



รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง ภาษาไทย: ระบบคอนเวอร์เตอร์สำหรับชิงโครนัสเยนเนอเรเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรเพื่อใช้งานกับกังหันลม

ภาษาอังกฤษ: Wind Turbine Converter System for Permanent Magnet Synchronous Generator

คณะผู้วิจัย

นายสรรพพล คุ่มทรัพย์

นายชาญฤทธิ์ ธาราลันตีสุข

นายบุญช่วย เจริญผล

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2555

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

หัวข้อวิจัย	ระบบคอนเวอร์เตอร์สำหรับซิงโครไนส์อินเวอร์เตอร์แบบแม่เหล็กถาวร เพื่อใช้งานกับกังหันลม
ผู้วิจัย	นายสรรรพ คุ้มทรัพย์ นายชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข นายบุญช่วย เจริญผล
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีงบประมาณ	2555

บทคัดย่อ

ระบบคอนเวอร์เตอร์สำหรับซิงโครไนส์อินเวอร์เตอร์แบบแม่เหล็กถาวร ออกแบบและสร้างเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 กิโลวัตต์ เพื่อทดสอบเครื่องกำเนิดซิงโครไนส์แบบแม่เหล็กถาวรที่ความเร็วลมต่างๆ และสร้างชุดวงจรดิจิทัลคอนเวอร์เตอร์แบบอินเตอร์ลีฟและอัตราขยายแรงดันสูง เพื่อควบคุมแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดซิงโครไนส์แบบแม่เหล็กถาวร การทดลองจะนำแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดซิงโครไนส์ผ่านวงจรเรียงกระแสให้เป็นกระแสตรงและนำไปจ่ายให้กับวงจรดิจิทัลคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์เพื่อยกแรงดันแรงดันและจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันหนึ่งเฟสเพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 V 50 Hz เพื่อจ่ายให้กับโหลดแบบแยกอิสระ และแบบต่อเข้าระบบจำหน่าย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 หลักการของพลังงานลม	5
2.2 ประเภทของกังหันลม	8
2.3 ประเภทของการจำกัดพลังงาน	9
2.4 ช่วงการทำงานของกังหันลม	12
2.5 อินเวอร์เตอร์ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์	16
2.6 การควบคุมแรงบิดโดยอินเวอร์เตอร์	19
2.7 ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย	20
2.8 วงจรบูสดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน	28
2.9 ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูง	32
บทที่ 3 การออกแบบงานวิจัย	
3.1 เครื่องจำลองกังหันลมสำหรับเซนเซอร์เรเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร	42
3.2 วงจรบูสดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล	55
3.3 การออกแบบวงจรกำลังวงจรบูสดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน	56
3.4 การออกแบบวงจรควบคุมของวงจรบูสดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน	61
3.5 การออกแบบวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูง	71
3.6 การออกแบบอินเวอร์เตอร์แบบหนึ่งเฟสแบบต่อเข้าระบบจำหน่าย	72

สารบัญ (ต่อ)

3.7 การออกแบบภาคควบคุมด้วย DSP	81
บทที่ 4 ผลการวิจัย	
4.1 การทดลองเครื่องจำลองกักกันลมกับโปรแกรม Matlab/Simulink	86
4.2 การจำลองการทำงานของวงจรบูตส์ตีชีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล	97
4.3 ผลการจำลองการทำงานของบูตส์ตีชีคอนเวอร์เตอร์แบบขนานด้วยเทคนิคอินเตอร์ลิฟ	100
4.4 การทดสอบวงจรบูตส์ตีชีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล	102
4.5 ทดสอบวงจรบูตส์ตีชีคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูง	109
4.6 ทดสอบหากำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดเชิงโรตัสแบบแม่เหล็กถาวรในแต่ ละช่วงความเร็ว	119
4.7 ทดสอบเครื่องกำเนิดเชิงโรตัสแบบแม่เหล็กถาวรขณะต่อเข้าวงจรบูตส์ตีชี คอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูง	123
4.8 การทดสอบอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบต่อเข้าระบบจำหน่ายด้วย DSP เบอร์ TMS320F2808	133
4.9 การเชื่อมต่อระบบเข้ากับอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบต่อเข้าระบบจำหน่ายด้วย DSP เบอร์ TMS320F2808	135
4.10 ผลการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ขณะจ่ายโหลดอิสระ	137
4.11 ผลการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ขณะต่อเข้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า	144
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลที่ได้จากการทดลอง	147
5.2 ปัญหาที่พบในงานวิจัย	147
5.3 ข้อเสนอแนะ	147
บรรณานุกรม	148
ภาคผนวก ก. บทความวิจัยการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า EECON35	149

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองกังหันลม	44
3.2 ข้อมูลของสถานที่ที่เก็บข้อมูลความเร็วลม	46
3.3 ค่าของ C_p เทียบกับ λ	52
3.4 ตัวแปรต่าง ๆ ของแกนเฟอโรไรต์เบอร์ EE55/55/21	58
4.1 พารามิเตอร์และข้อกำหนดที่ใช้จำลองการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน	98
4.2 ผลการทดสอบวงจรบัสคิซึทาคิชิคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล	103
4.3 ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล	105
4.4 ค่าความต้านทานที่นำมาเป็นโหลด 152 โอห์ม ที่ดีวีซีเคิล 50 %	111
4.5 ค่าความต้านทานที่นำมาเป็นโหลด 152 โอห์ม ดีวีซีเคิล 70 %	115
4.6 ค่าเอาต์พุตในแต่ละช่วงความเร็วในการหมุนของเครื่องกำเนิดเชิงโรนัส	120
4.7 ความต้านทานที่นำมาเป็นโหลด 152 โอห์ม ดีวีซีเคิล 50 %	124
4.8 ค่าความต้านทานที่นำมาเป็นโหลด 152 โอห์ม ดีวีซีเคิล 70 %	127
4.9 การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 10 โวลต์	130
4.10 การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเมื่อแรงดันอินพุต 20 โวลต์	131
4.11 การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพแรงดันอินพุตเท่ากับ 30 โวลต์	131
4.12 การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 40 โวลต์	132
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพกับค่าดีวีซีเคิล	133
4.14 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบอินเวอร์เตอร์	134
4.15 การกำหนด Port input ให้กับตัว Current Sensor และ Voltage Sensor	135
4.16 การกำหนด Port output ให้กับตัว DSP	135

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทยและตำแหน่งสถานีวัดพลังงานลม	2
1.2 ระบบคอนเวอร์เตอร์ในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมขนาดเล็กถึงกลาง	2
2.1 กำลังไฟฟ้าการติดตั้งรายปีและปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งแล้ว	5
2.2 ปริมาณการไหลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม	6
2.3 C_p vs. PU Exit Velocity	8
2.4 กังหันลมแนวนอนและแนวตั้ง	8
2.5 กระบวนการเกิดแรงบิดอากาศพลศาสตร์	10
2.6 การเกิดภาวะพาสซีฟสตอล	11
2.7 การเกิดภาวะแอ็คทีฟสตอล	12
2.8 การจำกัดพลังงานโดยการปรับมุมพิช	12
2.9 การทำงานของกังหันลม	13
2.10 กราฟการทำงานของกังหันลม	13
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p), สัมประสิทธิ์แรงบิด (C_T)	15
2.12 ความเร็วลมที่กระทำต่อกังหันลม	15
2.13 แนวแกนสนามแม่เหล็ก d และ q	16
2.14 แกนสนามแม่เหล็ก d และ q เปรียบเทียบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกับไฟฟ้ากระแสสลับ	17
2.15 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	18
2.16 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบการควบคุมแบบเวกเตอร์	19
2.17 การควบคุมแรงบิดโดยอินเวอร์เตอร์	20
2.18 ภาพอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กับตะวันออกเฉียงเหนือ	21
2.19 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย	22
2.20 วงจรบูตส์ตีชีฟคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน	28
2.21 วงจรสมมูลขณะสวิตช์ปิด	29
2.22 วงจรสมมูลขณะสวิตช์เปิด	30
2.23 วงจรตีชีฟคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูง	32
2.24 การเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันที่อุปกรณ์ต่างๆภายในวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด ที่ $D < 50$ เปอร์เซนต์	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

2.25 การเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันที่อุปกรณ์ต่างๆภายในวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด ที่ $D > 50$ เปอร์เซ็นต์	34
2.26 ความสัมพันธ์ของสัญญาณขับเคลื่อนกระแสและแรงดันต่อคาบเวลาที่ $D > 50$ เปอร์เซ็นต์	35
2.27 ความสัมพันธ์ของสัญญาณขับเคลื่อนกระแสและแรงดันต่อคาบเวลาที่ $D > 50$ เปอร์เซ็นต์	36
2.28 ทิศทางการไหลของกระแสของวงจรในขณะที่ยานำกระแส S_2 ไม่นำกระแส	37
2.29 ทิศทางการไหลของกระแสของวงจรในขณะที่ยานำกระแส S_1, S_2 พร้อมกัน	37
2.30 ทิศทางการไหลของกระแสของวงจรในขณะที่ยานำกระแส S_2 ไม่นำกระแส S_1 ไม่ทำกระแส	38
2.31 ทิศทางการไหลของกระแสของวงจรในขณะที่ยานำกระแส S_1, S_2 ไม่นำกระแส พร้อมกัน	38
2.32 เปรียบเทียบอัตราการขยายแรงดันของวงจรคอนเวอร์เตอร์	39
3.1 บล็อกไดอะแกรมระบบแปลงผันสำหรับกังหันลมแบบแม่เหล็กถาวร	41
3.2 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องจำลองกังหันลม	42
3.3 แผนที่ศักยภาพพลังงานลม กรุงเทพฯ รวมช่วงลมสงบ-เฉลี่ยรายปี	45
3.4 การวัดความเร็วลมที่วัดได้จริง	46
3.5 ข้อมูลผลการวัดความเร็วลมที่วัดได้จริง ณ.ชั้น11 ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์	47
3.6 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองความเร็วลมและการกำหนดค่าตัวแปร	48
3.7 กราฟความเร็วลมที่วัดได้จริงเขตกรุงเทพฯ	49
3.8 ความเร็วลมที่ได้จากแบบจำลองความเร็วลม	49
3.9 โครงสร้างแบบจำลองกังหันลมโดยมอเตอร์เหนี่ยวนำ	50
3.10 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของกังหันลม	51
3.11 บล็อกของ Look-Up Table ในโปรแกรม Matlab/Simulink	52
3.12 ค่าของ C_p เทียบกับ λ	52
3.13 การ์ดอินเตอร์เฟซ DS1104 และอุปกรณ์ต่อพ่วง	53
3.14 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส FUJI รุ่น FRENIC MEGA	54
3.15 บล็อกไดอะแกรมของบูตดิซิทูตติคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล	55
3.16 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันและกระแสแบบลูปปิด	61
3.17 วงจรกำเนิดพัลส์อ้างอิงโดยใช้ไอซี NE555	62
3.18 สัญญาณพัลส์อ้างอิง	62
3.19 วงจรลดความถี่สัญญาณพัลส์ให้เหลือ 25 kHz	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.20 สัญญาณพัลส์ที่ห่างกัน 180 องศา และความถี่ลดเหลือ 25kHz	64
3.21 วงจรสร้างสัญญาณกระตุ้นที่มีการเลื่อนเฟสกัน 90 องศา ของชุด A	65
3.22 สัญญาณกระตุ้นที่ออกมาจากไอซี 74LS123 ของชุด A	65
3.23 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม	66
3.24 สัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้จากทรานซิสเตอร์ 2N2222	67
3.25 วงจรมอดูเลตสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม (PWM)	68
3.26 วงจรขับนำเกตโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250	68
3.27 วงจรตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ	69
3.28 วงจรควบคุมกระแสแบบพีไอ	70
3.29 วงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายสูง	71
3.30 บล็อกไดอะแกรมของภาคควบคุมและภาคกำลัง	72
3.31 โครงสร้างโดยรวมของชุดอินเวอร์เตอร์	73
3.32 วงจรยกระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 3V เป็น 5V	74
3.33 วงจรขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์	75
3.34 อุปกรณ์และวงจรวัดกระแส	76
3.35 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	77
3.36 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	77
3.37 อุปกรณ์และวงจรภาคกำลัง	78
3.38 วงจรกรองความถี่ต่ำ	78
3.39 อุปกรณ์และวงจรทั้งหมดของการออกแบบด้านฮาร์ดแวร์	80
3.40 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์	81
3.41 โปรแกรมควบคุมอินเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink	81
3.42 บล็อก C28x ADC	82
3.43 การสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม	82
3.44 บล็อก C28x PWM	83
3.45 การเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลกับตัวประมวลสัญญาณดิจิทัล	83
3.46 หน้าต่างของโปรแกรม Code Composer Studio 3.3	84
3.47 การเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม Code Composer Studio 3.3 กับบอร์ด DSP	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.48 โปรแกรม Code Composer Studio 3.3 เมื่อเชื่อมต่อเรียบร้อยแล้ว	85
3.49 โปรแกรม Code Composer Studio 3.3 เมื่อหยุดเชื่อมต่อ	85
4.1 บล็อกไดอะแกรมการทดสอบระบบแปลงผัน	86
4.2 การทดสอบระบบของเครื่องกักกันจำลองกักกันลมใน Matlab/Simulink	87
4.3 การกำหนดค่าตัวแปรในแบบจำลองความเร็วลม	88
4.4 การกำหนดค่าตัวแปรในแบบจำลองกักกันลม	88
4.5 ค่าแรงบิดอากาศพลศาสตร์ที่ได้จากแบบจำลองกักกันลม	89
4.6 ค่าแรงบิดอากาศพลศาสตร์ที่ได้จากแบบจำลองกักกันลม (Wind Turbine Model)	90
4.7 การเชื่อมต่ออาร์คิเตอร์เฟสระหว่างคอมพิวเตอร์กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ	91
4.8 การเลือก Block set D/A	92
4.9 เลือกช่องเอาต์พุตของ Block set D/A	92
4.10 การกำหนดค่าคุณลักษณะการจำลอง	93
4.11 การผ่านสัญญาณให้กับอาร์คิเตอร์เฟสแบบทันเวลา	93
4.12 สัญญาณแรงบิดอ้างอิงจากโปรแกรม Matlab/Simulink	94
4.13 สัญญาณแรงบิดจากการประมาณของอินเวอร์เตอร์	94
4.14 หน้าต่างของโปรแกรม Control Desk	95
4.15 สัญญาณทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลม 2 m/s	96
4.16 สัญญาณทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลม 3 m/s	96
4.17 สัญญาณทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลม 4 m/s	97
4.18 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมวงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบขนาน	98
4.19 ภายในบล็อกของอินเตอร์ลิฟ	99
4.20 ภายในบล็อกของวงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบขนาน	99
4.21 ภายในบล็อกของระบบ	100
4.22 กระแสอินพุตและกระแสโหลดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูล	100
4.23 แรงดันเอาต์พุตและกระแสเอาต์พุต	101
4.24 แรงดันเอาต์พุตกระแสเอาต์พุตของวงจรและกระแสรวมขณะเปลี่ยนแปลงโหลด	102
4.25 วงจรทดสอบวงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบขนาน 4 โมดูล	102

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.26 กราฟความสัมพันธ์กระแส I_{Lref} กับ I_{in}	104
4.27 กราฟประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล	106
4.28 กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำที่มีกระแสด้านอินพุต 20 A	107
4.29 กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำที่มีกระแสด้านอินพุต 40 A	107
4.30 กระแส I_{L1}, I_{L2}, I_{L3} และแรงดันทางด้านเอาต์พุต	108
4.31 บล็อกไดอะแกรมทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบ อัตราขยายแรงดันสูง	109
4.32 การทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูง โดยใช้แหล่งจ่ายยี่ห้อ Delta Elektronika รุ่น SM 400-AR-8 สองตัวขนานกัน	110
4.33 ค่าดีวีดีไซเคิล 50 % ที่ขับสวิตช์	110
4.34 ความสัมพันธ์ของอัตราขยายแรงดันกับแรงดันอินพุตของการทดสอบหา ประสิทธิภาพของวงจรที่ค่าดีวีดีไซเคิล 50 %	111
4.35 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรที่ค่าดีวีดีไซเคิล 50 % แรงดันอินพุต 10 โวลต์	112
4.36 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรที่ค่าดีวีดีไซเคิล 50 % แรงดันอินพุต 20 โวลต์	112
4.37 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรที่ค่าดีวีดีไซเคิล 50 % แรงดันอินพุต 30 โวลต์	113
4.38 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรที่ค่าดีวีดีไซเคิล 50 % แรงดันอินพุต 40 โวลต์	113
4.39 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรที่ค่าดีวีดีไซเคิล 50 % แรงดันอินพุต 50 โวลต์	114
4.40 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรที่ค่าดีวีดีไซเคิล 50 % แรงดันอินพุต 60 โวลต์	114
4.41 ค่าดีวีดีไซเคิล 70 % ที่ขับสวิตช์	115
4.42 กราฟอัตราขยายแรงดันกับแรงดันอินพุตทดสอบที่ค่าดีวีดีไซเคิล 70 %	116
4.43 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรที่ค่าดีวีดีไซเคิล 70 % แรงดันอินพุต 10 โวลต์	116

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.44 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรที่ค่าตัวต้านทาน 70 % แรงดันอินพุต 20 โวลต์	117
4.45 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจร ที่ค่าตัวต้านทาน 70 % แรงดันอินพุต 30 โวลต์	117
4.46 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจร ที่ค่าตัวต้านทาน 70 % แรงดันอินพุต 40 โวลต์	118
4.47 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจร ที่ค่าตัวต้านทาน 70 % แรงดันอินพุต 50 โวลต์	118
4.48 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจร ที่ค่าตัวต้านทาน 70 % แรงดันอินพุต 60 โวลต์	119
4.49 บล็อกไดอะแกรมการทดสอบหาพลังงานที่ได้จากเครื่องกำเนิดเชิงโรตารีแบบแม่เหล็กถาวรในแต่ละช่วงความเร็ว	119
4.50 รูปทดสอบหาลำดับไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดเชิงโรตารีแบบแม่เหล็กถาวรในแต่ละช่วงความเร็ว	120
4.51 สัญญาณทดสอบหาลำดับไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดเชิงโรตารีที่ความเร็ว 331 รอบต่อนาที	121
4.52 สัญญาณทดสอบหาลำดับไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดเชิงโรตารีที่ความเร็ว 623 รอบต่อนาที	121
4.53 สัญญาณทดสอบหาลำดับไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดเชิงโรตารีที่ความเร็ว 918 รอบต่อนาที	122
4.54 สัญญาณทดสอบหาลำดับไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดเชิงโรตารีที่ความเร็ว 1,218 รอบต่อนาที	122
4.55 การต่อชุดเครื่องกำเนิดเชิงโรตารีแบบแม่เหล็กถาวรเข้ากับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมความเร็วและจ่ายลำดับไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดเชิงโรตารีเข้าสู่คอนเวอร์เตอร์	123
4.56 เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับกรณีศึกษาเครื่องกำเนิดเชิงโรตารีแบบแม่เหล็กถาวร	123
4.57 กราฟอัตราขยายแรงดันกับแรงดันอินพุตทดสอบที่ค่าตัวต้านทาน 50 %	124
4.58 สัญญาณที่ได้จากเครื่องจำลองกังหันลมที่ค่าตัวต้านทาน 50 % แรงดันอินพุต 10 โวลต์	125

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.59 สัญญาณที่ได้จากเครื่องจำลองกังหันลมที่ค่าตัวดีไซเคิล 50 % แรงดันอินพุต 20 โวลต์	125
4.60 สัญญาณที่ได้จากเครื่องจำลองกังหันลมที่ค่าตัวดีไซเคิล 50 % แรงดันอินพุต 30 โวลต์	126
4.61 สัญญาณที่ได้จากเครื่องจำลองกังหันลมที่ค่าตัวดีไซเคิล 50 % แรงดันอินพุต 40 โวลต์	126
4.62 กราฟอัตราขยายแรงดันกับแรงดันอินพุตของเครื่องจำลองกังหันลมที่ค่าตัวดีไซเคิล 70 %	127
4.63 สัญญาณที่ได้จากเครื่องจำลองกังหันลม ที่ค่าตัวดีไซเคิล 70 % แรงดันอินพุต 10 โวลต์	128
4.64 สัญญาณที่ได้จากเครื่องจำลองกังหันลม ที่ค่าตัวดีไซเคิล 70 % แรงดันอินพุต 20 โวลต์	128
4.65 สัญญาณที่ได้จากเครื่องจำลองกังหันลม ที่ค่าตัวดีไซเคิล 70 % แรงดันอินพุต 30 โวลต์	129
4.66 สัญญาณที่ได้จากเครื่องจำลองกังหันลม ที่ค่าตัวดีไซเคิล 70 % แรงดันอินพุต 40 โวลต์	129
4.67 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพกับค่าตัวดีไซเคิล	132
4.68 บล็อกไดอะแกรมทดสอบระบบอินเวอร์เตอร์	133
4.69 การต่อเพื่อวัดสัญญาณแรงดันและกระแสของอินเวอร์เตอร์กับ Power Analyzer WT500	134
4.70 หน้าต่างของโปรแกรม MATLAB R2010a	136
4.71 หน้าต่างของโปรแกรมควบคุมและการ Run โปรแกรม	136
4.72 รูปการทดสอบสัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อทดสอบกับโหลดความต้านทาน 320 โอห์ม	137
4.73 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทาน	137
4.74 สเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของแรงดัน(บน) และกระแส(ล่าง) เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์	138
4.75 ค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทาน ใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำ	138
4.76 สเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของแรงดัน(บน) และกระแส(ล่าง) เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทานใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมกับตัวเก็บประจุ	139
4.77 ผลการทดสอบหาค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทานใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมกับตัวเก็บประจุ	139
4.78 รูปการทดสอบสัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อทดสอบกับโหลดหลอดไฟขนาด 150 W	140
4.79 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อโหลดเป็นหลอดไฟ	140
4.80 สเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของแรงดัน(บน) และกระแส(ล่าง) เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อโหลดเป็นหลอดไฟใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำ	141

สารบัญภาพ (ต่อ)

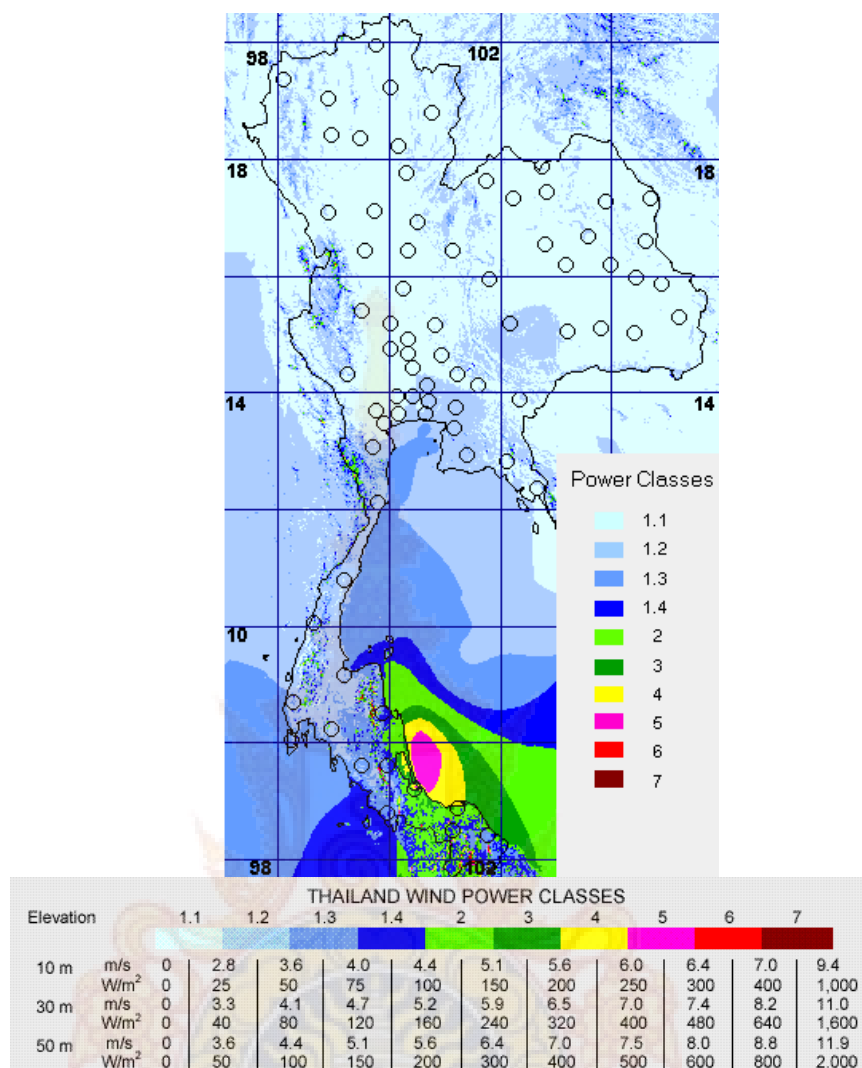
ภาพที่	หน้า
4.81 ผลการทดสอบหาค่าแรงดันและกระแสอนิกส์ลำดับต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์ เมื่อโหลดเป็นหลอดไฟใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำ	141
4.82 สเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของแรงดัน(บน) และกระแส(ล่าง) เอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ เมื่อโหลดเป็นหลอดไฟใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมกับตัวเก็บประจุ	142
4.83 ผลการทดสอบหาค่าแรงดันและกระแสอนิกส์ลำดับต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์ เมื่อโหลดเป็นหลอดไฟใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมกับตัวเก็บประจุ	142
4.84 ผลการตอบสนองของแรงดันและกระแสเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อโหลดเกิดการ เปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด	143
4.85 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุต(ล่าง) ของอินเวอร์เตอร์เมื่อยังไม่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำและ กระแสเอาท์พุต (บน)	143
4.86 รูปการทดสอบสัญญาณกระแสและแรงดันเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ขณะต่อ เข้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า	144
4.87 สัญญาณกระแสเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ขณะเชื่อมต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้า	145
4.88 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด ขณะเชื่อมต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้า	145
4.89 ผลการตอบสนองของแรงดันดีซีบัสเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสแบบทันทีทันใด	146

บทที่ 1

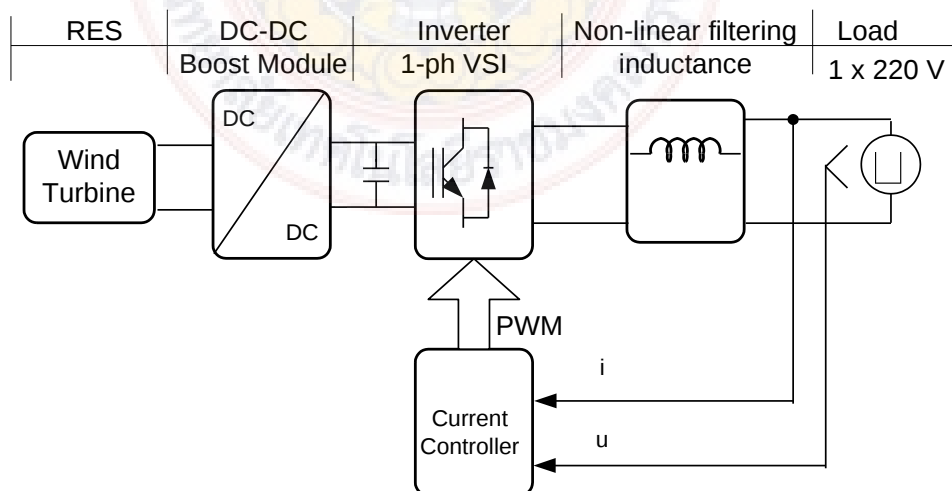
บทนำ

ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแหล่งพลังงานทดแทนที่สะอาด ไม่ก่อมลพิษ และยั่งยืน ซึ่งอาจจะเรียกได้ว่าเป็นพลังงานสะอาด (Green Power) อาทิเช่นพลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานชีวภาพ เป็นต้น โดยเฉพาะด้านพลังงานสะอาดในประเทศไทยเองก็มีการวิจัยด้านการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมค่อนข้างหลากหลายและติดตั้งอยู่หลายแหล่งตามศักยภาพของความเร็วลมในประเทศไทยดังในภาพที่ 1 ซึ่งแสดงถึงศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย และสถานีวัดพลังงานลมของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ณ. ที่ตำแหน่งวัดลม ○ ในแผนที่

ภาพที่ 1.1 แสดงให้เห็นถึงการบริเวณภาคใต้ที่มีความเร็วลมที่สูงกว่าพื้นที่อื่น ดังนั้นหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ การไฟฟ้าและภาคเอกชนจึงสนใจลงทุนผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานลมมากขึ้นตามลำดับ แต่ปัญหาหลักของพลังงานลมคือความไม่สม่ำเสมอของพลังงานลมและแปรปรวนค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงต้องมีระบบคอนเวอร์เตอร์เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และควบคุมให้ระดับแรงดันไฟฟ้าคงที่ด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมในภาพที่ 1.2 ประกอบด้วยกังหันลมซึ่งในที่นี้จะใช้กังหันลมแบบแม่เหล็กถาวร วงจรแปลงผันแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบบูสเพื่อยกกระดับแรงดันและควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ อินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 V 50 Hz สำหรับใช้งานกับเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน ซึ่งอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมสำหรับพิกัดไฟฟ้าขนาดเล็กถึงกลางคือ อินเวอร์เตอร์แบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร ซึ่งมีข้อดีคือสามารถดัดแปลงเพื่อติดตั้งใบกังหันแบบตั้ง (Vertical) และนอน (Horizontal) ให้แรงดันไฟฟ้าสูงขณะที่ความเร็วลมต่ำ ประสิทธิภาพสูง การบำรุงรักษาคำและอายุใช้งานได้นาน ระบบทดสอบระบบแปลงผันใช้เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อสร้างแรงบิดแทนกังหันลมจริงเพื่อให้สามารถทดสอบกังหันลมและระบบแปลงผันได้ง่าย ความเร็วลมที่เกิดขึ้นจริงมีความผันแปรค่อนข้างมากดังนั้นการสร้างเครื่องจำลองกังหันลมจึงใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมแบบเวกเตอร์ โดยสร้างแรงบิดอ้างอิงที่มีการผันแปรมีลักษณะเหมือนกังหันลมจากการวัดอินเตอร์เฟสแบบทันเวลาไปควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสร้างแรงบิดแทนกังหันลมได้



ภาพที่ 1.1 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทยและตำแหน่งสถานีวัดพลังงานลม [1]



ภาพที่ 1.2 ระบบคอนเวอร์เตอร์เพื่อผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมแบบแม่เหล็กถาวรขนาดเล็กลงถึงกลาง

1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.1.1 เพื่อค้นคว้าข้อมูลของความเร็วลมและแปรปรวนของความเร็วลมในประเทศไทย และเพื่อจำลองกังหันลมขนาด 1 kW ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

1.1.2 เพื่อศึกษาคุณลักษณะของเซนเซอร์เรเตอร์แบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรเพื่อใช้งานกับกังหันลม

1.1.3 เพื่อศึกษาและพัฒนาระบบดิจิทัลซีคอนเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมระดับไฟฟ้ากระแสตรงจากกังหันลม

1.1.4 เพื่อศึกษาและพัฒนาระบบอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

1.1.5 ศึกษาและสร้างระบบจัดการพลังงานไฟฟ้าด้วยการควบคุมผ่านการดอินเตอร์เฟส dSPACE

1.1.6 ศึกษาและวิเคราะห์ผลการใช้งานระบบคอนเวอร์เตอร์กับกังหันลมที่ติดตั้งและอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน

1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.2.1 สร้างแบบจำลองระบบคอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาการทำงานและการจัดการพลังงานไฟฟ้าในลักษณะบัสไฟฟ้ากระแสตรง

1.2.2 ออกแบบและสร้างดิจิทัลซีคอนเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมระดับไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่สำหรับใช้งานกับตัวจำลองกังหันลมขนาด 1 kW

1.2.3 ออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส 220 V 50 Hz ความถี่สวิตช์ 10 kHz สำหรับแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

1.2.4 มีระบบควบคุมและจัดการพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงโดยสามารถแสดงผลในลักษณะของ GUI และสามารถปรับค่าพารามิเตอร์แบบทันเวลา (real-time) ได้

1.2.5 ทดสอบระบบคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับเครื่องจำลองกังหันลมตามความเร็วลมแผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยเพื่อหาตำแหน่งเหมาะสมในการติดตั้ง

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.3.1 ค้นคว้าข้อมูลของความเร็วลมในประเทศไทยเพื่อจำลองการทำงาน

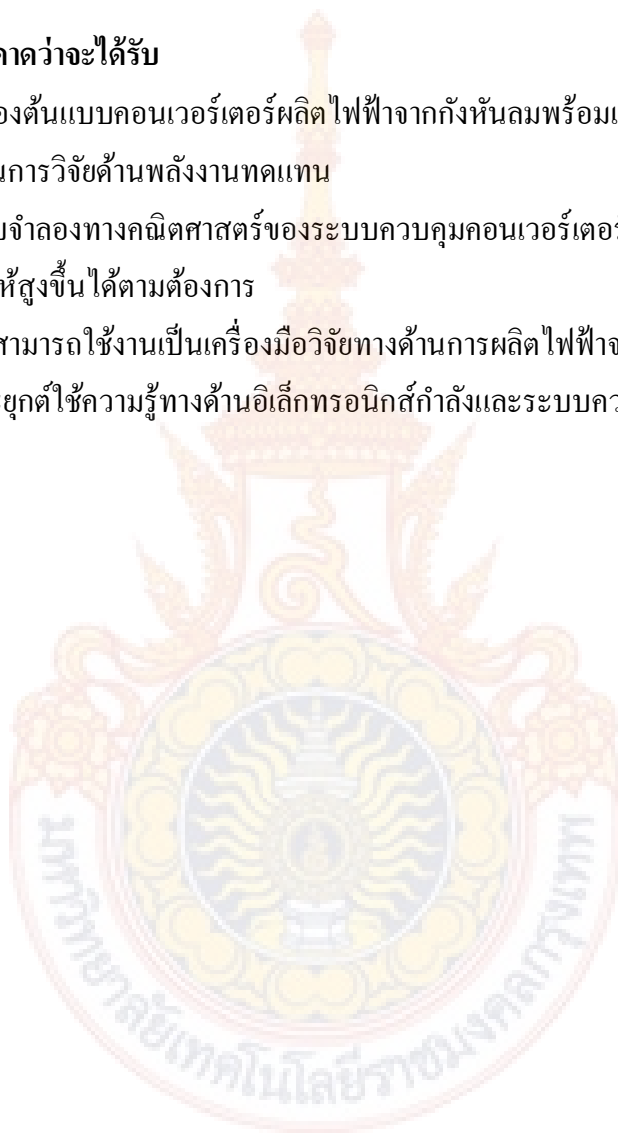
1.3.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลม

1.2.3 ออกแบบและสร้างดิจิทัลซีคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูง

- 1.3.4 ออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์แบบหนึ่งเฟส
- 1.3.5 ออกแบบและทดสอบระบบควบคุมวงปิด
- 1.3.6 วิเคราะห์ผลการทดลองและเปรียบเทียบกับผลจำลองการทำงาน
- 1.3.7 จัดทำรูปเล่มรายงานการวิจัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

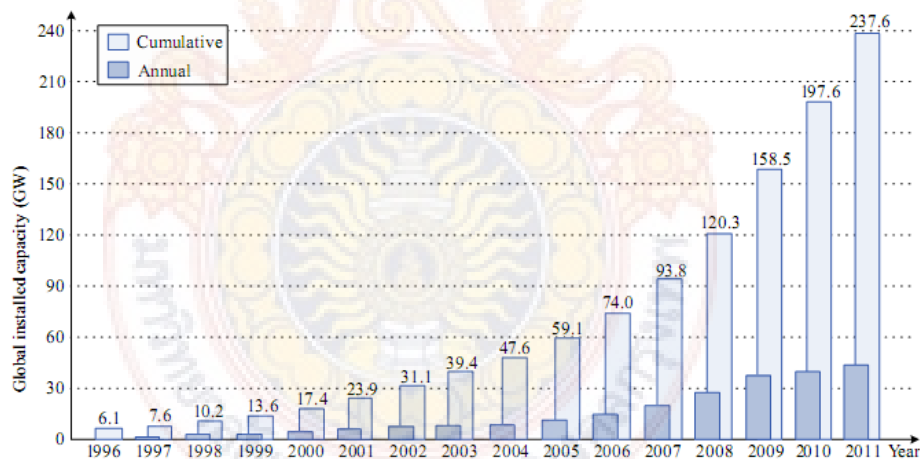
- 1.4.1 ได้เครื่องต้นแบบคอนเวอร์เตอร์ผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมพร้อมแบตเตอรี่เพื่อเป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการวิจัยด้านพลังงานทดแทน
- 1.4.2 ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ซึ่งสามารถที่เพิ่มพิกัดและกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้นได้ตามต้องการ
- 1.4.3 ระบบสามารถใช้งานเป็นเครื่องมือวิจัยทางด้านการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมได้
- 1.4.4 ได้ประยุกต์ใช้ความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและระบบควบคุมร่วมกับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน



บทที่ 2

ทฤษฎี

พลังงานลมเป็นพลังงานหมุนเวียนแบบหนึ่งที่มีต้นกำเนิดจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยอ้อม กล่าวคือพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบในภาคตัดขวางของโลกประมาณ 178,000 ล้านล้านวัตต์ มีเพียง 0.2% เท่านั้นที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนไหวของอากาศที่เรียกว่าพลังงานลมและส่วนนี้ก็ยังผลให้เกิดคลื่นในมหาสมุทรด้วย การใช้ประโยชน์จากพลังงานลมในภาพแบบของกังหันลมเริ่มมาตั้งแต่ 1,700 ปีก่อนคริสตกาลมีการพัฒนาใช้ประโยชน์กังหันลมแบบแนวตั้ง (Vertical Axis) ในแคว้นเมโสโปเตเมียและในประเทศจีน ต่อมาราว 400 ปีก่อนคริสตกาล ชาวอียิปต์ได้เริ่มพัฒนา กังหันลมแบบแกนนอน (Horizontal Axis) และมีการพัฒนาต่อเนื่องแพร่หลายเข้าไปในทวีปยุโรปในราวศตวรรษที่ 7 การใช้ประโยชน์ในระยะแรก ๆ เป็นการประยุกต์ใช้งานกลเป็นส่วนใหญ่การพัฒนาใช้ประโยชน์ในลักษณะกังหันลมผลิตไฟฟ้า (Wind Turbine Generator) เพิ่งจะขยายตัวในระหว่างปี ค.ศ.1930-1960 และมีการติดตั้งกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วดังกราฟในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 กำลังไฟฟ้าการติดตั้งรายปีและปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งแล้ว

2.1 หลักการของพลังงานลม

พลังงานลม (E_{wind}) เป็นพลังงานจลน์ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ ดังนั้นอากาศที่มีมวล m ถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วลม v จะก่อให้เกิดพลังงานจลน์

$$E_{wind} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

ถ้าลมเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดใดๆ (A) เราสามารถเขียนอัตราการไหลของอากาศเชิงมวลต่อเวลาดังนี้ว่า

$$m = \rho Av \quad (2.2)$$

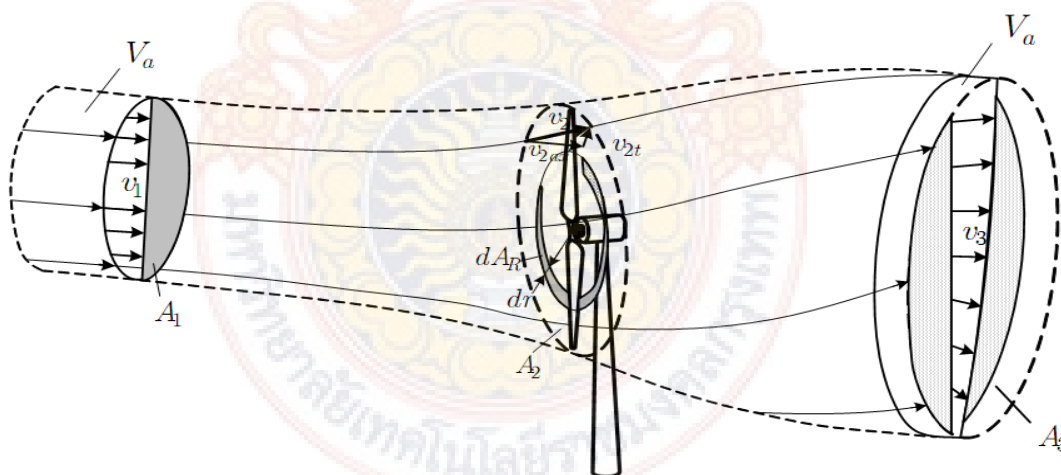
แทนสมการที่ 2.2 ลงในสมการที่ 2.1 จะได้สมการของพลังงานจลน์ต่อหน่วยเวลาซึ่งก็คือสมการของกำลังงานลมนั่นเอง

$$P_{wind} = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2.3)$$

โดย ρ คือความหนาแน่นของอากาศ ($\approx 1.25 \text{ kg/m}^3$)

จากภาพที่ 2.2 พลังงานลมที่สกัดได้จากปริมาตรของอากาศ V_a ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A_1 และมีความเร็วลม v_1 เมื่อเคลื่อนที่ผ่านกังหันลมทำให้ความเร็วลมถูกเปลี่ยนเป็น v_3 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าขนาดพื้นที่หน้าตัด A_3 ถูกขยายขึ้นเมื่อ V_a เคลื่อนที่ผ่านกังหัน สามารถเขียนสมการพลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้ดังนี้

$$W_w = V_a \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_3^2) \quad (2.4)$$



ภาพที่ 2.2 ปริมาตรการไหลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม

จะได้สมการของพลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดต่อหน่วยเวลา

$$P_{turb} = V_a \frac{dW_w}{dt} = d \frac{V_a \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_3^2)}{dt} \quad (2.5)$$

ปริมาตรการไหลของอากาศในพื้นที่หน้าตัดของกังหันลม

$$\frac{dV_a}{dt} = A_{turb} v_2 \quad (2.6)$$

ฉะนั้นจะได้

$$P_{turb} = A_{turb} \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_3^2) v_2 \quad (2.7)$$

ปริมาณกำลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้ขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่หน้าตัดของกังหันลม A_{turb}

ความเร็วลมและลักษณะของใบของกังหันลม ตามทฤษฎีของเบทซ์ (Betz) กำลังงานสูงสุดที่กังหันลมสกัดได้คือ

$$P_{turb}^{max} = \frac{16}{27} A_{turb} \frac{\rho}{2} v_1^3 \quad (2.8)$$

โดยมีความสัมพันธ์ความเร็วลม

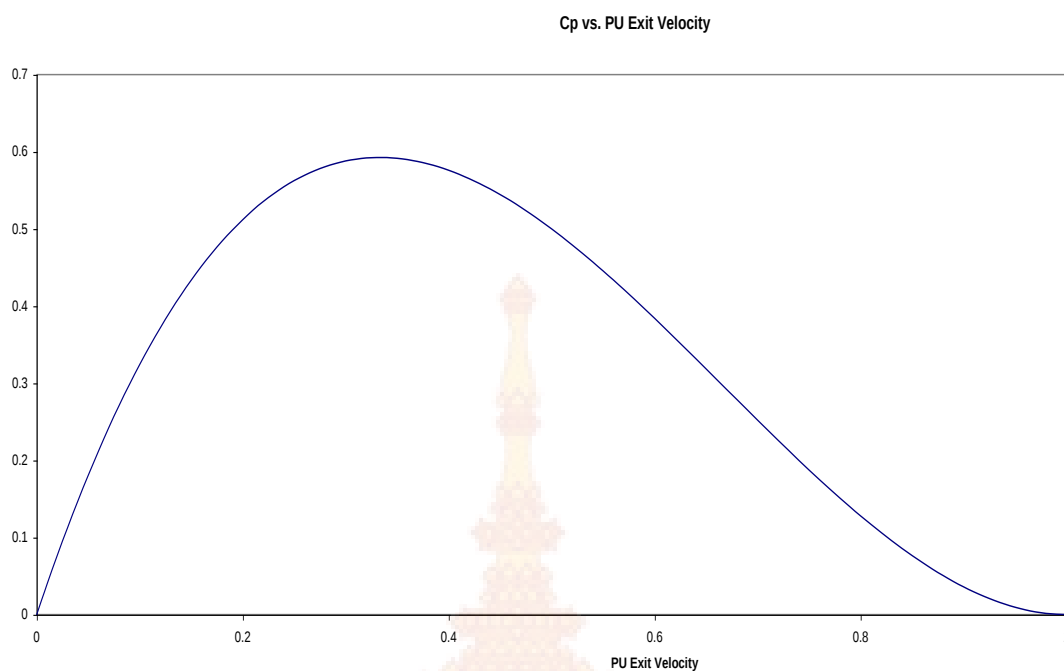
$$v_2 = \frac{3}{2} v_1 \text{ และ } v_3 = \frac{1}{3} v_1 \quad (2.9)$$

C_p เป็นค่าสัมประสิทธิ์กำลัง ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงสัดส่วนของกำลังงานที่กังหันลมสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยที่กราฟคุณลักษณะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของใบพัด

$$C_p = \frac{P_{turb}}{P_{Wind}} \quad (2.10)$$

ในทางอุดมคติค่า C_p จะมีค่าสูงสุดที่ประมาณ $(16/27 = 0.59)$ จากกราฟในภาพที่ 2.3 จากสมการที่ 2.3 ซึ่งจะได้กำลังงานของลมที่ผ่านกังหัน แต่กำลังงานที่กังหันลมสกัดได้จริงนั้นจะแปรผันตาม ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง C_p ด้วย เพราะฉะนั้นสมมุติให้กังหันมีพื้นที่หน้าตัดที่รับลมเป็นวงกลม สมการกำลังอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Power, P_a) จะเป็นดังนี้

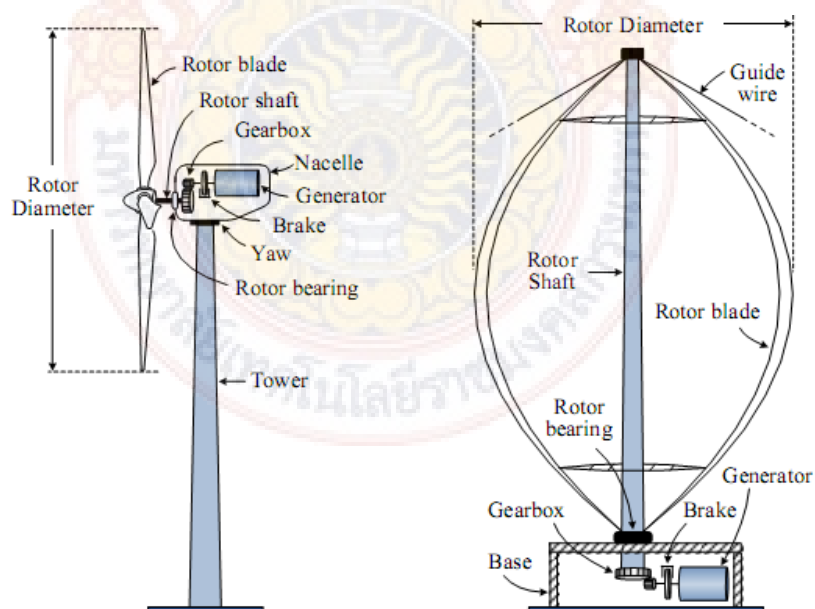
$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p \quad (2.11)$$



ภาพที่ 2.3 Cp vs. PU Exit Velocity

2.2 ประเภทของกังหันลม

กังหันลมที่ใช้อยู่ในปัจจุบันอาจแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือกังหันแนวนอน และกังหันแนวตั้งดังในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 กังหันลมแนวนอนและแนวตั้ง

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงกังหันแนวนอน ซึ่งโดยทั่วไปนิยมแบ่งประเภทของกังหันแนวนอนนี้ตามลักษณะของใบพัดดังนี้

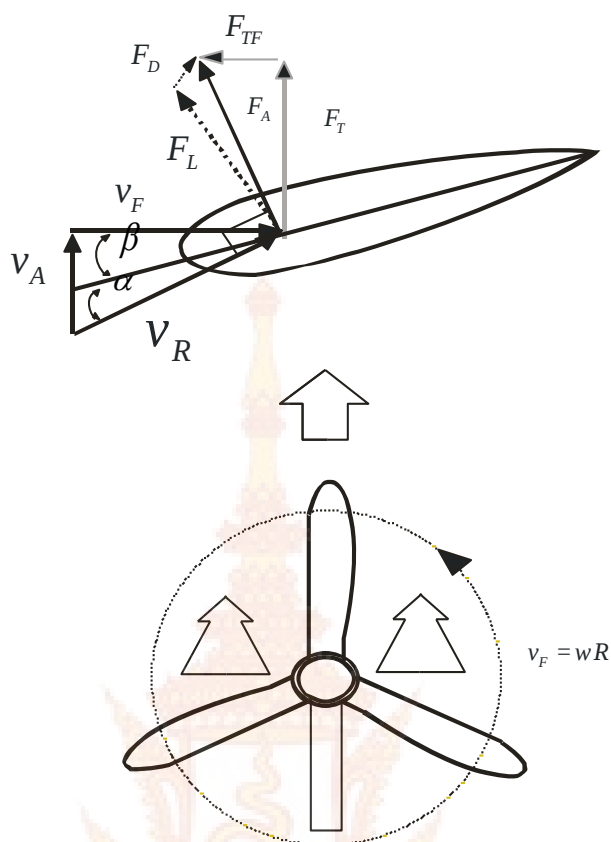
2.2.1 แบบมุมใบพัดคงที่

2.2.2 แบบปรับมุมใบพัดได้

2.3 ประเภทของการจำกัดพลังงาน

ภาพที่ 2.5 แสดงกังหันลม 3 ใบพัด ที่มีความเร็วลม v_A กระทำต่อใบพัดจากด้านหน้า และแสดงภาคตัดของใบพัดเมื่อมองจากด้านบน (Top View)

พิจารณาภาคตัดของใบพัด v_A คือเวกเตอร์ของความเร็วลมที่กระทำต่อใบพัดจากด้านหน้า และกังหันกำลังหมุนทวนเข็มนาฬิกา จะทำให้ใบพัดเสมือนได้รับความเร็วลมอีกตัวหนึ่ง ในทิศทางตรงข้ามกับการหมุน ซึ่งก็คือเวกเตอร์ v_F ดังแสดงในภาพนั่นเอง เรียกเวกเตอร์นี้ว่า ความเร็วลมเพิ่มเติม (Additional Wind Speed) ผลบวกของ v_A และ v_F ทำให้เกิดเวกเตอร์ความเร็วลมลัพธ์ (Resulting Wind Speed) v_R เวกเตอร์ v_R ที่กระทำต่อใบพัดจะทำให้เกิดแรงขึ้น 2 แรง คือ แรงยก (Lifting Force F_L) ซึ่งกระทำต่อใบพัดในทิศทางตั้งฉากกับ v_R และแรงฉุด (Drag Force F_D) ซึ่งกระทำต่อใบพัดในทิศทางเดียวกับ v_R โดยขนาดของเวกเตอร์ทั้งสอง ขึ้นอยู่กับภาพร่างของใบพัดและขนาดของ v_R



ภาพที่ 2.5 กระบวนการเกิดแรงบิดอากาศพลศาสตร์

ผลบวกของ F_L และ F_D ทำให้เกิดเวกเตอร์ที่เรียกว่า แรงอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Force F_A) ซึ่งส่วนหนึ่งของแรงนี้จะทำให้เกิดแรงผลัก (Thrust Force F_T) ซึ่งกระทำต่อใบพัดในทิศทางเดียวกับความเร็วลม มีผลโดยตรงต่อเสาของกังหันลม ส่วนที่เหลือจะกลายเป็นแรงสร้างแรงบิด (Tangential or Torque Force F_{TF}) กระทำต่อใบในทิศทางเดียวกับการหมุน แรงดังกล่าวนี้เองเป็นตัวทำให้เกิดแรงบิดอากาศพลศาสตร์ ที่กระทำต่อใบพัด จะเห็นว่า ขนาดของแรงบิดที่กระทำต่อใบพัด สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการควบคุมเวกเตอร์ v_R ซึ่งสามารถทำได้โดยมุม β, α นั้นเอง

β คือมุมที่ v_F กระทำต่อแนวแกนใบพัด เรียกว่ามุมพิช (Pitch Angle) เราสามารถปรับขนาดของมุมนี้ได้ด้วยการปรับใบพัด ให้แกนใบพัดเอียงตัวของสามก้านน้อยตามต้องการ ด้วยวิธีการกล ส่วน α คือมุมที่ v_R กระทำต่อแนวแกนใบพัดเรียกว่ามุมปะทะ (Attack Angle) เราสามารถปรับขนาดของมุมนี้ได้ 2 วิธีคือ ปรับใบพัดโดยวิธีเดียวกับการปรับ β หรือปรับเวกเตอร์ v_R

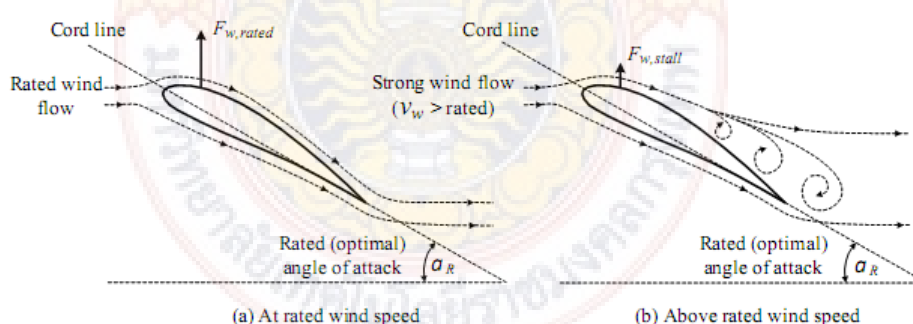
เวกเตอร์ v_R ประกอบด้วย v_A และ v_F แต่เนื่องจาก v_A คือความเร็วลมที่กระทำต่อใบพัด ในทิศทางตั้งฉากกับระนาบใบพัด ดังนั้นจึงไม่สามารถควบคุมขนาดและทิศทางได้ ส่วน v_F คือความเร็วลมที่ใบพัดมองเห็นเมื่อเกิดการหมุน ดังนั้นจึงสามารถควบคุมได้เฉพาะขนาด โดยการปรับความเร็วรอบของกังหันนั่นเอง ซึ่งจะส่งผลต่อ เวกเตอร์ v_R โดยตรง

การจำกัดพลังงานที่เกิดขึ้นบนกังหัน ทำได้โดยการควบคุมแรงบิดอากาศพลศาสตร์ ดังกล่าว ซึ่งแบ่งวิธีควบคุมได้เป็น 2 แบบหลักๆ ดังนี้

2.3.1 จำกัดพลังงานโดยการบังคับให้เกิดปรากฏการณ์สตอล

สตอลเป็นปรากฏการณ์ทางอากาศพลศาสตร์อย่างหนึ่ง ที่เกิดขึ้นกับวัตถุที่วางอยู่ในทางไหลของอากาศ เช่น ปีกเครื่องบิน หรือใบพัดกังหัน โดยจะทำให้อากาศที่กำลังไหลผ่านวัตถุทั้งด้านบนและด้านล่างนั้น เกิดการแยกตัวออกจากกัน ส่งผลให้แรงยกลดลง ถ้าปีกเครื่องบินเกิดการสตอล เครื่องบินจะตก แต่สำหรับใบพัดกังหันนั้น สามารถนำปรากฏการณ์นี้มาใช้ประโยชน์ในการจำกัดพลังงานได้ ซึ่งพบว่าปรากฏการณ์สตอลนี้ จะเกิดขึ้นเมื่อมุมกระทบบมีขนาดเพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่ง ดังนั้น การบังคับให้เกิดปรากฏการณ์สตอล จึงทำได้โดยปรับมุมกระทบบนั่นเอง จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่ามุมกระทบบสามารถควบคุมได้ 2 วิธี ดังนั้นการบังคับให้เกิดสตอลจึงแบ่งเป็น 3 แบบ เช่นกันคือ

2.3.1.1 พาสซีฟสตอล (Passive Stall) คือการทำให้เกิดการสตอล บนใบพัดของกังหันลม เมื่อความเร็วลมเกินกว่าพิกัดที่ออกแบบไว้ (เกิดได้เองโดยไม่มีการควบคุม) ให้เกิดการจำกัดพลังงาน

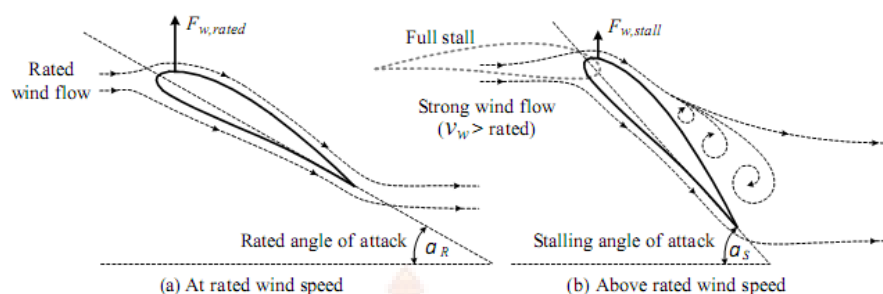


ภาพที่ 2.6 การเกิดภาวะพาสซีฟสตอล

2.3.1.2 แอกทีฟสตอล (Active Stall) คือการทำให้เกิดการสตอล โดยการปรับมุมกระทบบด้วยเวกเตอร์ v_R ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

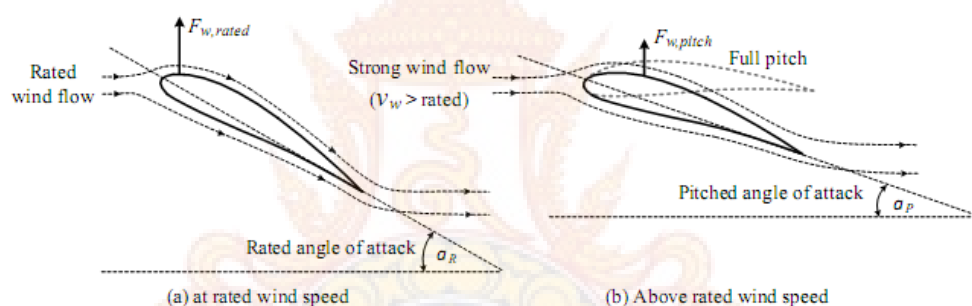
- ก) การควบคุมมุมใบพัดโดยวิธีทางกล
- ข) การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบทำให้ v_F มีขนาดซึ่งส่งผลโดยตรงกับ

เวกเตอร์ v_R



ภาพที่ 2.7 การเกิดภาวะแอ็คทีฟสตอล

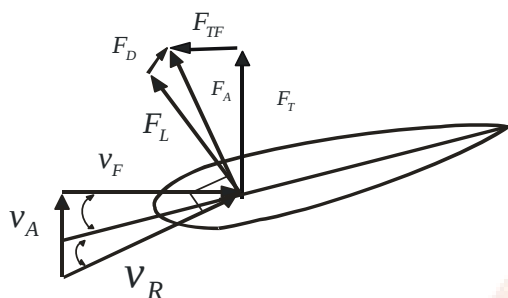
2.3.1.3 จำกัดพลังงานโดยการปรับมุมพิช (Pitch Regulation) ถ้ามุมพิชเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงทุกตัวบนใบพัดมีค่าลดลง รวมทั้งแรงที่ทำให้เกิดแรงบิดอากาศพลศาสตร์ด้วย ดังนั้นพลังงานจึงลดลง



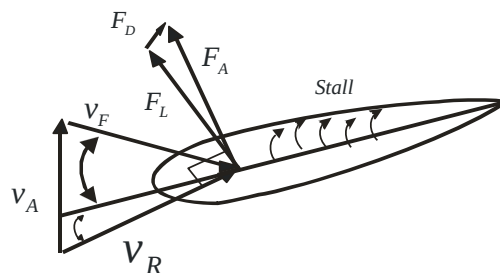
ภาพที่ 2.8 การจำกัดพลังงานโดยการปรับมุมพิช

2.4 ช่วงการทำงานของกังหันลม

ช่วงการทำงานของกังหันลม ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดว่ากังหันลมจะเริ่มและหยุดทำงานเมื่อใดก็คือพลังงานที่กังหันได้รับจากลมในขณะนั้นนั่นเอง โดยกังหันลมจะยังไม่เริ่มทำงานจนกว่าพลังงานที่ได้รับจะมีค่ามากเพียงพอและจะหยุดการทำงานเมื่อพลังงานที่ได้รับมีค่ามากเกินไป แล้วเนื่องจากพลังงานดังกล่าวแปรผันตามความเร็วลมที่กระทำต่อกังหัน ดังนั้นจึงสามารถเขียนกราฟการทำงานของกังหันลมได้ดังภาพที่ 2.9

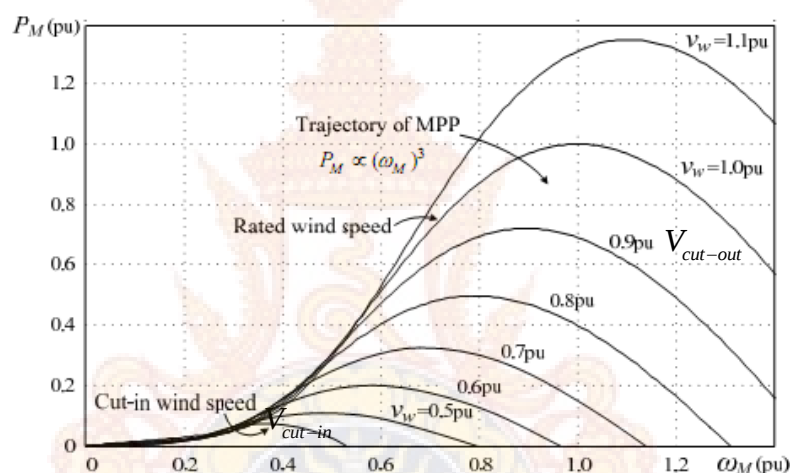


(ก) กังหันทำงานตามปกติ



(ข) เมื่อเกิดปรากฏการณ์สตอล

ภาพที่ 2.9 การทำงานของกังหันลม



ภาพที่ 2.10 กราฟการทำงานของกังหันลม

จากภาพที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าในช่วงที่ความเร็วลมมีค่าน้อยกว่า V_{cut-in} จะทำให้กังหันไม่ทำงาน เช่นเดียวกันกับ ช่วงที่ความเร็วลมมีค่าสูงเกินไปซึ่งอาจทำให้กังหันเกิดความเสียหายได้ กังหันจะถูกสั่งให้หยุดทำงานทันที กังหันจะทำงานเมื่อความเร็วลมมีค่ามากกว่า V_{cut-in} ถ้าลมมีความเร็วอยู่ในช่วง Optimum tracking โดยที่พลังงานที่สกัดได้จะอยู่ที่ 100 % คือค่าที่คำนวณไว้แล้วว่าเมื่อลมมีความเร็วเท่ากับค่าดังกล่าว กำลังที่สกัดได้จะมีค่าเท่ากับพิกัดกำลังพอดี

เมื่อลมมีความเร็วอยู่ในช่วงที่เรียกว่าความเร็วลมต่ำกว่าพิกัดซึ่งกำลังที่ผลิตได้จะแปรผันกับความเร็วลมกำลังสาม แต่เมื่อลมมีความเร็วอยู่ในช่วงที่ $V_{cut-out}$ จะเรียกช่วงนี้ว่าความเร็วลมสูงกว่าพิกัดซึ่งกำลังที่ผลิตได้จะต้องถูกจำกัดให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าพิกัดกำลังโดยใช้วิธีจำกัดพลังงานทางอากาศพลศาสตร์แบบใดแบบหนึ่ง ระหว่างแบบควบคุมให้เกิดปรากฏการณ์การสตอลกับวิธีการ

ปรับมุมพิช สำหรับงานวิจัยนี้จะสนใจเฉพาะกังหันแบบปรับความเร็วได้ ซึ่งใช้วิธีจำกัดพลังงานแบบสตอล

ภาพที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของกังหันกับพลังงานที่สกัดได้จากลมดังภาพที่ 2.10 สามารถใช้ภาพนี้เพื่อเลือกความเร็วรอบที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการควบคุมกังหันที่ความเร็วลมต่างๆ

โดยกังหันที่มีขนาดและลักษณะของใบพัดต่างกันก็จะมีกราฟคุณลักษณะต่างกันด้วย ดังนั้นจึงแสดงสมการกำลังที่กังหันสกัดได้จากลมดังสมการที่ 2.12

$$P_a = \frac{P}{2} \pi R^2 v^3 C_p(v, w, \beta) \quad (2.12)$$

ในที่นี้พิจารณาเฉพาะกังหันลมที่ไม่มีการปรับมุมพิช ดังนั้นที่มุมพิชคงที่ค่าหนึ่ง C_p จะขึ้นอยู่กับค่าของ v และ w เท่านั้น ถ้ากำหนดให้ λ คือ อัตราส่วนความเร็วรอบต่อความเร็วลม (Tip Speed Ratio) ซึ่งนิยามตามสมการที่ 2.13

$$\lambda = \frac{wR}{v} \quad (2.13)$$

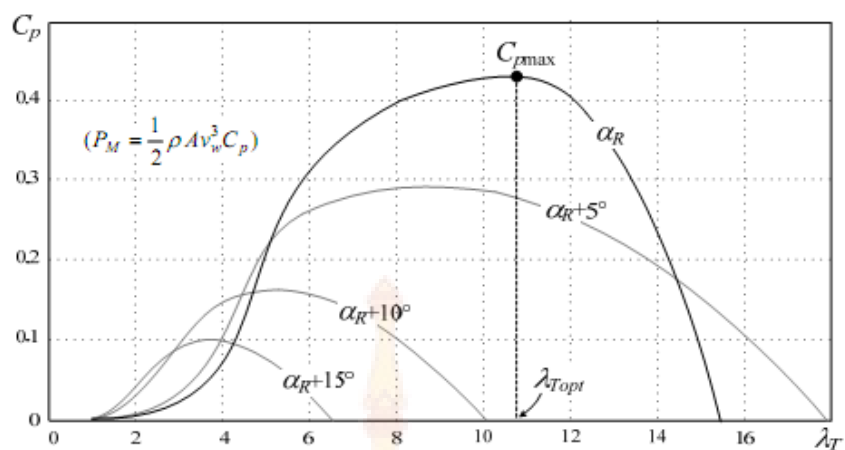
จะได้

$$P_a = \frac{P}{2} \pi R^2 v^3 C_p(\lambda) \quad (2.14)$$

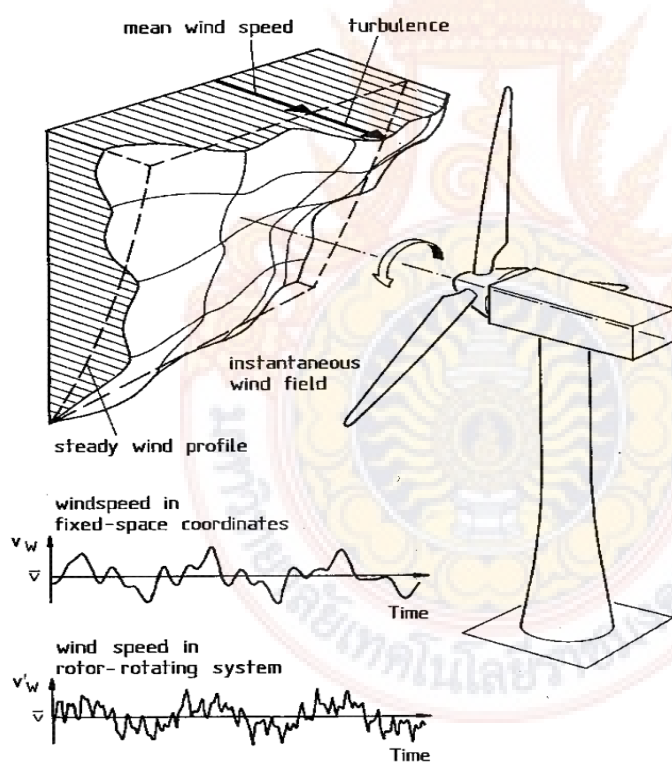
โดย $C_p(\lambda) = \frac{P_{turb}}{P_{Wind}}$ ของกังหันลมจริงที่ใช้ในการทดลองนี้ขนาด 1 kW มีลักษณะเป็นดังภาพที่

2.10

จากสมการที่ 2.14 และจากกราฟของ C_p จึงสามารถหากราฟคุณลักษณะของกังหันที่ใช้ในการทดลองได้ดังภาพที่ 2.11 ถ้าทราบความเร็วลมที่กระทำต่อกังหันก็จะสามารถเลือกทำงานที่ความเร็วรอบอันจะทำให้เกิดการสกัดกำลังตามที่ต้องการได้ แต่ในทางปฏิบัติพบว่า การวัดค่าความเร็วลมมีปัญหาหลายประการและอาจได้ค่าที่ไม่แม่นยำ ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้แบบจำลองความเร็วลม (Wind Speed Model) เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 2.12 จะเห็นว่าความเร็วลมที่ปะทะกับใบพัดของกังหันลมมีความผันแปร (turbulence) ค่อนข้างมาก โดยค่าความเร็วลมที่เกิดขึ้นจะเกิดจากสองส่วนคือค่าความเร็วลมเฉลี่ย และค่าความเร็วลมที่เกิดจากการผันแปร กระทำกับใบของกังหันลม



ภาพที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p), สัมประสิทธิ์แรงบิด (C_T) กับแลมด้า (λ_T)

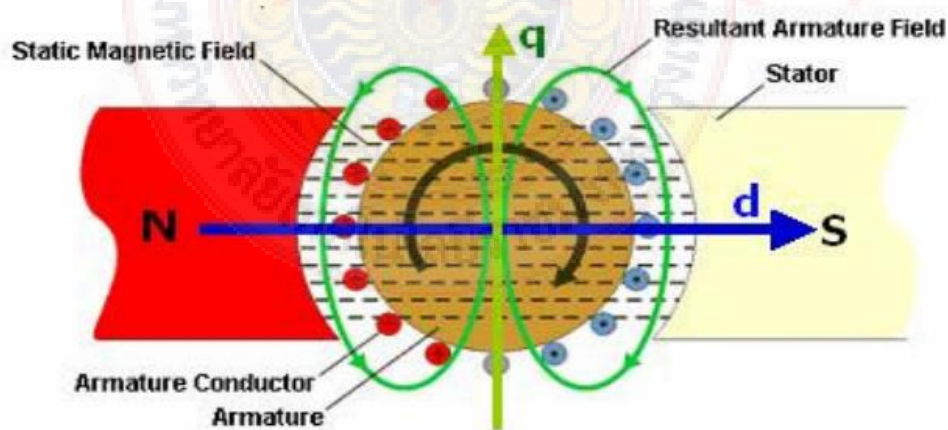


ภาพที่ 2.12 ความเร็วลมที่กระทำต่อกังหันลม

2.5 อินเวอร์เตอร์ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์

การควบคุมแบบเวกเตอร์ หรือ การควบคุมแบบฟิลด์อเรียนเตด (Field Oriented Control) คือ วิธีการและระบบการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่พัฒนามาจากการควบคุมจากแบบเดิมซึ่งเป็น V/f โดยอาศัยวิธีผสมผสานและหลักการเลียนแบบการควบคุมความเร็วรอบจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดกระตุ้นแยก เพื่อให้ได้กราฟของแรงบิดและกำลังต่อความเร็วรอบใหม่ใกล้เคียงกันมากที่สุดดังแสดงในภาพที่ 2.13 โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์คำนวณอยู่บนแกนอ้างอิงที่หมุนไปพร้อมๆ กับฟลักซ์เวกเตอร์ทางด้านโรเตอร์ให้มาอยู่ในภาพเทียบเคียงกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แต่เดิมนั้นการควบคุมแบบเวกเตอร์ใช้อุปกรณ์แอนะล็อกในการคำนวณจึงมีความสิ้นเปลือง และราคาสูงมากทำให้ระยะแรกๆจึงไม่ค่อยเป็นที่แพร่หลายมากนัก แต่ต่อมาเมื่อมีการพัฒนาทั้งทางด้านไมโครโปรเซสเซอร์ความเร็วสูงและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ได้มีการคิดค้นและพัฒนาก้าวหน้าไปอย่างมากทำให้การควบคุมแบบเวกเตอร์รุ่นปัจจุบันมีราคาถูกลงใกล้เคียงกับการควบคุมแบบ V/f มีขนาดเล็กลงใช้งานง่ายขึ้นและมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือในการทำงานมากขึ้นจากแนวคิดที่กล่าวถึงไปแล้วข้างต้นนั้น หากจะทำความเข้าใจการควบคุมมอเตอร์แบบเวกเตอร์ก็ต้องเริ่มทำความเข้าใจที่การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดกระตุ้นก่อนดังนี้

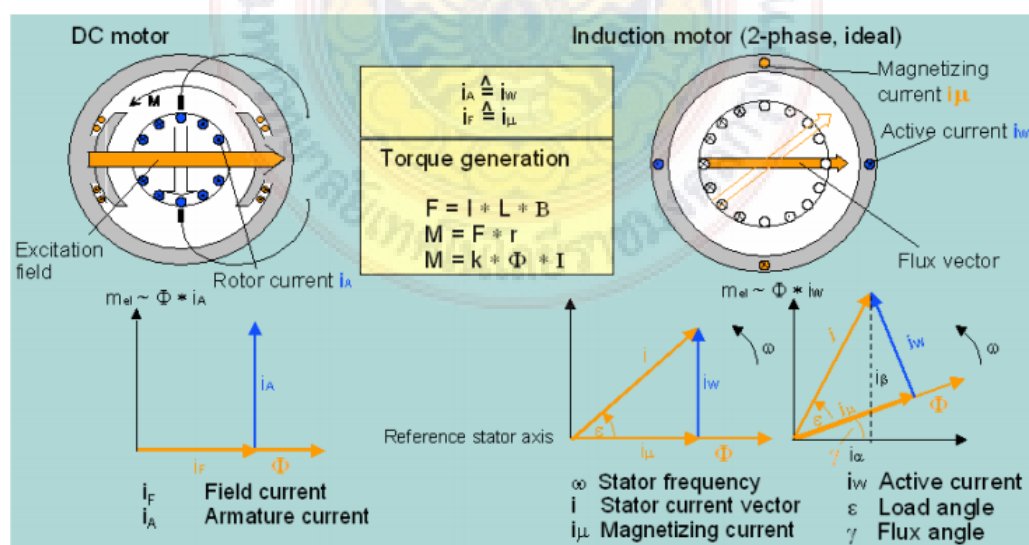
ในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทำได้สองวิธีด้วยกันคือ การควบคุมปริมาณสนามแม่เหล็กจากขดลวดชุด Field หรือ Separated Exciting Field และจากขดลวดในทุ่นโรเตอร์หรือขดลวดอาร์เมเจอร์นั่นเอง



ภาพที่ 2.13 แนวแกนสนามแม่เหล็ก d และ q

การควบคุมปริมาณสนามแม่เหล็กจากขดลวดชุดฟิลด์สามารถทำได้โดยวิธีการควบคุมกระแสที่นำไปสร้างสนามแม่เหล็กหลัก หรือ I_f องค์ประกอบของสนามแม่เหล็ก I_f นี้เกิดขึ้นจากขดลวดบนสเตเตอร์ที่ใช้สนามแม่เหล็กมีทิศชี้จากด้านซ้ายไปด้านขวา และเรียกสนามแม่เหล็กแนวแกนนี้ว่า แกน d หรือ Direct axis

ส่วน I_q หรือกระแสที่นำไปสร้างสนามแม่เหล็กรอบอาร์เมเจอร์ องค์ประกอบของสนามแม่เหล็กนี้จึงเกิดขึ้นโดยรอบขดลวดบนโรเตอร์ โดยมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กหลักจากทิศใต้ขึ้นไปยังทิศเหนือ จึงเรียกแนวแกนของสนามแม่เหล็กนี้ว่า แกน q หรือ Quadrature axis ดังภาพที่ 2.13 ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้น วิธีที่ง่ายในทางปฏิบัติเราจะให้องค์ประกอบหรือ สนามแม่เหล็กในแนวแกน d มีค่าคงที่ แล้วเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบเฉพาะในแนวแกน q กล่าวคือ โดยปกติจะให้ I_f มีค่าคงที่ และเมื่อต้องการเปลี่ยนความเร็วรอบหรือเปลี่ยนแปลงแรงบิด ก็จะมาควบคุม I_q เป็นหลักต่อเมื่อต้องการควบคุมความเร็วเกินพิกัด จึงจะทำการลด I_f ลง การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจึงแยกออกเป็นสองลักษณะดังภาพที่ 2.14-2.15 ในสภาวะปกติ I_f จะถูกตั้งค่าไว้ให้คงที่ ตามพิกัดของมอเตอร์ ส่วน I_q จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราการเร่งของมอเตอร์ และแรงบิดของโหลดที่ต้องการ I_{act} ในสภาวะปกติของการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะควบคุมเพียงตัวเดียวเท่านั้นโดยไม่ต้องไปควบคุมกระแสหรือสนามแม่เหล็กทางด้านขดลวดสนาม I_f ทำให้การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจึงง่ายแก่การควบคุมไม่สลับซับซ้อนเหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

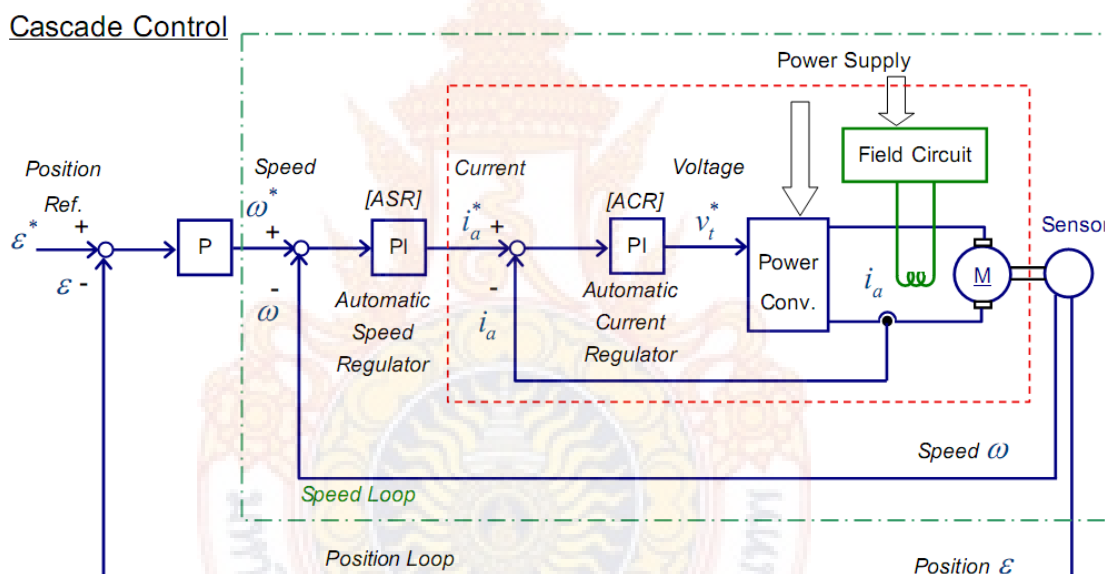


ภาพที่ 2.14 แกนสนามแม่เหล็ก d และ qเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกับไฟฟ้ากระแสสลับ

การควบคุมแบบเวกเตอร์ได้เลียนแบบแนวความคิดและวิธีการของการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกล่าวคือ ให้มองภาพสนามแม่เหล็กและวิธีการควบคุมแยกออกเป็นสองส่วนคือ

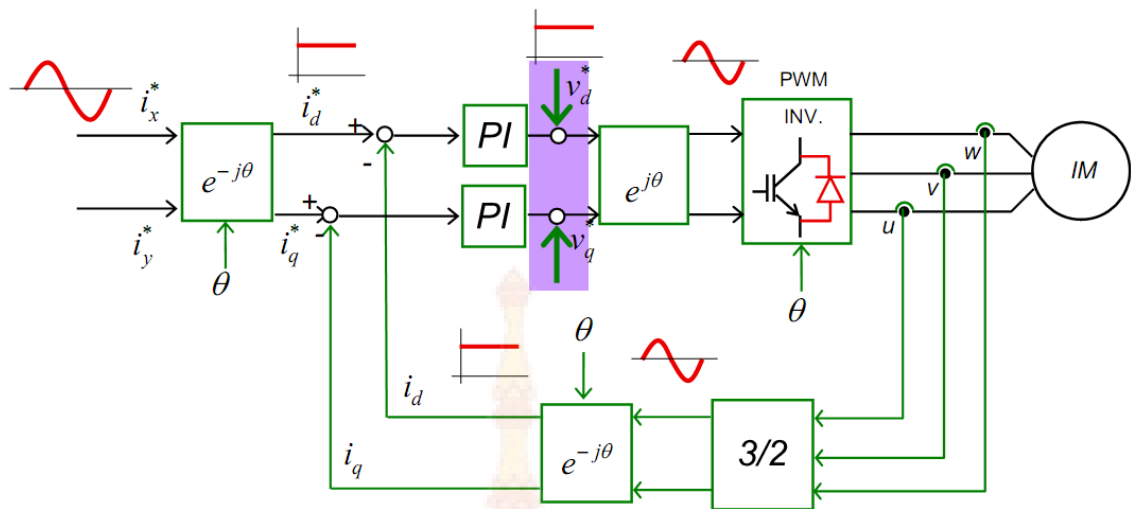
ก. ส่วนที่เป็นองค์ประกอบในแกน d เรียกว่า I_d ทำหน้าที่ควบคุมความเข้มของสนามแม่เหล็กในแกน d โดยปกติจะมีค่าคงที่ขั้วกรณิมอเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบเกินพิกัด

ข. ส่วนที่เป็นองค์ประกอบในแกน q เรียกว่า I_q ทำหน้าที่เหมือน I_d ของการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดย I_q จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราการเร่งและแรงบิดด้านของโหลดดังนั้นเมื่อต้องการเปลี่ยนความเร็ว (มีความเร่ง) และเพิ่มหรือลดโหลดทางกลก็จะปรับที่ I_q โดยตรง



ภาพที่ 2.15 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากที่กล่าวมาข้างต้นภาพแบบแนวความคิดของการควบคุมแบบเวกเตอร์เมื่อทำการเปรียบเทียบจึงเหมือนกับวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงเกือบทุกประการดังภาพที่ 2.16 ที่แสดงโครงสร้างการทำงานเมื่อเปรียบเทียบกัน



ภาพที่ 2.16 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบการควบคุมแบบเวกเตอร์

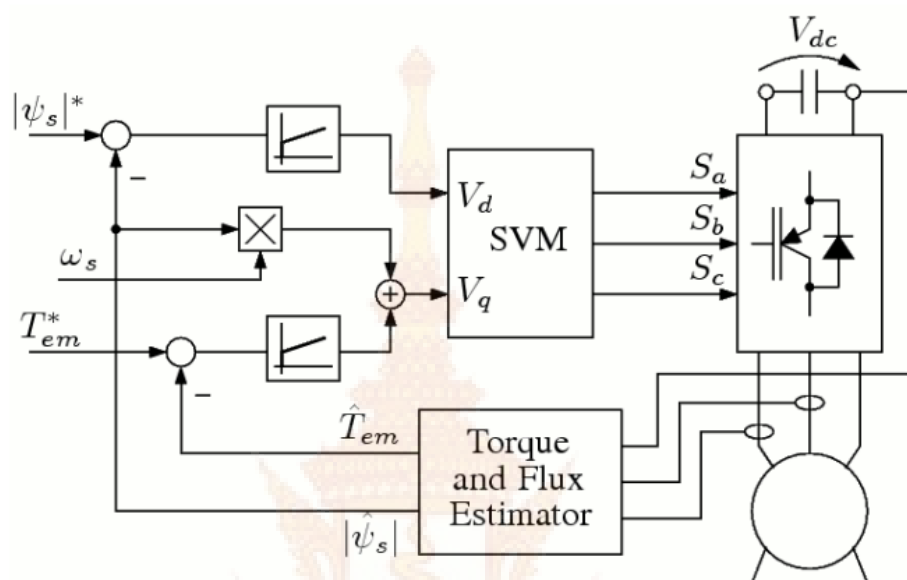
การทำงานของระบบนี้อยู่ที่การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสซึ่งเป็นสนามแม่เหล็ก หมุนห่างกัน 120° ทางไฟฟ้าต้องแปลงมาให้อยู่ในภาพของสมการทางคณิตศาสตร์ให้เป็น I_d และ I_q ซึ่งวิธีปกติที่ใช้กันทั่วไป เมื่อ I_μ ก็เปรียบเสมือนกับ I_f หรือ I_d ส่วน I_w ก็เปรียบเสมือน I_a หรือ I_q ของการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากภาพที่ 2.16 กระแส I จะถูกแปลงให้อยู่ในภาพของ I_μ หรือ I_w หรือแตกเวกเตอร์ ออกมาเป็น แกน d และ q ระบบควบคุมจะพยายามรักษาค่าประกอบในแกน d ให้คงที่ส่วน องค์ประกอบในแกน q นั้นจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับความต้องการของโหลดแต่ถ้าทำงานในย่าน ความเร็วรอบที่สูงกว่าความเร็วพิกัดระบบจะต้องลดแรงดันไฟฟ้าลงเพื่อทำ field weakening ให้กับ มอเตอร์ ซึ่งเมื่อสามารถควบคุมได้ดังนี้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่กำลังควบคุมอยู่ก็จะมี คุณสมบัติเทียบได้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหากมองในเรื่องการซ่อมบำรุงรักษาจะดีกว่า เพราะการบำรุงรักษามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบกรงกระรอกทำได้ง่ายกว่ามอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงเป็นอย่างมาก

2.6 การควบคุมแรงบิดโดยอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทำงานวิจัยนี้มีความสามารถในการคำนวณค่าแรงบิด และนำมา แสดงผลได้ โดยใช้หลักการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเข้ามาประมวลผลในโปรแกรม ของอินเวอร์เตอร์ และตั้งค่าการทำงานให้อยู่ในโหมดการควบคุมแบบเวกเตอร์ จุดเด่นของการ ควบคุมแรงบิดแบบนี้ คือระบบที่ควบคุมจะให้การตอบสนองต่อแรงบิดได้เร็ว ไม่จำเป็นต้องใช้

อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งการหมุน (Encoder-less) ความถี่ในการสวิตช์ซึ่งที่ ค่าความผิดพลาดของกระแสมีค่าต่ำมาก และค่าแรงบิดกระแสเฟื่อน้อยมาก ในส่วนของแรงบิดที่แสดงออกมานั้นเกิดจากการคำนวณในทางคณิตศาสตร์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของระบบมาคำนวณในโปรแกรมการควบคุมของอินเวอร์เตอร์ ดังภาพที่ 2.17



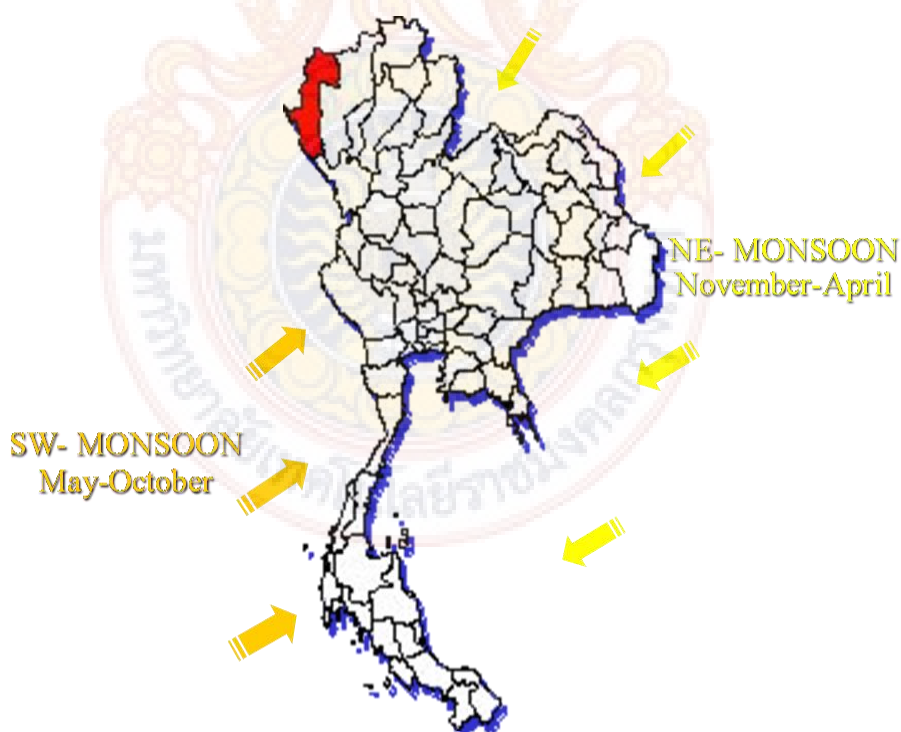
ภาพที่ 2.17 การควบคุมแรงบิดโดยอินเวอร์เตอร์

2.7 ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย

สำหรับประเทศไทยพบว่าศักยภาพพลังงานลมทั่วประเทศมีค่า 44 เทอราวัตต์ชั่วโมงต่อปี จากการศึกษาเพื่อหาความเร็วลมเฉลี่ยในพื้นที่ต่างๆ โดยกรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานพบว่าแหล่งแหล่งศักยภาพพลังงานลมที่ดีของประเทศไทยมีกำลังลมเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 3 (class3)[1-2] ดังแสดงในภาพที่ 2.18 หรือมีความเร็วลมเฉลี่ยประมาณ 6.4 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป ที่ระดับความสูง 10 เมตร ในแถบภาคใต้บริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออกเริ่มตั้งแต่จังหวัดนครศรีธรรมราช จังหวัดสงขลา จังหวัดปัตตานี และอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่ อันเกิดจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงปลายเดือนมีนาคม และยังพบแหล่งศักยภาพพลังงานลมที่ดีอีกแหล่งหนึ่งอยู่บริเวณเทือกเขาด้านทิศตะวันตก ตั้งแต่ทิศใต้ตอนบนจรดทิศเหนือตอนล่างในจังหวัดเพชรบุรี จังหวัดกาญจนบุรี และจังหวัดตาก อันเกิดจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ระหว่างเดือนพฤษภาคมจนเข้าสู่เดือนตุลาคมนอกจากนี้ยังมีแหล่งพลังงานลมที่ดีที่ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้อยู่ในบริเวณเทือกเขาอุทยานแห่งชาติแก่งกรุง ในจังหวัดสุราษฎร์ธานี อุทยานแห่งชาติเขาหลวงและอุทยานแห่งชาติไทรโยค จังหวัดนครศรีธรรมราช อุทยาน

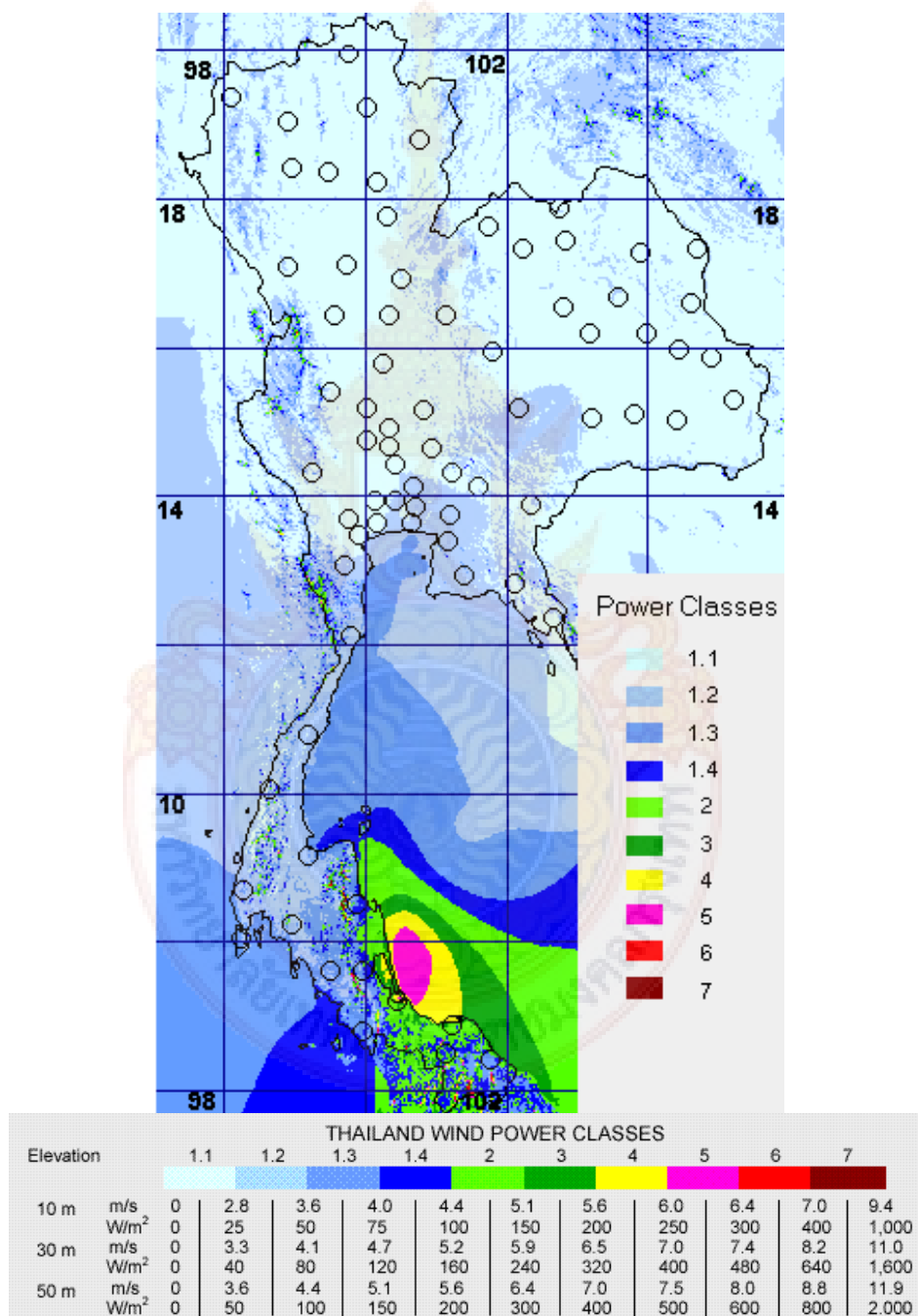
แห่งชาติศรีพังงาจังหวัดพังงา อุทยานแห่งชาติเขานมเบญจา จังหวัดกระบี่ ส่วนแหล่งที่มีศักยภาพรองลงมา โดยมีกำลังลมเฉลี่ยทั้งปีตั้งแต่ระดับ 1.3 ถึง 2 (class1.3 – class2) หรือมีความเร็วลม 4.4 เมตรต่อวินาทีขึ้นไปที่สูงกว่า 50 เมตร พบว่าที่ภาคใต้ตอนบนบริเวณอำเภอไทยชายฝั่งตะวันตกตั้งแต่จังหวัดเพชรบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จังหวัดชุมพรถึงจังหวัดสุราษฎร์ธานีและบริเวณเทือกเขาในภาคเหนือคือจังหวัดเชียงใหม่ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือคือจังหวัดเพชรบูรณ์และจังหวัดเลย โดยได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และพบที่ภาคใต้ฝั่งตะวันตกตั้งแต่จังหวัดพังงา จังหวัดภูเก็ต จังหวัดกระบี่ จังหวัดตรังถึงจังหวัดสตูลและชายฝั่งตะวันออกบริเวณอำเภอไทยคือ จังหวัดระยองและจังหวัดชลบุรี โดยได้รับอิทธิพลมรสุมตะวันตกเฉียงใต้

จากข้อมูลศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น หากเทียบกับประเทศในยุโรปแล้วถือว่ามีความศักยภาพต่ำมาก ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วแล้วความเร็วลมในระดับประมาณ 6 เมตรต่อวินาทีถือว่ายังไม่เหมาะกับการติดตั้งกังหันลมขนาดใหญ่ระดับเมกะวัตต์ เพราะกังหันลมขนาดดังกล่าวต้องการความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 12 – 13 เมตรต่อวินาที ดังนั้นทางเลือกที่เหมาะสมของประเทศไทยหากจะมีการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานลมในการผลิตไฟฟ้าควรจะเป็นระบบขนาดเล็กในช่วงพิกัดกำลังกิโลวัตต์จะมีความเหมาะสมกว่า



ภาพที่ 2.18 ภาพอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กับตะวันออกเฉียงเหนือ
ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.2546. ออนไลน์

ถึงแม้ผลจากการศึกษาศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทยค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับที่อื่น แต่
ก็ไม่ได้หมายความว่าพลังงานลมที่มีอยู่ไม่สามารถใช้ได้ จากผลการเปรียบเทียบต้นทุนในการลงทุน
ระหว่างพลังงานจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมพบว่า การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมมี
ต้นทุนถูกกว่าประมาณ 8 – 10 เท่า และยิ่งถ้าสามารถผลิตไบโพลีของกังหันลมได้เองจะถูกกว่าถึง 10
เท่า



ภาพที่ 2.19 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย [1]-[2]

ในปัจจุบันในประเทศไทยมีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมและจ่ายเข้าระบบสายส่งในปริมาณที่น้อยมากหากเทียบกับพลังงานอื่นๆ โดยมีการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 150 กิโลวัตต์ ซึ่งผลิตโดยบริษัทนอร์ดเทก ประเทศเดนมาร์กในพื้นที่ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ณ แหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539 เพื่อสาธิตการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10 กิโลวัตต์ โดยจ่ายไฟเข้าระบบสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จนถึงปัจจุบันระบบผลิตไฟฟ้ายังทำงานได้อยู่

การที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่เปลี่ยนรูปพลังงานจลน์ของกระแสลมให้อยู่ในรูปของพลังงานกล อุปกรณ์นี้เรียกว่า กังหันลม โดยพิจารณาจากกระแสลมที่มีความหนาแน่นและมีความเร็วและเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด กังหันลมจะทำหน้าที่สกัดกำลังงานที่อยู่ในกระแสลมมาใช้ประโยชน์ได้เพียงบางส่วนเท่านั้น

2.7.1 ส่วนประกอบของระบบกังหันลม

ส่วนประกอบที่สำคัญๆ ของกังหันลมโดยทั่วๆ ไปอาจแบ่งได้ดังนี้

1. ใบกังหัน

ใบกังหันนับเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดพลังงานกลที่เพลลาของกังหัน จำนวนใบกังหันอาจมีตั้งแต่หนึ่งถึงหลายสิบใบ กังหันลมที่มีจำนวนใบมากส่วนใหญ่จะใช้กับงานที่ต้องการแรงบิดสูง ในทางตรงข้ามกังหันที่มีจำนวนใบน้อยส่วนใหญ่จะใช้กับงานที่ต้องการความเร็วรอบสูง เช่น การผลิตไฟฟ้า เป็นต้น

โดยรูปหน้าตัดของใบพัดของกังหันอาจมีตั้งแต่ลักษณะแบนอากาศ หรือลักษณะคล้ายปีกเครื่องบิน เป็นแผ่นโค้งและเป็นแผ่นราบตรง วัสดุที่ใช้ทำใบกังหันควรเป็นวัสดุที่เบาและแข็งแรงซึ่งอาจเป็นอลูมิเนียมอัลลอยด์ แผ่นเหล็ก ไม้ และไฟเบอร์กลาสขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและความต้องการของผู้ออกแบบ

2. ระบบควบคุม

ระบบควบคุมในชุดกังหันลมส่วนใหญ่มี 2 ชนิด

2.1 การควบคุมเพื่อป้องกันความเสียหายเนื่องจากความเร็วลมแรงสูง

2.2 การควบคุมให้กังหันหันหน้าเข้าหาทิศทางลม ส่วนมากระบบนี้จะใช้ระบบทางเสือ โดยเฉพาะกังหันลมชนิดเล็ก

3. ระบบส่งกำลัง

การส่งกำลังจากตัวกังหันเพื่อไปใช้งานอาจต่อกับเพลาดำโดยตรง หรือผ่านระบบส่งกำลัง เช่น เฟือง สายพาน สายไฮดรอลิกส์ ซึ่งจะมีการทดรอบให้สอดคล้องกันระหว่างความเร็วรอบของแกนของกังหันกับการใช้งานในลักษณะต่างๆ

2.7.2 กังหันลมกับการใช้งาน

เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของความเร็วลมที่แปรผันตามธรรมชาติ และความต้องการพลังงานที่สม่ำเสมอให้เหมาะกับการใช้งานแล้ว จะต้องมีการเก็บพลังงานหรือกักพลังงานและใช้แหล่งพลังงานอื่นที่เชื่อถือได้เป็นแหล่งพลังงานสำรอง หรือใช้ร่วมกับแหล่งพลังงานอื่น

ตัวกักเก็บพลังงานมีอยู่หลายชนิด ส่วนมากขึ้นอยู่กับงานที่ใช้ เช่น ถ้าเป็นกังหันเพื่อผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมักใช้แบตเตอรี่เป็นตัวกักเก็บพลังงาน การสูบน้ำไปกักเก็บไว้ในลักษณะของพลังงานศักย์และการเก็บในรูปของพลังงานกล การใช้แหล่งพลังงานอื่นที่เป็นตัวหมุน ระบบนี้ปกติกังหันลมจะทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้ตลอดเวลาที่มีความเร็วลมเพียงพอ หากความเร็วลมต่ำหรือลมสงบ แหล่งพลังงานชนิดอื่นจะทำหน้าที่จ่ายพลังงานทดแทน

การใช้ร่วมกับแหล่งพลังงานอื่นๆ ระบบนี้ปกติมีแหล่งพลังงานชนิดอื่นจ่ายพลังงานอยู่แล้ว กังหันลมจะจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีความเร็วลมเพียงพอซึ่งในขณะเดียวกันก็ลดการจ่ายพลังงานจากแหล่งอื่น เช่น ลดพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบนี้ต่างจากระบบอื่นๆ คือ ระบบอื่นจะใช้พลังงานลมเป็นหลักและใช้พลังงานอื่นๆ เป็นพลังงานสำรอง แต่ระบบนี้ใช้พลังงานอื่นเป็นพลังงานหลักและใช้พลังงานลมเป็นพลังงานสำรองนั่นเอง

2.7.3 สถานภาพการวิจัยกังหันลมผลิตไฟฟ้า

1. สหรัฐอเมริกา

- การวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานลม
- การศึกษาความเหมาะสมทางเทคนิค และเศรษฐศาสตร์
- การทดสอบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่จำหน่ายโดยทั่วไป
- การทดสอบกังหันลมแบบแควร์เรียส ขนาดกำลังผลิต 2-32 กิโลวัตต์
- การทดสอบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ 100 kW Mod 0 ขนาด 200 kW Mod 0A จำนวน 3 ชุด และขนาด 2,000 kW
- การติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าในลักษณะ Wind Farm รวมกำลังผลิตมากกว่า 600,000 kW

2. แคนาดา

- การวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานลม
- การติดตั้งทดสอบกังหันลมแตรรี่ขนาดกำลังผลิต 200 kW
- การศึกษาระบบกังหันลมพรอเพลเลอร์ขนาดกำลังผลิต 2,000 kW

3. สวีเดน

- การวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานลม
- การทดสอบกังหันลมพรอเพลเลอร์ขนาดกำลังผลิต 65 kW

4. เดนมาร์ก

- การปรับปรุงทดสอบกังหันลมขนาดกำลังผลิต 200 kW
- การติดตั้งทดสอบกังหันลมพรอเพลเลอร์ขนาดกำลังผลิต 2,000 kW

5. ฮอลแลนด์

- การวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานลม
- การศึกษาการใช้ประโยชน์กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่
- การทดสอบติดตั้งกังหันลมแตรรี่ขนาดผ่าศูนย์กลาง 25 เมตร

6. เยอรมัน

- การวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานลม
- การพัฒนากังหันลมผลิตไฟฟ้าพรอเพลเลอร์ขนาดผ่าศูนย์กลาง 52 เมตร
- การทดสอบกังหันลมแกนตั้งขนาดกำลังผลิต 20 kW

7. ฝรั่งเศส

- การวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานลม
- การติดตั้งทดสอบกังหันลมพรอเพลเลอร์ขนาดกำลังผลิต 100-1,000 kW
- การติดตั้งทดสอบกังหันลมแบบแกนตั้ง

2.7.4 พลังงานลมในประเทศไทย

จากสมการที่กล่าวถึงข้างต้น จะเห็นว่ากำลังงานที่ได้จากกังหันลมแปรผันตามกำลังสามของความเร็วลมที่พัดผ่าน ดังนั้นความเร็วลมเฉลี่ยจึงเป็นตัวบ่งบอกศักยภาพของการใช้กังหันลมได้เป็นอย่างดีในขั้นแรก หน่วยงานในประเทศไทยที่ทำการบันทึกข้อมูลไว้ก็คือ กรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งได้บันทึกข้อมูลทั่วประเทศมานานไม่น้อยกว่า 25 ปี การบันทึกข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยานี้ส่วนใหญ่จะบันทึกค่าทุก ๆ 3 ชั่วโมง ซึ่งข้อมูลนี้เน้นไปใช้งานทางด้านอุตุนิยมวิทยามากกว่าการใช้ประโยชน์ในแง่พลังงาน กรมอุตุนิยมวิทยาได้ตีพิมพ์เอกสารข้อมูลสถิติลมพร้อมทั้งสถิติภูมิอากาศ

อื่น ๆ โดยเฉลี่ยข้อมูลเป็นรายเดือน ในคาบ 25 ปี และอีกฉบับหนึ่งเป็นแผนผังลมของประเทศไทย ในคาบ 20 ปี นอกจากนี้ยังมีสถาบันการศึกษาอีก 2 แห่ง ที่ได้มีการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ตีพิมพ์เป็นเอกสารแล้ว โดยอาศัยข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา

ปริญญานิพนธ์ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ การแสดงผลการวิเคราะห์นี้ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของกราฟ เช่น การกระจายความถี่ของความเร็วลม ความยาวนานของความเร็วลม (Duration Curve) การกระจายความถี่ และความยาวนานของพลังงานลม

สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย โดย Dr. Excell ใช้การแสดงผลงานอยู่ในรูปของ Parameter 2 ตัว ของสมการคณิตศาสตร์ Weibul Distribution พารามิเตอร์ทั้งสองคือ c และ k สมการนี้เป็นที่ยอมรับกันว่าใกล้เคียงกับการกระจายความถี่ของข้อมูลความเร็วลมมากและเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย Weibul Distribution นี้เหมาะสำหรับงานวิเคราะห์ทางด้าน Mathematical Model ของการวิเคราะห์ระบบกังหันลมซึ่งต้องอาศัยความรู้ทางด้านคณิตศาสตร์ และสถิติเป็นอย่างมาก

เป็นที่น่าสังเกตว่าการวิเคราะห์นี้ได้อาศัยข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยาซึ่งมีสถานีตรวจอากาศหลายแห่ง ในตอนแรกตั้งสถานีใหม่ ๆ นั้นก็อาจถูกต้องตามหลักของกรมอุตุนิยมวิทยาซึ่งต้องการพื้นที่โล่ง ไม่มีสิ่งกีดขวางใด ๆ แต่ปัจจุบันบริเวณนั้น ส่วนมากกลายเป็นชุมชนที่มีอาคารหรือต้นไม้สูงอยู่ล้อมรอบ ทำให้ข้อมูลที่วัดได้เกิดความคลาดเคลื่อน นอกจากนี้อุปกรณ์การวัดความเร็วลมควรมีการตรวจสอบเทียบมาตรฐานอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง แต่ในทางปฏิบัติ แล้ว มักจะไม่มีมีการตรวจสอบหลังการติดตั้งเลย

กรมอุตุนิยมวิทยาได้รับความช่วยเหลือทางด้านการเก็บข้อมูลพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์และลม จาก USIAD ทำให้ได้รับอุปกรณ์ที่ทันสมัยหลายชนิดพร้อมทั้งอุปกรณ์สอบเทียบมาตรฐานของเครื่องวัดด้วย กรมอุตุนิยมวิทยาได้ร่วมมือกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีในการวิเคราะห์ข้อมูลลมใหม่พร้อมกันนี้ Dr. Excell ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญได้ให้คำปรึกษา และวิเคราะห์ข้อมูลเพิ่มเติม จึงหวังเป็นอย่างยิ่งว่าอีกไม่นานนัก ก็คงจะได้ข้อมูลลม และศักยภาพของพลังงานลมที่ใกล้เคียงความจริงมากขึ้น

Meier และ Merson ได้จำแนกระดับความเร็วเฉลี่ยที่ความสูง 10 เมตร จากพื้นดินที่เหมาะสม สำหรับการใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้าออกเป็น 3 ระดับดังนี้

- ระดับต่ำ 4 – 5 เมตรต่อวินาที
- ระดับปานกลาง 5 – 7 เมตรต่อวินาที
- ระดับสูงตั้งแต่ 7 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป

ส่วนกังหันลมเพื่อการสูบน้ำ เช่น กังหันลมแบบหลายใบพัดที่จำหน่ายในประเทศสามารถใช้งานได้กับความเร็วลมเฉลี่ยต่ำถึง 3 เมตรต่อวินาที หากความเร็วเฉลี่ยต่ำกว่านี้พลังงานที่ได้จะน้อยจนไม่นำมาใช้งานได้

หากพิจารณาถึงสถิติข้อมูลลม เท่าที่กรมอุตุนิยมวิทยาได้บันทึกไว้ใน สถิติภูมิอากาศของประเทศและใช้ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งปี 3 เมตรต่อวินาที เป็นเกณฑ์ จะมีจำนวนสถานีตรวจอากาศประมาณร้อยละ 80 ที่มีความเร็วลมต่ำกว่า 3 เมตรต่อวินาที สำหรับประเทศไทยโดยทั่วไปจัดได้ว่ามีศักยภาพต่ำ แต่บริเวณตามชายฝั่งอ่าวไทย และทางภาคใต้ของประเทศ

กังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าในเมืองไทย ยังอยู่ในระหว่างการพัฒนาและทดสอบและยังไม่ถึงขั้นจำหน่ายในท้องตลาด อย่างไรก็ตาม การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยความร่วมมือกับสถาบันการศึกษาในประเทศได้ทำการศึกษาค้นคว้าสร้างกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมกับสภาพพลังงานลมของประเทศไทยเนื่องจากพลังงานลมในประเทศไทยมีกำลังค่อนข้างน้อยและบางประเทศมีกำลังลมที่แรงแตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องออกแบบกังหันให้เหมาะสมกับแต่ละสถานที่ ภูมิอากาศ กล่าวคือ ทำการศึกษาระบบกังหันลมแบบแควร์เรียส ร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระบบกังหันลมแบบพรอเพลเลอร์ กับมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

นอกจากนี้ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยก็ทำการทดสอบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบพรอเพลเลอร์ที่จัดหาจากต่างประเทศ โดยติดตั้งทดสอบบริเวณแหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต กังหันลม BWC EXCEL-R/240 ขนาด 10 kW 2 ตัว จากประเทศอเมริกา และกังหันลม Nord Tank ขนาด 150 kW จากประเทศเดนมาร์ก จ่ายไฟเข้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 10 kW

2.7.5 การศึกษาวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

1. ต้นทุนกังหันลมผลิตไฟฟ้า กรณีผลิตกังหันลมในเชิงพาณิชย์ราคากังหันลมผลิตไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 600,000 บาท/kW (ขนาดกำลังผลิตประมาณ 30 วัตต์) ถึง 30,000 บาท/kW (ขนาดกำลังผลิต 10-15 kW)

กรณีกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ ส่วนใหญ่จะเป็นกังหันลมทดลองต้นแบบในขนาดกำลังผลิต 100-1,000 kW ซึ่งราคาอยู่ระหว่าง 20,000-30,000 บาท/kW ราคาที่ลดลงตามขนาดของกังหันลมที่โตขึ้นก็ยังไม่สามารถจะกำหนดได้แน่นอน

2. ค่าดำเนินการและบำรุงรักษา กังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยทั่วไปจะออกแบบให้มีการควบคุมการทำงานโดยอัตโนมัติ อย่างไรก็ตามนักวิชาการที่ทำการติดตั้งทดสอบระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้ากำหนดให้ค่าดำเนินการและค่าบำรุงรักษาปีละ 4% ของราคากังหันลม

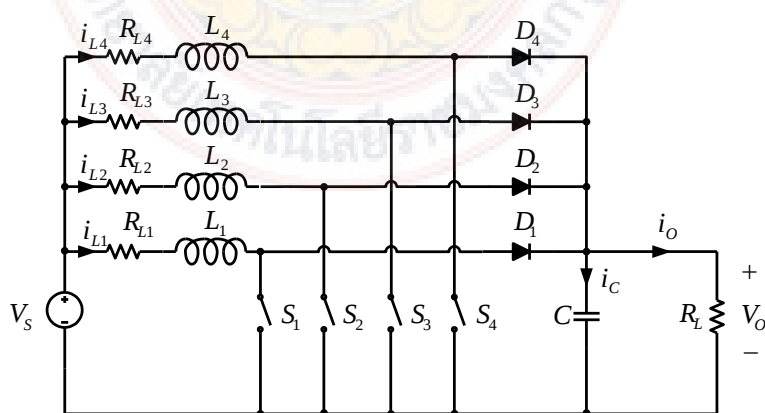
3. ราคากระแสไฟฟ้า ตัวประกอบหลักของราคากระแสไฟฟ้าขึ้นกับคุณลักษณะของกังหันลม และสถานที่ติดตั้ง อย่างไรก็ตามตัวประกอบอื่นๆ อาทิ เช่น อัตราดอกเบี้ย ก็มีผลการเปลี่ยนแปลงราคากระแสไฟฟ้าเช่นกัน

ตัวอย่างกรณีศึกษา

- ราคากังหันลม 50,000 บาท/kW
- ค่าบำรุงรักษา/ดำเนินการ 2,000 บาท/kW
- อายุการใช้งาน 20 ปี
- อัตราดอกเบี้ย 10 %
- ช่วยเวลาการใช้งานเต็มกำลังผลิต 3,000-4,500 ชม/ปี
- ราคาเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า 2.6-2 บาท /kWh

2.8 วงจรบูสตีชีฟต์สี่คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน

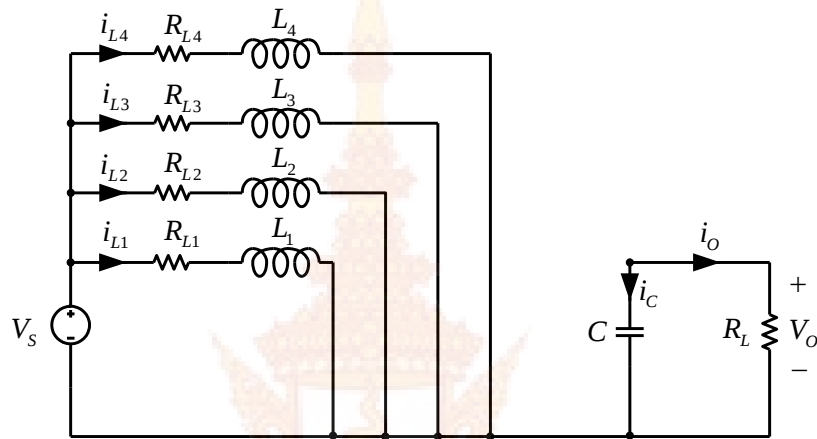
หลังจากกังหันลมรับแรงดันไฟฟ้าผ่านวงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแล้วระดับแรงดันไฟฟ้าที่ได้นั้นยังไม่คงที่ดังนั้นจึงใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสตีชเพื่อยกระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ โดยในงานวิจัยใช้วงจรบูสตีชคอนเวอร์เตอร์แบบขนานที่มีการแบ่งกระแสเพื่อลดกระแสกระเพื่อมด้านอินพุต [4]



ภาพที่ 2.20 วงจรบูสตีชีฟต์สี่คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน

จากภาพที่ 2.20 วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ครึ่งสะพานเพื่อหาสมการแรงดันและกระแสโดยใช้หลักการพิจารณาเหมือนกับวงจรบูสแบบพื้นฐาน ในการขนานวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์สามารถที่จะขนานได้มากกว่า 2 โมดูลขึ้นไป ดังนั้นกระแสที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำหาได้จากสมการกระแสของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเพียงสี่โมดูลซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

2.8.1 ขณะสวิตช์ปิด



ภาพที่ 2.21 วงจรสมมูลขณะสวิตช์ปิด

$$V_S = V_{RL1} + V_{L1} \quad (2.15)$$

$$V_{RL1} = i_{L1} R_{L1} \quad (2.16)$$

$$V_{L1} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} \quad (2.17)$$

$$V_S = (i_{L1} R_{L1}) + L_1 \frac{di_{L1}}{dt} \quad (2.18)$$

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = V_S - R_{L1} i_{L1} \quad (2.19)$$

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{1}{L_1} (V_S - R_{L1} i_{L1}) \quad (2.20)$$

สมการกระแสที่ไหลผ่าน i_{L1} หาได้จาก

$$i_{L1} = \frac{1}{L_1} \int (V_S - R_{L1} i_{L1}) dt \quad (2.21)$$

กระแสที่ไหลใน i_{L1} และ i_{LN} ก็สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วิธีเดียวกันจะได้

$$i_{L2} = \frac{1}{L_2} \int (V_S - R_{L2} i_{L2}) dt \quad (2.22)$$

$$i_{LN} = \frac{1}{L_N} \int (V_S - R_{LN} i_{LN}) dt \quad (2.23)$$

สามารถวิเคราะห์สมการของแรงดันได้ดังนี้ คือ

$$i_C = i_O \quad (2.24)$$

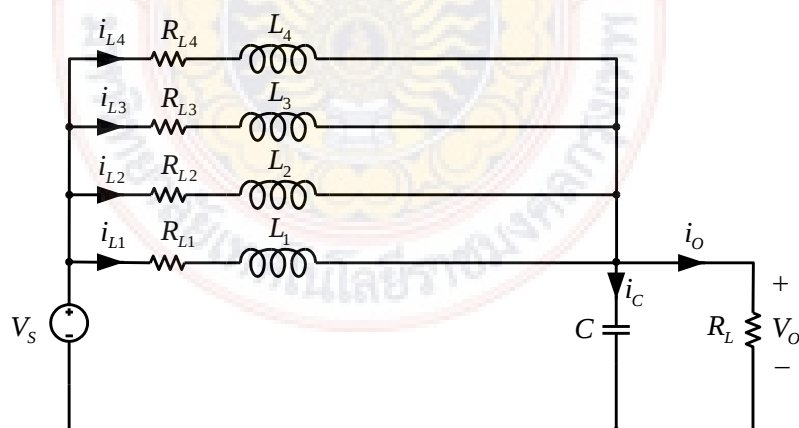
$$i_C = C \frac{dV_O}{dt} \quad (2.25)$$

$$C \frac{dV_O}{dt} = i_O \quad (2.26)$$

แรงดันทางเอาต์พุตหาได้จากสมการดังนี้

$$V_O = \frac{1}{C} \int (i_{L1} + i_{L2} + i_{LN}) dt \quad (2.27)$$

2.8.2 ขณะสวิตช์เปิด



ภาพที่ 2.22 วงจรสมมูลขณะสวิตช์เปิด

เมื่อสวิตช์เปิดกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ใดโอด ทุกตัวจะถูกไปอัสไปข้างหน้าให้นำกระแสไหลผ่านทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวอย่างต่อเนื่อง ดังภาพที่ 2.22 สมมติแรงดันไฟฟ้าที่ด้านเอาต์พุตมีค่าคงที่ จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังนี้

$$V_S = V_{RL1} + V_{L1} + V_O \quad (2.28)$$

$$V_{RL1} = i_{L1} \cdot R_{L1} \quad (2.29)$$

$$V_{L1} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} \quad (2.30)$$

$$V_S = (i_{L1} R_{L1}) + (L_1 \frac{di_{L1}}{dt}) + V_O \quad (2.31)$$

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = V_S - (i_{L1} R_{L1}) + V_O \quad (2.32)$$

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{1}{L_1} (V_S - (i_{L1} R_{L1}) - V_O) \quad (2.33)$$

ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่าน i_{L1} หาได้จากสมการ

$$i_{L1} = \frac{1}{L_1} \int (V_S - (i_{L1} R_{L1}) - V_O) \quad (2.34)$$

ส่วนกระแสที่ไหลใน i_{L2} และ i_{LN} ก็สามารถหาได้ด้วยวิธีเดียวกันสมการของแรงดันสามารถวิเคราะห์ได้จากการพิจารณาการเท่ากันของกระแสไหลเข้ากับกระแสไหลออก เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$i_{L1} + i_{L2} + i_{LN} = i_C + i_O \quad (2.35)$$

$$i_C = (i_{L1} + i_{L2} + i_{LN}) - i_O$$

$$i_O = C \frac{dV_O}{dt} \quad (2.36)$$

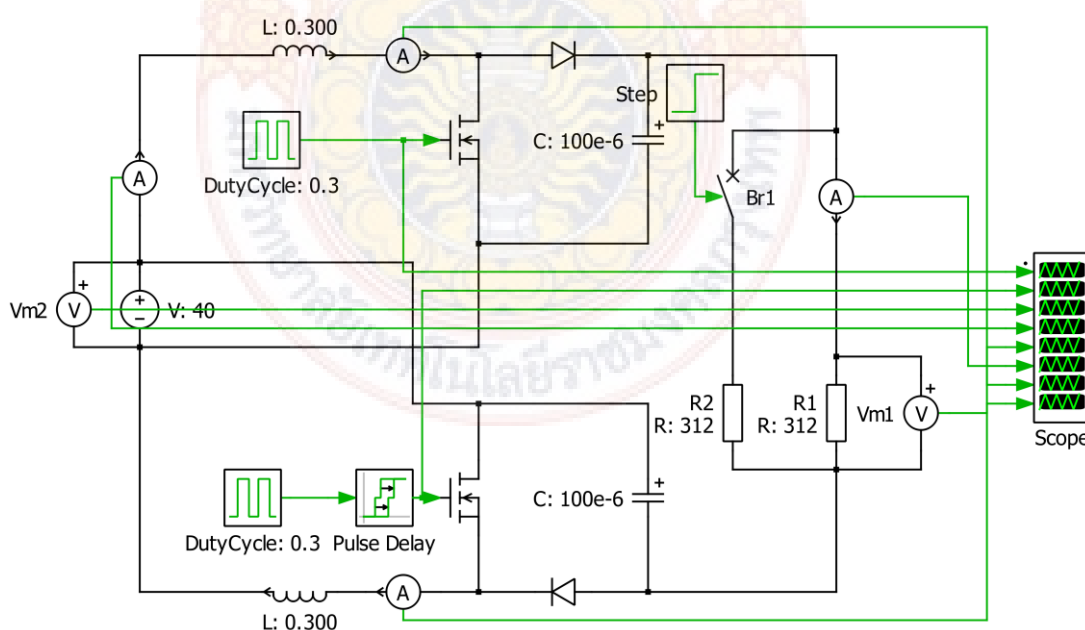
ดังนั้นผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวหาได้จากสมการ

$$V_O = \frac{1}{C} \int ((i_{L1} + i_{L2} + i_{LN}) - i_O) dt \quad (2.37)$$

2.9 ดีไซน์ทฤษฎีคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูง

วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบพื้นฐานเป็นวงจรที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในงานที่ต้องการระดับแรงดันทางด้านเอาต์พุตสูงกว่าแรงดันด้านอินพุตแต่แรงดันที่ได้ยังมีขนาดไม่สูงมากเนื่องจากวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ ยังมีข้อจำกัดคืออัตราขยายของวงจรสามารถยกระดับแรงดันประมาณ 4 เท่า หากสั่งให้วงจรมีอัตราขยายแรงดันมากกว่านี้ วงจรก็จะขาดความเสถียรแต่ถ้าต้องการทำให้ระดับแรงดันทางด้านเอาต์พุตสูงมากว่านี้ จำเป็นที่จะต้องใช่วงจรคอนเวอร์เตอร์ ที่มีการประยุกต์ใช้หม้อแปลงเพื่อใช้จำนวนรอบของขดลวดขุมิมาขยายระดับแรงดันให้สูงมากขึ้นแต่วิธีนี้จะมีข้อจำกัดเรื่องการพันจำนวนรอบของขดลวดไม่ตรงกับอัตราขยายที่ได้ออกแบบไว้และปัญหาการแปลงแรงดันขึ้นของหม้อแปลง (Step Up) เกิดปัญหาในเรื่องของการสะท้อนกลับของอิมพีแดนซ์ ที่มีผลกลับมาในวงจร (Reflected Impedance) ทำให้แรงดันอินพุตน้อยลงเนื่องจากมีแรงดันไปตกคร่อมที่อินพุตอิมพีแดนซ์มีผลทำให้แรงดันทางเอาต์พุตน้อยลง

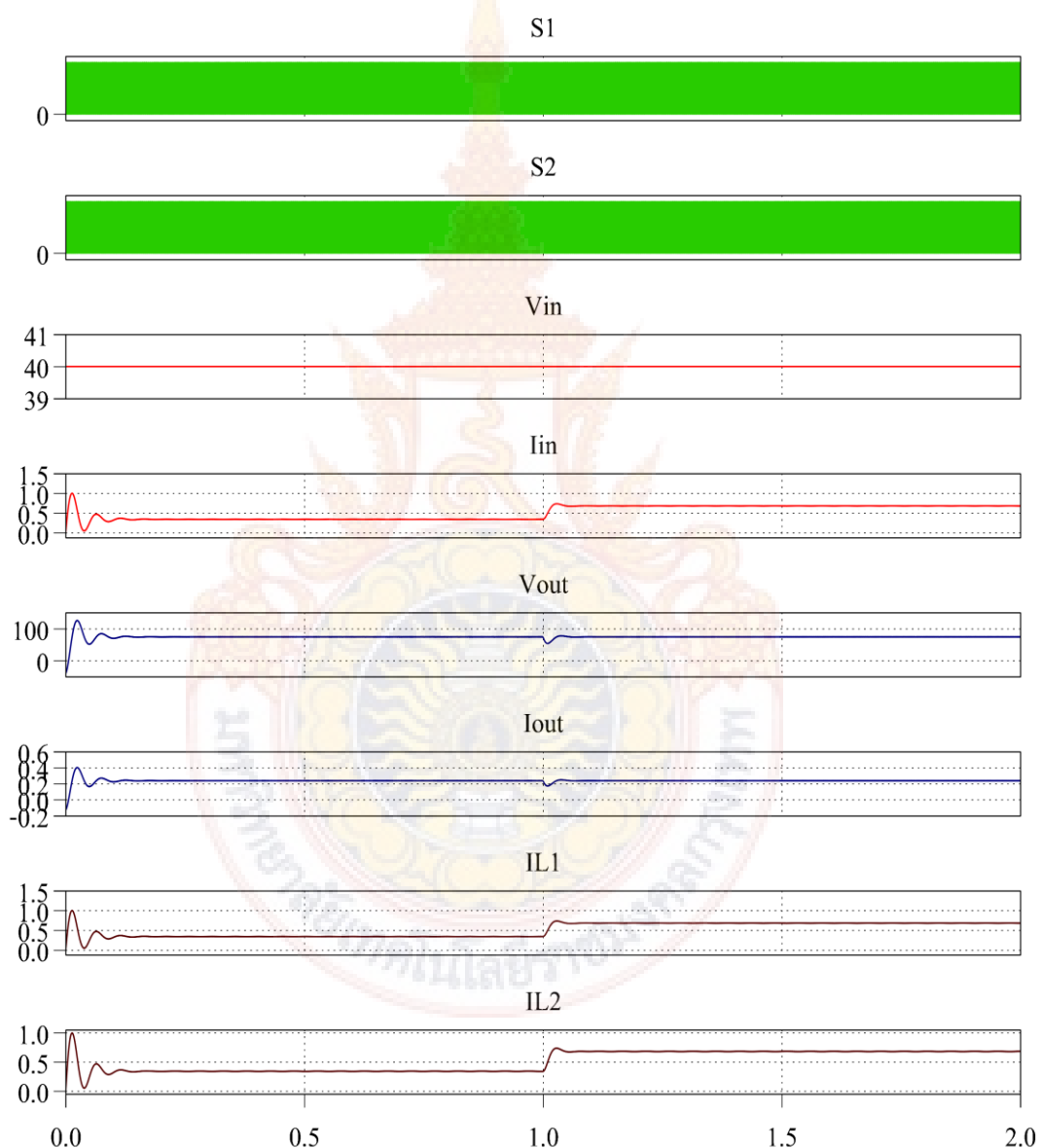
ดังนั้นจึงมีการคิดวงจรยกระดับแรงดันขึ้นมาใหม่โดยที่ไม่มีการใช้หม้อแปลงเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่จะใช้วิธีการรวมแรงดันที่มาจากตัวเก็บประจุดังภาพที่ 2.23 ทำให้อัตราขยายแรงดันมากกว่าวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบธรรมดาเมื่อเทียบที่วัฏจักรงานเท่าๆกัน และได้ใช้โปรแกรม PLECS ในการจำลองวงจรดีไซน์ทฤษฎีคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูงและจะมีปรับเปลี่ยนโหลดในขณะที่วงจรทำงานเพื่อดูผลของกระแสและแรงดันภายในวงจรดังภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 วงจรดีไซน์ทฤษฎีคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูง

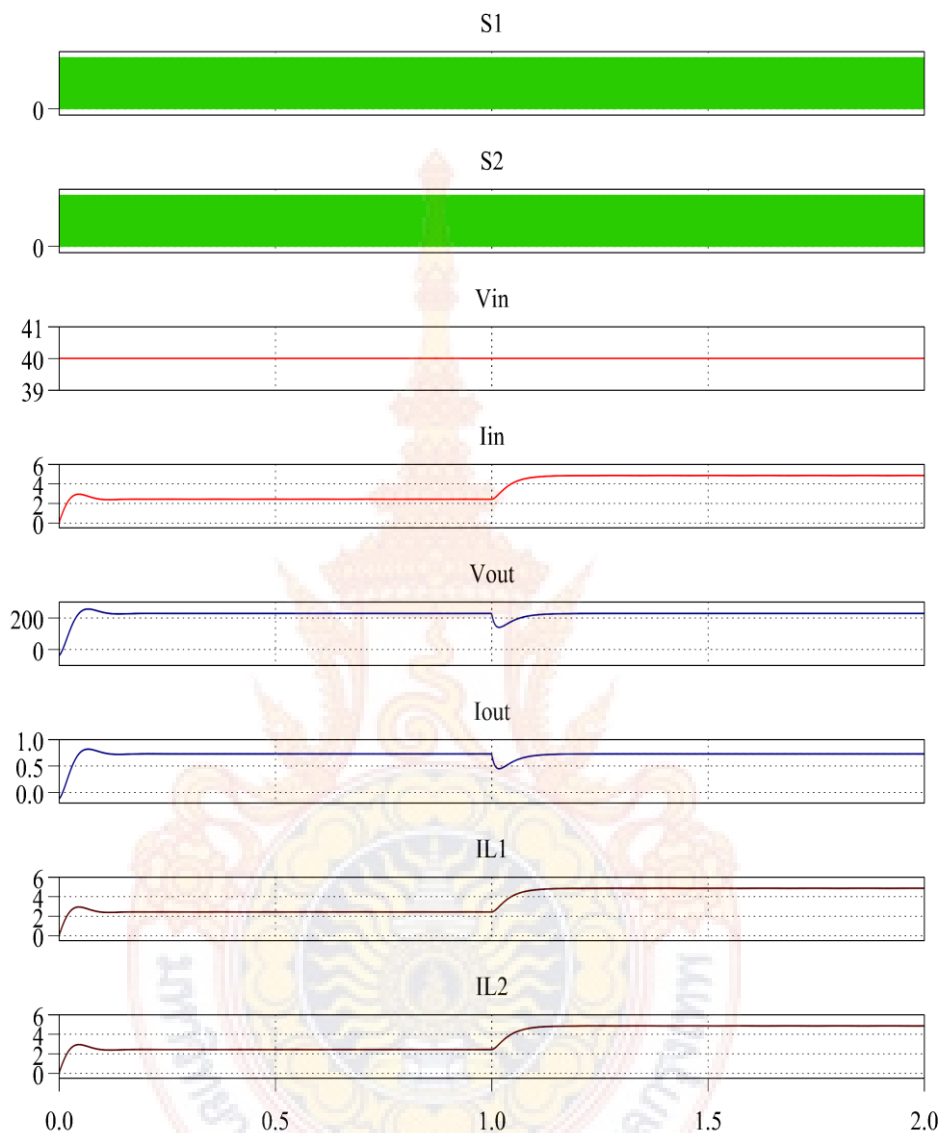
ซึ่งการจำลองวงจรดีซิงก์คอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูงจะมีปรับเปลี่ยนโหลดในขณะที่ยังทำงานเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันที่อุปกรณ์ต่างๆภายในวงจรดังภาพที่ 2.24 และภาพที่ 2.25

กำหนดให้ค่า $D < 50$ เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันที่อุปกรณ์ต่างๆภายในวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด ที่ $D < 50$ เปอร์เซ็นต์

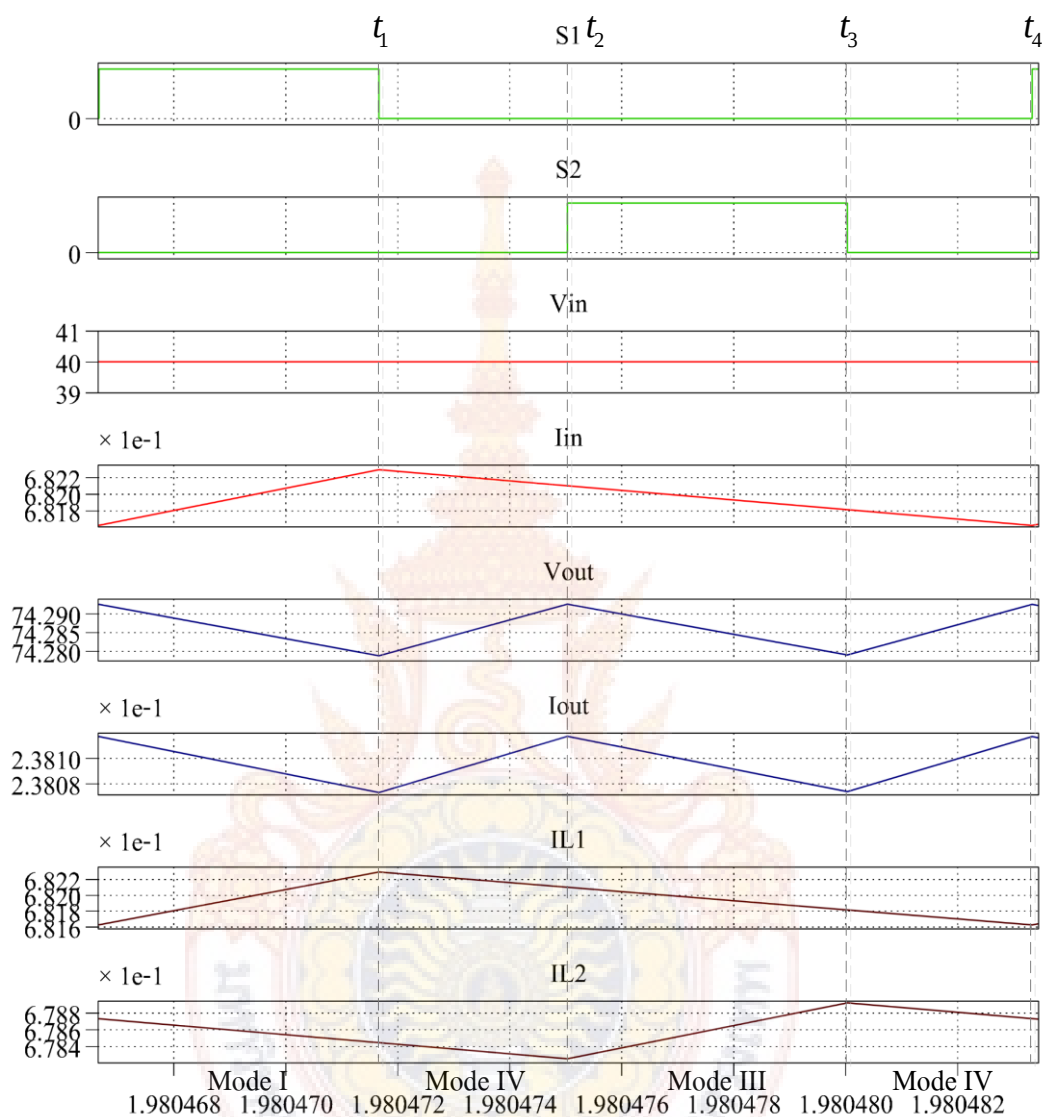
กำหนดให้ค่า $D > 50$ เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันที่อุปกรณ์ต่างๆภายในวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโวลต์ ที่ $D > 50$ เปอร์เซ็นต์

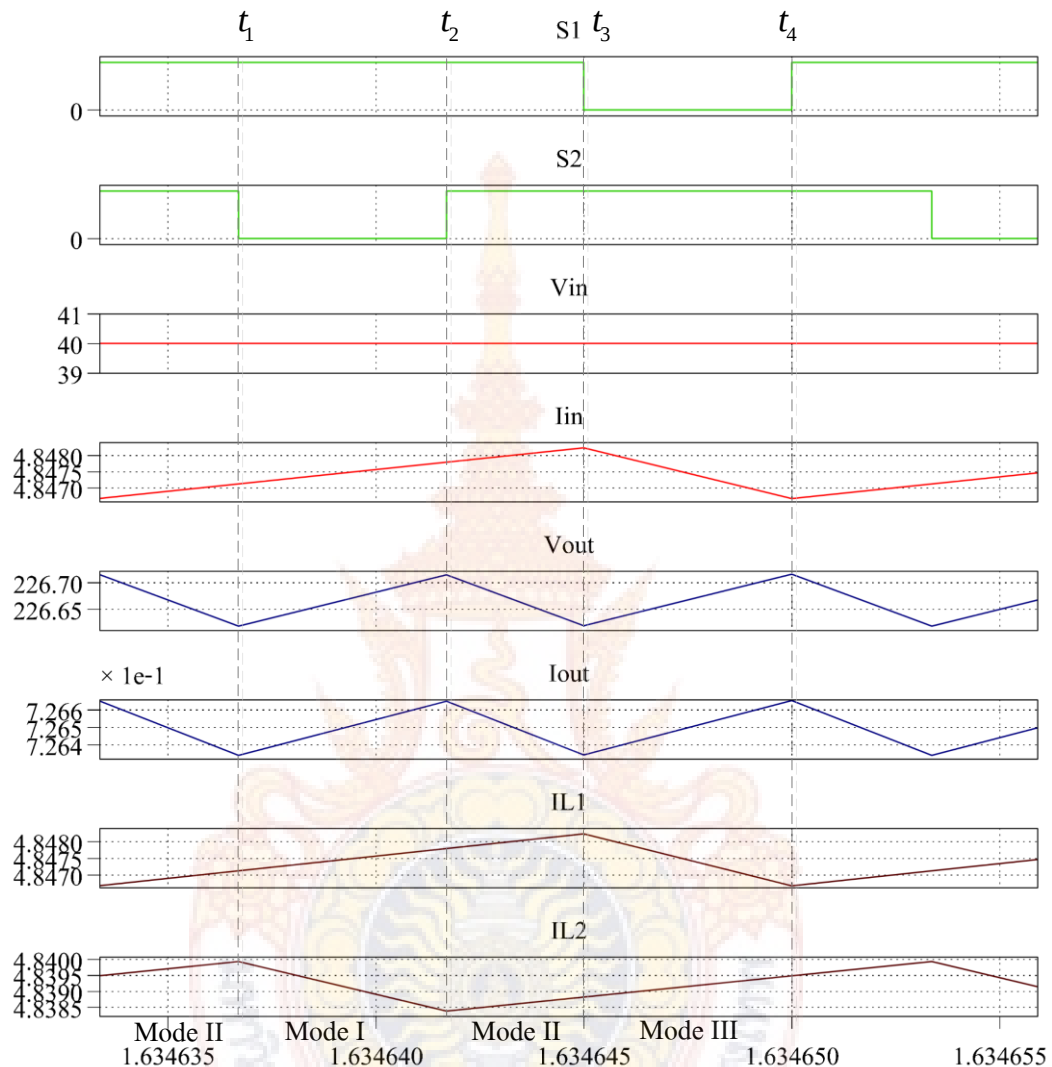
ซึ่งสามารถวิเคราะห์การทำงานของวงจรในช่วงสภาวะอยู่ตัว จะมีการกำหนดเงื่อนไขในการทำงานของวงจรจะแบ่งออกตามค่าตัวที่ใช้เกิดคือแบบ a และแบบ b

เงื่อนไข $a D < 50$ เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 2.26 ความสัมพันธ์ของสัญญาณขับเคลื่อนกระแสและแรงดันต่อคาบเวลาที่ $D > 50$ เปอร์เซ็นต์

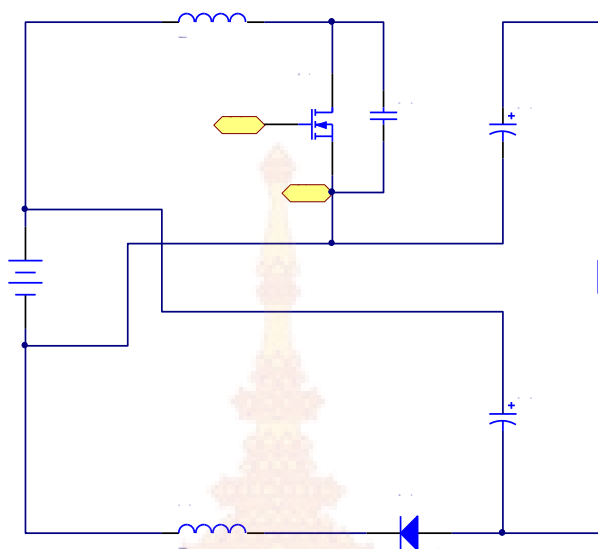
เงื่อนไข $b D > 50$ เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 2.27 ความสัมพันธ์ของสัญญาณขับเคลื่อนกระแสและแรงดันต่อคาบเวลาที่มี $D > 50$ เปอร์เซ็นต์

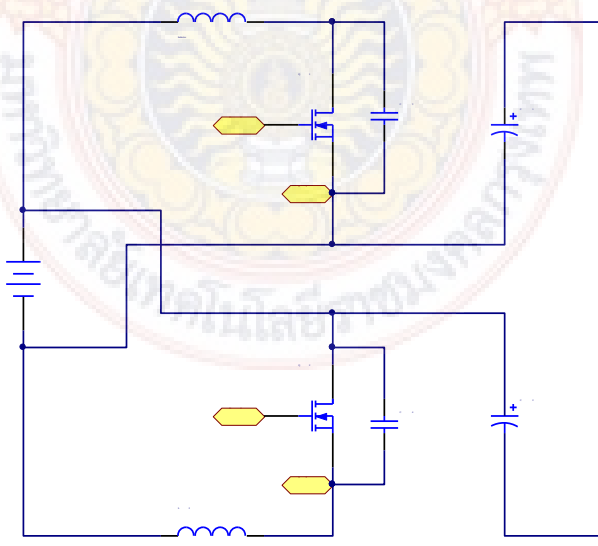
จากภาพที่ภาพที่ 2.26 และภาพที่ 2.27 จะเห็นได้ว่าทั้งเงื่อนไข a และเงื่อนไข b จะมี 4 รูปแบบการทำงานที่แตกต่างกันซึ่งในแต่ละรูปแบบจะมีหลักการทำงานดังนี้

รูปแบบ I จะแสดงการทำงานคือในขณะที่ S_1 นำกระแส S_2 ไม่นำกระแส ดังแสดงใน
ภาพที่ 2.28



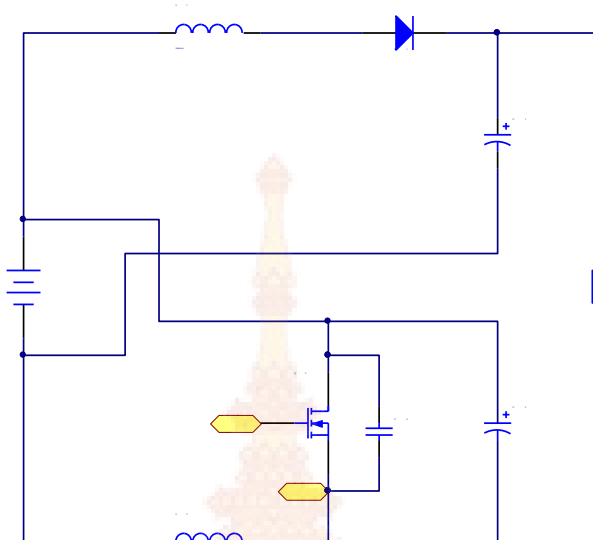
ภาพที่ 2.28 ทิศทางการไหลของกระแสของวงจรในขณะที่ S_1 นำกระแส S_2 ไม่นำกระแส

รูปแบบ II จะแสดงการทำงานคือในขณะที่ S_1, S_2 นำกระแส พร้อมกันทั้งสองตัวดังแสดงใน
ภาพที่ 2.29



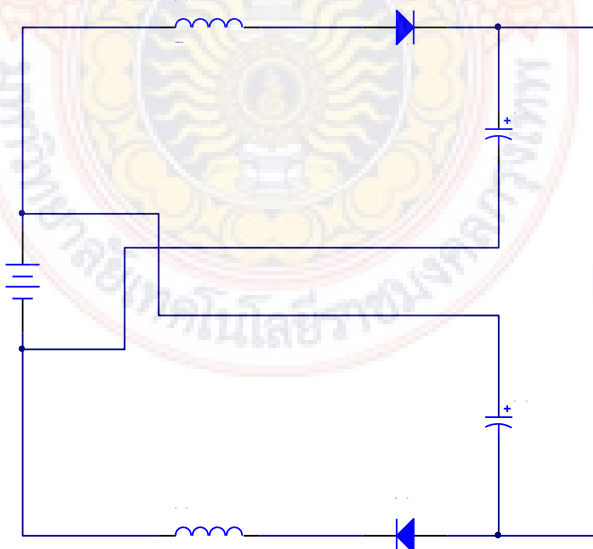
ภาพที่ 2.29 ทิศทางการไหลของกระแสของวงจรในขณะที่ S_1, S_2 นำกระแส พร้อมกัน

รูปแบบ III จะแสดงการทำงานคือในกรณีที่ S_2 นำกระแส S_1 ไม่ทำกระแสแสดงใน
ภาพที่ 2.30



ภาพที่ 2.30 ทิศทางการไหลของกระแสของวงจรในกรณีที่ S_2 นำกระแส S_1 ไม่ทำกระแส

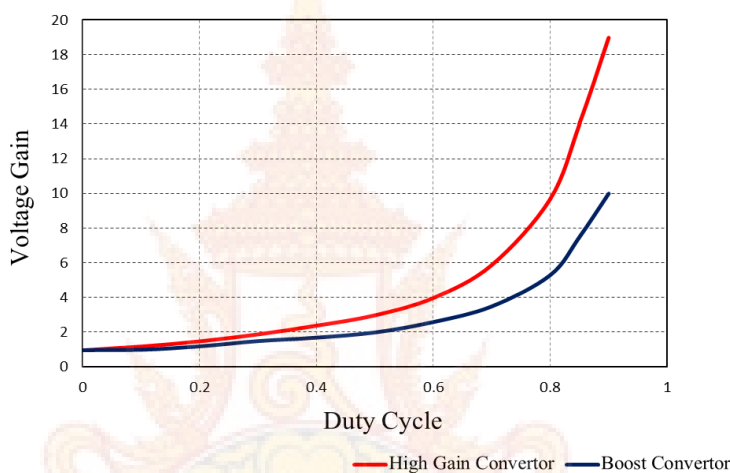
รูปแบบ IV จะแสดงการทำงานคือในกรณีที่ S_1, S_2 ไม่นำกระแส พร้อมกันทั้งสองตัวดัง
แสดงในภาพที่ 2.31



ภาพที่ 2.31 ทิศทางการไหลของกระแสของวงจรในกรณีที่ S_1, S_2 ไม่นำกระแส พร้อมกัน

เมื่อนำแต่ละรูปแบบการทำงานไปประกอบกับภาพที่ 2.16 และภาพที่ 2.17 ก็จะทราบว่าสัญญาณต่างๆในวงจรทั้งสองเงื่อนไขมีลักษณะเป็นอย่างไร

เมื่อนำสมการแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบธรรมดา เทียบกับสมการแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรดิฟเฟอเรนเชียลคอนเวอร์เตอร์อัตราขยายสูงด้วยวิธีการเขียนโปรแกรมเพื่อแทนค่าวัฏจักรงานของทั้งสองสมการเพื่อหาอัตราขยายแรงดันทางด้านเอาต์พุต จากภาพที่ 2.32 จะเห็นว่าที่ค่าวัฏจักรงานสูงวงจรดิฟเฟอเรนเชียลคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูง จะมีอัตราขยายแรงดันทางด้านเอาต์พุตมากกว่าวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบธรรมดา



ภาพที่ 2.32 เปรียบเทียบอัตราขยายแรงดันของวงจรคอนเวอร์เตอร์

วงจรดิฟเฟอเรนเชียลคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูงนี้จะมีวิธีการสวิตช์ที่คล้ายกับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนานคือมีการสลับเฟสการทำงานเพื่อที่สวิตช์จะไม่ทำงานพร้อมกันสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{มุมในการสวิตช์} = \frac{2\pi}{N} \text{ เรเดียน} \quad (2.22)$$

สามารถวิเคราะห์หาอัตราขยายแรงดันทางด้านเอาต์พุตได้จากการใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์

$$-V_O + V_a - V_s + V_b = 0$$

เมื่อ

$$V_o = V_a - V_s + V_b$$

$$V_a = V_b = \frac{V_s}{(1-D)}$$

$$V_o = \frac{V_s}{(1-D)} - V_s + \frac{V_s}{(1-D)}$$

$$V_o = \frac{V_s - V_s(1-D) + V_s}{(1-D)}$$

$$V_o = \frac{V_s + V_s D}{(1-D)}$$

$$V_o = \frac{V_s(1+D)}{(1-D)}$$

ดังนั้นสมการแรงดันทางด้านเอาต์พุตต่อแรงดันทางด้านอินพุตมีค่าเท่ากับ

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{(1+D)}{(1-D)}$$

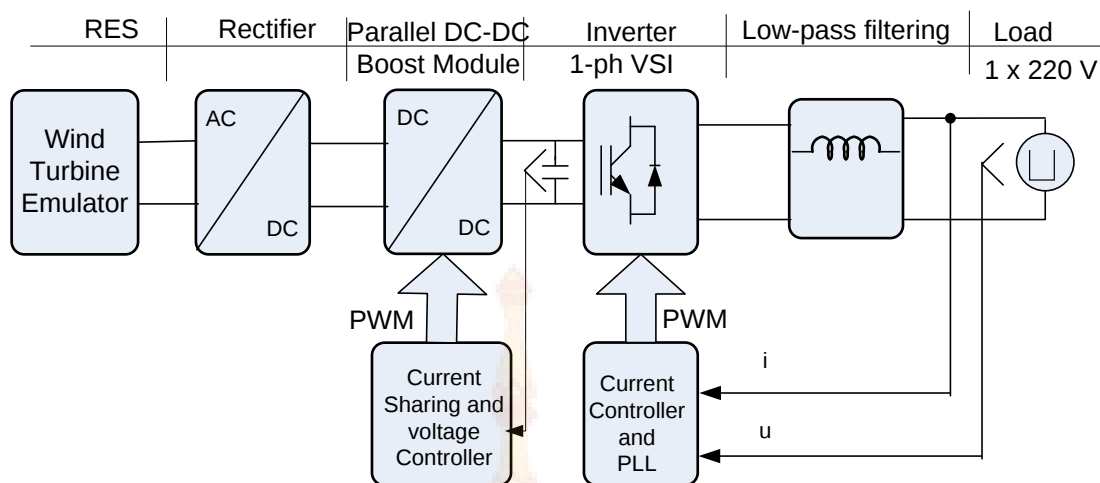
(2.23)

บทที่ 3

การออกแบบงานวิจัย

ในบทนี้จะเป็นการออกแบบงานวิจัยระบบผลิตไฟฟ้าจากเครื่องจำลองกังหันลมที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการ์ดอินเตอร์เฟส และออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ โดยแบ่งออกเป็นวงจรสคอนเวอร์เตอร์ที่มีอัตราขยายแรงดันสูงเพื่อรับแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์แบบแม่เหล็กถาวรและแปลงผันแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น ส่วนอินเวอร์เตอร์แบบหนึ่งเฟสทำหน้าที่แปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 V 50 Hz โดยเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าด้วยวิธีการเฟดล๊อคูลูป โดยลำดับขั้นการทำงานแสดงเป็นผังการดำเนินงานดังนี้

ระยะเวลา(เดือน) ขั้นตอนการวิจัย	เดือนที่												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. ค้นหาข้อมูลของความเร็วลมในประเทศไทยเพื่อจำลองการทำงาน	↔												
2. สร้างแบบจำลองของกังหันลมขนาด 1 kW และความแปรปรวนจากลม		↔											
3. ออกแบบและสร้างคิชีทุติยคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูงและมีการควบคุมแรงดันคงที่				↔									
4. ออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์แบบหนึ่งเฟสที่มีการเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายด้วยวิธีเฟสล็อกดูป							↔						
5. ออกแบบและทดสอบระบบควบคุมวงปิด								↔					
6. วิเคราะห์ผลการทดลองและเปรียบเทียบกับผลจำลองการทำงาน										↔			
8. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์											↔		



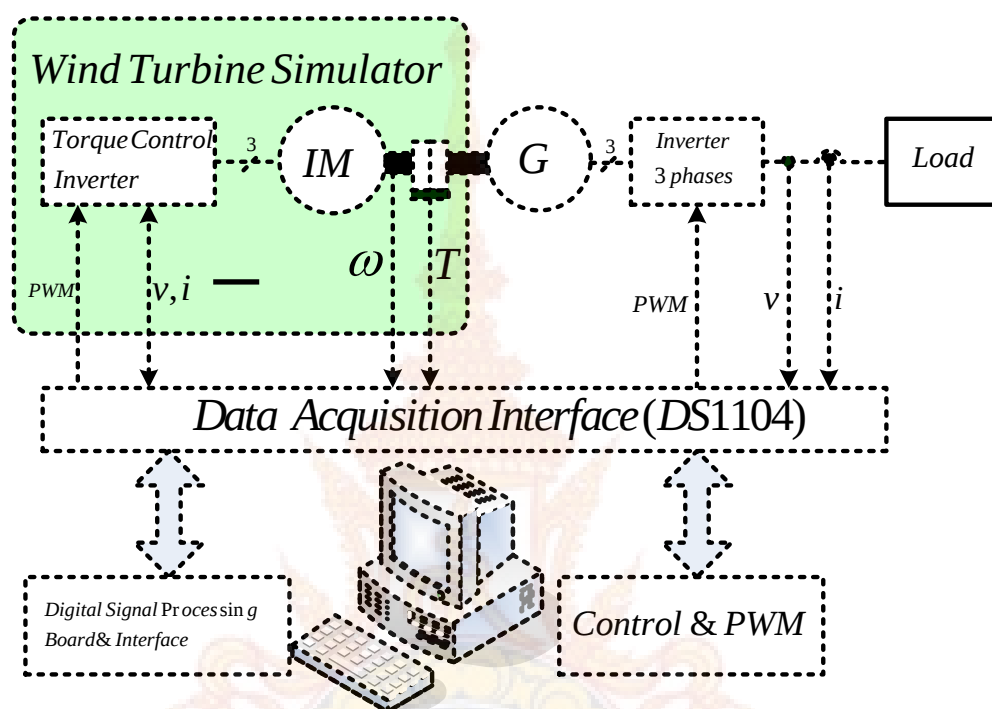
ภาพที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมระบบแปลงผันสำหรับกังหันลมแบบแม่เหล็กถาวร

บล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.1 แสดงวงจรแปลงผันของระบบกังหันลมโดยใช้เครื่องจำลองกังหันลมต่อกับปลั๊กกับเซนเซอร์เตอร์แบบแม่เหล็กถาวร และใช้วงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้นั้นมีขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ผันแปรตามความเร็วลม ดังนั้นจึงใช้วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมแรงดันด้านเอาต์พุตให้คงที่ จากนั้นใช้วงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับอีกครั้งเพื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายหรือจ่ายโหลดแบบแยกอิสระ การออกแบบแต่ละบล็อกไดอะแกรมมีดังนี้

3.1 เครื่องจำลองกังหันลมสำหรับเซนเซอร์เตอร์แบบแม่เหล็กถาวร

โครงสร้างของเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำประกอบไปด้วย 2 ส่วนโดยส่วนแรกประกอบไปด้วยแบบจำลองความเร็วลมใช้สร้างความเร็วลมคงที่ รูปแบบของพลังงานความเร็วของลมสามารถสร้างได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากหลักการสุ่มของ Kalman Spectrum โดยโปรแกรม Matlab/Simulink หรือสร้างจากการปรับค่าความเร็วลมแบบคงที่หรือจากข้อมูลบันทึกความเร็วลมจริงจากกรมอุตุนิยมวิทยา และต่อมาเป็นแบบจำลองกังหันลมที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหลักการและทฤษฎีกังหันลมที่คำนวณสัญญาณอ้างอิงในลักษณะของแรงบิดอ้างอิง (Torque Reference) ผ่านการคัดอินเตอร์เฟส เพื่อแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบทันเวลา แล้วส่งไปให้ตัวอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในส่วนที่สองคือส่วนที่รับสัญญาณแบบทันเวลามาควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำให้แสดงคุณลักษณะของกังหันลม ที่แกนโรเตอร์ออกมาเป็นแรงบิดเอาต์พุต (Torque Output) ของกังหันลม [3]



ภาพที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องจำลองกังหันลม

3.1.1 พิกัดของเครื่องจำลองกังหันลม

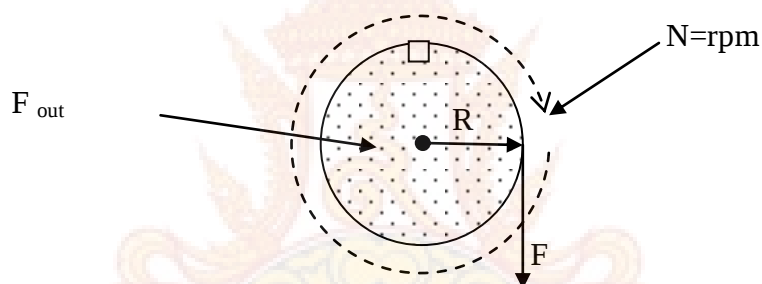
จากที่ได้อธิบายถึงหลักการและสมการที่ใช้กับกังหันลมในการทำงานไปแล้ว วิธีการออกแบบระบบควบคุมเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ จะอธิบายถึงแบบจำลองของกังหันลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

การกำหนดค่าพิกัดการจำลองของเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการ์ดอินเตอร์เฟสจะมีพิกัดการจำลอง เนื่องจากพิกัดของมอเตอร์มีพิกัดที่ 1 kW ดังนั้นแรงบิดของมอเตอร์จะต้องมีพิกัดด้วยโดยคำนวณจากข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังนี้

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองกังหันลม

พิกัดกำลัง	1 kW
ความเร็วรอบ	1400 RPM
ความถี่	50 Hz
ค่า PF	0.74
พิกัดกระแส (เดลต้า / สตาร์)	2.9/1.7 A
พิกัดแรงดัน (เดลต้า / สตาร์)	380/660 V

การคำนวณหาพิกัดแรงบิด (Rated Torque) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองในงานวิจัยนี้จะหาได้จากสูตรดังนี้



เมื่อ $T = F \times R$ (3.1)

และ $W = F \times \ell$ (3.2)

$$P \times t = F \times 2\pi \times R \times N$$
 (3.3)

$$P = F \times R \times \frac{2\pi N}{60}$$
 (3.4)

ดังนั้น $T = \frac{60}{2\pi} \frac{P}{N}$ (N-m) (3.5)

จากสมการที่ 3.5 พิกัดแรงบิด (Rated Torque)

$$= (9.55 \times \text{Power}) / \text{ความเร็วรอบ}$$

$$= (9.55 \times 1000 \text{ W}) / 1400 \text{ RPM}$$

$$= 6.821 \text{ N-m}$$

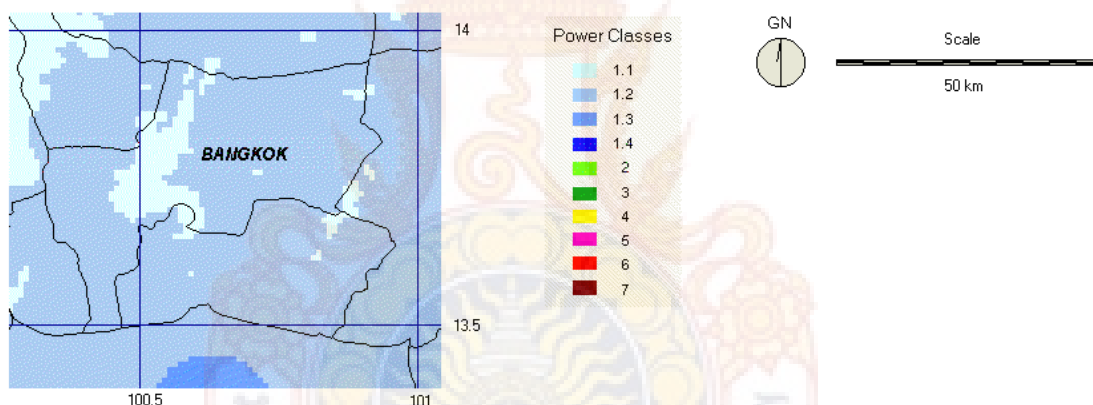
จะเห็นว่ามอเตอร์ 1 kW มีค่าแรงบิดพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองในงานวิจัยนี้มีค่า 6.821 N-m ดังนั้นแรงบิดที่ใช้ในการจำลองจะมีค่าไม่เกิน 6.821 N-m

3.1.2 สํารวจและเก็บข้อมูล

เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ระหว่างความเร็วลมที่ได้วัดได้จริง และความเร็วลมจากแบบจำลองความเร็วลม (Wind Speed Model) จากโปรแกรม Matlab/Simulink โดยการศึกษาจากแผนที่ศักยภาพพลังงานลมในกรุงเทพ ทำให้ทราบถึงปริมาณพลังงานลมบริเวณกรุงเทพ และนำมาเปรียบเทียบกับการวัดกำลังงานลมที่วัดได้จริงบริเวณที่จะทำการทดสอบเครื่องจำลองกังหันลม เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ต่อไป

BANGKOK WIND MAP INCLUDING CALM – ANNUAL AVERAGE

แผนที่ศักยภาพพลังงานลม กรุงเทพฯ รวมช่วงลมสงบ – เฉลี่ยรายปี



ภาพที่ 3.3 แผนที่ศักยภาพพลังงานลม กรุงเทพฯ รวมช่วงลมสงบ-เฉลี่ยรายปี

ข้อมูลศักยภาพพลังงานลม กรุงเทพฯ รวมช่วงลมสงบ-เฉลี่ยรายปี

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.2546. ออนไลน์

		THAILAND WIND POWER CLASSES									
Elevation		1.1	1.2	1.3	1.4	2	3	4	5	6	7
10 m	m/s	0	2.8	3.6	4.0	4.4	5.1	5.6	6.0	6.4	7.0
	W/m ²	0	25	50	75	100	150	200	250	300	400
30 m	m/s	0	3.3	4.1	4.7	5.2	5.9	6.5	7.0	7.4	8.2
	W/m ²	0	40	80	120	160	240	320	400	480	640
50 m	m/s	0	3.6	4.4	5.1	5.6	6.4	7.0	7.5	8.0	8.8
	W/m ²	0	50	100	150	200	300	400	500	600	800

จากภาพที่ 3.3 แสดงข้อมูลศักยภาพพลังงานลมในกรุงเทพมหานครช่วงลมสงบเฉลี่ยรายปี หลังจากนั้นจะมาถึงขั้นตอนของการนำเครื่องมือวัดความเร็วลมไปวัดความเร็วลมจริง ณ บริเวณที่จะทำการทดสอบเครื่องจำลองกังหันลม เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับยืนยันผลต่อไป

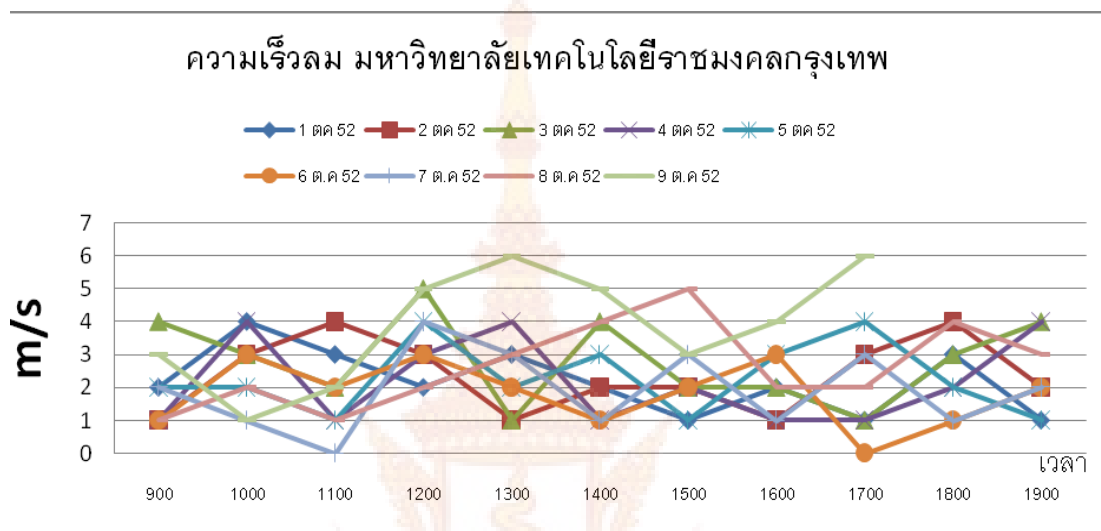
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลของสถานที่ที่เก็บข้อมูลความเร็วลม

สถานที่	ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ระดับความสูง	ชั้นที่ 11 ประมาณ 30 เมตร
ช่วงเวลา	09.00-19.00
ระหว่างวันที่	6 ตุลาคม 2554 – 9 ตุลาคม 2554
ความถี่การเก็บข้อมูล	1 ชั่วโมง ต่อ ครั้ง



ภาพที่ 3.4 การวัดความเร็วลมที่วัดได้จริง

จากภาพที่ 3.4 แสดงเครื่องมือวัดความเร็วลม ที่ความสูงจากพื้นดิน ประมาณ 30 เมตร โดยใช้ บริเวณชั้น 11 ของตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ โดยเริ่ม ตั้งแต่วันที่ 6 ตุลาคม 2554 ถึง วันที่ 9 ตุลาคม 2554 เวลา 09.00 น ถึง 19.00 น บันทึก 1 ชั่วโมงต่อ ครั้ง



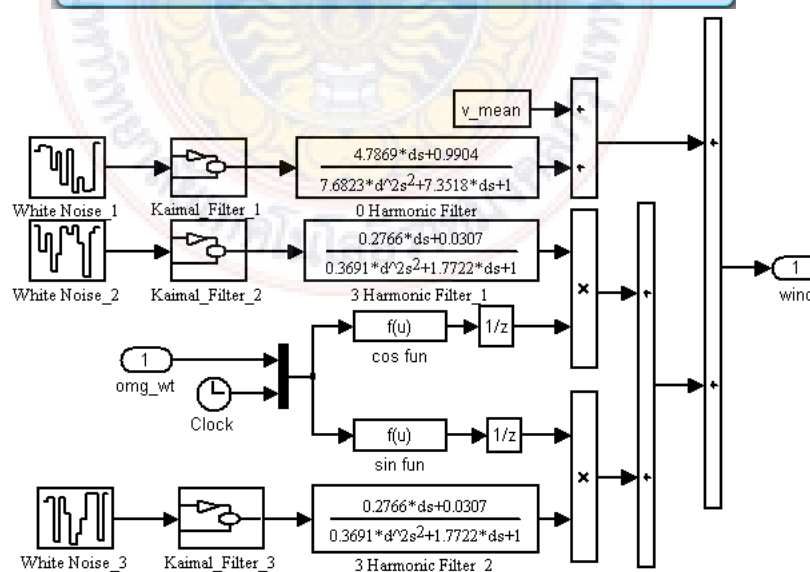
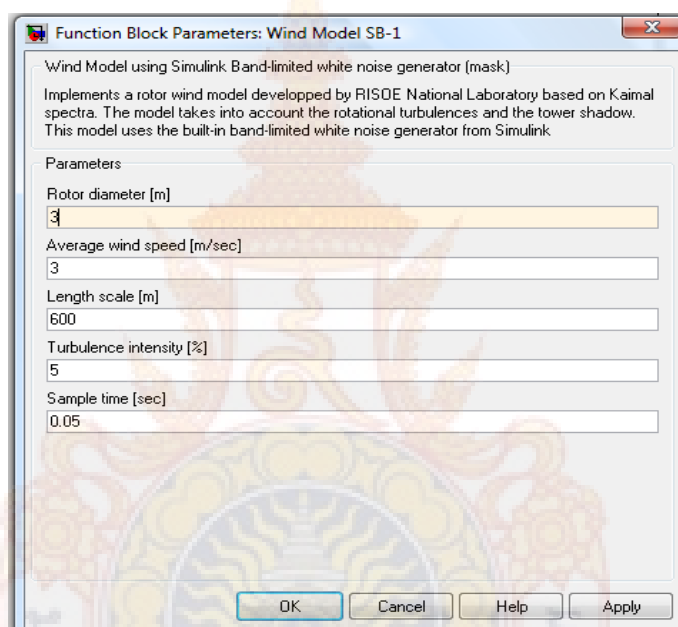
ภาพที่ 3.5 ข้อมูลผลการวัดความเร็วลมที่วัดได้จริง ณ.ชั้น11 ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

จากข้อมูลผลการวัดความเร็วลมที่วัดได้จริงบริเวณคาเฟ่ ชั้น 11 ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ซึ่งจะทำให้การทดสอบเครื่องจำลองกังหันลม มีผลออกมาดัง ภาพที่ 3.5 ความเร็วลมที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3 เมตรต่อวินาที

3.1.3 แบบจำลองความเร็วลม (Wind Speed Model)

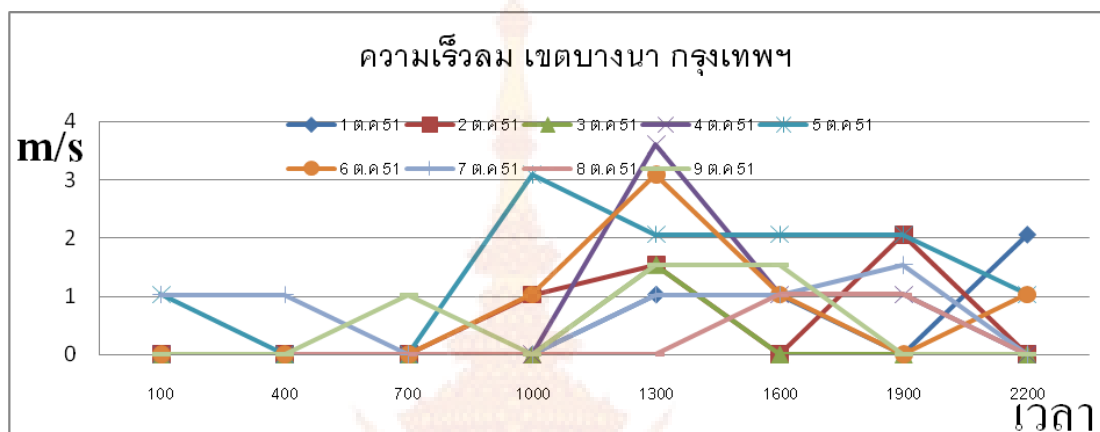
แบบจำลองความเร็วลมมีความสำคัญในการบอกค่าสมรรถนะของแหล่งกำเนิดลมและ พฤติกรรมของลมที่เกิดขึ้นจริง เพื่อนำผลจากแบบจำลองความเร็วลมไปวิเคราะห์และนำพลังงาน ลมนี้ไปสังเคราะห์ใช้ประโยชน์ต่อไป ในธรรมชาติของความเร็วลมจะมีปัจจัย 2 ส่วนคือ (ก) ส่วนแรกคือส่วนที่เป็นค่ากลางคงที่เฉลี่ย (Steady State) ซึ่งจะเฉลี่ยจากค่าที่เพิ่มขึ้นสูงสุด และ ลดลงต่ำสุด

(ข) ส่วนที่สองคือส่วนของค่าความแปรปรวน (Turbulence) เป็นคุณลักษณะของการสุ่มค่าไปแบบไม่เป็นปกติกับส่วนแรกคือส่วนที่เป็นค่ากลางคงที่เฉลี่ยกับเวลาและระยะทาง และนำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมแบบจำลองความเร็วลมได้ดังนี้

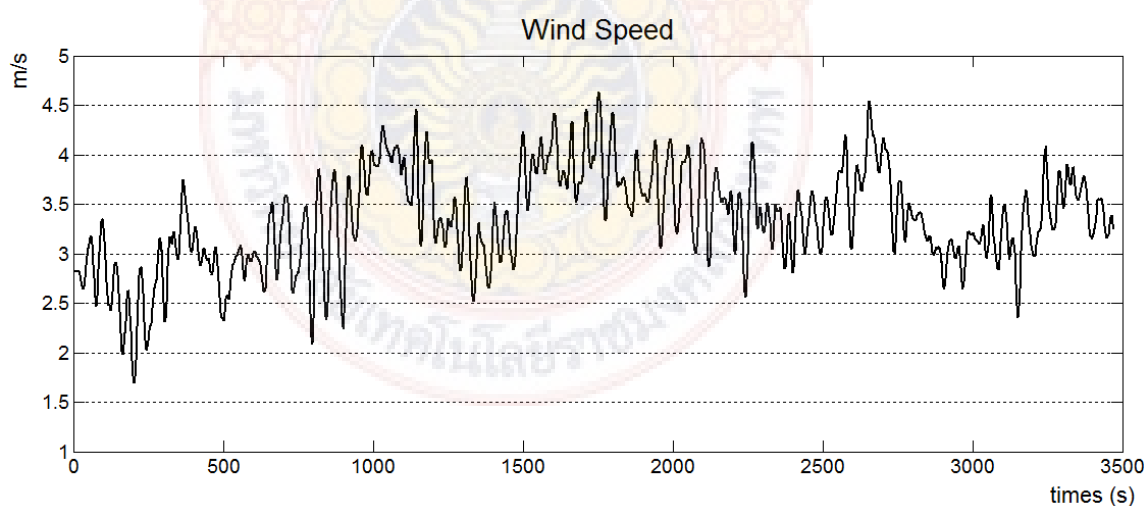


ภาพที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองความเร็วลมและการกำหนดค่าตัวแปร

จากข้อมูลที่ได้ทั้งหมดของความเร็วลมจากข้อมูลศักยภาพพลังงานลมกรุงเทพฯ รวมช่วงลมสงบ-เฉลี่ยรายปี ดังภาพที่ 3.7 และจากการนำเครื่องมือวัดความเร็วลมไปวัดความเร็วลมจริง ณ บริเวณที่จะทำการทดสอบเครื่องจำลองกังหันลมดังภาพที่ 3.5 เราสามารถนำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาเปรียบเทียบยืนยันผลกับภาพที่ 3.8 ได้ดังนี้

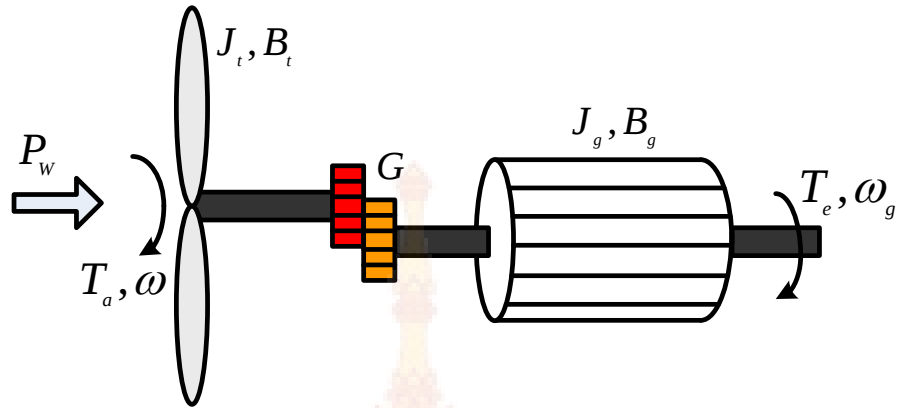


ภาพที่ 3.7 กราฟความเร็วลมที่วัดได้จริงเขตกรุงเทพฯ
ที่มา : กรมอุตุนิยมวิทยา เขตบางนา กรุงเทพฯ



ภาพที่ 3.8 ความเร็วลมที่ได้จากแบบจำลองความเร็วลม

3.1.4 แบบจำลองกังหันลม (Wind Turbine Model)



ภาพที่ 3.9 โครงสร้างแบบจำลองกังหันลมโดยมอเตอร์เหนี่ยวนำ

สมมติให้อัตราทดเกียร์ $G = 1$ เพราะฉะนั้น $\omega_g = \omega$ สามารถเขียนสมการไดนามิกของกังหันได้เป็น

$$\text{โดยที่ } J = J_t + J_g \text{ และ } B = B_t + B_g \quad 3.6$$

แปลงให้อยู่ในรูปแบบพีชคณิต

$$T_a - T_e = (JD + B)\omega \quad 3.7$$

โดยกำหนดตัวดำเนินการ $D = \frac{d}{dt}$

แรงบิดอากาศพลศาสตร์ T_a เป็นค่าที่ได้รับผลส่วนหนึ่งจาก ω ดังต่อไปนี้

$$P_a = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v^3 C_p(\lambda) \quad 3.8$$

แทนค่าใน $T_a = \frac{P_a}{\omega}$ จะได้ว่า

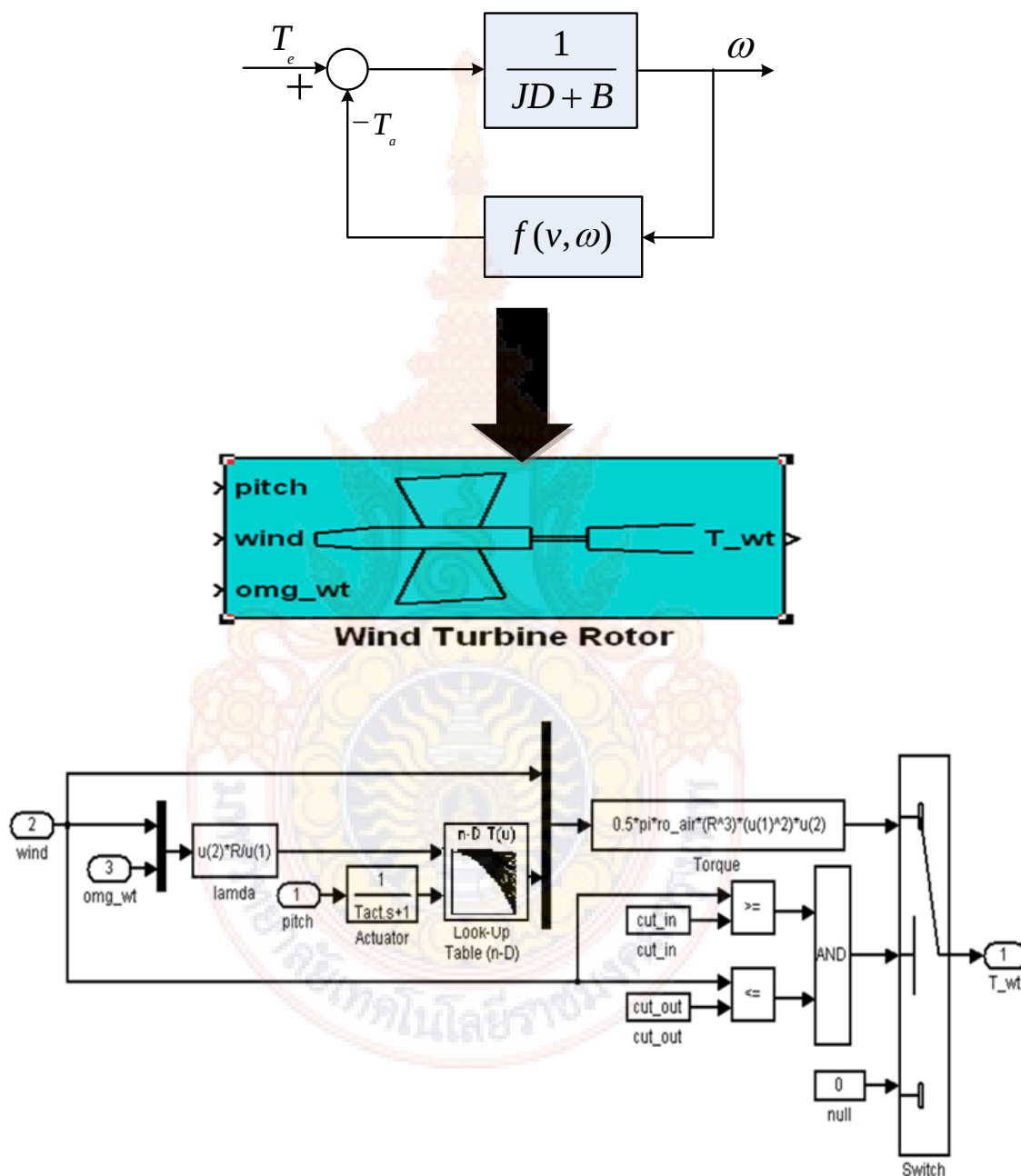
$$T_a = \frac{\rho}{2} \pi R^2 \frac{v^3}{\omega} C_p(\lambda) \quad 3.9$$

แทนค่าใน $\omega = \frac{\lambda v}{R}$ จะได้

$$T_a = \frac{\rho}{2} \pi R^3 v^2 \frac{1}{\lambda} C_p(\lambda) = \frac{\rho}{2} \pi R^3 v^2 C_T(\lambda) = \frac{\rho}{2} \pi R^3 v^2 C_T(v, \omega) \quad 3.10$$

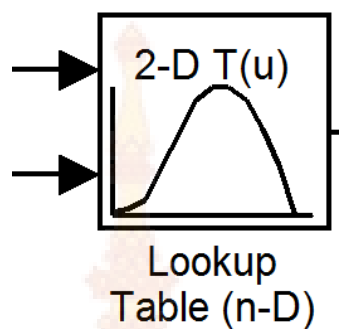
โดยที่ค่าของ $C_T(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda}$ เรียกว่าสัมประสิทธิ์แรงบิด

จากภาพที่ 3.10 กังหันเป็นระบบที่มีอินพุตคือแรงบิดของกังหันลม มีเอาต์พุตคือความเร็วรอบ และถือว่าลมที่กระทำต่อกังหันคือสัญญาณรบกวน (Disturbance) ดังนั้นจากสมการที่ 3.7 และสมการที่ 3.10 จึงเขียนบล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของกังหันได้ดังนี้

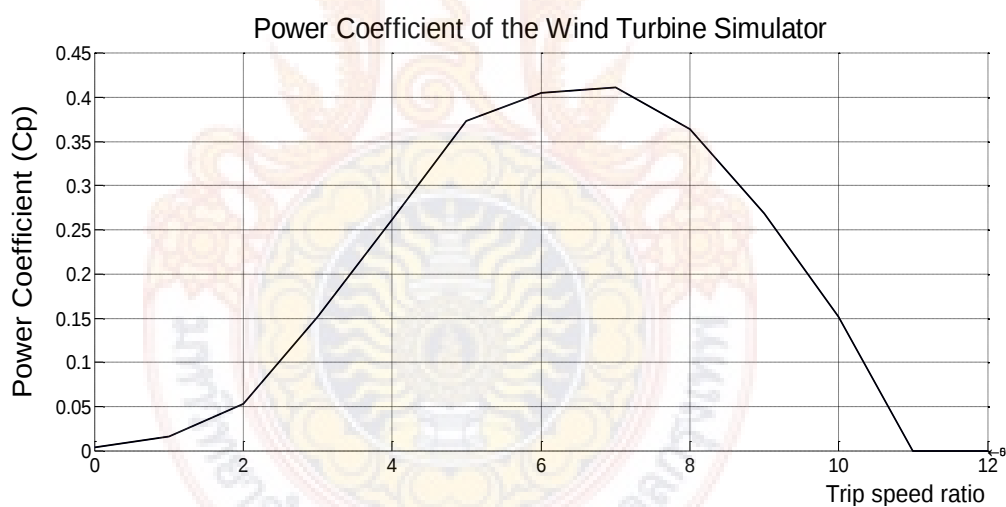


ภาพที่ 3.10 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของกังหันลม

จากภาพที่ 3.10 จะเห็นว่า จากสมการพื้นฐานของกังหันลม เราสามารถที่นำมาประยุกต์ใช้ในโปรแกรม Matlab/Simulink ได้โดยในส่วนของการคำนวณค่า C_p จะใช้บล็อกของ Look-Up Table ในโปรแกรม Matlab/Simulink ในภาพที่ 3.11 ช่วยในการคำนวณค่า C_p โดยใช้หลักการ Interpolation ค่าในตารางที่ 3.3



ภาพที่ 3.11 บล็อกของ Look-Up Table ในโปรแกรม Matlab/Simulink



ภาพที่ 3.12 ค่าของ C_p เทียบกับ λ

ตารางที่ 3.3 ค่าของ C_p เทียบกับ λ

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
C_p	0.003	0.015	0.052	0.151	0.261	0.373	0.405	0.411	0.364	0.268	0.151	0

3.1.5 การ์ดอินเตอร์เฟส DS1104

งานวิจัยนี้ได้นำเทคโนโลยีของการ์ดอินเตอร์เฟสควบคุมแบบทันเวลา (Real-time) ใช้งานร่วมกับโปรแกรม Matlab/Simulink ในการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้แสดงคุณลักษณะของกังหันลมออกมาให้มีพฤติกรรมเหมือนกังหันลมจริงและมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิด (C_p) ของกังหันลมจริง ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยบริษัท dSPACE เป็นการ์ดอินเตอร์เฟสที่ออกแบบสำหรับใช้กับงานพัฒนาต้นแบบ (Prototype) และงานวิจัยในอุตสาหกรรมรถยนต์



ภาพที่ 3.13 การ์ดอินเตอร์เฟส DS1104 และอุปกรณ์ต่อพ่วง

3.1.6 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส FUJI รุ่น FRENIC MEGA

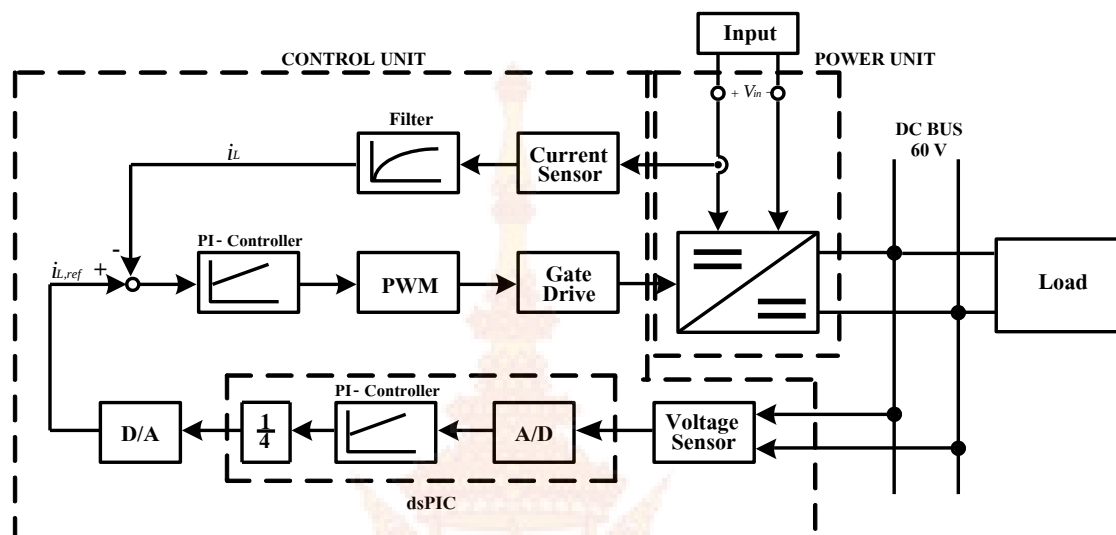
งานวิจัยนี้จะใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีการควบคุมแบบเวกเตอร์ โดยรับคำสั่งจากแรงบิดอ้างอิงเพื่อสั่งให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสร้างแรงบิดตามความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิด (C_p) ของกังหันลม ทำให้เครื่องจำลองการทำงานกังหันลมสามารถสร้างแรงบิดได้ใกล้เคียงกับกังหันลมจริงได้โดยรับสัญญาณแรงบิดอ้างอิงผ่านคาร์ดิอินเตอร์เฟสออกมาในรูปแบบทันทเวลา ในอินเวอร์เตอร์มีความสามารถในการประมาณค่าแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับป้อนกลับ และแสดงค่าแรงบิดในลักษณะของแรงดันเอาท์พุท



ภาพที่ 3.14 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส FUJI รุ่น FRENIC MEGA

3.2 วงจรบูตส์ตีชีทูตชีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

จากการศึกษาทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการสร้างวงจรบูตส์ตีชีทูตชีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล เขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมของวงจรส่วนแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังนี้



ภาพที่ 3.15 บล็อกไดอะแกรมของบูตส์ตีชีทูตชีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

จากผังโครงสร้างในภาพที่ 3.15 สามารถอธิบายการทำงานของวงจรบูตส์ตีชีทูตชีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลได้ดังนี้

3.2.1 แรงดันอินพุต (Input) ได้จากวงจรเรียงกระแสเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังวงจรบูตส์ตีชีทูตชีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

3.2.2 วงจรกำลังทำหน้าที่เป็นส่วนของภาควจรกำลัง ซึ่งทำหน้าที่ในการส่งจ่ายพลังงานไปยังระบบคอนเวอร์เตอร์ที่มีการขนานกันของคอนเวอร์เตอร์ 4 โมดูล

3.2.3 ส่วนวงจรควบคุม (Control unit) ทำหน้าที่เป็นส่วนวงจรควบคุมโดยในงานวิจัยนี้ได้มีการควบคุมในโหมดของกระแสโดยจะนำสัญญาณจาก Current Sensor ตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดตัวเหนี่ยวนำ ป้อนกลับมาทำการเปรียบเทียบกับกระแสอ้างอิงของระบบเพื่อที่จะนำสัญญาณที่ได้ไปควบคุมการทำงานของระบบคอนเวอร์เตอร์ที่มีการขนานกันจำนวน 4 โมดูล ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนต่างๆดังต่อไปนี้

3.2.3.1 ตัวตรวจจับกระแส (Current Sensor) ทำหน้าที่ตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดตัวเหนี่ยวนำ

3.2.3.2 ฟิลเตอร์ (Filter) ทำหน้าที่เพื่อที่จะกรองสัญญาณรบกวนจากฮาร์มอนิกส์ อันเนื่องมาจากการสวิตช์ที่มีความถี่สูงของวงจรกำลังเป็นวิธีการลดการผิดพลาดในการคำนวณ

3.2.3.3 ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมในรูปของ กระแสในแต่ละลูปซึ่งมี 4 ตัว

3.2.3.4 วงจรสร้างสัญญาณ PWM ทำหน้าที่ควบคุมการสวิตช์ที่มอสเฟตให้มีการ สวิตช์ที่มุมต่างเฟสกัน 90 องศา

3.2.3.5 วงจรขับเคลื่อน (Gate Drive) ทำหน้าที่ขับเคลื่อนสวิตช์ที่มอสเฟตที่มีการแยกวงจร ควบคุมกับวงจรกำลังในแต่ละวงจรซึ่งมีวงจรขับเคลื่อน 4 วงจร

3.2.3.6 ตัวตรวจจับแรงดัน (Voltage Sensor) ทำหน้าที่ตรวจจับแรงดันทางด้าน เอาท์พุท เพื่อที่จะนำเอาสัญญาณแรงดัน ส่งเข้าไปเป็นสัญญาณอินพุตของพอร์ต A/D ของ ไมโครคอนโทรลเลอร์

3.2.3.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล และทำการประมวลผลข้อมูลสัญญาณแบบดิจิทัล เพื่อควบคุมให้แรงดันทางด้านเอาท์พุตคงที่

3.2.3.8 D/A ทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

3.3 การออกแบบวงจรกำลังวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน

วงจรกำลังของวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล จะประกอบไปด้วย ตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิตช์ ตัวเก็บประจุทางด้านเอาท์พุท วงจรกำลังต้องมีความสามารถทำงานได้ปกติที่ขนาดพิกัดกระแส แรงดันที่ใช้งานและความถี่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ที่ 25 kHz ซึ่งเป็นความถี่ในการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ และเนื่องจากแรงดันเอาท์พุตที่ได้จากวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แต่ละตัวยังมีส่วนของแรงดันกระเพื่อมอยู่ ดังนั้นจึงต้องผ่านวงจรกรองแรงดันเพื่อลดแรงดันกระเพื่อม

ในวงจรกำลังจะประกอบไปด้วยการออกแบบส่วนต่างๆ ดังนี้

3.3.1 การคำนวณหาตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง

ในวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากเนื่องจากมีหน้าที่ในการเก็บและคายพลังงานเป็นผลให้ระดับแรงดันทางเอาท์พุตมีค่าสูงกว่าระดับแรงดันที่อินพุต การคำนวณหาตัวเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากสมการที่ (3.11)

$$L = \frac{V_s D}{f \Delta I} \quad (3.11)$$

หาค่าตัวที่ใช้ค้นหาได้จาก

$$D = \frac{(V_o - V_s)}{V_o} = \frac{(60 - 26)}{60} = 0.57 \quad (3.12)$$

แทนค่าเพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำ

$$L = \frac{26 \times 0.57}{25 \times 10^3 \times 1.5} = 395 \mu H \quad (3.13)$$

เมื่อได้ค่าของตัวเหนี่ยวนำแล้วจะหาขนาดของแกนที่ใช้โดยเลือกชนิดของแกนเป็นแกนเฟอร์ไรต์เพราะมีค่าสูญเสียต่ำเมื่อทำงานที่ความถี่สูง การคำนวณขนาดใช้วิธีการคำนวณแบบ A_p (Area Approach) วิธีนี้เป็นการออกแบบที่ใช้ค่า T_{rise} ซึ่งอยู่ในรูปความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำ ($J = 100 - 1000 A/cm^2$) โดยคำนวณหาขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 จากขีดจำกัดและข้อกำหนดในการคำนวณหาค่า A_p ในสมการที่ (3.14) กำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้ $J = 4 A/mm^2 = 4 \times 10^6 A/m^2$, $k = 0.65$, กระแสอินพุต (I_{rms}) = 11.5A, กระแสอินพุตสูงสุด (I_{peak}) = 12.25A, $\Delta I = 2(I_{peak} - I_{rms}) = 1.5A$ และ $B = 0.5$ แทนค่า

$$A_p = \frac{LI_{peak}I_{rms}}{B_{max}Jk} = \frac{395 \times 10^{-6} \times 12.25 \times 11.5}{0.5 \times 4 \times 10^6 \times 0.65} = 42.804 \times 10^{-9} = 42804 mm^3 \quad (3.14)$$

ขั้นตอนที่ 2 เลือกขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ที่มีค่า A_p มากกว่าที่ได้คำนวณจากขั้นตอนที่ 1 เนื่องจากถ้าเลือก A_p น้อยกว่าที่คำนวณได้อาจจะทำให้ไม่ได้ค่าต่าง ๆ ตามต้องการ โดยจะเลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์เบอร์ EE55/55/21 ซึ่งมีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$A_p = 43700 mm^3, A_w = 397 mm^2, S = 354 mm^2$$

ค่าตัวแปรจาก Datasheet ของแกนเฟอร์ไรต์เมื่อเทียบกับตัวแปรจากสูตร

A_p คือ Effective core Volume (Ve) มีหน่วยเป็น mm^3 หรือ mm^4

A_w คือ Cross-sectional winding area of core (Acw) มีหน่วยเป็น mm^2

S คือ Effective cross-sectional area (Ae) มีหน่วยเป็น mm^2

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ของแกนเฟอร์ไรต์เบอร์ EE55/55/21

Parameter			
Core factor	C1	mm^{-1}	0.348
Effective magnetic path length	Le	mm	123
Effective cross-sectional area	Ae	mm^2	354
Effective core volume	Ve	mm^3	43700
Cross-sectional center leg area	Acp	mm^2	351
Minimum cross-sectional area	Acp min	mm^2	341
Cross-sectional winding area of core	Acw	mm^2	397
Weight (approx)		g	234

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดตัวเหนี่ยวนำได้จากสมการที่ (3.15) กำหนดให้ $L = 395\mu H$, $I_{peak} = 12.25 A$, $B_{max} = 0.5$, $S = 354 mm^2$ แทนค่าเพื่อหาจำนวนรอบของขดลวดตัวเหนี่ยวนำ

$$N = \frac{LI_{peak}}{B_{max}S} = \frac{395 \times 10^{-6} \times 12.25}{0.5 \times 354 \times 10^{-6}} = 27 \text{ รอบ} \quad (3.15)$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาขนาดของลวดตัวนำ (A_w)

$$A_w = \frac{I_{rms}}{J} = \frac{11.5 A}{4 A/mm^2} = 2.87 mm^2 \quad (3.16)$$

ขั้นตอนที่ 5 เลือกเบอร์ลวดทองแดงให้มี A_w ใหญ่กว่า A_w ที่ได้จากการคำนวณจากขั้นตอนที่ 4 โดยคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดได้จาก

$$d = \sqrt{\frac{4A_w}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 2.87 mm^2}{\pi}} = 1.91 mm \quad (3.17)$$

จากตารางลวดเลือกขดลวดเบอร์ 12 AWG มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.05 mm มากกว่าที่ได้คำนวณไว้เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางมีผลต่อการไหลของกระแสในขดลวดถ้าค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้กระแสจะไหลได้ไม่ถึงที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของลวดที่ใช้งานจริง ว่าสามารถนำไปใช้กับแกนเฟอร์ไรต์ได้หรือไม่

$$A_w = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (2.05 \text{ mm})^2}{4} = 3.3 \text{ mm}^2 \quad (3.18)$$

$$W = \frac{N \times A_w}{k} = \frac{27 \times 3.3}{0.65} = 137 \text{ mm}^2 \quad (3.19)$$

$$W \text{ ที่ใช้ได้ต้องมีค่า } \leq 397 \text{ mm}^2$$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาค่าความกว้างของ Air Gap (l_g)

$$l_g = \frac{\mu_o N^2 S}{2L} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 27^2 \times 354 \times 10^{-6}}{2 \times 395 \times 10^{-6}} = 0.004102 \text{ mm} \quad (3.20)$$

สรุปวงจรบูสต์ชิตูติชิตูติคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล ใช้แกนเฟอร์ไรต์ EE 55/55/21 ลวดเบอร์ 12 AWG จำนวนรอบที่พัน 27 รอบ ความกว้าง Air Gap มีขนาด 0.004102 mm

3.3.2 การเลือกอุปกรณ์สวิตช์

อุปกรณ์สวิตช์ในวงจรบูสต์ชิตูติชิตูติคอนเวอร์เตอร์ควรเลือกอุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูง เวลาในการเปลี่ยนสถานะค่อนข้างสั้น ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เพาเวอร์มอสเฟตทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สวิตช์ เวลาในการสับสวิตช์อยู่ในช่วงนาโนวินาที และในวงจรขับมอสเฟตกำลังนั้นสามารถทำได้ง่ายเพราะควบคุมด้วยแรงดันและกระแสอินพุตค่าต่ำ ๆ เท่านั้น

โดยได้เลือกใช้มอสเฟตกำลังเบอร์ IRFP 264 ของบริษัท International Rectifier ซึ่งมีคุณลักษณะสมบัติต่าง ๆ ที่สำคัญดังนี้ ความต้านทานระหว่างขาเดรนและซอร์ส ขณะนำกระแส $R_{DS(on)} = 0.075 \Omega$ ซึ่งมีค่าต่ำมาก แรงดันตกคร่อมระหว่างขาเดรนและขาซอร์ส (V_{DS}) ที่ทนได้ 250 โวลต์ กระแสเดรน (I_D) สูงสุดที่สามารถไหลผ่านได้ 38 แอมป์ เวลาคืนสภาพของมอสเฟตกำลัง $t_{rr} = 620 \text{ ns}$

3.3.3 การคำนวณค่าตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุต

ในวงจรกำลังของวงจรบูสตีชีทึชคอนเวอร์เตอร์ ตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุตของวงจรมีหน้าที่ในการเก็บพลังงานรูปของประจุไฟฟ้าและทำการจ่ายแรงดันออกให้กับเอาต์พุต หรือ โหลดหรือคายประจุไฟฟ้าเมื่ออุปกรณ์สวิตช์ Turn ON และทำการเก็บประจุเมื่ออุปกรณ์สวิตช์ Turn OFF ดังนั้นจำเป็นต้องเลือกตัวเก็บประจุที่สามารถทนแรงดันได้เท่าหรือมากกว่าแรงดันเอาต์พุต หากเลือกตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะมีส่วนช่วยในการลดแรงดันกระเพื่อมทางด้านเอาต์พุต การคำนวณค่าตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุตหาได้จากสมการที่ (3.21)

$$C = \frac{I_o D}{f \Delta V_o} \quad (3.21)$$

แทนค่าเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุต

$$C = \frac{16.67 \times 0.57}{25 \times 10^3 \times 0.6} = 633 \mu F \quad (3.22)$$

ดังนั้นควรเลือกขนาดตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุตของวงจรที่มีค่าสูงกว่า $633 \mu F$ และแรงดันที่ทนได้ต้องไม่ต่ำกว่าแรงดันเอาต์พุต งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ขนาดตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุต $680 \mu F$ ทนแรงดันได้ 250 V

ในการเลือกค่าตัวเก็บประจุหากใช้ค่าที่มีความจุยิ่งสูงจะทำให้แรงดันกระเพื่อมทางด้านเอาต์พุตมีค่าลดลง แต่ค่าความจุของตัวเก็บประจุจะต้องไม่น้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ ถ้าเลือกตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุและอัตราทนแรงดันสูง ๆ ราคาจะสูงตามไปด้วยจึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน

3.3.4 การเลือกไดโอดความถี่สูง

ไดโอดที่ใช้ในวงจรบูสตีชีทึชคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล จะต้องมีความสมบัติที่สำคัญ คือ ทำงานที่ความถี่สูงได้ มีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำและควรพิจารณากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านไดโอดขณะนำกระแสหาได้จากสมการที่ (3.23)

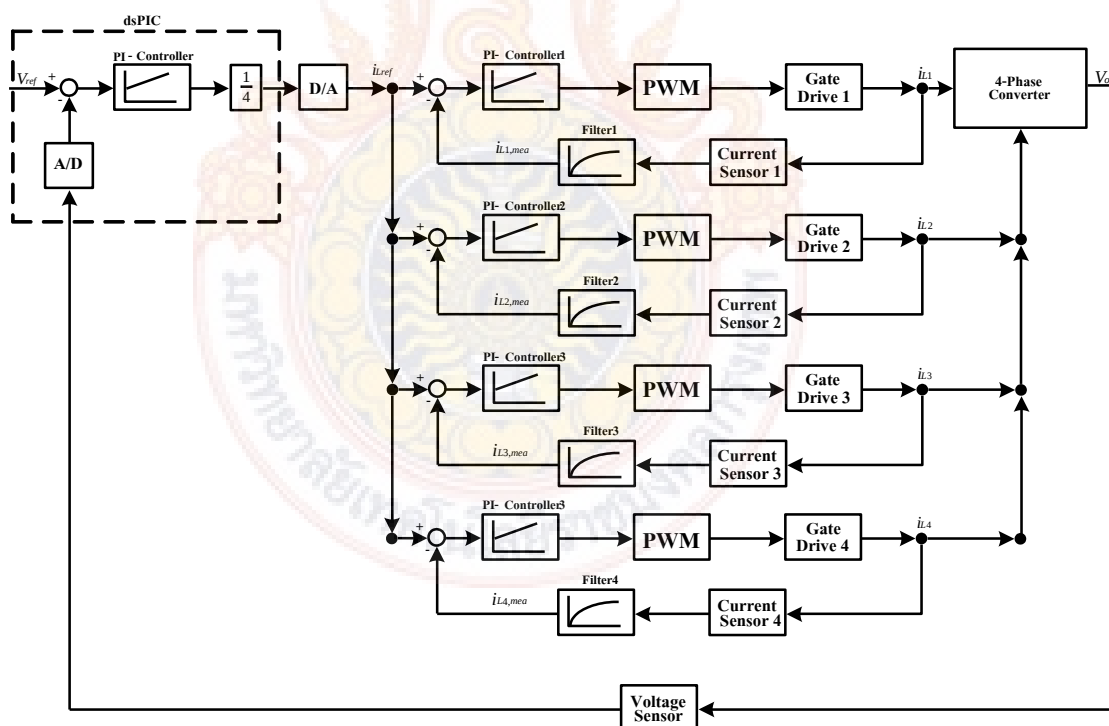
$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times I_{peak} \times \sqrt{\frac{1}{D}} \quad (3.23)$$

$$I_{rms} = 0.707 \times 12.25 \times 1.325 = 11.47 \quad (3.24)$$

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ไดโอดเบอร์ RURG 3020 ของบริษัท Fairchild Semiconductor มีค่าแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแส (V_F) ที่ 0.85V ค่าแรงดันไบแอสกลับ (V_R) ที่ 200 V และสามารถทนกระแสได้ถึง 30 A

3.4 การออกแบบวงจรควบคุมของวงจรบูสตีชีฟต์สี่คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน

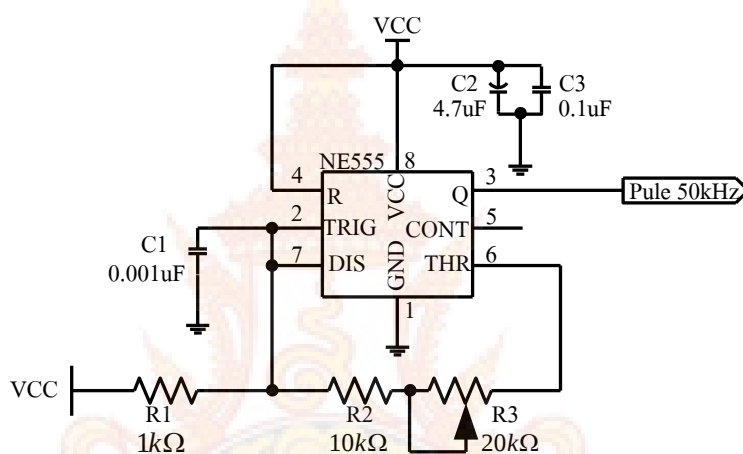
วงจรภาคควบคุมทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจรบูสตีชีฟต์สี่คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล ให้สามารถควบคุมจ่ายกระแสให้คงที่ตามกระแสอ้างอิง โดยการใช้การป้อนกลับของแรงดัน และการควบคุมค่าเฉลี่ยของกระแส ที่มีความถี่ในการสวิตช์คงที่ ประกอบด้วย สัญญาณอ้างอิงของกระแส ($i_{L,ref}$), สัญญาณป้อนกลับของกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ ($i_{L1,mea}$) และสัญญาณ PWM ที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจร ในการออกแบบวงจรควบคุมจะประกอบไปด้วย วงจรส่วนต่างๆดังภาพที่ 3.16



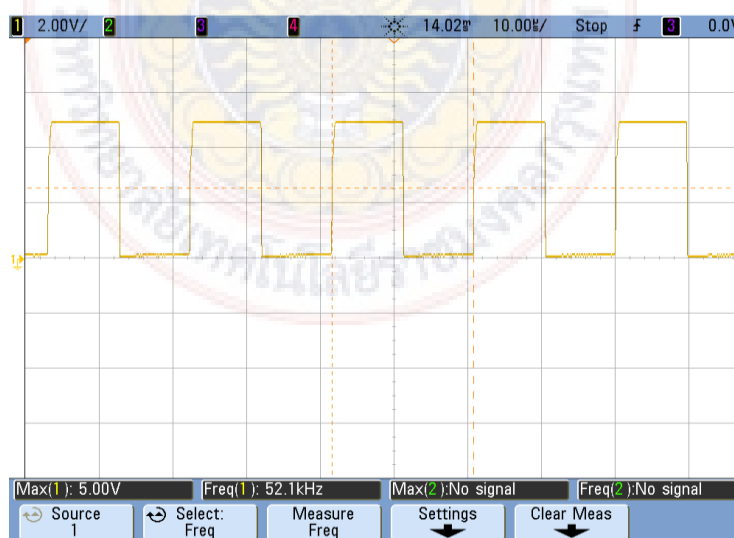
ภาพที่ 3.16 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันและกระแสแบบลูปปิด

3.4.1 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์อ้างอิง

ในการออกแบบวงจรมอดูเลตตามความกว้างของพัลส์ สัญญาณพาหะที่ใช้ในการมอดูเลตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม โดยก่อนที่จะได้สัญญาณสามเหลี่ยม ในงานวิจัยนี้ทำการสร้างสัญญาณพัลส์อ้างอิงโดยใช้ไอซีเบอร์ NE555 คุณสมบัติก็คือ เป็นไอซีไทมเมอร์นับเวลาที่มีความเที่ยงตรงสูงใช้งานง่าย เสถียรภาพสูง ในงานวิจัยนี้จะถูกนำมาใช้สำหรับสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ 50 kHz สามารถกำหนดความถี่ได้จากค่าตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน ดังที่ได้แสดงในวงจร ดังนั้นสัญญาณพัลส์นี้จะเป็นสัญญาณหลักที่ใช้ในการสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมสำหรับสัญญาณ PWM



ภาพที่ 3.17 วงจรกำเนิดพัลส์อ้างอิงโดยใช้ไอซี NE555



ภาพที่ 3.18 สัญญาณพัลส์อ้างอิง

จากคู่มือการใช้งานพื้นฐานของไอซีเบอร์ LM555 / NE555 / SA555 ของบริษัท Fairchild Semiconductor สามารถหาความถี่ที่ใช้งานตามวงจรในภาพที่ 3.18 ได้จาก

$$f = \frac{1.44}{R_1 + 2(R_A)(C_1)} \quad (3.25)$$

$$\text{เมื่อ } R_A = R_2 + R_3$$

เมื่อต้องการความถี่ 50 kHz กำหนดค่า $R_1 = 1\text{k}\Omega$ และ $C_1 = 0.001\mu\text{F}$ จากนั้นสามารถคำนวณหาความต้านทาน R_2 และ R_3 ได้ดังนี้

$$50 \times 10^3 \text{ Hz} = \frac{1.44}{(1 \times 10^3 \Omega + 2R_A) \times (0.001 \times 10^{-6} \text{ F})} \quad (3.26)$$

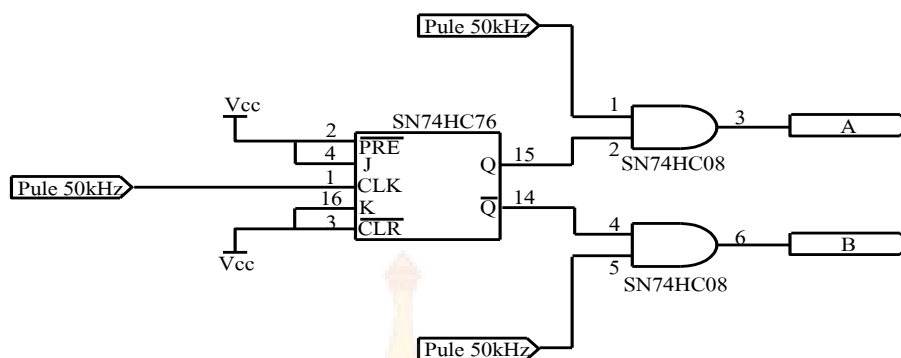
$$R_A = \left(\frac{1.44}{(0.001 \times 10^{-6} \text{ F}) \times (50 \times 10^3 \text{ Hz})} - (1 \times 10^3 \Omega) \right) / 2$$

$$R_A = 13.9 \text{ k}\Omega \quad (3.27)$$

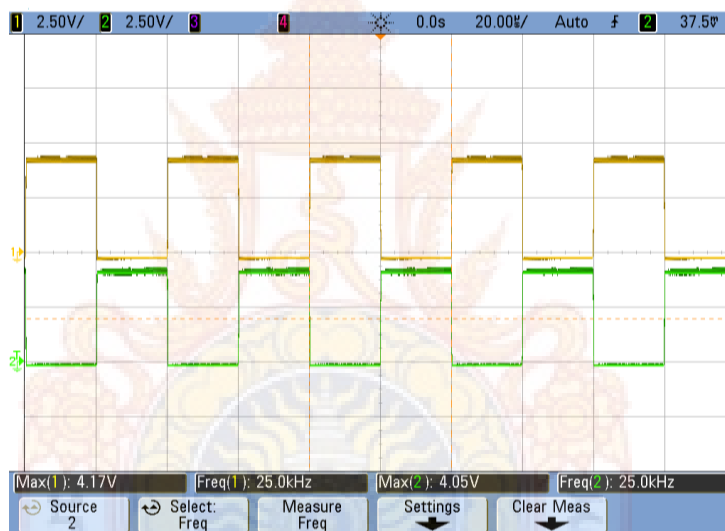
ในการใช้งานจริงอุปกรณ์อาจมีความผิดพลาด ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวต้านทานปรับค่า R_3 ค่า 20 k Ω ร่วมกับตัวต้านทานค่าคงที่ R_2 ค่า 10 k Ω ทำให้วงจรนี้สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ตั้งแต่ 20 kHz - 68.57 kHz โดยปรับที่ตัวต้านทานปรับค่าได้ R_3

3.3.2 วงจรแบ่งสัญญาณพัลส์ให้มีการเลื่อนเฟส 90 องศา

ในงานวิจัยนี้วงจรบูตส์ทูลิชีคอนเวอร์เตอร์ มีการสวิตช์ที่เลื่อนเฟสกัน 90 องศา ดังนั้นเมื่อได้สัญญาณพัลส์อ้างอิงหลักที่ได้จากไอซีเบอร์ NE555 สัญญาณพัลส์ก็จะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนโดยใช้ไอซีเบอร์ SN74HC76 โดยไอซีส่วนที่ 1 จะทำหน้าที่ Active High ที่ขอบขาขึ้น ไอซีส่วนที่ 2 จะทำหน้าที่ Active High ที่ขอบขาลง และส่งสัญญาณเข้าที่ไอซีเบอร์ SN74HC08 ทั้งสองตัวก็จะได้รับสัญญาณพัลส์ 2 สัญญาณที่เลื่อนเฟสกัน 180 องศาและคูณกับสัญญาณความถี่หลัก ดังนั้นความถี่ก็จะลดลงครึ่งหนึ่ง ดังภาพที่ 3.19 และสัญญาณพัลส์ที่ได้ดังภาพที่ 3.20

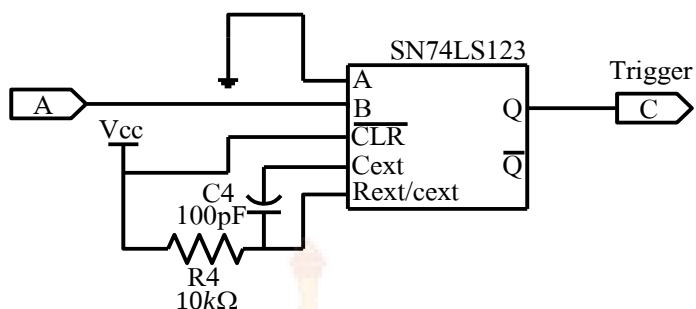


ภาพที่ 3.19 วงจรลดความถี่สัญญาณพัลส์ให้เหลือ 25 kHz



ภาพที่ 3.20 สัญญาณพัลส์ที่ห่างกัน 180 องศา และความถี่เหลือ 25kHz

จากนั้นก็จะผ่านไอซีเบอร์ 74LS123 เพื่อทำให้สัญญาณพัลส์ที่ได้มีการเลื่อมเฟสกัน 90 องศา ดังภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 วงจรสร้างสัญญาณกระตุ้นที่มีการเลื่อมเฟสกัน 90 องศา ของชุด A

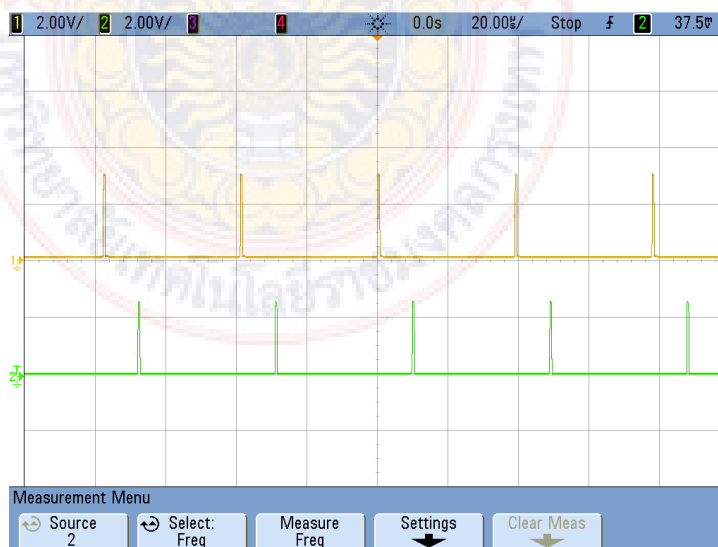
ในการคำนวณค่าเวลาของโมโนสเตเบิล(t_w) สามารถคำนวณได้จาก

$$t_w = R_4 \times C_4 \quad (3.28)$$

แทนค่า $C_4 = 100 \text{ pF}$ ดังนั้น

$$R_4 = \frac{1 \times 10^{-6} \text{ s}}{100 \times 10^{-12} \text{ F}} = 10 \text{ k}\Omega \quad (3.29)$$

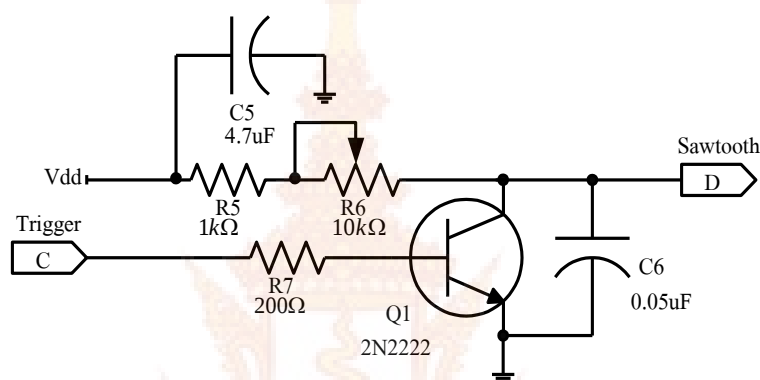
โดยสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากไอซีเบอร์ 74LS123 ทั้งสองตัวจะได้ออกมาเป็นสัญญาณกระตุ้นชุดละจำนวน 2 พัลส์ที่มีการเลื่อมเฟสกัน 90 องศา ดังภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.22 สัญญาณกระตุ้นที่ออกมาจากไอซี 74LS123 ของชุด A

3.4.3 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม

หลังจากที่ได้สัญญาณกระตุ้นจากวงจรข้างต้นจำนวน 4 ชุด ที่มีการเลื่อนเฟสกันเฟสละ 90 องศา จากนั้นจะต้องสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีการกำหนดให้มีความต่างเฟสกันเฟสละ 90 องศา จำนวน 4 ชุดโดยใช้หลักการของการเก็บและคายประจุของตัวเก็บประจุที่เกิดจากการเปิดปิดสวิทช์ของทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N2222 เพื่อทำให้เกิดสัญญาณสามเหลี่ยมที่มียอดความสูง 5 V สำหรับใช้ในการมอดูเลตกับสัญญาณคำสั่งกระแสอ้างอิงให้เกิดเป็นสัญญาณวัฏจักรงาน สำหรับนำไปเข้าวงจรขับนำเกตเพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์



ภาพที่ 3.23 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม

จากภาพที่ 3.23 เพื่อให้ง่ายแก่การคำนวณกำหนด $R_L = R_5 + R_6$ ในงานวิจัยนี้ต้องการสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่ 25 kHz ซึ่งมีคาบเวลา 40 μ s และจุดสูงสุดของสัญญาณสามเหลี่ยม 5V เลือกใช้ตัวเก็บประจุ C_6 มีค่า 0.05 μ F สามารถคำนวณหาค่า R_L ได้จาก

$$u_o = u_+ - (u_+ - u_{C0})e^{-t/R_L C_{10}} \quad (3.30)$$

เมื่อ u_o คือ ความแรงของสัญญาณสามเหลี่ยม ณ เวลาที่ต้องการ

u_+ คือ แรงดันไฟเลี้ยงที่ป้อนให้วงจร

u_{C0} คือ แรงดันที่ค้างที่ตัวเก็บประจุก่อนการประจุมีค่า $= V_{CEsat}$ ของ

ทรานซิสเตอร์ = 0.3V

t คือ คาบเวลาของสัญญาณสามเหลี่ยม

แทนค่าดังนั้น

$$5 = 15 - (15 - 0.3)e^{-40 \times 10^{-6} / R_L \times 0.05 \times 10^{-6}} \quad (3.31)$$

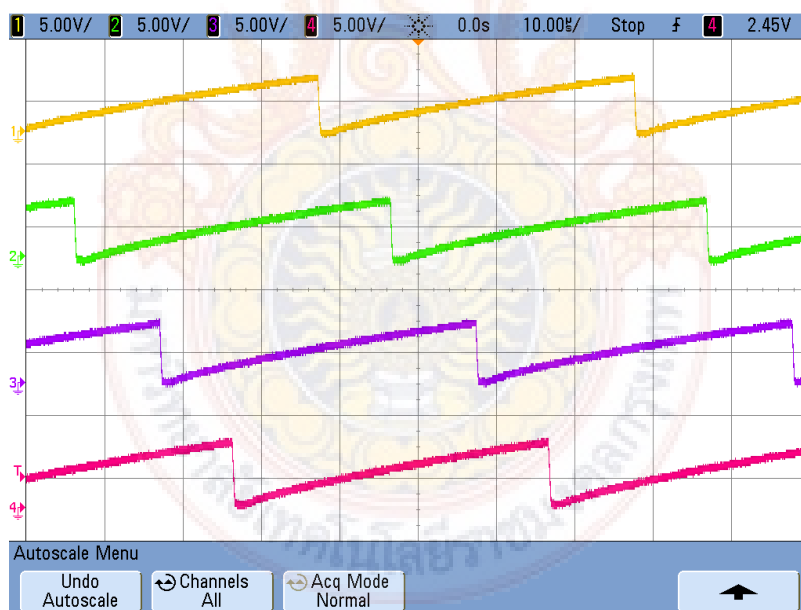
$$5 = 15 - \frac{14.7}{e^{800/R_L}}$$

$$e^{800/R_L} = \frac{14.7}{10} = 1.47$$

$$\frac{800}{R_L} \log e = \log 1.47$$

$$R_L = 800 \frac{\log e}{\log 1.47} = 2.1k\Omega \quad (3.32)$$

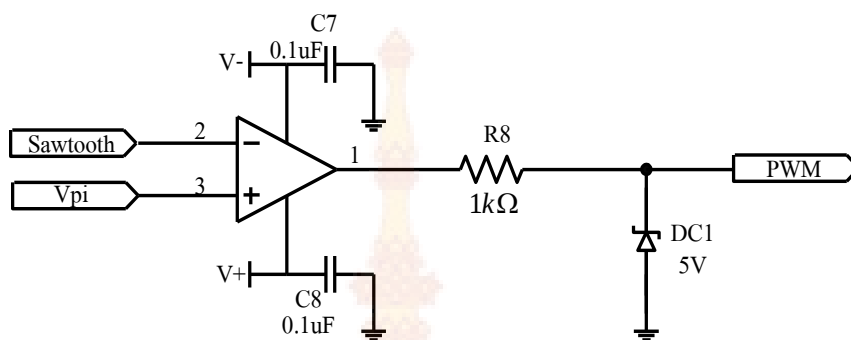
ในการใช้งานจริงอาจมีค่าผิดพลาดที่เกิดจากอุปกรณ์ได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้งานค่า R_L เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้ $R_L = R_5 + R_6$ จึงเลือกใช้งานค่า $R_5 = 1k\Omega$ ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานปรับค่า R_6 ค่า $10k\Omega$ จะได้สัญญาณตามเหลี่ยมดังภาพที่ 3.24



ภาพที่ 3.24 สัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้จากทรานซิสเตอร์ 2N2222

3.4.4 วงจรมอดูเลตตามความกว้างของสัญญาณพัลส์ (PWM)

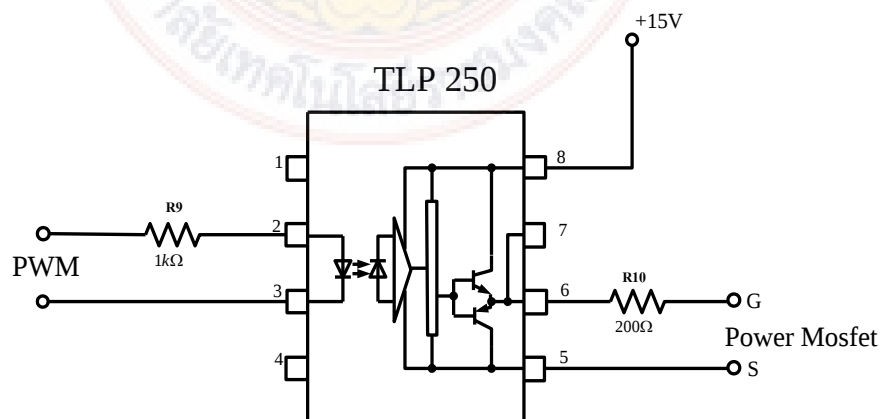
วงจรมอดูเลตทำหน้าที่มอดูเลตสัญญาณที่ได้จากตัวควบคุมในรูปปิดของกระแสกับสัญญาณพาหะที่เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรมอดูเลตตามความกว้างของสัญญาณพัลส์หรือสัญญาณพีดับบิวเอ็ม แสดงดังภาพที่ 3.25



ภาพที่ 3.25 วงจรมอดูเลตสัญญาณพีดับบิวเอ็ม (PWM)

จากภาพที่ 3.25 สัญญาณที่ได้จากตัวควบคุมในรูปกระแส ซึ่งเป็นสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมกระแสของวงจรแปลงผันสัญญาณที่ได้นี้จะเป็นลักษณะแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระดับตั้งแต่ 0V จนถึง 5V ถูกส่งเข้าไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมโดยใช้โอปแอมป์เบอร์ TL084 ทำเป็นวงจรเปรียบเทียบ ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตจะได้เป็นสัญญาณพีดับบิวเอ็ม (Pulse Width Modulation) แต่สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีระดับความสูงของยอดเท่ากับแรงดันของแหล่งจ่าย เพื่อให้สัญญาณมีความเหมาะสมที่จะเข้าวงจรขับเคลื่อนจะต้องมีการตัดยอดคลื่นออกไปโดยใช้ซีเนอร์ไดโอดขนาด 5V มาต่อที่ขาเอาต์พุตเพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตมีระดับความสูงไม่เกิน 5V หลังจากนั้นสัญญาณก็จะถูกส่งเข้าวงจรขับนำเกตต่อไป

3.4.5 วงจรขับนำเกตด้วยไอซี TLP250

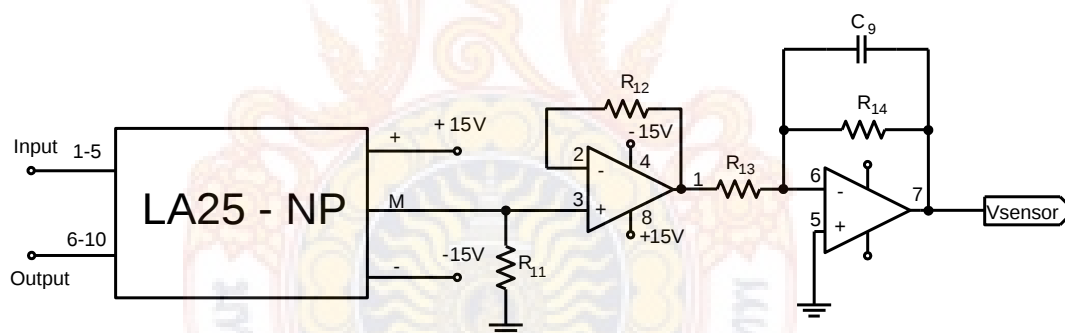


ภาพที่ 3.26 วงจรขับนำเกตด้วยไอซีเบอร์ TLP250

เพื่อความสะดวกและให้วงจรจับมีขนาดเล็กจึงใช้ไอซีสำเร็จรูป TLP250 ขนาด 8 ขาดังแสดงวงจรจับเกตไว้ในภาพที่ 3.26 จากวงจรสัญญาณด้านเข้าเป็นสัญญาณที่ถูกส่งมาจากวงจร มอดูเลตตามความกว้างของพัลส์มีขนาดแรงดัน 0V ถึง 5V โดยจะรับสัญญาณอินพุตผ่านขา 2 และขา 3 เพื่อที่จะทำการไบอัสให้แก่อิโอดเปล่งแสงที่ต่ออยู่ระหว่างขา 2 และขา 3 ทางอินพุต โดยจะต่อผ่านความต้านทาน $1\text{ k}\Omega$ เพื่อให้มีกระแสไหลผ่านไปยังไดโอดเปล่งแสงไม่สูงเกินไปจนเกิดความร้อนเสียหาย ส่วนทางเอาต์พุตกำหนดให้แรงดันมีขนาดเท่ากับ 15V โดยรับแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟจากชุดวงจรจ่ายไฟเลี้ยง

3.4.6 วงจรตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

ในภาพที่ 3.27 จะแสดงวงจรตรวจจับกระแส จะใช้ Current-Voltage Transducers ยี่ห้อ LEM รุ่น LA25-NP ที่มีอัตราการแปลง $25\text{ A} = 25\text{ mA}$ หลักการของวงจรตรวจจับกระแสจะนำค่าของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดในวงจรแต่ละวงจรกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $12.5\text{ A} = 12.5\text{ mA}$ หากต้องการนำเอาสัญญาณเอาต์พุตไปใช้งานจะต้องเปลี่ยนค่ากระแสให้เป็นแรงดันดังในภาพ



ภาพที่ 3.27 วงจรตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

3.4.7 วงจรควบคุมวงรอบกระแสแบบพีไอ

วงจรควบคุมกระแสเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ควบคุมให้ระดับการจ่ายกระแสคงที่ ถึงแม้ว่าโหลดทางไฟฟ้าจะมีการเพิ่มขึ้น โดยวงจรนี้จะใช้วงจรเปรียบเทียบ (Summing) โดยใช้ ออปแอมป์เบอร์ TL082 ในวงจรดังภาพที่ 3.28 ออปแอมป์ตัวที่ OPC2A ต่อเป็นแบบ Inverting Mode มีอัตราขยายเท่ากับ 1 สัญญาณที่ได้จากจุดนี้คือสัญญาณความผิดพลาดของแรงดัน (V_{er}) และถูกส่งต่อไปยังวงจรควบคุมต่อไป โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบพีไอสมการตัวควบคุมกระแสแสดงในสมการที่ 3.33

$$\frac{V_{pi}(s)}{V_{err}(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (3.33)$$

โดยที่อัตราขยายของ K_p หาได้จากสมการ 3.34

$$K_p = \frac{R_{19} + R_{20}}{R_{18}} \quad (3.34)$$

ในการออกแบบกำหนดให้ค่าความต้านทาน $R_{19} = 100\Omega$ และ $R_{20} = 37k\Omega$ แทนลงในสมการ 3.35 จะได้อัตราขยาย คือ

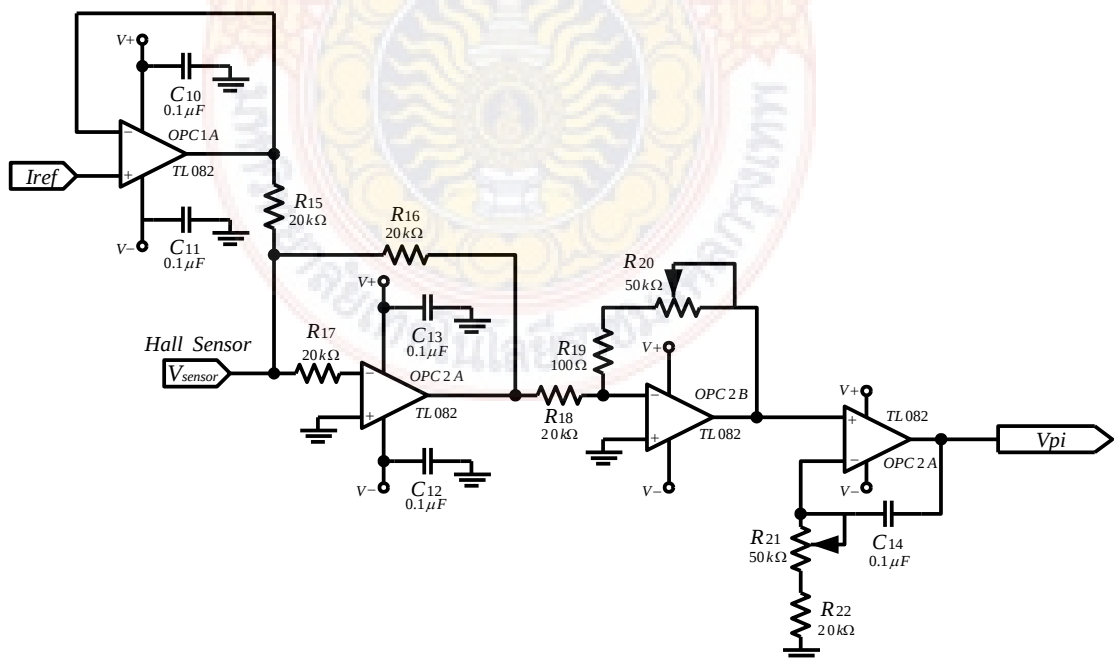
$$K_p = \frac{100 + 37k\Omega}{20k\Omega} = 1.855 \quad (3.35)$$

และค่าเวลาหาได้จากสมการ 3.36

$$T_i = (R_{21} + R_{22})C_{14} \quad (3.36)$$

ซึ่งในการออกแบบกำหนดให้ค่าความต้านทาน $R_{21} = 50k\Omega$ และ $R_{22} = 20k\Omega$ และตัวเก็บประจุ $C_{14} = 0.1\mu F$ แทนค่าที่ได้ลงในสมการที่ (3.37)

$$T_i = (50k\Omega + 20k\Omega) \times 0.1\mu F = 0.007 s \quad (3.37)$$

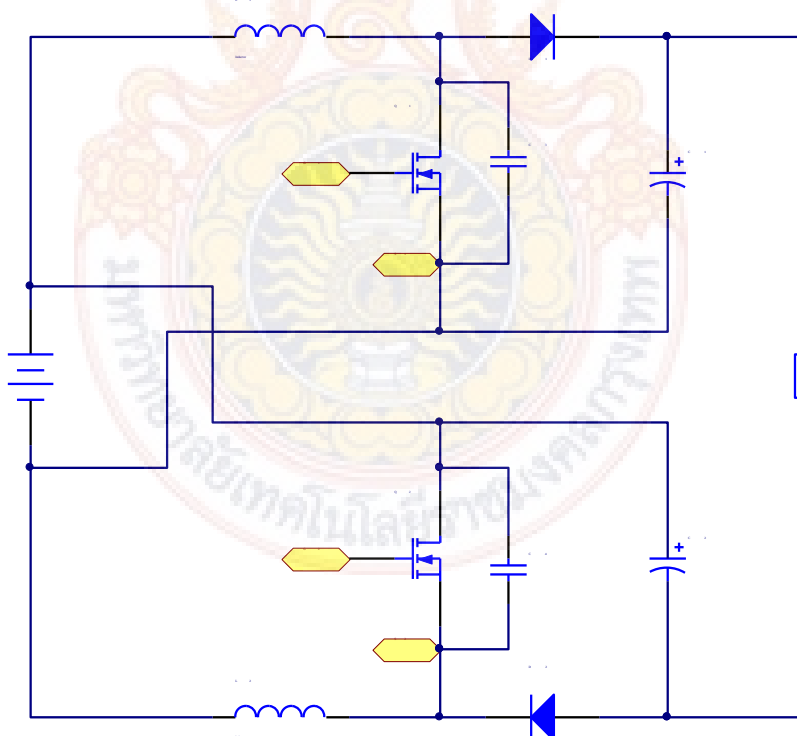


ภาพที่ 3.28 วงจรควบคุมกระแสแบบฟีดแบ็ค

3.5 การออกแบบวงจรตีชีทู้ดชีคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูง

การออกแบบวงจรตีชีทู้ดชีคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูงจะประกอบไปด้วย วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์จำนวน 2 วงจรมาอนุกรมกัน โดยจะมีวงจรที่ตัวเหนี่ยวนำจะอยู่ทางด้าน บวกของแหล่งจ่ายไฟส่วนอีก วงจรจะมีตัวเหนี่ยวนำอยู่ทางด้านลบของแหล่งจ่ายดัง วงจรภาคกำลัง ที่ได้ออกแบบนี้ใช้ MOSFET เป็นอุปกรณ์สวิตช์ โดยใช้ MOSFET เบอร์ IRFP460PBF ของบริษัท VISHAY INTER TECHNOLOGY ซึ่งมีคุณสมบัติคือ มีค่า $R_{ds(on)}$ ต่ำประมาณ 0.27 โอห์ม และสามารถทนกระแสได้สูงถึง 33 แอมแปร์ ที่แรงดัน 500 โวลต์ ที่อุณหภูมิ 25 องศา ส่วนไดโอดที่ใช้ เบอร์ RURG3020 ของบริษัท FAIRCHILD มีคุณสมบัติทนกระแสได้ 30 แอมแปร์ ที่แรงดัน 200 โวลต์ ที่อุณหภูมิ 25 องศา ส่วนตัวเหนี่ยวนำที่ใช้จะต้องสร้างขึ้นให้แต่ละตัวมีค่าความเหนี่ยวนำ ใกล้เคียงกันมากที่สุดคือ 400 มิลลิเฮนรี่

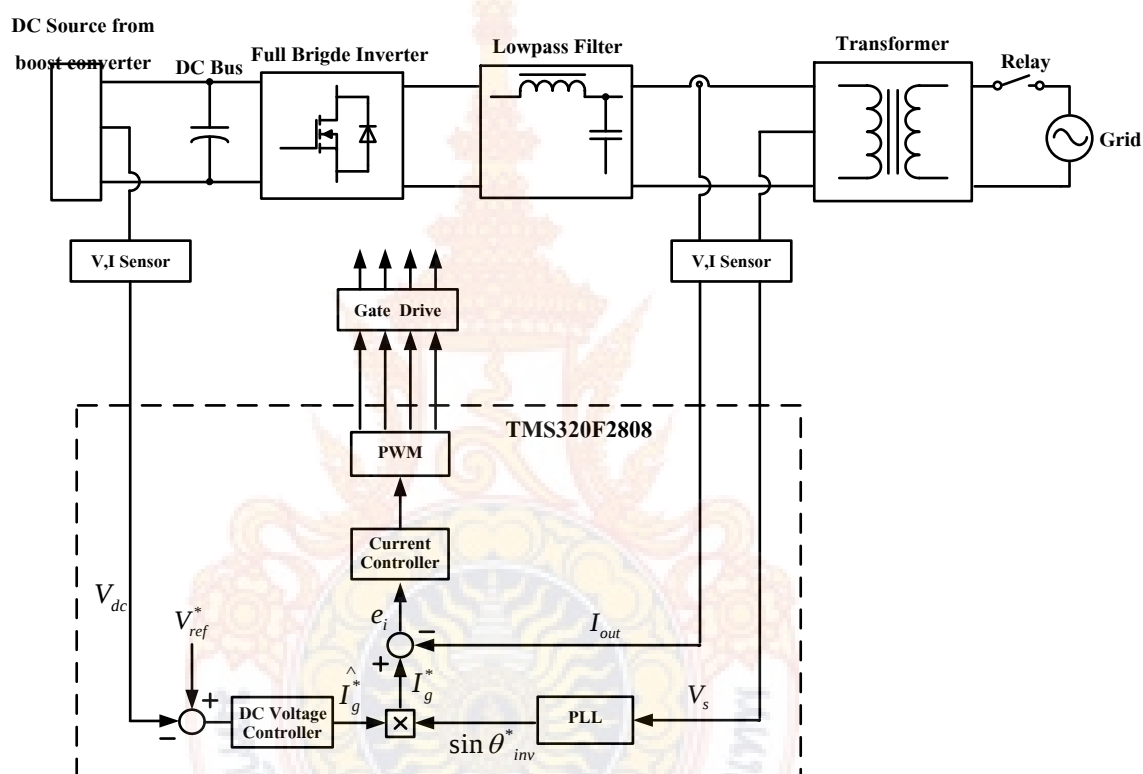
ซึ่งหลังจากกำหนดอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้งานเรียบร้อยแล้ว ก็ได้ใช้โปรแกรมออสเทียมดีไซ เนอร์ทำการออกแบบเขียนลายวงจรเพื่อสร้างวงจรตีชีทู้ดชีคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูง ดังภาพที่ 3.29



ภาพที่ 3.29 วงจรตีชีทู้ดชีคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายสูง

3.6 การออกแบบอินเวอร์เตอร์แบบหนึ่งเฟสแบบต่อเข้าระบบจำหน่าย

โครงสร้างของระบบซึ่งจะประกอบไปด้วยภาคควบคุมและภาคกำลังโดยที่ภาคควบคุมจะใช้แหล่งจ่ายสวิตช์ซึ่งเป็นตัวจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรภายในและใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวเขียนโปรแกรมเชื่อมโยงกับตัว DSP จากนั้นจะส่งสัญญาณขับเคลื่อนไปให้ภาคกำลังที่ต่ออยู่กับไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 60 V และแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายกำลังเข้าสู่ระบบจำหน่ายโดยแสดงดังภาพที่ 3.30 [9]



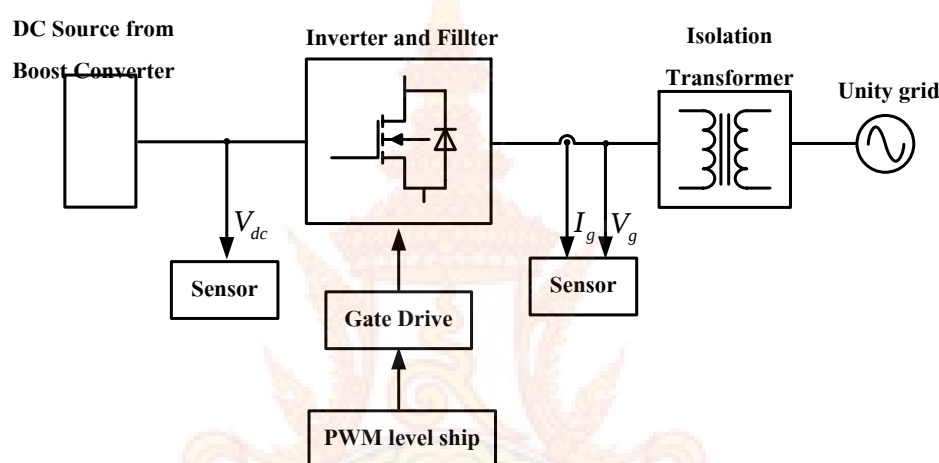
ภาพที่ 3.30 บล็อกไดอะแกรมของภาคควบคุมและภาคกำลัง

สำหรับกระบวนการทำงานของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบต่อเข้าระบบนั้น เมื่อพิจารณาตามภาพที่ 3.30 โดยเริ่มจากการรับแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสเพื่อนำสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงมาแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ สัญญาณที่ได้จะผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำเพื่อทำให้รูปร่างของสัญญาณเป็นรูปคลื่นไซน์ ในส่วนนี้จะสร้างกระแสรูปคลื่นไซน์ที่มีมุมเฟสตรงกันกับแรงดันของระบบการไฟฟ้า โดยใช้หลักการควบคุมกระแสแบบฟีดแบ็ก โดยการสร้างสัญญาณกระแสอ้างอิงรูปคลื่นไซน์มาเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสจริงที่จ่ายเข้าระบบเพื่อไปควบคุมการทำงานของสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์ โดยกระแสอ้างอิง

รูปคลื่นไซน์จะสร้างจากผลคูณของค่ากระแสที่จ่ายกำลังสูงสุดกับสัญญาณไซน์หนึ่งหน่วยที่ได้จากวิธีเฟสล็อกกลูป สัญญาณที่ได้จะถูกส่งผ่านไปยังหม้อแปลงที่ซึ่งทำหน้าที่แยกโดดทางไฟฟ้าและยกระดับแรงดันขึ้นเพื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบการไฟฟ้า

3.6.1 การออกแบบภาคกำลัง

ในส่วนของฮาร์ดแวร์ จะประกอบไปด้วยวงจรต่างๆ ดังภาพที่ 3.31 แต่ละวงจรมีการทำงานดังนี้



ภาพที่ 3.31 โครงสร้างโดยรวมของชุดอินเวอร์เตอร์

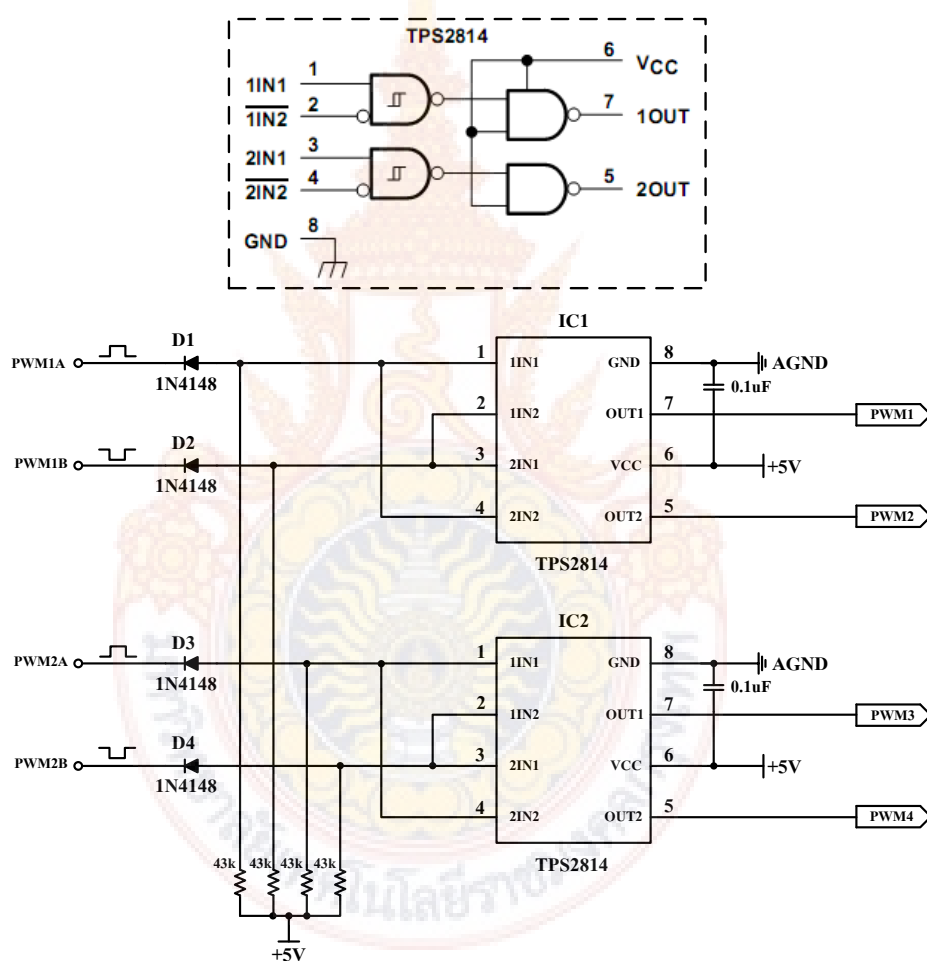
1. วงจรแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 3.3V ไปเป็น 5V
2. วงจรจับเกต เป็นวงจรที่ใช้แยกกราวด์ระหว่างชุดควบคุมและชุดกำลัง เพื่อป้องกันหากมีการลัดวงจรของชุดกำลังก็จะไม่ทำให้ชุดควบคุมเสียหาย โดยใช้ IC เบอร์ HCPL-3180 ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวจับเกต
3. วงจรตรวจวัดกระแสและแรงดัน
4. วงจรปรับระดับสัญญาณ

3.6.2 วงจรยกระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 3V ไปเป็น 5V

สัญญาณ PWM ที่สร้างขึ้นจาก DSP นั้นจะมีแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0 - 3V ซึ่งสัญญาณไม่สามารถขับมอสเฟตจากวงจรจับเกตได้โดยตรง ดังนั้นในวงจรนี้จะใช้ IC เบอร์ TPS2814 ทำหน้าที่รับสัญญาณ PWM จาก DSP เพื่อยกระดับแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0 - 3V ไปเป็น 5V ก่อนส่งไป

ยังวงจรจับเกต และเพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้แน่ใจว่าสัญญาณ PWM ในกิ่งเดียวกันต้องไม่ทำงานพร้อมกัน ใน TPS2814 ยังมีฟังก์ชันล็อกสัญญาณ PWM ในกิ่งเดียวกันไม่ให้ทำงานพร้อมกันเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายของวงจรกำลัง ดังภาพที่ 3.32

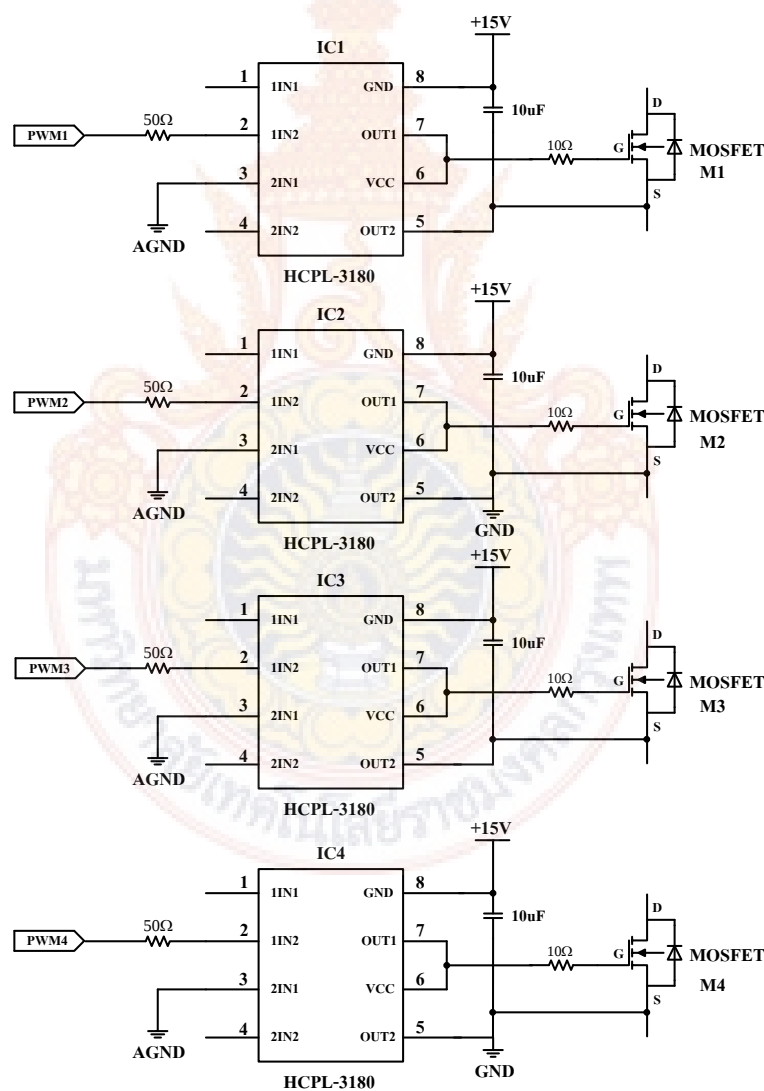
ถ้าสัญญาณ PWM ของอินเวอร์เตอร์ในกิ่งเดียวทั้งสองสัญญาณ On ในเวลาเดียวกัน สัญญาณเอาต์พุตจะมีค่าเป็นศูนย์ และถ้าสัญญาณ PWM ของอินเวอร์เตอร์ในกิ่งเดียวทั้งสองสัญญาณมีสถานะแตกต่างกัน (high & low or low & high) หรือมีสถานะเป็นศูนย์ทั้งสองสัญญาณ สัญญาณเอาต์พุตจะเท่ากับสัญญาณอินพุต ดังภาพที่ 3.32



ภาพที่ 3.32 วงจรยกระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 3V เป็น 5V

3.6.3 วงจรขับเคลื่อนสำหรับอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

เป็นวงจรที่ป้องกันความเสียหายของสัญญาณ PWM ของชุดควบคุมและชุดขับเคลื่อน ซึ่งเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายแก่วงจร หากเกิดการผิดพลาดจากวงจรอื่นเนื่องมาจากการลัดวงจรหรือจากการทำงานผิดพลาดอื่นๆ เช่น หากวงจรทางด้านควบคุมเกิดการลัดวงจรจะเสียหายเฉพาะทางด้านควบคุมแต่จะไม่ส่งผลกระทบต่อให้วงจรขับเคลื่อนเสียหายด้วย ซึ่งในวงจรแยกกราวด์ของสัญญาณขับเคลื่อน ต้องสามารถทำงานที่ความถี่สูงๆ ได้ เพราะสัญญาณ PWM ที่ส่งมาจากวงจรควบคุมมีความถี่สูงประมาณ 10kHz ดังนั้นจึงเลือกใช้ไอซีแยกกราวด์ เบอร์ HCPL3180 เป็นตัวแยกกราวด์ในการส่งสัญญาณ และสามารถใช้กับแรงดันไฟเลี้ยง $+15\text{V}$ ดังภาพที่ 3.33



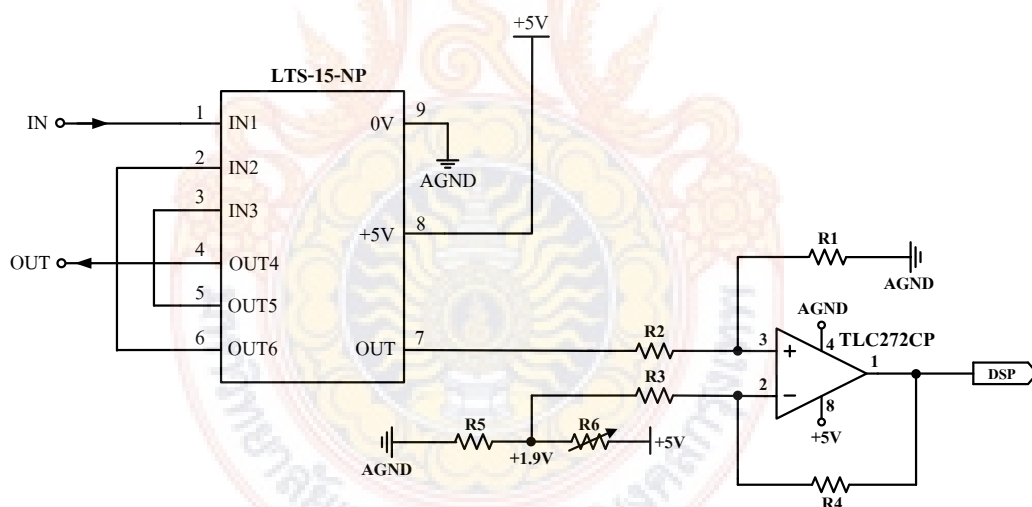
ภาพที่ 3.33 วงจรขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์

3.6.4 วงจรตรวจวัดกระแส

ในภาพที่ 3.34 จะแสดงวงจรตรวจวัดกระแสเพื่อนำกระแสเอาต์พุตกลับมาเปรียบเทียบกับกระแสอ้างอิงที่สร้างขึ้น จะใช้ Current Transducers (LEM) รุ่น LTS-15-NP ตรวจจับกระแสก่อนส่งค่าไปที่ DSP หลักการของอุปกรณ์ตรวจจับกระแสก่อนจะแปลงค่ากระแสให้เป็นแรงดัน โดยแรงดันที่ออกมาจาก LTS-15-NP ที่ขา 7 นั้นจะมีค่าเป็นไปตามสมการที่ 3.38

$$V_{out} = \frac{I_p \times 0.6}{I_{pn}} + V_{ref} \quad (3.38)$$

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการต่อให้วัดกระแสได้สูงสุดเท่ากับ [-5;5A] ที่ค่ากระแส 0 A จะมีค่าแรงดันดีซีออฟเซตเท่ากับ 2.5V ซึ่งจะได้แรงดันเอาต์พุตอยู่ระหว่าง [1.9;3.1V] ในตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลจะมีช่วงที่จะอ่านค่าได้ถูกต้อง ดังนั้นจึงใช้วงจรอปแอมป์เบอร์ TLC272CP ทำหน้าที่ปรับระดับสัญญาณให้อยู่ในช่วงที่จะอ่านค่าได้ถูกต้อง โดยมีค่าอยู่ที่ระหว่าง 0-3V ดังภาพที่ 3.34



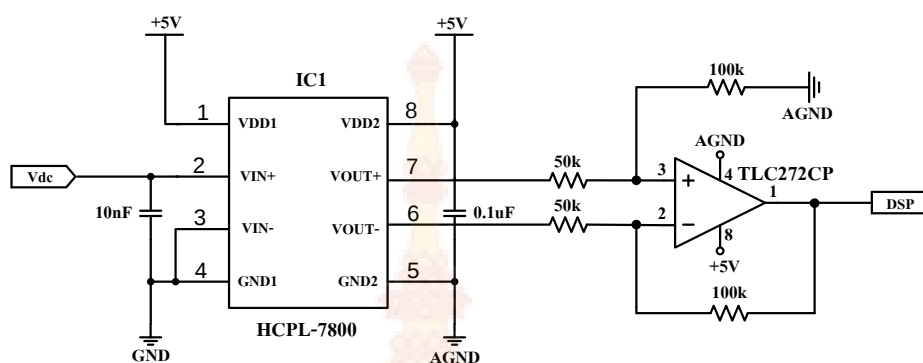
ภาพที่ 3.34 อุปกรณ์และวงจรวัดกระแส

3.6.5 วงจรตรวจวัดแรงดัน

3.6.5.1 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากภาพที่ 3.35 เป็นวงจรที่ออกแบบขึ้นมาเพื่อตรวจจับแรงดันด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์เพื่อนำกลับมาคำนวณหาค่ากระแสขดอ้างอิง จากวงจรใช้ไอซีเบอร์ HCPL7800 ซึ่ง

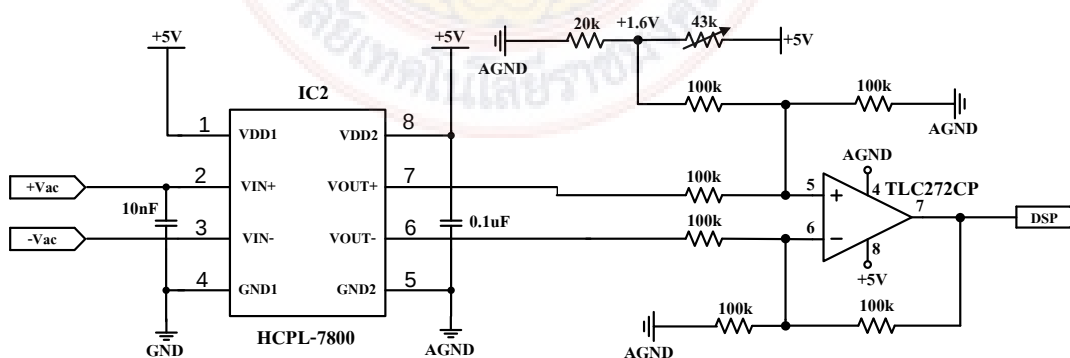
เป็นออปแอมป์ที่มีคุณสมบัติแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างด้านเข้ากับด้านออก เพื่อตรวจจับแรงดันทางด้านเข้าซึ่งต้องวงจรแบ่งแรงดันเพื่อลดขนาดของแรงดันลงเข้ามา ซึ่ง HCPL7800 จะอ่านค่าแรงดันอยู่ในช่วง $\pm 200\text{mV}$ แล้วทำการปรับแต่งสัญญาณด้วยวงจรขยายเพื่อให้ได้ค่าตามที่กำหนด



ภาพที่ 3.35 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

3.6.5.2 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

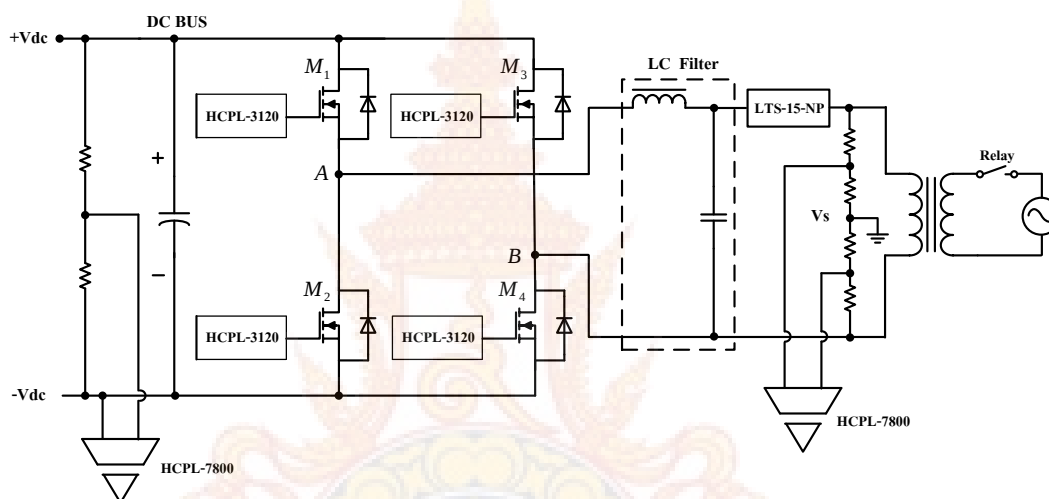
จากภาพที่ 3.36 เป็นวงจรที่ออกแบบขึ้นมาเพื่อตรวจจับแรงดันไฟฟ้าระบบจำหน่ายเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ามูมเฟส จะทำการแบ่งแรงดันให้ต่ำลงในช่วง $\pm 200\text{mV}$ ซึ่งจะได้สัญญาณแรงดันเอาท์พุทอยู่ในช่วง $\pm 1.6\text{V}$ เนื่องจากตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลของ DSP จะมีช่วงของแรงดันที่ใช้สำหรับอ่านค่าสัญญาณอนาลอก ดังนั้นจึงต้องมีวงจรระดับแรงดันเพื่อปรับค่าแรงดันของตัววัดสัญญาณอนาลอกให้อยู่ในช่วงที่ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลสามารถอ่านค่าได้ โดยวงจรระดับแรงดันจะสร้างจากตัวขยายสัญญาณเบอร์ TLC272CP ดังภาพที่ 3.36



ภาพที่ 3.36 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

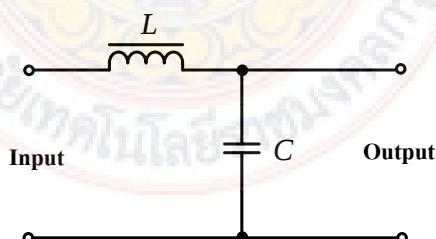
3.6.6 วงจรกำลัง

ในส่วนของภาคกำลังนั้นใช้ MOSFET เบอร์ IRFP640 จำนวน 4 ตัว เป็นอุปกรณ์สวิตช์ ซึ่งสามารถทนแรงดันได้ถึง 200V และทนกระแสได้ 18A ซึ่ง MOSFET ทั้ง 4 ตัวจะถูกควบคุมจากสัญญาณขั้วเกิดและในกึ่งเดียวกันจะไม่ให้ทำงานพร้อมกัน สำหรับวงจรกรองความถี่ต่ำที่ต่อระหว่างด้านออกของอินเวอร์เตอร์กับหม้อแปลงแรงดันเป็นวงจรแบบ LC ซึ่งหม้อแปลงแรงดันจะทำหน้าที่แยกโคจรทางไฟฟ้าและยกระดับแรงดันขึ้นเป็น 220V เพื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า ดังภาพที่ 3.37



ภาพที่ 3.37 อุปกรณ์และวงจรภาคกำลัง

ไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้หลังจากผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์นั้น จะมีความถี่ที่สูงกว่า 50Hz อยู่นอยู่จึงต้องทำการกรองออกด้วย ซึ่งจะใช้วงจรกรองแบบ LC ดังภาพที่ 3.38



ภาพที่ 3.38 วงจรกรองความถี่ต่ำ

ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ ขั้นตอนแรก คือการหาชนิดของการกรองความถี่ที่ดีที่สุด ขั้นตอนที่สอง คือการคำนวณและออกแบบค่าอิมพีแดนซ์จากแรงดันต่ำ (V_{min}) หารด้วย

ค่ากระแสสูงสุด ($I_{\max}$) ในที่นี้ก็คือค่าของ R_d ขั้นตอนที่สาม คือการคำนวณหาค่าความถี่คัทออฟ (f_c) ขั้นตอนที่สี่ คือสมการหาค่าของค่าของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำโดยจะมีวิธีการคำนวณหาได้จากสมการที่ (3.39) และ (3.40)

ในการคำนวณหาตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมีการคำนวณดังต่อไปนี้

เมื่อค่าความถี่คัทออฟ $f_c = 250\text{Hz}$ และ $R_d = 8.65\Omega$

การคำนวณหาตัวเก็บประจุ C (ตัวกรองความถี่ต่ำ) ที่เหมาะสมให้กับวงจร

$$\text{เมื่อ} \quad C = \frac{1}{2\pi f_c R_d} \quad (3.39)$$

แทนค่าลงในสมการที่ (3.39)

$$C = \frac{1}{2 \times \pi \times 250 \times 8.65}$$

$$\text{จะได้} \quad C = 74\mu F$$

ดังนั้นเลือกค่า $C = 74\mu F$

เนื่องจากตัวเก็บประจุที่มีขายตามท้องตลาดไม่มีค่า $74\mu F$ จึงเลือกใช้ค่า C ที่มีค่าใกล้เคียง มาใช้ในวงจร LC filter แทน
การคำนวณหาตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสมให้กับวงจร

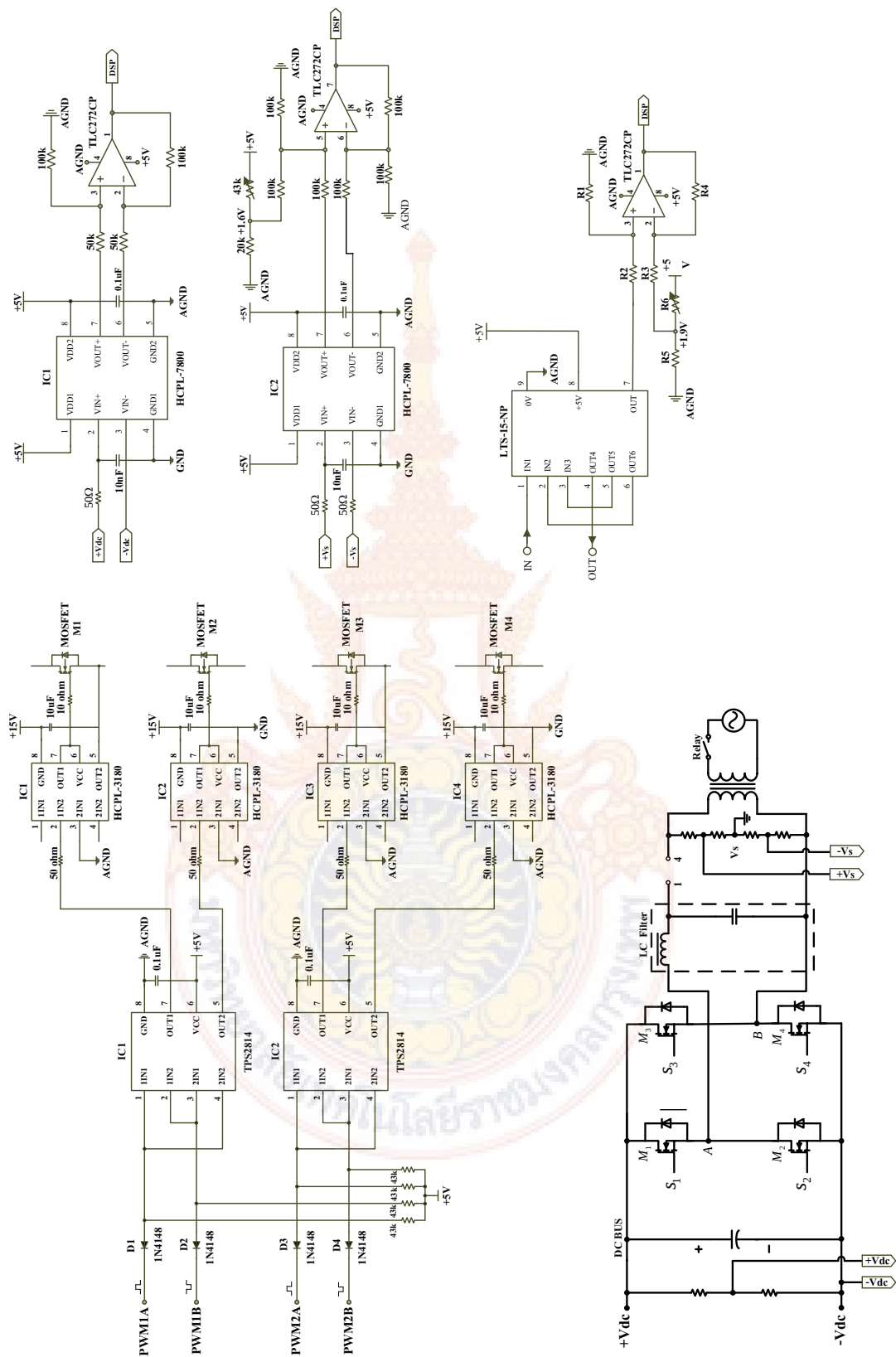
$$\text{เมื่อ} \quad L = \frac{R_d}{2\pi f_c} \quad (3.40)$$

แทนค่าลงในสมการที่ (3.40)

$$L = \frac{8.65}{2 \times \pi \times 250}$$

$$\text{จะได้} \quad L = 5.5\text{mH}$$

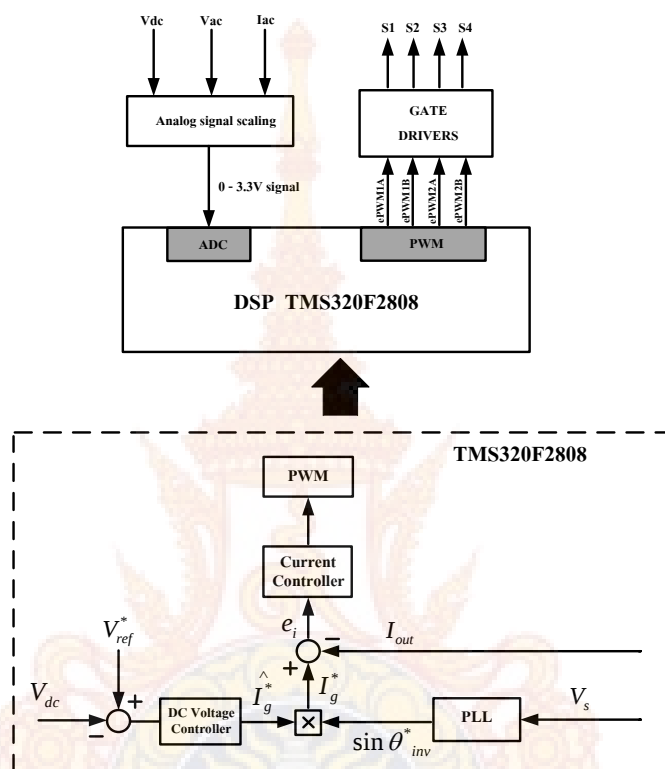
ดังนั้นเลือกค่า $L = 5.5\text{mH}$



ภาพที่ 3.39 อุปกรณ์และวงจรทั้งหมดของการออกแบบด้านฮาร์ดแวร์

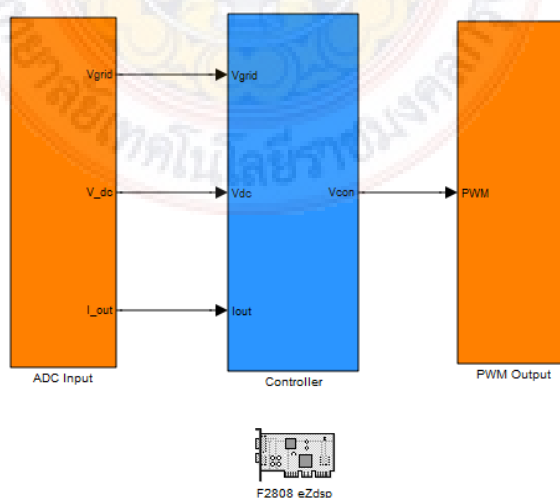
3.7 การออกแบบภาคควบคุมด้วย DSP

การจำลองระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์จะใช้โปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อจำลองการทำงานและวิธีการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ TMS 320F2808 และการใช้งานร่วมกันของโปรแกรม Matlab/Simulink กับ Code Composer Studio 3.3



ภาพที่ 3.40 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์

3.7.1 โปรแกรมควบคุมด้วย Matlab/Simulink

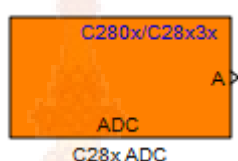


ภาพที่ 3.41 โปรแกรมควบคุมอินเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

จากภาพที่ 3.41 แบบจำลองการทำงานจะประกอบด้วยบล็อกที่สำคัญและมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.7.2 บล็อก C28x ADC

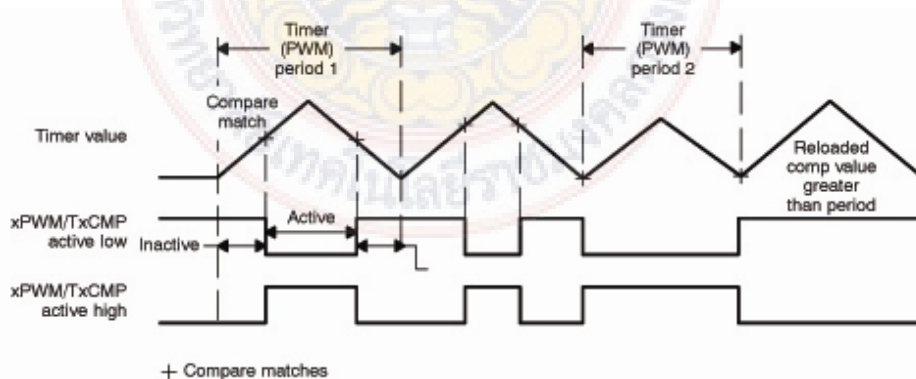
ADC เป็นตัวกำหนดเงื่อนไขการทำงานของโมดูล ADC เพื่อแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลของขาที่เลือกให้เป็นสัญญาณด้านเข้าโดยที่สัญญาณด้านออกของบล็อก C28x ADC จะเป็นค่าสัญญาณดิจิทัลและเก็บค่าจากการแปลงไว้ใน Result Register ของบอร์ด F2808 ค่าที่ผ่านการแปลงจะถูกส่งต่อไปยังตัวรับเอาท์พุต



ภาพที่ 3.42 บล็อก C28x ADC

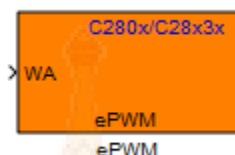
3.7.3 บล็อก C28x PWM

DSP TMS320F2808 ประกอบด้วยตัวสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มหลายตัวเพื่อใช้สัญญาณที่แตกต่างกัน บล็อกนี้จะเป็นการเตรียมทางเลือกที่จะตั้งค่าโมดูล เพื่อสร้างสัญญาณตามที่ต้องการ พีดับเบิลยูเอ็มทั้ง 12 สัญญาณ จะถูกแบ่งออกเป็น 6 โมดูล โดยแบ่งเป็นโมดูลละ 2 คู่ โดยนำคาบเวลาที่ได้จากโปรแกรมในส่วนของการคำนวณคาบเวลา มากำหนดเวลาในการสับสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์แต่ละตัว โดยจะนำมาใช้ในการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มทั้ง 12 สัญญาณ ดังภาพที่ 3.43



ภาพที่ 3.43 การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม

เมื่อพิจารณาภายในโครงสร้าง ePWM ของ DSP จะเห็นว่ามีส่วนที่ช่วยในการสร้างสัญญาณ PWM แบบสมมาตรที่เรียกว่า Symmetric Waveform Generation โดยอาศัยหลักการเปรียบเทียบกับตัวนับภายใน ถ้าค่าตัวนับมีค่ามากกว่าตัวเปรียบเทียบจะทำให้เอาต์พุตเปลี่ยนสถานะไป

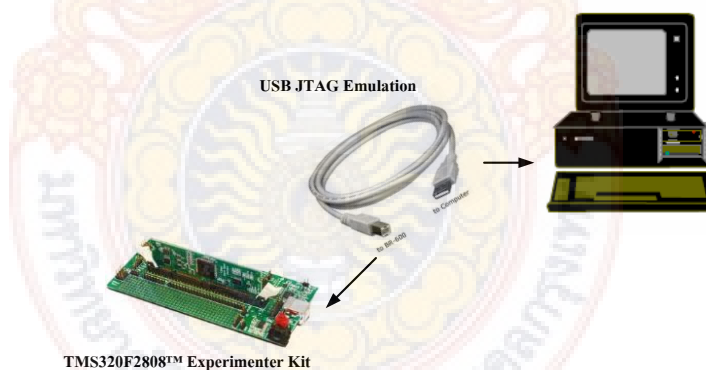


ภาพที่ 3.44 บล็อก C28x PWM

3.8 การใช้งาน Code Composer Studio 3.3

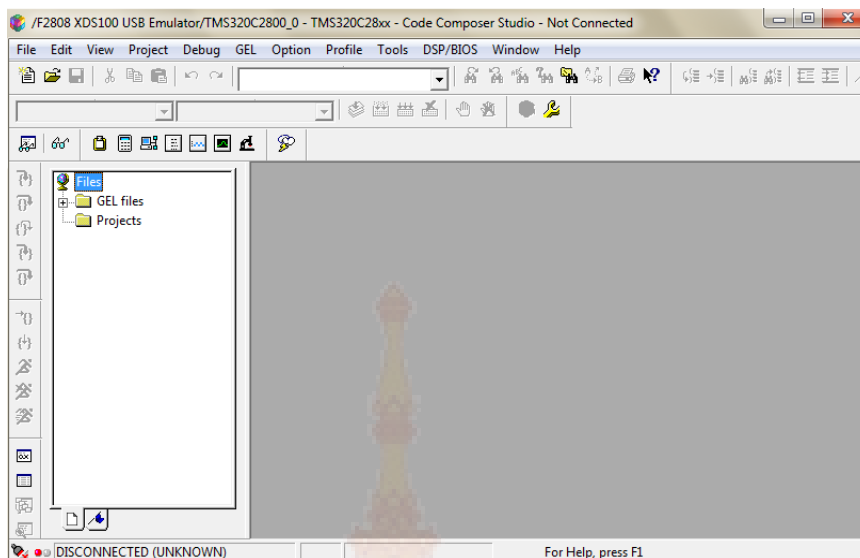
ปัจจุบันบริษัทเท็กซัสอินสตรูเมนต์ที่ได้พัฒนาเครื่องมือต่างๆ ที่สามารถใช้งานได้และมีความรวดเร็วในการติดต่อผ่านตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลซึ่งเป็นพื้นฐานในกระบวนการสร้างการแก้ปัญหาการวิเคราะห์การทดสอบต่างๆ ซึ่งโปรแกรม Code Composer studio 3.3 เป็นตัวกลางการเชื่อมต่อระหว่างตัวประมวลผลและโปรแกรมควบคุม โดยมีวิธีการใช้งานดังนี้

3.8.1 ทำการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลกับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล



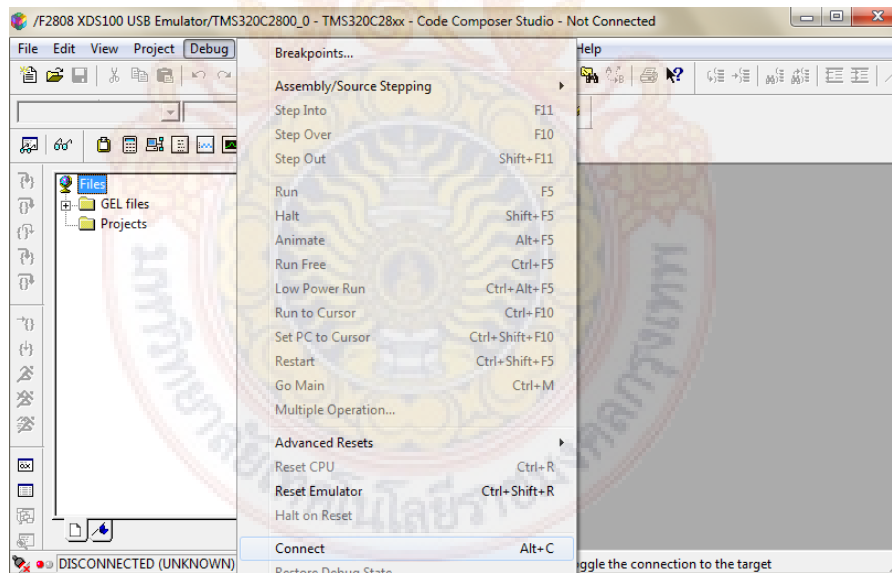
ภาพที่ 3.45 การเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลกับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

3.8.2 เปิดโปรแกรม Code Composer Studio 3.3 ขึ้นมาโปรแกรมจะเป็นดังภาพที่ 3.46



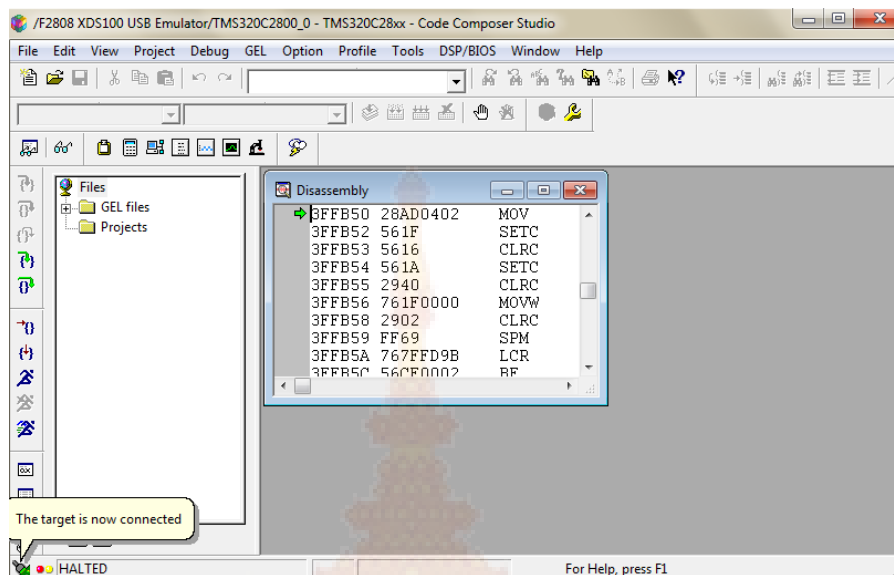
ภาพที่ 3.46 หน้าต่างของโปรแกรม Code Composer Studio 3.3

3.8.3 เข้าไปที่ debug / connect ดังภาพที่ 3.47



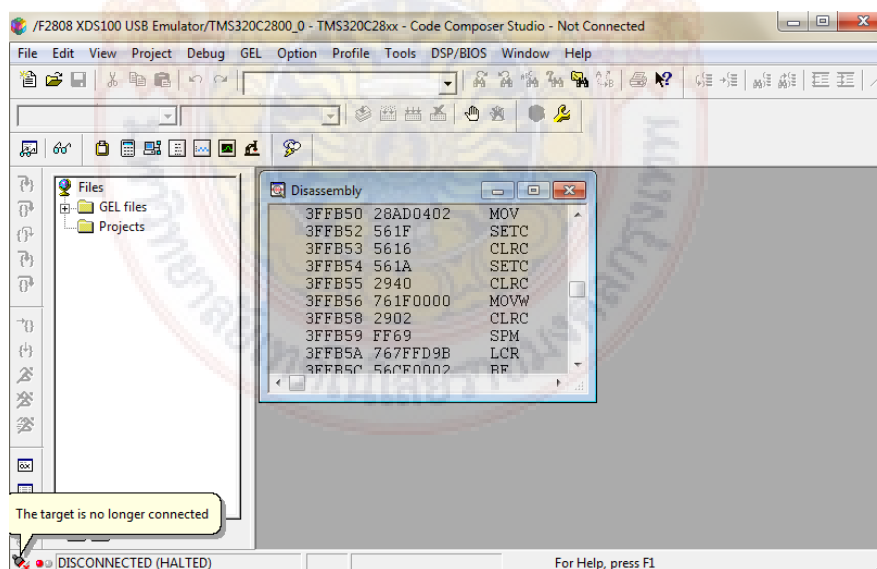
ภาพที่ 3.47 การเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม Code Composer Studio 3.3 กับบอร์ด DSP

3.8.4 ส่วนของโปรแกรมเมื่อทำการเชื่อมต่อ



ภาพที่ 3.48 โปรแกรม Code Composer Studio 3.3 เมื่อเชื่อมต่อเรียบร้อยแล้ว

3.8.5 เมื่อหยุดการใช้งานให้เข้าไปที่ debug / disconnect

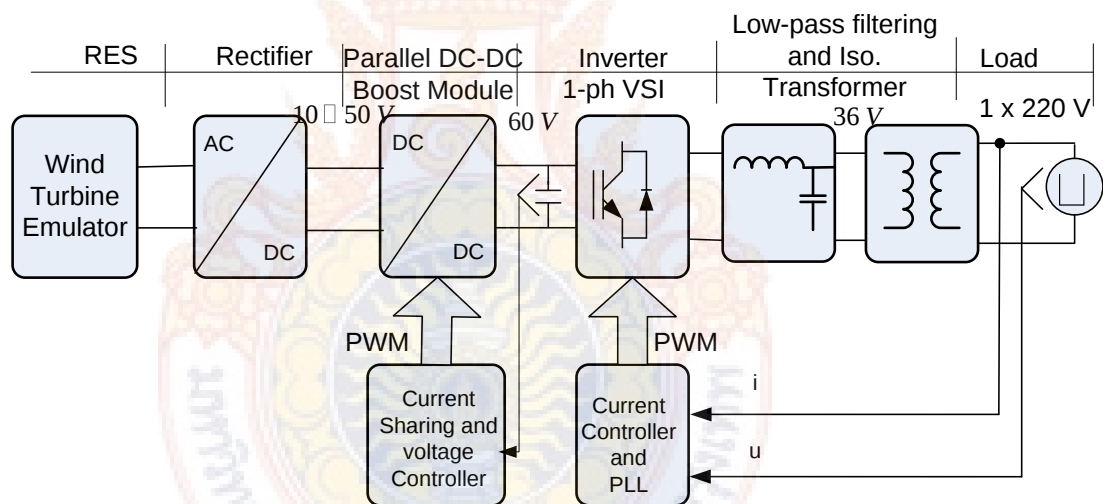


ภาพที่ 3.49 โปรแกรม Code Composer Studio 3.3 เมื่อหยุดเชื่อมต่อ

บทที่ 4

ผลการวิจัย

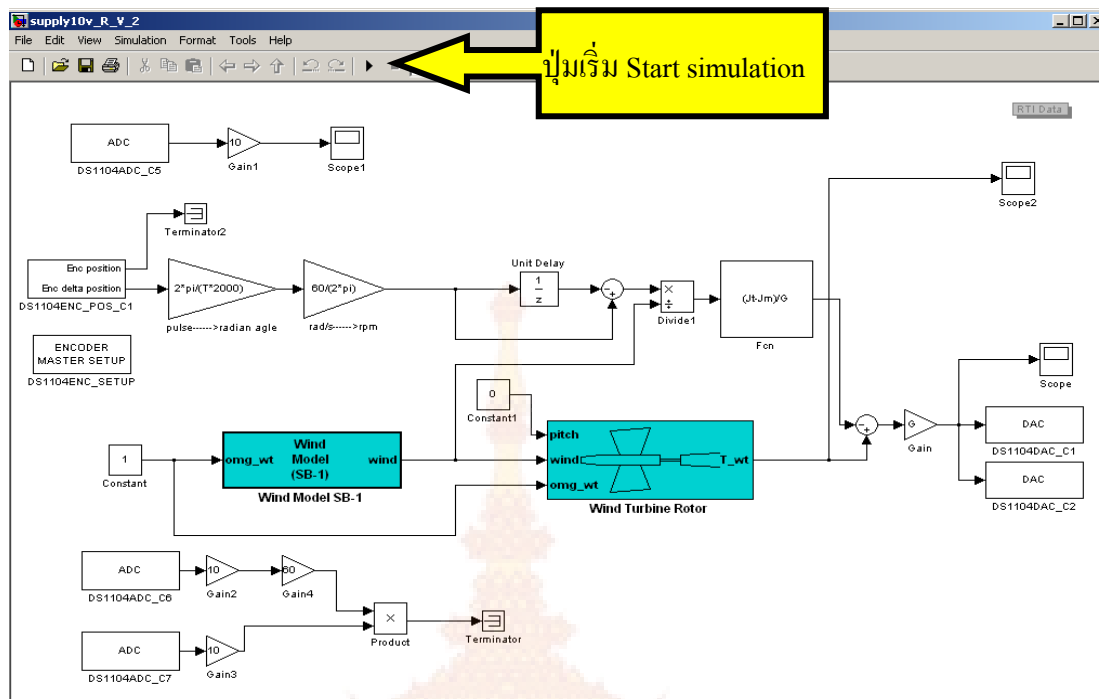
เมื่อการออกแบบงานวิจัยและสร้างเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการ์คอินเตอร์เฟซเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงนำเซนเซอร์เรเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรมาต่อคัปปลิงกับเครื่องจำลองกังหันลมเพื่อกำหนดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านวงจรเรียงกระแสเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงช่วงแรงดัน ($10 \sim 50\text{V}$) วงจรบูสต์ชัตติวี่คอนเวอร์เตอร์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าคงที่ 60 V ผ่านไปให้วงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 36 V ซึ่งโครไนท์เข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน $220\text{ V } 50\text{ Hz}$ ด้วยอัลกอริทึมเฟสล็อกกลูป (PLL)



ภาพที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมการทดสอบระบบแปลงผัน

4.1 การทดลองเครื่องจำลองกังหันลมกับโปรแกรม Matlab/Simulink

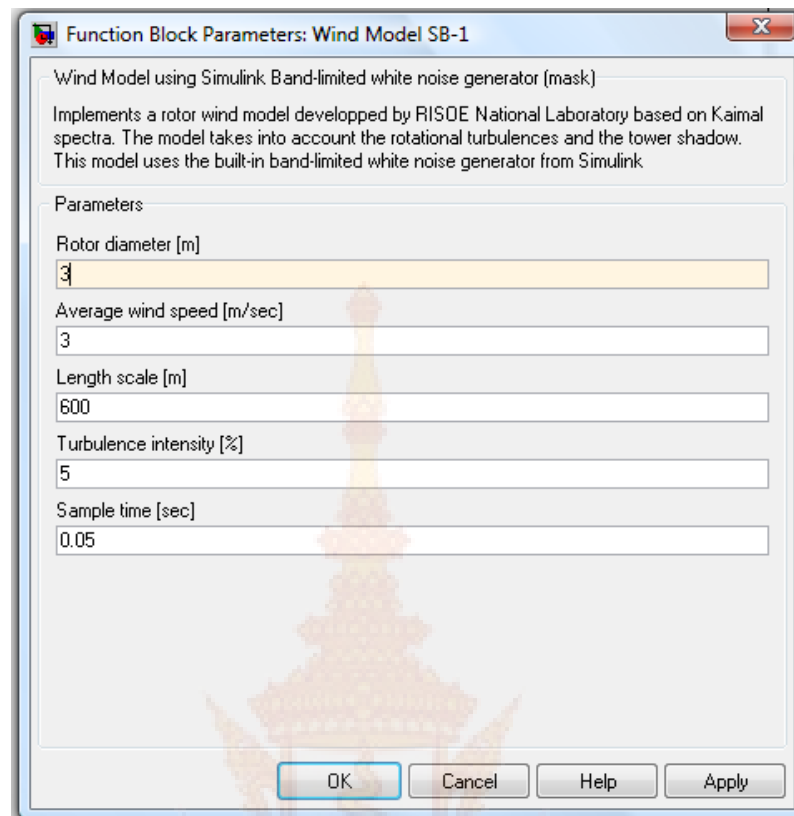
ในการทดลองเครื่องจำลองกับโปรแกรม Matlab/Simulink เราสามารถทำการทดลองได้โดยไม่ต้องต่อวงจรภายนอก เพียงแต่ทำการทดลองจากตัวโปรแกรม Matlab/Simulink ที่ได้ออกแบบมาแล้วโดยการใส่ค่าพารามิเตอร์ที่จะทำการทดลอง ในส่วนแบบจำลองของแต่ละส่วน



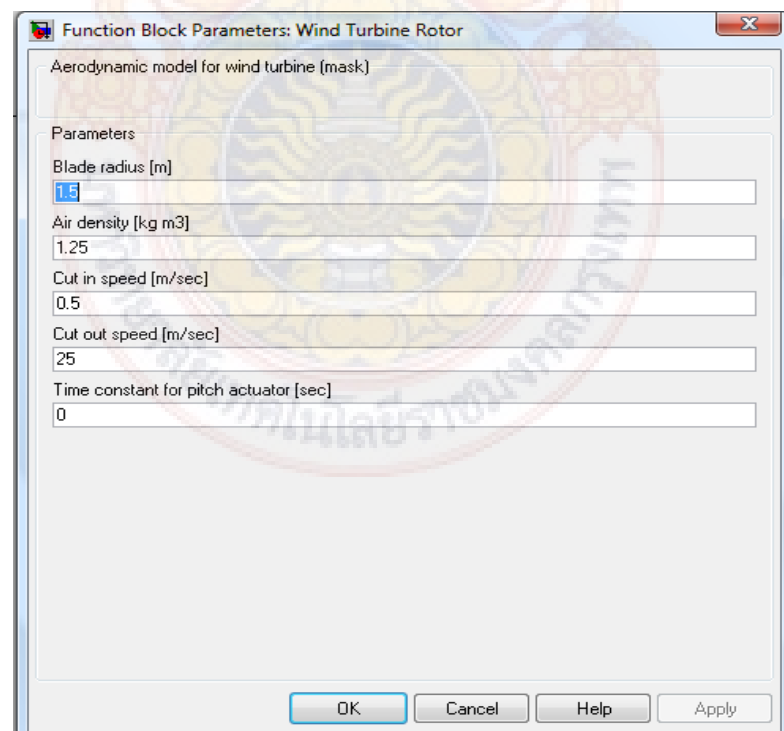
ภาพที่ 4.2 การทดสอบระบบของเครื่องกังหันจำลองกังหันลมใน Matlab/Simulink

ในส่วนของการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบจากทฤษฎีในบทที่ 2 สามารถใช้ตัวแปรในการกำหนดค่าต่างๆ ได้เช่น ค่าความเร็วลม (Wind Speed) ขนาดของใบพัด (Blade Radius) พื้นที่การสกัดพลังงานของใบพัด (Rotor Diameter) ในช่องใส่พารามิเตอร์ได้ทันที โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้

- ค่าความเร็วลมเฉลี่ย 3 m/s (v)
- ขนาดความยาวของต่อ 1 ใบพัด 1.5 m
- พื้นที่การสกัดพลังงานของใบพัด 3 m
- ความหนาแน่นของอากาศ 1.25 kg/m³

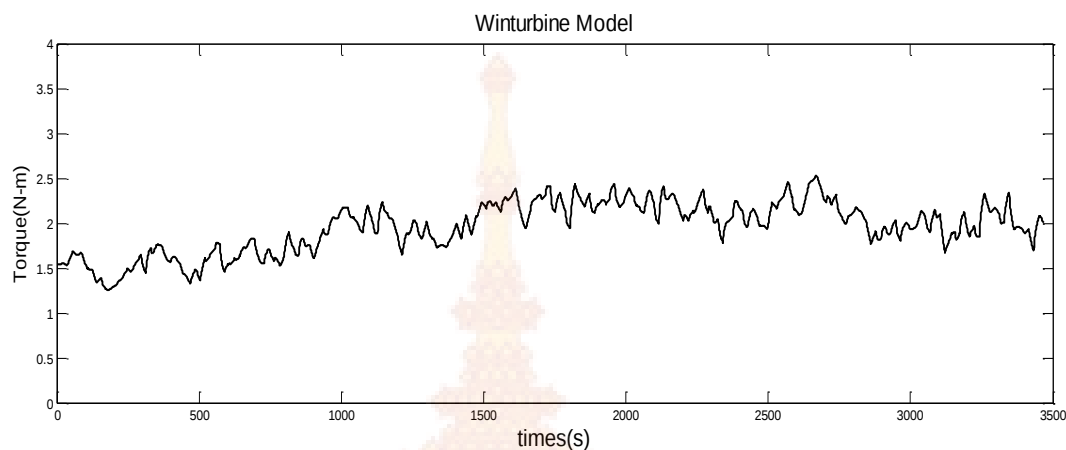


ภาพที่ 4.3 การกำหนดค่าตัวแปรในแบบจำลองความเร็วลม



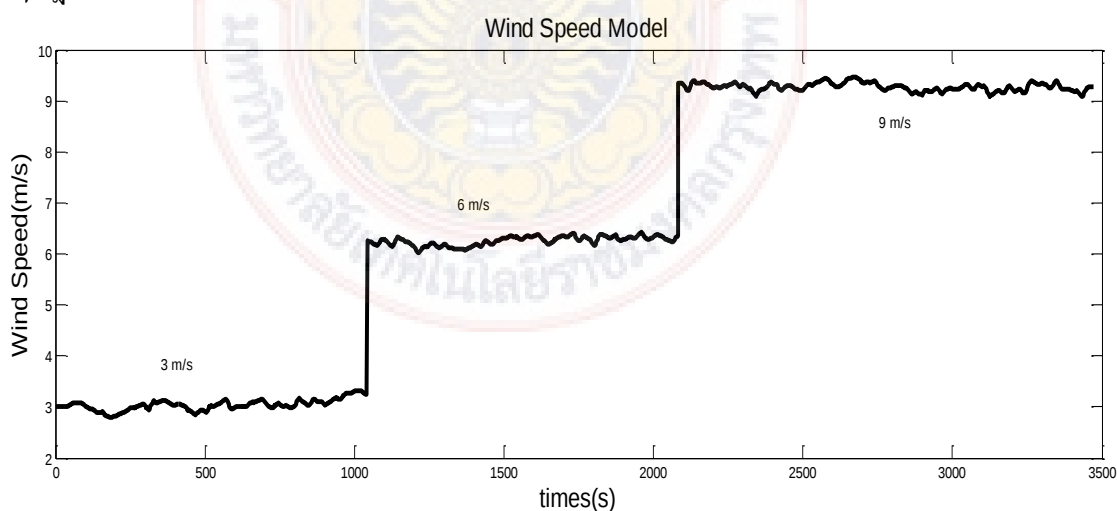
ภาพที่ 4.4 การกำหนดค่าตัวแปรในแบบจำลองกังหันลม

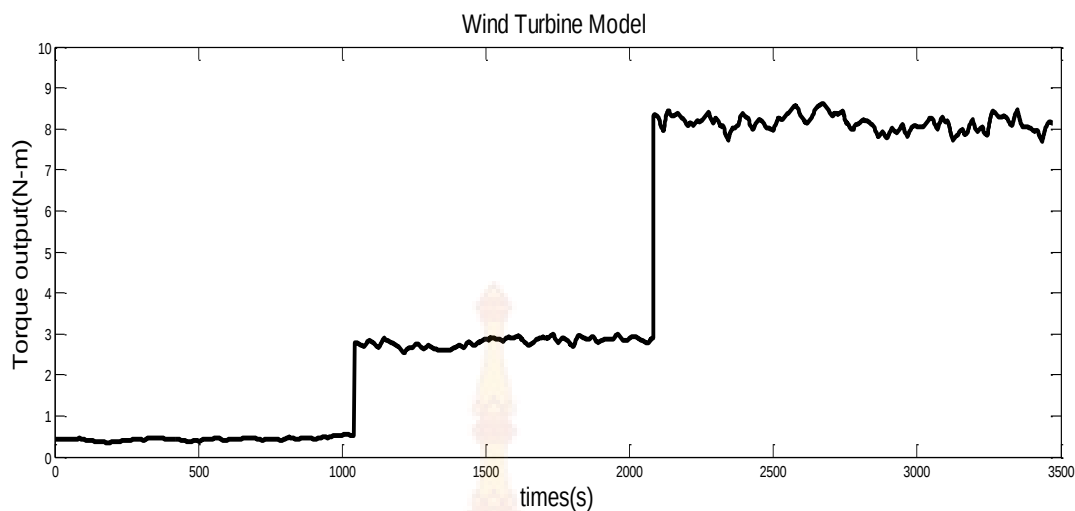
เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้วในส่วนของการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบแล้วทดลองเริ่มการจำลองเพื่อจำลองสัญญาณแรงบิดอ้างอิง (Torque reference) ที่ได้ว่าเป็นไปตามหลักการและทฤษฎีหรือไม่ และจากสัญญาณที่ได้ก็จะเป็นไปตามหลักการและทฤษฎีจริงดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ค่าแรงบิดอากาศพลศาสตร์ที่ได้จากแบบจำลองกังหันลม

จากนั้นทำการทดลองที่ค่าความเร็วลมในระดับต่างๆ โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบเมื่อตอนต้น แล้วทดลองเริ่มการจำลองต่อไปเพื่อดูสัญญาณแรงบิดอ้างอิง (Torque reference) ที่ได้ว่าเป็นไปตามหลักการและทฤษฎีหรือไม่ และจากสัญญาณที่ได้ก็จะเป็นไปตามหลักการและทฤษฎีจริงดังภาพที่ 4.5

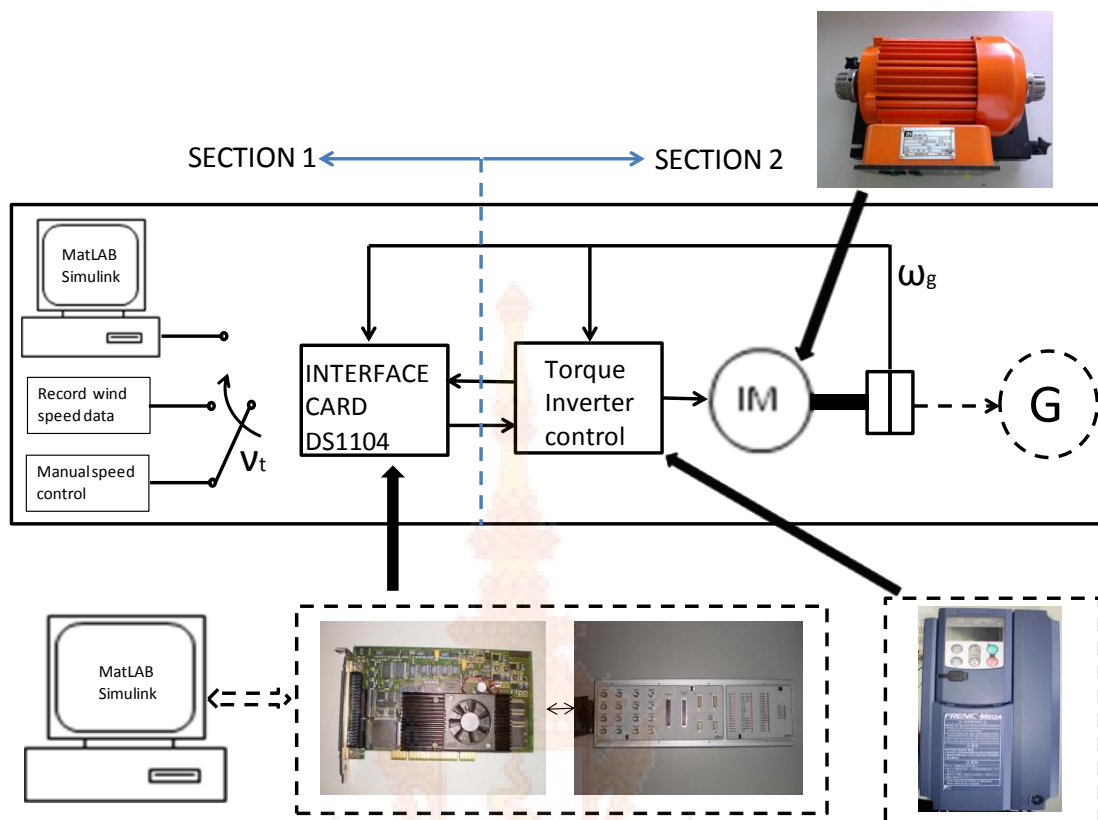




ภาพที่ 4.6 ค่าแรงบิดอากาศพลศาสตร์ที่ได้จากแบบจำลองกังหันลม (Wind Turbine Model) ที่ระดับความเร็วลมต่างๆ

4.1.1 การทดลองเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยการ์คอินเตอร์เฟส

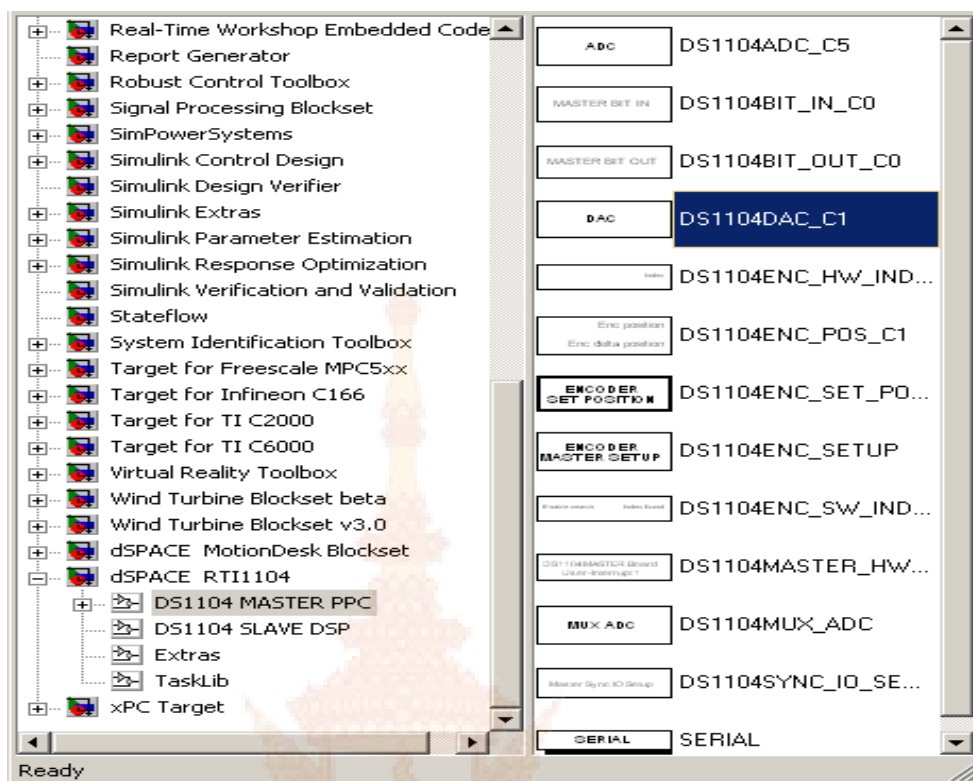
ขั้นตอนนี้จะมีการนำการ์คอินเตอร์เฟสเข้ามาใช้ควบคุมและแสดงผลแบบทันเวลา นอกจากการสังเกตพฤติกรรมของสัญญาณที่ได้ในโปรแกรม Matlab/Simulink แล้วสามารถที่จะวัดสัญญาณแบบทันเวลาที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำได้โดยผ่านการ์คอินเตอร์เฟส การกำหนดค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นจะกำหนดในโปรแกรม Matlab/Simulink มีขั้นตอนเหมือนเดิม



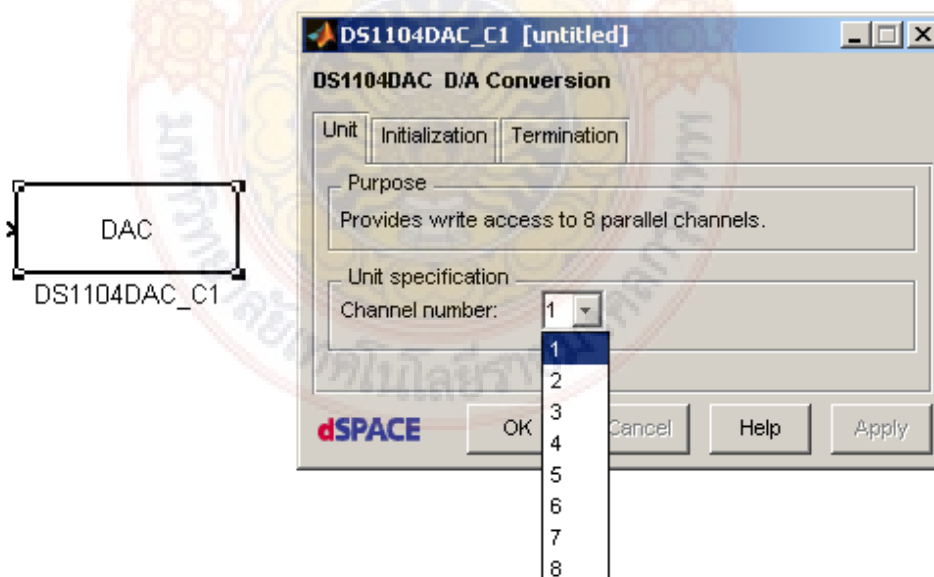
ภาพที่ 4.7 การเชื่อมต่ออาร์คิเตอร์เฟสระหว่างคอมพิวเตอร์กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

หลังจากผ่านขั้นตอนการกำหนดค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นแล้วจะเป็นการส่งผ่านสัญญาณให้กับอาร์คิเตอร์เฟสทำการแปลงโปรแกรม Matlab/Simulink เป็นแบบทันเวลา โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

เลือกช่องเอาต์พุตของ Blockset D/A โดยเข้าไปที่หน้าต่างของ Simulink Library Browser ดังภาพที่ 4.8 และดังภาพที่ 4.9



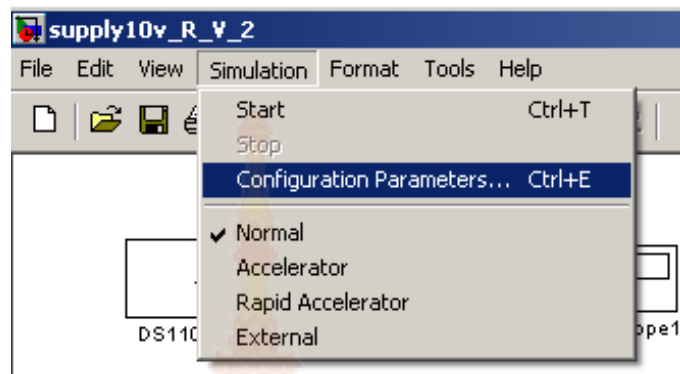
ภาพที่ 4.8 การเลือก Block set D/A



ภาพที่ 4.9 เลือกช่องเอาต์พุตของ Block set D/A

ทำการกำหนดค่าคุณลักษณะการจำลองโดยเข้าไปที่

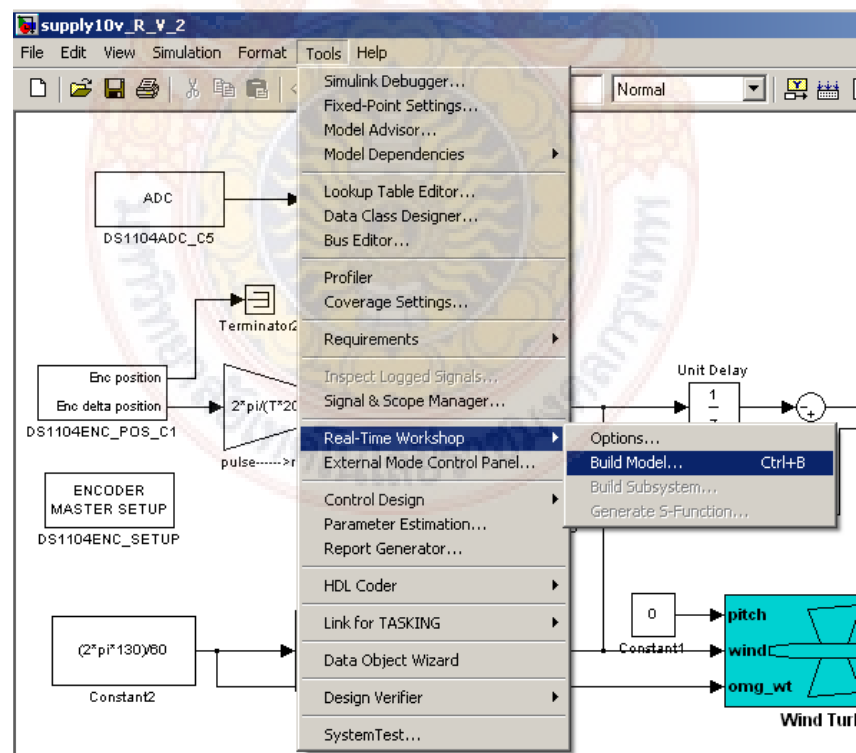
- Simulation > Configuration Parameter... ดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 การกำหนดค่าคุณลักษณะการจำลอง

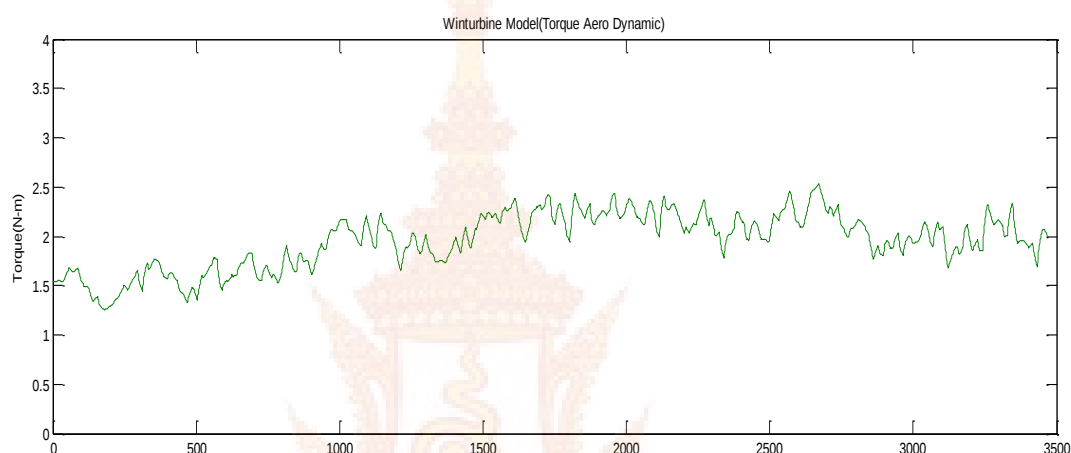
ทำการส่งผ่านสัญญาณให้กับการ์ดอินเตอร์เฟส DS1104 ทำการประมวลผล (Generate Code) แปลงเป็นแบบทันทเวลา โดยเข้าไปที่

- Tool > Real Times Works > Build Model > Enter ดังภาพที่ 4.11

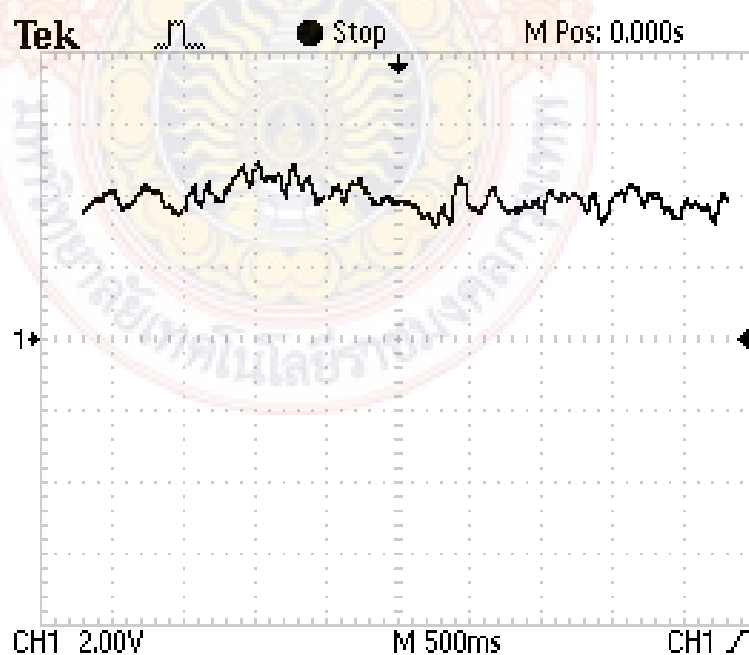


ภาพที่ 4.11 การผ่านสัญญาณให้กับการ์ดอินเตอร์เฟสแบบทันทเวลา

หลังจากทำการส่งผ่านสัญญาณให้กับการ์ดอินเตอร์เฟส ทำการประมวลผลแบบทันเวลา แล้ว มอเตอร์เหนี่ยวนำตอบสนองตามคุณลักษณะของแรงบิดอากาศพลศาสตร์ของกังหันลม เมื่อเราทำการเปรียบเทียบสัญญาณของแบบจำลองกังหัน (Wind Turbine Model) จากโปรแกรม Matlab/Simulink สัญญาณของแบบจำลองกังหันในรูปแบบทันเวลา และสัญญาณที่ได้จากแรงบิดของมอเตอร์ผ่านการประมาณแรงบิดของอินเวอร์เตอร์ จะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์กันทั้งสอง สัญญาณดังภาพที่ 4.12-4.13



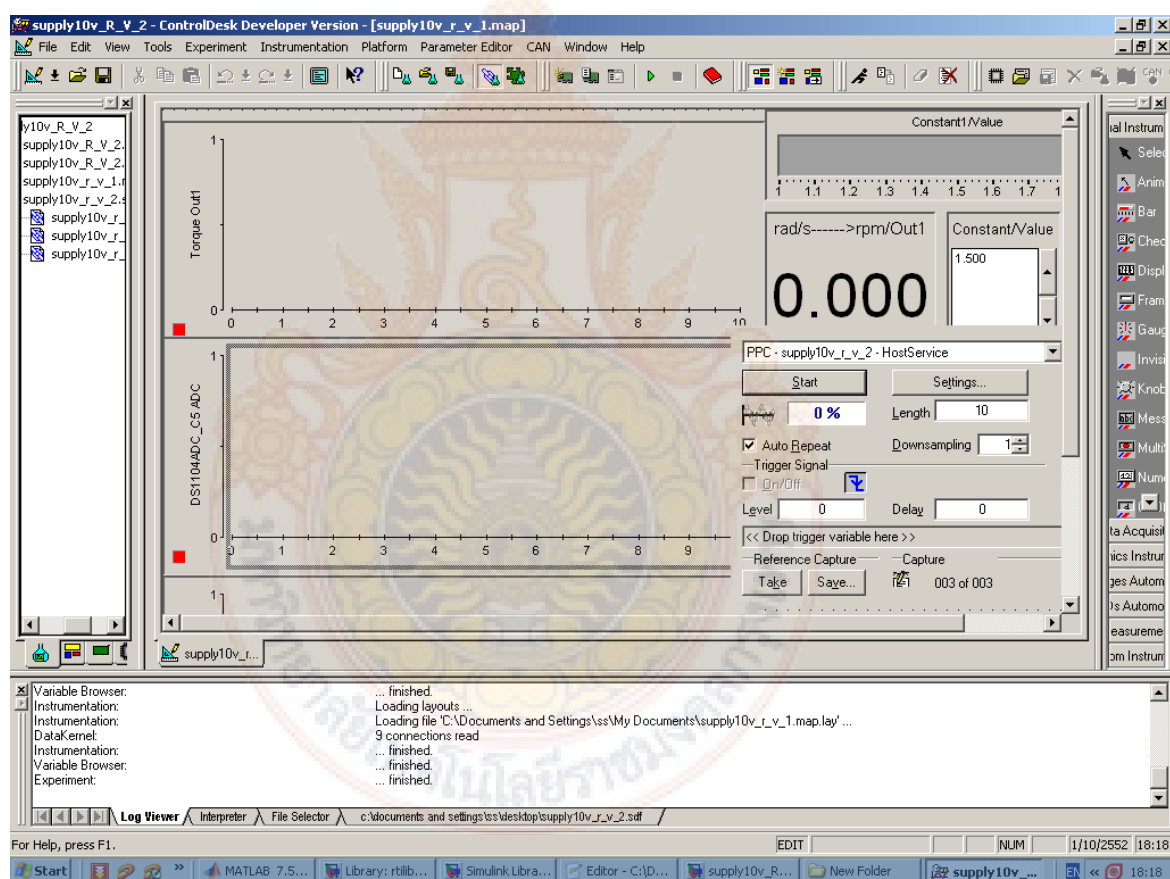
ภาพที่ 4.12 สัญญาณแรงบิดอ้างอิงจากโปรแกรม Matlab/Simulink



ภาพที่ 4.13 สัญญาณแรงบิดจากการประมาณของอินเวอร์เตอร์

4.1.2 การทดลองเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการ์คอินเตอร์เฟสที่ค่าความเร็วลมต่างๆ

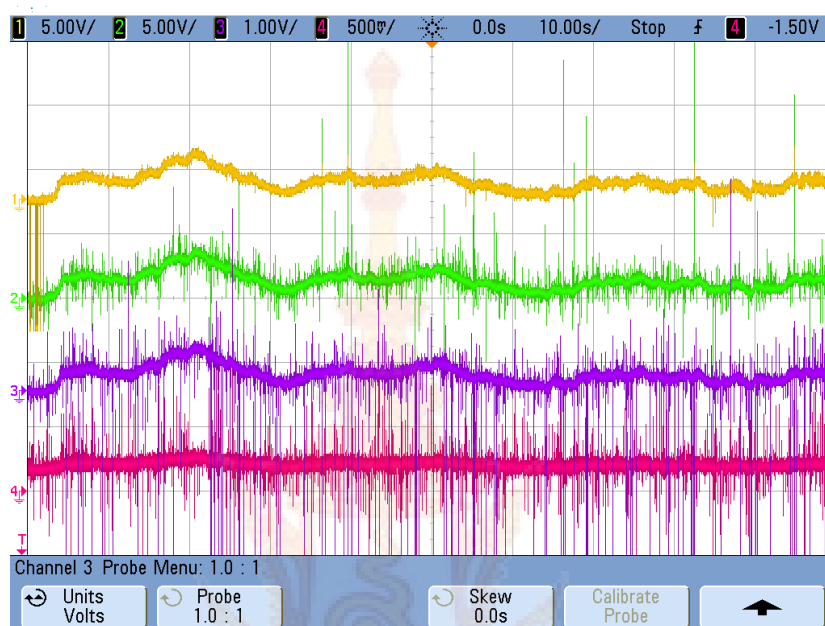
ในการทดลองเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการ์คอินเตอร์เฟส ที่ค่าความเร็วลมต่างๆ ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกังหันลมที่มีขนาดต่างกันให้กับการ์คอินเตอร์เฟส ทำการประมวลผลแบบทันทีเวลาแต่ละครั้งซึ่งเสียเวลามาก ในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้โปรแกรม Control Desk เป็นโปรแกรมที่ใช้ควบคุมค่าพารามิเตอร์ผ่านหน้าต่างของ Graphic User Interface (GUI) เมื่อเราได้ทำการส่งผ่านสัญญาณให้กับการ์คอินเตอร์เฟส ทำการประมวลผลแบบทันทีเวลาในครั้งแรกแล้วการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆจะถูกควบคุมที่หน้าต่างของโปรแกรม Control Desk



ภาพที่ 4.14 หน้าต่างของโปรแกรม Control Desk

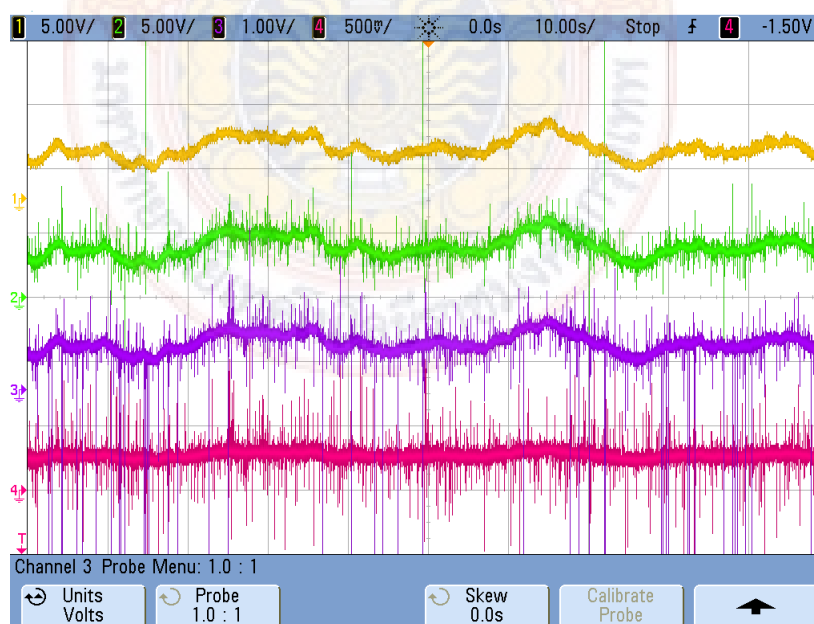
เราจะทำการทดลองจากค่าความเร็วลมที่ได้สำรวจไว้ในบทที่ 3 มาทำการทดลองเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยการ์ดอินเตอร์เฟส โดยเริ่มทำการทดลองดังนี้

- ที่ความเร็วลม 2 m/s



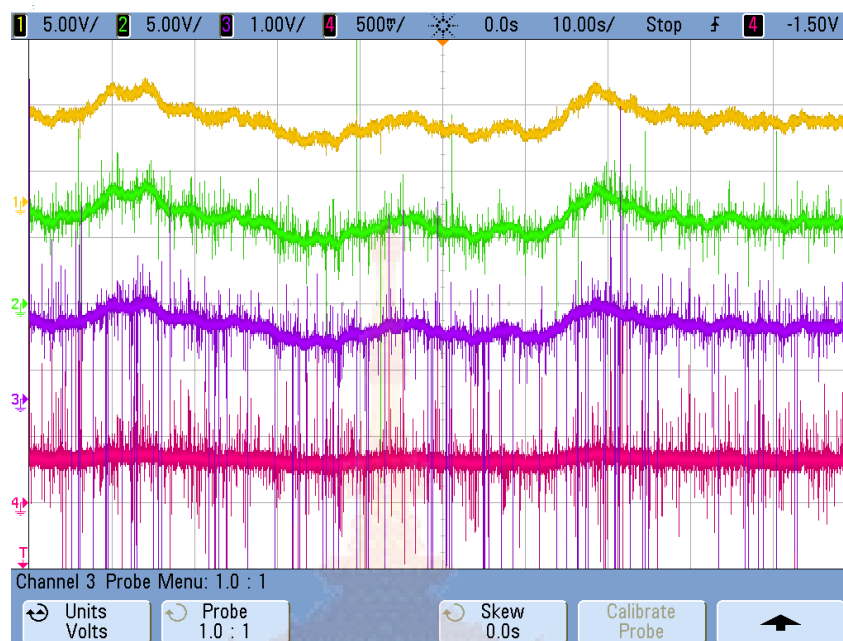
ภาพที่ 4.15 สัญญาณทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลม 2 m/s

- ที่ความเร็วลม 3 m/s



ภาพที่ 4.16 สัญญาณทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลม 3 m/s

- ที่ความเร็วลม 4 m/s



ภาพที่ 4.17 สัญญาณทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลม 4 m/s

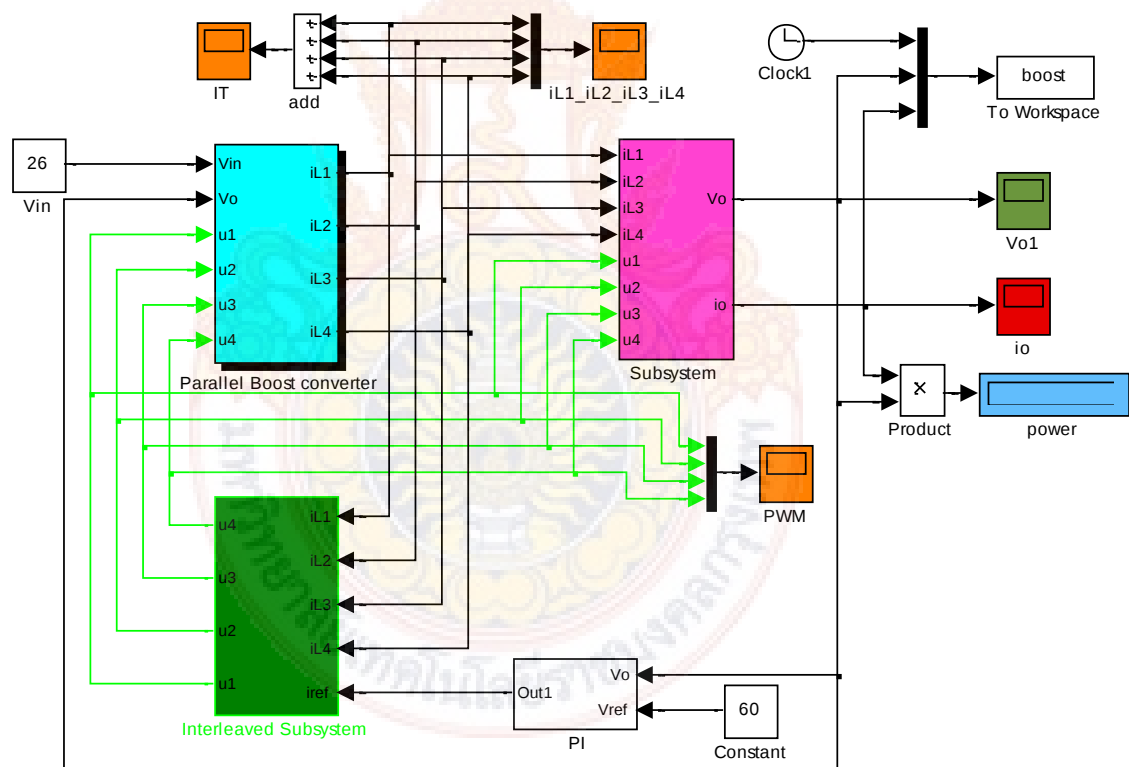
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากเซนเซอร์เรเตอร์ในรูปที่ 4.15-4.17 แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าไม่คงที่ ทำให้ไม่สามารถป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันโดยตรงได้ วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์แบบขนานด้วยเทคนิคอินเตอร์ลิฟหรือคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายสูง ทำหน้าที่รักษาระดับคงที่ โดยมีผลการทดลองของวงจรดังต่อไปนี้ ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบสร้างวงจรบูสดีซีทูดี้ซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล ซึ่งผลทดสอบการทำงานของระบบแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนการจำลองการทำงานของระบบโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink และส่วนของการทดสอบการทำงานของระบบจริง ทั้งในสภาวะคงตัว (Steady State) และในสภาวะทรานเซียน (Transient State) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบต่อการเปลี่ยนแปลงโหลด

4.2 การจำลองการทำงานของวงจรบูสดีซีทูดี้ซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

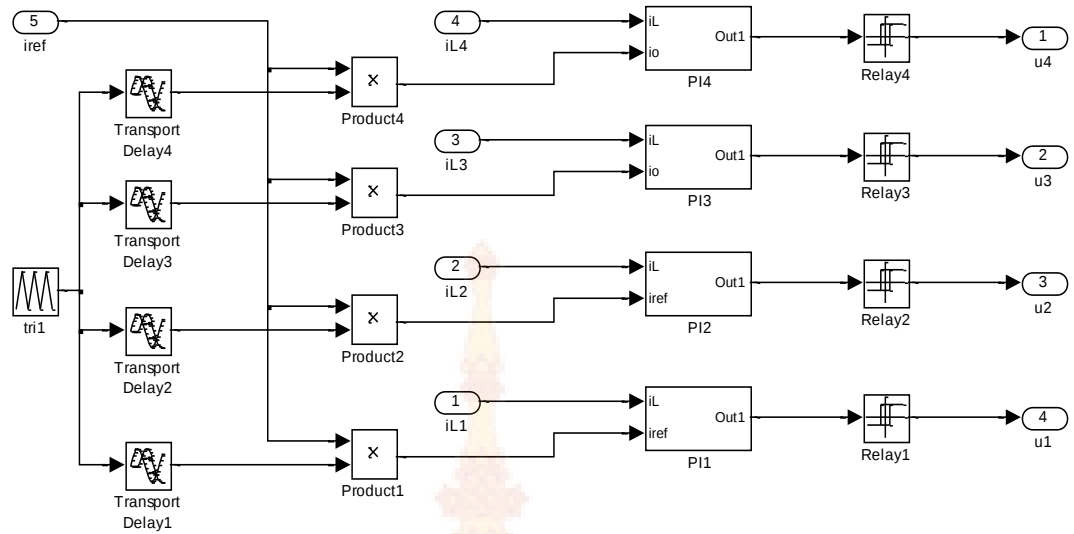
การทำงานของวงจรบูสดีซีทูดี้ซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลที่นำเสนอ ระบบได้ถูกทำการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โมเดลของระบบที่สร้างขึ้นได้มาจากสมการไดนามิกของกระแสและแรงดันซึ่งเป็นสมการของวงจรภาคกำลังที่นำเสนอดังแสดงตามภาพที่ 4.18 -4.21

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์และข้อกำหนดที่ใช้จำลองการทำงานของระบบคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน

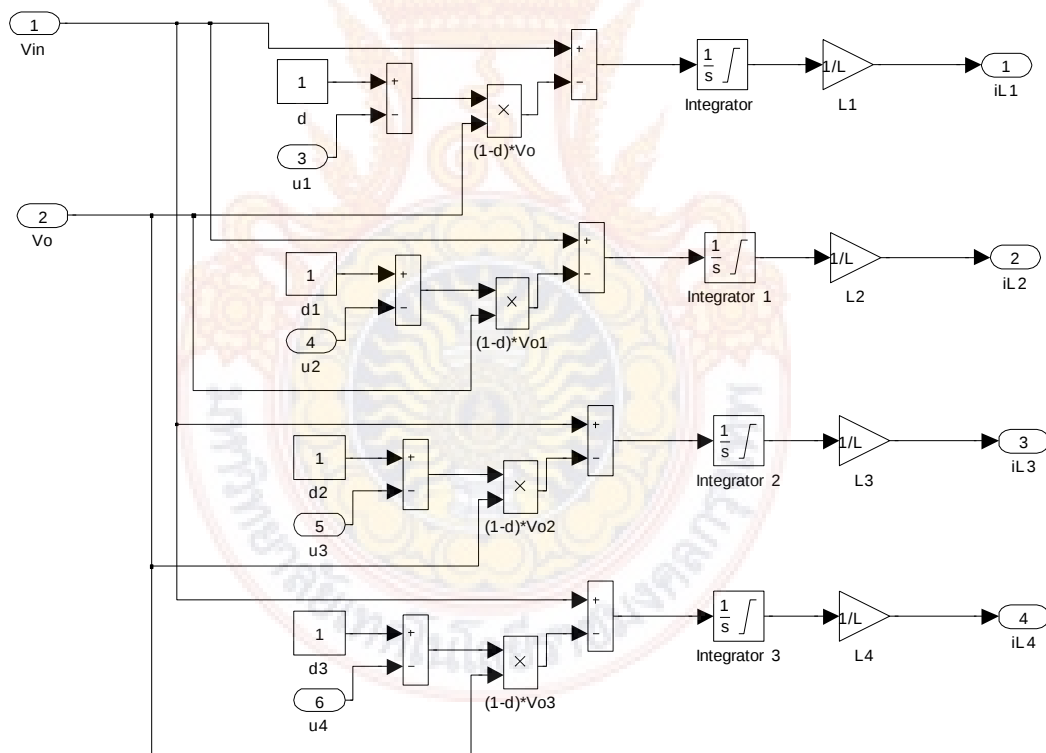
รายการ/สัญลักษณ์	ข้อกำหนด
แรงดันแหล่งอินพุต (V_{IN})	26 V
แรงดันเอาต์พุต (V_O)	60 V
ค่าความเหนี่ยวนำ (L_1, L_2, L_3, L_4)	395 μ H
ค่าความจุเอาต์พุต (C_O)	680 μ F
ความถี่สวิตช์ (f)	25 kHz



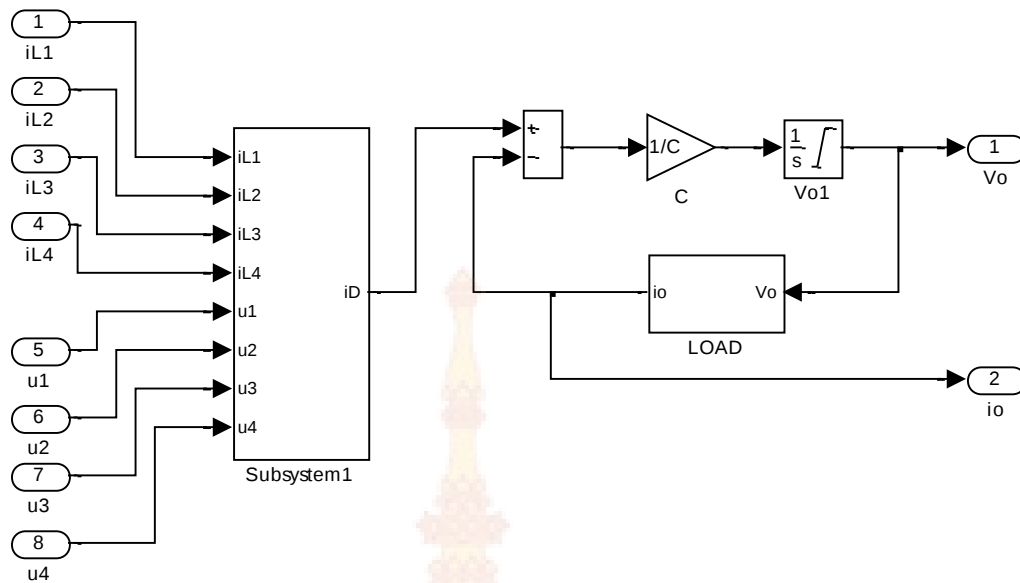
ภาพที่ 4.18 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมวงจรบูสต์ดีซีซีพียูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล



ภาพที่ 4.19 ภายในบล็อกของอินเทอร์ลิฟ



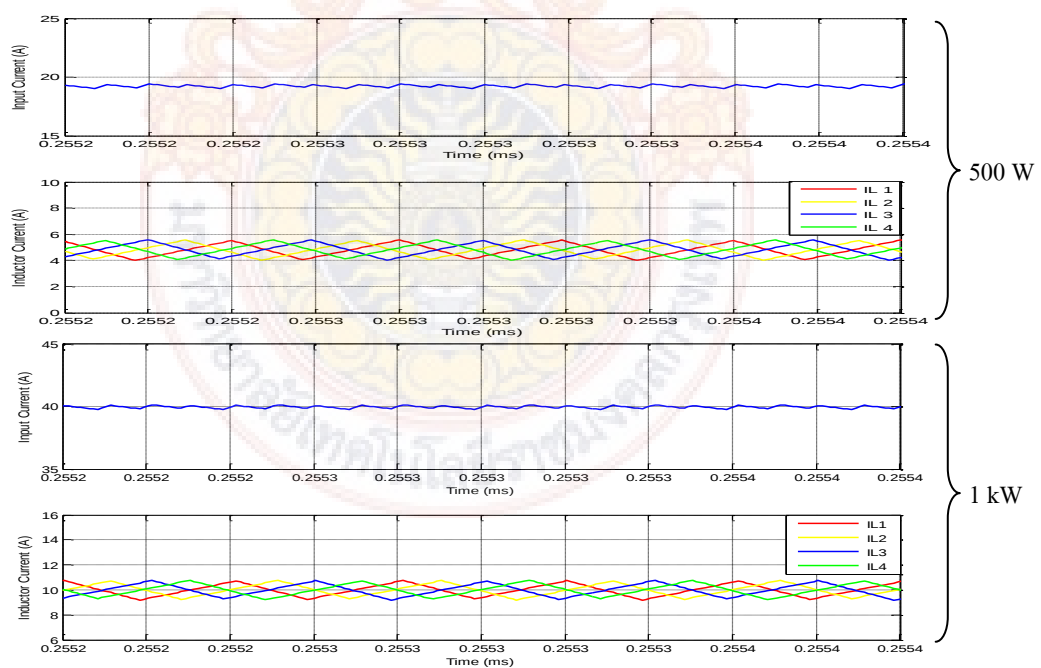
ภาพที่ 4.20 ภายในบล็อกของวงจรมัลติคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน



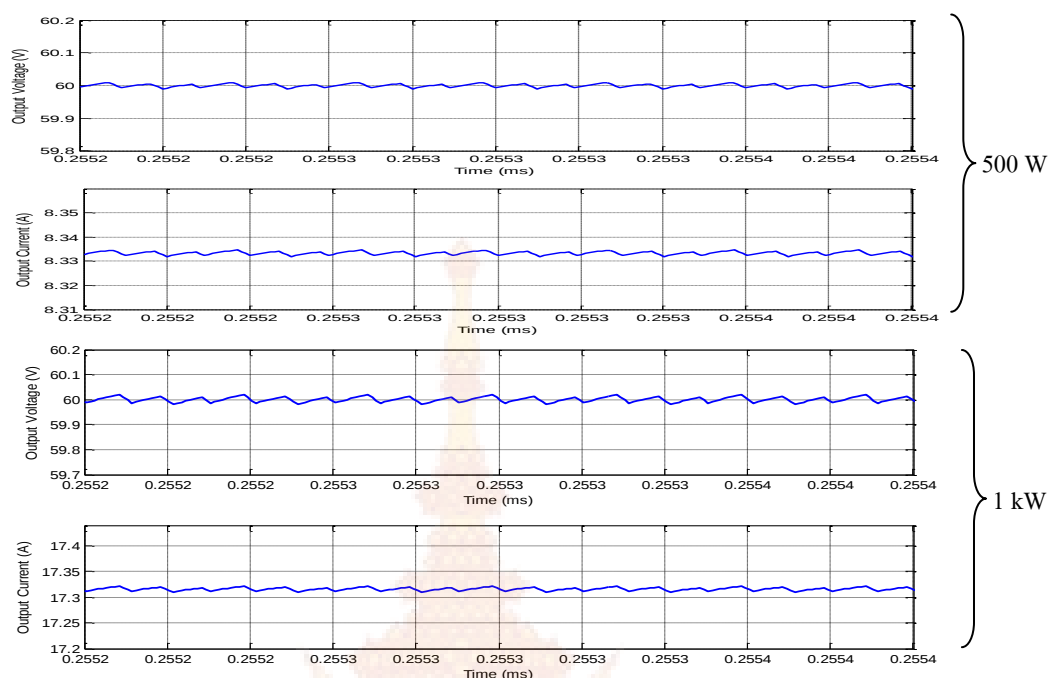
ภาพที่ 4.21 ภายในบล็อกของระบบ

4.3 ผลการจำลองการทำงานของมอเตอร์แบบขนานด้วยเทคนิคอินเตอร์ลีฟ

4.3.1 ผลการจำลองในสภาวะคงตัวที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 500 W และ 1 kW



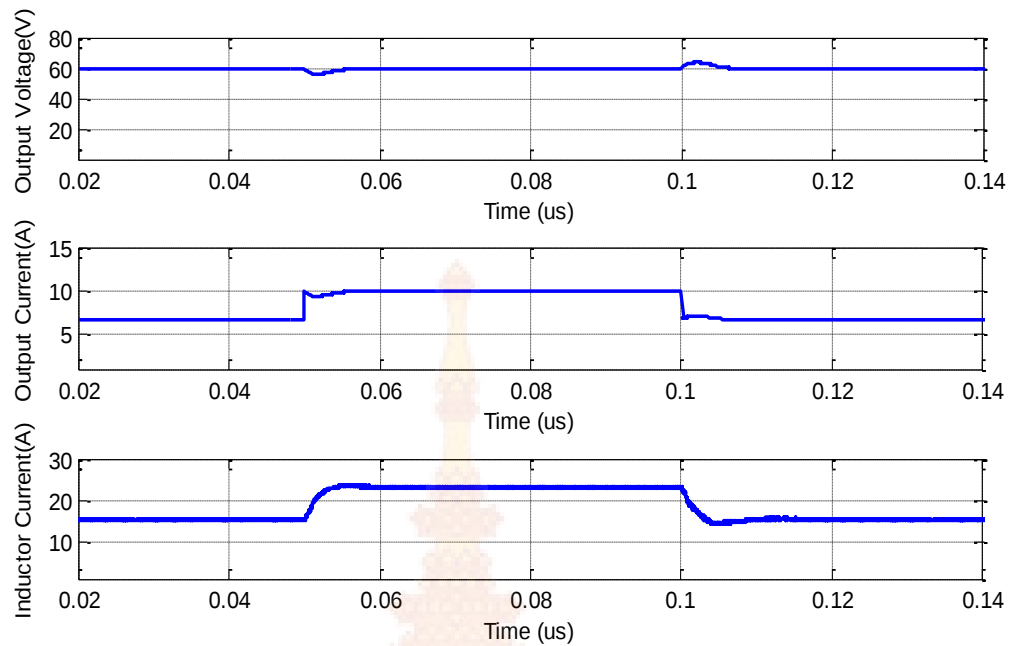
ภาพที่ 4.22 กระแสอินพุตและกระแสคลดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูล



ภาพที่ 4.23 แรงดันเอาต์พุตและกระแสเอาต์พุต

จากภาพที่ 4.22 - 4.23 เป็นรูปคลื่นของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำ โดยใช้เทคนิคการเหลื่อมเฟสทำให้กระแสทางด้านอินพุตมีการกระเพื่อมลดลง สามารถแบ่งจ่ายกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำให้เท่ากับที่ 4.9A และ 10 A ต่อวงจร ดังนั้นกระแสรวมก็จะได้ 19.6A และ 40A โดยมีการเหลื่อมกันของสัญญาณสัญญาณละ 90 องศา และรักษาระดับแรงดันทางด้านเอาต์พุตให้คงที่ 60V กำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตที่ 500W และ 1kW

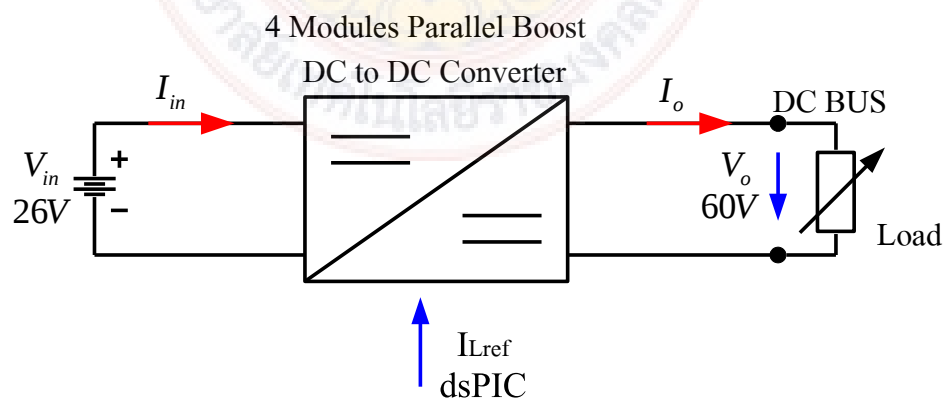
4.3.2 ผลการจำลองในสภาวะทรานเซียน



ภาพที่ 4.24 แรงดันเอาต์พุตกระแสเอาต์พุตของวงจรและกระแสรวมขณะเปลี่ยนแปลงโหลด ระหว่าง 400-600W

จากภาพที่ 4.24 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรพบว่าที่ออกแบบสามารถจ่ายแรงดัน 60 V ได้ และเมื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงภาระของวงจรที่กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 400 W ไปที่ 600 W และกลับไปที่ 400 W พบว่าวงจรบูสต์สี่ชุดสี่คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลที่ออกแบบสามารถรักษาระดับแรงดันคงที่ได้

4.4 การทดสอบวงจรบูสต์สี่ชุดสี่คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล



ภาพที่ 4.25 วงจรทดสอบวงจรบูสต์สี่ชุดสี่คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

เมื่อทำการออกแบบสร้างวงจรบูสต์ชิพดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลเสร็จแล้ว จึงทำการทดสอบว่าวงจรสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ถูกต้องหรือไม่ ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบการส่งถ่ายพลังงานออกจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังระบบในภาพที่ 4.25 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

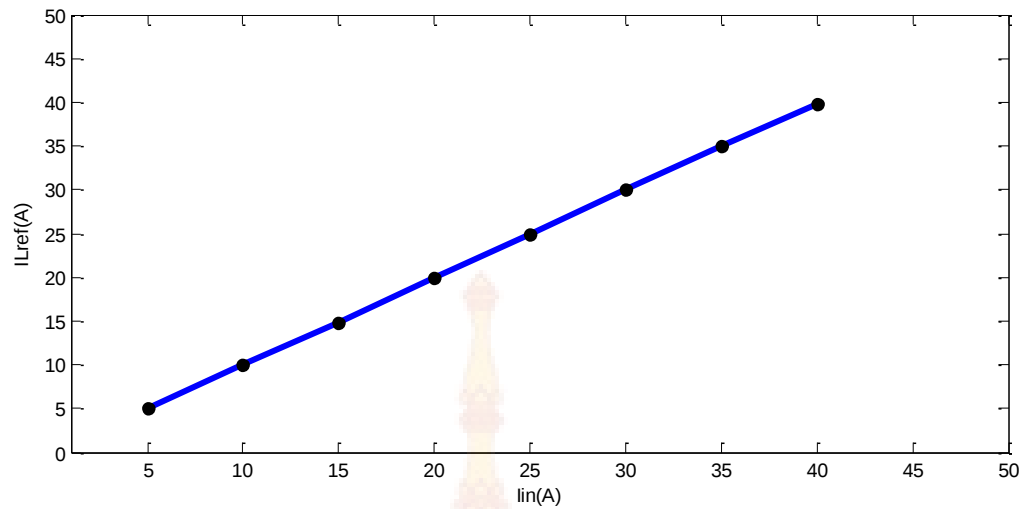
4.4.1 ผลการทดสอบวงจรบูสต์ชิพดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

จากการทดสอบวงจรในโหมดส่งถ่ายพลังงานออกจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังระบบสรุปผลการทดสอบตามวัตถุประสงค์ของการทดสอบได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบวงจรบูสต์ชิพดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

$I_{Lref} (A)$	$I_{in} (A)$	$V_{in} (V)$	$I_o (A)$	$V_o (V)$	$P_{in} (W)$	$P_{out} (W)$
5	5	26	2	60	130	120
10	10	26	3.87	60	260	232
15	14.80	25.96	5.8	60	384	349
20	19.95	25.95	7.7	60	518	462
25	24.96	25.94	9.52	60	647	571
30	30	25.91	11.76	60	777	705
35	35	25.89	13.63	60	906	818
40	39.88	25.88	15.79	60	1032	947

จากตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของกระแส I_{Lref} และ I_{in} เป็นการควบคุมวงจรบูสต์ชิพดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลที่แรงดันเอาต์พุต 60 V แสดงเป็นกราฟดังภาพที่ 4.26



ภาพที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์กระแส I_{Lref} กับ I_{in}

การควบคุมของวงจรบูสต์ชนิดซิงคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลที่กล่าวถึงนี้คือ การที่วงจรสามารถจ่ายกระแส I_{in} ได้เท่ากับ I_{Lref} เมื่อดูจากผลการทดสอบในตารางที่ 4.2 เห็นได้ว่าวงจรไม่สามารถที่จ่ายกระแส I_{in} เท่ากับ I_{Lref} ถูกต้อง 100 % ความผิดพลาดต่อคำสั่งของวงจรไม่ควรเกิน 5 % ดังนั้นหาได้จาก

$$I_{Err} = \frac{I_{Lref} - I_{in}}{I_{Lref}} \times 100 \quad (4.1)$$

จากผลการทดสอบค่าผิดพลาดสูงสุดคือที่คำสั่ง I_{Lref} มีค่า 15 นำมาคำนวณ หาค่าความผิดพลาดโดยแทนค่าลงสมการที่ (4.1)

$$I_{Err} = \frac{15 - 14.8}{15} \times 100 = 1.34\%$$

เมื่อค่าผิดพลาดต่อคำสั่งสูงสุดของวงจรตัวนี้มีค่า 1.34 % ซึ่งอยู่ในขอบเขตที่ตั้งไว้คือ ไม่เกิน 5 % ประกอบกับการตอบสนองต่อคำสั่งของวงจรตัวนี้ในภาพที่ 4.26 ค่อนข้างเป็นเส้นตรง จึงสรุปได้ว่าวงจรบูสต์ชนิดซิงคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลสามารถควบคุมได้เมื่อจ่ายกระแส I_{Lref} ไปยังระบบในช่วง 0 A ถึง 46 A

4.4.2 ประสิทธิภาพของบัสคอนเวอร์เตอร์

ในการออกแบบวงจรบัสคิซึทึคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล จำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่สำคัญ คือ ประสิทธิภาพของวงจร เนื่องจากเป็นตัวบอกคุณภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้นว่ามีคุณภาพมากน้อยเพียงใด ดังนั้นในการทดสอบนี้เป็นการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์โดยใช้วิธีการวัดกำลังไฟฟ้าทางด้านเข้าและกำลังไฟฟ้าทางด้านออกเพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพ (η) ดังแสดงในสมการที่ (4.2) งานวิจัยนี้ได้กำหนดประสิทธิภาพไม่น้อยกว่า 80%

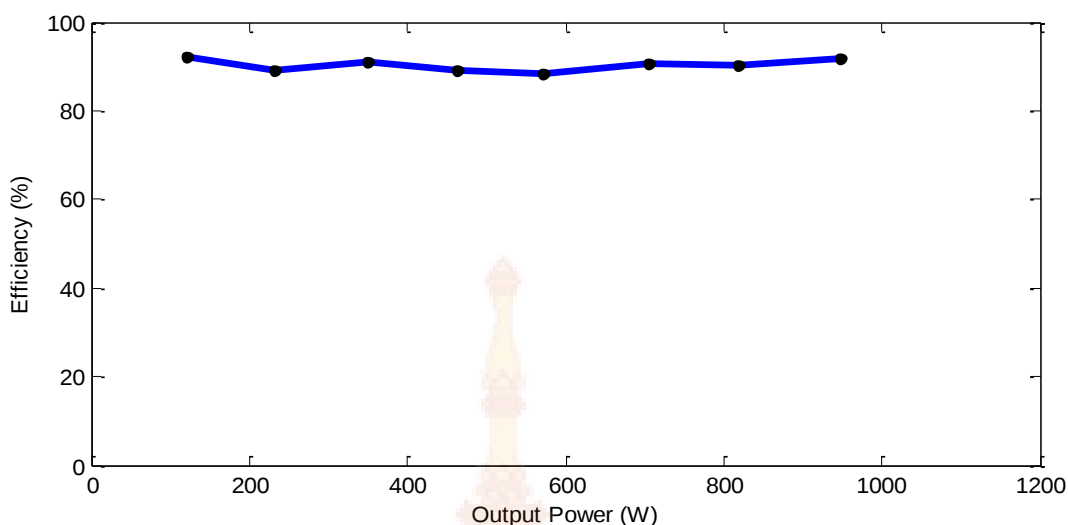
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{V_o I_{out}}{V_{in} I_{in}} \times 100 \quad (4.2)$$

จากการทดสอบการส่งถ่ายพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังระบบด้วยค่ากระแส I_L ค่าต่างๆดังตารางที่ 4.2 คำนวณประสิทธิภาพของวงจรโดยแทนค่าลงสมการที่ (4.2) ประสิทธิภาพของวงจรบัสคิซึทึคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล ตัวนี้ดังปรากฏในตารางที่ 4.3 ซึ่งมีประสิทธิภาพเฉลี่ย 90.33 %

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

$I_{Lref} (A)$	$P_{in} (W)$	$P_{out} (W)$	$\eta(\%)$
5	130	120	92.30%
10	260	232	89.23%
15	384	349	90.88%
20	518	462	89.19%
25	647	571	88.25%
30	777	705	90.73%
35	906	818	90.28%
40	1032	947	91.76%

จากตารางที่ 4.3 เขียนเป็นกราฟแสดงประสิทธิภาพดังปรากฏในภาพที่ 4.27



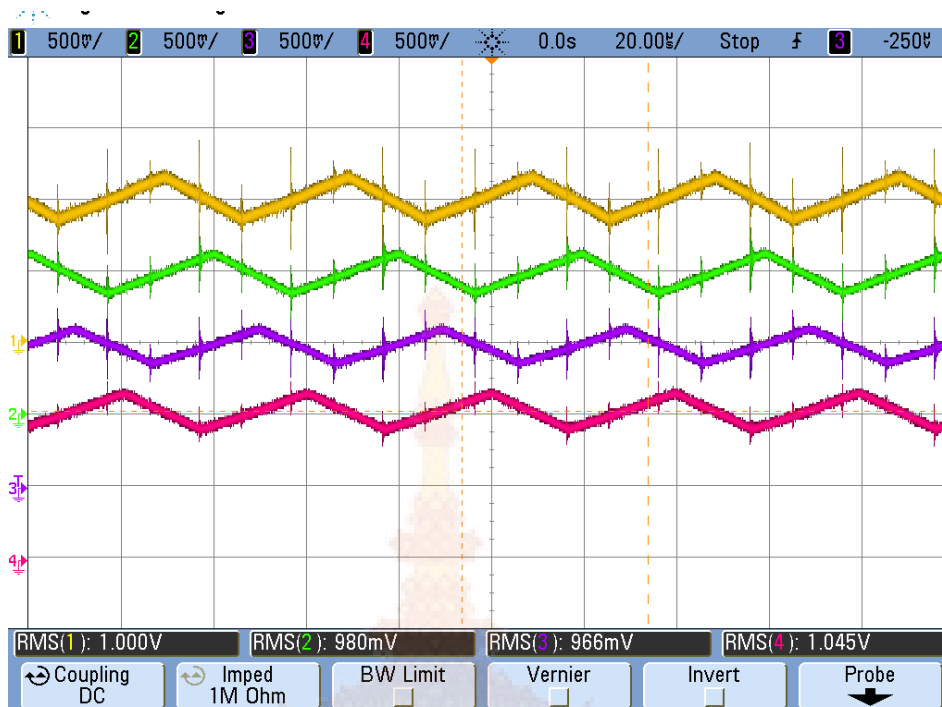
ภาพที่ 4.27 กราฟประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

4.4.3 ความสมดุลของการจ่ายกระแสวงจรบูสดีซีฟูลชีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

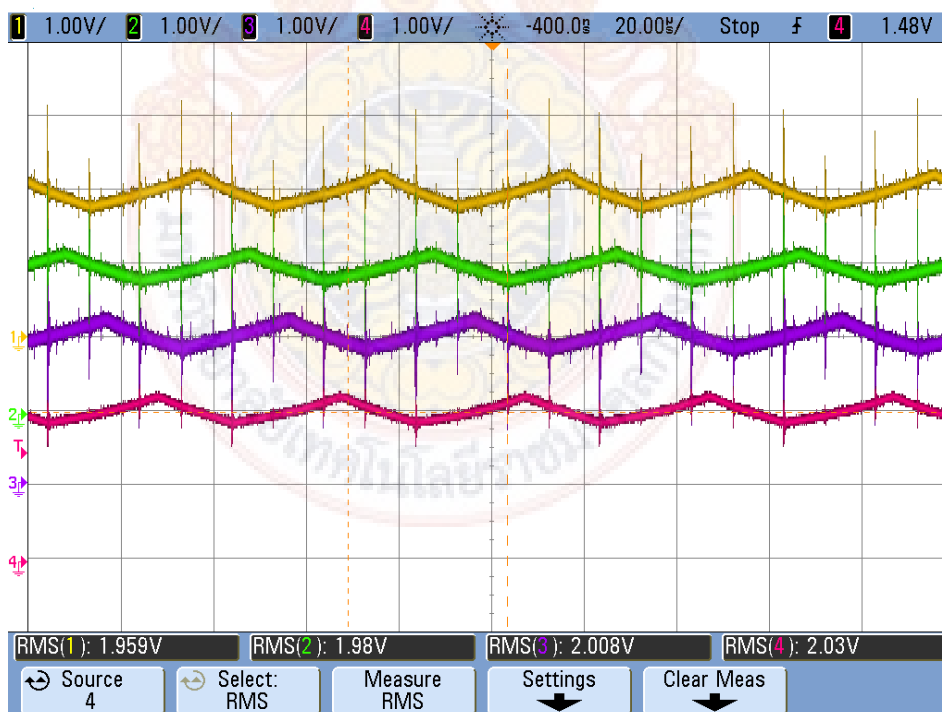
เป้าหมายของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลต้องมีกระแสที่ไหลในวงจรทั้ง 4 โมดูลเท่าๆกัน เพื่อลดการกระเพื่อมของกระแสด้านอินพุตให้น้อยลงกว่าวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์แบบโมดูลเดียว

4.4.3.1 การทดสอบในสภาวะคงตัว

ในสภาวะคงตัวของวงจรที่สร้างขึ้นมาจะต้องมีความสามารถในการขยายแรงดันได้ตรงกับที่ออกแบบไว้ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 4 โมดูลจะต้องมีการแบ่งกระแสที่เท่ากันมีการเหลื่อมเฟสกัน 90 องศา การทดสอบนี้ใช้ความต้านทานปรับค่าได้ ต่อเป็นภาระทางไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต โดยการทดสอบจะสั่งให้วงจรทำงานที่กระแสต่างกันแต่จะควบคุมแรงดันทางด้านเอาต์พุตคงที่ 60 V โดยจะทำการปรับค่าความต้านทานที่ต่อเป็นโหลดของวงจรให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ผลการทดสอบแสดงดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 4.28 กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำที่มีกระแสด้านอินพุต 20 A

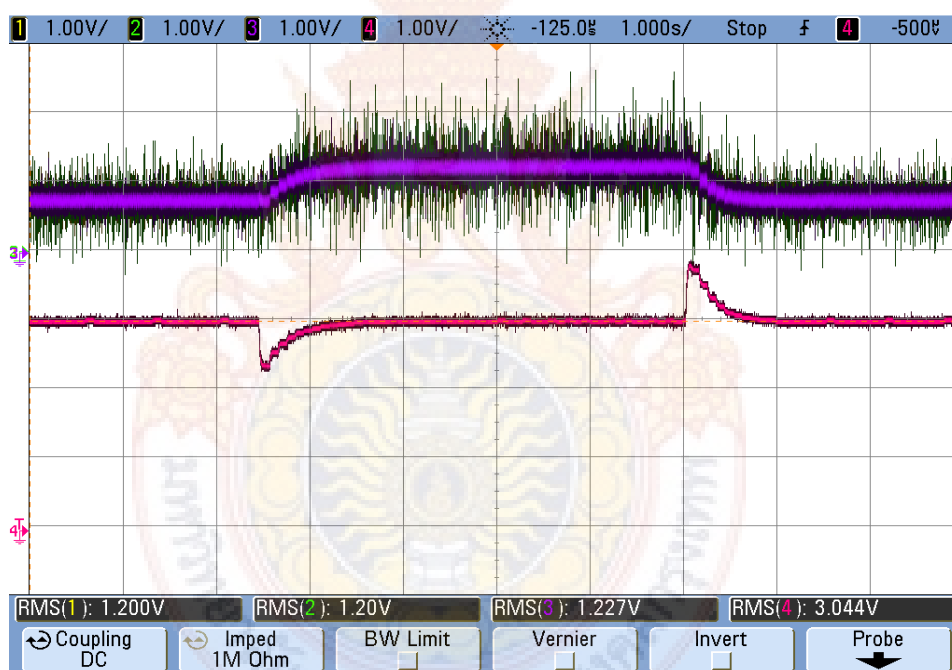


ภาพที่ 4.29 กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำที่มีกระแสด้านอินพุต 40 A

ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายที่วางไว้จากภาพที่ 4.28 พบว่าวงจรบูสดีซีทูดิซิคอนเวอร์เตอร์แบบขนานที่สร้างขึ้นสามารถแบ่งจ่ายกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำให้เท่ากับที่ 5 A ต่อวงจรดังนั้นกระแสรวมก็จะได้ 20 A และภาพที่ 4.29 พบว่าวงจรที่สร้างขึ้นสามารถแบ่งจ่ายกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำให้เท่ากับที่ 10 A ต่อวงจร ดังนั้นกระแสรวมก็จะได้ 40 A จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าวงจรที่สร้างขึ้นมีการแบ่งกระแสของขดลวดเหนี่ยวนำเท่าๆกันทุกวงจร โดยมีการเหลื่อมกันของสัญญาณสัญญาณละ 90 องศา และรักษาแรงดันทางด้านเอาต์พุตคงที่ 60 V ไว้ได้

4.4.3.2 การทดสอบในสภาวะทรานเซียน

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบขณะมีการเปลี่ยนแปลงภาระอย่างทันทีทันใดเพื่อศึกษาผลตอบสนองของระบบที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงภาระ โดยการเปลี่ยนแปลงกระแสจาก 15 A ไปที่ 25 A ผลการทดสอบระบบแสดงดังภาพที่ 4. 30

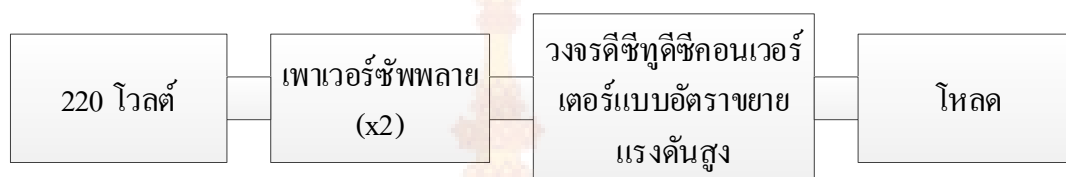


ภาพที่ 4.30 กระแส I_{L1} , I_{L2} , I_{L3} และแรงดันทางด้านเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่กระแสด้านอินพุต 15A ไปที่ 25A

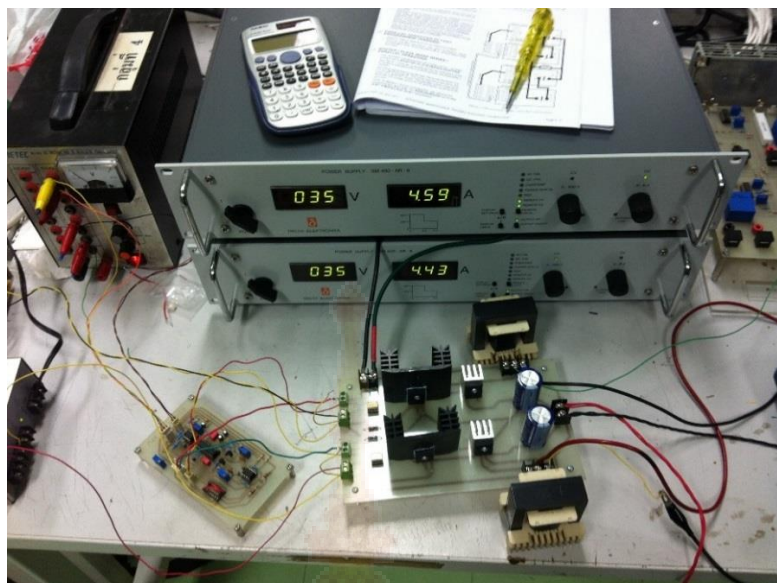
จากการทดสอบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระที่กระแสด้านเข้า 15A ไปที่ 25A โดยจะพบว่าระบบยังคงรักษาเสถียรภาพไว้ได้ วงจรจะสามารถแบ่งจ่ายกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ แต่ละตัวได้เท่ากับที่ 3.75A ไปที่ 6.25A ต่อโมดูล และควบคุมระดับแรงดันทางด้านเอาต์พุตคงที่ 60 V ไว้ได้ เพื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอินเวอร์เตอร์ต่อไป

4.5 ทดสอบวงจรดีซีฟูลชีคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูง

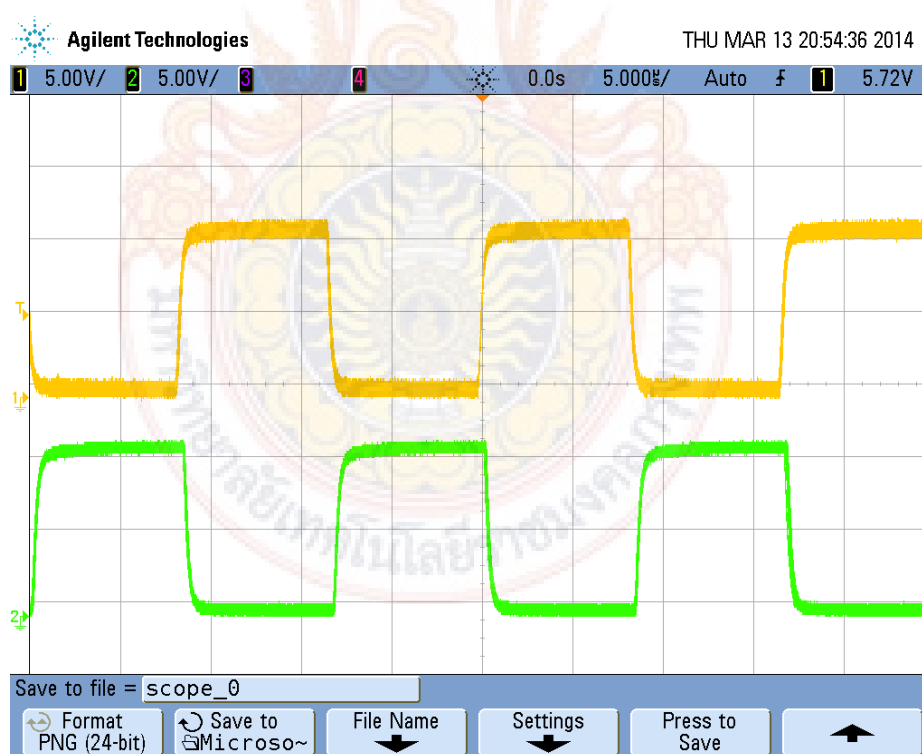
ใช้แหล่งจ่ายยี่ห้อ Delta Elektronika รุ่น SM 400-AR-8 ขนาด 0 โวลต์ ถึง 400 โวลต์ 4 แอมป์ สองตัวมาต่อขนานกันเพื่อจะเพิ่มพิกัดของแหล่งจ่ายให้เพียงพอในการจ่ายกำลังอินพุตให้กับวงจรแทนเครื่องกำเนิดเชิงโรนัสแบบแม่เหล็กถาวรและบันทึกกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ซึ่งจะกำหนดค่าความต้านทานที่นำมาเป็นโหลด 152 โอห์ม ค่าดีวีดีไซเคิลที่ 50 % และ 70 % ได้ผลการทดสอบดังนี้



ภาพที่ 4.31 บล็อกไดอะแกรมทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรดีซีฟูลชีคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูง



ภาพที่ 4.32 การทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรดีซีฟูลดิซีคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดัน
สูงโดยใช้แหล่งจ่าย ยี่ห้อ Delta Elektronik รุ่น SM 400-AR-8 สองตัวขนานกัน

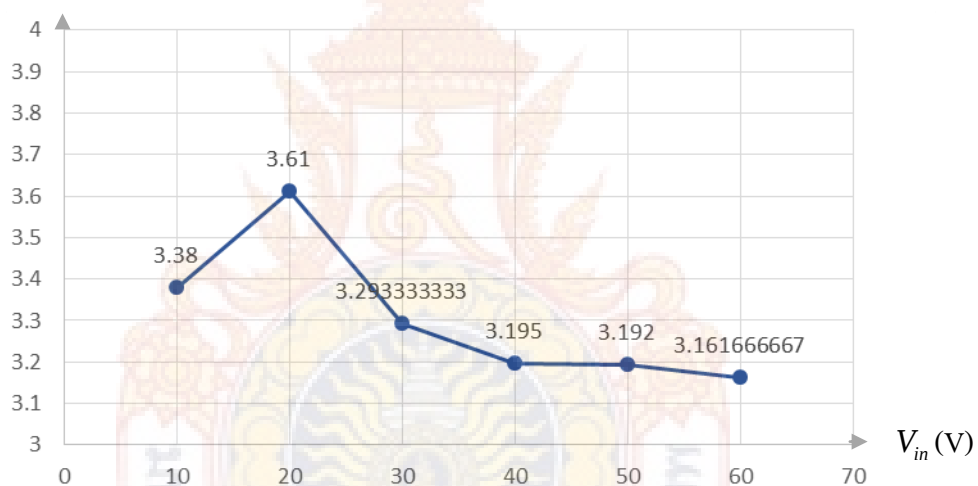


ภาพที่ 4.33 ค่าดีวีดีไซเคิล 50 % ที่ขับสวิตช์

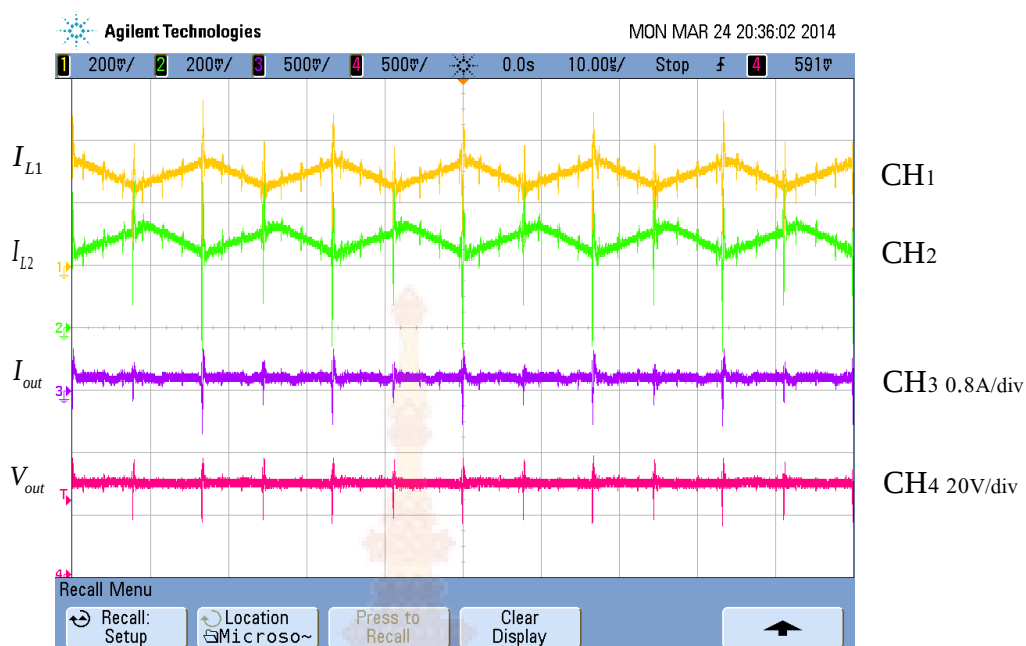
ตารางที่ 4.4 ค่าความต้านทานที่นำมาเป็นโหลด 152 โอห์ม ที่คิวดีไซเคิล 50 %

V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	I_{L1}, I_{L2} (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)
10	0.84	33.8	0.22	0.45, 0.4	8.4	7.44
20	1.7	72.2	0.43	0.87, 0.84	34	31.05
30	2.44	98.8	0.65	1.23, 1.15	73.2	64.22
40	3.13	127.8	0.84	1.67, 1.44	125.2	107.35
50	4.01	159.6	1.06	2.32, 2.16	200.5	169.20
60	4.92	189.7	1.3	2.78, 2.56	295.2	256.61

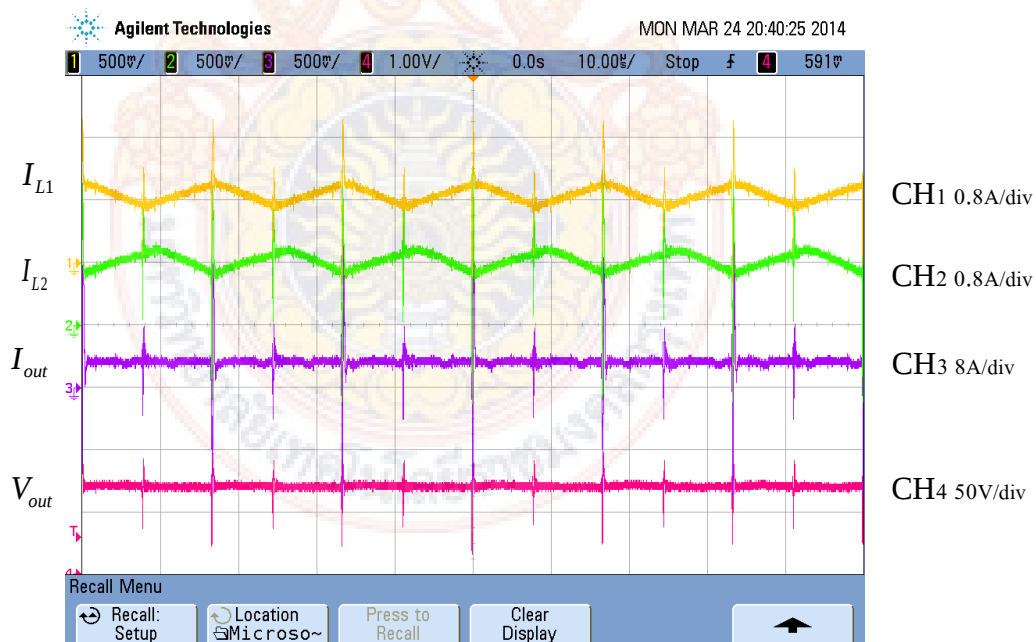
Voltage



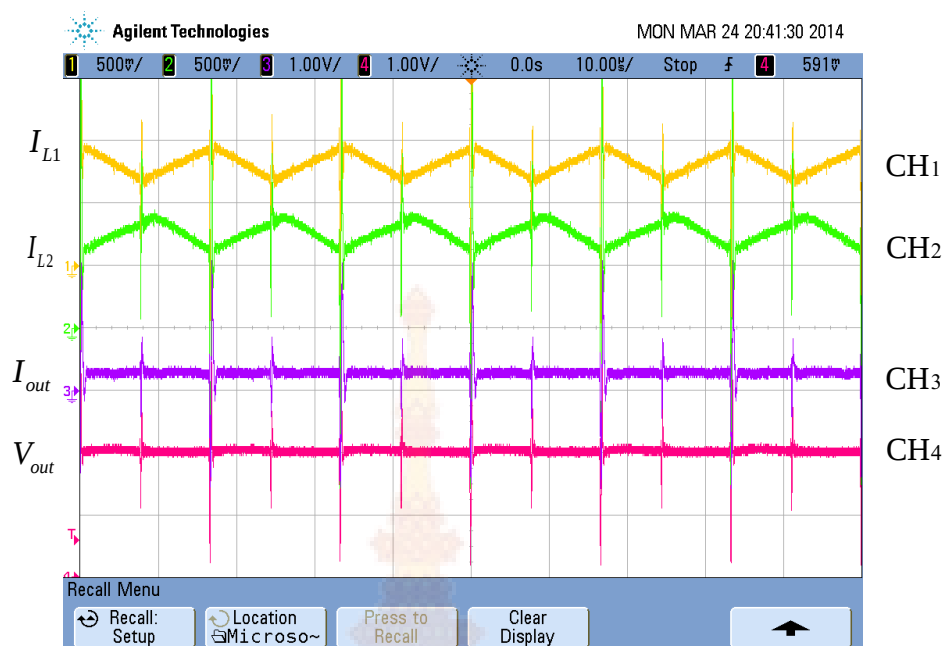
ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์ของอัตราขยายแรงดันกับแรงดันอินพุตของการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรที่ค่าคิวดีไซเคิล 50 %



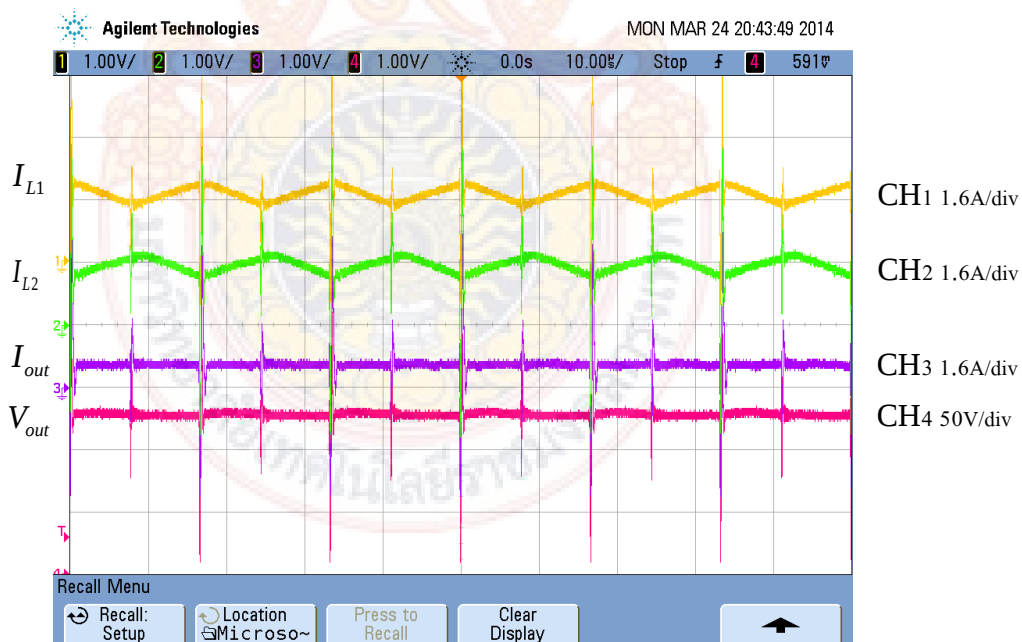
ภาพที่ 4.35 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรที่ค่าตัวใช้เคลิล 50 %
แรงดันอินพุต 10 โวลต์



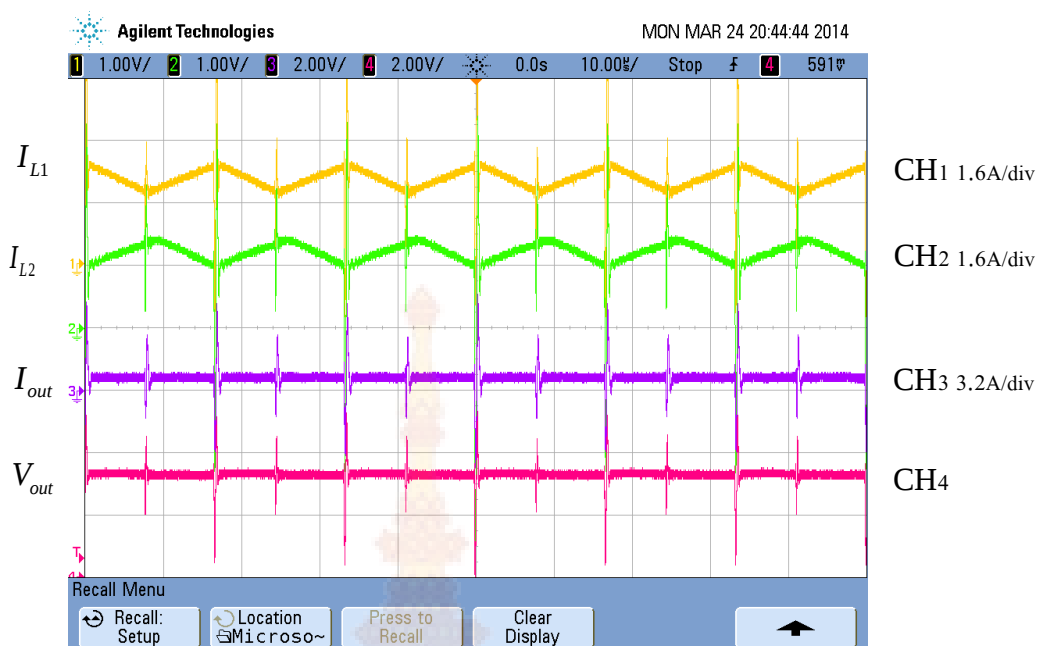
ภาพที่ 4.36 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรที่ค่าตัวใช้เคลิล 50 %
แรงดันอินพุต 20 โวลต์



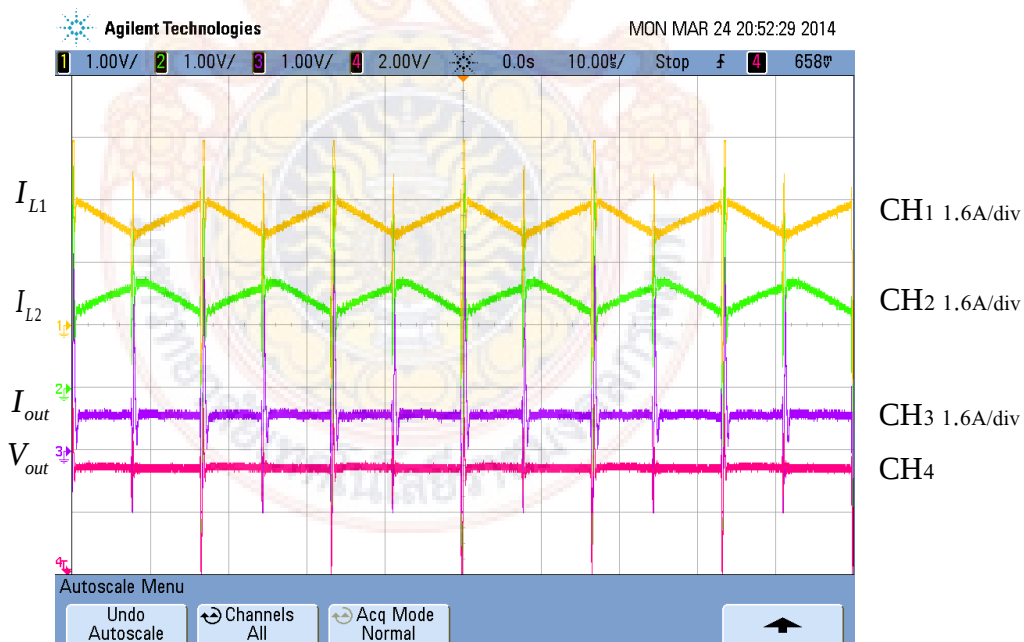
ภาพที่ 4.37 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรที่ค่าตัวใช้เคลิล 50 %
แรงดันอินพุต 30 โวลต์



ภาพที่ 4.38 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรที่ค่าตัวใช้เคลิล 50 %
แรงดันอินพุต 40 โวลต์

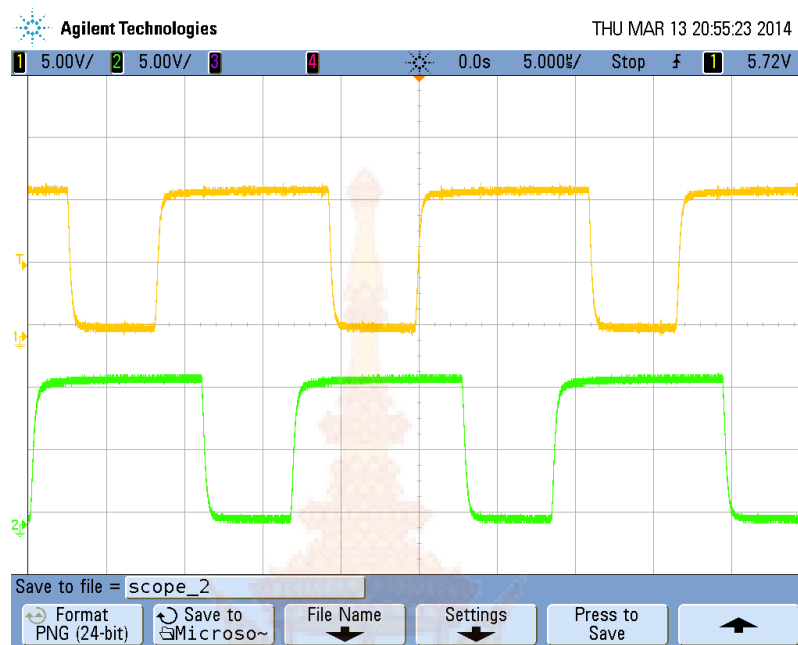


ภาพที่ 4.39 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรที่ค่าตัวใช้เคลิล 50 %
แรงดันอินพุต 50 โวลต์



ภาพที่ 4.40 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรที่ค่าตัวใช้เคลิล 50 %
แรงดันอินพุต 60 โวลต์

ที่ค่าดิวตี้ไซเคิล 70 % ความต้านทานที่นำมาเป็นโหลด 152 โอห์ม

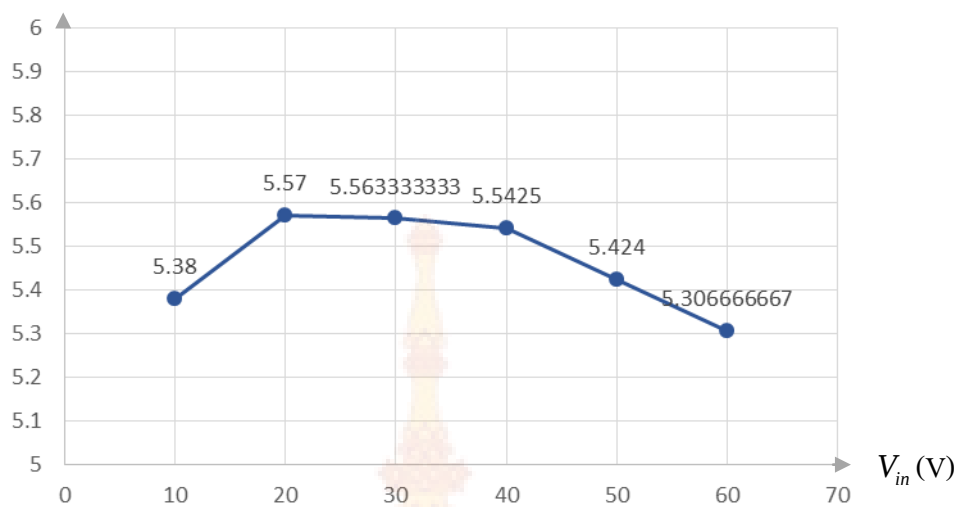


ภาพที่ 4.41 ค่าดิวตี้ไซเคิล 70 % ที่จับสวิตช์

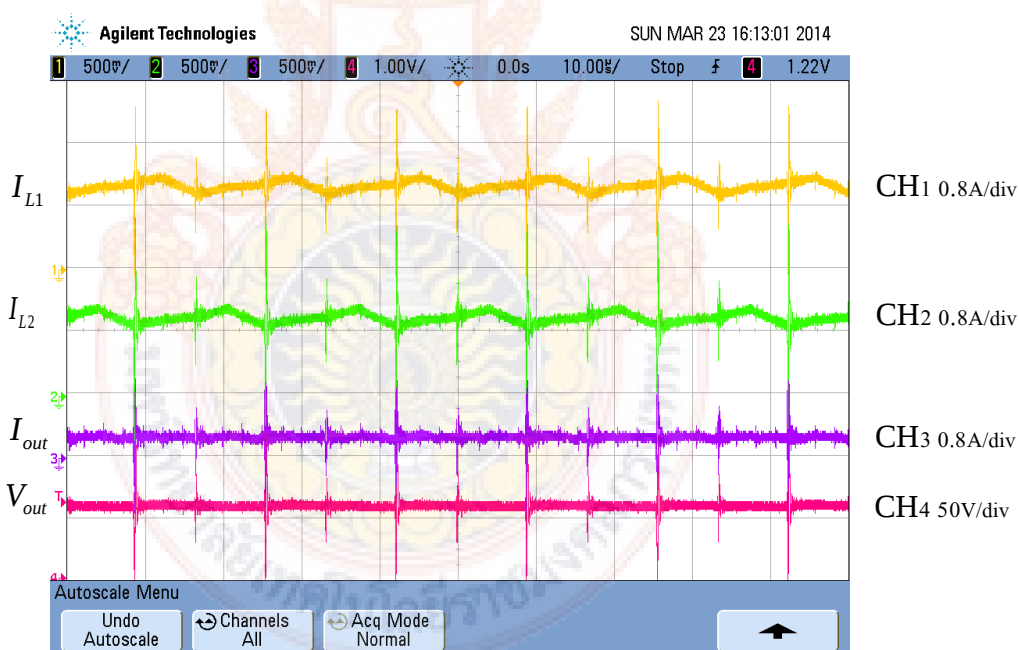
ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านทานที่นำมาเป็นโหลด 152 โอห์ม ดิวตี้ไซเคิล 70 %

V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	I_{L1}, I_{L2} (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)
10	2.46	53.8	0.359	1.36, 1.25	24	19.314
20	4.88	111.4	0.745	2.64, 2.42	97.6	83.55
30	7.38	166.9	1.099	3.72, 3.46	221.4	183.59
40	10.12	221.7	1.456	5.23, 4.98	404.8	325.9
50	12.49	271.2	1.783	6.45, 6.23	624.5	483.55
60	15.15	318.4	2.093	7.86, 7.46	909	668.64

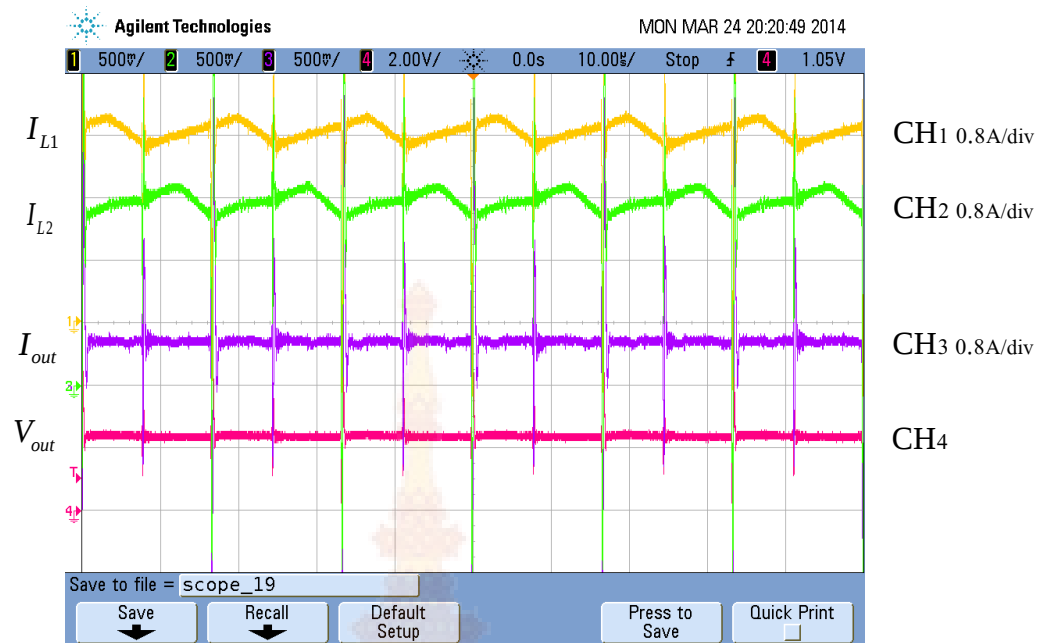
Voltage



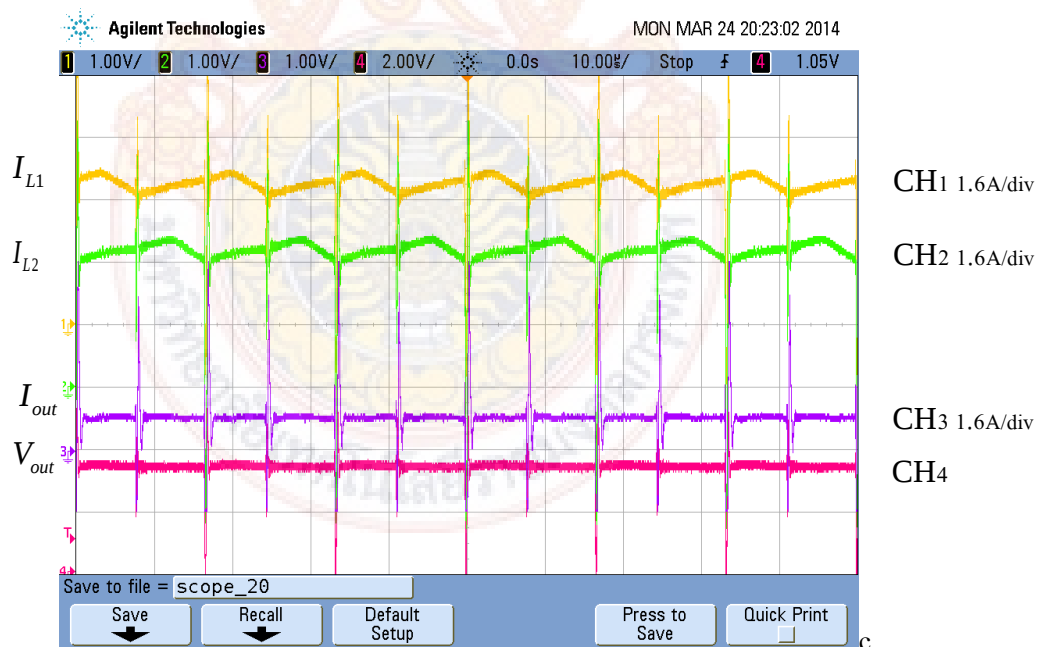
ภาพที่ 4.42 กราฟอัตราขยายแรงดันกับแรงดันอินพุตทดสอบที่ค่าดีวีดีไซเคิล 70 %



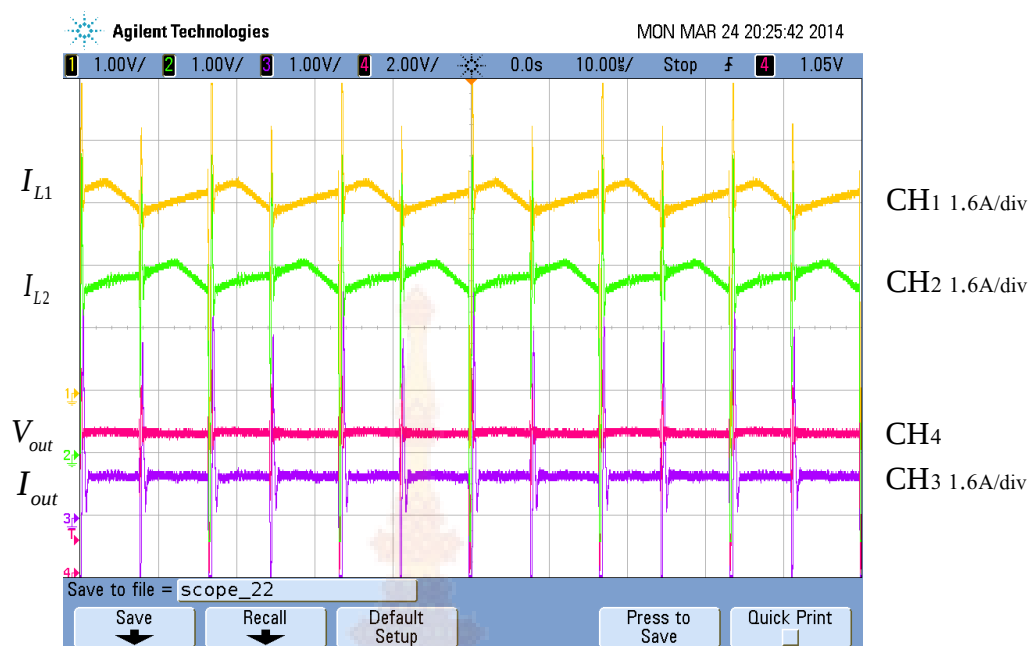
ภาพที่ 4.43 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรที่ค่าดีวีดีไซเคิล 70 % แรงดันอินพุต 10 โวลต์



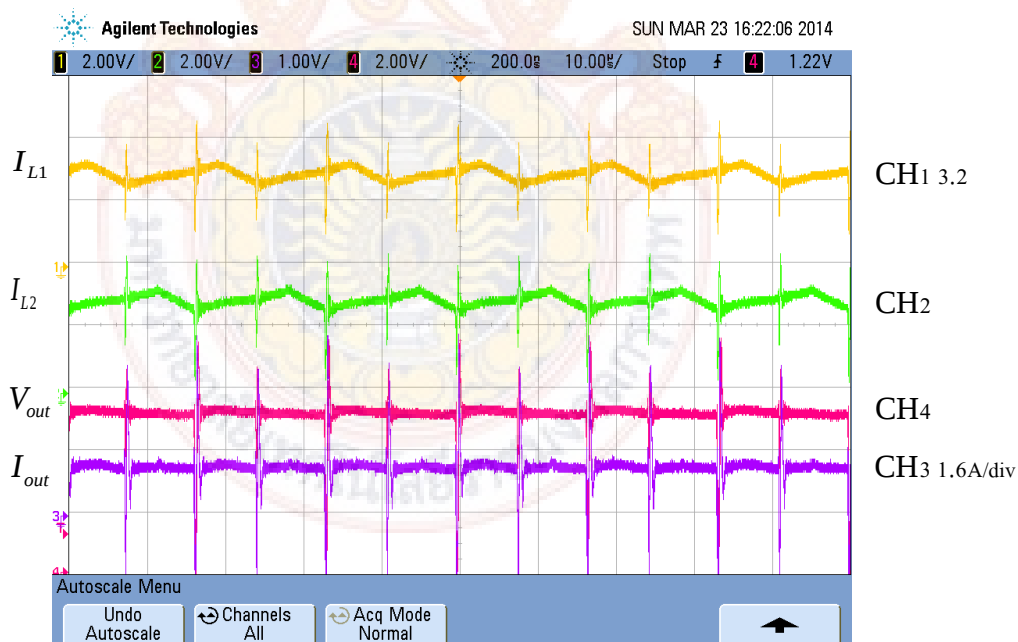
ภาพที่ 4.44 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรที่ค่าตัวใช้เคลิล
70 % แรงดันอินพุต 20 โวลต์



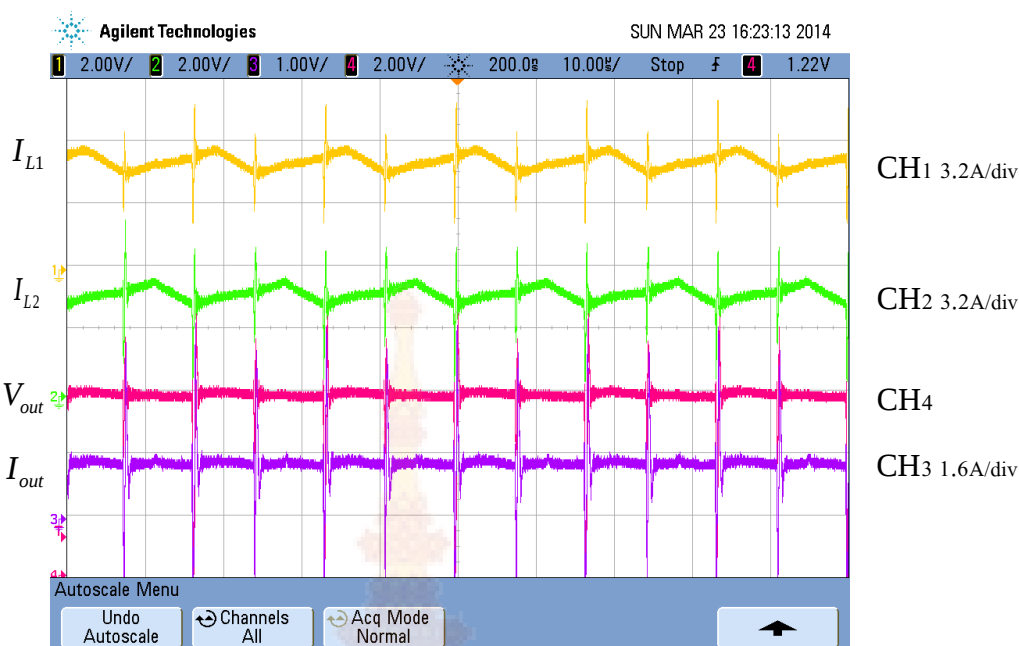
ภาพที่ 4.45 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจร ที่ค่าตัวใช้เคลิล
70 % แรงดันอินพุต 30 โวลต์



ภาพที่ 4.46 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจร ที่ค่าตัวชี้เซลล์
70 % แรงดันอินพุต 40 โวลต์



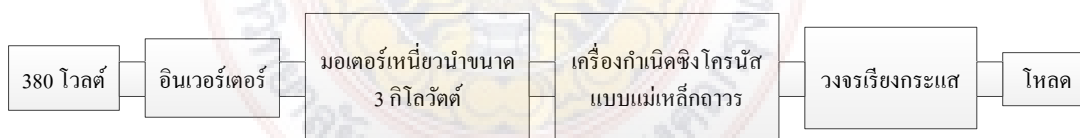
ภาพที่ 4.47 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจร ที่ค่าตัวชี้เซลล์
70 % แรงดันอินพุต 50 โวลต์



ภาพที่ 4.48 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจร ที่ค่าตัวชี้เซลล์
70 % แรงดันอินพุต 60 โวลต์

4.6 ทดสอบหาลำดับไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดเชิงโรนัสแบบแม่เหล็กถาวรในแต่ละช่วงความเร็ว

ในการหมุนของเครื่องกำเนิดเชิงโรนัส ซึ่งถูกจะขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 กิโลวัตต์ ควบคุมความเร็วด้วยอินเวอร์เตอร์ซึ่งกำหนดค่าความต้านทานที่นำมาเป็นโหลด 16 โอห์ม และบันทึกผล



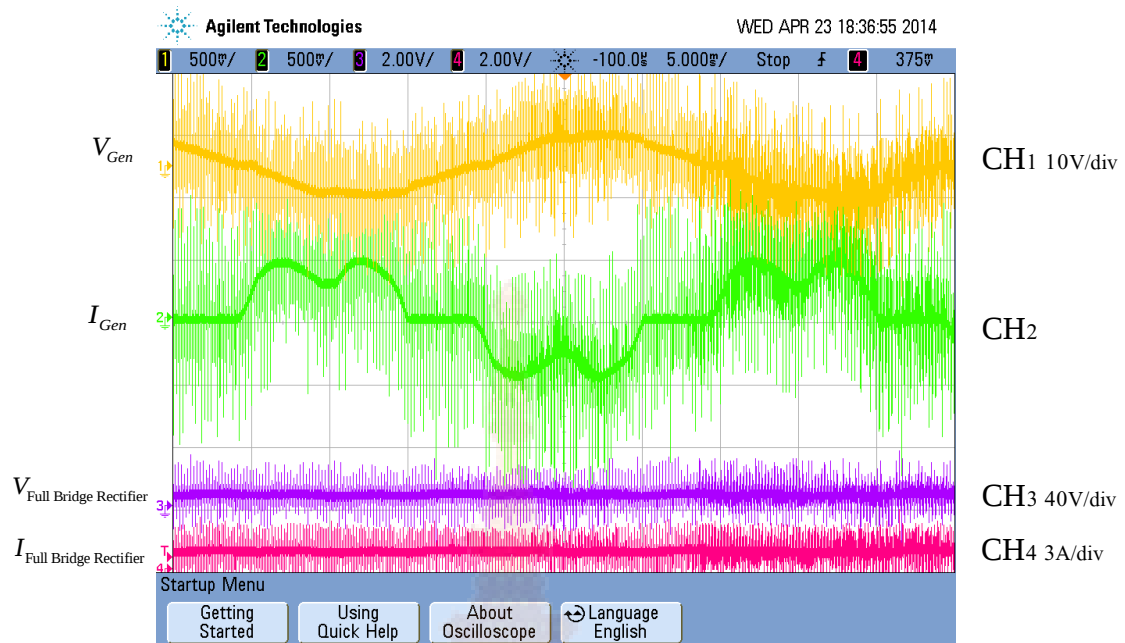
ภาพที่ 4.49 บล็อกไดอะแกรมการทดสอบหาพลังงานที่ได้จากเครื่องกำเนิดเชิงโรนัสแบบแม่เหล็กถาวรในแต่ละช่วงความเร็ว



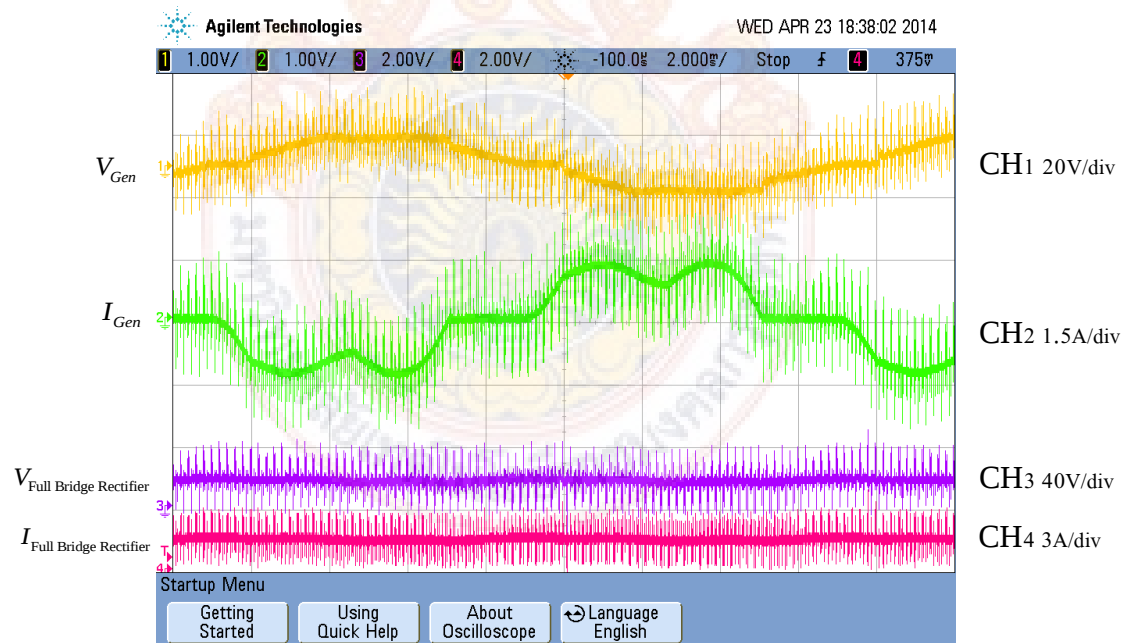
ภาพที่ 4.50 รูปทดสอบหาล้างไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดเชิงโรนัสแบบแม่เหล็กถาวรในแต่ละช่วงความเร็ว

ตารางที่ 4.6 ค่าเอาต์พุตในแต่ละช่วงความเร็วในการหมุนของเครื่องกำเนิดเชิงโรนัส

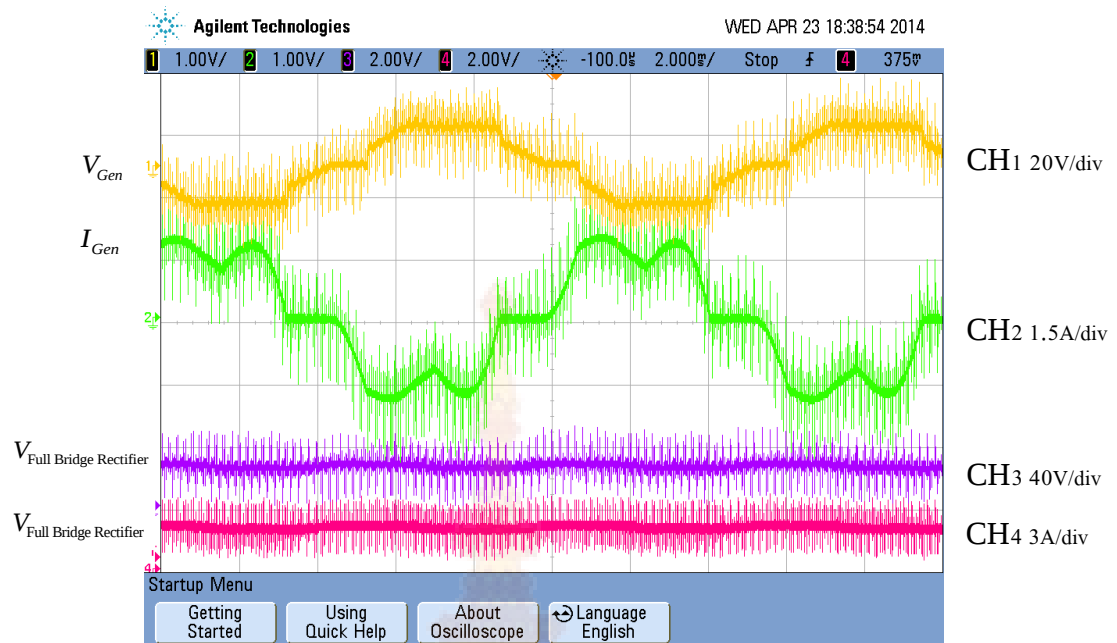
N_s (RPM)	$V_{\text{Full Bridge Rectifier}}$ (V)	$I_{\text{Full Bridge Rectifier}}$ (A)	P (W)
331	10	0.83	8.3
623	20	1.66	33.2
918	30	2.44	73.2
1218	40	3.26	130.4



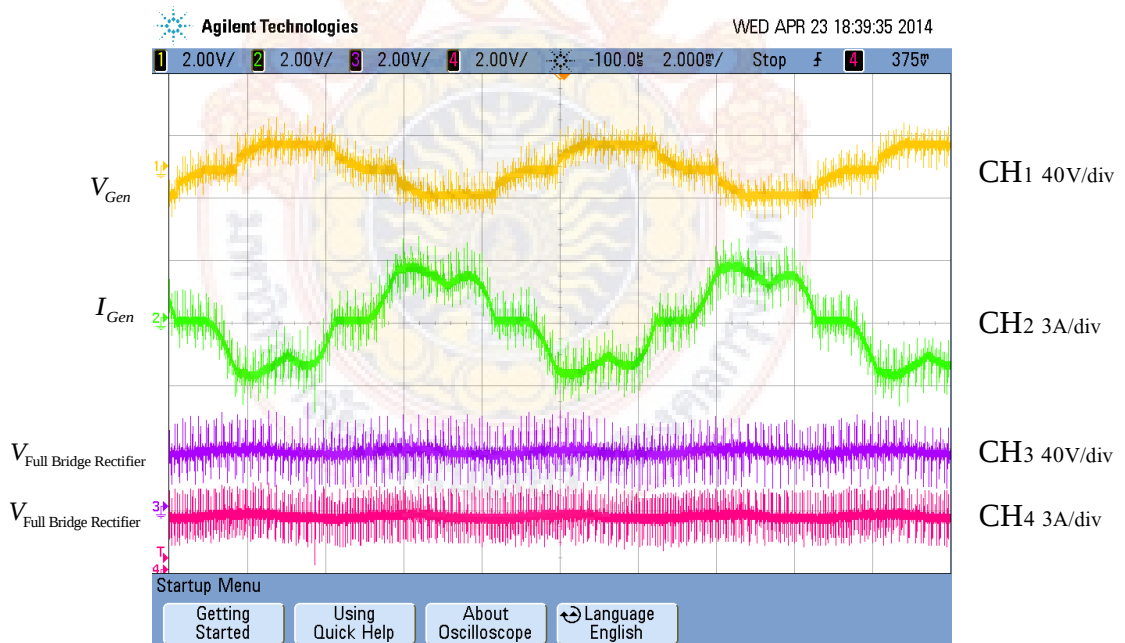
ภาพที่ 4.51 สัญญาณทดสอบหาล้างไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดเชิงโรนัส
ที่ความเร็ว 331 รอบต่อนาที



ภาพที่ 4.52 สัญญาณทดสอบหาล้างไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดเชิงโรนัส
ที่ความเร็ว 623 รอบต่อนาที



ภาพที่ 4.53 สัญญาณทดสอบหาล้างไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดเชิงโรนัส
ที่ความเร็ว 918 รอบต่อนาที



ภาพที่ 4.54 สัญญาณทดสอบหาล้างไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดเชิงโรนัส
ที่ความเร็ว 1,218 รอบต่อนาที

4.7 ทดสอบเครื่องกำเนิดซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรขณะต่อเข้าวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูง

ทำการทดลองปรับเปลี่ยนความเร็วในการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อให้เครื่องกำเนิดซิงโครนัสจ่ายกำลังงานไฟฟ้าในระดับต่างๆ และเพื่อทดลองวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูงจะมีการปรับเปลี่ยนค่าตัวชี้เซลล์และ ค่าความต้านทานที่นำมาเป็นโหลดของวงจร ซึ่งจะกำหนดค่าความต้านทานที่นำมาเป็นโหลด 152 โอห์ม ค่าตัวชี้เซลล์ที่ 50 % และ 70 % ได้ผลการทดสอบดังนี้



ภาพที่ 4.55 การต่อชุดเครื่องกำเนิดซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรเข้ากับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมความเร็วและจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดซิงโครนัสเข้าสู่วงจรคอนเวอร์เตอร์

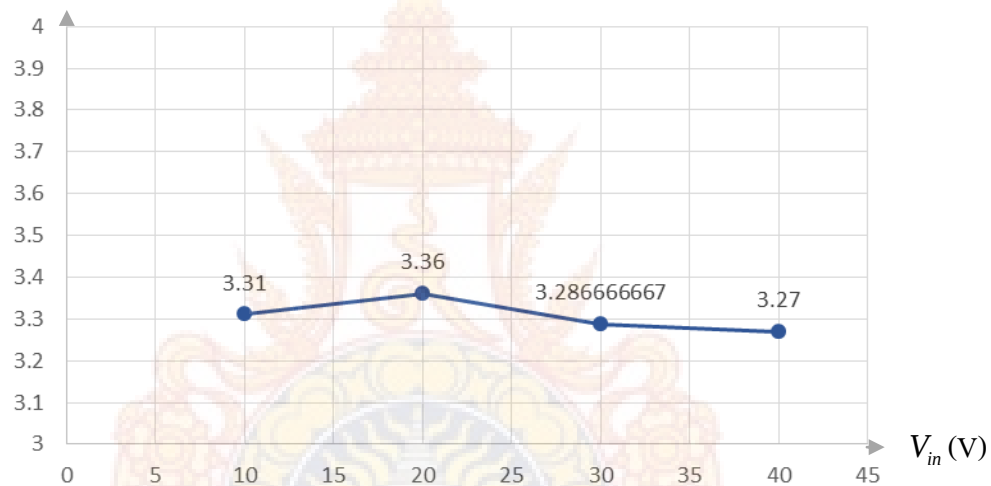


ภาพที่ 4.56 เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับกรณีศึกษาเครื่องกำเนิดซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร

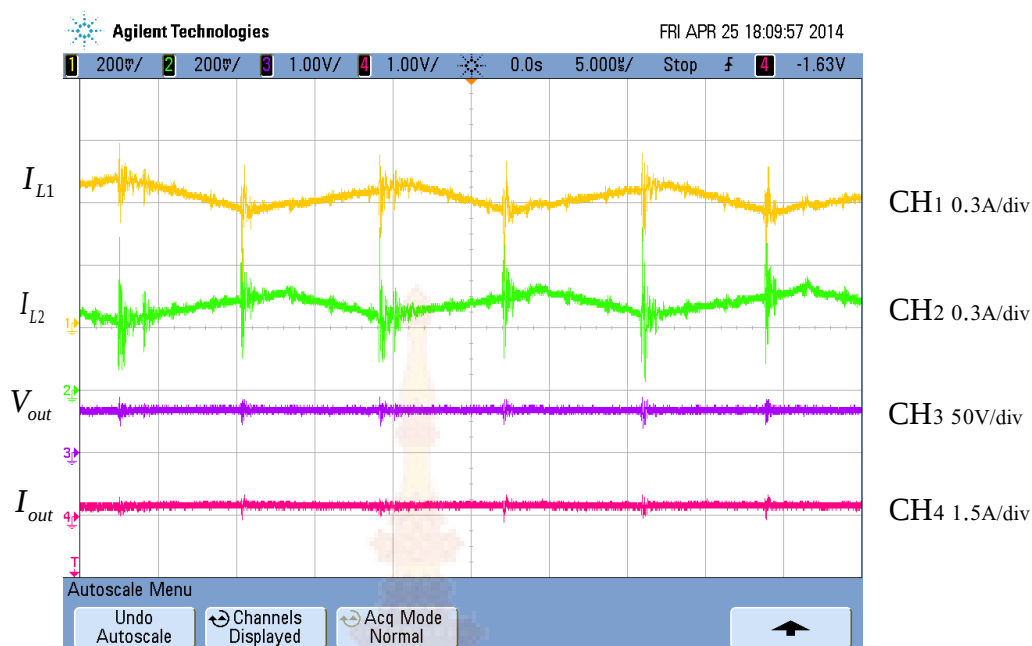
ตารางที่ 4.7 ความต้านทานที่นำมาเป็นโหลด 152 โอห์ม คิวตี้ไซเคล 50 %

V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	I_{L1}, I_{L2} (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)
10	0.94	33.1	0.217	0.56, 0.41	9.4	7.183
20	1.89	67.2	0.441	0.96, 0.94	37.8	29.64
30	2.73	98.6	0.648	1.40, 1.35	81.9	63.893
40	3.65	130.8	0.865	1.72, 1.93	146	113.142

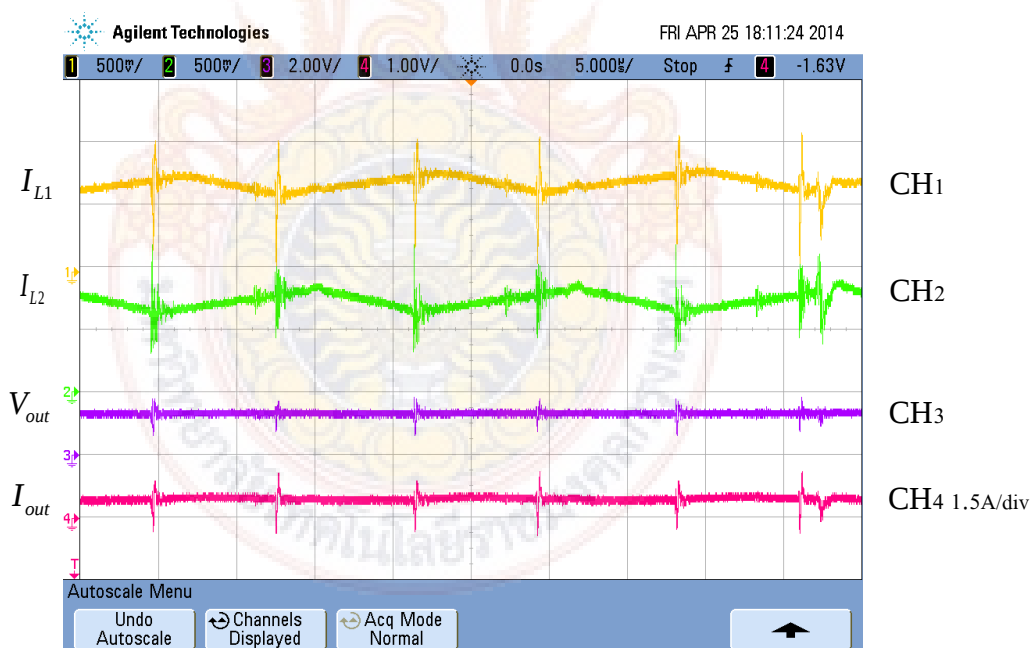
Voltage



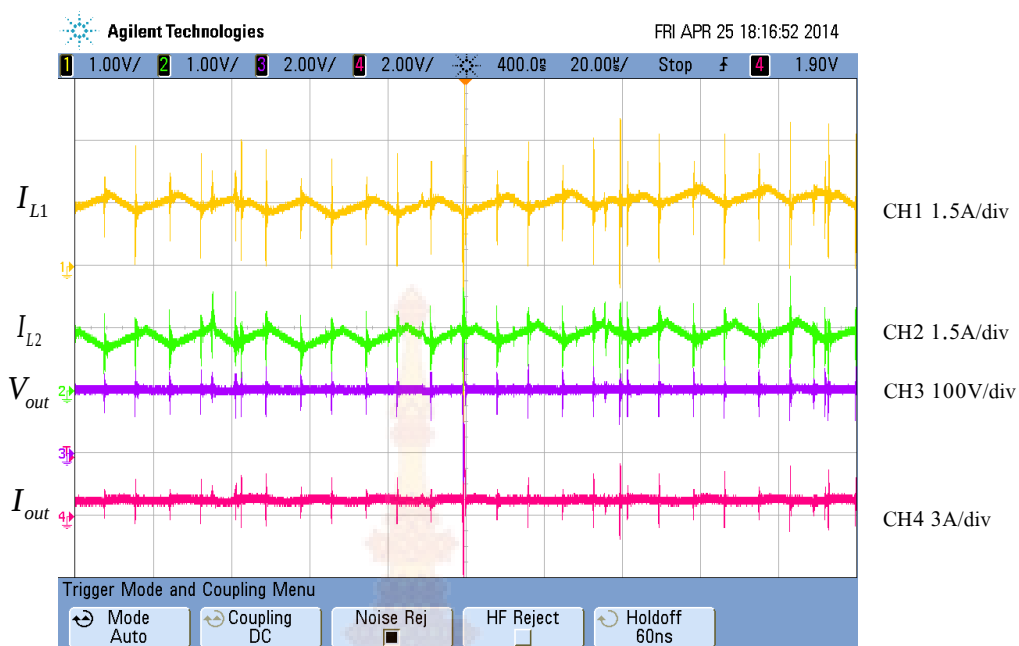
ภาพที่ 4.57 กราฟอัตราขยายแรงดันกับแรงดันอินพุตทดสอบที่ค่าคิวตี้ไซเคล 50 %



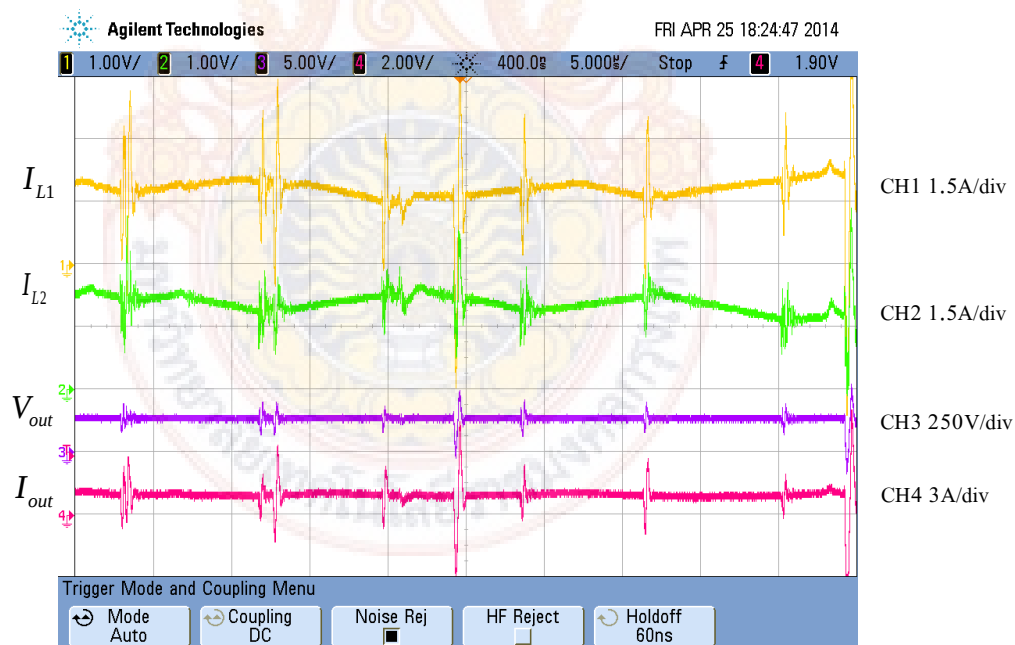
ภาพที่ 4.58 สัญญาณที่ได้จากเครื่องจำลองกังหันลมที่ค่าตัวไซเคิล 50 % แรงดันอินพุต 10 โวลต์



ภาพที่ 4.59 สัญญาณที่ได้จากเครื่องจำลองกังหันลมที่ค่าตัวไซเคิล 50 % แรงดันอินพุต 20 โวลต์



ภาพที่ 4.60 สัญญาณที่ได้จากเครื่องจำลองกังหันลมที่ค่าตัวไซเคิล 50 % แรงดันอินพุต 30 โวลต์

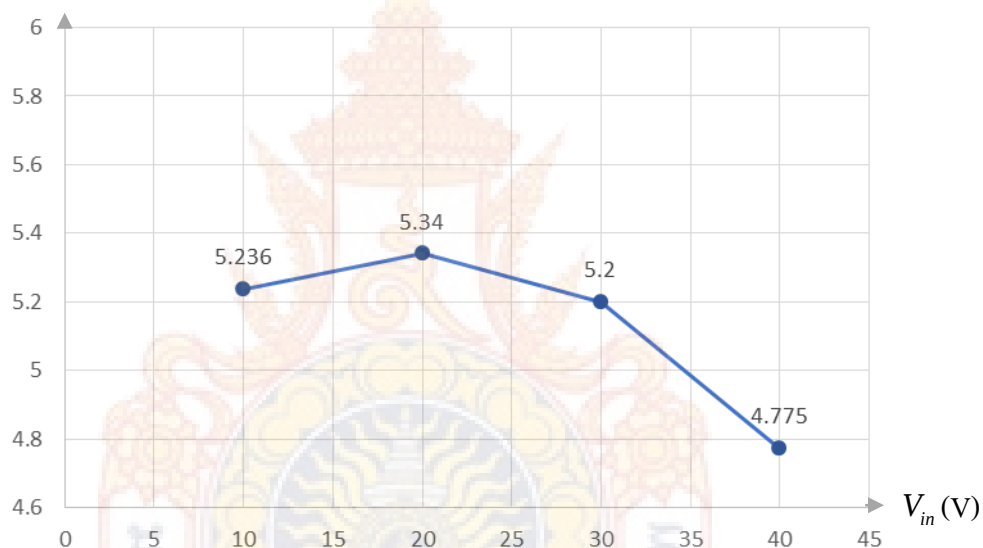


ภาพที่ 4.61 สัญญาณที่ได้จากเครื่องจำลองกังหันลมที่ค่าตัวไซเคิล 50 % แรงดันอินพุต 40 โวลต์

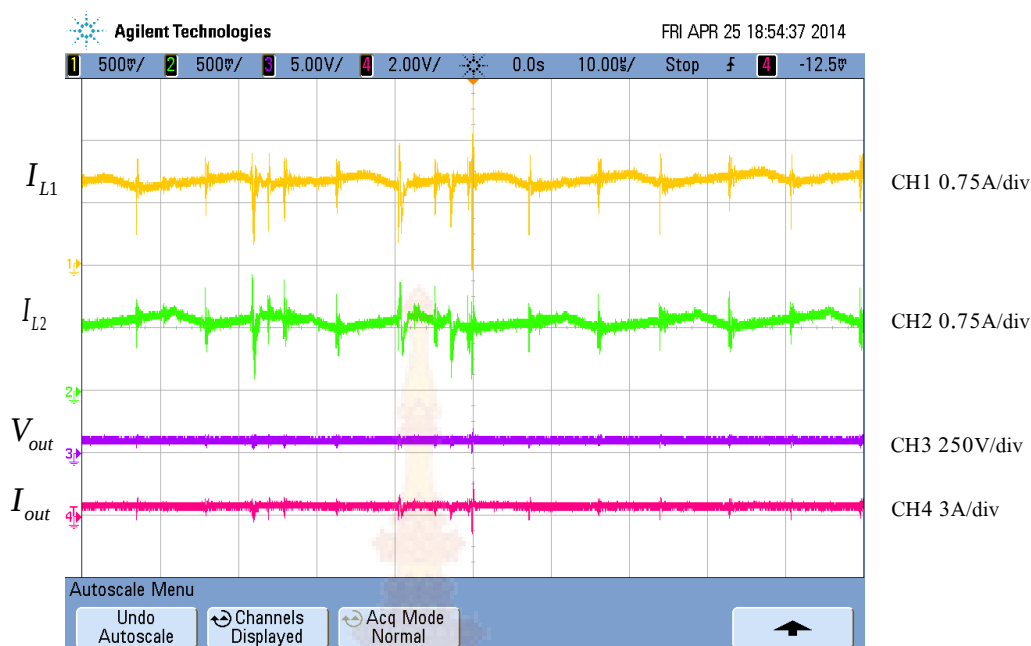
ตารางที่ 4.8 ค่าความต้านทานที่นำมาเป็นโหลด 152 โอห์ม คิวดีไซเคิล 70 %

V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	I_{L1}, I_{L2} (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)
10	2.53	52.36	0.344	1.265, 1.123	25.3	18.012
20	5.17	106.8	0.70	2.585, 2.24	103.4	74.76
30	7.31	156	1.04	3.655, 3.35	219.3	162.24
40	9.45	191	1.25	4.725, 4.13	378	238.75

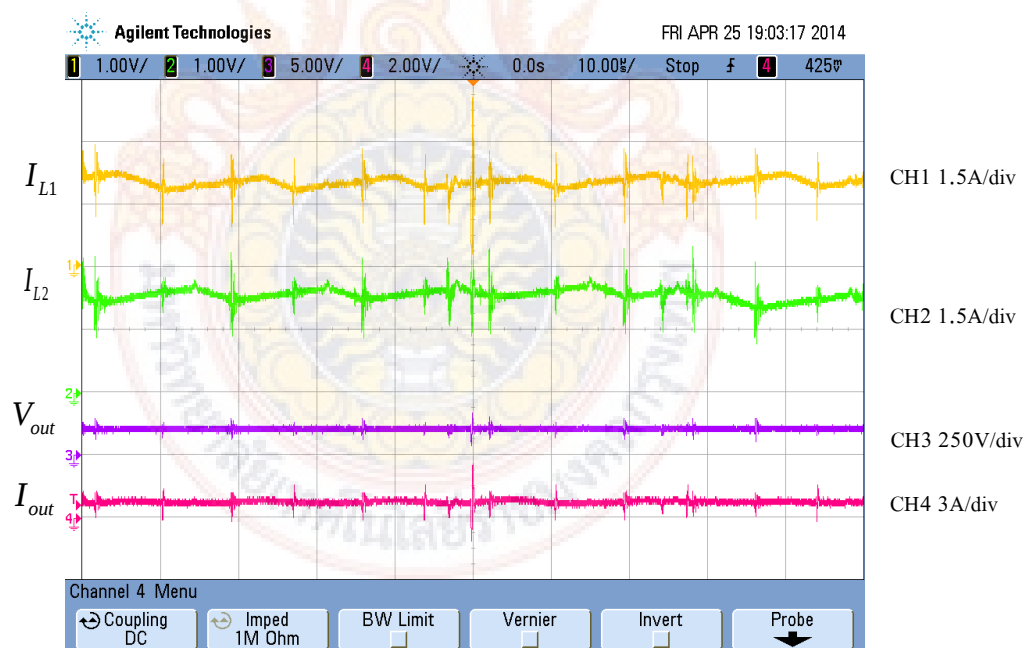
Voltage



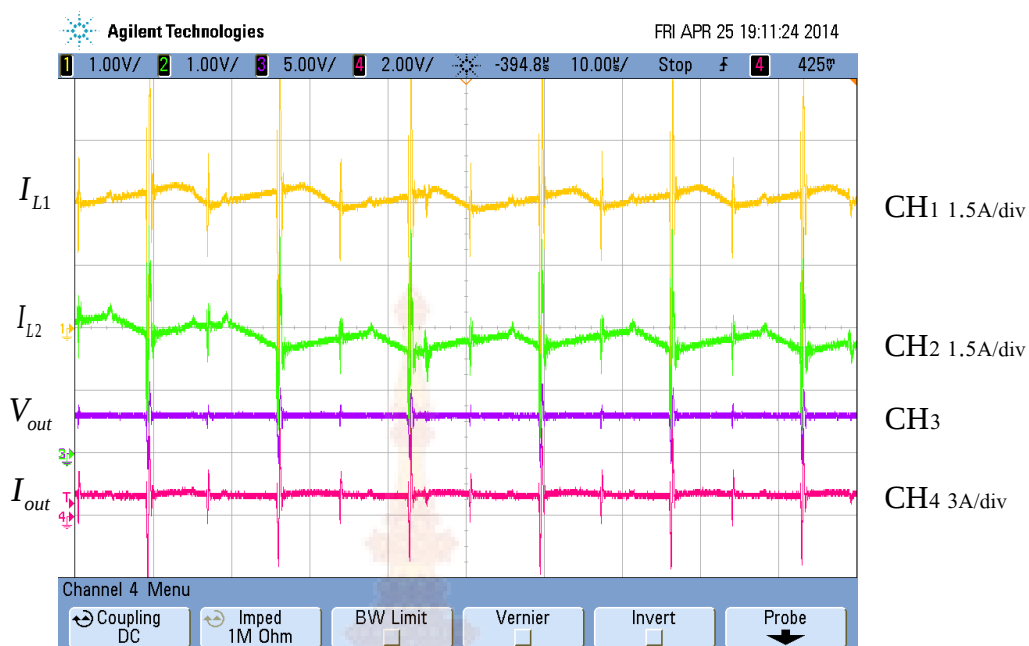
ภาพที่ 4.62 กราฟอัตราขยายแรงดันกับแรงดันอินพุตของเครื่องจำลอง
กึ่งหุ่นลม ที่ค่าคิวดีไซเคิล 70 %



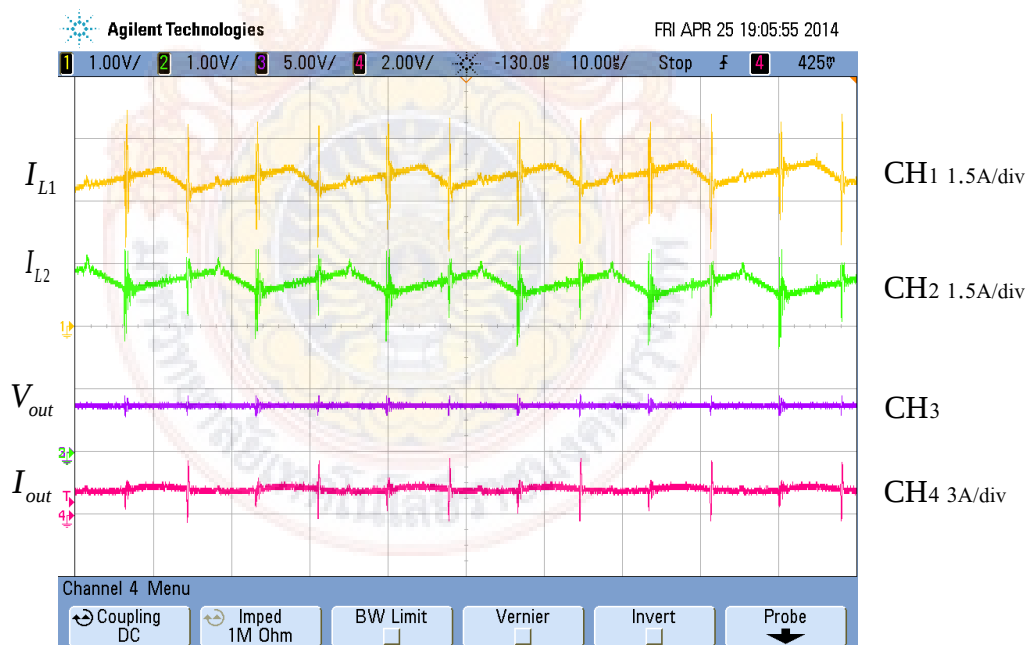
ภาพที่ 4.63 สัญญาณที่ได้จากเครื่องจำลองกังหันลม ที่ค่าตัวดีไซเกิล 70 % แรงดันอินพุต 10 โวลต์



ภาพที่ 4.64 สัญญาณที่ได้จากเครื่องจำลองกังหันลม ที่ค่าตัวดีไซเกิล 70 % แรงดันอินพุต 20 โวลต์



ภาพที่ 4.65 สัญญาณที่ได้จากเครื่องจำลองกังหันลม ที่ค่าตัวไซเคิล 70 % แรงดันอินพุต 30 โวลต์



ภาพที่ 4.66 สัญญาณที่ได้จากเครื่องจำลองกังหันลม ที่ค่าตัวไซเคิล 70 % แรงดันอินพุต 40 โวลต์

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดสอบเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับกรณีศึกษาเครื่องกำเนิด ซึ่งโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร และสร้างชุดวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายแรงดันสูง เพื่อที่จะยกระดับแรงดันด้านเอาต์พุตของวงจรและจะพบว่ากำลังงานอินพุตจะมีค่ามากกว่ากำลังงานเอาต์พุตซึ่งสาเหตุที่ กำลังงานเอาต์พุตมีค่าต่ำเนื่องจากเกิดพลังงานสูญเสียที่ตัวอุปกรณ์ เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้นจึงได้ทำการวัดและเก็บค่าผลการทดลองเพื่อคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของการทดสอบจากสมการที่ (4.3) และนำไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานในแต่ละช่วงของค่าดีวีดีไซเคิล

กำหนดให้อินพุตมีค่าตั้งแต่ 10 โวลต์ ถึง 40 โวลต์ และทำการปรับเพิ่มค่าดีวีดีไซเคิล ตั้งแต่ 20 % ถึง 70 % ดังนี้

$$\text{ค่าประสิทธิภาพ} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4.3)$$

ตารางที่ 4.9 การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 10 โวลต์

ค่าดีวีดีไซเคิล (%)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	ค่าประสิทธิภาพ (%)
20	0.22	16.08	0.106	77.74
30	0.33	19.54	0.129	76.38
40	0.455	22.67	0.15	74.7
50	0.879	32.7	0.216	80.35
60	1.356	40.02	0.264	77.9
70	2.121	51.36	0.327	79.18

ตารางที่ 4.10 การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเมื่อแรงดันอินพุต 20 โวลต์

ค่าดีวีทีซีเกิล (%)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	ค่าประสิทธิภาพ (%)
20	0.413	31.48	0.208	79.27
30	0.668	40.35	0.266	80.34
40	0.914	47.016	0.31	79.8
50	1.509	60.91	0.401	80.93
60	2.676	81.29	0.535	81.26
70	4.707	106.25	0.694	78.32

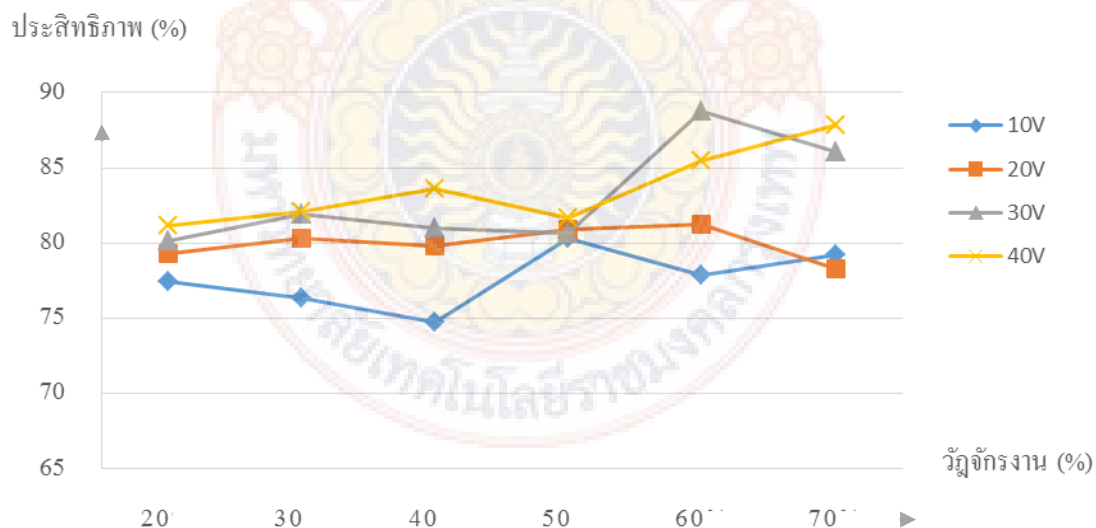
ตารางที่ 4.11 การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพแรงดันอินพุตเท่ากับ 30 โวลต์

ค่าดีวีทีซีเกิล (%)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	ค่าประสิทธิภาพ (%)
20	0.634	48.11	0.317	80.18
30	0.959	59.47	0.392	81.03
40	1.362	71.19	0.47	81.89
50	2.25	90.73	0.60	80.65
60	4.062	122.9	0.801	80.78
70	6.71	170.3	1.017	86.04

ตารางที่ 4.12 การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 40 โวลต์

ค่าดีวีดีไซเคิล (%)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	ค่าประสิทธิภาพ (%)
20	0.905	66.79	0.44	81.18
30	1.396	83.15	0.549	82.10
40	1.828	96.33	0.635	83.65
50	2.773	117.40	0.772	81.71
60	5.625	175.9	1.093	85.44
70	8.42	232	1.275	87.82

จากการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตและค่าดีวีดีไซเคิลจะมีผลกลับแรงดันและกระแสเอาต์พุตโดยตรงเมื่อนำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพและนำไปวาดกราฟจะพบว่าที่ค่าดีวีดีไซเคิล 50 % จะมีประสิทธิภาพมากที่สุดเพราะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตตั้งแต่ 10 โวลต์ ถึง 40 โวลต์ ค่าประสิทธิภาพที่วัดได้จะใกล้เคียงกันทุกช่วงแรงดัน ดังภาพที่ 4.67



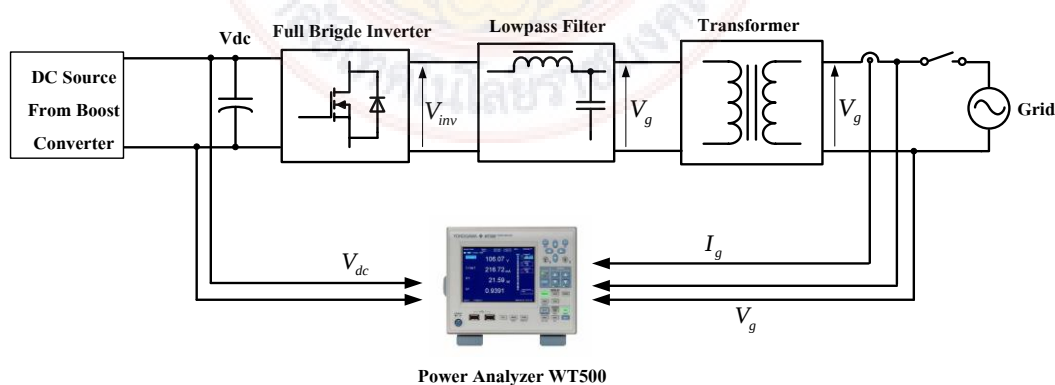
ภาพที่ 4.67 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพกับค่าดีวีดีไซเคิล

ตารางที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพกับค่าดีวีไอเซลล์

ค่าดีวีไอเซลล์ (%) แรงดันอินพุต (V)	20	30	40	50	60	70
10	77.47	76.38	74.7	80.35	77.90	79.18
20	79.27	80.34	79.8	80.93	81.26	78.32
30	80.18	81.89	81.03	80.65	88.78	86.04
40	81.18	82.10	83.65	81.71	85.44	87.82

4.8 การทดสอบอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบต่อเข้าระบบจำหน่ายด้วย DSP เบอร์ TMS320F2808

การทดสอบที่ได้จากการออกแบบสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบต่อเข้าระบบจำหน่าย ดังภาพที่ 4.68 ซึ่งผลทดสอบการทำงานของระบบแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของการทดสอบการทำงานในขณะจ่ายโหลดอิสระ (Stand alone) และส่วนของการทดสอบการทำงานในขณะต่อเข้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า (Grid connected) โดยการทดสอบทั้งสองส่วนจะทำการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพ (η) ของระบบโดยเปรียบเทียบตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำ, ตัวเหนี่ยวนำร่วมกับตัวเก็บประจุและค่า THD_i , THD_v เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบในการเชื่อมต่อระบบจำหน่าย ดังได้กล่าวมาแล้วนั้น ผลการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบต่อเข้าระบบจำหน่าย ที่สร้างขึ้นได้ทำการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

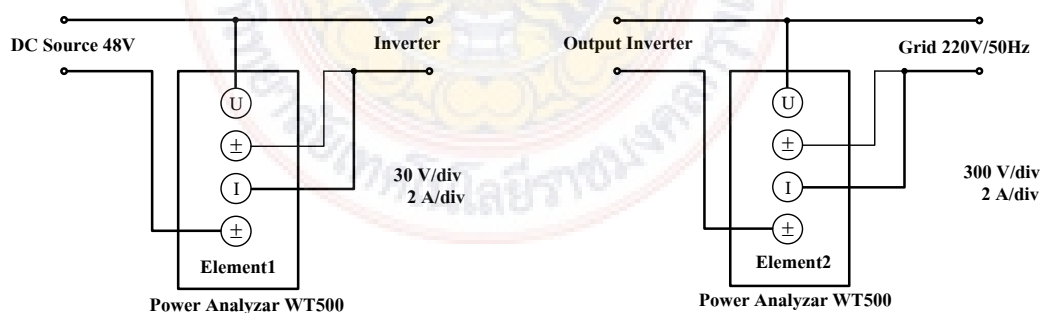


ภาพที่ 4.68 บล็อกไดอะแกรมทดสอบระบบอินเวอร์เตอร์

ตารางที่ 4.14 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบอินเวอร์เตอร์

พารามิเตอร์	รายละเอียด
ระบบจำหน่ายการไฟฟ้า (V_g)	220 V 50 Hz
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc})	60 V
กำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุต (P_{max})	150 W
ตัวเหนี่ยวนำ (L)	2 mH
ตัวเก็บประจุ (C)	47 μ F
ความถี่สวิตชิง (f_s)	10 kHz

ในการทดสอบอินเวอร์เตอร์แบบต่อเข้าระบบจำหน่ายจะทดสอบโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 60 V ให้กับอินเวอร์เตอร์ จากนั้นจึงทำการวัดสัญญาณแรงดันและกระแสทางด้านอินพุตและเอาต์พุต โดยใช้เครื่องวัด Power Analyzer รุ่น WT500 ซึ่งในการวัดสัญญาณแรงดันและกระแส ได้แบ่งการวัดออกเป็น 2 Element โดยที่ Element1 ใช้วัดสัญญาณแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งวิธีการต่อวงจรเพื่อวัดสัญญาณแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์โดยใช้ Element1 ของเครื่องวัด Power Analyzer รุ่น WT500 ได้นำเสนอดังภาพที่ 4.69 (ข) ส่วนการวัดสัญญาณแรงดันและกระแสอินพุตของอินเวอร์เตอร์เลือกใช้ Element2 ในการวัดสัญญาณ โดยได้นำเสนอวิธีการต่อเพื่อวัดสัญญาณแรงดันและกระแสอินพุต เข้ากับเครื่องวัด Power Analyzer รุ่น WT500 ไว้ในภาพที่ 4.69 (ก)



(ก) วงจรวัดสัญญาณแรงดันและกระแส
ทางด้านอินพุต

(ข) วงจรวัดสัญญาณแรงดันและกระแส
ทางด้านเอาต์พุต

ภาพที่ 4.69 การต่อเพื่อวัดสัญญาณแรงดันและกระแสของอินเวอร์เตอร์กับ Power Analyzer รุ่น WT500

4.9 การเชื่อมต่อระบบเข้ากับอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบต่อเข้าระบบจำหน่ายด้วย DSP เบอร์ TMS320F2808

เมื่อได้ศึกษาเกี่ยวกับตัวโปรแกรม Matlab/Simulink กับโปรแกรม Code Composer Studio 3.3 เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ก็จะมาถึงขั้นตอนในการเชื่อมต่อระบบทั้งหมดเข้าด้วยกันไม่ว่าจะเป็นชุด Analog Signal Scaling, Inverter, ตัวประมวลสัญญาณดิจิทัล (บอร์ด DSP), โปรแกรม Code Composer Studio 3.3 และตัวโปรแกรม Matlab/Simulink ก็จะได้เป็นอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบต่อเข้าระบบจำหน่ายด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ TMS320F2808 โดยมีวิธีการดังนี้

4.9.1 การกำหนดตัวรับค่าและส่งค่าให้กับบอร์ด DSP TMS320F2808

เราจะทำการกำหนด Port input ให้กับบอร์ด DSP โดยจะต้องกำหนดให้ตรงกับตัวโปรแกรมที่เราได้ทำการออกแบบไว้ในที่นี้คือตัว Current Sensor และ Voltage Sensor แสดงดังตารางที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.15 การกำหนด Port input ให้กับตัว Current Sensor และ Voltage Sensor (ใช้ขา 15, 65 และ 67)

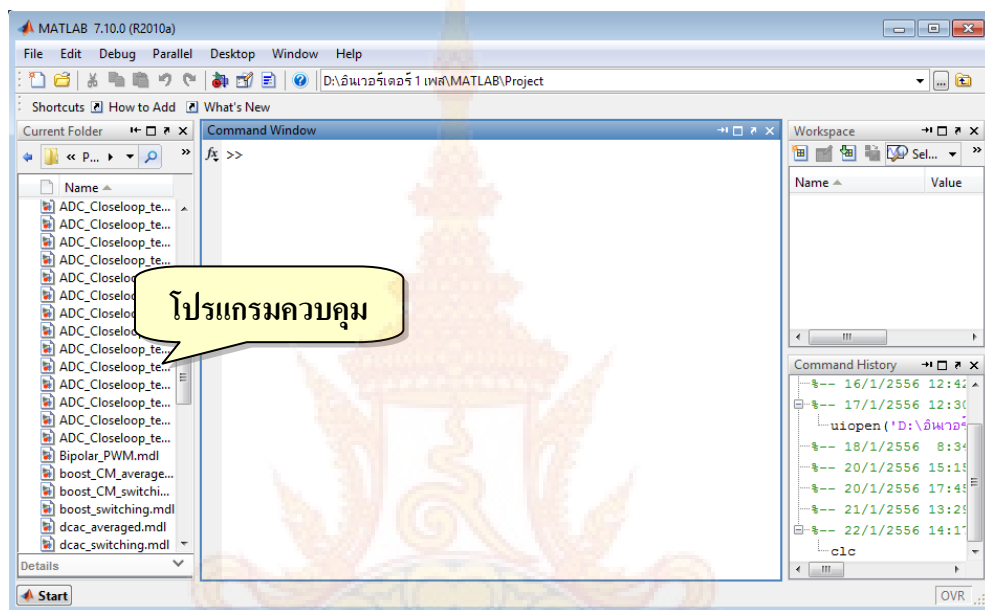
ADCIN-B4	15	65	ADCIN-A4
spare	16	66	spare
ADCIN-B5	17	67	ADCIN-A5
spare	18	68	spare

ตารางที่ 4.16 การกำหนด Port output ให้กับตัว DSP (ใช้ขา 23, 24, 73 และ 74)

GPIO-00 / EPWM-1A	23	73	GPIO-01/ EPWM-1B
GPIO-02 / EPWM-2A	24	74	GPIO-03/ EPWM-2B
GPIO-04 / EPWM-3A	25	75	GPIO-05/ EPWM-3B
GPIO-06 / EPWM-4A	26	76	GPIO-07/ EPWM-4B
GND	27	77	+5V in
GPIO-08/ EPWM-5A	28	78	GPIO-09/ EPWM-5B
GPIO-10 / EPWM-6A	29	79	GPIO-11/ EPWM-6B

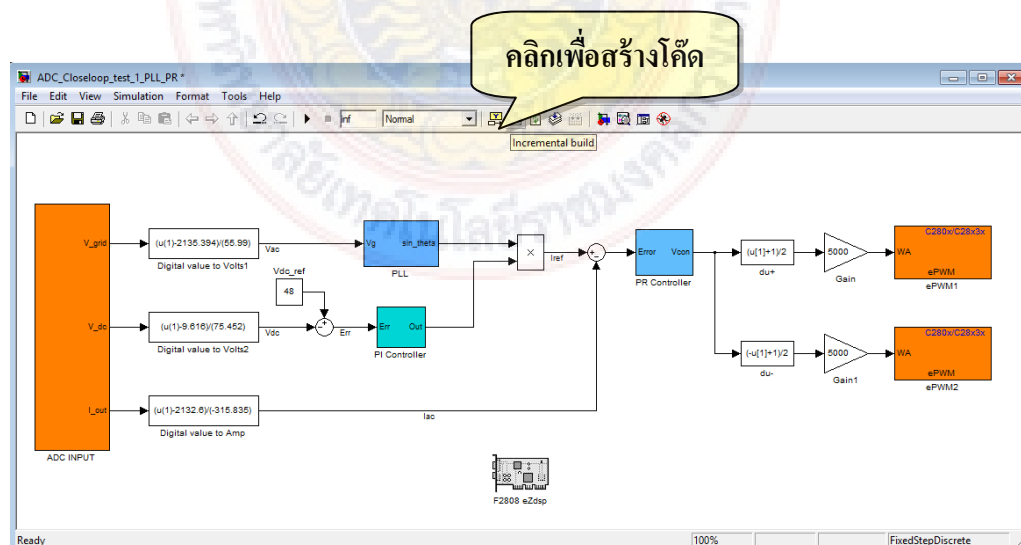
หลังจากที่เราได้กำหนด Port input และ Port output ให้กับบอร์ด DSP และทำการเชื่อมโยงบอร์ด DSP เข้ากับคอมพิวเตอร์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว เราจะทำการเปิดโปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อทำการทดลองอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบต่อเข้าระบบจำหน่ายด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด TMS320F2808 โดยมีวิธีการดังนี้

4.9.2 ทำการเปิดโปรแกรม MATLAB R2010a และเปิดโปรแกรมควบคุม



ภาพที่ 4.70 หน้าต่างของโปรแกรม MATLAB R2010a

4.7.3 ทำการโหลดข้อมูลไปยังบอร์ด DSP โดยการกดที่ปุ่ม Incremental build

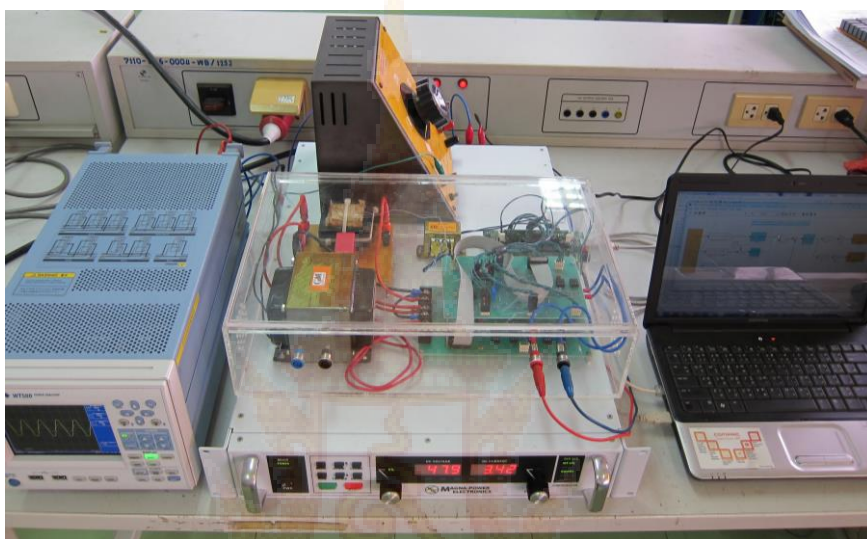


ภาพที่ 4.71 หน้าต่างของโปรแกรมควบคุมและการ Run โปรแกรม

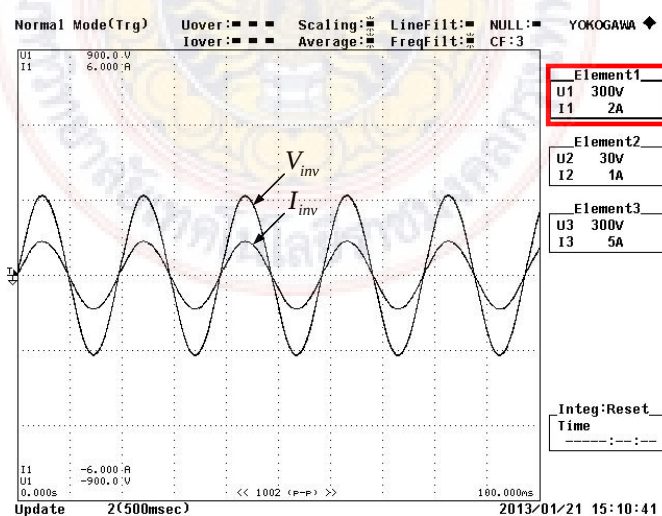
4.10 ผลการทดสอบการทำงานอินเวอร์เตอร์ขณะจ่ายโหลดอิสระ

การทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ขณะจ่ายโหลดอิสระ เพื่อตรวจสอบว่าระบบสามารถควบคุมให้ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ที่จ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์ได้หรือไม่ ซึ่งในการทดสอบนี้แบ่งเป็นการทดสอบเมื่อโหลดเป็นความต้านทานกับการทดสอบเมื่อโหลดเป็นหลอดไฟ

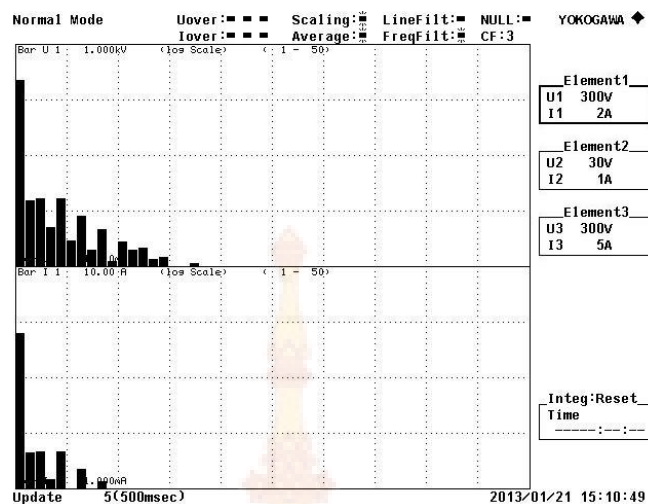
4.10.1 การทดสอบเมื่อโหลดเป็นความต้านทาน



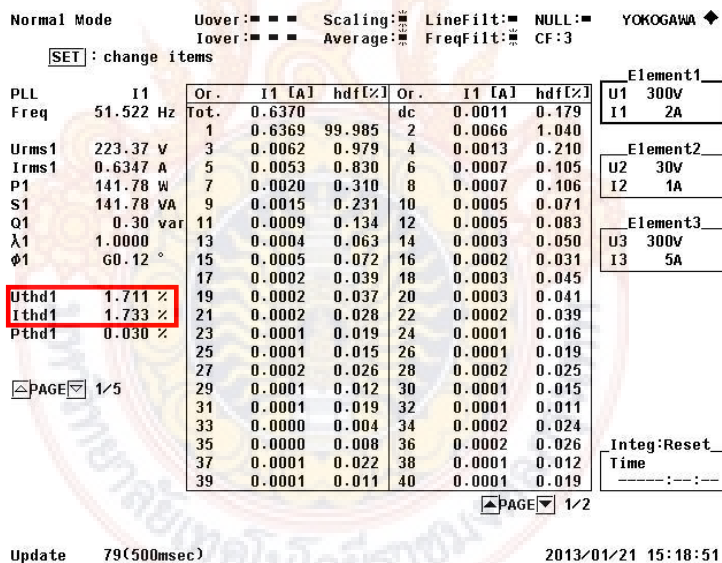
ภาพที่ 4.72 การทดสอบสัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อทดสอบ
กับโหลดตัวต้านทาน 320 โอห์ม



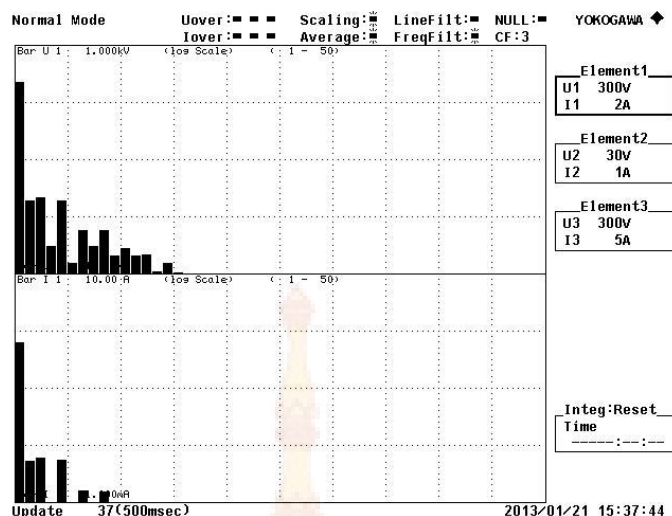
ภาพที่ 4.73 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทาน



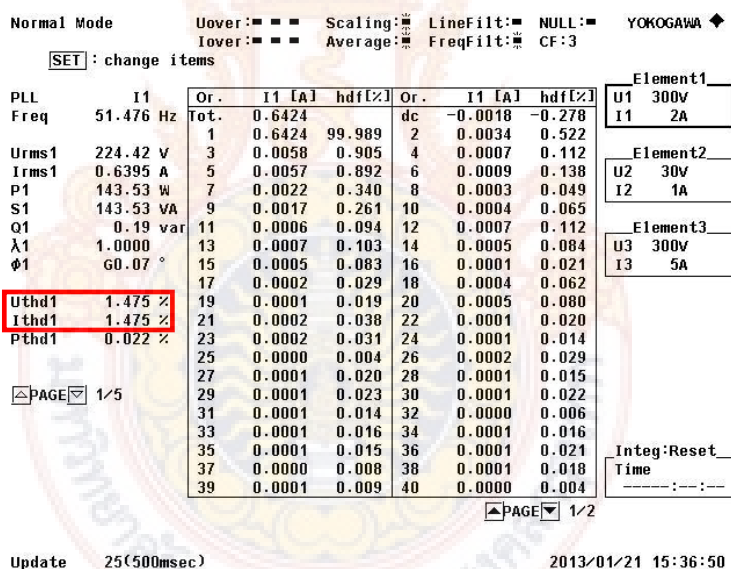
ภาพที่ 4.74 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน(บน) และกระแส(ล่าง) เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์
 เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทานใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 4.75 ค่าแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์
 เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทานใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำ



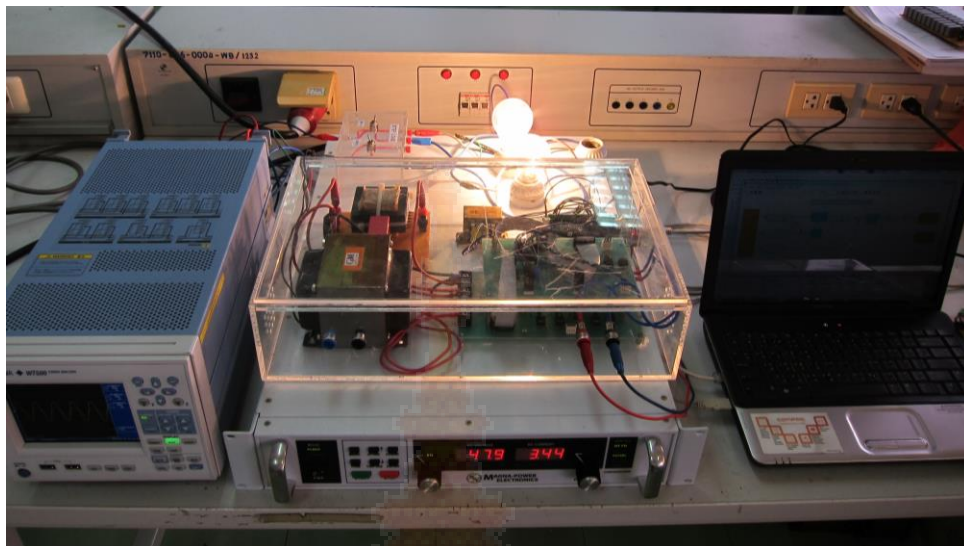
ภาพที่ 4.76 สเปกตรัมฮาร์มอนิกของแรงดัน(บน) และกระแส(ล่าง) เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทานใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมกับตัวเก็บประจุ



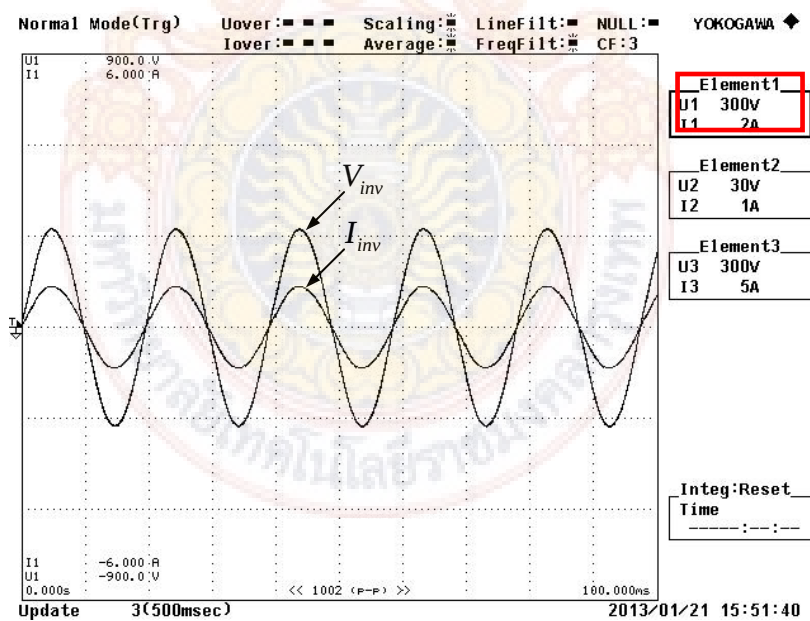
ภาพที่ 4.77 ผลการทดสอบหาค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์ เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทานใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมกับตัวเก็บประจุ

จากภาพที่ 4.74 ถึง 4.77 แสดงผลการทดสอบเมื่อโหลดเป็นความต้าน จากการวิเคราะห์สเปกตรัมฮาร์มอนิกพบว่าเมื่อใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำเกิดกระแสฮาร์มอนิกอยู่ที่ประมาณ 1.733 % และเมื่อใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมกับตัวเก็บประจุเกิดกระแสฮาร์มอนิกอยู่ที่ประมาณ 1.475 %

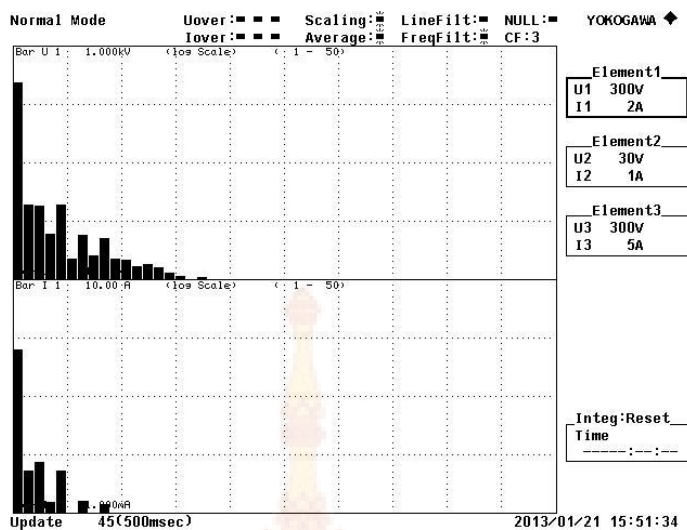
4.10.2 การทดสอบเมื่อโหลดเป็นหลอดไฟ



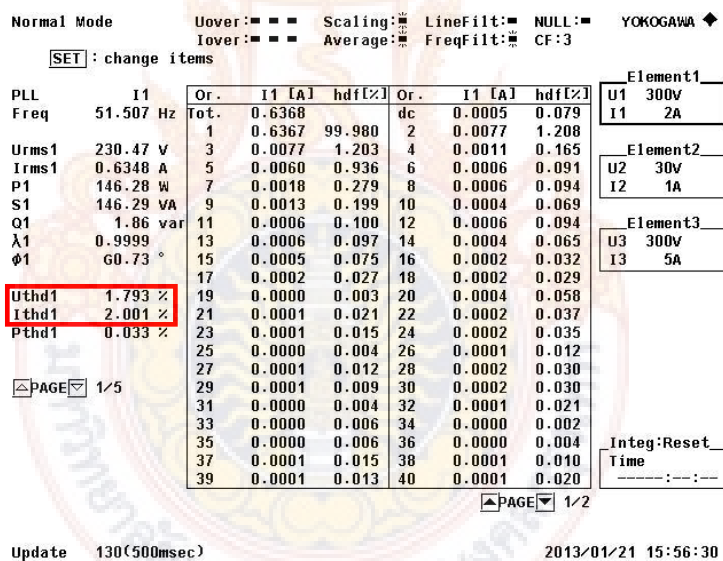
ภาพที่ 4.78 รูปการทดสอบสัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อทดสอบกับโหลดหลอดไฟขนาด 150 W



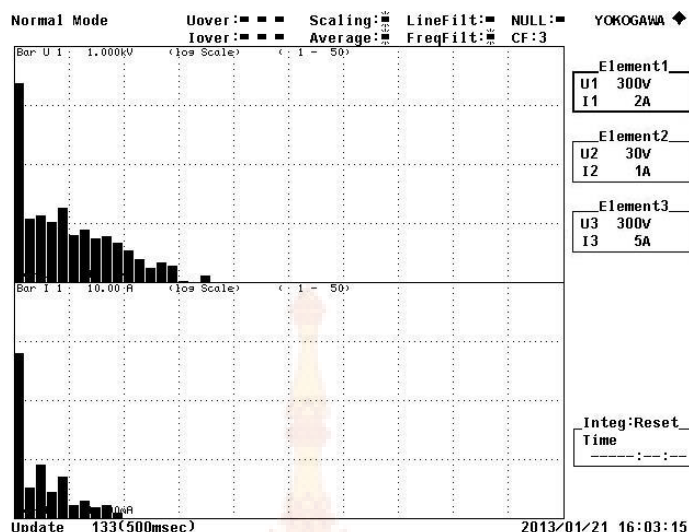
ภาพที่ 4.79 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อโหลดเป็นหลอดไฟ



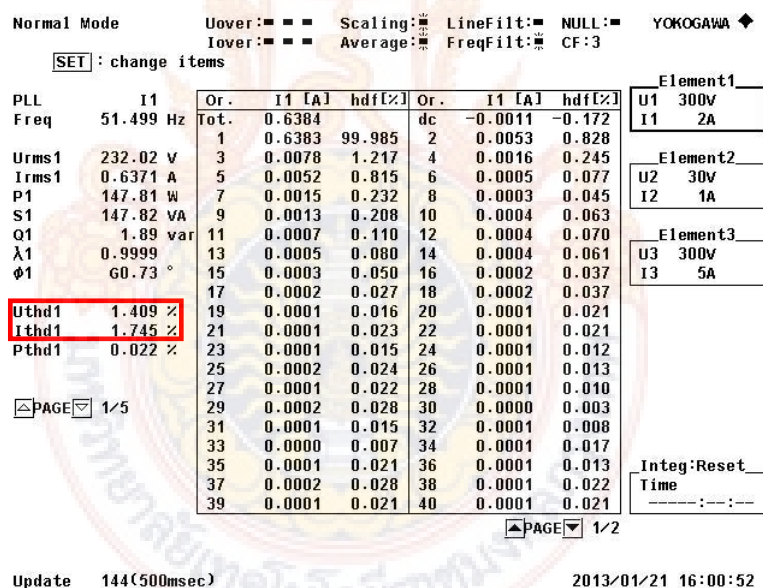
ภาพที่ 4.80 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน(บน) และกระแส(ล่าง) เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์
เมื่อโหลดเป็นหลอดไฟใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 4.81 ผลการทดสอบหาค่าแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์
เมื่อโหลดเป็นหลอดไฟใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำ



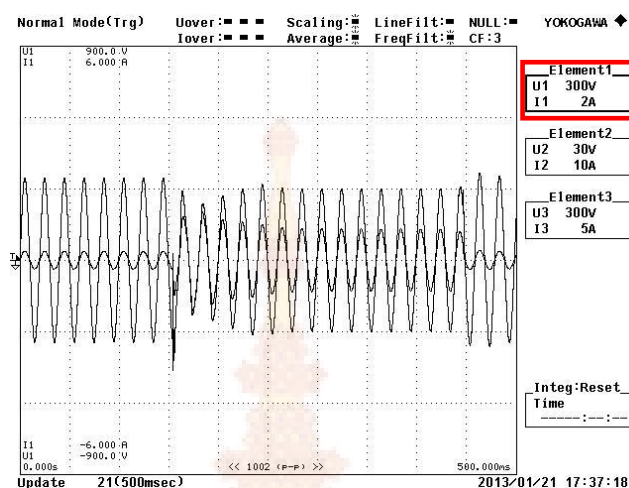
ภาพที่ 4.82 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน(บน) และกระแส(ล่าง) เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์
เมื่อโหลดเป็นโหลดไฟใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมกับตัวเก็บประจุ



ภาพที่ 4.83 ผลการทดสอบหาค่าแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์
เมื่อโหลดเป็นโหลดไฟใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมกับตัวเก็บประจุ

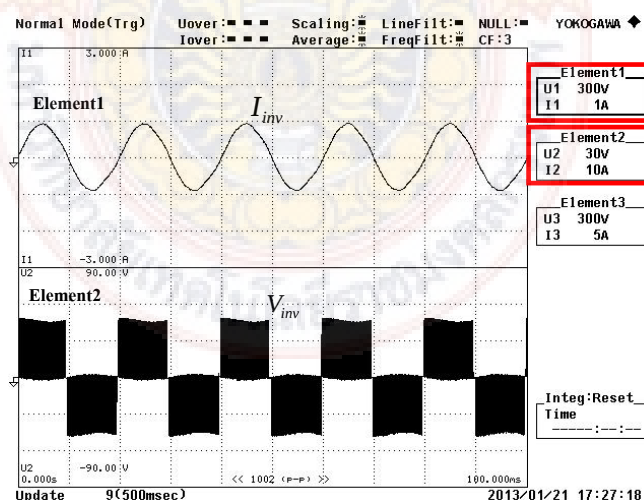
จากภาพที่ 4.79 ถึง 4.83 เป็นการทดสอบเมื่อโหลดเป็นโหลดไฟ จากการวิเคราะห์
สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์พบว่าเมื่อใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำเกิดกระแสฮาร์โมนิกส์อยู่ที่ประมาณ
2.001 % และเมื่อใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมกับตัวเก็บประจุเกิดกระแสฮาร์โมนิกส์อยู่ที่

ประมาณ 1.745 % ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นเมื่อโหลดเป็นหลอดไฟจะมีค่ามากกว่าในขณะทำการทดสอบเมื่อโหลดเป็นความต้านทาน



ภาพที่ 4.84 ผลการตอบสนองของแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อโหลดเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด

ผลตอบสนองในสถานะชั่วคราวของระบบถูกทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนภาระจาก 40 W ไปที่ 150 W และกลับมาที่ 40 W อีกครั้ง โดยทดสอบกับหลอดไฟผลที่ได้ปรากฏอยู่ในภาพที่ 4.84



ภาพที่ 4.85 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุต(ล่าง) ของอินเวอร์เตอร์เมื่อไม่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำและกระแสเอาต์พุต (บน)

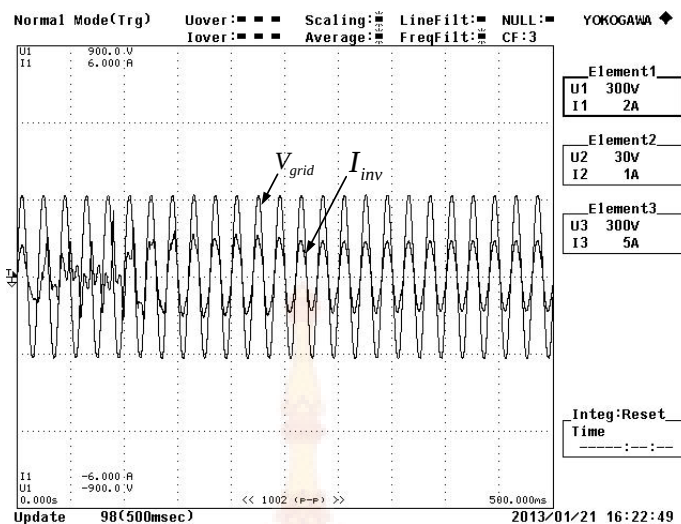
ในภาพที่ 4.85 เป็นภาพแรงดันของอินเวอร์เตอร์ โดยมีความถี่สูงที่ยังไม่ผ่านการกรอง(ล่าง) และกระแสของอินเวอร์เตอร์ที่ผ่านการกรอง(บน) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ มีผลต่อการกรองความถี่ของแรงดันอินเวอร์เตอร์

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดสอบการทำงานขณะจ่ายโหลดอิสระเมื่อโหลดเป็นตัวต้านทานและโหลดไฟฟพบว่า เมื่อใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำร่วมกับตัวเก็บประจุจะให้ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ตัวกรองแบบตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงว่า ระบบยังคงควบคุมค่าฮาร์มอนิกส์ของทั้งกระแสและแรงดันให้น้อยกว่า 5% ถึงแม้ว่าค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในขณะทำการทดสอบเมื่อโหลดเป็นโหลดไฟจะมีค่ามากกว่าเมื่อโหลดเป็นความต้านทาน

4.11 ผลการทดสอบการทำงานอินเวอร์เตอร์ขณะต่อเข้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า

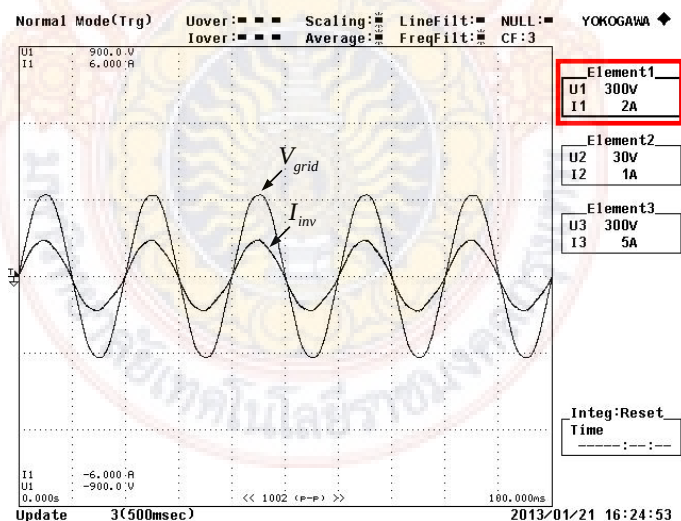


ภาพที่ 4.86 รูปการทดสอบสัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ขณะต่อเข้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า



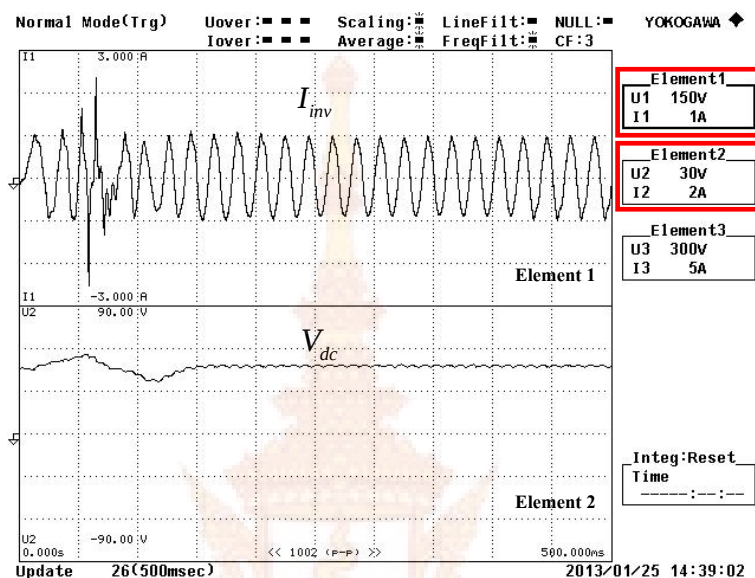
ภาพที่ 4.87 สัญญาณกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ขณะเชื่อมต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้า

ในภาพที่ 4.87 เป็นการแสดงสัญญาณค่ากระแสกับแรงดันขณะทำการเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้าที่แรงดัน 220 โวลต์ ซึ่งสัญญาณกระแสใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 120 ms จึงจะมีค่าความถี่และมุมเฟสตรงกันกับแรงดันของการไฟฟ้าได้



ภาพที่ 4.88 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดขณะเชื่อมต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้า

จากภาพที่ 4.88 จะเห็นได้ว่าสัญญาณกระแสต่อเข้ากับระบบการไฟฟ้านั้นมีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณไซน์มาก ซึ่งระบบสามารถที่จะควบคุมให้กระแสใกล้เคียงสัญญาณไซน์ได้ตามที่ออกแบบไว้



ภาพที่ 4.89 ผลการตอบสนองของแรงดันดีซีบัสเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสแบบทันทีทันใด

ในภาพที่ 4.89 เพื่อให้ทราบถึงผลของกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดต่อค่าแรงดันดีซีบัส จากภาพจะเห็นได้ว่าช่วงที่ทำการเชื่อมต่อเข้ากับระบบการไฟฟ้านั้น แรงดันดีซีบัสเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยแล้วจึงเข้าสู่สภาวะคงเมื่อกระแสเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัยที่ได้จากการทดลอง

5.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กึ่งหั่นลมสามารถควบคุมแสดงพฤติกรรมของกึ่งหั่นลม โดยสั่งให้อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมแบบเวกเตอร์ รับแรงบิดอ้างอิงจากการคอร์ดอินเตอร์เฟส DS1104

5.1.2 เชนเนอร์เรเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรที่ต่อกับปลั๊กกับเครื่องจำลองกึ่งหั่นลมจ่าย กระแสไฟฟ้าผ่านวงจรเรียงกระแสเพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรอนุคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล เพื่อรักษาระดับแรงดันคงที่ 60 V

5.1.3 อินเวอร์เตอร์แบบหนึ่งเฟสสามารถจ่ายโหลดแบบแยกอิสระ และจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบ จำหน่ายด้วยการชิงโครไนท์แบบเฟสล็อกกลูบให้ประสิทธิภาพในการเชื่อมต่อที่ดี และคุณภาพของ กระแสไฟฟ้าที่ดี

5.1.4 ด้วยเทคนิคการควบคุมกระแสแบบสัดส่วนบวกเรโซแนนท์ สามารถลดฮาร์มอนิกส์ ของกระแสได้

5.2 ปัญหาที่พบในงานวิจัย

5.2.1 การนำเอนเนอร์เรเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรจากต่างประเทศใช้เวลานานและเกิดการ เสียหายจากการขนส่ง ทำให้การทดลองวงจรอนุคอนเวอร์เตอร์ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจาก ห้องปฏิบัติการในช่วงแรก

5.2.2 การทดสอบระบบอินเวอร์เตอร์ขณะเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่ายจำเป็นต้องมีการทดสอบ สภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ฮาร์มอนิกส์ และการไหลของกระแสไฟฟ้าขณะชิงโครไนท์ซึ่งห้อง วิจัยไม่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าจึงไม่สามารถทดสอบ อินเวอร์เตอร์แบบต่อเข้าระบบจำหน่ายได้อย่างครบถ้วน

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 พัฒนาระบบทั้งหมดให้เป็นแบบฝังตัว (Embedded) โดยใช้ DSP เพียงตัวเดียวเพื่อลด ต้นทุนและการพัฒนา

5.3.2 ต้องพัฒนาอัลกอริทึมการแยกอิสระ(Islanding) ของอินเวอร์เตอร์ต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน., ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย, 2546.
<http://www2.dede.go.th/dede/renew/twm/main.htm>
- [2] กองพัฒนาพลังงานทดแทน. ฝ่ายพัฒนาและแผนงานโรงไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย., พลังงานลม, 2552
<http://www2.dede.go.th/dede/renew/Twm/REPORT.htm>
- [3] Md. Arifujjaman, M.T.Iqbal, John E.Quaicoe. Emulator of a Small Wind Turbine System with a separately-excited DC Machine., Faculty of Engineering and Applied Science Memorial University of Newfoundland., St.John's, NL, Canada. 2008
- [4] P. Thounthong , et al. February 2009. "Modified 4-phase interleaved fuel cell converter for high-power high-voltage applications." Proceeding of the International Conference on Industrial Technology (ICIT'09), 2009. Monash University. 440-445.
- [5] D.G. Holmes, B.P. McGrath, D. Segaran, and W.Y. Kong, "Dynamic Control of a 20 kW Interleaved Boost Converter for Traction Applications" Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS 2008, pp. 1-8.
- [6] Kaura, V. and Blasko, V.; "Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions" IEEE on Industry Application, vol. 33, Issue 1, pp. 58-63
- [7] D. Zmood and D. G. Holmes, "Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 18, no. 3, pp. 814–822, 2003.
- [8] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre and A. Poh Chiang Loh, "Proportional-Resonant Controllers and Filters for Grid-Connected Voltage-Source Converters" IEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol. 153, Issue 5, Sep., 2006
- [9] Raphael Marguet, "Development of a digitally controlled low power single phase inverter for grid connected solar panel", Norwegian University of Science and Technology Department of Electric Power Engineering, Jan. 2010.

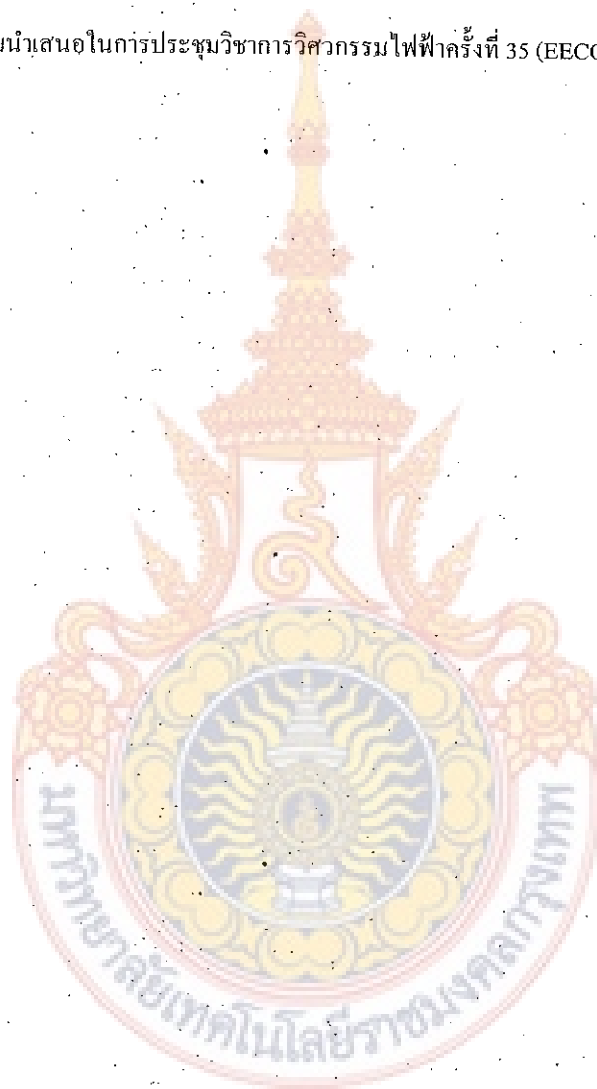
ภาคผนวก ก

บทความนำเสนอในการประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35 (EECON35) จำนวน 1 บทความ



ภาคผนวก ก

บทความนำเสนอในการประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35 (EECON35) จำนวน 2 บทความ





การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 The 35th Electrical Engineering Conference (EECON-35)

มหาวิทยาลัยกรุงเทพ และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ได้รับเกียรติให้เป็นเจ้าภาพ
ณ รอยัลฮิลล์ กอล์ฟ รีสอร์ท แอนด์ สปา นครนายก 12 - 14 ธันวาคม 2555

<http://eecon35.bu.ac.th>

20 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์-มหาวิทยาลัยกรุงเทพ :: 50 ปี มหาวิทยาลัยกรุงเทพ

คณะกรรมการจัดการประชุม

คณะกรรมการสภาวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันกรรมการสามัญ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยศรีปทุม
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยสยาม
มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
มหาวิทยาลัยธนบุรี
มหาวิทยาลัยรังสิต
มหาวิทยาลัยนเรศวร
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สถาบันกรรมการสมทบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
มหาวิทยาลัยรามคำแหง
มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
มหาวิทยาลัยราชธานี
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
มหาวิทยาลัยพะเยา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยศิลปากร
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering Conference, EECON) เป็นการประชุมวิชาการระดับชาติที่มีมาตรฐานสูงระดับสากล ดำเนินการโดยคณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าที่ประกอบด้วย คณะกรรมการสภาวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าแห่งประเทศไทย ผู้แทนจากสถาบันกรรมการสถาบัน ผู้แทนจากสถาบันกรรมการสมทบ และคณะกรรมการดำเนินงานจัดการประชุมจากสถาบันกรรมการสามัญที่ได้รับเกียรติให้เป็นเจ้าภาพในแต่ละปี เริ่มจัดประชุมครั้งแรกเมื่อ ปี 2521 จนถึงปัจจุบัน ปี 2555 เป็นครั้งที่ 35 ซึ่งมหาวิทยาลัยกรุงเทพ และ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ได้รับเกียรติให้เป็นเจ้าภาพดำเนินการจัดการประชุม

สาขาของบทความ

ไฟฟ้ากำลัง (PW)	การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)	คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)	ไฟโตนิกส์ (PH)
ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)	วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)
อิเล็กทรอนิกส์ (EL)	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

การส่งบทความ

บทความจัดทำเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ความยาวไม่เกิน 4 หน้ากระดาษ A4 ส่งผ่าน
ขบวนการออนไลน์ โดยขั้นตอนและรายละเอียดในการส่งบทความสามารถดูได้ที่เว็บไซต์ของ
สภาวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าแห่งประเทศไทย (EECON Council)
<http://www.eecon-thailand.org> หรือที่เว็บไซต์ของการประชุม <http://eecon35.bu.ac.th>

การพิจารณาและการนำเสนอบทความ

การพิจารณาบทความทำโดยผู้พิจารณาบทความระดับวิชาชีพชั้นสูง (Professional Reviewers)
ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ได้รับการคัดเลือกตรงตามสาขาจากสภาวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าแห่งประเทศไทย
และจากสถาบันกรรมการที่เป็นกรรมการสามัญทั่วประเทศ บทความที่ผ่านการพิจารณาจะได้รับ
การตีพิมพ์ใน Proceedings ของ EECON-35 และต้องมีการนำเสนอในที่ประชุมทุกบทความ
บทความที่เสนอในแต่ละสาขาจะได้รับคัดเลือกในขั้นตอนแรกจากผู้พิจารณาบทความ และจะได้รับการ
พิจารณาตัดสิน ในขั้นตอนสุดท้ายโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่ได้รับการเสนอชื่อจากสภาวิชาการ
วิศวกรรมไฟฟ้าแห่งประเทศไทย และจากสถาบันที่เป็นกรรมการสามัญทั่วประเทศ

กำหนดการสำคัญ

หมดเขตรับบทความ	13	กรกฎาคม 2555
แจ้งผลการพิจารณาบทความ	7	กันยายน 2555
หมดเขตรับบทความฉบับสมบูรณ์	21	กันยายน 2555
การนำเสนอบทความ	12-14	ธันวาคม 2555
การลงทะเบียนของผู้นำเสนอบทความ	21	กันยายน 2555
การลงทะเบียนล่วงหน้า	5	ตุลาคม 2555

ต้องการข้อมูลเพิ่มเติมกรุณาติดต่อ

1) ดร.วิมล วัฒนสุข โทรศัพท์ 087-069-8729
2) ผศ.ดร.สุพจน์ สุขโงรามณ โทรศัพท์ 086-565-5305
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ (วิทยุแจ้ง) 9/1 หมู่ 5 ถนนลาดพร้าว แขวงคลองจั่น เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 12120
โทรศัพท์ 02-902-0299 ต่อ 2620 โทรสาร 02-516-8564
email: eecon35@hotmail.com, eecon35@bu.ac.th

CALL FOR PAPERS

สารบัญ

PE003	การศึกษา State Trajectory Control แบบความถี่คงที่สำหรับ วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ มนทล นาวงษ์ ¹ นนทวัฒน์ จุลเดชะ ² ¹ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต ² สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	361
PE004	คุณสมบัติซีพียูคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลด้วยเทคนิคอินเวอร์สฟ สวรรณพล กลุ่มทรัพย์ บุญช่วย เจริญผล ¹ และพินิจ เทพสาธร์ ² ¹ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ² มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์	365
PE005	A Control Technique to Actively Damp Oscillation in the Input LC Filter of Single Phase Full Bridge Rectifier กำจัด ใจตรง ¹ และ ปิยะนัฐ ใจตรง ² ¹ วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม ² มหาวิทยาลัยชนบุรี	369
PE006	การวิเคราะห์วงจรเรียงกระแสคลาสดีอีแบบกึ่งบริดจ์ สำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้า กระแสตรงเรโซแนนท์ส่วนหน้าแบบพูซ-พูล ภายใต้การสวิตช์ขณะแรงดันไฟฟ้า เป็นศูนย์ รัชชฤทัย ทิพนเนตร ¹ ไชยรินทร์ อัครวโรดม ¹ และ กมล จิรเสรีอมรกุล ¹ ¹ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ² มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	373
PE007	วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบควอซีเรโซแนนซ์ที่มีประสิทธิภาพและ อัตราขยายแรงดันสูง อัครภณ บุญแจ่ม อธิภา บุญญาอรุณเนตร และ สาคร โพธิ์งาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	377
PE008	การออกแบบและทดสอบสมรรถนะวงจรควอดเรติกบัสท์คอนเวอร์เตอร์ (Design and Performance Evaluation of a Quadratic Boost Converter) กวีวัชร ทัตติวงษ์ เกศสุดา การะเกษ ชนินทร์ บุญลักษณ์านุสรณ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	381

การควบคุมมอดูลสี่ขั้วสี่คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลด้วยเทคนิคอินเตอร์ลีฟ

Control of 4 Modules Parallel Boost Dc to dc Converter using Interleaved Technique

สรรรถพล คุ้มทรัพย์¹ บุญช่วย เจริญผล¹ และปิ่นิจ เทพสาร²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120 E-mail: kobmoo@hotmail.com

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

ถนนรังสิต-นครนายก อําเภองครักษ์ จังหวัดนครนายก E-mail: pinit@swu.ac.th

PE004

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและควบคุมวงจรมอดูลสี่ขั้วสี่คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล เพื่อลดกระแสกระเพื่อมทางด้านอินพุตและสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้มากขึ้น โดยใช้วงจรมอดูลสี่ขั้วสี่คอนเวอร์เตอร์จำนวน 4 วงจรต่อขนานกัน แต่ละวงจรทำงานในโหมดกระแสไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำต่อเนื่อง การออกแบบควบคุมเป็นตัวควบคุมกระแสแบบพีไอ (PI Controller) และใช้เทคนิคอินเตอร์ลีฟ (Interleaved Technique) วงจรมอดูลสี่ขั้วสี่คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล สามารถยกระดับแรงดันเอาต์พุตคงที่ 60 V มีกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด 1 kW โดยควบคุมการแบ่งจ่ายกระแสให้มีความเท่ากันในแต่ละโมดูล จากผลการทดสอบวงจรมอดูลสี่ขั้วสี่คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล ที่สร้างขึ้นสามารถจ่ายแรงดันเอาต์พุตเป็นไปตามข้อกำหนด และมีประสิทธิภาพเฉลี่ย 90.33%

คำสำคัญ: มอดูลสี่ขั้วสี่คอนเวอร์เตอร์, ตัวควบคุมแบบพีไอ, เทคนิคอินเตอร์ลีฟ

Abstract

This article presents the design and control of a 4 modules parallel boost dc to dc converter in order to reduce the input ripple current and increase power. The boost dc to dc converter is 4 parallel circuits. The controller is a Proportional plus Integrator (PI controller) and using an interleaved control technique for decreasing input current ripple. The 4 modules parallel boost dc to dc converter step up output voltage to 60 V. The interleaved technique controlled the current to a value that equal in each module. The results shown that 4 modules parallel boost dc to dc converter are built to conform the output voltage regulation. The average of the current in each module was similar. The average efficiency of the purposed system is 90.33%

Keywords: Boost dc to dc converter, PI Control, Interleaved Technique

1. บทนำ

ในปัจจุบันได้สนใจพลังงานสะอาดที่ได้จากธรรมชาติมาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า และพลังงานทางเลือกใหม่ที่น่าสนใจ คือ เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงและไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ แต่จะแรงดันไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันต่ำจึงใช้วงจรมอดูลสี่ขั้วสี่คอนเวอร์เตอร์ [1] เพื่อให้แรงดันมีขนาดสูงขึ้น และเพื่อให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สูงได้ จึงนำวงจรมอดูลสี่ขั้วสี่คอนเวอร์เตอร์มาขนานกัน [2], [3] ซึ่งเป็นการลดความร้อนเนื่องจากการสวิตช์ ทำให้ลดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับตัวอุปกรณ์กำลัง ผลทำให้อายุใช้งานของวงจรกำลังและแบตเตอรี่ได้นานขึ้นในกรณีใช้งานกับรถไฟฟ้า เมื่อใช้เทคนิคอินเตอร์ลีฟในการควบคุมเวลาการสวิตช์ ให้เหลื่อมเฟสกัน 90 องศา เพื่อลดการกระเพื่อมของกระแสทางด้านอินพุตให้เรียบขึ้นและทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบดีขึ้น

บทความนี้ได้นำเสนอทฤษฎีแบบจำลองไดนามิกของมอดูลสี่ขั้วสี่คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล [4] เพื่อนำแบบจำลองที่ได้มาออกแบบตัวควบคุมพีไอในวงรอบกระแสและแรงดัน ให้สามารถแบ่งจ่ายกระแสระหว่างคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 4 โมดูลให้สมดุลกัน การควบคุมกระแสใช้การควบคุมแบบแอนะล็อก ส่วนการควบคุมแรงดันแบบดิจิทัลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F4011

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคนิคการอินเตอร์ลีฟ

เทคนิคการอินเตอร์ลีฟสามารถสร้างได้ด้วยการนำเอาสัญญาณขั้วนำสวิตช์ของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์จำนวน k วงจรมาต่อขนาน แล้วกำหนดเฟสของสัญญาณขั้วนำสวิตช์ให้เหลื่อมเวลาการทำงานกันออกไปเพื่อให้วงจรสลับการทำงานซึ่งกันและกันโดยจะแบ่งมุมการทำงานของสัญญาณขั้วนำสวิตช์ให้ครบกันพอดีในแต่ละหนึ่งรอบเวลาการทำงาน $(360^\circ/k)$ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับจำนวนวงจร (k) ที่นำมาอินเตอร์ลีฟกันและมีความถี่ของการสวิตช์เท่ากัน และหลักการนี้จะทำให้ขนาดของกระแสกระเพื่อมลดลงได้

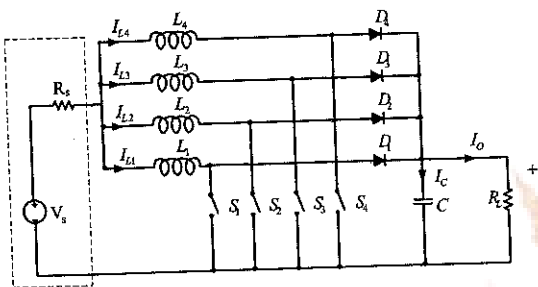
3. ออกแบบบูสตีชู้ทติชคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

3.1 ออกแบบวงจรภาคกำลัง

วงจรกำลังของวงจรบูสตีชู้ทติชคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง มอสเฟตกำลังทำหน้าที่สวิตช์ ตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุต วงจรกำลัง ต้องมีความสามารถทำงานได้ที่พิกัดกระแส และความถี่สวิตช์ที่ใช้ใน บทความนี้คือ 25 kHz สมการแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรคำนวณตาม สมการที่ (1) และใช้สมการที่ (2) ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำให้วงจร ทำงานในโหมดกระแสสลับต่อเนื่อง(CCM) [1]

$$V_o = \frac{V_s}{1-D} \quad (1)$$

$$L_{cri}(V_s, f) = \frac{V_s(1-\frac{V_o}{V_s})}{f P_o / 0.9 V_s} \quad (2)$$



รูปที่ 1 วงจรบูสตีชู้ทติชคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

3.2 แบบจำลองวงจรคอนเวอร์เตอร์และออกแบบวงจรควบคุม

โหมดกระแสต่อเนื่องสามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์เพื่ออธิบาย การทำงานและหาแบบจำลองได้โดยพิจารณาตัวแปรไดนามิก คือ $i_L(t)$, $v_c(t)$ และเงื่อนไขสวิตช์กำลังจะได้สมการที่ (3)-(4) [4]

$$\frac{di_{Lk}(t)}{dt} = \frac{V_s(t)}{L_k} - \frac{R_s}{L_k} \sum_{k=1}^4 i_{Lk}(t) \frac{1-s_k(t)}{L_k} v_c(t) \quad (3)$$

$$\frac{dv_c(t)}{dt} = \frac{1}{C} \sum_{k=1}^4 [1-s_k(t)] i_{Lk}(t) - \frac{1}{R_L C} v_c(t) \quad (4)$$

เมื่อ $s_k(t) \in \{0,1\}$ คือสัญญาณสวิตช์ $k = \{1,2,3,4\}$ คือลำดับโมดูล R_s คือความต้านทานด้านแหล่งจ่าย และ R_L คือความต้านทานโหลด และเมื่อพิจารณาให้กระแสเฉลี่ยในแต่ละโมดูลเท่ากันจะได้กระแสรวม $i_L(t)$ ตามสมการที่ (5) และสมการเชิงอนุพันธ์ในสมการที่ (6)-(7)

$$i_L(t) = \sum_{k=1}^4 i_{Lk}(t) \quad (5)$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{4}{L} v_s(t) - \frac{4}{L} R_s i_L(t) - \frac{4}{L} [1-D(t)] v_c(t) \quad (6)$$

$$\frac{dv_c(t)}{dt} = \frac{[1-D(t)]}{C} i_L(t) - \frac{1}{R_L C} v_c(t) \quad (7)$$

และเมื่อพิจารณาที่จุดทำงานมีสัญญาณรบกวนขนาดเล็กดังนี้

$$V_s(t) = V_{s0} + \tilde{v}_s(t), i_L(t) = i_{L0} + \tilde{i}_L(t), v_c(t) = V_{c0} + \tilde{v}_c(t), D(t) = D_0 + \tilde{d}(t)$$

โดยกำหนดอัตราแปลงผันแรงดัน $M_0 = V_c / V_s$ จะได้ค่า D_0, i_{L0} คือ

$$D_0 = 1 - \frac{1}{2M_0} - \sqrt{\frac{1}{4M_0^2} - \frac{R_s}{R_L}} \quad (\text{CCM}) \quad (8)$$

$$i_{L0} = \frac{M_0 V_{s0}}{R_L(1-D_0)} \quad (\text{CCM}) \quad (9)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_{CCM} \mathbf{x} + \mathbf{B}_{CCM} \mathbf{u} \quad (10)$$

เมื่อกำหนดตัวแปรสเกลคือ $\mathbf{x} = [\tilde{i}_L(t) \ \tilde{v}_c(t)]$, $\mathbf{u} = [\tilde{v}_s(t) \ \tilde{d}(t)]$

$$\mathbf{A}_{CCM} = \begin{bmatrix} \frac{R_s}{L/4} & \frac{(1-D_0)}{(L/4)} \\ \frac{(1-D_0)}{C} & -\frac{1}{R_L C} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{CCM} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L/4} & \frac{M_0 V_{s0}}{(L/4)} \\ 0 & -\frac{M_0 V_{s0}}{R_L C_0(1-D_0)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

จากนั้นทำการแปลงสมการสเกลเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่อนำไป ออกแบบตัวควบคุมวงรอบกระแสในโหมดกระแสต่อเนื่อง

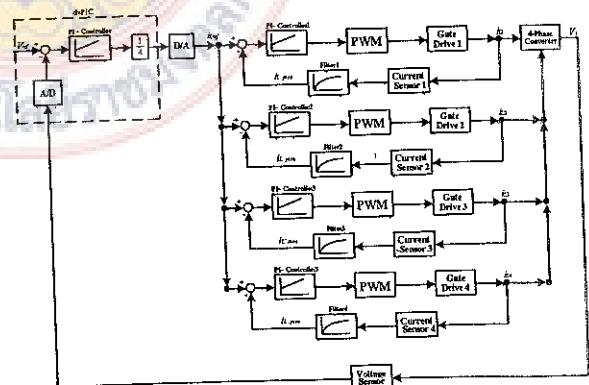
$$G_1(s) = \frac{\tilde{i}_L(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{4}{L} M_0 V_{s0} \left[s + \frac{2}{R_L C} \right] / s^2 + s \left(\frac{1}{R_L C} + \frac{4R_s}{L} \right) + \frac{4}{LC} \left\{ (1-D_0)^2 + \frac{R_s}{R_L} \right\} \quad (12)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนจากสามารถหาโพลของวงจรได้คือ

$$S_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_L C} + \frac{4R_s}{L} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2R_L C} + \frac{4R_s}{2L} \right)^2 - \frac{4}{LC} \left\{ (1-D_0)^2 + \frac{R_s}{R_L} \right\}} \quad (13)$$

$$\text{ให้ } \frac{4}{LC} (1-D_0)^2 \gg \left(\frac{1}{2R_L C} \right)^2 \Rightarrow S_{1,2} \approx -\frac{1}{2R_L C} \pm j \sqrt{\frac{4}{LC} (1-D_0)} \quad (14)$$

การควบคุมวงรอบกระแสโดยใช้การป้อนกลับด้วยตัวควบคุมแบบพีโอ บล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2 สัญญาณกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำจะถูกวัดด้วย เซนเซอร์ ($i_{Lk,med}$) ผ่านวงจรความถี่ต่ำผ่านและเปรียบเทียบกับ สัญญาณกระแสอ้างอิงก่อนเข้าตัวควบคุมพีโอที่ออกแบบด้วยวิธีทาง ความถี่ $K_{pc} = 1.85$ $K_{ic} = 142.85$ ก่อนที่จะสั่งให้สัญญาณ PWM ที่ ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ตามสัญญาณ $\tilde{d}(t)$



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมวงจรควบคุมแรงดันและกระแสแบบลูปิด

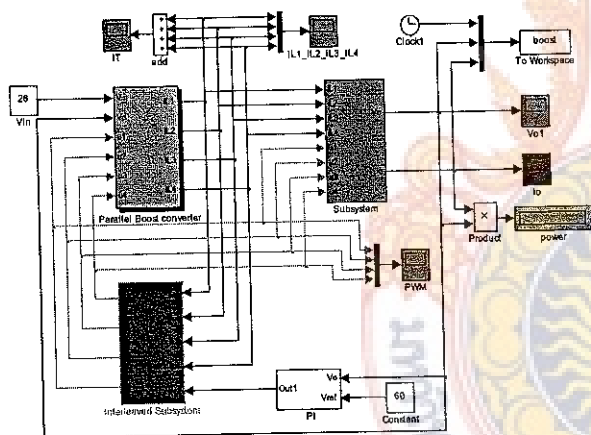
4. ผลการทดสอบ

4.1 การจำลองการทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์และค่าอุปกรณ์ที่ใช้งาน

รายการ/สัญลักษณ์	ค่า/หน่วย
แรงดันอินพุต (V_s)	26 V
แรงดันเอาต์พุต (V_o)	60 V
ตัวเหนี่ยวนำ ($L_1 - L_4$)	395 μH
ตัวเก็บประจุเอาต์พุต (C)	680 μF
ความถี่สวิตช์กิ้ง (f_s)	25 kHz
ความต้านทาน (R_s)	0.2
K_{pc}, K_{ic}	1.85, 142.85
K_{pv}, K_{iv}	0.25, 18

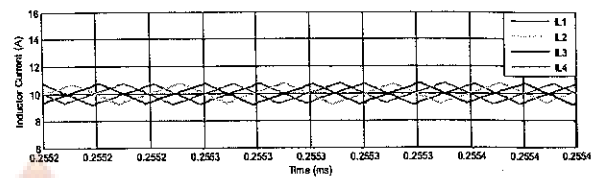
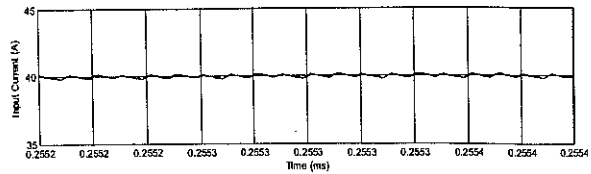
การจำลองการทำงานใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยใช้งานสวิตช์อุดมคติและนำสมการเชิงอนุพันธ์ตัวแปร i_L และ v_C ในสมการที่ (3)-(4) มาสร้างด้วยบล็อก Simulink และทดลองระบบควบคุมวงปิดด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่ออกแบบเพื่อตอบสนองในสภาวะทรานเซียน



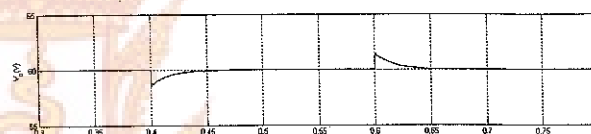
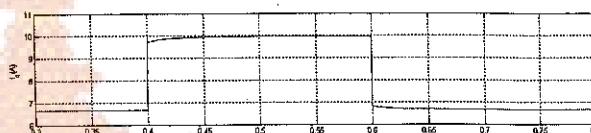
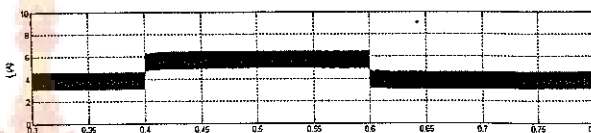
รูปที่ 3 แบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

4.2 ผลการจำลองการทำงาน

ผลการจำลองในสภาวะอยู่ตัวที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 1 kW ในรูปที่ 4 แสดงกระแสตัวเหนี่ยวนำทั้ง 4 โมดูล ซึ่งจะเห็นว่ากระแสรวมที่ได้มีกระแสกระเพื่อมที่ต่ำลง ในรูปที่ 5 แสดงผลจำลองการทำงานวงจรแรงดันขณะเปลี่ยนโหลดแบบทันทีทันใด ผลการทดลองจากวงจรต้นแบบในรูปที่ 11 เมื่อวัดกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ $i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}, i_{L4}$ แสดงได้ในรูปที่ 6 และ 7 ส่วนในรูปที่ 8 แสดงการรักษาระดับแรงดันคงที่ 60 V เมื่อมีการเปลี่ยนค่าตัวต้านทานโหลดแบบขึ้นจากกระแสอินพุต 15 A ไปที่ 25 A ในขณะทำงานแรงดันและกระแสจากวงจรต้นแบบจะแสดงค่าผ่านจอกราฟฟิคแอลซีดี

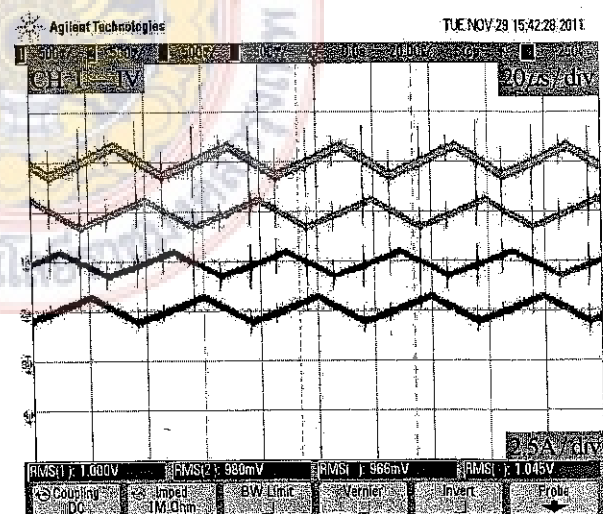


รูปที่ 4 กระแสอินพุต (i_L) และกระแสขดลวดเหนี่ยวนำ (i_{Lk})

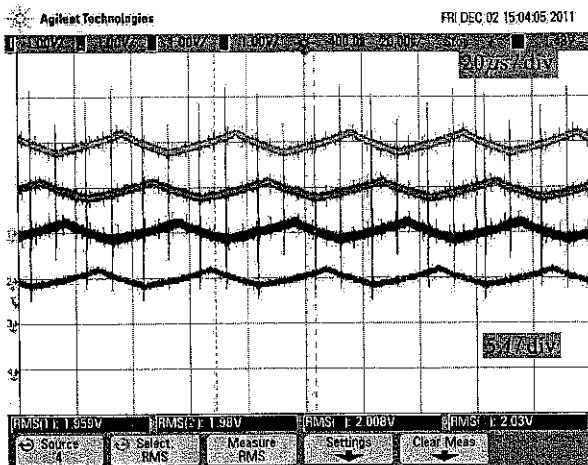


รูปที่ 5 กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ (i_L) กระแสเอาต์พุต (i_o) และแรงดันเอาต์พุต (V_o) ขณะเปลี่ยนแปลงโหลดระหว่าง 400-600W

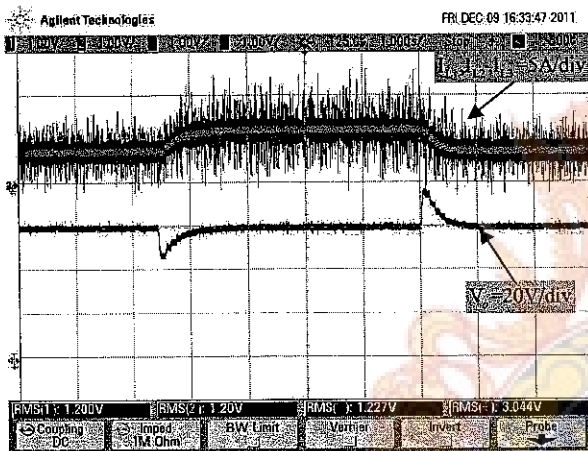
4.3 ผลการทดสอบวงจรบูสดีซีฟีดแบ็คคอนเวอร์เตอร์ 4 โมดูล



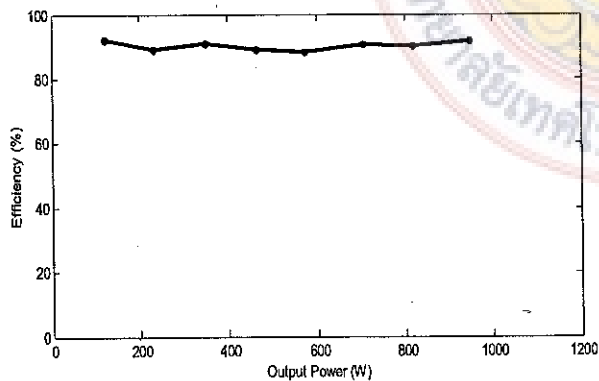
รูปที่ 6 กระแส $i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}, i_{L4}$ ที่กระแสด้านอินพุต 20 A



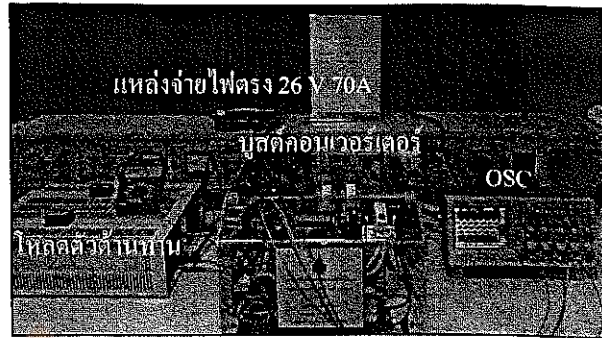
รูปที่ 7 กระแส $i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}, i_{L4}$ ที่กระแสค่านอินพุต 40 A



รูปที่ 8 กระแส i_{L1}, i_{L2}, i_{L3} และแรงดันทางด้านเอาต์พุต (V_o) ขณะเปลี่ยนแปลงโหลดระหว่าง 400-600W



รูปที่ 9 กราฟประสิทธิภาพของวงจรแบบขนาน 4 โมดูล



รูปที่ 10 ภาพวงจรต้นแบบขณะทดสอบ

5. สรุปผล

วงจรบูสต์ซีฟูดิซิคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล เป็นการนำเอาวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์มาขนานกัน เพื่อเพิ่มความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มากขึ้น และใช้เทคนิคอินเตอร์ลีฟ ทำให้การกระพือของกระแสทางด้านอินพุตมีขนาดลดลง จากผลการทดสอบการทำงานพบว่า การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ของวงจรบูสต์ซีฟูดิซิคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลจะสอดคล้องกับวงจรบูสต์ซีฟูดิซิคอนเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้น มีการแบ่งจ่ายกระแสเท่ากันเฟสละ 0 - 10 A และมีการเหลื่อมเฟสกัน 90 องศา สามารถควบคุมแรงดันทางด้านเอาต์พุตให้คงที่ 60 V สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 1 kW ประสิทธิภาพของระบบต้นแบบมีค่าเฉลี่ยที่ 90.33 % เทคนิคนี้สามารถนำไปใช้งานกับวงจรระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากเซลล์เชื้อเพลิงหรือแบตเตอรี่ในรถไฟฟ้าได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] X. Huang, X. Wang, T. Nergaard, J.-S. Lai, X. Xu, L. Zhu, "Parasitic Ringing and Design Issues of Digitally Controlled High Power Interleaved Boost Converters", IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 19, No. 5, Sep. 2004, pp. 1341-1351.
- [2] P. Thounthong, P. Sethakul, S. Rael, and B. Davat, "Design and Implementation of 2-Phase Interleaved Boost Converter for Fuel Cell Power Source," Proc. IET-PEMD 2008, York, UK, pp. 91-95.
- [3] P. Thounthong, P. Sethakul, and B. Davat "Modified 4-phase interleaved fuel cell converter for high-power high-voltage applications," ICIT'09, Monash University, pp. 440-445.
- [4] D.G. Holmes, B.P. McGrath, D. Segaran, and W.Y. Kong, "Dynamic Control of a 20 kW Interleaved Boost Converter for Traction Applications" Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS 2008, pp. 1-8.

สารบัญ

PE009	การควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงที่มีค่าตัวประกอบกำลัง สูง ด้วยตัวควบคุมพีไอที่มีการปรับตัวอย่างง่าย พิสิทธิ วิสุทธิเมธีกร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	385
PE010	การวิเคราะห์และออกแบบวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบหลายเฟส ประวิตร ศรีบริกิจ มานพ อ้อพิมาย และพิสิทธิ วิสุทธิเมธีกร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	389
PE011	A Carrier-Based Realization of Space Vector Modulation for Matrix Converters ไพบุลย์ เกียรติสุขกณารุ ¹ สมบูรณ์ แสงวงศ์วณิช ² ¹ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ² จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	393
PE012	Reactive-Power Control of Three-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules ศิวัช ชัยฤกษ์ และ สุรพงศ์ สุวรรณกวิน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	397
PE013	Front-End Power Factor Control of Novel Three-Level Back-to-Back Converters Based on Matrix Converter Theory สุรเชษฐ์ เสมอเหมือน กรวิษฐ์ นิยมเสถียร สุรพงศ์ สุวรรณกวิน และ สมบูรณ์ แสงวงศ์วณิช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	401
PE014	การควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานด้วย เทคนิครูปเพื่อใช้งานกับดีซีไมโครกริด ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข วิบูลย์ ชื่นแขก และปฏิพัทธ์ ทวนทอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	405
PE015	การควบคุมกระแสแบบสัดส่วนบวกกรีโชนนซ์สำหรับอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบ ต่อเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลังด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F2808 เอกพล อนุสุเรนทร์ และชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	409

การควบคุมกระแสแบบสัดส่วนบวกเรโซแนนซ์สำหรับอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบต่อเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลัง ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F2808

Proportional plus Resonant Current Control for Single-phase Grid Connected Inverter with TMS320F2808 Microcontroller

เอกพล อนุสุเรนทร์¹ และชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120 โทรศัพท์ 02-287-9692 E-mail : chanlit@gmail.com

PE015

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนออินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบฟูลบริดจ์สำหรับต่อเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ตัวควบคุมกระแสแบบสัดส่วนบวกเรโซแนนซ์ (Proportional plus Resonant Controller; PR) ซึ่งสัญญาณกระแสอ้างอิงรูปคลื่นไซน์จะสร้างจากผลคูณของค่ากระแสอ้างอิงกับสัญญาณชายนหนึ่งหน่วยที่ได้จากการหามุมเฟสของแรงดันการไฟฟ้า ด้วยวิธีเฟสล็อกกลุ๊ป ระบบประกอบขึ้นด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและหม้อแปลงแยกโคจรทางไฟฟ้า โดยส่วนควบคุมจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ TMS320F2808 เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันสวิตชิ่งแบบยูนิโพลาร์ ใช้ตัวควบคุมดิจิทัลสำหรับควบคุมการทำงานของระบบ ทั้งการจำลองการทำงานและการควบคุมฮาร์ดแวร์ จะใช้บล็อกคำสั่ง Real-time Embedded Coder ในโปรแกรม Matlab/Simulink ผลการทดลองได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีค่า 36 โวลต์ เมื่อผ่านหม้อแปลงแยกโคจรทางไฟฟ้าเพื่อยกระดับแรงดันเป็น 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ ขนาด 150 วัตต์

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส, เฟสล็อกกลุ๊ป, การควบคุมแบบสัดส่วนบวกเรโซแนนซ์

Abstract

This paper presented full bridge single-phase inverter for connected to the electrical distributed system with Proportional plus Resonant Controller. The sine current reference signal is generate from multiply signal of current reference and unit sine of phase-locked loop. An experimental system consists of single-phase inverter, control unit, low-pass filter and isolated transformer. The TMS320F2808 controller unit generates pulse width modulation (PWM) for unipolar switching scheme. The current and voltage signal from sensors are converted to digital signal and control. The simulation and experiment program are made by Matlab/Simulink and Real-time Embedded Coder. The result shown that output voltage inverter is 36 volt, the transformer step up voltage to 220 volt, 50 Hz at 150 watt.

Keywords: Single-phase Inverter, Phase-locked Loop and Proportional plus Resonant Current Control

1. คำนำ

ในปัจจุบันอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรแปลงผันที่มีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในด้านพลังงานทดแทนเช่น อินเวอร์เตอร์สำหรับกังหันลม อินเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีการวิจัยและพัฒนาอินเวอร์เตอร์แบบต่อเข้าระบบจำหน่าย (Grid-connected Inverter) อย่างต่อเนื่องเพื่อแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ [1] ซึ่งจะต้องมีคุณสมบัติที่สามารถเชื่อมต่อและจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และคุณภาพของแรงดันและกระแสไฟฟ้าอยู่ในมาตรฐานที่ยอมรับได้เช่น IEEE Std.1547-2003 [2]

คณะผู้วิจัย [3]-[4] ได้ศึกษาการควบคุมแบบสัดส่วนบวกเรโซแนนซ์ (Proportional plus Resonant Current Control; PR) เพื่อให้สามารถควบคุมกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในแกนหยุดนิ่ง (Stationary frame) ได้ โดยข้อเด่นของตัวควบคุมคือทำให้ค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ด้วยเป็นศูนย์ที่ไฟฟ้ากระแสสลับ 50 เฮิรตซ์ ต่อมาผู้วิจัย [5] ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบต่อเข้าระบบจำหน่ายด้วยการควบคุมกระแสในแกนหมุน (Rotating frame) และแกนหยุดนิ่ง และสุดท้ายผู้วิจัย [6] นำเสนออินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่ควบคุมด้วย Matlab/Simulink แต่ยังไม่สามารถต่อเข้าระบบจำหน่ายได้เนื่องจากในวงจรกระแสใช้ตัวควบคุมแบบพีแท่นั่น

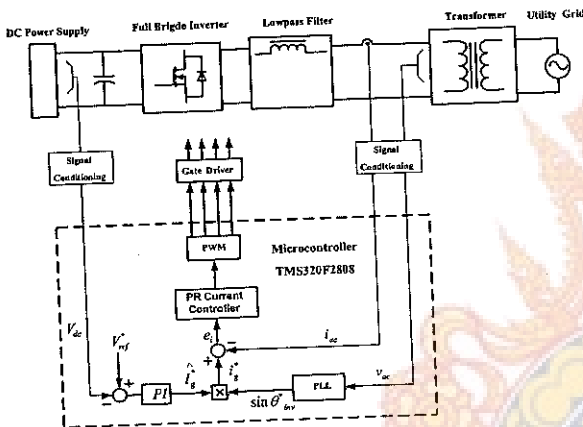
ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาการทำงานของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยใช้เทคนิคการควบคุมการเชื่อมต่อนับด้วยเฟสล็อกกลุ๊ปหนึ่งเฟสเพื่อให้สามารถซิงโครไนซ์เข้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพและสามารถพัฒนาอัลกอริทึมควบคุมการแยกอิสระของอินเวอร์เตอร์ได้ ส่วนการควบคุมในวงจรแรงดันจะใช้ตัวควบคุมแบบพีโอ และวงจรกระแสจะใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกเรโซแนนซ์ซึ่งเป็นการควบคุมบนแกนหยุดนิ่งและให้ค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ด้วยเป็นศูนย์ บทความนี้จะนำเสนอ

ทฤษฎีการสร้างสัญญาณขาพัลส์วิดท์มอดูเลชัน ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์จากบริษัท Texas Instruments เบอร์ TMS320F2808 ซึ่งสามารถโปรแกรมด้วย Matlab โดยใช้โมดูลสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันและสวิทซ์ซิงแรงดันแบบยูนิโพลาร์เพื่อไปควบคุมการทำงานของสวิทซ์ในอินเวอร์เตอร์ ในส่วนการออกแบบจะนำเสนอการสร้างตัวแบบสัดส่วนบวกรหัสและเฟสล็อกลูป [4], [5]

2. ทฤษฎี

2.1 บล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบค่อเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลัง

บล็อกไดอะแกรมอินเวอร์เตอร์ที่จะใช้ในการเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านั้นประกอบไปด้วย 5 ส่วนด้วยกันคือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง วงจรอินเวอร์เตอร์ การควบคุมแบบดิจิตอล วงจรกรองความถี่ต่ำ และหม้อแปลงแยกโคตทางไฟฟ้าดังรูปที่ 1 ต่อไปนี้ [6]



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของระบบอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบค่อเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลัง

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ นักศึกษาจะสามารถใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 58 โวลต์ เพื่อความปลอดภัย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ และกังหันลมขนาดเล็กได้
2. ส่วนวงจรกำลัง ซึ่งประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสทำหน้าที่ในการแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
3. วงจรกรองทำหน้าที่กรองสัญญาณฮาร์มอนิกจากการสวิทซ์ความถี่สูงของวงจรกำลังในการทดลองใช้ตัวเหนี่ยวนำ (L)
4. ส่วนควบคุมซึ่งประกอบด้วยตัวตรวจจับสนและความถี่และแรงดันสั่งเข้าวงจรออปแอมป์เพื่อปรับระดับสัญญาณแรงดันให้อยู่ในช่วง 0-3.3 โวลต์ก่อนแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอลด้วยบล็อก A/D ในตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล ส่วนวงจรจับนำคของมอสเฟตในอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แยกโคตทางแสงระหว่างวงจรควบคุมกับวงจรกำลัง และการโปรแกรมด้วย

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลเบอร์ TMS320F2808 ทำหน้าที่ตรวจจับมุมเฟสด้วยอัลกอริทึมเฟสล็อกลูปในหัวข้อ 2.2 และตัวควบคุมวงรอบแรงดันและกระแส

5. หม้อแปลงแยกโคตทำหน้าที่แยกโคตทางไฟฟ้าและยกระดับแรงดันขึ้นเป็น 220 โวลต์เพื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า

2.2 เฟสล็อกลูปแบบหนึ่งเฟส

บล็อกไดอะแกรมเฟสล็อกลูปหนึ่งเฟสในรูปที่ 2 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดได้ดังสมการที่ (1)

$$F_{OL}(s) = PD(s) \cdot LF(s) \cdot VCO(s) \\ = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = \frac{k_p s + \frac{k_p}{T_i}}{s} \quad (1)$$

และสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด

$$H_o(s) = \frac{\Theta'(s)}{\Theta(s)} = \frac{LF(s)}{1 + LF(s)} = \frac{K_p s + \frac{K_p}{T_i}}{s^2 + K_p s + \frac{K_p}{T_i}} \quad (2)$$

เมื่อป้อนกลับแบบวงปิดดังในสมการที่ (2) จะมีฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองที่มีลักษณะเหมือนวงจรรองความถี่ต่ำทำหน้าที่กรองสัญญาณความถี่สูงและสัญญาณรบกวนที่เข้ามาในระบบ เมื่อเทียบกับสมการมาตรฐานอันดับสองจะได้ค่า ω_n, ζ ตามสมการที่ (3) [8]

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_p}{T_i}} \quad \text{และ} \quad \zeta = \frac{\sqrt{K_p T_i}}{2} \quad (3)$$

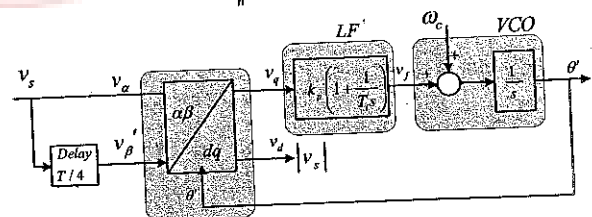
จากผลตอบสนองทางเวลาของระบบอันดับสองสามารถหาช่วงเวลาเข้าที่ (t_s) เพื่อให้ผลตอบสนองทางเวลาเข้าใกล้ผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัวโดยมีค่าผิดพลาดไม่เกิน 5 % เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตแบบขั้น (step)

$$t_s = 4.6\tau \quad \text{เมื่อ} \quad \tau = \frac{1}{\zeta \omega_n} \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) เมื่อกำหนดช่วงเวลาเข้าที่ของฟังก์ชันถ่ายโอนของสมการที่ (2) แล้วก็จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอของเฟสล็อกลูปได้จากสมการที่ (5)-(6) ดังนี้

$$K_p = 2\zeta \omega_n = \frac{9.2}{t_s} \quad (5)$$

$$T_i = \frac{2\zeta}{\omega_n} = \frac{t_s \zeta^2}{2.3} \quad (6)$$



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมเฟสล็อกลูปแบบหนึ่งเฟส

2.3 ตัวควบคุมวงรอบกระแสแบบสัดส่วนบวกกรีโชนแนซ

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกรีโชนแนซมีพื้นฐานบนตัวควบคุมแบบอินทิเกรตตามสมการที่ (8) และเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบอินทิเกรตจำนวนสองตัวที่สัญญาณกระแสสลับความถี่กรีโชนแนซ 50 Hz ก็ทำให้ความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวของสัญญาณเป็นศูนย์พิจารณาจากรูปที่ 6 และสามารถจัดสัญญาณรบกวนที่ความถี่ฮาร์โมนิกที่ต้องการได้ [4]

$$G_{AC}(s) = G_{DC}(s - j\omega) + G_{DC}(s + j\omega) \quad (7)$$

เมื่อ $G_{AC}(s)$ แทนสัญญาณแทนพหุนาม

$$G_{DC}(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{K_I}{s} \rightarrow G_{AC}(s) = \frac{2K_I s}{s^2 + \omega^2} \quad (8)$$

สมการที่ (9) เป็นพหุนามตัวควบคุมสัดส่วนบวกกรีโชนแนซที่ฮาร์โมนิกอันดับ 3, 5, 7 เพื่อลดความเพี้ยนของสัญญาณกระแสสลับ

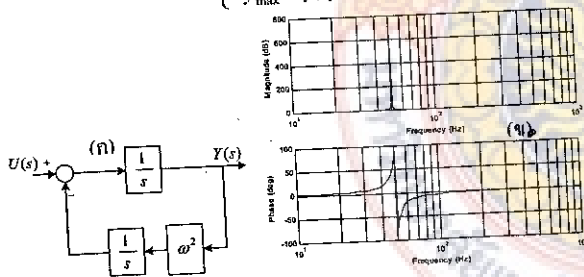
$$G_h(s) = \sum_{h=3,5,7} \frac{2K_{h,s}}{s^2 + (h\omega)^2} \quad (9)$$

การสร้างตัวควบคุมในสมการที่ (10) ทำได้โดยใช้ตัวอินทิเกรเตอร์จำนวนสองตัวป้อนกลับด้วยอัตราขยาย ω^2 ดังในรูปที่ 3ก และสามารถหาผลตอบสนองทางความถี่ในรูปที่ 3ข จะสังเกตว่าอัตราขยายจะมีค่าเป็นอนันต์ที่ความถี่ 50 Hz

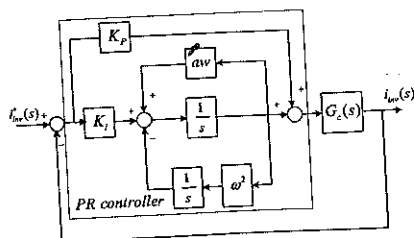
$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{s}{s^2 + \omega^2} \Leftrightarrow \begin{cases} Y(s) = \frac{1}{s}[U(s) - V(s)] \\ V(s) = \frac{1}{s}\omega^2 Y(s) \end{cases} \quad (10)$$

ส่วนในรูปที่ 4 แสดงการสร้างตัวควบคุมที่มีการแก้ไขไว้นัดซ์ตามสมการที่ (11)

$$aw = \begin{cases} y_{\max} - y, & y > y_{\max} \\ -y_{\max} - y, & y < -y_{\max} \end{cases} \quad (11)$$



รูปที่ 3 (ก) บล็อกไดอะแกรมการสร้างตัวควบคุม (ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวควบคุมที่ค่า $K_p = 1$, $K_I = 20$, $\omega = 314 \text{ rad/s}$



รูปที่ 4 ตัวควบคุมสัดส่วนบวกกรีโชนแนซที่มีการแก้ไขไว้นัดซ์

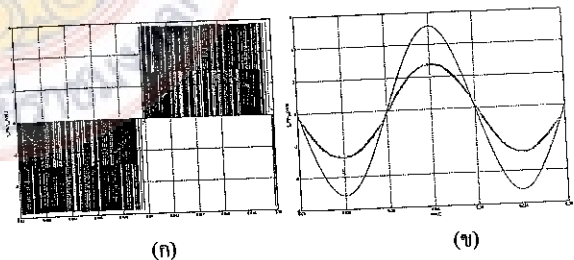
3. การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบต่อเข้าระบบจำหน่าย

จากการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบยูนิโพลาร์ ผลการจำลองได้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 5 (ก) และหาสเปกตรัมของแรงดันได้ THD , 1.6 % แรงดันและกระแสเมื่อผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแล้วจะเห็นว่าได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 36 โวลต์ก่อนเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อยกระดับแรงดันไฟฟ้าเป็น 220 โวลต์ และผลการเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่ายดังในรูปที่ 6 ได้กระแสเอาต์พุตที่กริดมีค่า THD , 1.91 %

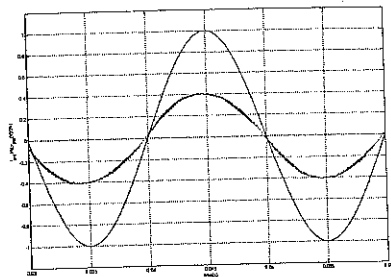
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานและควบคุมแบบ Real-time ด้วย Matlab/Simulink

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
แรงดันอินพุต (V_{dc})	58	V
แรงดันเอาต์พุต (V_{inv})	36	V
ตัวเหนี่ยวนำด้านเอาต์พุต (L_{ac})	1.5	mH
ความถี่สวิชชิงจรัล (f_s)	10	kHz
ตัวควบคุมพีอาร์วงรอบกระแส (K_{pc}, K_{ic})	10, 500	
ตัวควบคุมพีอาร์วงรอบแรงดัน (K_{pv}, K_{iv})	0.02, 5	
หม้อแปลงแยกโคจรทางไฟฟ้า	36/220	

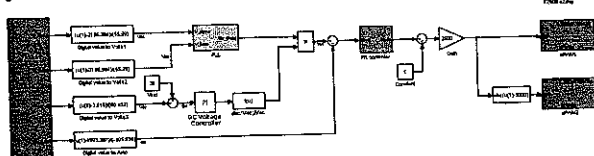
การควบคุมอินเวอร์เตอร์โดยใช้ Real-time Embedded Coder และ F2808 eZdsp Blocksets ในรูปที่ 7 เพื่อสร้างระบบควบคุมด้วยบล็อก ADC จำนวน 4 ช่องสัญญาณสำหรับกระแสและแรงดันป้อนกลับจากเซนเซอร์มาประมวลผล ส่วนสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมคลื่น PWM จำนวน 2 ช่องสัญญาณนั้นจะผ่านวงจรจับเวลาด้วยไอซีเบอร์ HCPL3180 จากนั้นส่งสัญญาณไปขับมอสเฟตกำลังเบอร์ IRF640PBF จำนวน 4 ตัวสำหรับอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส ผลการทดลองในรูปที่ 8-9 แสดงผลการทดลองกระแสและแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ขณะเชื่อมต่องานจำหน่าย



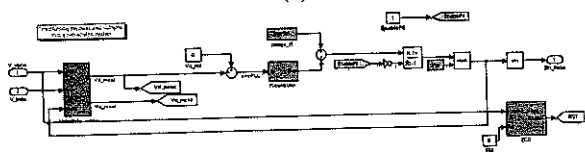
รูปที่ 5 (ก) ผลจำลองแรงดันแบบยูนิโพลาร์และกระแสอินเวอร์เตอร์ (ข) ผลจำลองแรงดันและกระแสอินเวอร์เตอร์เมื่อผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเหนี่ยวนำ



รูปที่ 6 ผลจำลองกระแสเอาต์พุต $THDi = 1.91\%$ และแรงดันกริด



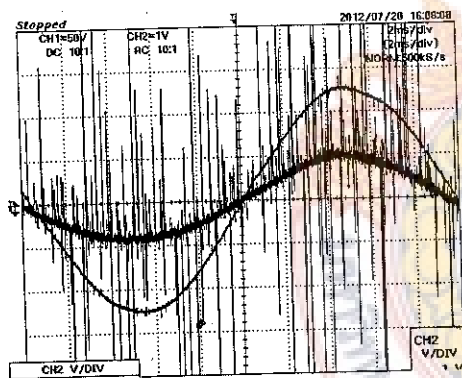
(ก)



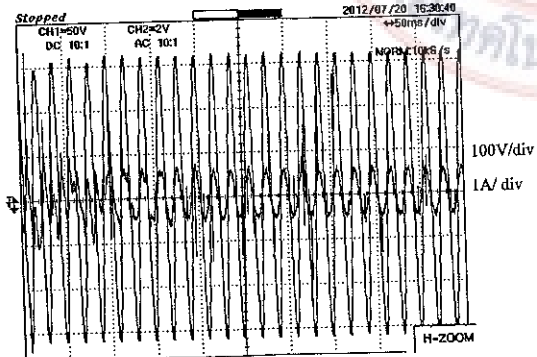
(ข)

รูปที่ 7 (ก) บล็อก Simulink สำหรับควบคุมและสร้างสัญญาณพัลส์
วิมอดดูเลชัน (ข) บล็อก Simulink เฟสล็อกูปแบบหนึ่งเฟส

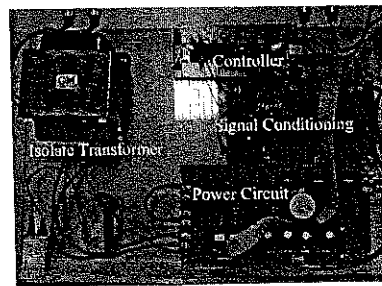
4. ผลการทดลอง



รูปที่ 8 ผลทดลองกระแสและแรงดันเอาต์พุตในสถานะอยู่ตัว



รูปที่ 9 ผลทดลองกระแสและแรงดันเอาต์พุตขณะเชื่อมต่อเข้าระบบ



รูปที่ 10 ภาพอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบต่อเข้าระบบจำหน่าย

4. สรุปผล

จากการสร้างระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบต่อเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลังด้วยการควบคุมกระแสแบบดิจิตอลของตัวควบคุมสัดส่วนบวกรีโซแนนซ์ แสดงให้เห็นว่ากระแสที่ได้จากอินเวอร์เตอร์มีความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเป็นศูนย์ รวมทั้งสามารถดึงโวลต์ได้อย่างรวดเร็ว ฮาร์ดแวร์ที่ออกแบบนี้สามารถนำไปใช้งานกับการสอนปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้เนื่องจากแรงดันอินพุตไม่สูงมาก อย่างไรก็ตามผู้วิจัยต้องพัฒนาการออกแบบตัวกรองแบบ LC หรือ LCL เพื่อลดสัญญาณรบกวนของกระแสและอัลกอริทึมการป้องกันการแยกตัวอิสระ (Anti-islanding) ของอินเวอร์เตอร์ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Dugan, R.C.; Key, T.S.; Ball, G.J., "Distributed resources standards," Industry Applications Magazine, IEEE, vol.12, no.1, pp. 27-34, Jan.-Feb. 2006
- [2] IEEE Std. 1547-2003 – "Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems," ISBN 0-7381-3720-0 SH95144, IEEE, June 2003
- [3] D. Zmood and D. G. Holmes, "Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 18, no. 3, pp. 814-822, 2003.
- [4] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre and A. Poh Chiang Loh, "Proportional-Resonant Controllers and Filters for Grid-Connected Voltage-Source Converters" IEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol. 153, Issue 5, Sep., 2006
- [5] Dong D., Thacker T., Burgos R., Boroyevich D., Wang F., Giewont B., "Control design and experimental verification of a multi-function single-phase bidirectional PWM converter for renewable energy systems," EPE '09., 8-10 Sept. 2009, pp.1-10.
- [6] Raphael Marguet, "Development of a digitally controlled low power single phase inverter for grid connected solar panel", Norwegian University of Science and Technology Department of Electric Power Engineering, Jan. 2010.