควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานกรณีใช้ ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฟuzzyลอจิกกรณีใช้อินพุต error และ sum error.....	225
ภาคผนวก จ บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในระหว่างการศึกษา.....	240
ประวัติผู้เขียน	278

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน..... 10
2.2	การเปรียบเทียบคุณสมบัติวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิดแหล่งจ่ายกระแสและชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน 14
2.3	ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน 15
2.4	ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิก18
2.5	ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสขดลวดของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน 22
2.6	ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง 26
3.1	องค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าของประเทศ ไต้หวัน..... 33
3.2	สรุปค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยของการทดสอบกรณีที่ 1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์ 47
3.3	สรุปค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยของการทดสอบกรณีที่ 2 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกปะปน..... 50
4.1	ผลสรุปค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยของการทดสอบการ กำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบรางไฟฟ้า..... 66
6.1	ผลการทดสอบเปรียบเทียบรูปร่างฟังก์ชันสมาชิก 88
6.2	ผลการทดสอบเปรียบเทียบจำนวนฟังก์ชันสมาชิกกลุ่มสามเหลี่ยม 89
6.3	ผลการทดสอบเปรียบเทียบการอนุมานฟัซซี่..... 90
6.4	ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษากรณี 3 ฟังก์ชันสมาชิก..... 91
6.5	ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษากรณี 5 ฟังก์ชันสมาชิก..... 92
6.6	ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษากรณี 7 ฟังก์ชันสมาชิก..... 93
6.7	การออกแบบค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error..... 109
6.8	การออกแบบค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate 110

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.9 การออกแบบค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต sum error.....	111
6.10 การออกแบบค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage	111
6.11 ผลสรุปเปรียบเทียบค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยแต่ละกรณี อินพุตของระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีซีลอจิก	115
7.1 ผลสรุปค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยของการจำลองสถานการณ์ การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป	126
7.2 องค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงลดขนาด	130
7.3 องค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาด ..	131
7.4 องค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง	132
7.5 สรุปผลค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยของการจำลองสถานการณ์ การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง.....	143
8.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบรางไฟฟ้าจำลอง.....	148
8.2 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอคทีฟแบบขนาน	153
8.3 สรุปผลค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่าย.....	173

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 จุดพิจารณาในการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม	2
1.2 การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมด้วยวงจรกรอง กำลังแอกทีฟแบบขนาน	3
2.1 แผนภาพสรุปผลการสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรม	29
3.1 ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาจำลองสถานการณ์ทดสอบการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิก	31
3.2 แผนภาพการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ แบบดั้งเดิม.....	34
3.3 แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย และกระแสไหลของเฟส M และ T	35
3.4 แผนภาพการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ สำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ แบบเฟสรวม.....	35
3.5 การใช้วงจร LPF ในการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ	36
3.6 สเปกตรัมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก	37
3.7 การใช้วิธี SWFA ในการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ.....	38
3.8 การคำนวณหาค่า A_{0p} และค่า $\bar{p}_L$	39
3.9 แผนภาพการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF สำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ แบบเฟสรวม.....	40
3.10 แผนภาพการคำนวณตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐานด้วยวิธี PSVD.....	41
3.11 การใช้วงจร LPF ในการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกำลังไฟฟ้าสนับสนุน (p', q').....	42
3.12 การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ร่วมกับวิธี PSVD	43
3.13 ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกของเฟส M ด้วยวิธี PQ กรณีแหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปไซน์.....	44
3.14 ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกของเฟส T ด้วยวิธี PQ กรณีแหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปไซน์.....	45
3.15 ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกของเฟส M ด้วยวิธี PQF กรณีแหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปไซน์.....	45
3.16 ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกของเฟส T ด้วยวิธี PQF กรณีแหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปไซน์.....	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกของเฟส M ด้วยวิธี PQF กรณีแหล่งจ่ายแรงดัน มีฮาร์มอนิกปะปน.....	48
3.18 ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกของเฟส T ด้วยวิธี PQF กรณีแหล่งจ่ายแรงดัน มีฮาร์มอนิกปะปน.....	48
3.19 ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกของเฟส M ด้วยวิธี PQF ร่วมกับ PSVD กรณีแหล่งจ่ายแรงดัน มีฮาร์มอนิกปะปน.....	49
3.20 ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกของเฟส T ด้วยวิธี PQF ร่วมกับ PSVD กรณีแหล่งจ่าย แรงดันมีฮาร์มอนิกปะปน.....	49
4.1 วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม	53
4.2 สเปกตรัมของกระแสไหลดในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก	54
4.3 ผลรวมผลคูณของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสและกระแสอ้างอิง	58
4.4 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ	58
4.5 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ	60
4.6 การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่เชื่อมต่อภายในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ..	61
4.7 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบรางไฟฟ้า	63
4.8 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสของเฟส M.....	63
4.9 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสของเฟส T	64
4.10 ผลการเปรียบเทียบ i_{CM} และ i_{CM}^*	64
4.11 ผลการเปรียบเทียบ i_{CT} และ i_{CT}^*	65
4.12 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส (เฟส A B และ C)....	65
4.13 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ	67
5.1 รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของเซตชัดเจน.....	70
5.2 รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซีเซต	71
5.3 ส่วนเติมเต็มของฟัซซีเซต A	72
5.4 ยูเนียนระหว่างฟัซซีเซต A และ B.....	72
5.5 อินเตอร์เซกชันระหว่างฟัซซีเซต A และ B	73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6	ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม..... 74
5.7	ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู..... 75
5.8	ฟังก์ชันสมาชิกรูปเกาส์เซียน 75
5.9	ฟังก์ชันสมาชิกรูปประฆังคว่ำ 76
5.10	แผนภาพการอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani 78
5.11	การอนุมานแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด..... 79
5.12	การอนุมานแบบค่าสูงสุด-ผลคูณ..... 80
5.13	การทำดีฟัซซีด้วยวิธีหาจุดศูนย์ถ่วง (COG) 81
5.14	การอนุมานฟัซซีแบบ Takagi- Sugeno..... 83
6.1	ระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิก 86
6.2	ระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิก 87
6.3	ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error 87
6.4	ลักษณะกระแสชดเชยสำหรับการออกแบบกฎฟัซซี 94
6.5	ลักษณะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกกรณีใช้เฉพาะอินพุต error ที่มี 3 ฟังก์ชันสมาชิก 95
6.6	ลักษณะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกกรณีใช้เฉพาะอินพุต error ที่มี 5 ฟังก์ชันสมาชิก 96
6.7	ลักษณะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกกรณีใช้เฉพาะอินพุต error ที่มี 7 ฟังก์ชันสมาชิก 97
6.8	ลักษณะอินพุต error rate..... 99
6.9	ลักษณะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกกรณีที่ใช้อินพุต error ร่วมกับอินพุต error rate 100

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.10 ลักษณะอินพุต sum error	102
6.11 ลักษณะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมพีชชีลอจิกกรณีย์ใช้อินพุต error ร่วมกับอินพุต sum error	103
6.12 ตำแหน่ง e_1 ถึง e_5 ของฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error.....	105
6.13 ตำแหน่ง er_1 ถึง er_3 ของฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate.....	105
6.14 ตำแหน่ง se_1 ถึง se_3 ของฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต sum error	105
6.15 ตำแหน่ง V_1 ถึง V_5 ของฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage	106
6.16 ค่าแต่ละตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error	109
6.17 ค่าแต่ละตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error rate.....	110
6.18 ค่าแต่ละตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต sum error	111
6.19 ค่าแต่ละตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage	112
6.20 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีชชีลอจิกกรณีย์ ใช้เฉพาะอินพุต error.....	113
6.21 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีชชีลอจิกกรณีย์ใช้ อินพุต error และ error rate	113
6.22 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีชชีลอจิกกรณีย์ใช้ อินพุต error และ sum error.....	113
6.23 ผลการเปรียบเทียบ i_{CM} และ i_{CM}^* กรณีย์ใช้เฉพาะอินพุต error	114
6.24 ผลการเปรียบเทียบ i_{CM} และ i_{CM}^* กรณีย์ใช้อินพุต error และ error rate	114
6.25 ผลการเปรียบเทียบ i_{CM} และ i_{CM}^* กรณีย์ใช้อินพุต error และ sum error	115
6.26 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสของเฟส M ที่ใช้ ตัวควบคุมพีชชีลอจิกกรณีย์ใช้อินพุต error และ sum error.....	116
6.27 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสของเฟส T ที่ใช้ ตัวควบคุมพีชชีลอจิกกรณีย์ใช้อินพุต error และ sum error.....	117

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.28 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่ใช้ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกกรณีใช้อินพุต error และ sum error.....	117
6.29 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมฟuzzyลอจิกกรณีใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยตัวควบคุมฟuzzyลอจิกกรณีใช้อินพุต error และ sum error.....	119
7.1 การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป.....	121
7.2 กระบวนการทำงานของการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป.....	122
7.3 ระบบจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมที่พิจารณาด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป.....	123
7.4 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์โมนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปของเฟส M	124
7.5 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์โมนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปของเฟส T	124
7.6 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์โมนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส (เฟส A, B, C)	125
7.7 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป.....	126
7.8 ระบบจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมที่พิจารณาด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปกรณีมีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดของระบบรางไฟฟ้า.....	128
7.9 กระแสโหลดของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง	129
7.10 กระแสโหลดของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง	129
7.11 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์โมนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปของเฟส M กรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง.....	132
7.12 ผลการเปรียบเทียบ i_{CM} และ i_{CM}^* ของเฟส M กรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง	133
7.13 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์โมนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปของเฟส T กรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง.....	134
7.14 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์โมนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปของเฟส T กรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง.....	135

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.15 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส (เฟส A, B, C) กรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง	136
7.16 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปแบบขยายที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส (เฟส A, B, C) กรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง.....	136
7.17 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปของเฟส T กรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง (ตัวควบคุมพีไอ).....	138
7.18 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปของเฟส T กรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง (ตัวควบคุมพีไอ).....	139
7.19 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปของเฟส T กรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง (ตัวควบคุมพีไอ).....	140
7.20 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปของเฟส T กรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง (ตัวควบคุมพีไอ).....	141
7.21 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส (เฟส A, B, C) กรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง (ตัวควบคุมพีไอ).....	142
7.22 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปแบบขยายที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส (เฟส A, B, C) กรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง (ตัวควบคุมพีไอ).....	142
7.23 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง	144
7.24 การกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรงกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง	145
8.1 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้า.....	147
8.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบคงค่าได้	149
8.3 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบปรับค่าได้.....	149
8.4 หม้อแปลงแยกกราวด์.....	150
8.5 หม้อแปลงเลอบลองค์.....	151

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.6 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส	151
8.7 โหลดตัวเหนี่ยวนำ	152
8.8 ชุดโหลดไฟแทนโหลดตัวต้านทาน.....	152
8.9 วงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส	153
8.10 ตัวเหนี่ยวนำของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน	154
8.11 ตัวต้านทานของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน	154
8.12 ตัวเก็บประจุของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน	155
8.13 หม้อแปลงเชิงเส้นหนึ่งเฟส.....	156
8.14 หม้อแปลงแท็ปกลางสำหรับตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า.....	157
8.15 ตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้า	157
8.16 ตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	158
8.17 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	159
8.18 วงจรปรุงแต่งสัญญาณ	159
8.19 บอร์ด eZdsp TM F28335.....	160
8.20 เวลาที่ใช้ในหนึ่งรอบการคำนวณค่าเอาต์พุตของระบบควบคุมบนบอร์ดeZdsp TM F28335.....	161
8.21 การเชื่อมต่อ expansion interface และ analog expansion	161
8.22 ตัวแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก รุ่น Burr-Brown DAC712P	162
8.23 วงจรสร้างสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยม	163
8.24 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ	163
8.25 วงจรนิเสธเกต.....	164
8.26 วงจรขับเกต.....	164
8.27 ฮาร์ดแวร์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าจำลอง.....	165
8.28 ตำแหน่ง e_1 ถึง e_5 ของฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error ของฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้า..	167

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.29 ตำแหน่ง se_1 ถึง se_3 ของฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต sum error ของฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้า.....	167
8.30 ตำแหน่ง V_1 ถึง V_5 ของฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage สำหรับฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้า.....	168
8.31 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกบนฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลองของเฟส M	170
8.32 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกบนฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลองของเฟส T	171
8.33 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกบนฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลองที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส	172
8.34 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้า	174