รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนาแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบไฮบริดจ์สำหรับป้ายแสดงผลอิเล็กทรอนิกส์

Development of Hybrid Electric Source for Electronic Display Board

ผู้วิจัย

นายชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2554

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยได้พัฒนาแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบไฮบริดจ์สำหรับป้ายแสดงผลอิเล็กทรอนิกส์ โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณผลแผ่นดิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย ปีงบประมาณ 2554 ทั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณนักศึกษาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ได้ช่วยเหลือในการจัดทำเครื่องต้นแบบและเก็บผลการทดลอง

หัวข้อวิจัย	การพัฒนาแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบไฮบริดจ์สำหรับป้ายแสดงผลอิเล็กทรอนิกส์
ผู้วิจัย	นายชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีงบประมาณ	2554

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำอัลตราคาปาซิเตอร์มาทำงานร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 70 วัตต์ 17.6 โวลต์ 4.38 แอมป์ ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าและเป็นแหล่งจ่ายแรงดันฟ้ากระแสตรงให้กับโหลดโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์และอัลตราคาปาซิเตอร์ร่วมกันเพื่อเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฮบริดจ์ผ่านวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ ทำให้ระดับแรงดันเอาต์พุตสูงกว่าระดับแรงดันอินพุต โดยใช้มอสเฟตเป็นสวิทช์ทำงานที่ความถี่ 100 kHz ใช้ไอซีเบอร์ UC3824 ทำหน้าที่สร้างสัญญาณ PWM เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของมอสเฟต และมีการควบคุมแรงดันเอาต์พุตป้อนกลับ เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F819 ในการควบคุมการประจุอัลตราคาปาซิเตอร์และสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้าระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์กับอัลตราคาปาซิเตอร์สำหรับเป็นแหล่งจ่ายให้กับป้ายแสดงผลอิเล็กทรอนิกส์

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ข
บทคัดย่อ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์	4
2.2 อัลตราคาปาซิเตอร์	22
2.3 บูสคอนเวอร์เตอร์	28
2.4 ออกแบบบูสคอนเวอร์เตอร์	35
2.5 วงจรควบคุมการทำงานสำหรับคอนเวอร์เตอร์	50
2.6 ไอซีที่ใช้ในการควบคุม UC3824	52
2.7 วงจรควบคุมการประจุและสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้า	56
2.8 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย	57
บทที่ 3 การออกแบบงานวิจัย	
3.1 การศึกษาข้อมูล	61
3.2 การออกแบบวงจรกำลังของวงจรทบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	62
3.3 การออกแบบวงจรควบคุมของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์	69
3.4 การออกแบบวงจรป้องกัน	77
3.5 การออกแบบวงจรควบคุมการประจุและสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้า	81

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์

4.1 การทดสอบวงจรกำลังและวงจรควบคุมของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ 83

4.2 การทดสอบหาค่าประสิทธิภาพของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์เมื่อเปลี่ยนกระแสเอาต์พุตและแรงดันอินพุตแบบลูปปิด 88

4.3 การทดสอบการเก็บและคายพลังงานไฟฟ้าของอัลตราคาปาซิเตอร์ 95

4.4 ทดสอบหาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อใช้งานร่วมกับวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์จ่ายโหลด 100

4.5ทดสอบหาประสิทธิภาพของอัลตราคาปาซิเตอร์ต่อใช้งานร่วมกับวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์จ่ายโหลด 102

4.6 การทดสอบการทำงานของวงจรประจุและสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้า 105

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลของงานวิจัย 107

5.2 ปัญหาของงานวิจัยและแนวทางแก้ไข 108

5.3 ข้อเสนอแนะ 108

บรรณานุกรม 109

ภาคผนวก ก. โปรแกรมระบบควบคุม 110

ภาคผนวก ข. ภาพชิ้นงานในส่วนต่างๆ 114

ภาคผนวก ค. บทความวิจัย 117

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 เปรียบเทียบจุดเด่นจุดด้อยของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ	12
2-2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ	13
2-3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของแบตเตอรี่กับอัลตราคาปาซิเตอร์และคาปาซิเตอร์ทั่วไป	24
2-4 การเปรียบเทียบวงจรแม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรไฟฟ้า	36
2-5 โครงการด้านพลังงานแสงอาทิตย์ทั่วประเทศไทย	57
4-1 ค่าแรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนกระแสเอาต์พุตและแรงดันอินพุตแบบลูปเปิด	84
4-2 ค่ากระแสอินพุตเมื่อเปลี่ยนกระแสเอาต์พุตและแรงดันอินพุตแบบลูปเปิด	85
4-3 ค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ ที่แรงดันอินพุต 12 โวลต์	89
4-4 ค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ ที่แรงดันอินพุต 14 โวลต์	89
4-5 ค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ ที่แรงดันอินพุต 16 โวลต์	90
4-6 ค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ ที่แรงดันอินพุต 18 โวลต์	91
4-7 ค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ ที่แรงดันอินพุต 20 โวลต์	91
4-8 ค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ ที่แรงดันอินพุต 22 โวลต์	92
4-9 ค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ ที่แรงดันอินพุต 24 โวลต์	93
4-10 ค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ เมื่อต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์ 70 วัตต์	106
4-11 ค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ เมื่อต่อกับอัลตราคาปาซิเตอร์	108

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของโลก	5
2-2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์	6
2-3 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	8
2-4 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์	9
2-5 ผลของ (R_s) และ (R_{sh}) ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	10
2-6 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว	11
2-7 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกโพลี	12
2-8 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส	13
2-9 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์	14
2-10 กราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้า (I-V Curve)	15
2-11 กราฟกระแสและแรงดันที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด	16
2-12 เซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand alone system)	19
2-13 เซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system)	20
2-14 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid system)	21
2-15 การวางแผงเซลล์แสงอาทิตย์	21
2-16 โครงสร้างของอัลตราคาปาซิเตอร์	23
2-17 ส่วนประกอบของอัลตราคาปาซิเตอร์	24
2-18 การเก็บประจุของอัลตราคาปาซิเตอร์	24
2-19 วงจรสมมูลของอัลตราคาปาซิเตอร์	25
2-20 วงจรทดสอบวัดค่าความต้านทานสมมูลต่อแบบอนุกรม	27
2-21 การนำอัลตราคาปาซิเตอร์เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองให้กับหน่วยความจำ	27
2-22 การนำอัลตราคาปาซิเตอร์เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับรถไฟฟ้า 28	
2-23 วงจรสมมูลของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์	29
2-24 วงจรการทำงานของบูสคอนเวอร์เตอร์	29
2-25 สัญญาณต่างๆ ของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์	30
2-26 วงจรแม่เหล็กไฟฟ้าพื้นฐาน	36
2-27 วงจรแม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรเทียบเคียง	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2-28	ลักษณะของแกนเฟอร์ไรต์แบบต่างๆ	39
2-29	เส้นโค้งฮีสเตอรีซีสของแกนเฟอไรต์	40
2-30	ค่าการสูญเสียในแกนเฟอไรต์ของเนื้อสารชนิด 6H20 7H20 และ 7H10	41
2-31	ลักษณะบ๊อบบิ้นของแกนเฟอร์ไรต์	42
2-32	กราฟแรงดันตกคร่อม	44
2-33	กราฟแรงดันตกคร่อมขณะไดโอดนำกระแส	45
2-34	กราฟแรงดันตกคร่อมขณะไดโอดนำกระแสและค่ากระแสรั่วไหล	46
2-35	ลักษณะของกระแสและแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟต เมื่อเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแส	47
2-36	ตัวเก็บประจุแฝงที่ต่ออยู่ที่ขาต่างๆ ภายในตัวเพาเวอร์มอสเฟต	49
2-37	ลักษณะกระแสและแรงดันที่ขาเกตขณะเพาเวอร์มอสเฟตถูกไบอัสให้นำกระแส	49
2-38	วงจรพื้นฐานสำหรับการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ในโหมดควบคุมแรงดัน	50
2-39	ลักษณะความกว้างของเอาต์พุตพัลส์ของ PWM	51
2-40	โครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซีเบอร์ UC3824	52
2-41	การเลือกใช้งานเอาต์พุตของไอซีเบอร์ UC3824	53
2-42	การต่อใช้งานวงจรควบคุมไอซีแบบ Open loop	54
2-43	การต่อใช้งานวงจรควบคุมไอซีแบบ Close loop	54
2-44	กราฟความสัมพันธ์ของค่า R_T และ C_T ในการกำหนดความถี่	55
2-45	การจัดขาของไอซีเบอร์ PIC16F819	56
2-46	แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย	57
2-47	แผนภูมิการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย	59
3-1	แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน	60
3-2	แผนผังโครงสร้างแหล่งจ่ายไฟแบบบูสคอนเวอร์เตอร์จากอัลตราคาปาซิเตอร์โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์	61
3-3	วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ของไอซี UC3824	70
3-4	วงจรในโหมดควบคุมแรงดันและวงจรชดเชยระบบ	71
3-5	จำลองวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม Orcad Pspice	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-6 ผลของการจำลองวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ ด้วยโปรแกรม Orcad Pspice	73
3-7 วงจรจำลองผลการตอบสนองวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ ด้วยโปรแกรม Orcad Pspice	76
3-8 ผลการตอบสนองวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ ด้วยโปรแกรม Orcad Pspice	76
3-9 วงจรจำกัดกระแสด้านเอาต์พุต	77
3-10 การทำงานของวงจรตัดการทำงานเมื่อลัดวงจรด้านเอาต์พุต	79
3-11 วงจรป้องกันการลัดวงจรด้านเอาต์พุต	80
3-12 วงจรการตรวจวัดแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์และอัลตราคาปาซิเตอร์	82
4-1 วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแบบลูปเปิด	83
4-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุตกับแรงดันเอาต์พุตเมื่อทดสอบแบบลูปเปิด เมื่อเปลี่ยนแรงดันอินพุต	85
4-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตกับกระแสเอาต์พุต	86
4-4 สัญญาณคำสั่งสวิตช์และสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบลูปเปิด	87
4-5 วงจรการวัดหาค่าประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟที่ค่ากระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ	88
4-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกระแสเอาต์พุตที่แรงดันอินพุต 12 – 24 โวลต์	94
4-7 สัญญาณคำสั่งสวิตช์และสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบลูปปิด	94
4-8 วงจรทดสอบการเก็บพลังงานไฟฟ้าของอัลตราคาปาซิเตอร์	95
4-9 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าอัลตราคาปาซิเตอร์ในการเก็บพลังงานไฟฟ้า ที่แรงดัน 14 โวลต์ กระแส 1 แอมป์	96
4-10 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าอัลตราคาปาซิเตอร์ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าที่แรงดัน 14 โวลต์ กระแส 2 แอมป์	96
4-11 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าอัลตราคาปาซิเตอร์ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าที่แรงดัน 14 โวลต์ กระแส 3 แอมป์	97
4-12 วงจรทดสอบการคายประจุของอัลตราคาปาซิเตอร์	98
4-13 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าอัลตราคาปาซิเตอร์ในการคายพลังงานไฟฟ้าที่แรงดัน 14 โวลต์ กระแส 1 แอมป์	98

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-14 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าอัลตราคาปาซิเตอร์ในการคายพลังงานไฟฟ้าที่แรงดัน 14 โวลต์ กระแส 2 แอมป์	99
4-15 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าอัลตราคาปาซิเตอร์ในการคายพลังงานไฟฟ้าที่แรงดัน 14 โวลต์ กระแส 3 แอมป์	99
4-16 วงจรต่อใช้งานอัลตราคาปาซิเตอร์ผ่านวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์จ่าย Step load	100
4-17 กราฟประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตต่างๆ เมื่อต่อใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 70 วัตต์	102
4-18 วงจรต่อใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ต่อใช้งานร่วมกับวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์	102
4-19 กราฟประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตต่างๆ เมื่อต่อใช้งานกับอัลตราคาปาซิเตอร์ 104	
4-20 กราฟบันทึกผลการทำงานของวงจรประจุและสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้า	105

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันการอนุรักษ์พลังงานและการหาแหล่งพลังงานทดแทน รวมถึงปัญหามลภาวะที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นพลังงานหลักที่นำมาผลิตกระแสไฟฟ้านั้นกำลังจะหมดไปจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่มาทดแทนเป็นเรื่องที่ให้ความสนใจกันมาก ระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่ที่น่าสนใจ เนื่องจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีข้อดีคือ สามารถเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงไม่ก่อให้เกิดมลภาวะขณะใช้งาน แต่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีข้อเสียคือ ใช้ต้นทุนการผลิตและการติดตั้งสูงและประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ค่อนข้างต่ำแรงดันไม่คงที่ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มของแสง ทั้งยังไม่สามารถจ่ายพลังงานชั่วขณะสูงๆ ได้ จากข้อจำกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวจึงได้มีแนวคิดที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยนำอัลตราคาปาซิเตอร์มาทำงานร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ในการจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าแล้วจ่ายเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับโหลดได้ ในกรณีที่โหลดต้องการกระแสสูง ซึ่ง อัลตราคาปาซิเตอร์ มีคุณสมบัติในการเก็บประจุและคายประจุได้อย่างรวดเร็ว ทั้งยังง่ายต่อการจัดเก็บพลังงาน มีน้ำหนักเบา อายุการใช้งานยาวนาน การเสื่อมเนื่องจากอุณหภูมิมีน้อย แนวโน้มในการนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองในระบบไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนมากขึ้นด้วย

1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.1.1 สร้างและพัฒนาดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ (Dc to dc converter) เพื่อเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับจัดการพลังงานไฟฟ้าระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์และ อัลตราคาปาซิเตอร์

1.1.2 สร้างและแสดงผลระบบควบคุมสำหรับแหล่งจ่ายพลังงานแบบไฮบริดจ์เพื่อให้เกิดประประสิทธิภาพสูงสุด

1.1.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพ อายุใช้งาน ของอุปกรณ์จัดเก็บพลังงาน2 ประเภทคือแบตเตอรี่แบบตะกั่วและอัลตราคาปาซิเตอร์

1.1.4 ทดสอบการใช้งานกับโหลดประเภทป้ายแสดงผลอิเล็กทรอนิกส์

1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

1.2.1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ อัลตราคาปาซิเตอร์ และจำลองระบบแหล่งจ่ายพลังงานด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

1.2.2 สร้างวงจรบูสดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์เพื่อจัดการพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์และ อัลตราคาปาซิเตอร์ สำหรับป้ายแสดงผลแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เลือกใช้งานได้

1.2.3 มีระบบควบคุมพลังงานไฟฟ้าและแสดงผลค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ และสามารถปรับค่าพารามิเตอร์แบบ real-time ได้

1.2.4 วิเคราะห์และเปรียบผลการสอบระหว่างอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานประเภท อัลตราคาปาซิเตอร์ และแบตเตอรี่แบบตะกั่ว

1.2.5 ติดตั้งการใช้งานไว้ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์เพื่อแสดงเป็นสิ่งประดิษฐ์และวิจัยเกี่ยวกับพลังงานทดแทน

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.3.1 ค้นคว้าข้อมูลและพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์และ อัลตราคาปาซิเตอร์

1.3.2 สร้างแบบจำลองของระบบพลังงานแบบไฮบริดจ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.2.3 ออกแบบและสร้างวงจรควบคุมดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์

1.24 ทดสอบระบบควบคุมพลังงานแบบไฮบริดจ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.2.5 เก็บข้อมูลและคุณลักษณะทางไฟฟ้าของระบบควบคุมพลังงานแบบไฮบริดจ์

1.2.6 วิเคราะห์ผลการทดลองและเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.2.7 นำเสนอผลงานในงานประชุม วิชาการ

1.2.8 จัดทำรูปเล่มรายงานการวิจัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ชุดแหล่งจ่ายพลังงานร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และ อัลตราคาปาซิเตอร์ เพื่อใช้งานเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับป้ายแสดงผลอิเล็กทรอนิกส์

1.4.2 ได้แบบจำลองระบบควบคุมของแหล่งจ่ายแบบไฮบริดจ์ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้งานกับระบบพลังงานทดแทนอื่นๆได้

1.4.3 แหล่งจ่ายแบบไฮบริดจ์ดังกล่าวสามารถแสดงสิ่งประดิษฐ์ด้านการใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าได้

1.4.4 ได้ประยุกต์ใช้ความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและระบบควบคุมร่วมกับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน

บทที่ 2

ทฤษฎี

การสร้างแหล่งจ่ายไฟแบบไฮบริดจ์สำหรับป้ายแสดงผลอิเล็กทรอนิกส์ (Hybrid Power Supply for Electronic Board) จำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell)
2. อัลตราคาปาซิเตอร์
3. วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ (DC-DC Boost Converter)
4. วงจรกำลังของคอนเวอร์เตอร์แบบทบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
5. วงจรควบคุมการทำงานสำหรับดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์
6. ไอซีที่ใช้ในการควบคุม UC3824
7. วงจรควบคุมการประจุและสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้า
8. ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย

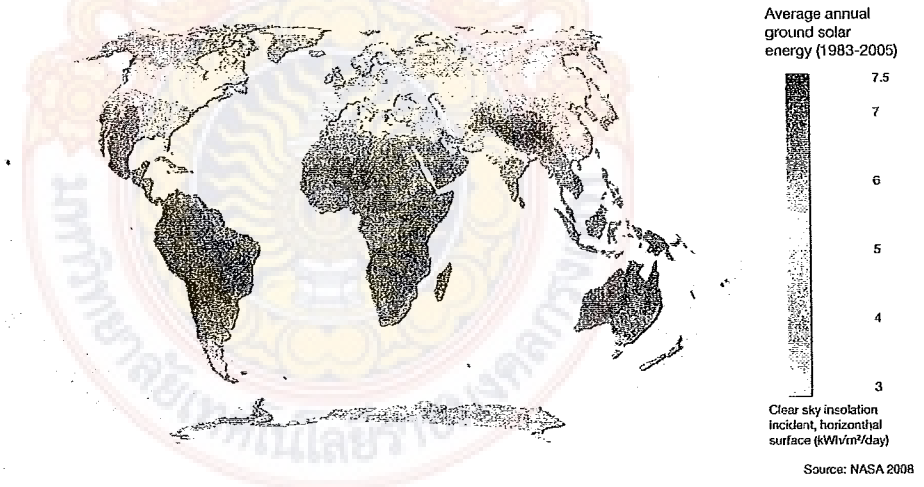
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell)

"แสงอาทิตย์" เป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีขนาดใหญ่ที่สุด เป็นแหล่งพลังงานสะอาดและมีอยู่ทั่วไปแต่การนำมาใช้ประโยชน์อาจยังมีข้อจำกัดอยู่บ้าง เนื่องจากแสงอาทิตย์มีเฉพาะในตอนกลางวันตลอดจนมีความเข้มของแสงที่ไม่แน่นอน เพราะขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและฤดูการที่เปลี่ยนไปแสงอาทิตย์เกิดจากปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ในดวงอาทิตย์ พลังงานที่ดวงอาทิตย์สร้างขึ้นมีประมาณ 3.8×10^{23} กิโลวัตต์ แต่เนื่องจากระยะทางที่ห่างจากโลกเราถึง 93 ล้านไมล์ทำให้พลังงานที่ส่งมายังโลกลดน้อยลงพลังงานแสงอาทิตย์เดินทางมาถึงโลกประมาณ 1.8×10^{14} กิโลวัตต์ถูกดูดซับโดยบรรยากาศและพื้นโลกประมาณ 1.25×10^{14} กิโลวัตต์ ในขณะที่พลังงานที่มนุษย์ใช้รวมกันทั้งโลกประมาณ 1×10^{14} กิโลวัตต์จะเห็นได้ว่าพลังงานที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์มากกว่าพลังงานที่มนุษย์ใช้ร่วมกันทั้งโลกประมาณ 10,000 เท่าปริมาณแสงอาทิตย์ที่ได้รับบนพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งจะมีปริมาณสูงสุด เมื่อพื้นที่นั้นทำมุมตั้งฉากกับแสงอาทิตย์ดังนั้นหากต้องการให้พื้นที่ได้รับแสงมากที่สุดต่อวัน ก็จะต้องปรับพื้นที่รับแสงนั้นๆ ตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ซึ่งจะเคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปสู่ทิศตะวันตกเสมอ นอกจากนั้นจากการที่โลกเอียงทำให้ซีกโลกเหนือหันหน้าเข้าหาดวงอาทิตย์ในฤดูร้อนและเอียงซีกโลกใต้ให้หันหน้าเข้าหาดวงอาทิตย์ในฤดูหนาว ดังนั้นเราจึงปรับมุมพื้นที่รับแสงนั้นๆ ในแนวเหนือใต้ (มุมก้มและมุมเงย) ให้สอดคล้องตามฤดูการด้วยเพื่อให้พื้นที่นั้นๆ รับแสงอาทิตย์มากที่สุดตลอดทั้งปี

สำหรับประเทศไทยพื้นที่เกือบทั้งหมดสามารถรับพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยประมาณ 4.5 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตรต่อวันดังนั้น ในพื้นที่ 1 ตารางกิโลเมตร สามารถติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพื้นที่ประมาณ 1,500 ตารางกิโลเมตรหรือคิดเป็นพื้นที่ประมาณ 0.3 % ของประเทศเท่านั้น

ในอดีตการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาแพงมาก แต่เนื่องจากปัจจุบันราคาของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ลดลงอย่างมากและมีแนวโน้มว่าจะลดลงอีกเรื่อยๆเพราะประชาชนโดยทั่วไปได้ตระหนักถึงภาวะแวดล้อมเป็นพิษ เนื่องจากใช้เชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานจึงหันมาใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีจุดเด่นที่สำคัญแตกต่างจากวิธีอื่นหลายประการดังนี้

1. ไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหวในขณะใช้งานจริงจึงไม่ทำให้เกิดมลภาวะทางเสียง
2. ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษจากกระบวนการผลิตไฟฟ้า
3. มีการบำรุงรักษาน้อยมากและใช้งานแบบอัตโนมัติได้ง่าย
4. ประสิทธิภาพคงที่ไม่ขึ้นกับขนาดจากเซลล์แสงอาทิตย์
5. ผลิตไฟฟ้าได้ทุกมุมของโลกแม้บนเกาะเล็กๆ กลางทะเล บนยอดเขาสูงและในอวกาศ
6. ได้พลังงานไฟฟ้าโดยตรงซึ่งเป็นพลังงานที่นำมาใช้ได้สะดวกที่สุด

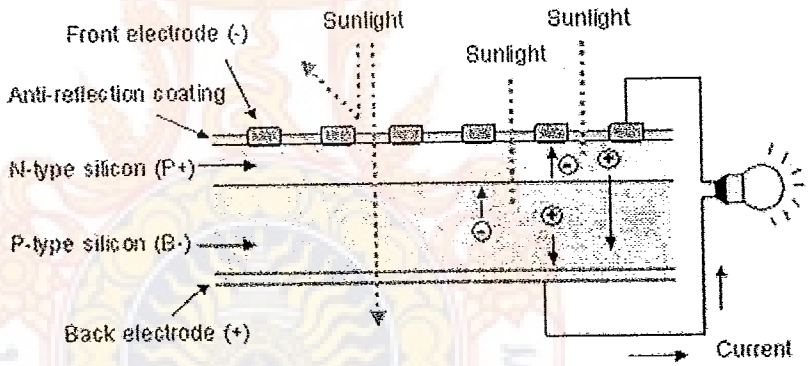


ภาพที่ 2-1 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของโลก

ที่มา: Map World's Solar Energy Resource ออน-ไลน์

2.1.1 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ทำจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน มีทั้งที่เป็นผลึกเดี่ยว ผลึกย่อยและไม่เป็นผลึก หรือเป็นสารอะมอร์ฟัส ซิลิกอนเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีราคาถูกที่สุด เพราะเป็นธาตุที่มีมากที่สุดในโลกชนิดหนึ่ง สามารถถลุงได้จากถ่านหินและทราย และมีการใช้งานในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อย่างกว้างขวาง มีประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 12 – 15% เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำมาจากซิลิกอนผลึกเดี่ยวหนึ่งแผ่นจะมีรูปร่างเป็นแผ่นวงกลม หรือแผ่นสี่เหลี่ยมจตุรัสมีความหนา 200 – 400 ไมครอน (ประมาณ 0.2 – 0.4 มิลลิเมตร) และต้องนำมาผ่านกระบวนการแพร่ซึมสารเจือปนในเตาอุณหภูมิสูง (ประมาณ 1000 องศาเซลเซียส) เพื่อสร้างรอยต่อพี - เอ็น ขั้วไฟฟ้าด้านหลังเป็นผิวสัมผัสโลหะเต็มหน้าและส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหน้าที่รับแสงจะมีลักษณะเป็นลายเส้นคล้ายก้างปลา ผิวทางด้านรับแสงนี้จะเคลือบด้วยทรายแก้ว (SiO_2) เพื่อลดการสะท้อนของแสง

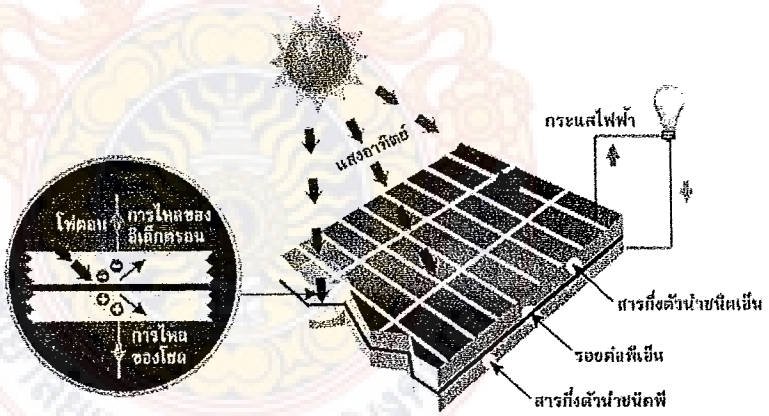


ภาพที่ 2-2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

2.1.2 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

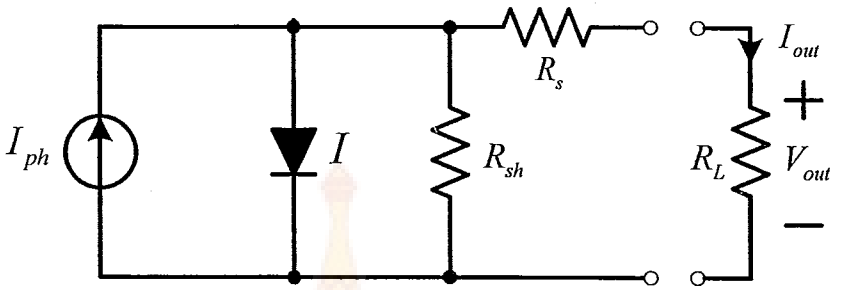
โครงสร้างที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะเหมือนกับไดโอดโดยทั่วๆไปซึ่งประกอบด้วยรอยต่อระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน 2 ชนิด ได้แก่สารกึ่งตัวนำชนิด P (ขั้วบวก) และสารกึ่งตัวนำชนิด N (ขั้วลบ) สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้งานในลักษณะดังกล่าวส่วนมากเป็นซิลิคอน ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจจะกล่าวเฉพาะสารกึ่งตัวนำที่ทำมาจากซิลิกอนเท่านั้น ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถผลิตขึ้นจากวัสดุชนิดอื่นๆก็ได้ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นจากซิลิคอนประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด N ที่ผลิตขึ้นจากผลึกของซิลิกอนที่ได้ผ่านการเติมสารเจือปนจำนวนเล็กน้อย (โดยปกติใช้ฟอสฟอรัส) เป็นแนวทางที่ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระส่วนเกินซิลิกอนที่ผ่านการเติมสารเจือด้วยกระบวนการดังกล่าว เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิด N (ขั้วลบ) และสารกึ่งตัวนำชนิด P ผลิตขึ้นจากผลึกของซิลิกอน แต่ใช้สารเจือปนต่างชนิดกันกับชนิดแรก (โดยปกติใช้โบรอน) เป็นแนวทางที่ทำให้วัสดุขาดอิเล็กตรอนอิสระการที่ไม่มีอิเล็กตรอนอิสระดังกล่าว จึงเรียกว่า โฮล (Hole) ซึ่งเป็นการขาดอิเล็กตรอนที่เป็นประจุลบจึงสามารถพิจารณาเทียบเคียง เป็นอนุภาคของประจุบวกซิลิกอนที่ผ่านการเติมสารเจือด้วยกระบวนการดังกล่าว เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิด P (ขั้วบวก) รอยต่อพี - เอ็น เกิดจากการเชื่อมต่อกันของสารกึ่งตัวนำที่มีคุณลักษณะต่างกัน ซึ่งจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า (Electric field) ในบริเวณรอยต่อสนามไฟฟ้าดังกล่าวมีลักษณะเหมือนกันกับสนามไฟฟ้าสถิต สามารถทำให้เกิดขึ้นได้โดย การถูหวีพลาสติกกับเสื้อขนสัตว์ ซึ่งจะทำให้เกิดอนุภาคของประจุลบเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งและอนุภาคของประจุบวกที่เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ตรงข้ามแสง ประกอบด้วยการไหลต่อเนื่องของอนุภาคเล็กๆ ของพลังงานที่เรียกว่า โฟตอน (Photons) เมื่อโฟตอนจากลำแสงที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสมตกลงบนรอยต่อพี-เอ็น จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานจากโฟตอนไปยังอิเล็กตรอนบางตัวในวัสดุซึ่งเป็นการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานไปยังระดับที่สูงกว่า โดยปกติอิเล็กตรอนดังกล่าวจะทำให้เกิดโฮลขึ้น ในเวลาเดียวกันอิเล็กตรอนที่เปลี่ยนเป็นอิเล็กตรอนอิสระ จะทำให้เกิดโฮลขึ้นในวัสดุที่สามารถเคลื่อนที่ได้ พลังงานที่ต้องการในการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังแถบพลังงาน เรียกว่า แถบช่องว่าง อิเล็กตรอนที่ได้รับการกระตุ้นจะเคลื่อนที่ไปอยู่ในชั้นของซิลิกอนชนิด N และโฮลที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ไปของอิเล็กตรอน จะเคลื่อนที่ไปอยู่ในชั้นของซิลิกอนชนิด P อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังที่รวมกระแสที่ผิวด้านหน้าของเซลล์การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังบริเวณผลึกชนิด N สามารถทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้เมื่อต่อไปยังวงจรภายนอกให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตลอดวงจร การเคลื่อนที่ไปยังวงจรอิเล็กตรอนในกรณีของสารกึ่งตัวนำ โดยการผ่านวัสดุตัวนำที่ยึดติดอยู่กับผิวด้านหน้าของเซลล์ ในเวลาเดียวกันโฮลจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้ามผ่านตลอดเนื้อเซลล์จนไปถึงวัสดุตัวนำ อีกส่วนหนึ่งที่ยึดติดอยู่

ด้านล่างของเซลล์ ซึ่งจะทำให้ครบวงจรโดยร่วมกับอิเล็กตรอนที่อยู่อีกด้านหนึ่งของวงจรภายนอก ถ้าโฟตอนมีพลังงานมากกว่าความกว้างของแถบช่องว่างปะทะกับอะตอมของซิลิกอนจะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของคู่อิเล็กตรอนและโฮล พลังงานที่เหลือจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน แต่ถ้าโฟตอนมีระดับพลังงานน้อยกว่าความกว้างของแถบช่องว่างจะเคลื่อนที่ผ่านเซลล์ไป ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดพลังงานตลอดระยะทางที่เคลื่อนที่ผ่าน อย่างไรก็ตามมีโฟตอนบางส่วนสะท้อนที่ผิวด้านหน้าของเซลล์ที่ราบเรียบ เมื่อผิวหน้าเคลือบด้วยสารป้องกันการสะท้อน แม้กระนั้นก็มีโฟตอนบางส่วนสูญเสียไปไม่สามารถปะทะกับผลึกได้ ต่อเนื่องจากถูกปิดบังด้วยอุปกรณ์รวมกระแสที่ด้านหน้าของเซลล์ การเกิดขึ้นของกำลังไฟฟ้าในกรณีการผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้เกิดขึ้น ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจะเกิดขึ้นจากการไหลของอิเล็กตรอนในส่วนของแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นเป็นผลมาจากการเกิดสนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อพี - เอ็น สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นจากซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว ขนาดปกติจะออกแบบให้ผลิตแรงดันไฟฟ้าประมาณ 0.5 โวลต์ ที่กระแสไฟฟ้าประมาณ 2.5 แอมป์ ดังนั้นจะเกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ประมาณ 1.25 วัตต์ (ขึ้นอยู่กับรายละเอียดในการออกแบบ ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์แบบอื่นๆ อาจผลิตแรงเคลื่อนหรือกระแสไฟฟ้าได้สูงหรือต่ำกว่านี้ก็ได้)



ภาพที่ 2-3 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

2.1.3 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 2-4 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

จากภาพที่ 2-4 ถ้าเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ถูกส่องด้วยแสงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ามืด (I) ของเซลล์แสงอาทิตย์ได้จาก

$$I = I_o\left[\exp\left(\frac{qV_g}{A_o kT}\right)-1\right] \tag{2.1}$$

เมื่อ V_g คือ แรงดันที่เกิดขึ้นระหว่างหัวต่อ

A_o คือ กระแสไฟฟ้าย้อนกลับอิ่มตัว

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (I_{out}) ที่ไหลออกสู่ภายนอกจะได้ ดังนี้

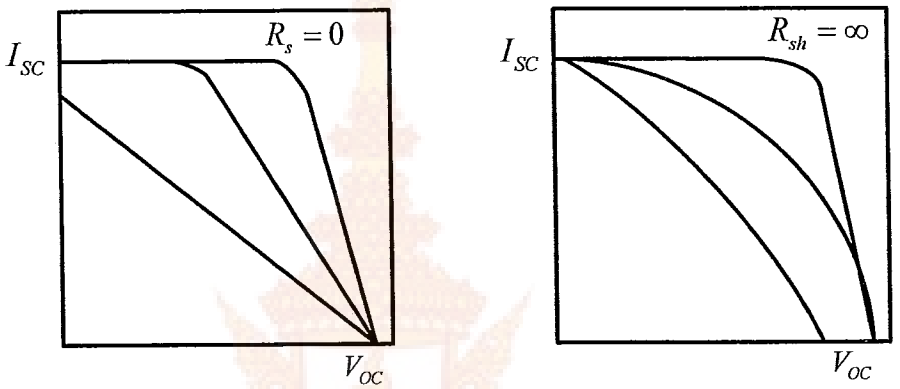
$$I = I_{ph} - I_o\left[\exp\left(\frac{qV_g}{A_o kT}\right)-1\right] \tag{2.2}$$

ถ้าพิจารณาความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งได้แก่ ความต้านทานอนุกรม (R_s) และความต้านทานขนาน (R_{sh}) ด้วยจะทำให้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (I_{out}) มีค่า

$$I_{out} = I_{ph} - I_o\left[\exp\left(\frac{q(V_{out}-IR_s)}{A_o}\right)-1\right]-\left(\frac{V_{out}-IR_s}{R_{sh}}\right) \tag{2.3}$$

2.1.4 ผลของ (R_s) และ (R_{sh}) ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ผลของตัวต้านทานที่ต่ออนุกรม (R_s) และตัวต้านทานที่ต่อขนาน (R_{sh}) ที่มีผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเห็นได้จากภาพที่ 2-5 โดยผลของตัวต้านทานที่ต่ออนุกรม (R_s) คือค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) และฟิลล์แฟกเตอร์ (FF) จะมีค่ามากเมื่อตัวต้านทานที่ต่ออนุกรม (R_s) มีค่าน้อยและส่วนของตัวต้านทานที่ต่อขนาน (R_{sh}) จะทำให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) และฟิลล์แฟกเตอร์ (FF) มีค่ามากเมื่อตัวต้านทานที่ต่อขนาน (R_{sh}) มีค่ามาก



ภาพที่ 2-5 ผลของ R_s และ R_{sh} ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

2.1.5 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η)

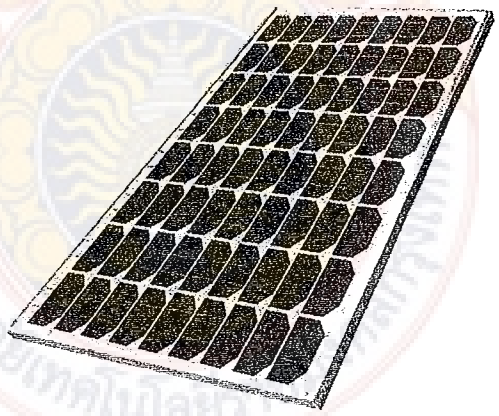
ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) เป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการกำหนดคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าสูงต่อเมื่อกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) และฟิลล์แฟกเตอร์ (FF) มีค่าสูงและจะมีประสิทธิภาพลดต่ำลง เมื่อค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรม (R_s) มีค่าสูง และความต้านทานที่ต่อขนาน (R_{sh}) มีค่าต่ำประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) ในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าสามารถหาได้จาก

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{V_{\max} \times I_{\max}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_{in}} \times 100\% \qquad (2.4)$$

2.1.6 ประเภทของเซลแสงอาทิตย์

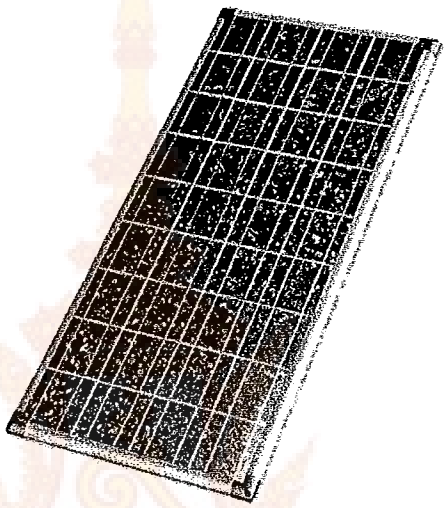
2.1.6.1 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอน แบ่งตามลักษณะของรูปผลึกได้เป็น 3 รูปแบบ คือ

1) แบบผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) คือ ซิลิกอนซึ่งผ่านการทำให้เป็นก้อนที่มีความบริสุทธิ์สูงมากถึง 99.99% ไปหลอมละลายที่อุณหภูมิที่สูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส เพื่อทำการสร้างแท่งผลึกเดี่ยวแบบขนาดใหญ่เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 - 8 นิ้ว จากต้นผลึกด้วยเทคโนโลยีการดึงผลึกคุณภาพของผลึกเดี่ยวจะสำคัญมากต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ต่อไปก็นำแท่งผลึกเดี่ยวนี้ไปตัดเป็นแผ่นๆ เรียกว่า เวเฟอร์ หนาประมาณ 300 ไมโครเมตรและขัดความเรียบของผิว จากนั้นก็จะนำไปเจือสารที่จำเป็นในการทำให้เกิดรอยต่อพี – เอ็น ขึ้นบนแผ่นเวเฟอร์ด้วยวิธีการ Diffusion ที่อุณหภูมิระดับ 1,000 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นก็จะเป็นขั้นตอนการทำขั้วไฟฟ้าเพื่อที่จะนำกระแสไฟฟ้าออกไปใช้ และขั้นตอนสุดท้ายก็จะเคลือบฟิล์มผิวหน้าเพื่อป้องกันการสะท้อนแสงให้น้อยที่สุด แม้ว่าขั้นตอนการผลิตจะค่อนข้างซับซ้อนและอุณหภูมิที่ใช้จะค่อนข้างสูงทำให้ต้องใช้พลังงานมาก เป็นผลให้ต้นทุนการผลิตสูงตามไปด้วย ปัจจุบันการวิจัยและพัฒนาเพื่อลดความซับซ้อนและต้นทุนการผลิตก็ยังมีอย่างต่อเนื่อง



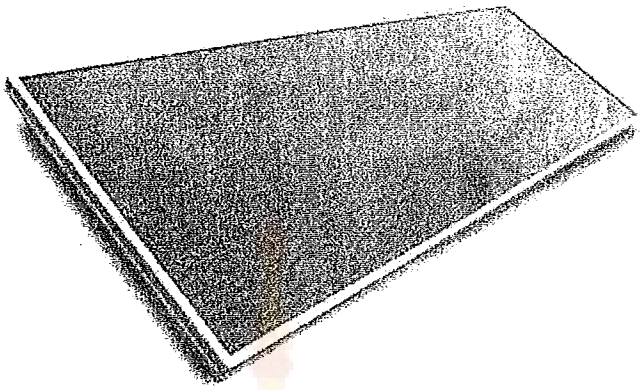
ภาพที่ 2-6 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว

2) เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกโพลี ได้ถูกพัฒนาเพื่อแก้ไขปัญหาต้นทุนของแบบผลึกเดี่ยว ซิลิกอนแบบผลึกโพลี ก็คือก้อนซิลิกอนที่เกิดจากการรวมตัวกันของชิ้นเล็กๆ ขนาดระดับไมโครเมตรหรือมิลลิเมตร ของผลึกเดี่ยวซิลิกอนการผลิตแบบ Cast โดยจะเทซิลิกอนที่หลอมละลายเข้าใน Crucible แล้วปล่อยให้เย็นลงอย่างช้าๆ ซึ่งจะได้ซิลิกอน ingot ที่มีรูปร่างตาม Crucible ที่ใช้หลังจากนั้นการนำไปทำเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะคล้ายกับวิธีการทำผลึกเดี่ยว คือนำไปตัดเวเฟอร์หนาขนาด 300 – 400 ไมโครเมตร แล้วก็ทำให้เกิดรอยต่อพี – เอ็นต่อไป



ภาพที่ 2-7 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกโพลี

3) เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส มีวิธีการผลิตที่แตกต่างจากแบบผลึกเดี่ยวโดยสิ้นเชิง โดยจะเป็นลักษณะของแผ่นฟิล์มบางไม่ใช่เวเฟอร์เราจะสร้างแผ่นฟิล์มบางของซิลิกอนบนแผ่นฐานรองโดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า CVD (Chemical Vapor Deposition) ซึ่งจะมีระบบนำก๊าซที่มีซิลิกอนติดอยู่ เช่น ไซเรนก๊าซ ผ่านเข้าไปในท่อสูญญากาศและตรงบริเวณที่วางแผ่นฐานรองก็จะมีการกระตุ้นโดยพลาสมาเพื่อส่งพลังงานให้ซิลิกอนแยกตัวออกจากก๊าซเข้าไปจับตัวกันบนแผ่นฐานรองโดยส่วนใหญ่จะเป็นแก้ว สแตนเลส หรือพลาสติก ซึ่งทำได้จากการเคลือบชั้นตัวนำโปร่งแสงไว้ก่อน โดยมีอุณหภูมิบนแผ่นฐานรองประมาณ 200 – 3000 องศาเซลเซียส ซิลิกอนจะสะสมทับถมบนแผ่นเกิดเป็นอะมอร์ฟัสซิลิกอนในขั้นตอนนี้เราใส่ก๊าซคาร์บอนเข้าไปด้วยจะได้แผ่นฟิล์มที่เป็นอะมอร์ฟัสชนิด P และถ้าหากใส่ก๊าซที่มีฟอสเฟตเราก็จะได้แผ่นฟิล์มอะมอร์ฟัสชนิด N ซึ่งเสร็จในส่วนนี้แล้วเราก็จะสร้างส่วนของขั้วไฟฟ้าให้เสร็จเป็นเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 2-8 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส

2.1.6.2 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารประกอบ เช่น สารประกอบแกลเลี่ยมอาเซไนด์ แคดเมี่ยมเทลเลอไรด์ คอปเปอร์อินเดียมไดอาเซไนด์ เป็นต้น ซึ่งมีทั้งแบบผลึกเดี่ยว และผลึกรวมส่วนใหญ่มีประสิทธิภาพสูง ข้อเสียของเซลล์แสงอาทิตย์พวกนี้ คือ มีราคาแพง บางชนิดทำจากสารที่เป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อมและยังมีปัญหาเรื่องอายุการใช้งานอีกด้วย จึงไม่เป็นที่นิยมในการใช้งาน

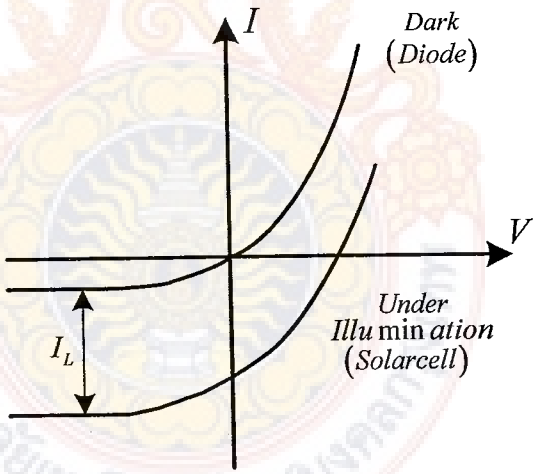
ตารางที่ 2-1 จุดเด่นจุดด้อยของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ

ชนิด	ประสิทธิภาพ	พลังงานในการผลิต	ราคา	วัตถุดิบ	คุณภาพ	สิ่งแวดล้อม
ซิลิกอนผลึกเดี่ยว	15-24%	ต่ำ	แพง	ดี	ดีมาก	ดีมาก
โพลีซิลิกอน	10-17%	ดี	ถูก	ดี	ดี	ดีมาก
อะมอร์ฟัสซิลิกอน	8-13%	ดีมาก	ถูกมาก	ดีมาก	ดี	ดีมาก
GaAs	18-30%	ต่ำ	แพงมาก	ไม่ดี	ดีมาก	ไม่ดี
CdS/CdTe	10-15%	ดี	ถูก	ไม่ดี	ดี	ไม่ดี

ตารางที่ 2-2 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ

ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์	สารกึ่งตัวนำที่เป็นวัตถุดิบ	ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	ประสิทธิภาพของโมดูล
ซิลิกอนแบบผลึก	ผลึกเดี่ยว	15-24%	10-14%
ซิลิกอนแบบผลึก	ผลึกคู่	10-17%	9-12%
ซิลิกอนแบบอะมอร์ฟัส	Amorphous – Silicon Amorphous – SiC. Amorphous – SiGe	8-13%	6-9%

2.1.7 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีรอยต่อของซิลิกอนชนิดรอยต่อพี – เอ็น ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับไดโอดทั่วไป ดังนั้นคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีลักษณะเหมือนคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดทุกประการ ดังแสดงในภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

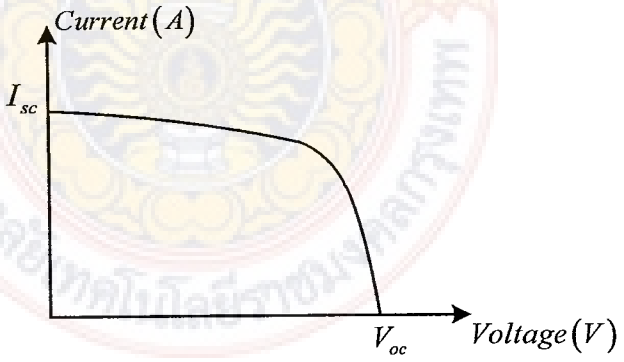
จากภาพที่ 2-9 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่อยู่ในสภาพไม่มีแสงตกกระทบ ซึ่งมีชนิด N จะมีแสงบางส่วนถูกดูดกลืนโดยเนื้อสาร แต่จะมีแสงส่วนใหญ่ผ่านไปยังรอยต่อระหว่างซิลิกอน N กับซิลิกอน P ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นภายในสารกึ่งตัวนำ เมื่อต่อสายไฟฟ้าเข้ากับขั้วอิเล็กโตรดไปยังวงจรภายนอกจะทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้นในวงจร ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรจะขึ้นอยู่กับขนาดของความเข้มของแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์และพื้นที่ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีแสงมาตกกระทบส่วนขนาดของแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้โดยใช้ I-V Curve ซึ่งเป็นประโยชน์มากสำหรับใช้ตรวจสอบการผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

I คือ กระแสไฟฟ้าซึ่งแทนด้วยกราฟแกน Y

V คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าซึ่งแทนด้วยกราฟแกน X

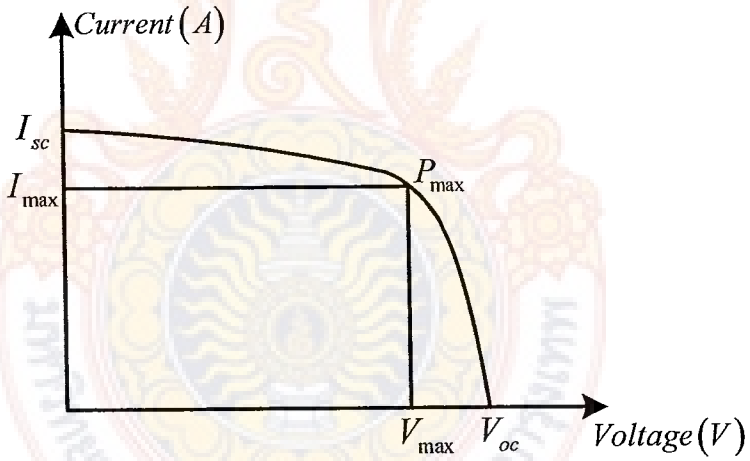
I-V Curve มาตรฐานที่ใช้สำหรับการหากำลังผลิตสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานนั้นได้มาจากการทดสอบในสภาวะมาตรฐานที่กำหนด โดยใช้แสงสว่างมาตรฐาน Solar simulator ที่สภาวะมาตรฐาน คือ ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ 1,000 วัตต์ / ตารางเมตร ดัชนีมวลอากาศ 1.5 และอุณหภูมิของเซลล์ที่ 25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2-10 กราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้า (I-V Curve)

ในการสร้างกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้า อันดับแรกที่ต้องการวัด คือ แรงดันไฟฟ้าไม่มีการต่อโหลดที่มีค่าต่างๆ กันค่าของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะถูกเก็บบันทึกไว้เมื่อต่อจุดทุกจุดเข้าด้วยกันจะเกิดเป็น I-V Curve ภายใต้สภาวะเฉพาะของ Irradiance และอุณหภูมิต่างๆ กัน สิ่งที่น่าสนใจที่สุด ก็คือกำลังงานสูงสุด (Maximum power) ที่ได้ในแต่ละสภาวะภายใต้สภาวะนั้นๆ ในทางไฟฟ้ากำลังงานที่ได้มีหน่วยเป็นวัตต์ ซึ่งเกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ค่ากำลังงานสูงสุดนี้จะถูกระบุไว้ในข้อกำหนด (Specification) ของเซลล์แสงอาทิตย์จากบริษัทผู้ผลิต

2.1.8 ข้อกำหนดของกำลังผลิตสูงสุด (The peak power specification) กำลังผลิตสูงสุดที่ใช้วัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งมีหน่วยเป็นวัตต์ กำลังผลิตสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่บริษัทผู้ผลิตแสดงไว้ในแผงนั้น ได้จาก I-V Curve ที่ทดสอบในสภาวะมาตรฐาน โดยกำหนดความเข้มของแสงตกกระทบที่ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร ณ ที่อุณหภูมิของเซลล์ 25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2-11 กราฟกระแสและแรงดันที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด

กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะสัมพันธ์กับความเข้มของแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นสำคัญ ในการใช้งานเพื่อให้เกิดกำลังงานสูงสุด จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ต่อพ่วงกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เรียกว่า Maximum Power Point Tracking (MPPT) คือเป็นตัวที่กำหนดจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดให้กำลังสูงสุดจากกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจุด MPPT นี้สามารถใช้งานได้โดยตรงกับปั๊มน้ำ ประจุแบตเตอรี่ และเครื่องแปลงกระแส (Inverter) ซึ่งเครื่องแปลงกระแสที่ออกแบบอย่างดีจะมีอุปกรณ์ MPPT อยู่ในเครื่องแล้ว

ภาพที่ 2-11 แสดงตัวอย่างลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ จุดที่กราฟตัดแกนแรงเคลื่อนคือแรงดันไฟฟ้าที่วงจรเปิด จุดกราฟตัดแกนกระแสไฟฟ้า คือกระแสไฟฟ้าลัดวงจรในการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์กำลังไฟฟ้าสูงสุด $P_{\max}$ (Maximum Power) ที่เราจะได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะเท่ากับพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ใหญ่ที่สุดภายในกราฟลักษณะสมบัตินี้ ซึ่งแสดงด้วยเส้นไข่ปลาในภาพที่ 2-11 ถ้าให้ $V_{\max}$ (Maximum Voltage) และ $I_{\max}$ (Maximum Current) คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดตามลำดับที่จะให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้น

$$P_{\max} = V_{\max} \times I_{\max} \tag{2.5}$$

ในการวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าจะต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

การแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนี้

1) แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Circuit Voltage, V_{oc}) เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้ขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกเปิดวงจร เมื่อรอยต่อระหว่างซิลิกอนชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็นได้รับแสง กระแสไฟฟ้าที่ไหลวนในวงจรในขณะนั้นเป็นศูนย์

2) กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short Circuit Current, I_{sc}) เป็นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกลัดวงจร เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลจากเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านไปยังวงจรภายนอก ซึ่งภายในสภาวะนี้กระแสไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุด

3) กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power, $P_{\max}$) เป็นผลคูณของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายออกมามีค่าสูงสุด สามารถวัดได้ขณะที่ต่อภาระทางไฟฟ้าที่มีค่าเหมาะสมค่าหนึ่งสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนจะมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าประมาณ 0.45 โวลต์/เซลล์

4) ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ เป็นค่าที่ใช้กำหนดคุณค่าของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายได้จริงกับผลคูณของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าวงจรเปิด สำหรับการทดสอบที่ภาวะมาตรฐานค่าฟิลแฟคเตอร์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.6 – 0.8

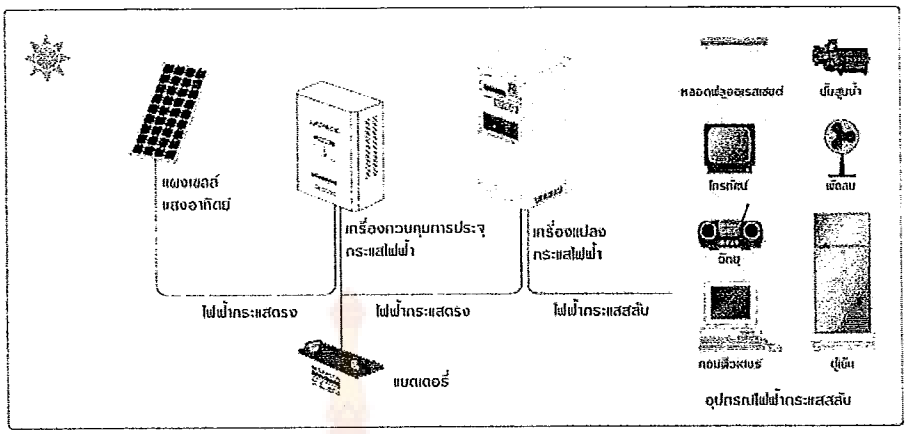
5) ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงาน เป็นอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้กับพลังงานความเข้มรังสีที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์

2.1.9 เทคโนโลยีพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์

การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ แบ่งออกเป็น 3 ระบบ คือ

2.1.9.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand alone system) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้า อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ และอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับแบบอิสระ

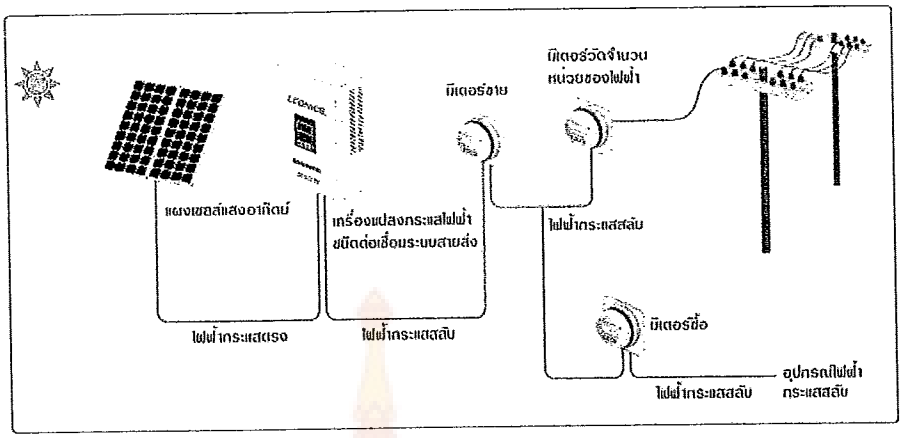
ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าจาก National Grid โดยมีหลักการทำงาน แบ่งได้เป็น 2 ช่วงเวลา กล่าวคือ ช่วงเวลากลางวัน เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงแดดสามารถผลิตไฟฟ้าจ่ายให้แก่โหลดพร้อมทั้งประจุพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินไว้ในแบตเตอรี่พร้อมๆ กัน ส่วนในช่วงเวลากลางคืนเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ได้รับแสงแดดจึงไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ดังนั้น พลังงานจากแบตเตอรี่ที่เก็บประจุไว้ในช่วงเวลากลางวันจะถูกจ่ายให้แก่โหลด จึงสามารถกล่าวได้ว่า ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้โหลดได้ทั้งกลางวันกลางคืน อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ และอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิด Stand alone เป็นต้น



ภาพที่ 2-12 เซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand alone system)

2.1.9.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรง ใช้ผลิตไฟฟ้าในเขตเมืองหรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

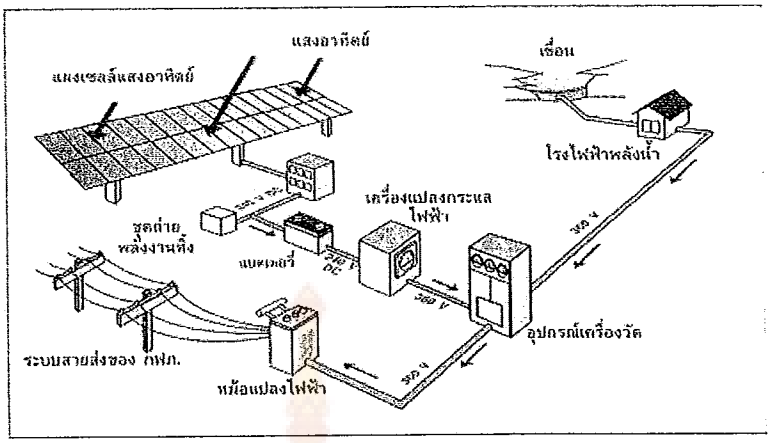
เป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยตรง มีหลักการทำงานแบ่งเป็น 2 ช่วง กล่าวคือ ในช่วงเวลากลางวันเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงแดดสามารถผลิตไฟฟ้าจ่ายให้แก่โหลดได้โดยตรง โดยผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับและหากมีพลังงานไฟฟ้าส่วนที่เกินจะถูกจ่ายเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้า สังเกตได้เนื่องจากมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าจะหมุนกลับทาง ส่วนในช่วงเวลากลางคืนเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้กระแสไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะจ่ายให้แก่โหลดโดยตรง สังเกตได้เนื่องจากมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าจะหมุนปกติ ดังนั้นระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายจะเป็นการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าในเขตเมืองหรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึงอุปกรณ์ระบบที่สำคัญ ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าเป็นต้น



ภาพที่ 2-13 เซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system)

2.1.9.3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน(PV Hybrid system) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่นๆ เช่นระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และเครื่องยนต์ดีเซล ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และไฟฟ้าพลังงานน้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบระบบจะขึ้นอยู่กับการออกแบบตามวัตถุประสงค์โครงการเป็นกรณีเฉพาะ

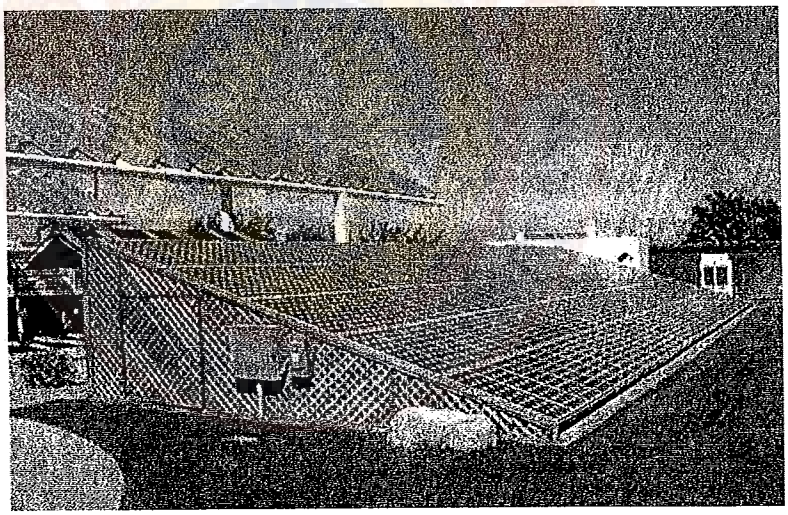
เป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกออกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่นๆ เช่นระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และเครื่องยนต์ดีเซล ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และไฟฟ้าพลังงานน้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบระบบจะขึ้นอยู่กับการออกแบบตามวัตถุประสงค์โครงการเป็นกรณีเฉพาะ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และเครื่องยนต์ดีเซล มีหลักการทำงาน กล่าวคือ ในช่วงเวลากลางวัน เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงแดดสามารถผลิตไฟฟ้าได้ จะจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิด Multi Function ทำงานร่วมกับไฟฟ้าจากพลังงานลม จ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่โหลดพร้อมทั้งทำการประจุไฟฟ้าส่วนเกินไว้ในแบตเตอรี่ในกรณีพลังงานต่ำไม่สามารถผลิตกระแสฟ้าฟ้าได้ หรือเวลากลางคืนไม่มีไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ชุดแบตเตอรี่จะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่โหลด และกรณีแบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้ามากจนถึงพิกัดที่ออกแบบไว้ เครื่องยนต์ดีเซลจะทำงานโดยอัตโนมัติเป็นอุปกรณ์สำรองพลังงาน กล่าวคือ จะจ่ายกระแสไฟฟ้าประจุแบตเตอรี่โดยตรง และแบ่งจ่ายให้แก่โหลดพร้อมกัน และหากโหลดมีมากเกินไประบบจะหยุดทำงานทันที และจะทำงานใหม่อีกครั้งเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์หรือพลังงานลมสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าประจุแบตเตอรี่ได้



ภาพที่ 2-14 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid system)

2.1.10 ความลาดเอียงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องติดตั้งให้มีความลาดเอียงเพียงพอ เพื่อที่จะให้ได้รับแสงแดดมากที่สุดทิศทางของแผงที่เหมาะสมนั้น จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของสถานที่ ว่าตั้งอยู่ที่เส้นรุ้งเท่าไรสำหรับประเทศไทยดีที่สุดคือ 15 องศา โดยมีทิศทางหันหน้าไปทางทิศใต้



ภาพที่ 2-15 การวางแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2.2 อัลตราคาปาซิเตอร์

คาปาซิเตอร์ คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้าให้กับวงจรมีการนำไปใช้งานในวงจรกรองแรงดัน วงจรกรองความถี่ ใช้ในการถ่ายทอดสัญญาณ เป็นต้น คาปาซิเตอร์มีค่าที่เรียกว่า ความจุไฟฟ้า (Capacitance) มีหน่วยเป็น ฟารัด (Farad) แต่ว่าหน่วยฟารัดนี้ใหญ่มากจึงต้องทอนลงมาเป็นหน่วยย่อยที่นิยมใช้ คือ ไมโครฟารัด (Microfarad: uF) นาโนฟารัด (Nanofarad : nF) และ พิโกฟารัด (Pigofarad : pF) ซึ่งจะถูกพิมพ์ไว้บนตัวเก็บประจุด้วย

การสร้างอัลตราคาปาซิเตอร์ขึ้นมา เพื่อต้องการให้เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองให้กับระบบต่างๆ หรืออาจกล่าวได้ว่า ไม่ได้นำมาใช้งานในวงจรทั่วไป แต่จะนำมาใช้งานแทนแบตเตอรี่ หรือคาปาซิเตอร์ค่ามากๆ ข้อดีของอัลตราคาปาซิเตอร์นี้ก็คืออายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า ไม่มีลักษณะของการลดประจุ เหมือนคาปาซิเตอร์ทั่วไป และไม่เหมือนกับถ่านนิเกิ้ลแคดเมี่ยมหรือนิแคด ตรงที่อายุการใช้งานของถ่านขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งของการชาร์จประจุไฟฟ้า และที่สำคัญไม่มีผลของดิสชาร์จเมมโมรี่เอฟเฟ็กต์ (Discharge Memory Effect)

2.2.1 หลักการของอัลตราคาปาซิเตอร์

สิ่งที่เหมือนกับคาปาซิเตอร์อิเล็กทรอไลท์ทั่วไป คือ สร้างขึ้นมาจากการใช้แผ่นอะลูมิเนียมพันเทปพลาสติกม้วนขึ้นมาเป็นคาปาซิเตอร์ อัลตราคาปาซิเตอร์เป็นตัวที่สร้างมาจากหลักการของระบบชั้นสนามไฟฟ้าแบบซ้อนชั้นหรืออาจเรียกว่า คาปาซิเตอร์แบบอิเล็กทริกดับเบิ้ลเลเยอร์ ซึ่งเราให้การเชื่อมโยงประจุไฟฟ้าด้วยพื้นที่ของสารในรูปแบบของการนำสาร 2 ชนิดที่มีความต่างกันมาทำเป็นอิเล็กโตรด เพื่อให้คาปาซิเตอร์ดังกล่าว สามารถเกิดประจุได้มาก เก็บประจุได้นาน โดยวัสดุอย่างที่บรรจุไว้ในอัลตราคาปาซิเตอร์ คือแอ็คติเวตคาร์บอนและน้ำยาที่เป็นตัวอิเล็กทรอไลท์ ซึ่งทำมาจากกรดซัลฟิวลิคเพื่อให้เกิดความชุ่มของเนื้อคาร์บอน ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดประจุบวกขึ้นทางขั้วหนึ่งส่วนอีกด้านก็จะเป็นประจุลบ โดยการถือว่าขั้วที่เป็นคาร์บอนจะให้ค่าประจุปฏิกิริยาเป็นบวกในขณะที่อีกขั้วซึ่งเป็นอิเล็กทรอไลท์เป็นค่าประจุปฏิกิริยาลบ

ค่าความจุไฟฟ้าในคาปาซิเตอร์เท่ากับอัตราส่วนระหว่างประจุไฟฟ้าที่คาปาซิเตอร์เก็บได้ต่อแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมคาปาซิเตอร์นั้น เขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

$$C = \frac{Q}{V} = \varepsilon \frac{A}{d} \tag{2.6}$$

ค่างานที่ได้ใช้ในการให้ประจุสะสมในตัวเก็บประจุจนมีพลังงานศักย์ไฟฟ้า E

$$E = \frac{1}{2}CV^2 \tag{2.7}$$

เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้า (F)

Q คือ ค่าประจุไฟฟ้า (C/V)

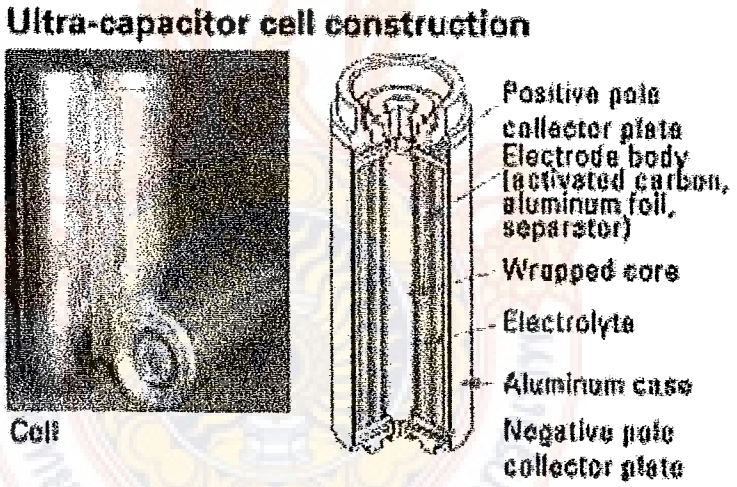
V คือ แรงดันไฟฟ้า (V)

ε คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

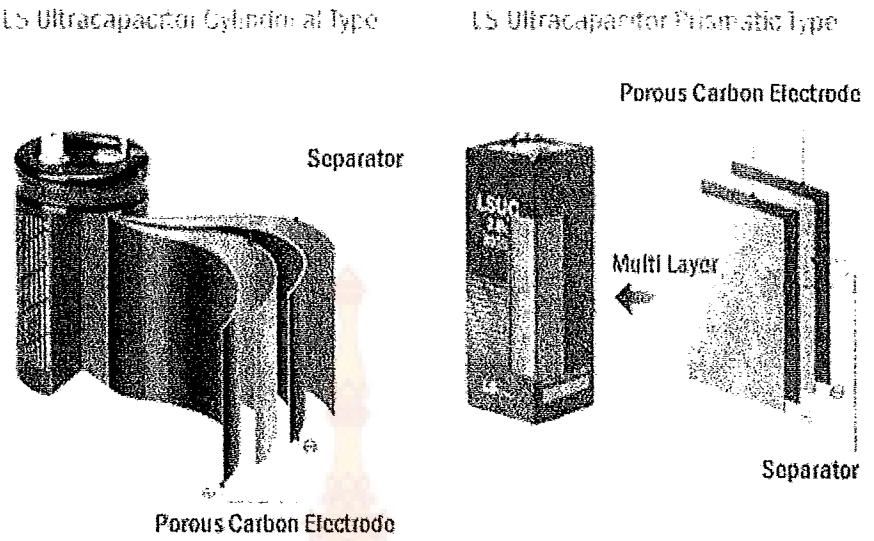
A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ (m^2)

d คือ ระยะห่างของตัวนำ (m)

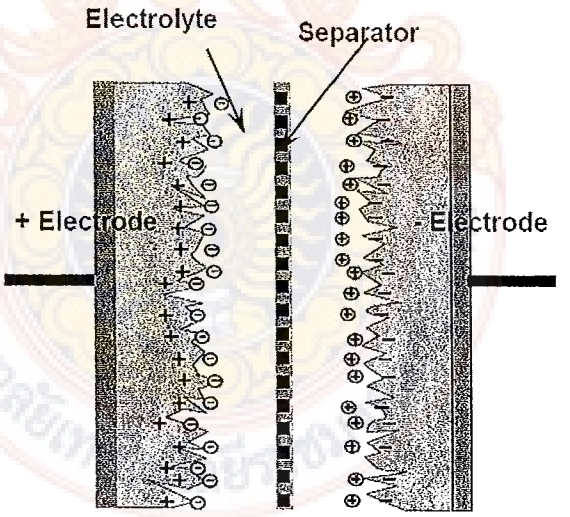
E คือ พลังงานศักย์ไฟฟ้า (W)



ภาพที่ 2-16 โครงสร้างของอัลตราคาปาซิเตอร์



ภาพที่ 2-17 ส่วนประกอบของอัลตราคาปาซิเตอร์



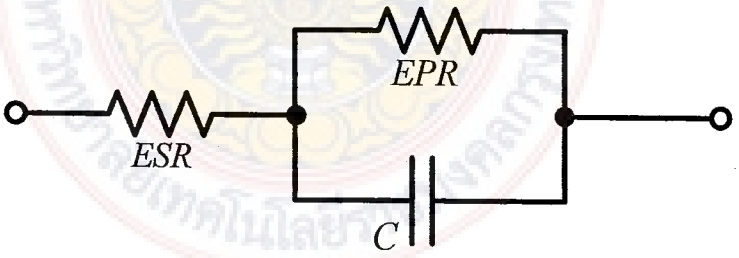
ภาพที่ 2-18 การเก็บประจุของอัลตราคาปาซิเตอร์

ตารางที่ 2-3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของแบตเตอรี่กับอัลตราคาปาซิเตอร์และคาปาซิเตอร์ทั่วไป

Available Performance	Lead Acid Battery	Ultracapacitor	Conventional Capacitor
Charge Time	1 – 5 hrs	0.3 – 30 s	$10^{-3} - 10^{-6}$ s
Discharge Time	0.3 – 3 hrs	0.3 – 30 s	$10^{-3} - 10^{-6}$ s
Energy (Wh/g)	10 – 100	1 – 10	< 0.1
Cycle Life	1000	< 500000	< 500000
Specific Power (Wh/g)	< 1000	< 10000	< 100000
Charge/Discharge Efficiency	0.7 – 0.85	0.85 – 0.98	> 0.95

2.2.2 วงจรสมมูลของอัลตราคาปาซิเตอร์

วงจรสมมูลอย่างง่ายของอัลตราคาปาซิเตอร์สามารถแสดงด้วยความต้านสมมูลต่ออนุกรม (ESR) และความต้านทานสมมูลต่อแบบขนาน (EPR) ESR เป็นการจำลองความต้านทานภายในของอัลตราคาปาซิเตอร์ ซึ่งความต้านทานนี้มีผลต่อระหว่างการเก็บและจ่ายพลังงานไฟฟ้า EPR เป็นการจำลองกระแสรั่วไหลในอัลตราคาปาซิเตอร์มีผลต่อระยะเวลาในการเก็บพลังงาน



ภาพที่ 2-19 วงจรสมมูลของอัลตราคาปาซิเตอร์

การหาค่าความต้านทานสมมูลต่อแบบขนานหาได้จากสมการ

$$EPR = \frac{-t}{\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)C} \tag{2.8}$$

เมื่อ EPR คือ ความต้านทานสมมูลต่อแบบขนาน

t คือ เวลา (s)

V_1 คือ แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น (V)

V_2 คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V)

C คือ ค่าความจุไฟฟ้า (F)

การหาค่าความต้านทานสมมูลต่อแบบอนุกรมหาได้จากสมการ

$$ESR = \frac{\Delta V}{\Delta I} \tag{2.9}$$

เมื่อ ESR คือ ความต้านทานสมมูลต่อแบบอนุกรม

ΔV คือ ผลต่างของแรงดัน

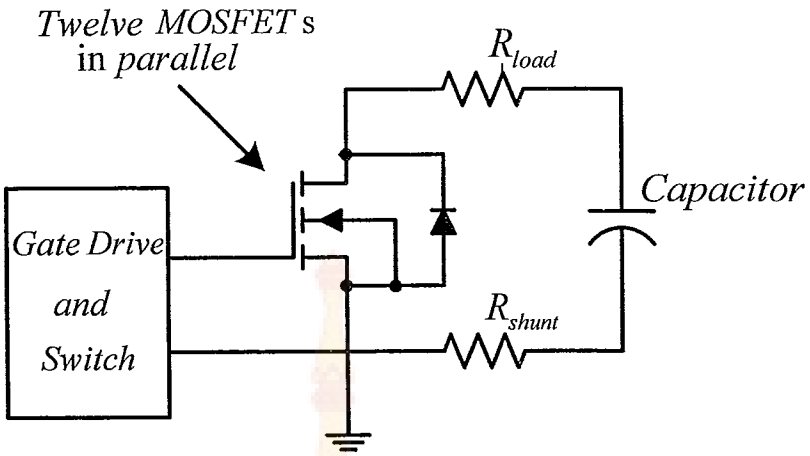
ΔI คือ ผลต่างของกระแส

การหากำลังไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์หาได้จากสมการ

$$P = \frac{V^2}{4 \times ESR} \tag{2.10}$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์ (W)

V คือ แรงดันไฟฟ้า (V)

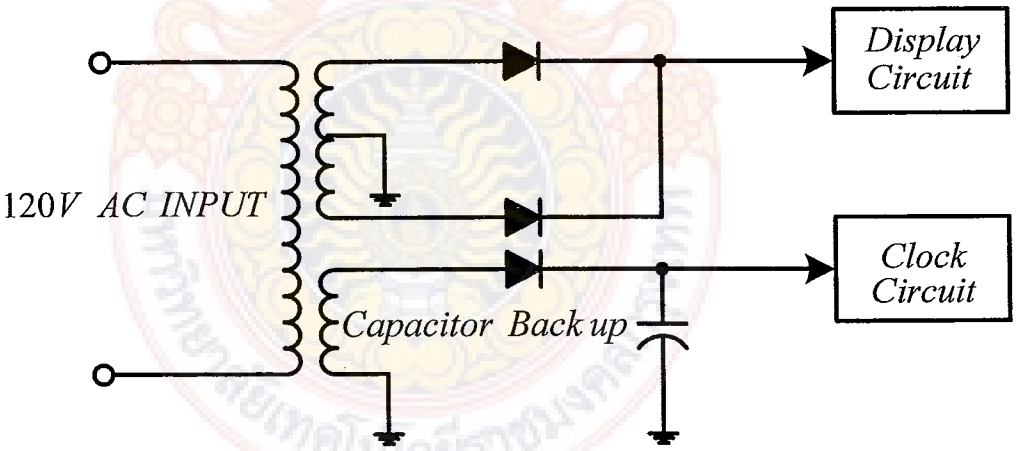


ภาพที่ 2-20 วงจรทดสอบวัดค่าความต้านทานสมมูลต่อแบบอนุกรม

2.2.3 การประยุกต์ใช้อัลตราคาปาซิเตอร์

2.2.3.1 หน่วยความจำ

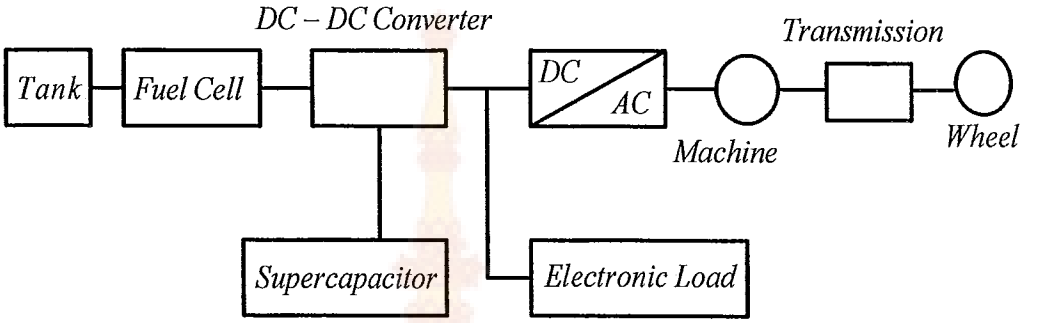
ใช้อัลตราคาปาซิเตอร์ในการเป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองให้กับหน่วยความจำ



ภาพที่ 2-21 การนำอัลตราคาปาซิเตอร์เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองให้กับหน่วยความจำ

2.2.3.2 รถไฟฟ้า

การใช้ อัลตราคาปาซิเตอร์ในการเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับรถไฟฟ้า เมื่อต้องการกำลังไฟฟ้าสูงๆ ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ผสมผสานกันกับแหล่งจ่ายฟ้าหลัก

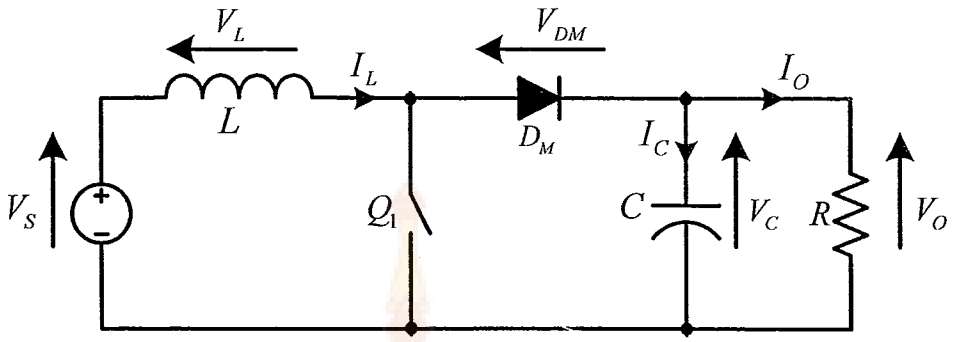


ภาพที่ 2-22 การนำอัลตราคาปาซิเตอร์เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับรถไฟฟ้า

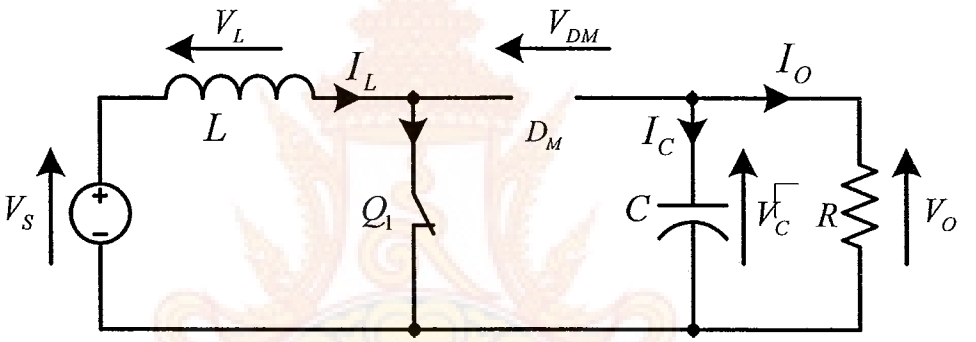
2.3 บูสดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์

บูสคอนเวอร์เตอร์เป็นสวิตชิ่งอีกชนิดหนึ่งที่ทำงานได้ โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ความถี่สูงต่างๆ จะทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงกว่าระดับแรงดันอินพุต โดยอาศัยคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงในการเก็บและคายพลังงานทำให้ระดับแรงดันเอาต์พุตสูงกว่าระดับแรงดันอินพุต หรืออาจจะเรียกว่า Step up Converter ซึ่งจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ ด้วยกัน คือ ส่วนของวงจรกำลัง ประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง ตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุต ไดโอดกำลัง อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิตช์ วงจรกรองแรงดัน และอีกส่วนคือ วงจรควบคุมการทำงานของบูสคอนเวอร์เตอร์เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่

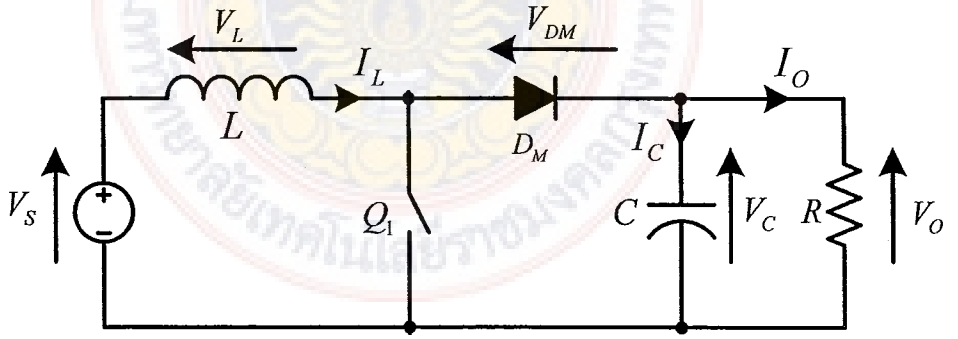
การวิเคราะห์วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์โหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง



ภาพที่ 2-23 วงจรสมมูลของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

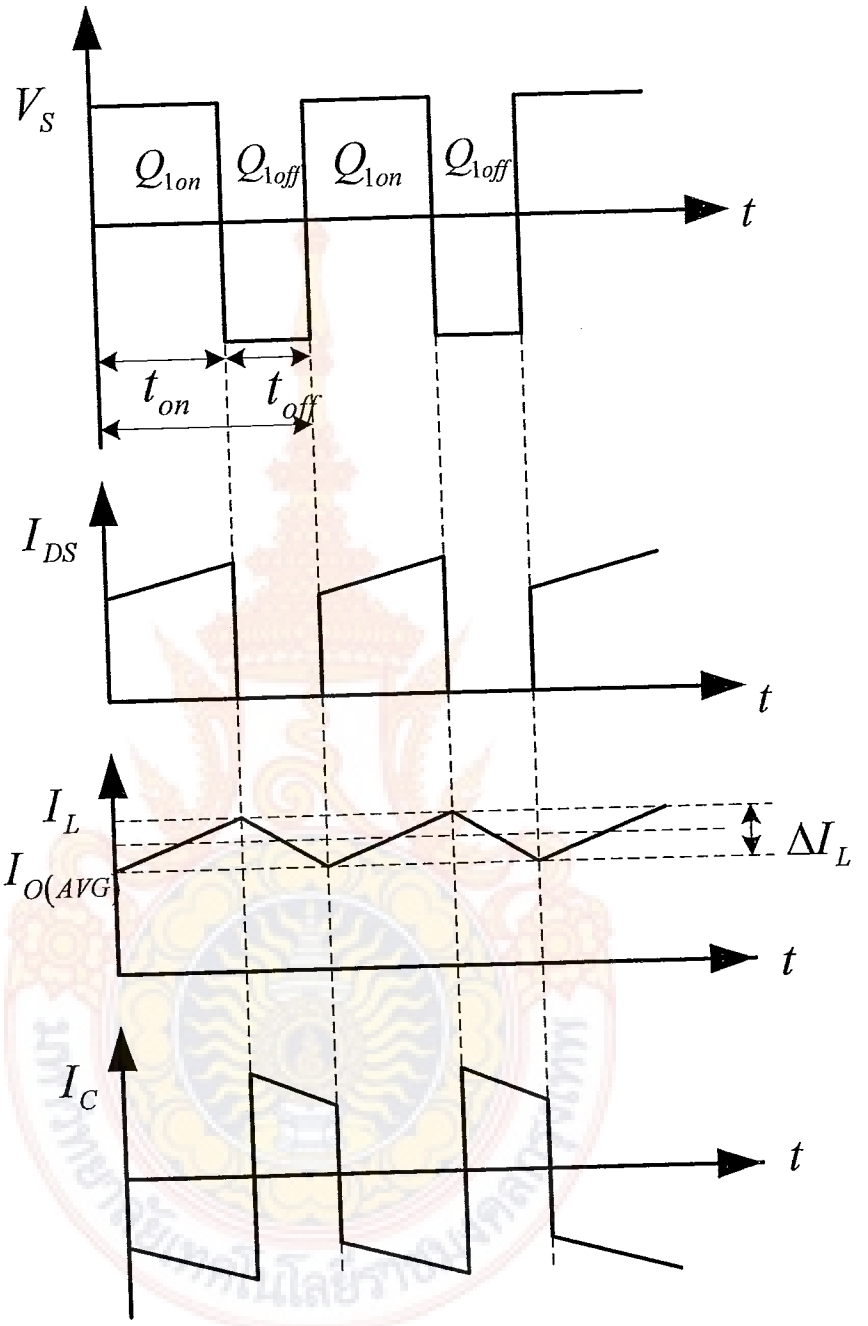


a) โหมดที่ 1 สวิตช์ปิด



b) โหมดที่ 2 สวิตช์เปิด

ภาพที่ 2-24 วงจรการทำงานของบูสคอนเวอร์เตอร์



ภาพที่ 2-25 สัญญาณต่างๆ ของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

2.3.1 วิเคราะห์เมื่อสวิตช์ปิด

โหมด 1 $(0 < t \le t_{on})$ มอสเฟต Q_1 ทำงานสวิตช์ปิด $(t = 0)$ กระแสอินพุตไหลผ่านมอสเฟต Q_1 และตัวเหนี่ยวนำทำให้กระแสของตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นจาก I_1 ที่ $t = 0$ เป็นเวลา I_2 ที่ $t = t_1$ โดยไดโอด D_M จะถูกไบอัสกลับ ตัวเก็บประจุจะดิสชาร์จประจุให้แก่โหลดในช่วงเวลา $(0 < t \le t_{on})$ ค่าแรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ (2.11)

$$V_S = V_L = L\frac{I_2 - I_1}{t_{on}} = \frac{L\Delta I}{t_{on}} \tag{2.11}$$

สมการที่จะหาค่าเวลาในช่วงที่เพาเวอร์มอสเฟต t_{on} ได้จากสมการที่ (2.11)

$$t_{on} = \frac{L\Delta I}{V_S} \tag{2.12}$$

พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากสมการที่ (2.13)

$$E = \frac{1}{2}L(\Delta I)^2 = \frac{1}{2L}V_s^2 t^2{}_{on} \tag{2.13}$$

2.3.2 วิเคราะห์เมื่อสวิตช์เปิด

โหมด $(0 < t \le t_{on})$ มอสเฟต Q_1 ทำงานสวิตช์เปิด $t = t_1$ แรงดันเหนี่ยวนำย้อนกลับของตัวเหนี่ยวนำซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับแรงดันอินพุต ทำให้เอาต์พุตมีค่ามากขึ้นจนทำให้ D_M ทำงานกระแสอินพุตไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ประกอบด้วยกระแสอินพุต I_S และกระแสของตัวเหนี่ยวนำ I_L ซึ่งกระแสของตัวเหนี่ยวนำเกิดจากพลังงานสะสมในตัวเหนี่ยวนำ ขณะที่มอสเฟต Q_1 ทำงานผ่านไดโอด D_M จ่ายให้กับโหลดและชาร์จประจุให้แก่ตัวเก็บประจุเป็นผลให้ I_L ตกลงในช่วงเวลา t_2

$$V_S - V_O = L\frac{I_2 - I_1}{t_{off}} \tag{2.14}$$

หรือ

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

สามารถที่จะหาค่าเวลาในช่วงที่เพาเวอร์มอสเฟต t_{off} ได้จากสมการที่ (2.16)

$$t_{off} = L\frac{\Delta I}{V_O - V_S} \tag{2.16}$$

การเปลี่ยนแปลงของกระแสของตัวเหนี่ยวนำระหว่างค่ากระแสสูงสุดถึงกระแสสูงสุด (Peak to Peak) คือกระแสกระเพื่อม เมื่อพิจารณาที่สภาวะคงที่โดยให้ช่วงเวลา t_{on} และ t_{off} จากสมการที่ (2.17) มีค่าเท่ากัน คำนวณหาค่ากระแสกระเพื่อมได้ ดังนี้

$$\Delta I = \frac{V_S t_{on}}{L} = \frac{(V_O - V_S)t_{off}}{L} \tag{2.17}$$

แทนค่า $t_{on} = DT$ และ $t_{off} = (1-DT)$ ลงในสมการที่ (2.18)

$$V_S DT = (V_O - V_S)(1-D)T = V_O(1-D)T - V_S(1-D)T \tag{2.18}$$

จากสมการที่ (2.18) เมื่อทำให้อยู่ในรูปอย่างง่ายจะได้ ดังนี้

$$V_S DT = V_O(1-D)T - V_S T + V_S DT \tag{2.19}$$

หรือ

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

ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยจากวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์จะได้ดังสมการที่ (2.21)

$$V_O = \frac{V_S}{1-D} \tag{2.21}$$

สมการที่ (2.21) แสดงถึงแรงดันเอาต์พุต ถ้าสวิตช์เปิดตลอดเวลาและดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) มีค่าเป็นศูนย์แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเหมือนกับแรงดันอินพุต ขณะที่ดิวตี้ไซเคิลมีค่าเพิ่มขึ้น ตัวส่วนในสมการที่ (2.21) จะมีขนาดเล็กลงและเอาต์พุตจะมีค่าแรงดันมากกว่าอินพุต แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามแรงดันอินพุตและค่าดิวตี้ไซเคิล ขณะที่ดิวตี้ไซเคิลมีค่าเข้าใกล้ 1

แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเข้าใกล้อนันต์ (Infinity) หากพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าด้านอินพุตเท่ากับด้านเอาต์พุตจะได้ ดังนี้

$$V_S I_S = V_O I_O \tag{2.22}$$

แทนค่าแรงดันเอาต์พุตจากสมการที่ (2.21)

$$V_S I_S = \frac{V_S I_O}{1-D} \tag{2.23}$$

ดังนั้นกระแสอินพุตเฉลี่ยจะได้

$$I_S = \frac{I_O}{1-D} \tag{2.24}$$

บูสคอนเวอร์เตอร์จะทำงานในรูปของคาบเวลาในหนึ่งคาบเวลา จะประกอบด้วยช่วงเวลา t_{on} และ t_{off} ดังนั้นค่าของคาบเวลาจะได้

$$T = \frac{1}{f} = t_{on} + t_{off} = \frac{L\Delta I}{V_S} + \frac{L\Delta I}{V_O - V_S} + \frac{L(\Delta I)V_O}{V_S(V_O - V_S)} \tag{2.25}$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (2.21) ให้อยู่ในรูปอย่างง่าย จะได้ค่ากระแสกระเพื่อมของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.26)

$$\Delta I = \frac{V_S(V_O - V_S)T}{LV_S} = \frac{V_S\left[V_S/(1-D) - V_O\right]}{fLV_O} \tag{2.26}$$

และจะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ ดังสมการที่ (2.27)

$$L = \frac{V_S D}{f\Delta I} \tag{2.27}$$

2.3.3 แรงดันกระเพื่อมด้านเอาต์พุต (Output Voltage Ripple)

การทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์จะต้องได้แรงดันเอาต์พุตที่สูงกว่าแรงดันอินพุต ถ้าไม่เป็นเช่นนั้นแสดงว่าตัวเหนี่ยวนำไม่คายพลังงานเสริมแรงดันอินพุต เมื่อมอสเฟต t_{on} แรงดันเอาต์พุตจะได้จากการคายประจุของตัวเก็บประจุอย่างเดียว เพราะฉะนั้นขนาดของตัวเก็บประจุจะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันด้านเอาต์พุตและโหมดการทำงาน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะให้ขนาดของตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ เพื่อที่จะให้ขนาดของแรงดันกระเพื่อมทางด้านเอาต์พุตมีขนาดลดลง ตัวเก็บประจุจะคายพลังงานให้ทางด้านเอาต์พุตในช่วงเวลาที่มอสเฟต t_{on} และหาค่าตัวเก็บประจุได้จากค่ากระแสเอาต์พุตในช่วงเวลาดังกล่าว

$$\Delta V_C = V_C - V_C(0) = \frac{1}{C}\int_{t_{off}}^{t_{on}} I_O dt = \frac{I_O t_{on}}{C} \tag{2.28}$$

หากพิจารณาจากช่วงเวลา t_{on} ในคอนเวอร์เตอร์จะมีความถี่ในการสวิตช์ เมื่อพิจารณาให้อยู่ในเทอมของเอาต์พุต ซึ่งจะได้จากสมการที่ (2.21) และพิจารณาความถี่ด้วยจะได้

$$V_O = \frac{V_S}{1-D} = \frac{V_S T}{T - DT} = \frac{V_S}{T - t_{on}} \tag{2.29}$$

หรือ

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

ค่าเวลาในช่วง t_{on} จะได้

$$t_{on} = T - \frac{V_S T}{V_O} = \frac{V_O - V_S}{f V_O} \tag{2.31}$$

แทนค่า t_{on} ในสมการที่ (2.31) ลงในสมการที่ (2.28) จะได้ ดังนี้

$$\Delta V_C = \frac{I_O(V_O - V_S)}{V_O f C} = \frac{I_O(V_O - V_S)}{f C V_S(1-D)} \tag{2.32}$$

จากสมการที่ (2.32) เขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายจะได้

$$\Delta V_C = \frac{\left[I_O\left(V_O - V_S + DV_S\right)/\left(1-D\right)\right]}{fCV_S/\left(1-D\right)} = \frac{I_O D}{fC} \tag{2.33}$$

ดังนั้นตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุตของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ จะหาได้จากสมการที่ (2.34) โดยค่าของ

$$\Delta V_C = \Delta V_O \tag{2.34}$$

จะได้

$$C = \frac{I_O D}{f\Delta V_O} \tag{2.35}$$

2.4 วงจรกำลังของบูสคอนเวอร์เตอร์

การออกแบบวงจรกำลังของคอนเวอร์เตอร์แบบบูสคอนเวอร์เตอร์จำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีดังต่อไปนี้

2.4.1 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานโดยอาศัยคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้า การที่จะเข้าใจถึงการออกแบบตัวเหนี่ยวนำจะต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยตัวเหนี่ยวนำ มีหน้าที่สำคัญมากในการเก็บและคายพลังงานในคอนเวอร์เตอร์แบบทบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

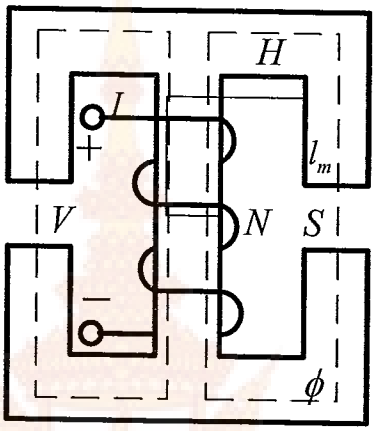
2.4.1.1 แม่เหล็กไฟฟ้าพื้นฐาน

ในทฤษฎีของแม่เหล็กไฟฟ้าพื้นฐาน กฎพื้นฐานทางแม่เหล็กไฟฟ้าพิจารณาจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดโดยมีตัวแปร 2 ตัว ที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กเวกเตอร์ตัวแรกได้แก่ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Field Intensity Vector) ใช้ตัวย่อคือ H มีหน่วยเป็น L/m ตามกฎของแอมแปร์ที่กำหนด

$$Hl_m = Ni \tag{2.36}$$

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

$$V = N\frac{d(BS)}{dt} = N\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \tag{2.37}$$



ภาพที่ 2-26 วงจรแม่เหล็กไฟฟ้าพื้นฐาน

เมื่อ N คือ จำนวนรอบ

ϕ คือ เส้นแรงแม่เหล็ก

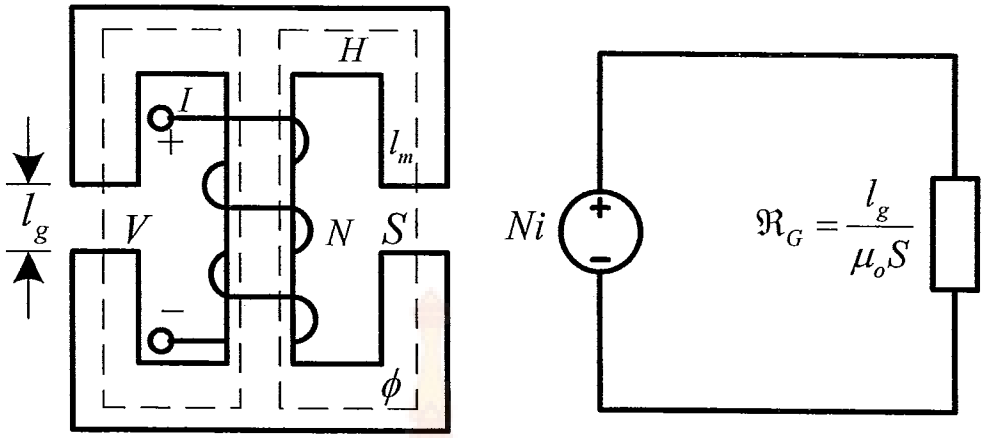
λ คือ เส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยง

l_m คือ ความยาวเฉลี่ยของทางแม่เหล็ก

I คือ กระแสที่ไหลในวงจรแม่เหล็ก

S คือ พื้นที่หน้าตัด

สามารถเขียนวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Circuit) แทนด้วยวงจรไฟฟ้า (Electric Circuit) และค่าเทียบเคียงดังภาพที่ 2-26 และตารางที่ 2-4 ตามลำดับ



ภาพที่ 2-27 วงจรแม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรเทียบเคียง

ตารางที่ 2-4 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

$$\Re = \frac{l}{\mu S} \tag{2.38}$$

และส่วนกลับของ $\Re$

$$P = \frac{1}{\Re} = \frac{\mu S}{l} \tag{2.39}$$

ค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) สามารถหาได้จาก

$$L = \frac{\lambda}{I} = \frac{N\phi}{I} = \frac{N^2}{R} = N^2 P = \frac{N^2 \mu S}{l} \tag{2.40}$$

วงจรแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อมี Air Gab

$$\phi = \frac{NI}{\Re_g + \Re_m} = (P_g + P_m)NI \tag{2.41}$$

$$N\phi = (P_g + P_m)N^2 I \tag{2.42}$$

$\Re_m$ คือ Reluctance ของแกนเหล็ก

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

$$L = N^2 P_g = \frac{N^2 \mu_o S}{l_g} \tag{2.43}$$

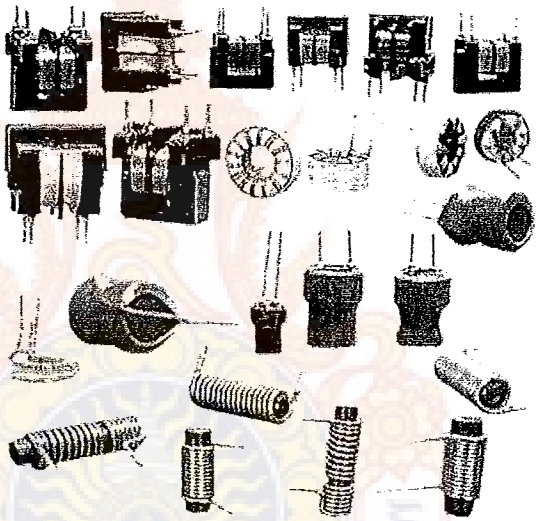
2.4.1.2 แกนเฟอไรต์

เฟอร์ไรต์เป็นวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) การเหนี่ยวนำแม่เหล็กบนแกนเฟอร์ไรต์จะมีผลทำให้เกิดการเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กสูงกว่าการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนแกนอากาศมาก แกนเฟอร์ไรต์มีค่าอิ่มตัวเส้นแรงแม่เหล็กค่อนข้างสูง และเกิดการสูญเสียในตัวแกนเฟอร์ไรต์ต่ำที่ความถี่สูงๆ ดังนั้นตัวเหนี่ยวนำในวงจรสวิตชิ่งจึงนิยมใช้แกนเฟอร์ไรต์มากที่สุด เฟอร์ไรต์ที่นำมาใช้ทำแกนของตัวเหนี่ยวนำสวิตชิ่งจะมีรูปร่างแตกต่างออกไปขึ้นอยู่กับการใช้งานและมาตรฐานในการออกแบบแกนเฟอร์ไรต์

สารแม่เหล็กที่ใช้ทำแกนแม่เหล็กมักจะเป็นอัลลอยของเหล็กหรือเฟอร์ไรต์ สารที่นิยมใช้ที่ความถี่ต่ำ ได้แก่ เหล็กผสมซิลิกอนเจือจาง ซึ่งมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กอิ่มตัวค่าสูงแต่จะมีการสูญเสียมาก ถ้าส่วนผสมซิลิกอนมีมากขึ้นก็มักจะเป็นชนิด Grain Oriented การสูญเสียจะน้อยลงแต่ราคาก็จะแพงขึ้น นอกจากจะผสมซิลิกอนแล้วยังมีสารแม่เหล็กที่ผสมสารอื่นๆ เช่น โคบอลต์ นิกเกิล โมลิบนัม เป็นต้น ซึ่งทำงานได้ถึงความถี่ 20kHz แต่ก็มีราคาแพงกว่าเหล็กผสม

ซิลิกอนมาก เฟอร์ไรต์เป็นเซรามิค ประกอบไปด้วย ออกไซด์ของเหล็ก สังกะสี และแมงกานีสหรือนิกเกิล เฟอร์ไรต์ชนิด MnZn มีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงกว่าชนิด NiZn แต่ทำงานได้ถึงความถี่ประมาณ 1MHz ซึ่งต่ำกว่าชนิด NiZn ซึ่งทำงานได้ถึง 1 MHz เฟอร์ไรต์มีหลากหลายชนิดตามแต่ละสูตรผสมและมีเลขรหัสต่างๆ เช่น 6H20 7H10 และ 3C6 เป็นต้น

แกนเฟอร์ไรต์สำหรับแหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่ง โดยทั่วไปจะถูกผลิตออกมาที่ขนาดและรูปทรงต่างๆ ตามมาตรฐานเดียวกัน เช่น เป็นแกนแบบ EI EE EER หรือแกนแบบ POT เป็นต้น ปกติผู้ผลิตจะทำแกนเฟอร์ไรต์ออกมาในลักษณะประกบคู่ เพื่อความสะดวกในการประกอบเข้ากับบ๊อบบิ้น การประกบแกนเฟอร์ไรต์บนบ๊อบบิ้นนั้น จะทำให้ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์มีลักษณะเป็นวงบรรจบได้

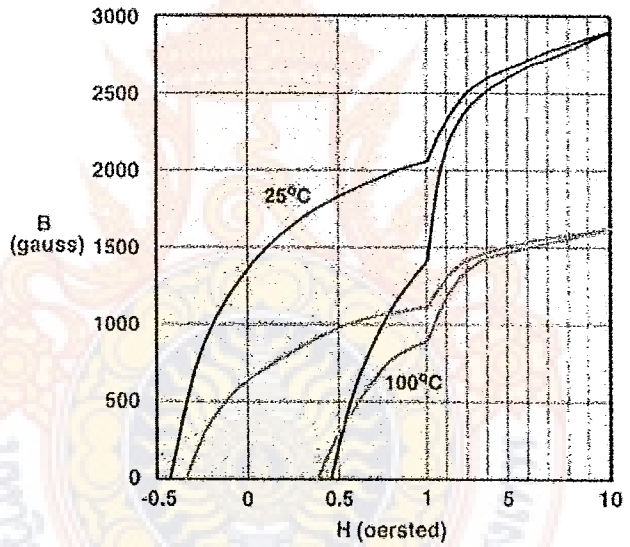


ภาพที่ 2-28 ลักษณะของแกนเฟอร์ไรต์แบบต่างๆ

ก. ลักษณะสมบัติของเนื้อสารที่ใช้ทำแกนเฟอไรต์

ชนิดของเนื้อสารแกนเฟอไรต์ที่แตกต่างกันจะให้คุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกนเฟอไรต์ที่แตกต่างกันด้วย ถึงแม้จะมีขนาดเท่ากันทุกประการก็ตาม ในแผ่นข้อมูลเนื้อสารที่ให้มากับแกนเฟอไรต์นั้นจะต้องมีรายละเอียดคุณสมบัติของเนื้อสารแสดงไว้เสมอ ข้อมูลที่สำคัญควรจะทำความเข้าใจและศึกษาไว้ก็คือ เส้นโค้งฮีสเตอรีซีส (Hysteresis Curve) และค่าการสูญเสียของแกนเฟอไรต์ (Core Loss)

เส้นโค้งฮีสเตอรีซีสจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ที่เกิดขึ้นในแกนเฟอไรต์กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดที่พันบนแกนเฟอไรต์ ภาพที่ 2-28 จะแสดงเส้นโค้งฮีสเตอรีซีสของแกนเฟอไรต์ จากรูปจะเห็นได้ว่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจะมีค่ามากขึ้น เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มจนถึงจุดหนึ่ง ซึ่งค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กแล้วก็ตาม จากจุดดังกล่าวจะเรียกว่าแกนเริ่มมีการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก โดยปกติผู้ผลิตจะแสดงกราฟของเส้นโค้งฮีสเตอรีซีสเพียงครึ่งเดียว เนื่องจากอีกครึ่งหนึ่งของเส้นโค้งฮีสเตอรีซีสจะมีลักษณะเหมือนกันทุกประการเพียงแต่จะมีลักษณะกลับทิศทางกันเท่านั้น จากภาพที่ 2-28 การใช้งานของแกนเฟอไรต์ในตัวเหนี่ยวนำจึงควรกำหนดค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเฟอไรต์ ขณะทำงานมีค่าไม่เกินครึ่งหนึ่งของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดก่อนอิ่มตัวของแกนเฟอไรต์เพื่อความปลอดภัย

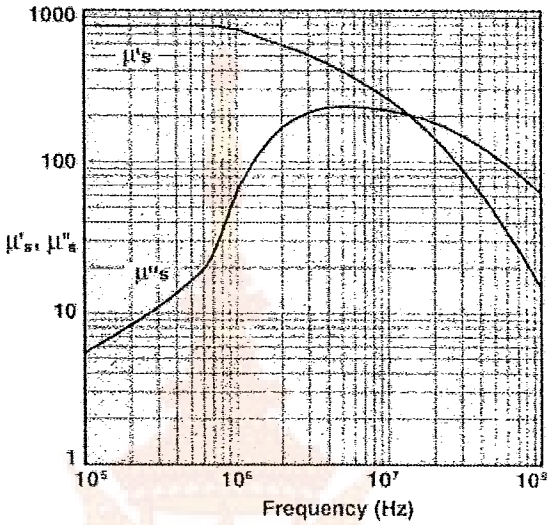


ภาพที่ 2-29 เส้นโค้งฮีสเตอรีซีสของแกนเฟอไรต์

ข. ค่าการสูญเสียในแกนเฟอไรต์ (Core Loss)

การสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเฟอไรต์จะทำให้แกนเฟอไรต์ร้อน ซึ่งมีสาเหตุหลัก 2 ประการ คือ การสูญเสียที่เกิดจากลักษณะฮีสเตอรีซีสของแกนและการสูญเสียจากการเกิดกระแสไหลวนในแกนจะมีค่าน้อยสำหรับแกนที่มีขนาดใหญ่ไม่มากนัก ดังนั้นการสูญเสียที่ก่อให้เกิดความร้อนในแกนอาจพิจารณาได้จากการสูญเสียทางฮีสเตอรีซีสของแกนเพียงอย่างเดียว ตัวอย่างกราฟ

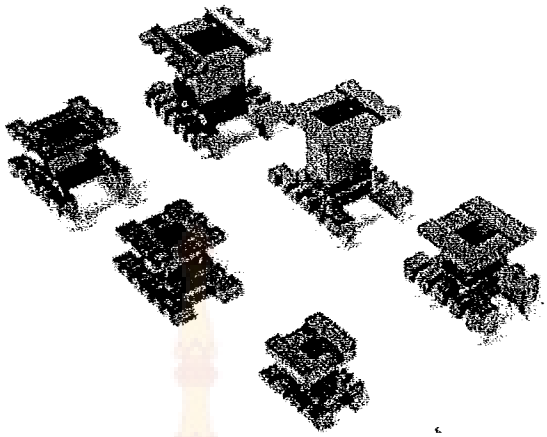
แสดงการสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเฟอไรต์ในภาพที่ 2-29 ปกติค่ากำลังสูญเสียจะถูกระบุไว้เป็นกิโลวัตต์ต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร และมีค่าขึ้นกับค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ความถี่ในการใช้งานรวมถึงอุณหภูมิขณะใช้งานของแกนเฟอไรต์



ภาพที่ 2-30 ค่าการสูญเสียในแกนเฟอไรต์ของเนื้อสารชนิด 6H20 7H20 และ 7H10

2.4.1.3 บ๊อบบิ้น

บ๊อบบิ้นหรือแบบรองพัน ปกติทำจากพลาสติกชนิดทนความร้อนได้สูงและไม่ติดไฟ บ๊อบบิ้นจะช่วยให้การพันขดลวดบนแกนเฟอไรต์สะดวกขึ้น และป้องกันปัญหาการลัดวงจรระหว่างขดลวดและแกนเฟอไรต์ บ๊อบบิ้นจะมีขนาดมาตรฐาน ตามมาตรฐานของแกนเฟอร์ไรต์ตัวอย่างลักษณะและขนาดของบ๊อบบิ้น บ๊อบบิ้นส่วนใหญ่จะถูกออกแบบให้มีขาพักลวดทองแดง เพื่อความสะดวกในการพันขดลวดและการบัดกรีติดกับแผ่น PCB



ภาพที่ 2-31 ลักษณะบ๊อบบิ้นของแกนเฟอร์ไรต์

2.4.1.4 ลวดทองแดงอาบน้ำยา (Enamelled Copper Wire)

การพันขดลวดของตัวเหนี่ยวนำสวิตชิ่งปกติจะใช้ลวดทองแดงอาบน้ำยาพันบนแกนบ๊อบบิ้น เพื่อให้ได้จำนวนรอบตามต้องการ ขนาดของลวดทองแดงที่จะใช้พันนั้นขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านขดลวด ความถี่ และผลข้างเคียงอื่นๆ

2.4.1.5 เทปฉนวน (Insulation Tape)

เทปฉนวนใช้พันสำหรับเป็นตัวรองระหว่างชั้นของขดลวดในตัวเหนี่ยวนำสวิตชิ่ง และมีความสำคัญในการเป็นฉนวนป้องกันความเสียหายของขดลวด และทำให้ขดลวดมีความแข็งแรง วัสดุที่ใช้ทำเทปฉนวนอาจเป็นพวกไมลาร์ (Mylar) หรือ โพลีเอสเตอร์ (Polyester) ที่มีความหนาอยู่ในช่วง 0.05 – 0.1 มิลลิเมตร การเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับการออกแบบและความปลอดภัยที่ต้องการจากตัวเหนี่ยวนำสวิตชิ่งเป็นหลัก

2.4.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

2.4.2.1 ข้อกำหนดในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำสวิตชิ่ง

1) ขนาดและรูปร่างรวมทั้งความถี่ของกระแสและแรงดัน
2) กำลังสูญเสีย ประสิทธิภาพหรืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น
3) คุณสมบัติทางไฟฟ้าและเชิงกลอื่นๆ

2.4.2.2 ขีดจำกัดในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำสวิตชิ่ง

1) ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กอิ่มตัวของแกนเหล็ก
2) กำลังงานสูญเสียในลวดทองแดงหรือแกนเหล็ก
3) คุณสมบัติอื่นๆ เช่น Permeability เป็นต้น

2.4.3 การเลือกตัวเก็บประจุในวงจรกำลังของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

ในวงจรกำลังของวงจรไฟฟ้ากระแสตรง ตัวเก็บประจุ มีหน้าที่เก็บพลังงานในรูปแบบประจุไฟฟ้า และทำการจ่ายแรงดันออกให้กับเอาต์พุต หรือคายประจุไฟฟ้าเมื่อมอสเฟตอยู่ในช่วงเวลา Turn On และเก็บประจุเมื่ออยู่ในช่วงเวลา Turn Off จะต้องเลือกตัวเก็บประจุที่สามารถทนแรงดันได้เท่ากับแรงดันทางด้านเอาต์พุต หากเลือกตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะช่วยในส่วนของการลดแรงดันกระเพื่อมทางด้านเอาต์พุตให้ลดลงได้

ตัวเก็บประจุในวงจรกำลัง หากพิจารณาในโหมดกระแสต่อเนื่องของวงจรทบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงค่าของตัวเก็บประจุพิจารณาได้จากสมการแรงดันกระเพื่อมทางเอาต์พุต (ΔV_o) และกระแสเอาต์พุต (I_o) ที่ใช้งาน ค่าดิวตี้ไซเคิลสูงสุดที่ใช้งาน ความถี่ในการสับสวิตช์ของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ (f_s) ดังสมการจะใช้คำนวนหาค่าตัวเก็บประจุที่จะใช้งาน

$$C = \frac{I_{o(\max)} D_{(\max)}}{f \Delta V_o} \tag{2.44}$$

เมื่อ $I_{o(\max)}$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดทางด้านเอาต์พุต

$D_{(\max)}$ คือ ค่าดิวตี้ไซเคิลสูงสุด

ค่าความต้านทานสมมูลอนุกรมของตัวเก็บประจุ (Equivalent Series Resistance: ESR) หาได้จาก

$$ESR \leq \frac{\Delta V_o}{\left[\frac{I_{o(\max)}}{1 - D_{(\max)}} + \frac{\Delta I_L}{2} \right]} \tag{2.45}$$

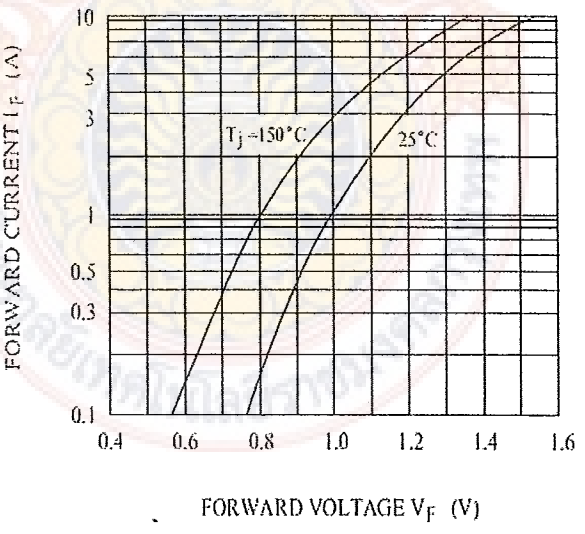
2.4.4 ชนิดและการเลือกใช้ไดโอด

เนื่องจากวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้จะมีค่าความถี่ของวงจรตั้งแต่ 20 kHz ขึ้นไป ไดโอดที่ใช้จึงจำเป็นต้องมีคุณสมบัติดังนี้ มีแรงดันขณะนำกระแสต่ำ ทนกำลังไฟฟ้าได้สูงและมีช่วงเวลาในการคืนตัวสั้น เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ซิลิกอนไดโอดที่ใช้ในวงจรเร็กติไฟเออร์ทั่วไป จึงไม่สามารถนำมาใช้กับวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ได้ เนื่องจากช่วงเวลาคืนตัวที่มาก กำลังสูญเสียในรูปความร้อนจะเกิดขึ้นสูงและมีประสิทธิภาพต่ำ

ด้วยเหตุนี้ซิลิกอนไดโอดที่ใช้ในวงจรเร็กติไฟเออร์ทั่วไปจึงไม่สามารถนำมาใช้กับวงจรคอนเวอร์เตอร์ได้ เนื่องจากมีช่วงเวลาคืนตัวที่มาก กำลังสูญเสียในรูปความร้อนจะเกิดขึ้นสูงและมีประสิทธิภาพต่ำ โดยไดโอดที่ใช้ในวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์นี้จะเลือกใช้ใน 3 ชนิดดังต่อไปนี้

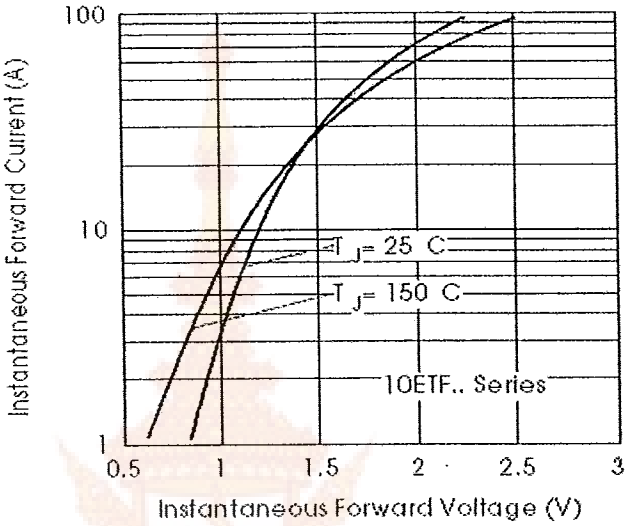
1. ฟาสต์ – รีคัฟเวอรี่ไดโอด (Fast Recovery Diode)
2. อุลตร้าฟาสต์ – รีคัฟเวอรี่ไดโอด (Ultra Fast Recovery Diode)
3. ชอตต์กี้ไดโอด (Shottky Diode)

ฟาสต์ – รีคัฟเวอรี่ไดโอด (Fast Recovery Diode) มีช่วงเวลาในการคืนตัวประมาณ 200 – 750 นาโนวินาที ซึ่งสั้นกว่าซิลิกอนไดโอดมาก มีอัตราทนแรงดันไบอัสกลับได้สูงถึง 1000 โวลต์



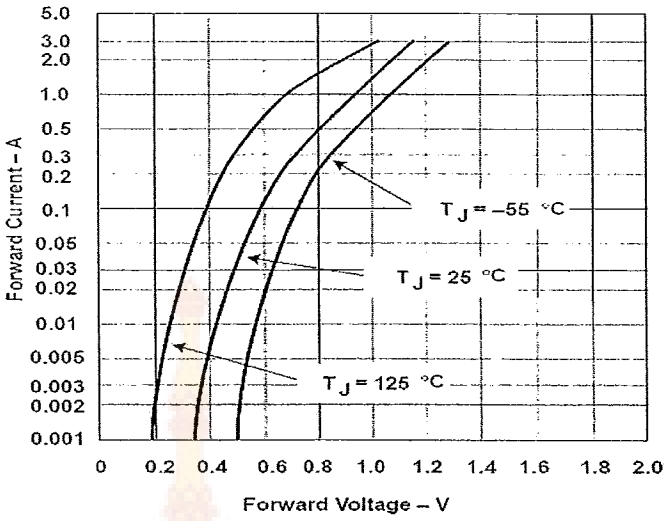
ภาพที่ 2-32 กราฟแรงดันตกคร่อม

อุลตร้าฟาสต์ – รีคัฟเวอรี่ไดโอด (Ultra Fast Recovery Diode) มีช่วงเวลาในการคืนตัวประมาณ 25 – 100 นาโนวินาที มีอัตราทนแรงดันไบอัสกลับได้สูงถึง 1000 โวลต์ แรงดันตกคร่อมขณะที่นำกระแสของไดโอดทั้งสองชนิดนี้มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน คือ 0.6 – 1.5 โวลต์



ภาพที่ 2-33 กราฟแรงดันตกคร่อมขณะไดโอดนำกระแส

ชอตต์กี้ไดโอด (Shottky Diode) มีค่าแรงดันตกคร่อมในขณะนำกระแสค่อนข้างต่ำที่ประมาณ 0.5 โวลต์ จึงเหมาะสมกับวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ที่มีค่าแรงดันเอาต์พุตค่าต่ำๆ และกระแสสูง ชอตต์กี้ไดโอดจะไม่เกิดประจุสะสมภายในตัวมันขณะนำกระแสช่วงเวลาคืนตัวที่ผลิตได้ในปัจจุบันมีค่าต่ำมาก มีอัตราทนแรงดันไบอัสกลับได้สูงสุด 200 โวลต์ เท่านั้นและมีกระแสรั่วไหลสูง ทำให้มีกำลังงานสูญเสียขณะถูกไบอัสกลับค่อนข้างสูง และจะให้ทรานเซี้ยนขณะเริ่มหยุดนำกระแสสูง



ภาพที่ 2-34 กราฟแรงดันตกคร่อมขณะไดโอดนำกระแสและค่ากระแสรั่วไหล

2.4.5 เพาเวอร์มอสเฟต

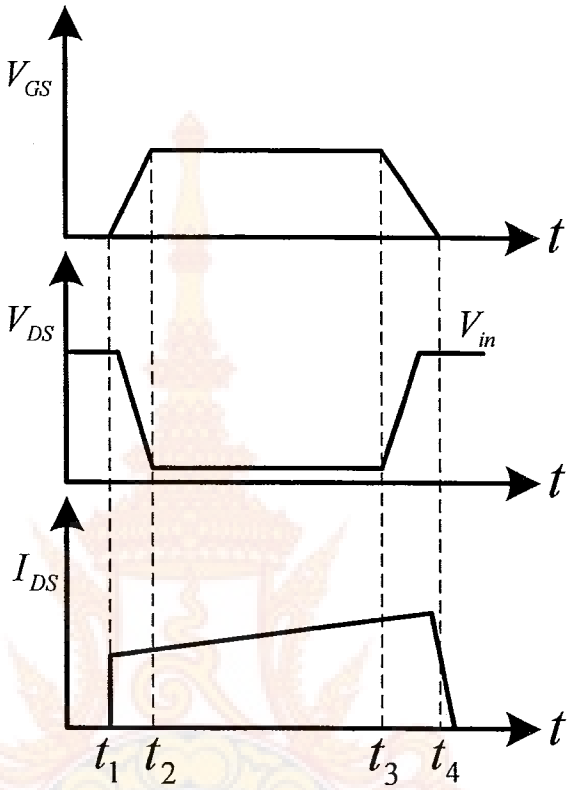
เพาเวอร์มอสเฟตสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงตั้งแต่ 20 kHz ไปจนถึงประมาณ 200 – 400 kHz เวลาในการเปลี่ยนสถานะค่อนข้างสั้น และจะมีการพัฒนาให้เพิ่มความถี่สูงขึ้นไปอีกซึ่งจะมีผลในการลดขนาดของบูสคอนเวอร์เตอร์ ในส่วนวงจรขับของเพาเวอร์มอสเฟตนั้นสามารถทำได้ง่าย เพาเวอร์มอสเฟตจึงเข้ามาแทนที่ไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ได้อย่างรวดเร็วในระบบสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย

2.4.5.1 กำลังงานสูญเสียในรูปของความร้อนของเพาเวอร์มอสเฟต

กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในเพาเวอร์มอสเฟตขณะทำงานจะเป็นไปได้ 2 ลักษณะ คือ กำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะและกำลังงานสูญเสียขณะนำกระแสเพาเวอร์มอสเฟต จะมีช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสสั้นมาก เพราะตามโครงสร้างของเพาเวอร์มอสเฟตจะไม่มีการสะสมประจุเกิดขึ้น

อย่างไรก็ตามเพาเวอร์มอสเฟตจะมีค่าความต้านทานขณะนำกระแสค่อนข้างสูง การสูญเสียกำลังขณะนำกระแสจึงสูงกว่าไบโพลาร์ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ถึงแม้ว่าช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตจะค่อนข้างสั้น แต่โดยทั่วไปเพาเวอร์มอสเฟตมักใช้งานที่ความถี่สูง การคิดค่ากำลังงานสูญเสียขณะทำงานจำเป็นต้องนำค่ากำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะมาคิดด้วย และเนื่องจากช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส (Turn off Time) กับช่วงเวลาเริ่ม

นำกระแส (Turn on Time) ของเพาเวอร์มอสเฟตมีค่าใกล้เคียงกันจึงต้องนำมาคิดทั้งสองช่วงเวลา ดังนั้นกำลังงานสูญเสียของเพาเวอร์มอสเฟตขณะทำงาน P_D จะมีค่าเท่ากับ



ภาพที่ 2-35 ลักษณะของกระแสและแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟต เมื่อเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแส

$$P_D = P_{sw(on)} + P_{sw(off)} + P_C \tag{2.46}$$

$$P_{sw(on)} = \frac{0.5 I_{PK(on)} V_{in} t_r}{T} \tag{2.47}$$

$$P_{sw(off)} = \frac{0.5 I_{PK(on)} V_{in} t_f}{T} \tag{2.48}$$

$$P_C = I^2_{Drms} \times R_{DS} T_{(j)} \tag{2.49}$$

เมื่อ $P_{sw(on)}$ คือ กำลังงานสูญเสียขณะเริ่มนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต

$P_{sw(off)}$ คือ กำลังงานสูญเสียขณะเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต

P_C คือ กำลังงานสูญเสียขณะนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต

$I_{PK(on)}$ คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มนำกระแส

I_{Drms} คือ ค่ากระแส rms

R_{DS} คือ ค่าความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอร์ส

$T_{(j)}$ คือ อุณหภูมิรอยต่อสูงสุดขณะทำงานของเพาเวอร์มอสเฟต

t_r คือ ช่วงเวลาเริ่มนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต

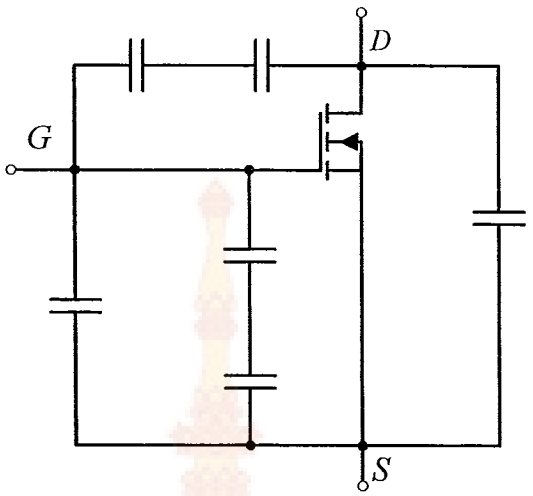
t_f คือ ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต

2.4.5.2 เงื่อนไขของวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟต

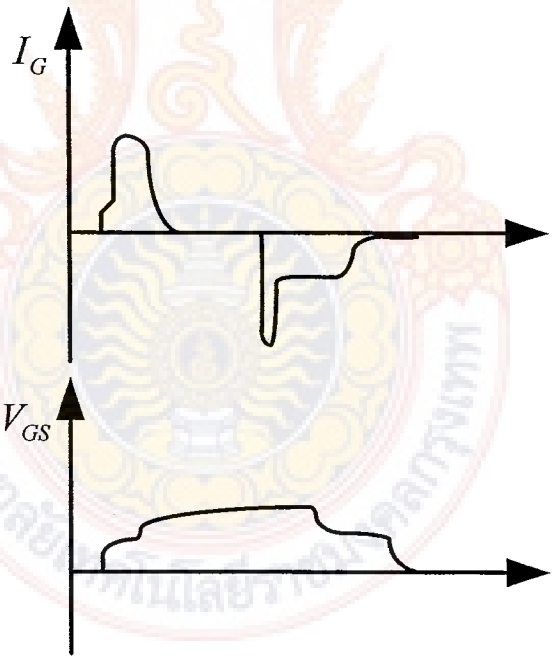
การขับเพาเวอร์มอสเฟตให้นำกระแสนั้นแตกต่างจากการขับกระแสไบอัสในไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ เนื่องจากมีเงื่อนไขการไบอัสที่แตกต่างกัน สำหรับไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์กระแสจะไหลผ่านคอลเล็กเตอร์และอีมิตเตอร์ได้ ก็ต่อเมื่อมีกระแสไบอัสไหลผ่านที่เบสและอีมิตเตอร์ แต่เพาเวอร์มอสเฟตจะมีกระแสไหลผ่านเดรนและซอร์สได้ ก็ต่อเมื่อแรงดันตกคร่อมที่ขาเกตและซอร์สมีค่าอย่างต่ำเท่ากับค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage) ของเพาเวอร์มอสเฟต แต่ใช้กระแสต่ำการขับเพาเวอร์มอสเฟตให้นำกระแสจึงทำง่ายและยุ่งยากน้อยกว่าไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มาก อย่างไรก็ตามเพื่อให้เพาเวอร์มอสเฟตทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด จึงจำเป็นต้องศึกษาเงื่อนไขต่างๆ สำหรับการบังคับให้เพาเวอร์มอสเฟตนำกระแสเป็นอันดับแรกเสียก่อน

2.4.5.3 ค่าความจุไฟฟ้าด้านอินพุต (Input Capacitance)

เนื่องจากลักษณะโครงสร้างภายในตัวเพาเวอร์มอสเฟตเหมือนกับมีตัวเก็บประจุอยู่รอบๆ ขาต่างๆ ของเพาเวอร์มอสเฟต ตัวเก็บประจุเหล่านี้บังคับให้เพาเวอร์มอสเฟตต้องชาร์จประจุเข้าไปที่ตัวเก็บประจุเสียก่อน เพื่อให้แรงดันตกคร่อมที่ขาเกต V_{GS} มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดันขีดเริ่มเพาเวอร์มอสเฟตจึงเริ่มนำกระแส ในทางกลับกันการหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต จะต้องทำให้ตัวเก็บประจุคายประจุออกไปจนแรงดันตกคร่อมที่ขาเกต V_{GS} มีค่าลดลงต่ำกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มเพาเวอร์มอสเฟตจึงหยุดนำกระแส ลักษณะของกระแสและแรงดันที่ขาเกตจึงมีลักษณะดังภาพที่ 2-36 โดยทั่วไปแล้วค่าความจุของตัวเก็บประจุในตัวเพาเวอร์มอสเฟตนี้เองจะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการเปลี่ยนสถานะของเพาเวอร์มอสเฟต



ภาพที่ 2-36 ตัวเก็บประจุแฝงที่ต่ออยู่ที่ขาต่างๆ ภายในตัวเพาเวอร์มอสเฟต



ภาพที่ 2-37 ลักษณะกระแสและแรงดันที่ขาเกตขณะเพาเวอร์มอสเฟตถูกไบอัสให้นำกระแส

2.5 วงจรควบคุมการทำงานสำหรับคอนเวอร์เตอร์

การควบคุมแรงดันขาออกของวงจรคอนเวอร์เตอร์ทำได้โดยการควบคุมค่าอัตราดิวตี้ไซเคิล ซึ่งมี 2 ทฤษฎี ที่ใช้ในการควบคุมแรงดันขาออก คือ

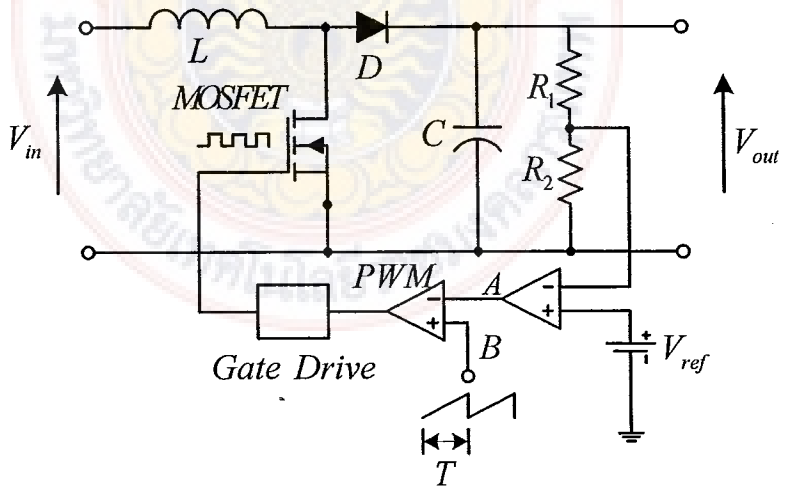
1) ควบคุมโดยให้ความถี่ในการสับสวิตช์คงที่ คือการใช้ความถี่การสับสวิตช์มีค่าคงที่ และทำการปรับดิวตี้ไซเคิลของสวิตชิ่งเพื่อที่จะควบคุมค่าแรงดันเฉลี่ยขาออก การควบคุมชนิดนี้รู้จักกันในชื่อ พัลส์วิดซ์มอดูเลชั่น (Pulse Width Modulation ; PWM)

2) ควบคุมโดยให้ความถี่ในการสับสวิตช์เปลี่ยนแปลง คือการใช้ความถี่ในการสับสวิตช์แปรเปลี่ยนไป โดยอาจให้ช่วงเวลาในการเปิดหรือปิดของสวิตชิ่งมีค่าคงที่ ซึ่งเรียกว่า พัลส์ฟีเควนซี่มอดูเลชั่น (Pulse Frequency Modulation ; PFM)

เนื่องจากคอนเวอร์เตอร์เกือบทุกแบบจะคงค่าแรงดันเอาต์พุตได้ด้วยการควบคุมช่วงเวลานำกระแสของสวิตชิ่งวงจรควบคุมการทำงานของบูสคอนเวอร์เตอร์ โดยทั่วไปใช้เทคนิคการพลัสวิดซ์มอดูเลชั่น เป็นหลักการใช้ PWM เพื่อควบคุมการนำกระแสค่าของสวิตช์ในคอนเวอร์เตอร์สามารถทำได้ใน 2 ลักษณะการทำงานของวงจรควบคุม คือ ในโหมดควบคุมวงจรแรงดันและในโหมดควบคุมกระแส

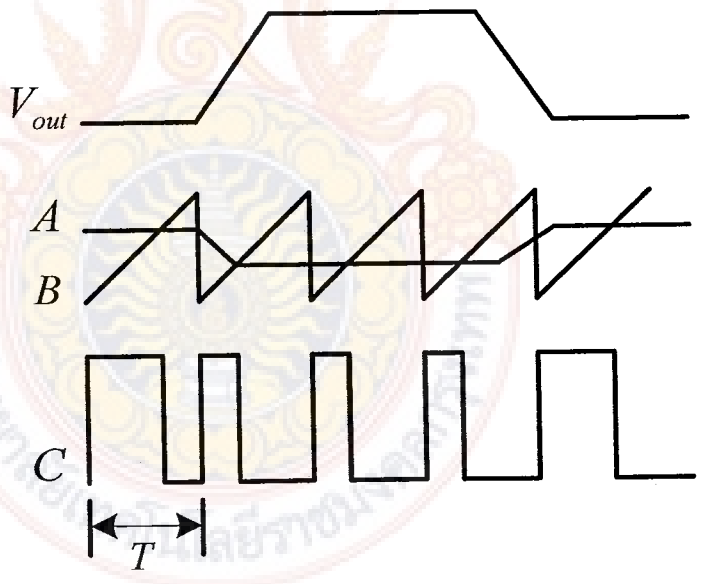
2.5.1 วงจรควบคุมในโหมดแรงดัน (Voltage Mode Control)

การทำงานของวงจรควบคุมในโหมดนี้จะอาศัยการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันที่เอาต์พุตมาควบคุมช่วงเวลานำกระแสของสวิตชิ่งเพื่อคงค่าแรงดันเอาต์พุตพื้นฐานของวงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากแรงดัน ดังในภาพที่ 2-38



ภาพที่ 2-38 วงจรพื้นฐานสำหรับการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ในโหมดควบคุมแรงดัน

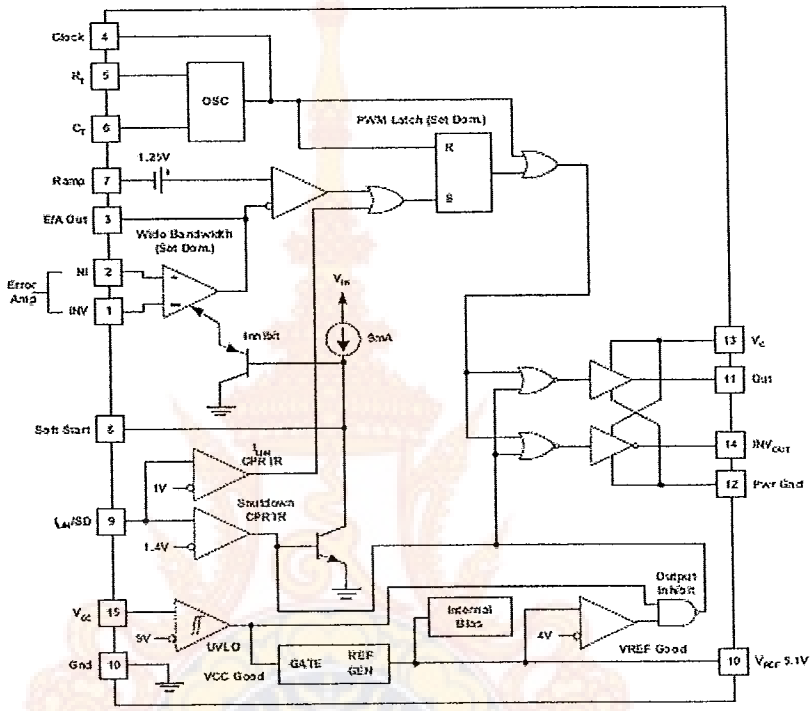
วงจรควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตคงที่โดยจะอาศัยการป้อนกลับค่าแรงดันที่เอาต์พุต และการเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) ของวงจรเพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่เอาต์พุตค่าแตกต่างที่ได้จะถูกขยายความแตกต่าง (E/A) ก่อนที่จะส่งไปยังวงจร PWM โดยค่าแรงดันที่ได้จากวงจรขยายความแตกต่างที่ตำแหน่ง A จะถูกเปรียบเทียบกับแรงดันรูปฟันเลื่อยที่ตำแหน่ง B ของ PWM อีกครั้งหนึ่ง เอาต์พุตที่ได้จากวงจร PWM จะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยม ซึ่งมีคาบเวลาคงที่เท่ากับคาบเวลาของแรงดันรูปฟันเลื่อยและมีความกว้างของพัลส์เปลี่ยนไปตามผลการเปรียบเทียบของค่าแรงดันที่ตำแหน่ง A และ B ค่าความกว้างของพัลส์นี้จะเป็นตัวกำหนดช่วงเวลานำกระแสของสวิตช์ในบูสคอนเวอร์เตอร์ เนื่องจากค่าแรงดันป้อนกลับจะถูกส่งมายังวงจรขยายความแตกต่างที่ขาอินเวอร์ติ้ง ผลต่างของแรงดันเอาต์พุตและแรงดันอ้างอิงที่จุด A จึงมีลักษณะต่างเฟสอยู่ที่ 180 องศา กล่าวคือ เมื่อแรงดันเอาต์พุตมีค่ามากขึ้น แรงดันที่จุด A จะมีค่าลดลง ความกว้างพัลส์ที่เอาต์พุตของวงจร PWM จึงมีค่าลดลงด้วย และช่วงเวลาการนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟสก็จะมีค่าลดลง ถ้าแรงดันเอาต์พุตลดลงแรงดันที่จุด A จะมีค่าเพิ่มขึ้นความกว้างพัลส์ที่เอาต์พุตของวงจร PWM จึงมีค่าเพิ่มขึ้น (t_{on}) ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้บูสคอนเวอร์เตอร์สามารถคงค่าแรงดันไว้ได้



ภาพที่ 2-39 ลักษณะความกว้างของเอาต์พุตพัลส์ของ PWM

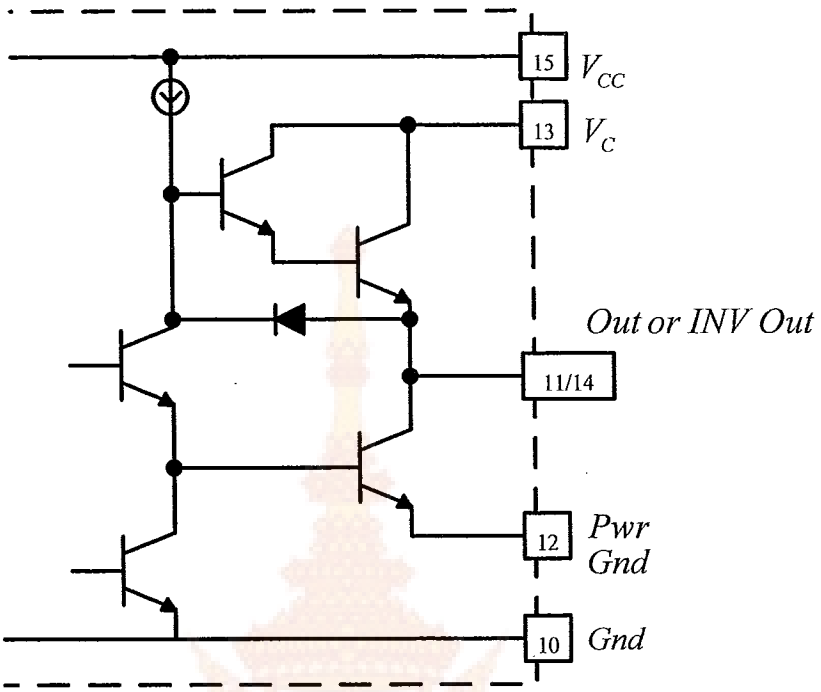
2.6 ไอซีที่ใช้ในการควบคุม UC3824

ไอซีเบอร์ UC3824 เป็นไอซีที่ออกแบบมาเพื่อใช้ควบคุมการทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ โดยทำงานด้วยโหมดควบคุมจากแรงดันหรือโหลดกระแสโครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซีเบอร์ UC3824 ดังแสดงด้วยภาพที่ 2-40



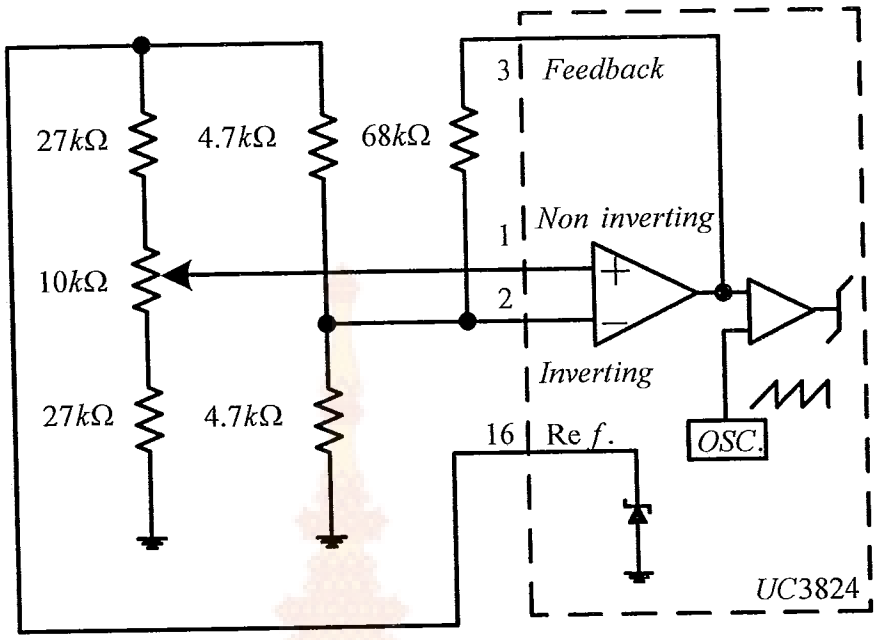
ภาพที่ 2-40 โครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซีเบอร์ UC3824

ความกว้างของเอาต์พุตพัลส์ของไอซี จะได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณฟันเลื่อยที่ขา 7 กับแรงดันที่ได้จากวงจรขยายความต่าง (Error Amp) ถ้าแรงดันที่มาจากวงจรขยายความต่างมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ความกว้างของเอาต์พุตพัลส์ของไอซีลดลง ในทางกลับกันถ้าแรงดันจากวงจรขยายความต่างมีค่าลดลงจะทำให้ความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซีเพิ่มขึ้นความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซีนี้สามารถกำหนดให้มีค่ามากสุดหรือมีค่าเท่ากับศูนย์ได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขา 3 จาก 0.5 – 5.1 โวลต์ การเลือกใช้งานเอาต์พุตพัลส์ของไอซีที่ขา 11 และขา 14 โดยที่ขาทั้ง 2 นี้จะทำงานตรงกันข้ามกันเสมอ โดยใช้การสลับการทำงานตามจังหวะของ Flip Flop เพื่อใช้ขับวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

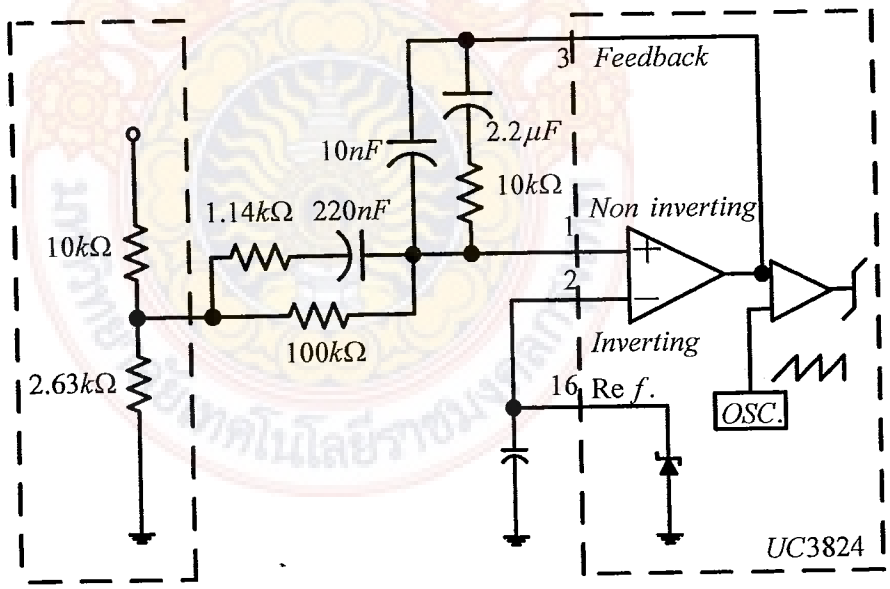


ภาพที่ 2-41 การเลือกใช้งานเอาต์พุตของไอซีเบอร์ UC3824

ไอซีเบอร์ UC3824 ต้องการไฟเลี้ยง 8 – 30 โวลต์ มีแรงดันอ้างอิงภายใน 5.1 โวลต์ และสามารถจ่ายกระแสได้ถึง 100 มิลลิแอมป์ เพื่อนำไปใช้กับวงจรภายนอกได้ โดยมีค่าความถูกต้อง ±15% ความคลาดเคลื่อนทางอุณหภูมิมีค่าน้อยกว่า 50 มิลลิโวลต์ เมื่อทำงานในช่วง 0 – 70 องศาเซลเซียส สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงสุด 1 MHz สามารถแสดงการต่อใช้งานไอซีเบอร์ UC3824 สำหรับวงจรแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทั้งแบบ Open loop และ Close loop เป็นต้น



ภาพที่ 2-42 การต่อใช้งานวงจรควบคุมไอซีแบบ Open loop



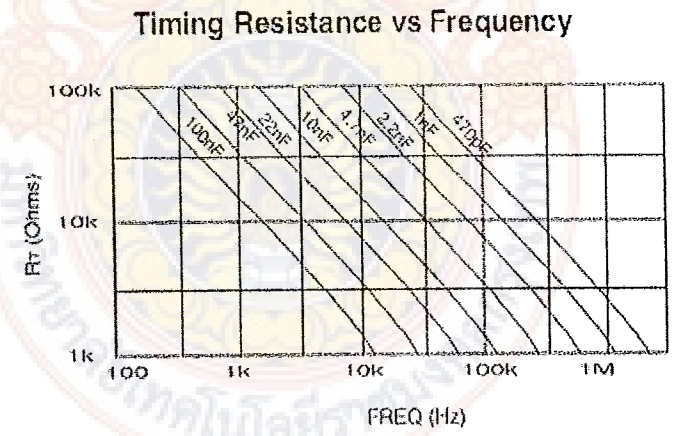
ภาพที่ 2-43 การต่อใช้งานวงจรควบคุมไอซีแบบ Close loop

จากภาพที่ 2-41 เป็นการต่อใช้งานแบบ Open loop จะใช้แรงดันที่ขา 1 เป็นแรงดันอ้างอิง โดยแบ่งแรงดันจากขา 16 ให้เหลือ 2.5 โวลต์ ส่วนที่ขา 2 จะเป็นแรงดันที่จะปรับเข้าไปวัดผลต่างกับแรงดันอ้างอิงและขาที่ 3 จะเป็นขาที่ใช้ต่อตัวต้านทานที่ใช้ในการปรับค่าตัวขยาย

จากภาพที่ 2-42 เป็นการต่อใช้งานแบบ Close loop จะใช้แรงดันที่ขา 2 เป็นแรงดันอ้างอิงที่ 5.1 โวลต์ของขา 16 ส่วนขา 2 และ 3 จะใช้เป็นจุดต่อร่วมกับวงจร Compensation Network ซึ่งเป็นวงจรในการควบคุมแบบย้อนกลับ จะใช้โวลต์เตจดิไวเดอร์วัดสัญญาณแรงดันเอาต์พุตนำกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง

วงจรสร้างสัญญาณกำเนิดความถี่ไอซีเบอร์ UC3824 เป็นวงจรที่มีความถี่คงที่ คาบเวลาการทำงานของเอาต์พุตพัลส์กำหนดโดยค่าของ R_T และ C_T จากภายนอกที่ขา 5 และขา 6 ของไอซี ค่าคาบเวลาการทำงานกำหนดได้จากสมการที่ (2-44)

$$f = \frac{1}{C_T R_T} \tag{2-50}$$



ภาพที่ 2-44 กราฟความสัมพันธ์ของค่า R_T และ C_T ในการกำหนดความถี่

2.7 วงจรควบคุมการประจุและสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้า

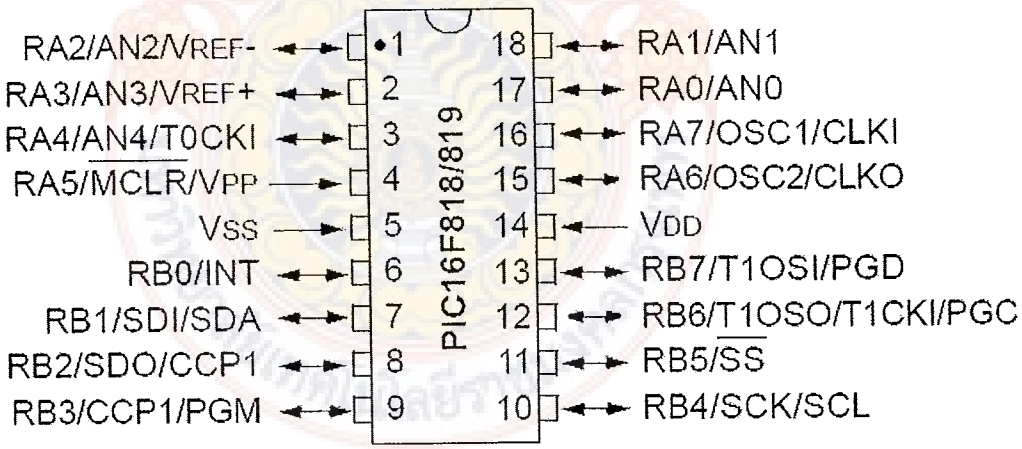
มีหน้าที่ควบคุมการประจุอัลตราคาปาซิเตอร์ โดยทั่วไปมีหน้าที่สำคัญ คือ

2.7.1 ตัดการประจุเมื่อแรงดันที่ อัลตราคาปาซิเตอร์ ถึงพิกัด เพื่อป้องกันการประจุเกิน (Over Charge)

2.7.2 ตัดการจ่ายพลังงานของอัลตราคาปาซิเตอร์ไปสู่ภาระทางไฟฟ้า เมื่ออัลตราคาปาซิเตอร์มีแรงดันไฟฟ้าต่ำ (Low Voltage Disconnect)

2.7.3 สั่งการให้จ่ายพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าเพียงพอสำหรับภาระทางไฟฟ้าและสำหรับการประจุ รวมถึงการจ่ายพลังงานจากอัลตราคาปาซิเตอร์ เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันไม่เพียงพอ

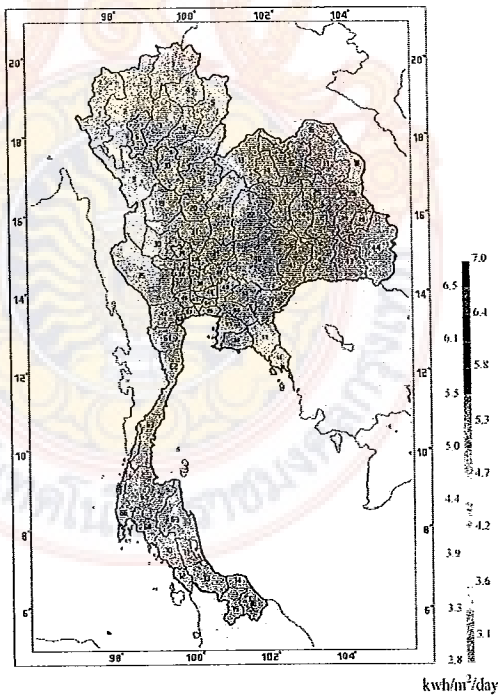
2.7.4 ไอซีที่ใช้ในการควบคุมการประจุและสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้า ไอซีเบอร์ PIC16F819 เป็นไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถทำการโปรแกรมให้อ่านค่าสัญญาณอนาลอกได้ รวมถึงนำค่าสัญญาณนั้นมาประมวลผลตามเงื่อนไขของโปรแกรมและแสดงผลออกมาเป็นตัวเลขได้เมื่อใช้ต่อร่วมกับจอ LCD หรือ 7 segment ด้านเอาต์พุตของไอซีสามารถนำสัญญาณไปขับอุปกรณ์ต่างๆได้เช่น BJT และ RELAY นอกจากนี้ขาต่างๆของไอซียังสามารถโปรแกรมให้ใช้งานได้หลายฟังก์ชัน



ภาพที่ 2-45 การจัดขาของไอซีเบอร์ PIC16F819

2.8 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย

ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2542) โดยกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานและคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากรพบว่าการกระจายของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ตามบริเวณต่างๆ ในแต่ละเดือนของประเทศ ได้รับอิทธิพลสำคัญจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดระหว่างเดือนเมษายน และพฤษภาคม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 20 ถึง 24 MJ/m^2-day(5.55 – 6.66 kwh/m^2-day) เมื่อพิจารณาแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีพบว่าบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดเฉลี่ยทั้งปีอยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือโดยครอบคลุมบางส่วนของจังหวัดนครราชสีมา บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ ร้อยเอ็ด ยโสธร อุบลราชธานีและอุดรธานีและบางส่วนของภาคกลางที่จังหวัดสุพรรณบุรี ชัยนาท อยุธยา และลพบุรีโดยได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี 19 ถึง 20 MJ/m^2-day (5.27 – 5.55 kwh/m^2-day) พื้นที่ดังกล่าวคิดเป็น 14.3% ของพื้นที่ทั้งหมดของประเทศ นอกจากนี้ยังพบว่า 50.2% ของพื้นที่ทั้งหมดได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี ในช่วง 18-19 MJ/m^2-day (5.00 – 5.27 kwh/m^2-day) จากการคำนวณรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศพบว่ามีค่าเท่ากับ 18.2 MJ/m^2-day (5.05 kwh/m^2-day) จากผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง



ภาพที่ 2-46 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย

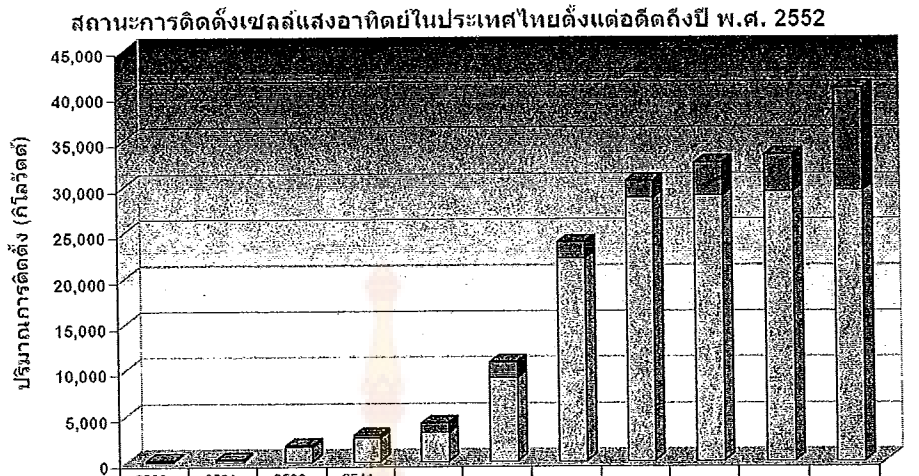
ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ออน-ไลน์

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้ดำเนินการจัดทำโครงการด้านพลังงานแสงอาทิตย์ทั่วประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2526-2552 จำนวนทั้งสิ้น 1,456 แห่ง ขนาดกำลังการผลิต 3,349.491 กิโลวัตต์ โดยแบ่งออกเป็นระบบต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 2-5 โครงการด้านพลังงานแสงอาทิตย์ทั่วประเทศไทย

ระบบ	แห่ง	กิโลวัตต์
ระบบประจุแบตเตอรี่สำหรับหมู่บ้านชนบท	353	1025.5
ระบบผลิตไฟฟ้าสำหรับโรงเรียนชนบทและโรงเรียนชนบทเพื่อขยายกำลังผลิต	217	946.5
ระบบผลิตไฟฟ้าสำหรับศูนย์การเรียนรู้ชุมชน	157	235.5
ระบบผลิตไฟฟ้าสำหรับโรงเรียนตำรวจตระเวนชายแดน	38	100.75
ระบบผลิตไฟฟ้าสำหรับฐานปฏิบัติการทางทหารและตำรวจตระเวนชายแดน	415	93.375
ระบบผลิตไฟฟ้าสำหรับสถานีอนามัย	83	166
ระบบผลิตไฟฟ้าสำหรับเขตพื้นที่ป่าสงวนแห่งชาติและอุทยานแห่งชาติ	40	120
ระบบผลิตไฟฟ้าเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า	15	202.2
ระบบผลิตไฟฟ้าในพื้นที่โครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ	67	275.666
ระบบสูบน้ำสำหรับหมู่บ้านชนบท	65	130
ระบบสูบน้ำสำหรับสถานีอนามัย	1	4
ระบบ Mini Grid สำหรับหมู่บ้าน	5	50
รวม	1,456	3,349.491

สำหรับการใช้งานด้านพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยนับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2526-2552 พบว่า มีหน่วยงานทั้งในส่วนของภาครัฐ สถาบันการศึกษาและเอกชน ได้ดำเนินการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบสูบน้ำด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงระบบการสื่อสารด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เป็นจำนวนถึง 40,568.833 กิโลวัตต์



	2526-2530	2531-2535	2536-2540	2541-2545	2546	2547	2548	2549	2550	2551	2552
grid-connected	120.000	122.100	139.360	319.490	1,095.004	1,761.036	1,773.536	1,863.274	3,606.264	4,057.224	11,144.82
off-grid	30.283	119.033	1,640.248	2,570.119	3,128.634	9,070.254	22,107.18	28,660.28	28,900.73	29,336.00	29,491.00

ที่มา : พพ. ยธ. กฟผ. กฟภ. กฟน. สวทช. สอท. กท. ตช. มจธ. มน. มก. มท. สนพ. TEI. โรงงานชอเฮง. บ.บางกอกโซล่าร์ จำกัด.
จัดทำโดย : สำนักพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน เมื่อเดือนกุมภาพันธ์ 2553

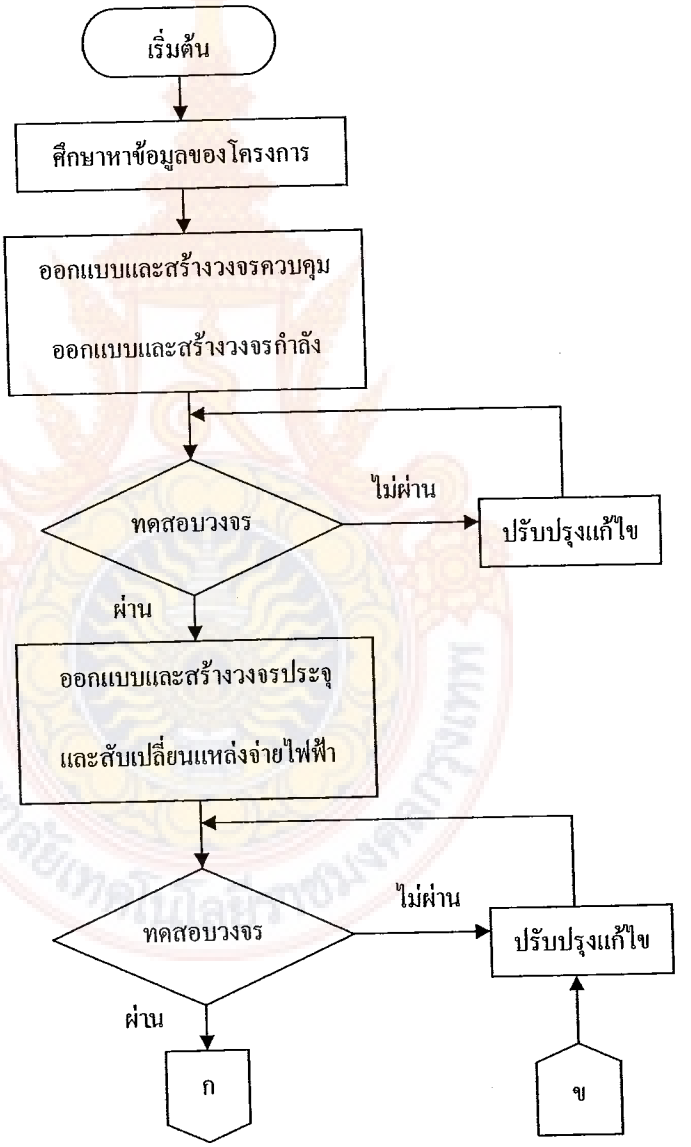
ภาพที่ 2-47 แผนภูมิการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย
ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ออน-ไลน์

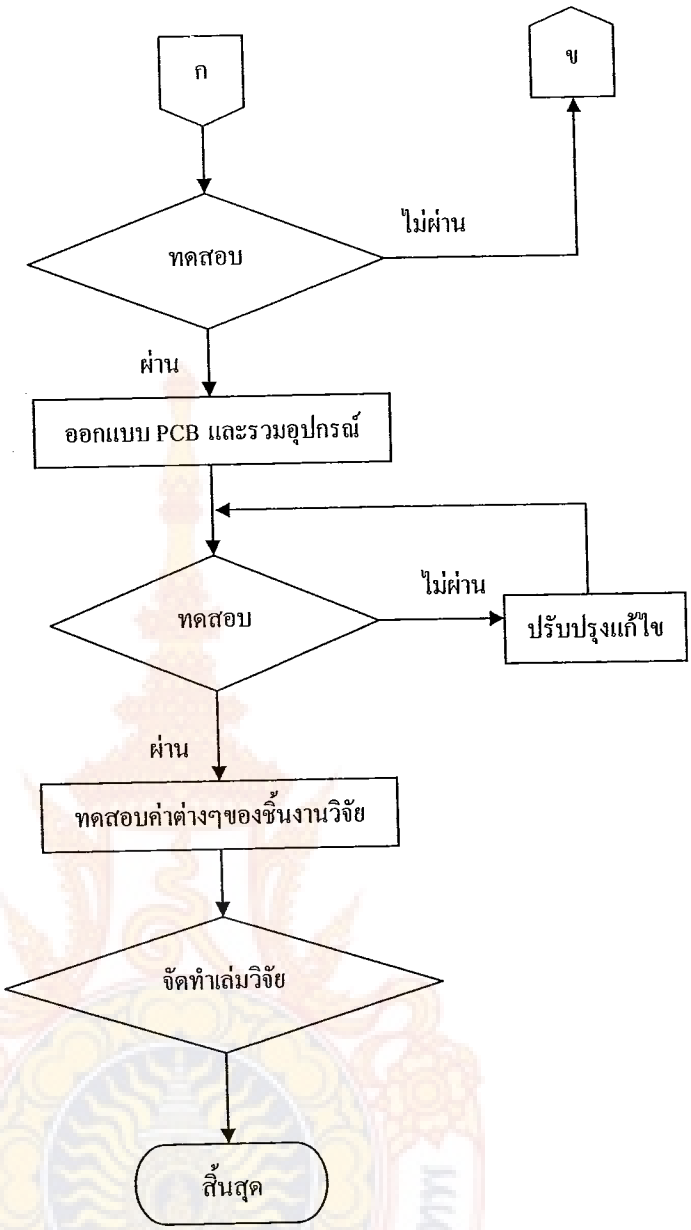
ปัจจุบันได้มีการให้ความสำคัญกับพลังงานแสงอาทิตย์มากขึ้นเนื่องด้วยเล็งเห็นถึงพลังงานของโลกที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเริ่มจะหมดไป พลังงานแสงอาทิย์จึงเข้ามามีบทบาทมากในการเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับพลังงานทดแทนในอนาคต ในประเทศไทยเริ่มนำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาที่ถูกลงกว่าสมัยก่อนมากจึงเป็นที่นิยมในปัจจุบันอีกทั้งยังมีการใช้ในโครงการพระราชดำริต่างๆ รวมถึงหน่วยงานจากภาครัฐและเอกชนให้การสนับสนุนในโครงการต่างๆอีกมากมายทำให้มีการใช้งานเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังเห็นได้จากภาพที่ 2-47 จะเห็นได้ว่า จากอดีตจนถึงปัจจุบันมีแนวโน้มในการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ

บทที่ 3

การออกแบบงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการออกแบบเพื่อสร้างแหล่งจ่ายไฟแบบไฮบริดจ์ ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆซึ่งอธิบายด้วยแผนผังการทำงานดังภาพที่ 3-1

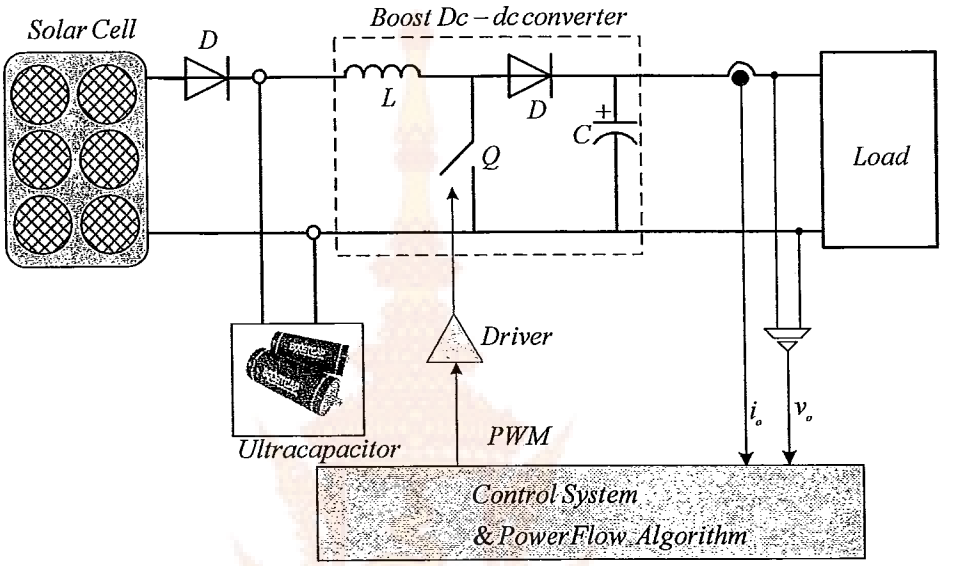




ภาพที่ 3-1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 การศึกษาข้อมูล

จากการศึกษาข้อมูลรวมถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการสร้างแหล่งจ่ายไฟแบบบูสคอนเวอร์เตอร์จาก อัลตราคาปาซิเตอร์โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์เขียนเป็นผังโครงสร้างของงานวิจัยได้ดังนี้



ภาพที่ 3-2 แผนผังโครงสร้างแหล่งจ่ายไฟแบบบูสคอนเวอร์เตอร์จากอัลตราคาปาซิเตอร์โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์

จากแผนผังโครงสร้างในภาพที่ 3-2 สามารถอธิบายการทำงานของแหล่งจ่ายไฟแบบบูสคอนเวอร์เตอร์จาก อัลตราคาปาซิเตอร์ ได้ดังนี้

3.1.1 INPUT ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 70 วัตต์ 17.6 โวลต์ 4.38 แอมป์ โดยระดับแรงดันอินพุตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีระดับแรงดันระหว่าง 12 – 24 โวลต์ดีซี ตามความเข้มของแสงอาทิตย์

3.1.2 อัลตราคาปาซิเตอร์ ขนาด 1200 ฟารัด 2.7 โวลต์ อนุกรมกัน 5 ตัว 2 ชุด ได้ความจุ 240 ฟารัด 13.5 โวลต์ ทำหน้าที่เก็บและจ่ายพลังงานเมื่อโหลดต้องการพลังงานชั่วขณะ

3.1.3 POWER UNIT เป็นส่วนภาคกำลังของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือวงจรกำลัง และวงจรกรองแรงดัน โดยวงจรกรองกำลังจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแปลงระดับ

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากระดับหนึ่งเป็นอีกระดับที่สูงขึ้น โดยทำงานตามหลักการของวงจรทบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แต่แรงดันที่ได้จากวงจรกำลังจะยังมีส่วนของแรงดันกระเพื่อมรวมออกมา ดังนั้นแรงดันที่ได้จะต้องผ่านวงจรกรองแรงดัน เพื่อลดแรงดันกระเพื่อมที่รวมออกมา

3.1.4 CONTROL UNIT ในส่วนของวงจรควบคุม จะใช้ไอซีกำเนิดพัลส์วิดซ์มอดูเลชั่น เบอร์ UC3824 ในการควบคุมการทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ความถี่ที่ใช้ 100 kHz โดยจะนำสัญญาณแรงดันเอาต์พุตและสัญญาณกระแสเอาต์พุตป้อนกลับมาทำการเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงของชุดชดเชยระบบ เพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปควบคุมการทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ เพื่อช่วยให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์คงที่

3.1.5 OVER CURRENT PROTECTION ทางด้านเอาต์พุตจะมีวงจรป้องกันในส่วนของกระแสเอาต์พุต โดยเมื่อกระแสเอาต์พุตมีค่าสูงเกินกว่าที่ตั้งไว้และเมื่อเกิดการลัดวงจร วงจรป้องกันส่วนนี้จะทำการตัดวงจรทางด้านเอาต์พุตออกจากโหลดเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น

3.2 การออกแบบวงจรกำลังของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

วงจรกำลังของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ ตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิตช์ ตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุต วงจรกำลังต้องมีความสามารถในการทำงานได้ปกติที่ขนาดพิกัดกระแส แรงดัน และความถี่ที่ใช้งานนี้ที่ 100 kHz ซึ่งเป็นความถี่ในการสวิตชิ่งของอุปกรณ์สวิตช์ และเนื่องจากแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ แต่ละตัวยังมีส่วนของแรงดันกระเพื่อมอยู่ ดังนั้นจึงต้องผ่านวงจรกรองแรงดันเพื่อลดแรงดันกระเพื่อม

ในวงจรกำลังจะประกอบไปด้วยการออกแบบส่วนต่างๆ ดังนี้

1) การคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง
2) การเลือกอุปกรณ์ในการสวิตช์
3) การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุต
4) การเลือกไดโอดความถี่สูง

3.2.1 การคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง

วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมาก เนื่องจากมีหน้าที่ในการเก็บและคายพลังงานเป็นผลให้ระดับแรงดันทางด้านเอาต์พุตมีค่าสูงกว่าระดับแรงดันทางด้านอินพุต การคำนวณหาค่าของตัวเหนี่ยวนำสามารถหาได้จาก

$$L = \frac{V_s D}{f \Delta I} \tag{3.1}$$

เมื่อ L คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำ

V_s คือ แรงดันอินพุต

D คือ ดิวตี้ไซเคิล

f คือ ความถี่ที่ใช้ในวงจร

ΔI คือ กระแสกระเพื่อมทางอินพุต

$$D = \frac{(V_O - V_S)}{V_O} = \frac{(24-12)}{24} = 0.5$$

แทนค่าในสมการที่ (3.1) เพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำ

$$L = \frac{12 \times 0.5}{100 \times 10^3 \times 0.12} = 500\,\mu H$$

เมื่อได้ค่าของตัวเหนี่ยวนำแล้วจะหาขนาดของแกนที่ใช้โดยเลือกชนิดของแกนเป็นแกนเฟอไรต์ เพราะมีค่าสูญเสียต่ำเมื่อทำงานที่ความถี่สูง การคำนวณขนาดใช้วิธีการคำนวณแบบ A_P (Area Approach) วิธีนี้เป็นการออกแบบเพื่อใช้ค่า T_{rise} ซึ่งอยู่ในรูปของความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำ $\left(J = 100 - 1000 A/cm^2\right)$ โดยคำนวณหาขนาดของแกนเฟอไรต์ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 จากขีดจำกัดและข้อกำหนดในการคำนวณหาค่า A_p ในการกำหนดค่าต่างๆ ดังนี้ $J = 4A/mm^2 = 4\times10^6 A/m^2$, $k = 0.45$ กระแสอินพุต $(I_{rms}) = 3.53A$ กระแสอินพุตสูงสุด $(I_{peak}) = 5A$ และ $B = 0.25$ แทนค่า ลงในสมการที่ 3.2

$$A_p = \frac{LI_{peak}I_{rms}}{BJk} \tag{3.2}$$

$$= \frac{500\times10^{-6}\times5\times3.53}{0.25\times4\times10^6\times0.45}$$

$$= 19.611\times10^{-9} \approx 19611 mm^3$$

ขั้นตอนที่ 2 เลือกขนาดของแกนเฟอไรต์ที่มีค่า A_p มากกว่าที่ได้คำนวณมาจากขั้นตอนที่ 1 เนื่องจากถ้าเลือก A_p น้อยกว่าที่คำนวณได้อาจจะทำให้ไม่ได้ค่าต่างๆ ตามต้องการ โดยจะเลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์เบอร์ ETD59 ซึ่งมีค่าต่างๆ ดังนี้

$A_p = 51500 mm^3$, $A_W = 366 mm^2$, $S = 368 mm^2$

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดให้ $L = 500\,\mu H$, $I_{peak} = 5\,A$, $B = 0.25$, และ $S = 368\,mm^2$ แทนค่าเพื่อหาจำนวนรอบของขดลวดตัวเหนี่ยวนำจะได้ ดังนี้

$$N = \frac{LI_{peak}}{BS} \tag{3.3}$$

$$= \frac{500\times10^{-6}\times5}{0.25\times368\times10^{-6}} = 27 \text{ รอบ}$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาขนาดของขดลวดตัวนำ A_w

$$A_w = \frac{I_{rms}}{J} \tag{3.4}$$

$$= \frac{3.53A}{4\times10^6 A/m^2}$$

$$= 0.88\,mm^2$$

ขั้นตอนที่ 5 เลือกเบอร์ลวดทองแดงให้มี A_w ใหญ่กว่า A_w ที่ได้จากการคำนวณจากขั้นตอนที่ 4 โดยคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดได้จาก สมการที่ 3.5

$$d = \sqrt{\frac{4A_w}{\pi}} \tag{3.5}$$

$$= \sqrt{\frac{4\times0.88mm^2}{\pi}}$$

$$= 1.058\,mm$$

เลือกขดลวดเบอร์ 26 มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าที่คำนวณได้ เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางมีผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ถ้าค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้กระแสจะไหลได้ไม่ถึงที่ต้องการ ทำให้กระแสไหลไม่ต่อเนื่อง

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของขดลวดที่ใช้งานจริงว่าสามารถนำไปใช้กับแกนเฟอไรต์ได้หรือไม่

$$A_W = \frac{\pi d^2}{4} \tag{3.6}$$

$$= \frac{\pi (1.058)^2}{4}$$

$$= 0.88\, mm^2$$

$$W = \frac{N \times A_W}{k} \tag{3.7}$$

$$= \frac{27 \times 0.88}{0.45}$$

$$= 52.8\, mm^2$$

ดังนั้นจะได้ W ที่ใช้ได้จะมีค่า $\leq 366\, mm^2$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาค่าความกว้างของ Air Gab (l_g)

$$l_g = \frac{\mu_o N^2 S}{2L} \tag{3.8}$$

$$= \frac{4\pi \times 10^{-7} \times (27)^2 \times 368 \times 10^{-6}}{2 \times 500 \times 10^{-6}}$$

$$= 0.9\,mm$$

3.2.2 การเลือกอุปกรณ์สวิตช์

อุปกรณ์สวิตช์ในวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ควรเลือกอุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูงเวลาในการเปลี่ยนสถานะค่อนข้างสั้น ในโครงงานนี้ได้เลือกใช้เพาเวอร์มอสเฟตทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สวิตช์ เพราะนอกจากสามารถทำงานที่ความถี่สูงตั้งแต่ 30 –400 kHz แล้วเวลาในการสับสวิตช์อยู่ในช่วงนาโนวินาที และในวงจรเพาเวอร์มอสเฟตนั้น สามารถทำได้ง่ายเพราะควบคุมด้วยแรงดันและต้องการกระแสอินพุตค่าต่ำๆ เท่านั้น

3.2.3 การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุต

ในวงจรกำลังของวงจรทบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุตของวงจรมีหน้าที่ในการเก็บพลังงานรูปของประจุไฟฟ้าและทำการจ่ายแรงดันออกให้กับเอาต์พุต โหลดหรือคายประจุไฟฟ้าเมื่ออุปกรณ์สวิตช์ T_{on} และทำการเก็บประจุ เมื่ออุปกรณ์สวิตช์ T_{off} ดังนั้นจำเป็นต้องเลือกตัวเก็บประจุที่สามารถทนแรงดันได้เท่าหรือมากกว่าแรงดันเอาต์พุต หากเลือกตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะมีส่วนช่วยในการลดแรงดันกระเพื่อมทางด้านเอาต์พุต การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุตหาได้จาก สมการที่ 3.9

$$C = \frac{I_O D}{f \Delta V_O} \tag{3.9}$$

เมื่อ C คือ ค่าตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุต

I_O คือ แรงดันทางด้านอินพุต

D คือ ดิวตี้ไซเคิล

f คือ ความถี่ที่ใช้ในวงจร

ΔV_O คือ แรงดันกระเพื่อมทางด้านเอาต์พุต

แทนค่าลงในสมการที่ 3.9 เพื่อหาค่าตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุต

$$C \geq \frac{2 \times 0.5}{100 \times 10^3 0.024} \geq 416.6\,\mu F$$

ดังนั้น ควรเลือกขนาดตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุตของวงจรที่มีค่าสูงกว่า $416.6\mu F$ และแรงดันที่ทนได้ต้องไม่ต่ำกว่าแรงดันเอาต์พุต โครงงานนี้ได้เลือกใช้ขนาดตัวเก็บประจุทางด้านเอาต์พุต $6800\mu F$ ทนแรงดันได้ 35 โวลต์

ในการเลือกค่าตัวเก็บประจุใช้ค่าที่มีความจุยิ่งสูงจะทำให้แรงดันกระเพื่อมทางด้านเอาต์พุตมีค่าลดลง แต่ค่าความจุของตัวเก็บประจุจะต้องไม่น้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ ถ้าเลือกตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุและอัตราทนแรงดันสูงๆ ราคาก็จะสูงตามไปด้วย จึงต้องเลือกขนาดให้เหมาะสมกับการใช้งาน

3.2.4 การเลือกไดโอดความถี่สูง

ไดโอดที่ใช้ในวงจรกำลังของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สูง ไดโอดที่ใช้งานในวงจรเร็กติไฟเออร์โดยทั่วไปจะไม่สามารถนำมาใช้งานได้ การเลือกใช้งานไดโอดในวงจรกำลังของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์นั้นจำเป็นต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ ทำงานที่ความถี่สูงได้ และมีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำ

3.3 การออกแบบวงจรควบคุมวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

ในส่วนของวงจรที่ควบคุมการทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ จะทำหน้าที่ควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตคงที่ 24 โวลต์ โดยใช้การป้อนกลับของแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุต นอกจากนี้วงจรควบคุมยังทำหน้าที่ผลิตความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์

ในการออกแบบวงจรควบคุมจะประกอบไปด้วยวงจรต่างๆ ดังนี้

1) วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่

2) วงจรในโหมดควบคุมแรงดันและวงจรชดเชยระบบ

3.3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่

ไอซี UC3824 สามารถควบคุมการทำงานแบบ PWM โดยที่มีความถี่คงที่ ความถี่และคาบเวลาในการทำงานของเอาต์พุต กำหนดได้โดยค่าของ C_T และ R_T ที่ต่ออยู่ภายในที่ขา 5 และ 6 ของไอซี วงจรนี้จะทำหน้าที่กำเนิดความถี่และควบคุมความถี่ให้คงที่ ค่าความถี่สามารถหาได้จาก สมการที่ 3.10

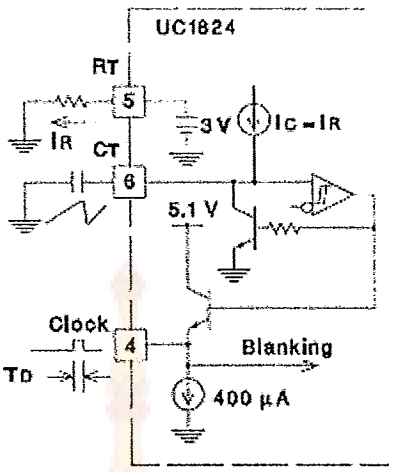
$$f = \frac{1}{R_T C_T} \tag{3.10}$$

เมื่อ f คือ ความถี่ในการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์

C_T กำหนดให้มีค่า $1nF$

ดังนั้น R_T มีค่า

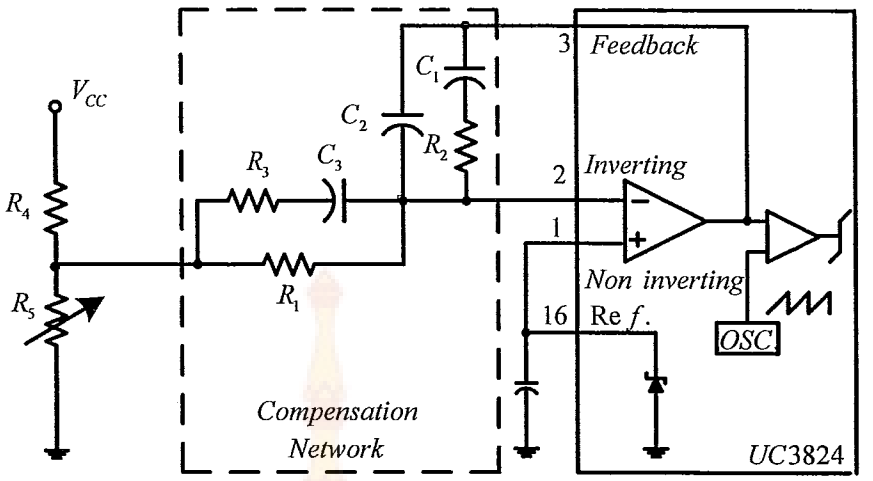
$$R_T = \frac{1}{100\times10^3\times1\times10^{-9}} = 10k\Omega$$



ภาพที่ 3-3 วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ของไอซี UC3824

3.3.2 วงจรควบคุมในโหมดแรงดันและวงจรชดเชยระบบ

การตรวจจับแรงดันเอาต์พุตจะใช้แบบแรงดันเอาต์พุต ซึ่งเป็นสัญญาณบวก ซึ่งจะใช้ค่าความต้านทาน R_1 และ R_2 โดยอาศัยหลักการแบ่งแรงดันมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง V_{ref} เมื่อแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลง จะทำให้ V_{error} มีค่ามากขึ้นและนำสัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่าง V_{error} และ V_{ref} ไปเข้ากับชุดชดเชยระบบ เพื่อใช้ในการปรับดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) โดยจะนำสัญญาณ V_{error} ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณ Ramp Oscillator ทำให้ได้สัญญาณ DTC Comp ไปควบคุมการเปิดและปิดของเพาเวอร์มอสเฟต วงจรนี้จะถูกควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่และชดเชยให้ระบบมีเสถียรภาพ



ภาพที่ 3-4 วงจรในโหมดควบคุมแรงดันและวงจรชดเชยระบบ

การหาค่าความต้านทาน R_1 และ R_2 จะใช้หลักการของวงจรแบ่งแรงดันคำนวณค่าได้จากสมการที่ 3.11

$$V_{out} = \left[\frac{R_1}{R_2} + 1\right] \times V_{ref} \tag{3.11}$$

เมื่อ V_{out} คือ แรงดันเอาต์พุตของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

V_{ref} คือ แรงดันอ้างอิงที่ขา 1 มีค่าเท่ากับขา 2 กำหนดให้มีค่า 5 โวลต์

R_1 คือ กำหนดให้มีค่า $10k\Omega$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.11 เพื่อหาค่า R_2 จะได้

$$24 = 5\left[\frac{10\times10^3}{R_2} + 1\right]$$

$$\therefore \quad R_2 = 2.632\,k\Omega$$

การคำนวณหาค่าอุปกรณ์ในวงจรชดเชยระบบ (Compensation Network)
สมการ Loop Transfer Function ดังนี้

$$\left|G_L(S)\right|_{fc} = \left|G_C(S)\right|_{fc} \cdot \left|G_{PWM}(S)\right|_{fc} \cdot \left|G_{PS}(S)\right|_{fc} \cdot K_{FB} = 1$$

อัตราการขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง $\left|G_{PWM}(S)\right|$ หาได้จาก

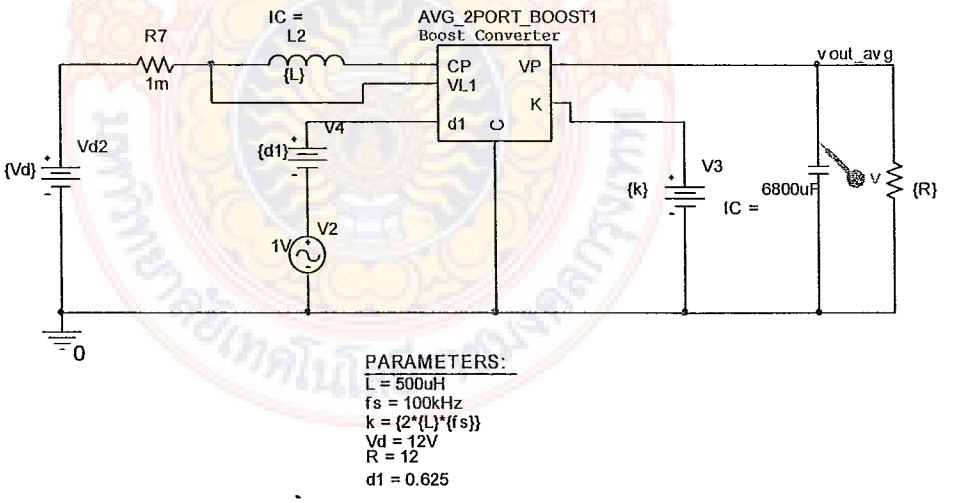
$$\left|G_{PWM}(S)\right|_{fc} = \frac{1}{V_r} = \frac{1}{1.8} = 0.556$$

เมื่อ V_r คือ Valley - to – peak of PWM ไอซี UC3824 = 1.8 โวลต์ อัตราขยายของ Output Voltage Sensing Network ของ Boost Convertor

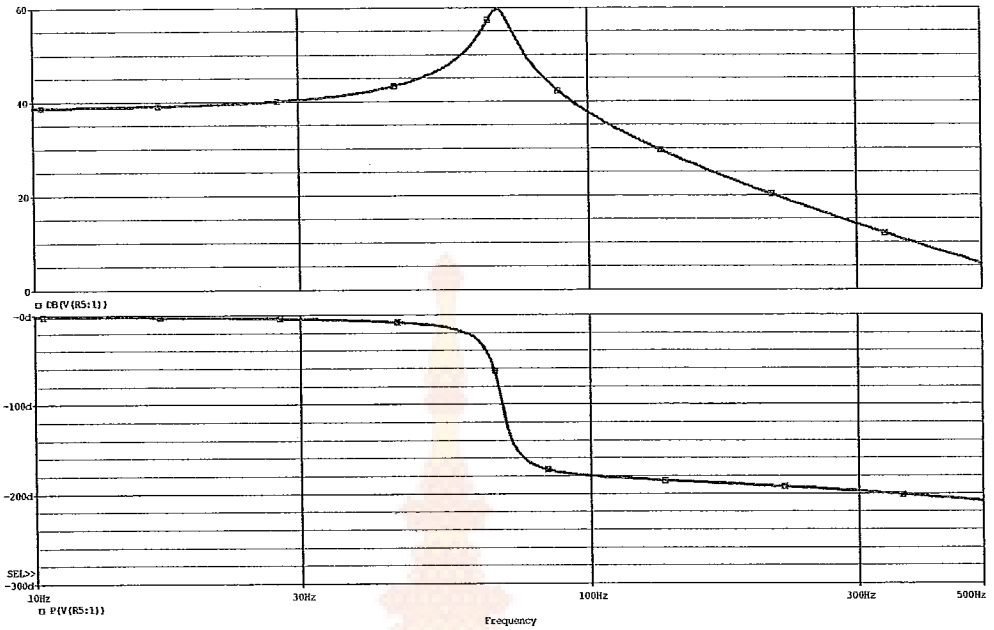
$$K_{FB} = 0.2$$

Power State of Boost Convertor $\left|G_{PS}(S)\right|_{fc}$

จำลองวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ โดยใช้โปรแกรม Orcad Pspic เพื่อหาความถี่ของ Bode Plot



ภาพที่ 3-5 จำลองวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม Orcad Pspice



ภาพที่ 3-6 ผลของการจำลองวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ ด้วยโปรแกรม Orcad /Pspice

จากผลของการจำลองดังภาพที่ 3-6 สามารถนำไปหาค่าต่างๆได้ดังนี้

เลือก $$fc = 100Hz$$

$$\left|G_{PS}(S)\right|_{fc} = 20db = 10$$

$$\angle\left|G_{PS}(S)\right|_{fc} = -185.42^{\circ}$$

$$\therefore \ \left|G_C(S)\right|_{fc} = \frac{1}{(0.556)(10)(0.2)} = 0.9$$

หาค่า ϕ_{boost} ได้จากสมการ

$$\phi_{boost} = -90^\circ + \phi_{PM} - \angle\left|G_{PS}(S)\right|_{fc}$$

ซึ่ง $\phi_{PM} = 60^\circ$ ซึ่งเป็นค่านิยมในการออกแบบ

$$\therefore \phi_{boost} = -90^\circ + 60^\circ + 185.49^\circ = 155.42^\circ$$

หาค่า K_{boost} ได้จาก

$$K_{boost} = \tan\left(45^\circ + \frac{\phi_{boost}}{4}\right)$$

$$= \tan\left(45^\circ + \frac{155.42^\circ}{4}\right)$$

$$= 9.28$$

หาค่า fz

$$fz = \frac{fc}{K_{boost}} = \frac{100}{9.28} = 10.77\,Hz \;\; ; \; \omega z = 2\pi(10.77) = 67.67\,rad$$

หาค่า fp

$$fp = (K_{boost})(fc) = (9.28)(100) = 928\,Hz \;\; ; \; \omega p = 2\pi(928) = 5830.8\,rad$$

หาค่า K_C

$$K_C = \left|G_C(S)\right|_{fc} \cdot \frac{\omega z}{K_{boost}} = \frac{(0.9)(67.67)}{9.28} = 5.56$$

กำหนดให้ $R_1 = 100k\Omega$

หาค่า C_2 ได้จาก

$$C_2 = \frac{\omega z}{K_C \omega_p R_1} = \frac{67.67}{(6.56)(5830.8)(100\times10^3)} = 17.7\,nF$$

หาค่า C_1 ได้จาก

$$C_1 = C_2\left(\frac{\omega p}{\omega z - 1}\right) = (17.7\times10^{-9})\left(\frac{5830.8}{67.67-1}\right) = 1.54\,\mu F$$

หาค่า R_2 ได้จาก

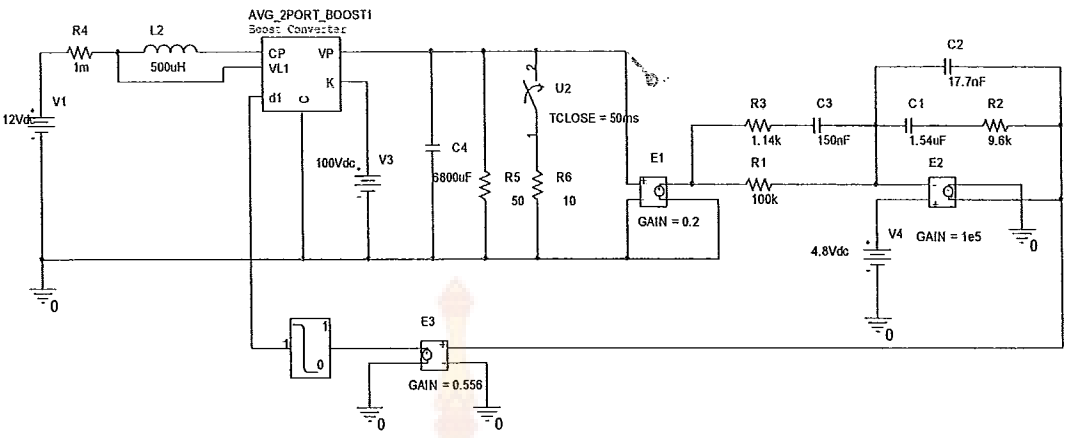
$$R_2 = \frac{1}{\omega z C_1} = \frac{1}{(67.67)(1.54\times10^{-6})} = 9.6\,k\Omega$$

หาค่า R_3 ได้จาก

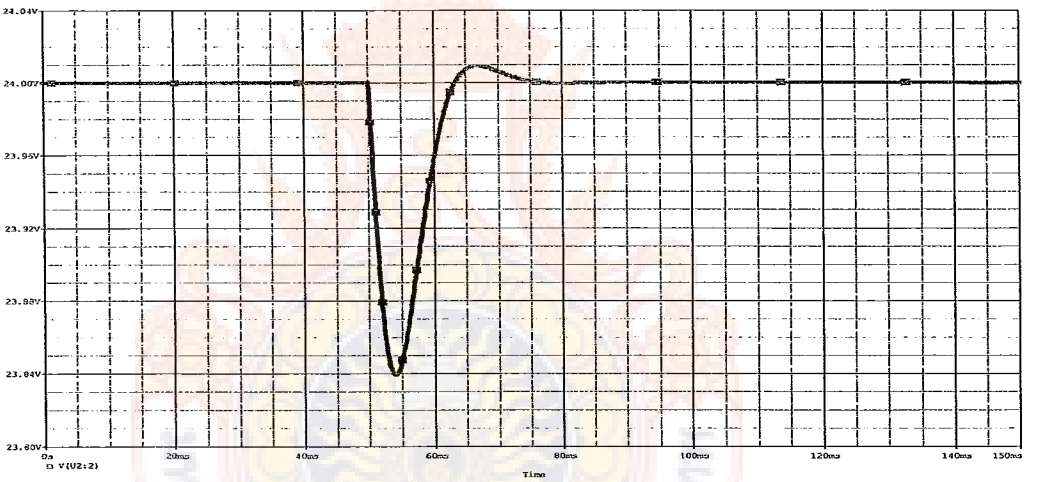
$$R_3 = \frac{R_1}{(\omega p)/(\omega z - 1)} = \frac{100\times10^3}{(5830.8)/(67.67-1)} = 1.14\,k\Omega$$

หาค่า C_3 ได้จาก

$$C_3 = \frac{1}{\omega p R_3} = \frac{1}{(5830.8)(1.14\times10^3)} = 150\,nF$$



ภาพที่ 3-7 วงจรจำลองผลการตอบสนองวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ ด้วยโปรแกรม Orcad Pspice



ภาพที่ 3-8 ผลการตอบสนองวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ ด้วยโปรแกรม Orcad Pspice

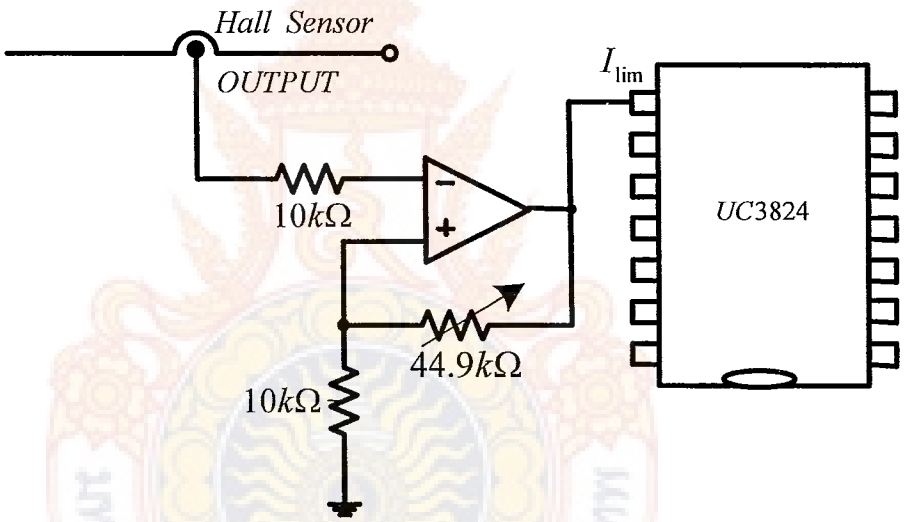
จากภาพที่ 3-8 จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองเมื่อเราทำการป้อนกลับวงปิด และออกแบบตัวควบคุมแล้วสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้เมื่อมีโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

3.4 การออกแบบวงจรป้องกัน

เนื่องจากวงจรของแหล่งจ่ายไฟแบบบูสคอนเวอร์เตอร์จากอัลตราคาปาซิเตอร์ โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีส่วนของวงจรป้องกัน หากเกิดปัญหาในเรื่องกระแสเอาต์พุตอาจจะก่อให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาดของวงจรและส่งผลทำให้อุปกรณ์ต่างๆ ภายในวงจรเกิดความเสียหายขึ้นได้จึงได้ทำการออกแบบวงจรป้องกันดังนี้

3.4.1 วงจรจำกัดกระแสด้านเอาต์พุต (Current Limit Circuit)

โครงงานนี้ออกแบบให้จ่ายกระแสโหลดได้ 2 แอมป์ และเพื่อป้องกันความเสียหาย เนื่องจากกระแสเกินกว่าที่ออกแบบไว้ จึงใช้วงจรจำกัดกระแสด้านเอาต์พุตและเพื่อการตรวจจับสัญญาณกระแสได้อย่างแม่นยำ โดยไม่เกิดค่าสูญเสียในรูปของความร้อนจึงเลือกใช้ Hall Sensor เป็นตัวตรวจจับกระแส



ภาพที่ 3-9 วงจรจำกัดกระแสด้านเอาต์พุต

เมื่อมีโหลดจะมีกระแสไหลส่งผลให้ Hall Sensor ส่งสัญญาณเป็นแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่วงจรปรับระดับสัญญาณ ซึ่งในที่นี้ใช้ออปแอมป์ *LF*351 จากนั้นจึงผ่านขา 9 ซึ่งสัญญาณแรงดันดังกล่าวจะนำไปเปรียบเทียบกับ V_{ref} จากขา 16 ใน *TL*598 หากกระแสไหลเกิน 2 แอมป์ จะส่งผลให้สัญญาณจากแรงดัน Hall Sensor มีมากกว่า V_{ref} ซึ่งจะทำให้เพาเวอร์มอสเฟตหยุดทำงาน

คำนวณหาค่า R_2 ได้ดังนี้

ที่ 2 แอมป์ Hall Sensor ส่งสัญญาณเป็นแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.8 โวลต์ เพื่อให้ได้เอาต์พุต เท่ากับ 5 โวลต์ ดังนั้นอัตราการขยายเท่ากับ 2.5 เท่า

$$A_V = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

กำหนดให้ $R_1 = 1k\Omega$

แทนค่าหา R_2

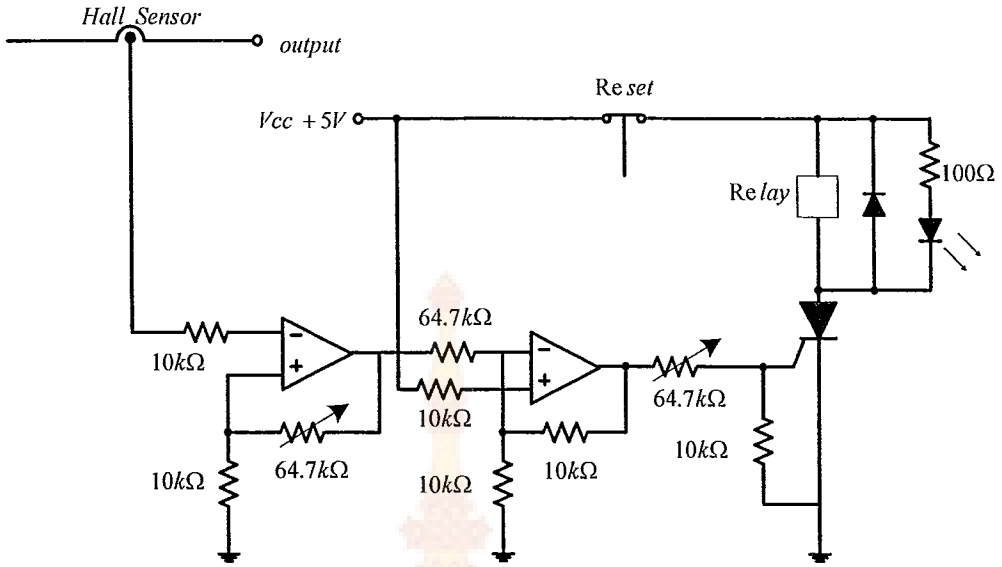
$$2.5 = 1 + \frac{R_2}{1k\Omega}$$

$$\therefore\ R_2 = 1.5\,k\Omega$$

3.4.2 วงจรตัดการทำงานเมื่อเกิดการลัดวงจรด้านเอาต์พุต (Short Circuit Protection)

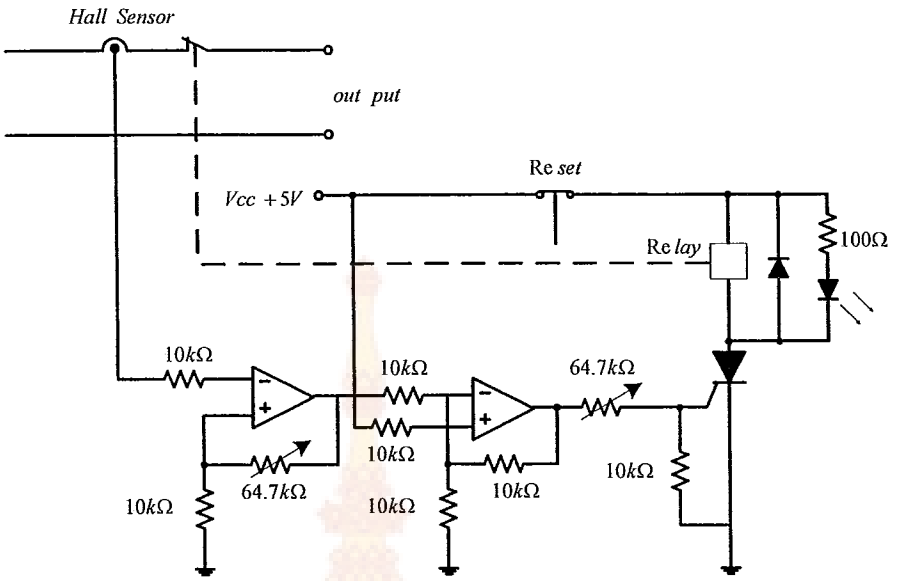
เนื่องจากการวงจรจำกัดกระแสไม่สามารถตัดวงจรได้หากมีการลัดวงจรเกิดขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรป้องกันการลัดวงจรอีกชุด

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในวงจรป้องกันการลัดวงจรด้านเอาต์พุต คือ รีเลย์การใช้รีเลย์ในวงจรป้องกันกระแสเกินนั้น เนื่องจากการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าการป้องกันด้วยฟิวส์ที่ป้องกันกระแสเกินเวลาเป็นนานและกระแสกระเพื่อมใหญ่ๆ มักจะเป็นลูกคลื่นที่มีความถี่สูงดังนั้นจึงต้องมีการตอบสนองที่มีความไวสูง



ภาพที่ 3-10 การทำงานของวงจรตัดการทำงานเมื่อลัดวงจรด้านเอาต์พุต

โดยออกแบบด้วยวิธีการนำสัญญาณกระแสมาควบคุมหน้าสัมผัสแม่เหล็ก โดยใช้การตรวจจับกระแสด้วย Hall Sensor เป็นตัวตรวจจับกระแส เมื่อเอาต์พุตเกิดการลัดวงจรขึ้นจะทำให้ Hall Sensor ส่งสัญญาณแรงดันมาผ่านวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส โดยใช้ออปแอมป์ LM324 จากนั้นจึงผ่านวงจรรวมสัญญาณ ซึ่งจะได้สัญญาณผลต่างจากวงจรทั้งสองที่มีแรงดันโดยที่จะมีซีเนอร์ไดโอดเป็นตัวรักษาระดับแรงดันที่เหมาะสมที่จะทริกที่ขาเกตของเอสซีอาร์ เมื่อเอสซีอาร์ทำงานก็จะไปควบคุมขดลวดรีเลย์และทำการตัดวงจรที่หน้าสัมผัสปกติปิด (Normally Closed Contact) และมี LED แสดงผลบอกสถานะ นอกจากนี้เอสซีอาร์จะรักษาสภาพหน้าสัมผัสไว้เพื่อไม่ให้เกิดการปิดวงจรอีกเมื่อตัดกระแสไฟไปแล้ว จนกว่าจะมีการกดสวิตช์รีเซตอีกครั้ง



ภาพที่ 3-11 วงจรป้องกันการลัดวงจรด้านเอาต์พุต

คำนวณหาค่าต่างๆในวงจรป้องกันการลัดวงจรได้ดังนี้

หาค่า R_{15} จากวงจรขยายไม่กลับเฟส อัตราการขยายหาได้จาก

$$A_V = 1 + \frac{R_{15}}{R_{14}}$$

กำหนดให้ R_{14} มีค่าเท่ากับ $10k\Omega$ และ A_V มีค่า 7.5 เท่า แทนค่าหา R_{14} จะได้

$$7.5 = 1 + \frac{R_{15}}{10\,k\Omega}$$

$$\therefore R_{15} = 65\,k\Omega$$

หาค่า R_{20} เมื่อกระแสทริกขาเกตของเอสซีอาร์ $I_{GT} = 200\,\mu A$ แรงดันเอาท์พุตจากวงจรรวมสัญญาณ $V_{OP} = 2.5V$

ดังนั้นค่าความต้านทานที่ขาเกตของเอสซีอาร์ R_{20}

$$R_{20} = \frac{V_{OP}}{I_{GT}}$$

$$= \frac{2.5}{200 \times 10^{-6}}$$

$$\therefore R_{20} = 12.5\,k\Omega$$

3.5 การออกแบบวงจรควบคุมการประจุและสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Charge & switch Controller)

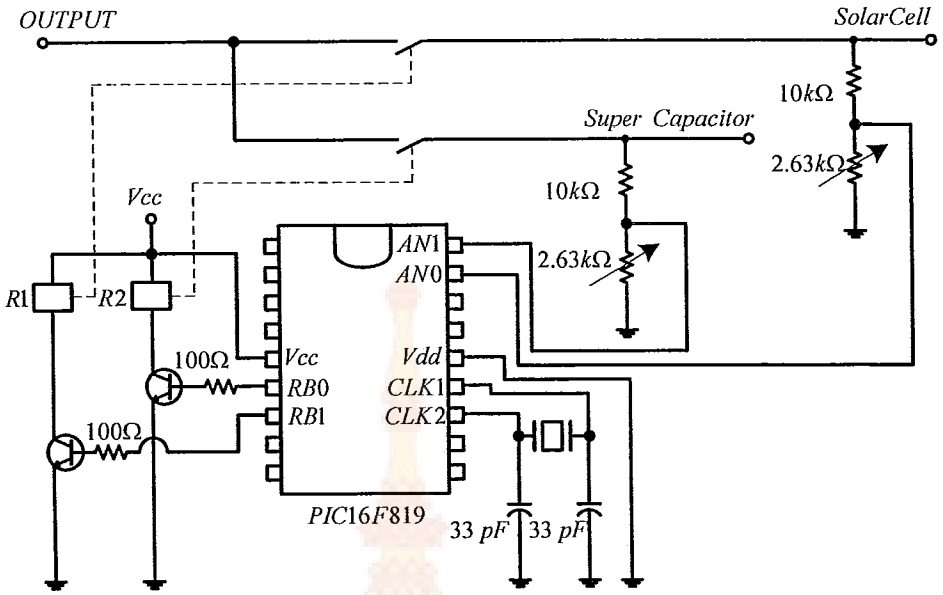
ในส่วนของวงจรควบคุมการประจุและสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีหน้าที่ในการประจุไฟฟ้าให้กับ อัลตราคาปาซิเตอร์ เมื่อมีพลังงานไฟฟ้ามากเพียงพอในขณะที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้โหลดของเซลล์แสงอาทิตย์และยังทำหน้าที่สับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้าระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์กับอัลตราคาปาซิเตอร์ให้ทำงานอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากที่สุดในการนำพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งาน

ในการออกแบบวงจรควบคุมการประจุและสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้าประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ คือ

1) วงจรการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า
2) ขั้นตอนวิธีในการควบคุมการประจุและสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้า

3.5.1 วงจรการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า

ไอซี PIC16F819 สามารถทำการโปรแกรมให้ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าได้ สามารถนำค่าแรงดันดังกล่าวนั้นมาทำการโปรแกรม ทำตามเงื่อนไขที่กำหนดได้ ด้วยเหตุผลนี้จึงนำมาตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และ อัลตราคาปาซิเตอร์



ภาพที่ 3-12 วงจรการตรวจวัดแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์และอัลตราคาปาซิเตอร์

3.5.2 ขั้นตอนวิธีในการควบคุมการประจุและสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้า

ไอซี PIC16F819 สามารถใช้โปรแกรมภาษา Assembly เขียนคำสั่งให้ไอซีทำตามเงื่อนไข โดยมีเงื่อนไขดังนี้

1) ตรวจวัดแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนเสมอ ถ้าเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันมากกว่า 14 โวลต์ จะสั่งงานให้รีเลย์ R_1 ทำงานจ่ายไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์จากนั้นจะตรวจเช็คแรงดันของ อัลตราคาปาซิเตอร์ ว่ามีค่าต่ำกว่า 10 โวลต์หรือไม่ถ้าต่ำกว่าจะสั่งให้รีเลย์ R_2 ทำงานเพื่อทำการประจุให้กับอัลตราคาปาซิเตอร์ จนกระทั่งแรงดันมีค่าเท่ากับ 13.5 โวลต์รีเลย์ R_2 จะหยุดทำงานเพื่อหยุดการประจุในขณะเดียวกันระหว่างที่ทำการประจุอยู่นั้นสามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดได้ในเวลาเดียวกัน

2) ตรวจวัดแรงดันอัลตราคาปาซิเตอร์ในกรณีที่แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์น้อยกว่า 14 โวลต์ ถ้าอัลตราคาปาซิเตอร์มีแรงดันมากกว่า 10 โวลต์ จะสั่งงานให้รีเลย์ R_2 ทำงานจ่ายไฟฟ้าจากอัลตราคาปาซิเตอร์ให้กับวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ไปจนกว่าแรงดันของเซลล์แสงแสงอาทิตย์จะมีค่ามากกว่า 14 โวลต์จึงจะหยุดทำงานหรือจ่ายไฟฟ้าไปจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าที่ อัลตราคาปาซิเตอร์น้อยกว่า 10 โวลต์ จะสั่งให้รีเลย์ R_2 หยุดทำงานในขณะที่แรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์ยังน้อยกว่า 14 โวลต์

บทที่ 4

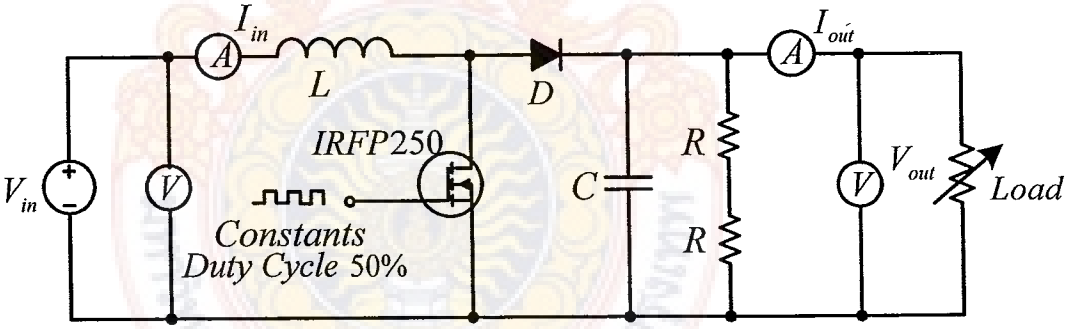
ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์

4.1 การทดสอบวงจรกำลังและวงจรควบคุมของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

การออกแบบในส่วนของวงจรกำลังและวงจรควบคุมของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์แล้ว ก็จะทำให้การทดสอบว่าวงจรกำลังและวงจรควบคุมสามารถทำงานไปตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ รวมถึงอุปกรณ์ต่างๆ ที่เลือกไว้สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ตัวอื่นๆ ได้โดยไม่มีความผิดพลาด และเป็นไปตามหลักการของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์หรือไม่โดยการทดสอบแบ่งออกได้ ดังนี้

4.1.1 การทดสอบแรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนกระแสเอาต์พุตและแรงดันอินพุตแบบลูปเปิด

ทดสอบด้วยความถี่ 100 kHz ระดับแรงดันอินพุต 12 – 24 โวลต์ ปรับดิวตี้ไซเคิลคงที่ 50% เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสเอาต์พุตกับแรงดันอินพุตว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร และมีความเป็นไปได้มากน้อยเพียงใดในการจ่ายกระแสเอาต์พุตให้แก่โหลดเมื่อต่อใช้งานแบบลูปเปิด

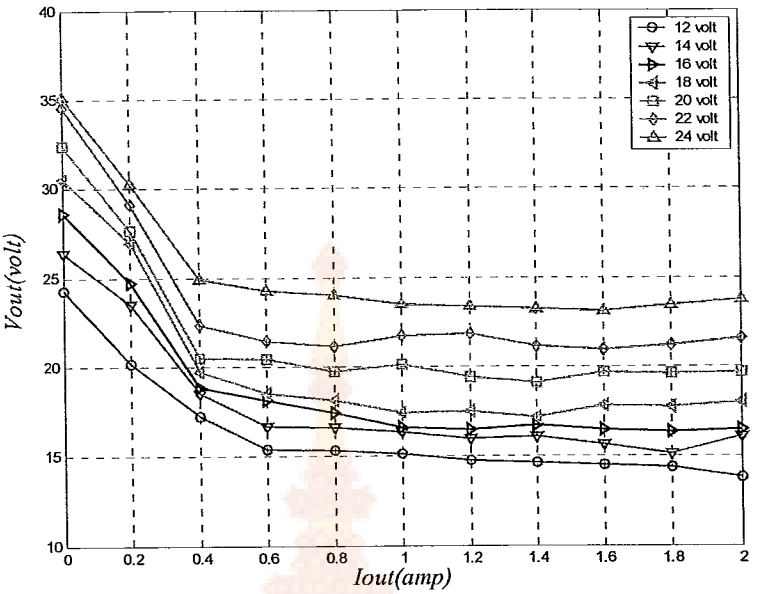


ภาพที่ 4-1 วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ในการทดสอบแบบลูปเปิด

ตารางที่ 4-1 ค่าแรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนกระแสเอาต์พุตและแรงดันอินพุตแบบลูปเปิด

	แรงดันเอาต์พุต (V) ที่แรงดันอินพุตค่าต่างๆ						
กระแสเอาต์พุต (A)	แรงดันอินพุต 12โวลต์	แรงดันอินพุต 14โวลต์	แรงดันอินพุต 16โวลต์	แรงดันอินพุต 18โวลต์	แรงดันอินพุต 20โวลต์	แรงดันอินพุต 22โวลต์	แรงดันอินพุต 24โวลต์
0	24.24	26.4	28.59	30.49	32.35	34.57	35.12
0.2	20.15	23.51	24.71	26.97	27.62	29.13	30.24
0.4	17.24	18.54	18.83	19.73	20.48	22.32	24.93
0.6	15.42	16.65	18.15	18.52	20.42	21.44	24.25
0.8	15.35	16.6	17.43	18.12	19.74	21.15	24
1	15.17	16.33	16.58	17.45	20.1	21.7	23.52
1.2	14.73	15.95	16.5	17.53	19.42	21.87	23.39
1.4	14.61	16.1	16.72	17.15	19.1	21.12	23.25
1.6	14.53	15.65	16.46	17.83	19.64	20.96	23.14
1.8	14.4	15.11	16.33	17.75	19.6	21.21	23.45
2	13.82	16.1	16.5	18	19.65	21.57	23.75

จากการทดสอบเมื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดและดังภาพที่ 4-2 โดยวิธีลูปเปิดที่แรงดันอินพุตค่าต่างๆ นั้นจะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตจะค่อยๆ ลดลงเมื่อโหลดมีการดึงกระแสมากขึ้น ทำให้ระดับแรงดันเอาต์พุตไม่คงที่ ดังนั้นจึงต้องทำให้แรงดันเอาต์พุตคงที่ โดยการควบคุมแรงดันด้วยวิธีลูปปิด ในงานวิจัยนี้จะใช้ไอซี UC3824 ในโหมดแรงดันเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่



ภาพที่ 4-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุตกับแรงดันเอาต์พุตเมื่อทดสอบแบบลูปเปิด เมื่อเปลี่ยนแรงดันอินพุต

4.1.2 การทดสอบค่ากระแสอินพุตเมื่อเปลี่ยนกระแสเอาต์พุตและแรงดันอินพุตแบบลูปเปิด

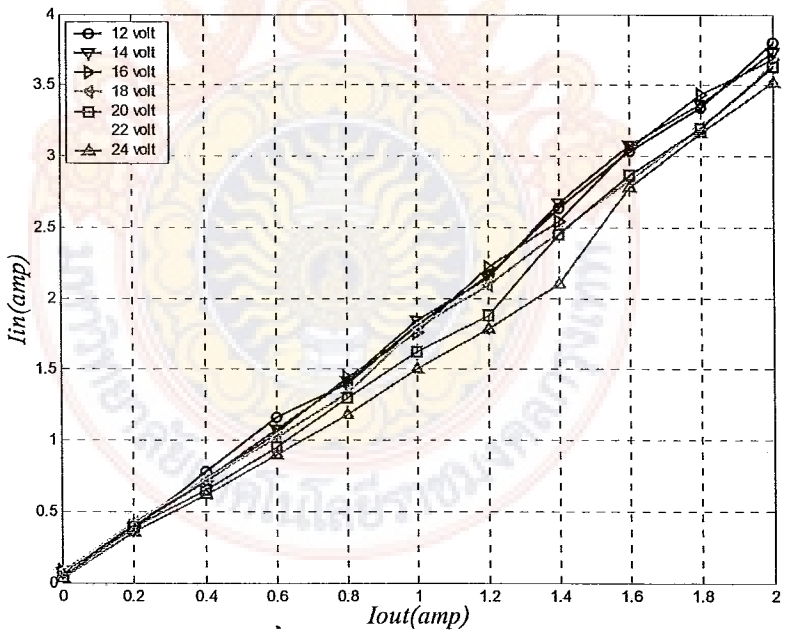
ทดสอบที่ความถี่ 100 kHz ระดับแรงดันอินพุต 12 – 24 โวลต์ ปรับดิวตี้ไซเคิลคงที่ที่ 50% เพื่อความเป็นไปได้ในด้านของกระแสอินพุตเมื่อต้องการจ่ายกระแสเอาต์พุตที่แรงดันอินพุตค่าต่างๆ

ตารางที่ 4-2 ค่ากระแสอินพุตเมื่อเปลี่ยนกระแสเอาต์พุตและแรงดันอินพุตแบบลูปเปิด

	กระแสอินพุต (A) ที่แรงดันอินพุตค่าต่างๆ						
กระแสเอาต์พุต (A)	แรงดันอินพุต 12โวลต์	แรงดันอินพุต 14โวลต์	แรงดันอินพุต 16โวลต์	แรงดันอินพุต 18โวลต์	แรงดันอินพุต 20โวลต์	แรงดันอินพุต 22โวลต์	แรงดันอินพุต 24โวลต์
0	0.07	0.07	0.08	0.07	0.04	0.03	0.03
0.2	0.38	0.39	0.4	0.42	0.39	0.35	0.3
0.4	0.78	0.73	0.71	0.73	0.65	0.62	0.55

ตารางที่ 4-2 (ต่อ) ค่ากระแสอินพุตเมื่อเปลี่ยนกระแสเอาต์พุตและแรงดันอินพุตแบบลูปเปิด

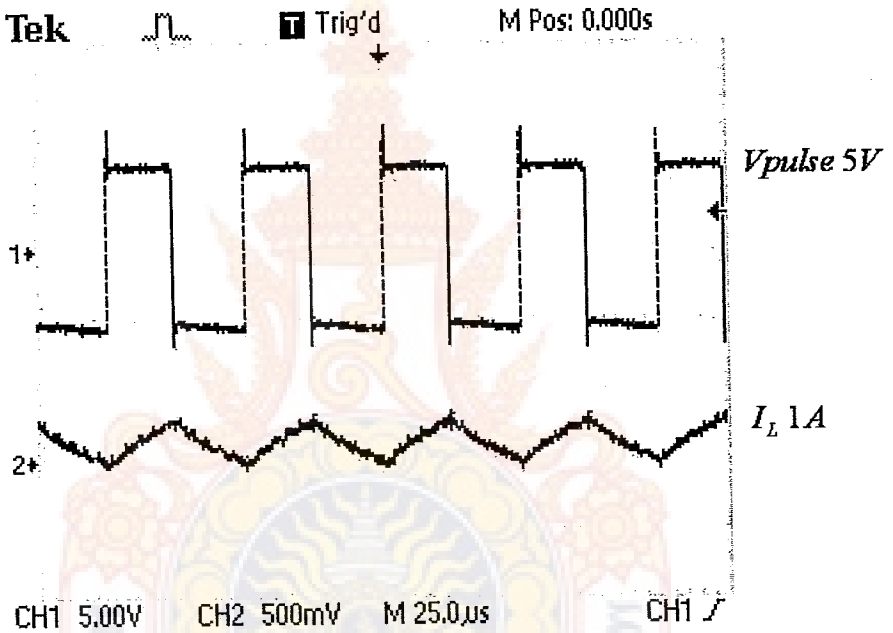
	กระแสอินพุต (A) ที่แรงดันอินพุตค่าต่างๆ						
กระแสเอาต์พุต (A)	แรงดันอินพุต 12โวลต์	แรงดันอินพุต 14โวลต์	แรงดันอินพุต 16โวลต์	แรงดันอินพุต 18โวลต์	แรงดันอินพุต 20โวลต์	แรงดันอินพุต 22โวลต์	แรงดันอินพุต 24โวลต์
0.6	1.16	1.08	1.05	1.02	0.95	0.9	0.85
0.8	1.4	1.42	1.44	1.33	1.3	1.18	1.05
1	1.81	1.84	1.76	1.79	1.62	1.5	1.41
1.2	2.16	2.14	2.22	2.09	1.88	1.78	1.68
1.4	2.63	2.67	2.54	2.46	2.45	2.1	2.09
1.6	3.03	3.08	3.05	2.83	2.86	2.78	2.63
1.8	3.34	3.37	3.43	3.2	3.2	3.16	3
2	3.8	3.73	3.68	3.65	3.63	3.52	3.44



ภาพที่ 4-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตกับกระแสเอาต์พุต

จากการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตกับกระแสเอาต์พุตที่แรงดันค่าต่างๆ ซึ่งเป็นการทดสอบแบบลูปเปิดทำให้ทราบว่าเมื่อโหลดมีค่าเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้วงจรยกระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะดึงกระแสอินพุตสูงขึ้นตามไปด้วย

4.1.3 การทดสอบเปรียบเทียบสัญญาณคำสั่งสวิตช์และสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบลูปเปิด $V_S = V_O(1-D)$

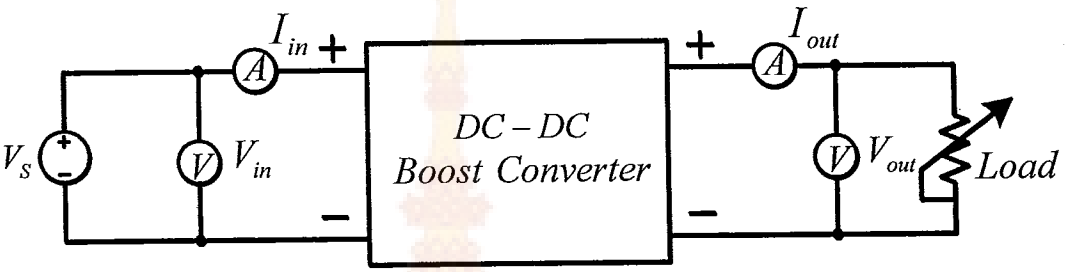


ภาพที่ 4-4 สัญญาณคำสั่งสวิตช์และสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบลูปเปิด

จากภาพที่ 4-4 แสดงให้เห็นถึงค่าสัญญาณจากชุดคำสั่งสวิตช์ ที่ได้จากไอซี UC3824 ผ่านไอซีขับเกต TLP250 เปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ จากการทดสอบโดยใช้ความถี่ที่ 100 kHz จะพบว่าสัญญาณจากชุดคำสั่งสวิตช์สามารถควบคุมสั่งงานให้มอสเฟตกำลังทำงานสวิตช์ได้และยังส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีการไหลต่อเนื่อง

4.2 การทดสอบหาค่าประสิทธิภาพของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์เมื่อเปลี่ยนกระแสเอาต์พุตและแรงดันอินพุตแบบลูปปิด

4.2.1 การทดสอบหาค่าประสิทธิภาพของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์แบบลูปปิด



ภาพที่ 4-5 วงจรการวัดหาค่าประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟที่ค่ากระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ

การทดสอบประสิทธิภาพที่ค่ากระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ จะใช้ดีซีเพาเวอร์ซัพพลาย 0 – 30 โวลต์ 0 – 10 แอมป์ ต่อเข้าทางอินพุตเพื่อเป็นแรงดันอินพุตแทนเซลล์แสงอาทิตย์ใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์วัดหาค่ากระแสและแรงดันทางอินพุตและเอาต์พุตตามภาพที่ 4-5 ใช้ตัวต้านทานปรับค่าเป็นโหลดทดสอบที่ความถี่ 100 kHz ทำการปรับค่ากระแสเอาต์พุตจากค่าที่ไม่มีโหลดจนถึงค่ากระแสพิกัดที่ระดับแรงดันอินพุต 12 – 24 โวลต์ สามารถได้ค่าตามตารางและสามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเมื่อทำการต่อโหลดได้ จากสมการ

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

กำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุตหาได้จาก

$$P_{out} = V_{out} \times I_{out}$$

กำลังไฟฟ้าด้านอินพุตหาได้จาก

$$P_{in} = V_{in} \times I_{in}$$

ตารางที่ 4-3 ค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ ที่แรงดันอินพุต 12 โวลต์

กระแสเอาต์พุต (A)	แรงดันเอาต์พุต (V)	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (W)	กระแสอินพุต (A)	แรงดันอินพุต (V)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (W)	ประสิทธิภาพ (%)
0	24.54	0	0.12	12	1.44	-
0.2	24.53	4.9	0.56	12	6.72	72.91
0.4	24.53	9.81	0.94	12	11.28	86.96
0.6	24.52	14.71	1.36	12	16.32	90.13
0.8	24.5	19.6	1.65	12	19.8	98.98
1	24.45	24.45	2.1	12	25.2	97.02
1.2	22.51	27.01	2.37	12	28.44	94.97
1.4	21.25	29.75	2.69	12	32.28	92.16
1.6	20.19	32.3	2.88	12	34.56	93.46
1.8	18.79	33.82	3.31	12	39.72	85.14
2	18.34	36.68	3.43	12	41.16	89.11

ตารางที่ 4-4 ค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ ที่แรงดันอินพุต 14 โวลต์

กระแสเอาต์พุต (A)	แรงดันเอาต์พุต (V)	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (W)	กระแสอินพุต (A)	แรงดันอินพุต (V)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (W)	ประสิทธิภาพ (%)
0	24.5	0	0.14	14	1.96	-
0.2	24.49	4.89	0.5	14	7	48.8
0.4	24.49	9.79	0.88	14	12.32	79.16
0.6	24.49	14.69	1.19	14	16.66	88.17
0.8	24.48	19.59	1.48	14	20.72	94.54

ตารางที่ 4-4 (ต่อ) ค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ ที่แรงดันอินพุต 14 โวลต์

กระแสเอาต์พุต (A)	แรงดันเอาต์พุต (V)	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (W)	กระแสอินพุต (A)	แรงดันอินพุต (V)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (W)	ประสิทธิ ภาพ (%)
1	24.45	24.45	1.8	14	25.20	97.00
1.2	24.32	29.18	2.1	14	29.4 0	99.20
1.4	24.03	33.64	2.45	14	34.30	98.07
1.6	23.3	37.28	2.8	14	39.20	95.10
1.8	22.38	40.28	3.2	14	44.80	89.91
2	21.83	43.66	3.65	14	51.10	85.44

ตารางที่ 4-5 ค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ ที่แรงดันอินพุต 16 โวลต์

กระแสเอาต์พุต (A)	แรงดันเอาต์พุต (V)	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (W)	กระแสอินพุต (A)	แรงดันอินพุต (V)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (W)	ประสิทธิภาพ (%)
0	24.48	0	0.01	16	0.16	-
0.2	24.48	4.89	0.47	16	7.52	65.2
0.4	24.48	9.79	0.83	16	13.28	73.71
0.6	24.48	14.68	1.14	16	18.24	80.48
0.8	24.48	19.58	1.44	16	23.04	84.98
1	24.41	24.41	1.85	16	29.6	82.46
1.2	24.34	29.2	2.15	16	34.4	84.88
1.4	24.28	33.99	2.51	16	40.16	84.63
1.6	24.24	38.78	2.87	16	45.92	84.45
1.8	23.6	42.48	3.06	16	48.96	86.76
2	22.56	45.12	3.21	16	51.36	87.85

ตารางที่ 4-6 ค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ ที่แรงดันอินพุต 18 โวลต์

กระแสเอาต์พุต (A)	แรงดันเอาต์พุต (V)	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (W)	กระแสอินพุต (A)	แรงดันอินพุต (V)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (W)	ประสิทธิภาพ (%)
0	24.47	0	0.01	18	0.18	-
0.2	24.47	4.89	0.44	18	7.92	61.74
0.4	24.47	9.78	0.73	18	13.14	74.42
0.6	24.47	14.68	1.02	18	18.36	79.95
0.8	24.47	19.57	1.31	18	23.58	82.99
1	24.43	24.43	1.62	18	29.16	83.77
1.2	24.42	29.3	1.92	18	34.56	84.79
1.4	24.35	34.09	2.22	18	39.96	85.31
1.6	24.17	38.67	2.54	18	45.72	84.58
1.8	23.67	42.61	2.87	18	51.66	82.48
2	22.9	45.8	3.2	18	57.61	79.51

ตารางที่ 4-7 ค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ ที่แรงดันอินพุต 20 โวลต์

กระแสเอาต์พุต (A)	แรงดันเอาต์พุต (V)	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (W)	กระแสอินพุต (A)	แรงดันอินพุต (V)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (W)	ประสิทธิภาพ (%)
0	24.48	0	0.01	20	0.2	-
0.2	24.48	4.89	0.42	20	8.4	58.21
0.4	24.48	9.79	0.68	20	13.6	71.98
0.6	24.48	14.68	0.93	20	18.6	78.92
0.8	24.48	19.58	1.19	20	23.8	82.26

ตารางที่ 4-7 (ต่อ) ค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ ที่แรงดันอินพุต 20 โวลต์

กระแสเอาต์พุต (A)	แรงดันเอาต์พุต (V)	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (W)	กระแสอินพุต (A)	แรงดันอินพุต (V)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (W)	ประสิทธิภาพ (%)
1	24.47	24.47	1.46	20	29.2	83.81
1.2	24.4	29.28	1.73	20	34.6	84.62
1.4	24.24	33.93	2.03	20	40.6	83.57
1.6	23.85	38.16	2.26	20	45.2	84.42
1.8	23.8	42.84	2.63	20	52.6	81.44
2	22.49	44.98	3.07	20	61.41	73.24

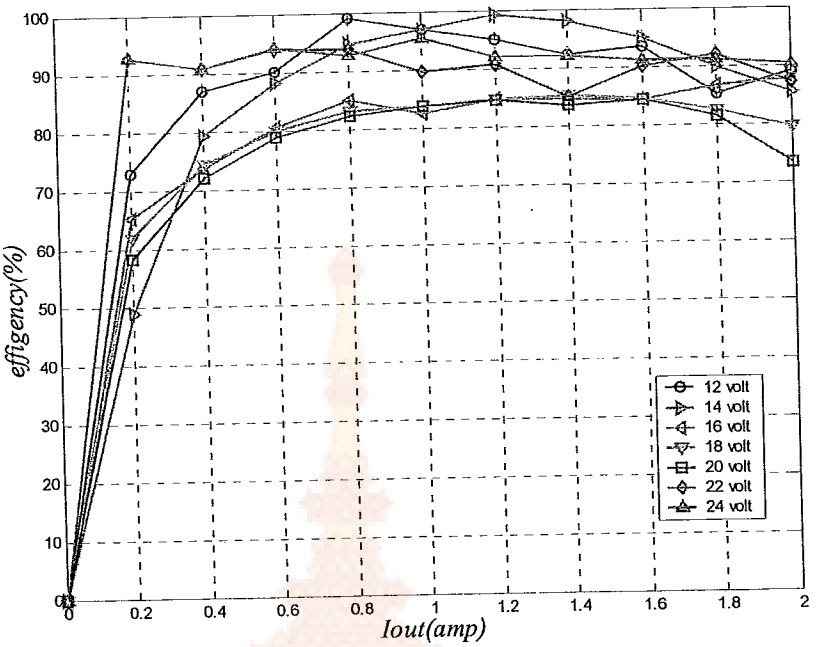
ตารางที่ 4-8 ค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ ที่แรงดันอินพุต 22 โวลต์

กระแสเอาต์พุต (A)	แรงดันเอาต์พุต (V)	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (W)	กระแสอินพุต (A)	แรงดันอินพุต (V)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (W)	ประสิทธิภาพ (%)
0	24.48	0	0.01	22	0.22	-
0.2	24.48	4.89	0.24	22	5.28	92.61
0.4	24.48	9.79	0.49	22	10.78	90.81
0.6	24.48	14.68	0.71	22	15.62	93.98
0.8	24.48	19.58	0.95	22	20.9	93.68
1	24.48	24.48	1.24	22	27.28	89.73
1.2	24.48	29.37	1.47	22	32.34	90.81
1.4	24.48	34.27	1.83	22	40.26	84.91
1.6	24.38	39.01	1.97	22	43.34	90.02
1.8	24.07	43.32	2.17	22	47.08	92.01
2	24.04	48.08	2.51	22	55.22	87.07

ตารางที่ 4-9 ค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ ที่แรงดันอินพุต 24 โวลต์

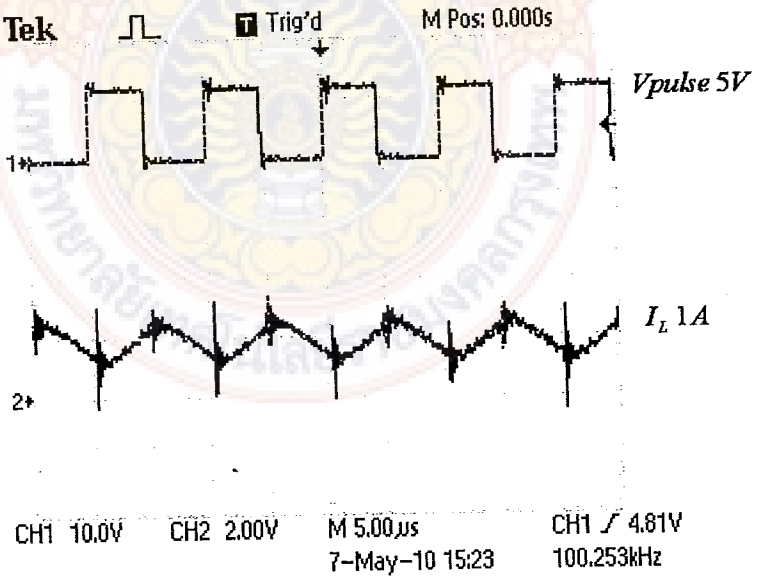
กระแสเอาต์พุต (A)	แรงดันเอาต์พุต (V)	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (W)	กระแสอินพุต (A)	แรงดันอินพุต (V)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (W)	ประสิทธิภาพ (%)
0	24.48	0	0.01	24	0.24	-
0.2	24.48	4.89	0.22	24	5.28	92.61
0.4	24.48	9.79	0.45	24	10.8	90.64
0.6	24.48	14.68	0.65	24	15.6	94.1
0.8	24.48	19.58	0.88	24	21.12	92.71
1	24.48	24.48	1.07	24	25.68	95.32
1.2	24.48	29.37	1.33	24	31.92	92.11
1.4	24.48	34.27	1.55	24	37.2	92.12
1.6	24.47	39.15	1.79	24	42.96	91.13
1.8	24.2	43.56	1.99	24	47.76	91.2
2	23.95	47.9	2.21	24	53.04	90.31

จากการทดสอบหาค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ จะได้ประสิทธิภาพในช่วงกระแสเอาต์พุต 0.6 – 1.6 แอมป์ มีค่าสูงที่สุด และเมื่อเพิ่มโหลดมากขึ้นประสิทธิภาพก็จะเพิ่มขึ้นและแรงดันอินพุตที่มีระดับแรงดันสูง ค่าประสิทธิภาพขณะกระแสพิกัดจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าระดับแรงดันอินพุตที่มีค่าต่ำกว่าเช่นที่แรงดัน 17 โวลต์ค่าประสิทธิภาพขณะกระแสพิกัดมีค่า 78.78% ในขณะที่แรงดันอินพุต 12 โวลต์ค่าประสิทธิภาพขณะกระแสพิกัดมีค่า 63.73%



ภาพที่ 4-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกระแสเอาต์พุตที่แรงดันอินพุต 12 – 24 โวลต์

4.2.2 การทดสอบเปรียบเทียบสัญญาณคำสั่งสวิตช์และสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบลูปปิด

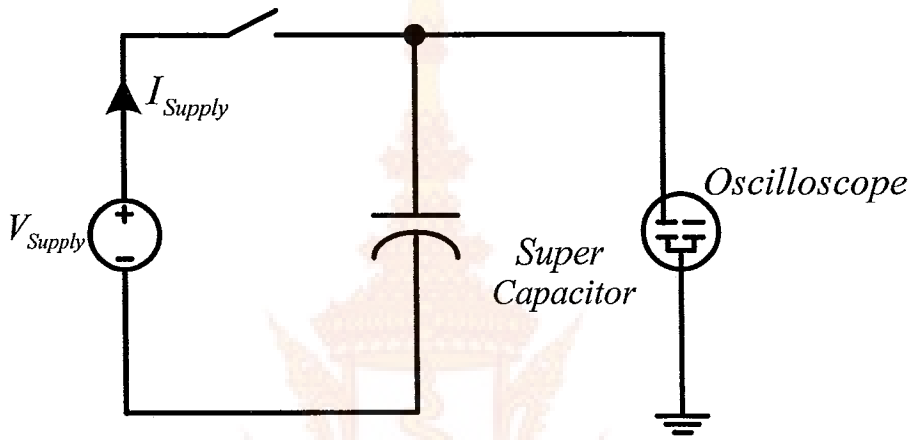


ภาพที่ 4-7 สัญญาณคำสั่งสวิตช์และสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบลูปปิด

4.3 การทดสอบการเก็บและคายพลังงานไฟฟ้าของ อัลตราคาปาซิเตอร์

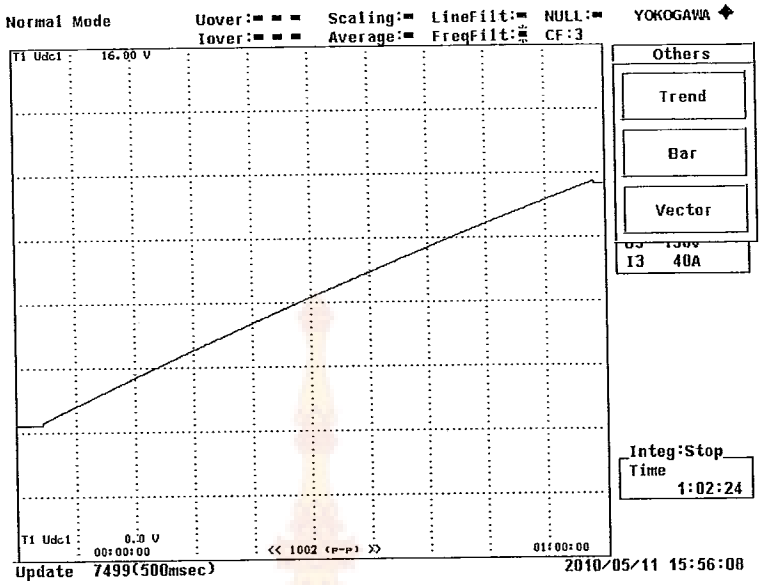
เป็นการศึกษาลักษณะการเก็บและคายพลังงานของอัลตราคาปาซิเตอร์ ว่าค่าแรงดันและกระแสต่างๆมีผลต่อการเก็บและคายพลังงานของ อัลตราคาปาซิเตอร์ เป็นอย่างไร

4.3.1 การสอบการเก็บพลังงานไฟฟ้าของ อัลตราคาปาซิเตอร์ ที่ค่าแรงดันและกระแสต่างๆ

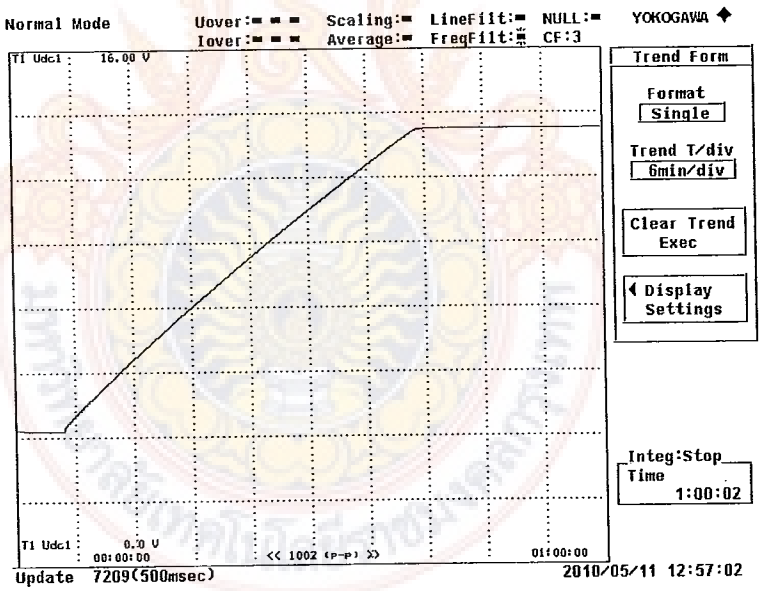


ภาพที่ 4-8 วงจรทดสอบการเก็บพลังงานไฟฟ้าของอัลตราคาปาซิเตอร์

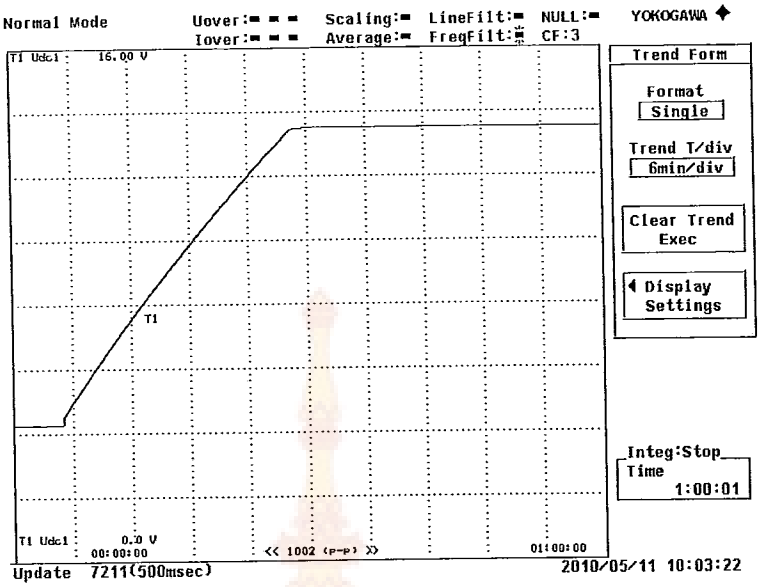
การทดสอบการเก็บพลังงานไฟฟ้าของซุเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ค่ากระแสต่างๆและแรงดันคงที่ที่ 14 โวลต์ จะใช้วงจรการทดสอบดังภาพที่ 4-8 โดยใช้แหล่งจ่ายไฟตรง 0 – 30 โวลต์ 0 – 20 แอมป์ โดยจำกัดกระแสของแหล่งจ่ายไฟตรง ไว้ที่ 1 แอมป์ 2 แอมป์ และ 3 แอมป์ แล้วใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณแรงดันของ อัลตราคาปาซิเตอร์



ภาพที่ 4-9 แรงดันไฟฟ้าอัลตราคาปาซิเตอร์ในการเก็บพลังงานไฟฟ้า ที่แรงดัน 14 โวลต์ กระแส 1 แอมป์



ภาพที่ 4-10 แรงดันไฟฟ้าอัลตราคาปาซิเตอร์ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าที่แรงดัน 14 โวลต์ กระแส 2 แอมป์

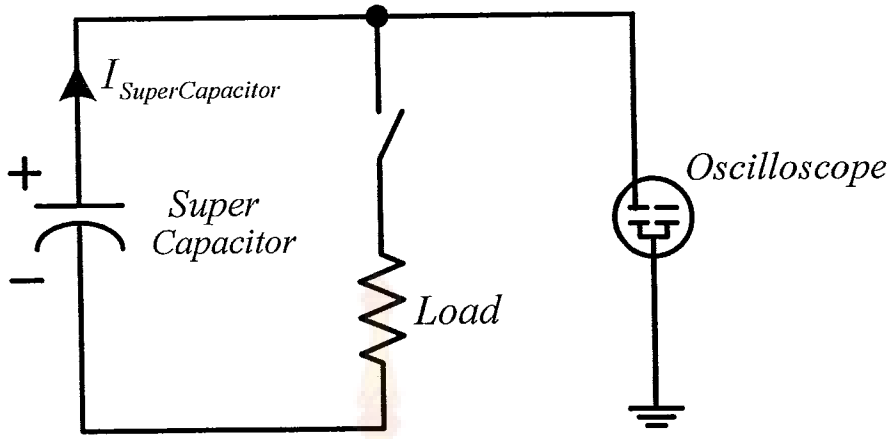


ภาพที่ 4-11 แรงดันไฟฟ้าอัลตราคาปาซิเตอร์ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าที่แรงดัน 14 โวลต์ กระแส 3 แอมป์

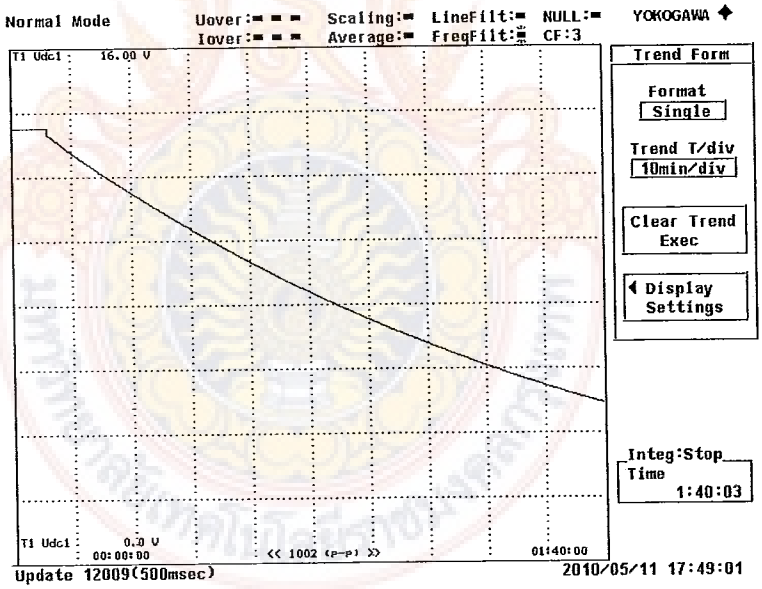
จากการทดสอบการเก็บพลังงานไฟฟ้าของ Ultrcapacitor ร์ที่ค่าแรงดัน 14 โวลลต์และค่ากระแสไฟฟ้าต่างๆ จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ค่ากระแสสูงในการเก็บพลังงานไฟฟ้าจะใช้เวลาในการเก็บพลังงานน้อยลงแต่เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าในการเก็บพลังงานมี่ค่าต่ำลงมาจะใช้เวลาในการเก็บพลังงานน้อยลง

4.3.2 ทดสอบการคายพลังงานไฟฟ้าของ Ultrcapacitor

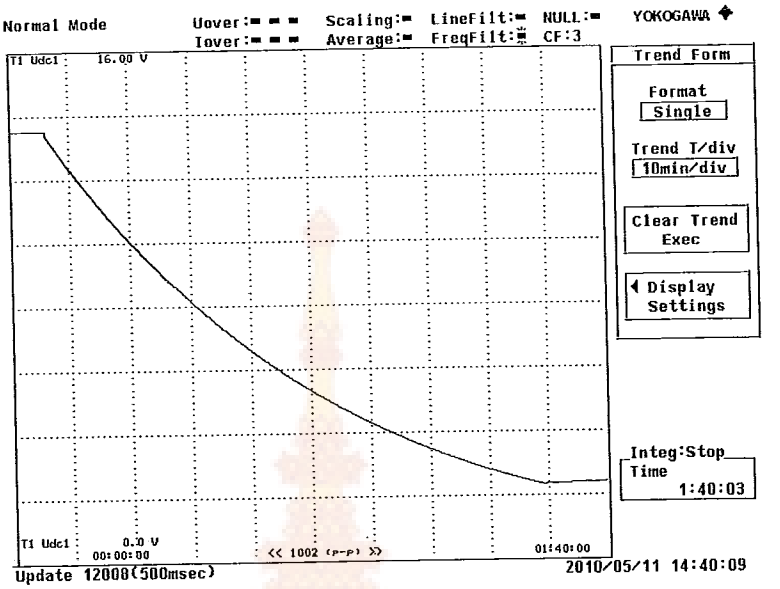
การทดสอบการคายพลังงานไฟฟ้าของ Ultrcapacitor ที่ค่ากระแสต่างๆและแรงดันคงที่ที่ 14 โวลต์ จะใช้ วงจรการทดสอบดังภาพที่ 4-11 โดยใช้แหล่งจ่ายไฟตรง 0 – 30 โวลต์ 0 – 20 แอมป์ โดยจำกัดกระแสของแหล่งจ่ายไฟตรงไว้ที่ 1 แอมป์ 2 แอมป์ และ 3 แอมป์ แล้วใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณแรงดันของ อัลตราคาปาซิเตอร์



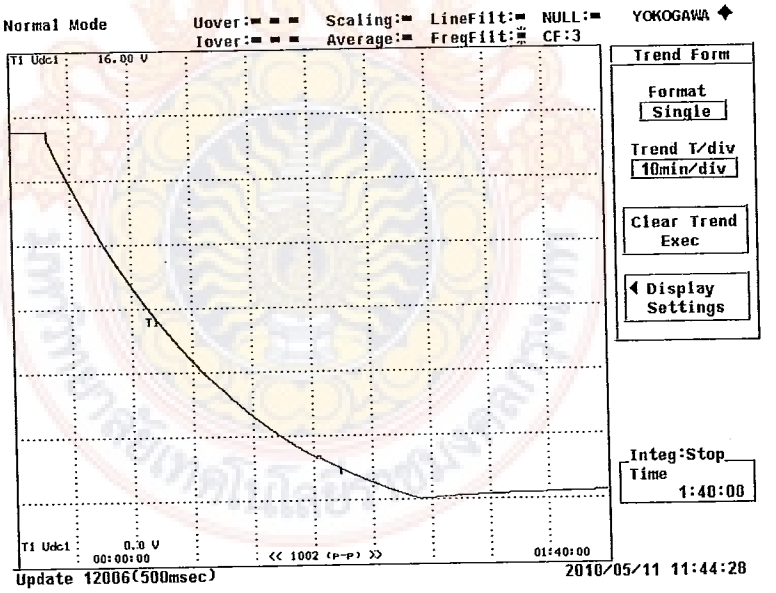
ภาพที่ 4-12 วงจรทดสอบการคายประจุของอัลตราคาปาซิเตอร์



ภาพที่ 4-13 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าอัลตราคาปาซิเตอร์ในการคายพลังงานไฟฟ้าที่แรงดัน 14 โวลต์ กระแส 1 แอมป์



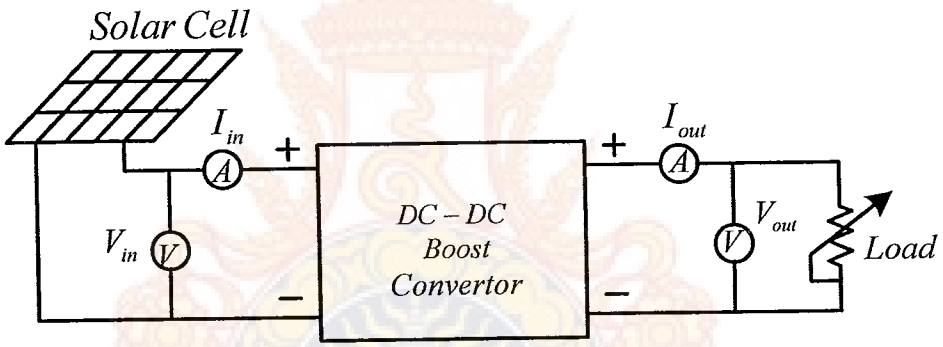
ภาพที่ 4-14 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าอัลตราคาปาซิเตอร์ในการคายพลังงานไฟฟ้าที่แรงดัน 14 โวลต์ กระแส 2 แอมป์



ภาพที่ 4-15 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าอัลตราคาปาซิเตอร์ในการคายพลังงานไฟฟ้าที่แรงดัน 14 โวลต์ กระแส 3 แอมป์

จากการทดสอบการคายพลังงานไฟฟ้าของ อัลตราคาปาซิเตอร์ ที่ค่าแรงดัน 14 โวลต์และค่ากระแสไฟฟ้าต่างๆ จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ค่ากระแสสูงในการคายพลังงานไฟฟ้าจะใช้เวลาในการคายพลังงานน้อยแต่เมื่อมีโหลดน้อยๆหรือกระแสที่ต่ำๆก็จะทำให้เวลาการคายพลังงานมากขึ้นทำให้อัลตราคาปาซิเตอร์ นี้มีคุณสมบัติเหมือนกับแบตเตอร์รี่ ดังภาพที่ 4-15 เมื่อจ่ายโหลดที่ทำให้มีกระแสไฟฟ้าที่ 3 แอมป์ จะทำให้เกิดการคายพลังงานของซุเปอร์คาปาซิเตอร์จนถึงแรงดันระดับคงที่ที่ 2.0 โวลล์ใช้เวลา 1 ชั่วโมง แต่ถ้าจ่ายกระแสโหลดที่ 1 แอมป์จะใช้เวลาถึง 1.50 ชั่วโมงในงานวิจัยจ่ายโหลดที่ 2 แอมป์และแรงดันใช้งานอยู่ที่ 10 – 13.5 โวลต์ ดังนั้นจึงสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้เป็นเวลาประมาณ 30 นาที

4.4 ทดสอบหาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อใช้งานร่วมกับวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์จ่ายโหลด

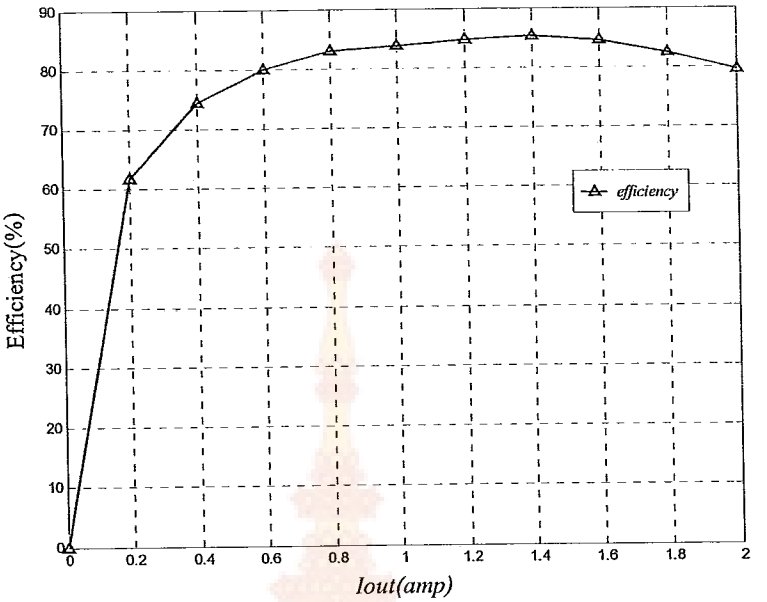


ภาพที่ 4-16 วงจรต่อใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ต่อใช้งานร่วมกับวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

การหาค่าประสิทธิภาพเมื่อต่อใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ทำได้โดยใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์วัดค่ากระแสและแรงดันทางด้านอินพุตและเอาต์พุตดังภาพที่ 4-16 ใช้ตัวต้านทานปรับค่าเป็นโหลดทำการปรับค่ากระแสเอาต์พุตจากไม่มีโหลดจนถึงค่าระดับกระแสสูงสุดที่บูสคอนเวอร์เตอร์สามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตไว้ได้และสามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพได้

ตารางที่ 4-10 ค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ เมื่อต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์ 70 วัตต์

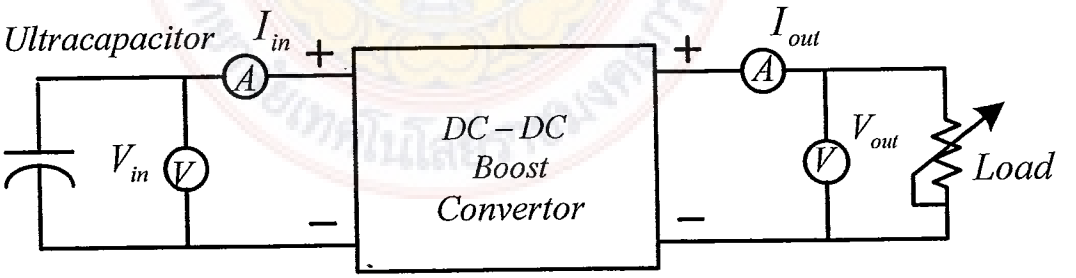
กระแสเอาต์พุต (A)	แรงดันเอาต์พุต (V)	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (W)	กระแสอินพุต (A)	แรงดันอินพุต (V)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (W)	ประสิทธิภาพ (%)
0	24.47	0	0.01	18	0.18	-
0.2	24.47	4.89	0.44	18	7.92	61.74
0.4	24.47	9.78	0.73	18	13.14	74.42
0.6	24.47	14.68	1.02	18	18.36	79.95
0.8	24.47	19.57	1.31	18	23.58	82.99
1	24.43	24.43	1.62	18	29.16	83.77
1.2	24.42	29.3	1.92	18	34.56	84.79
1.4	24.35	34.09	2.22	18	39.96	85.31
1.6	24.17	38.67	2.54	18	45.72	84.58
1.8	23.67	42.61	2.87	18	51.66	82.48
2	22.9	45.8	3.2	18	57.61	79.51



ภาพที่ 4-17 กราฟประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตต่างๆ เมื่อต่อใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 70 วัตต์

จากการทดสอบจะเห็นได้ว่า เมื่อใช้งานต่อเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์จ่ายโหลดที่ค่าของกระแสต่างๆ จะได้ค่าประสิทธิภาพที่สูงในช่วงของกระแส 0.6 – 1.6 แอมป์ นั่นหมายถึงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถใช้งานจ่ายโหลดโดยผ่านวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ได้ และในช่วงค่ากระแสสูงๆ จะมีประสิทธิภาพในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ดีมาก รวมถึงแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีค่าคงที่อีกด้วย

4.5 ทดสอบหาประสิทธิภาพของ อัลตราคาปาซิเตอร์ ต่อร่วมกับวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์จ่ายโหลด

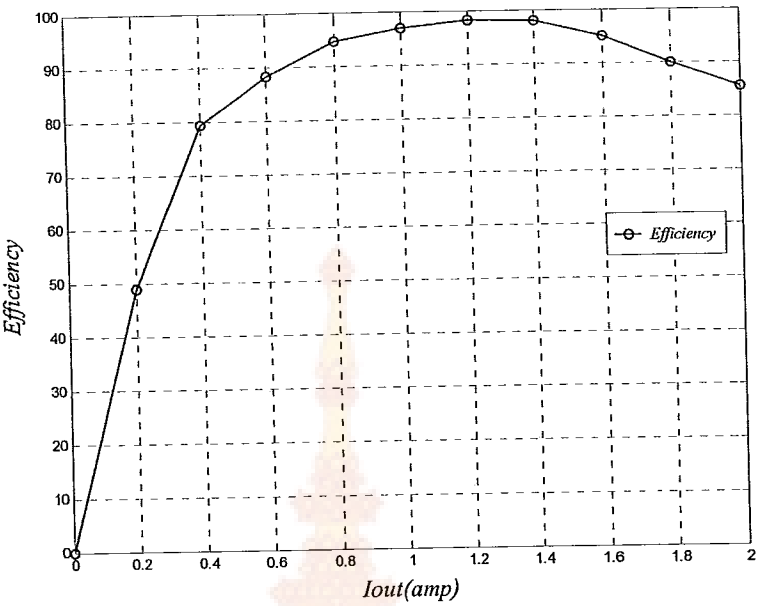


ภาพที่ 4-18 วงจรต่อใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ต่อใช้งานร่วมกับวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

การหาค่าประสิทธิภาพเมื่อต่อใช้งานกับ อัลตราคาปาซิเตอร์ ทำได้โดยใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์วัดค่ากระแสและแรงดันทางด้านอินพุตและเอาต์พุตดังภาพที่ 4-26 ใช้ตัวต้านทานปรับค่าเป็นโหลด ทำการปรับค่ากระแสเอาต์พุตจากไม่มีโหลดจนถึงค่าระดับกระแสสูงสุดที่บูสคอนเวอเตอร์สามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตไว้ได้และสามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพได้

ตารางที่ 4-11 ค่าประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ เมื่อต่อกับอัลตราคาปาซิเตอร์

กระแสเอาต์พุต (A)	แรงดันเอาต์พุต (V)	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (W)	กระแสอินพุต (A)	แรงดันอินพุต (V)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (W)	ประสิทธิภาพ (%)
0	24.5	0	0.14	13.52	1.96	-
0.2	24.49	4.89	0.5	13.51	7	48.8
0.4	24.49	9.79	0.88	13.37	12.32	79.16
0.6	24.49	14.69	1.19	13.27	16.66	88.17
0.8	24.48	19.59	1.48	13.11	20.72	94.54
1	24.45	24.45	1.8	13.06	25.20	97.00
1.2	24.32	29.18	2.1	12.67	29.4 0	99.20
1.4	24.03	33.64	2.45	12.61	34.30	98.07
1.6	23.3	37.28	2.8	12.59	39.20	95.10
1.8	22.38	40.28	3.2	12.52	44.80	89.91
2	21.83	43.66	3.65	12.49	51.10	85.44

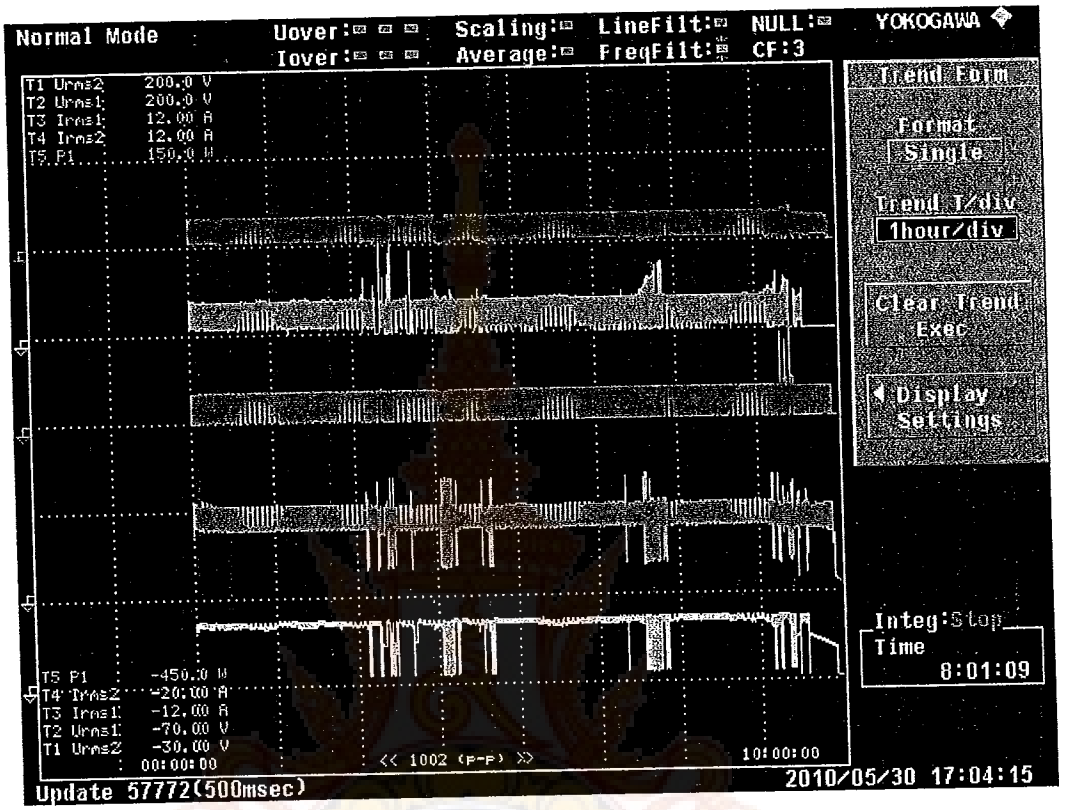


ภาพที่ 4-19 กราฟประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตต่างๆ เมื่อต่อใช้งานกับอัลตราคาปาซิเตอร์

จากการทดสอบจะพบว่าเมื่อต่อใช้งานอัลตราคาปาซิเตอร์ ผ่านวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์จ่ายโหลดที่ค่ากระแสสูงๆ ประสิทธิภาพในระบบจะมีค่าสูงในช่วง 0.6 – 1.8 แอมป์ นั่นคือ อัลตราคาปาซิเตอร์ สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดได้ โดยมีค่าประสิทธิภาพสูง ที่ค่ากระแสสูงๆ ประสิทธิภาพของระบบจะดีกว่า การใช้งานต่อเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์จ่ายโหลด แต่แรงดันที่ อัลตราคาปาซิเตอร์ จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อจ่ายโหลดที่ค่ากระแสสูงๆ

4.6 การทดสอบการทำงานของวงจรประจุและสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้า

4.6.1 การทดสอบการทำงานสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้า



ภาพที่ 4-20 กราฟบันทึกผลการทำงานของวงจรประจุและสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้า

โดยใช้บริเวณชั้น 11 ของตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ โดยเริ่มตั้งแต่วันที่ วันที่ 29 พฤษภาคม 2553 เวลา 11.15 น ถึง 16.15 น

จากภาพที่ 4-20 เป็นการต่อใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับอัลตราคาปาซิเตอร์ ผ่านบูสคอนเวอร์เตอร์ในการจ่ายโหลดที่ใช้ในงานวิจัยคือ ป้ายแสดงผลแบบอิเล็กทรอนิกส์ สามารถอธิบายผลของพลังงานที่บันทึกได้ คือ แสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลามีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากสภาพอากาศและเมฆ ทำให้บางช่วงเวลาเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถจ่ายพลังงานให้กับโหลดได้

4.6.2 ทดสอบการสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้า

การสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้าระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์กับอัลตราคาปาซิเตอร์ในการต่อใช้งานกับโหลดจริงนั้น จากภาพที่ 4-20 จะเห็นได้ว่าเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากกว่า 14 โวลต์ ระบบจะสั่งงานให้นำพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปผ่านวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์จ่ายให้กับโหลด แต่เมื่อแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าต่ำกว่า 14 โวลต์ ระบบจะสั่งให้หยุดการจ่ายพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์และไปสั่งให้จ่ายพลังงานจากอัลตราคาปาซิเตอร์ แทน จนกระทั่งแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากกว่า 14 โวลต์ อีกครั้ง ระบบจะสั่งให้หยุดจ่ายพลังงานจากอัลตราคาปาซิเตอร์แล้วไปสั่งให้จ่ายพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์แทน จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตและกระแสเอาต์พุตยังคงที่ เมื่อมีการสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

4.6.3 ทดสอบการประจุให้กับอัลตราคาปาซิเตอร์

เมื่อต่อใช้งานในระบบแล้ว ถ้าแรงดันของอัลตราคาปาซิเตอร์มีค่าต่ำกว่า 10 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่สามารถจ่ายพลังงานให้กับโหลดได้ ระบบจะสั่งให้ทำการประจุ อัลตราคาปาซิเตอร์ทันที โดยที่แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ต้องมากกว่า 14 โวลต์ เมื่อทำการประจุแล้วแรงดันของอัลตราคาปาซิเตอร์ มีค่าที่ 13.5 โวลต์ ระบบจะสั่งให้หยุดการประจุไฟฟ้าจากกราฟที่ 4.20 การประจุอัลตราคาปาซิเตอร์ จะไม่มีผลต่อแรงดันเอาต์พุตและกระแสเอาต์พุต เนื่องจากการประจุได้ทำการใส่ค่าความต้านทานไว้ เพื่อจำกัดกระแสประจุ อีกทั้งยังให้สามารถจ่ายโหลดได้ในขณะประจุ

4.6.4 การทดสอบจ่ายโหลดและใช้งาน

จากกราฟที่ 4-30 เป็นการบันทึกผลการต่อใช้งานจริงของงานวิจัย เพื่อทดสอบว่าในแต่ละเวลาสามารถจ่ายพลังงานให้กับโหลดได้เป็นอย่างไร จากการบันทึกผลพบว่าถึงแม้ว่าแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลงจนไม่สามารถจ่ายพลังงานให้กับระบบได้ แต่ยังมีพลังงานจากอัลตราคาปาซิเตอร์ จ่ายในช่วงเวลานั้น ทำให้ยังสามารถจ่ายพลังงานให้โหลดได้ต่อไปอีก แต่อัลตราคาปาซิเตอร์ไม่สามารถจ่ายพลังงานได้นาน เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องของความจุ แต่สามารถจ่ายพลังงานได้ประมาณ 30 นาที เท่านั้น ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เพียงเล็กน้อย จะไม่มีผลต่อแรงดันเอาต์พุต เนื่องจากวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ สามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต

บทที่5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลของงานวิจัย

งานวิจัยแหล่งจ่ายไฟแบบไฮบริดจ์เป็นการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาทำงานร่วมกับอัลตราคาปาซิเตอร์ในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าและจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากอัลตราคาปาซิเตอร์มีคุณสมบัติในการเก็บพลังงานเหมือนกับแบตเตอรี่ทั้งยังง่ายต่อการจัดเก็บพลังงานมีน้ำหนักเบา อายุการใช้งานยาวนาน การเสื่อมเนื่องจากอุณหภูมิมีน้อย แนวโน้มในการนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองในรถไฟฟ้ามีมากขึ้นด้วย ในการสร้างแหล่งจ่ายไฟแบบไฮบริดจ์จะใช้อัลตราคาปาซิเตอร์ซึ่งมีคุณสมบัติในการเก็บและคายพลังงานไฟฟ้าอย่างรวดเร็วแล้วผ่านวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ (DC-DC Boost Converter) ทำให้ระดับแรงดันเอาต์พุตสูงกว่าระดับแรงดันอินพุต โดยการใช้มอสเฟสเป็นอุปกรณ์กำลังทำหน้าที่สวิตช์ทำงานที่ความถี่ 100 kHz ใช้ไอซี UC3824 ทำหน้าที่ผลิตพัลส์วิดซ์เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของมอสเฟตและมีการควบคุมแรงดันเอาต์พุตป้อนกลับ เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ 24 โวลต์ กระแสสูงสุดที่จ่ายให้โหลด 2.00 แอมป์ มีวงจรป้องกันกระแสเอาต์พุตเกิน ในการทดสอบได้ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 70 วัตต์ ที่แรงดัน 17.6 โวลต์ กระแส 4.38 แอมป์

จากการทดสอบแหล่งจ่ายไฟนี้เมื่อต่อเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 70 วัตต์ สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 2 แอมป์แรงดันเอาต์พุต 24.44 โวลต์ ประสิทธิภาพ 74.56% หากจ่ายกระแสสูงกว่า 2 แอมป์ ก็จะไม่สามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตไว้ได้ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์มีข้อจำกัดในการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียง 70 วัตต์หรือต่ำกว่าขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มของแสง และเมื่อทดสอบเปรียบเทียบกันระหว่างต่อเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านบูสคอนเวอร์เตอร์จ่ายกระแสให้กับโหลดแบบ Step Load และเซลล์แสงอาทิตย์ต่อขนานอัลตราคาปาซิเตอร์ผ่านบูสคอนเวอร์เตอร์จ่ายกระแสให้กับโหลดแบบ Step Load พบว่าเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ต่อขนานอัลตราคาปาซิเตอร์สามารถจ่ายกระแสให้โหลดได้ โดยที่แรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์ยังจ่ายได้อยู่ไม่ลดลงมา เพราะมีอัลตราคาปาซิเตอร์ช่วยในการเก็บและจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว

5.2 ปัญหาของงานวิจัยและแนวทางแก้ไข

ปัญหาของแหล่งจ่ายไฟแบบไฮบริดจ์แสงอาทิตย์สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

เมื่อแรงดันตกเมื่อจ่ายโหลดกระแสสูงๆ และประสิทธิภาพของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์มีค่าต่ำแนวทางการแก้ไขพันตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ลวดฝอย (Litz Wire)

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 เปลี่ยนระบบชุดควบคุมจากไอซี UC3824 เป็นระบบดิจิตอลซึ่งจะมีความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรควบคุมได้ง่าย

5.3.2 หากต้องการลดกำลังสูญเสียให้น้อยที่สุด จึงควรใช้คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิคสวิตช์แบบนิ่มนวล (Soft Switching)

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย 2542. ออน-ไลน์

ทรงคุณ เผือกทอง แหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่งแบบสองทบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ปริญญานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2548

วีรเชษฐ์ ขันเงิน วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง กรุงเทพ หจก. วี เจ พริ้นติ้ง, 2548

ศราวุธ สุขบัวแก้ว สมยศ แก้วผดุง แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากอัลตราคาปาซิเตอร์โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ ปริญญานิพนธ์ ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2548

ศุภสันต์ พรหมเนรมิต เครื่องประจุแบตเตอรี่แบบทบแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ ปริญญานิพนธ์ ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2548

ภาษาอังกฤษ

Adam Marcus Namisnyk **A SURVEY OF ELECTROCHEMICAL SUPERCAPACITOR TECHNOLOGY** University of Technology Sydney Faculty of Engineering, 2003

Phatiphat Thounthong Stephane Real and Bernard Davat **Supercapacitor as an energy storage for fuel cell automotive hybrid electrical system** France, 2005

ภาคผนวก ก

โปรแกรมระบบควบคุม

```
            list        P=16F819
            errorlevel  -302
            __config    0x3921
            #include    "P16F819.INC"

            cblock      0x20
                        PDe10,PDe11,dat,temp,x1,x2,x3,x4,x5,x6,x7,x8
            endc


reset:      bsf     STATUS,RP0
            movlw   0x8E
            movwf   ADCON1
            clrf    TRISB
            bcf     STATUS, RP0
            clrf    PORTB

main:       movlw   b'00000001'
            movwf   ADCON0
            call    delay_47us
            bsf     ADCON0, GO_DONE
            btfsc   ADCON0, GO_DONE
            goto    $-1

            movlw   0x02
            movwf   x1
            movlw   0x51
            movwf   x2
            movf    ADRESH,W
            subwf   x1,W
            btfss   STATUS,C
            goto    main01
            btfsc   STATUS,Z
            goto    main01
            bcf     PORTB,0
            movlw   .100
            movwf   temp
            call    delay_5ms
            decfsz  temp,f
            goto    $-2
            goto    main0

main01:     bsf     STATUS,RP0
            movf    ADRESL,W
            bcf     STATUS,RP0
            subwf   x2,W
            btfss   STATUS,C
            goto    main1
            btfsc   STATUS,Z
```

```
            goto    main1
            bcf     PORTB,0
            movlw   .100
            movwf   temp
            call    delay_5ms
            decfsz  temp,f
            goto    $-2
            goto    main0

main0:      movlw   b'00001001'
            movwf   ADCON0
            call    delay_47us
            bsf     ADCON0, GO_DONE
            btfsc   ADCON0, GO_DONE
            goto    $-1
            movlw   0x01
            movwf   x3
            movlw   0xA2
            movwf   x4
            movf    ADRESH,W
            subwf   x3,W
            btfss   STATUS,C
            goto    main02
            btfsc   STATUS,Z
            goto    main02
            bcf     PORTB,1
            movlw   .100
            movwf   temp
            call    delay_5ms
            decfsz  temp,f
            goto    $-2
            goto    main

main02:     bsf     STATUS,RP0
            movf    ADRESL,W
            bcf     STATUS,RP0
            subwf   x4,W
            btfss   STATUS,C
            goto    main2
            btfsc   STATUS,Z
            goto    main2
            bcf     PORTB,1
            movlw   .100
            movwf   temp
            call    delay_5ms
            decfsz  temp,f
            goto    $-2
            goto    main

main1:      bsf     PORTB,0
            movlw   b'00001001'
            movwf   ADCON0
            call    delay_47us
            bsf     ADCON0, GO_DONE
            btfsc   ADCON0, GO_DONE
            goto    $-1
            movlw   0x01
            movwf   x5
```

```
        movlw   0xDE
        movwf   x6
        movf    ADRESH,W
        subwf   x5,W
        btfss   STATUS,C
        goto    main03
        btfsc   STATUS,Z
        goto    main03
        bsf     PORTB,1
        movlw   .100
        movwf   temp
        call    delay_5ms
        decfsz  temp,f
        goto    $-2
        goto    main4

main03: bsf     STATUS,RP0
        movf    ADRESL,W
        bcf     STATUS,RP0
        subwf   x6,W
        btfss   STATUS,C
        goto    main3
        btfsc   STATUS,Z
        goto    main3
        bsf     PORTB,1
        movlw   .100
        movwf   temp
        call    delay_5ms
        decfsz  temp,f
        goto    $-2
        goto    main4

main4:  movlw   b'00001001'
        movwf   ADCON0
        call    delay_47us
        bsf     ADCON0, GO_DONE
        btfsc   ADCON0, GO_DONE
        goto    $-1
        movlw   0x02
        movwf   x7
        movlw   0x51
        movwf   x8
        movf    ADRESH,W
        subwf   x7,W
        btfsc   STATUS,C
        goto    main5
        btfss   STATUS,Z
        goto    main5
        bcf     PORTB,1
        movlw   .100
        movwf   temp
        call    delay_5ms
        decfsz  temp,f
        goto    $-2
        goto    main

main5:  bsf     STATUS,RP0
        movf    ADRESL,W
```

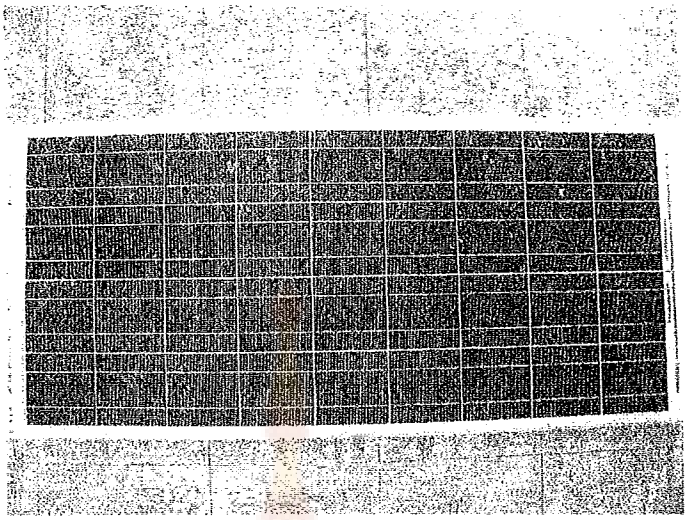
```
            bcf     STATUS,RP0
            subwf   x8,W
            btfsc   STATUS,C
            goto    main
            btfss   STATUS,Z
            goto    main
            bcf     PORTB,1
            movlw   .100
            movwf   temp
            call    delay_5ms
            decfsz  temp,f
            goto    $-2
            goto    main

main2:      bsf     PORTB,1
            goto    main

main3:      bcf     PORTB,1
            goto    main


delay_47us:    movlw    .11
               movwf    PDe10
delay_47us_0:  clrwdt
               decfsz   PDe10,f
               goto     delay_47us_0
               clrwdt
               return

delay_5ms:     movlw    .100
               movwf    PDe10
delay_5ms_0:   movlw    .10
               movwf    PDe11
delay_5ms_1:   clrwdt
               decfsz   PDe11,f
               goto     delay_5ms_1
               decfsz   PDe10,f
               goto     delay_5ms_0
               goto     $+1
               clrwdt
               return

               end
```

ภาคผนวก ข

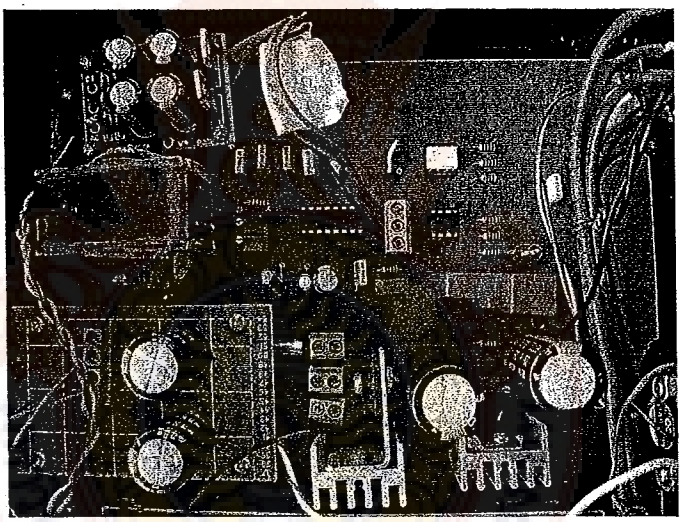
ภาพชิ้นงานในส่วนต่างๆ

ภาพที่ ข-1 ด้านหน้าของเครื่องจ่ายไฟแบบไฮบริด

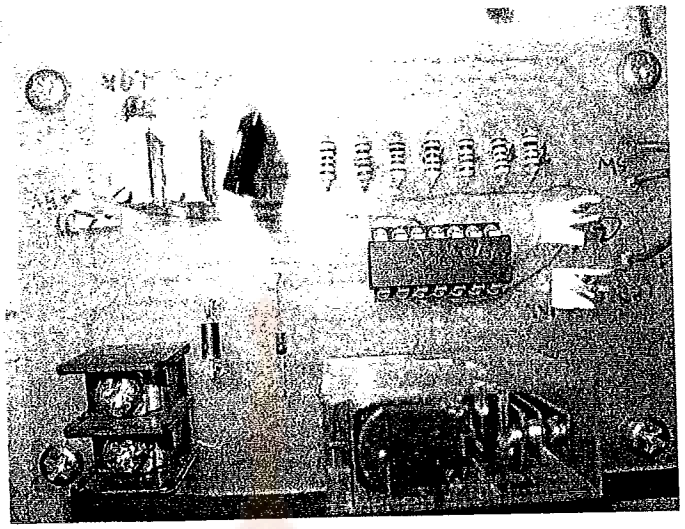
ภาพที่ ข-2 อัลตราคาปาซิเตอร์



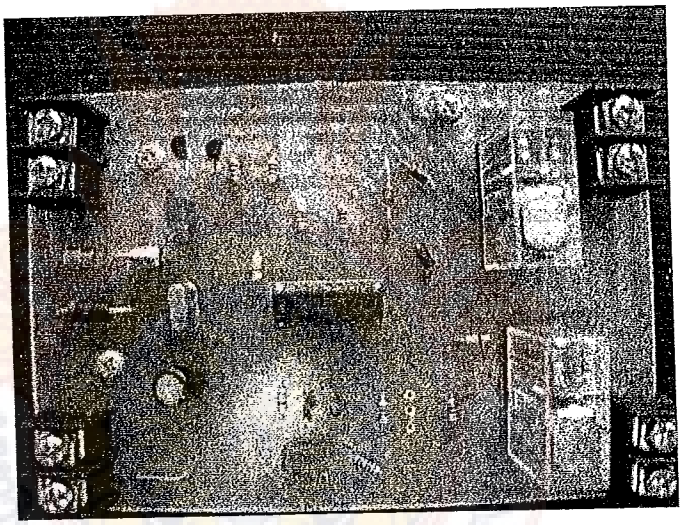
ภาพที่ ข-3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกโพลี



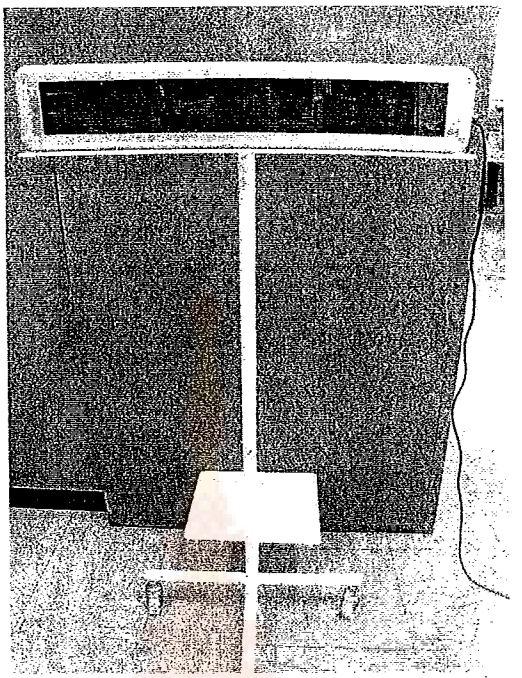
ภาพที่ ข-4 วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์



ภาพที่ ข-5 วงจรป้องกันกระแสเกิน



ภาพที่ ข-6 วงจรประจุและสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้า

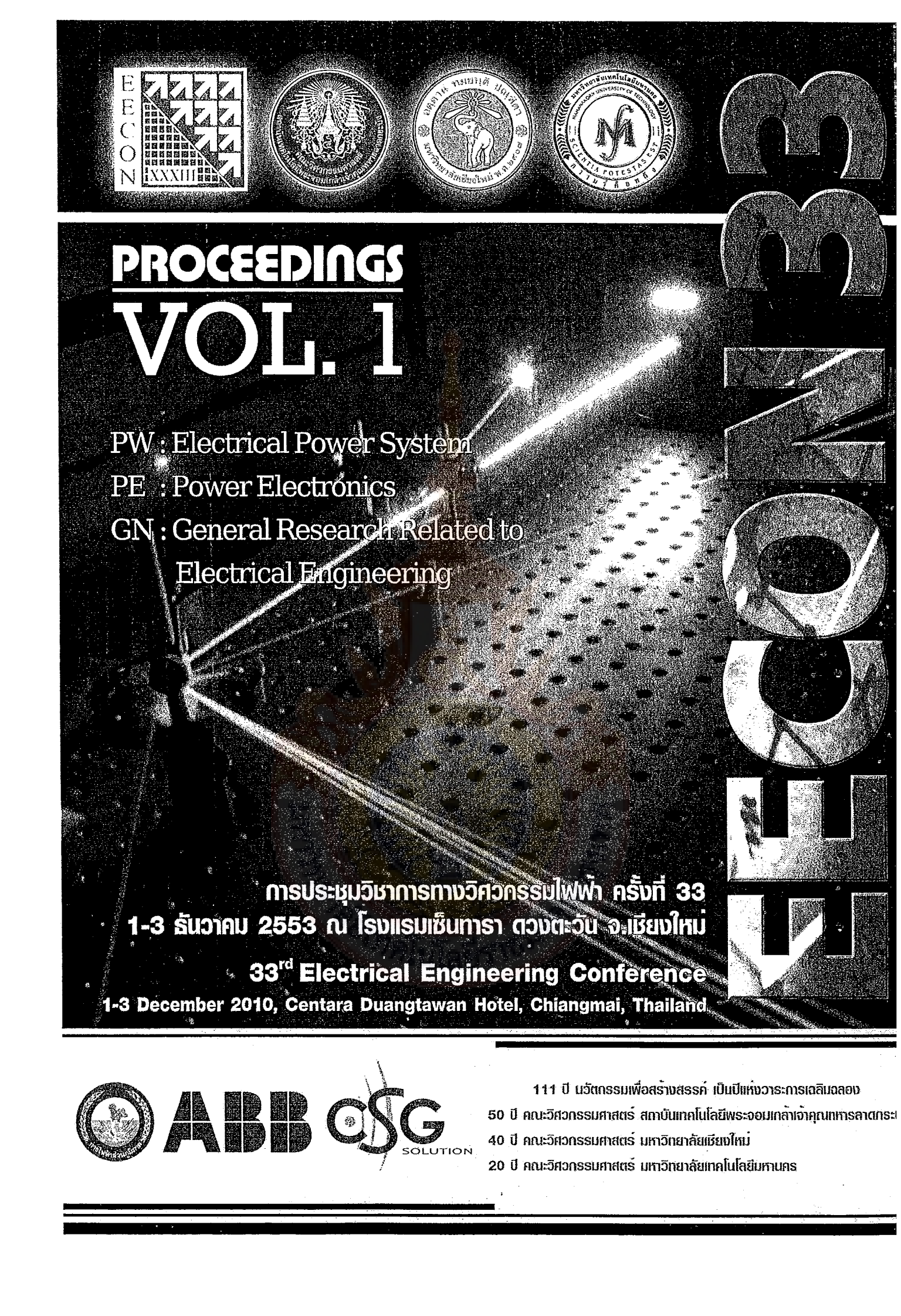


ภาพที่ ข-7 ป้ายแสดงผลอิเล็กทรอนิกส์

ภาพที่ ข-8 การต่อใช้งานแหล่งจ่ายไฟแบบไฮบริดสำหรับป้ายแสดงผลอิเล็กทรอนิกส์

ภาคผนวก ค

บทความวิจัย


EECON XXXIII
PROCEEDINGS
VOL. 1
PW : Electrical Power System
PE : Power Electronics
GN : General Research Related to Electrical Engineering
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33
1-3 ธันวาคม 2553 ณ โรงแรมเซ็นทารา ดวงตะวัน จ.เชียงใหม่
33rd Electrical Engineering Conference
1-3 December 2010, Centara Duangtawan Hotel, Chiangmai, Thailand
ABB
SOLUTION
111 ปี นวัตกรรมเพื่อสร้างสรรค์ เป็นปีแห่งวาระการเฉลิมฉลอง
50 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระ
40 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
20 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

การประยุกต์ใช้งานซุปเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์

Supercapacitor Application for Energy Storage in Collaborate with Solar Cell

ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข[1] สุเทพ ชูผึ้ง[1]และทวิวัช ชัยพิพัฒน์[1]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพ 10120 โทรศัพท์: 0-22879629 E-mail: chanrit.t@rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการประยุกต์นำเอาซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มาใช้งานร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าและเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับโหลด โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์และซุปเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ระดับแรงดันเอาต์พุตคงที่ 24 V ใช้มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ในการสวิตช์ที่ความถี่ 100 kHz ใช้ไอซี UC3824 สร้างสัญญาณ PWM เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของมอสเฟต มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแบบป้อนกลับด้วยตัวควบคุมแบบเฟสนำ-เฟสตาม เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F819 ควบคุมการประจุซุปเปอร์คาปาซิเตอร์และสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้า

คำสำคัญ: ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์, เซลล์แสงอาทิตย์, บูสคอนเวอร์เตอร์, PIC16F819

Abstract

This paper is an application of supercapacitor used in conjunction with solar cells to store energy and dc power supply to load. There are using boost converter circuit to regulate 24 V output voltages by 100 kHz switched power MOSFET. UC3824 IC to generate PWM signals to control operation of the MOSFET. The output voltage controlled with the phase lead- phase lag to regulated output voltage. The PIC16F819 microcontroller control of supercapacitor charger and switch power supply.

Keywords: Supercapacitor, Solar Cell, Boost Converter, PIC16F819

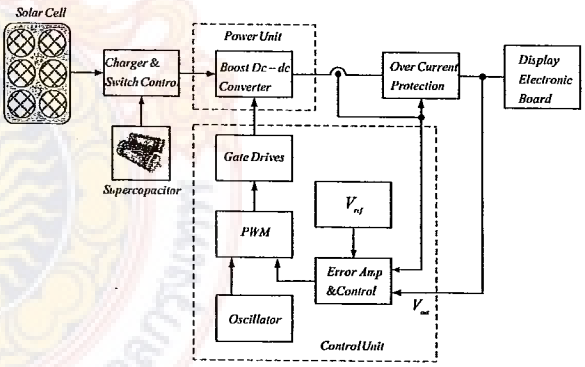
1. คำนำ

เซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่น่าสนใจ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีข้อดีคือ สามารถเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงไม่ก่อให้เกิดมลภาวะขณะใช้งานแต่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีข้อด้อยคือ ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ค่อนข้างต่ำและแรงดันไม่คงที่ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มของแสง จากข้อจำกัดดังกล่าวจึงได้มีแนวคิดที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเซลล์แสงอาทิตย์โดยนำซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มาใช้งานร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ในการจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าและเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับโหลดป้ายแสดงผลอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ มีข้อดีคือใช้เวลาสั้นในการจัดเก็บพลังงาน มีน้ำหนักเบา อายุการใช้งานยาวนาน และมีการเสื่อมเนื่องจากอุณหภูมิน้อย มีแนวโน้มในการนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองในระบบไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนมากขึ้น [1], [2]

2. ทฤษฎี

2.1 บล็อกไดอะแกรมระบบ

ระบบการทำงานใช้งานซุปเปอร์คาปาซิเตอร์รุ่น BCAP 1200F 2.7 V จำนวน 10 เซลล์ต่อแบบผสมร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 70 W 12 V เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยผ่านวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์สามารถเขียนระบบได้ดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 1



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบ

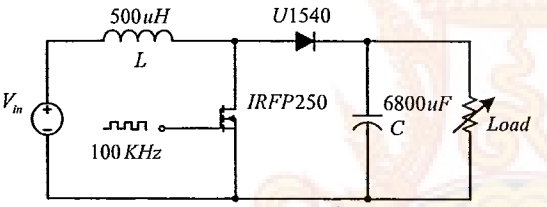
จากบล็อกไดอะแกรมระบบประกอบไปด้วยภาคจ่ายไฟฟ้าเป็นวงจรที่ทำหน้าที่สับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้าระหว่างซุปเปอร์คาปาซิเตอร์กับเซลล์แสงอาทิตย์ ภาควงจรกำลังทำหน้าที่เพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุต ภาควงจรควบคุมทำหน้าที่ควบคุมวงจรกำลังให้รักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ ภาควงจรป้องกันกระแสเกินมีหน้าที่ปลดวงจรด้านเอาต์พุตออกเมื่อเกิดกระแสเกิน

2.2 วงจรสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้าและประจุ

วงจรสับเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้าระหว่างซุปเปอร์คาปาซิเตอร์กับเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าผ่านวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์และทำการประจุซุปเปอร์คาปาซิเตอร์เมื่อแรงดันของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มีค่าต่ำโดยที่แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากเพียงพอที่จะสามารถทำการประจุได้ วงจรใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F819 ควบคุมการทำงานโดยตรวจจับแรงดันจากซุปเปอร์คาปาซิเตอร์และเซลล์แสงอาทิตย์นำมาเป็นตัวแปรให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำตามเงื่อนไข ส่วนของการป้องกันกระแสเกินทางด้านเอาต์พุตจะใช้รีเลย์รับสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับกระแส เมื่อเกิดกระแสเกินจะส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าผ่านวงจรออปแอมป์ เพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปทริกขาเกตเอสซีอาร์

2.3 วงจรกำลัง

วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงกว่าแรงดันอินพุต วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2 ประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงค่า $500\mu H$ สวิตช์กำลังใช้มอสเฟตเบอร์ IRFP250 ไดโอดกำลังความถี่สูงเบอร์ U1540 ตัวเก็บประจุเลือกใช้ที่ความจุ $6800\mu F$ 35 V วงจรกำลังออกแบบให้ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง (CCM) กำหนดความถี่ในการสวิตช์ 100 kHz



รูปที่ 2 วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

2.4 วงจรควบคุม

วงจรรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรกำลังให้คงที่ โดยใช้ไอซี UC3824 สร้างสัญญาณ PWM โดยความถี่คงที่ การตรวจจับแรงดันเอาต์พุตจะใช้วงจรแบ่งแรงดัน ซึ่งเป็นสัญญาณบวกจะใช้ค่าความต้านทาน R_1 และ R_2 โดยอาศัยใช้การแบ่งแรงดันไปต่อเข้ากับวงจรชดเชยเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง V_{ref} เมื่อแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลง จะทำให้ V_{error} มีค่ามากขึ้นและนำสัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่าง V_{error} และ V_{ref} ใช้ในการปรับดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) โดยจะนำสัญญาณ V_{error} ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณ Ramp Oscillator ทำให้ได้พัลส์ไปควบคุมมอสเฟตกำลัง วงจรจะถูกควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่และชดเชยให้ระบบมีเสถียรภาพสามารถเขียนวงจรได้ดังรูปที่ 3 ในส่วนของวงจรชดเชยระบบค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุสามารถคำนวณได้จากการนำพารามิเตอร์ของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ตามสมการที่ (1) ไปทำการจำลองเพื่อหาผลตอบสนองต่อความถี่โดยโปรแกรม Pspice

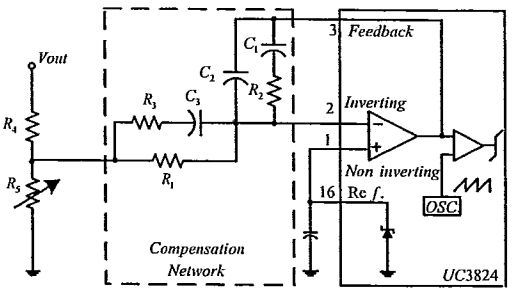
$$\frac{\tilde{v}_o}{\tilde{d}} = \frac{V_{in}}{(1-D)^2}\left(1 - s\frac{L}{R}\right)\frac{1+srC}{LC(s^2 + s\left(\frac{1}{RC}+\frac{r}{L}\right)+\frac{1}{LC}} \qquad (1)$$

แล้วนำค่า crossover frequency และ gain margin [3] ไปทำการหาค่าอุปกรณ์ชดเชยด้วยตัวควบคุมในสมการที่ (2) โดยเลือกค่า $\phi_{PM} = 60^\circ$ และค่าความถี่ครอสโอเวอร์ $f_c = 100\,H_z$

$$G_C(s) = \frac{k_c}{s}\frac{(1+s/\omega_z)^2}{(1+s/\omega_p)^2} \qquad (2)$$

จะได้ค่า

$R_1 = 100k\Omega,\ R_2 = 9.6k\Omega, R_3 = 1.14k\Omega, C_1 = 1.54\mu F, C_2 = 17.7nF, C_3 = 150nF$

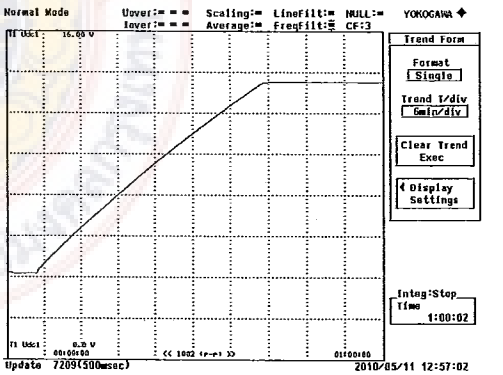


รูปที่ 3 วงจรควบคุมแบบวงปิดด้วยไอซี UC3824

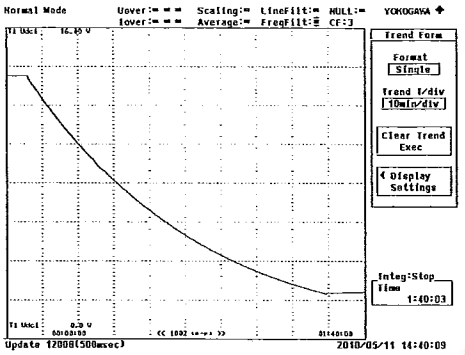
3. ผลการทดลอง

3.1 ทดสอบการเก็บและคายพลังงานของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์

จากการทดสอบการเก็บพลังงานไฟฟ้าของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ค่าแรงดัน 14 V และกระแสไฟฟ้าต่างๆ จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ค่ากระแสสูงในการเก็บพลังงานไฟฟ้า จะใช้เวลาในการเก็บพลังงานน้อย แต่เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าในการเก็บพลังงานมีค่าต่ำลงมาจะใช้เวลาในการเก็บพลังงานมากขึ้น



รูปที่ 4 แรงดันไฟฟ้าซุปเปอร์คาปาซิเตอร์เก็บพลังงานไฟฟ้าแรงดัน 14 V และกระแส 2 A

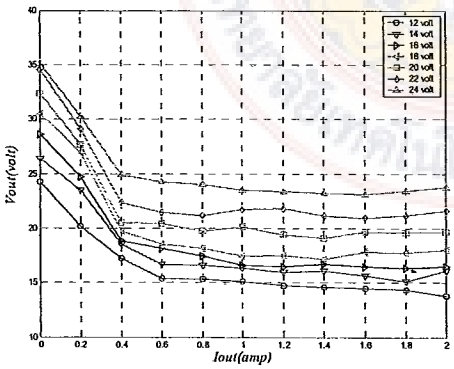


รูปที่ 5 แรงดันไฟฟ้าซุปเปอร์คาปาซิเตอร์คายพลังงานไฟฟ้าแรงดัน 14 V และกระแส 2 A

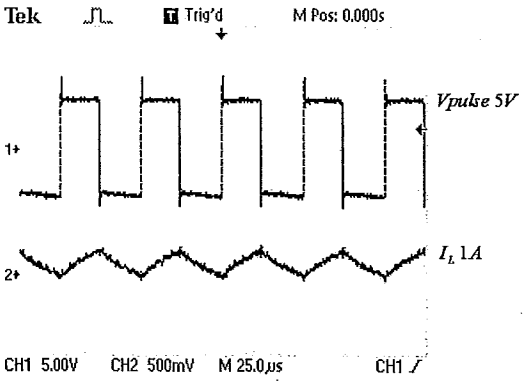
จากการทดสอบการคายพลังงานไฟฟ้าของซุเปอร์คาปาซิเตอร์ที่แรงดัน 14 Vและค่ากระแสไฟฟ้าต่างๆ จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ค่ากระแสสูงในการคายพลังงานไฟฟ้าจะใช้เวลาในการคายพลังงานน้อยแต่เมื่อมีโหลดน้อยๆ ก็จะทำให้เวลาการคายพลังงานมากขึ้นทำให้ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มีคุณสมบัติเหมือนกับแบตเตอรี่ รูปที่ 5 เมื่อจ่ายกระแสโหลดที่ 2 A จะใช้เวลาถึง 1 ชั่วโมง 50 นาที ในบทความนี้จ่ายกระแส 2 A และแรงดันใช้งานอยู่ระหว่าง 10 – 13.5 V ดังนั้นจึงจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ 30 นาที

3.2 ทดสอบแรงดันเอาต์พุตของวงจรเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง

จากการทดสอบเมื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดและดังรูปที่ 6 โดยวิธีลูปเปิดที่แรงดันอินพุตค่าต่างๆ นั้นจะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตจะค่อยๆ ลดลงเมื่อโหลดใช้กระแสมากขึ้น ทำให้ระดับแรงดันเอาต์พุตไม่คงที่ ดังนั้นจึงต้องทำให้แรงดันเอาต์พุตคงที่ โดยการควบคุมแรงดันด้วยวิธีลูปปิดโดยใช้ไอซี UC3824 ในโหมดแรงดันเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตคงที่ จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึงคำสัญญาณจากชุดคำสั่งสวิตช์ ที่ได้จากไอซี UC3824 ผ่านไอซีขับเกต TLP250 เปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ จากการทดสอบโดยใช้ความถี่ 100 KHz จะพบว่าสัญญาณจากชุดคำสั่งสวิตช์สามารถควบคุมให้มอสเฟตทำงานสวิตช์ได้ และยังส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าต่อเนื่อง



รูปที่ 6 กราฟระหว่างกระแสและแรงดันเอาต์พุตเมื่อทดสอบแบบลูปเปิด

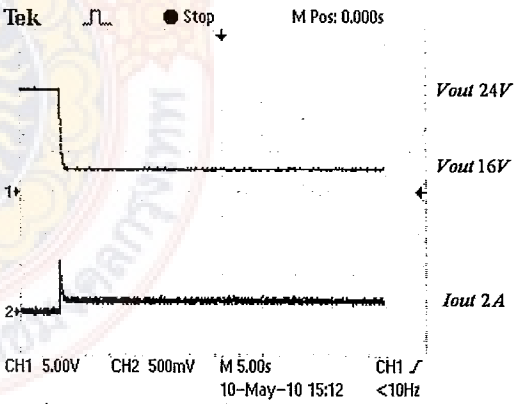


รูปที่ 7 สัญญาณสวิตช์และสัญญาณกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ (i_L)

จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าเมื่อจ่ายโหลดแบบ step ในกรณีลูปเปิดแรงดันเอาต์พุตจะลดลงทันทีทำให้ไม่สามารถรักษาระดับไว้ได้แต่ในกรณีลูปปิดแรงดันเอาต์พุตจะลดลงแล้วกลับมาคงที่ได้ช้ากว่าซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ เนื่องจากซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มีการจ่ายกระแสชั่วขณะได้ดี

3.3 ทดสอบต่อใช้งานซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ผ่านบูสคอนเวอร์เตอร์

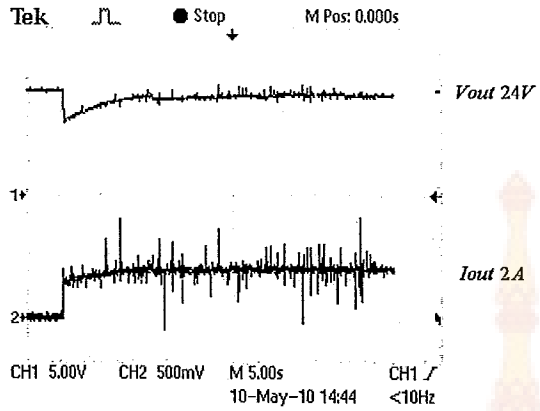
ส่วนการทดสอบจะพบว่าเมื่อต่อใช้งานซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ผ่านวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์จ่ายโหลดประสิทธิภาพในระบบจะมีค่าสูงในช่วง 0.6 – 1.8 แอมป์ ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดได้โดยมีค่าประสิทธิภาพสูงที่ค่ากระแสสูงๆ ประสิทธิภาพของระบบจะดีกว่าการใช้งานต่อเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์จ่ายโหลด แต่แรงดันซุปเปอร์คาปาซิเตอร์จะลดลงค่อนข้างรวดเร็วเมื่อจ่ายโหลดที่ค่ากระแสสูงๆ



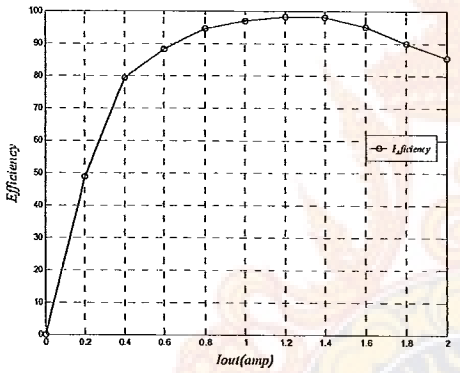
รูปที่ 8 แรงดันและกระแสเมื่อจ่ายโหลด 100 % ทันทีแบบลูปเปิด

จากรูปที่ 11 เป็นการบันทึกผลการต่อใช้งานจริงของระบบ พบว่าถึงแม้ว่าแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลงจนไม่สามารถจ่ายพลังงานให้กับระบบได้ แต่ยังมีพลังงานจากซุปเปอร์คาปาซิเตอร์จ่ายในช่วงเวลานั้น ทำ

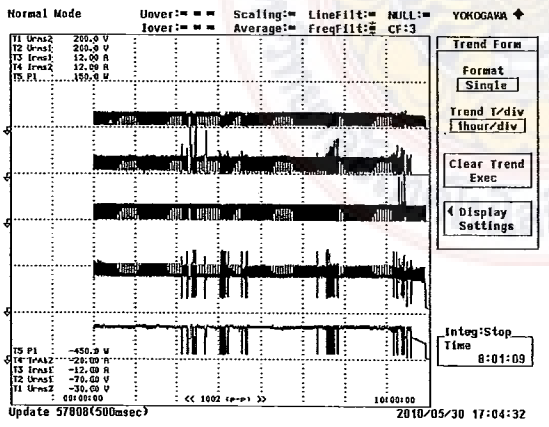
ให้ยังสามารถจ่ายพลังงานให้โหลดได้ต่อไปอีก แต่ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ไม่สามารถจ่ายพลังงานได้นาน เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องของความจุ แต่สามารถจ่ายพลังงานได้นานประมาณ 30 นาที



รูปที่ 9 แรงดันและกระแสเมื่อจ่ายโหลด 100 % ทันทีแบบลูปปิด



รูปที่ 10 กราฟประสิทธิภาพที่กระแสเอาต์พุตต่างๆ เมื่อต่อใช้งานกับซุปเปอร์คาปาซิเตอร์



รูปที่ 11 กราฟบันทึกผลการทำงานระบบขณะสับเปลี่ยนแหล่งจ่าย

4. สรุปผล

การประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับซุปเปอร์คาปาซิเตอร์สำหรับป้ายแสดงผลแบบอิเล็กทรอนิกส์ในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าและจัดเก็บพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีคุณสมบัติในการเก็บและคายพลังงานไฟฟ้าอย่างรวดเร็วแล้วผ่านวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ โดยใช้ไอซี UC3824 ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดดูเลชั่นและควบคุมแรงดันเอาต์พุตคงที่ 24 V กระแสสูงสุดที่จ่ายให้โหลด 2 A ในการทดสอบได้ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ 70 W ที่แรงดัน 17.6 V กระแส 4.38 A จากการทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้านี้เมื่อต่อเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 70 W สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 2 A แรงดันเอาต์พุต 24.44 V ประสิทธิภาพ 74.56% หากจ่ายกระแสสูงกว่า 2 A ก็จะไม่สามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตไว้ได้ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์มีข้อจำกัดในการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียง 70 W หรือต่ำกว่า และทดสอบเปรียบเทียบกันระหว่างต่อเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านบูสคอนเวอร์เตอร์จ่ายกระแสให้กับโหลดแบบ Step Load และเซลล์แสงอาทิตย์ต่อขนานซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ผ่านบูสคอนเวอร์เตอร์จ่ายกระแสให้กับโหลดแบบ Step Load พบว่าเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ต่อขนานซุปเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถจ่ายกระแสให้โหลดได้เพราะมีซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ช่วยในการเก็บและจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Arbizzani, C., Mastragostino, M., & Soavi, F., "New trends in electrochemical supercapacitors," Journal of power sources, vol. 100, pp.164-170, 2001.

[2] Zubieta, L., & Bonert, R., "Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications," IEEE transactions on industry applications, vol. 36, pp. 199-205, 2000.

[3] Mohan, N. "A First Course on Power Electronics and Drives" MNPERE. pp. 4-1- 4-21, 2003.

ประวัติผู้เขียนบทความ

ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีความสนใจงานวิจัยด้านระบบควบคุม และอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

สุเทพ ชูผึ้งและทวิวัช ชัยพิพัฒน์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ มีความสนใจงานวิจัยด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและระบบควบคุม