

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการรูปประกอบ	ฉ
สารบัญตาราง	ฅ
รายการสัญลักษณ์	ฉ
บทที่ 1 ปัญหาและที่มาของงานวิจัย	
1.1 ความสำคัญปัญหา และที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง	2
บทที่ 2 หลักการควบคุม	
2.1 แบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	3
2.1.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในรูปสเปซเวกเตอร์	3
2.1.2 การย้ายแกนอ้างอิงของสเปซเวกเตอร์	5
2.1.3 แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ ($\alpha - \beta$)	5
2.1.4 แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์ ($d - q$)	7

	๙
2.2 ทฤษฎีการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม	9
2.3 สเปสเวกเตอร์พีดับบลิวเอ็ม (Voltage Source Space Vector PWM)	12
2.3.1 วิธีการสร้างสัญญาณขับนำแบบ Space Vector Pulse-Width-Modulation Inverters	13
2.3.2 รูปแบบทั่วไปของการสวิตช์	14
บทที่ 3 การจำลองระบบควบคุม	
3.1 การจำลองการทำงานระบบควบคุม	16
3.1.1 ระบบการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม	16
3.1.2 Inverse Transformation 2/3	18
3.1.3 สเปสเวกเตอร์พัลส์วิทมอดดูเลชัน	19
3.2 บล็อกไดอะแกรมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	22
3.3 ผลการจำลองการทำงาน	23
3.3.1 ผลการจำลองที่สภาวะไร้โหลด	23
3.3.2 ผลการจำลองการทำงานที่สภาวะจ่ายโหลด	30
3.3.3 แรงดันอินเวอร์เตอร์	38
บทที่ 4 สถาปัตยกรรมของ DSP TMS320F243	
4.1 คุณสมบัติเด่นของ TMS320F243	43
4.2 หน่วยประมวลผลกลาง	44
4.3 การจัดฝั่งหน่วยความจำ	49
4.4 อุปกรณ์รอบข้างของหน่วยความจำ	50
4.5 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของ DSP TMS320F243	55

บทที่ 5 การเขียนโปรแกรม

5.1 สมการดิสมคริต (Discrete time equation)	54
5.2 ค่าหน่วย (Per-Unit Value)	57
5.3 ค่าเบส (Base Value)	58
5.4 ขั้นตอนการทำงาน โปรแกรม	59
5.5 การเขียน โปรแกรมตรวจจับความเร็ว	61
5.6 การรับค่าสัญญาณอนาลอก	62
5.7 การสร้างสัญญาณขับนำ	63
5.8 ตัวอย่างโปรแกรม	66

บทที่ 6 โครงสร้างฮาร์ดแวร์และผลการทดลอง

6.1 ส่วนของวงจรจริง	69
6.1.1 วงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit)	69
6.1.2 ดีเอสพี (TMS320F243)	70
6.1.3 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส (Three-phase Inverter)	73
6.1.4 วงจรไอโซเลต (Isolated Circuit)	75
6.1.5 วงจรขับนำอินเวอร์เตอร์ (Gate-drive Circuit)	77
6.1.6 คอมพิวเตอร์ (Computer)	78
6.1.7 ตัวตรวจจับความเร็ว (Encoders)	79
6.1.8 แหล่งจ่ายไฟ (Power supply)	80
6.1.9 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	81
6.1.9 เครื่องมือวัดค่า	81

6.2 ผลการทดลอง

6.2.1 สัญญาณขั้วนำมอสเฟต	82
6.2.2 ผลการทดลองการแก้การประวิงเวลา	83
6.2.3 แรงดันอินเวอร์เตอร์สภาวะไร้โหลด	84
6.2.4 การทดสอบกระแสที่สภาวะไร้โหลด	88
6.2.5 การทดสอบกระแสที่สภาวะมีโหลด	89

บทที่ 7 สรุปผลการทดลอง 94

เอกสารอ้างอิง 95

ภาคผนวก ก. ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 97

ภาคผนวก ข. มอสเฟต 99

ภาคผนวก ค. แผนการดำเนินการ โครงการวิจัย 101

ประวัติผู้วิจัย 102

รายการรูปประกอบ

รูปที่ 2.1 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	4
รูปที่ 2.2 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 เฟส	5
รูปที่ 2.3 ภาพรวมระบบการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม	10
รูปที่ 2.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมภายในของส่วนการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม	11
รูปที่ 2.5 แสดงขั้นตอนการหาแรงดันที่จะจ่ายให้กับมอเตอร์	12
รูปที่ 2.6 แสดงอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน	12
รูปที่ 2.7 แสดงสัญลักษณ์สวิทช์และสัญลักษณ์มอสเฟต	13
รูปที่ 2.8 แสดงตำแหน่งของเวกเตอร์แรงดัน	13
รูปที่ 2.9 รูปประกอบการพิจารณาหาแรงดันที่ vector 1	15
รูปที่ 3.1 แสดงระบบโดยรวมของ Decoupling Control	16
รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างภายในของส่วน Decoupling Control	17
รูปที่ 3.3 การแปลงแกนจาก 2 เป็น 3 เฟส	18
รูปที่ 3.4 แสดง Block Diagram SVPWM	19
รูปที่ 3.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมหาค่า $V_{UN}^*, V_{VN}^*, V_{WN}^*$	20
รูปที่ 3.6 แสดงค่าแรงดัน $\bar{V}_{U0}, \bar{V}_{V0}, \bar{V}_{W0}$	21
รูปที่ 3.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมการเปรียบเทียบสัญญาณสามเหลี่ยม	22
รูปที่ 3.8 แสดงโครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	22

รูปที่ 3.9 ความเร็วมอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลดที่ความเร็วโรเตอร์ 300 rpm	23
รูปที่ 3.10 กระแสเดเตอร์ที่สภาวะไร้โหลดที่ความเร็วโรเตอร์ 300 rpm	24
รูปที่ 3.11 ความเร็วสภาวะไร้โหลดที่ความเร็วโรเตอร์ 700 rpm	25
รูปที่ 3.12 กระแสเดเตอร์ที่สภาวะไร้โหลดที่ความเร็วโรเตอร์ 700 rpm	25
รูปที่ 3.13 ความเร็วมอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลดที่ความเร็วมอเตอร์ 1000 rpm	26
รูปที่ 3.14 กระแสเดเตอร์ที่สภาวะไร้โหลดที่ความเร็วมอเตอร์ 1000 rpm	27
รูปที่ 3.15 กระแสเดเตอร์ที่สภาวะไร้โหลดที่ความเร็วมอเตอร์ 1000 rpm	27
รูปที่ 3.16 ความเร็วมอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลดที่ความเร็วโรเตอร์ 1300 rpm	28
รูปที่ 3.17 กระแสเดเตอร์ที่สภาวะไร้โหลดที่ความเร็วมอเตอร์ 1300 rpm	29
รูปที่ 3.18 กระแสเดเตอร์ที่สภาวะไร้โหลดที่ความเร็วโรเตอร์ 1300 rpm	29
รูปที่ 3.19 ความเร็วมอเตอร์ขณะจ่ายโหลดที่ความเร็วโรเตอร์ $N_m = 300rpm$	30
รูปที่ 3.20 กระแสเดเตอร์ที่สภาวะจ่ายโหลดที่ความเร็วมอเตอร์ 300 rpm	31
รูปที่ 3.21 กระแสแกนคิว (isq) ขณะจ่ายโหลดที่ความเร็วมอเตอร์ $N_m = 300rpm$	31
รูปที่ 3.22 ความเร็วมอเตอร์ขณะจ่ายโหลดที่ความเร็วโรเตอร์ $N_m = 700rpm$	32
รูปที่ 3.23 กระแสเดเตอร์ที่สภาวะจ่ายโหลดที่ความเร็วมอเตอร์ 700 rpm	33
รูปที่ 3.24 กระแสแกนคิว (isq) ขณะจ่ายโหลดที่ความเร็วมอเตอร์ $N_m = 700rpm$	33
รูปที่ 3.25 ความเร็วมอเตอร์ขณะจ่ายโหลดที่ความเร็วโรเตอร์ $N_m = 1000rpm$	34
รูปที่ 3.26 กระแสเดเตอร์ที่สภาวะจ่ายโหลดที่ความเร็วมอเตอร์ $N_m = 1000rpm$	35
รูปที่ 3.27 กระแสแกนคิว (isq) ขณะจ่ายโหลดที่ความเร็วมอเตอร์ $N_m = 1000rpm$	35
รูปที่ 3.28 ความเร็วมอเตอร์ขณะจ่ายโหลดที่ความเร็วโรเตอร์ $N_m = 1300rpm$	36

รูปที่ 3.29	กระแสเตเตอร์สภาวะจ่ายโหลดที่ความเร็วมอเตอร์ $N_m = 1300rpm$	37
รูปที่ 3.30	กระแสแกนทวิ (isq) ขณะจ่าย โหลดที่ความเร็วมอเตอร์ $N_m = 1300rpm$	37
รูปที่ 3.31	แรงดันไฟตรงของ V_{n0}	38
รูปที่ 3.32	แรงดันไฟตรงของเฟส u , V_{u0}	39
รูปที่ 3.33	แรงดันไฟตรงระหว่างเฟส u กับจุด n	39
รูปที่ 3.34	แรงดันไฟตรงระหว่างเฟส v กับจุด n	40
รูปที่ 3.35	แรงดันไฟตรงระหว่างเฟส w กับจุด n	40
รูปที่ 4.1	แสดงส่วนต่างของ DSP TMS320F243	43
รูปที่ 4.2	แสดงหน่วยประมวลผลของ	45
รูปที่ 4.3	แสดงโครงสร้างหน่วยประมวลผล (CPU)	46
รูปที่ 4.4	แสดงส่วนการคูณ	48
รูปที่ 4.5	แสดงส่วนประกอบของ ARAU	48
รูปที่ 4.6	แสดงการจัดผังของ DSP รุ่น TMS320F243	50
รูปที่ 4.7	แสดงตำแหน่งอุปกรณ์รอบข้างของ DSP	51
รูปที่ 4.8	แสดงส่วนของบอร์ด DSP รุ่น TMS320F243	51
รูปที่ 4.9	แสดงส่วนประกอบต่างๆของบอร์ด DSP ตามตารางที่ 4.1	52
รูปที่ 5.1	แสดงรูป DSP รุ่น TMS 320F243	54
รูปที่ 5.2	แสดงบล็อกการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม	55
รูปที่ 5.3	แสดงผังการทำงานหลักของ โปรแกรม	60
รูปที่ 5.4	แสดงระบบการตรวจจับความเร็วจาก Incremental Rotary Encoder	61

รูปที่ 5.5 แสดงสัญญาณ QEP0 และ QEP1	61
รูปที่ 5.6 แสดงการวัดค่าแรงดัน DC BUS เข้า ADC ของ DSP TMS320F243	62
รูปที่ 5.7 การสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์	63
รูปที่ 5.8 แสดงเชกเตอร์ในการสวิตช์	64
รูปที่ 5.9 แสดงการสร้างสัญญาณ PWM	64
รูปที่ 5.10 สัญญาณเปรียบเทียบ (Compare) แบบ Symmetric waveform.	65
รูปที่ 5.11 ตัวอย่างการเซตค่า COMCON และ ACTR	66
รูปที่ 5.12 แสดงการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาแอสเซมบลี	67
รูปที่ 6.1 แสดงโครงสร้างโดยรวมของระบบการควบคุม	68
รูปที่ 6.2 แสดงส่วนประกอบจริงของระบบการควบคุม	68
รูปที่ 6.3 แสดงวงจรเรียงกระแส	69
รูปที่ 6.4 แสดงโครงสร้างจริงของ Rectifier	70
รูปที่ 6.5 แสดงบอร์ด DSP รุ่น TMS320F243	71
รูปที่ 6.6 แสดงตำแหน่งขา DSP TMS320F243	71
รูปที่ 6.7 แสดงการเชื่อมต่อ DSP	72
รูปที่ 6.8 แสดงโครงสร้างจริงของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	73
รูปที่ 6.9 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	73
รูปที่ 6.10 แสดงตัวมอสเฟส	74
รูปที่ 6.11 แสดงวงจรการทำงานอินเวอร์เตอร์	74
รูปที่ 6.12 การทำงานอินเวอร์เตอร์ที่ตำแหน่ง 001	75

รูปที่ 6.13	วงจร Gate drive	76
รูปที่ 6.14	ภาพจริงวงจร Gate drive	76
รูปที่ 6.15	แสดงการต่อวงจรระหว่างเกตไดร์กับมอเตอร์	77
รูปที่ 6.16	แสดงคอมพิวเตอรืต่อเชื่อมกับดีเอสพี	77
รูปที่ 6.17	แสดงการต่อเอ็นโคเดอรืกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	78
รูปที่ 6.18	แสดงรูปจริงของ encoder	78
รูปที่ 6.19	แสดงส่วนของการแปลงค่าความเร็วใน TMS320F243	79
รูปที่ 6.20	แสดงสัญญาณพัลส์ที่ส่งออกจาก encoder	79
รูปที่ 6.21	การแปลงรับค่าและการแปลงค่าความเร็วจาก QEP	79
รูปที่ 6.22	แสดงส่วนของการตรวจจับสัญญาณไฟตรง	80
รูปที่ 6.23	ภาคจ่ายไฟให้กับวงจรเกตไดร์	81
รูปที่ 6.24	แสดงภาพจริงมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	81
รูปที่ 6.25	แสดงการใช้ฮอสซิลโลสโคปวัดค่า	82
รูปที่ 6.26	สัญญาณขับนำ PWM ขับนำ Q1 และ Q2	82
รูปที่ 6.27	สัญญาณขับนำ PWM ขับนำ Q3 และ Q4	83
รูปที่ 6.28	สัญญาณขับนำ PWM ขับนำ Q5 และ Q6	83
รูปที่ 6.29	สัญญาณขับนำที่มีการแก้การประวิงเวลา	84
รูปที่ 6.30	แรงดัน V_{un} ที่จ่ายให้กับมอเตอร์	85
รูปที่ 6.31	แรงดัน V_{un} ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ที่ $M = 500$ ms	85
รูปที่ 6.32	แรงดัน V_{vn} ที่จ่ายให้กับมอเตอร์	86

	๗
รูปที่ 6.33 แรงดัน V_{wn} ที่จ่ายให้กับมอเตอร์	86
รูปที่ 6.34 แรงดัน V_{wn} ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ที่ $M = 500$ ms	87
รูปที่ 6.35 แรงดันระหว่าง V_{un} และ V_{wn} ที่จ่ายให้กับมอเตอร์	87
รูปที่ 6.36 แรงดัน V_{uv} ที่จ่ายให้กับมอเตอร์	88
รูปที่ 6.37 แรงดัน V_{vw} ที่จ่ายให้กับมอเตอร์	88
รูปที่ 6.38 กระแส i_u ที่จ่ายให้กับมอเตอร์	89
รูปที่ 6.39 กระแส i_v ที่จ่ายให้กับมอเตอร์	89
รูปที่ 6.40 วงจรการต่อโหลด	90
รูปที่ 6.41 การต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเป็นโหลด	90
รูปที่ 6.42 ค่ากระแสเดเตอร์ i_u	91
รูปที่ 6.43 ค่ากระแสเดเตอร์ i_u ที่วัดด้วยคิิจิตอลมิเตอร์	91
รูปที่ 6.44 แสดงค่าแรงดัน V_{uv}	91
รูปที่ 6.45 แสดงค่าแรงดัน V_{uv} เมื่อขยายความถี่	92
รูปที่ 6.46 ค่าความเร็วจริงที่ $N_m = 500$ rpm	92
รูปที่ 6.47 ค่าความเร็วจริงที่ $N_m = 1000$ rpm	93
รูปที่ 6.48 ค่าความเร็วจริงที่ $N_m = 1500$ rpm	93

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 แสดงตำแหน่งของจุดเชื่อมต่อ	52
ตารางที่ 4.2 แสดงตำแหน่งขาตามพอร์ตที่ P1	52
ตารางที่ 4.3 แสดงตำแหน่งขาต่างตามพอร์ตที่ P2	53
ตารางที่ 4.4 แสดงตำแหน่งขาต่างๆตามพอร์ตที่ P4	53
ตารางที่ 6.1 แสดงรายละเอียดตำแหน่งขา DSP TMS320F243	72
ตารางที่ 6.2 แสดงตำแหน่งการสวิตช์	75
ตารางที่ ก1 ค่าพารามิเตอร์	98
ตารางที่ ค1 แผนการดำเนินการ โครงการวิจัย	101

รายการสัญลักษณ์

- v_{su} = แรงดันขดลวดสเตเตอร์เฟส u
 v_{sv} = แรงดันขดลวดสเตเตอร์เฟส v
 v_{sw} = แรงดันขดลวดสเตเตอร์เฟส w
 i_{su} = กระแสขดลวดสเตเตอร์เฟส u
 i_{sv} = กระแสขดลวดสเตเตอร์เฟส v
 i_{sw} = กระแสขดลวดสเตเตอร์เฟส w
 $v_{s\alpha}$ = แรงดันของขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ α
 $v_{s\beta}$ = แรงดันของขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ β
 v_{sd} = แรงดันของขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์ d
 v_{sq} = แรงดันของขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์ q
 $i_{r\alpha}$ = กระแสของขดลวดโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ α
 $v_{s\alpha}, v_{s\beta}$ = แรงดันของขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ α และ β ตามลำดับ
 v_{sd}, v_{sq} = แรงดันของขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์ d และ q ตามลำดับ
 u_{sd}, u_{sq} = แรงดันสเตเตอร์ที่ได้จากตัวควบคุมอิสระบนแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์ d และ q ตามลำดับ
 \vec{i}_s = เวกเตอร์ของกระแสสเตเตอร์
 i_{sd}, i_{sq} = กระแสของขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ d และ q ตามลำดับ
 $i_{r\alpha}, i_{r\beta}$ = กระแสของขดลวดโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ α และ β ตามลำดับ

- i_{rd}, i_{rq} = กระแสของขดลวดโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ d และ q ตามลำดับ
- i_{mR} = กระแสกระตุ้นโรเตอร์ฟลักซ์
- $\lambda_{s\alpha}, \lambda_{s\beta}$ = สเตเตอร์ฟลักซ์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ α และ β ตามลำดับ
- $\lambda_{r\alpha}, \lambda_{r\beta}$ = โรเตอร์ฟลักซ์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ α และ β ตามลำดับ
- \vec{i}_s = เวกเตอร์ของกระแสสเตเตอร์
- i_{sd} = กระแสในแกน d ที่อยู่บนแกนอ้างอิงโรเตอร์
- i_{sq} = กระแสคำสั่งในแกน q ที่อยู่บนแกนอ้างอิงโรเตอร์
- θ_m = ตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์
- ρ = ตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ฟลักซ์
- ω_m = ความเร็วโรเตอร์
- ω_{mR} = ความถี่โรเตอร์ฟลักซ์
- ρ = ตำแหน่งของโรเตอร์ฟลักซ์
- T_m = แรงบิดของมอเตอร์
- T_L = แรงบิดของโหลด
- P = จำนวนคู่ขั้วของมอเตอร์
- R_s = ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
- R_r = ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์
- L_s = ความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์
- L_r = ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์
- M = ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์

σL_s = ความเหนียวนำร่วมขดลวดสเตเตอร์

k_p = อัตราขยายปรับตัวเชิงสัดส่วน

k_i = อัตราขยายปรับตัวแบบอินทิเกรต

s = ใช้แทนตัวปฏิบัติการอนุพันธ์

T_s = เวลาในการสวิตช์

f_s = ความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์