สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
สารบัญแผนภูมิ	ฑ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่สำคัญ	4
2.1 นิยามศัพท์ที่สำคัญ	5
2.2 แนวคิด	5
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.4 ทฤษฎีที่สำคัญ	6
บทที่ 3 **การวิเคราะห์ชุด D-STATCOM ด้วย** MATLAB/SIMULINK	39
3.1 แนวคิดในการออกแบบและการสร้างD-STATCOM	40
3.2 แบบจำลองแหล่งจ่ายตัวแปลงผันแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส	48
3.3 การออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำการสวิตช์ด้านออก	55
3.4 การออกแบบชุดควบคุมการชดเชยแรงดัน	51
3.5 การจำลองการทำงานในระบบไฟฟ้า	72
3.6 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันแต่ละกรณี	74
3.7 สรุปท้ายบท	84
บทที่ 4 **การออกแบบและทดสอบชุดควบคุมในระบบ D-STATCOM**	86
4.1 การออกแบบและทดสอบชุดควบคุมในระบบ D-STATCOM	86
4.2 หลักการเขียนโปรแกรมควบคุม	113

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 (ต่อ)	
4.3 การทดลองและผลการทดลองการชดเชยแรงดันเบื้องต้น	116
บทที่ 5 ผลการทดลอง	122
5.1 การทดลอง	123
5.2 ผลการทดลอง	124
5.3 สรุปผลการทดลอง	141
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย	142
6.1 สรุปผลการวิจัย	142
6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	143
เอกสารอ้างอิง	144
บทความวิจัย	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 มาตรฐานย่อยของ IEC และ IEEE	7
2.2 แสดงระยะเวลาการเกิดแรงดันตก แรงดันเกินและไฟดับในช่วงเวลาสั้นๆ	8
2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงระยะเวลายาว	9
3.1 ค่าพารามิเตอร์การจำลองระบบ D-STATCOM ใน MATLAB/SIMULINK	72
4.1 แสดงผลการทดลองชุดตรวจจับแรงดันกระแสสลับ	91
4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในโครงการ	98
4.3 ผลการทดลองชุดตรวจจับกระแส	111
4.4 ผลการทดลองชุดชดเชยแรงดันแบบขนานที่ระบบ 48Vrms	120
5.1 ผลการทดลองชดเชยแรงดันที่ 48V 400 วัตต์ f = 50 Hz เมื่อเกิดแรงดันตก 10%	126
5.2 ผลการทดลองชดเชยแรงดันที่ 48V 400 วัตต์ f = 50 Hz เมื่อเกิดแรงดันเกิน 10%	126
5.3 ผลการทดลองชดเชยแรงดันที่ 80 V 400 วัตต์ f = 50 Hz เมื่อเกิดแรงดันตก 10%	129
5.4 ผลการทดลองชดเชยแรงดันที่ 80 V 400 วัตต์ f = 50 Hz เมื่อเกิดแรงดันเกิน 10%	129
5.5 ผลการทดลองชดเชยแรงดันที่ 100V 400 วัตต์ f = 50 Hz เมื่อเกิดแรงดันตก 10%	131
5.6 ผลการทดลองชดเชยแรงดันที่ 100V 400 วัตต์ f = 50 Hz เมื่อเกิดแรงดันเกิน 10%	131
5.7 ผลการทดลองชดเชยแรงดันที่ 120V 400 วัตต์ f = 50 Hz เมื่อเกิดแรงดันเกิน 10%	135
5.8 ผลการทดลองชดเชยแรงดันที่ 120V 400 วัตต์ f = 50 Hz เมื่อเกิดแรงดันเกิน 10%	136
5.9 ผลการทดลองชดเชยแรงดันที่ 48V 400 วัตต์ f = ไม่คงที่และเกิดแรงดันตก 10%	139
5.10 ผลการทดลองชดเชยแรงดันที่ 48V 400 วัตต์ f = ไม่คงที่และเกิดแรงดันเกิน10%	140

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	วงจรอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบขนานเข้ากับระบบการไฟฟ้า	2
2.1	การเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995.	4
2.2	Voltage Sag จากสาเหตุการเกิดความผิดพร่องทางไฟฟ้าลงดิน	8
2.3	Voltage Swell จากสาเหตุการเกิดความผิดพร่องทางไฟฟ้าลงดิน	9
2.4	คลื่นแรงดันเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะชนิด 2 เฟส ลงกราวด์	10
2.5	ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะ	11
2.6	ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ทำให้ลักษณะของแรงดันตกชั่วขณะมีการเปลี่ยนแปลง	11
2.7	เฟสเซอร์ของแรงดันตกชั่วขณะทั้ง 4 ประเภท	11
2.8	เฟสเซอร์แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดพร่องแบบ 3 เฟส	12
2.9	เฟสเซอร์แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดพร่องลงดินเส้นเดียว	12
2.10	เฟสเซอร์แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดพร่องระหว่างสายที่ต่อลงดิน	13
2.11	เฟสเซอร์แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดพร่องระหว่างสาย	13
2.12	การเกิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้า 3 เฟส	14
2.13	องค์ประกอบของความไม่สมมาตรของแรงดัน 3 เฟส	15
2.14	วงจรกรองสัญญาณไฟฟ้าความถี่ต่ำผ่าน Low Pass Filter	16
2.15	วงจรกรองสัญญาณไฟฟ้าความถี่ต่ำผ่าน Low Pass Filter T-Type	16
2.16	วงจรกรองสัญญาณไฟฟ้าความถี่ต่ำผ่าน Low Pass Filter Pi-Type	17
2.17	ช่วงเวลาทำงานของ Low Pass Filter	17
2.18	วงจรสมมูลของวงจรกรองที่ใช้ในการออกแบบ	17
2.19	แสดงสัญลักษณ์ออปแอมป์	20
2.20	วงจรขยายออปแอมป์แบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)	21
2.21	วงจรบัฟเฟอร์	22
2.22	วงจรแอคทีฟฟิลเตอร์	23
2.23	รูปจริงของตัวบอร์ด DSP	23
2.24	ลักษณะลายวงจรบนบอร์ด DSP	24
2.25	แสดงกระบวนการชักตัวอย่างสัญญาณและควอนไทซ์	25
2.26	โครงสร้างของตัวควบคุมแบบอนุกรม	27

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบขนาน	28
2.28 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม - อนุกรม	29
2.29 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบผสมอนุกรม - ขนาน	30
2.30 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบผสมขนาน - ขนาน	32
2.31 ไดอะแกรมเส้นเดียวของชุดเชยแรงดันแบบขนาน	33
2.32 เฟสเซอร์แสดงกระบวนการชดเชยแรงดันที่กริด	33
2.33 วงจรการต่อชุดชดเชยแรงดันขนานเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า	34
2.34 วงจรเทียบเคียงการชดเชยแรงดันเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า	34
2.35 โครงสร้างและการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าของ D-STATCOM	36
2.36 วิธีการรีเคอร์ซีฟดีเอฟที	37
3.1 โครงสร้างของระบบควบคุม D-STATCOM	41
3.2 วงจรแหล่งจ่ายตัวแปลงผันแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสแบบพีดับบลิวเอ็ม	43
3.3 วงจรเทียบเคียงแหล่งจ่ายตัวแปลงผันแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส กับแรงดันในระบบ	43
3.4 เวกเตอร์แสดงความสัมพันธ์การแปลงแกนนิ่ง และแกนหมุน	44
3.5 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์คอนเวอร์เตอร์เข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า	47
3.6 วงจรสมมูลของวงจรกรองที่ใช้ในการออกแบบ	48
3.7 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรอง	51
3.8 แรงดันสเปซเวกเตอร์ขณะที่แรงดัน 3 เฟสมีความสมมาตร	52
3.9 แรงดันสเปซเวกเตอร์ขณะที่แรงดัน 3 เฟสมีความไม่สมมาตร	52
3.10 ลักษณะของแรงดันสเปซเวกเตอร์ของแรงดันบนระนาบ α-β ขณะแรงดันสมมาตร	52
3.11 ลักษณะของแรงดันสเปซเวกเตอร์ของแรงดันบนระนาบ α-β ขณะไม่สมมาตร	53
3.12 ลักษณะของแรงดันสเปซเวกเตอร์ของแรงดันขณะไม่สมมาตรพิจารณาขนาดแรงดัน	54
3.13 ลักษณะของแรงดันสเปซเวกเตอร์ของการฉีดค่ากระแสเพื่อรักษาแรงดันให้สมมาตร	54
3.14 ขนาดของแรงดันตกชั่วขณะแบบสมมาตรและไม่สมมาตร	55
3.15 มุมเฟสของแรงดันตกชั่วขณะแบบสมมาตรและไม่สมมาตร	55
3.16 วิธีการรีเคอร์ซีฟดีเอฟที	56
3.17 การต่อวงจรทดสอบการแยกลำดับแรงดัน abc เป็นแรงดันในรูปของแกน dqo	57
3.18 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเมื่อเกิดสภาวะความไม่สมมาตรขึ้นในระบบ	58

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.19 รูปคลื่นแรงดันในแกนนิ่ง dqo	58
3.20 ผลการทดสอบชุดแยกการลำดับแรงดันบวกและลบ	59
3.21 ผลการจำลององค์ประกอบแรงดัน *dq* ลำดับบวก และลบ	60
3.22 แบบแผนผังของการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน สำหรับ ดี- สแตทคอม	61
3.23 นำสัญญาณที่แยกการลำดับเรียบร้อยต่อเข้ากับส่วนการควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	61
3.24 แบบจำลองชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน	62
3.25 ผลการทดสอบการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน	62
3.26 ระบบควบคุมแยกการเชื่อมร่วม	63
3.27 ระบบควบคุมแยกการเชื่อมร่วมที่มีวงรอบควบคุมกระแส	63
3.28 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมกระแสในแกน d	64
3.29 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมกระแสในแกน q	64
3.30 แผนผังระบบควบคุมกระแสที่ใช้ในการออกแบบ	65
3.31 แผนภาพโบดของระบบควบคุมกระแสวงรอบปิดที่ได้ทำการออกแบบ	67
3.32 เวกเตอร์แสดงความสัมพันธ์ของการแยกการเชื่อมร่วมทางเวกเตอร์	67
3.33 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของชุดแยกการเชื่อมร่วม	68
3.34 ผลการทดสอบชุดควบคุมกระแส	68
3.35 แบบจำลองการนำชุดแยกการเชื่อมร่วมเข้ากับชุดแบบจำลองคอนเวอร์เตอร์	69
3.36 แบบแผนผังวงรอบการควบคุมบัสแรงดันไฟตรง	70
3.37 แผนภาพโบดของระบบควบคุมควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ได้ทำการออกแบบ	71
3.38 วงจรการจำลองการควบคุม D-STATCOM	72
3.39 วงจรการจำลองของระบบ D-STATCOM ใน MATLAB/SIMULINK	73
3.40 ผลการจำลองแรงดันในระบบเมื่อเกิดความผิดพร่องแบบ 1 เฟสลงกราวด์	74
3.41 ผลการจำลองแรงดันในระบบ ของแกน dqลำดับบวกและลบ กรณีแรงดันตกที่ 20%	75
3.42 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันเมื่อในระบบเกิดความผิดพร่องแบบ 1 เฟสลง	76
3.43 ผลการชดเชยแรงดันในแกน dq เมื่อเกิดความผิดพร่องแบบ 1 เฟสลงกราวด์	76
3.44 ผลการชดเชยกระแสเข้าในระบบขณะเกิดความผิดพร่องที่ 1 เฟสลงกราวด์	77
3.45 ผลของการจ่ายแรงดันที่บัสไฟฟ้ากระแสตรง	77
3.46 ผลการจำลองแรงดันเมื่อในระบบเกิดความผิดพร่องแบบ 2 เฟสลงกราวด์	78
3.47 ผลการจำลองแรงดันในระบบ ของแกน dqลำดับบวกและลบ กรณีแรงดันตกที่ 30%	78

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.48 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันเมื่อในระบบเกิดความผิดพร่องแบบ 2 เฟสลงกราวด์	79
3.49 ผลการชดเชยแรงดันในแกน dq เมื่อเกิดความผิดพร่องแบบ 2 เฟสลงกราวด์	80
3.50 ผลการชดเชยกระแสเข้าในระบบขณะเกิดความผิดพร่องที่ 2 เฟสลงกราวด์	80
3.51 ผลของการจ่ายแรงดันที่บัสไฟฟ้ากระแสตรง	81
3.52 ผลการจำลองแรงดันในระบบเมื่อเกิดความผิดพร่องแบบ 1 เฟสลง	81
3.53 ผลการจำลองแรงดันในระบบ ของแกน dqลำดับบวกและลบ กรณีแรงดันตกที่ 25%	81
3.54 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันเมื่อในระบบเกิดความผิดพร่องแบบ 2 เฟส	82
3.55 ผลการชดเชยแรงดันในแกน dq เมื่อเกิดความผิดพร่องแบบ 2 เฟส	83
3.56 ผลการชดเชยกระแสเข้าในระบบขณะเกิดความผิดพร่องที่ 2 เฟส	83
3.57 ผลของการจ่ายแรงดันที่บัสไฟฟ้ากระแสตรง	83
4.1 ชุดควบคุมในระบบ D-STATCOM	87
4.2 วงจรตัวตรวจจับแรงดันกระแสสลับ	88
4.3 ชุดวงจรตัวตรวจจับแรงดันกระแสสลับ	89
4.4 ตำแหน่งปรับแรงดันอ้างอิง	89
4.5 ค่าแรงดันอ้างอิงของตัวตรวจจับแรงดันที่ 1.5โวลท์	90
4.6 แสดงค่าแรงดัน Peak To Peakของ Input ทั้ง 3 เฟส	90
4.7 ตำแหน่งการปรับ Ratio	91
4.8 แสดงค่าแรงดัน Peak To Peakของ Output ทั้ง 3 เฟส	91
4.9 ตัวปรับระดับสัญญาณ	92
4.10 วงจรตัวปรับระดับสัญญาณ	93
4.11 แสดงการต่อชุด IPM Interface	94
4.12 แสดงขั้วInput และ Output ของ IPM Interface	94
4.13 แสดงขอบสัญญาณของ ขั้ว Up	95
4.14 แสดงขอบสัญญาณของ ขั้ว Vp	95
4.15 แสดงขอบสัญญาณของ ขั้ว Wp	95
4.16 แสดงขอบสัญญาณของ ขั้ว Un	96
4.17 แสดงขอบสัญญาณของ ขั้ว Vn	96
4.18 แสดงขอบสัญญาณของ ขั้ว Wn	96
4.19 วงจรภายในของตัว IPM	98

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.20 โครงสร้างภายนอกของ IPM	99
4.21 ลักษณะทางกายภาพ IPM	99
4.22 แสดงการต่อชุด IPM เพื่อทดสอบระบบป้องกัน	100
4.23 แสดงสัญญาณการทำงานของระบบป้องกันของ IPM	100
4.24 แสดงการต่อชุด IPM เพื่อทดสอบ Death Time	101
4.25 แสดงสัญญาณ Death Timeของ Up และ Un	101
4.26 แสดงสัญญาณ Death Timeของ Vp และ Vn	102
4.27 แสดงสัญญาณ Death Timeของ Wp และ Wn	102
4.28 ชุด Power Module	103
4.29 ชุดฟิลเตอร์	103
4.30 การทดสอบ Power Module	103
4.31 วงจรตัวตรวจจับแรงดันกระแสตรง	104
4.32 ตัวตรวจจับแรงดันกระแสตรง	105
4.33 แสดงการทดสอบวงจร DC Bus	105
4.34 แสดงค่า V_{dc} ในวงจร DC Bus	106
4.35 แสดงค่า V_{dqp} และ $I_{AlphaBeta}$ ในวงจร DC Bus	106
4.36 แสดงค่า V_{dc} V_{dqp} $I_{AlphaBeta}$ ของ DSP	106
4.37 ชุดเปรียบเทียบสัญญาณโปรแกรมกับ DSP	107
4.38 วงจรตัวตรวจจับกระแส	108
4.39 ชุดวงจรการตรวจจับกระแส	108
4.40 ตำแหน่งการปรับแรงดันอ้างอิง	109
4.41 ค่าแรงดันอ้างอิงของตัวตรวจจับแรงดันที่ 1.5โวลต์	109
4.42 ตำแหน่งการปรับ Rratio	110
4.43 แสดงค่าแรงดันOutputในเฟส A	110
4.44 แสดงค่าแรงดันOutputในเฟส B	111
4.45 แสดงค่าแรงดันOutputในเฟส C	111
4.46 ชุดวงจรแหล่งจ่ายแรงดัน +/- 15 โวลต์	112
4.47 แหล่งจ่ายแรงดัน +/- 15 โวลต์	112
4.48 ชุดวงจรแหล่งจ่ายแรงดัน + 15 โวลต์	113

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.49 แหล่งจ่ายแรงดัน + 15 โวลต์	113
4.50 การชดเชยแรงดันเข้าระบบของ D-STATCOM	116
4.51 สัญญาณก่อนการชดเชยแรงดัน	117
4.52 DC Bus charger	117
4.53 สัญญาณหลังการชดเชยแรงดันที่ระบบ 44.8 Vrms	118
4.54 สัญญาณหลังการชดเชยแรงดันที่ระบบ 43 Vrms	118
4.55 สัญญาณหลังการชดเชยแรงดันที่ระบบ 52 Vrms	119
4.56 สัญญาณหลังการชดเชยแรงดันที่ระบบ 48 Vrms	119
5.1 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ D-STATCO	122
5.2 การทดลองการชดเชยแรงดันเข้ากับระบบโดยมี Variac 3 Phase เป็นแหล่งจ่าย	123
5.3 การทดลองการชดเชยแรงดันเข้ากับระบบ Wind Turbine	123
5.4 สัญญาณก่อนการชดเชยแรงดันที่ระบบ 48Vrms	124
5.5 สัญญาณหลังการชดเชยแรงดันที่ระบบ48Vrmsเมื่อเกิดแรงดันตก	124
5.6 สัญญาณหลังการชดเชยแรงดันที่ระบบ48Vrmsสภาวะแรงดันปกติ	125
5.7 สัญญาณหลังการชดเชยแรงดันที่ระบบ48Vrmsเมื่อเกิดแรงดันเกิน	125
5.8 สัญญาณก่อนการชดเชยแรงดันที่ระบบ 80 Vrms	127
5.9 สัญญาณหลังการชดเชยแรงดันที่ระบบ80Vrmsเมื่อเกิดแรงดันตก	127
5.10 สัญญาณหลังการชดเชยแรงดันที่ระบบ80Vrmsสภาวะแรงดันปกติ	128
5.11 สัญญาณหลังการชดเชยแรงดันที่ระบบ80Vrmsเมื่อเกิดแรงดันเกิน	128
5.12 สัญญาณก่อนการชดเชยแรงดันที่ระบบ 100Vrms	130
5.13 สัญญาณหลังการชดเชยแรงดันที่ระบบ100Vrmsเมื่อเกิดแรงดันตก	130
5.14 สัญญาณหลังการชดเชยแรงดันที่ระบบ100Vrmsสภาวะแรงดันปกติ	131
5.15 สัญญาณหลังการชดเชยแรงดันที่ระบบ100Vrmsเมื่อเกิดแรงดันเกิน	131
5.16 สัญญาณก่อนการชดชยแรงดันที่ระบบ 120Vrms	133
5.17 สัญญาณหลังการชดเชยแรงดันที่ระบบ120Vrmsเมื่อเกิดแรงดันตก	133
5.18 สัญญาณหลังการชดเชยแรงดันที่ระบบ120Vrmsสภาวะแรงดันปกติ	134
5.19 สัญญาณหลังการชดเชยแรงดันที่ระบบ120Vrmsเมื่อเกิดแรงดันเกิน	134
5.20 แรงดันเฟสเมื่อเกิดแรงดันตกของระบบ Wind Turbine ก่อนการชดเชย	137

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่		หน้า
5.21	แรงดันเฟสเมื่อเกิดแรงดันตกของระบบ Wind Turbine หลังการชดเชย	137
5.22	แรงดันเฟส-เฟส เมื่อเกิดแรงดันตก โดยที่แรงดันปกติเป็น 48Vrms	137
5.23	แรงดันเฟสเมื่อเกิดแรงดันเกินของระบบ Wind Turbine ก่อนการชดเชย	138
5.24	แรงดันเฟสเมื่อเกิดแรงดันเกินของระบบ Wind Turbine หลังการชดเชย	138
5.25	แรงดันเฟส-เฟส เมื่อเกิดแรงดันเกิน โดยที่แรงดันปกติเป็น 48Vrms	138

สารบัญแผนภูมิ

แผนภูมิที่	หน้า
3.1 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม	56