รหัสโครงการ 2555A16502004

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย   โฟโตโวลตาอิคดีซีนาโนกริด

ผู้วิจัย

อาจารย์สรรธพล คุ้มทรัพย์

อาจารย์ขวญฤทธิ์ ธวราสันติสุข

อาจารย์บุญช่วย เจริญผล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

สนับสนุนโดย สำนักบริหารโครงการวิจัยในอุดมศึกษา

และพัฒนาวิทยาลัยแห่งชาติ

สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จาก สำนักบริหารโครงการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา

อาจารย์สุระพล ทุ้มทรัพย์

หัวข้อวิจัย	โฟโตโวลตาอิคดีซีนาโนกริด
ผู้วิจัย	อาจารย์สรวงพล คุ้มทรัพย์
ผู้วิจัย	ศาสตราจารย์ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข และอาจารย์บุญช่วย เจริญผล
สาขาวิชา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ปีงบประมาณ	2555

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบคอนเวอร์เตอร์สำหรับดีซีนาโนกริดที่อาศัยการควบคุมแบบดรูป (Droop) โดยใช้อินพุตจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบโปรแกรมได้ที่ใช้ข้อมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งจริง ป้อนให้กับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ใช้การแบ่งกระแสด้วยเทคนิคอินเตอร์ลีฟ (interleaved) จำนวน 4 โมดูล เพื่อที่จะลดกระแสกระเพื่อมทางด้านอินพุตและสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดที่มีการต่อเพิ่มเข้ามาในระบบได้ แต่ละวงจรทำงานในโหมดกระแสไหลต่อเนื่อง การออกแบบควบคุมเป็นตัวควบคุมแบบพีไอ เพื่อลดการกระเพื่อมของกระแสทางด้านอินพุต การควบคุมเพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ สามารถจ่ายกระแสสูงและการแบ่งจ่ายกระแสของแต่ละวงจรไปยังภาระมีค่าใกล้เคียงกัน มีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือสูง จากผลการทดสอบพบว่าสามารถคุมระดับแรงดันเอาต์พุตที่ 60 V มีการเฉลี่ยแบ่งจ่ายกระแสในแต่ละโมดูลได้ใกล้เคียงกัน มีกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดที่ 1kW และมีประสิทธิภาพเฉลี่ย 90.33 %

Abstract

This research report presented converter system of DC Nanogrid, control with droop control technique. The input of converter system controls by DC programmable power supply and PV emulator. The parallel boost Dc to dc converter in order to reduce the input ripple current and power to the load can be further added to the system. The boost dc to dc converter with 4 parallel modules works in continuous current mode. Control design is a PI controller and comprise of an interleaved control technique for decreasing input current ripple. The performance of 4 modules parallel boost dc to dc converter is increase output voltage 60 V. The maximum power output of 1 kW can control the current to a value that was similar in each module. Results of the tests shown that 4 modules parallel boost dc to dc converter are built to conform to the output voltage regulation. The average of the current in each module was similar. The maximum output power of 1 kW and also average efficiency of the purposed system is 90.33%

สารบัญเรื่อง

	หน้า
ปกใน	2
กิตติกรรมประกาศ	3
บทคัดย่อ	4
สารบัญ	6
สารบัญตาราง	8
สารบัญภาพ	9
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	14
1.2 ขอบเขตของงานวิจัย	15
1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	15
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์	17
2.2 คุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	18
2.3 การติดตามจุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด	24
2.4 บูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ (Boost Dc to Dc Convertor)	27
2.5 วงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน	38
2.6 เทคนิคการอินเตอร์ลีฟ (Interleaved Technique)	52
2.7 ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller)	54
2.8 เทคนิคการควบคุมแบบดรูป (Droop Control technique)	57
บทที่ 3 การออกแบบงานวิจัย	
3.1 หลักการออกแบบชุดติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด	59
3.2 ส่วนประกอบหลักของโครงการวิจัย	60
3.3 คุณสมบัติแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัย	62
3.4 อัลกอริทึมติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด	63
3.5 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรม	65
3.6 การประมวลผลของส่วนโปรแกรมควบคุม	66
3.7 การขนานวงจรแปลงผันด้วยเทคนิคอินเตอร์ลีฟ	73
3.8 การออกแบบวงจรกำลังแบบขนาน 4 โมดูล	74

3.9 การออกแบบการจำลองวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล 79

บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ 92

4.2 ทดสอบการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 96

4.3 การจำลองการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล 101

4.4 ผลการจำลองการทำงาน 104

4.5 การทดสอบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล 106

4.6 สรุปผลการทดลอง 112

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลที่ได้จากการทดลอง 113

5.2 ข้อเสนอแนะ 113

5.3 ผลงานที่ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ 114

บรรณานุกรม 118

ภาคผนวก ก. โปรแกรม และรูปชิ้นงาน 119

ภาคผนวก ข. ประวัตินักวิจัย 122

ภาคผนวก ค. รายการสรุปการเงิน 130

สารบัญตาราง

ตารางที่ | หน้า

2.1 การเปรียบเทียบวงจรแม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรไฟฟ้า 40

2.2 ขนาดบอบบิ้น 44

2.3 ข้อมูลขนาดลวดทองแดง 49

2.4 ข้อมูลขนาดลวดทองแดง (ต่อ) 50

3.1 ค่าพารามิเตอร์ของแกนเฟอร์ไรต์เบอร์ EE55/55/21 70

4.1 คุณสมบัติแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น LEC-3024 93

4.2 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อ 1 แผง 94

4.3 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อ 2 แผง 95

4.4 รายการและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้จำลองการทำงาน 101

4.5 ผลการทดลองวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล 106

4.6 ประสิทธิภาพของบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล 108

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	วงจรสมมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	18
2.2	เส้นโค้งกระแส-แรงดัน (I-V) ที่แปรผันตามระดับความเข้มแสง	19
2.3	เส้นโค้งกระแส-แรงดัน (I-V) ที่แปรผันตามระดับอุณหภูมิ	20
2.4	เส้นโค้งกำลังไฟฟ้า-แรงดัน (P-V) ที่แปรผันตามระดับความเข้มแสง	21
2.5	เส้นโค้งกำลังไฟฟ้า-แรงดัน (P-V) ที่แปรผันตามระดับอุณหภูมิ	21
2.6	คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์	22
2.7	จุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเส้นโค้งกำลังไฟฟ้า-แรงดัน (P-V)	24
2.8	จุดปฏิบัติงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด และจุดปฏิบัติงานอยู่ต่ำกว่าและสูงกว่าแรงดันที่จุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด จากเส้นโค้งกำลังไฟฟ้า-แรงดัน (P-V)	26
2.9	วงจรสมมูลของวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์	27
2.10	วงจรการทำงานของวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์โหมดที่ 1 สวิตช์ปิด	28
2.11	วงจรการทำงานของวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์โหมดที่ 2 สวิตช์เปิด	28
2.12	สัญญาณแรงดันกระแสของวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์	29
2.13	วงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน	34
2.14	วงจรสมมูลขณะสวิตช์ปิด	34
2.15	วงจรสมมูลขณะสวิตช์เปิด	36
2.16	วงจรแม่เหล็กพื้นฐาน	38
2.17	ฮิสเตอรีซิสลูป	39
2.18	วงจรแม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรเทียบเคียง	40
2.19	ลักษณะของแกนเฟอร์ไรต์แบบต่าง ๆ	42
2.20	เส้นโค้งฮิสเตอรีซีสของแกนเฟอร์ไรต์	43
2.21	ค่าการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ของเนื้อสารชนิด 6H20 7H20 และ 7H10	
2.22	ลักษณะบ๊อบบิ้นของแกนเฟอร์ไรต์	43
2.23	ขนาดค่าระลอกกับดิวตี้ไซเคิลของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลโดยใช้เทคนิคการอินเตอร์ลีฟ	44
2.24	กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุกับดิวตี้ไซเคิลของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล	53
2.25	บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบพีไอ	55
2.26	ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดของตัวควบคุมแบบพีไอ	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.27	วงจรชอปเปอร์ควบคุมแบบพีไอ	56
2.28	บล็อกไดอะแกรมการควบคุมขั้นต้นด้วยวิธีดังรูป	58
3.1	VI Characteristic ของเซลล์แสงอาทิตย์	59
3.2	บล็อกไดอะแกรมของอัลกอริทึมติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดและส่วนแสดงผล	60
3.3	กราฟ VI Curve แสดงค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์	62
3.4	บล็อกไดอะแกรมของภาคควบคุม	63
3.5	อุปกรณ์และวงจรวัดแรงดัน	63
3.6	อุปกรณ์และวงจรวัดกระแส	64
3.7	วงจรแยกโดดทางแสงสำหรับขับเกต	65
3.8	ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม	71
3.9	บล็อกไดอะแกรมของบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์จำนวน 4 โมดูล	73
3.10	วงจรควบคุมแรงดันและกระแสแบบลูปปิด	79
3.11	วงจรกำเนิดพัลส์อ้างอิงโดยใช้ไอซี NE555	80
3.12	สัญญาณพัลส์อ้างอิง	81
3.13	วงจรลดความถี่สัญญาณพัลส์ให้เหลือ 25 kHz	82
3.14	สัญญาณพัลส์ที่ห่างกัน 180 องศา และความถี่ลดเหลือ 25 kHz	83
3.15	วงจรสร้างสัญญาณกระตุ้นที่มีการเลื่อนเฟสกัน 90 องศา ของชุด A	83
3.16	สัญญาณกระตุ้นที่ออกมาจากไอซี 74LS123 ของชุด A	84
3.17	วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม	85
3.18	สัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้จากทรานซิสเตอร์ 2N2222	86
3.19	วงจรมอดูเลตสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม	86
3.20	วงจรขับนำเกตโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250	87
3.21	วงจรควบคุมกระแสแบบพีไอ	89
3.22	อุปกรณ์และวงจรตรวจจับแรงดัน	89
3.23	ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสร้างตัวควบคุมแบบพีไอ	90
3.24	แผนภูมิสายงานการทำงานของโปรแกรมควบคุมของไมโครคอนโทรลเลอร์	91

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.1	ไดอะแกรมการทดสอบประเมินสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	93
4.2	กำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อ 1 แผง	94
4.3	การหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อ 2 แผง	95
4.4	ไดอะแกรมสร้างเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink	96
4.5	การต่อใช้งานเครื่อง Power Analyzer รุ่น W1600	97
4.6	ค่ากำลังงานไฟฟ้าในขณะที่ความเข้มแสงที่ต่างกัน โดยต่อกับโหลดความต้านทาน 50Ω 300W โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 30W 2 แผง ต่อขนานโดยใช้โปรแกรมที่ 1	98
4.7	ค่ากำลังงานไฟฟ้าขณะที่ความเข้มแสงที่ต่างกัน โดยต่อกับโหลดความต้านทาน 50Ω 300W โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 30W 2 แผง ต่อขนาน โดยใช้โปรแกรมที่ 2	99
4.8	ค่ากำลังงานไฟฟ้าในขณะที่ความเข้มแสงที่ต่างกัน โดยต่อกับโหลดความต้านทาน ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 30 W 2 แผงต่อขนาน ด้วยโปรแกรมที่1	100
4.9	ค่ากำลังงานไฟฟ้าในขณะที่ความเข้มแสงที่ต่างกันโดยต่อกับโหลดความต้านทานใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 30W 2 แผงต่อขนาน โดยใช้โปรแกรมที่ 2	100
4.10	แบบจำลองคณิตศาสตร์ของการควบคุมวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล	102
4.11	ภาพโบดพล็อตของอินเตอร์ลีฟ	102
4.12	ภาพโบดพล็อตของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน	103
4.13	ภาพจำลองเนื้อหาของระบบ	103
4.14	กระแสอินพุตและกระแสของขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูล	104
4.15	แรงดันเอาต์พุตและกระแสเอาต์พุต	104
4.16	แรงดันเอาต์พุตกระแสเอาต์พุตของวงจรและกระแสของขดลวดเหนี่ยวนำ ขณะเปลี่ยนแปลงภาระโหลด 400-600W	105
4.17	วงจรการทดสอบการส่งถ่ายพลังงานของคอนเวอร์เตอร์	106
4.18	กราฟความสัมพันธ์กระแส I_{Lref} กับ I_{L}	107
4.19	กราฟประสิทธิภาพของบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล	109
4.20	กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำที่มีกระแสด้านอินพุต 20 A	110
4.21	กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำที่มีกระแสด้านอินพุต 40 A	110
4.22	กระแสและแรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่กระแสอินพุต 15A ไปที่ 25A	111

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

ผนวก ก. รูปชิ้นงาน 118

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

บทที่ 1

บทนำ

ในการพัฒนาประเทศ พลังงานไฟฟ้าถือเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญมาก จากความกดดันในด้านความผันผวนของราคาเชื้อเพลิงฟอสซิล ความสนใจในปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่นจากพันธกรณีตามพิธีสารเกียวโตซึ่งมีเนื้อหาเกี่ยวกับการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพื่อป้องกันและบรรเทาปัญหาโลกร้อน และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการผลิตไฟฟ้าจากการเปิดเสรีทางพลังงาน (Deregulation) ทำให้ความสนใจเกี่ยวกับการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานธรรมชาติ หรือพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy Resources) เช่น พลังงานลม หรือพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้นอย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานธรรมชาติเหล่านี้ โดยทั่วไปแล้วกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีปริมาณที่ผันผวนเป็นอย่างมาก จึงทำให้เกิดความกังวลเกี่ยวกับผลกระทบในแง่ลบทั้งในด้านของคุณภาพไฟฟ้าและความเชื่อถือได้ของระบบในกรณีที่มีการนำแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเหล่านี้ จำนวนมากเข้ามาต่อกับระบบไฟฟ้า (Grid Connected Distributed Generation) จึงได้มีการนำเสนอแนวทางการผลิตและจ่ายไฟฟ้าภายในพื้นที่สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดเล็กโดยใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเช่นเซลล์แสงอาทิตย์ หรือเซลล์เชื้อเพลิง รวมทั้ง การผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน หรือรวมเรียกว่าแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ณ. จุดใช้งาน (Distributed Energy Resource, DER) เพื่อปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าและตอบสนองการเปลี่ยนแปลงที่ตามมาจากการเปิดเสรีด้านพลังงานไฟฟ้า เรียกว่าแนวคิดนาโนกริด หรือ NanoGrid Concept โดยถูกนำเสนอมาจากโครงการ CERTS(Consortium for Electric Reliability Technology Solutions) ในสหรัฐอเมริกา ในปี 2002 ภายใต้แนวคิดนี้ทั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กและโหลดภายในพื้นที่จะถูกมองรวมเป็นระบบกำลังขนาดเล็กระบบหนึ่ง ซึ่งให้ทั้งกำลังไฟฟ้าและความร้อน แหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กส่วนใหญ่ในระบบนี้จะต้องประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อความยืดหยุ่นในการทำงานและการควบคุม ในสภาวะที่เกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังหลัก นาโนกริดจะสามารถปลดตัวเองออกจากระบบไฟฟ้ากำลังหลัก และทำงานในแบบไอส์แลนด์ (ผลิตและจ่ายกำลังไฟฟ้าภายในพื้นที่) ได้อย่างอัตโนมัติ และสามารถเชื่อมต่อกลับเข้าไปกับระบบไฟฟ้ากำลังหลักได้เมื่อความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังหลักได้รับการแก้ไขไปแล้วโดยแนวคิดนี้ นาโนกริดจะถูกมองเป็นระบบควบคุมหน่วยหนึ่งจากระบบไฟฟ้ากำลังหลัก และจะไม่สร้างปัญหาเช่นการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า การแกว่งไกวของความถี่ไฟฟ้า เป็นต้นให้กับระบบไฟฟ้ากำลังหลัก เนื่องจากนาโนกริดไม่ได้มุ่งหมายเพื่อการขายไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังหลัก หากแต่มุ่งเน้นการผลิตและจำหน่ายไฟฟ้าในพื้นที่ของตัวเอง การ

เพิ่มขึ้นของนาโนกริด รวมถึง DER จะไม่ทำให้เกิดปัญหากับระบบไฟฟ้ากำลังหลัก ในขณะเดียวกันก็ช่วยเสริมความมั่นคงของการส่งจ่ายไฟฟ้า รวมทั้งความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าและคุณภาพไฟฟ้าในพื้นที่ของนาโนกริด ความต้องการเสริมความมั่นคงทางพลังงานของประเทศก็จะได้รับการตอบสนอง ขณะที่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการผลิตไฟฟ้าก็น้อยลงจากการใช้พลังงานหมุนเวียน และประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยรวมที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เนื่องจาก DER มีขนาดเล็กการวางแผนและติดตั้งจึงใช้เวลาและค่าใช้จ่ายน้อยกว่าระบบการผลิตขนาดใหญ่ จึงมีส่วนช่วยกระจายความเสี่ยงของการลงทุนด้านการผลิตไฟฟ้าได้อีกทางหนึ่ง จากที่กล่าวมา **อาจสามารถสรุปความสำคัญของแนวคิดนาโนกริดได้ดังนี้**

1 การรักษาคุณภาพกำลังไฟฟ้าและความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

2. การลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง

3 การลดค่าใช้จ่ายทางพลังงานหรือค่าเชื้อเพลิงลง

4 การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

5 การรักษาความมั่นคงทางพลังงาน

6.สำรองแหล่งจ่ายไฟในกรณีเกิดภัยธรรมชาติเช่น แผ่นดินไหวหรือน้ำท่วมเกิด ระบบสายส่งจ่ายไฟจากการไฟฟ้าบกพร่อง

ข้อดีของระบบดีซีนาโนกริดเมื่อเปรียบเทียบกับเอซีนาโนกริดคือ [3], [4]

1 ไม่เกิดกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในระบบส่งไฟฟ้า

2 สามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์

3.ไม่เกิดปัญหาการซิงโครไนซ์เหมือนในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

4 ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบได้เนื่องอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีความสูญเสียน้อยกว่าหม้อแปลงไฟฟ้า

5 สามารถต่อเชื่อมโยงกำลังไฟฟ้ากับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเช่น แบตเตอรี่หรืออัลตราคาปาซิเตอร์ได้ง่าย

1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.1.1 ศึกษาคุณลักษณะของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1kW เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบแปลงผันทางไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

1.1.2 ศึกษาและออกแบบดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบอัตราขยายสูง 1 kW เพื่อแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากเซลล์แสงอาทิตย์

1.1.3 ศึกษาและออกแบบดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางเพื่อใช้งานสำหรับการต่อร่วมกับแบตเตอรี่สำหรับประจุและคายประจุ

1.1.4 สร้างระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าในไมโครกริดระหว่างแหล่งจ่ายจากเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ด้วยวิธี Droop control

1.1.5 ศึกษาการใช้งานอินเวอร์เตอร์แบบหนึ่งเฟสสำหรับแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับการใช้ต่อเข้าระบบและการควบคุมกำลังไฟฟ้า

1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

1.2.1 สร้างและจำลองการทำงานระบบแปลงผันเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1kW ในระบบไฟฟ้ากระแสตรงด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

1.2.2 ออกแบบและสร้างวงจรบูสต์ดีซีคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

1.2.3 ออกแบบและสร้างบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางเพื่อแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่

1.2.4 ออกแบบและจัดหาอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส 220 V 50 Hz ความถี่สวิตช์ 10 kHz สำหรับแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

1.2.5 สร้างระบบควบคุมกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ในระบบดีซีนาโนกริดด้วยวิธี interleaved control

1.2.6 ทดสอบระบบคอนเวอร์เตอร์ในสภาวะสเตติกและไดนามิก

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.3.1 ค้นคว้าข้อมูลของการควบคุมในระบบนาโนกริด

1.3.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์และคอนเวอร์เตอร์

1.3.3 ออกแบบและสร้างดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์จำนวน 4 โมดูล

1.3.4 ออกแบบและทดสอบระบบควบคุมวงปิด

1.3.5 ทดสอบคอนเวอร์เตอร์ในสภาวะสเตติกและไดนามิก

1.3.6 วิเคราะห์ผลการทดลองและเปรียบเทียบกับผลจำลองการทำงาน

1.3.7 จัดทำรูปเล่มรายงานการวิจัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เครื่องต้นแบบคอนเวอร์เตอร์ผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการวิจัยด้านพลังงานทดแทน

1.4.2 ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ในระบบนาโนกริดซึ่งสามารถที่เพิ่มพิกัดและกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้นได้ตามต้องการ

1.4.3 ระบบสามารถใช้งานเป็นเครื่องมือวิจัยทางด้านการผลิตไฟฟ้านาโนกริดจากพลังงานทดแทนได้

1.4.4 ได้ประยุกต์ใช้ความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและระบบควบคุมร่วมกับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน

บทที่ 2

ทฤษฎี

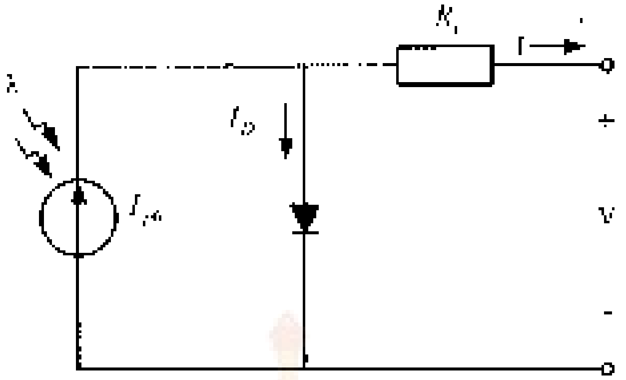
ในการออกแบบและสร้างระบบโฟโตโวลตาอิกชนิดเชื่อมต่อกริดด้วยฟลายแบคอินเวอร์เตอร์โดยอาศัยการควบคุมกระแสแบบอินเตอร์ลีฟ (interleaved technique) เพื่อเป็นการเพิ่มกำลังไฟฟ้าและลดความเครียดที่อุปกรณ์กำลัง ยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ในส่วนควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดใช้ทดลองอัลกอริทึมแบบรบกวนและสังเกตการณ์ และแบบความนำส่วนเพิ่ม ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นวัสดุชนิดสารกึ่งตัวนำที่ดูดซับแสงอาทิตย์และแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า เซลล์ส่วนใหญ่เป็นเซลล์จำพวกซิลิคอน ซึ่งเป็นส่วนประกอบของรอยต่อพีเอ็น โดยถูกสร้างเป็นแผ่นบางๆหรือเป็นชั้นของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ มีพฤติกรรมเป็นสนามไฟฟ้าโดยมีประจุบวกอยู่ด้านใต้แผง และประจุลบอยู่ทางด้านหน้าแผง (ด้านรับแสงอาทิตย์) เมื่อพลังงานแสงอาทิตย์(ประจุโฟตอน) กระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โฟตอนจะชนอะตอมภายในเซมิคอนดักเตอร์ ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนแตกตัวออกไป โดยอิเล็กตรอนวิ่งชนอะตอมที่อยู่ถัดไปเรื่อยๆ จะเกิดการถ่ายเทพลังงานเกิดขึ้น การที่อิเล็กตรอนวิ่งจากขั้วลบไปขั้วบวกนั้น ถ้ามองในรูปแบบวงจรสมมูลทางไฟฟ้า อิเล็กตรอนแทนด้วยค่ากระแสโฟโต I_{ph} *(photo current)* โดยในที่นี้คุณลักษณะของกระแส-แรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีคุณลักษณะเส้นกราฟที่ไม่เป็นเชิงเส้นเหมือนกับไดโอด

2.1.1 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

ในสภาวะที่ไม่มีแสง เซลล์แสงอาทิตย์จะไม่สามารถจ่ายพลังงานออกมาได้ ซึ่งทำงานเสมือนเป็นไดโอด โดยไม่จ่ายทั้งแรงดันและกระแส อย่างไรก็ตามถ้าเซลล์แสงอาทิตย์นี้ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายภายนอก เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิต I_D ออกมา เรียกกระแสนี้ว่า กระแสไดโอด (diode current หรือ dark current) โดยรูปแบบวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ในระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ถูกรวมเข้าด้วยกันเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการเชื่อมต่อเซลล์ในลักษณะอนุกรมกัน การพิจารณาถึงวงจรสมมูลของแบบจำลอง นำไปสู่สมการสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการเชื่อมต่อในลักษณะดังกล่าว โดยที่แบบจำลองดังกล่าวประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแส I_{ph} ไดโอดและความต้านทานอนุกรม R_s ซึ่งแทนค่าความต้านทานภายในของเซลล์แต่ละเซลล์ โดยกระแส I คือผลต่างระหว่างกระแสโฟโต I_{ph} และกระแสของไดโอด I_D ดังนี้

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s(e^{q(V+IR_s)/nkT_c} - 1) \qquad (2.1)$$

เมื่อ n คือแฟกเตอร์ทางอุดมคติ k คือค่าคงที่โบลซ์มานน์ T_c คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ของเซลล์ q คือประจุไฟฟ้า และ V คือแรงดันตกคร่อมเซลล์โดย I_s คือกระแสอิ่มตัวย้อนกลับซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมินอกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีการเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมแล้วยังสามารถทำการเชื่อมต่อในลักษณะขนานกันได้ เพื่อให้ได้ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าแก่ระบบตามที่ต้องการ

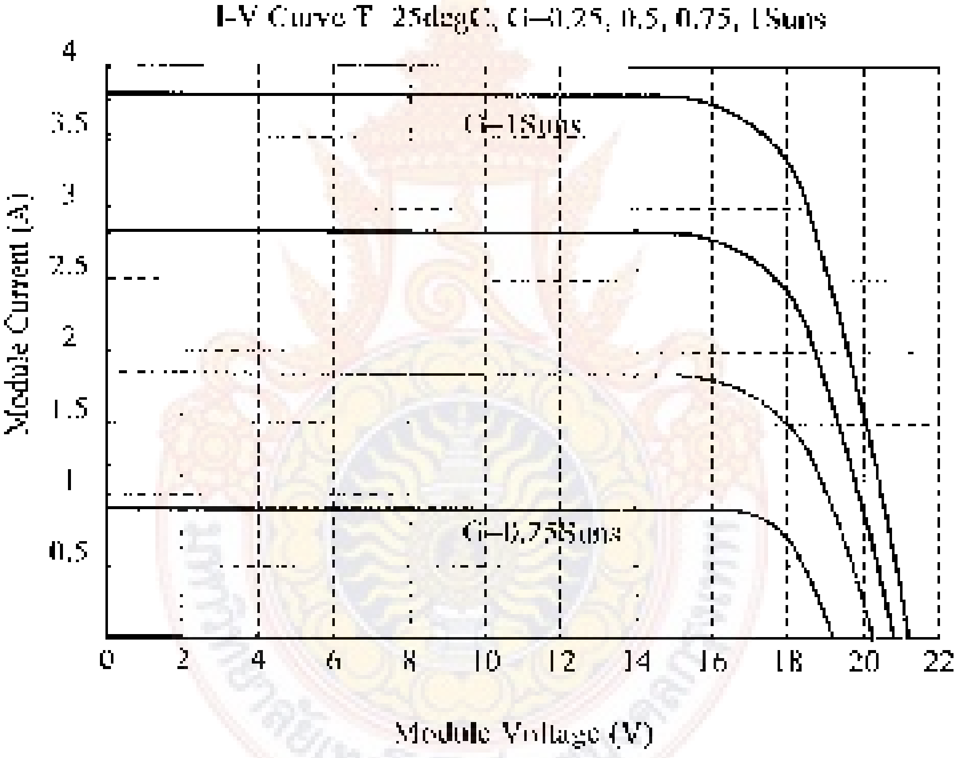
2.2 คุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำมาใช้ในการหาพลังงานเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชุดติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะถูกนำมาควบคุมการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของกระแส–แรงดัน และ กำลังไฟฟ้า-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเป้าหมายของชุดติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดคือเพื่อทำให้แน่ใจว่าระบบจะทำงานใกล้กับจุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่ออยู่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม สามารถให้ประสิทธิภาพที่

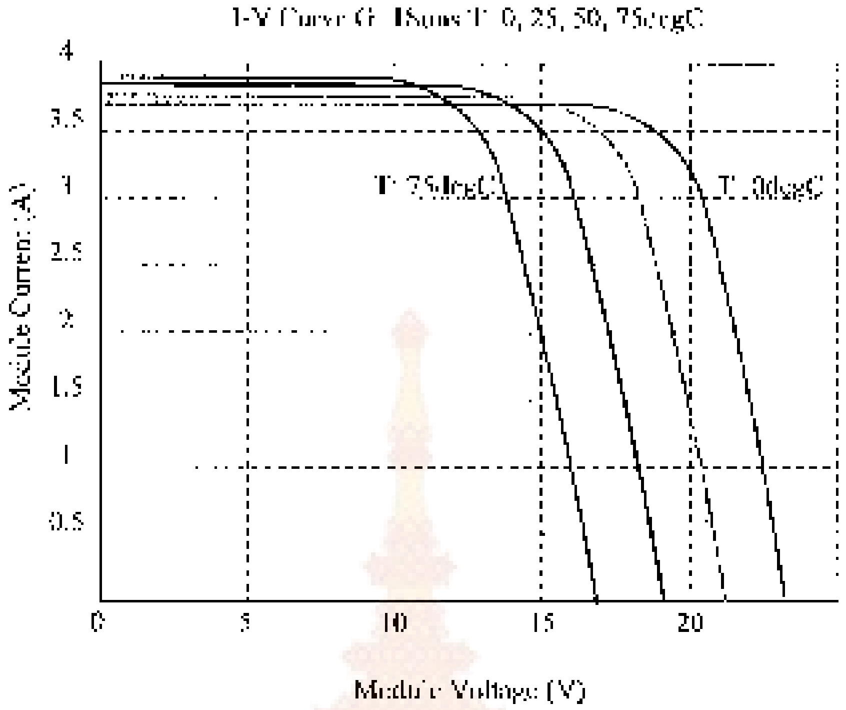
สูง รักษาการติดตามในช่วงกว้างของสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงและให้ค่าเอาต์พุตกำลังได้ตามที่ต้องการ

2.2.1 คุณลักษณะของกระแสและแรงดัน

ในการศึกษาคุณลักษณะของกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะทำการวิเคราะห์จากสมการข้างต้น โดยการเลือกค่าอุณหภูมิและความเข้มแสงแทนลงในสมการและพล็อตกราฟกระแส-แรงดัน จะเห็นว่ากระแสเอาต์พุต I ของแผงจะมีอิทธิพลอย่างมาก โดยการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงขณะที่แรงดันเอาต์พุต V ยังคงประมาณคงที่ และสำหรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งจะเห็นได้จากแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง ในขณะที่กระแสแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงด้วยเหตุนี้เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำลง



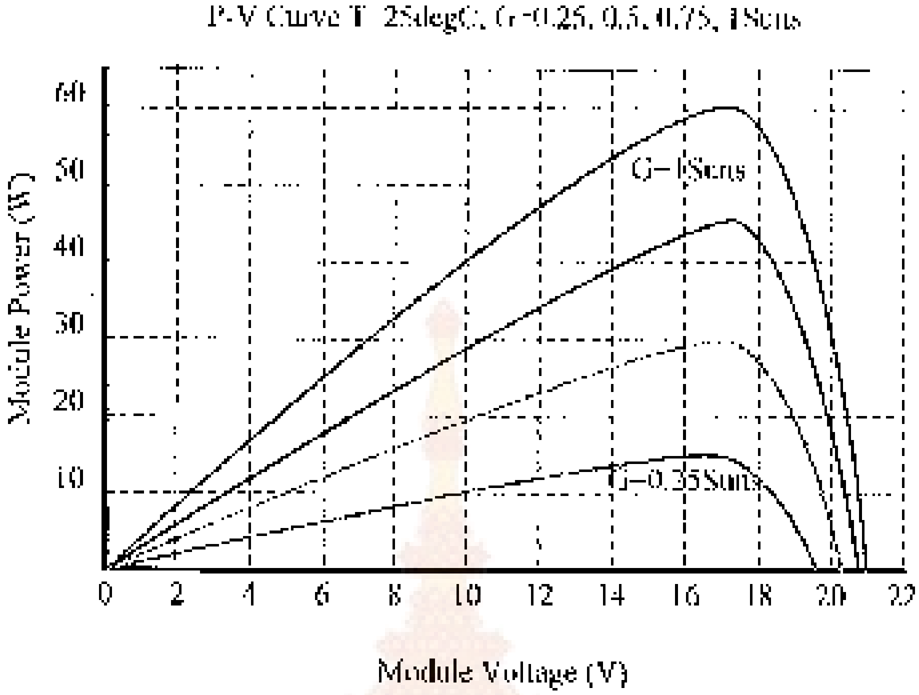
รูปที่ 2.2 เส้นโค้งกระแส-แรงดัน (I - V) ที่แปรผันตามระดับความเข้มแสง



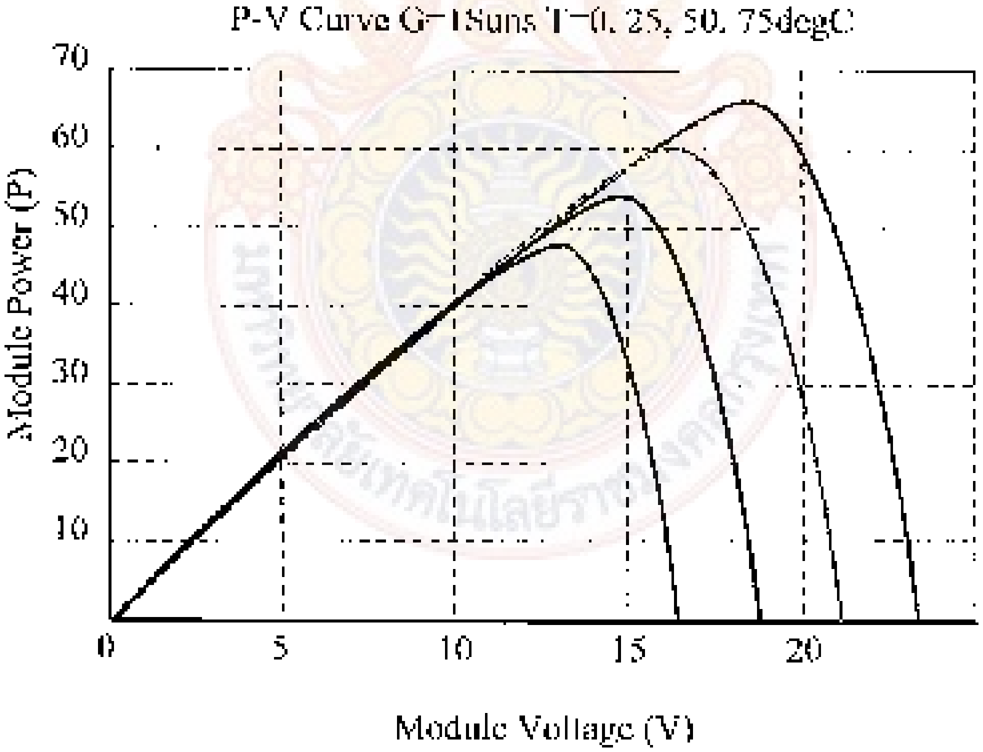
รูปที่ 2.3 เส้นโค้งกระแส-แรงดัน ($I - V$) ที่แปรผันตามระดับอุณหภูมิ

2.2.2 คุณลักษณะของกำลังไฟฟ้า-แรงดัน

คุณลักษณะของกำลังไฟฟ้า-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้มาจากคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน ส่วนความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูงสุด $P = V \times I$ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลงอย่างมาก สำหรับการลดลงของความเข้มแสง และ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตถูกลดลงโดยการเพิ่มอุณหภูมิของแสง ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่กำหนดของแรงดันเปิดวงจร



รูปที่ 2.4 เส้นโค้งกำลังไฟฟ้า-แรงดัน (P-V) ที่แปรผันตามระดับความเข้มแสง

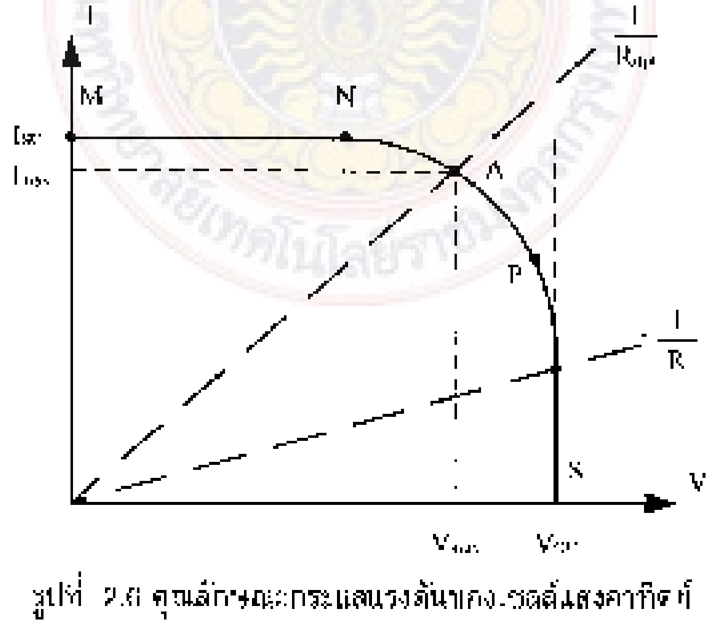


รูปที่ 2.5 เส้นโค้งกำลังไฟฟ้า-แรงดัน (P-V) ที่แปรผันตามระดับอุณหภูมิ

จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและความเข้มแสงเพียงอย่างเดียว แต่มันจะมีผลอย่างมากกับแรงดันที่จุดปฏิบัติงาน จุดของกำลังไฟฟ้าสูงสุดถูกแสดงที่ MPPT ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นจุดปฏิบัติงานที่ต้องการสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ความชันเป็น 0 หรือ $\frac{dP}{dV}=0$ แต่หากแรงดันต่ำกว่าหรือสูงกว่าแรงดันที่จุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ก็ส่งผลให้ $\frac{dP}{dV}>0$ หรือ $\frac{dP}{dV}<0$ ตามลำดับ โดยที่แรงดันตกเนื่องมาจากการเพิ่มของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด ซึ่งจะไม่ทำให้ได้จุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด และจากรูปที่ 2.4 และ รูปที่ 2.5 ผลของค่าสำหรับแรงดันที่จุดปฏิบัติงานที่ดีที่สุดจะเปลี่ยนแปลงในสภาวะแวดล้อมตลอดเวลา

2.2.3 ผลของโหลดต่อจุดปฏิบัติงาน

จากรูปที่ 2.6 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ ความเข้มแสง G_a และอุณหภูมิ T_c ของบรรยากาศค่าหนึ่งจะเห็นว่าถ้าต่อโหลดความต้านทานปรับค่าได้ R ที่ขั้วต่อของเซลล์แล้ว จุดปฏิบัติงานจะถูกกำหนดโดยจุดตัดกันของเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันกับเส้นตรงคุณลักษณะของโหลดที่มีความชัน $\frac{I}{V}=\frac{1}{R}$ ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายไปยังโหลดจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน นั่นคือถ้าโหลด R มีค่าต่ำๆ เซลล์จะทำงานในช่วง MN ของเส้นโค้งซึ่งเป็นช่วงที่เซลล์ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่มีค่าเท่ากับกระแสลัดวงจร ในทางกลับกันถ้าโหลด R มีค่าสูงๆ เซลล์จะทำงานในช่วง PS ของเส้นโค้งซึ่งเป็นช่วงที่เซลล์ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันคงที่มีค่าเท่ากับแรงดันเปิดวงจร



รูปที่ 2.6 คุณลักษณะกระแสแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อพิจารณาสมการของกระแสตามจากสมการ(2.1) และกราฟคุณลักษณะของกระแส และแรงดันข้างต้น สามารถหาค่ากระแสได้จากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

-กระแสลัดวงจร (Short circuit current) $I_{sc} = I_{ph}$ มีค่ามากที่สุดเมื่อเซลล์จ่ายกระแสออกมาภายใต้ภาวะของการลัดวงจร V = 0

- แรงดันเปิดวงจร (Open circuit voltage) สอดคล้องกับแรงดันตกคร่อมไดโอด เมื่อ กระแสไฟไหลผ่านไดโอด ($I_D = I_{ph}$) ส่งผลให้เซลล์ผลิตกระแสออกมาเท่ากับศูนย์ I = 0 ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันของเซลล์ตอนปลายทางด้าน แรงดันเปิดวงจรแสดงด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$V_{oc} = \frac{nkT_c}{e}\ln\left(\frac{I_{ph}}{I_o}\right) = V_t\ln\left(\frac{I_{ph}}{I_o}\right) \qquad (2.2)$$

เมื่อ $V_t = \frac{nkT_c}{e}$ คือ แรงดันที่เปลี่ยนแปลงตามค่าของอุณหภูมิ (Thermal voltage)

- จุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด เมื่อพิจารณาจากกราฟคุณลักษณะของแรงดันและกระแส P คือจุด $A(V_{max}, I_{max})$ ซึ่งจะมีสมการความสัมพันธ์ คือ

$$P_{max} = I_{max} \times V_{max} \qquad (2.3)$$

- ค่าประสิทธิภาพสูงสุด (Maximum efficiency) เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดกับค่ากำลังที่ได้จากแสงอาทิตย์

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{max}I_{max}}{AG_a} \qquad (2.4)$$

เมื่อค่า G_a คือ ค่าความเข้มของแสงโดยรอบ (ambient irradiation) (วัตต์ต่อตารางเมตร) และ A คือพื้นที่รับแสงของเซลล์ (ตารางเมตร)

- Fill factor (FF) คือ ค่าอัตราส่วนระหว่าง ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์สามารถจ่ายให้กับโหลดกับ ค่ากระแสลัดวงจรคูณกับค่าแรงดันเปิดวงจร

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{V_{max}I_{max}}{V_{oc}I_{sc}} \qquad (2.5)$$

ค่า Fill factor เป็นค่าที่แน่นอนซึ่งกำหนดคุณลักษณะของกราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน ซึ่งเซลล์ที่ดีควรมีค่า Fill factor ประมาณ 0.7 แต่ถ้ามีค่าต่ำกว่านี้อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ มีค่ามากขึ้น

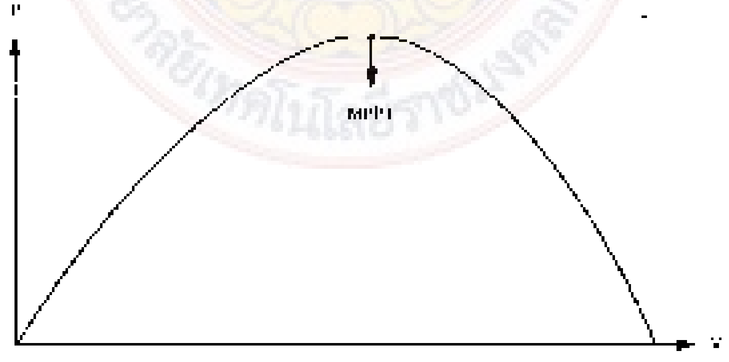
2.3 การติดตามจุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

2.3.1 ชุดควบคุมการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

โดยปกติแล้วแผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาได้ขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ชนิดก็คือ ความเข้มแสงและอุณหภูมิ แต่ทราบได้อย่างไรว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะของความเข้มแสงและอุณหภูมินั้นๆ ส่วนประกอบที่สำคัญในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นองค์ประกอบในการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นมีอีกส่วนหนึ่งก็คือ ส่วนติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำทฤษฎีการติดตามการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมาใช้พิจารณา โดยในทฤษฎีนี้สามารถแบ่งวิธีการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้หลายวิธี แต่โดยส่วนใหญ่แล้วที่นิยมนำมาพิจารณามี 2 วิธี คือ

2.3.1.1 ทฤษฎีการรบกวนและการสังเกตการณ์ (Perturbation and Observation Method – P&O)

ทฤษฎีการรบกวนและการสังเกตการณ์ มีโครงสร้างที่ง่ายและพารามิเตอร์ต่างๆ น้อย ซึ่งมีการทำงานโดยการรบกวนระบบโดยการเพิ่มหรือการลดแรงดันที่จุดการทำงานของแผงและการสังเกตการณ์ผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าขาออกของแผง ดังกล่าวทำการเปรียบเทียบกับระบบการรบกวนที่ผ่านมา ถ้าการรบกวนนั้นนำไปสู่การเพิ่ม (หรือการลด) กำลังไฟฟ้าของแผง การรบกวนที่ตามมาก็คือ ทำให้เป็นทิศทางเดียวกันหรือตรงข้ามกัน ในวิธีนี้ชุดติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะทำการค้นหาสภาวะที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 2.7 จุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเส้นโค้งกำลังไฟฟ้า-แรงดัน (P-V)

2.3.1.2 ทฤษฎีความนำส่วนเพิ่ม (Incremental Conductance Method – IncCond)

วิธีนี้จะใช้วิธีแหล่งจ่ายความนำส่วนเพิ่ม เป็นอัลกอริทึมการค้นหาจุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการรบกวนและการสังเกตการณ์และไม่ขึ้นกับอุปกรณ์หรือวิธีการทางกายภาพ แรงดันและกระแสเอาต์พุตจากแหล่งจ่ายจะถูกควบคุม ซึ่งจุดควบคุมจุดติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะอาศัยการคำนวณค่าความนำและความนำส่วนเพิ่มและทำการตัดสินใจ (ที่จะเพิ่มหรือลดค่าอัตราส่วนดิวตี้เอาต์พุต) โดยทำงานร่วมกับเซนเซอร์ในการวัดแรงดันและกระแสที่จุดปฏิบัติงานของแผง

อัลกอริทึมความนำส่วนเพิ่ม :

- กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

$$P = V \times I \tag{2.6}$$

- เมื่อประยุกต์สมการกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตกับกฎลูกโซ่ จะได้

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV}$$
$$= I\frac{dV}{dV} + V\frac{dI}{dV}$$
$$= I + V\frac{dI}{dV}$$

จะได้

$$\left(\frac{1}{V}\right)\frac{dP}{dV} = \left(\frac{I}{V}\right) + \frac{dI}{dV} \tag{2.7}$$

- กำหนดให้ความนำของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือ

$$G = \frac{I}{V} \tag{2.8}$$

- และความนำส่วนเพิ่มคือ

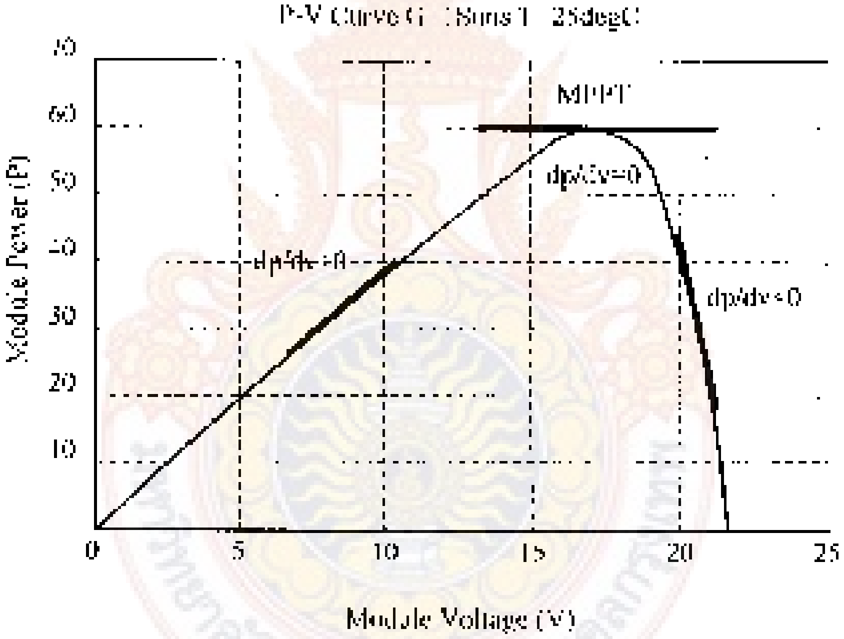
$$\Delta G = \frac{dI}{dV} \tag{2.9}$$

โดยปกติแรงดันเอาต์พุตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าเป็นบวก จากสมการที่ (2.9) แสดงว่าแรงดัน ณ จุดปฏิบัติงานอยู่ต่ำกว่าแรงดันที่จุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ถ้าความนำมีค่ามากกว่าความนำส่วนเพิ่ม ดังนั้นหน้าที่หลักของอัลกอริทึมดังกล่าวคือการค้นหาจุดปฏิบัติงานของแรงดัน ณ ความนำมีค่าเท่ากับความนำส่วนเพิ่ม โดยหลักการดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{dP}{dV} > 0; \text{ ถ้า } G > \Delta G$$

$$\frac{dP}{dV} = 0; \text{ ถ้า } G = \Delta G$$

$$\frac{dP}{dV} < 0; \text{ ถ้า } G < \Delta G$$



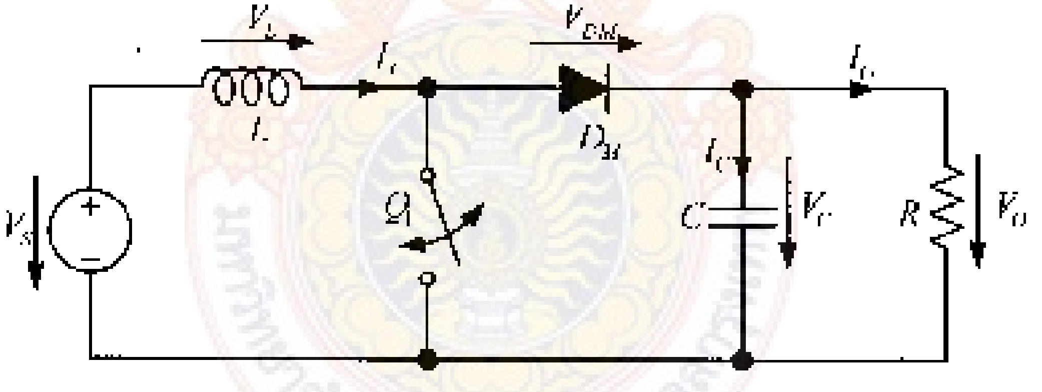
รูปที่ 2.8 จุดปฏิบัติงานที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด และจุดปฏิบัติงานอยู่ต่ำกว่าและสูงกว่าแรงดันที่จุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด จากเส้นโค้งกำลังไฟฟ้า-แรงดัน (P-V)

ซึ่งอัลกอริทึมนี้ถูกใช้ในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดปฏิบัติงานที่สูงที่สุด การชาร์จของกระบวนการการแปรผันของกระแสและแรงดันจะเกิดขึ้นเสมอจากอัลกอริทึมที่มีการแสดงทางคณิตศาสตร์ที่ถูกอ้างอิง ถ้า $\frac{dP}{dV} = 0$ เพราะฉะนั้น $G = \Delta G$

ซึ่งหมายความว่ามีการปฏิบัติงานที่จุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ไม่มีการกระทำใดที่จะทำให้ค่าดิวตี้ไซเคิล ซึ่งให้ผลในการหยุดการติดตามดังกล่าว หรือถ้าน้อยหนึ่ง $G > \Delta G$ ค่าอัตราส่วนเพิ่มขึ้น 1 หน่วยหรือลดลง 1 หน่วย ถ้า $G < \Delta G$ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอทฤษฎีการติดตามจุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้ทฤษฎีความนำส่วนเพิ่ม ด้วยเหตุผลดังกล่าวในบทต่อไปกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทำงานของวงจรแปลงผัน ซึ่งก็คือวงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรงแบบบูสต์เพื่อใช้ในการยกระดับแรงดันเอาต์พุตให้สามารถติดตามจุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

2.4 บูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ (Boost Dc to Dc Converter)

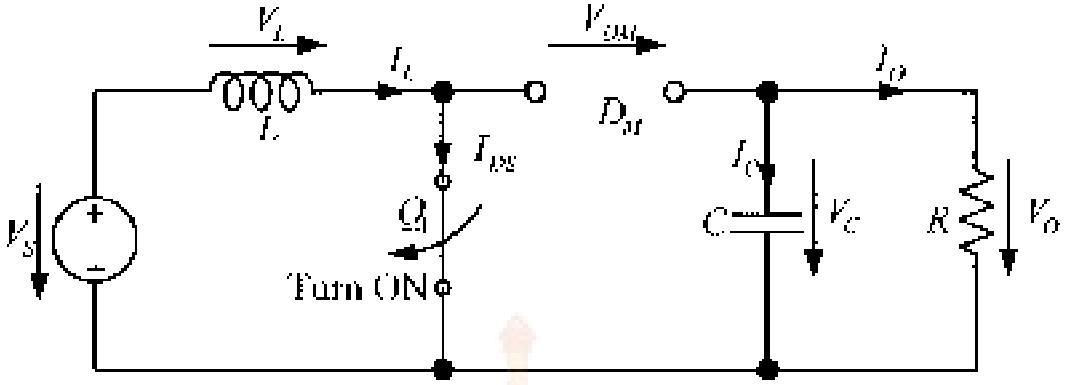
บูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์เป็นสวิตชิ่งอีกชนิดหนึ่งที่ทำงานได้ โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ความถี่สูงต่าง ๆ จะทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงกว่าระดับแรงดันอินพุต โดยอาศัยคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง ในการเก็บและคายพลังงานทำให้ระดับแรงดันเอาต์พุตสูงกว่าระดับแรงดันอินพุตหรืออาจจะเรียกว่า "สเต็ปอัพคอนเวอร์เตอร์" (Step-up Converter) ซึ่งจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ ด้วยกัน คือ ส่วนของวงจรกำลัง ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง ตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุต ไดโอดกำลัง อุปกรณ์ทำหน้าที่สวิตช์ วงจรกรองแรงดัน และอีกส่วนคือวงจรควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ การวิเคราะห์วงจรคอนเวอร์เตอร์โหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านต่อเนื่อง



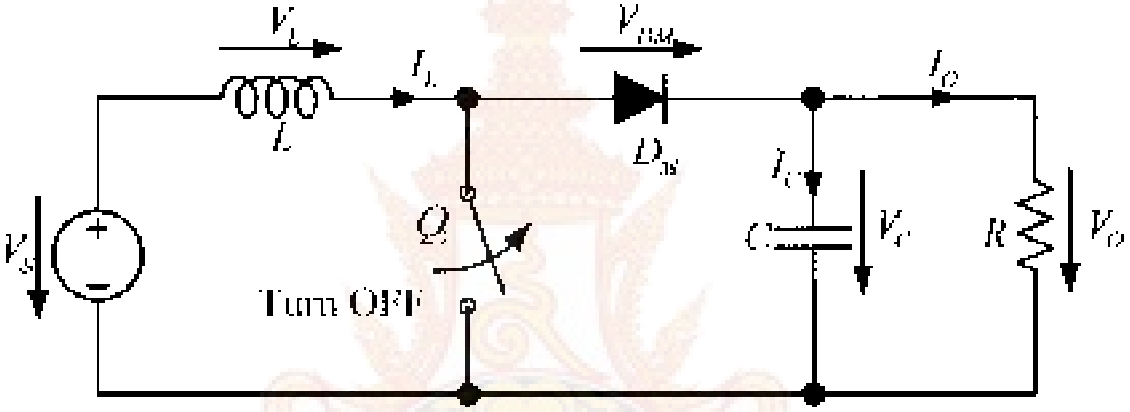
รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์

2.4.1 หลักการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

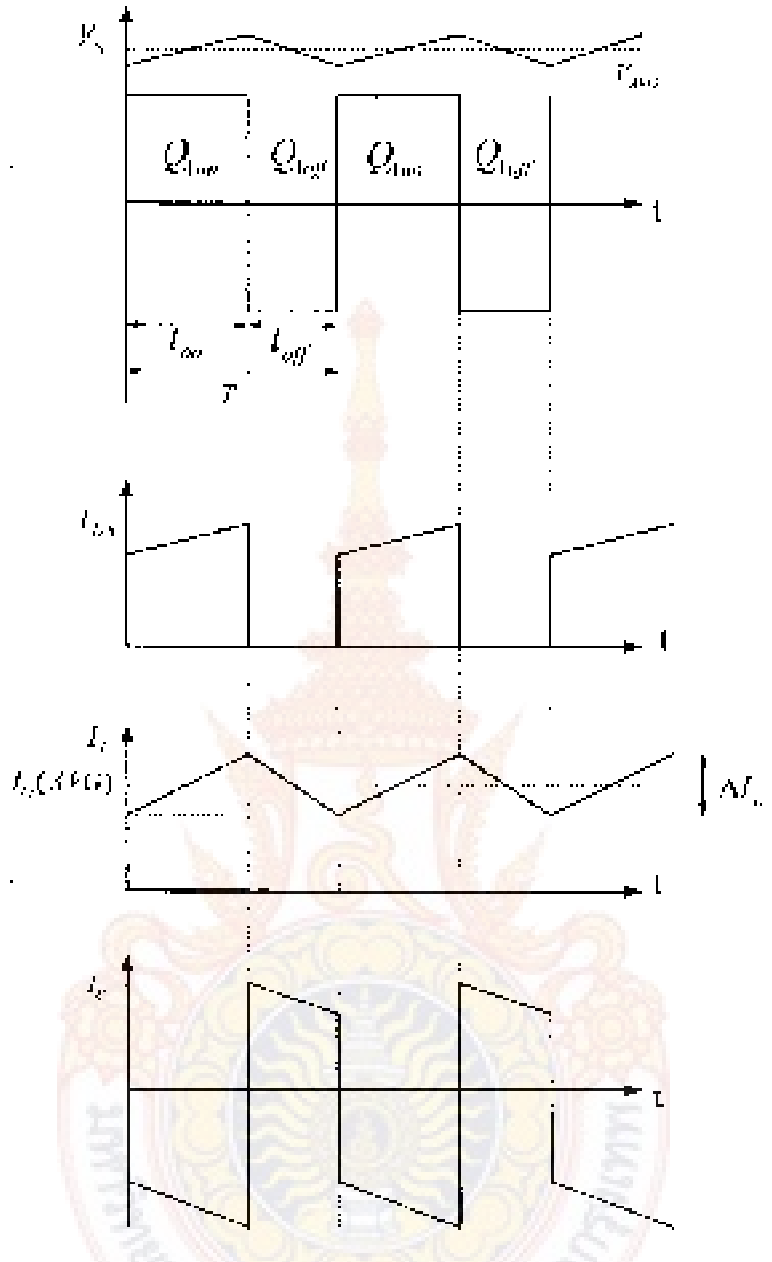
หลักการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกตามต้องการจะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ และสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้ โดยวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด ทั้งนี้การทำงานต้องอยู่ในช่วงสภาวะคงตัวดังนี้



รูปที่ 2.10 วงจรการทำงานของวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์โหมดที่ 1 สวิตช์ปิด



รูปที่ 2.11 วงจรการทำงานของวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์โหมดที่ 2 สวิตช์เปิด



รูปที่ 2.12 สัญญาณแรงดันกระแสของวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์

2.4.1.1 วิเคราะห์เมื่อสวิตซ์ปิด

โหมด 1 $(0 < t \leq t_{on})$ มอสเฟต Q_1 ทำงานสวิตซ์ปิด $(t = 0)$ กระแสอินพุตไหลผ่าน มอสเฟต Q_1 และตัวเหนี่ยวนำทำให้กระแสของตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นจาก I_1 ที่ $t = 0$ เป็นเวลา I_2 ที่ $t = t_1$ โดยไดโอด D_m จะถูกไบอัสกลับตัวเก็บประจุจะดีสชาร์จประจุให้แก่โหลดในช่วงเวลา $(0 < t < t_{on})$ ค่าแรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.10)

$$V_S = L\frac{I_2 - I_1}{t_{on}} = \frac{L\Delta I}{t_{on}} \tag{2.10}$$

สมการที่จะหาค่าเวลาในช่วงที่เพาเวอร์มอสเฟต Turn ON ได้จากสมการที่ (2.11)

$$t_{on} = \frac{L\Delta I}{V_S} \tag{2.11}$$

พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากสมการที่ (2.12)

$$E = \frac{1}{2}L(\Delta I)^2 = \frac{1}{2L}V_S^2 t_{on}^2 \tag{2.12}$$

2.4.1.2 วิเคราะห์เมื่อสวิตช์เปิด

โหมด 2 ($0 < t < t_{off}$) มอสเฟต (Q) ทำงานสวิตช์เปิด ($t = t_1$) แรงดันเหนี่ยวนำตกคร่อมขั้วของตัวเหนี่ยวนำซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับแรงดันอินพุต ทำให้เอาต์พุตมีค่ามากขึ้นจนทำให้ D_m ทำงาน กระแสอินพุตไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ประกอบด้วยกระแสอินพุต (I_S) และกระแสของตัวเหนี่ยวนำ (I_L) ซึ่งกระแสของตัวเหนี่ยวนำเกิดจากพลังงานสะสมในตัวเหนี่ยวนำ ขณะที่มอสเฟต (Q) ทำงานผ่านไดโอด D_m จ่ายให้กับโหลดและชาร์จประจุให้แก่ตัวเก็บประจุเป็นผลให้ I_L ตกลงในช่วงเวลา t_2

$$V_S - V_O = L\frac{I_2 - I_1}{t_{off}} \tag{2.13}$$

$$V_O = V_S - L\frac{\Delta I}{t_{off}} \tag{2.14}$$

สามารถที่จะหาค่าเวลาในช่วงที่เพาเวอร์มอสเฟต Turn OFF ได้จากสมการนี้

$$t_{off} = L\frac{\Delta I}{V_O - V_S} \tag{2.15}$$

การเปลี่ยนแปลงของกระแสของตัวเหนี่ยวนำระหว่างค่ากระแสยอดถึงยอด (Peak to - Peak) คือ กระแสกระเพื่อมเมื่อพิจารณาที่สภาวะคงที่โดยให้ช่วงเวลา t_{on} และ t_{off} จากสมการที่ (2.11) และ (2.15) มีค่าเท่ากัน คำนวณหากระแสกระเพื่อมได้ดังนี้

$$\Delta I = \frac{V_S t_{on}}{L} = \frac{(V_O - V_S)t_{off}}{L} \qquad (2.16)$$

แทนค่า $t_{on} = DT$ และ $t_{off} = (1-D)T$ ลงในสมการที่ (2.16)

$$V_S DT = (V_O - V_S)(1-D)T = V_O(1-D)T - V_S(1-D)T \qquad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.17) เมื่อทำให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้

$$V_S DT = V_O(1-D)T - V_S T + V_S DT \qquad (2.18)$$

$$V_S = V_O(1-D) \qquad (2.19)$$

ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์จะได้ดังสมการที่ (2.20)

$$V_O = \frac{V_S}{1-D} \qquad (2.20)$$

สมการที่ (2.20) แสดงถึงแรงดันเอาต์พุต ถ้าสวิตช์เปิดตลอดเวลาและ D มีค่าเป็นศูนย์แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเหมือนกับแรงดันอินพุต ขณะที่ดิวตี้ไซเคิลมีค่าเพิ่มขึ้น ตัวส่วนในสมการที่ (2.20) จะมีขนาดเล็กลงและเอาต์พุตจะมีค่าแรงดันมากกว่าอินพุต แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามแรงดันอินพุตและค่าดิวตี้ไซเคิล ขณะที่ดิวตี้ไซเคิลมีค่าเข้าใกล้ 1 แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเข้าใกล้อนันต์ (Infinity) หากพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าด้านอินพุตเท่ากับด้านเอาต์พุตจะได้ว่า

$$V_S I_S = V_O I_O \qquad (2.21)$$

แทนค่าแรงดันเอาต์พุตจากสมการที่ (2.20)

$$V_S I_S = \frac{V_S I_O}{1-D} \qquad (2.22)$$

ดังนั้นกระแสอินพุตเฉลี่ยจะได้

$$I_s = \frac{I_o}{1-D} \tag{2.23}$$

วงจรกำลังจะทำงานเป็นรูปคลื่นตามเวลา ในหนึ่งคาบเวลาจะประกอบไปด้วยช่วงเวลา t_{on} และ t_{off} ดังนั้นค่าของคาบเวลาจะได้

$$T = \frac{1}{f} = t_{on} + t_{off} = \frac{L\Delta I}{V_S} + \frac{L\Delta I}{V_o - V_S} = \frac{L(\Delta I)V_o}{V_S(V_o - V_S)} \tag{2.24}$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (2.24) ใหม่จะได้ค่ากระแสกระเพื่อมของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.25)

$$\Delta I = \frac{V_S(V_o - V_S)T}{LV_o} = \frac{V_S\left[V_S/(1-D) - V_S\right]}{fLV_o} \tag{2.25}$$

และจะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ดังสมการที่ (2.26)

$$L = \frac{V_S D}{f\Delta I} \tag{2.26}$$

2.4.1.3 แรงดันกระเพื่อมด้านเอาต์พุต (Output Voltage Ripple)

การทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์นี้จะต้องได้แรงดันเอาต์พุตที่สูงกว่าแรงดันอินพุต ถ้าไม่เป็นเช่นนั้นแสดงว่าตัวเหนี่ยวนำไม่จ่ายพลังงานเสริมแรงดันอินพุต เมื่อมอสเฟต Turn ON แรงดันเอาต์พุตจะได้จากการจ่ายประจุของตัวเก็บประจุเพียงอย่างเดียว เพราะฉะนั้นแล้ว ค่าของตัวเก็บประจุจะขึ้นอยู่ขนาดของแรงดันเอาต์พุตและโหมดการทำงาน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะให้ขนาดของตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่เพื่อที่จะให้ขนาดของแรงดันกระเพื่อมทางด้านเอาต์พุตมีขนาดลดลง

ตัวเก็บประจุจะจ่ายพลังงานให้เอาต์พุตในช่วงเวลาที่มอสเฟต Turn on และหาค่าเก็บประจุได้จากกระแสเอาต์พุตในช่วงเวลาดังกล่าว

$$\Delta V_o = V_c - V_c(0) = \frac{1}{C}\int_0^{t_{on}} I_o dt = \frac{I_o t_{on}}{C} \tag{2.27}$$

หากพิจารณาจากช่วงเวลา t_{on} ในคอนเวอร์เตอร์จะมีความถี่ในการสวิตช์เมื่อพิจารณาให้อยู่ในเทอมของเอาต์พุตซึ่งจะได้จากสมการที่ (2.20) และพิจารณาตามที่ตั้งจะได้

$$V_O = \frac{V_S}{1-D} = \frac{V_S T}{T - DT} = \frac{V_S}{T - t_{on}} \tag{2.28}$$

$$T - t_{on} = \frac{V_S T}{V_O} \tag{2.29}$$

$$t_{on} = T - \frac{V_S T}{V_O} = \frac{V_O - V_S}{f V_O} \tag{2.30}$$

แทนค่า t_{on} ในสมการที่ (2.30) ลงในสมการที่ (2.28) จะได้

$$\Delta V_O = \frac{I_O (V_O - V_S)}{V_O f C} = \frac{I_O (V_O - V_S)}{f C V_S / (1-D)} \tag{2.31}$$

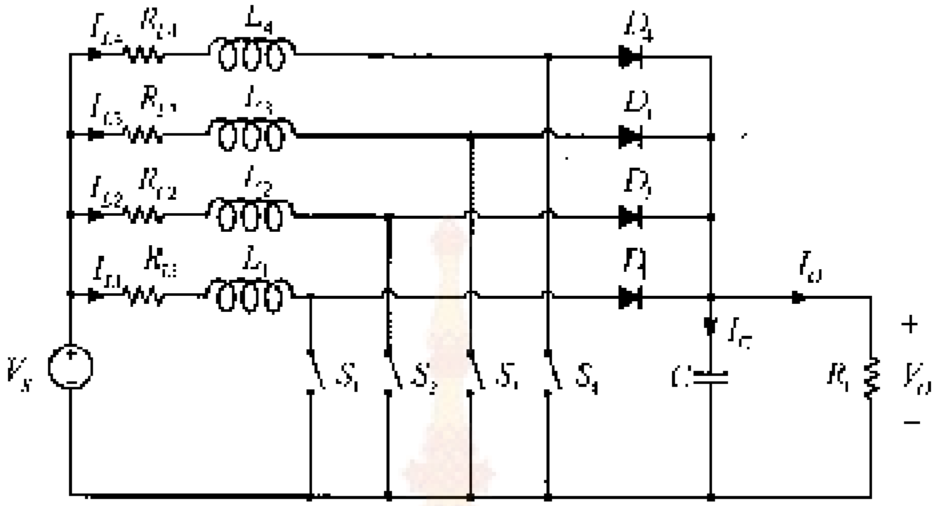
จากสมการที่ (2.31) เขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายจะได้

$$\Delta V_O = \frac{\left[I_O (V_O - V_S + D V_S) / (1-D) \right]}{f C V_S / (1-D)} = \frac{I_O D}{f C} \tag{2.32}$$

ดังนั้นตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุตของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์จะหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$C = \frac{I_O D}{f \Delta V_O} \tag{2.33}$$

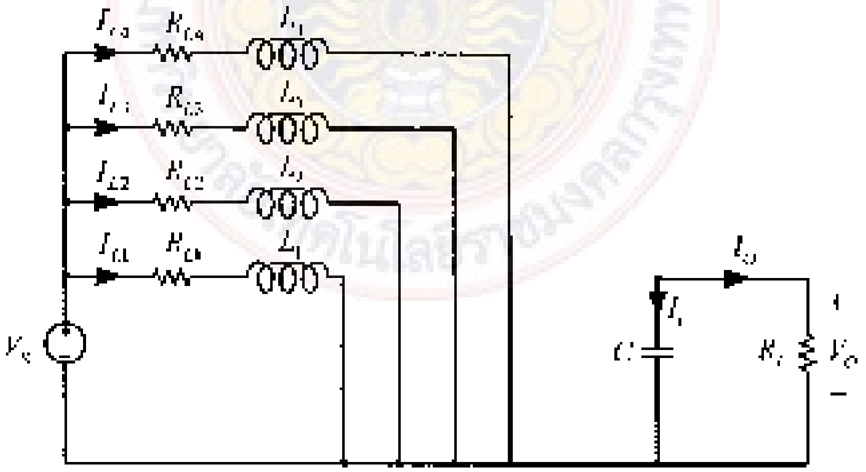
2.4.2 วงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน



รูปที่ 2.13 วงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน

จากรูปที่ 2.13 จากการพิจารณาวงจรบูสต์ครั้งละวงจรเพื่อหาสมการแรงดันและกระแส โดยใช้หลักการพิจารณาเหมือนกับวงจรบูสต์แบบธรรมดา ในการขนานวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์สามารถที่จะขนานได้มากกว่า 2 โมดูลขึ้นไป ดังนั้นกระแสที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำหาได้จากสมการกระแสของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเพียง 4 โมดูลซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

2.4.2.1 วงจรสมมูลขณะสวิตช์ปิด



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลขณะสวิตช์ปิด

$$V_S = V_{R1} + V_{L1} \tag{2.34}$$

$$V_{R1} = I_{L1}.R_{L1} \tag{2.35}$$

$$V_{L1} = L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} \tag{2.36}$$

$$V_S = (I_{L1}.R_{L1}) + L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} \tag{2.37}$$

$$L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} = V_S - R_{L1}.I_{L1} \tag{2.38}$$

$$\frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{1}{L_1}(V_S - R_{L1}.I_{L1}) \tag{2.39}$$

สมการกระแสที่ไหลผ่าน L_1 หาได้จาก

$$I_{L1} = \frac{1}{L_1}\int(V_S - R_{L1}.I_{L1})dt \tag{2.40}$$

กระแสที่ไหลใน L_2 และ L_N ก็สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วิธีเดียวกันจะได้

$$I_{L2} = \frac{1}{L_2}\int(V_S - R_{L2}.I_{L2})dt \tag{2.41}$$

$$I_{LN} = \frac{1}{L_N}\int(V_S - R_{LN}.I_{LN})dt \tag{2.42}$$

สามารถวิเคราะห์สมการการคงแรงดันได้ดังนี้ คือ

$$I_C = I_O \tag{2.43}$$

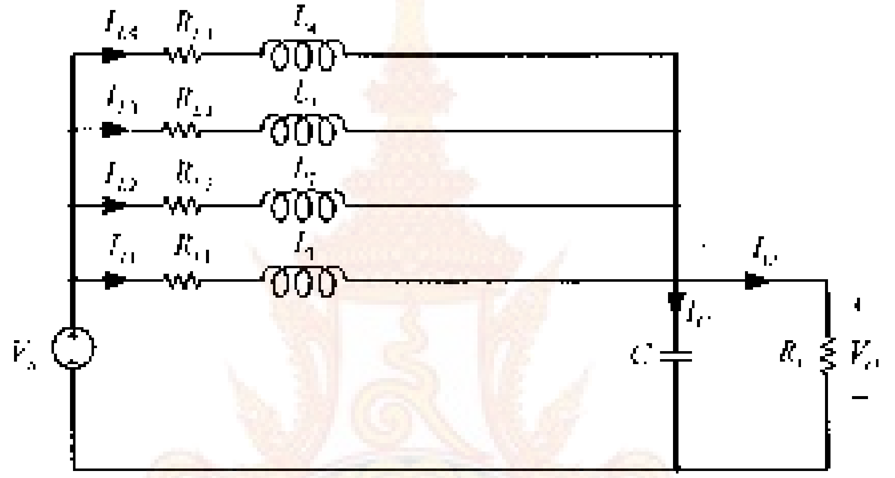
$$I_C = C\frac{dV_O}{dt} \tag{2.44}$$

$$C\frac{dV_O}{dt} = I_O \tag{2.45}$$

แรงดันทางเอาต์พุตหาได้จากสมการดังนี้

$$V_O = \frac{1}{C}\int (I_{L1} + I_{L2} + I_{LN})\,dt \tag{2.46}$$

2.4.2.2 วงจรสมมูลขณะสวิตช์เปิด



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลขณะสวิตช์เปิด

เมื่อสวิตช์เปิดกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ไดโอดทุกตัวจะถูกไบอัสไปข้างหน้าให้มีกระแสไหลผ่านทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวอย่างต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2.15 สมมติแรงดันไฟฟ้าที่ด้านเอาต์พุตมีค่าคงที่ จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังนี้

$$V_S = V_{R1} + V_{L1} + V_O \tag{2.47}$$

$$V_{R1} = I_{L1}R_{L1} \tag{2.48}$$

$$V_{L1} = L_1\frac{dI_{L1}}{dt} \tag{2.49}$$

$$V_S = (I_{L1}.R_{L1}) + (L\frac{dI_{L1}}{dt}) + V_O \quad (2.50)$$

$$L_1\frac{dI_{L1}}{dt} = V_S - (I_{L1}.R_L) + V_O \quad (2.51)$$

$$\frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{1}{L_1}(V_S - (I_{L1}.R_{L1}) - V_O) \quad (2.52)$$

ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่าน i_{L1} หาได้จากสมการ

$$I_{L1} = \frac{1}{L_1}\int(V_S - (I_{L1}.R_{L1}) - V_O) \quad (2.53)$$

ส่วนกระแสที่ไหลใน i_{L2} และ i_{L3} ก็สามารถหาได้ด้วยวิธีเดียวกันสมการของแรงดันสามารถวิเคราะห์ได้จากการพิจารณาการเท่ากันของกระแสไหลเข้ากับกระแสไหลออก สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} = I_C + I_O \quad (2.54)$$

$$I_C = (I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}) - I_O \quad (2.55)$$

$$I_C = C\frac{dV_O}{dt} \quad (2.56)$$

ดังนั้นผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวสามารถหาได้จากสมการ

$$V_O = \frac{1}{C}\int((I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}) - I_O)dt \quad (2.57)$$

2.5 วงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน

การออกแบบวงจรกำลังของวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนานจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีดังต่อไปนี้

2.5.1 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานโดยอาศัยคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้า การที่จะเข้าใจถึงการออกแบบตัวเหนี่ยวนำจะต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับ ทฤษฎีทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยตัวเหนี่ยวนำมีหน้าที่สำคัญมากในการเก็บพลังงาน และคาย พลังงานในวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน

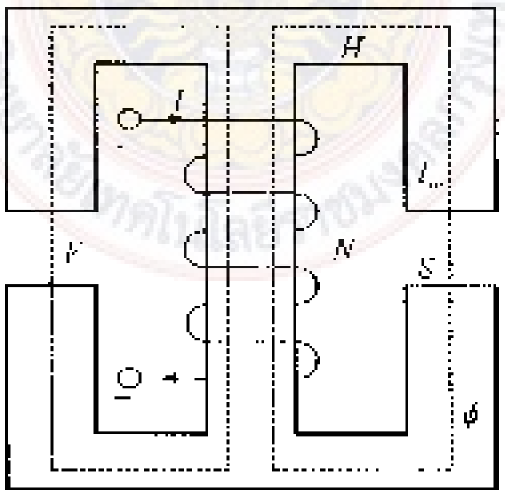
2.5.1.1 แม่เหล็กไฟฟ้าพื้นฐาน

ในทฤษฎีของแม่เหล็กไฟฟ้า กฎพื้นฐานทางแม่เหล็กไฟฟ้า พิจารณาจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดโดยมีตัวแปร 2 ตัวที่เกี่ยวกับสนามแม่เหล็ก เวกเตอร์ตัวแรกได้แก่ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Field Intensity Vector) ใช้ตัวย่อ คือ H มีหน่วยเป็น Ampere-turns/m ตามกฎของแอมแปร์ที่กำหนด

$$Hl_m = Ni \tag{2.58}$$

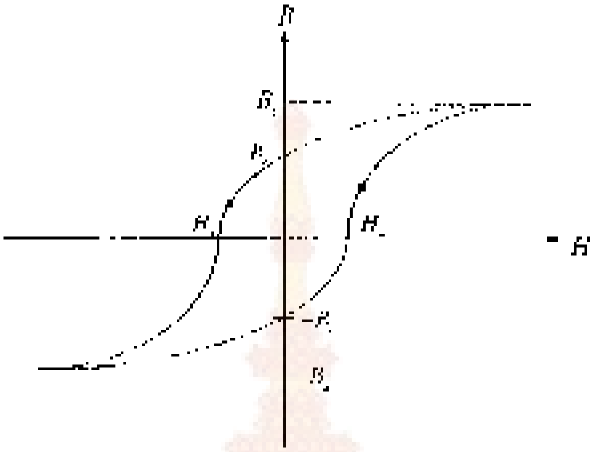
ส่วนเวกเตอร์อีกตัวหนึ่ง ได้แก่ ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (Flux Density) ใช้ตัวย่อ B มีหน่วยเป็นเทสลา (Tesla) จากกฎของฟาราเดย์

$$V = N\frac{d(BS)}{dt} = N\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \tag{2.59}$$



รูปที่ 2.16 วงจรแม่เหล็กพื้นฐาน

กฎพื้นฐานของสารแม่เหล็กที่ใช้ทางแม่เหล็กจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสารแม่เหล็ก H กับความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B โดยทั่วไป $B = f(H)$ เป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นและมีฮิสเตอรีซีสลูป ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ฮิสเตอรีซีสลูป

เมื่อ B_s คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กอิ่มตัว

B_r คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

H_c คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กหักล้าง

ความสัมพันธ์ระหว่าง B และ H คิดตรงที่เป็นเชิงเส้น $B = \mu H = \mu_r \mu_0 H$

โดยที่ μ คือ สภาพความซาบซึมได้ (H/m)

μ_r คือ สภาพความซาบซึมได้ของวัสดุ

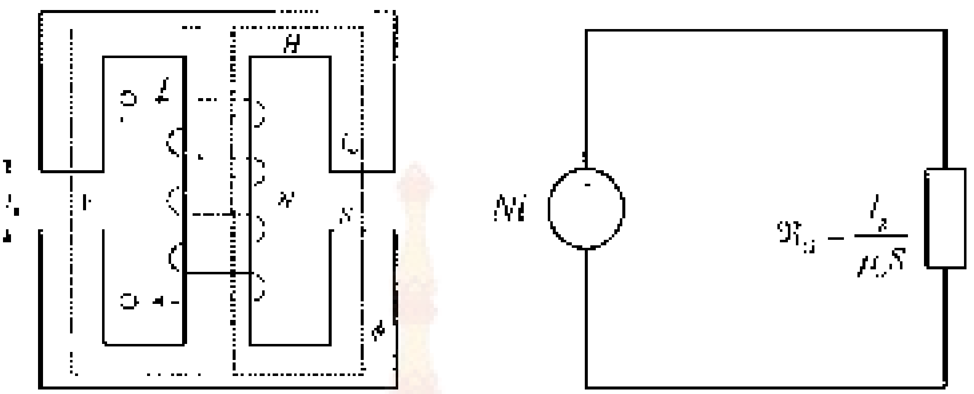
μ_0 คือ สภาพความซาบซึมได้ของอากาศ มีค่าเท่ากับ $4\pi\times10^{-7}\ H/m$

เมื่อจ่ายกระแสไหลผ่านขดลวดจำนวน N รอบ จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กขึ้นมา (Magneto motive force, mmf)

$$mmf = NI \tag{2.51}$$

$$H = \frac{mmf}{l_m} = \frac{NI}{l_m} \tag{2.52}$$

สามารถเขียนวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Circuit) แทนด้วยวงจรไฟฟ้า (Electric Circuit) และค่าเทียบเคียงดังรูปที่ 2.18 และตารางที่ 2.1 ตามลำดับ



ก) วงจรแม่เหล็กไฟฟ้า ข) วงจรเทียบเคียง

รูปที่ 2.18 วงจรแม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรเทียบเคียง

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบวงจรแม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรไฟฟ้า

วงจรแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Circuit)	วงจรไฟฟ้า (Electric Circuit)
Current (I)	Flux (ϕ)
EMF (V)	mmf (F)
Resistance (R)	Reluctance ($\Re$)
Conductance (G)	Permence (P)

ค่า Reluctance ($\Re$) ของวงจรแม่เหล็กไฟฟ้าหาได้จาก

$$\Re = \frac{l}{\mu S} \tag{2.60}$$

และส่วนกลับของ $\Re$

$$P = \frac{1}{\Re} = \frac{\mu S}{l} \tag{2.61}$$

ค่าความเหนี่ยวนำสามารถหาค่าได้

$$L = \frac{\lambda}{I} = \frac{N\phi}{I} = \frac{N^2}{\Re} = N^2 P = \frac{N^2 \mu S}{l} \qquad (2.62)$$

วงจรแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อมี Air Gap

$$\phi = \frac{NI}{\Re_g + \Re_m} = (P_g + P_m)NI \qquad (2.63)$$

$$N\phi = (P_g + P_m)N^2 I \qquad (2.64)$$

$\Re_m$ คือ Reluctance ของแกนเหล็ก

ในทางปฏิบัตินั้น $\Re_m << \Re_g$ ดังนั้นจะหาค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ได้จาก

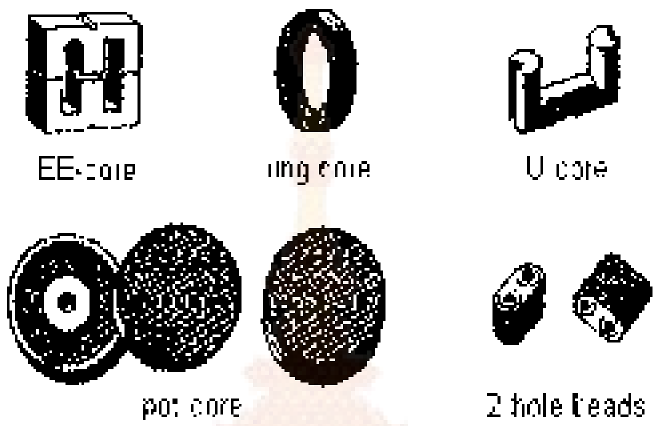
$$L = N^2 P_g = \frac{N^2 \mu_0 S}{l_g} \qquad (2.65)$$

2.5.1.2 แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core)

เฟอร์ไรต์เป็นวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) การเหนี่ยวนำแม่เหล็กบนแกนเฟอร์ไรต์ จะมีผลทำให้เกิดการเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กสูงกว่าการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนแกนอากาศมาก แกนเฟอร์ไรต์มีค่าอิ่มตัวเส้นแรงแม่เหล็กค่อนข้างสูงประมาณในช่วง 3,000 – 6,000 เกาส์ และเกิดการสูญเสียในตัวแกนเฟอร์ไรต์ต่ำที่ความถี่สูง ๆ ดังนั้นตัวเหนี่ยวนำในวงจรสวิตชิ่งจึงนิยมใช้แกนเฟอร์ไรต์มากที่สุด เฟอร์ไรต์ที่นำมาใช้ทำแกนของตัวเหนี่ยวนำสวิตชิ่งจะมีรูปร่างแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับการใช้งานและมาตรฐานในการออกแบบ

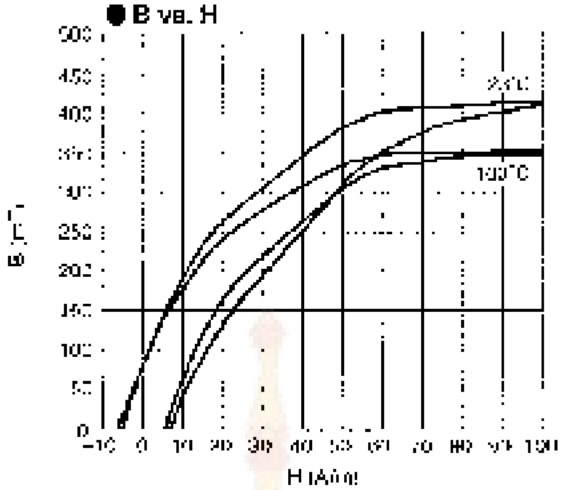
สารแม่เหล็กที่ใช้ทำแกนแม่เหล็ก มักจะเป็นอัลลอยของเหล็กหรือเฟอร์ไรต์สารที่นิยมใช้ที่ความถี่ต่ำ (< 1kHz) ได้แก่ เหล็กผสมซิลิกอนเจือจาง (Si < 1%) ซึ่งมีความหนาแน่น เส้นแรงแม่เหล็กอิ่มตัวค่าสูงแต่จะมีการสูญเสียมาก ถ้าส่วนผสมซิลิกอนมีมากขึ้นก็มักจะเป็นชนิด Grain Oriented การสูญเสียจะลดลงแต่ราคาก็จะแพงขึ้น นอกจากจะผสมซิลิคอนแล้วก็ยังมีสารแม่เหล็กที่ผสมสารอื่น ๆ เช่น โคบอลต์ นิกเกิล โมลิบดินัม เป็นต้น ซึ่งทำงานได้ถึงความถี่ประมาณ 20kHz แต่มีราคาแพงกว่าเหล็กผสมซิลิกอนมาก เฟอร์ไรต์เป็นเซรามิคประกอบไปด้วย ออกไซด์ของเหล็ก สังกะสี และแมงกานีส หรือนิกเกิล เฟอร์ไรต์ชนิด MnZn มีความหนาแน่น เส้นแรงแม่เหล็กสูงกว่าชนิด NiZn แต่ทำงานได้ถึงความถี่ประมาณ 1MHz ซึ่งต่ำกว่าชนิด NiZn ซึ่งทำงานได้ถึง 1MHz เฟอร์ไรต์มีหลากหลายชนิดตามแต่ละสูตร

ผสมและมีเลขรหัสต่าง ๆ เช่น 6H20 7H10 และ 3C6 เป็นต้น แกนเฟอร์ไรต์สำหรับแหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่งโดยทั่วไปจะถูกผลิตออกมาที่ขนาด และรูปทรงต่าง ๆ ตามมาตรฐานเดียวกัน เช่น แกนแบบ EI EE EER หรือแกนแบบ POT เป็นต้น ปกติผู้ผลิตจะทำแกนเฟอร์ไรต์ออกมาในลักษณะประกบคู่ เพื่อความสะดวกในการประกอบเข้ากับบอบบิ้น



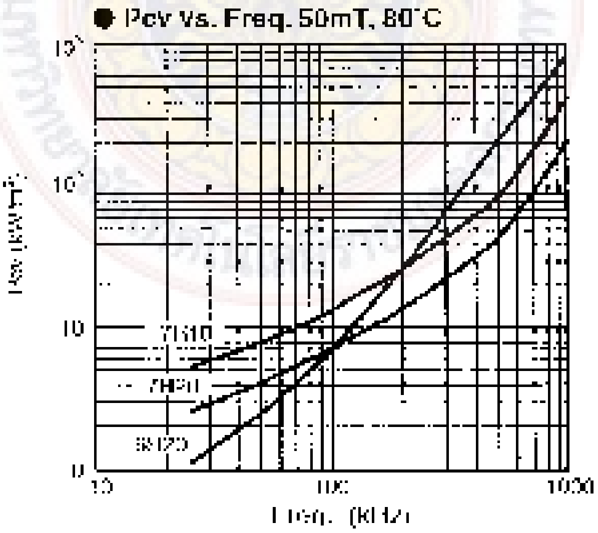
รูปที่ 2.19 ลักษณะของแกนเฟอร์ไรต์แบบต่าง ๆ

ลักษณะสมบัติของเนื้อสารที่ใช้ทำแกนเฟอร์ไรต์ชนิดของเนื้อสารแกนเฟอร์ไรต์ที่แตกต่างกันจะให้คุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรต์ที่แตกต่างกันด้วย ถึงแม้จะมีขนาดเท่ากันทุกประการก็ตาม ในแผ่นข้อมูลเนื้อสารที่ใช้ทำแกนเฟอร์ไรต์นั้น จะต้องมีรายละเอียดคุณสมบัติของเนื้อสารแสดงไว้เสมอ ข้อมูลที่สำคัญควรจะทำความเข้าใจและศึกษาไว้ก็คือ เส้นโค้งฮิสเตอรีซิส (Hysteresis Curve) และค่าการสูญเสียของแกนเฟอร์ไรต์ (Core Loss) เส้นโค้งฮิสเตอรีซีสจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดที่พันบนแกนเฟอร์ไรต์ รูปที่ 2.20 จะแสดงเส้นโค้งฮิสเตอรีซีสของแกนเฟอร์ไรต์จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจะมีค่ามากขึ้น เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มจนถึงจุดหนึ่งซึ่งค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก มีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กแล้วก็ตาม จากจุดดังกล่าวจะเรียกว่าแกนเริ่มมีการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก โดยปกติผู้ผลิตจะแสดงกราฟของเส้นโค้งฮิสเตอรีซีสเพียงครึ่งเดียว เนื่องจากอีกครึ่งหนึ่งของเส้นโค้งฮิสเตอรีซีสจะมีลักษณะเหมือนกันทุกประการ เพียงแต่จะมีลักษณะกลับทิศทางกันเท่านั้น จากรูปที่ 2.19 การใช้งานของแกนเฟอร์ไรต์ในเชิงปฏิบัติจึงควรกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนขณะทำงานมีค่าไม่เกินครึ่งหนึ่ง ของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดก่อนอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรต์เพื่อความปลอดภัย



รูปที่ 2.20 เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสของแกนเฟอร์ไรต์

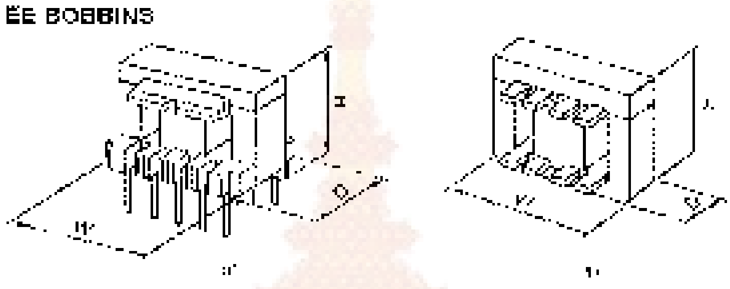
ค่าการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ (Core Loss) การสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์จะทำให้แกนเฟอร์ไรต์ร้อน ซึ่งมีสาเหตุหลัก 2 ประการ คือ การสูญเสียที่เกิดจากลักษณะ ฮิสเตอร์รีซิสของแกน (Hysteresis Loss) และการสูญเสียจากการเกิดกระแสไหลวนในแกนเฟอร์ไรต์ (Eddy Current Loss) ที่ความถี่ 100kHz การสูญเสียจากการเกิดกระแสไหลวนในแกนจะมีค่าน้อยสำหรับแกนที่มีขนาดใหญ่ไม่มากนัก ดังนั้นการสูญเสียที่ทำให้เกิดความร้อนในแกนจะพิจารณาได้จากการสูญเสียทางฮิสเตอร์รีซิสของแกนเพียงอย่างเดียว ด้วยกราฟแสดงค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์แสดงไว้ในรูปที่ 2.20 ปกติค่ากำลังสูญเสียจะถูกระบุไว้เป็นกิโลวัตต์ต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร (kW/m^3) และมีค่าขึ้นกับค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ความถี่ในการใช้งานรวมถึงอุณหภูมิขณะใช้งานของแกนเฟอร์ไรต์



รูปที่2.21 ค่าการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ของผลิตภัณฑ์ชนิด 6H20 7H20 และ 7H10

2.5.1.3 บอบบิ้น (Bobbin)

บอบบิ้นหรือแกนรองพัน ปกติทำจากพลาสติก ชนิดทนความร้อนได้สูงและไม่ติดไฟ บอบบิ้นจะช่วยให้การพันขดลวดบนแกนเฟอร์ไรต์สะดวกขึ้น และป้องกันปัญหาการลัดวงจรระหว่างขดลวดและแกนเฟอร์ไรต์ บอบบิ้นจะมีขนาดมาตรฐานตามมาตรฐานของแกนเฟอร์ไรต์ ตัวอย่างลักษณะและขนาดของบอบบิ้นดูได้จากรูปที่ 2.22 และตารางที่ 2.2 บอบบิ้นส่วนใหญ่จะถูกออกแบบให้มีขาพักลวดทองแดง เพื่อความสะดวกในการพันขดลวดและการบัดกรีติดกับแผ่น PCB



รูปที่ 2.22 ลักษณะบอบบิ้นของแกนเฟอร์ไรต์

ตารางที่ 2.2 ขนาดบอบบิ้น

Part No.	No. of pin terminal	Dimensions (mm) W	D	H
BE-8-1106CPH	6	6.9	9	8
BE-19-1108CPS	8	10.4	10.2	11.2
BE-13-1110CPS	10	13.2	12.7	12.1
BE-16-1106CP	6	16.3	13.1	14.0
BE-16-1110CPH	10	16.3	13.1	14.6
BE-16-1108CPH	8	16.5	14.8	13.0
BE-16-1110CPS	10	16.3	44.1	16.3
BE-19-1106CP	6	20.3	16.7	16.2
BE-19-1108CPH	8	20.3	16.2	18.0
BE-22-1108CP	8	22.3	37.1	20.1
BE-30-1110CP	10	30.4	25.1	24.6
BE-30-1112CP	12	30.4	25.1	20.0
BE-40-1112CP	12	40.5	30.2	55.0
BE-40-1112CPH	12	40.5	30.2	35.7
BE-50-1112CP	12	50.7	36.2	43.0
BE-50-50/16-1112CPH	12	52	77	16.7
BE-60-1112CP	12	60.6	45.2	45.2
BE-62-3/62/6-1112CPH	12	64	98	16.2

* Material: FR phenol, UL Grade 94V-0, Pin material: Steel wire (Solder plated)

2.5.1.4 สายทองแดงอาบน้ำยา (Copper Wire)

การพันขดลวดของตัวเหนี่ยวนำสวิตซ์ซิ่งปกติจะใช้สายทองแดงอาบน้ำยาพันประกอบเข้ากัน เพื่อให้ได้จำนวนรอบตามต้องการ ขนาดของขดลวดทองแดงที่จะใช้พันนั้นขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านขดลวด ความถี่ และผลข้างเคียงอื่น ๆ

2.5.1.5 เทปฉนวน (Insulation Tape)

เทปฉนวนใช้พันสำหรับเป็นตัวรองระหว่างชั้นของขดลวดในตัวเหนี่ยวนำสวิตซิ่ง และมีความสำคัญในการเป็นฉนวนป้องกันความเสียหายของขดลวด และทำให้ขดลวดมีความแข็งแรง วัสดุที่ใช้ทำเทปฉนวนต่างเป็นพวกไมลาร์ (Mylar) หรือโพลีเอสเตอร์ (Polyester) ที่มีความหนาอยู่ในช่วง 0.05-0.1 มิลลิเมตร การเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับการออกแบบและความปลอดภัยที่ต้องการจากตัวเหนี่ยวนำสวิตซิ่งเป็นหลัก

2.5.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

2.5.2.1 ข้อกำหนดในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำสวิตซิ่ง

1. ขนาดและรูปร่างรวมทั้งความถี่ของกระแสและแรงดัน
2. กำลังสูญเสีย ประสิทธิภาพหรืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น
3. คุณสมบัติทางไฟฟ้าและเชิงกลอื่น ๆ

2.5.2.2 ขีดจำกัดในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำสวิตซิ่ง

1. ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กอิ่มตัวของแกนเหล็ก
2. กำลังงานสูญเสียในลวดทองแดงหรือแกนเหล็ก
3. คุณสมบัติอื่น ๆ เช่น Permeability (μ) เป็นต้น

โดยมีสมการของการออกแบบดังนี้

$$B_{max} = \frac{\phi_{max}}{S} = \frac{\lambda_{max}}{SN} = \frac{LI_{peak}}{SN} \qquad (2.66)$$

จากขีดจำกัดของลวดทองแดง โดยคำนึงถึงความสูญเสีย (Copper loss: P_{cu})

$$P_{cu} = I_{rms}^2 R \qquad (2.67)$$

โดยที่ค่า R หาได้จาก

$$R = \rho \frac{l}{A_w} \qquad (2.68)$$

2.5.5 การเลือกหรือกำหนดขนาดแกนเหล็กโดยใช้วิธีการคำนวณแบบ A_p (Area Approach)

วิธีนี้เป็นการออกแบบที่ใช้ค่า T_{max} ซึ่งกำหนดความหนาแน่นของกระแสในลวดตัวนำ ($J = 100 - 1000 A/cm^2$) โดยคำนวณหาขนาดของแกนเหล็กดังนี้

$$N = \frac{LI_{peak}}{B_{max}S} \qquad (2.69)$$

$$kW = \frac{NI_{rms}}{J} = NA_w \qquad (2.70)$$

แทนค่า N จะได้

$$A_w = \frac{LI_{peak}I_{rms}}{B_{max}JS} \qquad (2.71)$$

เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$A_p = WS = \frac{LI_{peak}I_{rms}}{B_{max}Jk} \qquad (2.72)$$

โดยมีวิธีการออกแบบดังนี้

1. จากข้อกำหนดและข้อจำกัด คำนวณหาค่า A_p จากสมการที่ (2.72)

2. เลือกขนาดของแกนให้มีขนาดมากกว่า A_p ที่ได้จากการคำนวณในข้อที่ 1

3. คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดตัวเหนี่ยวนำ (N) จากสมการที่ (2.71)

4. คำนวณหาขนาดของลวดตัวนำ A_w จากสมการที่ (2.71)

5. เลือกเบอร์ลวดทองแดงให้มี A_w ใหญ่กว่า A_w ที่คำนวณได้จากข้อที่ 4 ซึ่งทำได้โดยการเลือกเบอร์ลวดที่รัศมีน้อยกว่าค่าความลึกผิวทองแดงที่มีความถี่สูงสุดที่ใช้งานนำมาตีเกลียวให้มี A_w ตามที่เลือกไว้

$$\delta(m) = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \qquad (2.73)$$

เมื่อ $\delta(m)$ คือ ค่าความลึกผิวทองแดง

ρ มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{56 \times 10^6}$ Ω

μ มีค่าเท่ากับ $\mu_0\mu_r$

1. คำนวณหาค่า P_{cu}

2. ปรับค่า J ใหม่จนได้ค่า P_{cu} ที่เหมาะสม

3. คำนวณหาขนาดของช่องอากาศ (Air gap: l_g) และทำการปรับช่องอากาศจนได้ค่า L ตามที่ต้องการ

2.5.3.1 ขั้นตอนการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

ต้องกำหนด L, I และ $\%\Delta I$

ขั้นตอนที่ 1

กำหนดความหนาแน่นของกระแส (J) ในช่วง 2.5 - 10 A/mm^2 ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของการระบายความร้อน กำหนดค่า k อยู่ในช่วง 0.3 - 0.6 ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของฉนวนที่หุ้มลวดและพื้นที่ช่องว่างระหว่างลวด

หาค่า ΔI โดยที่ $\Delta I = 2(I_{max} - I)$

หาค่า ΔB โดยที่ $\Delta B = \Delta I \times \Delta B_{max}$ (สำหรับแกนเฟอร์ไรต์ใช้ $\Delta B_{max} = 0.3T$)

หาค่า B_{max} โดยที่ $B_{max} = \Delta B_{max} - \frac{\Delta B}{2}$

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณค่า A_p จากสมการที่ (2.72)

$$A_p = \frac{LI_{peak}I_{rms}}{B_{max}Jk}$$

โดยที่ L มีหน่วยเป็น Henry, I มีหน่วยเป็น Ampere, B มีหน่วยเป็น Tesla, J มีหน่วยเป็น A/m^2 และ A_p มีหน่วยเป็น m^4 หรือ mm^4 (ตามขนาดของแกน)

ขั้นตอนที่ 3

เลือกขนาดของแกนเหล็กที่มี A_p ใกล้เคียงกับค่า A_p ที่ได้จากการคำนวณในขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 4

คำนวณจำนวนรอบของขดลวดจากสมการที่ (2.69)

$$N = \frac{LI_{peak}}{B_{max}S}$$

เมื่อ S มีหน่วยเป็น cm^2

ขั้นตอนที่ 5

คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของขดลวด

$$A_w = \frac{I_{rms}}{J} \tag{2.74}$$

คำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด

$$d = \sqrt{\frac{4A_w}{\pi}} \tag{2.75}$$

เลือกใช้ลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับค่า d ที่คำนวณได้

ขั้นตอนที่ 6

ทดสอบว่าสามารถพันขดลวดลงใน W ได้หรือไม่ จากสมการที่ (2.69)

W = (N × พื้นที่หน้าตัดของลวดที่ใช้จริง) / k_u (2.76)

ขั้นตอนที่ 7

คำนวณหาค่าความกว้างของ Air Gab (l_g)

$$l_g = \frac{\mu_0 N^2 S}{2L} \tag{2.77}$$

เมื่อพันขดลวดเสร็จแล้วทำการวัดค่า L ที่ได้ว่าตรงตามต้องการหรือไม่ถ้าไม่ได้ตามต้องการให้ปรับขนาดความกว้างของ Air Gap จนกระทั่งได้ค่า L ตามต้องการ

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลขนาดลวดทองแดง

หมายเลข AWG	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	ความต้านทาน (75°) Ω/km	น้ำหนัก kg/km	จำนวนรอบต่อ cm
0	8.25	0.392	457	
1	7.35	0.494	377	
2	6.54	0.624	299	
3	5.83	0.786	237	
4	5.19	0.991	188	
5	4.62	1.25	149	
6	4.12	1.58	118	
7	3.67	1.99	93.8	
8	3.26	2.51	74.4	
9	2.91	3.16	59.0	
10	2.59	3.99	46.8	14
11	2.31	5.03	37.1	17
12	2.05	6.34	29.4	22
13	1.83	7.99	23.3	27
14	1.63	10.1	18.5	34
15	1.45	12.7	14.7	40
16	1.29	16.0	11.6	51

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลขนาดลวดทองแดง (ต่อ)

หมายเลข AWG	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	ความต้านทาน (75°) Ω/km	น้ำหนัก kg/km	จำนวนรอบต่อ cm
17	1.15	20.2	9.23	63
18	1.02	25.5	7.32	79
19	0.912	32.1	5.8	98
20	0.812	40.5	4.6	123
21	0.732	51.1	3.65	153
22	0.644	64.4	2.3	192
23	0.573	81.2	2.89	237
24	0.511	102	1.82	293
25	0.455	128	1.44	364
26	0.405	162	1.15	454
27	0.361	205	1.1	575
28	0.321	259	1.39	710
29	0.286	327	1.75	871
30	0.255	421	2.21	1090

2.5.4 มอสเฟตกำลัง (Power MOSFET)

มอสเฟตกำลังสามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูงตั้งแต่ 30 kHz ไปจนถึงประมาณ 200 - 400 kHz เวลาในการเปลี่ยนสถานะค่อนข้างสั้น และการพัฒนาในปัจจุบันมีแนวโน้มจะทำให้มอสเฟตกำลังทำงานได้ที่ความถี่สูงขึ้นไปอีก ซึ่งจะเป็นผลดีในการลดขนาดของทรานสฟอร์เมอร์ ในส่วนวงจรขับของมอสเฟตกำลังนั้นสามารถทำได้ง่ายโดยขับเกตของมอสเฟตได้จาก TLP250 โดยตรง โครงสร้างของมอสเฟตกำลังจะเป็นไปได้ทั้งในลักษณะ N Channel และ P-Channel ขาของมอสเฟตประกอบด้วย 3 ขา คือ ขาเกต (Gate) ขาเดรน (Drain) และขาซอร์ส (Source)

กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในมอสเฟตกำลังขณะทำงาน จะเป็นไปได้ 2 ลักษณะ คือ กำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะและกำลังงานสูญเสียขณะนำกระแส มอสเฟตกำลังจะมีช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสสั้นมาก เพราะตามโครงสร้างของมอสเฟตกำลังจะไม่มีการสะสมประจุเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามมอสเฟตกำลังจะมีค่าความต้านทานขณะนำกระแสค่อนข้างสูง การสูญเสียกำลังขณะนำกระแสจึงสูงกว่าไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ถึงแม้ว่าช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและหยุดนำกระแสของมอสเฟตกำลัง จะ

ค่อนข้างสั้นแต่โดยทั่วไปมอสเฟตกำลังมักใช้งานที่ความถี่สูง การคิดค่ากำลังงานสูญเสียขณะทำงานจำเป็นต้องนำค่ากำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะมาคิดด้วย และเนื่องจากช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส (Turn off Time) กับช่วงเวลาเริ่มนำกระแส (Turn on Time) ของมอสเฟตกำลังมีค่าใกล้เคียงกันจึงต้องนำมาคิดทั้งสองช่วงเวลา ดังนั้นกำลังงานสูญเสียขณะมอสเฟตกำลังขณะทำงาน P_D จะมีค่าเท่ากับ

$$P_D = P_{sw(on)} + P_{sw(off)} + P_C \tag{2.78}$$

$$P_{sw(on)} = \frac{0.5 I_{DS(on)} V_{in} t_r}{T} \tag{2.79}$$

$$P_{sw(off)} = \frac{0.5 I_{DS(on)} V_{in} t_f}{T} \tag{2.80}$$

$$P_C = I^2_{Drms} \times R_{DS(on)} \tag{2.81}$$

2.5.5 ชนิดและการเลือกใช้ไดโอด

เนื่องจากคอนเวอร์เตอร์จะมีความถี่ในการทำงานของวงจรตั้งแต่ 20 kHz ขึ้นไปไดโอดที่ใช้ในคอนเวอร์เตอร์จึงจำเป็นที่ต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- มีแรงดันขณะนำกระแสต่ำ
- มีช่วงเวลาในการคืนตัว (Reverse Recovery Time: t_{rr}) ที่สั้น
- ทนกำลังไฟฟ้าได้สูง

ด้วยเหตุนี้ซิลิกอนไดโอดที่ใช้ในวงจรเร็คติไฟร์ทั่วไปจึงไม่สามารถนำมาใช้กับวงจรคอนเวอร์เตอร์ได้ เนื่องจากมีช่วงเวลาคืนตัวที่มาก กำลังสูญเสียในรูปความร้อนจะเกิดขึ้นสูงและมีประสิทธิภาพที่ต่ำโดยไดโอดที่ใช้ในวงจรคอนเวอร์เตอร์จะเลือกใช้ใน 3 ชนิดดังต่อไปนี้

1. ฟาสต์ – รีคัฟเวอรี่ไดโอด (Fast Recovery Diode)
2. อัลตร้าฟาสต์ – รีคัฟเวอรี่ไดโอด (Ultra Fast Recovery Diode)
3. ชอตต์กี้ไดโอด (Schottky Diode)

ฟาสต์ - รีคัฟเวอรี่ไดโอดมีช่วงเวลาคืนตัวประมาณ 200 – 750 นาโนวินาที ซึ่งสั้นกว่าซิลิกอนไดโอดธรรมดามีอัตราทนแรงดันไบอัสกลับได้สูงถึง 1000V ส่วนอัลตร้าฟาสต์ - รีคัฟเวอรี่ไดโอด มีช่วงเวลาคืนตัวประมาณ 25 – 100 นาโนวินาที มีอัตราทนแรงดันไบอัสกลับได้สูงถึง 1000V แรงดันตกคร่อมขณะที่นำกระแสของไดโอดทั้งสองชนิดมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันคือประมาณ 0.6 ถึง 1.5 V

2.5.6 การเลือกตัวเก็บประจุในวงจรกำลังของวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน

ในวงจรกำลังของวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน ตัวเก็บประจุกำลังมีหน้าที่เก็บพลังงานในรูปของประจุไฟฟ้า และทำการจ่ายแรงดันคงที่ให้กับเอาต์พุตหรือคายประจุให้กับโหลดขณะที่มอสเฟตอยู่ในช่วงเวลา Turn ON และเก็บประจุเมื่ออยู่ในช่วงเวลา Turn OFF จะต้องเลือกตัวเก็บประจุที่สามารถทนแรงดันได้เท่ากับแรงดันทางด้านเอาต์พุต หากเลือกตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะช่วยในส่วนของการลดแรงดันกระเพื่อมทางด้านเอาต์พุตลดลง

ตัวเก็บประจุในวงจรกำลังหากพิจารณาในโหมดกระแสต่อเนื่องของวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ค่าของตัวเก็บประจุพิจารณาได้จากสมการที่ (2.57) แรงดันกระเพื่อมทางเอาต์พุต (ΔV_O) และ กระแสเอาต์พุต (I_O) ที่ใช้งาน ค่าดิวตี้ไซเคิลสูงสุดที่ใช้งาน ความถี่ในการสวิตช์ของคอนเวอร์เตอร์ (f) ดังสมการจะใช้คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่จะใช้งาน

$$C = \frac{I_{O(max)} D_{max}}{f \Delta V_O} \qquad (2.82)$$

ค่าความต้านทานอนุกรมสมมูลของตัวเก็บประจุ (Equivalent Series Resistance ESR) หาได้จาก

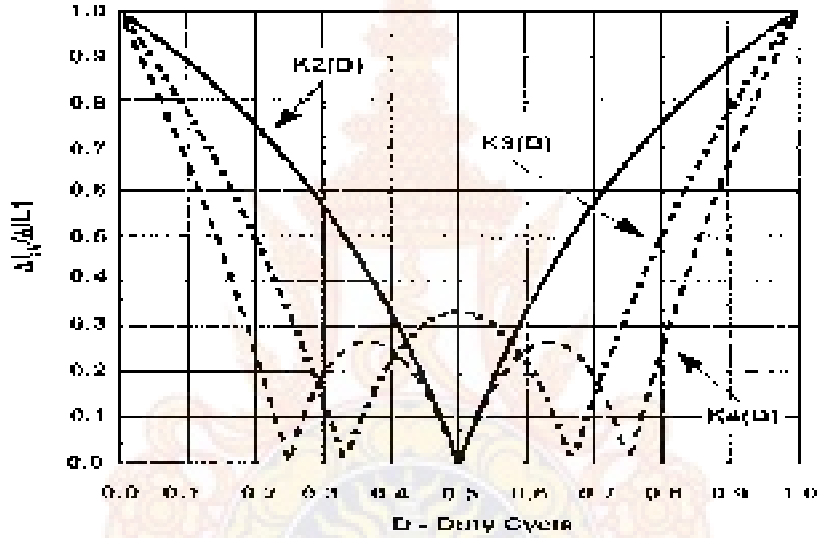
$$ESR = \frac{\Delta V_O}{\left[\frac{I_{O(max)}}{1 - D_{(max)}} + \frac{\Delta I_L}{2}\right]} \qquad (2.83)$$

2.6 เทคนิคการอินเตอร์ลีฟ (Interleaved Technique)

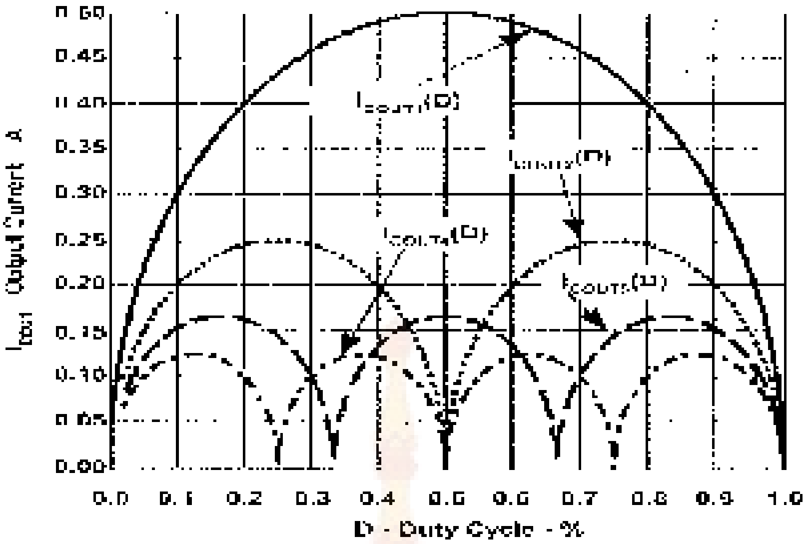
เทคนิคการอินเตอร์ลีฟ [2] สามารถทำได้โดยการนำเอาสัญญาณขับนำสวิตช์ของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์หลายๆ วงจรมาต่อขนาน แล้วกำหนดเฟสของสัญญาณขับนำสวิตช์ให้เหลื่อมเวลาการทำงานกันออกไปเพื่อให้วงจรสลับการทำงานซึ่งกันและกันโดยจะแบ่งมุมการทำงานของสัญญาณขับนำสวิตช์ให้ห่างกันหรือใน 1 คาบเวลาการทำงาน (360/ N) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับจำนวนวงจร (N) ที่นำมาอินเตอร์ลีฟกันและมีความถี่ของการสวิตช์เท่ากัน และหลักการนี้จะทำให้แอมพลิจูดของกระแสระลอกลดลง และเป็นการเพิ่มประสิทธิผลของความถี่กระแส ค่าระลอกของวงจร โดยไม่ทำให้เกิดความสูญเสียที่สวิตช์หรืออุปกรณ์ การนำวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์มาขนานกัน โดยใช้เทคนิคการอินเตอร์ลีฟ เพื่อเพิ่มความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มากขึ้น และลดค่าระลอกกระแสในขดลวดเหนี่ยวนำทั้งสองทำให้สามารถลดขนาดของตัวเหนี่ยวนำลงได้

ในงานวิจัยนี้นำวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนานกัน 4 เฟส (N = 4) โดยใช้เทคนิคการอินเตอร์ลีฟ เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสสูงสุดได้ 46 A ดังแสดงในรูปที่ 2.23 โดยจัดให้มีเฟสของสัญญาณพัลส์ควบคุมสวิตช์ตัวบนและตัวล่างห่างกัน 90° ซึ่งรูปคลื่นของกระแสสวิตช์กระแสระลอกที่ตัวเหนี่ยวนำและกระแสระลอกด้านเข้าจะลดลงเหลือ 25 % เมื่อทำการต่อวงจรแปลงผันแบบบูสต์ขนานกันจำนวน 4 วงจร

จากคุณสมบัติของอินเตอร์ลีฟที่กล่าวมาข้างต้นสามารถนำค่าระลอกของแต่ละวงจรมาหักล้างกันได้ (Ripple Cancellation) นั่นคือ ค่าระลอกรวมที่ด้านออกลดลง และขนาดค่าระลอกจากการหักล้างกันของสองวงจรมีความสัมพันธ์กับดิวตี้ไซเคิลดังแสดงในรูปที่ 2.23 พบว่าค่าระลอกถูกหักล้างอย่างสมบูรณ์เมื่อดิวตี้ไซเคิลเป็น 25 %



รูปที่ 2.23 ขนาดค่าระลอกกับดิวตี้ไซเคิลของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล
โดยใช้เทคนิคการอินเตอร์ลีฟ



รูปที่ 2.24 กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุกับดิวตี้ไซเคิลของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ แบบขนาน 4 โมดูล

2.7 ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller)

ตัวควบคุมแบบพีไอ [3] เป็นการนำเอาคุณสมบัติของ ตัวควบคุมแบบพีกับตัวควบคุมแบบไอมารวมกัน ดังนั้นสัญญาณที่ออกจากตัวควบคุมชนิดนี้คือ

สัญญาณทางออก = สัญญาณทางออกแบบพี + สัญญาณทางออกแบบไอ

$$v_{out}(t) = G_p v_{in}(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t v_{in}(t)dt \tag{2.84}$$

แปลงลาปลาซจะได้

$$v_{out}(s) = G_p v_{in}(s) + \frac{v_{in}(s)}{T_i s} \tag{2.85}$$

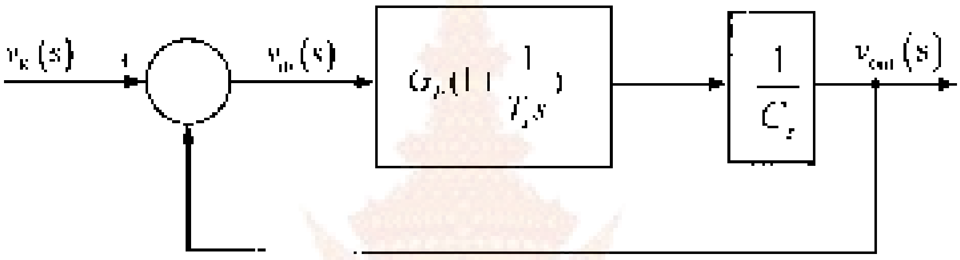
$$v_{out}(s) = G_p v_{in}(s)\left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \tag{2.86}$$

เมื่อ $T_i = G_p T_i$ เขียนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน ดังสมการที่ (2.87)

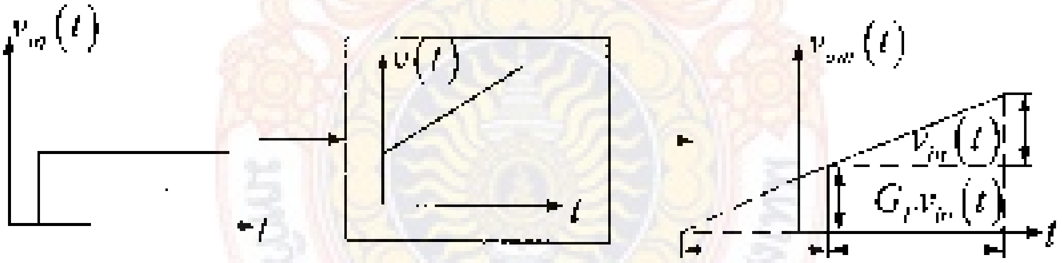
$$F(s) = \frac{v_{out}(s)}{v_{in}(s)} = G_p(1+\frac{1}{T_i s}) \qquad (2.87)$$

ค่าของ G_p และ T_i สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ การปรับปรุงค่า T_i จะมีผลต่อการกระทำการควบคุมแบบไอ แต่ถ้าปรับค่าความไวของสัดส่วน G_p จะมีผลทั้งการกระทำการควบคุมแบบพี และการกระทำการควบคุมแบบไอ ส่วนกลับของ T_i เรียกว่า "อัตราส่วนการจัดใหม่" อัตราส่วนการจัดใหม่เป็นจำนวนครั้งต่อนาทีที่การควบคุมแบบสัดส่วนเริ่มต้นใหม่

จากสมการที่ (2.87) สามารถนำมาเขียนเป็นภาพบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.25และผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดแสดงได้ดังรูปที่2.26

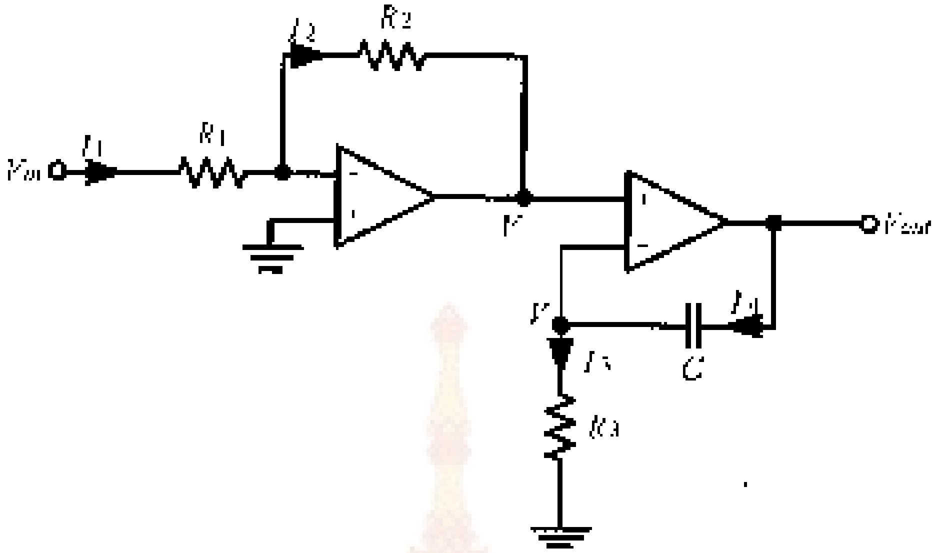


รูปที่ 2.25 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 2.26 ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดของตัวควบคุมแบบพีไอ

จากรูปที่ 2.26 สามารถสร้างเป็นวงจรออปแอมป์ได้ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 วงจรออลพาสสำหรับรูปแบบทีไอ

จากวงจรในรูปที่ 2.27 สามารถแปลงลาปลาซได้ดังนี้

$$I_1(s) = I_2(s) \tag{2.88}$$

$$\frac{V_{in}(s)}{R_1} = -\frac{V(s)}{R_2} \tag{2.89}$$

$$V(s) = -\frac{R_2}{R_1}V_{in}(s) \tag{2.90}$$

$$I_3(s) = I_4(s) \tag{2.91}$$

$$\frac{V(s)}{R_1} = Cs(V_{out}(s) - V(s)) \tag{2.92}$$

$$V(s) = \frac{R_3Cs}{(1 + R_3Cs)}V_{out}(s) \tag{2.93}$$

เมื่อเทียบสมการจะได้สมการ

$$\frac{R_2}{R_1}V_{in}(s) = \frac{R_3Cs}{(1+R_3Cs)}V_{out}(s) \tag{2.94}$$

$$F(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{R_2}{R_1}\left(1+\frac{1}{R_3Cs}\right) \tag{2.95}$$

เมื่อ $G_p = \frac{R_2}{R_1}$ คือ ความไวคงสัดส่วนหรืออัตราการขยาย

$T_i = R_3C$ คือ อัตราส่วนจัดใหม่

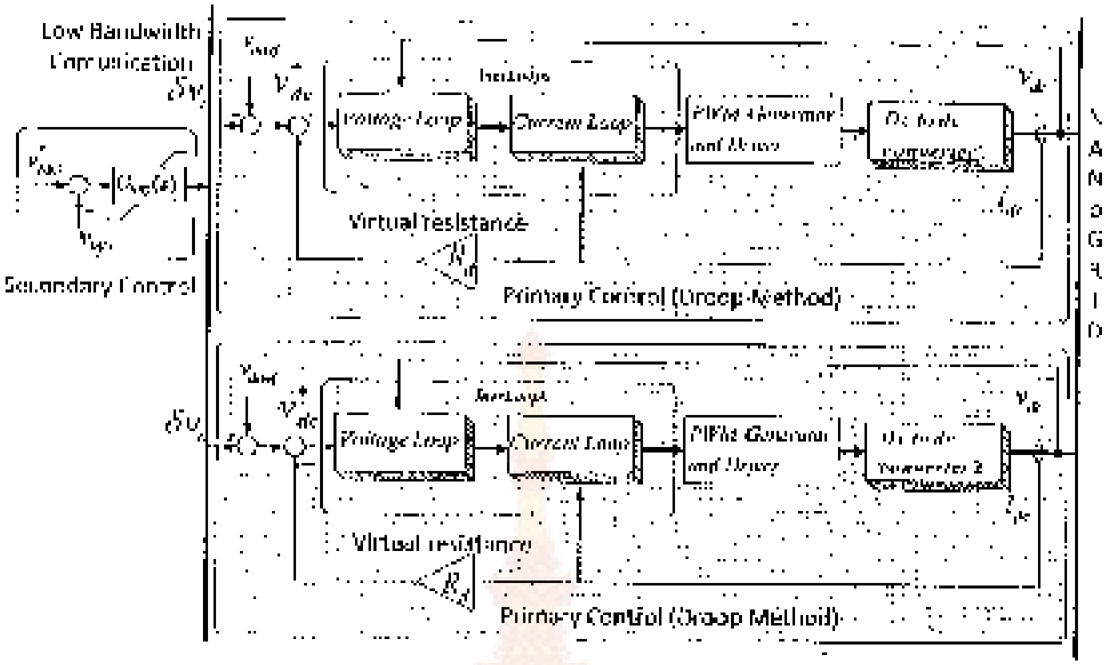
สรุปการควบคุมแบบพีร่วมกับแบบไอนั้นคือการนำคุณสมบัติของการควบคุมทั้งสองแบบมารวมกัน นั่นคือการควบคุมมีการตอบสนองที่เร็วและระบบมีความแม่นยำผิดพลาดน้อยที่สุดที่สภาวะคงตัว สามารถปรับค่าพีและไอได้อิสระต่อกันและปรับค่าตัวควบคุมพีได้จาก R_2 และปรับค่าตัวควบคุมไอได้จาก R_3

2.7 เทคนิคการควบคุมแบบดรูป (Droop Control technique)

ระบบไมโครกริดจะใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์กักเก็บพลังงานและระบบจำหน่ายตามลำดับ ในระบบไมโครกริดทั้งสองแบบจะมีลำดับขั้นการควบคุมในระบบดังในรูปที่ 1 คือ

1. การควบคุมปฐมภูมิ (Primary Control)
2. การควบคุมขั้นทุติยภูมิ (Secondary Control)
3. การควบคุมขั้นที่สาม (Tertiary control)

การขนานวงจรแปลงผันเพื่อให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นและเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบนั้น วิธีที่เหมาะสมสำหรับไมโครกริดก็คือการควบคุมแบบดรูป ซึ่งมีข้อดีที่ง่ายในการสร้างและไม่จำเป็นต้องใช้การสื่อสารระหว่างชุดวงจรแปลงผันเมื่อเปรียบเทียบกับการขนานแบบอื่น



รูปที่ 2.28 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมขั้นต้นด้วยวิธีดรูป

ในการขนานวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจะใช้การแบ่งกระแสตรงด้านเอาต์พุต (I_{dc}) ของวงจรแปลงผัน ดังในรูปที่ 2.28 ส่วนค่าตัวต้านทานเสมือน (Virtual resistor; R_d) จะคำนวณจากสมการที่ (2.97) จากช่วงแรงดันกระแสตรงที่ยอมรับได้

$$I_{dc(FL)} R_d \le V_{dcmax} - V_{dcmin} \tag{2.96}$$

$$R_d \le (V_{dcmax} - V_{dcmin}) / I_{dc(FL)} \tag{2.97}$$

เมื่อ v_{dcmax} และ v_{dcmin} คือแรงดันกระแสตรงสูงสุดและต่ำสุด

$I_{dc(FL)}$ คือกระแสโหลดสูงสุดที่ต้องการจ่าย

บทที่ 3

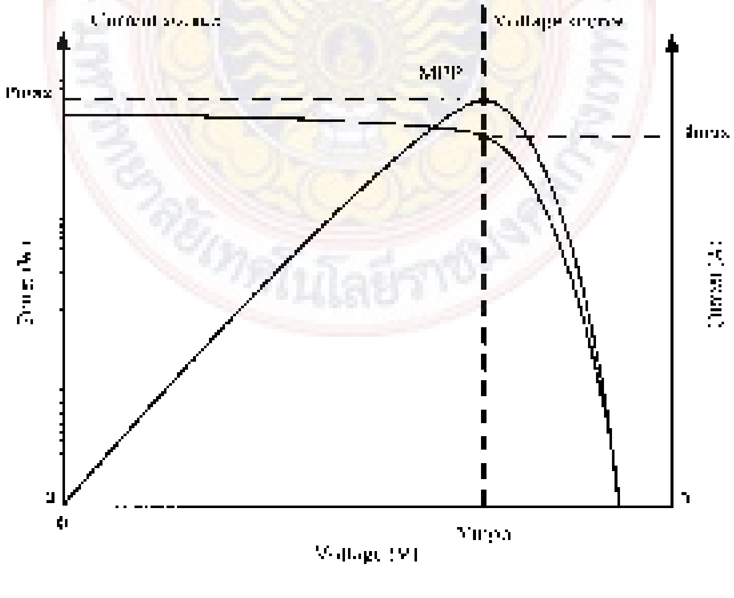
การออกแบบงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบงานวิจัย โดยการทำการทดลองเก็บข้อมูลกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากนั้นจำลองกราฟคุณสมบัติด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อศึกษาการทำงานเบื้องต้นและเป็นข้อมูลในการโปรแกรมแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์ วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้งานต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูง จำเป็นต้องใช้การขนานจำนวน 4 โมดูลเพื่อให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ 1 kW

3.1 หลักการออกแบบชุดติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

การนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งานโดยให้ได้รับกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่าที่ความสามารถของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายออกมาได้นั้นต้องมีการกำหนดจุดการทำงานที่จะได้กำลังไฟฟ้ามากที่สุด จากรูปที่ 3.1 แสดงถึงเส้นกราฟการจ่ายแรงดันและกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการรับแสงที่ความเข้มแสงต่างๆกัน และเมื่อนำโหลดมาต่อก็จะสามารถหาจุดที่โหลดได้รับ กระแสและแรงดันค่าหนึ่งบนเส้นกราฟซึ่งนำมาเขียนเป็นเส้นก็จะได้เส้นขึ้นมาเส้นหนึ่งคือ เส้นแรงดันจ่ายโหลดคงที่ (Constant Voltage Load) ซึ่งเมื่อพิจารณาที่จุดนี้ ค่ากำลังไฟฟ้า ที่โหลดได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ใช่กำลังไฟฟ้าที่มากที่สุดเมื่อคิดจากสมการที่ (3.1)

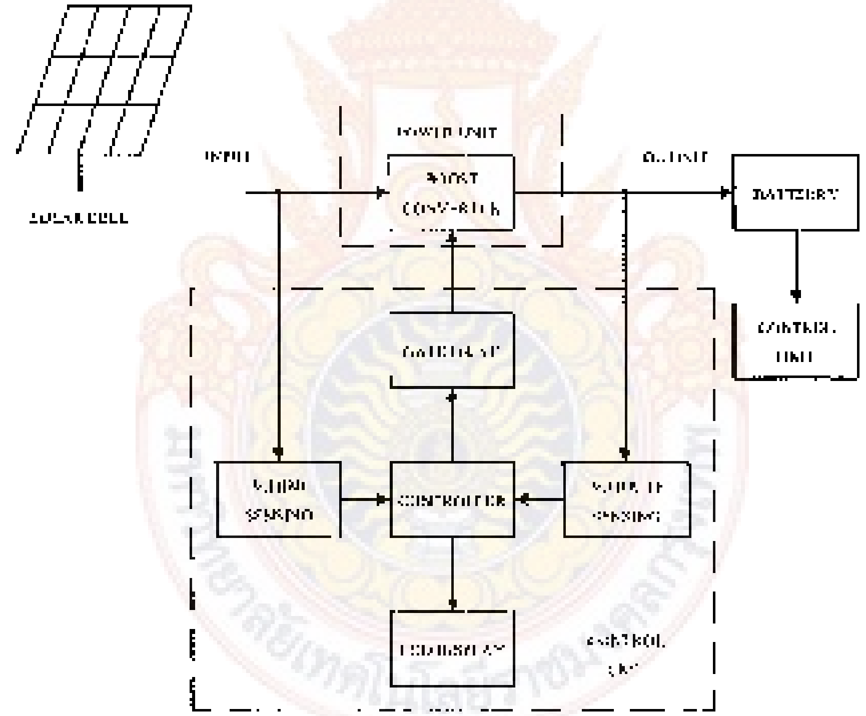
$$P = V*I \tag{3.1}$$



รูปที่ 3.1 VI Characteristic ของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อพิจารณาจากกราฟคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคูณที่ค่าของกระแสและแรงดันที่คงที่ เมื่อจ่ายโหลดจะมีค่าน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคูณค่าของกระแสและแรงดันที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point) เมื่อเป็นเช่นนี้ จึงต้องมีอัลกอริทึมที่ช่วยในการเปลี่ยนจุดการทำงานจากจุดแรงดันจ่ายโหลดคงที่มาเป็นจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point) อัลกอริทึมนั้น คือ การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking : MPPT) โดยใช้หลักการของการควบคุมแรงดันและกระแสจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมองอยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาให้แก่โหลด ซึ่งการควบคุมนั้นใช้หลักการของการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลให้กับสวิตช์ของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) ที่ส่งผลมาจากภาคควบคุมอีกที เพื่อให้ได้จุดทำงานที่ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

3.2 ส่วนประกอบหลักของโครงการวิจัย



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมของอัลกอริทึมติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดและส่วนแสดงผล

จากหลักการทำงานของชุดติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด(MPPT) ที่ต้องการให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากที่สุด ดังนั้นถ้าสามารถทำวงจรที่มีการวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายออกมา แล้วมีการเก็บข้อมูลไว้เปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง

ส่วนหลักนี้แล้ว ก็จะสามารถประยุกต์ทำเป็นชุดติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้และส่วนประกอบหลักของการทำงานโดยรวมของชุดติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแสดงได้ดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 3.2

- แผงเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 1 แผง ขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 30 วัตต์ ที่ 1000 W/m^2 25°C ชนิดที่เป็นสารอะมอร์ฟัสซิลิกอน (Amorphous Silicon) ของบริษัท มิโลนิค อิเล็กโทรนิคส์ วัดแรงดันได้สูงสุด 31.0 โวลท์และวัดค่ากระแสสูงสุดได้ 0.96 แอมป์

- ส่วนตรวจจับแรงดันและกระแส (V,I Sensor) ตรวจจับค่าแรงดันและกระแสทั้งด้านอินพุทและเอาต์พุต สำหรับส่งไปประมวลผลในส่วนของคอนโทรลเลอร์ และนำไปแสดงผล

- ส่วนคอนโทรลเลอร์ ใช้ในการประมวลผล โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC18F458 ทำการประมวลผลส่งสัญญาณควบคุมไปยังวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ ให้ทำงาน ณ จุดที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ค่าความเข้มแสงและอุณหภูมินั้นๆ ขณะทำงาน โดยในส่วนคอนโทรลเลอร์ จะมีการรับค่าแรงดันจากส่วนตรวจจับแรงดันและกระแสเข้าที่ขาสัญญาณวัดแอนาลอกเป็นดิจิตอล (A/D Converter) ของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วนำค่าที่แปลงเป็นดิจิตอลแล้วไปประมวลผล ออกทางจอแสดงผล และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อควบคุมสัญญาณพัลส์ที่สร้างจากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถปรับดิวตี้ไซเคิ้ลได้ เพื่อนำไปขับสวิตช์ของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ โดยในส่วนคอนโทรลเลอร์จะรวมถึงตัวแยกกราวด์ ทำหน้าที่แยกกราวด์ของระบบระหว่างภาคควบคุมกับภาคกำลัง

- ส่วนชุดบูสต์คอนเวอร์เตอร์จะรับสัญญาณพัลส์ ที่สามารถปรับดิวตี้ไซเคิ้ล ได้จากชุดคอนโทรลเลอร์ เพื่อนำไปควบคุมการเปิด-ปิด ของสวิตช์ของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดตามที่ต้องการ

- ส่วนแบตเตอรี่ ออกแบบใช้แบตเตอรี่แห้ง ขนาด 7.5 แอมป์-ชั่วโมง 12 โวลท์ จำนวน 2 ลูกต่ออนุกรมกัน 24 โวลท์ ใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรควบคุม

- ส่วนแสดงผล จะแสดงค่าแรงดันและกระแสทั้งด้านอินพุทและเอาต์พุตมาแสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายโหลด เปรียบเทียบหาประสิทธิภาพของระบบ

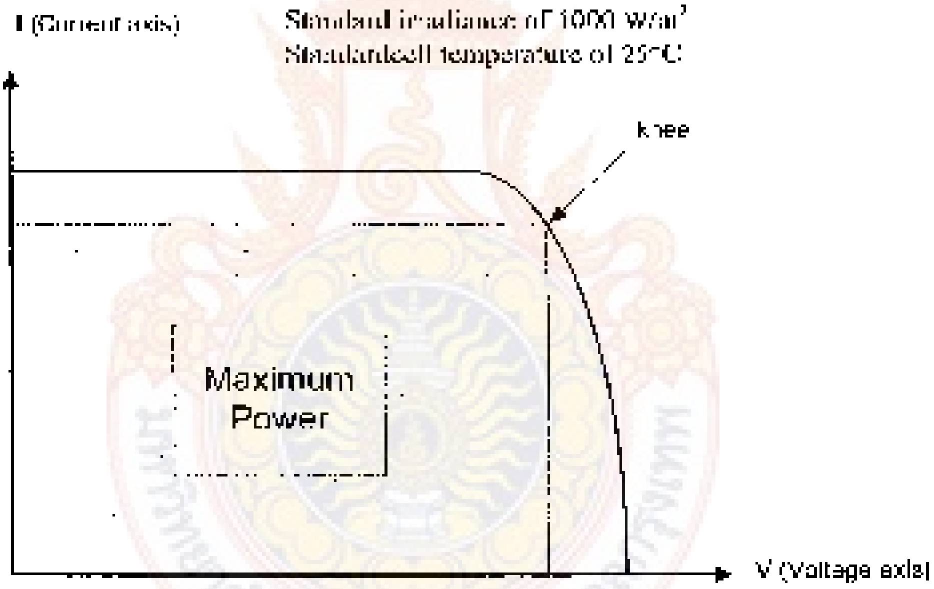
3.3 คุณสมบัติแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัย

เป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Solarmax รุ่น LEC 3024 จำนวน 2 แผง มีคุณสมบัติเฉพาะต่อแผงดังนี้

Maximum Power (P_{max})	30	Watt
Voltage At Maximum Power (V_{pm})	31.0	Volt
Current At Maximum Power (I_{pm})	0.96	Amp
Open Circuit Voltage (V_{oc})	42.9	Volt
Short Circuit Current (I_{sc})	1.17	Amp
Weight	5.5	kg

เซลล์เป็นชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Triple Junction Amorphous Silicon Solar Cell)

หมายเหตุ Open Circuit Voltage และ Short Circuit Current ทดสอบที่ความเข้มแสงอาทิตย์ 1000 W/m² อุณหภูมิที่เซลล์ (Cell Temp) 25°C

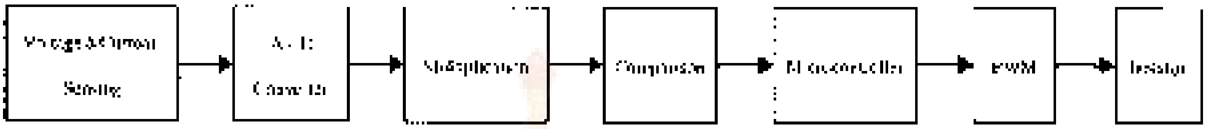


รูปที่ 3.3 กราฟ VI Curve แสดงค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

3.4 อัลกอริทึมติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

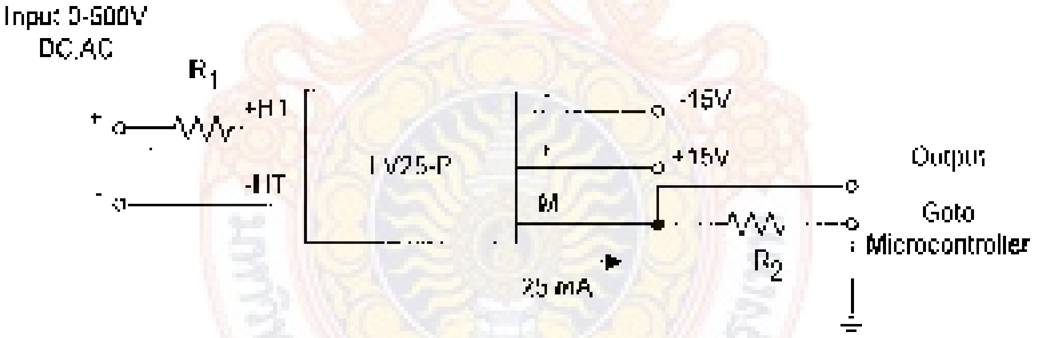
3.4.1 การทำงานของภาคควบคุม

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการเปิด-ปิด สวิตช์ของมอสเฟตกำลัง โดยแสดงส่วนต่างๆ ของวงจรติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดภาคควบคุม ได้แสดงดังบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.4



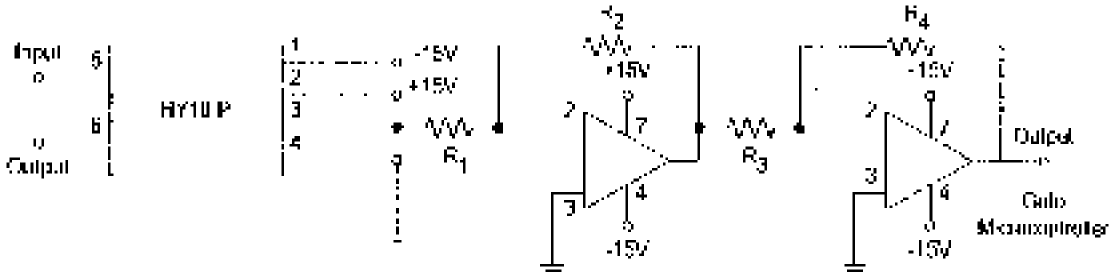
รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมของภาคควบคุม

1. ชุดตรวจจับแรงดันจะใช้ Voltage Transducers (LEM) รุ่น LV25-P สามารถวัดแรงดันได้ตั้งแต่ 0-500 V มีอัตราส่วนการแปลงค่า 100V/10mA ดังนั้นด้านอินพุตจะใส่ R_1 เท่ากับ 10 kΩ และเอาท์พุตจะมีค่าเท่าไหร่นั้นขึ้นอยู่การใส่ค่าความต้านทาน R_2 โดยในโครงงานนี้ต้องการวัดค่าแรงดันสูงสุดที่ 5 V จึงต้องใช้ R_2 มีค่าเท่ากับ 100 โอห์ม ถ้าอุปกรณ์ตรวจจับรับแรงดันพิกัด 100V จะได้สัญญาณก่อนเข้าพอร์ตแอนาลอกมีค่าสูงสุด เป็น 2.5 V



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์และวงจรวัดแรงดัน

2. ชุดตรวจจับกระแสจะใช้ Current-Voltage Transducers (LEM) รุ่น HY10-P ที่มีอัตราการแปลง 10A/4V ซึ่งในรูปที่ 3.5 จะตรวจจับกระแสก่อนส่งค่าไปที่ PIC หลักการของอุปกรณ์ตรวจจับกระแสก็จะแปลงค่ากระแสให้เป็นแรงดัน โดยแรงดันที่ออกมาจาก HY10-P ที่ขา 3 นั้นจะมีค่าสูงสุดที่ 4V ดังนั้นจึงต้องทำการลดระดับแรงดันโดยใช้วงจรกลับเฟส ซึ่งจะใช้ออปแอมป์เบอร์ LF353 เพื่อให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0-4 V ถ้าอุปกรณ์ตรวจจับรับกระแสพิกัด 5 A จะได้สัญญาณก่อนเข้าพอร์ตแอนาลอกมีค่าสูงสุด 2.6V ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์และวงจรวัดกระแส

3. ชุดแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลหรือ ADC เพื่อให้สามารถนำค่าแรงดันและกระแสที่ได้จากชุดตรวจจับไปใช้ในการคำนวณในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F458 โดยใช้วงจรจาก PIC 18F452 แปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล จะมีขนาด 10 บิต 8 ช่อง ที่ขาพอร์ต RA0/AN0, RA1/AN1, RA2/AN2, RA3/AN3, RA4/AN4, RE5/AN5, RE6/AN6, RE7/AN7 โดยงานวิจัยนี้จะใช้ 4 ช่องเท่านั้น โดย RA0/AN0 จะกำหนดรับสัญญาณแรงดันอินพุต RA1/AN1 จะกำหนดรับสัญญาณกระแสอินพุตที่เปลี่ยนเป็นรูปแรงดัน RA2/AN2 จะกำหนดรับสัญญาณแรงดันเอาต์พุต RA3/AN3 จะกำหนดรับสัญญาณกระแสเอาต์พุตที่เปลี่ยนเป็นรูปแรงดัน โดยการแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลจะเป็นแบบการประมาณค่า(Successive Approximation) ซึ่งจะอยู่ในส่วนของการเขียนโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458

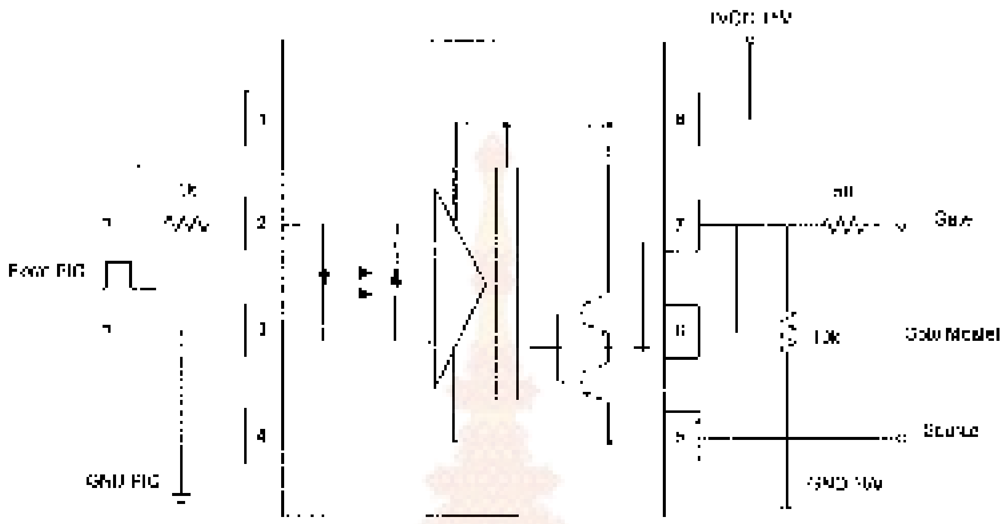
4. Multiplication เป็นส่วนที่ทำหน้าที่คูณแรงดันและกระแสที่อยู่ในรูปของสัญญาณดิจิตอลแล้ว เพื่อให้เป็นค่ากำลัง โดยส่วนของการคำนวณนี้จะอยู่ในส่วนของการเขียนโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F458

5. Comparison เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคูณกันของแรงดันและกระแส ณ จุดทำงานต่างๆที่ได้จากการเลื่อนจุดการทำงาน เพื่อให้ได้ซึ่งจุดทำงานที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ ความเข้มแสงและอุณหภูมินั้นๆ โดยส่วนของการเปรียบเทียบนี้จะอยู่ในส่วนของการเขียนโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458

6. ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เก็บค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคูณกันของแรงดันและกระแสไว้เพื่อทำการเปรียบเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดต่างๆ ซึ่งจะใช้หน่วยความจำภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เก็บไว้เพื่อทำการเปรียบเทียบ ซึ่งเบอร์ที่จะใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นเบอร์ 18F458

7. สัญญาณพัลส์ (Pulse Width Modulation : PWM) โดยใช้โหมดสร้างสัญญาณพัลส์จากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ ณ ค่าดิวตี้ไซเคิลที่ต้องการ และนำไปสั่งมอสเฟตกำลังให้ทำงาน ณ จุดที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

8. ชุดแยกกราวด์ (Isolator) ทำหน้าที่แยกกราวด์ระหว่างภาคควบคุมกับภาคกำลังออกจากกัน โดยออกแบบใช้ไอซีแยกสัญญาณเบอร์ TLP250 ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรแยกโดยทางแสงสำหรับขับเกท

3.5 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรม

1. ทำการเขียนโปรแกรมเป็นภาษาซี บนโปรแกรม MPLAB ด้วยคอมพิวเตอร์ บันทึกเป็นโปรแกรมไฟล์ PROJECT.C เช่น MPPT.C

2. ทำการคอมไพล์โปรแกรมจากภาษาซีเป็นฐานสิบหก (.HEX) ด้วยโปรแกรม CCS Compiler

3. เมื่อทำการคอมไพล์แล้ว ถ้าโปรแกรมไฟล์ที่เขียนขึ้นมีข้อผิดพลาดเกี่ยวกับโครงสร้างของภาษาคำสั่งโปรแกรม MPLAB จะแจ้งให้ทราบว่าผิดพลาดที่บรรทัดที่เท่าไหร่บ้าง บนหน้าต่าง Output ของโปรแกรม MPLAB แล้วทำการแก้ไขบรรทัดที่ผิดพลาด จากนั้นทำการคอมไพล์ใหม่อีกครั้ง

4. ในกรณีโปรแกรมที่คอมไพล์แล้วไม่เกิดข้อผิดพลาด ก็ทำการดาวน์โหลดไฟล์ MPPT.HEX ลงสู่เครื่องโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC โดยผ่านทางโปรแกรม Pickit 2 โดยส่งทางพอร์ต USB ที่เชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับบอร์ด ET-PGMPIC USB V2.0ด้วยสายUSB CONNECTORและเชื่อมสายสัญญาณของพอร์ต TAGETไปยังAdaptor Module เลือกเบอร์ PIC ให้ตรงกับเบอร์ที่ใช้และทำการImport HEX ไฟล์ .HEXเข้ามาในโปรแกรมและทำการกดปุ่ม Write รอจนกว่าเครื่องโปรแกรมจะทำการโปรแกรมเสร็จ เป็นอันเสร็จสิ้นขั้นตอนการโปรแกรม

3.6 การประมวลผลของส่วนโปรแกรมควบคุม

การประมวลผลของส่วนโปรแกรมควบคุมของชุดติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด มีขั้นตอนการทำงานดังนี้ คือ

1. เริ่มจากไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการรับค่าแรงดันและกระแสที่ส่งมาจากชุดตรวจจับกระแสและแรงดัน โดยทำการแปลงค่าจากสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล (A/D Converter) โดยใช้โมดูลจากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 ด้วยการเขียนโปรแกรมควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์

2. นำค่ากระแสและแรงดันที่แปลงค่าแล้วนี้ไปคำนวณหาค่ากำลังงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายออกมา นำค่ากำลังไฟฟ้า ณ ขณะนี้เก็บไว้เป็นค่าอ้างอิง ขณะเดียวกันทำการย้ายจุดการทำงานของระบบไปเล็กน้อยโดยการปรับค่าดิวตี้ไซเคิล ด้วยการเขียนโปรแกรมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ และทำการสร้างสัญญาณพัลส์จากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 นำไปขับมอสเฟตกำลังอีกที

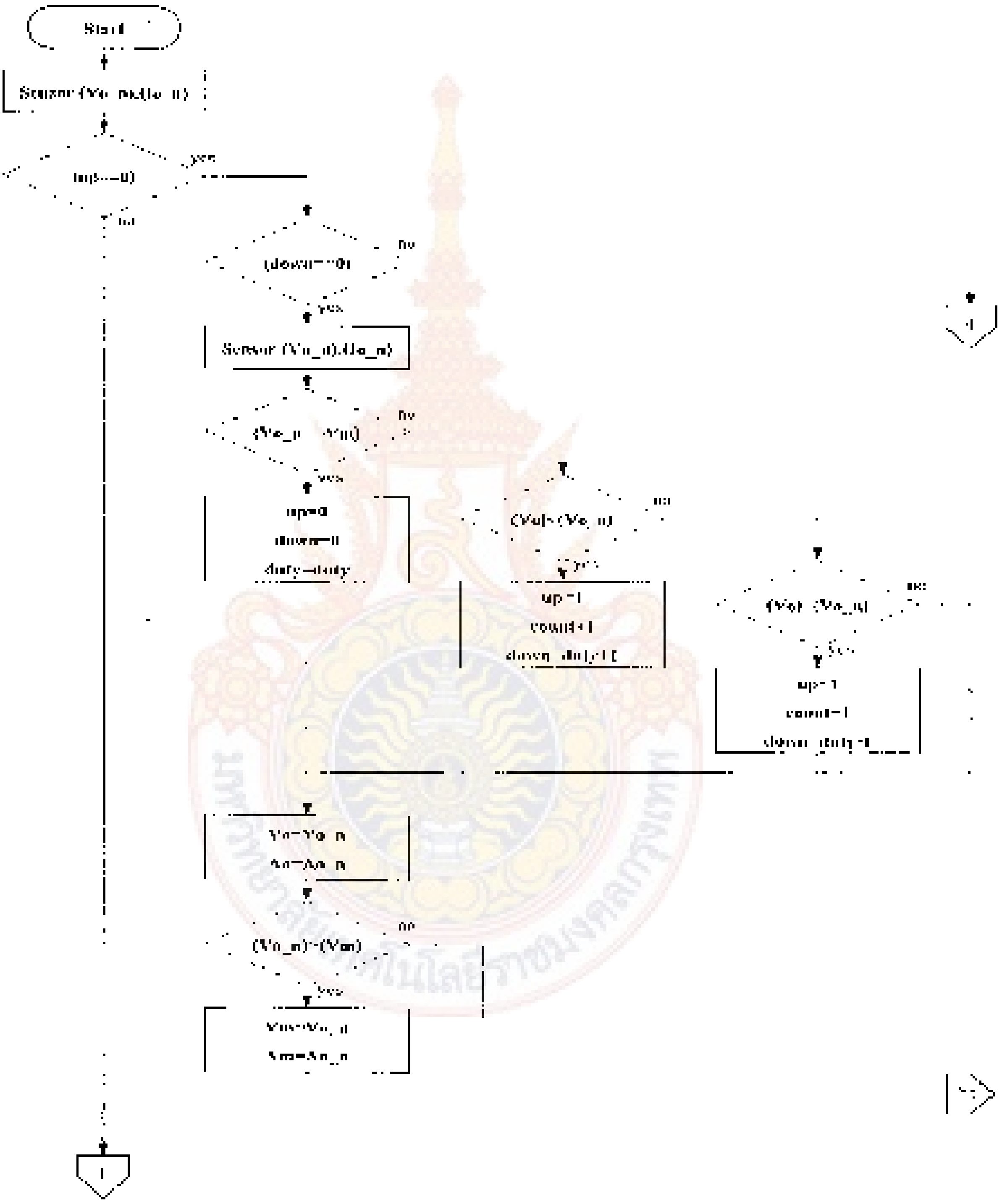
3. ทำการตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้าใหม่เข้ามาเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้า ณ จุดอ้างอิง

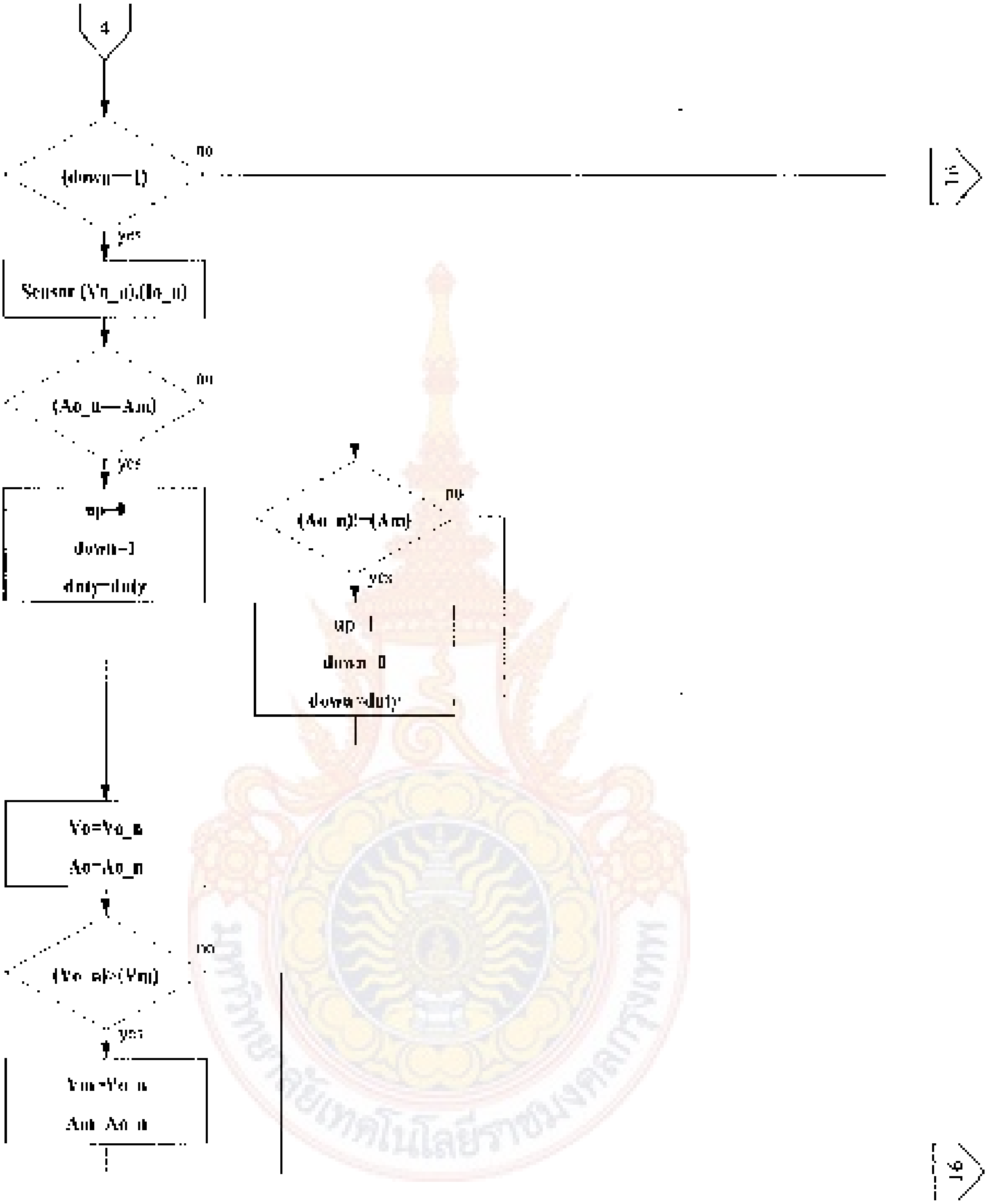
- หากกำลังไฟฟ้าใหม่ที่เข้ามานี้มีค่ามากกว่ากำลังไฟฟ้า ณ จุดอ้างอิง ก็ทำการย้ายจุดการทำงานไปในทิศทางเดิมเล็กน้อย และทำการเก็บค่ากำลังไฟฟ้าใหม่นี้ไว้เป็นกำลังไฟฟ้า ณ จุดอ้างอิงแทน แล้วทำการเปรียบเทียบจุดการทำงานใหม่ต่อไปเรื่อยๆ
- หากกำลังไฟฟ้าใหม่ที่เข้ามานี้มีค่าเล็กน้อยกว่ากำลังไฟฟ้า ณ จุดอ้างอิง ก็ทำการย้ายจุดการทำงานไปในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางเดิมเล็กน้อย จนกว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่นำมาเปรียบเทียบจะมีค่ามากกว่ากำลังไฟฟ้า ณ จุดอ้างอิง

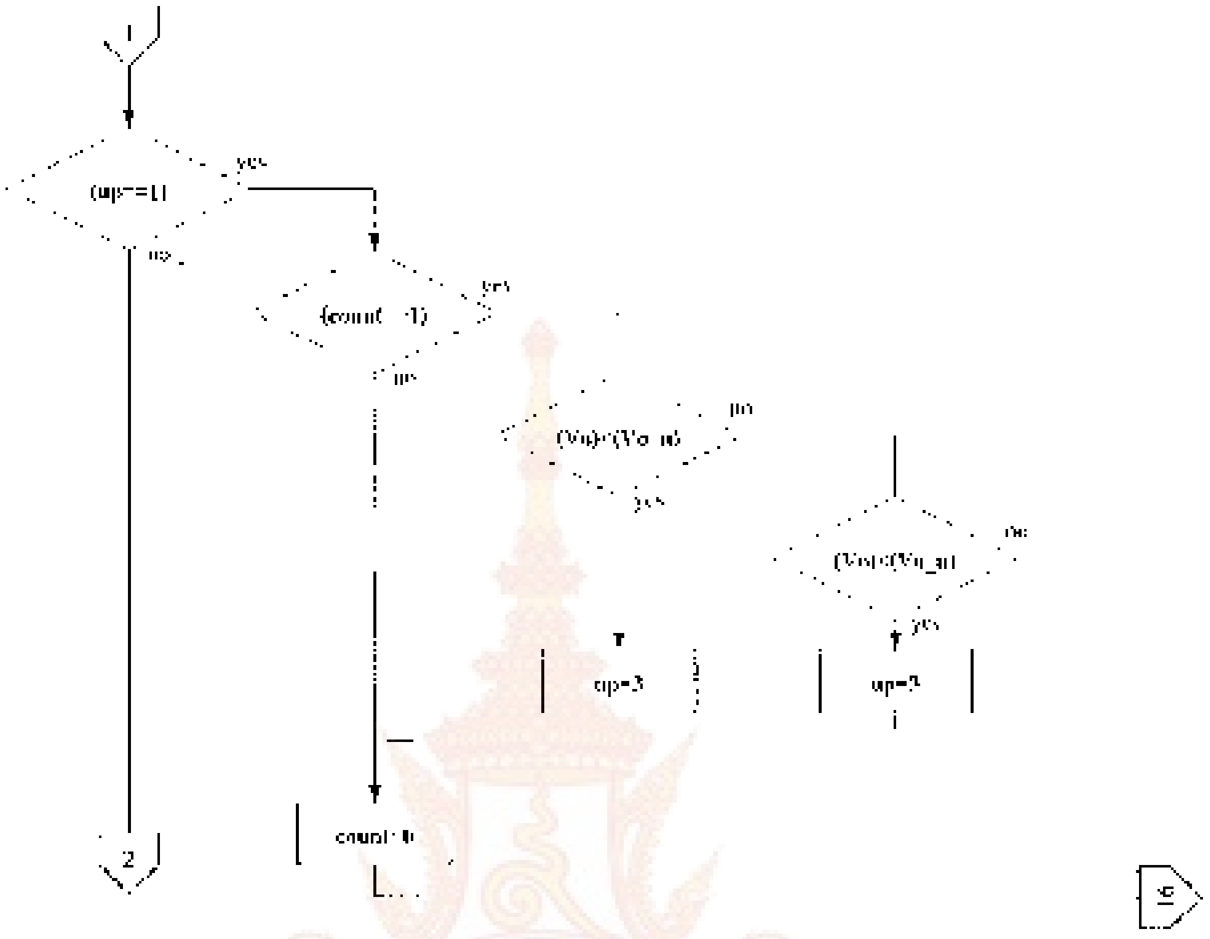
โปรแกรมจะทำงานวนเวลาอย่างนี้ไปเรื่อยๆ เพื่อที่จะให้ได้ค่า ณ กำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ตลอดเวลา แม้ว่าความเข้มแสงและอุณหภูมิขณะทำงานจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตาม

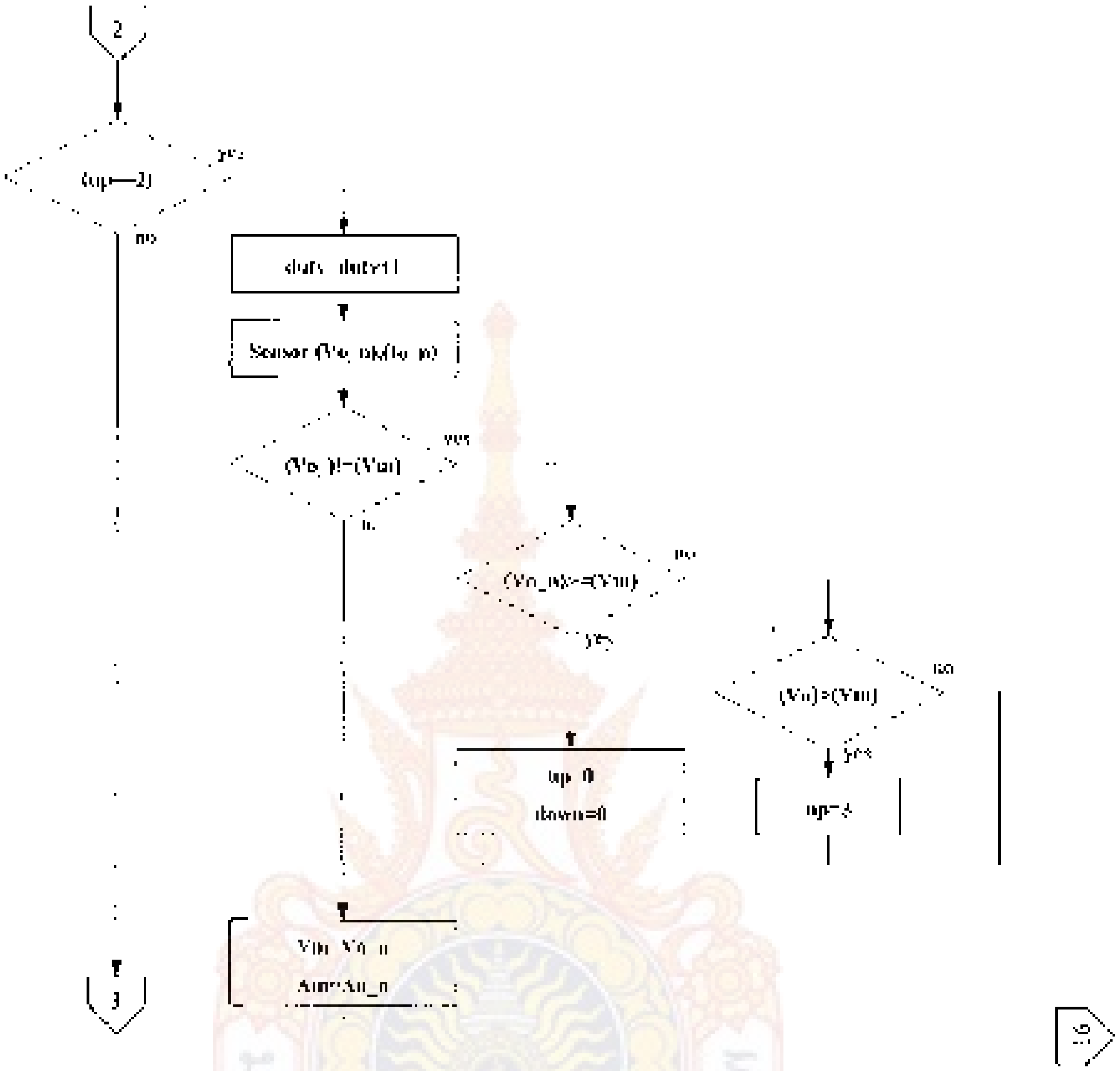
โดยหลักการทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น สามารถนำมาเขียนเป็นโฟลวชาร์ต ได้ดังรูปที่ 3.8 แสดงการทำงานของโปรแกรมควบคุมของชุดติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

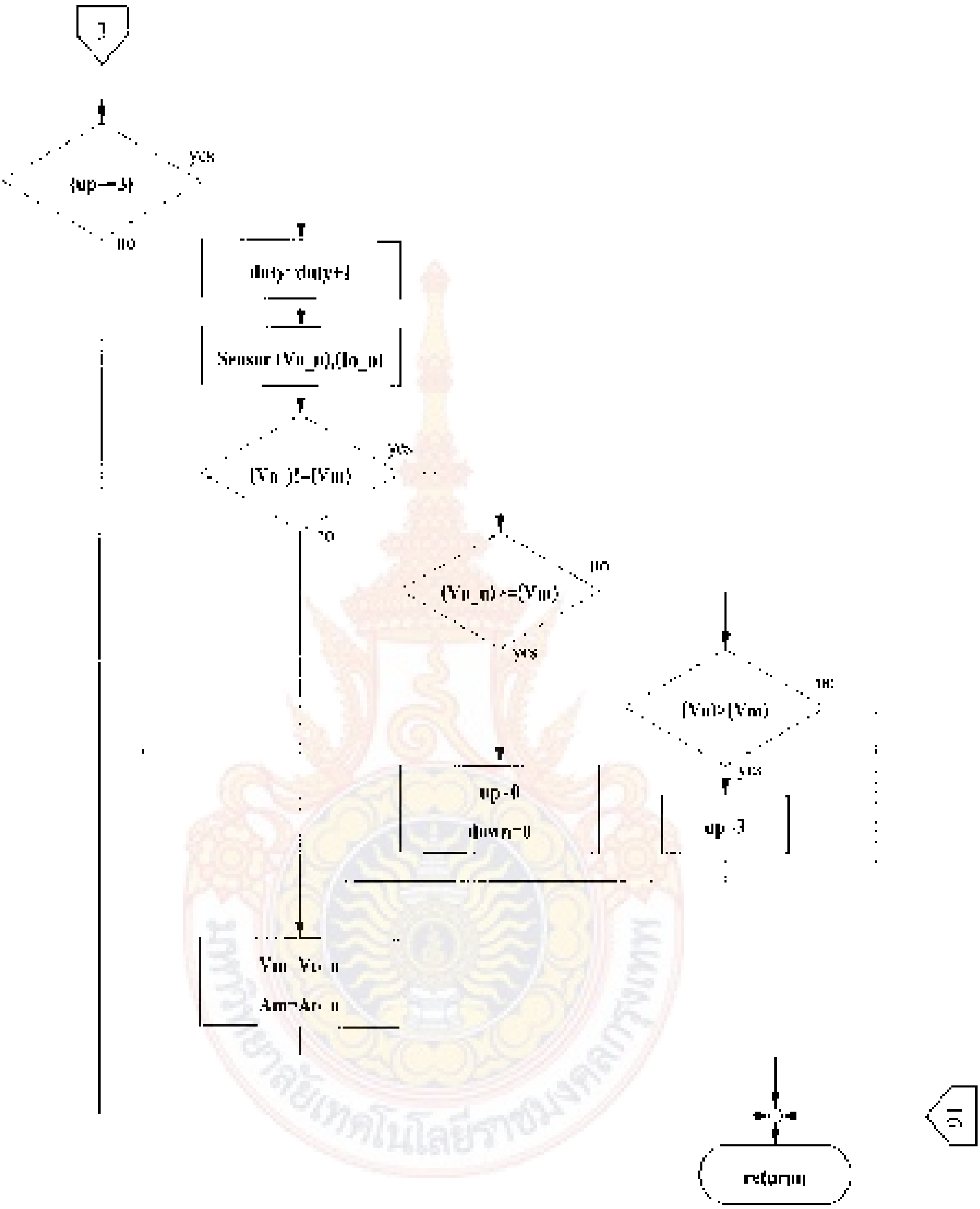
ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมทฤษฎีความนำส่วนเพิ่ม (Incremental Conductance Method -IncCond)




4
no
yes
Sensor (Vo_n),(Io_n)
(Ao_n==Am)
down=1
(Vo_n)>(Vm)
Vo=Vo_n
Ao=Ao_n
16

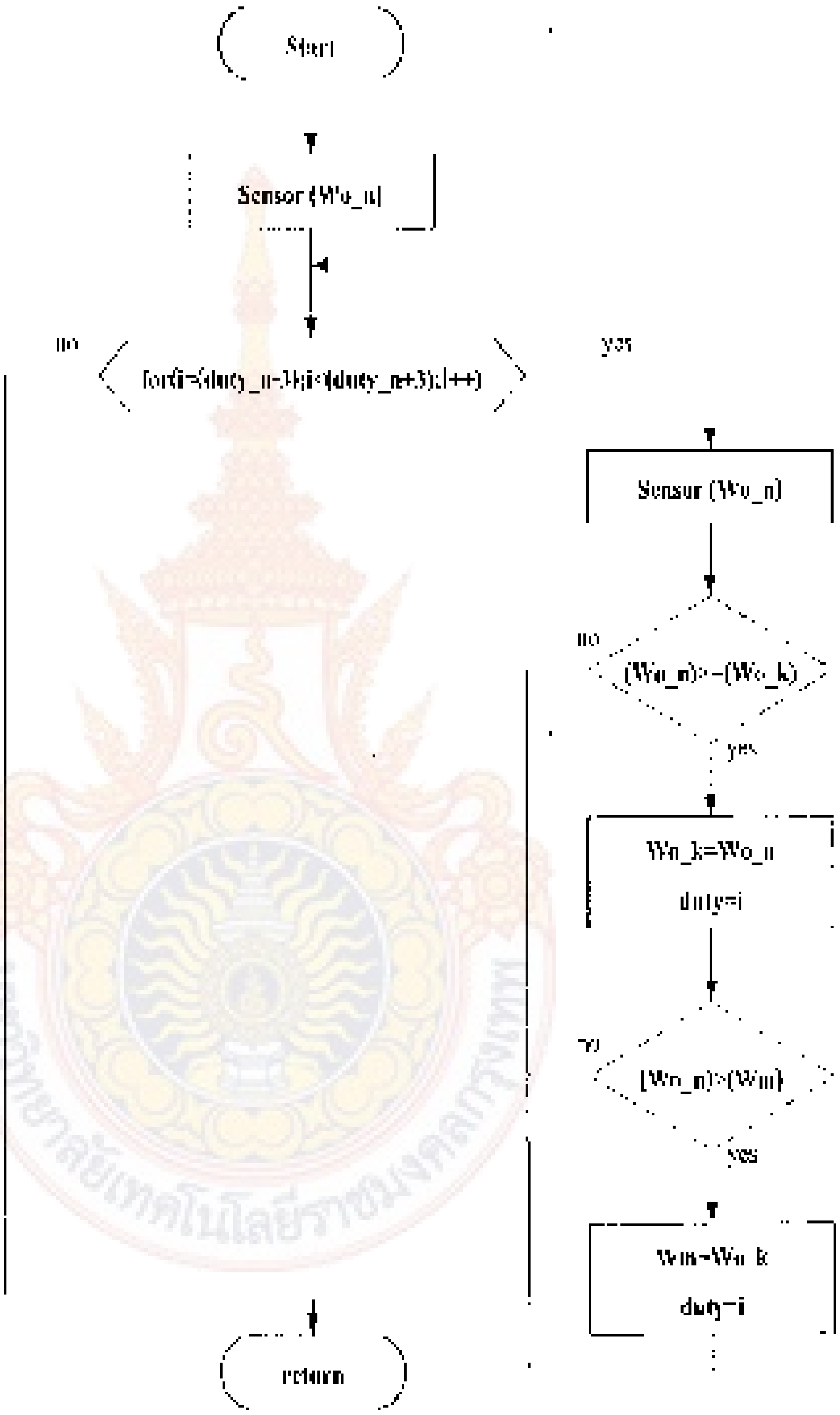

1
yes
no
yes
no
no
yes
count=0
2


2
(up==2)
yes
no
duty=duty+1
Sensor (Vo_n)(Io_n)
(Vo_n)!=(Vm)
yes
no
(Vo_n)>=(Vm)
no
yes
(Vo)>(Vm)
no
yes
up=0
down=0
up=3
Vm=Vo_n
3
16



รูปที่ 3.8 (ก) ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

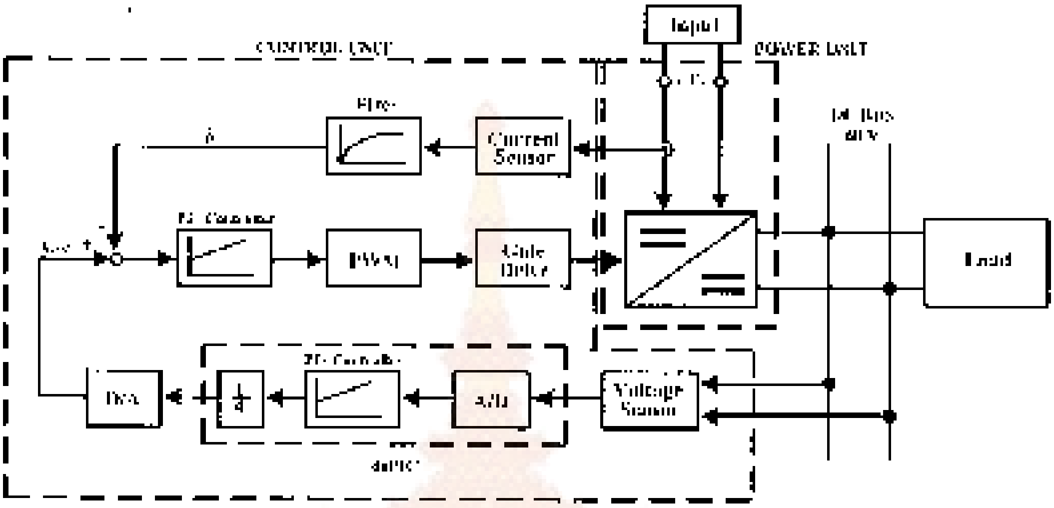
ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมทฤษฎีการรบกวนและการสังเกตการณ์ (Perturbation and Observation Method : P&O)



รูปที่ 3.8 (ข) ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

3.7 การขนานวงจรแปลงผันด้วยเทคนิคอินเตอร์ลีฟ

การขนานวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลด้วยเทคนิคการแบ่งกระแส สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 3.9 บล็อกไดอะแกรมของบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.9 สามารถอธิบายการทำงานของวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลได้ดังนี้

3.7.1 อินพุตได้จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับค่าได้ ทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

3.7.2 วงจรแปลงผันทำหน้าที่เป็นส่วนของภาควงจรกำลัง ซึ่งทำหน้าที่ในการส่งจ่ายพลังงานไปยังระบบคอนเวอร์เตอร์ที่มีการขนานกันของคอนเวอร์เตอร์ 4 โมดูลโดยอาศัยหลักการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

3.7.3 ส่วนวงจรควบคุม ทำหน้าที่เป็นส่วนวงจรควบคุมโดยในงานวิจัยนี้ได้มีการควบคุมในโหมดของกระแสโดยจะนำสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดตัวเหนี่ยวนำ ป้อนกลับมาทำการเปรียบเทียบกับกระแสอ้างอิงของระบบเพื่อที่จะนำสัญญาณที่ได้ไปควบคุมการทำงานของระบบคอนเวอร์เตอร์ที่มีการขนานกันจำนวน 4 โมดูล ซึ่งสามารถแบ่งย่อยส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.7.3.1 อุปกรณ์ตรวจจับกระแสทำหน้าที่ตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดตัวเหนี่ยวนำ

3.7.3.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านทำหน้าที่ เพื่อที่จะกรองสัญญาณรบกวนจากฮาร์มอนิกส์อันเนื่องมาจากการสวิตช์ที่มีความถี่สูงของวงจรกำลังเป็นวิธีลดการผิดพลาดในการคำนวณ

3.7.3.3 ตัวควบคุมแบบพีไอทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมในลูปของกระแสในแต่ละลูป ซึ่งมี 4 ตัว

3.7.3.4 PWM ทำหน้าที่ควบคุมการสวิตช์ที่มอสเฟตให้มีการสวิตช์ที่มุมต่างเฟสกัน 90 องศา

3.7.3.5 วงจรขับเกตทำหน้าที่ขับสวิตช์มอสเฟตที่มีการแยกวงจรควบคุมกับวงจรกำลังในแต่ละวงจรซึ่งมีวงจรขับเกตจำนวน 4 วงจร

3.7.3.6 วงจรตรวจจับแรงดันทำหน้าที่ตรวจจับแรงดันทางด้านเอาท์พุต เพื่อที่จะนำเอาสัญญาณแรงดัน ส่งเข้าไปเป็นสัญญาณอินพุตของพอร์ต A/D ของไมโครคอนโทรลเลอร์

3.7.3.7 dsPIC ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล และทำการประมวลผลข้อมูลสัญญาณแบบดิจิตอล เพื่อควบคุมให้แรงดันทางด้านเอาท์พุตคงที่

3.7.3.8 D/A ทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก

3.8 การออกแบบวงจรกำลังแบบขนาน 4 โมดูล

วงจรกำลังบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิตช์ ตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุต วงจรกำลังต้องมีความสามารถทำงานได้ปกติที่ขนาดพิกัดกระแส แรงดันที่ใช้งานและความถี่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 25 kHz ซึ่งเป็นความถี่ในการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ และเนื่องจากแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แต่ละตัวก็ยังมีส่วนของแรงดันกระเพื่อมอยู่ ดังนั้นจึงต้องผ่านวงจรกรองแรงดัน เพื่อลดแรงดันกระเพื่อมในวงจรกำลังจะประกอบไปด้วยการออกแบบส่วนต่างๆ ดังนี้

3.8.1 การคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง

ในวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมาก เนื่องจากมีหน้าที่ในการเก็บและคายพลังงานเป็นผลให้ระดับแรงดันทางเอาต์พุตมีค่าสูงกว่าระดับแรงดันที่อินพุต การคำนวณหาค่าของตัวเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากสมการที่ (3.2)

$$L = \frac{V_s D}{f \Delta I} \tag{3.2}$$

หาค่าดิวตี้ไซเคิล (D) ได้จาก

$$D = \frac{(V_o - V_s)}{V_o} = \frac{(60-26)}{60} = 0.57 \qquad (3.3)$$

แทนค่าเพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำ

$$L = \frac{26 \times 0.57}{25 \times 10^3 \times 1.5} = 395 \mu H \qquad (3.4)$$

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

ขั้นตอนที่ 1 จากข้อจำกัดและข้อกำหนดในการคำนวณหาค่า A_p ในสมการที่ (3.4) 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

$$A_p = \frac{LI_{peak}I_{rms}}{B_{max}Jk} = \frac{395 \times 10^{-6} \times 12.25 \times 11.5}{0.5 \times 4 \times 10^6 \times 0.65} = 42{,}804 \times 10^{-9} = 42804 mm^4 \qquad (3.5)$$

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

$$A_p = 43700 mm^4, A_w = 397 mm^2, S = 354 mm^2$$

ค่าตัวแปรจาก Datasheet ของแกนเฟอร์ไรต์เทียบกับตัวแปรจากสูตร

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 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของแกนเฟอร์ไรต์เบอร์ EE55/55/21

Parameter		
Core factor	C1	ผิดพลาด! วัตถุไม่สามารถถูกสร้างจากการแก้ไขโค้ดเขตข้อมูล **0.348**
Effective magnetic path length	Le	ผิดพลาด! วัตถุไม่สามารถถูกสร้างจากการแก้ไขโค้ดเขตข้อมูล **123**
Effective cross-sectional area	Ae	ผิดพลาด! วัตถุไม่สามารถถูกสร้างจากการแก้ไขโค้ดเขตข้อมูล **354**
Effective core volume	Ve	ผิดพลาด! วัตถุไม่สามารถถูกสร้างจากการแก้ไขโค้ดเขตข้อมูล **43700**
Cross-sectional center leg area	Acp	ผิดพลาด! วัตถุไม่สามารถถูกสร้างจากการแก้ไขโค้ดเขตข้อมูล **351**
Minimum cross-sectional area	Acp min	ผิดพลาด! วัตถุไม่สามารถถูกสร้างจากการแก้ไขโค้ดเขตข้อมูล **341**
Cross-sectional winding area of core	Acw	ผิดพลาด! วัตถุไม่สามารถถูกสร้างจากการแก้ไขโค้ดเขตข้อมูล **397**
Weight (approx)		ผิดพลาด! วัตถุไม่สามารถถูกสร้างจากการแก้ไขโค้ดเขตข้อมูล **234**

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดตัวเหนี่ยวนำได้จากสมการที่ (3.5) กำหนดให้ $L = 395\mu H, I_{peak} = 12.25A, B_{max} = 0.5, S = 354mm^2$ แทนค่าเพื่อหาจำนวนรอบของขดลวดตัวเหนี่ยวนำ

$$N = \frac{LI_{peak}}{B_{max}S} = \frac{395\times10^{-6}\times12.25}{0.5\times354\times10^{-6}} = 27 \text{ รอบ} \qquad (3.6)$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาขนาดของลวดตัวนำ (A_c)

$$A_c = \frac{I_{rms}}{J} = \frac{11.5\,A}{4\,A/mm^2} = 2.87\,mm^2 \qquad (3.7)$$

ขั้นตอนที่ 5 เลือกเบอร์ลวดทองแดงให้มี A_w ใหญ่กว่า A_w ที่ได้จากการคำนวณจากขั้นตอนที่ 4 โดยคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดได้จาก

$$d = \sqrt{\frac{4A_w}{\pi}} = \sqrt{\frac{4\times 2.87\,mm^2}{\pi}} = 1.91\,mm \qquad (3.8)$$

จากตารางเลือกขดลวดเบอร์ 12 AWG มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.05 mm มากกว่าที่ได้คำนวณไว้เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางมีผลต่อการไหลของกระแสในขดลวดถ้าต่ำน้อยกว่าที่คำนวณได้กระแสจะไหลได้ไม่ถึงที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของลวดที่ใช้งานจริง ว่าสามารถนำไปใช้กับแกนเฟอร์ไรต์ได้หรือไม่

$$A_w = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(2.05\,mm)^2}{4} = 3.3\,mm^2 \qquad (3.9)$$

$$W = \frac{N\times A_w}{k} = \frac{27\times 3.3}{0.65} = 137\,mm^2 \qquad (3.10)$$

W ที่ใช้ได้ต้องมีค่า $\leq 397\,mm^2$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาค่าความกว้างของ Air Gab (l_g)

$$l_g = \frac{\mu_0 N^2 S}{2L} = \frac{4\pi\times 10^{-7}\times 27^2\times 354\times 10^{-6}}{2\times 395\times 10^{-6}} = 0.004102\,mm \qquad (3.11)$$

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

3.8.2 การเลือกอุปกรณ์สวิตช์

อุปกรณ์สวิตช์ในวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์จะเลือกอุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูงเวลาในการเปลี่ยนสถานะค่อนข้างสั้น ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้มอสเฟตที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สวิตช์ เวลาในการสับสวิตช์อยู่ในช่วงนาโนวินาที และในวงจรขับเกทเพาเวอร์มอสเฟตนั้นสามารถทำได้ง่ายเพราะควบคุมด้วยแรงดันและกระแสอินพุตค่าต่ำๆ 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 เวลาคืนสภาพของเพาเวอร์มอสเฟต $t_{rr} = 620\ ns$

3.8.3 การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุต

ในวงจรกำลังของวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ ตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุตของวงจรมีหน้าที่ในการเก็บพลังงานรูปของประจุไฟฟ้าและทำการจ่ายแรงดันออกให้กับเอาต์พุตหรือโหลด หรือคายประจุไฟฟ้าเมื่ออุปกรณ์สวิตช์ Turn ON และทำการเก็บประจุเมื่ออุปกรณ์สวิตช์ Turn OFF ดังนั้นจำเป็นต้องเลือกตัวเก็บประจุที่สามารถทนแรงดันได้เท่าหรือมากกว่าแรงดันเอาต์พุต หากเลือกตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะมีส่วนช่วยในการลดแรงดันกระเพื่อมทางด้านเอาต์พุต การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุตหาได้จากสมการที่ (3.11)

$$C = \frac{I_o D}{f \Delta V_o} \qquad (3.12)$$

แทนค่าเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุต

$$C = \frac{16.67 \times 0.57}{25 \times 10^3 \times 0.6} = 633\ \mu F \qquad (3.13)$$

ดังนั้นควรเลือกขนาดตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุตของวงจรที่มีค่าสูงกว่า 633 μF และแรงดันที่ทนได้ต้องไม่ต่ำกว่าแรงดันเอาต์พุต งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ขนาดตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุต 680 μF ทนแรงดันได้ 250 V

ในการเลือกค่าตัวเก็บประจุหากใช้ค่าที่มีความจุที่สูงจะทำให้แรงดันกระเพื่อมทางด้านเอาต์พุตมีค่าลดลง แต่ค่าความจุของตัวเก็บประจุจะต้องไม่น้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ ถ้าเลือกตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุและอัตราทนแรงดันสูง ๆ ราคาก็จะสูงตามไปด้วยจึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน

3.8.4 การเลือกไดโอดความถี่สูง

ไดโอดที่ใช้ในวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล จะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือทำงานที่ความถี่สูงได้ มีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำและควรพิจารณากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านไดโอด และนำกระแสหาได้จากสมการที่ (3.14)

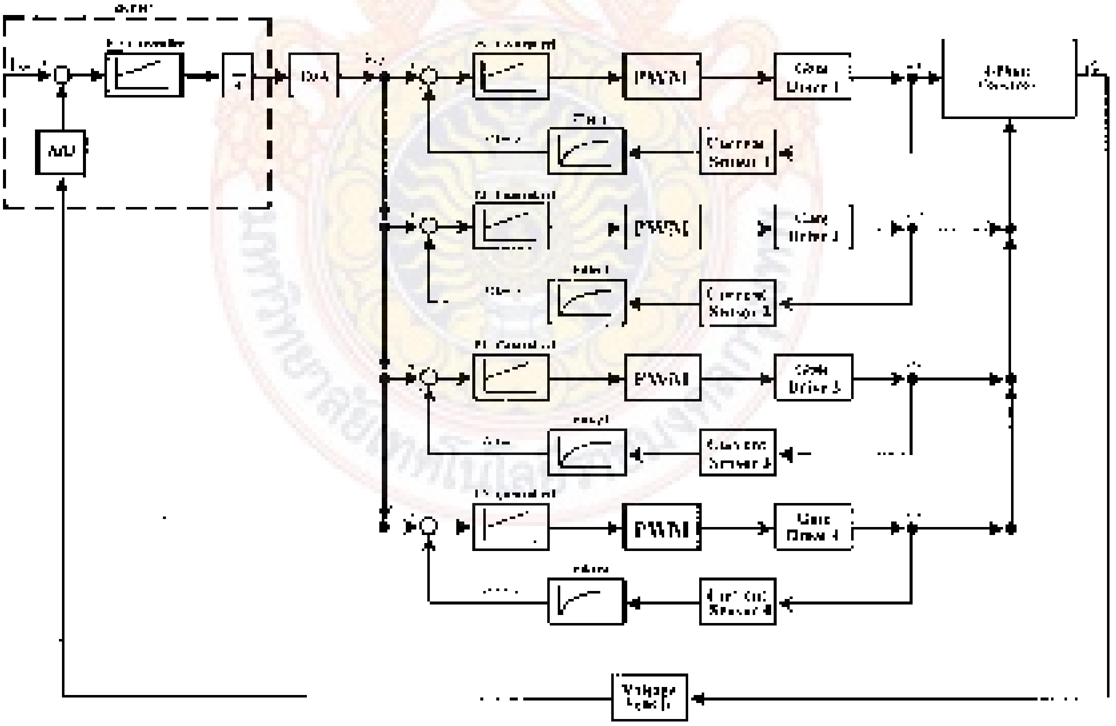
$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times I_{peak} \times \sqrt{\frac{1}{D}} \qquad (3.14)$$

$$I_{rms} = 0.707 \times 12.25 \times 1.325 = 11.47 \qquad (3.14)$$

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

3.9 การออกแบบวงจรควบคุมบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

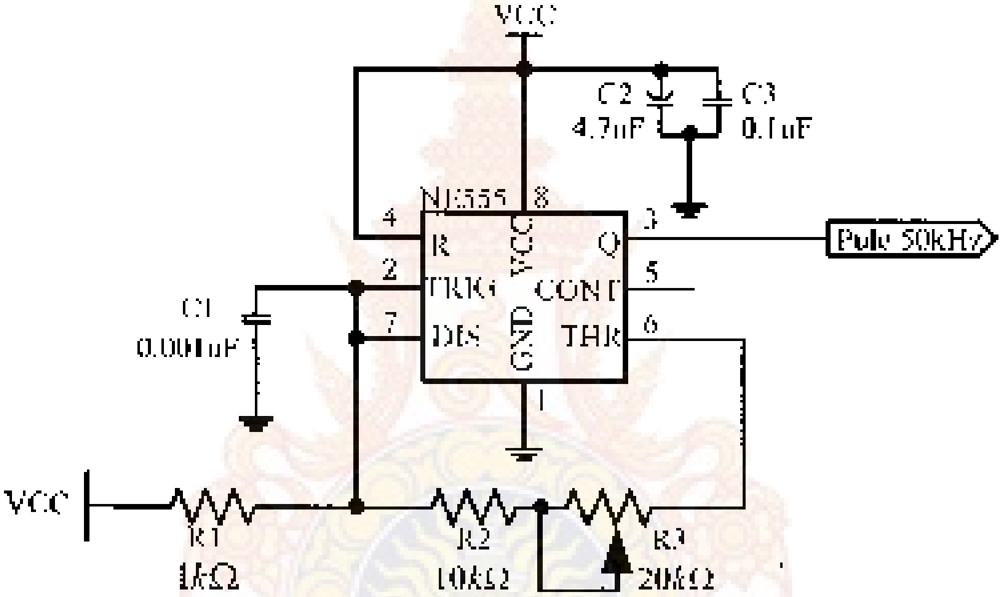
วงจรภาคควบคุมทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล [2] ให้สามารถรักษาระดับการจ่ายกระแสให้คงที่ให้ได้ตามค่าสั่ง โดยใช้การวัดแรงดันด้านขาออกและการควบคุมค่าเฉลี่ยของกระแส ที่มีความถี่ในการสวิตช์คงที่ ประกอบด้วย สัญญาณอ้างอิงของกระแส (I_{ref}), สัญญาณวัดกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ ($I_{L,mea}$) และสัญญาณ PWM ที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจร ในการออกแบบวงจรควบคุมจะประกอบไปด้วยวงจรส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 3.10



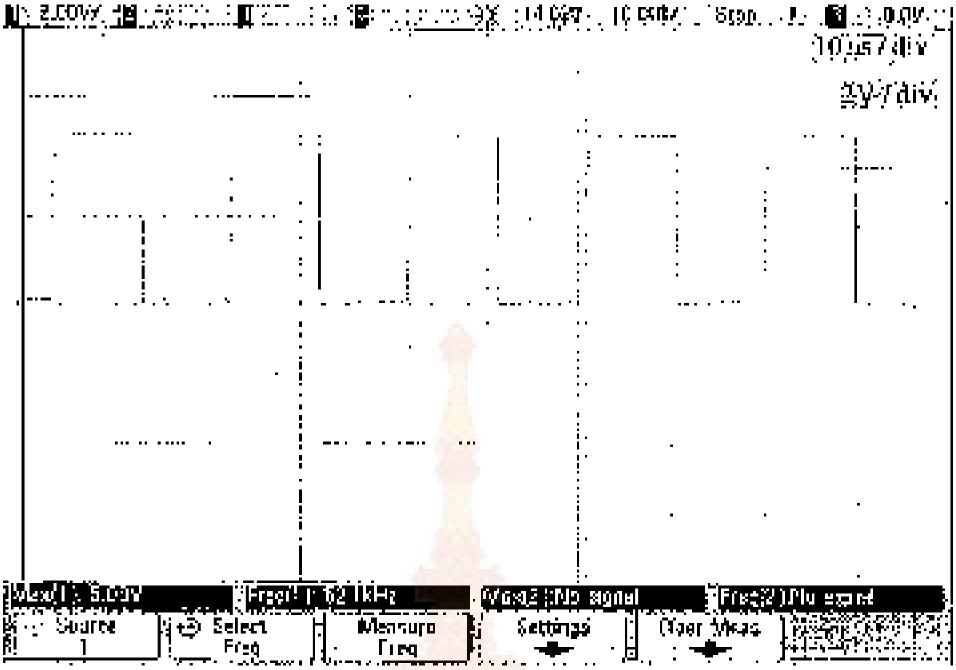
รูปที่ 3.10 วงจรควบคุมแรงดันและกระแสแบบลูปปิด

3.9.1 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์อ้างอิง

ในการออกแบบวงจรมอดูเลตตามความกว้างของพัลส์ สัญญาณพาหะที่ใช้ในการมอดูเลตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม โดยก่อนที่จะได้สัญญาณสามเหลี่ยม ในงานวิจัยนี้ทำการสร้างสัญญาณพัลส์อ้างอิงโดยใช้ไอซีเบอร์ NE555 คุณสมบัติคือ เป็นไอซีไทเมอร์นับเวลาที่มีความเที่ยงตรงสูงใช้งานง่าย และประสิทธิภาพสูง ในงานวิจัยนี้จะถูกนำมาใช้สำหรับสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ 50 kHz สามารถกำหนดความถี่ได้จากค่าตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน ดังที่ได้แสดงในวงจร ดังนั้นสัญญาณพัลส์นี้จะเป็นสัญญาณหลักที่ใช้ในการสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมสำหรับสัญญาณวัฏจักรงาน



รูปที่ 3.11 วงจรกำเนิดพัลส์อ้างอิงโดยใช้ไอซี NE555



รูปที่ 3.12 สัญญาณพัลส์ด้านจริง

จากคู่มือการใช้งานพื้นฐานของไอซีเบอร์ LM555 / NE555 / SA555 ของบริษัท Fairchild Semiconductor สามารถหาความถี่ที่ใช้งานตามวงจรในรูปที่ 3.12 ได้จาก

$$f = \frac{1.44}{R_1 + 2(R_x)(C_1)} \tag{3.15}$$

เมื่อ $R_x = R_2 + R_3$

เมื่อต้องการความถี่ 50 kHz กำหนดค่า R_1=1 kΩ และ C_1=0.001 µF ดังนั้น สามารถคำนวณหาค่าความต้านทาน R_2 และ R_3 ได้ดังนี้

$$50\times10^3\,Hz = \frac{1.44}{(1\times10^3\Omega + 2R_x)\times(0.001\times10^{-6}F)} \tag{3.16}$$

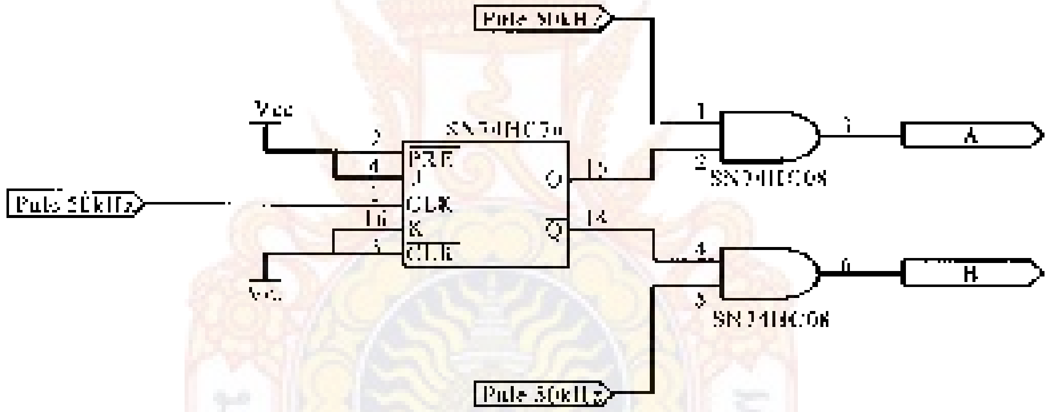
$$R_x = \left(\frac{1.44}{(0.001\times10^{-6}F)\times(50\times10^3\,Hz)} - (1\times10^3\Omega)\right)/2$$

$$R_x = 13.9k\Omega \tag{3.17}$$

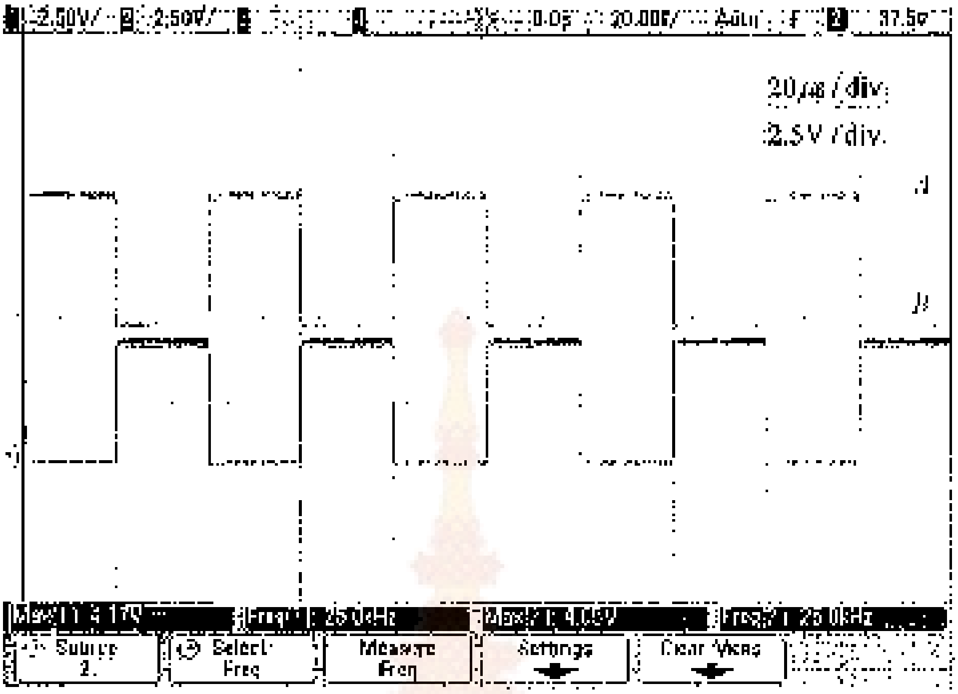
ในการใช้งานจริงอุปกรณ์อาจมีความผิดพลาด ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวต้านทานปรับ R_1 มีค่า 20 kΩ ร่วมกับตัวต้านทานค่าคงที่ R_2 ค่า 10 kΩ ทำให้วงจรนี้สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ตั้งแต่ 20 kHz - 68.57 kHz โดยปรับที่ตัวต้านทานปรับค่าได้ R_1

3.9.2 วงจรแบ่งสัญญาณพัลส์ให้มีการเหลื่อมเฟส 90 องศา

ในงานวิจัยนี้วงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ มีการสวิตช์ที่เหลื่อมเฟสกัน 90 องศา ดังนั้นเมื่อได้สัญญาณพัลส์อ้างอิงหลักที่ได้จากไอซีเบอร์ NE555 สัญญาณพัลส์ก็จะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนโดยใช้ไอซีเบอร์ SN74HC76 โดยไอซีส่วนที่ 1 จะทำหน้าที่ Active High ที่ขอบขาขึ้น ไอซีส่วนที่ 2 จะทำหน้าที่ Active High ที่ขอบขาลง และส่งสัญญาณเข้าที่ไอซีเบอร์ SN74HC08 ทั้งสองตัวก็จะได้รับสัญญาณพัลส์ 2 สัญญาณที่เหลื่อมเฟสกัน 180 องศาและคูณกับสัญญาณความถี่หลัก ดังนั้นความถี่ก็จะลดลงครึ่งหนึ่ง ดังรูปที่ 3.14 และสัญญาณพัลส์ที่ได้ดังรูปที่ 3.15

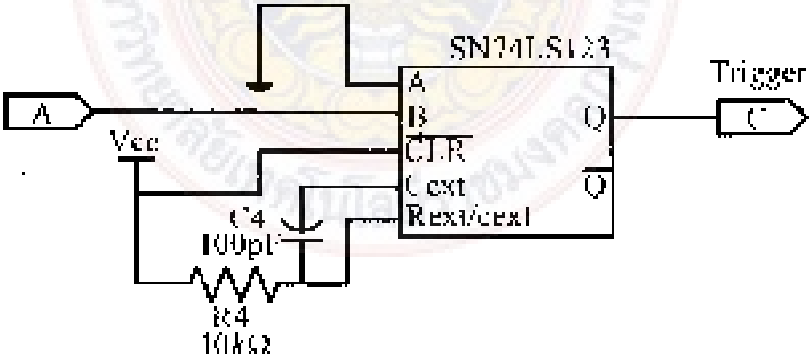


รูปที่ 3.13 วงจรลดความถี่สัญญาณพัลส์ให้เหลือ 25 kHz



รูปที่ 3.14 สัญญาณพัลส์ที่ห่างกัน 180 องศา และความถี่ลดเหลือ 25 kHz

จากนั้นจึงจะผ่านไอซีเบอร์74LS123 เพื่อทำให้สัญญาณพัลส์ที่ได้มีการเหลื่อมเฟสกัน 90 องศา ดังภาพที่ 3.8



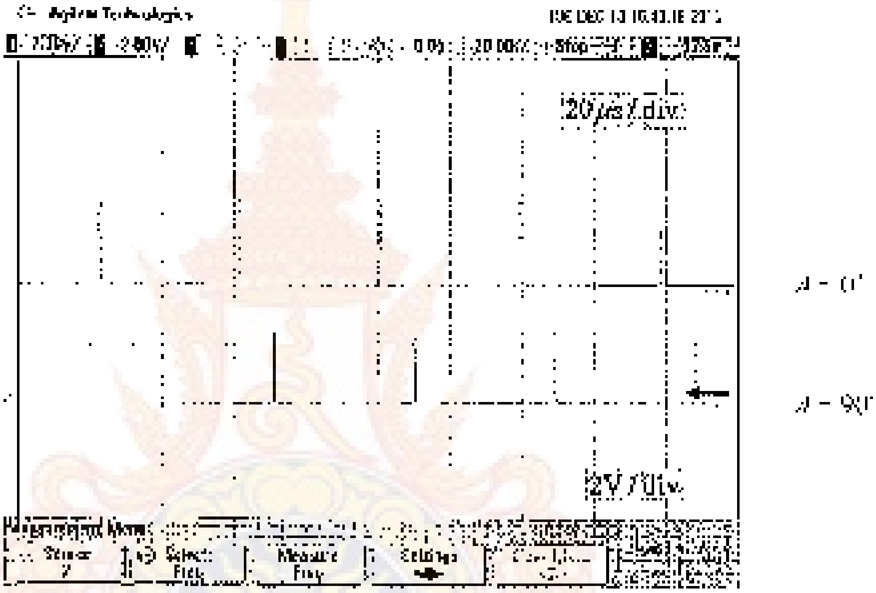
รูปที่ 3.15 วงจรสร้างสัญญาณกระตุ้นที่มีการเหลื่อมเฟสกัน 90 องศา ของชุด A

ในการคำนวณค่าเวลาของโมโนสเตเบิ้ล (t_w) สามารถคำนวณได้จาก

$$t_w = R_1 \times C_1 \tag{3.18}$$

แทนค่า $C_1 = 100\,pF$ ดังนั้น $$R_1 = \frac{1\times10^{-6}s}{100\times10^{-12}F} = 10k\Omega \tag{3.19}$$

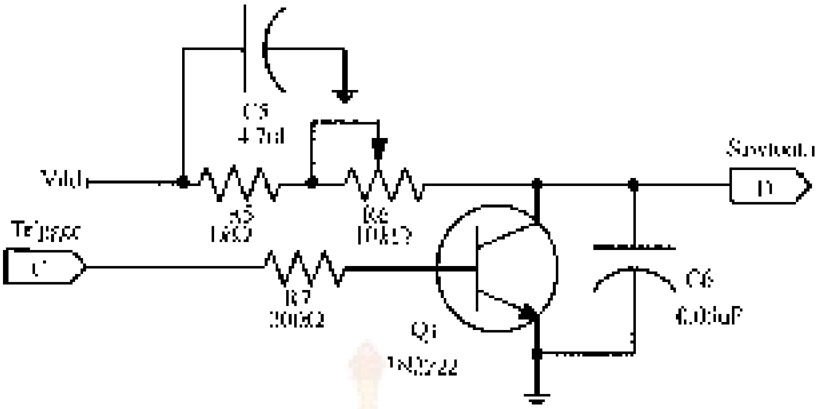
โดยสัญญาณพัลส์ที่ได้จากไอซีเบอร์ 74LS123 ทั้งสองตัวจะได้ออกมาเป็นสัญญาณกระตุ้นชุดละจำนวน 2 พัลส์ที่มีการเหลื่อมเฟสกัน 90 องศา ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 สัญญาณกระตุ้นที่ออกมาจากไอซี 74LS123 ของชุด A

3.9.3 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม

หลังจากที่ได้สัญญาณกระตุ้นจากวงจรข้างต้นจำนวน 4 ชุด ที่มีการเหลื่อมเฟสกันเฟสละ 90 องศา จากนั้นจะต้องสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีการกำหนดให้มีความต่างเฟสกัน เฟสละ 90 องศา จำนวน 4 ชุดโดยใช้หลักการของการเก็บและคายประจุของตัวเก็บประจุที่ได้จากการเปิดปิดสวิทช์ของทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N2222 เพื่อทำให้เกิดสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีขนาด 5 V สำหรับใช้ในการมอดูเลตกับสัญญาณคำสั่งกระแสอ้างอิงให้เกิดเป็นสัญญาณวัฏจักรงาน สำหรับนำไปเข้าวงจรขับนำเกตเพื่อควบคุมการทำงานของมอสเฟต



รูปที่ 3.17 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม

จากรูปที่ 3.17 เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณกำหนด $R_t = R_5 + R_6$ ในโครงงานนี้ต้องการสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่ 25 kHz ซึ่งมีคาบเวลา 40 μs และจุดสูงสุดของสัญญาณสามเหลี่ยม 5V เลือกใช้ตัวเก็บประจุ C_6 มีค่า 0.05μF สามารถคำนวณหาค่า R_t ได้จาก

$$v_o = v_s - (v_s - v_{CE})e^{-t/R_tC_6} \tag{3.20}$$

เมื่อ v_o คือ ความแรงของสัญญาณสามเหลี่ยม ณ เวลาที่ต้องการ

v_s คือ แรงดันไฟเลี้ยงที่ป้อนให้วงจร

v_{CE} คือ แรงดันที่ค้างที่ตัวเก็บประจุก่อนการประจุมีค่า $V_{CE(sat)}$ ของทรานซิสเตอร์ = 0.3V

t คือ คาบเวลาของสัญญาณสามเหลี่ยม

แทนค่าดังนี้

$$5 = 15 - (15 - 0.3)e^{-40\times10^{-6}/(R_t\times0.05\times10^{-6})} \tag{3.21}$$

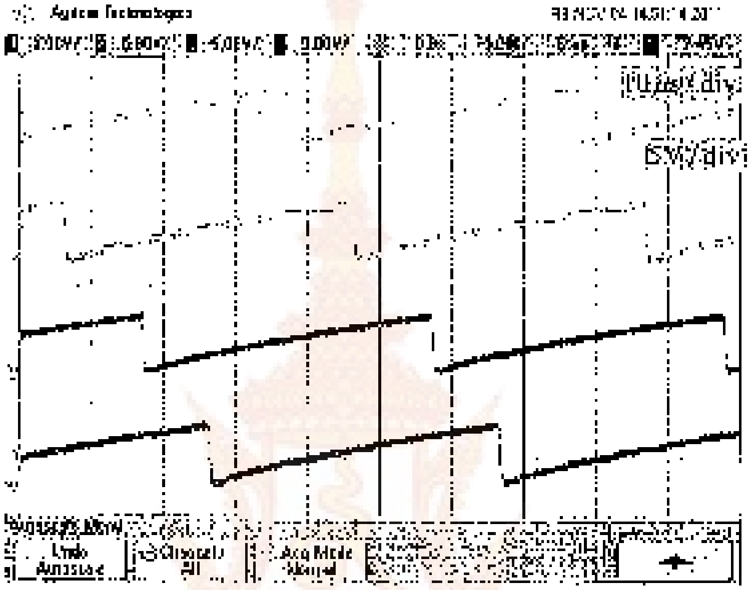
$$5 = 15 - \frac{14.7}{e^{800/R_t}}$$

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

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

$$R_t = 800 \cdot \frac{\log e}{\log 1.47} = 2.1k\Omega \tag{3.22}$$

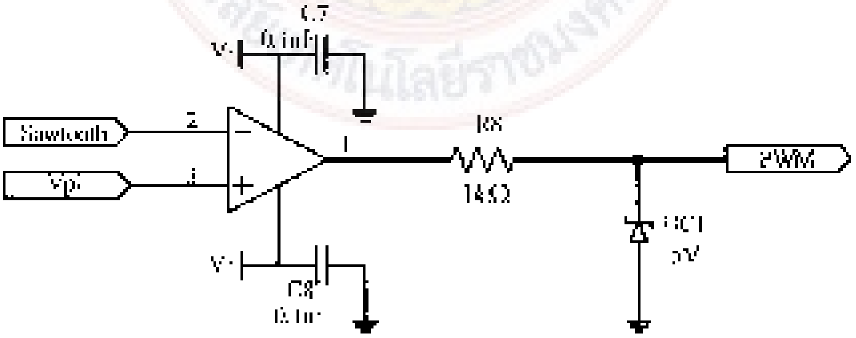
ในการใช้งานจริงอาจมีค่าผิดพลาดที่เกิดจากอุปกรณ์ได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้งานค่า R_t เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้ $R_t = R_5 + R_6$ จึงเลือกใช้งานค่า $R_5 = 1k\Omega$ ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานปรับค่า R_6 ค่า $10k\Omega$ จะได้สัญญาณสามเหลี่ยมดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 สัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้จากทรานซิสเตอร์ 2N2222

3.9.4 วงจรมอดูเลตความกว้างของสัญญาณพัลส์ (PWM)

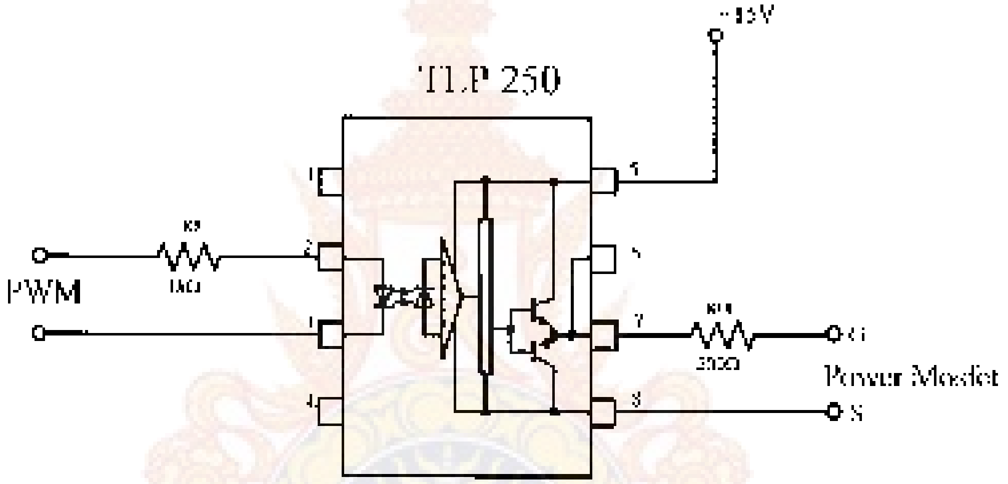
วงจรมอดูเลตทำหน้าที่มอดูเลตสัญญาณที่ได้จากตัวควบคุมในลูปโดเมนกระแสกับสัญญาณพาหะที่เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรมอดูเลตความกว้างของสัญญาณพัลส์หรือสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 วงจรมอดูเลตสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม

จากรูปที่ 3.19 สัญญาณที่ได้จากตัวควบคุมในลูปกระแส ซึ่งเป็นสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมกระแสของวงจรแปลงผันสัญญาณที่ได้นี้จะเป็นลักษณะแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระดับตั้งแต่ 0 V จนถึง 5 V ถูกส่งเข้าไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมโดยใช้ออปแอมป์เบอร์ TL084 ทำเป็นวงจรเปรียบเทียบ ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตจะได้เป็นสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม (Pulse Width Modulation) แต่สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีระดับความสูงของยอดเท่ากับแรงดันของแหล่งจ่าย เพื่อทำให้สัญญาณมีความเหมาะสมที่จะเข้าวงจรขับเกตจะต้องมีการตัดยอดคลื่นออกไปโดยใช้ซีเนอร์ไดโอดขนาด 5V มาต่อที่ขาเอาต์พุตเพื่อทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีระดับความสูงไม่เกิน 5V หลังจากนี้สัญญาณจะถูกส่งเข้าวงจรขับนำเกตต่อไป

3.9.5 วงจรขับนำเกตด้วยไอซี TLP250



รูปที่ 3.20 วงจรขับนำเกตโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250

เพื่อความสะดวก และให้วงจรมีขนาดเล็กจึงใช้ไอซีสำเร็จรูป TLP250 ขนาด 8 ขา ดังแสดงวงจรขับเกตไว้ในรูปที่ 3.20 จากวงจรสัญญาณด้านเข้าเป็นสัญญาณที่ถูกส่งมาจากวงจร มอดูเลตความกว้างของพัลส์มีขนาดแรงดัน 0V ถึง 5V โดยจะรับสัญญาณอินพุตผ่านขา 2 และขา 3 เพื่อที่จะทำการไบอัสให้แก่ไดโอดเปล่งแสงที่ต่ออยู่ระหว่างขา 2 และขา 3 ทางด้านอินพุต โดยจะต่อผ่านความต้านทาน 1kΩ เพื่อให้มีกระแสไหลผ่านไปยังไดโอดเปล่งแสงไม่สูงเกินไปจนเกิดความเสียหาย ส่วนทางเอาต์พุตกำหนดให้แรงดันมีขนาดเท่ากับ 15 V โดยรับแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟจากชุดวงจรจ่ายไฟเลี้ยง

3.9.6 วงจรควบคุมกระแสแบบพีไอ

วงจรควบคุมกระแสเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ควบคุมให้ระดับการจ่ายกระแสคงที่ ถึงแม้ว่าโหลดทางไฟฟ้าจะมีการเพิ่มขึ้นโดยวงจรนี้จะใช้วงจรเปรียบเทียบ (Summing) โดยใช้

ออปแอมป์เบอร์ TL082 ในวงจรดังรูปที่ 3.21 ออปแอมป์ตัวที่ OPC2A ต่อเป็นแบบ Inverting Mode มีอัตราขยายเท่ากับ 1 สัญญาณที่ได้จากจุดนี้คือสัญญาณความผิดพลาดของแรงดัน (V_e) และถูกส่งต่อไปยังวงจรควบคุมต่อไป โดยในโครงงานนี้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ สมการตัวควบคุมกระแสแสดงในสมการที่ (3.23)

$$\frac{V_o(S)}{V_{in}(S)} = K_p(1+\frac{1}{T_i s}) \tag{3.23}$$

โดยที่อัตราขยายของ K_p หาได้จากสมการ (3.24)

$$K_p = \frac{R_{18}+R_{22}}{R_{18}} \tag{3.24}$$

ในการออกแบบกำหนดให้ค่าความต้านทาน $R_{18} = 100\Omega$ และ $R_{22} = 37k\Omega$ แทนลงในสมการที่ (3.26) จะได้อัตราขยาย คือ

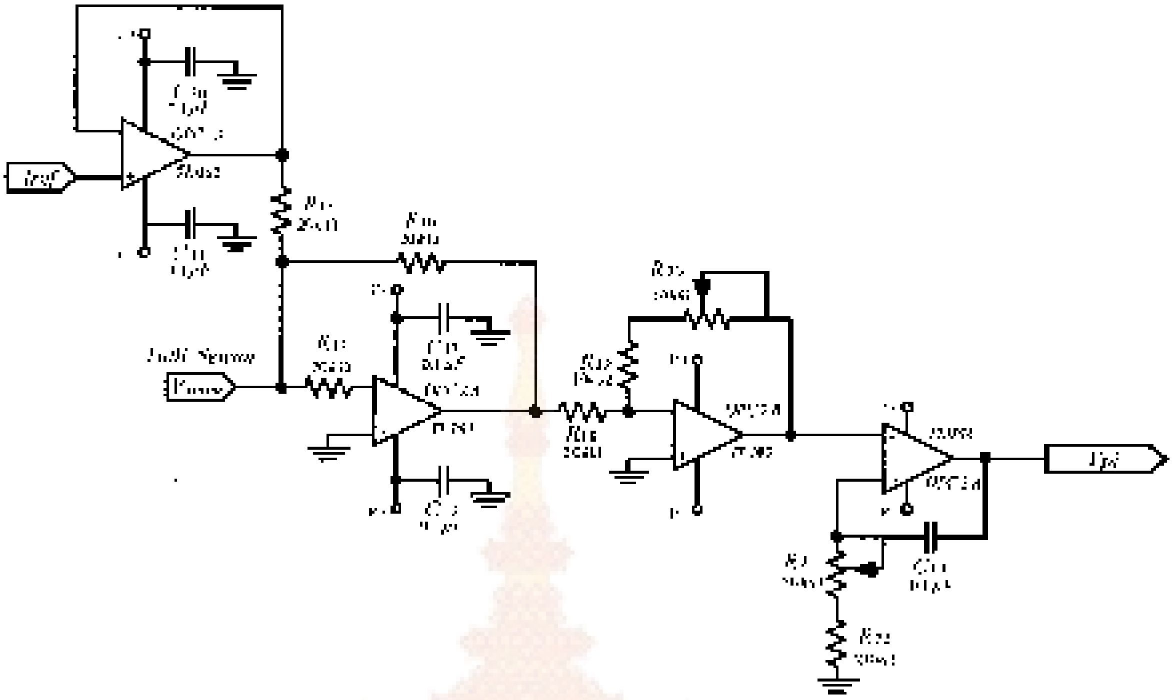
$$K_p = \frac{100+37k\Omega}{20k\Omega} = 1.855 \tag{3.25}$$

และค่าเวลาหาได้จากสมการที่ (3.26)

$$T_i = (R_{21}+R_{22})C_{14} \tag{3.26}$$

ซึ่งในการออกแบบกำหนดให้ค่าความต้านทาน $R_{21} = 50k\Omega$ และ $R_{22} = 20k\Omega$ และตัวเก็บประจุ
$C_{14} = 0.1\mu F$ แทนค่าที่ได้ลงในสมการที่ (3.27)

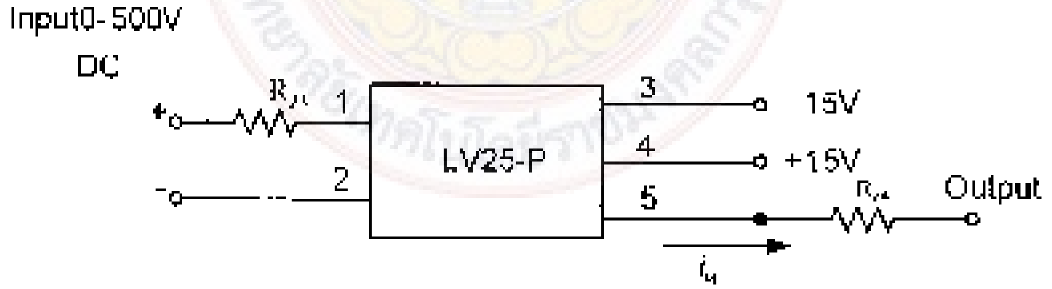
$$T_i = (50k\Omega + 20k\Omega)\times 0.1\mu F = 0.007\,s \tag{3.27}$$



รูปที่ 3.21 วงจรควบคุมกระแสแบบพีไอ

3.9.7 วงจรตรวจจับแรงดัน

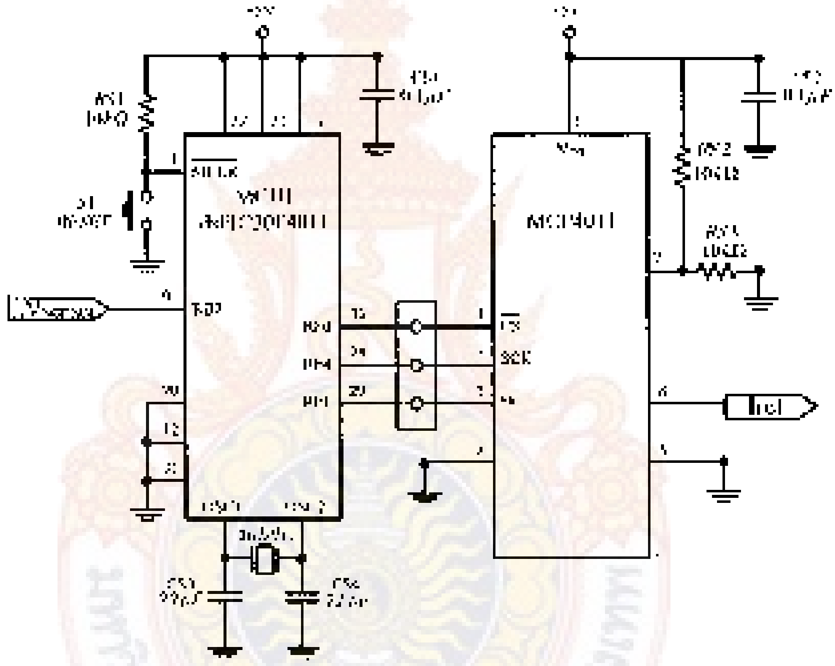
ในรูปที่ 3.22 จะเป็นวงจรตรวจวัดแรงดันจะใช้ Voltage Transducers ยี่ห้อ LEM รุ่น LV25-P สามารถวัดแรงดันได้ตั้งแต่ 0-500 V มีอัตราส่วนการแปลงค่า 500V/50mA ดังนั้นเอาต์พุตจะมีค่าเท่าใดขึ้นอยู่การใส่ค่าความต้านทาน $R_{[illegible]}$ เพื่อที่จะนำเอาสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อม R_{21} ส่งเข้าไปเป็นสัญญาณอินพุตของพอร์ต Analog to Digital (A to D) ของไมโครคอนโทรลเลอร์



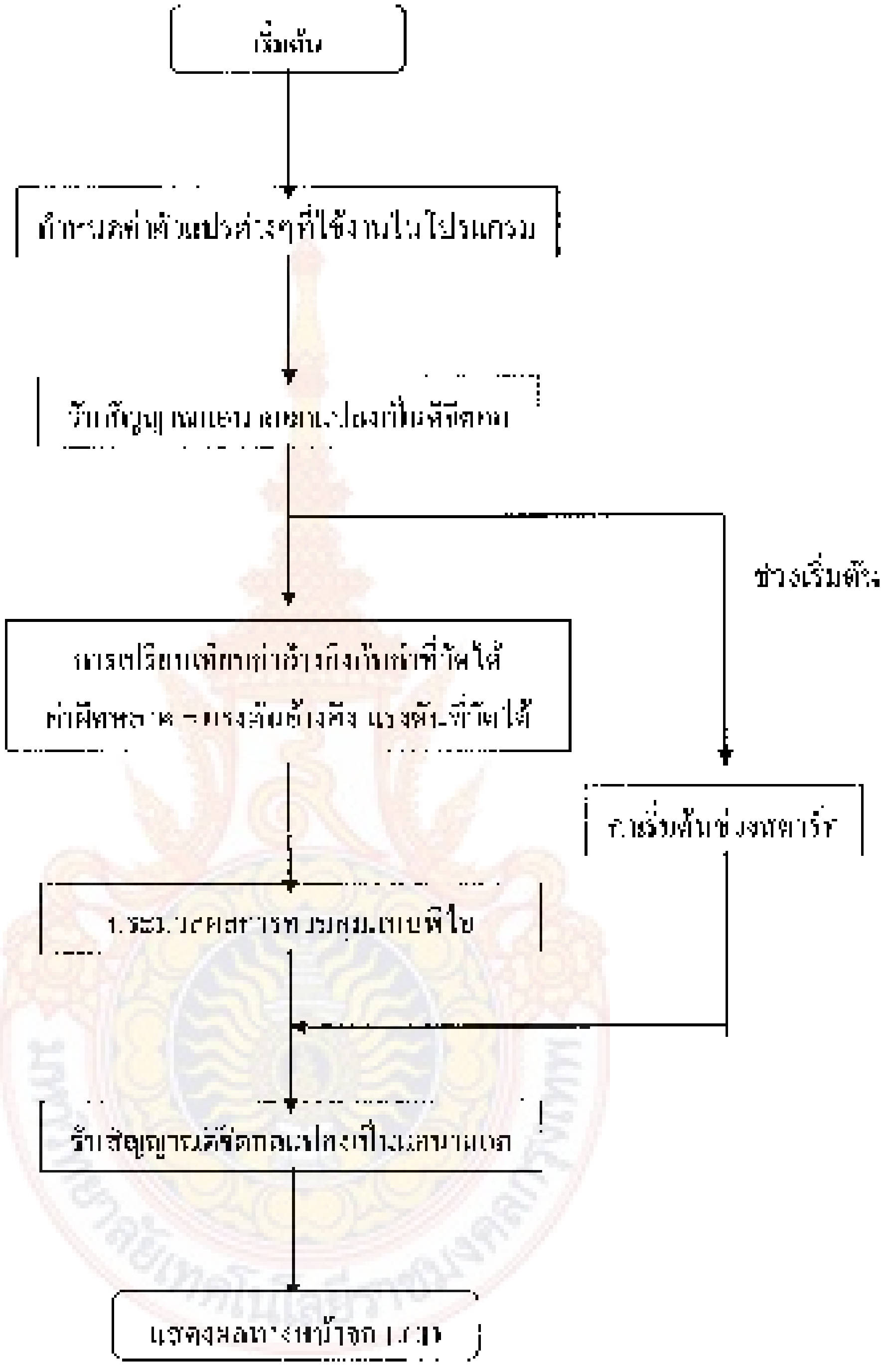
รูปที่ 3.22 อุปกรณ์และวงจรตรวจจับแรงดัน

3.9.8 วงจรควบคุมรักษาระดับแรงดัน

วงจรควบคุมรักษาระดับแรงดันจะทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันให้คงที่ 60 V โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F4011สามารถรับสัญญาณจากวงจรตรวจจับแรงดันทางด้านเอาต์พุตและส่งไปยังขา ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล และทำการประมวลผลพร้อมส่งข้อมูลสัญญาณแบบดิจิตอล จากนั้นจะใช้ไอซีเบอร์ MCP4011 เพื่อแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก จะใช้งานในโหมด SPI ของ dsPIC30F4011 ไอซีจะสร้างแรงดันแอนาลอกความละเอียด 8 บิต เนื่องจากเป็นอีกหนึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ติดต่อผ่านระบบบัส SPI เพื่อส่งข้อมูลไปสั่งการควบคุมในลูปของกระแสในแต่ละลูปกระแสให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามภาระ



รูปที่ 3.23 ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสร้างตัวควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 3.24 แผนภูมิสายงานการทำงานของโปรแกรมควบคุมของไมโครคอนโทรลเลอร์

บทที่ 4

ผลการวิจัย

การทดสอบคอนเวอร์เตอร์ในระบบนาโนกริดที่นำเสนอประกอบด้วยการเก็บข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บริเวณดาดฟ้าของอาคาร 48 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชมงคลกรุงเทพ จากข้อมูลแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้นำไปโปรแกรมลงในแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อเป็นแหล่งจ่ายจำลองไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และเมื่อทำการทดสอบอัลกอริทึม MPPT ทั้งสองโปรแกรมนั้นจะสามารถติดตามจุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ ส่วนผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบสร้างวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล ซึ่งผลทดสอบการทำงานของระบบแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนการจำลองการทำงานของระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และส่วนของการทดสอบการทำงานของระบบจริง ทั้งสภาวะคงตัว (Steady State) และในสภาวะชั่วครู่ (Transient State) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบต่อการเปลี่ยนแปลงภาระ ดังได้กล่าวมาแล้วนั้นผลการทดสอบวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลที่สร้างขึ้นได้ทำการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

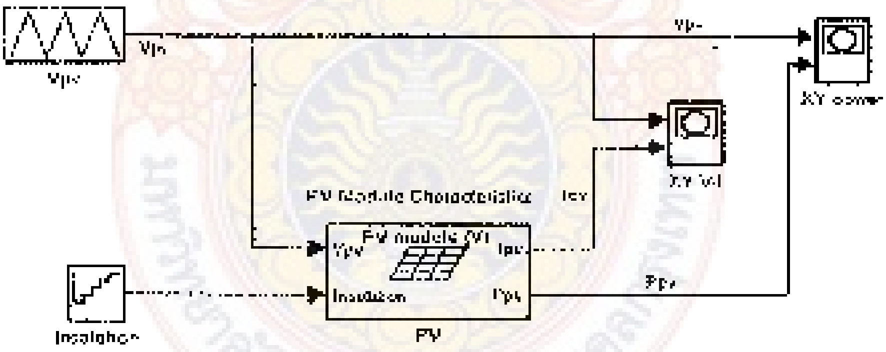
4.1 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ

1) แหล่งจ่ายไฟตรงยี่ห้อ Magna power ขนาด 4 kW
2) เครื่องออสซิลโลสโคปยี่ห้อ Agilent Technologies
3) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ Solarmax รุ่น LEC-3024
4). Power Analyzer รุ่น WT500
5) โหลดความต้านทาน 50Ω 3kW
6) แบตเตอรี่ยี่ห้อ VISION CP1275 12V 7.5AH

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น LEC 3024

ค่าพารามิเตอร์	ค่า
ค่าแรงดัน ณ จุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด	31.0 โวลต์
ค่ากระแส ณ จุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด	0.96 แอมแปร์
ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด	63 วัตต์
ค่าแรงดันเปิดวงจรของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์	42.9 โวลต์
ค่ากระแสลัดวงจรของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์	1.17 แอมแปร์

เพื่อทำการประเมินสมรรถนะของชุดติดตามจุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด และระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยรวม จึงจำเป็นต้องทราบถึงลักษณะสมบัติ ณ จุดปฏิบัติงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยก่อน โดยการประเมินลักษณะสมบัติของ กระแส-แรงดัน และกำลังไฟฟ้า-แรงดันของแผงด้วยการเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรมกับความต้านทานปรับค่าได้ แล้วทำการวัดกระแส และแรงดันของช่วงความต้านทานระหว่าง 0 โอห์ม (ลัดวงจร) ถึง ∞ โอห์ม (เปิดวงจร) ดังไดอะแกรมในรูปที่ 4.1

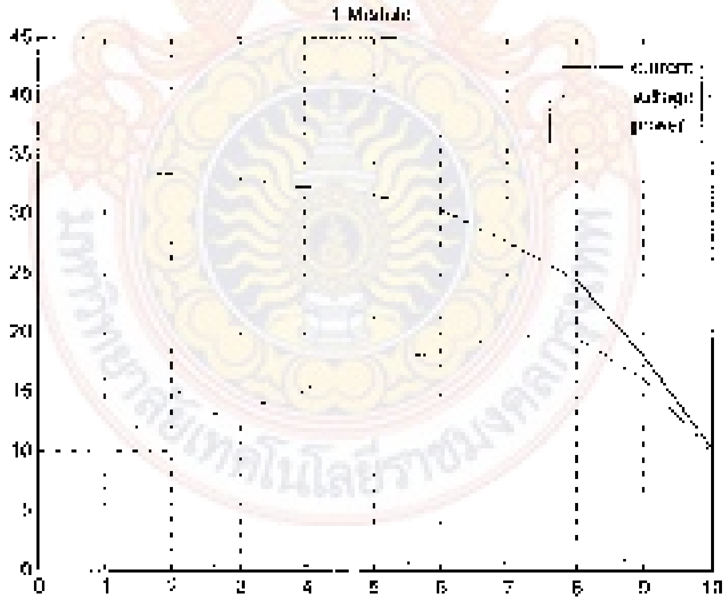


รูปที่ 4.1 ไดอะแกรมการทดสอบประเมินสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากการทดสอบนำข้อมูลที่เก็บผลมาพล็อตเป็นกราฟความสัมพันธ์ได้ดัง ตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดลด 1 แผง

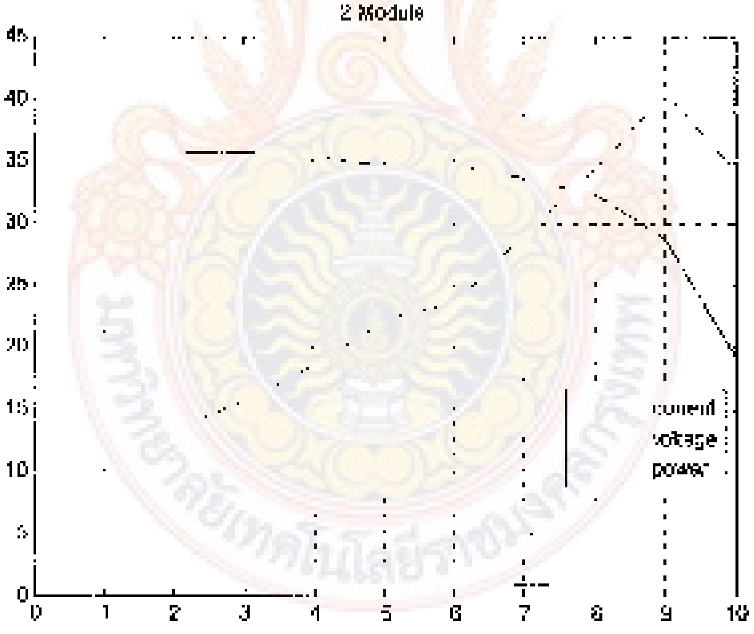
แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น LEC-3024 จำนวน 1 แผง			
ความต้านทานโหลด (R)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
100	34	0.34	11.56
90	33.3	0.38	12.654
80	33	0.41	13.53
70	32.3	0.47	15.181
60	31.6	0.56	17.696
50	30.5	0.6	18.3
40	27.7	0.72	19.944
30	24.5	0.8	19.6
20	18.1	0.9	16.29
10	10.3	0.97	9.991



รูปที่ 4.2 กำลังไฟฟ้าสูงสุดลด 1แผง

ตารางที่4.3 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อ 2 แผง

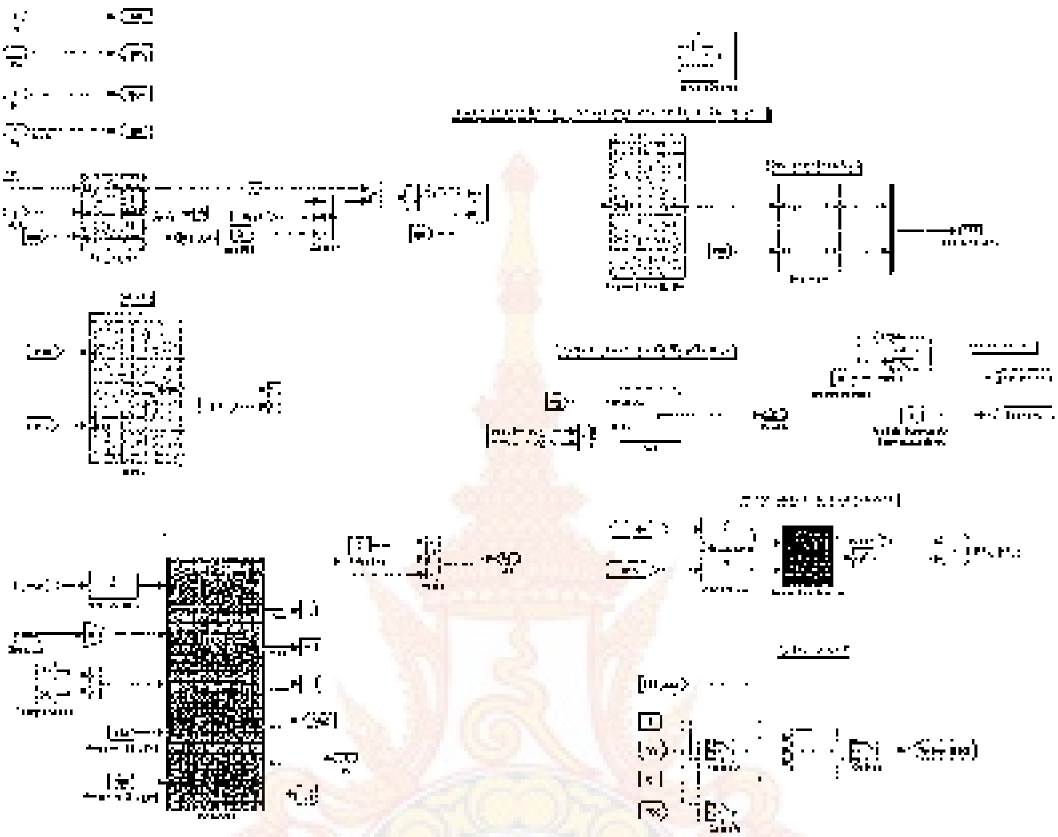
แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น LEC-3024 จำนวน 1 แผง			
ความต้านทานโหลด (R)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
100	36.2	0.36	13.032
90	35.7	0.4	14.28
80	35.6	0.44	15.664
70	35.5	0.52	18.46
60	34.6	0.64	22.144
50	34.7	0.68	23.596
40	33.6	0.86	28.896
30	32.3	1.06	34.238
20	28.8	1.41	40.608
10	19.2	1.78	34.176



รูปที่4.3 การหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อ 2 แผง

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการบันทึกค่าในตารางที่ 4.2 และ 4.3 มาสร้างไดอะแกรมด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ดังในรูปที่ 4.4 เพื่อควบคุมแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบ

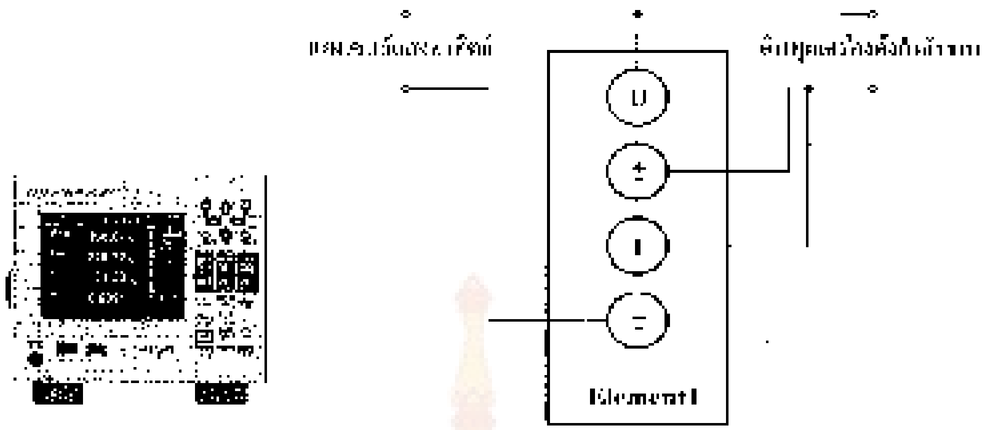
โปรแกรมใช้ยี่ห้อ Magna power ขนาด 4 kW 400 V 10 A ตัวการ์ดควบคุมดีสเปซ DS1104 และใช้เป็นแหล่งจ่ายในป้อนให้กับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนานต่อไป



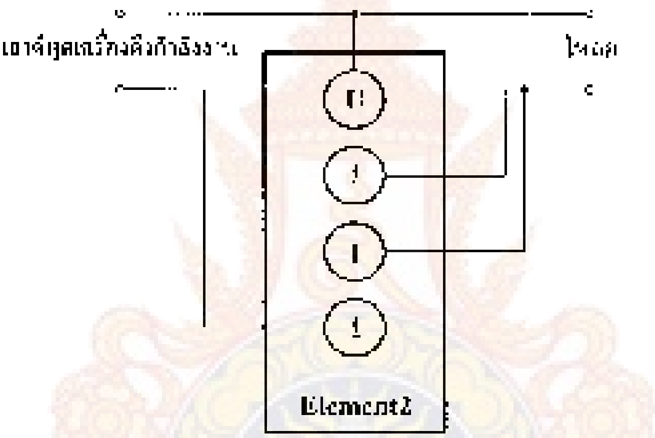
รูปที่ 4.4 ไดอะแกรมสร้างเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

4.2 ทดลองการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ในการทดลองค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะใช้เครื่อง Power Analyzer รุ่น WT500 ทำการวัดแรงดันและกระแสทั้งด้านอินพุตและเอาต์พุตของเครื่องติดตามกำลังไฟฟ้า เพื่อที่จะทำให้เครื่อง Power Analyzer ทำการอ่านค่าและทำการพล็อตกราฟแสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถทำได้โดยการต่อวงจรเพิ่มให้เครื่อง Power Analyzer รุ่น WT500 ทำการวัดค่ากระแสและแรงดันอินพุตของชุดติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นสามารถทำการต่อวงจรได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.5(ก) ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าในการวัดสัญญาณแรงดันและกระแสทางด้านอินพุตนั้นจะเลือกใช้ Element1 ในการวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ Solarmax รุ่น LEC-3024 แล้วจ่ายเป็นแรงดันอินพุตให้กับชุดติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดส่วนการวัดสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของชุดจุดติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นใช้ Element2 โดยมีการต่อวงจรดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.5(ข)



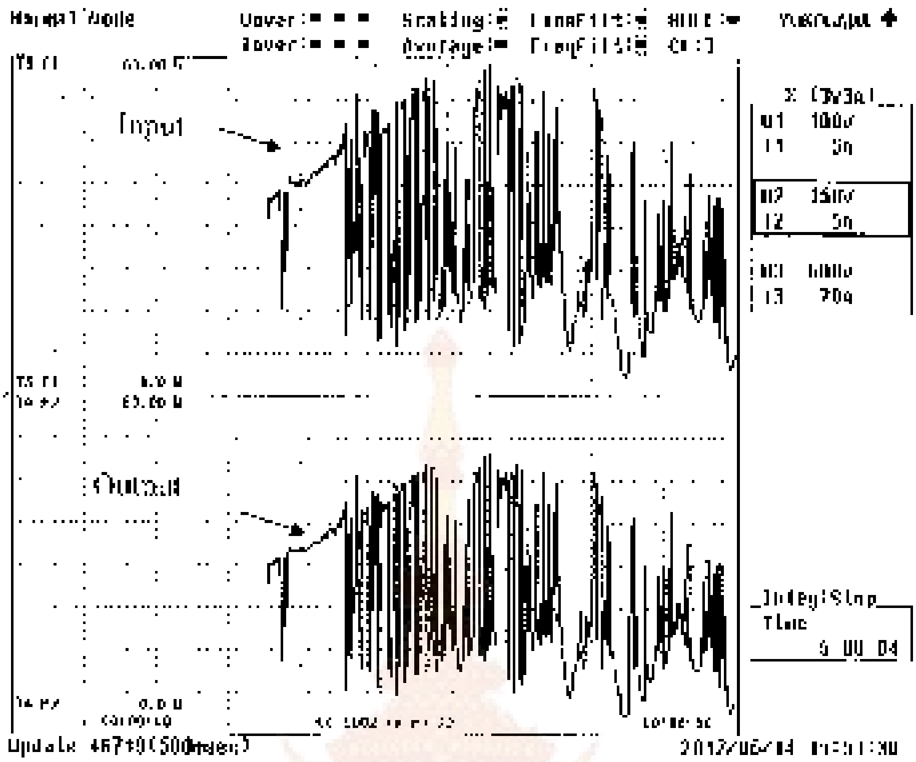
(ก) วัดแรงดันและกระแสด้านอินพุตด้วย Power Analyzer



(ข) วัดแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุต

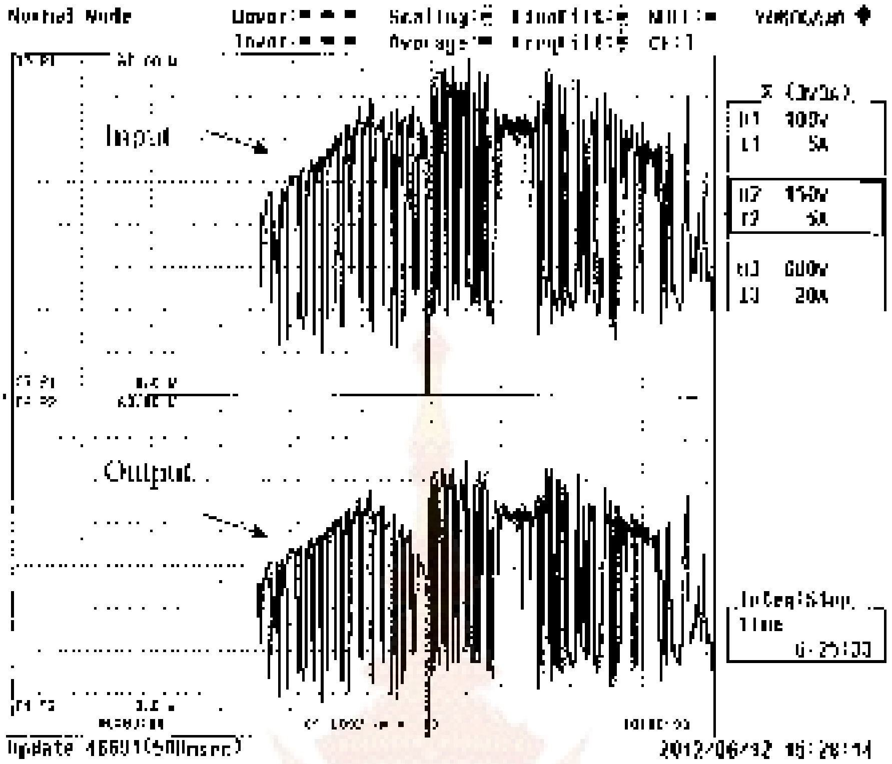
รูปที่ 4.5 การต่อใช้งานเครื่อง Power Analyzer รุ่น WT500

ทดสอบ ชุดติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 30W จำนวน 2 แผง ต่อขนานกัน โดยต่อกับโหลด ค่าความต้านทานคงที่ 50Ω 300W โดยใช้โปรแกรมที่ 1



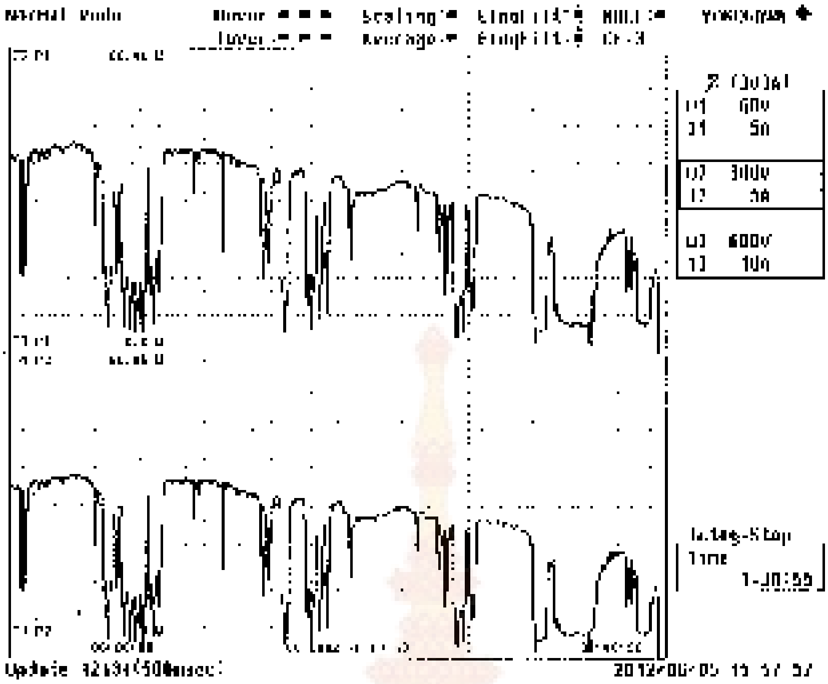
รูปที่4.6 ค่ากำลังงานไฟฟ้าในขณะที่ความเข้มแสงที่ต่างกัน โดยต่อกับโหลดความต้านทาน 50Ω 300W โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 30W 2 แผง ต่อขนาน โดยใช้โปรแกรมที่ 1

ทดสอบชุดติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 30W 2 แผงต่อขนานกัน โดยต่อกับโหลดค่าความต้านทานตรงที่ 50Ω 300W โดยใช้โปรแกรมที่ 2



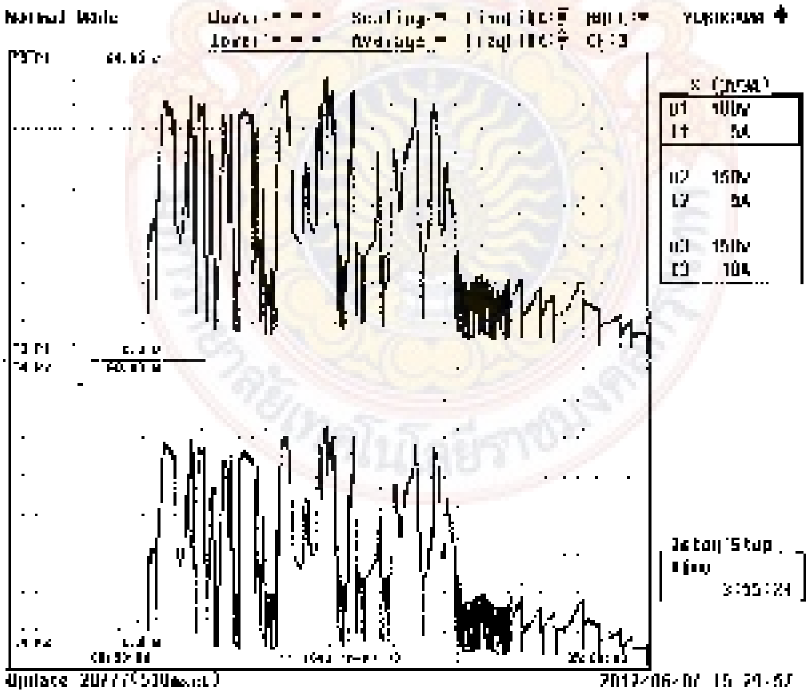
รูปที่ 4.7 ค่ากำลังงานไฟฟ้า ณ ระดับความเข้มแสงที่ต่างกัน โดยต่อกับโหลดความต้านทาน 50Ω 300W โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 30W 2 แผง ต่อขนาน โดยใช้โปรแกรมที่ 2

การทดสอบชุดติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 30 W 2 แผงต่อขนานกัน โดยต่อกับโหลดค่าความต้านทานคงที่โดยใช้โปรแกรมที่ 1



รูปที่ 4.8 ค่ากำลังงานไฟฟ้าในขณะที่ความเข้มแสงที่ต่างกัน โดยต่อกับโหลดความต้านทาน ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 30 W 2 แผงต่อขนาน ด้วยโปรแกรมที่ 1

ทดสอบการจุดติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 30W จำนวน 2 แผง ต่อขนานกัน โดยต่อกับโหลด ความต้านทานคงที่โดยใช้โปรแกรมที่ 2



รูปที่ 4.9 ค่ากำลังงานไฟฟ้าในขณะที่ความเข้มรังสีที่ต่างกันโดยต่อกับโหลดความต้านทาน ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 30W 2 แผงต่อขนาน โดยใช้โปรแกรมที่ 2

กราฟที่ได้จากการทดสอบชุดติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดนี้ทั้งสองกราฟ ทั้งในรูปที่ 4.6, 4.7, 4.8 และรูปที่ 4.9 ได้ทำการทดสอบในช่วงเดือนมิถุนายนซึ่งเข้าหน้าฝนซึ่งมีเมฆมากเป็นบางช่วงจะเห็นได้จากกราฟของเครื่อง Power Analyzer เส้นกราฟบางช่วงมีค่ากำลังไฟฟ้าต่ำและบางช่วงมีค่ากำลังไฟฟ้าสูง ทั้งนี้เนื่องจากเมฆเป็นปัจจัยสำคัญต่อความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีผลต่อการจ่ายแรงดันและกระแส การทำงานของชุดติดตามจุดกำลังไฟฟ้านี้จะสามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ ช่วงเวลาที่มีความเข้มของรังสีของแสงอาทิตย์ในขณะนั้นๆ

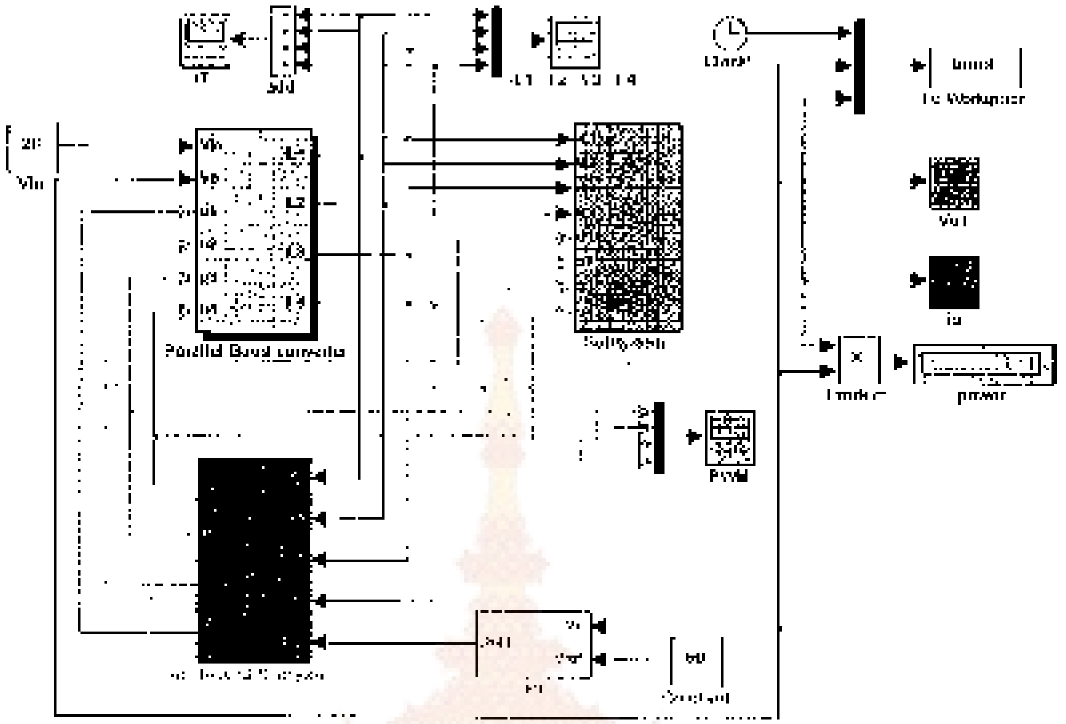
ในส่วนต่อไปนี้กล่าวถึงผลการทดสอบที่ได้จากการออกแบบสร้างวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล ซึ่งผลทดสอบการทำงานของระบบแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนการจำลองการทำงานของระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และส่วนของการทดสอบการทำงานของระบบจริง ทั้งสภาวะคงตัว (Steady State) และในสภาวะชั่วครู่ (Transient State) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบต่อการเปลี่ยนแปลงภาระ ซึ่งได้กล่าวมาแล้วนั้นผลการทดสอบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลที่สร้างขึ้นได้ทำการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3 การจำลองการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

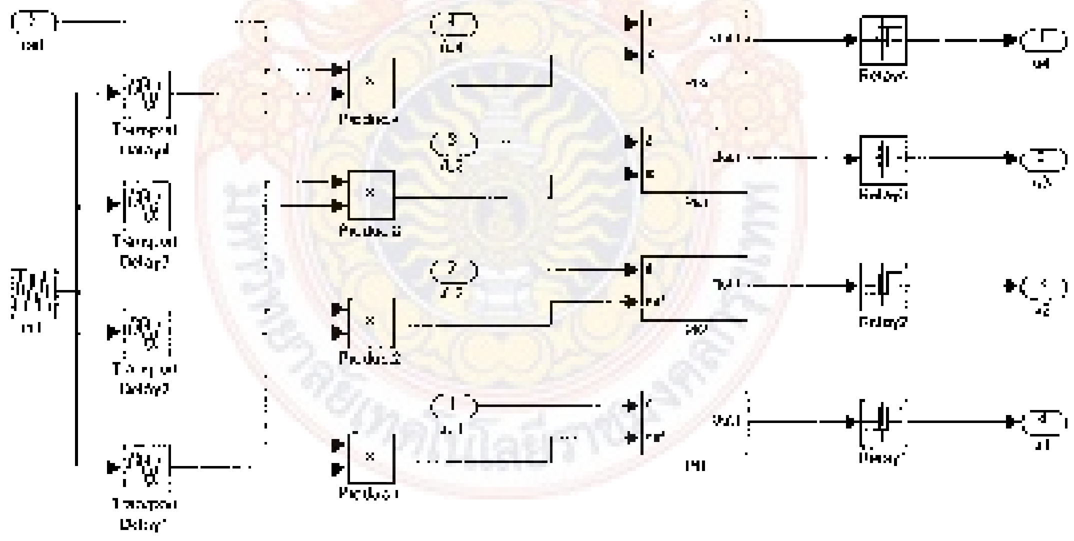
เพื่อเป็นการพิสูจน์การทำงานของวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลที่นำเสนอ ระบบได้ถูกทำการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink แบบจำลองของระบบที่สร้างขึ้นได้มาจากสมการที่ 2.42 - 2.46 ซึ่งเป็นสมการของวงจรภาคกำลังที่นำเสนอดังแสดงตามรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 รายการและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้จำลองการทำงาน

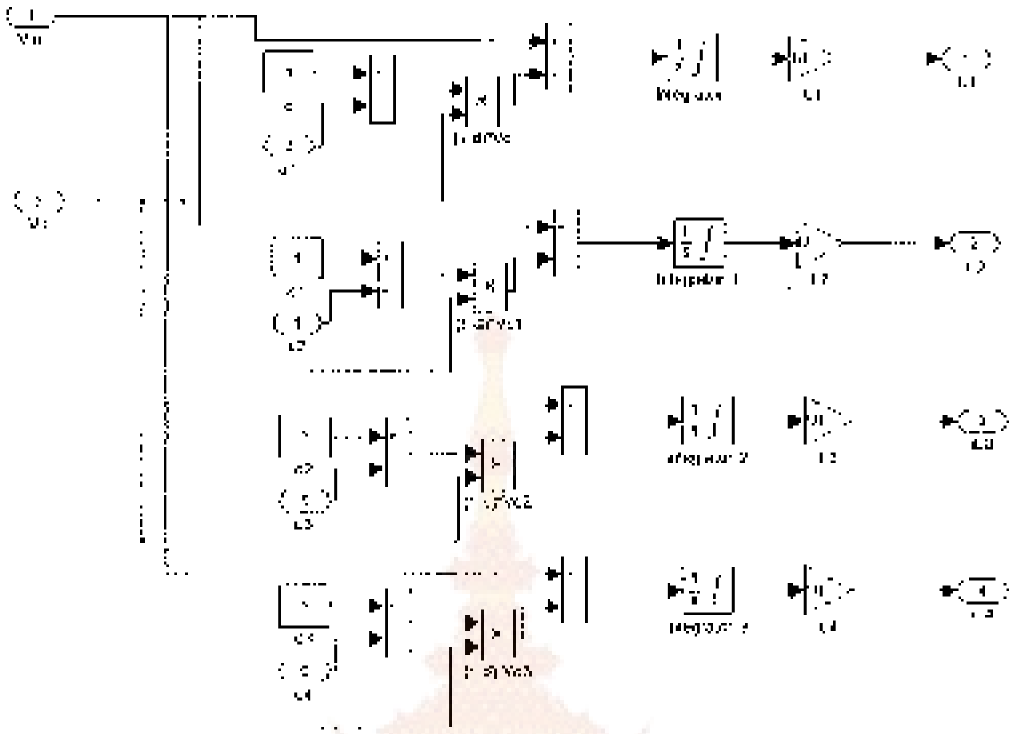
รายการ/สัญลักษณ์	ค่า
แรงดันอินพุต (V_{in})	26 V
แรงดันเอาต์พุต (V_o)	60 V
ค่าความเหนี่ยวนำ (L_1, L_2, L_3, L_4)	395 µH
ค่าความจุเอาต์พุต (C_o)	680 µF
ความถี่สวิตช์กำลัง (f)	25 kHz



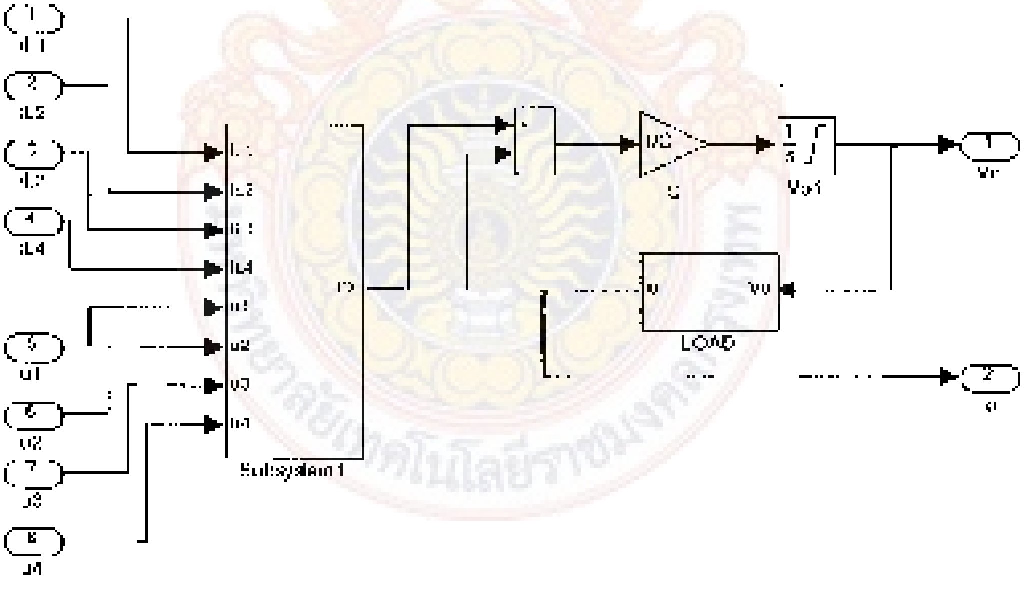
รูปที่ 4.10 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของการควบคุมวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล



รูปที่ 4.11 ภายในบล็อกกระแสอินเตอร์ลีฟ



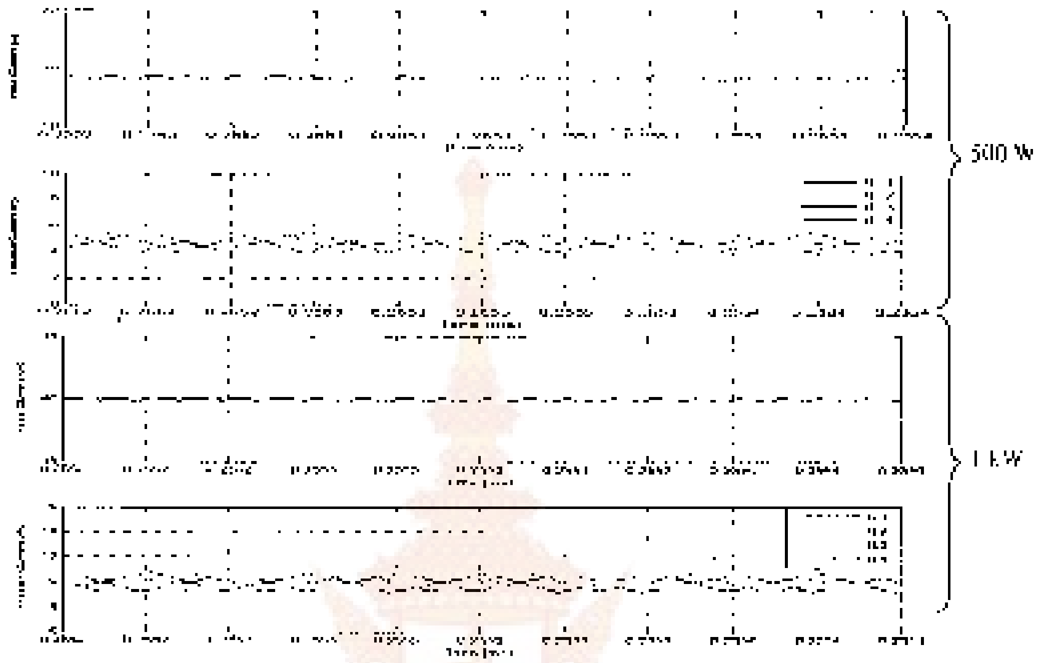
รูปที่ 4.12 ภายในบล็อกของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน



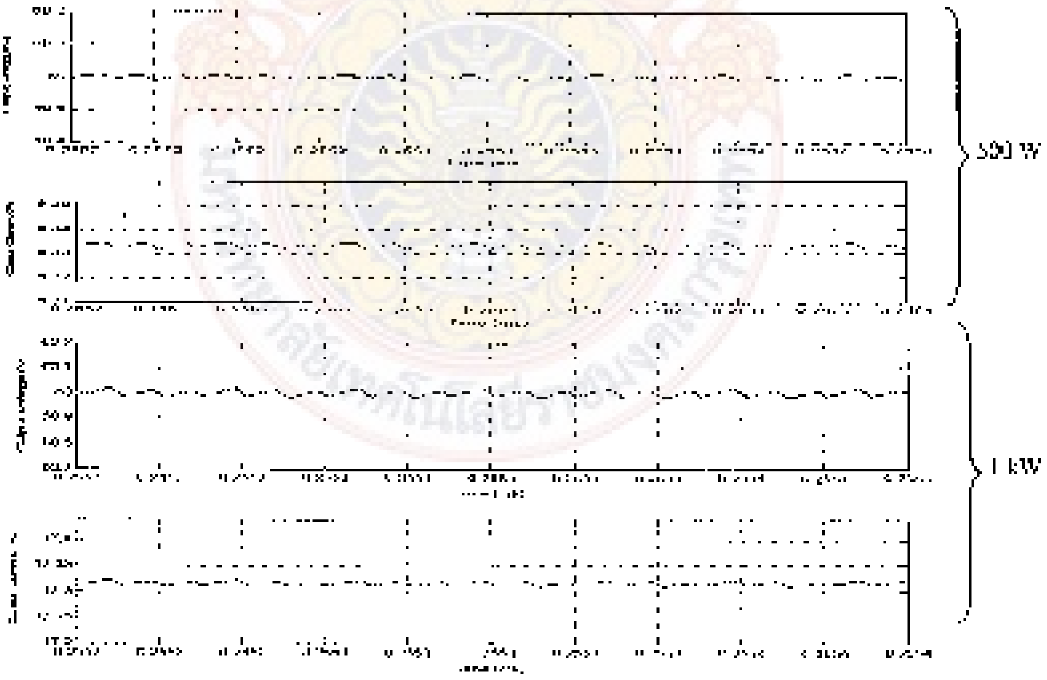
รูปที่ 4.13 ภายในบล็อกของระบบ

4.4 ผลการจำลองการทำงาน

4.4.1 ผลการจำลองในสภาวะคงตัวที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 500 W และ 1 kW



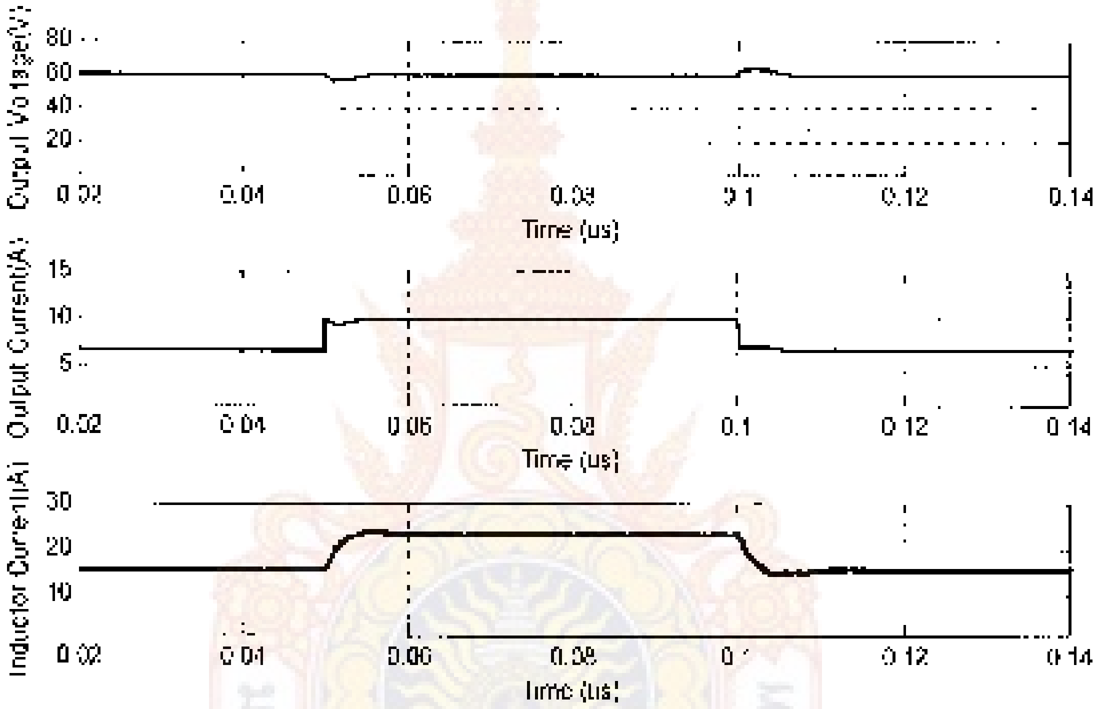
รูปที่ 4.14 กระแสอินพุตและกระแสตัวเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูล



รูปที่ 4.15 แรงดันเอาต์พุตและกระแสเอาต์พุต

จากภาพที่ 4.14 ถึงภาพที่ 4.15 เป็นรูปคลื่นของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำ โดยใช้เทคนิคการเหลื่อมเฟสทำให้กระแสทางด้านอินพุตมีการกระเพื่อมลดลง สามารถแบ่งการกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำให้เท่ากันที่ 4.9A และ 10 A ต่อวงจร ดังนั้นกระแสรวมก็จะได้ 19.6A และ 40A โดยมีการเหลื่อมกันของสัญญาณสัญญาณและ 90 องศา และรักษาระดับแรงดันทางด้านเอาต์พุตให้คงที่ 60V กำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตที่ 500W และ 1kW

4.4.2 ผลการจำลองในสภาวะชั่วครู่

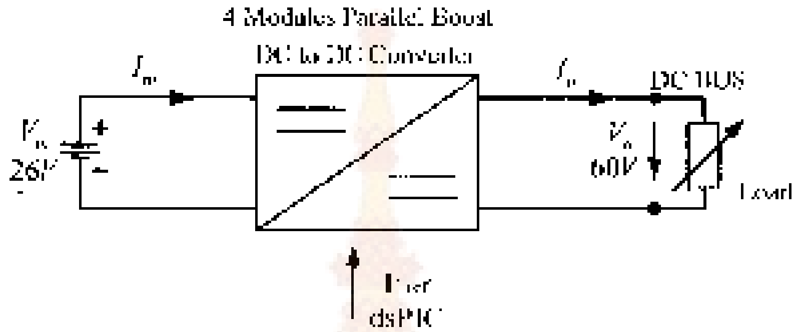


รูปที่ 4.16 แรงดันเอาต์พุต กระแสเอาต์พุตของวงจรและกระแสรวมของขดลวดเหนี่ยวนำ และเปลี่ยนแปลงภาระระหว่าง 400-600W

จากรูปที่ 4.16 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรพบว่าที่สภาวะปกติสามารถจ่ายแรงดันคงที่ได้ และเมื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงภาระของวงจรที่กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 400W ไปที่ 600 W และกลับไปที่ 400 W พบว่าวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลที่ออกแบบสามารถรักษาระดับแรงดันได้

4.5 การทดสอบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

เมื่อทำการออกแบบสร้างวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลเสร็จแล้ว จึงทำการทดสอบว่าวงจรสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบการส่งถ่ายพลังงานออกจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังระบบดังรูปที่ 4.17 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.17 วงจรการทดสอบการส่งถ่ายพลังงานของคอนเวอร์เตอร์

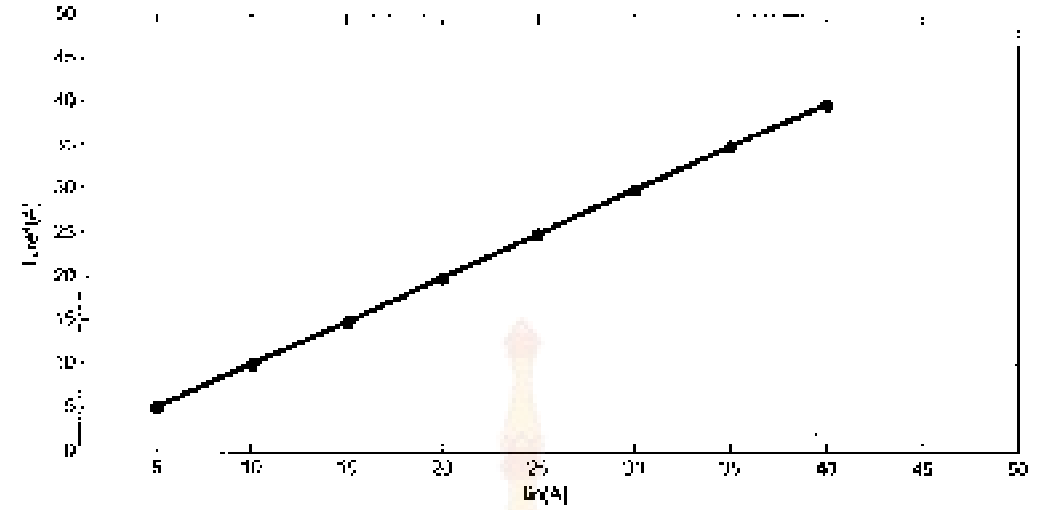
4.5.1 ผลการทดสอบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

จากการทดสอบวงจรในโหมดส่งถ่ายพลังงานออกจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังระบบ สรุปผลการทดสอบตามวัตถุประสงค์ของการทดสอบได้ดังนี้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

$I_{ref}(A)$	$I_{in}(A)$	$V_{in}(V)$	$I_o(A)$	$V_o(V)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$
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	19.85	25.95	7.7	60	516	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 4.5 ความสัมพันธ์ของกระแส I_{ref} และ I_{in} เป็นการควบคุมวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลแสดงเป็นกราฟดังในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์กระแส I_{ref} กับ I_{in}

การควบคุมของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลที่กล่าวถึงนี้คือ การที่วงจรสามารถจ่ายกระแส I_o ได้เท่ากับ I_{ref} เมื่อดูจากผลการทดสอบในตารางที่ 4.5 เห็นได้ว่าวงจรไม่สามารถที่จ่ายกระแส I_o เท่ากับ I_{ref} ถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาดต่อคำสั่งของวงจรไม่ควรเกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นหาได้จาก

$$I_{err} = \frac{I_{ref} - I_o}{I_{ref}} \times 100 \qquad (4.1)$$

จากผลการทดสอบจุดที่พบความผิดพลาดสูงสุดคือที่คำสั่ง I_{ref} มีค่า 15 นำมาคำนวณหาค่าความผิดพลาดโดยแทนค่าลงสมการที่ (4.1)

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

เมื่อค่าผิดพลาดต่อคำสั่งสูงสุดของวงจรตัวนี้มีค่า 1.34 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในขอบเขตที่ตั้งไว้คือ ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ประกอบกับการตอบสนองต่อคำสั่งของวงจรตัวนี้ในรูปที่ 4.18 ค่อนข้างเป็นเส้นตรง จึงสรุปได้ว่าวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลสามารถควบคุมได้เมื่อจ่ายกระแส I_{ref} ไปยังระบบในช่วง 0 A ถึง 46 A

4.5.2 ประสิทธิภาพของชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์

ในการออกแบบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล จำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่สำคัญคือประสิทธิภาพของวงจร เนื่องจากจะเป็นตัวบอกคุณภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้นมาว่ามีสูญเสียมากน้อยเพียงใด ดังนั้นในการทดสอบนี้เป็นการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์โดยใช้วิธีการวัดกำลังไฟฟ้าทางด้านเข้าและกำลังไฟฟ้าทางด้านออกเพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพ (η) ดังแสดงในสมการที่ (4.2) งานวิจัยนี้ได้กำหนดประสิทธิภาพไม่น้อยกว่า 90 %

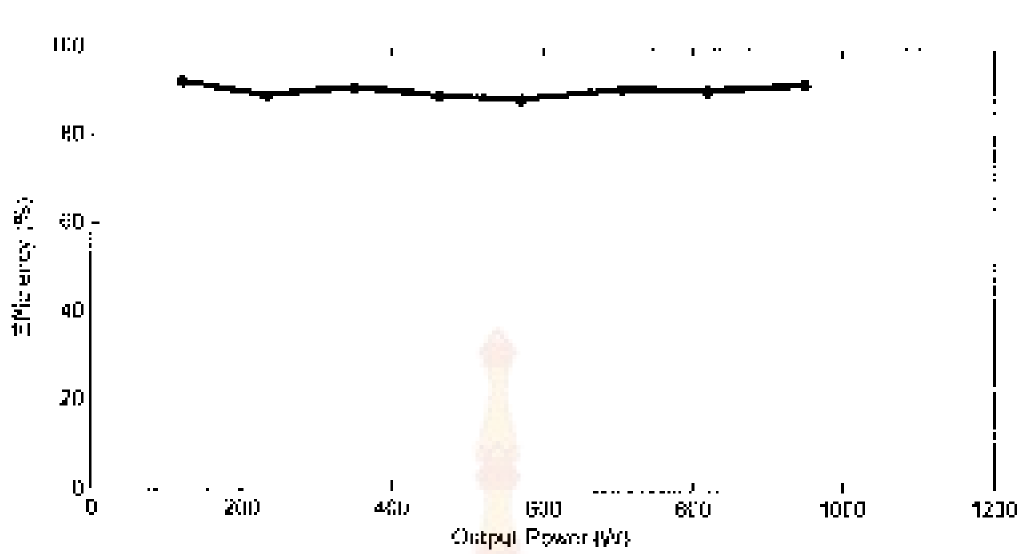
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{V_o I_{out}}{V_{in} I_{in}} \times 100 \qquad (4.2)$$

จากการทดลองการส่งถ่ายพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังระบบด้วยค่ากระแส I_L ต่างๆ ดังตารางที่ 4.7 คำนวณประสิทธิภาพของวงจรโดยแทนค่าลงสมการที่ (4.2) ประสิทธิภาพของวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล ดังนี้จึงปรากฏในตาราง ที่ 4.6 ซึ่งมีประสิทธิภาพเฉลี่ย 90.33 %

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพของบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

$I_{ref}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	η(%)
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 4.6 สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟแสดงประสิทธิภาพดังปรากฏในรูปที่ 4.18



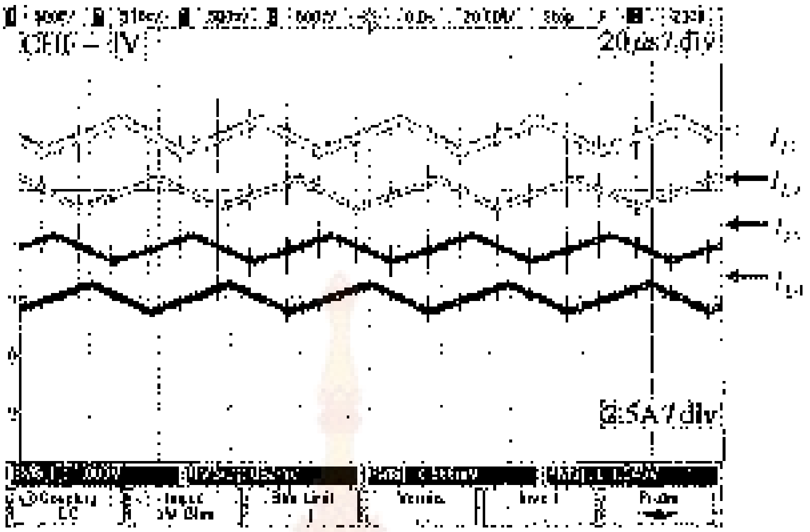
รูปที่ 4.19 กราฟประสิทธิภาพของบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

4.5.3 ความสามารถของการจ่ายกระแสของวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

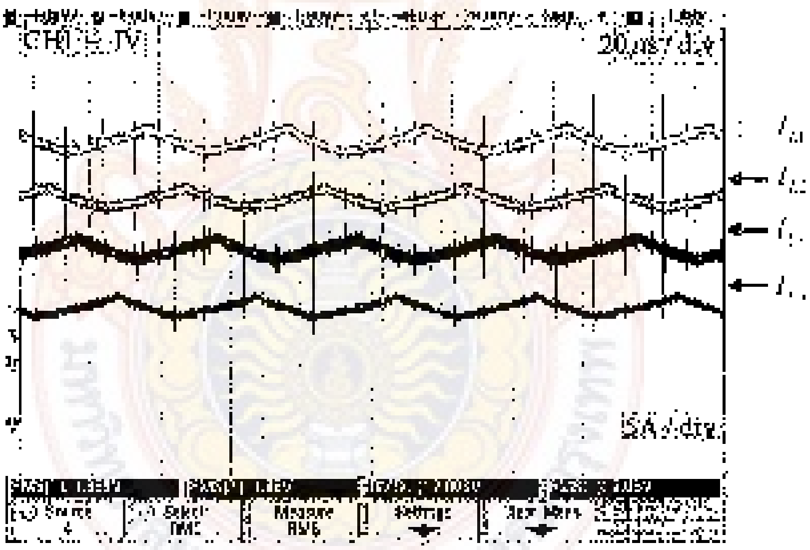
วัตถุประสงค์ของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลต้องมีกระแสที่ไหลในวงจรทั้ง 4 โมดูลเท่าๆกัน เพื่อลดการกระเพื่อมของกระแสด้านอินพุตให้น้อยลงกว่าวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบตัวเดียวและจ่ายกระแสเท่ากันเพื่อให้วงจรแต่ละโมดูลมีภาระที่เท่ากัน

4.5.3.1 การทดสอบในสภาวะคงตัว

ในสภาวะคงตัวของวงจรที่สร้างขึ้นมาจะต้องมีความสามารถในการรักษาแรงดันให้ตรงกับที่ออกแบบไว้ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้ง 4 โมดูลจะต้องมีการแบ่งกระแสที่เท่ากันมีการเหลื่อมเฟสกัน 90 องศา การทดสอบนี้ใช้ความต้านทานปรับค่าได้ ต่อเป็นโหลดทางไฟฟ้าทางด้านเอาท์พุต โดยการทดสอบจะตั้งให้วงจรทำงานที่กระแสต่างกันแต่จะควบคุมแรงดันทางด้านเอาท์พุตคงที่ 60V โดยจะทำการปรับค่าความต้านทานที่ต่อเป็นโหลดของวงจรให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน มีผลการทดสอบแสดงดังภาพต่อไปนี้



รูปที่ 4.20 กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำที่มีกระแสด้านอินพุต 20 A



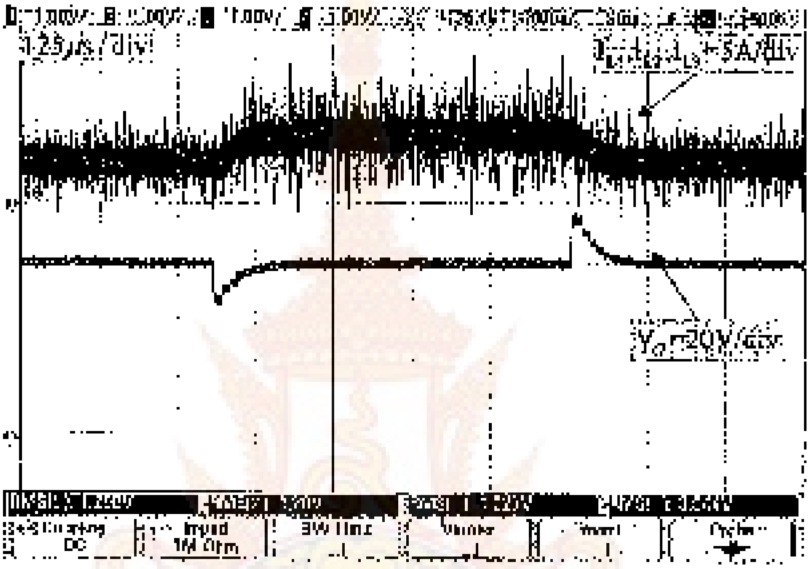
รูปที่ 4.21 กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำที่มีกระแสด้านอินพุต 40 A

ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายที่วางไว้จากรูปที่ 4.20 พบว่าวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบหลายเฟสที่สร้างขึ้นสามารถแบ่งจ่ายกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำได้เท่ากันที่ 5 A ต่อวงจร ดังนั้นกระแสรวมก็จะได้ 20 A และรูปที่ 4.21 พบว่าวงจรที่สร้างขึ้นสามารถแบ่งจ่ายกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำได้เท่ากันที่ 10 A ต่อวงจร ดังนั้นกระแสรวมก็จะได้ 40 A จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าวงจรที่สร้างขึ้นมีการแบ่งกระแสของขดลวดเหนี่ยวนำเท่าๆกันทุก

วงจร โดยมีการเหลื่อมกันของสัญญาณสัญญาณละ 90 องศา และรักษาแรงดันทางด้านเอาท์พุตคงที่ไว้ได้

4.3.3.2 ผลการทดสอบในสภาวะชั่วครู่

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบขณะมีการเปลี่ยนแปลงภาระอย่างทันทีทันใด เพื่อศึกษาผลตอบสนองของระบบที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงภาระ โดยการเปลี่ยนแปลงกระแสจาก 15 A ไปที่ 25 A ผลการทดสอบระบบแสดงดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 กระแสและแรงดันเอาท์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่กระแสอินพุต 15A ไปที่ 25A

จากการทดสอบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระที่กระแสด้านเข้า 15A ไปที่ 25A โดยจะพบว่าระบบยังคงรักษาเสถียรภาพไว้ได้ วงจรจะสามารถแบ่งจ่ายกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ แต่ละตัวได้เท่ากันที่ 3.75A ไปที่ 6.25A ต่อวงจร และระบบจะพยายามรักษาระดับแรงดันทางด้านเอาท์พุตให้คงที่ไว้ได้

4.6 สรุปผลการทดลอบ

การทดสอบชุดวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล พบว่าวงจรสามารถควบคุมการทำงานได้ตามที่ออกแบบเอาไว้ โดยควบคุมกระแสทางด้านอินพุต (I_{in}) ตามคำสั่งที่ส่งจากกระแสอ้างอิง (I_{ref}) ได้เป็นอย่างดี ซึ่งกระแสอ้างอิงมาจากการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อทดสอบการจ่ายกระแสในช่วง 0-40 A โดยใช้สัญญาณคำสั่ง 0-10 A มีค่าความผิดพลาดของกระแสที่ไหลจริงในวงจรต่อสัญญาณคำสั่ง ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ การทำงานของวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล มีการแบ่งกระแสที่เท่ากันมีการเหลื่อมเฟสกัน 90 องศา สามารถควบคุมแรงดันทางด้านเอาท์พุตให้คงที่ 60V และมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการทำงาน 90.33 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัยที่ได้จากการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเก็บเก็บข้อมูลของเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 1 แผงและ 2แผงเพื่อเก็บข้อมูลกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาพแวดล้อมของประเทศไทย จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink และควบคุมแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบโปรแกรมขนาด 1 kW เพื่อเป็นอินพุตให้กับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลได้ จากการออกแบบสร้างวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล โดยใช้เทคนิคการอินเตอร์ลีฟให้มีการเหลื่อมเฟสกระแสด้านอินพุต เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและประยุกต์ใช้งานคอนเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและแบตเตอรี่ โดยใช้การควบคุมกระแสด้วยลูปป้อนกลับกระแสด้วยพีไอคอนโทรลแบบอนาลอกทำงานในโหมดกระแสไหลต่อเนื่อง โดยประยุกต์ใช้การขนานวงจรคอนเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคการอินเตอร์ลีฟ (Interleaved Technique) เพื่อลดการกระเพื่อมกระแสของแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง ระบบนี้ถูกออกแบบให้ทำงานที่พิกัดแรงดันด้านอินพุต 20 V 40 A แรงดันด้านเอาต์พุต 60 V และมีกำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุตสูงสุด 1 kW ทดสอบได้ประสิทธิภาพเฉลี่ย 90.3 %

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้มีจุดที่ต้องปรับปรุงแก้ไขคือ

5.2.1 พัฒนาระบบชุดควบคุมลูปกระแสของคอนเวอร์เตอร์ ที่มีการควบคุมแบบแอนาลอกมาเป็นการควบคุมด้วยตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิตอล

5.2.2 หากต้องการลดกำลังสูญเสียที่เกิดจากการสวิตช์ให้น้อยลง จึงควรออกแบบวงจรควบคุมที่ใช้เทคนิคสวิตช์แบบซอร์ฟสวิตช์ (Soft Switch) ควรใช้มอสเฟตกำลัง ที่สามารถทนกระแสได้สูงๆ เมื่อแรงดันดีซีเพิ่มมากขึ้น

5.2.3 ปรับปรุงการออกแบบทางวงจรกำลังของคอนเวอร์เตอร์ให้มีขนาดเล็กลง

5.3 ผลงานตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ

บทความเรื่อง "การควบคุมบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลด้วยเทคนิคอินเตอร์ลีฟ" นำเสนอในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 มหาวิทยาลัยกรุงเทพ เป็นเจ้าภาพจัดการประชุม ณ โรงแรมรอยัลฮิลส์ กอล์ฟ แอนด์ รีสอร์ท จังหวัดนครนายก

EECON XXXV

The 35th Electrical Engineering Conference (EECON-35)

SCHOOL OF ENGINEERING
BANGKOK UNIVERSITY

NECTEC
a member of NSTDA

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

การควบคุมบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูลด้วยเทคนิคอินเตอร์ลีฟ

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

[illegible]
[illegible]
[illegible]
[illegible]
[illegible]

PE004

บทคัดย่อ

[illegible]

คำสำคัญ: บูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์, ตัวควบคุมแบบพีไอ, เทคนิคอินเตอร์ลีฟ

Abstract

This article presents the design and control of 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 Integral (PI controller) and using interleaved control technique for decreasing input current ripple. The 4 modules parallel boost dc to dc converter step up supply 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 control the output voltage regulation. The average of the current in each module was similar. The average efficiency of the proposed system is 90.15%

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

1. บทนำ

[illegible]

[illegible]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคนิคการอินเตอร์ลีฟ

[illegible]

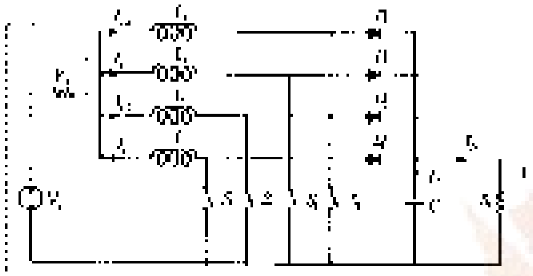
3. [illegible] 4 [illegible]

3.1 [illegible]

[illegible]

$$[illegible] \quad (1)$$

$$[illegible] \quad (2)$$



รูปที่ 1 [illegible] 4 [illegible]

3.2 [illegible]

[illegible]

$$[illegible] \quad (3)$$

$$[illegible] \quad (4)$$

[illegible]

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

$$[illegible] \quad (6)$$

$$[illegible] \quad (7)$$

[illegible]

$$[illegible] \quad (8)$$

$$[illegible] \quad (9)$$

$$\dot{x} = A_{[illegible]}x + B_{[illegible]}u \quad (10)$$

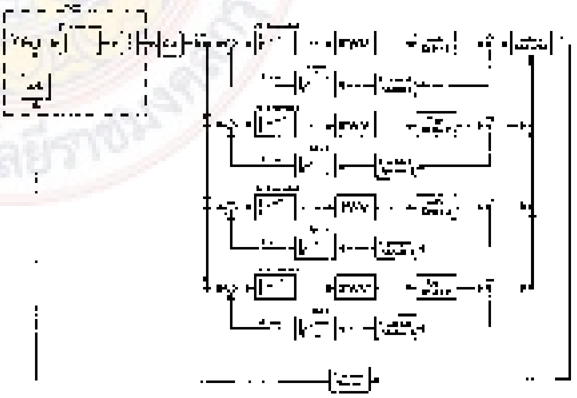
$$[illegible] \quad (11)$$

[illegible]

$$[illegible] \quad (12)$$

$$[illegible] \quad (13)$$

[illegible]



รูปที่ 2 [illegible]

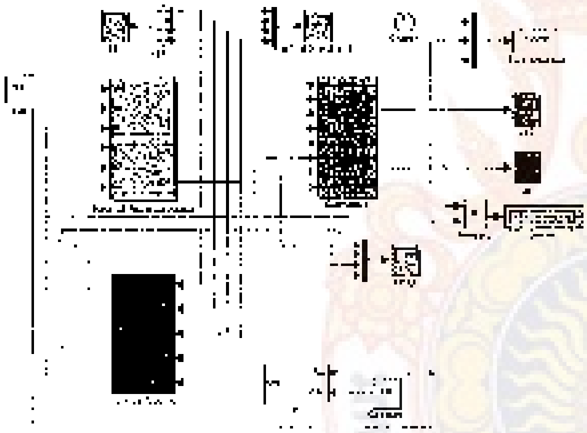
4. ผลการทดลอง

4.1 การจำลองแบบการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ที่ใช้จำลอง

รายการสัญลักษณ์	ขนาดค่า
แรงดันอินพุต (V_i)	36 V
แรงดันเอาต์พุต (V_o)	60 V
ตัวเหนี่ยวนำ (L_1 – L_4)	195 μH
ตัวเก็บประจุเอาต์พุต (C)	680 μF
ความถี่สวิตชิ่ง (f_s)	25 kHz
ความต้านทาน (R_L)	6 Ω
K_p , K_i	1.85, 142.85
K_p , K_i	0.25, 18

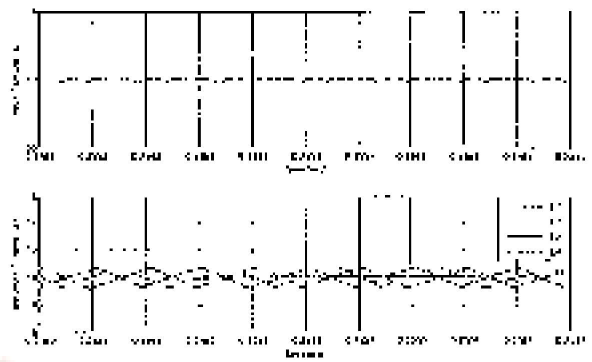
การจำลองการทำงานใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยใช้ตัวควบคุม [illegible] i_L และ v_o [illegible] ใช้ Simulink [illegible]



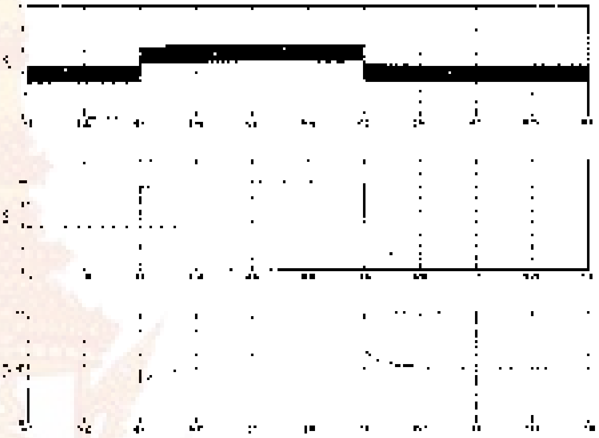
รูปที่ 3 แบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

4.2 ผลการจำลองการทำงาน

[illegible] 1 kW ในรูปที่ 4 แสดงกระแสตัวเหนี่ยวนำทั้ง 4 โมดูล [illegible] ในรูปที่ 5 แสดงผลการจำลองการทำงาน [illegible] $i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}, i_{L4}$ [illegible] ในรูปที่ 6 และ 7 [illegible] V [illegible] 15A ไปที่ 25A [illegible]

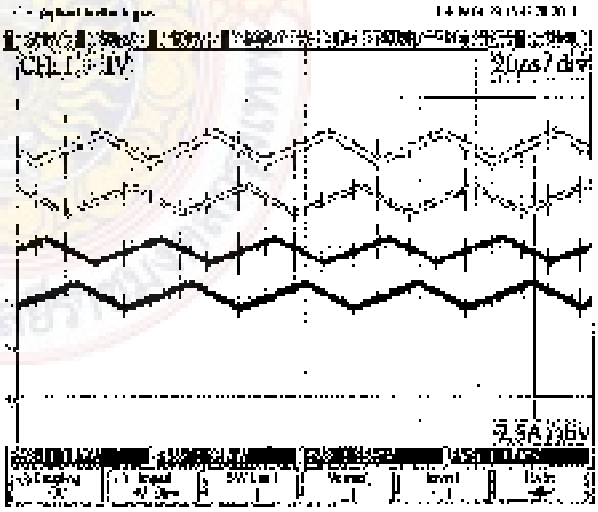


รูปที่ 4 กระแสอินพุต (i_s) และกระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L)

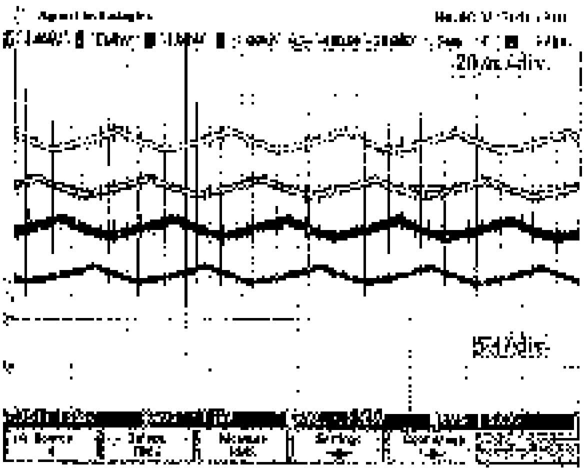


รูปที่ 5 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) กระแสเอาต์พุต (i_o) และแรงดันเอาต์พุต (V_o) ขณะเปลี่ยนแปลงโหลดระหว่าง 400-600W

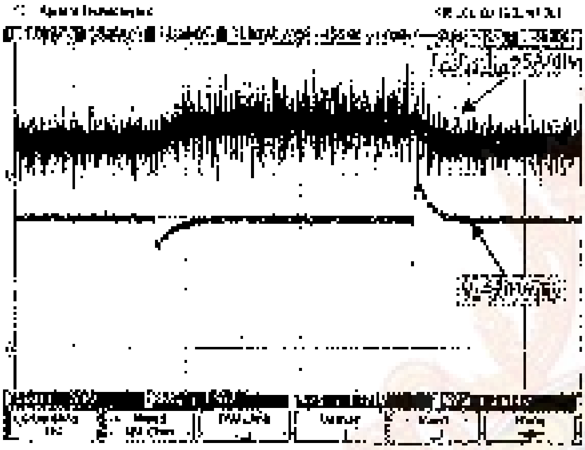
4.3 ผลการทดลองบูสต์คอนเวอร์เตอร์ 4 โมดูล



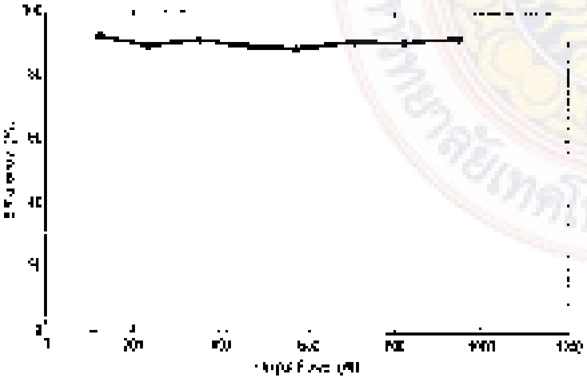
รูปที่ 6 กระแส $i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}, i_{L4}$ [illegible]



รูปที่ 7 กระแส i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}, i_{L4} ที่กระแสโหลด 10 A



รูปที่ 8 การตอบสนอง v_o, i_o, i_L และแรงดันเอาต์พุต เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง
เปลี่ยนแปลงโหลดอย่างฉับพลัน



รูปที่ 9 ประสิทธิภาพของวงจรบูสต์อินเตอร์ลีฟ 4 เฟส

รูปที่ 10 การทดสอบวงจรต้นแบบ

5. สรุปผล

ระบบวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบอินเตอร์ลีฟ 4 เฟส ได้ถูกนำเสนอ ... แรงดันเอาต์พุตที่ 60 V ... 0 - 10 A ... 1 kW ... ประสิทธิภาพเฉลี่ยที่ 95.11 % ... สามารถนำไปใช้งานกับระบบการจ่ายไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงหรือแหล่งพลังงานอื่นได้

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. 1341-1352.

[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, P.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.

บรรณานุกรม

[1] พงษ์ศิริ มุ้งพา, และปิยะพงษ์ ผมล่อน. 2551. "ตัวแปลงไฟฟ้ากระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันขนาด 4 เฟส ที่กระแสเหลื่อมเฟสสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง". วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

[2] 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.

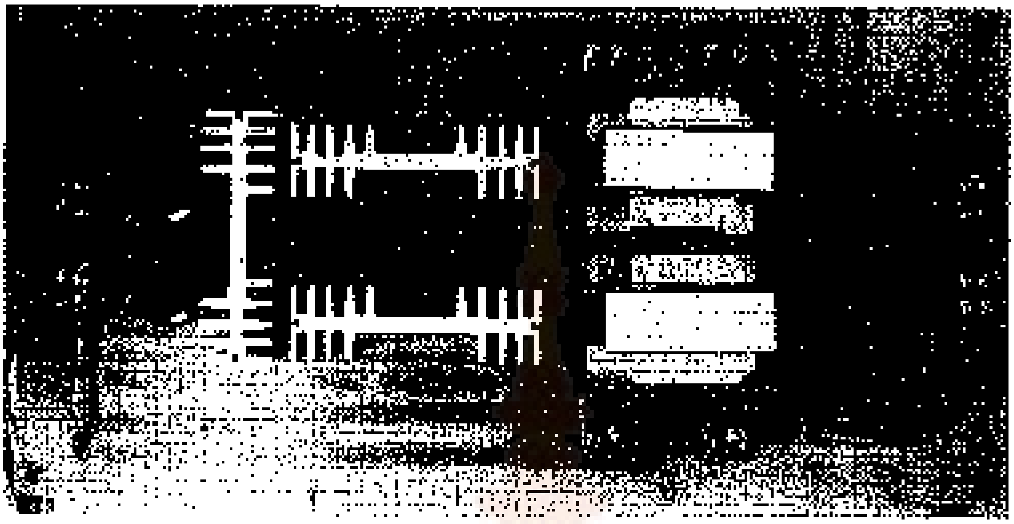
[3] J. Bryan, R. Duke, and S. Round, Decentralized generator scheduling in a nanogrid using DC bus signalling, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 977 - 982, June, 2004.

[4] J. Schonberger, R. Duke, and S. Round, DC Bus Signalling: A Distributed Control Strategy for a Hybrid Renewable Nanogrid, IEEE Transactions on Industrial Electronics. April 2006

[5] B. T. Irving and M. M. Jovanovic, "Analysis, Design, and Performance Evaluation of Droop Current-Sharing Method," in IEEE APEC'00, pp. 235-241.

ภาคผนวก ก

ภาพถ่ายชิ้นงาน

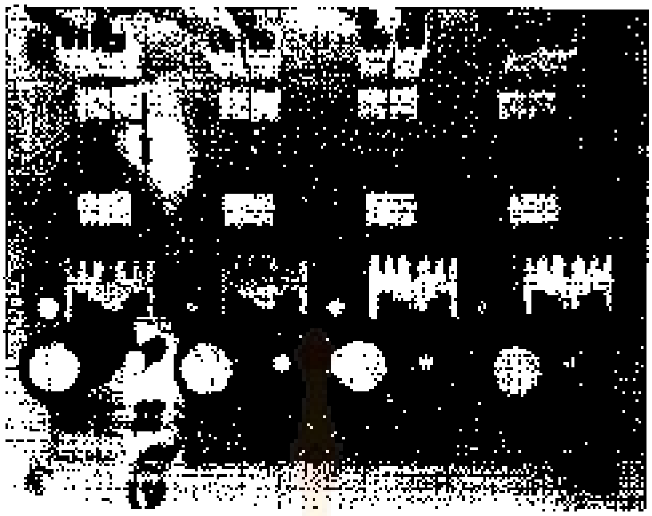


รูปที่ ก.1 ด้านบนของวงจรกำลัง

รูปที่ ก.2 ด้านข้างของวงจรกำลัง

รูปที่ ก.3 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม

รูปที่ ก.4 วงจรควบคุมกระแสแบบพีไอและชุดสร้างสัญญาณ PWM



รูปที่ 11.5 วงจรข้างหน้า

รูปที่ 11.6 วงจรตรวจจับแรงดัน

รูปที่ ก.7 วงจรควบคุมรักษาระดับแรงดัน

รูปที่ ก.8 ไฟเลี้ยงชุดควบคุม

โปรแกรมควบคุมการทำงาน

```
#include <p30f4011.h>
#include "stdio.h" // Used "sprintf" Function
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
/**************************************************************/
_FOSC(CSW_FSCM_OFF & FRC_PLL16);    // Fosc=16x7.5MHz, Fcy=30MHz
_FWDT(WDT_OFF);                     // Watchdog timer off
/************************MCP4811************************/
#define  TRIS_F     TRISF
#define  MCP_SCK    _LATF4
#define  MCP_SI     _LATF1
#define  MCP_CS     _LATF0
/************************ PI ************************/
//Define parameter
#define epsilon 0.1
#define dt 0.07
#define MAX  255.0
#define MIN  -255.0
#define Kp  1.0
#define Ki  0.025
#define setpoint_volt  60.0
float OUTPUT_VOLT = 0.0;
/**************************************************************/
// Character LCD Interface Pins
#define TRIS_DATA_PIN_4  TRISBbits.TRISB0 // Direction D4
#define TRIS_DATA_PIN_5  TRISBbits.TRISB1 // Direction D5
#define TRIS_DATA_PIN_6  TRISBbits.TRISB2 // Direction D6
#define TRIS_DATA_PIN_7  TRISBbits.TRISB3 // Direction D7
#define TRIS_RS  TRISBbits.TRISB4 // Direction RS
#define TRIS_RW  TRISBbits.TRISB8 // Direction RW
#define TRIS_E  TRISBbits.TRISB5 // Direction E

#define DATA_PIN_4  LATBbits.LATB0 // RD1 = D4 LCD
#define DATA_PIN_5  LATBbits.LATB1 // RD2 = D5 LCD
#define DATA_PIN_6  LATBbits.LATB2 // RD3 = D6 LCD
#define DATA_PIN_7  LATBbits.LATB3 // RD12 = D7 LCD
#define RS_PIN  LATBbits.LATB4 // RD5 = RS LCD
#define RW_PIN  LATBbits.LATB8 // RD4 = RW LCD
#define E_PIN  LATBbits.LATB5 // RD13 = E LCD

#define READ_PIN_BUSY PORTBbits.RB3 // Read LCD Busy Pin

/* Display ON/OFF Control */
#define DON 0x0F // Display on
#define DOFF 0x0B // Display off
#define CURSOR_ON 0x0F // Cursor on
#define CURSOR_OFF 0x0D // Cursor off
#define BLINK_ON 0x0F // Cursor Blink
#define BLINK_OFF 0x0E // Cursor No Blink
/* Cursor or Display Shift */
#define SHIFT_CUR_LEFT 0x13 // Cursor shifts to the left
#define SHIFT_CUR_RIGHT 0x17 // Cursor shifts to the right
#define SHIFT_DISP_LEFT 0x1B // Display shifts to the left
#define SHIFT_DISP_RIGHT 0x1F // Display shifts to the right
```

```
char lcd_buf[16]; // "sprint" LCD Buffer
/* Function Prototypes */
void Initial_4bitLCD(void); // Initial LCD Interface
void SetCursor(unsigned char); // Set Cursor Address
void WriteCmdLCD(unsigned char); // Write Command
void WriteDataLCD(unsigned char); // Write Data
void Delay_tW_LCD(void); // Enable Pulse Delay
char Read_BusyLCD(void); // Read LCD Busy
void print_LCD(void); // Print String to LCD
void Delay(unsigned long int); // Delay Time Function
/*************************************************/
// Function prototypes
void configure_pins();
unsigned int read_analog_channel(int n);
void SetResister(unsigned char value);
unsigned char phase=0;
unsigned char value=0;
unsigned int i = 0;
unsigned char data_ = 0;
float VOLT = 0;
long Volt = 0;
float Volt_ = 0;
float Volt_I = 0;
unsigned int A=0;

/************************* pi ****************************/
float PIcal(float setpoint,float actual_position)
{
      static float pre_error = 0;
      static float integral = 0;
      float error;
      float derivative;
      float output;
      error = setpoint - actual_position;
      if((error<0.05)&&(error>-0.05))  error = 0;
      //In case of error too small then stop intergration
      if(abs(error) > epsilon)
      {
      integral = integral + error*dt;
      }
      output = Kp*error+ Ki*integral;
      if(output > MAX)
      {
      output = MAX;
      }
      else if(output < MIN)
      {
      output = MIN;
      }
      pre_error = error;
 return output;
}
/*********************MCP4011*********************/
void SetResister(unsigned char value)
{
      unsigned char i,Cmd=0x00;
      MCP_CS = 0;
      for (i=0; i<=7; i++)
      {
```

```
            data_ = (cmd&0x80);
            if(data_==0x80) MCP_SI = 1;
            else if(data_==0x00) MCP_SI = 0;
            cmd <<= 1;
            MCP_SCK = 1;
            Delay(4000);        //4000
            MCP_SCK = 0;
      }
      for (i=0; i<=7; i++)
      {
            data_ = (value&0x80);
            if(data_==0x80) MCP_SI = 1;
            else if(data_==0x00) MCP_SI = 0;
            value <<= 1;
            MCP_SCK = 1;
            Delay(4000);
            MCP_SCK = 0;
      }
      MCP_CS = 1;
}
/**********************Read volt**********************/
void Read_volt(void)
{
      Volt = 0;
      Volt_ = 0;
      Volt_1 = 0;
      VOLT =0;
      unsigned int v=0;
      unsigned int i=0;
      for(A=0;A<10;A++)
      {
      for(i=0;i<1000;i++)
      {
            v = read_analog_channel(7);
            Volt = Volt+v;
            v = 0;
            Delay(2);
      }
      Volt_1 = Volt*0.001;
      Volt_ = Volt_+Volt_1;
      Volt = 0;
      Volt_1 = 0;
      }
      VOLT = (Volt_*0.1)*0.079500;                //===>>> 60V
      Volt_ = 0;
}

/**********************soft_start****************/
void soft_start(void)
{
      Unsigned int round;
      Read_volt();
      OUTPUT_VOLT = 101;                          //====>>>>ILref = 1.0V
      i = 255-(unsigned int)OUTPUT_VOLT;
      phase = i;
      //SetResister(i);
      SetResister(phase);
      SetCursor(0x00); // Start Cursor Line 1
      sprintf(lcd_buf,"   Soft Start   ");
```

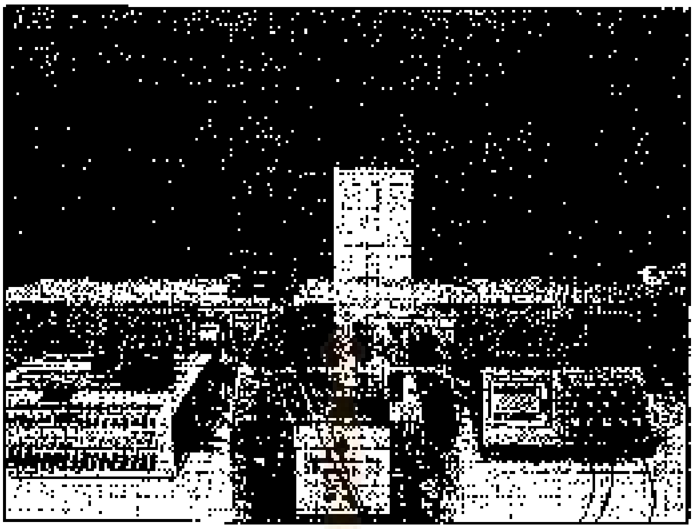
```
	print_LCD();
	SetCursor(0x40); // Start Cursor Line 2
	sprintf(lcd_buf,"  Please Wait  ");
	print_LCD();
	for(round=100;round>0;round--)Delay(50000);
	for(round=30,round>0;round--)      //=====>>>>set_delay_time 1
	{
	Read_volt();
	SetResistor(phase);
	SetCursor(0x00); // Start Cursor Line 1
	sprintf(lcd_buf,"Volt:%3.1f V.   ",VOLT);
	print_LCD();
	SetCursor(0x40); // Start Cursor Line-2
	sprintf(lcd_buf,"ILref: %1.3f V   ",(255-i)* 0.009900200);
	print_LCD();
	Delay(1000);                     //----->>>>set delay_time_2
	}
	SetCursor(0x00); // Start Cursor Line 1
	sprintf(lcd_buf,"  Program PI   ");
	print_LCD();
	SetCursor(0x40); // Start Cursor Line-2
	sprintf(lcd_buf," Status:Ready ");
	print_LCD();
	for(round=100;round>0;round--)Delay(50000);
}
/****************************************************************************/
int main(void)
{
/* Start of PLL Config Fcy = 40MIPS */
//CLKDIV &= 0xFFE0; // PLLPRE[4..0] = 00000 (N1=2)
//CLKDIV &= 0xFF3F; // PLLPOST[1:0] = 00 (N2=2)
//PLLFBD = 0x26; // PLLDIV[8..0] = 000000110(M=40)
//while(!OSCCONbits.LOCK); // Wait PLL to Lock
//OSCCONbits.CLKLOCK = 1; // Disable PLL Modify
/* End of PLL Config Fcy = 40MIPS */
	initial_4bitLCD(); // Initial LCD 4 Bit Interface
// Set up which pins are which
	configure_pins();
// Loop Print Message to LCD16 x 2 //
	TRIS_F = 0x00;
/*****************************************************/
	soft_start();
/*****************************************************/
	while(1)

// Loop Continue
	{
	Read_volt();
/*****************************************************/
//float PIcal(float setpoint,float actual position)
//i = 255-(unsigned int)PIDcal(setpoint_volt,VOLT);
	OUTPUT_VOLT = OUTPUT_VOLT+PIcal(setpoint_volt,VOLT);
	if(OUTPUT_VOLT<0) OUTPUT_VOLT=0;
	if(OUTPUT_VOLT>255) OUTPUT_VOLT=255;
	i = 255-(unsigned int)OUTPUT_VOLT;
	if(i<=42) i = 42;              //=====>>>Volt Max 255 213(2.1V)-42
	phase = 1;
/*****************************************************/
	SetResistor(phase);
```

```
        SetCursor(0x00); // Start Cursor Line 1
        sprintf(lcd_buf,"VOLT:%3.1f V.    ",VOLT);
        print_LCD();
        SetCursor(0x40); // Start Cursor Line 2
        sprintf(lcd_buf," Iref: %2.3f V ",(255-i)*0.008561400);=>>Iref(2.1/255)
        print_LCD();
        Delay(10);
        }
}
/***************Initial 4Bit LCD***************/
void Initial_4bitLCD(void)
{
        TRIS_DATA_PIN_4 = 0; // Set Port Direction = Output
        TRIS_DATA_PIN_5 = 0;
        TRIS_DATA_PIN_6 = 0;
        TRIS_DATA_PIN_7 = 0;
        TRIS_RS = 0;
        TRIS_RW = 0;
        TRIS_E = 0;
        DATA_PIN_4 = 1; // Start 4 Bit Initial
        DATA_PIN_5 = 1;
        DATA_PIN_6 = 0;
        DATA_PIN_7 = 0;
        RS_PIN = 0; // Instruction Select
        RW_PIN = 0; // Write Select
        E_PIN = 0; // Disable LCD Read/Write
        Delay(600000); // Power-ON Delay (minimum of 15ms)
        DATA_PIN_4 = 1; // Start 4 Bit Initial
        DATA_PIN_5 = 1;
        DATA_PIN_6 = 0;
        DATA_PIN_7 = 0;
        RS_PIN = 0; // Instruction Select
        RW_PIN = 0; // Write Select
        E_PIN = 1; // Strobe High Nibble
        Delay_tW_LCD(); // Enable Pulse Delay
        E_PIN = 0;
        // Wait 4.1mS
        Delay(164000); // Wait 4.1 mS
        DATA_PIN_4 = 1; // Start 4 Bit Initial
        DATA_PIN_5 = 1;
        DATA_PIN_6 = 0;
        DATA_PIN_7 = 0;
        RS_PIN = 0; // Instruction Select
        RW_PIN = 0; // Write Select
        E_PIN = 1; // Strobe High Nibble
        Delay_tW_LCD(); // Enable Pulse Delay
        E_PIN = 0;
        Delay(4000); // Wait 100uS
        WriteCmdLCD(0x32); // Start Function Set 4Bit LCD Interface
        WriteCmdLCD(0x28); // Function Set (DL=0 4 Bit,N=1 2 Line,F=0 5X7)
        WriteCmdLCD(0x0C); // Display on/off Control (Entry Display,Cursor
off,Cursor not Blink)
        WriteCmdLCD(0x06); // Entry Mode Set (I/D=1 Increment,S=0 Cursor Shift)
        WriteCmdLCD(0x01); // Clear Display (Clear Display,Set DD RAM Address=0)
}
/* ****************Set Cursor Address LCD****************/
void SetCursor(unsigned char address)
{
        RS_PIN = 0; // Select Instruction
```

```
        RW_PIN = 0; // Write Select
        DATA_PIN_7 = 1; // DB7 Must be 1 For Setting DDRam ADDR
        DATA_PIN_6 = ((address & 0x40)>>6);
        DATA_PIN_5 = ((address & 0x20)>>5);
        DATA_PIN_4 = ((address & 0x10)>>4);
        E_PIN = 1; // Strobe High Nibble
        Delay_tW_LCD(); // Enable Pulse Delay
        E_PIN = 0;
        Delay_tW_LCD(); // Enable Pulse Delay
        RS_PIN = 0; // Select Instruction
        RW_PIN = 0; // Write Select
        DATA_PIN_7 = ((address & 0x08)>>3);
        DATA_PIN_6 = ((address & 0x04)>>2);
        DATA_PIN_5 = ((address & 0x02)>>1);
        DATA_PIN_4 = ((address & 0x01)>>0);
        E_PIN = 1; // Strobe Low Nibble
        Delay_tW_LCD(); // Enable Pulse Delay
        E_PIN =0;
        while(Read_BusyLCD()); // Wait LCD Ready
}
/*************** Write Command to LCD*************/
void WriteCmdLCD(unsigned char cmd)
{
        RS_PIN = 0; // Select Instruction
        RW_PIN = 0; // Write Select
        DATA_PIN_7 = ((cmd & 0x80)>>7);
        DATA_PIN_6 = ((cmd & 0x40)>>6);
        DATA_PIN_5 = ((cmd & 0x20)>>5);
        DATA_PIN_4 = ((cmd & 0x10)>>4);
        E_PIN = 1; // Strobe High Nibble
        Delay_tW_LCD(); // Enable Pulse Delay
        E_PIN = 0;
        Delay_tW_LCD(); // Enable Pulse Delay
        RS_PIN = 0; // Select Instruction
        RW_PIN = 0; // Write Select
        DATA_PIN_7 = ((cmd & 0x08)>>3);
        DATA_PIN_6 = ((cmd & 0x04)>>2);
        DATA_PIN_5 = ((cmd & 0x02)>>1);
        DATA_PIN_4 = (cmd & 0x01);
        E_PIN = 1; // Strobe Low Nibble
        Delay_tW_LCD(); // Enable Pulse Delay
        E_PIN = 0;
        while(Read_BusyLCD()); // Wait LCD Ready
}
/***************Write Data to LCD **************/
void WriteDataLCD(unsigned char data)
{
        RS_PIN = 1; // Select Data
        RW_PIN = 0; // Write Select
        DATA_PIN_7 = ((data & 0x80)>>7);
        DATA_PIN_6 = ((data & 0x40)>>6);
        DATA_PIN_5 = ((data & 0x20)>>5);
        DATA_PIN_4 = ((data & 0x10)>>4);
        E_PIN = 1; // Strobe High Nibble
        Delay_tW_LCD(); // Enable Pulse Delay
        E_PIN = 0;
        Delay_tW_LCD(); // Enable Pulse Delay
        RS_PIN = 1; // Select Data
        RW_PIN = 0; // Write Select
```

```
	DATA_PIN_7 = ((data & 0x08)>>3);
	DATA_PIN_6 = ((data & 0x04)>>2);
	DATA_PIN_5 = ((data & 0x02)>>1);
	DATA_PIN_4 = (data & 0x01);
	E_PIN = 1; // Strobe Low Nibble
	Delay_tW_LCD(); // Enable Pulse Delay
	E_PIN = 0;
	while(Read_BusyLCD()); // Wait LCD Ready
}
/* ***********Pulse Delay Write LCD *****************/
void Delay_tW_LCD(void) // Enable Pulse Delay
{
	int i;
	for(i=0;i<500;i++); // Wait 10uS
}
/* *****************Wait LCD Ready*******************/
char Read_BusyLCD(void)
{
	TRIS_DATA_PIN_7 = 1; // Set Port Direction = Input
	RW_PIN = 1; // Read Function Select
	RS_PIN = 0; // Instruction Select
	Delay_tW_LCD(); // Enable Pulse Delay
	E_PIN = 1; // Enable Read
	Delay_tW_LCD(); // Enable Pulse Delay
	if(READ_PIN_BUSY) // Verify Busy Flag
	{
	TRIS_DATA_PIN_7 = 0; // Set Port Direction = Output
	E_PIN = 0; // Disable Read
	return 1;
	}
	else
	{
	TRIS_DATA_PIN_7 = 0; // Set Port Direction = Output
	E_PIN = 0; // Disable Read
	return 0;
	}
}
/********************* Print String to LCD **********************/
void print_LCD(void)
{
	char *p; // Pointer Buffer
	p = lcd_buf; // LCD Buffer
	do // Get char & Print Until null
	{
	WriteDataLCD(*p); // Write char to UART1
	p++; // Next char
	}
	while(*p != '\0'); // End of ASCII (null)
	return;
}
/*****************************************************/
/* Delay Time Function */
/* 1-4294967296 */
/*****************************************************/
void Delay(unsigned long int count1)
{
	while(count1 > 0) {count1--;} // Loop Decrease Counter
}
/*************configure_pins*************/
```

```
void configure_pins()
{
      // Configure analog inputs
      TRISB = 0x8080;       // Port B all inputs          //0x01FF
      ADPCFG = 0xFF00;      // Lowest 8 PORTB pins are analog inputs
      ADCON1 = 0;           // Manually clear SAMP to end sampling, start
conversion
      ADCON2 = 0;           // Voltage reference from AVDD and AVSS
      ADCON3 = 0x0005;      // Manual Sample, ADCS=5 -> Tad = 3*Tcy
      ADCON1bits.ADON = 1; // Turn ADC ON
}
/**************Read_Analog***************/
unsigned int read_analog_channel(int channel)
{
      ADCHS = channel;           // Select the requested channel
      ADCON1bits.SAMP = 1;       // start sampling
      __delay32(30);             // 1us delay @ 30 MIPS
      ADCON1bits.SAMP = 0;       // start Converting
      while (!ADCON1bits.DONE); // Should take 12 * Tad = 1.2us
      return ADCBUF0;
}
```



รูปที่ ค.1 ชุดการทดสอบวงจรบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

ภาพที่ ค.2 ด้านหน้าและด้านหลังกล่องบูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน 4 โมดูล

ภาคผนวก ข

ประวัตินักวิจัย

ประวัติผู้วิจัยหลัก

1 **ชื่อ และ นามสกุล** นายสันธพล คุ้มทรัพย์

Mr. Santaphon Koomsap

2 **หมายเลขบัตรประชาชน** 3-1017-01699-82-0

3 **ตำแหน่งปัจจุบัน** อาจารย์ระดับ 6

สาขาที่ทำการวิจัย สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

4 **สถานที่ติดต่อ**

ที่ทำงานปัจจุบัน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่

แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10120

โทรศัพท์ 0 2286 9629

ที่อยู่ปัจจุบัน 42-115 ซอยนิมิตใหม่ 6/1 หมู่บ้านพนาสนธิ์ 4

แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ 10510.

E-mail santaphon.k@rmutk.ac.th

5. **ประวัติการศึกษา**

ระดับการศึกษา	อักษรย่อปริญญา	วิชาเอก	สถานศึกษา	ปีที่สำเร็จ	ประเทศ
ปริญญาโท	วศ.ม.	วิศวกรรมไฟฟ้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	2554	ไทย
ปริญญาตรี	วศ.บ.	วิศวกรรมไฟฟ้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	2544	ไทย

6 **สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ** ระบบไฟฟ้ากำลัง พลังงานทดแทน

7.1ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอวิจัย

7.1 **ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย: ชื่อแผนงานวิจัย** -

7.2 **หัวหน้าโครงการวิจัย: ชื่อโครงการวิจัย**

- เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมแบบ Real-time (ปีงบประมาณ 2553) หัวหน้าโครงการและเป็นโครงการวิจัยเดี่ยว

- "เครื่องประจุแบตเตอรี่แบบค่าตัวประกอบกำลังสูงสำหรับแบตเตอรี่แบบลิเทียมไอออนและแบบกรดตะกั่ว" (ปีงบประมาณ 2564) หัวหน้าโครงการและจบโครงการเรียบร้อย

7.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว: ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน

- "Space Vector Pulse Width Modulation for Three Phases Inverter with Real-Time Control", วัชชัย ทวัตถ์สิงห์, **สรรอพล ตุ้มทรัพย์**, เวทิน ปิยรัตน์, EECON31, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

-"Real-Time Wind Turbine Emulator for Testing Wind Energy Conversion Systems" , **Kumsup. S.** Tarasartisuk, C. , EnergyCON 2010. pp7-9

-"บูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับที่มีการควบคุมแรงดันคงที่ด้วยตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า-เฟสล้าหลัง" EECON34 **สรรอพล ตุ้มทรัพย์** และชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข, มหาวิทยาลัยสยาม

ประวัติผู้วิจัยร่วม

1 **ชื่อและ นามสกุล** อาจารย์ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข

Mr. Chanrit Tarasantisuk

2 **หมายเลขบัตรประชาชน** 3-2010-00133-45-4

3 **ตำแหน่งปัจจุบัน**

อาจารย์พนักงานมหาวิทยาลัย

สาขาที่ทำการวิจัย สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

4 **สถานที่ติดต่อ**

ที่ทำงานปัจจุบัน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10120 โทรศัพท์ 0 2286 9629

ที่อยู่ปัจจุบัน 116/95 ตึก B3 อาคาร LPN รามคำแหง 43/1 แขวง/เขต วังทองหลาง กรุงเทพฯ 10310 E-mail chanrit.t@rmutk.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	อักษรย่อปริญญา	วิชาเอก	สถานศึกษา	ปีที่สำเร็จ	ประเทศ
ปริญญาโท	ค.อ.ม.	วิศวกรรมไฟฟ้า	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2546	ไทย
ปริญญาตรี	ค.อ.บ.	วิศวกรรมไฟฟ้า	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	2543	ไทย

6 สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ ระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงานทดแทน

7.ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

7.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย: **ชื่อแผนงานวิจัย**

7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย: ชื่อโครงการวิจัย

- เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมแบบ Real time (ปีงบประมาณ 2553) ร่วมวิจัยและจบโครงการเรียบร้อย

- ชุดฝึกวิศวกรรมด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วย DSP (TMS320F2812) ที่มีการควบคุมแบบ Real-time (ปีงบประมาณ 2553) หัวหน้าโครงการและจบโครงการเรียบร้อย

-การพัฒนาแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบไตรวิตจ์สำหรับป้ายแสดงผลอิเล็กทรอนิกส์ (ปีงบประมาณ 2554) หัวหน้าโครงการและจบโครงการเรียบร้อย

-เครื่องทำลายเข็มฉีดยาด้วยการอาร์กไฟฟ้าแบบพกพา (ปีงบประมาณ 2554) หัวหน้าโครงการและจบโครงการเรียบร้อย

-เครื่องประจุแบตเตอรี่และค่าตัวประกอบกำลังสูงสำหรับแบตเตอรี่แบบลิเทียมไอออนและแบบกรดตะกั่ว (ปีงบประมาณ 2554) ร่วมวิจัยและจบโครงการเรียบร้อย

-ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่มีกำลังไฟฟ้าสม่ำเสมอด้วยอัลตราคาปาซิเตอร์ (งบประมาณ สกย. ปีงบประมาณ 2554) หัวหน้าโครงการและอยู่ระหว่างวิจัย

7.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว: ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน

-"Identification and control of brushless DC motor using on-line trained artificial neural networks", Tipsuwanporn, V.; Piyarat, W.; **Tarasantisuk, C.**, PCC2002, Japan.

-"Enhanced control design of single phase AC-DC converter using power balance calculator" Tipsuwanporn, V.,**Tarasantisuk C.**,Piyarat W., Power and Energy System conference, IASTED

-"A Matlab/Simulink tool for power converters teaching - a power factor correction approach", Tipsuwanporn, V.; **Tarasantisuk, C.**; Phanphairoje, S., PEDS2003, Singapore

-"A Matlab/Simulink Tool for Enhancing Efficient Education of Power Electronics Corresponding to the ETH Power Converter Laboratory", **C. Tarasantisuk**, S. Tunyasrirut and V.Tipsuwanporn, IECON2004, Korea.

"Representations of Robustly Stabilizing Controller Structure for Distributed Control Architectures with Plant Uncertainties" K. Witheephanich, W. Piyarat and **C. Tarasantisuk**, IECON2004, Korea

-"Controller Design for a Networked Control System with Plant Uncertainties", K. Witheephanich, W. Piyarat and **C. Tarasantisuk**, EECON27, *(Best Paper)*, Khonkhan University

-"The Experimental Setup of DC Motor Speed and Position Control with LabVIEW Programming" **C. Tarasantisuk**, EECON29, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

-"Position Control of DC Motor using Sliding Mode Control" เฉลิมชัย จันวัฒน์ สมพงษ์ โสภาบัน และชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข, EECON31, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

-"Z-source Inverter for Renewable Energy Applications" พีนิจ เทพสาธร เฉลิมชัย จันวัฒน์ และ **ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข**, EECON31, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

-"เครื่องประจุแบตเตอรี่ด้วยตัวประกอบกำลังสูงแบบสองภาคต", พีนิจ เทพสาธร **ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข** สุวิทย์ เต็งเปา และเอกพันธ์ หาญสืบเชื้อ , EECON33 เชียงใหม่

-"การประยุกต์ใช้งานซุปเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์", **ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข**, สุเทพ ขูผึ้ง และทวีวัฒ ชัยพัฒน์, **EECON33**, เชียงใหม่

-"เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม" **ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข**, การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 5-7 พ.ค. 2553

- "Real-Time Wind Turbine Emulator for Testing Wind Energy Conversion Systems" , Kumsup S., **Tarasantisuk C.**, EnergyCON 2010, pp.7-9

- "บูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับที่มีการควบคุมแรงดันคงที่ด้วยตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า-เฟสล้าหลัง" EECON34, สุรพล คุ้มทรัพย์ และชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข, มหาวิทยาลัยสยาม

-"อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วย dsPIC30F4011" EENET2012, เอกพล อนุศุเวนทร์, **ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข**

"บูสต์ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบจำนวน 4 โมดูลด้วยเทคนิคอินเตอร์ลีฟ" EENET2012, ปิยะพร ธงชัยขาวสะอาด, ธาดุษ เฉิดจรัมย์ และ**ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข**

"การแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามเฟสที่ควบคุมกระแสด้วยวิธีฮิสเตอรีซิสสำหรับประยุกต์ใช้งานกับกังหันลม", E-NETT8, **ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข** และทองอินทร์ สุขะทา

- "การควบคุมกระแสแบบสัดส่วนเรโซแนนซ์สำหรับอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบต่อเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลังต่ำบนไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F2808" EECON35, เอกพล อนุศุเวนทร์ และชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข มหาวิทยาลัยกรุงเทพ

7.4 วิทยากรอบรมเรื่อง

-Control systems Laboratory with Real time control

-Power Electronics and Drives Laboratory with Matlab/Simulink

7.5 ผ่านการอบรมหลักสูตร

Department of Energy Technology, Aalborg University, เมืองอัลบอร์ก ประเทศเดนมาร์ก ในหลักสูตรดังต่อไปนี้

1. Power Electronics for Renewable Energy Systems – in theory and practice ระหว่างวันที่ 3-5 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

2.Micro grids in theory and practice ระหว่างวันที่ 17-19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

3.Photovoltaic Power Systems - in theory and practice ระหว่างวันที่ 23-26 พฤษภาคม พ.ศ.2554

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

1 ชื่อ และ นามสกุล นายบุญช่วย เจริญผล

Mr. Boonchuay Jareonpol

2 หมายเลขบัตรประชาชน 3-7201-00641-44-7

3 ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ระดับ 7

สาขาที่ทำการวิจัย สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

4 สถานที่ติดต่อ

ที่ทำงานปัจจุบัน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10120 โทรศัพท์ 0 2286 9629

ที่อยู่ปัจจุบัน 52/2 หมู่ 9 ต. เขาพระ อ.เดิมบางนางบวช จ.สุพรรณบุรี 72120

E-mail boonchuay.j@yahoo.com

5. ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	อักษรย่อปริญญา	วิชาเอก	สถานศึกษา	ปีที่สำเร็จ	ประเทศ
ปริญญาโท	ค.อ.ม.	วิศวกรรมไฟฟ้า	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	2545	ไทย
ปริญญาตรี	วศ.บ.	วิศวกรรมไฟฟ้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	2540	ไทย

6 สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ ระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงานทดแทน

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

7.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย: ชื่อแผนงานวิจัย

7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย: ชื่อโครงการวิจัย

- เครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการควบคุมแบบ Real-time (ปีงบประมาณ 2553) ร่วมวิจัย

ภาคผนวก ต

รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการ 2556A16062004

โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยแห่งชาติ

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ชื่อโครงการ โฟโตโวลตาอิกซึ่งนำในกริด

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน นายสาวรพล คุ้มทรัพย์ นายชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข และ นายบุญช่วย เจริญผล

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ ๑ มิถุนายน ปี ๒๕๕๕ ถึง ๑๙ ธันวาคม ปี ๒๕๕๕

ระยะเวลาดำเนินการ ๑ ปี ๖ เดือนตั้งแต่วันที่ ๑ ตุลาคม ปี ๒๕๕๔ ถึง ๑๙ ธันวาคม ปี ๒๕๕๕

รายจ่าย

หมวด (ตามสัญญา)	รายจ่ายสะสมจากรายงานครั้งก่อน	ค่าใช้จ่ายงวดปัจจุบัน	รวมรายจ่ายสะสมถึงปัจจุบัน	งบประมาณที่ตั้งไว้	คงเหลือเงิน
1. ค่าตอบแทน	45,760.00	37,000.00	82,760.00	82,760.00	0
2. ค่าจ้าง	-	-	-	7,000.00	7,000.00
3. ค่าวัสดุ	129,024.16	92,836.91	221,861.07	220,859.00	-11,102.07
4. ค่าใช้สอย	35,000.00	10,000.00	45,000.00	45,000.00	0
5. ค่าสาธารณูปโภค	14,361.00	-	14,361.00		0
				370,000.00	
รวม	234,145.16	140,306.91	374,102.07		-4,102.07

จำนวนเงินที่ได้รับและจำนวนเงินคงเหลือ

งวดที่ 1 222,000.00 บาท เมื่อ 14 มิถุนายน 2555

งวดที่ 2 148,000.00 บาท เมื่อ ยังไม่ได้รับ

รวม 370,000.00 บาท

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

ลงนามเจ้าหน้าที่การเงินโครงการ