บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นและได้ผลตรงตามจุดมุ่งหมายของการวิจัย ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าเอกสาร ตำรา อินเทอร์เน็ต และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถแยกแยะรายละเอียดออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ได้ดังนี้

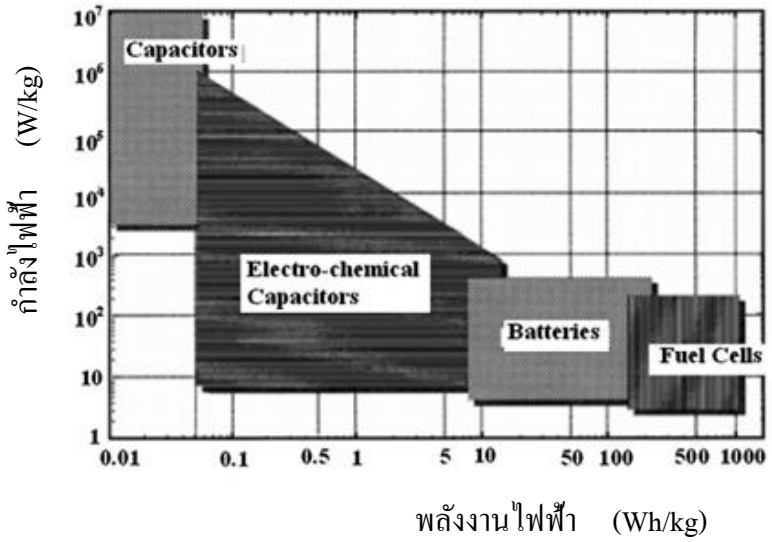
1. ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์
2. แบตเตอรี่
3. วงจรภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
4. วงจรเปรียบเทียบแรงดัน
5. วงจรคอนเวอร์เตอร์
6. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดหรือซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ (Supercapacitors: SC) หรือตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบที่มีการเรียงตัวของประจุแบบสองชั้น (Electrochemical Double-Layer Capacitors: EDLCs) หรืออัลตร้าคาปาซิเตอร์ (Ultracapacitor: UC) ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตแต่ละประเทศนั้น ๆ ตามภาพที่ 2.1 แต่ก็ยังคงมีความหมายคือตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพความจุสูง ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจึงเป็นเทคโนโลยีใหม่ ที่มาช่วยลดช่องว่างของการเก็บสะสมพลังงาน ซึ่งสามารถเก็บพลังงานได้มากกว่าตัวเก็บประจุแบบเดิมและสามารถจ่ายพลังงานได้สูงกว่าแบตเตอรี่ตามภาพที่ 2.2 โดยที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีจำนวนครั้งในการเก็บปะจุ (Charge) การปล่อยประจุ (Discharge) ได้มากกว่าและเวลาในการเก็บประจุ/การปล่อยประจุได้เร็วกว่าแบตเตอรี่ คุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถเก็บประจุและการปล่อยประจุได้อย่างรวดเร็วนี้เอง จึงนำมาใช้รวมกับการเก็บประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่เพื่อลดระยะเวลาในการประจุพลังงานไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่และจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บพลังงานของแบตเตอรี่ด้วย เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการเก็บประจุสั้น ทำให้เกิดความร้อนต่ำ การสูญเสียพลังงานลดลงและยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่อีกด้วย

ภาพที่ 2.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Ultracapacitor cell integration kit, 2014)

มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี



ภาพที่ 2.2 เปรียบเทียบความแตกต่างของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานไฟฟ้า (Cao, 2005: 122-132)

จากภาพที่ 2.2 เมื่อเปรียบเทียบแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะมีค่าความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Stored Energy) ต่ำกว่าแบตเตอรี่ คือ 10 กิโลวัตต์ x ชั่วโมง/กิโลกรัม เนื่องด้วยข้อจำกัดจากการที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ไม่ได้เป็นวัสดุที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ภายในตัวเอง แต่เป็นเพียงอุปกรณ์เก็บสะสมประจุไฟฟ้า ในขณะที่แบตเตอรี่สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้อย่างน้อย 35-40 กิโลวัตต์ x ชั่วโมง/กิโลกรัม แต่ในขณะเดียวกันตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะให้ค่ากำลังไฟฟ้าเฉพาะ (Specific Power) สูงกว่าแบตเตอรี่ นอกจากนี้แล้วยังสามารถนำตัวเก็บประจุยิ่งยวดยังมี วัฏจักร (Cycle)หรือรอบการใช้งานที่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีกเป็นระยะเวลานานโดยไม่เสื่อมประสิทธิภาพ

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดหรือตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบที่มีการเรียงตัวของประจุแบบสองชั้น ค้นพบโดยนักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน เฮอร์แมน วอน เฮล์มโฮลท์ (Hermann von Helmholtz) ในปี ค.ศ. 1853 ต่อมาในปี ค.ศ. 1957 บริษัท จีอี (General Electric) ได้จดสิทธิบัตร อิเล็คโทรเคมิคอลคาปาซิเตอร์ ในโครงสร้างของดิบเบิ้ลเลเยอร์คาปาซิเตอร์ซึ่งใช้คาร์บอนเป็นวัสดุในการเก็บประจุและต่อมา บริษัท สแตนดาร์ตออย(standard Oil), เคลฟแลนด์ (Cleveland) และ โอไฮโอ (OHIO) ได้จดสิทธิบัตรในอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานแบบดับเบิ้ลเลเยอร์และ โอไฮโอ ได้ให้บริษัท นิปปอนอิเล็กทริค (Nippon Electric Corporations : NEC) สร้างอุปกรณ์สำรองข้อมูลในคอมพิวเตอร์ในปี ค.ศ.1957 ต่อมานิปปอนอิเล็กทริคได้พัฒนาอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าและเรียกว่า ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ (Supercapacitors) ซึ่งตารางที่ 2.1 แสดงข้อมูลตัวเก็บประจุยิ่งยวดและรายชื่อบริษัทผู้ผลิต

มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลตัวเก็บประจุยิ่งยวดและบริษัทผู้ผลิต

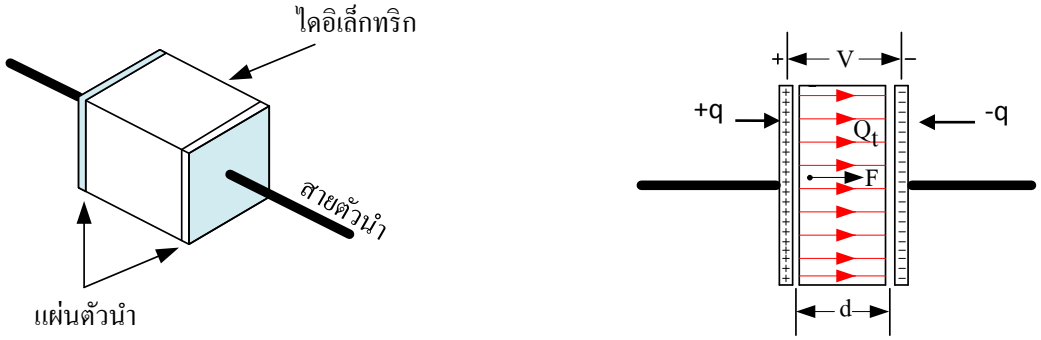
บริษัท	ชื่ออุปกรณ์	ประเทศ	พิกัดแรงดัน (V)	ความจุ (F)
AVX	Bestcap	USA	3.5-12	0.022-0.56
Cap XX	Super Capacitor	Australia	2.25-4.5	0.09-2.28
Copper	Power Stor	USA	2.5-50	0.47-50
ELNA	Dyna cap	USA	2.5-6.8	0.033 - 1000
ESMA	Capacitor modules	Russia	12 - 52	100 - 8000
EPCOS	Ultra-capacitor	USA	2.3 - 2.5	5 - 5000
Evans	Capattery	USA	5.5,11	0.01 - 15
Kold Ban	Kapower	USA	12	1000
Maxwell	Boostcap	USA	2.5	1.6 - 2600
NEC	Super Capacitor	Japan	3.5 - 12	0.01 - 6.5
Nesscap	EDLC	South Korea	2.7	10 - 5000
Panasonic	Gold capacitor	Japan	2.3 - 5.6	0.1 - 2000

โครงสร้างตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ภายในตัวเก็บประจุ ประกอบด้วยแผ่นตัวนำแยกกัน 2 แผ่น ระหว่างแผ่นตัวนำมีวัตถุที่เป็นฉนวนกันกลางเรียกว่าไดอิเล็กทริก (Dielectric) มีการนำไฟฟ้าต่ำ และต่อมายังสายตัวนำตามภาพที่ 2.3 (ก) ความจุของตัวเก็บประจุที่แผ่นเพลททั้งสองจะอิสระต่อกันตามภาพที่ 2.3 (ข) เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะสะสมประจุไฟฟ้าไว้ ถ้าประจุ 1 คูลอมบ์ ที่สะสมบนแผ่นเพลทจากความต่างศักดิ์ไฟฟ้า 1 โวลต์ ตัวเก็บประจุจะมีค่าความจุ 1 ฟารัด โดยทั่วไปโครงสร้างตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนดังนี้

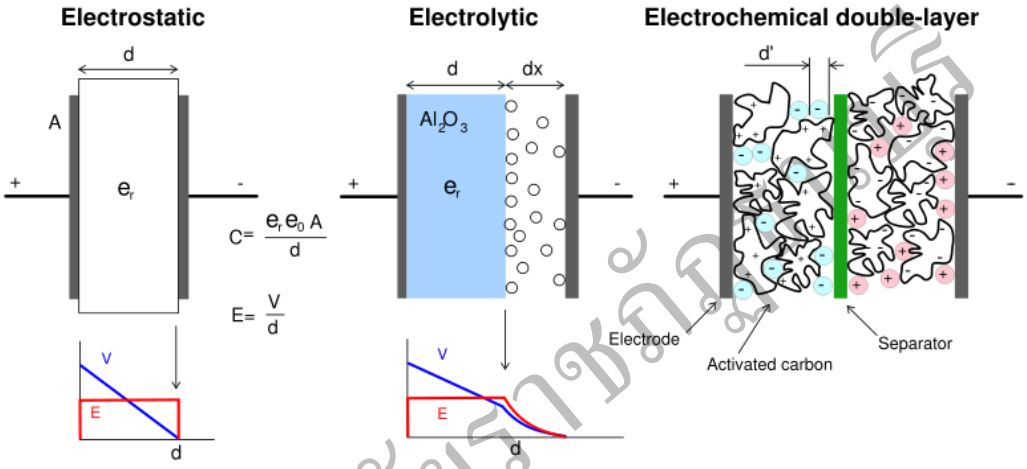
1. ขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด
2. อิเล็กโทรไลต์
3. ตัวคั่นขั้วทั้งสอง

มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี



(ก) โครงสร้าง (ข) สนามไฟฟ้าบนแผ่นเพลทของตัวเก็บประจุธรรมดา

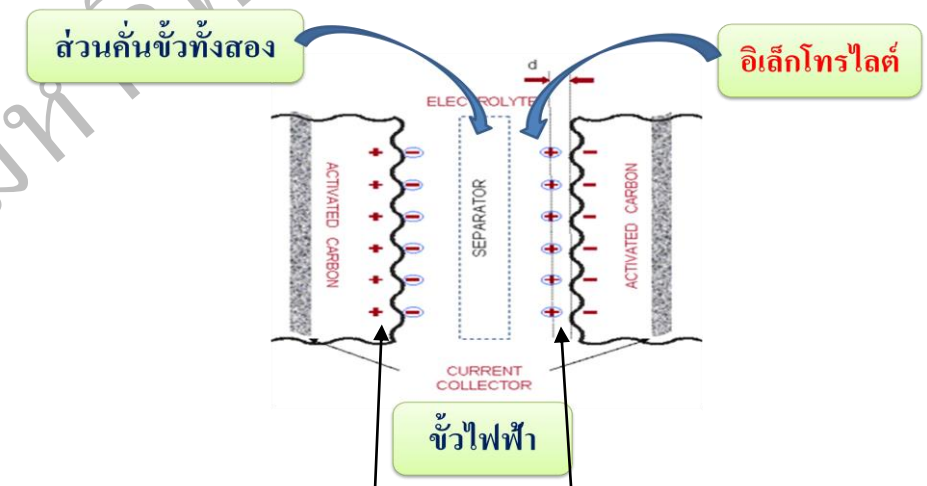
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างตัวเก็บประจุแบบธรรมดา (Cook, 2004: 213)



(ก) ตัวเก็บประจุไฟฟ้าสถิต (ข) ตัวเก็บประจุอิเล็กโทรไลต์ (ค) ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

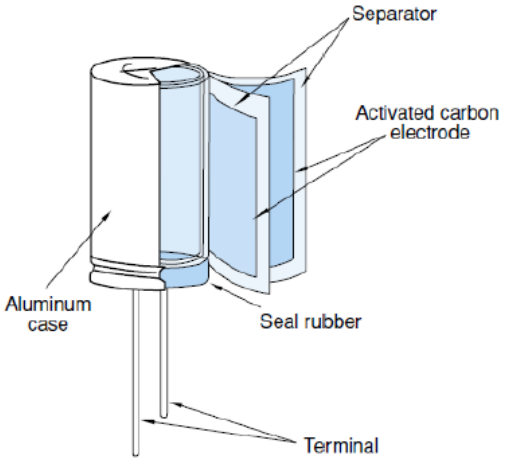
ภาพที่ 2.4 เปรียบเทียบโครงสร้างตัวเก็บประจุแต่ละชนิด

(Jayalakshmi & Balasubramanian, 2008: 1196-1217)



ประจุไฟฟ้าที่มีการเรียงตัวของประจุแบบสองชั้น (Electrochemical Double Layer)

ภาพที่ 2.5 เซลล์ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่มีการเรียงตัวของประจุแบบสองชั้น (EDLCs)



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Tecate Group, 2011: 8)

ปัจจัยสำคัญในการเลือกวัสดุที่จะใช้เป็นอิเล็กโทรดในตัวเก็บประจุยิ่งยวด คือวัสดุจะต้องมีรูพรุน เพื่อให้สารอิเล็กโทรไลต์แทรกผ่านได้ โดยที่ขนาดของรูควรจะอยู่ในระดับ 2-50 นาโนเมตร และวัสดุดังกล่าวต้องมีพื้นที่ผิวสูงสำหรับการสะสมประจุไฟฟ้าวัสดุที่นิยมใช้ในการผลิตตัวเก็บประจุยิ่งยวด ได้แก่ คาร์บอนที่มีการปรับปรุงสภาพพื้นผิว (Activated Carbon) ผงคาร์บอนแบล็ค เส้นใยคาร์บอนแบบผืนผ้า (Woven Carbon Fiber Cloth) ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nano Tube) ข้อจำกัดในการใช้คาร์บอนที่มีการปรับปรุงสภาพพื้นผิวเป็นอิเล็กโทรด คือ ไม่สามารถควบคุมขนาดของรูพรุนในโครงสร้างของคาร์บอนได้ แม้ว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมหลักการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ประกอบด้วยวัสดุที่มีรูพรุนทำหน้าที่เป็นตัวสะสมกระแสไฟฟ้าและสารอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่เป็นตัวนำประจุไฟฟ้าที่จะแทรกผ่านรูพรุนของวัสดุภาพที่ 7.14 เมื่อมีการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในตัวเก็บประจุยิ่งยวด แผ่นอิเล็กโทรดที่ต่ออยู่กับขั้วบวกจะดึงอิเล็กตรอนที่เป็นขั้วลบจากสารอิเล็กโทรไลต์ให้มาสะสมอยู่บนพื้นผิว ส่วนแผ่นที่ต่ออยู่กับขั้วลบจะดึงประจุบวกจากอิเล็กโทรไลท์มาที่พื้นผิวของอิเล็กโทรด เพื่อให้ประจุไฟฟ้าที่พื้นผิวของอิเล็กโทรดทั้งสองขั้วสมดุลตามภาพที่ 2.6

1. ขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

คุณลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถกำหนดได้จากการเลือกวัสดุของขั้วไฟฟ้า (Electrode) โดยการเก็บประจุจะเก็บไว้ที่บริเวณพื้นผิวและลักษณะของพื้นผิวจะเป็นตัวกำหนดปริมาณความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและวัสดุที่นำมาใช้มีหลากหลายอาทิเช่น คาร์บอน, ออกไซด์โลหะ, คอนดักชิ้งค์โพลิเมอร์, และไฮบริดคอนดักชิ้งค์โพลิเมอร์ โดยคาร์บอนนั้นได้ถูกนำมาใช้มากที่สุดเพราะมีพื้นที่ผิวสูง,มีราคาถูก และยังสามารถใช้ร่วมกับโฟม ไฟเบอร์ และท่อนาโน การเลือกถ่านกัมมันต์มาใช้เพราะโครงสร้างพื้นผิวที่มีรูพรุน ทำให้สารอิเล็กโทรไลต์เข้าถึงรูพรุนได้ดี ซึ่งการเคลื่อนย้ายไอออนในรูพรุนจะแตกต่างกันการเคลื่อนย้ายไอออนในสารอิเล็กโทรไลต์และขนาดของรูพรุนยังมีอิทธิพลอย่างมาก โดยถ้ารูพรุนมีขนาดเล็กเกินไปการเข้าถึงรูพรุนของไอออนในสารอิเล็กโทรไลต์จะทำได้ยาก ดังนั้นขนาดของรูพรุนควรมีขนาดที่เหมาะสมกับสารอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นท่อนาโนจึงเป็นทางเลือกใหม่ในการทำขั้วคาร์บอนแต่ยังคงอยู่ในช่วงของการทดลอง และไอออนโลหะมีข้อดีในการนำมาทำขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด เพราะให้ความจุที่ดีและความต้านทานต่ำ โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะใช้รูทีเนียมไอออนและเซลล์ต้นแบบมีความหนาแน่นพลังงาน 8.5 Wh/kg ความหนาแน่นกำลัง 6 kW/kg ซึ่งพัฒนาโดยกองทัพของสหรัฐอเมริกา (Sharma & Bhatti, 2010: 2904)

2. อิเล็กโทรไลต์

การเลือกใช้สารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolytes) ในตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะต้องเลือกให้เข้ากับวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าเพราะจะส่งผลถึงระดับแรงดันต่อเซลล์โดยทั่วไปอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีอยู่ 2 ชนิดคือ 1. แบบสารอินทรีย์ 2. แบบที่มีส่วนประกอบเป็นน้ำ และผู้ผลิตส่วนใหญ่จะใช้สารอิเล็กโทรไลต์แบบอินทรีย์หรือแบบแห้ง ซึ่งเซลล์ที่ใช้ใน อิเล็กโทรไลต์แบบอินทรีย์จะมีระดับการทดแรงดันอยู่ที่ประมาณ 2-2.5 โวลต์ แต่ความต้านทานจะสูงกว่าอิเล็กโทรไลต์แบบน้ำ ส่วนเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบน้ำจะทนแรงดันได้ 1โวลต์ ความแตกต่างระหว่างตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบน้ำและแบบอินทรีย์ ในสารอิเล็กโทรไลต์เป็นทั้งแบบน้ำหรือสารอินทรีย์ สารอิเล็กโทรไลต์แบบน้ำ มีความต้านทานภายในต่ำ แต่ แรงดันไฟฟ้าจำกัดประมาณ 1 โวลต์ต่อเซลล์ ในขณะที่สารอิเล็กโทรไลต์แบบอินทรีย์ช่วยให้แรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์สูงขึ้น แต่มีความต้านทานอนุกรมภายในสูง (ESR)

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบอิเล็กโทรไลต์แบบน้ำกับสารอินทรีย์

	อิเล็กโทรไลต์แบบน้ำ	อิเล็กโทรไลต์แบบอินทรีย์
แรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์	แรงดันสูงสุด = 1V	แรงดันสูงสุด = 2.7V
การผลิต	ง่าย	ยาก
ต้นทุน	ราคาต่ำ	ราคาสูง
วงจรสมดุลแรงดัน	ไม่จำเป็นต้องใช้	จำเป็นต้องใช้
กระแสรั่วไหล	เสถียรภาพเร็ว	เสถียรภาพนานมาก ต้องใช้วงจรสมดุลแรงดัน

นอกจากนี้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบสารอินทรีย์มีความต้านทานอนุกรมภายในสูง (ESR ต่อความจุสูง) เมื่อเทียบกับแบบน้ำ แต่แบบน้ำจะไวต่อสิ่งกระตุ้น ตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบน้ำมีความสามารถเคลื่อนไหวไปมาของไอออนเร็วพร้อมกับความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดี ซึ่งนำไปสู่การเก็บประจุ/การปล่อยประจุได้เร็วขึ้น

3. ตัวคั่นขั้วทั้งสอง

ตัวคั่นขั้วทั้งสอง (Separator) จะทำหน้าที่ป้องกันการสัมผัสกันของประจุไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองแต่ไอออนสามารถแทรกผ่านไปได้ และยอมให้ประจุไอโอนิกผ่านถึงแผ่นตรงข้าม โพลิเมอร์หรือกระดาษสามารถใช้เป็นตัวคั่นร่วมกับสารอิเล็กโทรไลต์แบบอินทรีย์ และเซรามิคกับเส้นใยแก้วจะใช้กับอิเล็กโทรไลค์แบบที่มีส่วนประกอบของน้ำและตัวคั่นที่ดีต้องมีความต้านทานไฟฟ้าที่สูง เป็นตัวนำไอโอนิกได้ดี, และมีขนาดบาง ซึ่งส่วนใหญ่จะสร้างในรูปทรงกระบอกโดยเซลล์ของตัวเก็บประจุยิ่งยวดสร้างอนุภาคของถ่านกัมมันต์ผสมกับสารแล้ววางบนอลูมิเนียมฟอยล์ และเซลล์จะถูกม้วนเป็นทรงกลมนำใส่ในกระบอกอลูมิเนียมโดยขั้วจะมีการต่อออกไปภายนอกกระบอกเซลล์ตามภาพที่ 2.6

จากโครงสร้างของตัวเก็บประจุ สามารถคำนวณหาค่าความจุในการเก็บประจุ โดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนของประจุต่อศักย์ไฟฟ้า จึงมีการกำหนดให้ค่านี้เป็นค่าความจุ โดยให้ C เป็นสัญลักษณ์แทนความจุและ หาค่าความจุได้จากสมการที่ (2.1)

$$C = \frac{Q}{V} \qquad (2.1)$$

เมื่อ C คือ ความจุ มีหน่วยเป็น ฟารัด (F)
Q คือ ประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น คูลอมบ์ (C)
V คือ แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

จากภาพที่ 2.3 (ข) ความจุของตัวเก็บประจุจะแปรผันตามพื้นที่หน้าตัดและแปรผกผันกับระยะห่างของแผ่นเพลททั้งสองและขึ้นอยู่กับไดอิเล็กทริกดังนี้
เมื่อ $Q = \varepsilon EA$ และ V = Ed แทนค่าลงในสมการที่ (2.1) จะได้ความจุเป็น

$$C = \varepsilon\frac{A}{d} \qquad (2.2)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำ มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)
d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง มีหน่วยเป็น เมตร (m)
ε คือ ค่าสภาพยอม (Permittivity) ของไดอิเล็กทริกที่นำมาใช้คั่นแผ่นตัวนำ มีหน่วยเป็น (F/m)

ค่าคงที่ของไดอิเล็กทริก

วัสดุทุกๆ ชนิดที่ใช้ทำเป็นไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุมีสนามไฟฟ้าระหว่างขั้ว บวกกับขั้วลบ การวัดค่าความสามารถในการสร้างสนามไฟฟ้านี้เรียกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) หรือสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative Permittivity: ε_r)

ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ε_r) เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราค่าสภาพยอมคงที่ของวัสดุ (ε) กับสภาพยอมที่สุญญากาศ (ε_o) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12} หน่วยเป็น ฟารัดต่อเมตร ดังสมการที่ (2.3)

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_o} \qquad (2.3)$$

เมื่อ ε_r คือ สภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุ ไม่มีหน่วย
ε คือ สภาพยอมของวัสดุ มีหน่วยเป็น (F/m)
ε_o คือ สภาพยอมที่สุญญากาศ มีหน่วยเป็น (F/m)

พิจารณาสมการที่ 2.2 $C = \varepsilon\frac{A}{d} = \varepsilon_r\varepsilon_o\frac{A}{d}$ โดยที่ $\varepsilon_o\frac{A}{d}$ คือ ความจุของตัวเก็บประจุที่สุญญากาศ หรือมีค่าไดอิเล็กทริกใกล้เคียงกับอากาศ และความจุของตัวเก็บประจุหาค่าได้ดังสมการที่ (2.4) สำหรับไดอิเล็กทริกของวัสดุใดๆ แสดงตามตารางที่ 2.3 วัสดุทุกชนิดจะมีค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกหรือสภาพยอมสัมพัทธ์ (ε_r) ที่แตกต่างกัน เช่น ค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ 1.00 เป็นต้น

$$C = \varepsilon_r C_o \qquad (2.4)$$

มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุแต่ละชนิด (Cook, 2004: 220)

ชนิดของวัสดุ	ค่าคงที่ของไดอิเล็กทริก (ε_r)
สุญญากาศ (Vacuum)	1.00
อากาศ (Air)	1.0006
เทพลอน (Teflon)	2.00
กระดาษ (Paper)	2.50
น้ำมัน (Oil)	4.00
ไมกา (Mica)	5.00
เซรามิค (Ceramic) ต่ำสุด	6.00
เบกาไลต์ (Bakelite)	7.00
แก้ว (Glass)	7.50
น้ำ (Water)	78.00
เซรามิค (Ceramic) สูงสุด	8000.00

ความคงทนของไดอิเล็กทริก

แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของตัวเก็บประจุ จะถูกกำหนดโดย ค่าความคงทนของไดอิเล็กทริกของวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้ทำ ดังตารางที่ 2.3 ค่าความคงทนของไดอิเล็กทริกมีหน่วยเป็นโวลต์ต่อมิลลิเมตร (V/mm)

เมื่อ (1 mm = 0.001 in)

ตารางที่ 2.4 ความคงทนของวัตถุแต่ละชนิด (Floyd, 1998: 320)

ชนิดของวัตถุ	ความคงทนของไดอิเล็กทริกแต่ละชนิด (V/mil)
อากาศ (Air)	80
น้ำมัน (Oil)	375
เซรามิค (Ceramic)	1000
กระดาษ (Paper)	1200
เทพลอน (Teflon)	1500
ไมกา (Mica)	1500
แก้ว (Glass)	2000

จากตารางที่ 2.2 ถ้าสมมติใช้เซรามิคมาทำเป็นไดอิเล็กทริกคั่นกลางระหว่างแผ่นตัวนำของตัวเก็บประจุ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ทนได้จะมีค่าเท่ากับ 1000 V/mm เป็นต้น

มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

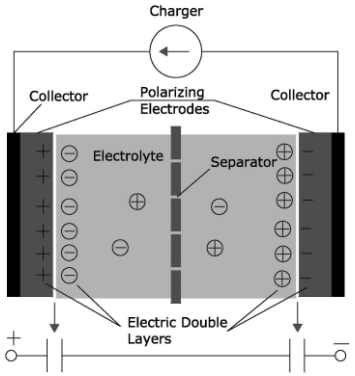
พิกัดแรงดันไฟฟ้า

พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุจะถูกจำกัดด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมแผ่นตัวนำทั้งสอง พิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุด ที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อตัวเก็บประจุเรียกว่า แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ ซึ่งการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุต้องไม่เกินพิกัดที่ระบุไว้

พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะสะสมพลังงานในรูปสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง สนามไฟฟ้าจะถูกแทนด้วยเส้นแรงที่อยู่ระหว่างขั้วบวกไปสู่ขั้วลบ โดยมีไดอิเล็กทริกขั้นกลาง แสดงตามภาพที่ 2.7

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะสะสมพลังงานในรูปสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง สนามไฟฟ้าจะถูกแทนด้วยเส้นแรงที่อยู่ระหว่างขั้วบวกไปสู่ขั้วลบ โดยมีไดอิเล็กทริกคั่นกลางตามภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ที่มา (Jayalakshmi & Balasubramanian, 2008: 1202)

พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor Energy Storage) มีหน่วยเป็น จูล หรือ วัตต์-วินาที (1 Joules or 1 Watt-second) พลังงานรวมที่ใช้ในช่วงเวลาการเก็บประจุ (Charge) คือ

$$W_t = \int_0^t pdt = \int_0^t Iv_c dt = \int_0^t (C\frac{dv}{dt})v_c dt = C\int_0^t vdv$$

พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุคือ

$$W_c = \frac{1}{2}CV_c^2 \qquad (2.5)$$

เมื่อ W_c คือ พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ มีหน่วยเป็น จูล (J) หรือ วัตต์-วินาที

C คือ ความจุ มีหน่วยเป็น ฟารัด (F)

V_c คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

และสามารถหาค่าพลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บประจุกับการปล่อยประจุได้ดังนี้

มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

$$\Delta W = \frac{1}{2}C(V_1^2 - V_2^2) \quad (2.6)$$

เมื่อ V_1 คือ แรงดันช่วงเก็บประจุ (Charge Voltage)

V_2 คือ แรงดันช่วงปล่อยประจุ (Discharge Voltage)

พลังงานที่เกิดจากความต้านทานภายในตัวเก็บประจุหาได้จาก

$$W_R = I^2Rt \quad (2.7)$$

ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

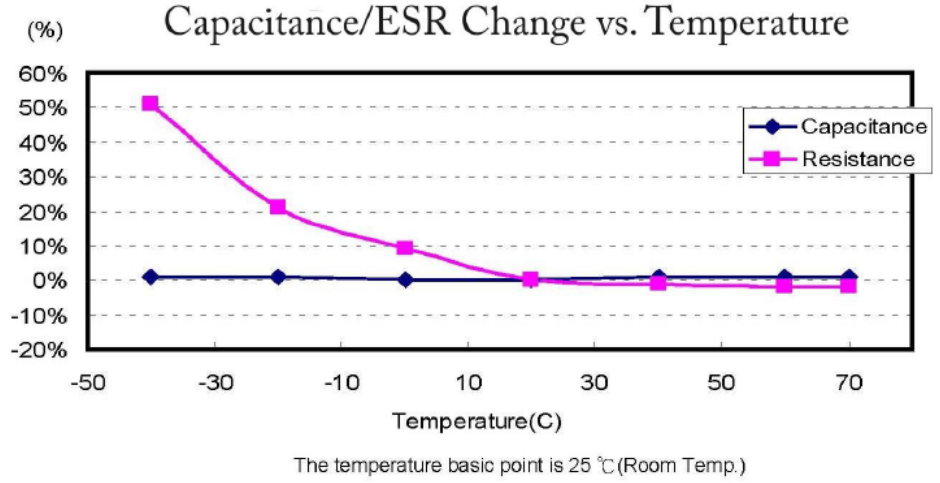
ประสิทธิภาพการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดขึ้นอยู่กับระดับแรงดันและอุณหภูมิ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขต่างๆดังนี้ ประสิทธิภาพการเก็บประจุที่กระแสคงที่คือ

$$\eta = \frac{W_c}{W_t}$$

$$\eta = \frac{W_c}{W_t} = \frac{W_c}{W_c + W_R} \quad (2.8)$$

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ลักษณะอย่างหนึ่งที่สำคัญของตัวเก็บประจุยิ่งยวดซึ่งสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรและมีประสิทธิภาพภายใต้อุณหภูมิที่หลากหลายดังภาพที่ 2.8 แสดงถึงความจุและความต้านทานช่วงอุณหภูมิ -40°C ถึง +65 °C

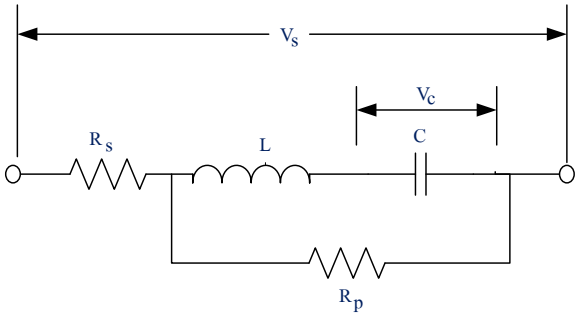


ภาพที่ 2.8 เปรียบเทียบความจุและความต้านทานช่วงอุณหภูมิ -40 °C ถึง +65 °C (Tecate Group, 2011: 17)

วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

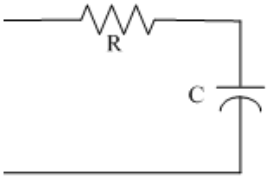
วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะคล้ายกับตัวเก็บประจุธรรมดาทั่วไป ซึ่งมีส่วนประกอบ 2 ส่วนคือ ส่วนประกอบของตัวเก็บประจุและส่วนประกอบของตัวต้านทาน R_S อนุกรมกับวงจรเรียกว่าค่าความต้านทานอนุกรมภายในตัวเก็บประจุ (Equivalent Series Resistance or ESR) ซึ่งเป็นผลให้เกิดความร้อนในตัวเก็บประจุ ตัวต้านทานขนาน R_P (Equivalent Parallels Resistance or EPR) เป็นผล

จากกระแสรั่วไหล (Leakage Current) ขั้วไฟฟ้า (Electrodes) และตัวต้านทาน R_P นี้จะทำให้เกิดพลังงานสูญเสียตลอดเวลาหรือเรียกว่าการปล่อยประจุในตัวเอง (Self-Discharge) ตัวเก็บประจุ C ต่ออนุกรมกับความเหนี่ยวนำ L ซึ่งมีขนาดเล็กมากเป็นผลมาจากรูปทรงทางเรขาคณิตจากการผลิตตัวเก็บประจุ ตามภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 วงจรสมมูลตัวเก็บประจุยิ่งยวด
(Tecate Group, 2011, p. 8)

ในกรณีการปล่อยประจุในช่วงเวลาสั้นๆ หรือไม่กี่นาที การกำหนดค่าของ EPR อาจไม่นำมาพิจารณาดังภาพที่ 2.10 โดยสมมุติให้มีแค่ ESR



ภาพที่ 2.10 วงจรของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

โดยค่า ESR สามารถหาได้จากการจ่ายไฟในช่วงแรงดัน (ΔV) และกระแส (ΔI) ในระหว่างการปล่อยประจุ นอกจากนี้วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดยังมีผลต่อความจุและความต้านทานภายในเช่นเดียวกับในสายไฟฟ้าจึงจำเป็นจะต้องนำมาต่อกับวงจร เพื่อดูผลการตอบสนองทางไฟฟ้า และสามารถหาค่าความต้านทานอนุกรมภายในได้ดังนี้

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

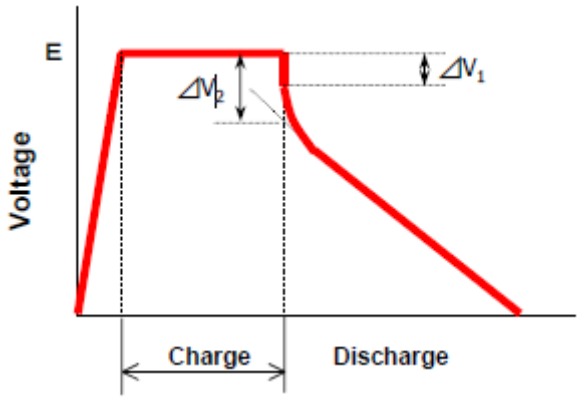
$$ESR = \frac{V_f - V_{min}}{I_d} \qquad (2.9)$$

ความจุไฟฟ้า (Capacitance) $= (I_d \times t_d)/(V_w - V_f)$

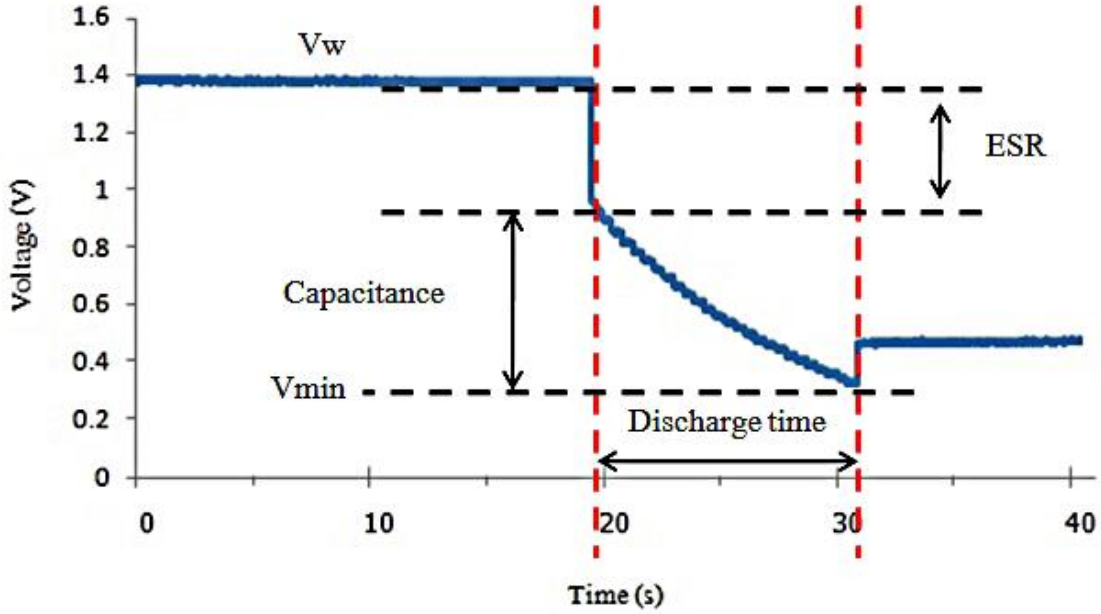
$$= (I_d \times t_d)/V_d \qquad (2.10)$$

เมื่อ V_w คือ แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นในการทำงาน มีหน่วยเป็น (V)
V_{min} คือ แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดภายที่ต่อโหลด มีหน่วยเป็น (V)
I_d คือ กระแสช่วงการปล่อยประจุ มีหน่วยเป็น (A)
V_f คือ แรงดันไฟฟ้าหลังจากปลดโหลดออก 5 วินาที มีหน่วยเป็น (V)
t_d คือ เวลาช่วงปล่อยประจุจากแรงดันเริ่มต้นถึงแรงดันขั้นต่ำ มีหน่วยเป็น (second)

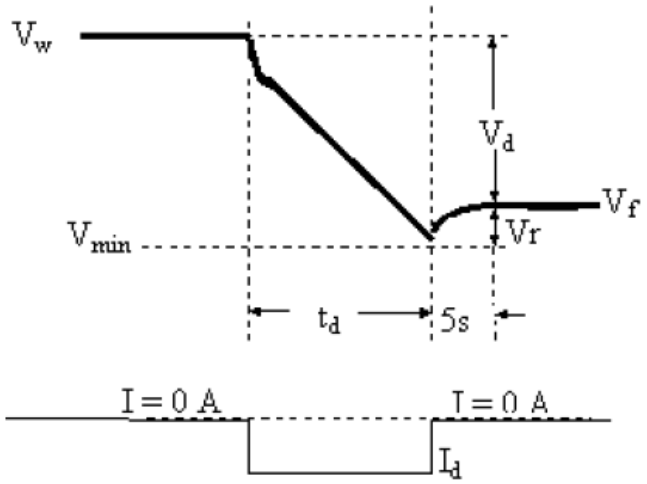
มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี



ภาพที่ 2.11 ช่วงการเก็บประจุ/ปล่อยประจุ (ELNA CO.,LTD, 2011: 5)



(ก) ช่วงการปล่อยประจุ (t_d)



(ข) แรงดัน V_f ช่วงหลังการปล่อยประจุ

ภาพที่ 2.12 การทดลองปล่อยประจุด้วยกระแสคงที่(Ultracapacitor cell integration kit, 2014.: 3)

เวลาในการเก็บประจุ/การปล่อยประจุ

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง, ชุดสำรองไฟกระแสตรง, แบตเตอรี่ และโซล่าเซลล์ โดยไม่ต้องคำนึงถึงระดับของกระแสในการชาร์จไฟแต่ต้องคำนึงถึงระดับของแรงดันไม่ให้เกินพิกัดของแรงดันที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถทนได้ ซึ่งเวลาในการเก็บประจุและการปล่อยประจุสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.11) ถึง (2.13)

เวลาช่วงการปล่อยประจุ สำหรับกระแสคงที่

$$t = C \times \frac{(V_0 - V_1)}{I} \qquad (2.11)$$

เวลาช่วงการปล่อยประจุ สำหรับกำลังไฟฟ้าคงที่

$$t = 0.5 \times C \times \frac{(V_0^2 - V_1^2)}{P} \qquad (2.12)$$

เวลาช่วงการปล่อยประจุ สำหรับความต้านทานคงที่

$$t = -C \times R \times \ln\left(\frac{V_1}{V_0}\right) \qquad (2.13)$$

เวลาช่วงการปล่อยประจุ สำหรับการเปลี่ยนตามความจุแบตเตอรี่ที่ระบุ

$$Ah = 0.5 \times C \times \frac{V_0^2}{(3600 \times V_b)} \qquad (2.14)$$

เมื่อ t คือ เวลาช่วงการปล่อยประจุ (s)
V_0 คือ แรงดันเก็บประจุ (Charge Voltage), (V)
V_1 คือ แรงดันปล่อยประจุ (Discharge Voltage), (V)
V_b คือ แรงดันแบตเตอรี่ที่ระบุ(Nominal Battery Voltage), (V)
I คือ กระแสปล่อยประจุ (A)
R คือ ความต้านทานปล่อยประจุ (Ω)
P คือ กำลังไฟฟ้า (W)

ผลจากการปล่อยประจุในตัวเอง (Self-Discharge) ของตัวเก็บประจุยิ่งยวดยังส่งผลกระทบต่อการคำนวณเวลาในการเก็บประจุและการปล่อยประจุ แต่การปล่อยประจุในตัวเองนั้นจะเป็นการสูญเสียพลังงานที่น้อยมากและสูญเสียช่วงเวลาสั้นๆ จึงอาจไม่ส่งผลกระทบอะไรมากนัก แต่ถ้ามีการปล่อยประจุในตัวเองด้วยระยะเวลาที่ยาวนานจะต้องคำนึงถึงกระแสที่รั่วไหลนี้ด้วย

การปรับสมดุลแรงดัน

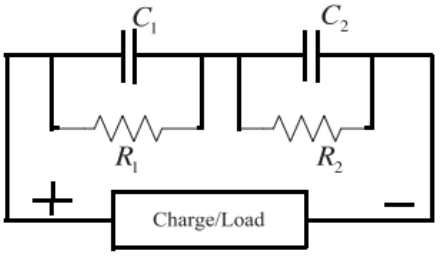
การปรับสมดุลแรงดันภายในของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Voltage Balancing of Super capacitors) เมื่อมีการต่ออนุกรมตัวเก็บประจุมากกว่า 3 เซลล์ ระดับแรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

นับเป็นปัญหาในการใช้งานเพราะมีระดับที่ต่ำซึ่งระดับแรงดันต่อเซลล์อยู่ที่ประมาน 2.5 V แต่ในการนำไปใช้งานต้องการระดับแรงดันที่สูง จากความต้องการแรงดันที่สูงสามารถนำตัวเก็บประจุยิ่งยวดมาต่ออนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันในระบบ อย่างไรก็ตามการต่ออนุกรมก็จะมีปัญหาหาในเรื่องของแรงดันและความจุในแต่ละเซลล์ที่อาจจะไม่เท่ากันในแต่ละเซลล์ตัวอย่างเช่น ถ้านำตัวเก็บประจุยิ่งยวดขนาด 2.5 V ต่ออนุกรมกัน 20 ตัว แล้วป้อนด้วยแรงดัน 50 V ถ้าตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีความจุเดียวกันแรงดันไฟฟ้าก็จะแบ่งเท่ากัน ถ้าใช้ในแรงดันที่สูงเกินจะส่งผลต่ออายุการใช้งานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ซึ่งจะต้องทำการปรับสมดุลแรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแต่ละตัวให้มีแรงดันตกคร่อมเท่ากัน การปรับสมดุลสามารถแบ่งเป็น 2 วิธีดังนี้

1. การปรับสมดุลโดยใช้ตัวต้านทาน

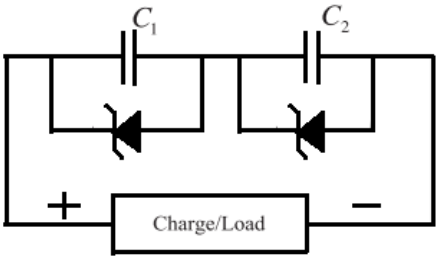
การปรับสมดุลวิธีนี้จะใช้ตัวต้านทานต่อขนานเข้าไปกับตัวเก็บประจุเพื่อปรับระดับแรงดับภายในของตัวเก็บประจุในแต่ละตัวให้เท่ากันดังภาพที่ 2.13 แต่ในการปรับสมดุลด้วยวิธีนี้จะมีข้อเสียคือตัวต้านทานที่ต่อขนานนั้นจะดึงดูดพลังงานภายในตัวเก็บประจุตลอดเวลา ซึ่งเมื่อเก็บประจุเข้าตัวเก็บประจุ C_1 จนเต็ม กระแสก็จะไหลเข้ามาที่ตัวต้านทาน R_1 ที่ตัวเก็บประจุ C_2 ก็จะเกิดขึ้นเหมือนกับ C_1 และจะเกิดขึ้นต่อเนื่องจนพลังงานในตัวเก็บประจุหมด



ภาพที่ 2.13 การต่อตัวต้านทานในการปรับสมดุลแรงดัน

2. การปรับสมดุลโดยใช้ซีเนอร์ไดโอด

การใช้ซีเนอร์ไดโอดเป็นอีกหนึ่งวิธีในการปรับสมดุลระดับแรงดันในตัวเก็บประจุ โดยการทำงานของซีเนอร์ไดโอดที่สามารถปรับแรงดันของจุดเชื่อมต่อให้คงที่ได้ถึงแม้กระแสในซีเนอร์ไดโอดจะเปลี่ยนแปลงและซีเนอร์ไดโอดสามารถควบคุมการไหลของกระแสได้ เมื่อแรงดันที่ขั้วบวก-ขั้วลบ V_{KA} น้อยกว่าแรงดันที่ V_B มันจะป้องกันกระแสไหลย้อนกลับได้ โดยการจำลองระดับการสูญเสียพลังงานจากการสมดุลแรงดันของตัวต้านทานและซีเนอร์ไดโอด โดยใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดขนาด 1000 ฟารัด 2.5 โวลต์ 4 ตัวและขนาด 800 ฟารัด 2.5 โวลต์ 1 ตัว ต่ออนุกรมและทำการชาร์จที่แรงดัน 12.5 โวลต์ พลังงานสะสมที่ได้คือ 15 kJ แต่ในกรณีปรับสมดุลด้วยตัวต้านทานขนาด 0.1 โอห์ม จะได้พลังงานอยู่ที่ 120 kJ ส่งผลให้ประสิทธิภาพคือ 12 % เมื่อใช้ซีเนอร์ไดโอดในการปรับสมดุลเพียงเป็น 16.3 kJ ส่งผลให้ประสิทธิภาพเป็น 93 % ดังนั้นในการใช้ซีเนอร์ไดโอดในการปรับสมดุลแรงดันจะเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บประจุแทนการใช้ตัวต้านทานดังแสดงดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 การต่อซีเนอร์ไดโอดในการปรับสมดุลแรงดัน (Cao, 2005: 173)

อายุการใช้งานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

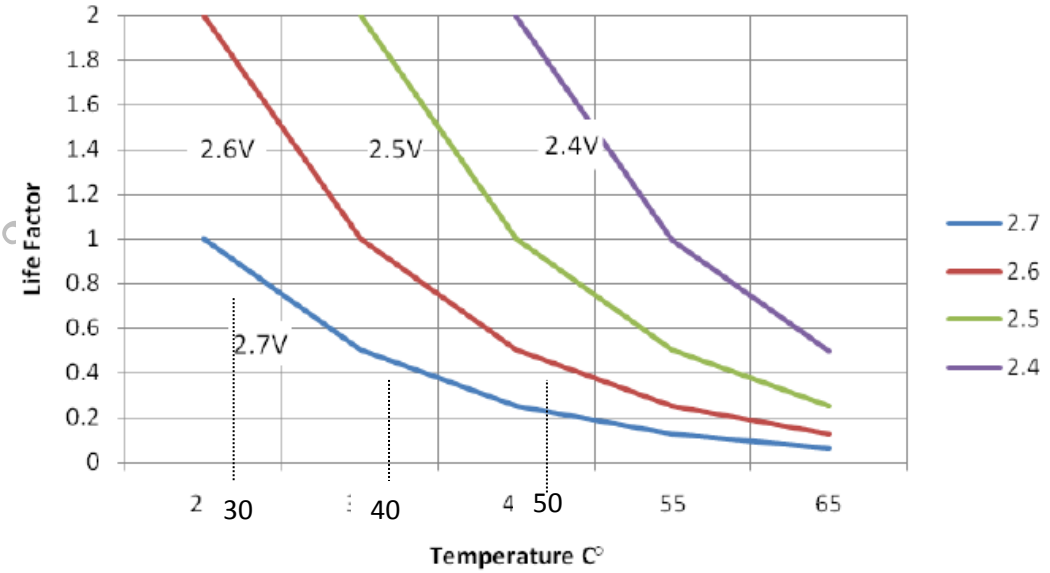
ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าแบตเตอรี่แต่อายุการใช้งานก็ยังมีขีดจำกัด โดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะปล่อยประจุไม่หมดเหมือนแบตเตอรี่ แต่จะค่อยๆ เสื่อมสภาพลงเลื่อยๆ จนหมดอายุการใช้งาน ซึ่งอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิในการทำงาน, ระดับแรงดันและกระแสขณะทำงาน โดยปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่ออายุการใช้งานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ผลของอุณหภูมิต่ออายุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

อายุการใช้งานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นผลมาจากอุณหภูมิในการทำงานเช่น ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีอุณหภูมิในการทำงานอยู่ที่ 30 °C กับที่อุณหภูมิ 40 °C ที่แรงดัน 2.7 V ดังภาพที่ 2.15 จะทำให้อายุการใช้งานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า

ผลของแรงดันต่ออายุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ระดับแรงดันในการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะส่งผลต่ออายุการใช้งานเหมือนกับอุณหภูมิ โดยถ้าใช้ที่ระดับแรงดันต่ำกว่าค่าพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวด 0.1V (ที่อุณหภูมิ 50 °C จากพิกัดแรงดัน 2.7 V เป็น 2.6 V) จะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานจาก 20 % เป็น 40 % ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 อุณหภูมิและแรงดันมีผลต่ออายุการใช้งานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Tecate Group, 2011: 12)

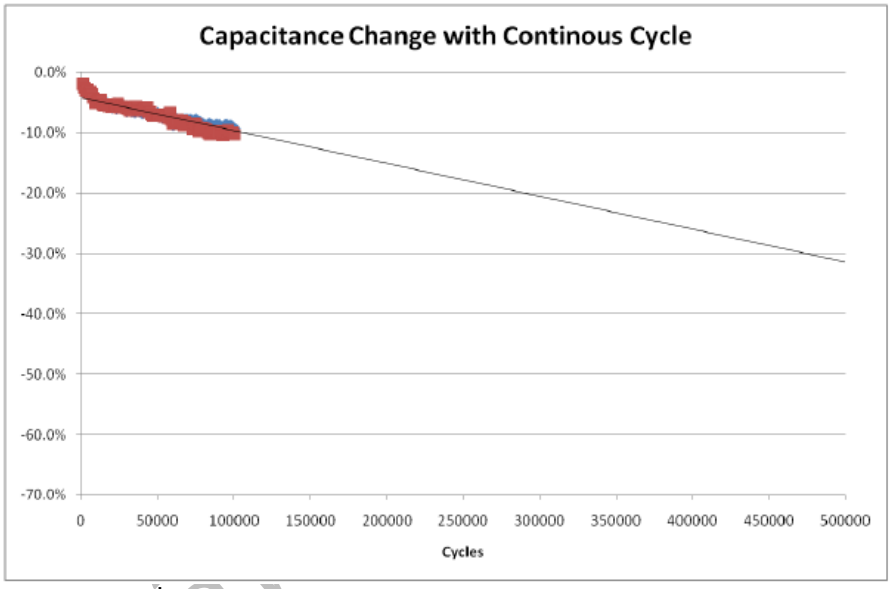
ระดับกระแสในการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ระดับกระแสเป็นหนึ่งในจุดเด่นของตัวเก็บประจุยิ่งยวดคือมีความต้านทานในตัวเองต่ำและสามารถที่จะรับ/จ่ายพลังงาน และกระแสสูงๆ ได้ แต่การจ่ายกระแสสูงนั้นจะทำให้เกิดความร้อนในตัวมันเองอย่างรวดเร็ว ดังนั้นในขณะใช้งานควรมีระบบระบายความร้อนที่ดี

วัฏจักรการใช้งานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

คุณลักษณะสำคัญของตัวเก็บประจุยิ่งยวดคือจำนวนวัฏจักรในการเก็บประจุและการปล่อยประจุที่ใช้ได้เป็นเวลานาน โดยการทดสอบการหาอัตราการเสื่อมประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่อุณหภูมิห้องด้วยกระแสคงที่และระดับแรงดันครึ่งหนึ่งของแรงดันตัวเก็บประจุยิ่งยวดโดยใช้เวลา 15 วินาทีในการเก็บประจุและการปล่อยประจุ

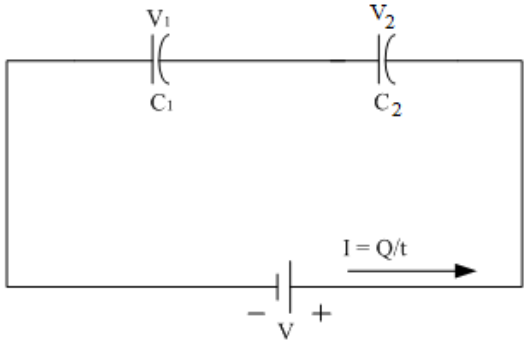
การประยุกต์ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่นิยมอย่างหนึ่งคือการสำรองพลังงานเพราะสามารถใช้ได้เป็นเวลานานและสามารถปล่อยประจุได้ในช่วงเวลาที่ต้องการ



ภาพที่ 2.16 ความจุกับวัฏจักรการนำกลับมาใช้งาน (Tecate Group, 2011: 19)

ตัวเก็บประจุต่ออนุกรม

เมื่อนำตัวเก็บประจุมาต่ออนุกรมกันจะทำให้ผลรวมของค่าความจุลดลง การคำนวณหาค่าความจุจะทำได้เหมือนกับการต่อตัวต้านทานขนานกัน และกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวเก็บประจุจะกำหนดได้เป็น (I = Q/t)



ภาพที่ 2.17 ตัวเก็บประจุต่ออนุกรม

จากภาพที่ 2.17 ประจุมีค่าเท่ากัน $Q_T = Q_1 = Q_2$ และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ $V = Q/C$ ถ้าใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$V_S = V_1 + V_2$

จากสูตร $V = Q/C$ แทนลงในสมการข้างบนจะได้

$$\frac{Q}{C_T} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

$$Q\frac{1}{C_T} = Q(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2})$$

จะได้ $$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (2.15)$$

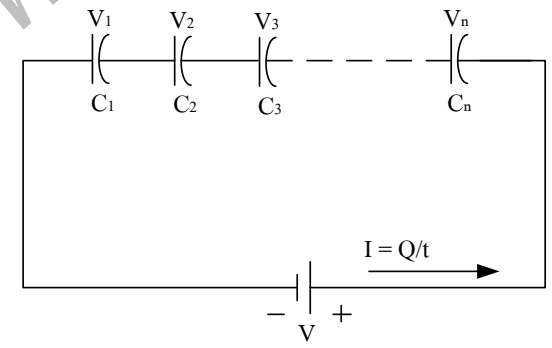
หรือ

$$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C2} \quad (2.16)$$

และถ้านำตัวเก็บประจุมาต่ออนุกรมกัน N ตัว จะได้

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + ... + \frac{1}{C_n} \quad (2.17)$$

$$C_T = \frac{1}{(\frac{1}{C_1}) + (\frac{1}{C_2}) + (\frac{1}{C_3}) + ... + \frac{1}{C_n}} \quad (2.18)$$



ภาพที่ 2.18 ตัวเก็บประจุต่ออนุกรม n ตัว

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ

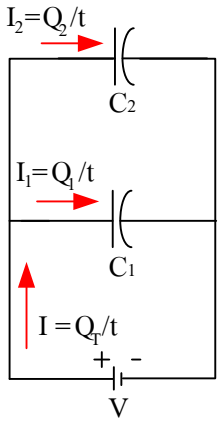
แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวในวงจรอนุกรมสามารถหาได้ดังนี้

มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

$$V_x = (\frac{C_T}{C_x})V_S \qquad (2.19)$$

ตัวเก็บประจุต่อขนาน

`เมื่อนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกันจะทำให้ผลรวมของค่าความจุเพิ่มขึ้น การคำนวณหาค่าความจุจะทำได้เหมือนกับการต่อตัวต้านทานอนุกรมกัน และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีเพียงค่าเดียว กำหนดได้เป็น (C = Q/V)



ภาพที่ 2.19 ตัวเก็บประจุต่อขนาน (Cook, 2004: 221)

จากภาพที่ 2.19 ประจุที่สะสมทั้งหมดหาได้จาก

$$Q_T = Q_1 + Q_2$$

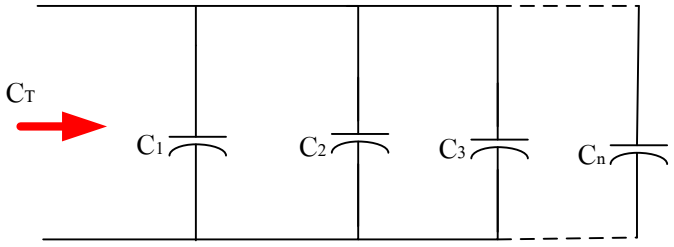
และจากสมการ Q = CV จะได้

$$C_T V = C_1 V + C_2 V$$

ดังนั้นจะได้ $C_T = C_1 + C_2$ (2.20)

ถ้านำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกัน N ตัว จะทำให้ความจุเพิ่มเป็นดังสมการที่ (2.21)

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + ... + C_n \qquad (2.21)$$

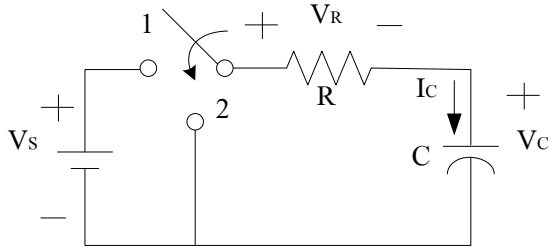


ภาพที่ 2.20 ตัวเก็บประจุต่อขนาน n ตัว

มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

การเกิดภาวะชั่วครู่ในวงจร RC

เมื่อตัวเก็บประจุถูกต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดแรงดัน V_S กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุเริ่มต้นจะมีค่าสูงสุด และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเป็นศูนย์ (ตัวเก็บประจุลัดวงจร) ช่วงนี้ตัวเก็บประจุจะเก็บสะสมพลังงาน ตามภาพที่ 2..21 เมื่อเวลาผ่านไปความจุจะขึ้นอยู่กับค่าเวลา กระแสเริ่มลดลงและแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ตัวเก็บประจุจะเก็บประจุไว้จนเต็ม กระแสไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุจะเท่ากับแหล่งกำเนิดแรงดัน



ภาพที่ 2.21 วงจร RC ในภาวะชั่วครู่

ค่ากระแสที่ผ่านตัวเก็บประจุสามารถหาได้จาก

$$i_C = \frac{V_S}{R} e^{-t/RC} \qquad (2.22)$$

จากสมการที่ 2.22 ที่เวลา t = 0 จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่าสูงสุด (100 %) และกระแสจะมีค่า 1 % เมื่อเวลาผ่านไป 5τ

$$i_C = \frac{V_S}{R} e^{-0/RC}$$

ที่เวลา t = 0 กระแส i_C สูงสุด $i_C = \frac{V_S}{R}$

แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ V_C หาได้จากสมการที่ 2.23

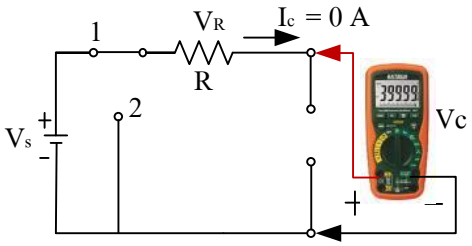
$$v_C = V_S(1 - e^{-t/RC}) \qquad (2.23)$$

และแรงดันตกคร่อม ตัวต้านทาน V_R จะได้

$$V_R = i_R R = i_C R = R(\frac{V_S}{R})e^{-t/RC}$$

$$V_R = V_S e^{-t/RC}$$

มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี



ภาพที่ 2.22 แทนที่ตัวเก็บประจุโดยการเปิดวงจร

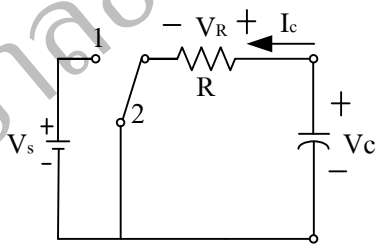
วงจร RC เมื่อไม่มีแหล่งกำเนิดพลังงาน

ถ้าสวิตช์ถูกปรับมาตำแหน่งที่ 2 ตามภาพที่ 2.23 ตัวเก็บประจุจะทำงานคล้ายกับแหล่งกำเนิดแรงดัน และปล่อยพลังงานในรูปสนามไฟฟ้าผ่านไปยังความต้านทาน พลังงานที่ตัวเก็บประจุจะเก็บหรือปล่อยพลังงานออกไปจะถูกกำหนดโดยค่าคงตัวทางเวลา (Time Constant ; τ)

$$RC = (\frac{V}{I})(\frac{Q}{V}) = (\frac{V}{Q/t})(\frac{Q}{V}) = t$$

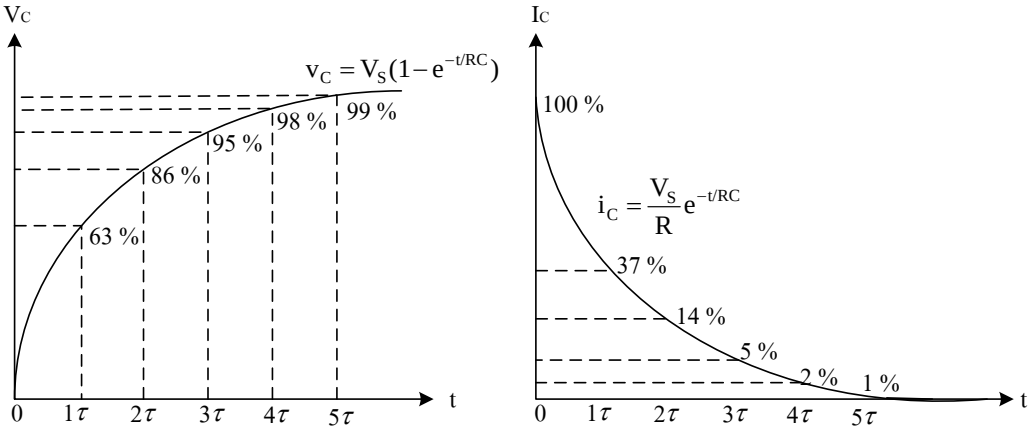
$$\tau = RC \qquad (2.24)$$

เมื่อ τ คือ ค่าคงทางตัวเวลา มีหน่วยเป็น วินาที (s)

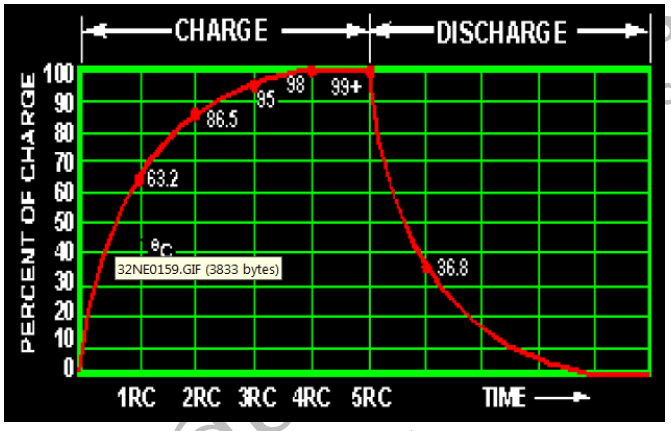


ภาพที่ 2.23 วงจร RC ไม่มีแหล่งกำเนิดพลังงาน (Boylestad, 1997: 355)

มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี



(ก) เก็บประจุ (ข) การปล่อยประจุ



(ค) ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงการเก็บประจุ/ปล่อยประจุ

ภาพที่ 2.24 คุณลักษณะของตัวเก็บประจุ (Cook, 2004: 218)

ช่วงเวลาที่เก็บประจุของตัวเก็บประจุใช้เวลาประมาณ 63 % ตามภาพที่ 2.24 (ก) และช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุปล่อยพลังงานประมาณ 37 % ดังภาพที่ 2.24 (ข) และสมการชั่วขณะที่ตัวเก็บประจุปล่อยพลังงานสามารถเขียนได้ดังนี้

$$V_c = V e^{-t/RC} \qquad (2.25)$$

แบตเตอรี่

แบตเตอรี่(Battery) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในรูปของไฟฟ้ากระแสตรงและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลาย ๆ วัฏจักร โดยทั่วไปแบตเตอรี่จะแบ่งเป็นสองกลุ่มใหญ่ด้วยกัน ได้แก่

1. แบตเตอรี่ที่ทำการชาร์จจนเต็มมาจากโรงงาน เช่นแบตเตอรี่นาฬิกา(ถ่านนาฬิกา) แบตเตอรี่ไฟฉาย (ถ่านไฟฉาย) เป็นต้น ซึ่งเมื่อใช้ไฟในแบตเตอรี่จนหมดแล้วก็หมดเลยไม่สามารถกลับนำมาใช้ใหม่ได้ เราเรียกแบตเตอรี่นี้ว่า แบตเตอรี่ปฐมภูมิ (Primary Battery)

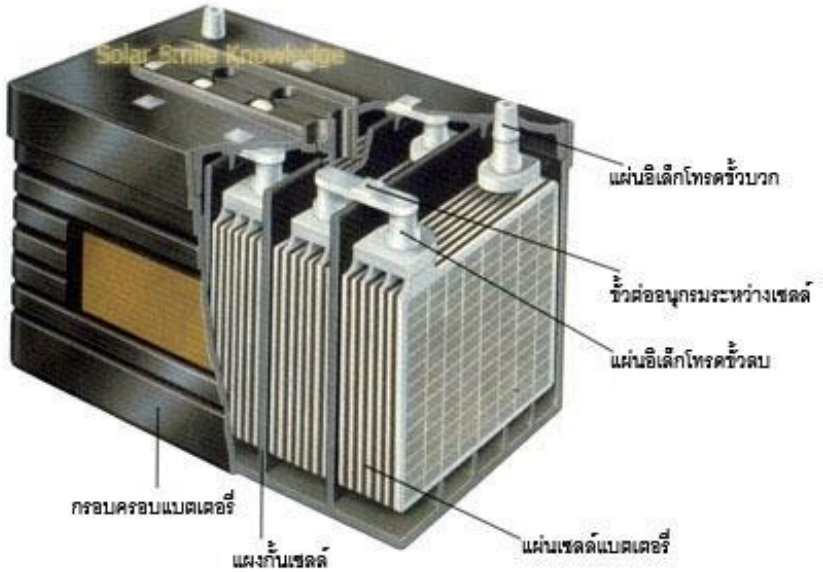
2. แบตเตอรี่ที่ทำการชาร์จใหม่ได้เมื่อแบตเตอรี่มีไฟที่อ่อนลง เช่นแบตเตอรี่รถยนต์ เราเรียกแบตเตอรี่นี้ว่า แบตเตอรี่ทุติยภูมิ (Secondary Battery)

ในระบบผลิตไฟฟ้าจากแผงโซล่าเซลล์นั้นจะใช้แบตเตอรี่แบบทุติยภูมิซึ่งสามารถชาร์จได้ใหม่เมื่อแบตเตอรี่มีกำลังไฟที่อ่อนลง ในระบบแบตเตอรี่จะทำงานเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงโซล่าเซลล์เข้ามาไว้แล้วปล่อยกำลังไฟฟ้าออกไปให้กับโหลดในเวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์ เช่นในช่วงเวลากลางคืนหรือเมฆครึ้มตลอดวัน รถยนต์ที่ใช้งานอยู่ทุกวันเมื่อเปิดวิทยุหรือพัดลมในรถยนต์โดยที่เราไม่สตาร์ทเครื่องยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้าเหล่านั้นก็ทำงานได้ปกติ แต่เมื่อเปิดไปนานๆจนไฟในแบตเตอรี่เริ่มหมดลง แรงดันในแบตเตอรี่ก็จะเหลือน้อยลง ต้องทำการชาร์จแบตเตอรี่ใหม่ การชาร์จประจุของแบตเตอรี่ในรถยนต์ทำได้โดยการสตาร์ทเครื่องยนต์รถ เพื่อจะทำให้เพลาขับไปหมุนเครื่องกำเนิดผลิตไฟกระแสตรงชาร์จให้กับแบตเตอรี่ต่อไป จนแบตเตอรี่กลับมามีแรงดันไฟฟ้าที่เต็มเหมือนเดิม ซึ่งเวลาเครื่องยนต์กำลังทำงานอยู่เราก็สามารถเปิดวิทยุและพัดลมได้เหมือนเดิม เพราะว่าทุกอย่างไม่ว่าจะเป็นแบตเตอรี่ โหลด เครื่องยนต์ และเครื่องกำเนิดต่อทำงานร่วมกันอยู่ในระบบ ถ้าเปรียบเทียบหน้าที่การทำงานของแบตเตอรี่ของระบบผลิตไฟฟ้าจากโซล่าเซลล์ก็คล้ายกับแบตเตอรี่ในรถยนต์นั่นเอง เพียงแต่ไฟฟ้าที่นำมาชาร์จประจุจะผลิตจากแผงโซล่าเซลล์โดยผ่านเครื่องควบคุมการชาร์จ ส่วนโหลดอาจจะเป็นโหลดไฟฟ้ากระแสตรง หรือถ้าต้องการใช้งานกับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับก็ต้องต่อผ่านอินเวอร์เตอร์อีกทีหนึ่ง

แบตเตอรี่ที่ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าจากโซล่าเซลล์จะมีหลายชนิด เช่น ลีดเอซิด(Lead-Acid Battery), อัลคาไลน์ (Alkaline), นิคเกิลแคดเมียม (Nickel-cadmium) แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดก็คือแบตเตอรี่ลีดเอซิด เพราะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าและมีการปล่อยประจุ (กระแสไฟฟ้า) ที่สูง

โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่แบบลีดเอซิด (Lead-Acid Battery)

ภายในแบตเตอรี่แบบลีดเอซิด (Lead-Acid Battery) จะประกอบด้วยเซลล์อยู่ภายในโดยต่อกันแบบอนุกรม จำนวนเซลล์ก็ขึ้นอยู่กับการออกแบบแบตเตอรี่นั้นๆว่าให้มีค่าแรงดันใช้งานที่เท่าไร โดยทั่วไปหนึ่งเซลล์มีแรงดันประมาณ 2 โวลต์ ตัวอย่างเช่นแบตเตอรี่รถยนต์มีแรงดันใช้งานที่ 12 โวลต์ ดังนั้นข้างในแบตเตอรี่จะประกอบด้วยเซลล์ 6 เซลล์ต่ออนุกรมกันอยู่



ภาพที่ 2.25 แบตเตอรี่แบบลีดเอซิด (Klangbattery, 2010)

ลักษณะของการปล่อยประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่

การปล่อยประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะแบ่งออกเป็น 2 แบบด้วยกัน ได้แก่

1. แบตเตอรี่ที่สามารถปล่อยประจุ(กระแส)ไฟฟ้าได้น้อย (Shallow-Cycle Battery) คือ แบตเตอรี่ที่ออกแบบมาให้ปล่อยประจุไฟฟ้าได้ประมาณ 10-20 เปอร์เซนต์ของประจุไฟฟ้ารวมก่อนจะทำการชาร์จประจุใหม่ การปล่อยประจุไฟฟ้าจะมีหน่วยเป็นแอมป์-ชั่วโมง (A-hr) ตัวอย่างเช่น 100 A-hr หมายถึง แบตเตอรี่สามารถปล่อยประจุ (กระแสไฟฟ้า) 100 หน่วยได้ใน 1 ชั่วโมง (ในความเป็นจริงไม่สามารถทำอย่างนั้นได้เพราะเมื่อปล่อยประจุจากแบตเตอรี่จนหมด แบตเตอรี่จะเสียทันที) ตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่แบบปล่อยประจุได้น้อย(Shallow cycle battery) สามารถปล่อยประจุไฟฟ้าได้ 100 แอมป์-ชั่วโมง อยู่หนึ่งลูก แบตเตอรี่ลูกนี้ควรที่จะปล่อยประจุไฟฟ้า (หรือใช้กระแสไฟฟ้า) ได้เพียง 10-20 A-hr หลังจากนั้นจะต้องทำการชาร์จประจุให้เต็ม ก่อนคลายประจุครั้งต่อไป ถ้าการปล่อยประจุมากเกินกว่าที่กำหนดไว้ เช่นทำการปล่อยประจุที่ 50 A-hr จะทำให้แบตเตอรี่มีอายุการที่ใช้งานที่สั้นลง (เสื่อมเร็ว) อย่างมาก ตัวอย่างเช่น ตามสเปคระบุอายุการใช้งานของแบตเตอรี่สามารถชาร์จได้ 3000 วัฏจักร อาจจะลดเหลือเพียงแค่ 1000 วัฏจักร ดังนั้นการออกแบบระบบโดยรวม ควรคำนึงถึงลักษณะการปล่อยประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วย

2. แบตเตอรี่ที่สามารถปล่อยประจุไฟฟ้า (กระแส) ได้มาก (Deep-Cycle Battery) คือ แบตเตอรี่สามารถปล่อยประจุได้ถึง 60-80 เปอร์เซ็นต์ ของประจุรวม ก่อนที่จะทำการชาร์จประจุใหม่ ส่วนมากแล้วจะนำมาใช้กับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าในบ้านพักอาศัย แบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีราคาที่สูงกว่าแบบแรกมาก แต่ใช้เพียงไม่กี่ลูกก็สามารถทดแทนประจุไฟฟ้ารวมจากแบตเตอรี่แบบแรกได้ แบตเตอรี่แบบนี้จะมีความคุ้มค่าในระยะยาว คำถามที่มักจะพบบ่อยคือ จะสามารถใช้แบตเตอรี่รถยนต์แทนแบตเตอรี่กับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ได้หรือไม่ – ถ้าระบบเล็กๆ ใช้กระแสไฟที่จะไปจ่ายโหลดไม่มาก ก็สามารถใช้แบตเตอรี่รถยนต์ได้ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นต้องคำนวณให้ดีว่าไม่ควรที่จะปล่อยกระแสไฟออกจากแบตเตอรี่ให้มากเกินไปกว่าสเปคที่กำหนดไว้ เพราะถ้าปล่อยกระแสไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่มากเกินไป จะทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง จนไม่สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้อีกต่อไป คล้ายกับแบตเตอรี่ของคอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊คที่เสื่อมแล้ว ไม่สามารถที่จะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่องได้นานนัก แบตเตอรี่รถยนต์มีอายุการใช้งานประมาณ 2 ปี แต่ถ้าเป็นแบตเตอรี่ดีพไซเคิลที่สามารถปล่อยประจุไฟฟ้าได้มากจะมีอายุการใช้งาน 4-5 ปี ถ้าใช้งานกับระบบโซล่าเซลล์แล้ว แบตเตอรี่แบบดีพไซเคิลมีความคุ้มค่ามากกว่า และยังจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดได้มากกว่าแบตเตอรี่รถยนต์ก่อนที่จะทำการชาร์จประจุใหม่

เครื่องควบคุมการชาร์จ

แบตเตอรี่จะต่อกับเครื่องควบคุมการชาร์จซึ่งทำหน้าที่ปรับแรงดันให้เหมาะสมไม่ให้สูงไป เพราะอาจทำให้แบตเตอรี่เสียหายได้ ถ้าแบตเตอรี่มีแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำมากกว่าค่าที่ตั้งไว้ในเครื่องควบคุมการชาร์จ เครื่องควบคุมการชาร์จจะปลดโหลดออกไปทันทีเพราะถ้าไม่ทำอย่างนี้แล้วประจุที่เก็บไว้ในแบตเตอรี่จะถูกปล่อยไปจนหมด ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อแบตเตอรี่เพราะจะทำให้เซลล์ที่อยู่ข้างในไม่สามารถกลับมาชาร์จประจุได้อีก

ข้อควรระวัง!

▪ ไม่ควรปล่อยให้แบตเตอรี่ปล่อยประจุ (กระแสไฟฟ้า) จนหมด เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพในการเก็บประจุของแบตเตอรี่ลดลงไปอย่างมาก และบางครั้งจะไม่สามารถนำกลับมาชาร์จประจุได้อีกต่อไป

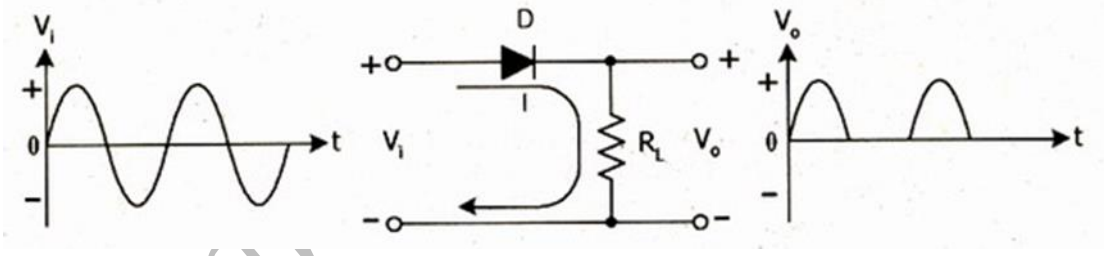
- ควรติดตั้งแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิที่กำหนดไว้ในสเป็ค โดยส่วนใหญ่แล้วแบตเตอรี่จะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้จะทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลง ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่านี้ จะทำให้ประสิทธิภาพในการเก็บประจุลด
- ควรเลือกขนาดความจุของแบตเตอรี่ให้มีการชาร์จประจุเต็มทุกวัน เพราะถ้าแบตเตอรี่แบบลีดเอซิดไม่เคยชาร์จเต็มเลย จะทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง

วงจรภาคจ่ายไฟกระแสตรง

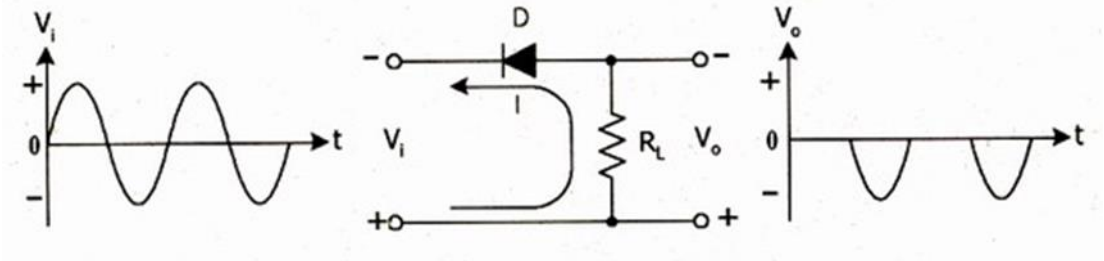
วงจรเรียงกระแส (Rectifier)

วงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ จะต้องใช้แรงดันเลี้ยงวงจรเป็นแรงดันไฟตรง (DC) โดยทำการแปลงแรงดันไฟสลับ (AC) ให้เป็นแรงดัน ไฟตรง (DC) วงจรที่ทำหน้าที่ดังกล่าวนี้เรียกว่าวงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit) อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่นี้คือไดโอด ไดโอดที่นิยมนำมาใช้งานในวงจรวงจรเรียงกระแสเป็นไดโอดชนิดซิลิกอน

การทำงานของไดโอดวงจรเรียงกระแสใช้หลักการจ่ายไบอัสตรง และการจ่ายไบอัสกลับให้ตัวไดโอด เพื่อทำให้ไดโอดนำกระแสและหยุดนำกระแสตามสภาวะไบอัสที่จ่ายแรงดันที่ผ่าน วงจรเรียงกระแสแล้ว ได้แรงดันออกมาเป็นไฟตรงซีกบวกหรือแรงดันไฟตรงซีกลบ แรงดันไฟตรงจะได้ออกมาซีกใดขึ้นอยู่กับการจัดวงจรไดโอดวงจรเรียงกระแส ถ้าไดโอดจัดให้ขาแคโถด (K) ออกเอาต์พุตได้แรงดันซีกบวกออกมา และถ้าไดโอดจัดให้ขาแอโนด (A) ออกเอาต์พุตได้แรงดันซีกลบออกมา ลักษณะการวงจรเรียงกระแสเบื้องต้น แสดงดังภาพที่ 2.26



(ก) แรงดันไฟตรงซีกบวกออก



(ข) แรงดันไฟตรงซีกลบออก

ภาพที่ 2.26 วงจรเรียงกระแสเบื้องต้น

จากภาพที่ 2.26(ก) แสดงวงจรเรียงกระแสเบื้องต้น จะได้แรงดันไฟตรงซีกบวกออกเอาต์พุต โดยต่อขา A รับแรงดันไฟสลับอินพุต และต่อขา K ออกเอาต์พุต ไดโอด D จะได้รับไบอัสตรงเมื่อแรงดันไฟ

สลับซีกบวกป้อนให้ขา A ไดโอด D นำกระแส มีกระแส I ไหลผ่านไดโอดไปตกคร่อมโหลด RL เป็นแรงดันออกเอาต์พุต V_O ซีกบวก

ส่วนภาพที่ 1 (ข) แสดงวงจรเรียงกระแสเบื้องต้น ได้แรงดันไฟตรงซีกลบออกเอาต์พุต โดยต่อขา K รับแรงดันไฟสลับอินพุต และต่อขา A ออกเอาต์พุต ไดโอด D จะได้รับไบอัสตรงเมื่อแรงดันไฟสลับซีกลบป้อนให้ขา K ไดโอด D นำกระแสมีกระแส I ไหลผ่านโหลด RL ไหลผ่านไดโอด D เป็นแรงดันออกเอาต์พุต V_O ซีกลบ

วงจรวงจรเรียงกระแสที่ถูกสร้างใช้งานมีลักษณะแรงดันที่ผ่านการเรียงกระแส แล้วได้แรงดันออกเอาต์พุต 2 แบบ คือ แบบวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น (Half Wave Rectifiers) และแบบวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น (Full Wave Rectifiers) เมื่อนำมาสร้างเป็นวงจรเรียงกระแส สามารถสร้างวงจรออกมาได้เป็น 3 ชนิด คือ

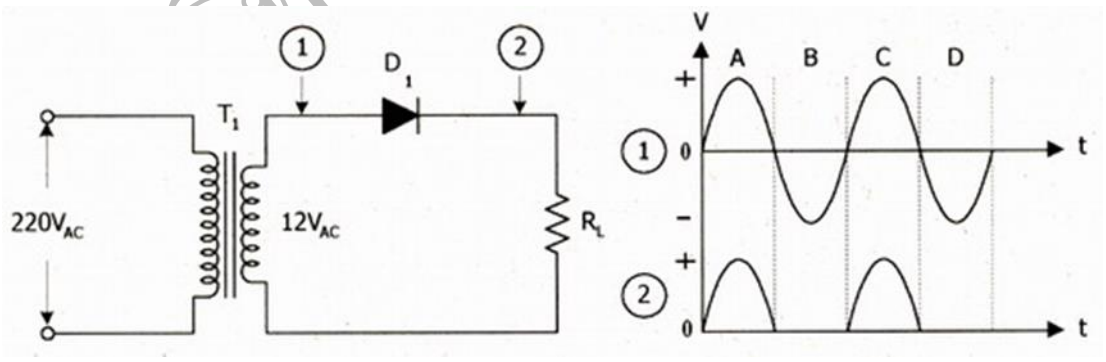
1. วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น (Half Wave Rectifiers)

2. วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น (Full Wave Rectifiers) โดยใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลาง (Full Wave Rectifier by Center-tapped Transformer) ซึ่งใช้หม้อแปลงแรงดัน 1 ลูก แบบมีแท็ป เช่น 12V-0V-12V และไดโอด 2 ตัว

3. วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (Full Wave Bridge Rectifier) โดยใช้หม้อแปลงแรงดัน 1 ลูกแบบ 2 สาย เช่น 12V-0V และไดโอด 4 ตัวต่อแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น

วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น เป็นวงจรเรียงกระแสที่แปลงแรงดันไฟสลับเป็นแรงดันไฟตรงกระเพื่อม โดยการตัดแรงดันไฟสลับที่ป้อนเข้ามาออกไปซีกใดซีกหนึ่ง อาจเป็นซีกบวกหรือซีกลบ การกำหนดตัดซีกใดออกขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดวงจรเรียงกระแส วงจรวงจรเรียงกระแสแบบนี้ใช้ไดโอดในการทำงานเพียงตัวเดียว แรงดันไฟตรงกระเพื่อมที่ออกเอาต์พุตถูกตัดหายไปเป็นเป็นช่วง ๆ ลักษณะวงจรและแรงดันที่ได้แสดงดังภาพที่ 2.27



(ก) วงจร (ข) แรงดันจุดต่าง ๆ

ภาพที่ 2.27 วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น

จากภาพที่ 2.27 แสดงวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น ภาพที่ 2 (ก) เป็นวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น มีหม้อแปลง T1 เป็นหม้อแปลงชนิดลดแรงดัน มีไดโอด D1 เป็นตัวตัดแรงดันไฟสลับออกซีกหนึ่งก่อน

ส่งออกเอาต์พุต และมีโหลด RL เป็นตัวรับแรงดันไฟตรงกระเพื่อมมาตกคร่อมจ่ายออกเป็นแรงดันเอาต์พุต จุดวัดสัญญาณแรงดันมี 2 จุด คือ จุด 1 และจุด 2 ภาพสัญญาณแรงดันที่วัดได้ แสดงดังภาพที่ 2 (ข) จุด 1 เป็นแรงดันไฟสลับวัดได้ที่ขดทุติยภูมิของหม้อแปลง T1 ส่วนจุด 2 เป็นแรงดันไฟตรงกระเพื่อมวัดได้ที่โหลด RL

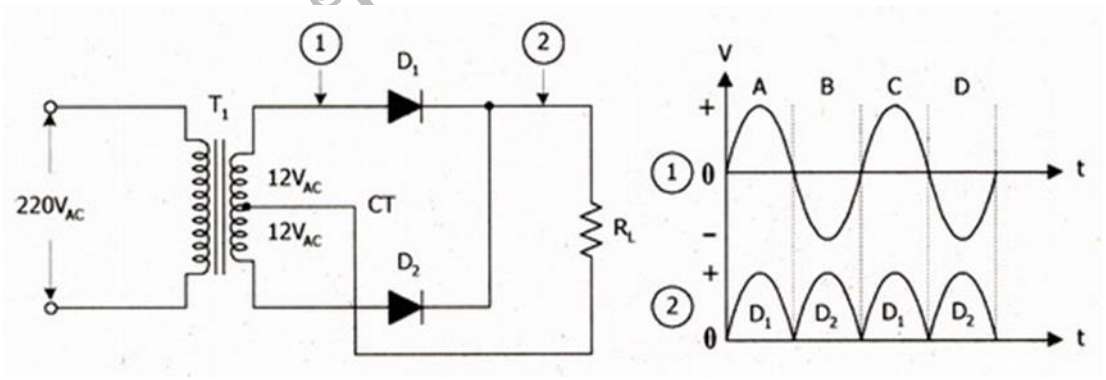
การทำงานอธิบายได้ดังนี้ ที่จุด 1 เมื่อมีแรงดันไฟสลับซีกบวกตำแหน่ง A ป้อนให้ไดโอด D1 ไดโอด D1 ได้รับไบอัสตรงนำกระแส มีกระแสไหลผ่าน D1 ผ่าน RL ได้แรงดันตกคร่อม RL ตามจุด 2 ที่ตำแหน่ง A

เมื่อมีแรงดันไฟสลับซีกลบตำแหน่ง B ของจุด 1 ป้อนให้ไดโอด D1 ไดโอด D1 ได้รับไบอัสกลับไม่นำกระแส ไม่มีกระแสไหลผ่าน RL ไม่มีแรงดันตกคร่อม RL ตามจุด 2 ที่ตำแหน่ง B

เมื่อมีแรงดันไฟสลับซีกบวกตำแหน่ง C ของจุด 1 ป้อนให้ไดโอด D1 เป็นการจ่ายไบอัสตรงให้ไดโอด D1 อีกครั้ง เริ่มทำงานซ้ำเหมือนกับตำแหน่ง A มีกระแสไหลผ่าน D1, RLได้แรงดันตกคร่อม RL ตามจุด 2 ที่ตำแหน่ง C และเมื่อมีแรงดันไฟสลับซีกลบตำแหน่ง D ของจุด 1 ป้อนให้ไดโอด D1 เป็นการจ่ายไบอัสกลับให้ไดโอด D1 อีกครั้ง เริ่มทำงานซ้ำเหมือนกับตำแหน่ง B ไม่มีกระแสไหลผ่านD1, RL ไม่มีแรงดันตกคร่อม RL ตามจุด 2 ที่ตำแหน่ง D

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลาง

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น เป็นวงจรวงจรเรียงกระแสที่แปลงแรงดันไฟสลับเป็นแรงดันไฟตรงกระเพื่อม สามารถนำแรงดันไฟสลับทั้ง 2 ซีก มาทำเป็นแรงดันไฟตรงกระเพื่อมได้ทั้งหมด แรงดันไฟตรงกระเพื่อมที่ได้ออกมาอาจเป็นแรงดันไฟตรงซีกบวก หรืออาจเป็นแรงดันไฟตรงซีกลบก็ได้ ขึ้นอยู่กับการจัดวงจรวงจรเรียงกระแส วงจรเรียงกระแสชนิดนี้ใช้ไดโอดในการทำงาน 2 ตัว และใช้หม้อแปลงที่มีขดทุติยภูมิ 3 ขั้วต่อ จ่ายแรงดันไฟสลับออกมาเหมือนกัน 2 ชุด โดยมีขั้วต่อกลางหรือแท็ปกลาง (Center Tap) เป็นขั้วร่วมในการทำงาน ลักษณะวงจรและแรงดันที่ได้ แสดงดังภาพที่ 2.28

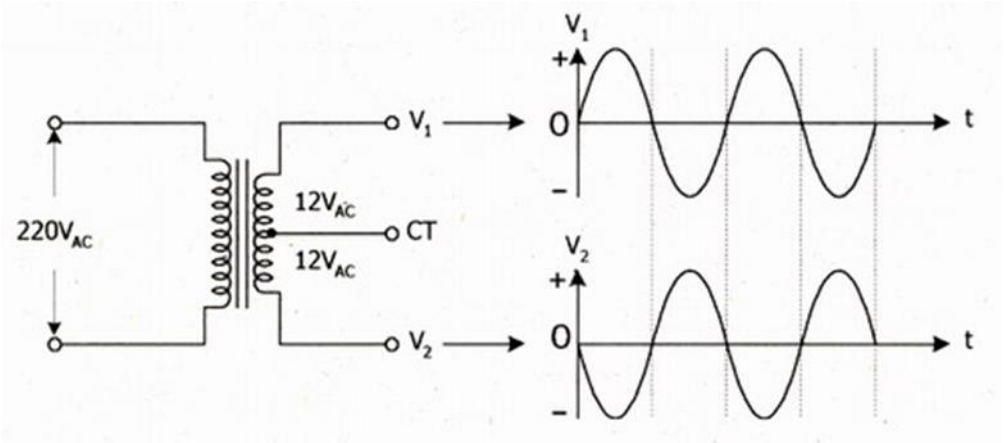


(ก) วงจร (ข) แรงดันจุดต่าง ๆ

ภาพที่ 2.28 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลาง

จากภาพที่ 2.28 แสดงวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลาง ภาพที่ 2.28 (ก) เป็นวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นชนิดใช้หม้อแปลง T1 มีแท็ปกลาง (CT) เป็นขั้วต่อร่วมในการทำงานของวงจร ขั้วแท็ปกลาง (CT) นี้แบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ขดทุติยภูมิออกเป็น 2 ชุดเท่ากัน การวัดสัญญาณที่จุด 1 ได้ภาพสัญญาณออกในภาพที่ 3 (ข) ที่จุด 1 วัดได้จากการวัดสัญญาณที่ขั้วบนกับขั้วแท็ปกลาง

(CT) ของขดทุติยภูมิ T1 และถ้าวัดสัญญาณที่ขั้วล่างกับขั้วแท็ปกลาง (CT) ของขดทุติยภูมิ T1 จะได้ภาพสัญญาณเหมือนกันแต่มีเฟสสัญญาณเป็นตรงข้าม แสดงได้ดังภาพที่ 2.29



ภาพที่ 2.29 แรงดันไฟสลับวัดออกมาได้ที่ตำแหน่ง V1, V2 เทียบกับแท็ปกลาง (CT)

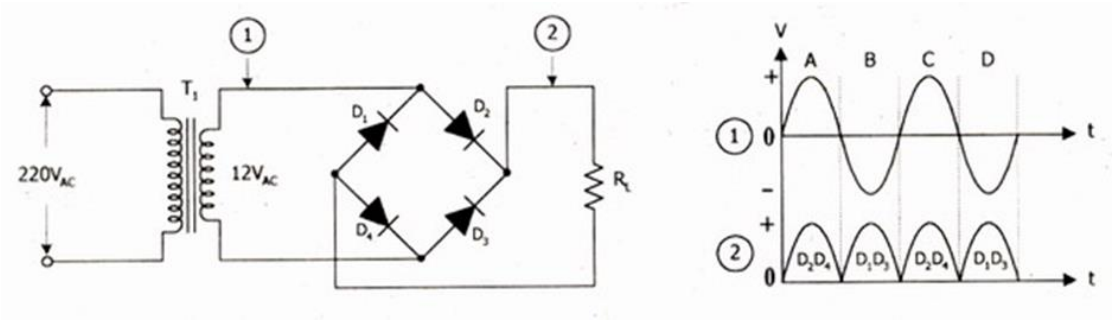
การทำงานของวงจรตามภาพที่ 2.29 อธิบายได้ดังนี้ ที่จุด 1 เมื่อมีแรงดันไฟสลับซีกบวกตำแหน่ง A ป้อนให้ไดโอด D1 ไดโอด D1 ได้รับไบอัสตรงนำกระแส มีกระแสไหลผ่าน D1ผ่าน RL ครบวงจรที่แท็ปกลาง (CT) ได้แรงดันตกคร่อม RL ตามจุด 2 ที่ตำแหน่ง A ส่วนด้านล่างที่ไดโอด D2 มีแรงดันไฟสลับซีกลบจ่ายให้ไดโอด D1 ได้รับไบอัสกลับไม่นำกระแส

เมื่อมีแรงดันไฟสลับซีกลบตำแหน่ง B ของจุด 1 ป้อนให้ไดโอด D1 ไดโอด D1 ได้รับไบอัสกลับไม่นำกระแส ส่วนด้านล่างที่ไดโอด D2 มีแรงดันไฟสลับซีกบวกจ่ายให้ไดโอดD2 ได้รับไบอัสตรงนำกระแส มีกระแสไหลผ่าน D2 ผ่าน RL ครบวงจรที่แท็ปกลาง (CT) ได้แรงดันตกคร่อม RL ตามจุด 2 ตำแหน่ง B

เมื่อมีแรงดันไฟสลับซีกบวกตำแหน่ง C ของจุด 1 ป้อนให้ไดโอด D1 อีกครั้งเป็นการทำงานซ้ำเหมือนกับที่ตำแหน่ง A ทุกประการ ได้แรงดันตกคร่อม RL ตามจุด 2 ที่ตำแหน่ง C และเมื่อมีแรงดันไฟสลับซีกลบตำแหน่ง D ของจุด 1 ป้อนให้ไดโอด D1 อีกครั้งเป็นการทำงานซ้ำเหมือนกับที่ตำแหน่ง B ทุกประการได้แรงดันตกคร่อม RL ตามจุด 2 ที่ตำแหน่ง D

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ คือวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นนั่นเอง เพียงแต่การจัดวงจรเรียงกระแสมีความแตกต่างไปจากวงจรวงจรเรียงกระแสเต็ม คลื่นใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลาง วงจรวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ประกอบด้วยหม้อแปลงใช้ชนิดทางขดทุติย ภูมิมี 2 ขั้วต่อไม่ต้องมีแท็ปกลาง (CT) ใช้ไดโอดในวงจรเรียงกระแส 4 ตัว การทำงานแต่ละครั้งไดโอดทำงานเป็นชุด 2 ตัว ลักษณะวงจรและแรงดันที่ได้แสดงดังภาพที่ 2.30



(ก) วงจร (ข) แรงดันจุดต่าง ๆ

ภาพที่ 2.30 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

จากภาพที่ 2.30 แสดงวงจรวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ภาพที่ 2.30 (ก) เป็นวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ มีไดโอด D1-D4 เป็นวงจรเรียงกระแส หม้อแปลง T1 เป็นชนิดธรรมดาไม่มีแท็ปกลาง (CT) วัดสัญญาณที่จุด 1 และจุด 2 ออกมาได้เหมือนกับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นใช้หม้อแปลงแท็ปกลางทุกประการ

การทำงานของวงจรตามภาพที่ 5 อธิบายได้ดังนี้ ที่จุด 1 เมื่อมีแรงดันไฟสลับซีกบวกตำแหน่ง A ป้อนเข้ามา ไดโอด D2, D4 ได้รับไบอัสตรงนำกระแส มีกระแสไหลผ่าน D2, RLและผ่าน D4 ครบวงจร ได้แรงดันตกคร่อม RL ตามจุด 2 ที่ตำแหน่ง A ส่วนไดโอด D1, D3 ได้รับไบอัสกลับไม่นำกระแส

เมื่อมีแรงดันไฟสลับซีกลบตำแหน่ง B ของจุด 1 ป้อนเข้ามาไดโอด D1, D3 ได้รับไบอัสตรงนำกระแสมีกระแสไหลผ่าน D3, RL และผ่าน D1 ครบวงจร ได้แรงดันตกคร่อม RLตามจุด 2 ที่ตำแหน่ง B ส่วนไดโอด D2, D4 ได้รับไบอัสกลับไม่นำกระแส

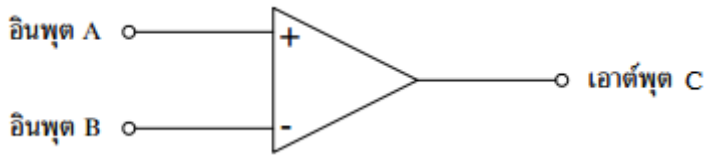
เมื่อมีแรงดันไฟสลับซีกบวกตำแหน่ง C ของจุด 1 ป้อนเข้ามาอีกครั้ง ไดโอด D2, D4 ได้รับไบอัสตรงนำกระแส เป็นการทำงานเหมือนกับที่ตำแหน่ง A ทุกประการ ได้แรงดันตกคร่อม RL ตามจุด 2 ที่ตำแหน่ง C และเมื่อมีแรงดันไฟสลับซีกลบตำแหน่ง D ของจุด 1 ป้อนเข้ามาอีกครั้ง ไดโอด D1, D3 ได้รับไบอัสตรงนำกระแส เป็นการทำงานซ้ำเหมือนกับที่ตำแหน่ง B ทุกประการ ได้แรงดันตกคร่อม RL ตามจุด 2 ที่ตำแหน่ง D

วงจรเปรียบเทียบแรงดัน

วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Comparator Circuit) ถือได้ว่าเป็นพื้นฐานของการตัดสินใจในด้านการคำนวณของออปแอมป์ ที่ทำหน้าที่เปรียบเทียบข้อมูลสองจำนวนว่าเท่ากันหรือไม่อย่างไร ถ้าเท่ากันก็ตัดสินใจว่าต้องทำอะไร หรือแม้แต่เครื่องตั้งเวลาหรือเครื่องควบคุมเวลา ก็มีส่วนของการเปรียบเทียบเข้าไปเกี่ยวข้องว่าถึงเวลาที่ตั้งไว้หรือยัง โดยเปรียบเทียบค่าที่ตั้งไว้ กับค่าที่เป็นอยู่ เป็นต้น

การเปรียบเทียบแรงดันโดยใช้ไอซีออปแอมป์สามารถนำไปใช้งานในการสร้างเป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันได้คือการ เปรียบเทียบสัญญาณสองสัญญาณโดยใช้วงจรออปแอมป์ ดังนั้นวงจรออปแอมป์ เปรียบเทียบแรงดันวงจรจึงต้องมีอินพุต 2 อินพุต อินพุตหนึ่งสำหรับรับค่าแรงดันอ้างอิง (Reference voltage, V_{ref}) แรงดันอ้างอิง หมายถึง แรงดันที่ตั้งค่าไว้คงที่ ส่วนอีกขาหนึ่ง สำหรับรับสัญญาณอินพุต (Input voltage, Vin) สัญญาณอินพุต คือ สัญญาณใดๆที่ต้องการ นำมาเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิง หากแรงดันอินพุตป้อนเข้าขา (+) เรียกว่าวงจร เปรียบเทียบแรงดันแบบไม่กลับเฟส

และถ้าแรงดันอินพุตป้อนเข้าขา (-) เรียกว่าวงจร เปรียบเทียบแรงดันแบบกลับเฟส ส่วนแรงดันอ้างอิงนั้นมี 3 ลักษณะคือ แรงดันอ้างอิงเป็น บวก (+) แรงดันอ้างอิงเป็นลบ (-) และ แรงดันอ้างอิงเป็นศูนย์ ผังการแบ่งชนิดของวงจร เปรียบเทียบแรงดันที่ใช้ออปแอมป์แสดงดังภาพที่ 2.31



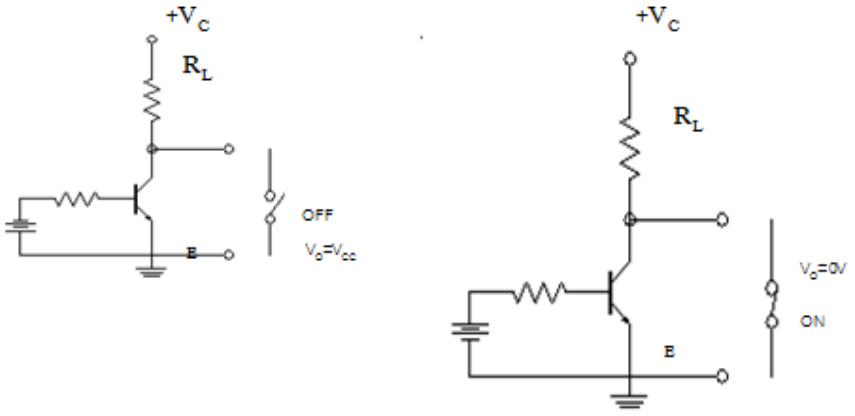
ภาพที่ 2.31 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน

จากภาพที่ 2.31 เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดัน โดยข้อมูลที่อินพุต A จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่อินพุต B ผลการเปรียบเทียบจะปรากฏที่เอาต์พุต C ถ้าเอาต์พุตเป็นบวก (+) แสดงว่าข้อมูลที่อินพุต A มีค่ามากกว่าที่อินพุต B และถ้าเอาต์พุต C เป็น (-) แสดงว่าข้อมูลที่อินพุต A มีค่าน้อยกว่าข้อมูลที่อินพุต B

การนำทรานซิสเตอร์มาเป็นสวิตช์

การที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ต้องจ่ายไฟไบแอสให้ขาเบส (B) ซึ่งเป็นขาที่มีหน้าที่ในการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากขอคอลเลกเตอร์ไปสู่ขาอิมิตเตอร์หากเราให้ไบแอสกระแสไหลที่ขาเบสมากจะทำให้กระแสไหลผ่านขาคอลเลกเตอร์ไปสู่ขาอิมิเตอร์ไหลมากตามไปด้วยแต่ถ้าให้ไบแอสกระแสไหลที่ขาเบสน้อยกระแสที่จะไหลผ่านขาคอลเลกเตอร์ไปสู่ขาอิมิเตอร์น้อยลงไปด้วย ดังนั้นด้วยหลักการทำงานของทรานซิสเตอร์นี้ก็จะสามารถนำทรานซิสเตอร์ไปประกอบในวงจรต่างๆได้มากมายโดยเฉพาะในวงจรที่ต้องการควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร

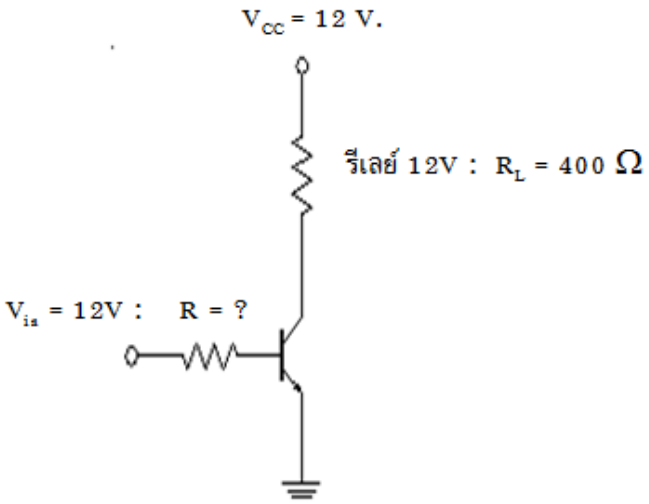
สวิตช์ทรานซิสเตอร์ที่ใช้งาน



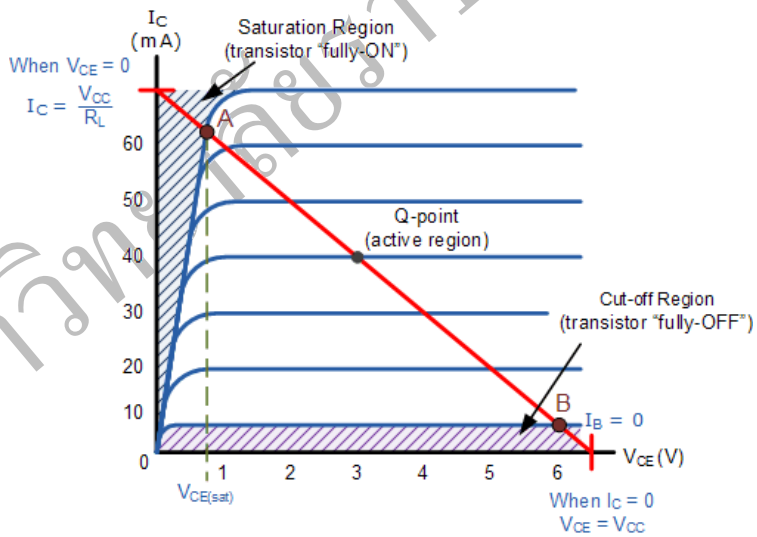
(ก) สภาวะไม่นำกระแส (ข) สภาวะนำกระแส

ภาพที่ 2.32 การนำทรานซิสเตอร์มาเป็นสวิตช์ในอุดมคติ

เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 2.32 เป็นการต่อใช้งานทรานซิสเตอร์ทำงานแทนสวิตช์ โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าที่ขาเบส (Base) และต่อขาคอลเลกเตอร์ กับขาอิมิตเตอร์ เป็นสวิตช์
ตัวอย่างเช่น การคำนวณวงจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์ในทางอุดมคติ



ภาพที่ 2.33 วงจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์



ภาพที่ 2.34 คุณลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์ (Texas Instruments, 2015: 7)

จากภาพที่ 2.34 กราฟแสดงลักษณะสมบัติทางกระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์ที่ใช้งานจริงซึ่งแบ่งส่วนในการทำงานออกเป็น 3 ส่วน

ส่วนที่ 1 แสดงบริเวณที่ทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่ในช่วงอิ่มตัว (Saturation Region)

ส่วนที่ 2 แสดงบริเวณที่ทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่ในช่วงทำงาน (Active Region)

ส่วนที่ 3 แสดงบริเวณที่ทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่ในช่วงตัด (Cut Off Region)

-การทำให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในสถานะอิ่มตัว (Saturation State)

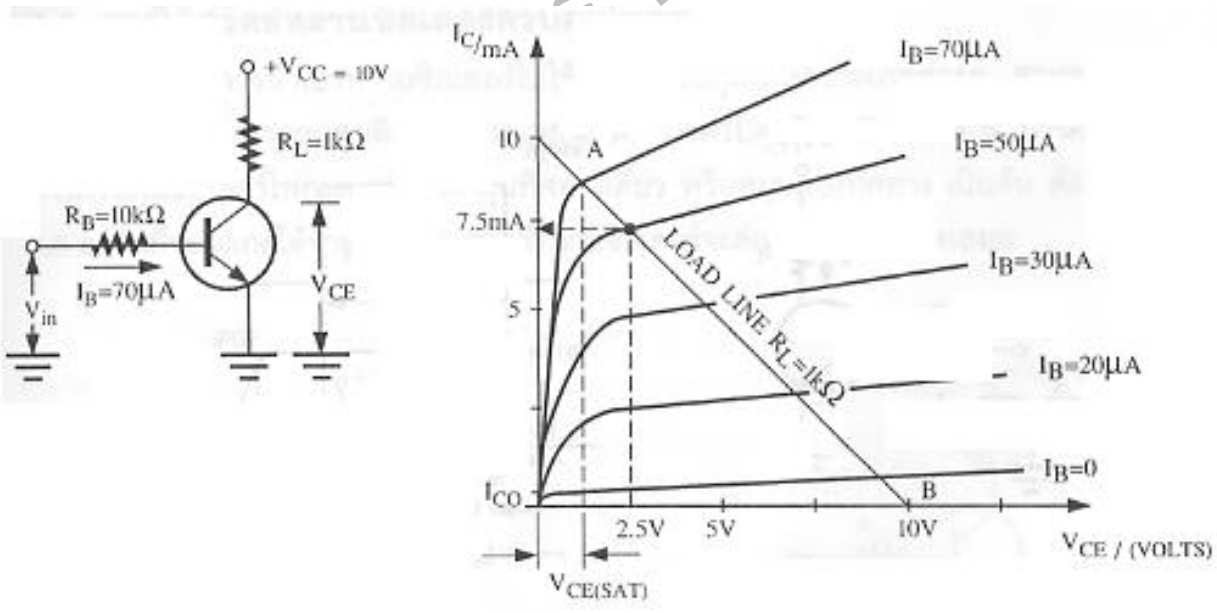
1. ทำการออกแบบค่ากระแสเบส (I_B) และกระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) ได้จากวงจร ซึ่งค่าที่ปรากฏเมื่อ $I_B > I_C / \beta$ จะทำให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะอิ่มตัวได้
2. การให้แรงดันไบแอสแก่ขาเบส และขาอิมิตเตอร์จะทำให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะอิ่มตัวได้

-การทำให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในสถานะตัด (Cut Off State)

1. การทำให้กระแสเบส (I_B) มีค่าเท่ากับศูนย์
2. การทำให้แรงดันไบแอสย้อนกลับแก่ขาเบส และขาอิมิตเตอร์ หรือทำให้แรงดันคร่อมขาเบสและขาอิมิตเตอร์มีค่าเป็นศูนย์

การคำนวณวงจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์ในการใช้งานจริง เพื่อเป็นการเปรียบเทียบการทำงานของวงจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์ที่ใช้งานจริงกับวงจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์ ทางอุดมคติว่าแตกต่างกันอย่างไร ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสามารถกำหนดและหาได้จากกราฟแสดงลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์ ดังแสดงในตัวอย่างข้างล่างนี้

ตัวอย่าง วงจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์ ดังภาพที่ 2.35 มีค่ากระแสเบส (I_B) = 50μA ความต้านทานอินพุต (R_B) = 10 kΩ ความต้านทานโหลด (R_L) = 1kΩ จงหาค่ากระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) และแรงดันคร่อมขาคอลเลคเตอร์กับขาอิมิตเตอร์ (V_{CE})



ภาพที่ 2.35 วงจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์ (Texas Instruments, 2015: 6)

วิธีทำ 1. กำหนดจุดบนแกนกระแส (I_C) และแรงดัน (V_{CE}) เพื่อลากเส้นโหลด (Load line)

- ขณะทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะนำกระแส

เมื่อ $V_{CB} \cong 0$ V

V_{CC} = $I_C \times R_L + V_{CE}$

I_C = V_{CC} / R_L = 10V / 1kΩ

= 10mA (ที่จุดA)

- ขณะทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะหยุดนำกระแส

เมื่อ I_C = 0 mA

V_{CE} = V_{CC} = 10 V (ที่จุด B)

2. หาค่ากระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) และแรงดันคร่อมขาคอลเลคเตอร์กับขาอิมิตเตอร์ (V_{CE}) จากเส้นโหลดความต้านทาน (R_L) = 1kΩ

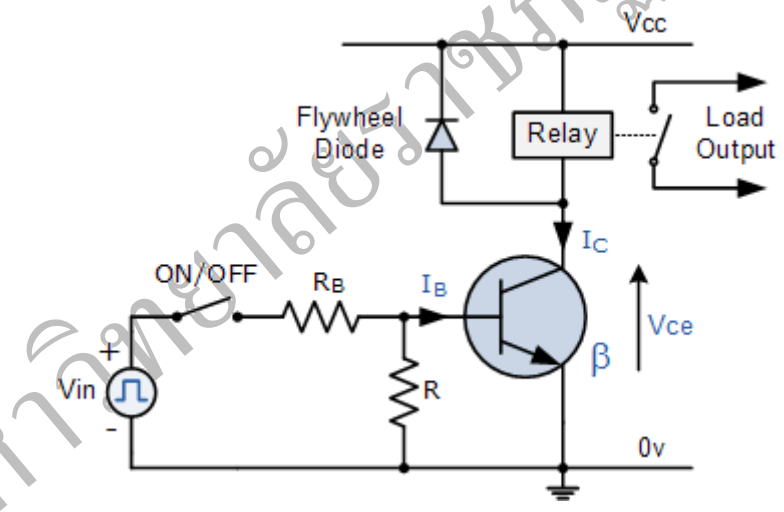
เมื่อ I_B = 50μA พิจารณาจากภาพที่ 33 จะได้ว่า

กระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) = 7.5 มิลลิแอมป์

แรงดันคร่อมขาคอลเลคเตอร์กับขาอิมิตเตอร์ (V_{BE}) = 2.5 โวลต์

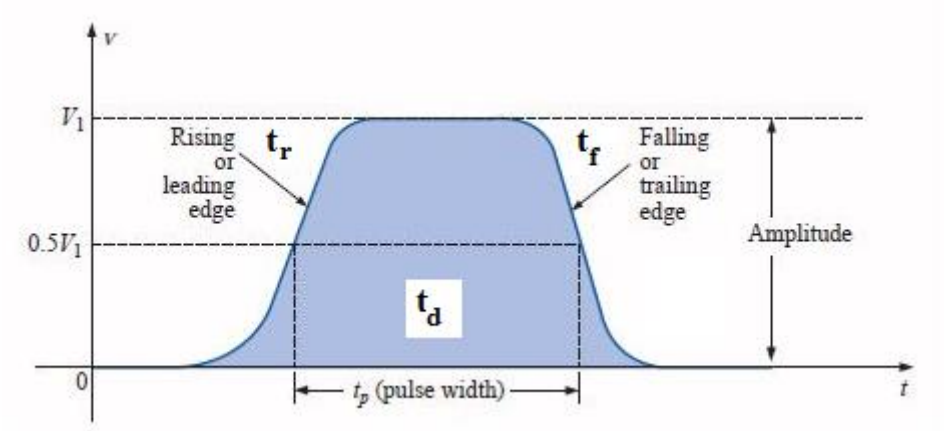
ช่วงเวลาการสวิตช์ในทางปฏิบัติ

ช่วงเวลาการสวิตช์ เป็นสิ่งที่สำคัญมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อใช้กับความถี่สูง ซึ่งช่วงเวลาการสวิตช์นี้จะเป็นตัวชี้บอกถึงคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ว่าเร็วหรือช้า เมื่อพิจารณารูปสัญญาณของการสวิตช์จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ช่วงเวลานำกระแส (On Time) และช่วงไม่นำกระแส (Off Time) ดังภาพที่ 2.37



ภาพที่ 2.36 การสวิตช์ของทรานซิสเตอร์

มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร



ภาพที่ 2.37 สัญญาณพัลส์

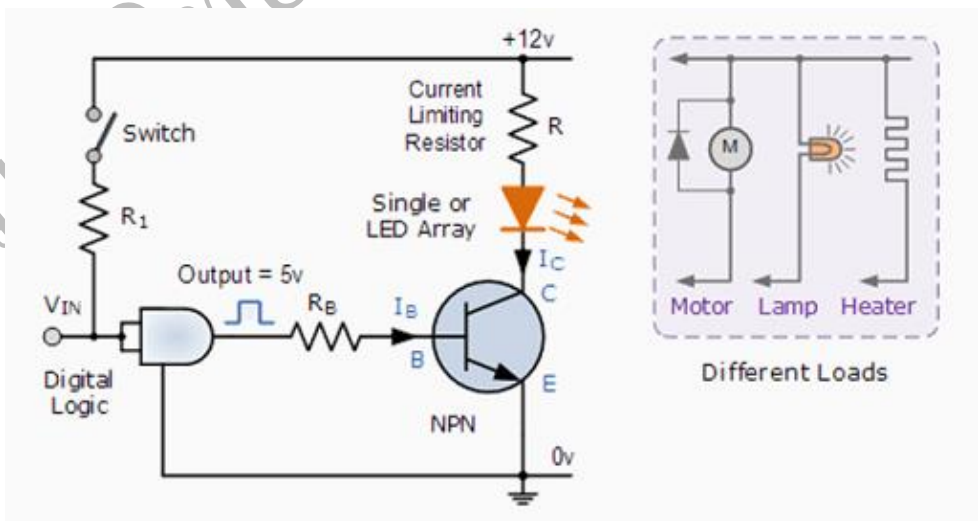
3. ช่วงเวลานำกระแส (On Time) หมายถึง ช่วงเวลาที่ใช้เพื่อให้แรงดันที่ขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์เปลี่ยนแปลงค่าขึ้นไปที่ 90% ของแหล่งจ่ายแรงดัน (V_{CC}) ซึ่งช่วงเวลานำกระแส (t_{on}) จะประกอบด้วยช่วงเวลาย่อย 2 ส่วน คือ

- ช่วงเวลาประวิง (Delay Time) คือช่วงเวลาที่เป็นระยะเวลาห่างจากจุดเริ่มต้น

ของการสวิตช์ทางอินพุตจนถึงแรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงเป็น 10% ของแหล่งจ่าย (V_{CC}) ใช้อักษรตัวย่อคือ"t_d"

- ช่วงเวลาขึ้น (Rise Time) คือช่วงเวลาที่แรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงจาก 10% ถึง 90% ของแหล่งจ่ายแรงดัน (V_{CC}) ใช้อักษรตัวย่อ คือ " t_r "

∴ช่วงเวลานำกระแส (t_{on}) = $t_d + t_r$



ภาพที่ 2.38 วงจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์ขณะปิดวงจร (WordPress, 2012. 2)

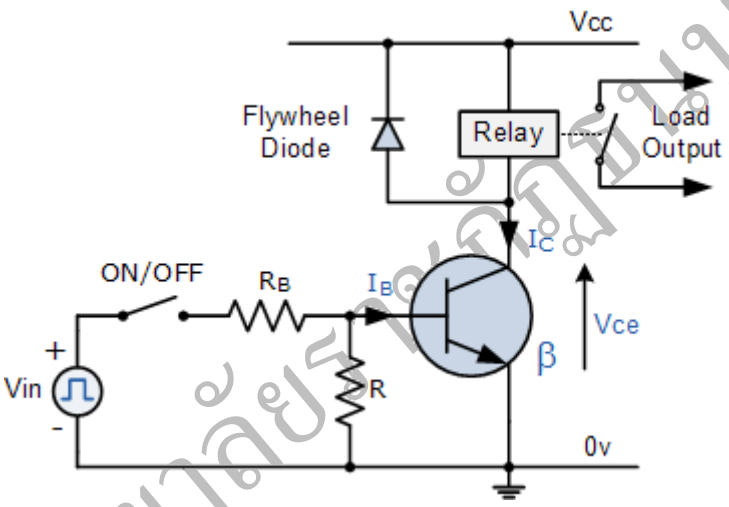
4. ช่วงเวลาไม่นำกระแส (Off Time) คือช่วงเวลาที่ใช้เพื่อให้ค่าของแรงดันเอาต์พุตลดลงจาก 90% ของแหล่งจ่ายแรงดัน (V_{CC}) มาที่ 0 โวลต์ ซึ่งเวลาที่ไม่นำกระแส (t_{off}) จะประกอบด้วยช่วงเวลาย่อย 3 ส่วนคือ

- ช่วงเวลาสะสม (Storage Time) คือขณะเมื่อสัญญาณทางอินพุตอยู่ในช่วงไม่นำกระแสแล้ว แต่สัญญาณทางเอาต์พุตยังคงอยู่ในช่วงนำกระแส ซึ่งช่วงเวลาสะสมนี้จะมีระดับแรงดันเอาต์พุต ลดลงมาที่ 90% ของแหล่งจ่ายแรงดัน(V_{CC}) ใช้อักษรตัวย่อ คือ "t_S"

- ช่วงเวลาไต่ลง (Fall Time) คือ ช่วงเวลาที่แรงดันเอาต์พุตมีระดับลดลงจาก 90% มาที่ 10% ของแหล่งจ่ายแรงดัน (V_{CC}) ซึ่งต่อจากช่วงเวลาสะสม ใช้อักษรตัวย่อ คือ "t_f")

- ช่วงเวลาประวิง (Delay Time) คือ ช่วงเวลาที่ต่อจากช่วงเวลาลงจากระดับแรงดันเอาต์พุตที่ 10% ของแหล่งจ่ายแรงดัน (V_{CC}) มาที่ระดับ 0 เพื่อให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะไม่ทำงานอย่างสมบูรณ์ ใช้อักษรตัวย่อ คือ "t_d"

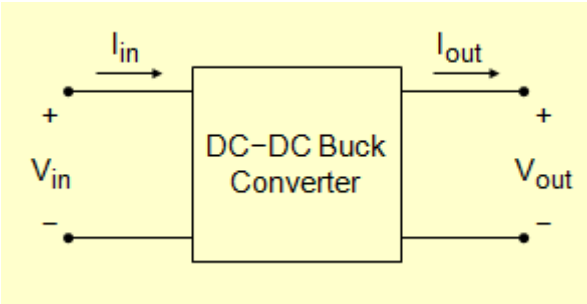
∴ช่วงเวลาไม่นำกระแส (t_{off}) = $t_s + t_f + t_d$



ภาพที่ 2.39 วงจรสวิตช์ทรานซิสเตอร์ขณะเปิดวงจร

วงจรคอนเวอร์เตอร์

วงจรคอนเวอร์เตอร์มีหลายลักษณะขึ้นอยู่กับการต่อใช้งาน แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงในส่วนของคอนเวอร์เตอร์แบบลดทอนแรงดันลง และอาศัยข้อดีของการออสซิลเลต (Oscillation) วงจร L-C ในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการสวิตช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์



ภาพที่ 2.40 วงจรลดทอนแรงดัน ที่มา (Hart, 1997. 339)

มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

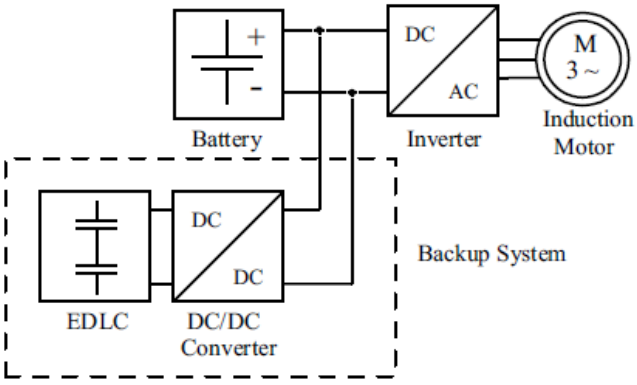
วงจรลดทอนแรงดันลง (Buck Converter) หรือ วงจร Step down converter เป็นวงจรที่ลดแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำลงเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน โครงสร้างของวงจรจะประกอบด้วยสวิทช์ที่สามารถสั่งให้ "ON" หรือ "OFF" ได้ทุกขณะตามความต้องการในทางปฏิบัติสวิทช์ที่ใช้ในวงจรจริงคืออุปกรณ์สวิทช์ชิ่งเช่น BJT, MOSFET นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่นๆอีกเช่น Condenser , Inductance และ Diode เป็นต้น

หลักการทำงานของวงจร Buck Converter

เพื่อที่จะออกแบบให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกตามที่ต้องการ คือ ต้องเริ่มจากที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลามีค่าเท่ากับศูนย์จากนั้นจะสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้การ วิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมดจะต้องวิเคราะห์ในสภาวะอยู่ตัว

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้กับระบบจัดเก็บพลังงานขนาดเล็กเช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาหรือเครื่องสำรองไฟ (UPS) การใช้งานร่วมกันกับแบตเตอรี่ การใช้งานกับยานพาหนะเป็นต้น บนพื้นฐานระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าในภาพที่ 2.41 ประกอบไปด้วยแบตเตอรี่ 24 V, อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าและมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม BBS จะเชื่อมต่อกับการเชื่อมโยง DC ผ่านทาง DC / DC converter ระบบไฟฟ้าสูงสุดคือ 5 kW โครงสร้างของการวิเคราะห์ที่นำเสนอนี้จะถูกอธิบายไว้ด้านล่าง



ภาพที่ 2.41 ระบบขับเคลื่อนรถยกรวมถึงระบบแบตเตอรี่สำรอง
(Jens C., Schroeder, Bjoern Wittig, Friedrich W. Fuchs., 2010.)

ระดับแรงดันของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์

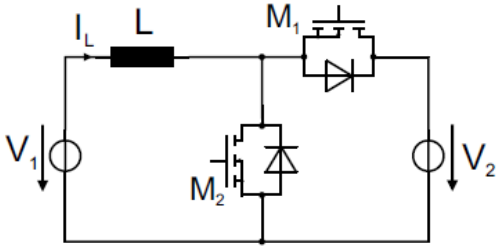
การเลือกช่วงแรงดันไฟฟ้าสำหรับซุปเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นหนึ่งในประเด็นสำคัญในการสำรวจนี้ ระดับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการแปลงที่เหมาะสมรวมทั้งขนาดขององค์ประกอบ แรงดันไฟฟ้าของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ (V_{SC}) จะต้องเกี่ยวข้องกับอย่างใดอย่างหนึ่งตามลำดับในการใช้ประโยชน์ดังนี้

A: $V_{SC} < V_{Bat}$

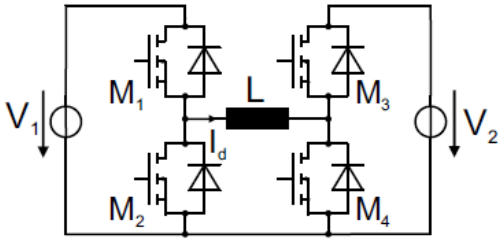
B: $V_{SC(min)} < V_{Bat} < V_{SC(max)}$

C: $V_{SC} > V_{Bat}$

ในการตรวจสอบข้อเท็จจริงต่อไปนี้ converter ปรับเปลี่ยนถูกเลือกสำหรับแต่ละกรณี Converter แบบสองทิศทางซึ่งจะแสดงในภาพที่ 2.42 จะถูกนำมาใช้ในการใช้งานต่างๆในกรณีนี้เพราะความเรียบง่ายและจำนวนชิ้นส่วนที่ต่ำ โครงสร้างเดียวกันที่เชื่อมต่อในทิศทางที่แตกต่างกันสามารถนำมาใช้สำหรับ C



ภาพที่ 2.42 Bidirectional boost converter



ภาพที่ 2.43 Bidirectional non inverting buck-boost converter
(Jens C., Schroeder, Bjoern Wittig, Friedrich W. Fuchs., 2010.)

Converter ที่มีประสิทธิภาพได้จากการวัดโดย (Dewetron Dewe, 2010) และ ประสิทธิภาพรวมถึงการสูญเสียในส่วนประกอบ converter (MOSFETs, inductor) แต่ไม่สูญเสียในซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ในช่วงระยะเวลา freewheeling ของไดโอด สัญญาณเกตบวกถูกนำมาใช้ในการขับแรงดันของไดโอด [20] ที่มีคุณสมบัติสองอย่างในโหมดการทำงานแต่ละแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ แรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ ประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วยการลดแรงดันไฟฟ้าที่ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ เนื่องจากการสูญเสียในสวิตช์ ซึ่งได้แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมประสิทธิภาพในโหมด buckจะมากกว่าโหมด boost เพราะว่าการสูญเสียจาก AC สูง ในตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งสาเหตุเกิดจากการกระแสกระเพื่อมสูงขึ้นในโหมด boost ความสามารถในการรองรับแบตเตอรี่ในรถที่มีการแสดงในภาพที่ 2.41 แรงดันแบตเตอรี่จะถูกเก็บไว้คงที่เกือบจะระหว่างการปฏิรูปการเบรก ในโหมดการเร่งความเร็วกระแสแบตเตอรี่ไม่เกินค่าที่กำหนดไว้จากจุดกระแสแบตเตอรี่นี้และทำให้แรงดันไฟฟ้าอยู่คงที่และระบบการสำรองให้โหลดด้วยพลังที่ยังคงค้างอยู่

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบไฟสำรองข้อมูลคอมพิวเตอร์ขนาด 500 โวลต์แอมป์ โดยใช้ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ที่ผู้วิจัยได้ศึกษาและควรกล่าวถึงมีดังนี้

Xuehuan Jiang. และคณะ. (2013). งานวิจัยเรื่อง “The Analysis of Ultracapacitor Charging Efficiency” ได้นำเสนอทฤษฎีการชาร์จซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ ให้มีประสิทธิภาพการชาร์จของกระแสและแรงดันคงที่ การศึกษาประสิทธิภาพการชาร์จ ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในขณะนั้น วิธีการชาร์จที่แตกต่างกันของ ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ เป็นการทดสอบที่กระแสค่าต่างกัน โดยการวิเคราะห์

ข้อมูลการทดสอบความสมบูรณ์ มีการยืนยันความจริงโดยการเปรียบเทียบผลการทดสอบและวิเคราะห์จากทฤษฎี สุดท้ายจะได้วิธีการชาร์จที่ดีที่สุดสำหรับ ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ การดำเนินศึกษารายละเอียดการชาร์จซุปเปอร์คาปาซิเตอร์เพียงหนึ่งตัว ผลที่ได้สามารถนำมาใช้สำหรับการออกแบบอุปกรณ์ชาร์จ และ เพิ่มเติมการชาร์จในหลักการพื้นฐานการต่ออนุกรมและขนานสำหรับงานวิจัย สำหรับซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มีการชาร์จหลายวิธี เช่นชาร์จพลังงานคงที่ การชาร์จแบบพัลส์ และอื่น ๆ มีวิธีการชาร์จมากมายที่จะได้รับการศึกษาการทำงานในอนาคต

Dong-Hoon Hwang, และคณะ. (2011). งานวิจัยเรื่อง “A Study on the Lifetime Comparison for Electric Double Layer Capacitors Using Accelerated Degradation Test” ได้นำเสนอการดำเนินการเปรียบเทียบอายุการใช้งานสำหรับผลิตภัณฑ์ (แรงดันไฟฟ้า: 2.5V และ 2.7V, ความจุ: 100F) จากผู้ผลิตซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ 8 ราย โดยใช้การทดสอบการสลายตัวเร่ง (ADT) ที่เป็นที่นิยมใช้คาดการณ์อายุการใช้งานของชิ้นส่วนที่เกิดจากความล้มเหลวของการสลายตัวเมื่อเวลาผ่านไป ADT ได้ดำเนินการที่สภาวะการทดสอบเร่งต่างๆ (50 °C, 60 °C, 70 °C) มีแรงดันไฟฟ้าลอยตัวคงที่และวัฏจักรการชาร์จ / ดิสชาร์จอย่างรวดเร็ว) อันเป็นผลมาจาก ADT ที่เราได้รับข้อมูลการย่อยสลายที่สภาวะการทดสอบต่างๆ และพัฒนารูปแบบการเร่งโดยใช้ข้อมูลการย่อยสลาย แล้วเราประมาณการว่าอายุการใช้งาน (อายุ B10 และ MTTF) ของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่สภาวะการใช้งานปกติ การพัฒนารูปแบบการเร่งและเปรียบเทียบอายุการใช้งานผลิตภัณฑ์จาก 8 ผู้ผลิตใน การทดสอบเร่งการย่อยสลายที่สภาวะการทดสอบต่างๆ เร่งดำเนินการเพื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานสำหรับผลิตภัณฑ์ของ 8 ผู้ผลิต ช่วงเวลาล้มเหลวใช้รูปแบบการย่อยสลายและคาดการณ์อายุการใช้งานในสภาพการใช้งานตามปกติโดยใช้การกระจายแบบ Weibull และความสัมพันธ์ประมาณการ Arrhenius บนพื้นฐานการประมาณค่าอายุการใช้งานภายใต้สภาพการใช้งานปกติสามารถเลือกที่ดีที่สุดของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์

Rares Bodnar. และคณะ, (2011). งานวิจัยเรื่อง “A 250W/30A Fast Charger for Ultracapacitors with Direct Mains Connection” ได้นำเสนอรูปแบบการชาร์จอย่างรวดเร็วและขนาดกะทัดรัดของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ต่อตรงกับแหล่งจ่าย 230VAC เครื่องชาร์จจะได้เอาพุทออกมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะช่วยชดเชยสำหรับการเหนี่ยวนำและพฤติกรรมอื่น ๆ ที่ไม่เหมาะสมในซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ ที่ความถี่กลางและความถี่สูง ภายในคอนเวอร์เตอร์จะใช้วงจรควบคุมการแกร่งไปมาในตัวเอง ซึ่งเปลี่ยนแปลงความถี่สวิตชิ่งได้ในช่วงกว้าง นี้จะช่วยให้วงจรปรับให้เข้ากับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท (0 - 16.2V) และความผันผวนของเครือข่ายไฟฟ้าหลัก ด้วยเหตุนี้จะช่วยลดการสูญเสียมากกว่าการทำงานของเครื่องชาร์จทั่วไปและประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

Hammar A, และคณะ. (2010). งานวิจัยเรื่อง “Study of Accelerated Aging of Supercapacitors for Transport Applications” ได้นำเสนอระบบการจัดเก็บพลังงานที่เป็นพื้นฐานอย่างเช่นใน ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ ในบทความนี้จะนำเสนอการศึกษาพฤติกรรมภายใต้ข้อจำกัดที่คล้ายคลึงกับการใช้งานในระบบไฟฟ้าและรถไฟลาก เราจะกำหนดโปรโตคอลการตรวจวัดที่เพียงพอสำหรับการเร่งอายุที่นำมาใช้กับ ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยสองอย่าง:ผลของกระแสและอุณหภูมิ เราจำลองซุปเปอร์คาปาซิเตอร์สำหรับสถานะที่แตกต่างกันของความแข็งแรง การสร้างแบบจำลองช่วยให้ประมาณการที่ดีของความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่สถานะที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นถึงช่วงการใช้งานโดยทั่วไปของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์และจะอภิปรายเกี่ยวกับวัฏจักรการใช้งานของมัน รูปแบบที่ใช้สำหรับซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ความทนทานยังคงใช้ได้กับซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่เก่าแก่ ดังนั้นจึงควรได้รับการพิจารณาว่าเป็นส่วนหนึ่งของขั้วไฟฟ้าไม่

สามารถเข้าถึงได้อย่างสมบูรณ์และไม่ได้มีส่วนร่วมในการจัดเก็บพลังงาน การเพิ่มขึ้นของความต้านทานของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ในระหว่างเสื่อมก่อนวัยจึงทำให้ความจุลดลงเนื่องจากการสูญเสียของพื้นผิวที่สามารถเข้าถึงได้โดยอิเล็กโทรไลต์และการสลายตัวของอิเล็กโทรไลต์ซึ่งจะสร้างการกระจายใหม่ได้ง่ายและผุพังได้ง่าย ผลลัพธ์ที่น่าพอใจและก่อให้เกิดวิวัฒนาการของพารามิเตอร์ของ ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ในระหว่างรอบการใช้งาน นอกจากนี้เรายังสามารถทราบความต้านทานอนุกรม R_s และความต้านทานของรูพรุนเล็กๆ R_{eli} สามารถเป็นตัวบ่งชี้ที่เชื่อถือได้สำหรับความแข็งแรงของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์สุดท้ายเพื่อการทำความเข้าใจธรรมชาติกับปรากฏการณ์ที่สังเกตได้และการตรวจสอบข้อสงสัยเกี่ยวกับบทบาทเริ่มแรกของการเกิดออกซิเดชันอิสระในการเสื่อมของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ควรทำการวิเคราะห์เกี่ยวกับเคมีและฟิสิกส์

Jens C. Schroeder, และคณะ. (2010) งานวิจัยเรื่อง “High Efficient Battery Backup System for Lift Trucks Using Interleaved-Converter and Increased EDLC Voltage Range” ได้ทำการศึกษา ประสิทธิภาพสูงสุดในยานพาหนะไฟฟ้าและเพิ่มอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ใช้ฉุด, ระบบแบตเตอรี่สำรองที่ใช้ ในบทความนี้เป็นการตรวจสอบระบบสำหรับรถยกไฟฟ้ากับระบบขับเคลื่อนรถยกประกอบด้วยซุปเปอร์คาปาซิเตอร์และตัวแปลง DC/DC เริ่มแรกแรงดันไฟฟ้าที่ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มีการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ ตัวเหนี่ยวนำและ MOSFET เช่นเดียวกับการสูญเสียโอกาส ส่วนใหญ่จะถูกกำหนดช่วง ดังนั้นประสิทธิภาพสูงใน DC/DC converter ได้รับการออกแบบและมีประโยชน์กับ converter หนึ่งเฟส การออกแบบที่มีประสิทธิภาพกับระบบการสำรองแบตเตอรี่ที่ดีที่สุดได้นำเสนอ การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีบ่งชี้ช่วงที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุด EDLC กว่าแรงดันแบตเตอรี่เป็นตัวเลือกแนวทางนี้มากที่สุดในระบบเครื่องยนต์รถยก ช่วงนี้ส่งผลใน Converter boost แบบสองทิศทางเนื่องจากมีความง่ายและมีประสิทธิภาพสูง จะได้รับการตรวจสอบว่าการดำเนินงานน้อยมาก โครงสร้างนี้ให้ได้เปรียบในการลดกระแสกระเพื่อม ลดขนาดตัวเหนี่ยวนำในกระแสและลด EDLC RMS กระแสระบบที่นำเสนอประกอบด้วยโมดูล EDLC และ Three phase Interleaved - Converter Buck-boost ถูกสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ แสดงการวัดที่มีประสิทธิภาพสูงถึง 98% ในช่วงที่กำลังดำเนินการ ในเทียบเท่ารถสร้างขึ้น ประโยชน์ของระบบการสำรองที่มีการแสดงโดยวิธีการของแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ การเปลี่ยนแปลงภายในวงจรโหลดที่น้อยที่สุดแม้ในการเร่งความเร็วและการนำพลังงานกับมาใช้ใหม่จากการเบรก ดังนั้นการฉุดกระชากจากแบตเตอรี่จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

Katsuhiro Hata, และคณะ. (2010). งานวิจัยเรื่อง “A Series or Parallel Changeover System Using Battery with EDLC for EV” ได้นำเสนอวิธีการต่อรวมกันของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ในรถยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก (Electric Vehicle, EV) ในการศึกษาล่าสุดของ EV ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ถูกนำมาใช้ ในระบบจัดเก็บข้อมูลการใช้พลังงาน ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน โดยทั่วไปการต่อรวมกันของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ ประกอบด้วยเซลล์จำนวนมากเพราะเซลล์แรงดันไฟฟ้าต่อรวมกันของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มีขนาดเล็กมาก เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ ที่มีแรงดันไฟในระบบมอเตอร์ ในทางกลับกัน EV ขนาดเล็ก ไม่สามารถ ติดตั้ง กับการต่อรวมกัน ขนาดซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มีขนาดใหญ่เนื่องจาก ข้อ จำกัด ของค่าใช้จ่ายและพื้นที่ ดังนั้น พลังงานระบบจัดเก็บข้อมูลความต้องการการต่อรวมกันของ ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดเล็ก มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยปกติแล้วระบบ ทั่วไปของ EV ไม่สามารถใช้แรงดันไฟฟ้า เต็มรูปแบบของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์เพราะช่วงที่แรงดันไฟฟ้า ถูกจำกัด ด้วยอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้า ขั้นตอน ระหว่างรถบัสซี และสถานีของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ในสองทิศทาง DC / DC converter ในบทความนี้ เนื่องจากมีการปรับปรุงช่วงที่แรงดัน

การดำเนินงานของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ ชุดหรือระบบการเปลี่ยนแปลง ใช้แบตเตอรี่ขนานกับซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ นอกจากนี้การจำลอง และผลการทดลอง นั้นจะมีการตรวจสอบว่าระบบที่นำเสนอสามารถขยายช่วงแรงดัน การดำเนินงานของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ เป็นผลให้ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดเล็กของเซลล์ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ไม่กี่อัน จะถูกนำมาใช้สำหรับ EV ขนาดเล็ก เป็นระบบพลังงานสำรอง ข้อคิดเห็นของระบบการเปลี่ยนจากแบตเตอรี่ ไปเป็นระบบซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ต่อแบบอนุกรมหรือต่อแบบขนานสำหรับยานพาหนะขนาดเล็ก EV ระบบที่นำเสนอช่วยให้การเชื่อมต่อแบตเตอรี่และซุปเปอร์คาปาซิเตอร์bank ที่ต่อแบบอนุกรมหรือต่อแบบขนาน โหมดการขับเคลื่อนโดยการต่อชุดของแบตเตอรี่และ SC bank สามารถให้ SC EV ที่มีอำนาจให้ความช่วยเหลือถึงแม้ว่าแรงดัน SC bank ต่ำกว่าข้อจำกัดของ boost conversion เป็นผลให้ระบบที่นำเสนอสามารถเพิ่มช่วงแรงดันการดำเนินงานของ SC bank ได้

Mirzaei A, และคณะ. (2010). งานวิจัยเรื่อง “Analysis and Design of a High Efficiency Bidirectional DC-DC Converter for Battery and Ultracapacitor Applications” ได้อธิบายถึงคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางประสิทธิภาพสูงที่ไม่แยกกัน ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นวงจรเชื่อมต่อระหว่างซุปเปอร์คาปาซิเตอร์หรือแบตเตอรี่ร่วมกับรถบัส DC อุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ทั้งหมดในคอนเวอร์เตอร์เป็นแบบสวิตช์นุ่มนวล (soft switched) ขณะที่วงจรควบคุมด้วย PWM ดังนั้นการเปลี่ยนพลังงานผ่านคอนเวอร์เตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง ในขณะแปลงแรงดันลงแบบแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ (Zero-voltage transition; ZVT Buck Converter) ชาร์จให้แบตเตอรี่หรือซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ ในขณะที่ทำหน้าที่เป็น Boost ZVT จะดิสชาร์จให้กับ แบตเตอรี่หรือซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ ประสิทธิภาพการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอได้รับการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม PSPICE ผลที่ได้ยืนยันถึงข้อได้เปรียบดังกล่าวข้างต้นและมีคุณลักษณะเฉพาะของคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอ

Tomoshige Inoue, Hirotaka Koizumi. (2009). งานวิจัยเรื่อง “A Voltage Equalizer Applying a Charge Pump for Energy Storage Systems” ได้นำเสนอระบบต่างๆที่ปรับแต่งแรงดันไฟฟ้าเพื่อประยุกต์ใช้งานทำให้แรงดันไฟฟ้าสมดุล ทำให้เป็นที่ยอมรับโดยมีสิ่งตีพิมพ์ซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ในบทความนี้เสนอเป็นสิ่งใหม่ (novel) เซลล์แรงดันไฟฟ้า ซึ่งต่อซุปเปอร์คาปาซิเตอร์อนุกรมกันสำหรับระบบจัดเก็บพลังงาน การเสนอการปรับแต่งแรงดันไฟฟ้าประกอบด้วยสวิตช์แบบสองทิศทาง (Bidirectional Switch) ที่ต่อซุปเปอร์คาปาซิเตอร์อนุกรมกัน ในหลักการนี้จะนำเสนอการปรับแต่งแรงดันไฟฟ้าที่ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์แต่ละอันให้เกิดสมดุลแรงดัน สมรรถนะของการปรับแต่งแรงดันจะยืนยันด้วยการสร้างสถานการณ์จำลอง (MATLAB/Simulink simulation) และการทดลองวงจร การนำเสนอวิธีใหม่ของการปรับคาแรงดันอยู่บนพื้นฐานของ Cockcroft-Walton voltage multiplier แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการทำเซลล์แรงดันให้เท่ากัน การนำเสนอวงจรจากการจำลองสถานการณ์และการทดลองวงจร ปัญหาจากการปรับค่าแรงดันธรรมดาจะถูกแก้ไขโดยวิธีที่นำเสนอซึ่งไม่มีองค์ประกอบของความต้านทานไม่ก่อให้เกิดความร้อน

Jisheng Hu, และคณะ. (2008). งานวิจัยเรื่อง “The design of regeneration braking system in light rail vehicle using energy-storage Ultra-capacitor” ได้อธิบายความจำเป็นของการใช้พลังงานที่เก็บสะสมไว้ช่วงชะลอตัวหรือช่วงเบรกเพื่อให้สามารถนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ได้ (Regeneration Braking) ดังนั้นบทความนี้ได้ทำให้ระบบเบรกที่สามารถนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ได้โดยใช้ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ เป็นองค์ประกอบในการจัดเก็บพลังงาน ระบบนี้จะใช้ Converter แบบสองทิศทางระหว่างซุปเปอร์คาปาซิเตอร์กับ DC link inverter เพื่อให้แน่ใจว่าตัวเก็บประจุสามารถเก็บ

พลังงานที่ได้จากระบบเบรกที่สามารถเก็บพลังงานไว้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เมื่อระบบเบรกทั่วไปไม่สามารถเก็บพลังงานแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และให้พลังงานที่จะดึงกระแสไฟฟ้าและเชื่อมโยงด้วยไฟ VDC เมื่อยานพาหนะกำลังทำงานในสถานะลากดึง ในกรณีนี้ก็สามารถมั่นใจได้ว่ารถไฟสามารถทำให้เป็นจริงจากการเบรกที่นำกลับมาใช้ใหม่ในการเบรกธรรมดาและรถไฟลดการใช้พลังงานได้อย่างชัดเจน ในการเสนอเมื่อรถไฟรางพลังงานไฟฟ้าถูกนำมาใช้เป็นหลักในการเพิ่มพลังงานจลน์ในรถไฟและเป็นส่วนหนึ่งของพลังงานที่จะนำกลับมาใช้ แต่อัตราการก่อให้เกิดระบบการเบรกที่สามารถนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ได้มีอยู่ในระดับต่ำมาก การจัดเก็บพลังงานกับระบบเบรกที่สามารถนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งจะเสนอในบทความนี้สามารถเพิ่มอัตราการใช้พลังงานจากการเบรกจาก 20% ~ 80% เป็น 100% และรถไฟรางลดการใช้พลังงานอย่างเห็นได้ชัด ในบทความนี้เทคโนโลยีที่สำคัญที่ใช้ในระบบที่สมบูรณ์ มันมีค่าการใช้งานในโครงการโดยใช้เทคโนโลยีนี้จะได้รับผลกระทบซึ่งการใช้รถไฟรางในการดำเนินการลดพลังงานอย่างเห็นได้ชัด

Luis Zubieta, Richard Boner. (2000). งานวิจัยเรื่อง “Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications” ได้นำเสนอซุปเปอร์คาปาซิเตอร์สำหรับการใช้งานไฟฟ้าถือเป็นอุปกรณ์ใหม่ วงจรสมมูลง่ายๆของความต้านทาน ความจุ (R-C equivalent) ไม่เพียงพอที่จะอธิบายลักษณะการทำงานของแรงดันที่ขั้ว ซึ่งขึ้นอยู่กับเหตุผลทางกายภาพวงจรสมมูลมีการเสนอที่จะให้วิศวกรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ที่มีรูปแบบการทำงานแรงดันที่ขั้ว ของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์รูปแบบวงจรสมมูลประกอบด้วย RC สามสาขา หนึ่งอย่างของพวกเขาที่มีความจุขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า วิธีการที่จะจำแนกแยกแยะพารามิเตอร์วงจรที่จะนำเสนอ การวัดซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ของคาร์บอนที่ใช้สำหรับการใช้งานอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะนำเสนอการวิเคราะห์และการตอบสนองของวงจรสมมูลเปรียบเทียบกับผลการทดลอง แบบการให้ข้อมูลเชิงลึกที่ต้องการลงไปในพฤติกรรมที่ซับซ้อนของขั้วซุปเปอร์คาปาซิเตอร์และให้หมายถึงการศึกษาการประยุกต์ใช้อุปกรณ์จัดเก็บพลังงานไฟฟ้าในวงจรอิเล็กทรอนิกส์และระบบ

จากรายงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าซุปเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถชาร์จพลังงานได้ในเวลาที่รวดเร็ว และชาร์จด้วยปริมาณกระแสสูง ๆ ได้ ซึ่งแบตเตอรี่ไม่สามารถทำได้ และซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ชาร์จด้วยกระแสสูงจะใช้เวลาชาร์จเร็ว เนื่องจากซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มีความจุพลังงานที่สูงมาก โดยงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการใช้ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานเพื่อที่จะใช้สำหรับจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ ในช่วงระบบไฟฟ้าดับ โดยที่ตัวเก็บสะสมพลังงานนี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้มากกว่าหนึ่งล้านวัฏจักร (Ultracapacitor cell integration kit, 2013)

มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร