

รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง ภาษาไทย: การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์สำหรับ
Ultracapacitor เพื่อประยุกต์ใช้งานจัดเก็บพลังงานไฟฟ้า
ภาษาอังกฤษ: Design and Development of Ultracapacitor Converter
Control System for Energy Storage Applications

คณะผู้วิจัย

นายชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข

RMUTK - CARIT



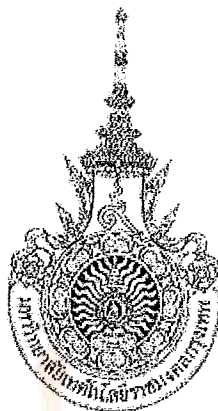
3 2000 00100628 9

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2552

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

1285



รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง ภาษาไทย: การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์สำหรับ
Ultracapacitor เพื่อประยุกต์ใช้งานจัดเก็บพลังงานไฟฟ้า
ภาษาอังกฤษ: Design and Development of Ultracapacitor Converter
Control System for Energy Storage Applications

คณะผู้วิจัย

นายชาญฤทธิ์ ชารัตน์ติสุข

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2552
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

หัวข้อวิจัย	การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์สำหรับ Ultracapacitor เพื่อประยุกต์ใช้งานจัดเก็บพลังงานไฟฟ้า
ผู้วิจัย	นายชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีงบประมาณ	2552

บทคัดย่อ

อุปกรณ์จัดเก็บพลังงานมีความสำคัญต่อระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้า โดยแบตเตอรี่จัดว่าเป็นอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy Storage) ที่ใช้งานกันอยู่มากในปัจจุบันแต่มีข้อด้อยคือ ผลตอบสนองในสถานะไดนามิกไม่ดี ใช้เวลาการชาร์จและดิสชาร์จนาน ระยะเวลาใช้งาน (life cycle) ที่น้อย และความสามารถในการจัดเก็บพลังงานที่ต่ำ ผู้วิจัยจึงได้ค้นคว้าข้อมูลอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานไฟฟ้า เพื่อใช้งานกับระบบส่งจ่ายและจัดเก็บพลังงานสำหรับพลังงาน ซึ่งอุปกรณ์ Ultracapacitor จัดว่าเป็นอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เวลาในการชาร์จและดิสชาร์จที่ต่ำ มีพิกัดกระแสและแรงดันที่สูง มีพิกัดความสามารถในการจัดเก็บพลังงานที่สูง และมีความสามารถในการลดพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก โดยการศึกษาข้อมูล หาแบบจำลอง ด้วยโปรแกรม Pspice และนำเซลล์ Ultracapacitor BCAP1200 2.7 V มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับ วงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางขนาด 1 KW ซึ่งจากการทดสอบคอนเวอร์เตอร์สามารถทำงานส่งผ่านพลังงานได้สองทิศทาง และมีประสิทธิภาพสูง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 Ultracapacitor	4
2.2 วงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรง	11
2.3 มอสเฟตกำลัง (Power MOSFET)	25
2.4 ไดโอดกำลัง	32
2.5 การควบคุมการทำงานสำหรับคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง	38
2.6 ตัวควบคุมแบบพีไอ	41
2.7 การ์ดอินเตอร์เฟส DS1104	44
บทที่ 3 การออกแบบงานวิจัย	
3.1 คำนวณและศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	55
3.2 การออกแบบวงจรกำลังของวงจรดีซีบูตัสตีคอนเวอร์เตอร์	56
3.3 อุปกรณ์ตรวจจับกระแส	59
3.4 วงจรขับนำเกตด้วยไอซีเบอร์ TLP250	60

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์	
4.1 การทดสอบการเก็บและคายพลังงานไฟฟ้าของ Ultracapacitor	61
4.2 การจำลองการเก็บและคายพลังงานไฟฟ้าของ Ultracapacitor ด้วยโปรแกรม Pspice	66
4.3 การทดสอบการส่งถ่ายพลังงานจาก Ultracapacitor ผ่านบัสคอนเวอร์เตอร์ไปยังระบบ	69
4.4 การทดสอบการส่งถ่ายพลังงานจากระบบ ผ่านบัสคอนเวอร์เตอร์ไปยัง Ultracapacitor	74
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลที่ได้จากการทดลอง	77
5.2 ปัญหาที่พบในงานวิจัย	77
5.3 ข้อเสนอแนะ	77
บรรณานุกรม	78
ภาคผนวก ก. รูปงานวิจัย	79
ภาคผนวก ข. รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	81
ภาคผนวก ค. บทความวิจัย	83

สารบัญตาราง		
ตารางที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติของแบตเตอรี่กับ Ultracapacitor และคาปาซิเตอร์ทั่วไป	7
4.1	คุณสมบัติของ Ultracapacitor	66



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของ Ultracapacitor	6
2.2 Ultracapacitor แบบต่างๆ	6
2.3 การเก็บประจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์	7
2.4 วงจรสมมูลของ Ultracapacitor	8
2.5 วงจรทดสอบวัดค่าความต้านทานสมมูลต่อแบบอนุกรม	9
2.6 การนำ Ultracapacitor เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองให้กับหน่วยความจำ	10
2.7 การนำ Ultracapacitor เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับรถไฟฟ้า	10
2.8 หลักการควบคุมวงจรแปลงผันตรงใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์	11
2.9 การควบคุมความกว้างพัลส์	12
2.10 คุณสมบัติบั๊กคอนเวอร์เตอร์	14
2.11 รูปคลื่นวงจรกรณีกระแสต่อเนื่อง	15
2.12 คลื่นกระแส i_L เริ่มไม่ต่อเนื่อง	16
2.13 รูปคลื่นกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง	17
2.14 รูปคลื่น i_C และ V_O	17
2.15 รูปคลื่นกระแส i_L , i_S และ i_D	19
2.16 คุณสมบัติวงจรแปลงผันแบบบูส	20
2.17 รูปคลื่นกรณีกระแสไหลต่อเนื่อง	21
2.18 รูปคลื่นกรณีกระแส i_L เริ่มไม่ต่อเนื่อง	22
2.19 รูปคลื่นกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง	23
2.20 รูปคลื่น i_C และ V_O	24
2.21 ลักษณะของกระแสและแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตกำลัง	29
2.22 ตัวเก็บประจุแผ่นที่ต่ออยู่ที่ขาต่างๆ ภายในมอสเฟตกำลัง	30
2.23 Gate Charge Chart	31
2.24 ลักษณะการชาร์จประจุที่ขาเกต	32
2.25 การทำงานของไดโอด	33
2.26 การหยุดนำกระแสของไดโอด	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.27 ผลกระทบของช่องอากาศต่อกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก	35
2.28 วงจร 2 Quadrant dc to dc converter	38
2.29 วงจรสมมูลขณะทำงานเป็นวงจร Buck dc to dc converter	38
2.30 วงจรสมมูลขณะทำงานเป็นวงจร Boost dc to dc converter	39
2.31 บล็อกไดอะแกรมระบบดิจิทัลซีคอนเวอร์เตอร์ 2 ทิศทาง	39
2.32 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง	40
2.33 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบพีไอ	41
2.34 ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดของตัวควบคุมแบบพีไอ	42
2.35 วงจรควบคุมแบบพีไอ	42
2.36 การ์ดอินเตอร์เฟส dSPACE รุ่น DS1104	45
2.37 บล็อกไดอะแกรมฮาร์ดแวร์ของการ์ดอินเตอร์เฟส DS1104	46
2.38 rtlib1104 blocksets	48
2.39 DS1104 Master PPC และ DS1104 SLAVE DSP blocksets	49
3.1 ผังขั้นตอนการดำเนินงาน	54
3.2 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์สำหรับ Ultracapacitor	55
3.3 วงจรดิจิทัลซีคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง	55
3.4 เซนเซอร์กระแสเบอร์ LA55-P	59
3.5 วงจรขับเคลื่อนด้วย TLP 250	60
4.1 วงจรทดสอบการเก็บพลังงานไฟฟ้าของ Ultracapacitor	61
4.2 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า Ultracapacitor ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าที่แรงดัน 14 V กระแส 1 A	62
4.3 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า Ultracapacitor ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าที่แรงดัน 14 V กระแส 2 A 55	62
4.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า Ultracapacitor ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าที่แรงดัน 14 V กระแส 3 A	63
4.5 วงจรทดสอบการคายประจุของ Ultracapacitor	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า Ultracapacitor ในการคายพลังงานไฟฟ้า ที่แรงดัน 14 โวลต์ กระแส 1 แอมป์	64
4.7 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า Ultracapacitor ในการคายพลังงานไฟฟ้า ที่แรงดัน 14 โวลต์ กระแส 2 แอมป์	65
4.8 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า Ultracapacitor ในการคายพลังงานไฟฟ้า ที่แรงดัน 14 โวลต์ กระแส 3 แอมป์	66
4.9 Ultracapacitor รุ่น พร้อมแผงวงจร Cell balance จำนวน 6 เซลล์	67
4.10 วงจรจำลองทดสอบการคายประจุของ Ultra Capacitor	67
4.11 สัญญาณแรงดันและกระแสของ Ultracapacitor ในการคายประจุ ที่แรงดัน 13.5 โวลต์ กระแส 1 แอมป์	68
4.12 สัญญาณแรงดันและกระแสของ Ultra Capacitor ในการคายประจุ ที่แรงดัน 13.5 โวลต์ กระแส 2 แอมป์	68
4.13 สัญญาณแรงดันและกระแสของ Ultracapacitor ในการคายประจุ ที่แรงดัน 13.5 โวลต์ กระแส 3 แอมป์	69
4.14 การทดสอบการจ่ายพลังงานออกจาก Ultracapacitor	69
4.15 สัญญาณค่าตั้งสวิตช์ (CH1: 5V/div) และสัญญาณกระแสตัวเหนี่ยวนำ ผ่านเซนเซอร์ (CH2: 10A/div)	70
4.16 วงจรการวัดค่าประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟที่ค่ากระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ	71
4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกระแสเอาต์พุตขณะคายพลังงาน	71
4.18 วงจรต่อใช้งานชุดเปอร์คาปาซิเตอร์ผ่านวงจรบูตคอนเวอร์เตอร์จ่าย Step load	72
4.19 สัญญาณแรงดันผ่านเซนเซอร์ (CH1: 25V/div) และกระแสผ่านเซนเซอร์ (CH2: 10A/div) เมื่อจ่ายโหลด 100 % ทันทีแบบรูปเปิด	72
4.20 สัญญาณแรงดันผ่านเซนเซอร์ (CH1: 25V/div) และกระแสผ่านเซนเซอร์ (CH2: 10A/div) เมื่อจ่ายโหลด 100 % ทันทีแบบรูปปิด	73
4.21 สัญญาณแรงดันผ่านเซนเซอร์ (CH1: 25V/div) และกระแสผ่านเซนเซอร์ (CH2: 10A/div) เมื่อจ่ายโหลดที่ 25 % แล้วเพิ่มโหลดเป็น 100 % แบบรูปเปิด	73
4.22 สัญญาณแรงดันผ่านเซนเซอร์ (CH1: 25V/div) และกระแสผ่านเซนเซอร์ (CH2: 10A/div) กระแสเมื่อจ่ายโหลดที่ 25 % แล้วเพิ่มโหลดเป็น 100 % แบบรูปปิด	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.23 การทดสอบการจ่ายพลังงานเข้าสู่ Ultracapacitor	74
4.24 สัญญาณคำสั่งสวิตช์ (CH1: 5V/div) และสัญญาณกระแสตัวเหนี่ยวนำผ่านเซนเซอร์ (CH2: 10A/div)	75
4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกระแสเอาต์พุตขณะเก็บพลังงาน	75
4.26 กราฟบันทึกผลการทำงานของวงจรประจุและคายพลังงานไฟฟ้าอุปกรณ์ Ultracapacitor ในช่วงเวลา 1hr/div	76



บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันนี้ได้มีผลิตพลังงานไฟฟ้าทดแทนมากขึ้นอาทิเช่น จากแสงอาทิตย์ (Solar) และเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากภาวะที่น้ำมันเชื้อเพลิงมีราคาแพงและหมดไปในอนาคตอันใกล้ โดยพลังงานเหล่านี้เป็นพลังงานสะอาดและไม่มีมลพิษจากการผลิตไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามการนำพลังงานไฟฟ้าเหล่านี้มาใช้งานในลักษณะของแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า รถไฟฟ้าหรือต่อเข้ากับระบบส่งจ่ายไฟฟ้า (Grid connected) จะต้องใช้งานร่วมกับชุดคอนเวอร์เตอร์เพื่อยกระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากแหล่งไฟฟ้าทดแทนให้สูงขึ้นมากพอสำหรับการชาร์จให้กับอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (Energy Storage) และอินเวอร์เตอร์สำหรับแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับต่อไป

ดังนั้นอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานจึงมีความสำคัญต่อระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้า โดยเบดเตอร์จัดว่าเป็นอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy Storage) ที่ใช้งานกันอยู่มากในปัจจุบันแต่มีข้อด้อยที่ผลตอบสนองในสถานะไดนามิกที่ช้ากว่าคือใช้เวลาการชาร์จและดิสชาร์จที่นาน ระยะเวลาใช้งาน (life cycle) ที่น้อย และความสามารถในการจัดเก็บพลังงาน (energy density) ที่ต่ำ ผู้วิจัยจึงได้ค้นคว้าข้อมูลอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานไฟฟ้า เพื่อใช้งานกับระบบส่งจ่ายและจัดเก็บพลังงานในรถไฟฟ้า การสำรองพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าทดแทน ซึ่งอุปกรณ์ Ultracapacitor จัดว่าเป็นอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เวลาในการชาร์จและดิสชาร์จที่ต่ำ มีพิกัดกระแสและแรงดันที่สูง มีพิกัดความสามารถในการจัดเก็บพลังงานที่สูง และมีความสามารถในการลดพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก

1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.1.1 ค้นคว้าข้อมูล Ultracapacitor และคอนเวอร์เตอร์สำหรับใช้งานกับ Ultracapacitor

1.1.2 ศึกษาคุณลักษณะของ Ultracapacitor เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Orcad/Pspice

1.1.3 ศึกษาและพัฒนาดีซีฟูลชีคอนเวอร์เตอร์สำหรับใช้งานร่วมกับ Ultracapacitor

1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาข้อมูลของ Ultracapacitor และความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งาน
- 1.2.2 ศึกษาและสร้างคิซิทูคิซิคอนเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมกับการใช้งาน
- 1.2.3 จำลองการทำงานของ Ultracapacitor ร่วมกับคิซิทูคิซิคอนเวอร์เตอร์และแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าหลัก
- 1.2.4 สร้างชุดทดสอบการทำงานของ Ultracapacitor ร่วมกับคิซิทูคิซิคอนเวอร์เตอร์และแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าหลัก ขนาด 1 kW

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.3.1 ศึกษาหลักวิธีการควบคุมคอนเวอร์เตอร์สำหรับ Ultracapacitor
- 1.3.2 จำลองการทำงานของคิซิทูคิซิคอนเวอร์เตอร์และ คุณสมบัติการชาร์จและดิสชาร์จของ Ultracapacitor
- 1.3.3 สร้างคิซิทูคิซิคอนเวอร์เตอร์ขนาด 1 kW
- 1.3.4 สร้างโปรแกรมควบคุมการด์อินเตอร์เฟสรุ่น DS1104 เพื่อเชื่อมโยงข้อมูลผ่านช่องสัญญาณ ADC, DAC, PWM
- 1.3.5 ทดสอบการทำงานของ Ultracapacitor
- 1.3.6 ทดสอบและเก็บผลการทดลองระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์สำหรับ Ultracapacitor เพื่อประยุกต์ใช้งานจัดเก็บพลังงานไฟฟ้า
- 1.3.7 เปรียบเทียบคุณลักษณะต่างๆ เช่น กระแส แรงดัน สภาวะไดนามิก และประสิทธิภาพ เป็นต้น
- 1.3.8 จัดทำรูปเล่มรายงานการวิจัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เมื่องานวิจัยสำเร็จแล้วจะสามารถใช้เป็นเครื่องต้นแบบร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าทดแทนของประเทศในอนาคตต่อไป
- 1.4.2 เมื่องานวิจัยสำเร็จแล้วจะสามารถประยุกต์นำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าของประเทศในอนาคตต่อไป
- 1.4.3 สามารถนำผลงานไปตีพิมพ์บทความวิชาการเพื่อเผยแพร่งานวิจัยเป็นชื่อเสียงให้กับมหาวิทยาลัยได้

1.4.4 สามารถส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนจากเซลล์แสงอาทิตย์และเซลล์เชื้อเพลิงได้ในอนาคต

1.4.5 ได้งานวิจัยด้านอุปกรณ์ Ultracapacitor เพื่อสามารถนำไปใช้กับร่วมกับงานวิจัยอื่นๆได้



บทที่ 2

ทฤษฎี

ในการสร้างการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์สำหรับ Ultracapacitor เพื่อประยุกต์ใช้งานจัดเก็บพลังงานไฟฟ้า จะต้องศึกษาทฤษฎีดังต่อไปนี้

1. Ultracapacitor
2. วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบคิซึทาคิ (DC-DC Converter)
3. อุปกรณ์กำลังของคอนเวอร์เตอร์
4. การควบคุมการทำงานสำหรับคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง
5. ตัวควบคุมแบบพีไอ
6. การ์ดอินเตอร์เฟซ DS1104

2.1 Ultracapacitor

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

การสร้าง Ultracapacitor ขึ้นมา เพื่อต้องการให้เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองให้กับระบบต่างๆ หรืออาจกล่าวได้ว่า ไม่ได้นำมาใช้งานในวงจรทั่วไป แต่จะนำมาใช้งานแทนแบตเตอรี่ หรือคาปาซิเตอร์ค่ามากๆ ข้อดีของซูเปอร์คาปาซิเตอร์นี้ก็คืออายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า ไม่มีลักษณะของการลดประจุ เหมือนคาปาซิเตอร์ทั่วไป และไม่เหมือนกับถ่านนิเกิลแคดเมียมหรือนิแคด ตรงที่อายุการใช้งานของถ่านขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งของการชาร์จประจุไฟฟ้า และที่สำคัญไม่มีผลของดิสชาร์จเมมโมรีเอฟเฟกต์ (Discharge Memory Effect)

2.1.1 หลักการของ Ultracapacitor

สิ่งที่เหมือนกับคาปาซิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป คือ สร้างขึ้นมาจากการใช้แผ่นอะลูมิเนียมพื้นเคลือบพลาสติกม้วนขึ้นมาเป็นคาปาซิเตอร์ ซึ่งคาปาซิเตอร์นี้เป็นอุปกรณ์ที่สร้างมาจากหลักการของระบบชั้นสนามไฟฟ้าแบบซ้อนชั้น (Electric Double Layer) หรืออาจเรียกว่า คาปาซิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ดับเบิลเลเยอร์ ซึ่งเราให้การเชื่อมโยงประจุไฟฟ้าด้วยพื้นที่ของสารในรูปแบบของการนำสาร 2 ชนิดที่มีความต่างกันมาทำเป็นอิเล็กโตรด เพื่อให้คาปาซิเตอร์ดังกล่าว สามารถเกิดประจุได้มาก เก็บประจุได้นาน โดยวัสดุอย่างที่ยกมาไว้ในรูปของคาปาซิเตอร์ คือแอ็คติเวตคาร์บอนและน้ำยาที่เป็นตัวอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งทำมาจากกรดซัลฟิวริกเพื่อให้เกิดความชุ่มชื้นของเนื้อคาร์บอน ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดประจุบวกขึ้นทางขั้วหนึ่งส่วนอีกด้านก็จะเป็นประจุลบ โดยการถือว่าขั้วที่เป็นคาร์บอนจะให้ค่าประจุปฏิกิริยาเป็นบวกในขณะที่อีกขั้วซึ่งเป็นอิเล็กโทรไลต์เป็นค่าประจุปฏิกิริยาลบ

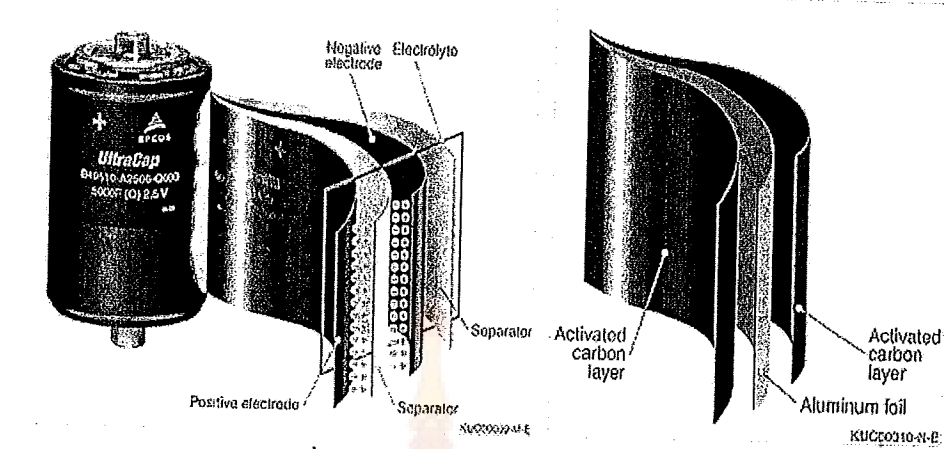
ค่าความจุไฟฟ้าในคาปาซิเตอร์เท่ากับอัตราส่วนระหว่างประจุไฟฟ้าที่คาปาซิเตอร์เก็บได้ ต่อแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมคาปาซิเตอร์นั้น เขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

$$C = \frac{Q}{V} = \epsilon \frac{A}{d} \tag{2.1}$$

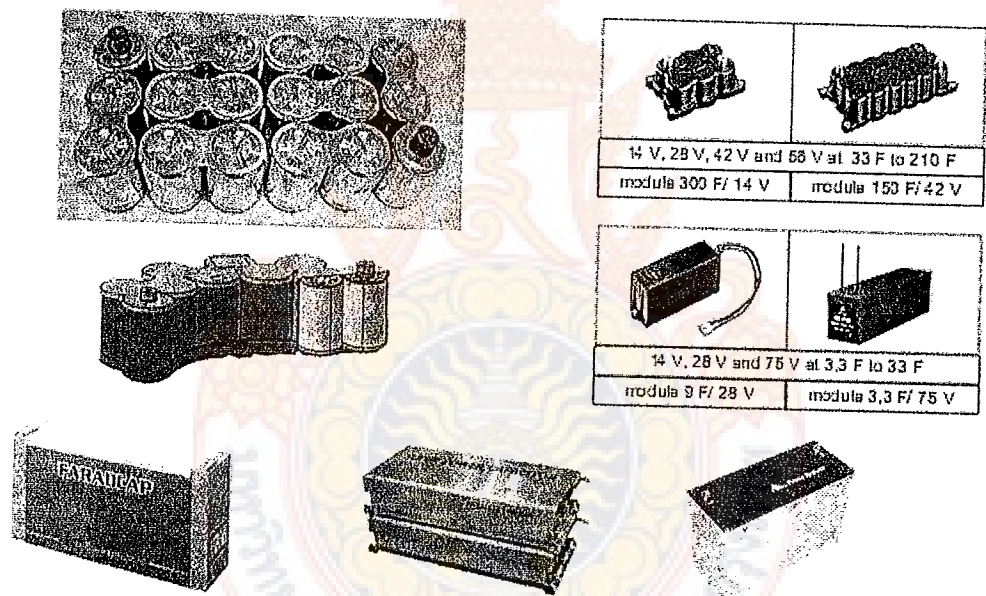
ค่าพลังงานที่ได้ใช้ในการให้ประจุสะสมในตัวเก็บประจุจะมีพลังงานศักย์ไฟฟ้า E

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \tag{2.2}$$

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)



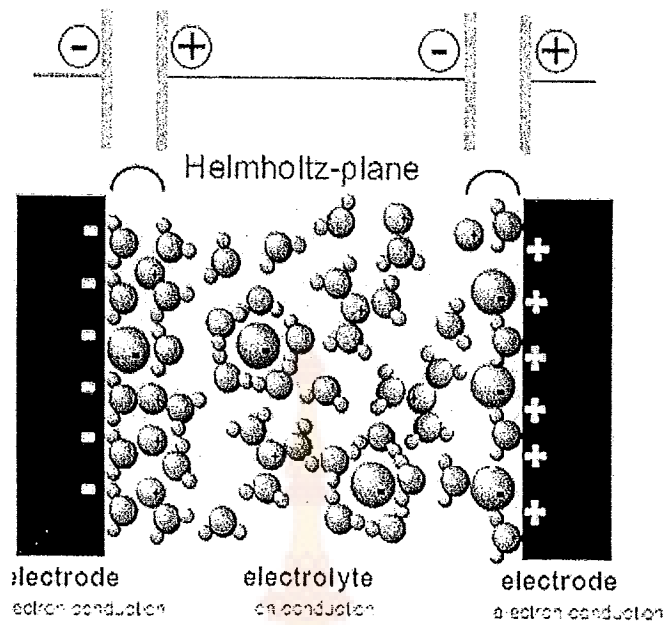
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของ Ultracapacitor



14 V, 28 V, 42 V and 56 V at 33 F to 210 F	
module 300 F/ 14 V	module 150 F/ 42 V

14 V, 28 V and 75 V at 3.3 F to 33 F	
module 3 F/ 28 V	module 3.3 F/ 75 V

ภาพที่ 2.2 Ultracapacitor แบบต่างๆ



ภาพที่ 2.3 การเก็บประจุของ Ultracapacitor

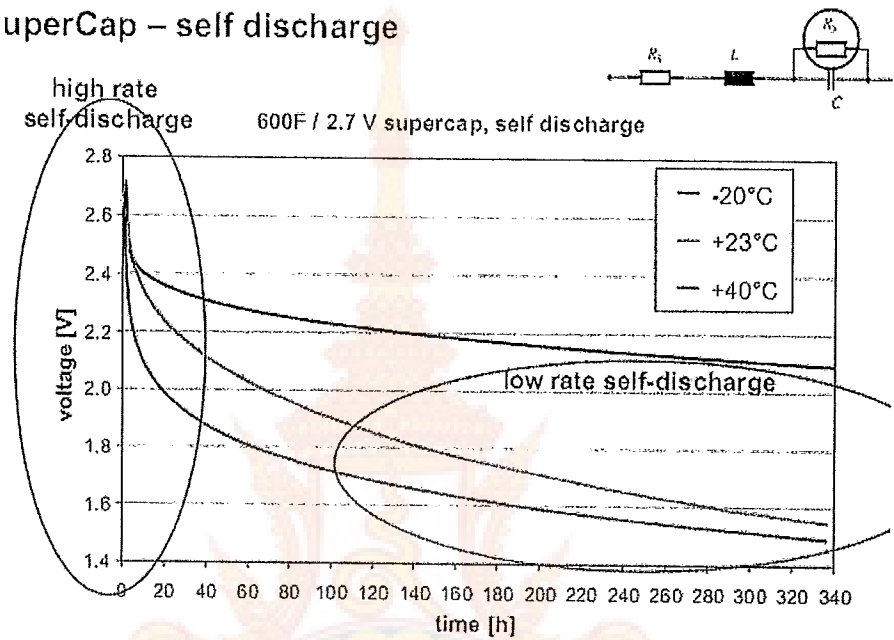
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของแบตเตอรี่กับ Ultracapacitor และคาปาซิเตอร์ทั่วไป

Available Performance	Lead Acid Battery	Super Capacitor	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

2.1.2 วงจรสมมูลของ Ultracapacitor

วงจรสมมูลอย่างง่ายของ Ultracapacitor สามารถแสดงด้วยความต้านสมมูลต่ออนุกรม (*ESR*) และความต้านทานสมมูลต่อแบบขนาน (*EPR*) *ESR* เป็นการจำลองความต้านทานภายในของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ซึ่งความต้านทานนี้มีผลต่อระหว่างการเก็บและจ่ายพลังงานไฟฟ้า *EPR* เป็นการจำลองกระแสรั่วไหลในซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีผลต่อระยะเวลาในการเก็บพลังงาน

SuperCap – self discharge



ภาพที่ 2.4 วงจรสมมูลของ Ultracapacitor

การหาค่าความต้านทานสมมูลต่อแบบขนานหาได้จากสมการ

$$EPR = \frac{-t}{\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)C} \tag{2.3}$$

- เมื่อ *EPR* คือ ความต้านทานสมมูลต่อแบบขนาน
- t* คือ เวลา (s)
- V*₁ คือ แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น (V)
- V*₂ คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V)
- C* คือ ค่าความจุไฟฟ้า (F)

การหาค่าความต้านทานสมมูลต่อแบบอนุกรมหาได้จากสมการ

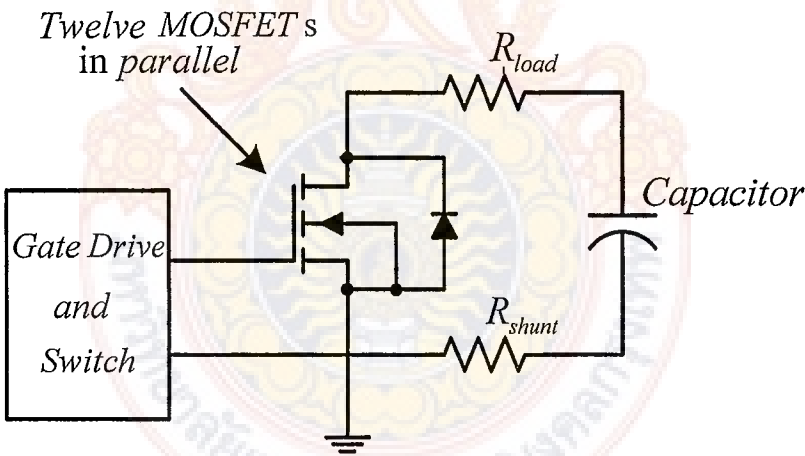
$$ESR = \frac{\Delta V}{\Delta I} \tag{2.4}$$

- เมื่อ ESR คือ ความต้านทานสมมูลต่อแบบอนุกรม
 ΔV คือ ผลต่างของแรงดัน
 ΔI คือ ผลต่างของกระแส

การหาค่ากำลังไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์หาได้จากสมการ

$$P = \frac{V^2}{4 \times ESR} \tag{2.5}$$

- เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์ (W)
 V คือ แรงดันไฟฟ้า (V)

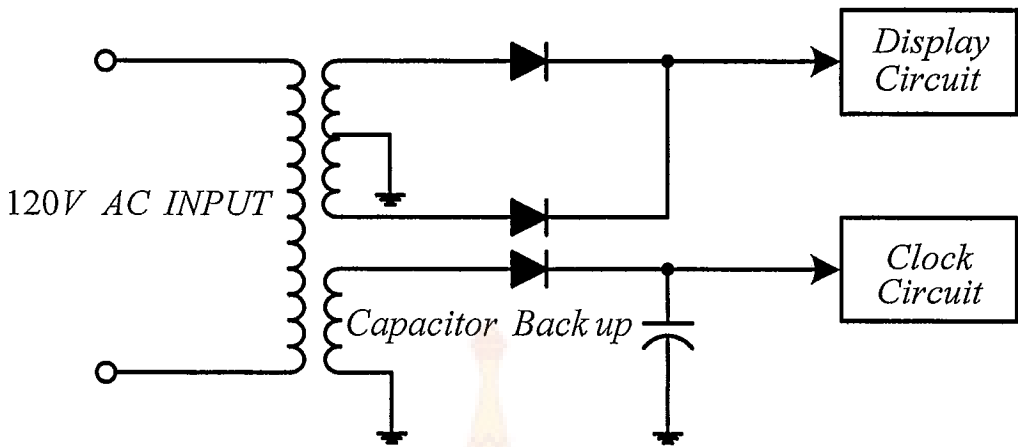


ภาพที่ 2.5 วงจรทดสอบวัดค่าความต้านทานสมมูลต่อแบบอนุกรม

2.1.3 การประยุกต์ใช้ Ultracapacitor

2.1.3.1 หน่วยความจำ

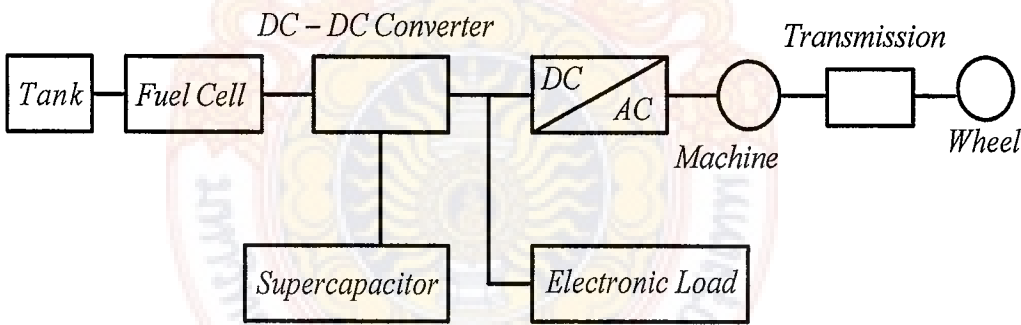
ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ในการเป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองให้กับหน่วยความจำ



ภาพที่ 2.6 การนำ Ultracapacitor เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองให้กับหน่วยความจำ

2.1.3.2 รถไฟฟ้า

ใช้ Ultracapacitor ในการเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับรถไฟฟ้า เมื่อต้องการกำลังไฟฟ้าสูงๆ ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ผสมผสานกันกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก



ภาพที่ 2.7 การนำ Ultracapacitor เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับรถไฟฟ้า

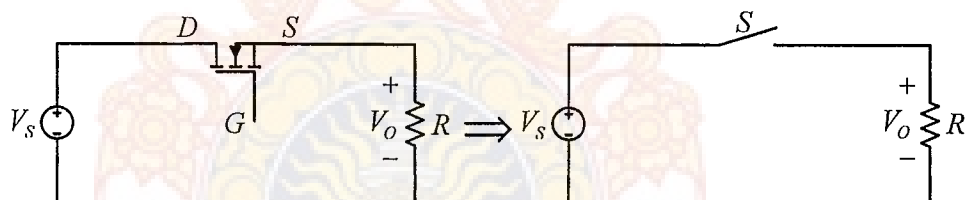
2.2 วงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรง

วงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรง หรือคิซึทซึคิคอนเวอร์เตอร์ คือวงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีค่าคงที่ให้ได้แรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับค่าแรงดันได้ตามที่โหลดต้องการ การปรับค่าแรงดันไฟฟ้าจะใช้วิธีการเปิดและปิดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์สลับกันอย่างต่อเนื่อง คิซึทซึคิคอนเวอร์เตอร์มีหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดวงจรภายใน

การเลือกใช้คอนเวอร์เตอร์แบบใดมีข้อควรพิจารณาจากลักษณะพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์แต่ละแบบตามลักษณะการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ วงจรแปลงผันตรงแบ่งตามคุณสมบัติของวงจรได้ 3 ประเภท คือ

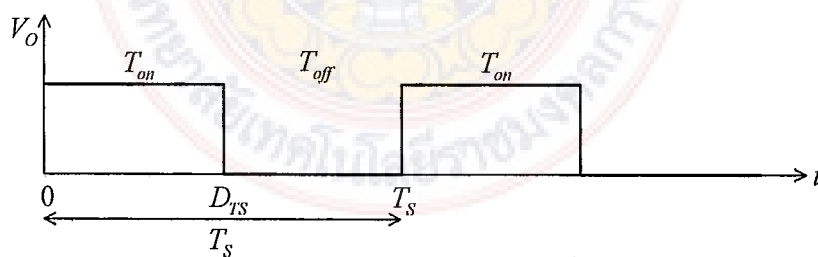
1. วงจรลดค่าแรงดัน เป็นวงจรที่แรงดันเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่าแรงดันอินพุตเสมอ ได้แก่ วงจรแปลงผันตรงแบบบัค (Buck Converter)
2. วงจรเพิ่มค่าแรงดัน เป็นวงจรที่แรงดันเอาต์พุตมีค่าสูงกว่าแรงดันอินพุตเสมอ ได้แก่ วงจรแปลงผันแบบบูส (Boost Converter)
3. วงจรลด-เพิ่มค่าแรงดัน เป็นวงจรที่สามารถควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่าหรือสูงกว่าแรงดันอินพุตก็ได้ ได้แก่ วงจรแปลงผันบัค-บูส (Buck-Boost Converter) วงจรแปลงผันแบบชุก (Cuk Converter)

2.2.1 หลักการควบคุมวงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรง



ก. วงจรที่ใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์

ข. วงจรสมมูล



ค. รูปคลื่น

ภาพที่ 2.8 หลักการควบคุมวงจรแปลงผันตรงใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์

ขณะทรานซิสเตอร์นำกระแสจะได้ $V_o = V_s$ เรียกช่วงเวลานี้ว่า T_{on} ขณะมอสเฟตหยุดนำกระแสจะได้ $V_o = 0$ เรียกช่วงเวลานี้ว่า T_{off}

$$T_s = T_{on} + T_{off} \quad , \quad T_s = \frac{1}{f_s} \tag{2.6}$$

เมื่อ T_s คือ คาบเวลาของการสวิตช์ (Switching Time Period)

f_s คือ ความถี่การสวิตช์ (Switching Frequency)

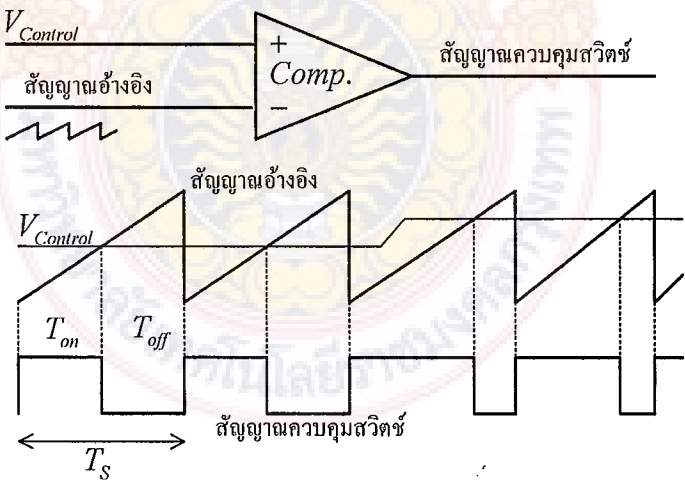
$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad , \quad T_{on} = DT_s \tag{2.7}$$

เมื่อ D คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ (Duty Cycle)

$$D' = \frac{T_{off}}{T_s} = \frac{T_s - T_{on}}{T_s} = 1 - D \quad , \quad T_{off} = (1 - D)T_s \tag{2.8}$$

2.2.2 วิธีการควบคุมสวิตช์

- 1. ควบคุมความกว้างของพัลส์ (ช่วง T_{on}) โดยค่าความถี่ (f_s) มีค่าคงที่เรียกการควบคุมแบบนี้ว่าการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse-width Modulation; PWM)
- 2. เปลี่ยนค่าความถี่ (f_s) เรียกการควบคุมแบบนี้ว่า การมอดูเลตความถี่ (Frequency Modulation; FM)
- 3. ควบคุมโดยวิธีที่ 1 และ 2 พร้อมกัน การควบคุมโดยวิธีเปลี่ยนค่าความถี่ เป็นวิธีการที่ไม่นิยมใช้งาน เพราะการออกแบบวงจรยุ่งยาก ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการควบคุมความกว้างของพัลส์เท่านั้น



ภาพที่ 2.9 การควบคุมความกว้างพัลส์

จากภาพที่ 2.9 สัญญาณควบคุมสวิตช์ได้จากการนำค่าแรงดัน $V_{Control}$ เปรียบเทียบกับ สัญญาณอ้างอิงที่เป็นภาพฟันเลื่อย (Sawtooth)

ถ้า $V_{Control} > Sawtooth$ จะได้สัญญาณควบคุมสวิตช์เป็นบวก

ถ้า $V_{Control} < Sawtooth$ จะได้สัญญาณควบคุมสวิตช์เป็นศูนย์

นำสัญญาณควบคุมสวิตช์ไปจ่ายให้กับขาเกตของมอสเฟต สามารถควบคุมความกว้างของพัลส์ได้ โดยการเปลี่ยนระดับแรงดัน $V_{Control}$

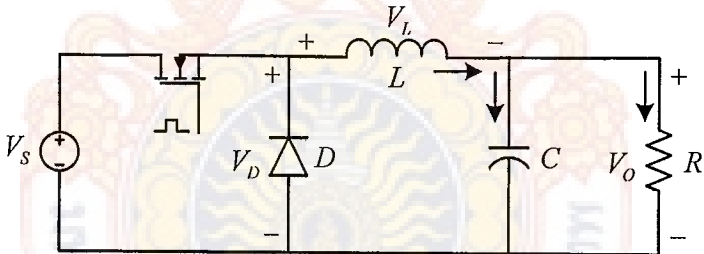
วงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรง จะทำงานใน 2 แบบวิธี (Mode) คือ

- 1. กรณีกระแสต่อเนื่อง (Continuous Current Mode)
- 2. กรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Current Mode)

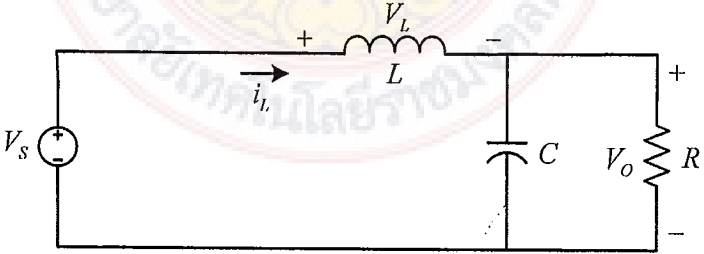
การทำงานในแต่ละแบบวิธี จะทำให้คุณสมบัติของวงจรไม่เหมือนกัน (ทั้งที่เป็นวงจรเดียวกัน) ดังนั้นการศึกษาคูสมบัติของวงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรง จะต้องพิจารณากันทั้งกรณีกระแสต่อเนื่องและกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง

2.2.3 บักคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter)

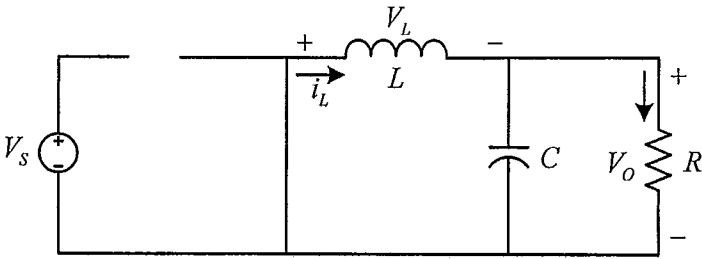
บักคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรลดระดับแรงดัน ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าต่ำกว่าแรงดันอินพุต ลักษณะวงจรบักแสดงดังภาพที่ 2.3



ก. วงจรบัก



ข. วงจรบักในช่วง T_{on}



ก. วงจรบัคในช่วง T_{off}

ภาพที่ 2.10 คุณสมบัติบัคคอนเวอร์เตอร์

วงจรบัคประกอบด้วย 2 ส่วน คือ วงจรชอปเปอร์ (Chopper) และวงจรกรอง วงจรชอปเปอร์ประกอบด้วยมอสเฟตและไดโอด โดยมอสเฟตทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ไดโอดเป็นทางผ่านของกระแส i_L ขณะมอสเฟตตัดวงจร ส่วนวงจรกรองเป็นวงจรกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter)

ขณะมอสเฟตต่อวงจรแรงดัน $V_D = V_s$ ไดโอดหยุดนำกระแสเนื่องจากได้รับไบแอสย้อนกลับ ขณะมอสเฟตตัดวงจร ไดโอดนำกระแสเป็นทางผ่านของกระแส i_L ทำให้แรงดัน $V_D = 0$ ลักษณะเป็นรูปคลื่นแรงดัน V_D แสดงดังภาพที่ 2.3 ข. อนุกรมฟูเรียร์ของแรงดัน V_D ประกอบด้วยส่วนที่เป็นไฟตรงหรือค่าเฉลี่ย โดยมีค่าเท่ากับ V_o (ค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุต) ส่วนที่เป็นทอมไฟสลับประกอบด้วยฮาร์โมนิกที่ความถี่การสวิตช์ (f_s) และความถี่ $2f_s, 3f_s, 4f_s, \dots$ วงจรกรอง LC เป็นวงจรอันดับที่ 2 โดยความถี่ตัด (Cut-off Frequency) มีสมการเป็น

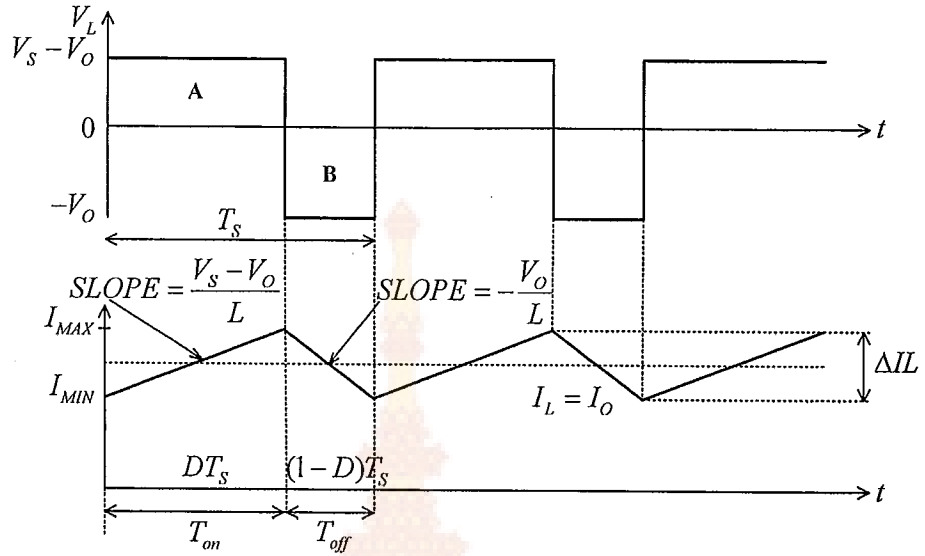
$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.9}$$

วงจรกรองทำหน้าที่กรองทอมที่เป็นไฟสลับของแรงดัน V_D (เพื่อกรองความถี่ $f_s, 2f_s, 3f_s, \dots$) ดังนั้นในการออกแบบวงจรจะต้องให้ความถี่ตัดของวงจรกรองมีค่าต่ำกว่าความถี่การสวิตช์มากๆ $f_c \ll f_s$

การวิเคราะห์วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัค จะกำหนดให้ตัวเก็บประจุ (C) มีค่าสูงพอที่จะทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่

2.2.3.1 คุณสมบัติของวงจรกรณีกะแสต่อเนื่อง กรณีกะแสต่อเนื่องหมายถึง กระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) มีค่าเป็นบวกเพียงค่าเดียว ไม่ลดลงเป็นศูนย์ จะเกิดขึ้นเมื่อ

$$L > \frac{(1-D)R}{2f_s} \quad (2.10)$$



ภาพที่ 2.11 รูปคลื่นวงจรกรณีกระแสต่อเนื่อง

ในช่วง T_{on} เป็นช่วงที่มอสเฟตต่อวงจรจะได้ $V_L = V_s - V_o$ ตัวเหนี่ยวนำ L รับพลังงาน กระแส i_L มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง

$$\text{ความชัน(Slope)} = \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2.11)$$

ในช่วง T_{off} เป็นช่วงที่มอสเฟตตัดวงจร จะได้ $V_L = -V_o$ ตัวเหนี่ยวนำ L จ่ายพลังงาน กระแส i_L มีค่าลดลงเป็นเส้นตรง

$$\text{ความชัน(Slope)} = \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{-V_o}{L} \quad (2.12)$$

จากคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำ (L)

โวลต์-วินาที ขณะรับพลังงาน = โวลต์-วินาที ขณะจ่ายพลังงาน

จากภาพที่ 2.11 พื้นที่ A = พื้นที่ B

$$DT_s(V_s - V_o) = (1-D)T_s V_o$$

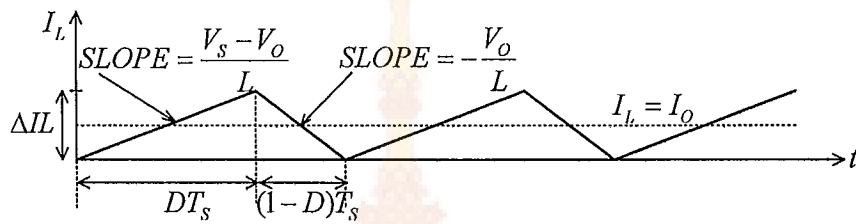
$$DV_s - DV_o = V_o - DV_o$$

$$V_o = DV_s$$

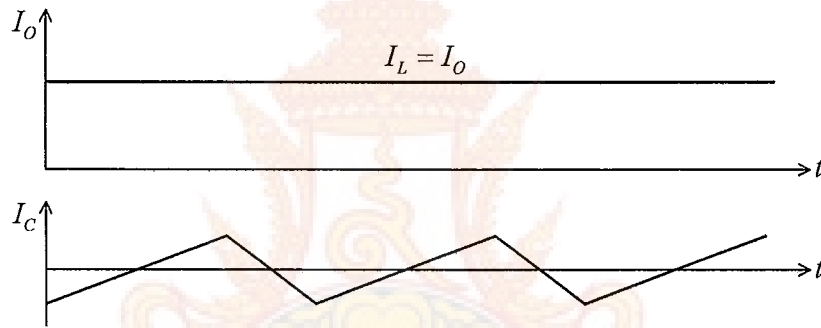
$$\frac{V_o}{V_s} = D \quad (2.13)$$

จากสมการ (2.13) ถ้าแรงดันแหล่งจ่ายมีค่าคงที่ แรงดันเอาต์พุต V_o จะแปรผันโดยตรง
 ค่าวัฏจักรหน้าที่ (Duty Cycle; D) โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่าอุปกรณ์ในวงจร

2.2.3.2 จุดแบ่งระหว่างการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องกับไม่ต่อเนื่อง จุดแบ่ง
 ระหว่างการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องกับไม่ต่อเนื่อง คือตำแหน่งที่ค่าต่ำสุดของค่ากระแส i_L
 ($i_{\min}$) ลดลงเป็นศูนย์เมื่อครบ 1 คาบเวลา



ก. รูปคลื่นกระแส i_L



ข. รูปคลื่น i_L แยกเป็น i_o กับ i_c

ภาพที่ 2.12 คลื่นกระแส i_L เริ่มไม่ต่อเนื่อง

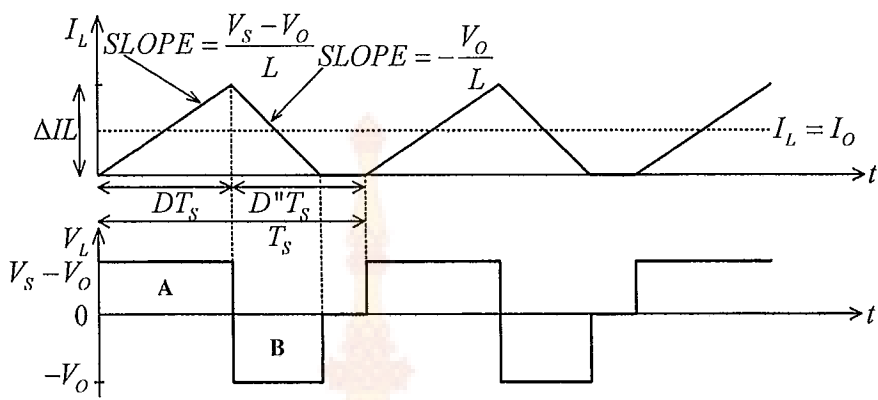
กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน (i_o) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (i_c) กระแสที่ไหล
 ผ่านตัวต้านทานจะมีค่าคงที่ (เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตคงที่) มีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของกระแส i_L

กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ เป็นไฟฟ้ากระแสสลับรูปสามเหลี่ยมมีค่าเป็นศูนย์ (เป็นไป
 ตามหลักการ Amp-Sec Balance ของตัวเก็บประจุ) กระแสส่วนนี้ก็คือค่าระลอกคลื่นของกระแส i_L
 ดังนั้นจุดแบ่งระหว่างการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องกับกระแสไม่ต่อเนื่อง คือ

$$\text{ถ้า } L > \frac{(1-D)R}{2f_s} \text{ เป็นกรณีกระแสต่อเนื่อง} \quad (2.14)$$

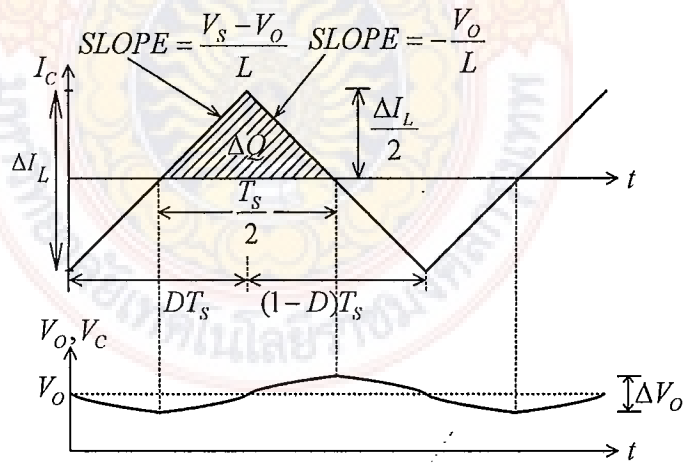
$$\text{ถ้า } L < \frac{(1-D)R}{2f_s} \text{ เป็นกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง} \quad (2.15)$$

2.1.3.3 คุณสมบัติของวงจรกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง วงจรแปลงผันแบบบัคจะทำงานเป็นแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง เมื่อ $L < \frac{(1-D)R}{2f_s}$ เป็นกรณีที่กระแส มีค่าทั้งเป็นบวกและศูนย์ ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 รูปคลื่นกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง

2.2.3.4 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุต (ΔV_o) พิจารณากระแสต่อเนื่อง กระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุ i_C แสดงดังภาพที่ 2.14 พื้นที่ใต้กราฟของรูปคลื่นกระแส i_C คือค่าประจุไฟฟ้า (Charge) ขณะกระแส i_C เป็นบวก เป็นช่วงที่ C ได้รับประจุ ทำให้แรงดัน V_o มีค่าเพิ่มขึ้น ขณะกระแส i_C เป็นลบเป็นช่วงที่ C คายประจุ ทำให้แรงดัน V_o มีค่าลดลง



ภาพที่ 2.14 รูปคลื่น i_C และ V_o

2.2.3.5 การออกแบบบัคคอนเวอร์เตอร์ วงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรงส่วนมาก จะใช้งานในช่วงกระแสต่อเนื่อง ดังนั้นในการออกแบบวงจรจะใช้คุณสมบัติการกระแสต่อเนื่องมา ออกแบบ วงจรแปลงผันแบบบัค กระแสจะต่อเนื่องเมื่อตัวเหนี่ยวนำมีค่าต่ำสุดตามสมการ

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f_s} \tag{2.16}$$

เมื่อ $L_{\min}$ คือค่าความเหนี่ยวนำต่ำสุดที่ยังคงทำให้กระแสไหลต่อเนื่อง
ความถี่การสวิตช์ (f_s) จะมีผลกับขนาดกับอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร ถ้าความถี่การสวิตช์มีค่า สูง ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ที่ใช้ในวงจรจะมีขนาดเล็กลง แต่ค่ากำลังสูญเสียในการสวิตช์จะ สูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรจะลดลง โดยปกติความถี่การสวิตช์นิยมใช้งานในช่วง 20 kHz ถึง 50 kHz

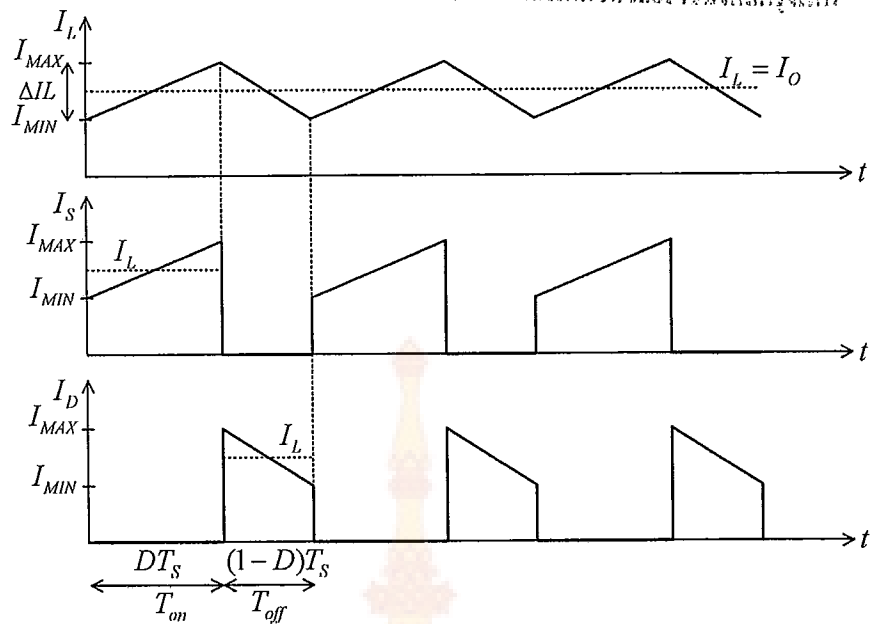
ตัวเหนี่ยวนำ (L) จะมีผลกับระลอกคลื่นของกระแส (ΔI_L) การหาขนาดของตัวเหนี่ยวนำ หาได้โดยการพิจารณาจากรูปคลื่นกระแส i_L ขดลวดตัวเหนี่ยวนำต้องทนกระแสมากกว่า กระแส $I_{L,rms}$

ตัวเก็บประจุ (C) จะมีผลกับระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุต (ΔV_o) การหาขนาดของตัว เก็บประจุ อาจหาได้จากสมการ 2.17

$$C = \frac{\Delta I_L}{8f_s \Delta V_o} \tag{2.17}$$

ตัวเก็บประจุต้องทนแรงดันได้ไม่ต่ำกว่าค่าแรงดัน V_o

สำนักวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีสารสนเทศ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



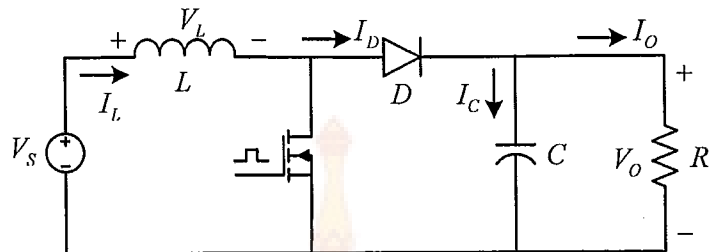
ภาพที่ 2.15 รูปคลื่นกระแส i_L , i_S และ i_D

พิกัดแรงดันของอุปกรณ์ที่ใช้เป็นสวิตช์และไดโอด พิจารณาจากค่าแรงดันตกคร่อมสูงสุด ขณะหยุดนำกระแส จะได้ว่าอุปกรณ์ที่ใช้เป็นสวิตช์และไดโอดต้องทนแรงดันได้ไม่ต่ำกว่า V_S พิกัดกระแสของอุปกรณ์ที่เป็นสวิตช์และไดโอด พิจารณาจากรูปคลื่น i_S และ i_D

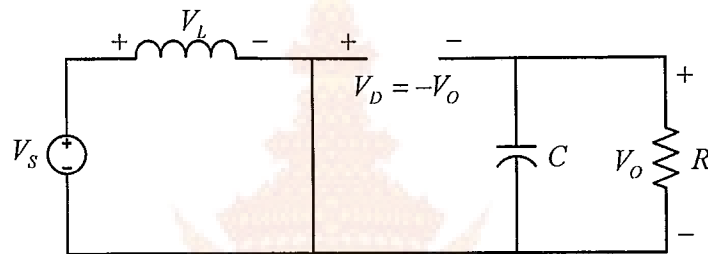
- ค่ากระแสสูงสุดที่อุปกรณ์สวิตช์และไดโอดต้องทนได้คือ i_{max}
- ค่ากระแสเฉลี่ยที่อุปกรณ์สวิตช์ต้องทนได้คือ i_S
- ค่ากระแสเฉลี่ยที่ไดโอดต้องทนได้คือ i_D

2.2.4 บูลคอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter)

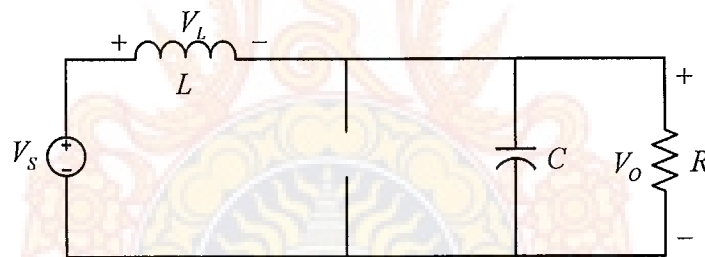
บูลคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรเพิ่มแรงดัน ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าสูงกว่าแรงดันอินพุต ลักษณะวงจรบูลแสดงดังภาพที่ 2.16



ก. วงจรบูล



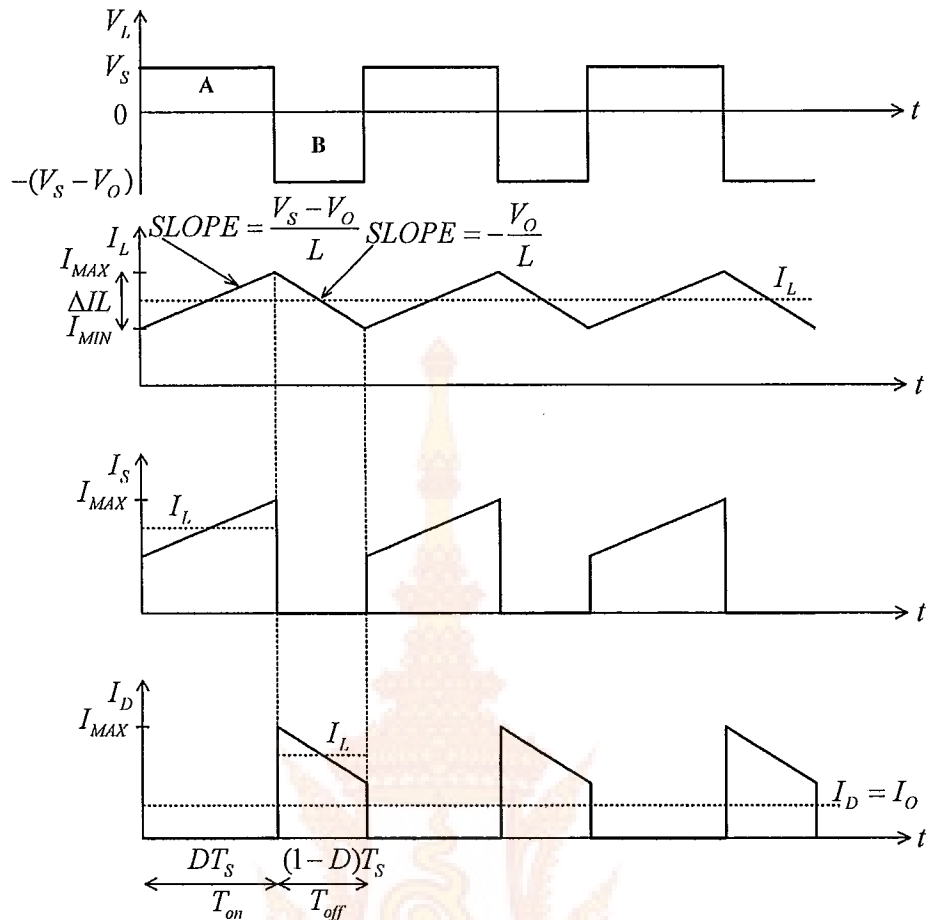
ข. วงจรบูลในช่วง T_{on}



ค. วงจรบูลในช่วง T_{off}

ภาพที่ 2.16 คุณสมบัติวงจรแปลงผันแบบบูล

2.2.4.1 คุณสมบัติวงจรกรณีกระแสต่อเนื่อง กระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) จะต่อเนื่อง เมื่อ $L > \frac{D(1-D)^2 R}{2f_s}$ ลักษณะรูปคลื่นแสดงดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 รูปคลื่นกระแสไหลต่อเนื่อง

ขณะช่วง T_{on}

$$V_L = V_s$$

ความชัน (Slope) ของกระแส $i_L = \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{-V_L}{L} = \frac{V_s}{L}$

ขณะช่วง T_{off}

$$V_s - V_o = -(V_o - V_s)$$

ความชัน (Slope) ของกระแส $i_L = \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{V_L}{L}$

จากภาพที่ 2.18 พื้นที่ A = พื้นที่ B

$$V_s D T_s = (V_o - V_s)(1 - D) T_s$$

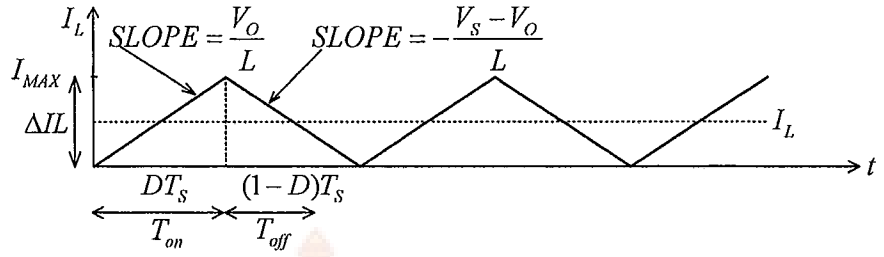
$$V_s D = V_o(1 - D) - V_s(1 - D)$$

$$V_s = V_o(1 - D)$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1 - D}$$

(2.18)

2.2.4.2 จุดแบ่งระหว่างการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องกับไม่ต่อเนื่อง



ภาพที่ 2.18 รูปคลื่นกระแส i_L เริ่มไม่ต่อเนื่อง

พิจารณาช่วง T_{on}

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{V_s DT_s}{L}$$

$$I_L = \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_s DT_s}{2L}, V_s = V_o(1-D)$$

$$I_L = \frac{V_o T_s}{2L} D(1-D) \quad (2.19)$$

จากวงจรภาพที่ 2.18 $I_D = I_O = \frac{V_o}{R}$

จากรูปคลื่นภาพที่ 2.19 $I_D = \frac{I_L (1-D) T_s}{T_s} = (1-D) I_L$

$$I_L = \frac{V_o}{(1-D)R} \quad (2.20)$$

จากสมการ (2.19) และ (2.20)

$$\frac{V_o}{(1-D)R} = \frac{V_o T_s}{2L} D(1-D)$$

$$L = \frac{D(1-D)^2 R}{2f_s}$$

ดังนั้นจุดแบ่งระหว่างการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องกับกระแสไม่ต่อเนื่อง คือตำแหน่งที่

$$L = \frac{D(1-D)^2 R}{2f_s} \text{ เรียก } L \text{ ค่านี้ว่า } L_{\min}$$

$$L_{\min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f_s} \quad (2.21)$$

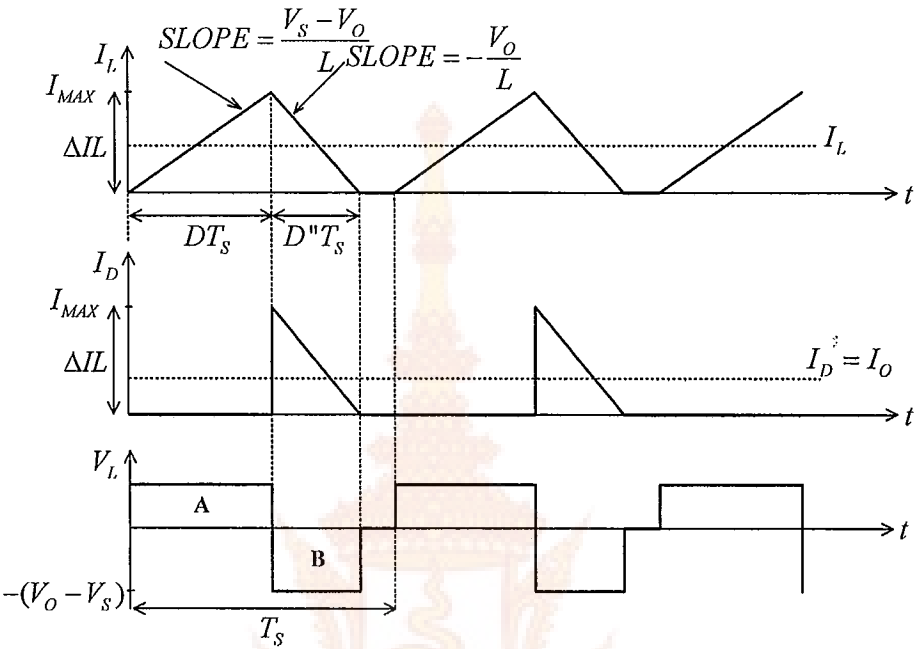
เมื่อ $L_{\min}$ คือค่าความเหนี่ยวนำต่ำสุดที่ยังคงทำให้กระแสไหลต่อเนื่อง

ถ้า $L > \frac{D(1-D)^2 R}{2f_s}$ เป็นกรณีกระแสต่อเนื่อง (2.22)

ถ้า $L < \frac{D(1-D)^2 R}{2f_s}$ เป็นกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง (2.23)

2.1.4.3 คุณสมบัติของวงจรกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง วงจรแปลงผันแบบบัสจะทำงาน

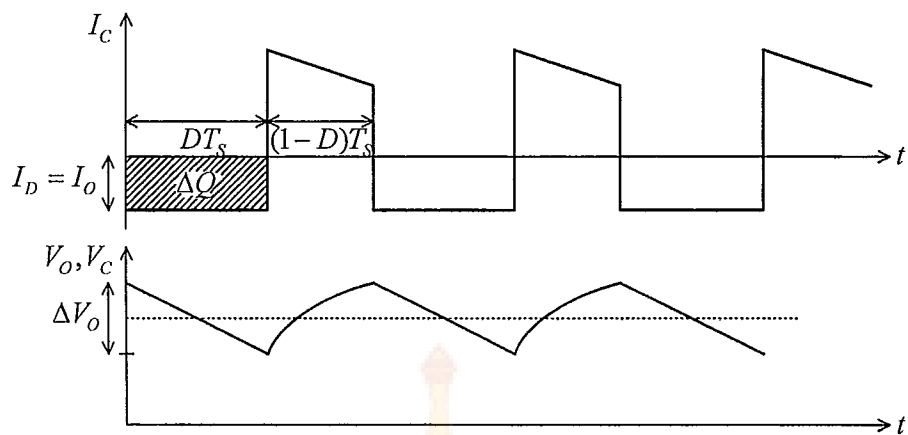
เป็นแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง เมื่อ $L < \frac{D(1-D)^2 R}{2f_s}$ มีลักษณะรูปคลื่นดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 รูปคลื่นกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง

2.2.4.3 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุต (ΔV_o) กระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุ ก็คือค่าระลอกคลื่นของกระแสที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ดังภาพที่ 2.20

$$\Delta V_o = \frac{V_o D T_s}{RC f_s} \tag{1.24}$$



ภาพที่ 2.20 รูปคลื่น i_C และ V_o

2.1.4.5 การออกแบบวงจรแบบบูส การออกแบบจะใช้คุณสมบัติการกระแสต่อเนื่อง เช่นเดียวกับวงจรบัค ซึ่งเป็นกรณีที่ $L > L_{min}$ โดย L_{min}

การหาขนาดของตัวเหนี่ยวนำ (L) หาได้โดยการพิจารณาจากรูปคลื่นกระแส i_L ขนาดของ ตัวเก็บประจุ (C)

พิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุจะต้องไม่ต่ำกว่าค่าแรงดัน V_o ค่าพิกัดแรงดันของอุปกรณ์ที่เป็นสวิตช์และไดโอดต้องไม่ต่ำกว่าค่าแรงดัน V_o

พิกัดกระแสสูงสุดของอุปกรณ์ที่เป็นสวิตช์และไดโอด ต้องไม่ต่ำกว่า $I_{max} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2}$

พิกัดกระแสเฉลี่ยของอุปกรณ์ที่เป็นสวิตช์ต้องไม่ต่ำกว่า DI_L

พิกัดกระแสเฉลี่ยของไดโอด ต้องไม่ต่ำกว่า I_o

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_L กับ I_o พิจารณาได้จากรูปคลื่นกระแส $I_D, I_L = \frac{I_o}{1-D}$

2.3 มอสเฟตกำลัง (Power MOSFET)

มอสเฟตกำลังเป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยแรงดันและต้องการกระแสอินพุตที่มีค่าต่ำ มีความสามารถเป็นสวิตช์ที่มีความเร็วสูงและเวลาในการสวิตช์ที่มีความเร็วสูงและเวลาในการสวิตช์ต่ำอยู่ในระดับนาโนวินาที จึงถูกนำมาใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังมากขึ้น และมีแนวโน้มที่จะเข้ามาแทนที่ทรานซิสเตอร์ ด้วยความแตกต่าง ทางฟิสิกส์และโครงสร้างทำให้มอสเฟตกำลัง ไม่มี ปัญหาในเรื่องแรงดันพังทลายแบบที่สอง (Secondary Breakdown) เหมือนทรานซิสเตอร์ แต่อย่างไรก็ตามมอสเฟตกำลังยังมีจุดอ่อน ในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าสถิต การเก็บรักษา และ มอสเฟตกำลังที่มีขายตามท้องตลาดยังมีอัตราทนกำลังต่ำอยู่เมื่อเทียบกับอุปกรณ์สวิตช์ประเภทอื่นๆ แต่มีแนวโน้มที่จะได้รับการพัฒนามากขึ้น

2.3.1 คุณลักษณะของกระแสและแรงดัน

มอสเฟตกำลังมี 3 ขาเช่นเดียวกับอุปกรณ์ชนิดอื่น โดยมีขาเกตเป็นขาที่ควบคุมกระแสที่ ขั้วเอาต์พุตและซอร์ส ขั้วซอร์สเป็นขั้วร่วมระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของมอสเฟต คุณลักษณะสมบัติทั้งเอาต์พุตกระแสเดรน I_D จะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันระหว่างเดรนและซอร์ส V_{DS} กับแรงดันที่เกตและซอร์ส V_{GS} ในการประยุกต์ใช้งานมอสเฟตกำลัง จะทำหน้าที่มีคุณลักษณะใน ย่านคัตออฟ (Cut Off Region) ผ่านย่านแอคทีฟ (Active Region) และย่านเชิงเส้น (Ohmic Region)

มอสเฟตกำลังจะทำงานในลักษณะคัตออฟ เมื่อแรงดันระหว่างขาเกตและซอร์สต่ำกว่า แรงดันเทรชโฮล $V_{GS, Th}$ ปกติมอสเฟตกำลังโดยทั่วไปจะมีค่าไม่มากนัก ซึ่งจะให้ลักษณะเหมือนเปิด วงจรทำให้แรงดันที่เดรนและซอร์สต้องไม่เกินค่าแรงดันพังทลาย BV_{DSS} และมีค่ากำลังไฟฟ้าไม่ เกินกว่าที่พิกัดจะทนได้ เพราะถ้าเกินจะทำให้มอสเฟตกำลังเกิดความเสียหายได้

เมื่อแรงดันที่เกตและซอร์สมีค่ามากพอที่จะทำให้การทำงานของ มอสเฟตกำลังอยู่ในย่าน เชิงเส้นในขณะที่แรงดันระหว่างขาเดรนซอร์สมีค่าต่ำ ในย่านนี้จะมีค่ากำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นที่มอสเฟต ก่อนข้างมาก โดยมอสเฟตจะทำงานในย่านเมื่อ

$$V_{GS} - V_{GS, Th} > V_{DS} > 0$$

ในย่านแอคทีฟกระแสเดรนจะไม่ขึ้นอยู่กับ ค่าแรงดันระหว่างขาเดรนและซอร์ส แต่จะ ขึ้นอยู่กับแรงดันระหว่างเกตกับซอร์ส อาจกล่าวได้ว่ากระแสอิ่มตัว ในย่านนี้ค่าของกระแสเดรน สามารถหาได้โดยประมาณจาก

$$I_D = K[V_{GS} - V_{GS, Th}]^2 \tag{2.25}$$

โดยที่ย่าน K เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณลักษณะโครงสร้างของมอสเฟต ในช่วงต่อระหว่าง ย่านเชิงเส้นกับย่านแอคทีฟ $V_{GS} - V_{GS,th} = V_{DS}$ ทำให้กระแสทรานส์คอนดักชันเท่ากับ

$$I_D = KV_{DS}^2 \quad (2.26)$$

2.3.2 ข้อจำกัดการทำงานและพื้นที่การทำงาน

2.3.2.1 แรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) มอสเฟตมีอัตราทนแรงดันอยู่ สองค่าคือค่าที่ใช้ได้ไม่เกินค่าแรกเป็นค่าแรงดัน V_{GS} ค่าที่สองเป็นค่า BV_{DSS} ค่าแรงดันที่ยอมได้ สูงสุดระหว่างเกตและซอร์ส V_{GS} เป็นผลจากที่เกตออกไซด์จะพังทลายได้จากสนามไฟฟ้าขนาดใหญ่ ซึ่งโดยทั่วไปการพังทลายของสาร SiO_2 จะมีค่าสนามไฟฟ้าประมาณ 5 ถึง 10 ล้าน V/Cm ดังนั้นถ้าเกตออกไซด์มีความหนา 1000 Å จะสามารถทนแรงดันระหว่างเกตและซอร์สได้ประมาณ 50 ถึง 100 V โดยปกติค่าโดยทั่วไปของ V_{GS} จะอยู่ระหว่าง 20-30 V ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากคู่มือที่แสดง ค่าที่ปลอดภัยในการใช้งานที่เพื่อเอาไว้ป้องกันการพังทลายอย่างถาวรของเกตออกไซด์ในอุปกรณ์ สิ่งที่ต้องระวังอีกอย่างคือผลของไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดขึ้นที่เกตออกไซด์จากการประมาททำให้เกิด ออกไซด์นั้นเกิดการแตกและทำให้มอสเฟตกำลังเสียหายได้ ถ้าแรงดันชั่วขณะที่เกตและซอร์สที่ เกินค่าของ V_{GS} นั้นต้องป้องกันด้วยการต่อซีเนอร์ไดโอดสองตัวอนุกรมกันแบบกลับขั้วต่อคร่อมที่ ขาเกตและซอร์ส โดยที่ค่าแรงดันซีเนอร์จะต้องน้อยกว่าค่าของ V_{GS} แรงดันสูงสุดที่ยอมได้ที่ขา ทรานส์คอนดักชันกับซอร์ส BV_{DSS} เป็นค่าแรงดันขนาดใหญ่ของมอสเฟตกำลังที่ไม่ทำให้รอยต่อ PN ที่ขาทราน นั้นเกิดการเสียหายค่าแรงดันพังทลายค่ามากนี้ ขึ้นอยู่กับโครงสร้างมอสเฟตกำลังในส่วนความยาว แลบกระจายและการได้ปัดนั้นการใช้งานจะต้องระวังค่าแรงดันระหว่างทรานส์คอนดักชันและซอร์สไม่ให้เกิน กว่าอัตราทนนี้ ตามข้อมูลแต่ละตัวของมอสเฟตกำลัง

2.3.2.2 ค่าสูญเสียขณะนำกระแส (On-State Conduction Losses) เมื่อ มอสเฟตกำลังมีสถานะนำกระแสจะเกิดกำลังสูญเสียขึ้นที่มอสเฟตกำลังอันเนื่องมาจากค่าความ ดัชนีต้านทานขณะนำกระแสของมอสเฟตกำลังโดยหาได้จากสมการ

$$P_{(ON)} = I_O^2 R_{DS(ON)} \quad (2.27)$$

ค่าความต้านทานสถิตย์ระหว่างทรานส์คอนดักชันและซอร์สมีค่าเท่ากับ V_{DS} / I_D ในแต่ละจุด ส่วน R_{DS} เป็นค่าความต้านทานไดนามิกขณะนำกระแส V_{DS} / I_D ที่แต่ละจุด ค่าของ R_{DS} นั้นมีส่วนประกอบ อยู่สองค่าคือความต้านทานที่แชลแนลกับความต้านทานที่ชั้นของสารกึ่งตัวนำค่าความต้านทานที่

เกิดขึ้นที่เซลล์แนลนั้นเกี่ยวพันกับแรงดันเกิดกับซอร์สที่สั่งให้นำกระแสโดยที่จะมีค่าลดลงได้โดยการเพิ่มแรงดัน V_{GS} แต่ต้องไม่เกินค่ากำหนดค่าความต้านทานขณะนำกระแสจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ตัวมอสเฟตกำลัง ด้วยค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิที่เป็นบวกทำให้กระแสที่ไหลผ่านมีค่าลดลงในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น

2.3.3.3 ทรานซิสเตอร์แฝง (Parasitic BJT) มอสเฟตกำลังมีโครงสร้างที่ทำให้เกิดทรานซิสเตอร์แฝง ผลของทรานซิสเตอร์แฝงนี้อาจทำให้เกิดกระแสไหลผ่านมอสเฟตกำลังได้แม้จะไม่มีแรงดันคกร่อมระหว่างเกรนและซอร์สที่เกิด V_{GS} เลยก็ตามโดยผ่านทรานซิสเตอร์แฝง ซึ่งสามารถป้องกันเหตุการณ์ดังกล่าวที่มีผลมาจากทรานซิสเตอร์แฝงนี้โดยการต่อเพิ่มไดโอดเพิ่มกับการทำงานของมอสเฟตกำลัง

2.3.3.4 การพิจารณาผลของอุณหภูมิ (Thermal Considerations) ในการใช้งานมอสเฟตกำลังก็เหมือนกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทอื่นในเรื่องอุณหภูมิซึ่งเรียกกันว่าอุณหภูมิต่อ T_j ซึ่งต้องเก็บรักษาไม่ให้เกินค่า T_{jmax} ในการใช้งานซึ่งโดยทั่วไปได้จากคู่มือหรือใบข้อมูลของอุปกรณ์และค่าอัตราทดต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายกับมอสเฟตกำลังได้

2.3.3.5 พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัย (Safe Operating Area) ในย่านการทำงานที่ปลอดภัยของมอสเฟตกำลัง มีสามตัวแปรที่เกี่ยวข้องในพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยของมอสเฟตกำลังค่ากระแสเกรนสูงสุด I_{DM} ค่าของอุณหภูมิ T_j ซึ่งครอบคลุมค่าของกำลังไฟฟ้าของมอสเฟตกำลังและค่าแรงดันพังทลาย BV_{DSS} ในขณะที่นำกระแสและหยุดนำกระแสโดยเป็นขีดจำกัดทางอุณหภูมิสำหรับมอสเฟตกำลังจะไม่มีปรากฏการณ์ “เซกกันดารีเบรกดาวน์” แต่จะมีข้อจำกัดของกระแสที่ V_{DS} ต่ำๆ เนื่องจากความต้านทานในขณะทำงานเพิ่มขึ้นสำหรับการทำงานในช่วงสั้นๆ ขอบเขตของพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยจะกว้างขึ้นคือ V_{DS} และ I_D มีค่ามากขึ้นนั่นเอง ซึ่งปกติพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยมักจะกำหนดไว้ที่ $T_j = 150^{\circ}\text{C}$

2.3.3 กำลังสูญเสียในรูปความร้อนของมอสเฟตกำลัง

กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในมอสเฟตกำลังขณะทำงานแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ กำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะและกำลังงานสูญเสียขณะนำกระแส สำหรับมอสเฟตกำลังมีช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสสั้น เนื่องจากโครงสร้างไม่มีประจุสะสมเกิดขึ้น แต่โดยทั่วไปมอสเฟตกำลังถูกใช้งานที่ความถี่สูง (มากกว่า 50 กิโลเฮิร์ตซ์) การคิดค่ากำลังงานสูญเสียขณะทำงานจึงต้องนำค่ากำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะมาคิดด้วย และเนื่องจาก

ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส (T_{off}) กับช่วงเวลาเริ่มนำกระแส (T_{on}) ของมอสเฟตกำลังมีค่าใกล้เคียงกันจึงต้องนำมาคิดทั้งสองช่วงเวลา

กำลังงานสูญเสียขณะนำกระแสของมอสเฟตกำลังมีผลมาจากความต้านทานขณะนำกระแสของมอสเฟตกำลัง ความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอร์ส R_{DS} ขึ้นอยู่กับพิกัดการทำงานของแรงดันไฟฟ้าหากทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงก็ยิ่งทำให้ค่าความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอร์สมีค่ามากขึ้น และทำให้กำลังสูญเสียขณะนำกระแสมีค่ามากขึ้นด้วย ความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอร์ส R_{DS} นอกจากจะขึ้นกับพิกัดแรงดันแล้วยังต้องพิจารณาพร้อมกับอุณหภูมิ เพราะเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นความต้านทานก็มีค่าสูงขึ้นด้วย ดังนั้นสมการกำลังงานสูญเสียการทำงานของมอสเฟตกำลัง คือ

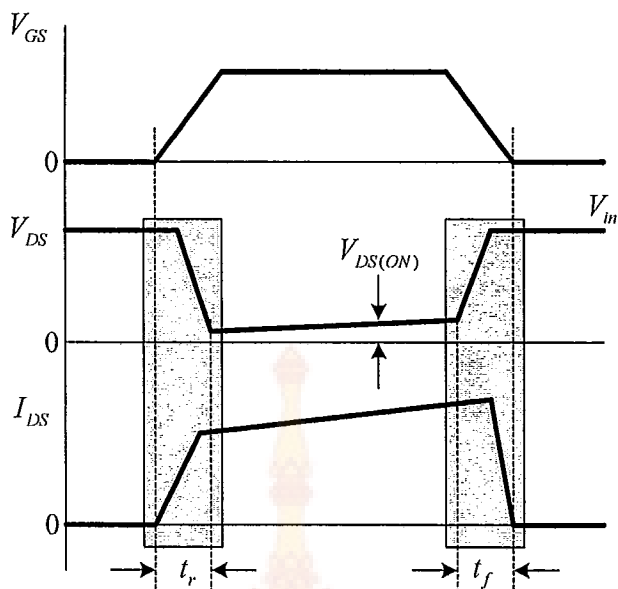
$$P_D = P_{SW(on)} + P_{SW(off)} + P_C \tag{2.28}$$

$$P_{SW(on)} = \frac{0.5 I_{PK(on)} V_{in} \cdot t_r}{T} \tag{2.29}$$

$$P_{SW(off)} = \frac{0.5 I_{PK(off)} V_{in} \cdot t_f}{T} \tag{2.30}$$

$$P_C = I_{D_{rms}}^2 \times R_{DS(on)} (T_j) \tag{2.31}$$

เมื่อ	$P_{SW(on)}$	คือ กำลังงานสูญเสียขณะเริ่มนำกระแสของมอสเฟตกำลัง
	$P_{SW(off)}$	คือ กำลังงานสูญเสียขณะเริ่มหยุดนำกระแสของมอสเฟตกำลัง
	P_C	คือ กำลังงานสูญเสียขณะนำกระแสของมอสเฟตกำลัง
	$I_{PK(on)}$	คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มนำกระแส
	$I_{PK(off)}$	คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะหยุดนำกระแส
	$I_{D_{rms}}$	คือ ค่ากระแส Rms ที่ไหลผ่านมอสเฟตกำลังขณะทำงาน
	$R_{DS(on)} T(j)$	คือ ค่าความต้านทานระหว่างขาเดรนและขาซอร์สที่อุณหภูมิรอบต่อ สูงสุดขณะทำงานของมอสเฟตกำลัง
	t_r	คือ ช่วงเวลาเริ่มนำกระแสของมอสเฟตกำลัง (Current rise time)
	t_f	คือ ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสของมอสเฟตกำลัง (Current fall time)



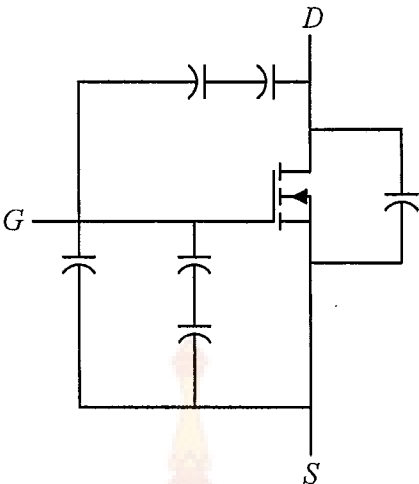
ภาพที่ 2.21 ลักษณะของกระแสและแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตกำลังเมื่อเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแส ในส่วนที่แรงดันเป็นส่วนที่เกิดกำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนได้สูง

2.2.4 เงื่อนไขของวงจรขับมอสเฟตกำลัง

การขับมอสเฟตกำลังให้นำกระแสโดยมีกระแสไหลผ่านขาเดรนและขาซอร์สได้ก็ต่อเมื่อแรงดันตกคร่อมที่ขาเกตและขาซอร์สมีค่าอย่างต่ำเท่ากับค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage) ซึ่งใช้ค่ากระแสต่ำ ดังนั้นการขับมอสเฟตกำลังให้นำกระแสจึงไม่ยุ่งยากโดยต้องศึกษาเงื่อนไขต่างๆ สำหรับบั๊คมอสเฟตกำลังให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.2.5 ความจุไฟฟ้าด้านอินพุต (Input Capacitance)

เนื่องจากลักษณะ โครงสร้างภายในมอสเฟตกำลังจึงเหมือนกับมีตัวเก็บประจุต่ออยู่รอบๆ ขาต่างๆ ดังภาพที่ 2.22

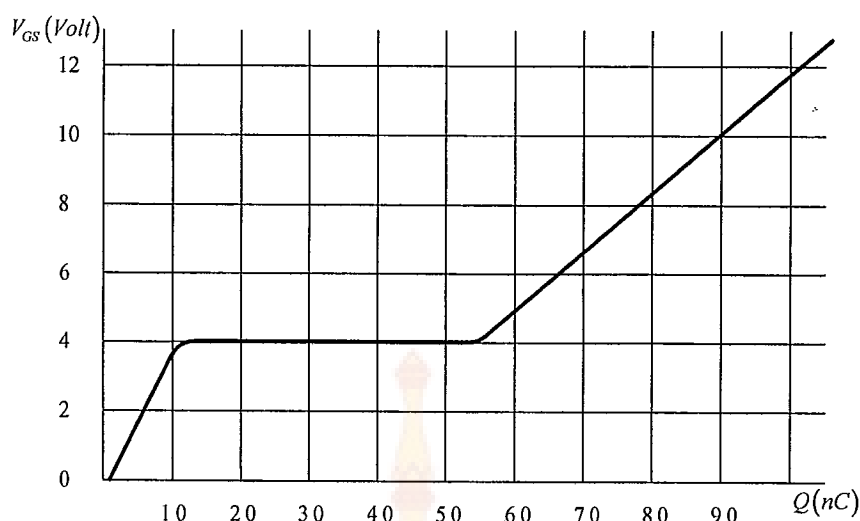


ภาพที่ 2.22 ตัวเก็บประจุแฝงที่ต่ออยู่ที่ขาต่างๆ ภายในมอสเฟटकำลัง

ตัวเก็บประจุที่ขาต่างๆ ของมอสเฟटकำลังต้องถูกชาร์จก่อนเพื่อให้แรงดันตกคร่อมที่ขาเกต V_{GS} มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดันขีดเริ่ม มอสเฟटकำลังจึงเริ่มนำกระแสในทางกลับกันการหยุดนำกระแสของมอสเฟटकำลังต้องทำให้ตัวเก็บประจุคายประจุออกไปจนแรงดันตกคร่อมที่ขาเกต V_{GS} มีค่าลดลงต่ำกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มมอสเฟटकำลังจึงหยุดนำกระแส โดยทั่วไปแล้วค่าความจุของตัวเก็บประจุในมอสเฟटकำลังเป็นตัวกำหนดความเร็วในการเปลี่ยนสถานะของมอสเฟटकำลังแต่ละชนิด

2.2.6 การกำหนดเวลาในการเปลี่ยนสถานะ

เวลาในการเปลี่ยนสถานะของมอสเฟटकำลังขึ้นอยู่กับ Gate Charge Chart แรงดัน V_{GS} ที่เพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าประจุสะสมที่ขาเกตเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.23 ซึ่งผู้ผลิตจะให้ Gate Charge Chart มาในข้อมูลคุณลักษณะของมอสเฟटकำลังแต่ละชนิด เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณค่ากระแสไบแอสขาเกตและเวลาในการเปลี่ยนสถานะของมอสเฟटकำลัง



ภาพที่ 2.23 Gate Charge Chart

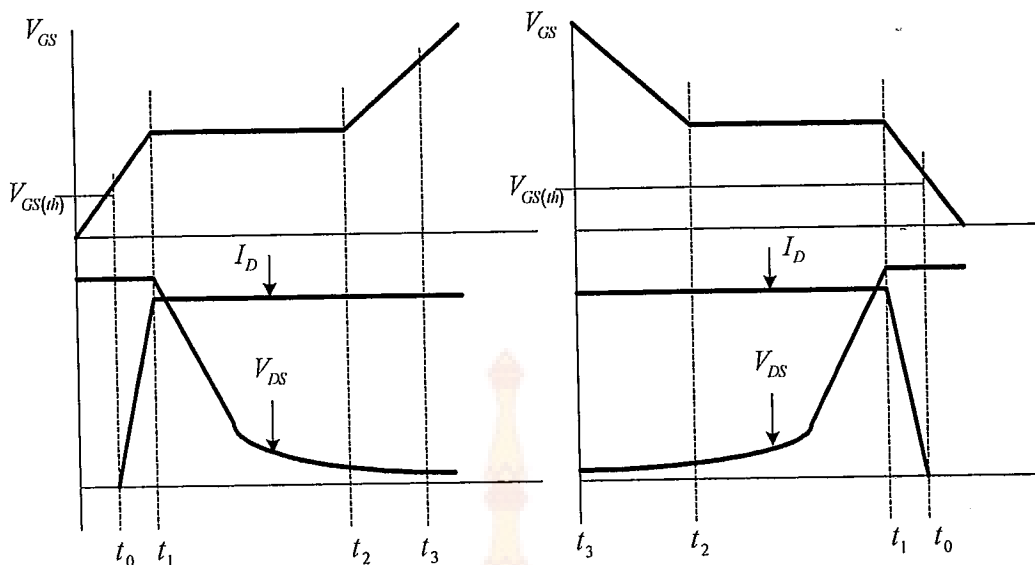
ลักษณะของกราฟแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ตามผลของประจุที่เพิ่มขึ้น คือ

ช่วงเวลานิ่งก่อนเริ่มนำกระแส (Turn on delay) t_0

ช่วงเวลาเริ่มนำกระแส (Rise time) $t_0 \rightarrow t_2$

ช่วงเวลาสะสมประจุส่วนเกิน (Excess charge time) $t_2 \rightarrow t_3$

เมื่อมอสเฟตกำลังเริ่มซาร์จประจุที่ขาเกต จนกระทั่งพ้นช่วงเวลานิ่งก่อนเริ่มนำกระแส แรงดันที่ขาเกตมากกว่าแรงดันขีดเริ่ม $V_{GS,th}$ จึงเริ่มมีกระแสไหลผ่านขาเดรนและขาซอร์สที่เวลา t_0 ค่าของแรงดันจะยังไม่ลดจนกว่าเวลาผ่านไปเท่ากับ t_1 แรงดันตกคร่อมขาเดรนและขาซอร์ส V_{DS} จึงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจากค่าแรงดันที่ประมาณ 90 % จนเหลือเพียง 10 % ของค่าแรงดัน ตกคร่อม V_{DS} สูงสุด มอสเฟตกำลังนำกระแสได้อย่างเต็มที่ในช่วงเวลาเริ่มนำกระแส $t_1 \rightarrow t_2$ และแรงดันตกคร่อมที่ขาเกต V_{GS} คงที่จนกว่ามอสเฟตกำลังสามารถนำกระแสได้อย่างเต็มที่ดังภาพที่ 2.25 ในช่วงเวลาสะสมประจุส่วนเกินความต้านทานระหว่างขาเดรนและขาซอร์สมีค่าลดลงได้เรื่อยๆ หากปล่อยให้มีการสะสมประจุต่อไปในช่วงเวลา $t_2 \rightarrow t_3$ แต่ประจุสะสมที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการหน่วงขณะเริ่มหยุดนำกระแส เนื่องจากมอสเฟตกำลังต้องใช้เวลามากในการคายประจุส่วนเกินทิ้งไป ดังนั้นการขับมอสเฟตกำลังที่ขาเกตด้วยแรงดันสูงเกินความจำเป็นทำให้ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลเสีย



(ก) การเริ่มนำกระแส

(ข) การเริ่มหยุดนำกระแส

ภาพที่ 2.24 ลักษณะการชาร์จประจุที่ขาเกต

เนื่องจากมอสเฟตกำลังไม่เกิดประจุสะสมขั้วนำกระแส การหยุดนำกระแสของมอสเฟตกำลังจึงทำได้ง่ายด้วยการคายประจุที่ขาเกตทิ้งไปเช่นเดียวกับขั้วเริ่มนำกระแส เมื่อกระแสเพื่อชาร์จประจุและคายประจุมีค่าเท่ากัน ช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสจะมีค่าเท่ากันด้วย ยกเว้นหากมีประจุสะสมมากในช่วงเวลา $t_2 \rightarrow t_3$ การหยุดนำกระแส นั้นมีช่วงเวลาหน่วงเพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องใช้เวลาส่วนหนึ่งในการคายประจุส่วนเกินทิ้งไปจาก Gate Charge Chart ของมอสเฟตกำลังแต่ละตัว นำมาคำนวณช่วงเวลาเริ่มนำกระแส t_r และช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส t_f ได้จาก

$$t = \frac{Q_G}{I_G} \quad (2.32)$$

เมื่อ Q_G คือ ค่าประจุที่ได้จากกราฟ (C)

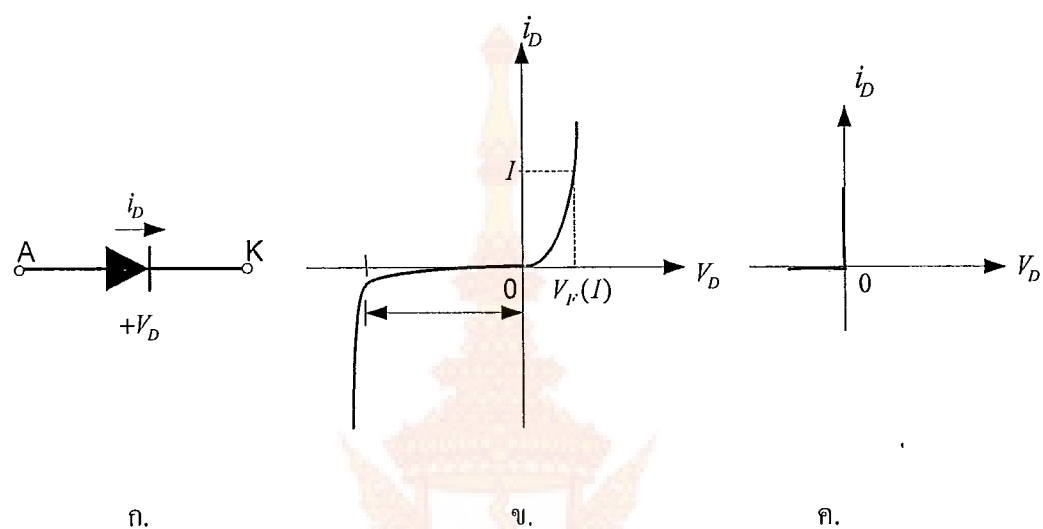
เมื่อ I_G คือ ค่ากระแสที่ใช้ชาร์จประจุที่กระแสคงที่ (A)

2.4 ไดโอดกำลัง (Power Diode)

ไดโอดเริ่มนำกระแส เมื่อแรงดันตกคร่อม มีค่าเพียงเล็กน้อยประมาณ 1 โวลต์ ในทำนองเดียวกันเมื่อไดโอดถูกไบแอสย้อนกลับ กระแสจำนวนหนึ่งซึ่งน้อยมาก ก็สามารถไหลผ่านไดโอด

ตัวนี้ได้ และกระแสจำนวนนี้มีค่าคงที่ตลอดไป จนกระทั่งถึงค่าเบรกดาวน์ ดังนั้นการนำไปใช้งาน แรงดันไบแอสย้อนกลับที่ป้อนไดโอดไม่ควรมีค่าเกินแรงดันเบรกดาวน์นี้ ซึ่งได้แสดงสัญลักษณ์ และคุณลักษณะกระแส-แรงดันของไดโอดขณะไบแอสไปหน้าดังภาพที่ 2.25 ก. และ ข.

เนื่องจากกระแสรั่วไหลของไดโอดขณะอยู่ในสถานะกั้นหรือไบแอสย้อนกลับมีค่าน้อย และแรงดันตกคร่อมในขณะนำกระแสหรือไบแอสไปหน้ามีค่าน้อยมากเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงเปรียบเทียบเป็นไดโอดอุดมคติ ดังคุณลักษณะดังภาพที่ 2.25 ค.



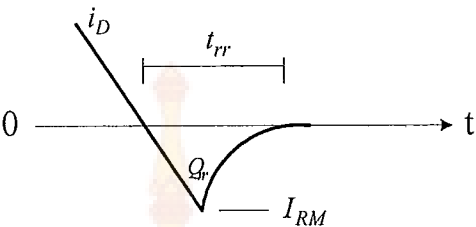
ภาพที่ 2.25 การทำงานของไดโอด

การสวิตช์เพื่อนำกระแสของไดโอด เปรียบเสมือนกับการสวิตช์ทางอุดมคติได้ เนื่องจากใช้เวลาการสวิตช์น้อยมาก เมื่อเทียบกับสถานะชั่วคราวของวงจรกำลัง แต่ถ้าหากเป็นการสวิตช์เพื่อหยุดนำกระแสจะต้องเสียเวลาให้กับกระแสฟลักซ์ย้อนกลับ ดังภาพที่ 2.26 ดังนั้นอาจเป็นสาเหตุนำไปสู่การเกิดแรงดันเกินในวงจรที่มีตัวเหนี่ยวนำด้วย และสำหรับไดโอดสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ดังนี้ คือ

2.3.1 ไดโอดชอตต์กี (Schottky Diodes) นิยมนำมาใช้งานที่ต้องการแรงดันตกคร่อมต่ำ (ปกติประมาณ 0.3 โวลต์) แต่ไดโอดชนิดนี้ ได้จำกัดความสามารถในการกั้นแรงดัน 50 ถึง 100 โวลต์ เท่านั้น

2.3.2 ไดโอดฟื้นตัวย้อนกลับเร็ว (Fast-Recovery Diodes) เป็นไดโอดที่ได้รับการพัฒนาเวลาการสวิตช์ขณะนำกระแส และเวลาฟื้นตัวย้อนกลับให้มีค่าต่ำมาก (ปกติเวลาการฟื้นตัวย้อนกลับ มีค่าไม่กี่ไมโครวินาที) ดังนั้นจึงเหมาะกับงานความถี่สูง นอกจากนี้แรงดันแหล่งจ่ายสามารถจ่ายได้ถึงหลายโวลต์ และกระแสหลายแอมป์

2.3.3 ไดโอดความถี่ต่ำ (Line Frequency Diode) แรงดันตกคร่อมไดโอดชนิดนี้ ให้นำกระแสจะมีค่าต่ำ แต่เวลาการฟื้นตัวย้อนกลับมีค่าสูง ดังนั้นจึงเหมาะกับการงานความถี่สูง สำหรับค่าพิกัดแรงดันกั้นกับพิกัดการไหลของกระแสจะมีค่าสูงหลายกิโลโวลต์และหลายกิโลแอมป์ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถต่ออนุกรมและขนานกันเพื่อให้ได้ค่าแรงดันและกระแสตามต้องการได้

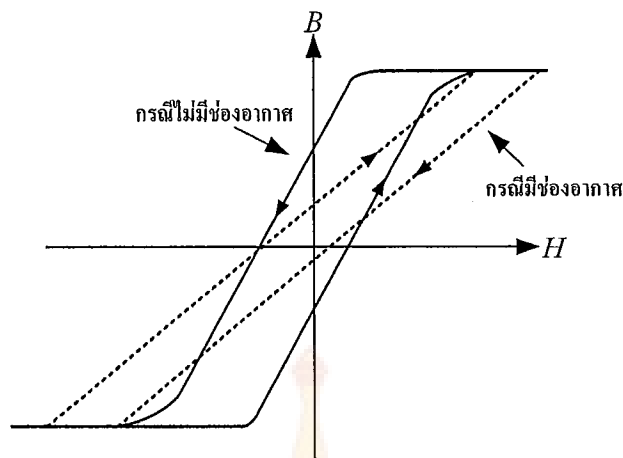


ภาพที่ 2.26 การหยุดนำกระแสของไดโอด

2.4 ตัวเหนี่ยวนำ และการออกแบบตัวเหนี่ยวนำด้วยวิธีผลคูณพื้นที่

2.4.1 ตัวเหนี่ยวนำ

คุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำที่ดี คือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็กมีความเป็นเชิงเส้น สารเฟอร์โรแมกเนติกมีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น แต่มีค่าความซึมซาบได้สูงในขณะที่แกนอากาศ หรือแกนที่ไม่ได้ทำจากสารเฟอร์โรแมกเนติกค่าความซึมซาบได้มีค่า $\mu = \mu_0$ ซึ่งมีความเป็นเชิงเส้นสูงแต่ทำให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำต่ำ ด้วยข้อจำกัดต่างๆ นี้ การแก้ปัญหาในทางปฏิบัติคือ การเพิ่มช่องอากาศในแกนแม่เหล็ก ซึ่งทำให้แกนแม่เหล็กที่ทำจากสารเฟอร์โรแมกเนติกให้ค่าความซึมซาบได้ที่สูง ในขณะที่ช่องอากาศมีผลทำให้ค่าความซึมซาบได้มีค่าคงที่ โดยช่องอากาศที่เพิ่มเข้าไปในแกนเฟอร์ไรต์ใช้ในการสะสมพลังงานแม่เหล็กและทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีความเป็นเชิงเส้น นอกจากสารเฟอร์โรแมกเนติกแล้ว ยังมีสารแกนโลหะแบบผง (Powder metal core) ซึ่งเป็นสารแม่เหล็กที่มีช่องอากาศกระจายอยู่ภายในให้ผลเหมือนกับการเพิ่มช่องอากาศเข้าไปในแกนเฟอร์ไรต์



ภาพที่ 2.27 ผลกระทบของช่องอากาศต่อกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก

เมื่อกำหนดให้ค่า $H_c = H_g$ เห็นได้ว่าพลังงานที่สะสมในแกนแม่เหล็กมีขนาดน้อยกว่าพลังงานที่สะสมในอากาศมากเพราะค่าความซึมซาบได้สัมผัสของแกนแม่เหล็กมีค่ามากกว่าค่าความซึมซาบได้ของอากาศประมาณ 10-1000 เท่า ดังนั้นตัวเหนี่ยวนำซึ่งทำหน้าที่สะสมพลังงาน จึงจำเป็นต้องมีช่องอากาศ ผลกระทบจากการเพิ่มช่องอากาศดังกล่าวนี้ ได้แก่

1. ค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก L_m มีค่าคงที่
2. ลดค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กลง
3. สามารถเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านได้
4. ลดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง
5. หลีกเลี่ยงการอิ่มตัวเนื่องจากไฟฟ้ากระแสตรง
6. เพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำรั่ว L_r ซึ่งเป็นผลกระทบโดยตรงต่อขนาดสไปก์ของกระแส

2.4.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำด้วยวิธีผลคูณพื้นที่

กรณีเป็นตัวเหนี่ยวนำ เส้นแรงแม่เหล็กในแกนแม่เหล็กขึ้นอยู่กับกระแสไหล เมื่อกระแสไหลมีค่าเพิ่มขึ้น อาจทำให้แกนแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัวได้ และเมื่อแกนแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัวทำให้ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กมีค่าลดลง ดังนั้นในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำจึงต้องมีการระบุค่ากระแสสูงสุดเพื่อทำการออกแบบแกนแม่เหล็กที่จะไม่เกิดการอิ่มตัว

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำด้วยวิธีผลคูณพื้นที่สำหรับแกนเฟอร์ไรต์มีขั้นตอนดังนี้

2.4.2.1 คำนวณค่าความเหนี่ยวนำ สำหรับขั้นตอนแรกในการออกแบบตัว

เหนี่ยวนำ คือการกำหนดค่าความเหนี่ยวนำ โดยใช้กฎของฟาราเดย์ $e = L \frac{di}{dt}$ ในการคำนวณหา
ค่าความเหนี่ยวนำของวงจร

2.4.2.2 คำนวณหาผลคูณพื้นที่ A_p , พลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ

$$E = \frac{1}{2} LI_m^2 \quad (2.33)$$

โดยที่ E หมายถึง พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำ

L หมายถึง ค่าความเหนี่ยวนำ H

I_m หมายถึง กระแสยอดของวงจร A

โดยที่พื้นที่ในการพันขดลวดต้องเหมาะสมกับจำนวนรอบ N และพื้นที่หน้าตัดของ
ขดลวด a ดังนี้

$$K_w A_w = N a \quad (2.34)$$

แทนค่า $a = \frac{I}{J}$ ลงในสมการที่ (2.34) จะได้

$$K_w A_w = N \frac{I}{J} \quad (2.35)$$

และจาก $K_c = \frac{I_m}{I}$ ดังนั้น

$$K_w K_c A_w J = NI_m \quad (2.36)$$

จากสมการแรงดันของฟาราเดย์

$$e = L \frac{di}{dt} = N \frac{d\phi}{dt} = NA_c \frac{dB}{dt}$$

และ

$$LI_m = NA_c B_m \quad (2.37)$$

จะได้

$$E = \frac{1}{2} NI_m A_c B_m \quad (2.38)$$

$$A_p = A_w A_c = \frac{2E}{K_w K_c J B_m} \quad (2.39)$$

2.4.2.3 คำนวณหาจำนวนรอบ ในการพันตัวเหนี่ยวนำจำนวนรอบในการพันตัว
เหนี่ยวนำสามารถหาได้จาก

$$N = \frac{LI_m}{A_c B_m} \quad (2.40)$$

2.4.2.4 คำนวณหาขนาดของขดลวดเหนี่ยวนำ พื้นที่หน้าตัดของขดลวดเหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้จาก

$$a = \frac{I}{J} \tag{2.41}$$

2.4.2.5 ช่องอากาศ จากสมการแรงดันของฟาราเดย์โดยที่

$$e = L \frac{di}{dt} = N \frac{d\phi}{dt} \tag{2.42}$$

$$B = \frac{LI}{NA_c} \tag{2.43}$$

หรือ
$$B = \frac{\phi}{A_c} \tag{2.44}$$

จากกฎของแอมแปร์จะได้

$$H = \frac{NI}{I_m} \tag{2.45}$$

ดังนั้น
$$B = \frac{NI}{I_m} \tag{2.46}$$

จากสมการที่ (2.45) และ (2.46)จะได้

$$\frac{I_m}{\mu A_c} = \frac{N^2}{L} \tag{2.47}$$

โดยที่ $\frac{I_m}{\mu A_c}$ หมายถึงค่าความต้านทานแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ

$$\frac{I_m}{\mu A_c} = \frac{I_c}{\mu_0 \mu_r A_c} + \frac{I_g}{\mu_0 A_c} \tag{2.48}$$

- I_c หมายถึง เส้นทางเดินแม่เหล็ก m
- I_g หมายถึง ระยะห่างของช่องอากาศ m
- A_c หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็ก m^2

ถ้าแกนแม่เหล็กมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูง จะทำให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กที่เกิดจากช่องอากาศมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับความต้านทานแม่เหล็กของแกนแม่เหล็ก

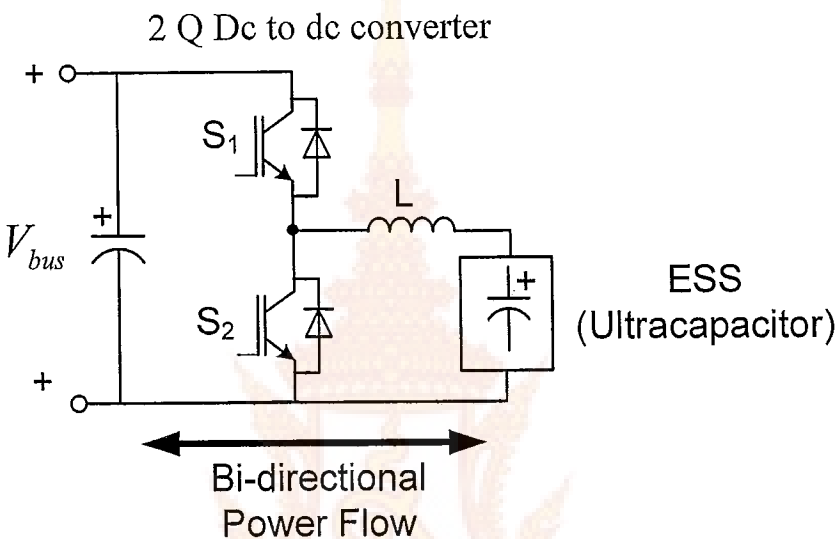
$$\frac{I_c}{\mu_0 \mu_r A_c} = \frac{I_g}{\mu_0 A_c} \tag{2.49}$$

จากสมการที่ (2.49) สามารถจัดรูปเพื่อหาค่า I_g ได้ดังนี้

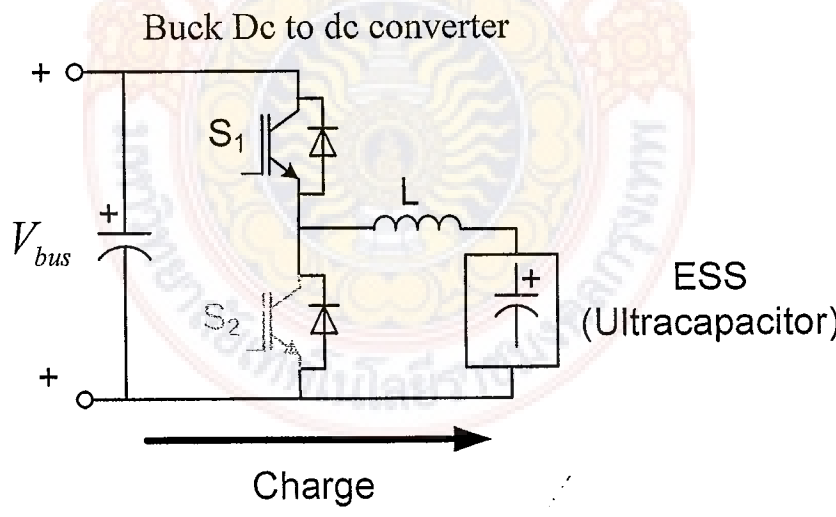
$$I_g = \frac{\mu_0 N^2 A_c}{L} \tag{2.50}$$

2.5 การควบคุมการทำงานสำหรับคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง

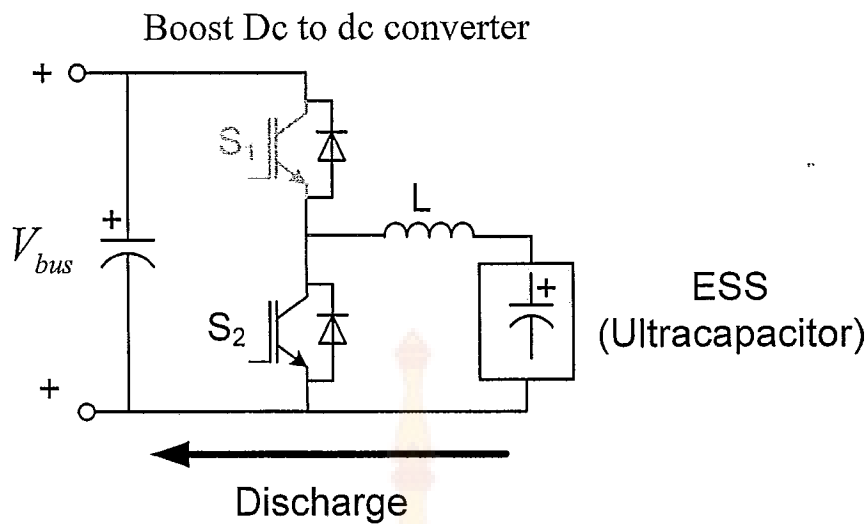
เหตุผลที่ใช้คอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง เนื่องจากคอนเวอร์เตอร์ทั่วไปสามารถจ่ายกระแสได้เพียงทิศทางเดียว หากนำคอนเวอร์เตอร์นั้นมาใช้งานร่วมกับ Ultracapacitor จะไม่สามารถชาร์จได้ ดังนั้นเมื่อ Ultracapacitor จ่ายพลังงานหมดจึงจำเป็นต้องถอดไปชาร์จด้วยเครื่องชาร์จอีกครั้ง หากคอนเวอร์เตอร์ที่มีการทำงานแบบสองทิศทาง วงจรจะสามารถจ่ายพลังงานไปยังระบบและจ่ายพลังงานจากระบบกลับเข้าสู่ Ultracapacitor ได้ ซึ่งวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์สามารถแสดงได้ในภาพที่ 2.28



ภาพที่2.28 วงจร 2 Quadrant dc to dc converter

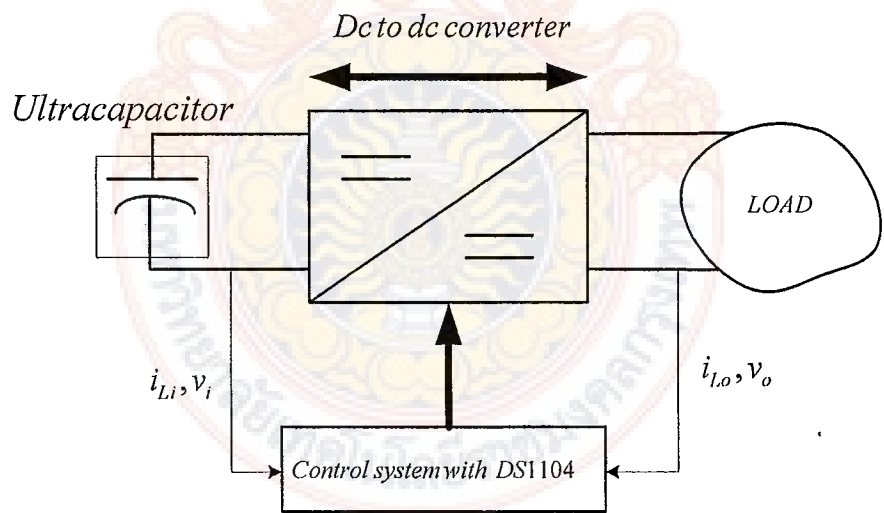


ภาพที่2.29 วงจรสมมูลขณะทำงานเป็นวงจร Buck dc to dc converter

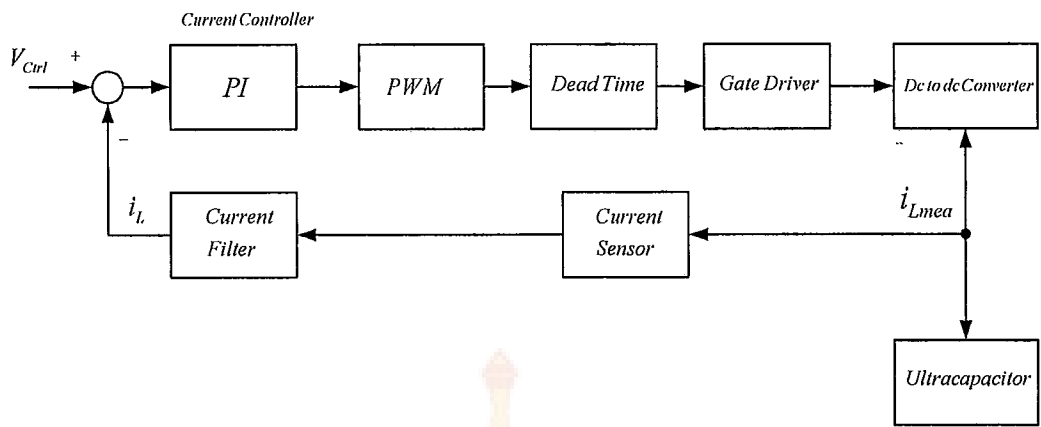


ภาพที่2.30 วงจรสมมูลขณะทำงานเป็นวงจร Boost dc to dc converter

วงจรคอนเวอร์เตอร์ในภาพที่ 2.28 สามารถทำงานได้สองแบบคือวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ ในภาพที่ 2.29 ทำหน้าที่ประจุพลังงานอุปกรณ์ Ultracapacitor และวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่คายพลังงานจากอุปกรณ์ Ultracapacitor ไปยังดีซีบัส ในภาพที่ 2.31 ส่วนบล็อกไดอะแกรมในภาพ 2.31 และ 2.32 เป็นบล็อกไดอะแกรมระบบดีซีบูตส์คอนเวอร์เตอร์ 2 ทิศทาง ที่ควบคุมด้วยการ์ด อินเตอร์เฟสรุ่น DS1104



ภาพที่ 2.31 บล็อกไดอะแกรมระบบดีซีบูตส์คอนเวอร์เตอร์ 2 ทิศทาง



ภาพที่2.32 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง

2.6 ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller)

ตัวควบคุมแบบพีไอนี้ เป็นการนำเอาคุณสมบัติของ ตัวควบคุมแบบพีกับตัวควบคุมแบบไอมารวมกัน ดังนั้นสัญญาณที่ออกจากตัวควบคุมชนิดนี้คือ

สัญญาณทางออก = สัญญาณทางออกแบบพี + สัญญาณทางออกแบบไอ

$$V_{in}(t) = G_p V_{in}(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t V_{in} dt \quad (2.51)$$

เมื่อแปลงลาปลาซ จะได้

$$V_{out}(s) = G_p V_{in}(s) + \frac{V_{in}(s)}{T_i s} \quad (2.52)$$

$$V_{out}(s) = G_p V_{in}(s) + (1 + \frac{1}{T_i s}) \quad (2.53)$$

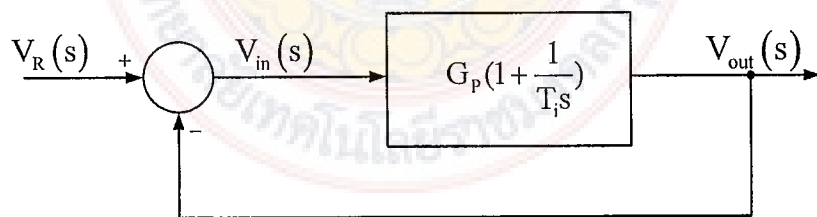
เมื่อ $T_r = G_p T_i$ เขียนเป็นฟังก์ชันโอนย้าย ดังสมการที่ (2.54)

$$F(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = G_p (1 + \frac{1}{T_i s}) \quad (2.54)$$

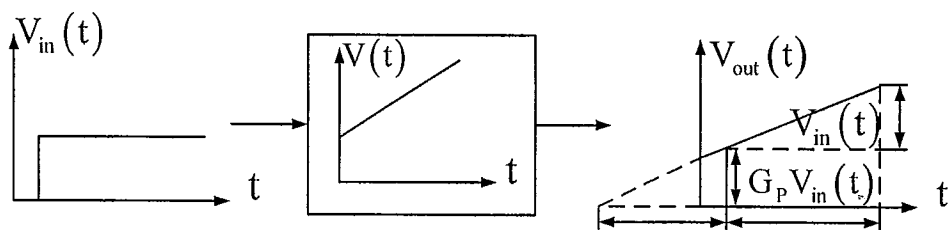
ค่าของ G_p และ T_i สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ การปรับปรุ่งค่า T_i จะมีผลต่อการกระทำ การควบคุมแบบบูรณาการรวมหน่วย แต่ถ้าปรับค่าความไวของสัดส่วน G_p จะมีผลทั้งการกระทำ การควบคุมแบบสัดส่วน และการกระทำการควบคุมแบบบูรณาการรวมหน่วย ส่วนกลับของ T_i เรียกว่า

“อัตราส่วนการจัดใหม่” อัตราส่วนการจัดใหม่เป็นจำนวนครั้งที่ที่การควบคุมแบบสัดส่วน เริ่มต้นใหม่

จากสมการที่ (2.54) สามารถนำมาเขียนเป็นภาพบล็อกไดอะแกรมได้ดังภาพที่ 2.33 และ ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดแสดงได้ดังภาพที่ 2.34

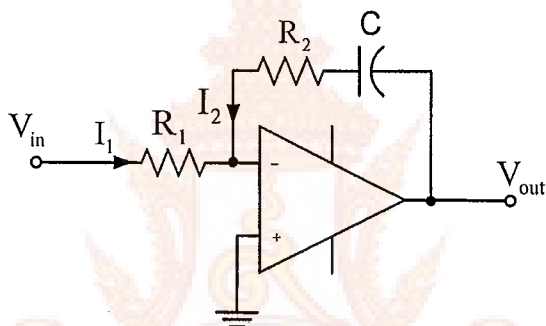


ภาพที่ 2.33 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบพีไอ



ภาพที่ 2.34 ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดของตัวควบคุมแบบพีไอ

จากภาพที่ 2.29 สามารถสร้างเป็นวงจรอปแอมป์ได้ ดังภาพที่ 2.30



รูปที่ 2.35 วงจรควบคุมแบบพีไอ

จากวงจรในภาพที่ 2.30 เมื่อพิจารณาที่ขั้วลบ (-) จะได้

$$\begin{aligned}
 I_1 + I_2 &= 0 \\
 V_{in}(t) &= I_1(t)R_1 \\
 &= -I_2(t)R_1 \\
 V_{out}(t) &= -[I_2(t)R_2 + V_C(t)] \\
 &= -\left[I_2(t)R_2 + \frac{1}{C} \int_0^t i_2 dt \right] \\
 &= -\left[V_{in}(t) \frac{R_2}{R_1} + \frac{V_{in}(t)}{CR_1} \right]
 \end{aligned} \tag{2.55}$$

$$= -\frac{V_{in}(t)}{R_1} + (R_2 + \frac{1}{C}) \tag{2.56}$$

สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันโอนย้ายได้ดังนี้

$$\begin{aligned} F_{(s)} &= \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{1}{R_1} \left(R_2 + \frac{1}{C_s} \right) \\ &= -\frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{1}{R_2 C_s} \right) \\ F_{(s)} &= -G_p \left(1 + \frac{1}{T_r s} \right) \end{aligned} \tag{2.57}$$

เมื่อ $G_p = \frac{R_2}{R_1}$ คือ ความไวของสัดส่วนหรืออัตราขยาย
 $T_r = R_2 C$ คือ อัตราส่วนจัดใหม่
 $T_i = R_1 C$ คือ เวลาบูรณาการรวมหน่วย



2.7 การ์ดอินเทอร์เฟซ DS1104

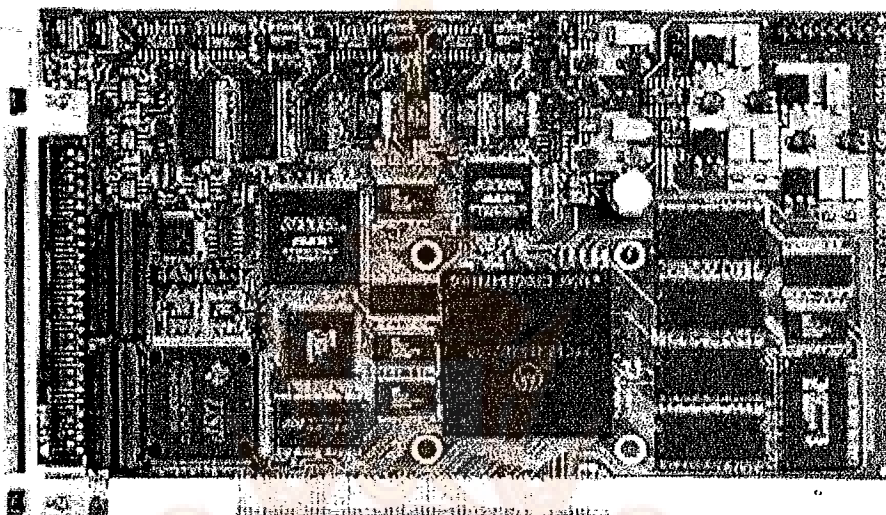
การ์ดอินเทอร์เฟซของบริษัท dSPACE เป็นการ์ดอินเทอร์เฟซที่ออกแบบสำหรับใช้กับงานพัฒนาต้นแบบ (prototype) และงานวิจัยในอุตสาหกรรมยานยนต์ (automobile industrial) เป็นหลัก ในช่วงแรกๆ ยกตัวอย่างเช่น BMW และ BENZ เป็นต้น แต่ในเวลาต่อมาสถานศึกษาโดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับมหาวิทยาลัยที่ต้องการพัฒนาห้องทดลองให้ทันสมัยและพัฒนางานวิจัยต้นแบบได้รวดเร็วมากขึ้นจึงได้นำการ์ดอินเทอร์เฟซ dSPACE เข้ามาใช้งานมากขึ้น โดยเฉพาะรุ่น ACE kit1103, ACE kit1104 และ ACE kit MicroAutobox (ACE: Advanced Control Education) เป็นการ์ดอินเทอร์เฟซที่บริษัทได้ลดราคาขายลงพิเศษสำหรับลูกค้าที่เป็นสถานศึกษา ซื้อได้เปรียบของการใช้การ์ดอินเทอร์เฟซ dSPACE สำหรับมหาวิทยาลัยที่มีการสอนทางวิศวกรรมศาสตร์ [1-3] คือ เมื่อมีการจำลองการทำงานระบบควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เรียบร้อยแล้วสามารถเชื่อมต่อเข้ากับกระบวนการจริงได้ทันทีโดยผ่าน blocksets สำหรับการอินเทอร์เฟซ โดยเฉพาะ และสามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ออกแบบด้วยเวลาจริง ดังนั้นแล้วจึงมีมหาวิทยาลัยจำนวนมากที่ใช้การ์ดอินเทอร์เฟซ dSPACE ควบคู่กับชุดทดลองทางการศึกษาของบริษัท Quanser, ECP เป็นต้น

การ์ดอินเทอร์เฟซ dSPACE ประกอบด้วยจำนวนช่อง A/D, D/A PWM, Digital I/O, Encoder ที่มากเพียงพอสำหรับระบบควบคุมทุกประเภท ยกตัวอย่างเช่น การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสสลับแบบเวกเตอร์ (AC motor Vector control) การควบคุมหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ การควบคุมแขนกล การควบคุมกระบวนการแบบไม่เชิงเส้นที่ซับซ้อน เป็นต้น

ในที่นี้จะกล่าวถึงการติดตั้งและใช้งานการ์ดอินเทอร์เฟซ DS1104 สำหรับงานระบบควบคุมและงานควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นหลัก ลักษณะสมบัติของการ์ดสามารถกล่าวโดยสรุปดังนี้คือ

- เป็นการ์ดอินเทอร์เฟซสำหรับควบคุมแบบเวลาจริง (Real time) ผ่านสล๊อต PCI 32 บิต ในคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC/AT) ใช้โปรเซสเซอร์หลัก PPC603e 250 MHz และตัวประมวลผลเชิงดิจิทัลรอง (Slave Digital Signal Processor) เบอร์ TMS320F240
- ช่องสัญญาณ A/D 8 ช่อง ความละเอียด 12 และ 16 บิต แรงดันอินพุต $\pm 10V$
- ช่องสัญญาณ D/A 8 ช่อง ความละเอียด 16 บิต บิต แรงดันเอาต์พุต $\pm 10V$
- สัญญาณ PWM 10 ช่อง แบบอิสระจาก DSP TMS320F240
- ดิจิตอล I/O 20 ช่อง แบบขนาน
- ช่องสัญญาณสำหรับเอนโคเดอร์จำนวน 2 ช่อง

- ช่องสัญญาณอินเทอร์เฟซแบบอนุกรม RS232, RS485
- อินเทอร์เน็ตฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์
- แผงเชื่อมต่อสัญญาณ (Panel) สำหรับควบคุมกระบวนการ
- Microtec C Compiler
- ซอฟต์แวร์จัดการระบบฮาร์ดแวร์ (Experiment and platform manager for hardware management)
- ไดรเวอร์ซอฟต์แวร์สำหรับ MATLAB/SIMULINK และ Control Desk standard



ภาพที่ 2.36 การ์ดอินเทอร์เฟซ dSPACE รุ่น DS1104

2.6.2 สำหรับขั้นตอนการติดตั้ง DS1104 กับคอมพิวเตอร์ให้ดำเนินการตามขั้นตอนต่อไปนี้คือ

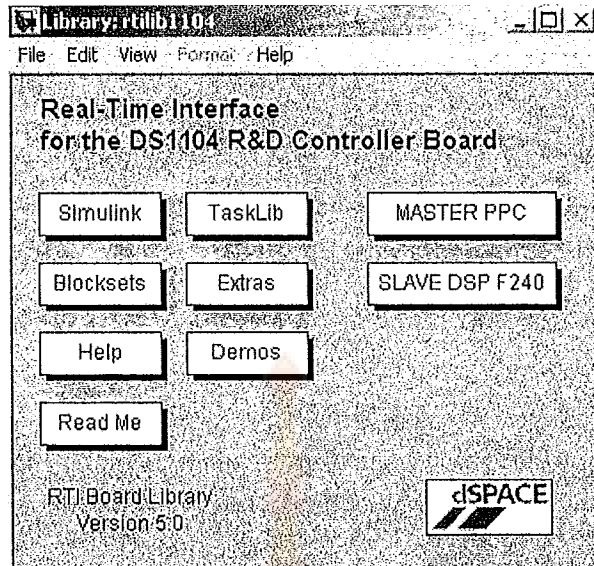
1. ปิดคอมพิวเตอร์และถอดไฟเลี้ยงจากคอมพิวเตอร์
2. เปิดฝาครอบคอมพิวเตอร์
3. เลือกสล็อต PCI 32 บิต ที่ต้องการและถอดฝาครอบสล็อตออก
4. เสียบการ์ดและใส่สกรูเพื่อยึดการ์ดกับคอมพิวเตอร์
5. ปิดฝาครอบคอมพิวเตอร์และเสียบปลั๊กไฟเลี้ยงคอมพิวเตอร์
6. เมื่อเปิดคอมพิวเตอร์อีกครั้งควรมีการตามสถานะปกติ ถ้ามีปัญหาไม่สามารถบูตได้ให้ลองเปลี่ยนสล็อตไปใช้สล็อตเนื่องจาก address อาจจะชนกับ address ของอุปกรณ์อื่น

2.6.3 ขั้นตอนการติดตั้งซอฟต์แวร์เริ่มต้นตามขั้นตอนดังนี้คือ

1. เพื่อให้การ์ดอินเตอร์เฟซสามารถทำงานร่วมกับ MATLAB ได้ดั่งนั้นรุ่น (version) ของโปรแกรม MATLAB ที่ใช้งานต้องตรงกับ CD version ของ dSPACE ยกตัวอย่างเช่น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง version ของ RTI toolboxes (ดูจาก dSPACE Release Matrix) แต่ในที่นี้ใช้ Matlab version 6.5.1
2. เสียบ Hard-lock ที่มี label ตรงกับ Key-disk ที่พอร์ต USB ของคอมพิวเตอร์
3. ใส่แผ่นซีดีโปรแกรม dSPACE ไดรฟ์ซีดีของคอมพิวเตอร์
4. ใส่แผ่นดิสก์ Key-Disk ขนาด 3.5" ในไดรฟ์ A:
5. เลือกที่ไดรฟ์ซีดีและ Run ไฟล์ CDsetup.exe เพื่อติดตั้งโปรแกรม
6. ทำตามคำแนะนำและคำสั่งติดตั้งโปรแกรม จนถึงขั้นสุดท้ายที่คำสั่งที่ให้คอมพิวเตอร์เริ่มทำงานใหม่อีกครั้ง (restart)
7. หลังจากติดตั้งโปรแกรมเสร็จเรียบร้อยแล้วให้นำแผ่น Key-Disk และแผ่นซีดีโปรแกรมออก
8. สามารถตรวจสอบการถูกต้องของการติดตั้งโปรแกรมจาก Install Manager ของ dSPACE
9. เมื่อตรวจสอบถูกต้องสามารถเริ่มใช้งานการ์ดอินเตอร์เฟซ dSPACE แบบเวลาจริงได้ทันที

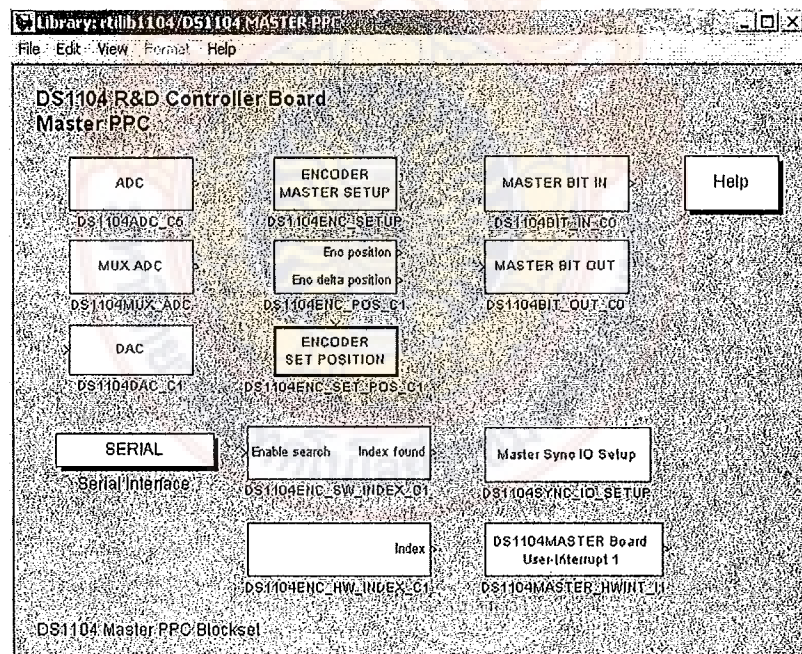
2.6.4 การใช้งาน dSPACE blocksets ใน SIMULINK

เพื่อเข้าใจถึงการใช้งานฟังก์ชันต่างๆของการ์ดอินเตอร์เฟซ DS1104 อาทิเช่น A/D, D/A, PWM, Digital I/O จะกล่าวถึง SIMULINK blocksets ใน RTI1104 ตามภาพที่ 2.33 โดยสังเขป ดังนี้คือ (รายละเอียดทั้งหมดสามารถดูได้จาก DS1104RTI.pdf)

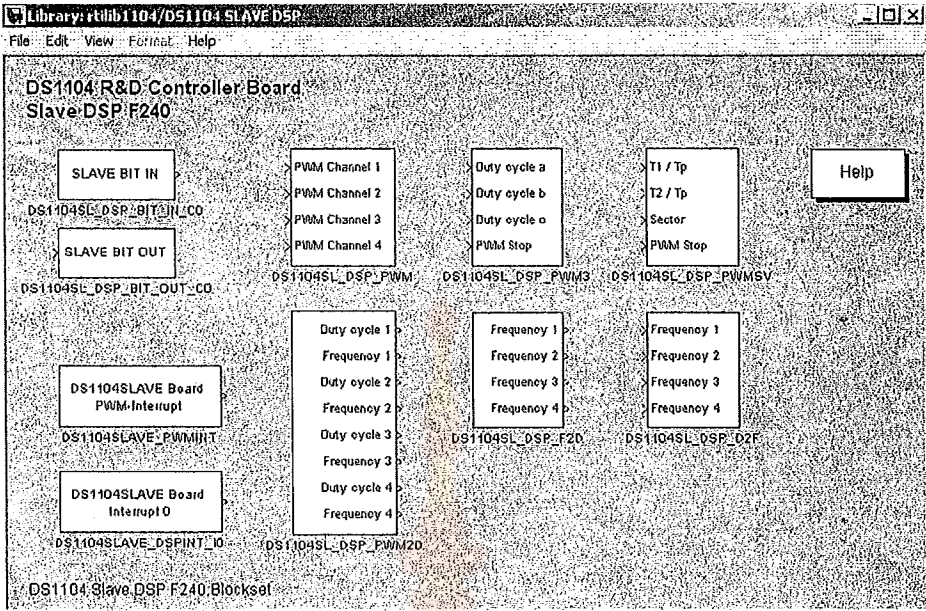


ภาพที่ 2.38 rtilib1104 blocksets

- Simulink สำหรับเรียกใช้งาน Blocksets ต่างๆ
- Demos สำหรับเรียกตัวอย่างการใช้งาน
- Master PPC สำหรับเรียกไลบรารีในรูปที่ 2.34 ก
- Slave DSP F240 สำหรับเรียกไลบรารีในภาพที่ 2.34 ข



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.39 DS1104 Master PPC และ DS1104 SLAVE DSP blocksets

1. Analog Input/Output Channels controls

1. DS1104ADC_Cx และ DS1104MUX_ADC เป็นบล็อกสำหรับแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลเมื่อรับสัญญาณอนาลอก $\pm 10V$ ที่ด้านอินพุต และที่เอาพุตของบล็อกจะถูกลดทอนด้วยอัตรา 10:1 นั่นหมายความว่าสัญญาณ $10V$ ที่อินพุตของการ์ดจะมีค่าเท่ากับ $1V$ ใน SIMULINK

Input Voltage Range	Simulink Output
-10 V ... +10 V	-1 ... +1 (double)

2. DS1104DAC_Cx และ DS1104MUX_DACเป็นบล็อกสำหรับแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อกเมื่อรับสัญญาณดิจิตอล $\pm 1V$ ที่ด้านอินพุต และที่เอาพุตของบล็อกจะถูกขยายด้วยอัตรา 1:10 นั่นหมายความว่าสัญญาณ $1V$ ใน SIMULINKจะมีค่าเท่ากับ $10V$ ที่เอาพุตของการ์ด

Simulink Input	Output Voltage Range
-1 ... +1 (double)	-10 V ... +10 V

2. Digital Input/Output control controls

DS1104BIT_IN_Cx และ DS1104BIT_OUT_Cx สำหรับรับและส่งสัญญาณดิจิตอลแบบ TTL จำนวน 20 บิต สามารถเปลี่ยนช่องสัญญาณด้วยการเลือกหมายเลขช่องโดยตรงที่บล็อก

Digital Input (TTL)	Simulink Output	
	Without Data Typing	With Data Typing
High	1 (double)	1 (boolean)
Low	0 (double)	0 (boolean)

Simulink Input		Digital Output (TTL)
Without Data Typing	With Data Typing	
> 0 (double)	1 (boolean)	High
≤ 0 (double)	0 (boolean)	Low

3. Encoder position controls

1. DS1104ENC_SETUP บล็อกสำหรับเลือกช่องสัญญาณ (1,2) และค่าเริ่มต้นของเอนโคเดอร์ที่ใช้งาน

Channel	Encoder Signal Type	Position Information	Position Value
1 ... 2	digital	24 bit	$-2^{21} \dots +2^{21} - 0.25$

2. DS1104ENC_POS_CX บล็อกสำหรับการกำหนดการต่อสายสัญญาณของเอนโคเดอร์ที่ใช้งาน (RS422,TTL) สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมจาก DS1104InsConfig.pdf หน้า 129

Parameter		Value	
TTL Input voltage	High	Min.	Max.
	Low	2.0 V 0 V	5.0 V 0.8 V
TTL Input resistance		12 kΩ	
RS422 Input voltage	High	Diff > +0.2 V Diff < -0.2 V	
	Low		
		• Diff = Voltage difference between non-inverted and inverted signal • The input signal, together with the corresponding inverted signal, must be in the range 0 ... 5 V.	
RS422 Input resistance		The input resistance gradually drops from 8.5 kΩ at the corner frequency of 28 kHz to 210 Ω at the corner frequency of 225 kHz.	

4. PWM control

DS1104PWM สำหรับสร้างสัญญาณ PWM อัตราจำนวน 4/6 ช่อง ปรับความกว้างของพัลส์ในช่วง 0–1V ความถี่สวิตช์ ค่าเริ่มต้นพัลส์ และการอินเตอร์รัพท์ของพัลส์ โดยความถี่ในการสวิตช์อยู่ที่ 0.1Hz-1MHz

Simulink Input	Value	Data Type	Meaning
Duty cycle a, b, c	0 ... 1	Double	Duty cycle of the PWM signal for channel a, b, c.
Stop PWM	0 / 1	Boolean	Enables PWM stop for channel pairs a/b, b/c and c/a: • Value 1 stops PWM generation • Value 0 resumes PWM generation

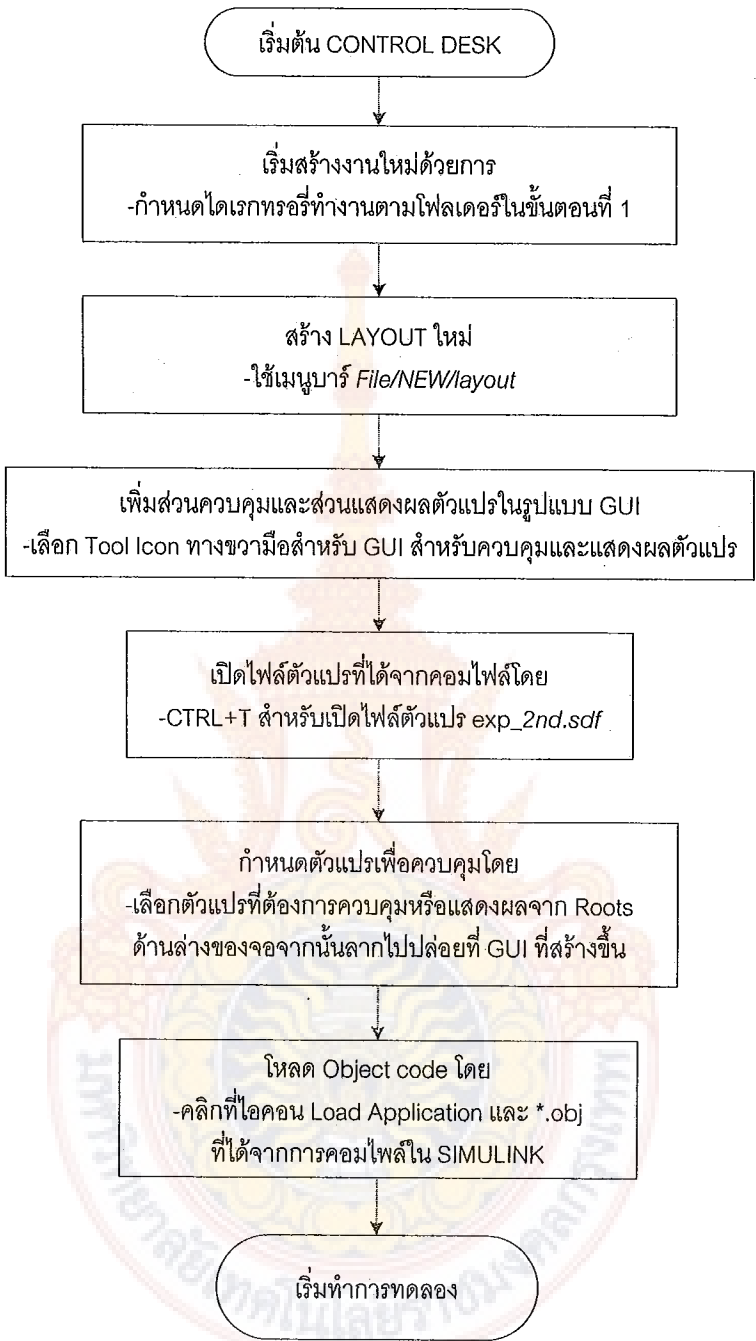
2.6.5 การสร้างการทดลองด้วย dSPACE และSimulink

ขั้นตอนแบบ Step-by-Step จะช่วยการงานทดลองด้วย dSPACE ง่ายขึ้นโดยจะแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ ส่วนแรกเป็นการแบบจำลอง SIMULINK สำหรับอัลกอริทึมที่ต้องการสำหรับเชื่อมต่อกับ dSPACE ผ่าน RTI1104 blocksets ส่วนที่สองเป็นการสร้าง GUI สำหรับการควบคุมตัวแปรที่ต้องการ และแสดงผลแบบเวลาจริง

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง SIMULINK และ คอมไพล์ DSP code สำหรับ DS1104



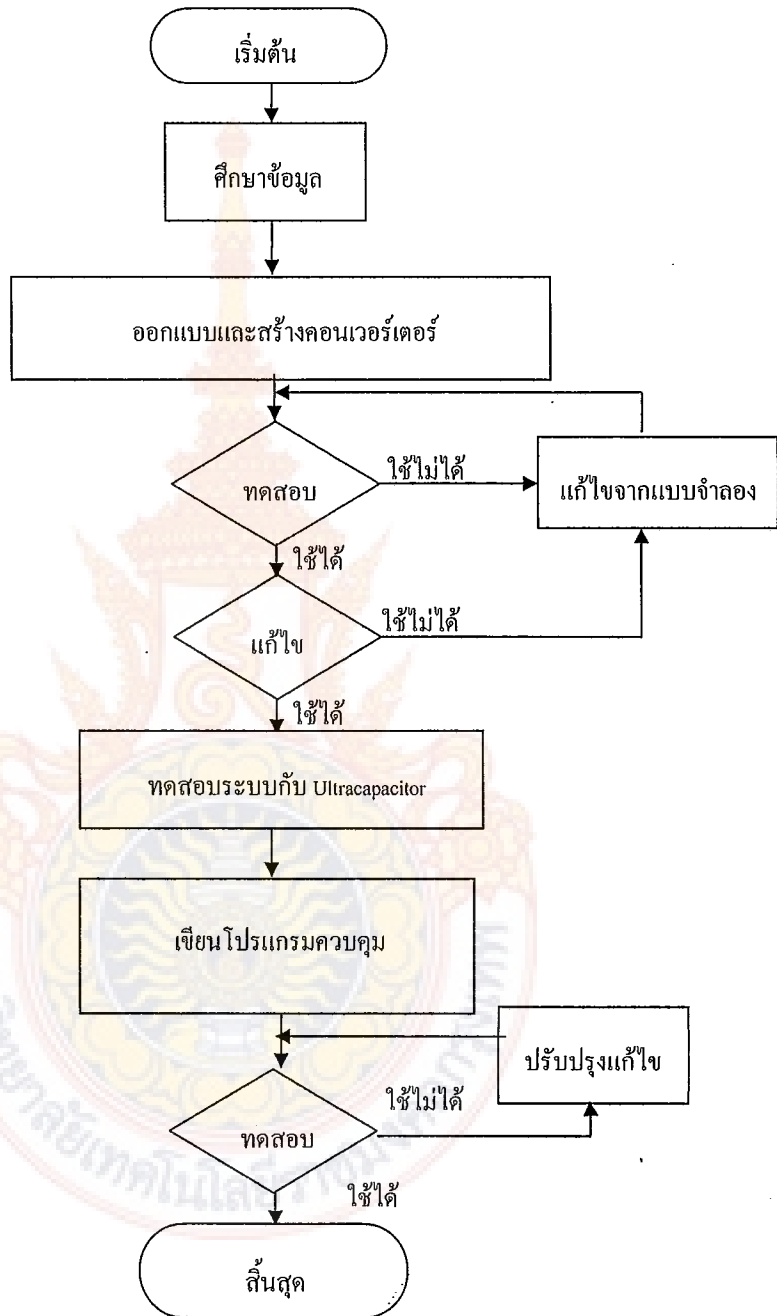
ขั้นตอนการสร้างการทดลองด้วย DS1104 ผ่าน CONTROL DESK



บทที่ 3

การออกแบบงานวิจัย

การออกแบบคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางสำหรับ Ultracapacitor มีขั้นตอนในการปฏิบัติงานดังต่อไปนี้

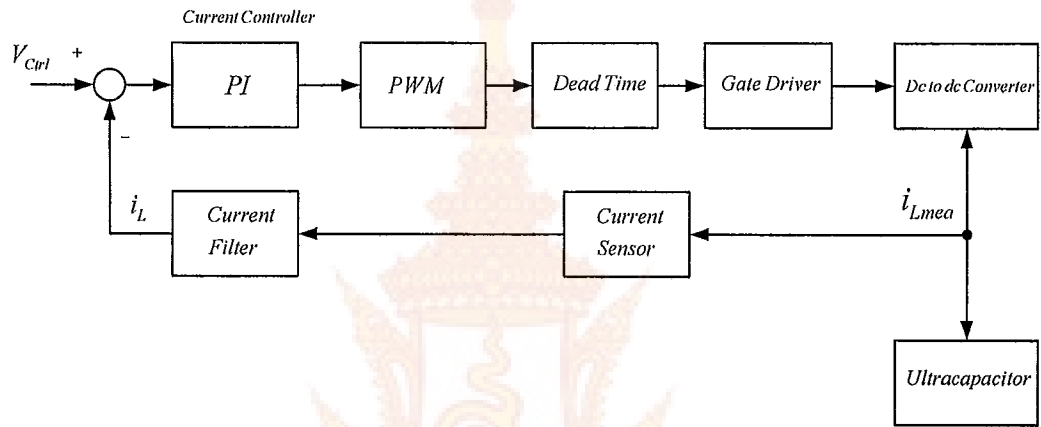


ภาพที่ 3.1 ฟังขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 คำนวณและศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

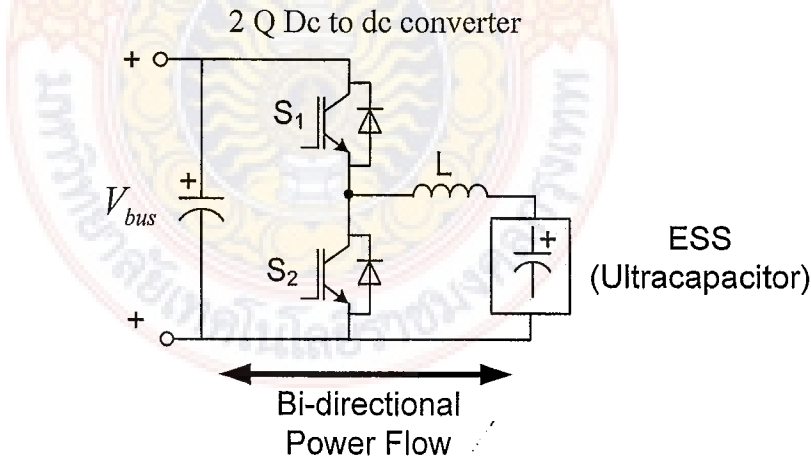
จากข้อมูลที่ได้ศึกษาคำนวณรายละเอียดเนื้อหาในบทที่ 2 สามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ได้ในภาพที่ 3.2 โดยมีการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แบ่งได้ 2 ส่วนดังนี้

- 1. ส่วนของตัวควบคุมกระแส ทำหน้าที่รับคำสั่งจากการ์ดอินเตอร์เฟส DS1104 แล้วบังคับให้ภาควงจรกำลังทำงานให้ได้ตามคำสั่งที่ได้รับ โดยมีการตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณคำสั่ง โดยตัวควบคุมจะมีหน้าที่ควบคุมให้มีค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์
- 2. ภาควงจรกำลังเป็นส่วนที่ทำหน้าที่สวิตช์ตามสัญญาณพัลส์วิธมอดดูเลชั่น (PWM) ตามที่ได้รับจากภาควควบคุม



ภาพที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์สำหรับ Ultracapacitor

3.2 การออกแบบวงจรถูกกำลังของวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์



ภาพที่ 3.3 วงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง

วงจรกำลังของวงจรคอนเวอร์เตอร์ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญคือตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ตัวเก็บประจุทางด้านเข้าพุต วงจรกำลังต้องสามารถทำงานปกติที่ขนาด พิกัดกระแสและ แรงดันที่ใช้งาน ในวงจรกำลังจะประกอบการทำงานแบบส่วนต่างๆ ดังนี้

- การคำนวณหาตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง
- การเลือกอุปกรณ์สวิตช์
- การคำนวณค่าตัวเก็บประจุทางด้านเข้าพุต

3.2.1 การคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง

ในวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากเนื่องจากมีหน้าที่ในการเก็บและ คายพลังงานเป็นผลให้ระดับแรงดันทางด้านเข้าพุตสูงกว่าระดับแรงดันทางด้านอินพุต การ คำนวณหาตัวเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากสมการ

$$L_{min} = \frac{D(1 - D)^2 R}{2f} \tag{3.1}$$

เมื่อ

- L_{min} คือค่าตัวเหนี่ยวนำต่ำสุดที่สามารถใช้งานได้ใหม่ดกระแสต่อเนื่อง
- f คือความถี่ที่ใช้งาน 20 kHz
- R คือค่าความต้านทานโหลดของวงจรหาได้จาก

$$R = \frac{V_{bus}^2}{P_{Omin}} \tag{3.2}$$

เมื่อ

- V_{bus} คือแรงดันด้านออกของวงจรที่ต้องการ
- P_{Omin} คือกำลังด้านเข้าพุตที่ให้ประสิทธิภาพต่ำสุดที่ได้จากสมการที่ (3.3)

$$\eta_{min} = \frac{P_{Omin}}{P_{imin}} \tag{3.3}$$

เมื่อ

- η_{min} คือประสิทธิภาพต่ำสุดของวงจรที่ต้องการคือ 80%
- P_{imin} คือกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตที่ให้ประสิทธิภาพต่ำสุดที่หาได้

$$P_{imax} = V_{Cmax} i_{Cmax} \tag{3.4}$$

เมื่อ

- V_{Cmax} คือแรงดันสูงสุดของ Ultracapacitorคือ 42 V
- i_{Cmax} คือกระแสสูงสุดของ Ultracapacitor คือ 24 A

แทนค่าในสมการที่ (3.4)

$$P_{i\max} = 42 * 24 \approx 1kW$$

แทนค่า $P_{i\max}$ ลงในสมการที่ (3.3) เพื่อหา $P_{O\min}$

$$\begin{aligned} P_{O\min} &= \eta_{\min} P_{i\max} \\ P_{O\min} &= 0.8 * 1,000 = 800W \end{aligned}$$

แทนค่า $P_{O\min}$ ลงในสมการที่ (3.2)

$$R = \frac{V_{bus}^2}{P_{O\max}} = \frac{60^2}{800} = 4.5 \Omega$$

จากสมการที่ (3.1) D คือค่าตัวชี้ไขเกิล หาได้จาก

$$D = 1 - \frac{V_c}{V_{is}} \tag{3.5}$$

$V_c = 42V$ แทนในสมการที่ (3.5)

$$D = 1 - \frac{42}{60} = 0.3$$

แทนลงในสมการที่ (3.1) เพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำ

$$L_{\min} = \frac{0.3(1-0.3)^2 * 4.5}{2 * 2000} = 165.375 \mu H$$

โครงการนี้เลือกใช้ขดลวดพันบนแกน E40 คำนวนหาจำนวนรอบของขดลวดได้จาก

$$N = \frac{LI_{peak}}{B_{\max} S} \tag{3.6}$$

จะได้

$$N = \frac{165.375 * 10^{-6} * 10}{0.02 * 10^{-6} * 550} = 35.4 \text{ รอบ}$$

เมื่อ

- N คือจำนวนรอบของขดลวด
- I_{peak} คือกระแสสูงสุดที่ไหลในขดลวด
- $B_{\max}$ คือความเข้มฟลักซ์สูงสุด
- S คือพื้นที่แกนมีค่า 550 mm^2

3.2.2 การเลือกอุปกรณ์สวิตซ์ซิ่ง

อุปกรณ์สวิตซ์ซิ่งในวงจรคอนเวอร์เตอร์ ควรเลือกอุปกรณ์ที่ทำงานได้ดีที่ความถี่สูง เวลาในการเปลี่ยนสถานะค่อนข้างสั้น โดยเลือกใช้มอสเฟตกำลังทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ซิ่ง เพราะนอกจากสามารถทำงานที่ความถี่สูงตั้งแต่ 10 kHz ไปจนถึง 400 kHz เวลาในการสับสวิตซ์อยู่ในช่วงนาโนวินาที และในวงจรขั้วมอสเฟตกำลังนั้นทำได้ง่ายเพราะควบคุมด้วยแรงดันและต้องการกระแสค่อนข้างต่ำ

โดยได้เลือกใช้มอสเฟตกำลังเบอร์ IRFP264 ของบริษัท International Rectifier มีคุณลักษณะสมบัติต่างๆที่สำคัญดังนี้ ความต้านทานระหว่างขาเดรนและซอร์ส ขณะนำกระแส $R_{DS(on)} = 0.075\Omega$ ซึ่งมีค่าต่ำมาก แรงดันตกคร่อมระหว่างขาเดรนและขาซอร์ส (V_{DS}) ที่ทนได้ 250 V กระแสเดรน (I_D) สูงสุดที่สามารถไหลผ่านได้ 38 A เวลาคืนสภาพของมอสเฟตกำลัง $t_{rr} = 620\text{ ns}$

3.2.3 การคำนวณหาตัวเก็บประจุด้านเอาพุต

ในวงจรกำลังของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ ตัวเก็บประจุด้านเอาพุตมีหน้าที่ในการเก็บพลังงานในรูปของประจุไฟฟ้าและทำการจ่ายแรงดันออกให้กับโหลด หรือคายประจุไฟฟ้าเมื่อสวิตซ์ Turn ON และทำการเก็บประจุไฟฟ้าเมื่ออุปกรณ์สวิตซ์ Turn OFF ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะช่วยให้การลดแรงดันกระเพื่อมทางด้านเอาพุต สามารถคำนวณตัวเก็บประจุทางด้านเอาพุตได้จากสมการที่ (3.7)

$$\frac{\Delta V_{bus}}{V_{bus}} = \frac{D}{RCf} \quad (3.7)$$

เมื่อ $\frac{\Delta V_{bus}}{V_{bus}}$ คือค่า Ripple Factor กำหนดให้มีค่าไม่เกิน 1%

ΔV_{bus} คือแรงดันกระเพื่อมด้านเอาพุต

C คือตัวเก็บประจุด้านเอาพุต

D คือคิวิตซ์ไซเคิล

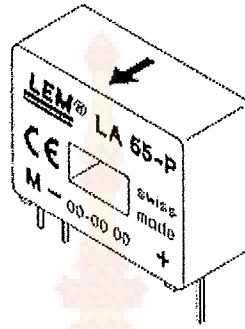
R คือค่าความต้านทานโหลดของวงจร

f คือความถี่สวิตซ์ซิ่ง

แทนค่าในสมการที่ (3.7) จะได้ค่าตัวเก็บประจุด้านเอาพุต $200\text{ }\mu\text{F}$

3.3 อุปกรณ์ตรวจจับสนะแสง

ทำหน้าที่ตรวจวัดกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเพื่อให้วงจรคอนเวอร์เตอร์ทำงานแบบวงปิดในวงจรกระแส ซึ่งใช้ตัวตรวจจับสนะแสง แบบฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์ (Hall Effect Sensor) เบอร์ LA55-P ของบริษัท LEM ซึ่งมี Conversion ratio 1:1000 หมายความว่าถ้ากระแสที่ตรวจจับมีค่า 1 A เซนเซอร์จะออกมา 1 mA ลักษณะของเซนเซอร์แสดงดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 เซนเซอร์กระแสเบอร์ LA55-P

การออกแบบสามารถควบคุมการจ่ายกระแสจาก Ultracapacitor ได้โดยการป้อนคำสั่ง V_{ctrl} โดยการทำงานของเซนเซอร์เบอร์ LA55-P นี้มีการทำงานคล้ายกับการใช้มิเตอร์ก้ามปู โดยการผ่านตัวนำที่มีกระแสที่ต้องการวัดไหลผ่านเซนเซอร์ซึ่งจะมีช่อง สำหรับให้ลวดตัวนำผ่านกระแสสูงสุดที่สามารถผ่านได้คือ 50A ในโครงงานไหลสูงสุด 25 A จึงพันลวดตัวนำที่จุดวัด i_L ผ่านเซนเซอร์ 2 รอบ ซึ่งจะได้กระแสต้านเข้าจุดสูงสุดเพิ่มเป็น 20 mA จากนั้นทำการเลือกค่า R_1 เพื่อเปลี่ยนค่ากระแสเป็นแรงดันได้จาก

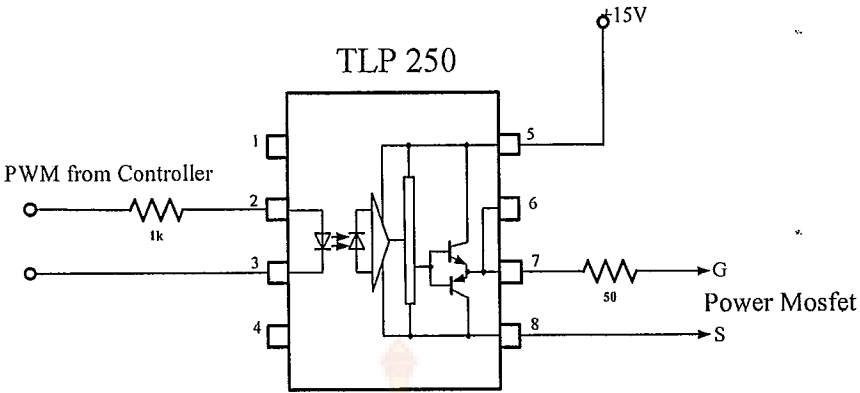
$$R_1 = \frac{5V}{20mA} = 250\Omega \quad (3.8)$$

ส่วนค่าทนกำลังกำลังของตัวต้านทานที่ใช้สามารถคำนวณได้จากกระแสและแรงดันที่ตัวต้านทาน

$$P = V * I = 5 * 20 * 10^{-3} = 100mW \quad (3.9)$$

3.4 วงจรขับนำเกตด้วยไอซีเบอร์ TLP250

ไอซีสำเร็จรูป TLP250 ขนาด 8 ขาดังแสดงวงจรขับเกตไว้ในรูปที่ 3.7 โดยจะรับสัญญาณอินพุตผ่านขา 2 และขา 3 เพื่อที่จะทำการไบอัสให้แก่ไดโอดเปล่งแสงที่ต่ออยู่ระหว่างขา 2 และขา 3 ทางอินพุต โดยจะต่อผ่านความต้านทาน 1 กิโลโอห์ม เพื่อให้มีกระแสไหลผ่านไปยังไดโอดเปล่งแสงไม่สูงเกินไปจนเกิดความเสียหาย ส่วนทางเอาต์พุตกำหนดให้แรงดันมีขนาดเท่ากับ 15 โวลต์โดยรับแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟจากชุดวงจรจ่ายไฟเลี้ยง



ภาพที่ 3.5 วงจรขับเกตด้วย TLP 250



บทที่ 4

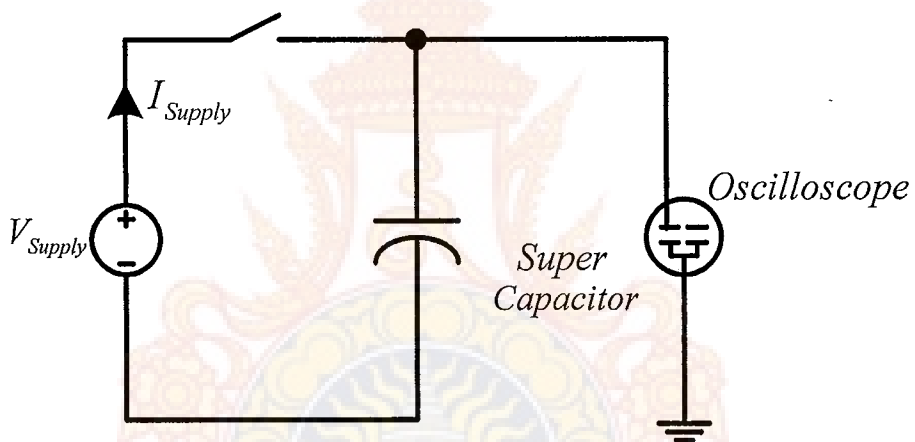
ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์

จากขั้นตอนออกแบบในบทที่ 2 การดำเนินงานเมื่อได้นำส่วนต่างๆ มาประกอบเรียบร้อยแล้ว ทำการทดสอบและเก็บผลการทดสอบด้วยออสซิลโลสโคป และ Power Analyser

4.1 การทดสอบการเก็บและคายพลังงานไฟฟ้าของ Ultracapacitor

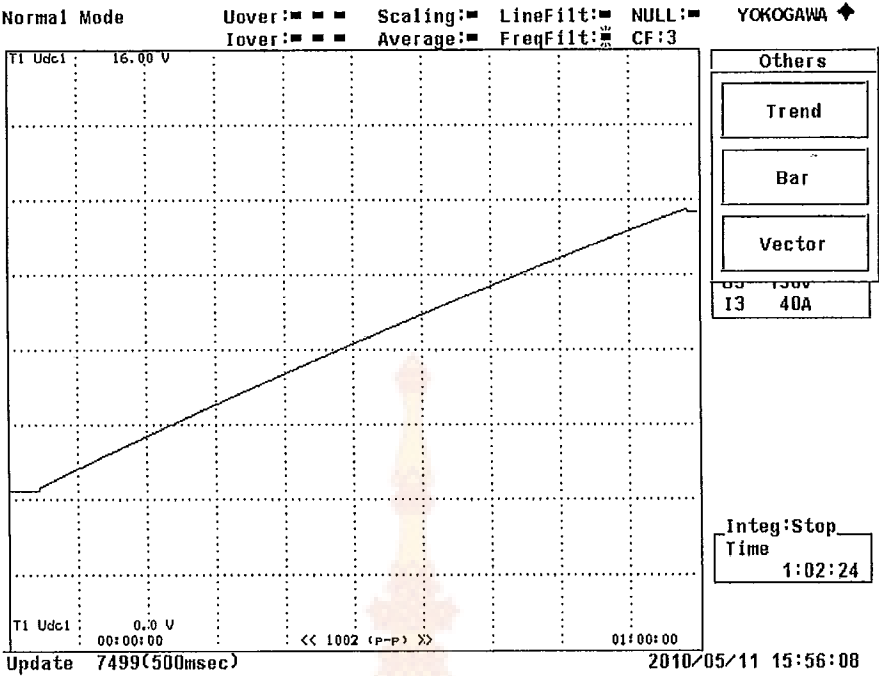
การศึกษาลักษณะการเก็บและคายพลังงานของ Ultracapacitor ว่าการเก็บและคายพลังงานของ Ultracapacitor ใช้ระยะเวลานานเท่าใดโดยแยกการทดสอบเป็นสองแบบดังนี้

4.1.1 การสอบการเก็บพลังงานไฟฟ้าของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ค่าแรงดันและกระแสต่างๆ

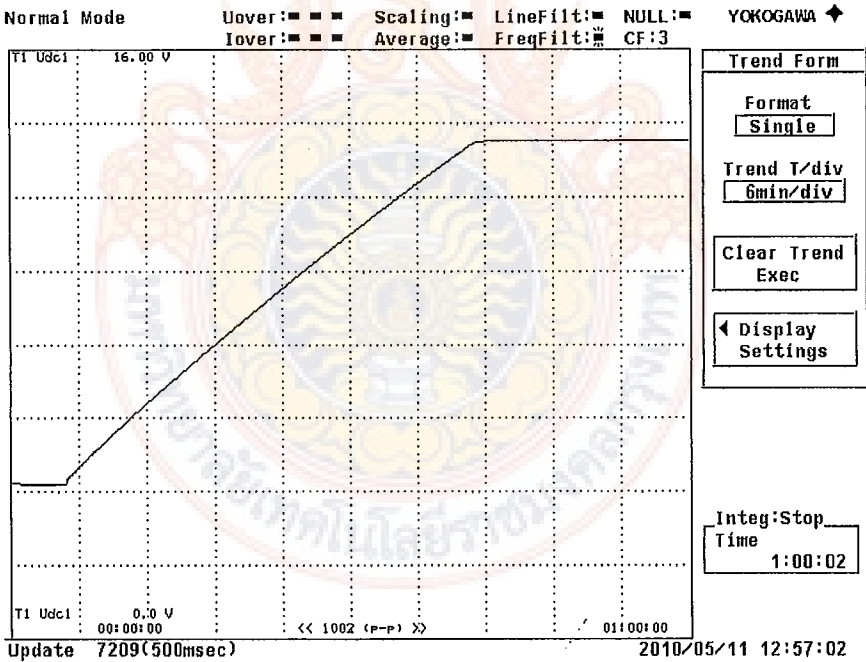


ภาพที่ 4.1 วงจรทดสอบการเก็บพลังงานไฟฟ้าของ Ultracapacitor

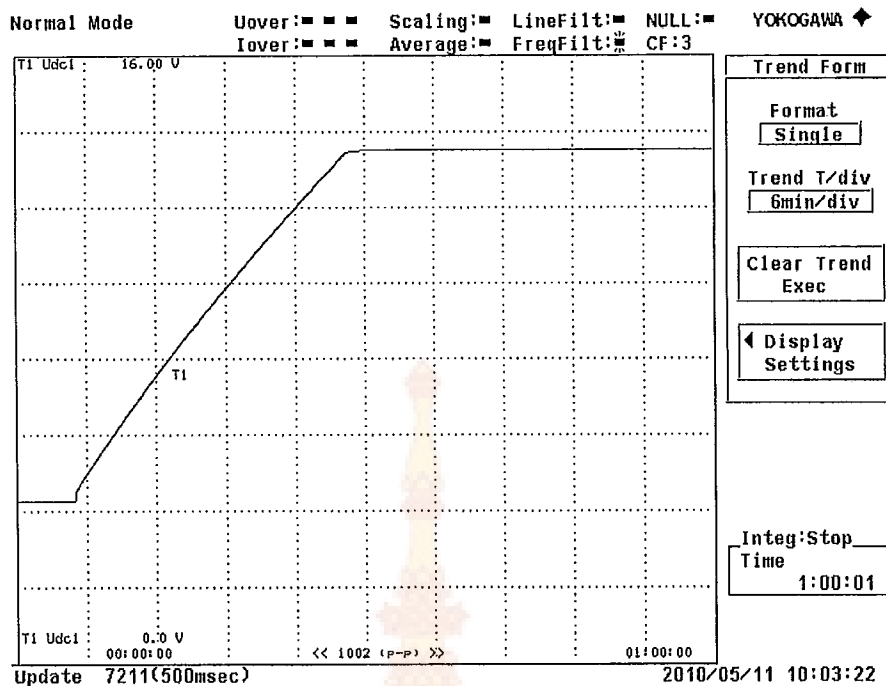
การทดสอบการเก็บพลังงานไฟฟ้าของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ค่ากระแสต่างๆและแรงดันคงที่ที่ 14 โวลต์ จะใช้ วงจรการทดสอบดังภาพที่ 4.1 โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบโปรแกรมได้ขนาด 0 – 30 โวลต์ 0 – 20 แอมป์ โดยจำกัดกระแสของดีซีเพาเวอร์ซัพพลายไว้ที่ 1 แอมป์ 2 แอมป์ และ 3 แอมป์ แล้วใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณแรงดันของ Ultracapacitor จำนวน 1 ไมครูล 15 V ทั้งนี้เนื่องจากแหล่งจ่ายที่ใช้งานมีพิกัดต่ำกว่าโมดูลของ Ultracapacitor ทั้งหมด



ภาพที่ 4.2 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า Ultracapacitor ในการเก็บพลังงานไฟฟ้า ที่แรงดัน 14 V กระแส 1 A



ภาพที่ 4.3 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า Ultracapacitor ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าที่แรงดัน 14 V กระแส 2 A

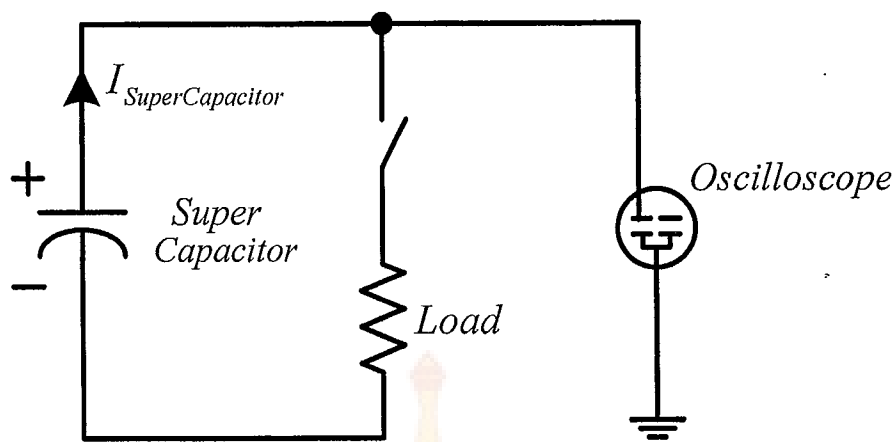


ภาพที่ 4.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า Ultracapacitor ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าที่แรงดัน 14 V กระแส 3 A

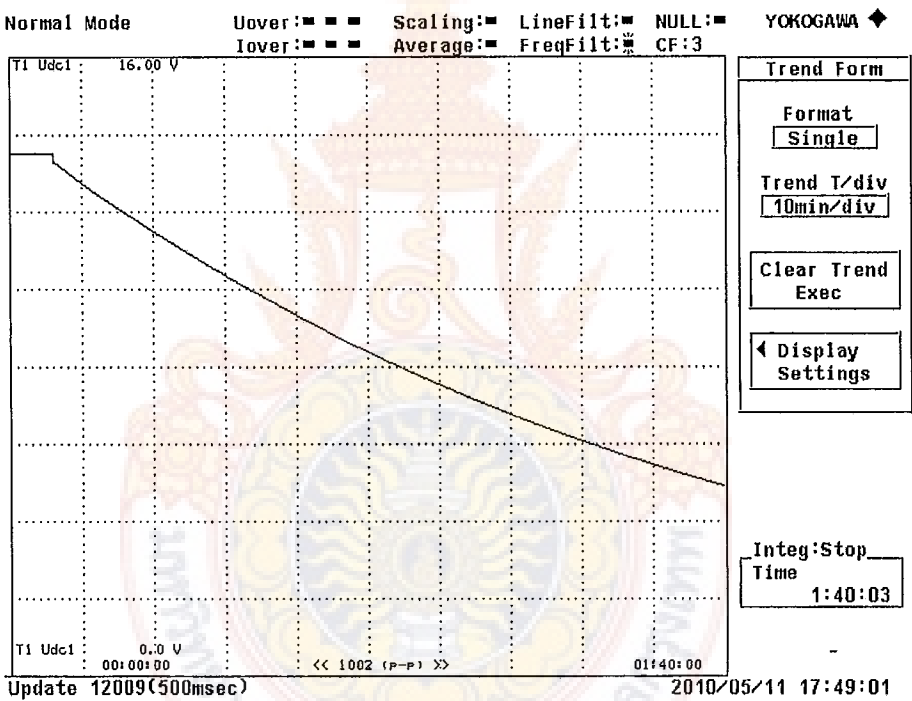
จากการทดสอบการเก็บพลังงานไฟฟ้าของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ค่าแรงดัน 14 V และค่ากระแสไฟฟ้าต่างๆ จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ค่ากระแสสูงในการเก็บพลังงานไฟฟ้าจะใช้เวลาในการเก็บพลังงานน้อยลงแต่เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าในการเก็บพลังงานมีค่าต่ำลงมาจะใช้เวลาในการเก็บพลังงานน้อยลง

4.1.2 ทดสอบการคายพลังงานไฟฟ้าของ Ultracapacitor

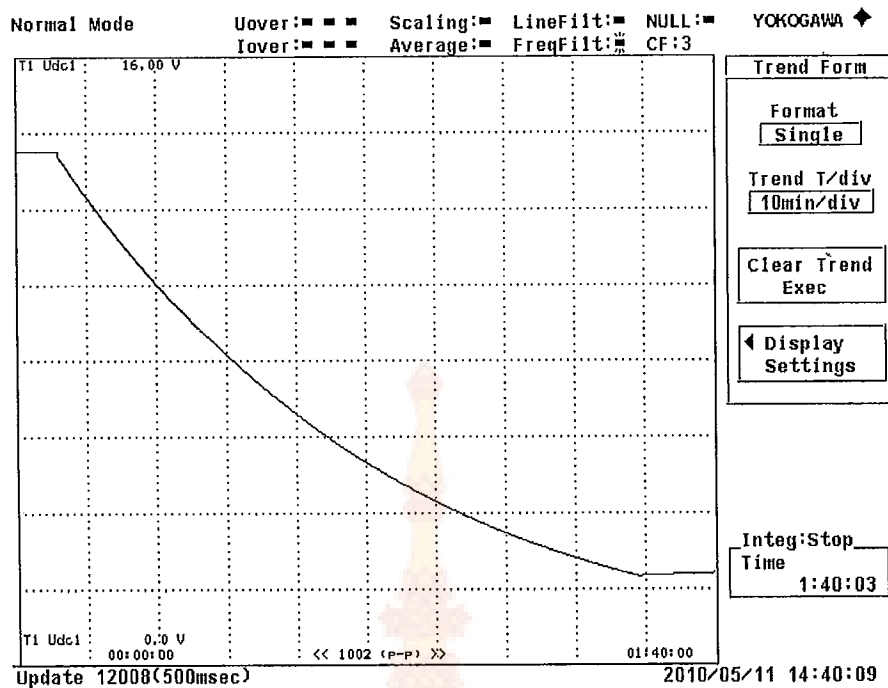
การทดสอบการคายพลังงานไฟฟ้าของ Ultracapacitor ที่ค่ากระแสต่างๆ และแรงดันคงที่ 14 โวลต์ จะใช้ วงจรการทดสอบดังภาพที่ 4.5 โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0 – 30 V 0 – 20 A โดยจำกัดกระแสของดีซีเฟนเวอร์ชัพพลายไว้ที่ 1 A 2 A และ 3 A แล้วใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณแรงดันของ Ultracapacitor



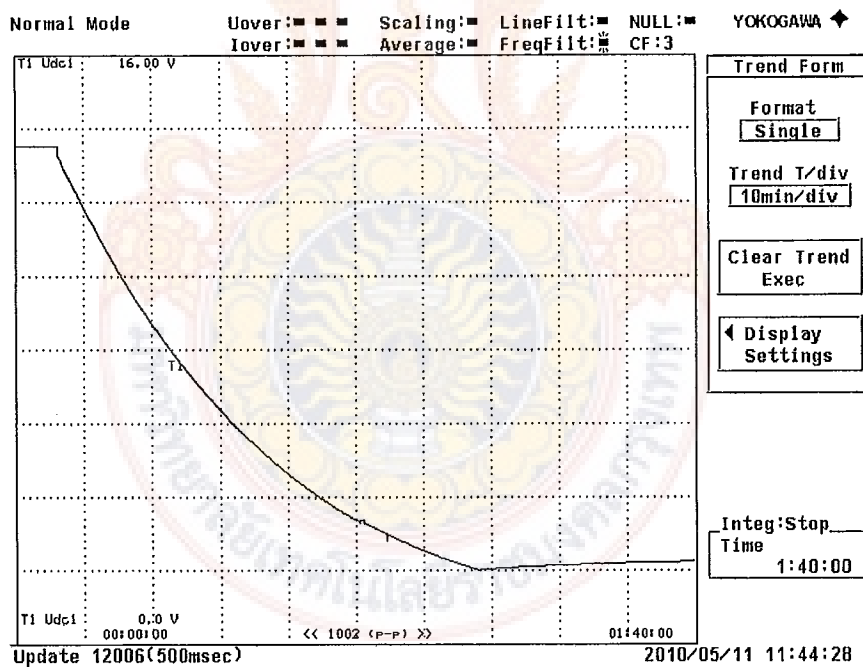
ภาพที่ 4.5 วงจรทดสอบการคายประจุของ Ultracapacitor



ภาพที่ 4.6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า Ultracapacitor ในการคายพลังงานไฟฟ้าที่แรงดัน 14 โวลต์ กระแส 1 แอมป์



ภาพที่ 4.7 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า Ultracapacitor ในการคายพลังงานไฟฟ้าที่แรงดัน 14 โวลต์ กระแส 2 แอมป์



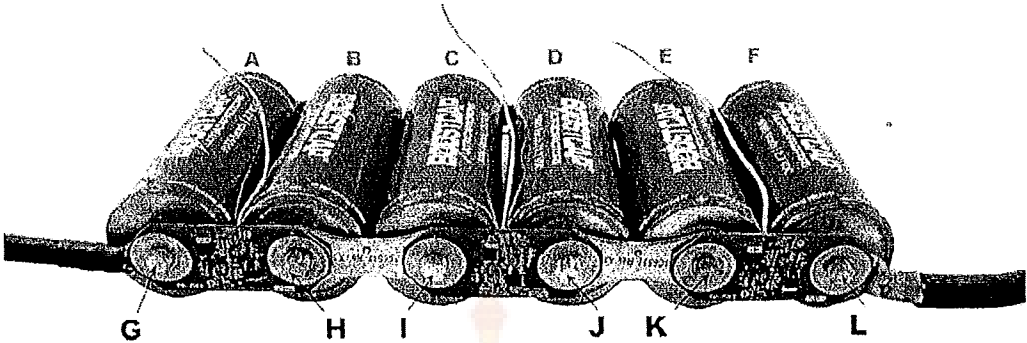
ภาพที่ 4.8 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า Ultracapacitor ในการคายพลังงานไฟฟ้าที่แรงดัน 14 โวลต์ กระแส 3 แอมป์

จากการทดสอบการคายพลังงานไฟฟ้าของ Ultracapacitor ที่ค่าแรงดัน 14 โวลต์และค่ากระแสไฟฟ้าต่างๆ จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ค่ากระแสสูงในการคายพลังงานไฟฟ้าจะใช้เวลาในการคายพลังงานน้อยแต่เมื่อมีโหลดน้อยๆหรือกระแสที่ต่ำๆก็จะทำให้เวลาการคายพลังงานมากขึ้นทำให้ Ultracapacitor มีคุณสมบัติเหมือนกับแบตเตอรี่ ดังภาพที่ 4.8 เมื่อจ่ายโหลดที่ทำให้มีกระแสไฟฟ้าที่ 3 แอมป์ จะทำให้เกิดการคายพลังงานของ Ultracapacitor รุ่งถึงแรงดันระดับคงที่ 2.0 โวลต์ใช้เวลา 1 ชั่วโมง แต่ถ้าจ่ายกระแสโหลดที่ 1 แอมป์จะใช้เวลาถึง 1.50 ชั่วโมงในโครงการจ่ายโหลดที่ 2 แอมป์และแรงดันใช้งานอยู่ที่ 10 – 13.5 โวลต์ ดังนั้นจึงสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้เป็นเวลาประมาณ 30 นาที

4.2 การจำลองการเก็บและคายพลังงานไฟฟ้าของ Ultracapacitor ด้วยโปรแกรม Pspice

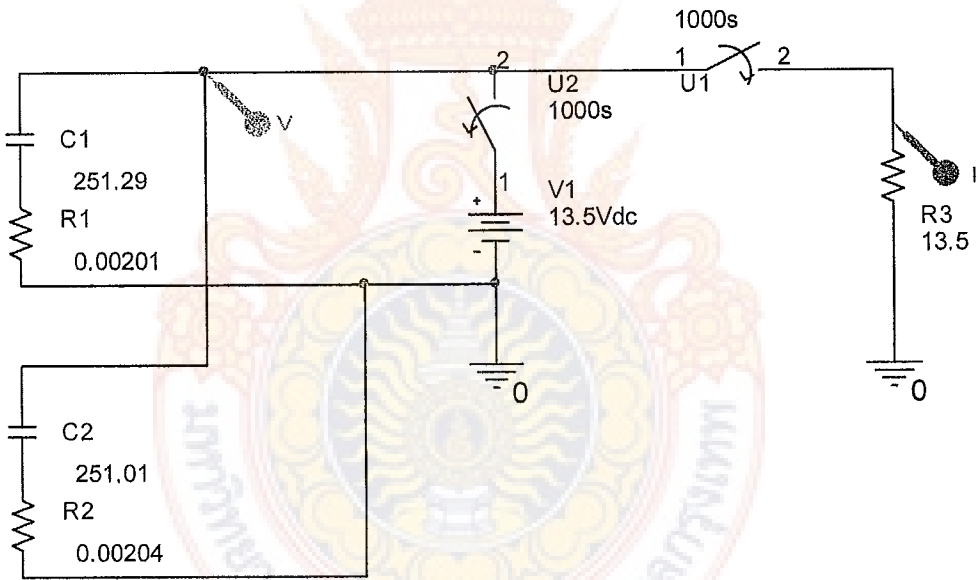
4.2.2 การจำลองการคายประจุของ Ultracapacitor 502.34 ฟารัด 13.5 โวลต์
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของUltracapacitor

Seriel Number	Capacitance (F)	Resistance ESR
C12PT08256B0060	1265.4	0.38
C12PT08257B0002	1248.1	0.38
C12PT08257B0014	1261.5	0.4
C12PT08256B0024	1252.8	0.42
C12PT08256B0034	1254.8	0.43
C12PT08256B0013	1265.4	0.38
C12PT08256B0020	1248.3	0.41
C12PT08256B0061	1252.8	0.4
C12PT08257B0013	1264.3	0.42

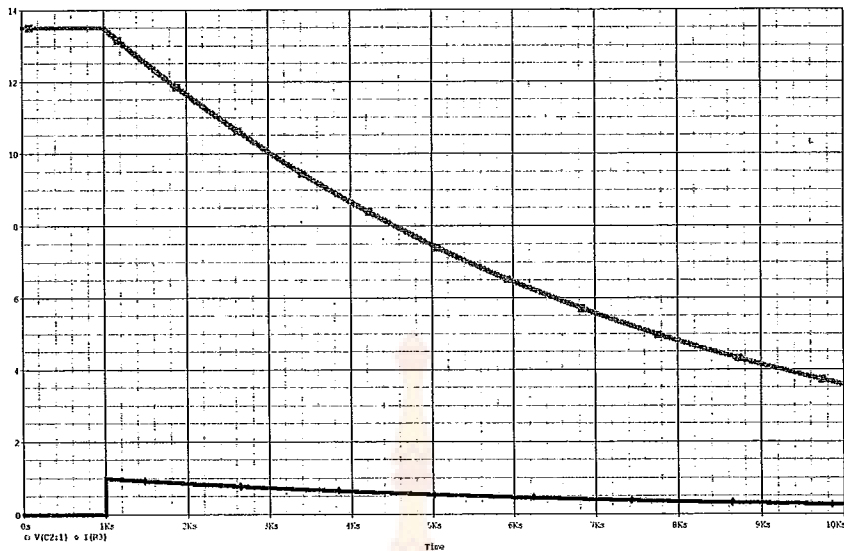


ภาพที่ 4.9 Ultracapacitor รุ่น พร้อมแผงวงจร Cell balance จำนวน 6 เซลล์

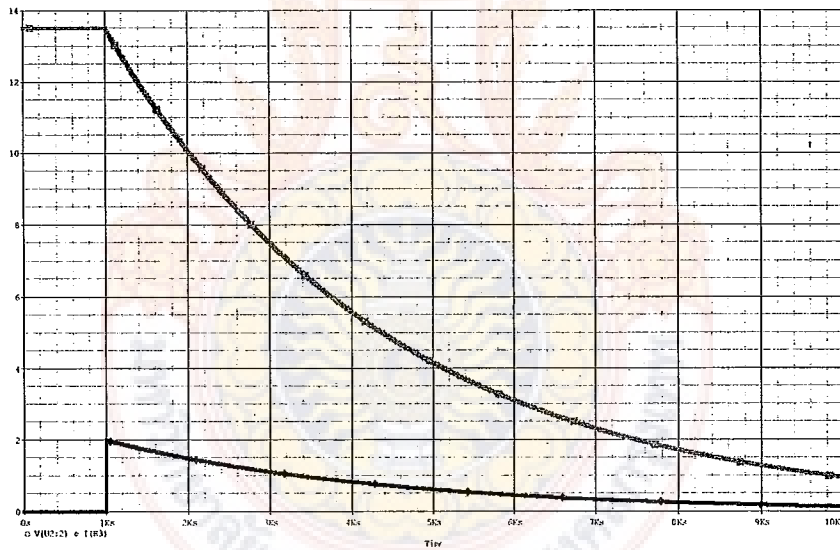
4.2.2 การจำลองการคายประจุของ Ultra Capacitor 502.34 ฟารัด 13.5 โวลต์



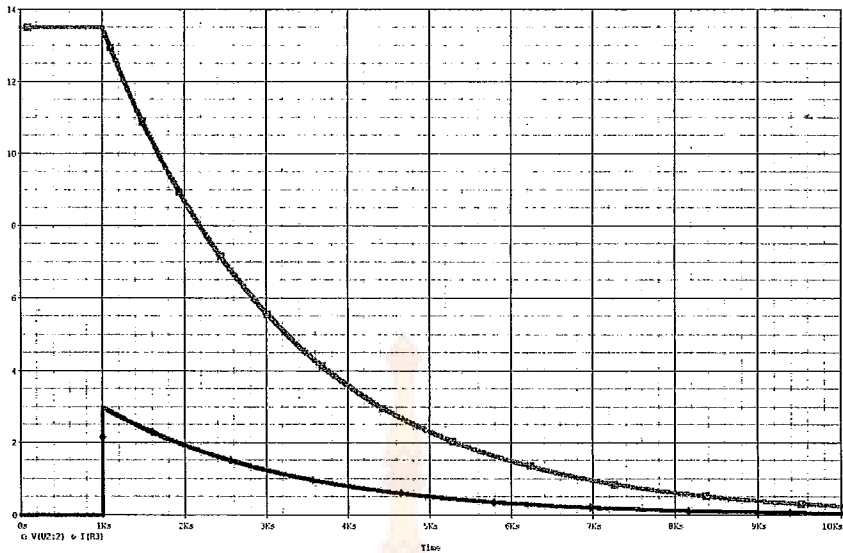
ภาพที่ 4.10 วงจรทดสอบการคายประจุของ Ultra Capacitor



ภาพที่ 4.11 สัญญาณแรงดันและกระแสของ Ultracapacitor ในการคายประจุที่แรงดัน 13.5 โวลต์ กระแส 1 แอมป์



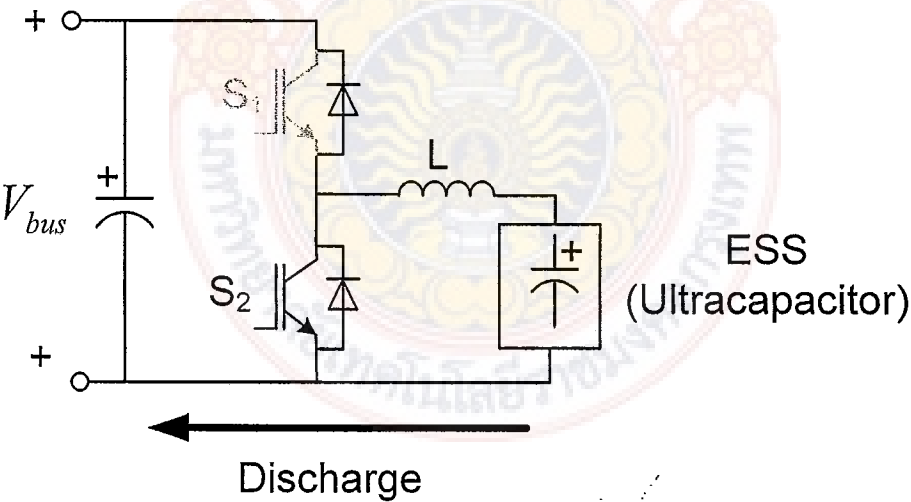
ภาพที่ 4.12 สัญญาณแรงดันและกระแสของ Ultra Capacitor ในการคายประจุที่แรงดัน 13.5 โวลต์ กระแส 2 แอมป์



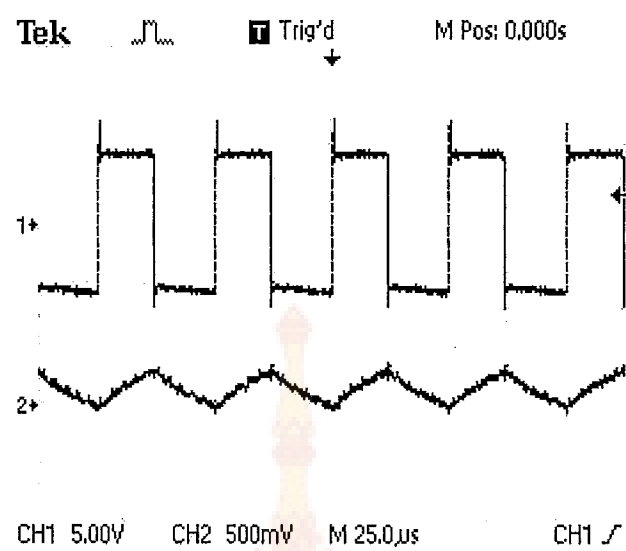
ภาพที่ 4.13 สัญญาณแรงดันและกระแสของ Ultracapacitor ในการคายประจุที่แรงดัน 13.5 โวลต์ กระแส 3 แอมป์

4.3 การทดสอบการส่งถ่ายพลังงานจาก Ultracapacitor ผ่านบัสคอนเวอร์เตอร์ไปยังระบบ

เมื่อทำการออกแบบคอนเวอร์เตอร์สองทิศทางสำหรับ Ultracapacitor แล้วจึงทำการทดสอบว่าคอนเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้ถูกต้องหรือไม่ จึงต้องทดสอบการส่งถ่ายพลังงานออกจาก Ultracapacitor ไปยังโหลดตัวต้านทาน



ภาพที่ 4.14 การทดสอบการจ่ายพลังงานออกจาก Ultracapacitor



ภาพที่ 4.15 สัญญาณคำสั่งสวิทช์ (CH1: 5V/div) และสัญญาณกระแสตัวเหนี่ยวนำผ่านเซนเซอร์ (CH2: 10A/div)

การทดสอบประสิทธิภาพที่ค่ากระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ จะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0 – 30 โวลต์ 0 – 10 แอมป์ ต่อเข้าทางอินพุตเพื่อเป็นแรงดันอินพุตใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์วัดหาค่ากระแสและแรงดันทางอินพุตและเอาต์พุตตามภาพที่ ใช้ตัวต้านทานปรับค่าเป็นโหลดทดสอบปรับค่ากระแสเอาต์พุตจากค่าที่ไม่มีโหลดจนถึงค่ากระแสพิกัดและสามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเมื่อทำการต่อโหลดได้ จากสมการ

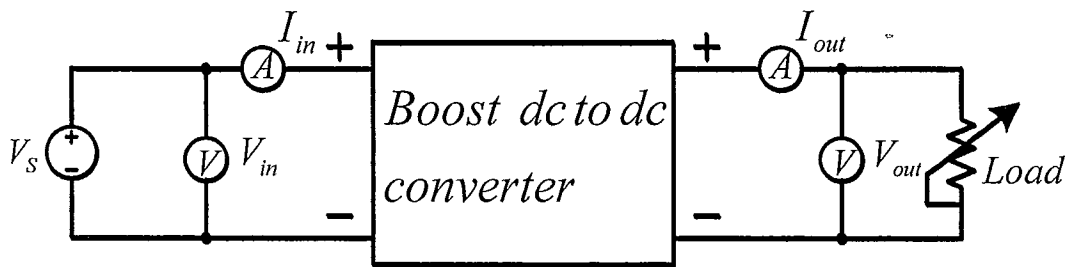
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

กำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุตหาได้จาก

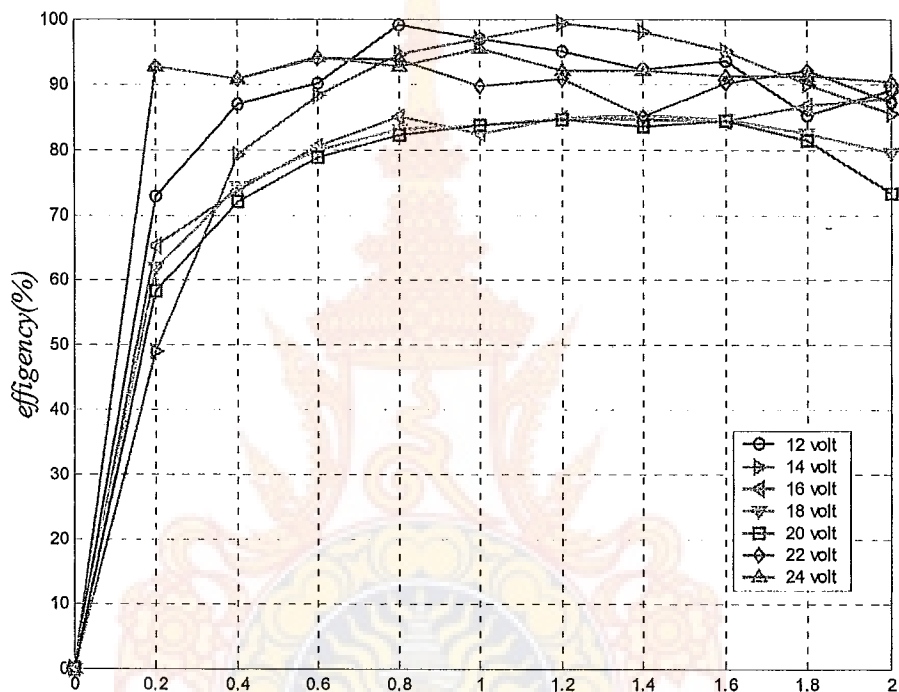
$$P_{out} = V_{out} \times I_{out}$$

กำลังไฟฟ้าด้านอินพุตหาได้จาก

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

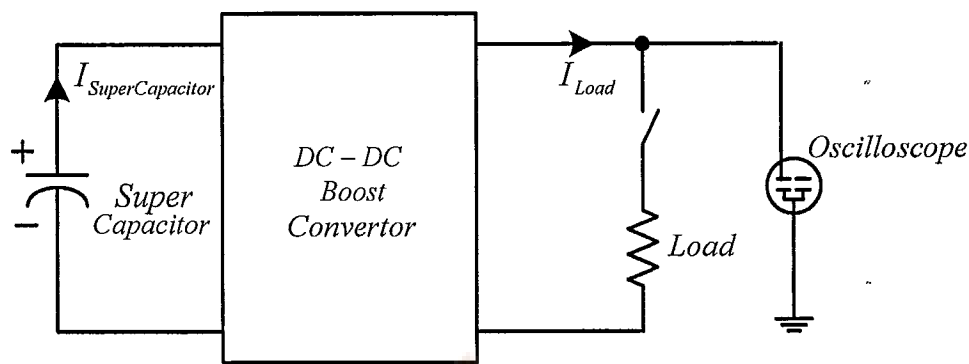


ภาพที่ 4.16 วงจรการวัดหาค่าประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟที่ค่ากระแสเอาต์พุตค่าต่างๆ

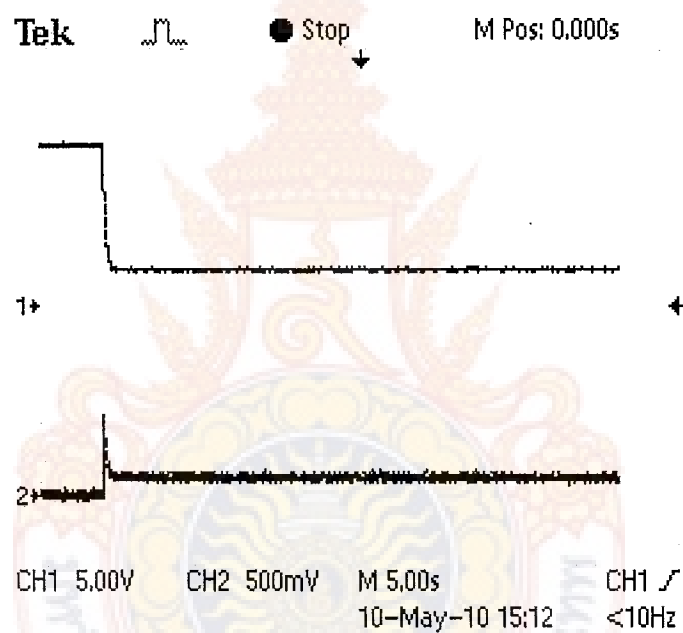


ภาพที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกระแสเอาต์พุตขณะคายพลังงาน

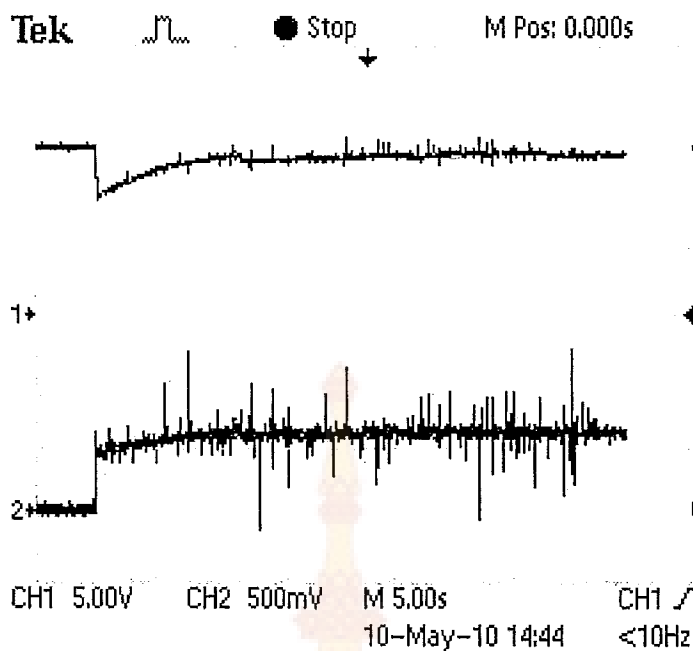
จากนั้นทำการทดสอบต่อ Ultracapacitor ผ่านวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์จ่ายโหลด 100 %
ทันทีและจ่ายโหลด 25 % แล้วจ่ายโหลด 100 % ทันที



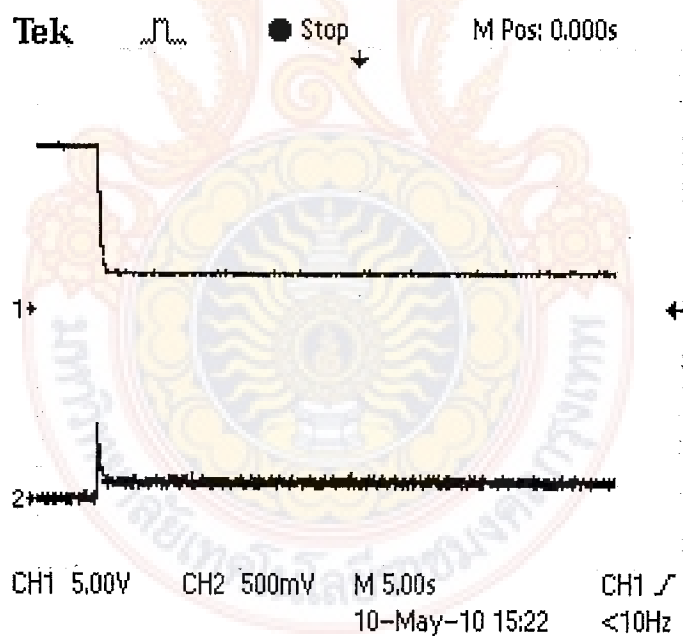
ภาพที่ 4.18 วงจรต่อใช้งานซูเปอร์คาปาซิเตอร์ผ่านวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์จ่าย Step load



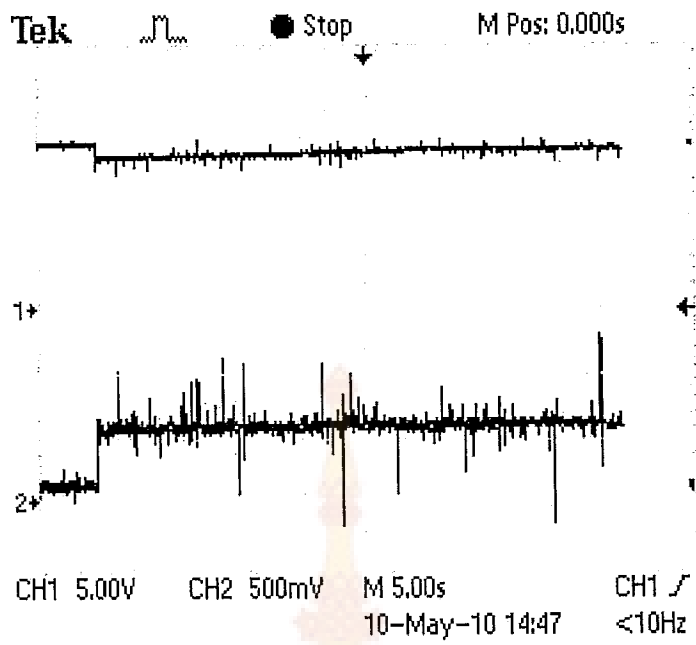
ภาพที่4.19 สัญญาณแรงดันผ่านเซนเซอร์ (CH1: 25V/div) และกระแสผ่านเซนเซอร์ (CH2: 10A/div) เมื่อจ่ายโหลด 100 % ทันทีแบบดูเปิด



ภาพที่ 4.20 สัญญาณแรงดันผ่านเซนเซอร์(CH1: 25V/div) และกระแสผ่านเซนเซอร์ (CH2: 10A/div) เมื่อจ่ายโหลด 100 % ทันทีแบบลูปปิด

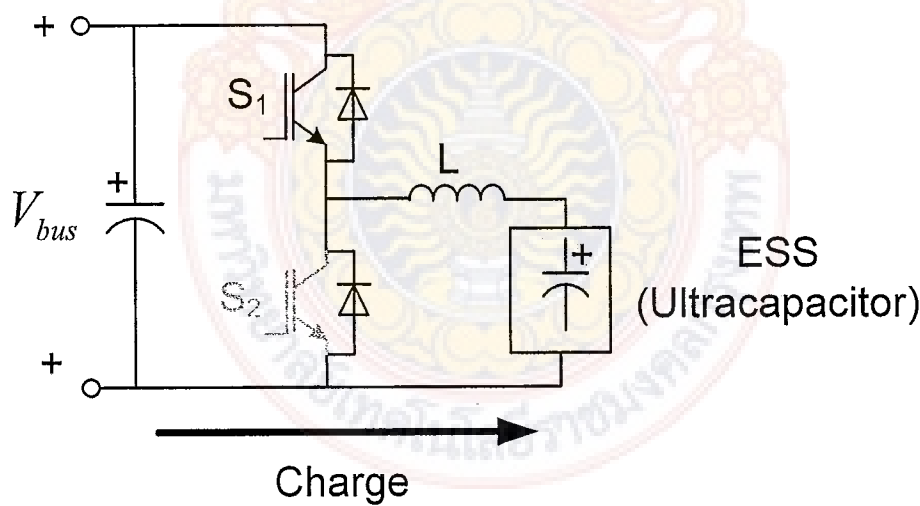


ภาพที่ 4.21 สัญญาณแรงดันผ่านเซนเซอร์ (CH1: 25V/div) และกระแสผ่านเซนเซอร์ (CH2: 10A/div) เมื่อจ่ายโหลดที่ 25 % แล้วเพิ่มโหลดเป็น 100 % แบบลูปเปิด

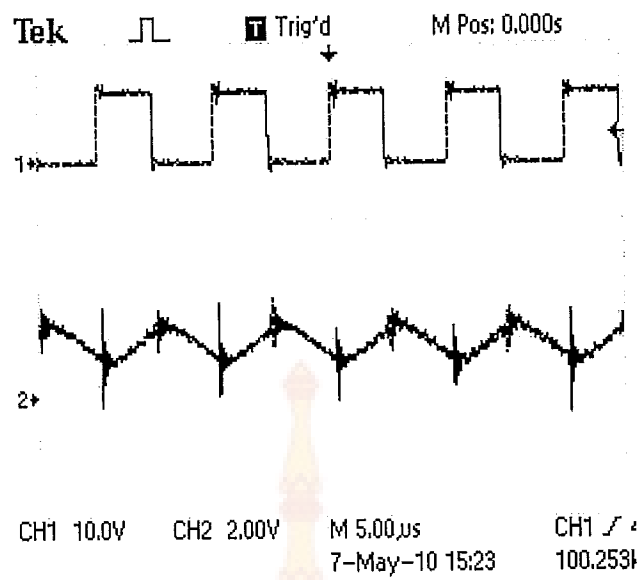


ภาพที่ 4.22 สัญญาณแรงดันผ่านเซนเซอร์ (CH1: 25V/div) และกระแสผ่านเซนเซอร์ (CH2: 10A/div) กระแสเมื่อจ่ายโหลดที่ 25 % แล้วเพิ่มโหลดเป็น 100 % แบบลูปปิด

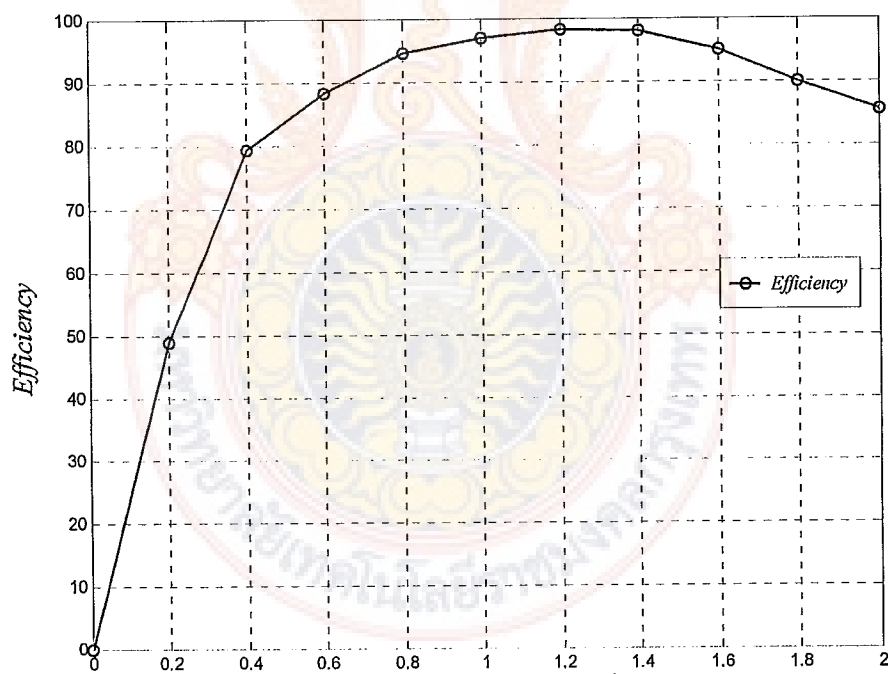
4.4 การทดสอบการส่งถ่ายพลังงานจากระบบผ่านบัคคอนเวอร์เตอร์ไปยัง Ultracapacitor



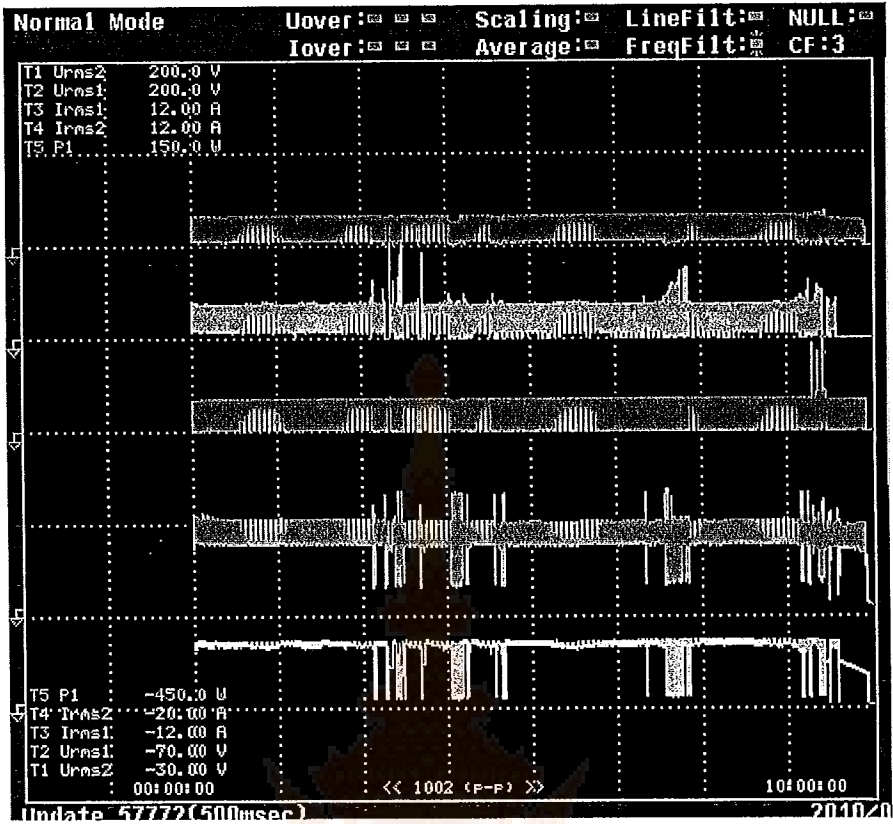
ภาพที่ 4.23 การทดสอบการจ่ายพลังงานเข้าสู่ Ultracapacitor



ภาพที่ 4.24 สัญญาณคำสั่งสวิตช์ (CH1: 5V/div) และสัญญาณกระแสตัวเหนี่ยวนำผ่านเซนเซอร์ (CH2: 10A/div)



ภาพที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกระแสเอาต์พุตขณะเก็บพลังงาน



ภาพที่ 4.25 กราฟบันทึกผลการทำงานของวงจรประจุและคายพลังงานไฟฟ้าอุปกรณ์
Ultracapacitor ในช่วงเวลา 1hr/div

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัยที่ได้จากการทดลอง

5.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Ultracapacitor ด้วยโปรแกรม Orcad/Pspice สามารถจำลองพฤติกรรมกระแส แรงดัน และระยะเวลาในการเก็บพลังงาน

5.1.2 ตัวเก็บประจุแบบ Ultracapacitor สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้เหมือนแบตเตอรี่ แต่มีข้อดีที่ทนกระแสชั่วขณะได้สูง มีอายุการใช้งานที่นาน และมีความยืดหยุ่นในการต่อใช้งานมากกว่า

5.1.3 คีชีพูคิชีคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางมีการทำงานเทียบเคียงกับวงจรบัคและวงจรบูสท์ ในขณะชาร์จและคายประจุตามลำดับ

5.1.3 การทดสอบระบบคอนเวอร์เตอร์ทั้งหมดสามารถทำงานได้ทั้งในขณะเก็บพลังงานและคายพลังงานในช่วงเวลาที่ทดสอบได้เป็นอย่างดี

5.2 ปัญหาที่พบในงานวิจัย

5.2.1 เนื่องจากอุปกรณ์ Ultracapacitor ต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ ซึ่งใช้เวลานานในการนำเข้า

5.2.2 การทดสอบร่วมกับคิชีบัสส์นั้นกระแสที่ค่อนข้างสูงต้องใช้ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบโปรแกรมได้ และอิเล็กทรอนิกส์โหลด ห้องปฏิบัติการในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ายังไม่มีเครื่องมือดังกล่าว

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 พัฒนาให้ระบบสามารถทำงานไมโครคอนโทรลเลอร์แบบฝังตัว (Embedded Microcontroller)

5.3.2 พัฒนาให้คอนเวอร์เตอร์สามารถทำงานแบบขนานด้วยเทคนิคการเหลื่อมเฟส (Interleaved Technique) เพื่อช่วยลดกระแสกระแสเพื่อมิได้

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย

2542. ออน-ไลน์

ทรงคุณ เพื่อกทอง แหล่งจ่ายไฟสวิตชิงแบบสองทบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ปรินูญยานิพนธ์ครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2548

วีรเชษฐ์ ชันเงิน วุฒิพล ชาราชิรเศรษฐ์ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง กรุงเทพฯ หจก. วีเจพรินติ้ง, 2548

ศราวุธ สุขบัวแก้ว สมยศ แก้วผดุง แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากซูเปอร์คาปาซิเตอร์โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ ปรินูญยานิพนธ์ ครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2548

ศุภสันต์ พรหมเนรมิต เครื่องประจุแบตเตอรี่แบบทบแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ ปรินูญยานิพนธ์ ครุศาสตรบัณฑิต 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

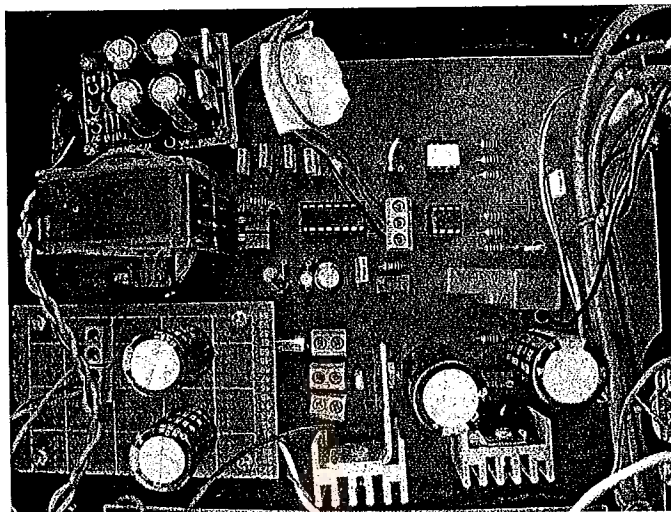
ภาพชิ้นงานในส่วนต่างๆ



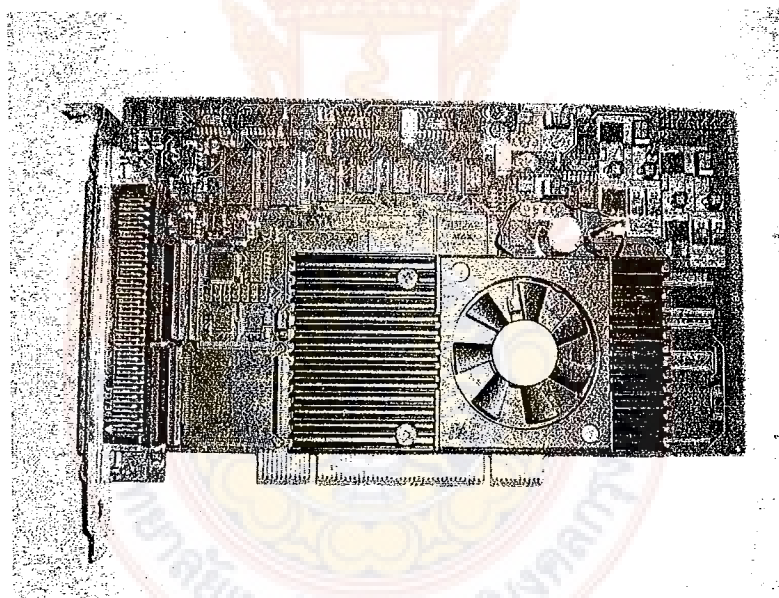
ภาพที่ ก Ultracapacitor ขนาด 42 V



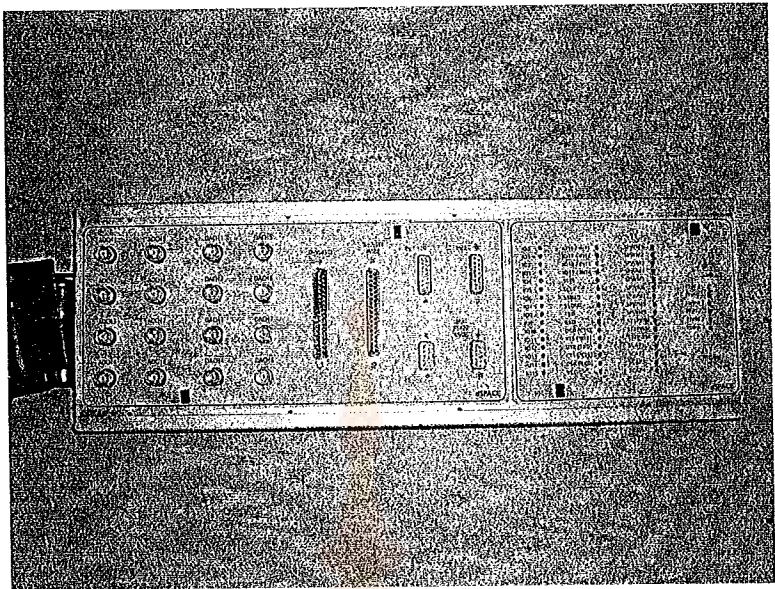
ภาพที่ ข Ultracapacitor ขนาด 15 V



ภาพที่ ก วงจรคอนเวอร์เตอร์



ภาพที่ ง การ์ดอินเตอร์เฟส DS1104



ภาพที่ จ ช่องสัญญาณเอาต์พุตของการ์ดอินเตอร์เฟส DS1104



ภาคผนวก ข

Datasheet ของ Ultracapacitor



BCAP0650 P270
BCAP1200 P270
BCAP1500 P270
BCAP2000 P270
BCAP3000 P270



FEATURES AND BENEFITS

- 2.7 V operating voltage
- Highest power performance available
- Lowest RC time constant
- Over 1,000,000 duty cycles
- Proprietary material science and packaging technology
- Threaded terminal or weldable post versions
- Ultra-low internal resistance

TYPICAL APPLICATIONS

- Automotive subsystems
- Back-up power
- Grid stabilization
- Hybrid drive trains
- Rail system power
- Transportation
- Utility vehicles

PRODUCT SPECIFICATIONS

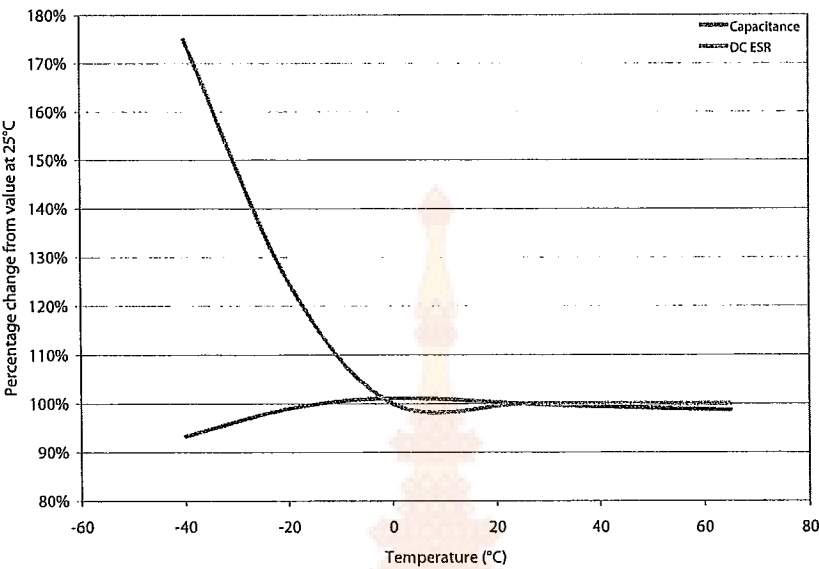
	BCAP0650	BCAP1200	BCAP1500	BCAP2000	BCAP3000
ELECTRICAL					
Capacitance					
Nominal capacitance	650 F	1,200 F	1,500 F	2,000 F	3,000 F
Tolerance capacitance	-0% / +20%	-0% / +20%	-0% / +20%	-0% / +20%	-0% / +20%
Voltage					
Rated voltage	2.7 V DC	2.7 V DC	2.7 V DC	2.7 V DC	2.7 V DC
Resistance					
ESR, DC (max., room temperature)	0.8 mΩ	0.58 mΩ	0.47 mΩ	0.35 mΩ	0.29 mΩ
ESR, AC (max., room temperature, 1kHz)	0.6 mΩ	0.44 mΩ	0.35 mΩ	0.26 mΩ	0.24 mΩ
Current					
Maximum continuous current (20°C temperature rise)	62 A	81 A	97 A	123 A	147 A
Maximum peak current, 1 sec.	577 A	955 A	1190 A	1590 A	2170 A
Leakage current (After 72 hours at 25°C. Initial leakage current can be higher.)	1.5 mA	2.7 mA	3 mA	4.2 mA	5.2 mA
TEMPERATURE					
Operating temperature range (Cell case temperature)	-40°C to +65°C	-40°C to +65°C	-40°C to +65°C	-40°C to +65°C	-40°C to +65°C
Storage temperature range (Stored uncharged)	-40°C to +70°C	-40°C to +70°C	-40°C to +70°C	-40°C to +70°C	-40°C to +70°C
POWER AND ENERGY					
Usable power density, Pd	6,800 W/kg	5,800 W/kg	6,600 W/kg	6,900 W/kg	5,900 W/kg
Usable power	1,090 W	1,510 W	1,860 W	2,500 W	3,020 W
Impedance match power, Pmax	14,200 W/kg	12,100 W/kg	13,800 W/kg	14,500 W/kg	12,300 W/kg
Gravimetric energy density, Emax	4.11 Wh/kg	4.67 Wh/kg	5.42 Wh/kg	5.63 Wh/kg	5.96 Wh/kg
Energy available	0.66 Wh	1.22 Wh	1.52 Wh	2.03 Wh	3.04 Wh

PRODUCT SPECIFICATIONS (cont.)

	BCAP0650	BCAP1200	BCAP1500	BCAP2000	BCAP3000
DC LIFESPAN					
Endurance (at rated voltage and temperature)	1,500 hours	1,500 hours	1,500 hours	1,500 hours	1,500 hours
Capacitance change (% decrease from rated value)	≤20%	≤20%	≤20%	≤20%	≤20%
ESR change (% increase from rated value)	≤60%	≤60%	≤60%	≤60%	≤60%
Life Test (at rated voltage and 25°C)	10 years	10 years	10 years	10 years	10 years
Capacitance change (% decrease from rated value)	≤20%	≤20%	≤20%	≤20%	≤20%
ESR change (% increase from rated value)	≤100%	≤100%	≤100%	≤100%	≤100%
Cycle Test (Number of cycles)	1 million	1 million	1 million	1 million	1 million
Capacitance change (% decrease from rated value)	≤20%	≤20%	≤20%	≤20%	≤20%
ESR change (% increase from rated value)	≤100%	≤100%	≤100%	≤100%	≤100%
Shelf Life (Storage uncharged up to maximum storage temperature)	2 years	2 years	2 years	2 years	2 years
Capacitance change (% change from rated value)	10%	10%	10%	10%	10%
ESR change (% change from rated value)	50%	50%	50%	50%	50%
CONNECTION					
Power output terminals	Threaded (K04) or Weldable (K05)				
PHYSICAL					
Dimensions	See drawings				
Weight	0.16 kg	0.26 kg	0.28 kg	0.36 kg	0.51 kg
SAFETY					
Short circuit current (Current possible with short circuit from rated voltage. Do not use as an operating current.)	3,400 A	4,700 A	5,700 A	7,700 A	9,300 A
Certifications	RoHS	RoHS	RoHS	RoHS	UL810a, RoHS
Surge voltage (voltage above this level can cause catastrophic failure)	2.8 V DC	2.8 V DC	2.8 V DC	2.8 V DC	2.8 V DC
Isolation voltage	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

TYPICAL CHARACTERISTICS

	BCAP0650	BCAP1200	BCAP1500	BCAP2000	BCAP3000
THERMAL CHARACTERISTICS					
Thermal resistance (Rth, case to ambient)	6.5°C/W	5.3°C/W	4.5°C/W	3.8°C/W	3.2°C/W



ADDITIONAL TECHNICAL INFORMATION

Capacitance and ESR, DC measured per document no. 1007239 available at www.maxwell.com. Unless specified, all specifications are at 25°C.

Short circuit current (Isc) = $\frac{V_{\text{RATED}}}{\text{ESR}(\text{DC})}$

E_{max} = $\frac{\frac{1}{2} CV^2}{3,600 \times \text{mass}}$

P_{max} = $\frac{V^2}{4 \times \text{ESR}(\text{DC}) \times \text{mass}}$

P_d = $\frac{0.12V^2}{\text{ESR}(\text{DC}) \times \text{mass}}$

Maximum peak current (1 sec) = $\frac{\frac{1}{2} CV}{C \times \text{ESR}(\text{DC}) + 1}$

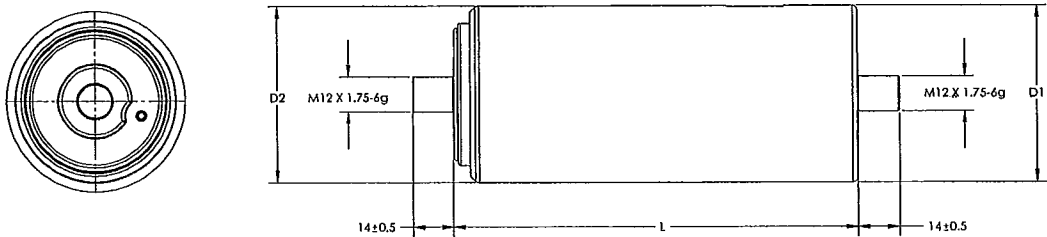
MOUNTING RECOMMENDATIONS

Do not reverse polarity. Maximum torque for M12 screw terminals is 14Nm. Cells are designed to be connected into series or parallel strings. Clean terminals before mounting..

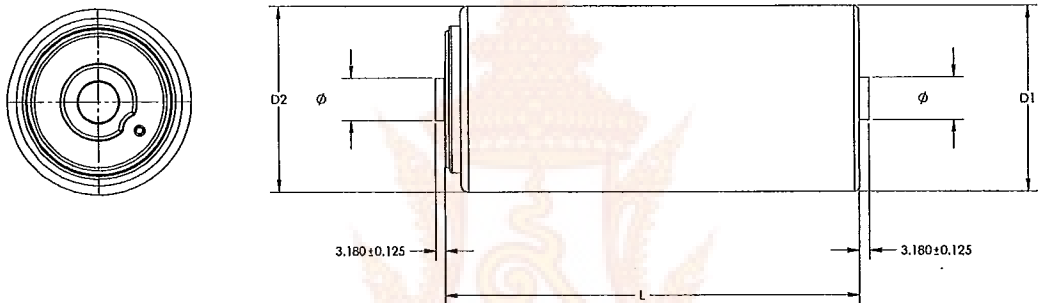
MARKINGS

Products are marked with the following information: Rated capacitance, rated voltage, product number, name of manufacturer, positive and negative terminal, warning marking, serial number.

DIMENSIONS



Part Description	Vol.(l)	Dimensions (mm)			Package Quantity
		L (±0.3mm)	D1 (±0.2mm)	D2 (±0.7mm)	
BCAP0650 P270 K04 02	0.211	51,5	60.4	60.7	15
BCAP1200 P270 K04 02	0.294	74	60.4	60.7	15
BCAP1500 P270 K04 02	0.325	85	60.4	60.7	15
BCAP2000 P270 K04 02	0.373	102	60.4	60.7	15
BCAP3000 P270 K04 02	0.475	138	60.4	60.7	15



Part Description	Vol.(l)	Dimensions (mm)			Package Quantity
		L (±0.3mm)	D1 (±0.2mm)	D2 (±0.7mm)	
BCAP0650 P270 K05 02	0.15	51.5	60.4	60.7	15
BCAP1200 P270 K05 02	0.133	74	60.4	60.7	15
BCAP1500 P270 K05 02	0.264	85	60.4	60.7	15
BCAP2000 P270 K05 02	0.312	102	60.4	60.7	15
BCAP3000 P270 K05 02	0.414	138	60.4	60.7	15

Product dimensions are for reference only unless otherwise identified. Product dimensions and specifications may change without notice.
Please contact Maxwell Technologies directly for any technical specifications critical to application.



Maxwell Technologies, Inc.
Worldwide Headquarters
9244 Balboa Avenue
San Diego, CA 92123
USA
Tel: +1 858 503 3300
Fax: +1 858 503 3301



Maxwell Technologies SA
CH-1728 Rossens
Switzerland
Tel: +41 (0)26 411 85 00
Fax: +41 (0)26 411 85 05



Maxwell Technologies, GmbH
Brucker Strasse 21
D-82205 Gilching
Germany
Tel: +49 (0)8105 24 16 10
Fax: +49 (0)8105 24 16 19



Maxwell Technologies, Inc.
Shanghai Representative Office
13E, CR Times Square
500 Zhangyang Road, Purlong
Shanghai 200122, P.R. China
Tel: +86 21 5836 8780
Fax: +86 21 5836 8790

Online: www.maxwell.com • Email: info@maxwell.com



USER MANUAL

Integration Kit

- BKIT – MCINT
- BKIT – MCIHT

Integration Kit for:

- Maxwell Technologies® MC Series BOOSTCAP® Ultracapacitor Cells

1. Introduction

This integration kit is intended to provide all the necessary hardware and instructions to interconnect 2, 4 or 6 series connected ultracapacitors. This kit includes printed circuit boards (PCBs) with voltage management circuitry, buss bars, washers and retaining nuts. For optimal implementation, we recommend to use an even number of cells with this kit.

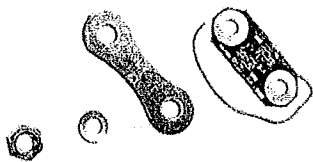
Each individual cell voltage is monitored by the voltage management circuitry, which protects each cell from entering an over voltage condition. If any cell does experience an over voltage condition, an LED will illuminate and the active circuitry will begin to discharge that cell. Once the cell is back within nominal operation voltage limits, the LED will extinguish.

This manual is current at time of printing. Please visit www.maxwell.com for the latest product updates and information.

For illustrative purposes the integration kit with active PCBA is shown throughout this document.

2. Unpacking

The integration kit contains the following items.



BKIT-MCINT (P/N 106927) Integration Kit with active PCBA		
Part No.	Description	Qty
106610	Active PCBA	3
106517	Buss bar	5
105385	Washers	12
103996	M12-1.75 nuts	12
105003	Rivets	3

BKIT-MCIHT (P/N 108320) Integration Kit with passive PCBA		
Part No.	Description	Qty
106826	Passive PCBA	3
106517	Buss bar	5
105385	Washers	12
103996	M12-1.75 nuts	12
105003	Rivets	3

3. Installation

3.1Preparing buss bar connection

- 3.1.1 Apply joint compound to capacitor surfaces that will come in contact with the buss bar. Use a highly conductive aluminum-aluminum antioxidant. For example, Noalox® Anti-Oxidant Compound available from IDEAL is a viable choice. There are many other vendors that supply equivalent compounds.
- 3.1.2 Apply joint compound to the buss bar **only** on the side that will come in contact with the capacitor.

3.1.3 Ensure any excess joint compound does not contact the top of the buss bar or come in contact with the voltage management circuitry as this may affect the circuitry performance.

3.2 **Assembling connections**

Notes: For optimal implementation, we only support and recommend the use of an even number of cells with this kit. These instructions show the assembly of six cells connected in series.

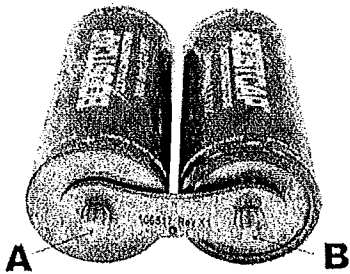


Figure 2

3.2.1 Place a buss bar over the threaded terminal at one end of the first pair of cells (Figure 2, A, B) with antioxidant facing towards capacitor. Note the polarity of the terminals of each cell, e.g. in Figure 2, A: positive terminal, B: negative terminal.

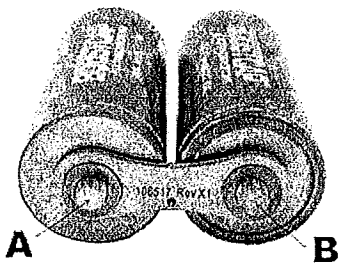


Figure 3

3.2.2 Place a wave washer over each threaded terminal on top of buss bar. (Figure 3, A, B) **Note:** For optimal electrical connection, it is critical to use the provided washer on every single cell, per the explanation in step 3.2.6, below.

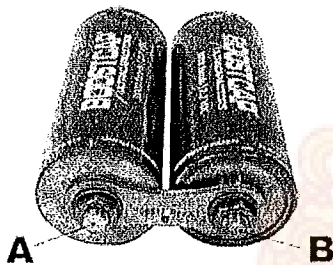


Figure 4

3.2.3 Thread a nut onto each threaded terminal and hand tighten. (Figure 4, A, B)

3.2.4 Repeat steps 3.2.1 to 3.2.3 on one side of each of the remaining pairs of cells. (Figure 5, A - F)

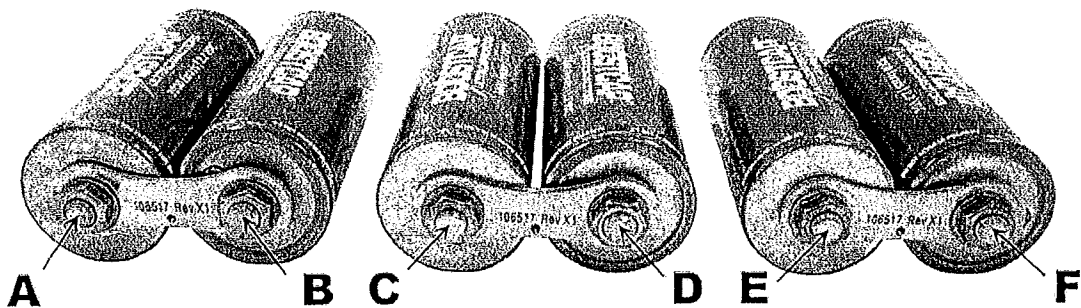


Figure 5

3.2.5 Turn the cells around so that the threaded terminals opposite to terminals A - F are facing you. Place buss bars over the middle pairs of threaded terminals (marked H, I, J and K in Figure 6), with antioxidant facing towards capacitor.

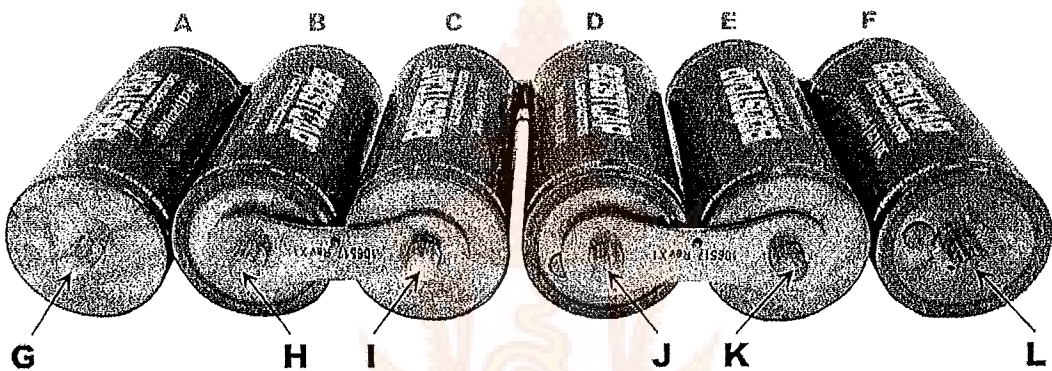


Figure 6

3.2.6 Place 1/8 inch thick lugs attached to power cables (1/0 AWG cables shown in Figure 7) over the remaining two threaded terminals of the cells at the ends of the series and a washer over each lug. (Figure 7, G and L). It is important to use a lug plus an aluminum washer that together have a minimum combined thickness of 1/8 inch. This prevents the voltage management boards (which are attached in the following step) from being stressed due to uneven stack up of the elements bolted to the cell.

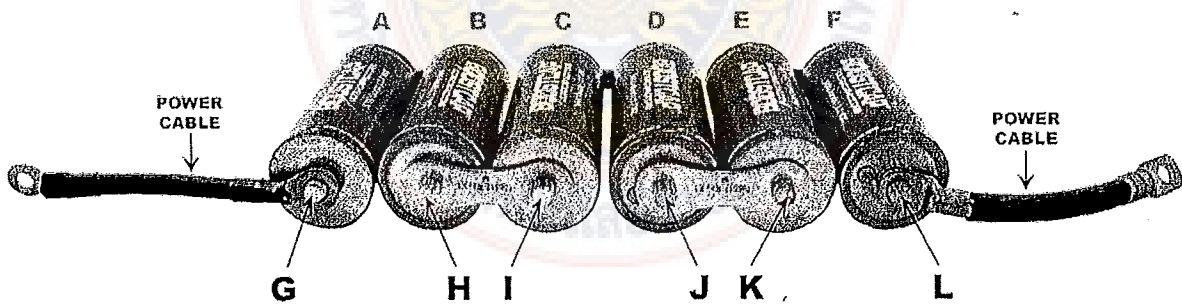


Figure 7

3.2.7 Place a voltage management board over each pair of threaded terminals, as shown in Figure 8, with the printed circuit board components facing away from the capacitor. Make sure that the buss bar and power cable connections are **below** the voltage management board.

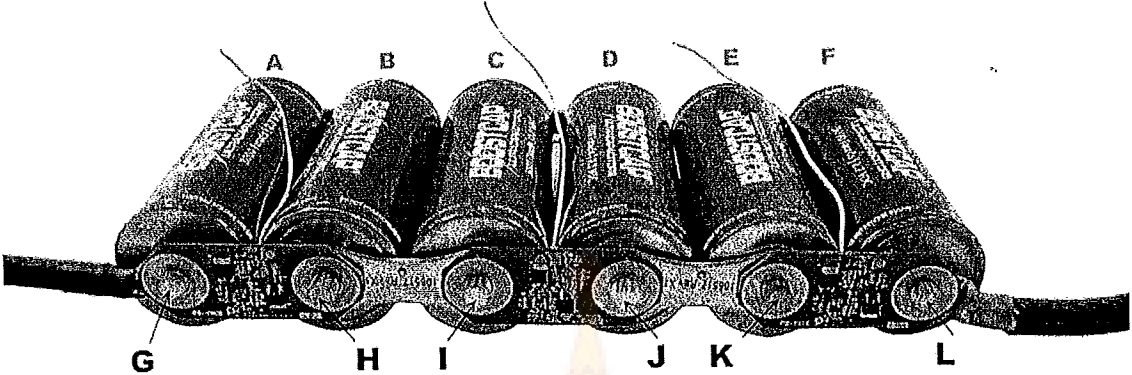


Figure 8

3.2.8 **Note:** The voltage management board is polarized. **J1 on the board is positive; J3 is negative.** Ensure correct polarities of capacitor terminal and voltage management board are connected. (Figure 9)

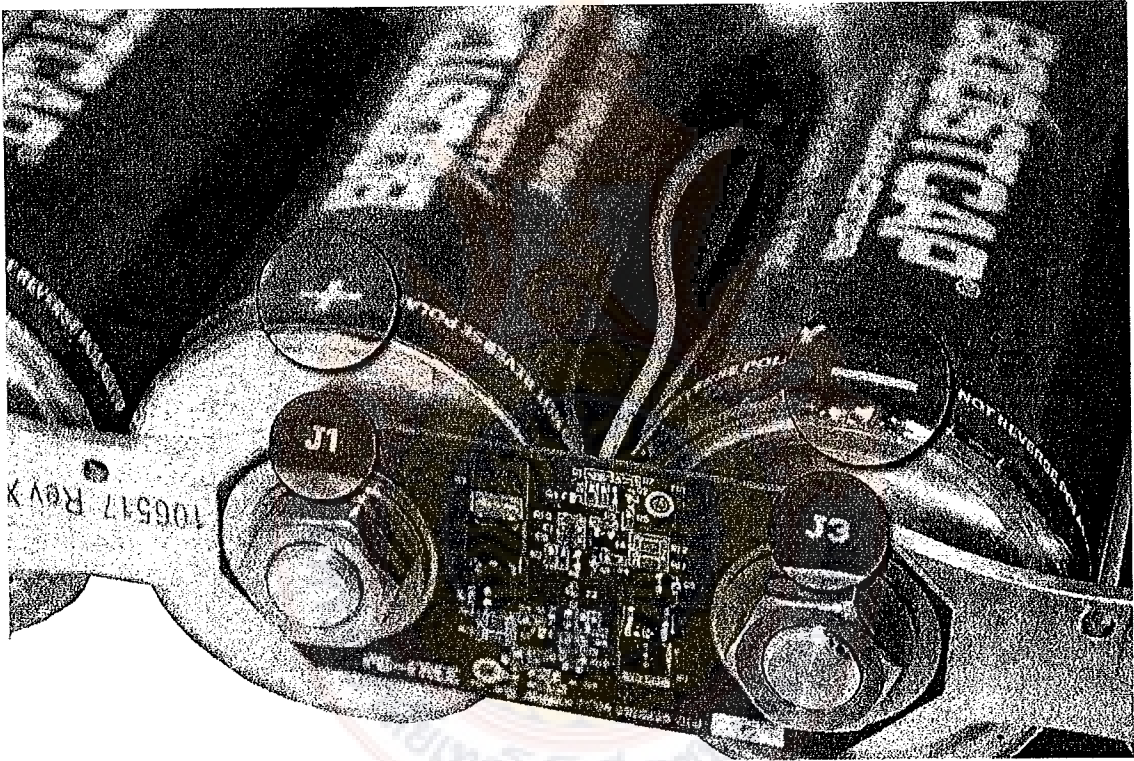


Figure 9

3.2.9 Place a wave washer over each threaded terminal on top of voltage management boards. (G – L, Figure 10)

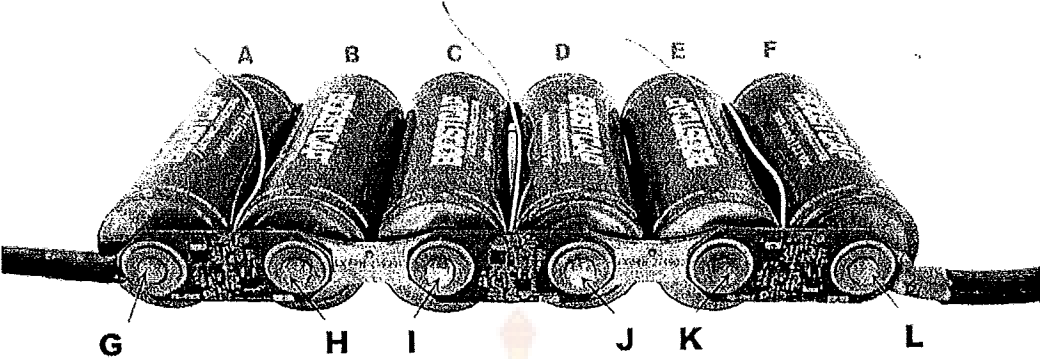


Figure 10

3.2.10 Thread a nut onto each threaded terminals and hand tighten. (G – L, Figure 11)

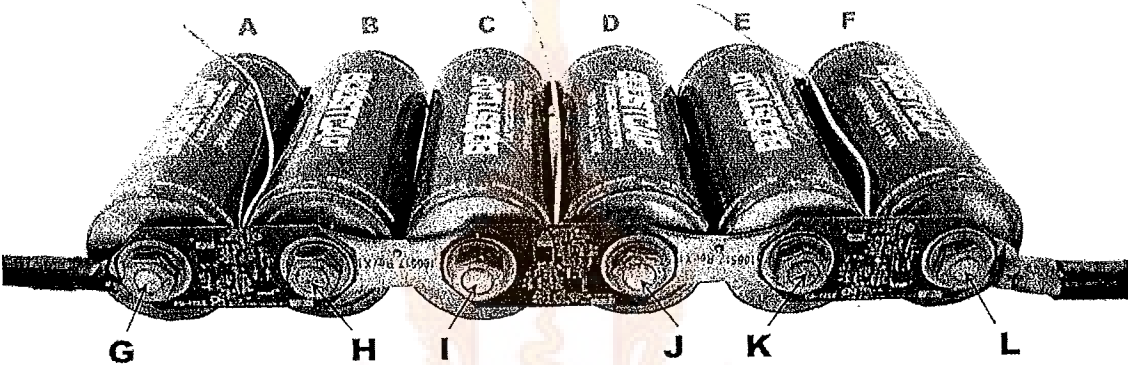


Figure 11

3.2.11 The 22 AWG wire attached to the voltage management board must be riveted in place with the provided rivet to the buss bar that spans **the same two cells as the printed circuit board** (M, N and O, Figure 12). Those two cells are protected by that one board. E.g.: the wire on the voltage management board spanning terminals G and H in Figure 11 is connected to the rivet on the buss bar spanning terminals A and B.

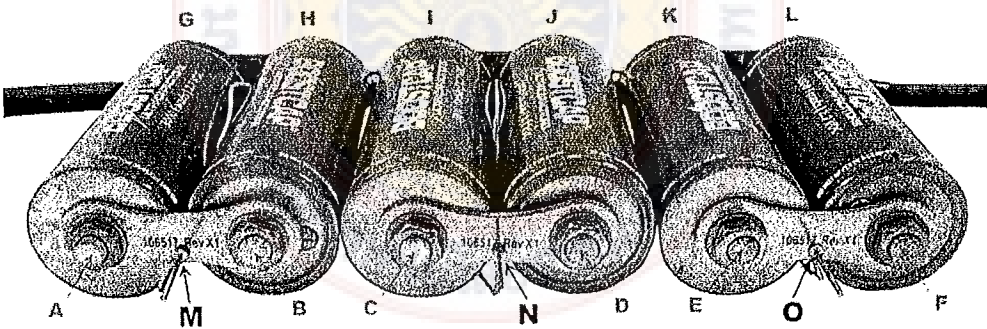


Figure 12

3.2.12 Trim the rivets as per standard riveting procedure.

3.2.13 Torque each connection to 14 Nm.

3.2.14 Wipe off any excess joint compound.

3.2.15 Repeat the steps above, until every cell is serially connected.

4. Accessories

Additional items not included in the integration kit but necessary for installation are:

- 1) Antioxidant high conductivity joint compound specified for aluminum-aluminum connections and lead free solder
- 2) Torque wrench capable applying 14 Nm torque to the nut.

5. Operation

No additional requirements for operation.

6. Safety

Voltage management circuitry does not prevent an individual capacitor or series of capacitors from over voltage conditions if prolonged charging to a higher than specified voltage persists (2.7V/cell). Provisions should be made with the system integration to prevent prolonged over voltage conditions.

7. Maintenance

No maintenance required.

8. Storage

Integration kits should be stored in a non-condensing environment.

9. Disposal

Buss bars and printed circuit boards should be recycled. The capacitors should be disposed of in accordance with local regulations.

Contact Information:



Maxwell Technologies, Inc.
Worldwide Headquarters
9244 Balboa Avenue
San Diego, CA 92123
USA
Phone: +1 858 503 3300
Fax: +1 858 503 3301



Maxwell Technologies SA
CH-1728 Rossens
Switzerland
Phone: +41 (0)26 411 85 00
Fax: +41 (0)26 411 85 05



Maxwell Technologies GmbH
Brucker Strasse 21
D-82205 Gilching
Germany
Phone: +49 (0)8105 24 16 10
Fax: +49 (0)8105 24 16 19



**Maxwell Technologies, Inc. -
Shanghai Representative Office**
Rm.2104, Suncome Liauw's Plaza
738 Shang Cheng Road
Pudong New Area
Shanghai 200120, P.R. China
Phone: +86 21 5836 5733
Fax: +86 21 5836 5620

info@maxwell.com -- www.maxwell.com

Refer to our website www.maxwell.com for full terms and conditions.

Maxwell
TECHNOLOGIES