

รายงานการวิจัยทางวิศวกรรมเครื่องกลของคณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ที่มีต่อสาธารณชนเป็นไปโดยสมบูรณ์และพร้อมสำหรับการสืบค้นข้อมูล

CAPACITOR DETERIORATION, MONITORING AND ANALYSIS IN MULTILEVEL  
MODULAR CAPACITOR CLAMPED DC/DC CONVERTER



รองศาสตราจารย์ ดร. อรุณรัตน์ งามชื่นงาม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2011-EN-M-028-145

ระบบตรวจวัดและวิเคราะห์ค่าความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุในวงจรแปลง  
ผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์

CAPACITOR DETERIORATION MONITORING AND ANALYSIS IN MULTILEVEL  
MODULAR CAPACITOR CLAMPED DC/DC CONVERTER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2554  
KMITL-2011-EN-M-020-145

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CAPACITOR DETERIORATION MONITORING AND ANALYSIS IN MULTILEVEL  
MODULAR CAPACITOR CLAMPED DC/DC CONVERTER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2011  
KMUTL-2011-EN-M-020-145

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2011

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

---

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ระบบตรวจวัดและวิเคราะห์ค่าความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์

Thesis Title Capacitor Deterioration Monitoring and Analysis in Multilevel Modolar Capacitor Clamped DC/DC Converter

นักศึกษา นายปรกากร อินทพัฒน์

รหัสประจำตัว 52610415

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์(ร่วม) รศ.ประภาช ไพรสวรรณา

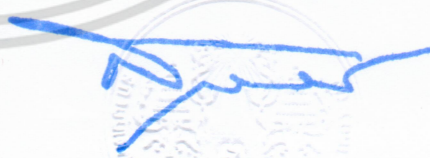
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2011-EN-M-020-145

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ	
ดร.ชัยยันต์	เจตนาเสน	
รศ.ดร.ไพบุลย์	นาคมหาชาสินธุ์	
รศ.ประภาช	ไพรสวรรณา	
ผศ.ดร.สุรินทร์	คำฝอย	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2554 เวลา 10.30-12.00 น.  
สถานที่สอบ ณ ตึก ECC ห้อง ECC-401

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)  
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
วันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ระบบตรวจวัดและวิเคราะห์ค่าความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์

นักศึกษา

นาย ปรภากร อินทพัฒน์

รหัสประจำตัว

52610415

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2554

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร. สุรินทร์ คำฝอย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รศ. ประภาฯ ไพรสุวรรณนา

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบตรวจวัดและวิเคราะห์ค่าความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์ ( $M^2C^3$ ) วงจร  $M^2C^3$  ที่นำเสนอมีความสามารถในการผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้หลายระดับเปรียบเสมือนหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยอาศัยตัวเก็บประจุที่ทำงานร่วมกับอุปกรณ์สวิตซ์กำลังเพื่อผลิตแรงดันไฟฟ้าตามหลักการอัดประจุและคายประจุแบบสมดุลง แต่อย่างไรก็ตามตัวเก็บประจุแต่ละตัวในวงจรจะมีค่าความเสื่อมสภาพที่ไม่เท่ากันเพราะตัวเก็บประจุจะทำงานในระดับแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ในการตรวจวัดค่าความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุแบบดั้งเดิมจำเป็นต้องใช้ตัวตรวจวัดจำนวนมากต่อตัวเก็บประจุหนึ่งตัว ด้วยเหตุนี้เองในงานวิจัยจึงได้สร้างระบบการตรวจวัดค่าความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุด้วยการใช้ตัวตรวจวัดเพียงตัวเดียว วิธีการที่ได้เลือกใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดเทียมคือ PCR (Principal Component Regression) จากการทดสอบระบบพบว่าสามารถตรวจวัดค่าความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุได้เป็นที่น่าพอใจและสามารถลดจำนวนการใช้ตัวตรวจวัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ค่าความสูญเสียรวมของตัวเก็บประจุทั้งหมดในวงจร  $M^2C^3$  ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าตัวเก็บประจุ  $C_1$  ส่งผลกระทบต่อให้เกิดค่าความสูญเสียรวมภายในตัวเก็บประจุมากที่สุด ดังนั้นตัวเก็บประจุ  $C_1$  จึงควรได้รับการแก้ไขปัญหาย่างรวดเร็วเมื่อถูกระบบตรวจพบทำงานอยู่ภายใต้สภาวะไม่ปกติ เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นต่อวงจร  $M^2C^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	CAPACITOR DETERIORATION MONITORING AND ANALYSIS IN MULTILEVEL MODULAR CAPACITOR CLAMPED DC/DC CONVERTER
Student	Mr. Prakarn Intrapath
Student ID.	52610415
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2554
Thesis advisor	Asst. Prof. Dr. Surin Khomfoi
Thesis Co - Advisor	Assoc. Prof. Prapart Prisuwan

## ABSTRACT

Capacitor deterioration monitoring and analysis in multilevel modular capacitor clamped dc to dc converter ( $M^2C^3$ ) are proposed in this thesis. The proposed  $M^2C^3$  can supply a multilevel dc output voltage as a dc transformer function by using capacitors and power switches together with a method of charge and discharge balance. However, each capacitor deterioration is somehow various; capacitor operating difference level voltage and current. Generally, the original monitoring capacitor deterioration uses several sensors per one capacitor. Therefore, the developed technique can monitor the capacitor deterioration using the artificial sensor. The artificial sensors are created by using PCR (Principal Component Regression) method. The results show that the developed system can reduce the number of sensors and has the satisfactory classification performance. In addition, the loss analysis in  $M^2C^3$  is also performed. The result also illustrates that the capacitor  $C_1$  has the most impact in the loss of the  $M^2C^3$ ; thereupon, the  $C_1$  is required to detect as soon as possible if the  $C_1$  is operating under abnormal condition in order to protect the further damage of the  $M^2C^3$ .

# กิตติกรรมประกาศ

ตลอดระยะเวลากว่า 6 ปีที่ผ่านมา ผมได้เข้ารับการศึกษาด้าน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีบุคคลหลายๆท่านที่ผมขอขอบคุณจากใจจริงสำหรับการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี บุคคลที่ผมขอขอบคุณด้วยความเคารพและนับถืออย่างสูงคือ ผศ.ดร. สุรินทร์ คำฝอย รศ. ประภาส ไพรสวรรณา และ ดร. วรชาติ แซ่ก๊ก ที่ให้โอกาสในการทำงานวิจัยรวมทั้งให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาของงานวิจัยนี้ อย่างมีระเบียบแบบแผน

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ ผศ.ดร. สุรินทร์ คำฝอย รศ. ประภาส ไพรสวรรณา ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน และ รศ.ดร.ไพบุลย์ นาคมหาชาสินธุ์ ที่ให้คำแนะนำที่มีค่าและเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์ นอกจากนี้คณะบุคคลที่ผมขอขอบคุณด้วยความเคารพและนับถืออย่างสูงคืออาจารย์ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้คุณธรรม ตลอดจนได้รับการอบรมสั่งสอนให้มีทักษะและจรรยาบรรณในการประกอบวิชาชีพ ที่ทำให้ผมสามารถเติบโตเป็นวิศวกรไฟฟ้าที่ดีต่อไปได้ในอนาคต

ขอขอบคุณเพื่อนๆและน้องๆที่ REAL LAB ทุกคนที่คอยให้กำลังใจและความสนุกสนาน เพลิดเพลินในระหว่างการทำงาน ขอขอบคุณ นาย อภิวัฒน์ อินทพัฒน์ น้องชายสุดที่รักของผมที่คอยให้กำลังใจในการทำงานวิจัยและให้คำปรึกษาปัญหาในด้านต่างๆ ขอขอบคุณตัวเองที่สามารถสร้างแรงบันดาลใจในการแก้ปัญหาและอุปสรรคที่ผ่านเข้ามาในชีวิตเพื่อนำประสบการณ์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับปัญหาและอุปสรรคต่างๆที่อาจเกิดขึ้นต่อไปในอนาคตให้ผ่านพ้นไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณสิ่งดีๆที่ผ่านเข้ามาในชีวิตและขอขอบคุณอุปสรรคที่ทำให้ผมเข้มแข็ง

ท้ายสุดนี้ผมขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาด้วยความเคารพรักและความกตัญญูตเวทีคือ นาย นิกร อินทพัฒน์ และ นาง ปิ่นมณี อินทพัฒน์ ที่เป็นพรหมของลูกทุกคน ซึ่งคอยให้กำลังใจในการทำงานและให้คำปรึกษาปัญหาในทุกๆด้าน รวมถึงได้รับการอบรมสั่งสอนที่มีคุณค่าอย่างยิ่งเพื่อที่จะทำให้ผมเป็นคนดีของสังคม

ปราการ อินทพัฒน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อ||อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์.....	3
1.3 การตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุ.....	4
1.4 เทคนิคการสร้างแบบจำลองการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุ.....	6
1.5 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	9
1.6 ขอบเขตของการวิจัย.....	9
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	9
1.8 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	10
1.9 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	11
บทที่ 2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ.....	12
2.1 บทนำ.....	12
2.2 การพัฒนาวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ.....	12
2.3 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดไฟร์อิงค์คาปาซิเตอร์ (Flying Capacitor Multilevel DC-DC Converter หรือ FCMDC).....	12
2.4 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์ (Switched Capacitor Multilevel DC-DC Converter).....	15
2.5 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดเพิ่มแรงดันไฟฟ้า แบบสวิตช์โหมด (Switch Mode Step Up Multilevel DC-DC Converter).....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัด IV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดปราศจากวงจรแม่เหล็ก (Magnetic Less Multilevel DC-DC Converter) .....	18
2.7 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์แบบสองทิศทาง (Switched Capacitor Bidirectional DC-DC Converter) .....	19
2.8 สรุป .....	21
บทที่ 3 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์ .....	24
3.1 บทนำ .....	24
3.2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์ .....	24
3.3 หลักการควบคุมการทำงานของวงจร $M^2C^3$ .....	25
3.4 ทิศทางการโอนย้ายพลังงานของวงจร $M^2C^3$ .....	25
3.4.1 ทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำของวงจร $M^2C^3$ ..	26
3.4.2 ทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูงของวงจร $M^2C^3$ ..	30
3.5 การบายพาสความผิดพลาดของวงจร $M^2C^3$ .....	34
3.6 การวิเคราะห์ค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในวงจร $M^2C^3$ .....	36
3.6.1 วงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ .....	36
3.6.2 วงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง .....	53
3.7 สรุป .....	62
บทที่ 4 การหาค่าตัวแปรของตัวเก็บประจุ .....	63
4.1 บทนำ .....	63
4.2 การสร้างแบบจำลองเพื่อหาค่าตัวแปรของตัวเก็บประจุ .....	63
4.3 การหาค่าตัวแปรด้วยวิธีสร้างแบบจำลองร่วมกับโครงสร้างทางกายภาพของตัวเก็บประจุ .....	65
4.4 การหาค่าตัวแปรด้วยวิธีการสร้างฟังก์ชันการทำงานของตัวเก็บประจุ .....	68
4.5 การหาค่าตัวแปรด้วยวิธีแปลง FFT ของค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ .....	70
4.6 สรุป .....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อVอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 เทคนิคการตรวจวัดและวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพ ของตัวเก็บประจุ.....	74
5.1 บทนำ .....	74
5.2 การสร้างแบบจำลองเพื่อตรวจวัดสภาวะการทำงานของตัวเก็บประจุ .....	74
5.3 การค้นหาคุณลักษณะเด่นของระบบ (Feature Extraction System) .....	74
5.4 การเก็บข้อมูล (Data Set Collection).....	79
5.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis).....	81
5.6 การสร้างตัวตรวจวัดเทียม (Artificial Sensor Construction).....	85
5.7 การทดสอบแบบจำลองการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุ.....	87
5.8 การควบคุมวงจร $M^2C^3$ ภายใต้สภาวะตัวเก็บประจุทำงานอยู่ในสภาวะไม่ปกติ .....	96
5.9 สรุป .....	101
บทที่ 6 การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบของวงจร $M^2C^3$ .....	102
6.1 บทนำ .....	102
6.2 วงจรควบคุม.....	103
6.3 วงจรกำลัง .....	105
6.4 สรุป.....	109
บทที่ 7 ผลการจำลองการทำงานและการทดสอบ.....	110
7.1 บทนำ .....	110
7.2 ขั้นตอนการเตรียมการทดลอง.....	110
7.3 การทดสอบความสามารถในการโอนย้ายพลังงานแบบ 2 ทิศทางของวงจร $M^2C^3$ .....	113
7.3.1 การทดสอบวงจร $M^2C^3$ ขณะที่มีทิศทางการโอนย้ายพลังงานจาก บัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ.....	113
7.3.2 การทดสอบวงจร $M^2C^3$ ขณะที่มีทิศทางการโอนย้ายพลังงานจาก บัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง.....	119
7.4 การทดสอบวงจร $M^2C^3$ เมื่อมีตัวเก็บประจุทำงานในสภาวะไม่ปกติ .....	124
7.4.1 การทดสอบการปรับค่าวัฏจักรการทำงานของสัญญาณควบคุม.....	124
7.4.2 การทดสอบการปรับความถี่ของสัญญาณควบคุม.....	132
7.5 สรุป.....	141

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 8 สรุปและข้อเสนอแนะ .....	142
8.1 สรุป .....	142
8.2 ข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางการพัฒนาและต่อยอดงานวิจัยในอนาคต.....	143
บรรณานุกรม .....	145
ภาคผนวก .....	148
บทความวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่.....	148
ประวัติผู้เขียน .....	164



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 จำนวนชุดอุปกรณ์ตรวจวัดทั้งหมดในวงจร $M^2C^3$ 3 ระดับ.....	7
1.2 ข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบให้ตัวเก็บประจุในวงจรค่อยๆเสื่อมสภาพ.....	7
2.1 สถานะการอัดประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ.....	13
2.2 สถานะการอัดประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง.....	13
2.3 สถานะการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดตัวเก็บประจุ สวิตช์แบบสองทิศทาง.....	20
2.4 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง หลายระดับแต่ละชนิด.....	22
3.1 สถานะการอัดประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ.....	28
3.2 สถานะการอัดประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง.....	32
3.3 แรงดันของตัวเก็บประจุเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ..	52
3.4 แรงดันของตัวเก็บประจุเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง..	61
5.1 แรงดันไฟฟ้าของโหนดอ้างอิงในแต่ละช่วงเวลา.....	77
5.2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณแต่ละชุด.....	80
5.3 สถานะการตรวจวัดสถานะการทำงานของตัวเก็บประจุของตัวตรวจวัดเทียบ.....	87
5.4 ผลการทดสอบแบบจำลองในการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุแต่ละตัว.....	96
5.5 ค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่วัฏจักรการทำงาน 50%.....	97
7.1 ขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	113
7.2 พิกัดสูงสุดของวงจร $M^2C^3$ .....	113
7.3 ผลการทดสอบวงจร $M^2C^3$ เมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานจากบัสแรงดันสูงไปยัง บัสแรงดันต่ำ.....	114
7.4 ผลการทดสอบวงจร $M^2C^3$ เมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานจากบัสแรงดันต่ำไปยัง บัสแรงดันสูง.....	120
7.5 สถานะในการทดสอบ.....	125
7.6 ค่าความสูญเสียรวมของตัวเก็บประจุในวงจร $M^2C^3$ .....	132
7.7 ค่าความสูญเสียรวมภายในตัวเก็บประจุทั้งหมดของวงจร $M^2C^3$ เมื่อมีตัวเก็บประจุ ตัวใดตัวหนึ่งทำงานอยู่ในสถานะที่ไม่ปกติ.....	140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล 1 ชุด .....	3
1.2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง 3 ระดับ .....	4
1.3 กระบวนการสร้างแบบจำลองการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุ .....	6
1.4 จุดตรวจวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าในวงจร $M^2C^3$ 3 ระดับ .....	7
2.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดไฟร์อิงค์คาปาซิเตอร์ 3 ระดับ .....	14
2.2 สัญญาณควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง ชนิดไฟร์อิงค์คาปาซิเตอร์ 3 ระดับ .....	14
2.3 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์ 3 ระดับ .....	15
2.4 สัญญาณควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง ชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์ 3 ระดับ .....	15
2.5 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดเพิ่มแรงดันไฟฟ้า แบบสวิตช์โหมด .....	17
2.6 สัญญาณควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ ชนิดเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมด .....	17
2.7 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดปราศจากวงจรแม่เหล็ก 3 ระดับ .....	18
2.8 สัญญาณควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง ชนิดปราศจากวงจรแม่เหล็ก 3 ระดับ .....	19
2.9 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์แบบสองทิศทาง .....	20
2.10 สัญญาณควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง ชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์แบบสองทิศทาง .....	20
2.11 การขนานวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง ชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์แบบสองทิศทาง .....	21
3.1 ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล 1 ชุด .....	25
3.2 วงจร $M^2C^3$ 3 ระดับ .....	25
3.3 ชุดสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิตช์กำลัง .....	26
3.4 การทำงานของวงจรเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ .....	27
3.5 ขั้นตอนการทำงานของตัวเก็บประจุแต่ละตัวเมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ .....	29
3.6 แรงดันไฟฟ้าในแต่ละโหนดเทียบกราวด์เมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ .....	30
3.7 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ .....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 การทำงานของวงจรเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง .....	31
3.9 ขั้นตอนการทำงานของตัวเก็บประจุแต่ละตัวเมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง .....	33
3.10 แรงดันไฟฟ้าในแต่ละโหนดเทียบกราวด์เมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง .....	34
3.11 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง .....	34
3.12 หลักการบายพาสชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล .....	35
3.13 ขั้นตอนการบายพาสความผิดพลาดของวงจร $M^2C^3$ 3 ระดับ .....	35
3.14 ช่วงเวลาการวิเคราะห์วงจร $M^2C^3$ .....	36
3.15 วงจรสมมูลในช่วงเวลาที่ $t_1$ ถึง $t_2$ เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ .....	37
3.16 วงจรสมมูลในช่วงเวลาที่ $t_2$ ถึง $t_3$ เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ .....	40
3.17 วงจรสมมูลในช่วงเวลาที่ $t_3$ ถึง $t_4$ เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ .....	44
3.18 วงจรสมมูลในช่วงเวลาที่ $t_4$ ถึง $t_5$ เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ .....	46
3.19 ช่วงเวลาการวิเคราะห์วงจร $M^2C^3$ .....	54
3.20 วงจรสมมูลในช่วงเวลาที่ $t_1$ ถึง $t_2$ เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง .....	54
3.21 วงจรสมมูลในช่วงเวลาที่ $t_2$ ถึง $t_3$ เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง .....	56
3.22 วงจรสมมูลในช่วงเวลาที่ $t_3$ ถึง $t_4$ เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง .....	57
3.23 วงจรสมมูลในช่วงเวลาที่ $t_4$ ถึง $t_5$ เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า .....	59
4.1 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุ .....	63
4.2 เวกเตอร์ของอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ .....	65
4.3 กระบวนการหาค่าตัวแปรด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองของตัวเก็บประจุ .....	66
4.4 แบบจำลองภายในของตัวเก็บประจุ .....	66
4.5 กระบวนการหาค่าตัวแปรด้วยวิธีการสร้างฟังก์ชันการทำงานของตัวเก็บประจุ .....	69
4.6 กระบวนการหาค่าตัวแปรด้วยวิธีการแปลง FFT ของค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ .....	71

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 แบบจำลองชนิด Heteroassociative .....	75
5.2 กระบวนการสร้างแบบจำลองเพื่อตรวจวัดสถานะการทำงานของตัวเก็บประจุ .....	75
5.3 โหนดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของระบบ .....	76
5.4 แรงดันไฟฟ้าของโหนดอ้างอิงในวงจร $M^2C^3$ .....	76
5.5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าโหนดอ้างอิงของตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่ทำงาน ในสถานะปกติและไม่ปกติ .....	78
5.6 สเปกตรัมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่ทำงานในสถานะปกติและไม่ปกติ .....	79
5.7 ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดแต่ละตัวที่ใช้ตรวจวัดสถานะการทำงานของตัวเก็บประจุ .....	80
5.8 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากโหนดอ้างอิงเมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยกลางของข้อมูล .....	81
5.9 แผนผังการวิเคราะห์ห่อหุ้มประกอบหลัก .....	82
5.10 กราฟข้อมูลของค่าองค์ประกอบหลักแต่ละตัว .....	83
5.11 สัญญาณจากตัวตรวจวัดที่วัดได้จริงและสัญญาณเลียนแบบที่ถูกสร้างขึ้น .....	84
5.12 สัญญาณค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณจากตัวตรวจวัดที่วัดได้จริง และสัญญาณเลียนแบบที่ถูกสร้างขึ้น .....	85
5.13 กระบวนการสร้างสัญญาณอ้างอิงด้วยตัวกรองสัญญาณมัธยฐาน .....	86
5.14 กระบวนการเปรียบเทียบสัญญาณด้วยตัวตรวจวัดเทียม .....	86
5.15 สัญญาณอ้างอิงที่ถูกสร้างขึ้นของตัวเก็บประจุที่ทำงานในสถานะปกติ .....	87
5.16 สัญญาณจากชุดตรวจวัดเทียมเมื่อตัวเก็บประจุทำงานในสถานะปกติขณะมีภาระทางไฟฟ้า .....	88
5.17 สัญญาณจากชุดตรวจวัดเทียมเมื่อ $C_{HV}$ ทำงานในสถานะไม่ปกติขณะมีภาระทางไฟฟ้า .....	88
5.18 สัญญาณจากชุดตรวจวัดเทียมเมื่อ $C_1$ ทำงานในสถานะไม่ปกติขณะมีภาระทางไฟฟ้า .....	89
5.19 สัญญาณจากชุดตรวจวัดเทียมเมื่อ $C_2$ ทำงานในสถานะไม่ปกติขณะมีภาระทางไฟฟ้า .....	90
5.20 แผนผังการแบ่งกลุ่มของข้อมูลด้วยวิธีคูล์และคี่ .....	92
5.21 แผนผังการทำ Zscore .....	92
5.22 แผนผังการแปลง PCA .....	93
5.23 กราฟการแปลง PCA ของข้อมูล .....	94
5.24 แผนผังการทำ PCR .....	95
5.25 แผนผังการตรวจสอบค่าความผิดพลาด .....	95
5.26 กระบวนการอัดประจุของตัวเก็บประจุ $C_x$ และ $C_y$ .....	97
5.27 วงจรการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุของ $M^2C^3$ เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายกำลังไฟฟ้า จากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง .....	100
6.1 แผนผังการทำงานของวงจร $M^2C^3$ .....	102
6.2 ชุดประมวลผล PIC18F4431 สำหรับสร้างสัญญาณควบคุม .....	103
6.3 วงจรขับเคลื่อนของวงจร $M^2C^3$ .....	104
6.4 สัญญาณควบคุมของวงจร $M^2C^3$ .....	105
6.5 วงจร $M^2C^3$ เมื่ออสเฟต SRn ทำงาน .....	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.6	กราฟแสดงค่า ESR ของตัวเก็บประจุที่ได้จากเครื่อง Impedance Gain-Phase Analyzer ... 107
6.7	วงจรการทดสอบสภาวะการทำงานของตัวเก็บประจุ..... 108
6.8	เครื่องต้นแบบของวงจร $M^2C^3$ 3 ระดับ พิกัด 500 W..... 109
7.1	วงจร $M^2C^3$ ที่ใช้ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM 9.0..... 111
7.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ..... 112
7.3	แผนผังของขั้นตอนการเตรียมการทดลอง..... 112
7.4	วงจร $M^2C^3$ ขณะที่มีทิศทางการโอนย้ายพลังงานจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ..... 114
7.5	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง..... 116
7.6	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ $C_{HV}$ ..... 116
7.7	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ $C_1$ ..... 116
7.8	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ $C_2$ ..... 117
7.9	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ $C_{LV}$ ..... 117
7.10	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ ..... 117
7.11	วงจรการเชื่อมต่อเมื่อมอสเฟตแต่ละตัวทำงาน ..... 118
7.12	กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจากวงจรควบคุม ..... 118
7.13	วงจร $M^2C^3$ ขณะที่มีทิศทางการโอนย้ายพลังงานจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง..... 119
7.14	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ ..... 121
7.15	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ $C_{LV}$ ..... 121
7.16	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ $C_2$ ..... 121
7.17	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ $C_1$ ..... 122
7.18	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ $C_{HV}$ ..... 122
7.19	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง ..... 122
7.20	วงจรการเชื่อมต่อเมื่อมอสเฟตแต่ละตัวทำงาน ..... 123
7.21	กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจากวงจรควบคุม ..... 123
7.22	แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเฟืองทางด้านบัสแรงดันต่ำ ที่วัฏจักรการทำงาน 30% ถึง 70% ..... 126
7.23	แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเฟืองของตัวเก็บประจุ $C_{LV}$ ที่วัฏจักรการทำงาน 30% ถึง 70% ..... 127
7.24	แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเฟืองของตัวเก็บประจุ $C_2$ ที่วัฏจักรการทำงาน 30% ถึง 70% ..... 128
7.25	แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเฟืองของตัวเก็บประจุ $C_1$ ที่วัฏจักรการทำงาน 30% ถึง 70% ..... 129
7.26	แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเฟืองของตัวเก็บประจุ $C_{HV}$ ที่วัฏจักรการทำงาน 30% ถึง 70% ..... 130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.27 แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเฟืองทางด้านบัสแรงดันสูง ที่วัฏจักรการทำงาน 30% ถึง 70% .....	131
7.28 แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเฟืองทางด้านบัสแรงดันต่ำ ที่ความถี่สวิตช์ 1 kHz ถึง 20 kHz .....	133
7.29 แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเฟืองของตัวเก็บประจุ $C_{LV}$ ที่ความถี่สวิตช์ 1 kHz ถึง 20 kHz .....	134
7.30 แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเฟืองของตัวเก็บประจุ $C_2$ ที่ความถี่สวิตช์ 1 kHz ถึง 20 kHz .....	135
7.31 แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเฟืองของตัวเก็บประจุ $C_1$ ที่ความถี่สวิตช์ 1 kHz ถึง 20 kHz .....	136
7.32 แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเฟืองของตัวเก็บประจุ $C_{HV}$ ที่ความถี่สวิตช์ 1 kHz ถึง 20 kHz .....	137
7.33 แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเฟืองทางด้านบัสแรงดันสูง ที่ความถี่สวิตช์ 1 kHz ถึง 20 kHz .....	138
7.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความสูญเสียรวมภายในตัวเก็บประจุ กับ ความถี่สวิตช์ ของวงจร $M^2C^3$ เมื่อตัวเก็บประจุ $C_2$ ทำงานอยู่ในสถานะไม่ปกติ.....	139
7.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพ กับ ความถี่สวิตช์ ของวงจร $M^2C^3$ เมื่อตัวเก็บประจุ $C_2$ ทำงานอยู่ในสถานะไม่ปกติ.....	139
7.36 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียรวมของตัวเก็บประจุทั้งหมด ในวงจร $M^2C^3$ เมื่อมีตัวเก็บประจุตัวใดตัวหนึ่งทำงานอยู่ในสถานะที่ไม่ปกติ.....	140

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นในปัจจุบันที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาศักยภาพทางด้านภาคการเกษตรกรรม ภาคอุตสาหกรรม ภาคการขนส่ง รวมถึงสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆที่ใช้ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ จึงทำให้ต้องมีแผนการรองรับเพื่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการ แต่การที่จะผลิตพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการได้นั้น จำเป็นต้องใช้ทรัพยากรจากธรรมชาติจำพวกก๊าซธรรมชาติและถ่านหินเป็นทรัพยากรหลักในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ซึ่งทรัพยากรดังกล่าวจะมีต้นทุนการผลิตสูงและเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไปไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ อีกทั้งในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากทรัพยากรดังกล่าวยังก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) และ ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) ที่เป็นตัวการทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศ เช่น ฝนกรด (Acid Rain) ปรากฏการณ์เรือนกระจก (Green House Effect) ปรากฏการณ์โลกร้อน (Global Warming) ดังนั้นเพื่อเป็นการบรรเทาปัญหาเหล่านี้ การประยุกต์ใช้พลังงานทดแทนที่เป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) จึงเป็นพลังงานทางเลือกอีกทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับประเทศไทย นอกจากนี้การใช้พลังงานหมุนเวียนยังสอดคล้องกับนโยบายของกระทรวงพลังงานที่สนับสนุนให้การใช้พลังงานหมุนเวียนเป็นวาระแห่งชาติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาการใช้แหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนในระดับชุมชน หมู่บ้าน รวมทั้งส่งเสริมและวิจัยการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพ โดยเฉพาะโครงการผลิตไฟฟ้าในระบบขนาดเล็ก (Very Small Power Plant หรือ VSPP) ที่สามารถให้ประเทศไทยมีความมั่นคงทางด้านการผลิตกำลังไฟฟ้า และสามารถพึ่งพาตนเองต่อไปได้ในอนาคต

เป็นที่ทราบกันดีว่าการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนมีความจำเป็นต้องรวบรวมแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนที่มีพิกัดกำลังขนาดเล็กเป็นจำนวนมากเพียงพอที่จะสามารถผลิตไฟฟ้าสำหรับการใช้งานในด้านต่างๆ แต่อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้าที่ได้นั้นอาจมีการแกว่งตัวอยู่ตลอดเวลาตามปัจจัยของสภาพแวดล้อมภายนอก ด้วยเหตุนี้เองจึงต้องมีการประยุกต์ใช้งานชุดอุปกรณ์แปลงผันพลังงานไฟฟ้าคือ วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC Converter) เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ประโยชน์จากการใช้พลังงานหมุนเวียนได้อย่างคุ้มค่า

โดยทั่วไปวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบดั้งเดิม (Conventional DC-DC Converter) ได้ถูกใช้ในการเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า เช่น วงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้า (Boost Converter) วงจรลดทอนและทบทระดับแรงดันไฟฟ้า (Buck Boost Converter) วงจรชุกคอนเวอร์เตอร์ (Cuk Converter) และวงจรพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ (Push-Pull Converter) เป็นต้น ซึ่งวงจรดังกล่าวจะมีข้อเสียอยู่หลายประการเช่น วงจรมีตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์กำลังมีค่าสูงจึงทำให้สวิตช์กำลังเกิดความเครียดจากการสวิตช์  $dv/dt$  เพิ่มสูงขึ้นตาม และวงจรยังมีประสิทธิภาพไม่สูงมากนัก ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดในการพัฒนาวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีจุดเด่นเหนือกว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบดั้งเดิมในหลายๆด้านคือ

- วงจรสามารถทำงานในย่านแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น
- วงจรสามารถลดความเครียดจากการสวิตช์  $dv/dt$  ให้มีค่าต่ำลง
- วงจรสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาท์พุทที่มีคุณภาพสูง
- วงจรมีน้ำหนักเบาเนื่องจากไม่มีตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) เป็นองค์ประกอบ
- วงจรมีเสถียรภาพและประสิทธิภาพสูง

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับในงานวิจัยนี้ ได้ทำการกล่าวถึงวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากการใช้ตัวเก็บประจุแทนการใช้ตัวเหนี่ยวนำจะมีจุดเด่นในเรื่องของขนาดและน้ำหนักของวงจรมีค่าลดลง [1-3] ถึงแม้ว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับจะมีการใช้ตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของการสวิตช์สูงเพื่อลดขนาดของวงจร แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มความถี่ของการสวิตช์นั้นจะทำให้เกิดค่าความสูญเสียจากการสวิตช์ (Switching Loss) เพิ่มขึ้นและส่งผลให้วงจรมีประสิทธิภาพลดลงอีกด้วย

แนวคิดของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับได้ถูกคิดค้นและพัฒนามาจากชุดคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรมและขนาน (Series Parallel Converter หรือ SPC) [10] , [11] ที่อาศัยหลักการของการควบคุมชุดอุปกรณ์สวิตช์กำลังหลายๆชุดทำงานร่วมกับตัวเก็บประจุ ที่ต่อเรียงอนุกรมหรือขนานกันหลายๆตัว เพื่อผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตามหลักการอัดประจุ (Charge) และคายประจุ (Discharge) ของตัวเก็บประจุแบบสมดุล ซึ่งโครงสร้างของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่ถูกพัฒนามาจากวงจร SPC ได้เคยมีการศึกษามาแล้วก่อนหน้านี้อยู่หลายรูปแบบ แต่อย่างไรก็ตามในหลายๆวงจรยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น บางวงจรการควบคุมการทำงานมีความซับซ้อน (Complicated Control) บางวงจรไม่มีลักษณะโครงสร้างเป็นโมดูล (Non-Modular Structure) บางวงจรไม่มีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานที่พิกัดกำลังสูง (High Power Application) บางวงจรไม่สามารถโอนย้ายพลังงานแบบสองทิศทาง (Bidirectional Power Flow) และบางวงจรไม่มีความสามารถในการบายพาสความผิดปกติ (Bypass Fault) เป็นต้น ดังนั้นหากทำให้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับสามารถแก้ไขจุดบกพร่องของวงจรชนิดต่างๆไว้ในวงจรชุดเดียวกันได้จะทำให้วงจรมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งต่อมาได้มีการคิดค้นโครงสร้างของวงจรหลากหลายรูปแบบที่สามารถแก้ไขจุดบกพร่องดังกล่าว หนึ่งในนั้นคือวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคปซอร์ (Multilevel Modular Capacitor Clamped DC-DC Converter หรือ  $M^2C^3$ ) [1-8]

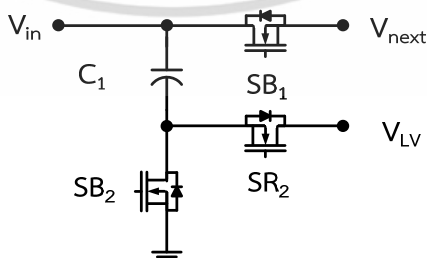
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างภายในของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์จะประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งตัวเก็บประจุนี้เองเป็นอุปกรณ์สำคัญต่อการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยหลักของการอัดประจุและคายประจุแบบสมดุลตามการควบคุมของสวิตช์กำลังที่อยู่ในวงจร แต่การอัดประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุในแต่ละครั้งนั้นทำให้เกิดการกระเพื่อมของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่อาจส่งผลกระทบต่อความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุตัวอื่นๆที่อยู่ในวงจรให้มีค่าลดลงและอาจนำไปสู่การเกิดความเสียหายต่อวงจรได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นดังกล่าว การสร้างระบบการตรวจวัดความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุที่มีความสามารถในการตรวจวัดได้อย่างทันทีทันใดจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อความมั่นคงและเสถียรภาพของวงจรในระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน ด้วยเหตุนี้เองในงานวิจัยจึงมุ่งเน้นศึกษาระบบการตรวจวัดและวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์

## 1.2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์

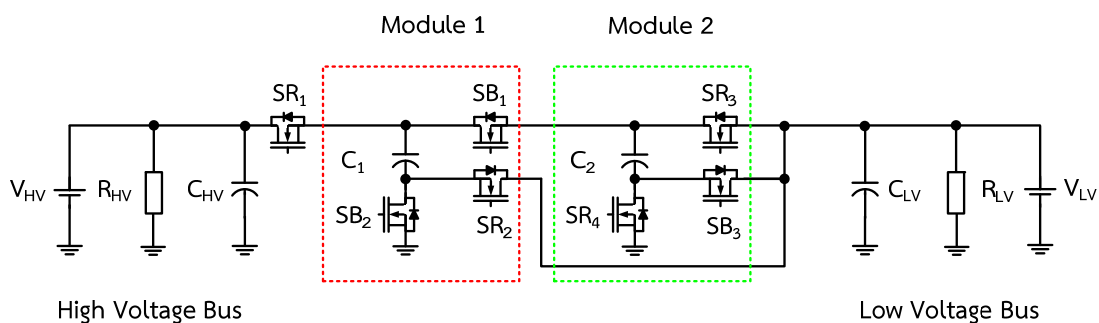
วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์หรือวงจร  $M^2C^3$  คือวงจรที่สามารถในการเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้าระหว่างบัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำ โดยอาศัยชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล (Converter Module) ที่ต่อเรียงอนุกรมกันอยู่เป็นชุดๆ แต่ละชุดจะมีอุปกรณ์สวิตช์กำลัง 3 ตัว และตัวเก็บประจุ 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 1.1 เมื่อนำชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลเป็นจำนวน 2 ชุด มาต่อเรียงอนุกรมกันดังรูปที่ 1.2 จะได้วงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ ซึ่งเป็นวงจรที่ได้เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากวงจร  $M^2C^3$  มีจุดเด่นอยู่หลายประการคือ

- วงจรมีน้ำหนักเบาเนื่องจากไม่มีตัวเหนี่ยวนำเป็นองค์ประกอบ
- วงจรสามารถควบคุมทิศทางการไหลของพลังงานไฟฟ้าได้ 2 ทิศทางระหว่างบัสแรงดันต่ำและบัสแรงดันสูงเปรียบเสมือนวงจรคือหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรง
- วงจรสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าหลายระดับที่มีคุณภาพสูงและมีการกระเพื่อมต่ำ
- วงจรสามารถบายพาสความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้
- วงจรมีประสิทธิภาพสูง



รูปที่ 1.1 ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล 1 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง 3 ระดับ

จากโครงสร้างของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์จะประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่ในการผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอยู่เป็นจำนวนมาก อีกทั้งความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในวงจรมีค่าไม่เท่ากัน โดยความเสื่อมสภาพนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า การกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า และการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งหากมีตัวเก็บประจุตัวใดตัวหนึ่งมีความเสื่อมสภาพลดลงไปมาก จะทำให้ตัวเก็บประจุทำงานอยู่ในสถานะไม่ปกติ (Abnormal Operating) และอาจส่งผลกระทบต่อความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุตัวอื่นๆได้ เนื่องจากตัวเก็บประจุเกิดการการอัดประจุและคายประจุแบบไม่สมดุลในระบบนั่นเอง ดังนั้นจึงควรมีการวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุ เพื่อที่จะสามารถทราบความเสื่อมสภาพและสามารถคาดการณ์ล่วงหน้าได้ว่า ควรจะทำการเปลี่ยนตัวเก็บประจุตัวใดจึงจะมีความเหมาะสมมากที่สุด

### 1.3 การตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุ

การตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุโดยทั่วไปจะใช้แบบจำลองของอายุการใช้งาน (Operating Lifetime Model) ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากทฤษฎีของ Arrhenius (Arrhenius Theory) [18] หลักการคำนวณจะเป็นเพียงการประมาณค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุที่ยังคงสามารถทำงานได้อย่างปกติ ซึ่งในการคำนวณจะต้องทำการใช้ข้อมูล 2 ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งข้อมูลจากการทดลอง (Experimental Result) ประกอบไปด้วยค่า แรงดันไฟฟ้า (V) , อุณหภูมิใช้งาน ( $T_{ambient}$ ) , กระแสไฟฟ้า (I) และความถี่ (f) เป็นต้น ส่วนที่สองข้อมูลจากโรงงานผู้ผลิต (Data Sheet) ประกอบไปด้วยค่าอายุการใช้งานสูงสุดของตัวเก็บประจุ ( $L_0$ ) , อุณหภูมิใช้งานสูงสุด ( $T_{operating,max}$ ) , กระแสไฟฟ้ากระแสเพื่อมสูงสุด ( $I_{ripple,max}$ ) , ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า (C) , ค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูล (ESR) , ค่าตัวเหนี่ยวนำแฝงอนุกรมสมมูล (ESL) , ค่าอิมพีแดนซ์รวม (Z) และ Dissipation Factor (D.F.) เป็นต้น โดยค่าอายุการใช้งานสามารถคำนวณได้ดังสมการ [16]

$$L = L_0 \times M_I \times M_V \times 2^{\left(\frac{T_{ambient,max} - T_{ambient}}{10}\right)} \quad (1.1)$$

โดยที่

$$M_I = 2^{\left(1 - \frac{\Delta T}{K}\right)} \quad (1.2)$$

$$M_V = \frac{V_{rate}}{V_{operate}} \quad (1.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta T = \Delta T_0 \times \left[ \frac{I_{\text{ripple, operate}}}{I_{\text{ripple, rate}}} \right]^2 \quad (1.4)$$

เมื่อ		
L	คือ	ค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุ (Hours)
L <sub>0</sub>	คือ	ค่าอายุการใช้งานสูงสุดของตัวเก็บประจุ (จากโรงงานผู้ผลิต , Hours)
T <sub>ambient,max</sub>	คือ	ค่าอุณหภูมิการทำงานสูงสุดของตัวเก็บประจุ (จากโรงงานผู้ผลิต , °C)
T <sub>ambient</sub>	คือ	ค่าอุณหภูมิการทำงานของตัวเก็บประจุ (°C)
M <sub>I</sub>	คือ	ค่าอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้ากระเพื่อม
M <sub>V</sub>	คือ	ค่าอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้า
ΔT	คือ	ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจากกระแสไฟฟ้ากระเพื่อม (°C)
K	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น (จากโรงงานผู้ผลิต)
ΔT <sub>0</sub>	คือ	ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิจากความสูญเสียภายในตัวเก็บประจุ (°C)
V <sub>rate</sub>	คือ	ค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V)
V <sub>operate</sub>	คือ	ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะใช้งาน (V)
I <sub>ripple, operate</sub>	คือ	ค่ากระแสไฟฟ้ากระเพื่อมขณะใช้งาน (A)
I <sub>ripple, rate</sub>	คือ	ค่าพิกัดกระแสไฟฟ้ากระเพื่อมสูงสุด (จากโรงงานผู้ผลิต , A)

ในระหว่างการใช้งานตัวเก็บประจุพบว่าค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT<sub>0</sub>) จะเกิดขึ้นเนื่องจากค่ากำลังความสูญเสียภายในตัวเก็บประจุ (Power Internal Loss) โดยค่ากำลังความสูญเสียดังกล่าวนี้เกิดขึ้นจากค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูล (ESR) ซึ่งค่า ΔT<sub>0</sub> สามารถหาได้ดังสมการ

$$\Delta T_0 = P_{\text{ESR}} \times T_{\text{resistance}} \quad (1.5)$$

โดยที่

$$P_{\text{ESR}} = I_{\text{rms}}^2 \times \text{ESR} \quad (1.6)$$

เมื่อ		
P <sub>ESR</sub>	คือ	ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูล (W)
T <sub>resistance</sub>	คือ	ค่าความต้านทานของอุณหภูมิในตัวเก็บประจุ (จากโรงงานผู้ผลิต, °C / W)
I <sub>rms</sub>	คือ	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (A)

จากการคำนวณหาค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุพบว่ามีความจำเป็นต้องใช้ค่าตัวแปรต่างๆภายในตัวเก็บประจุเช่น ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า (C) , ค่าความต้านทานแฝง (ESR) , ค่าตัวเหนี่ยวนำแฝงอนุกรมสมมูล (ESL) , ค่าอิมพีแดนซ์รวม (Z) และ Dissipation Factor (D.F.) ถึงแม้ว่าค่าตัวแปรดังกล่าวจะสามารถทราบได้จากข้อมูลของโรงงานผู้ผลิต แต่อย่างไรก็ตามค่าตัวแปรที่ได้นั้นอาจมีค่าไม่ตรงกันในทางปฏิบัติ กล่าวคือเมื่อตัวเก็บประจุถูกใช้งานไปแล้วเป็นระยะเวลาหนึ่งทำให้ค่าตัวแปรภายในเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเสื่อมสภาพภายในตัวเก็บประจุ ต่อมาจึงได้มีการแนวคิดในการวิจัยการหาค่าตัวแปรภายในด้วยการใช้แบบจำลองของตัวเก็บประจุ [16-19] แต่ละเทคนิคและวิธีการจะมีความแตกต่างกันออกไป โดยการหาค่าตัวแปรนั้นเป็นเพียงการประมาณค่าให้มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เนื่องจากค่าตัวแปรดังกล่าวไม่สามารถทำการวัด

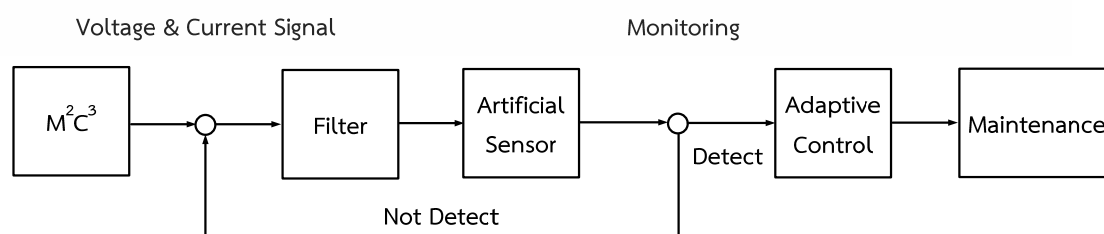
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อประโยชน์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ถึงแม้ว่าการทราบค่าตัวแปรต่างๆของตัวเก็บประจุจะสามารถนำไปคำนวณค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าที่คำนวณได้นั้นจะมีค่าอายุการใช้งานที่ยาวนานมากถึง 100,000 ชั่วโมง [19] ซึ่งอาจไม่เป็นประโยชน์มากนักในทางปฏิบัติ อีกทั้งในการหาค่าตัวแปรด้วยการใช้แบบจำลองของตัวเก็บประจุจะประกอบไปด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน ดังนั้นเทคนิคการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุด้วยวิธีทางสถิติจึงได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้

#### 1.4 เทคนิคการสร้างแบบจำลองการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุ

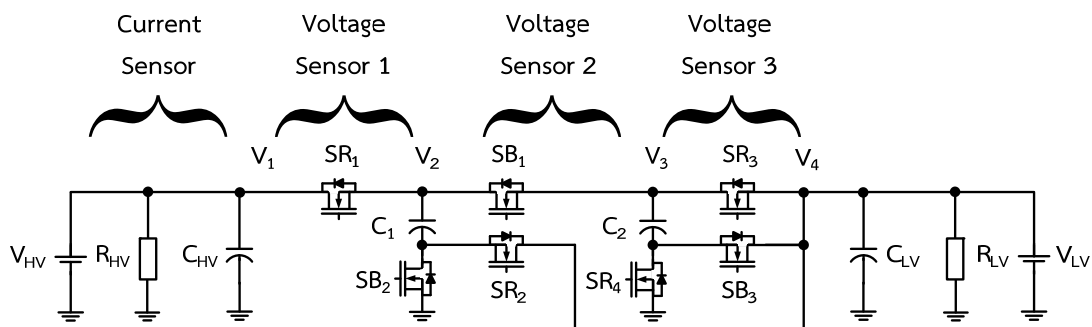
แนวคิดในการสร้างแบบจำลองการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุจะมีกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 1.3 โดยเริ่มจากการเก็บข้อมูลเป็นรูปคลื่นสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากชุดอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าในวงจร  $M^2C^3$  3 ระดับดังรูปที่ 1.4 การใช้รูปคลื่นสัญญาณทางไฟฟ้าจะมีข้อดีคือสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณทางไฟฟ้าในขณะที่ตัวเก็บประจุกำลังทำงานอยู่ในวงจร ซึ่งการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุด้วยวิธีที่นำเสนอมีความแตกต่างจากวิธีดั้งเดิมคือ วิธีดั้งเดิมจะไม่ใช้รูปคลื่นสัญญาณทางไฟฟ้าแต่จะใช้เพียงค่าที่วัดได้จากชุดตรวจวัดแต่ละตัวและนำไปแทนค่าในสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำการตรวจวัดค่าความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่อยู่ในวงจร

นอกจากนี้การตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุด้วยวิธีที่นำเสนอสามารถลดจำนวนการใช้ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดข้อมูลได้อีกทางหนึ่ง กล่าวคือการตรวจวัดความเสื่อมสภาพด้วยวิธีดั้งเดิมจะใช้ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดจำนวน 3 ชุดต่อตัวเก็บประจุ 1 ตัวคือ ชุดตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า ชุดตรวจวัดกระแสไฟฟ้า และชุดตรวจวัดอุณหภูมิ ส่วนวิธีการที่นำเสนอได้ใช้ชุดตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าเพียง 1 ชุดต่อตัวเก็บประจุ 1 ตัวและใช้ชุดตรวจวัดกระแสไฟฟ้าอีก 1 ชุดต่อตัวเก็บประจุทุกตัวที่อยู่ในวงจร โดยสามารถเปรียบเทียบจำนวนการใช้ชุดตรวจวัดทั้งหมดในวงจร  $M^2C^3$  3 ระดับได้ดังตารางที่ 1.1 จากตารางพบว่าวิธีที่นำเสนอจะไม่ใช้ชุดตรวจวัดอุณหภูมิ เนื่องจากในทางปฏิบัติตัวเก็บประจุได้ถูกออกแบบให้อุณหภูมิขณะทำงานอยู่ระหว่าง  $25^{\circ}\text{C}$  ถึง  $40^{\circ}\text{C}$  ช่วงอุณหภูมินี้มีผลต่อการทำงานและการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติภายในของตัวเก็บประจุน้อยมาก [16] ซึ่งหากมีการเปลี่ยนแปลงเกินขอบเขตของอุณหภูมิดังกล่าวมีผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามสมการที่ (1.4) และเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจะทำให้สัญญาณรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้เองชุดตรวจวัดอุณหภูมิจึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้ในการสร้างระบบการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 1.3 กระบวนการสร้างแบบจำลองการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.4 จุดตรวจวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าในวงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ

ตารางที่ 1.1 จำนวนชุดอุปกรณ์ตรวจวัดทั้งหมดในวงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ

ชุดอุปกรณ์ตรวจวัด	จำนวนชุดอุปกรณ์ตรวจวัด (ชุด)	
	วิธีดั้งเดิม	วิธีที่นำเสนอ
แรงดันไฟฟ้า	3	3
กระแสไฟฟ้า	3	1
อุณหภูมิ	3	-
รวม	9	4

ตารางที่ 1.2 ข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบให้ตัวเก็บประจุในวงจรค่อยๆเสื่อมสภาพ

ค่าการเก็บประจุ ( $\mu\text{F}$ )	ค่าความต้านทานแฝง ( $\text{m}\Omega$ )	การเสื่อมสภาพ	สถานะการทำงาน
560	173.08	ยังไม่เสื่อมสภาพ	ปกติ
280	346.16	เริ่มเสื่อมสภาพ	ปกติ
186.6667	519.24	เริ่มเสื่อมสภาพ	ปกติ
140	692.32	เสื่อมสภาพ	ไม่ปกติ

ในการเก็บข้อมูลได้ทำการทดสอบให้ตัวเก็บประจุที่กำลังทำงานอยู่ในวงจรค่อยๆเสื่อมสภาพ โดยได้ทำการกำหนดสถานะเริ่มต้นของตัวเก็บประจุที่มีค่าการเก็บประจุ  $560 \mu\text{F}$  ค่าความต้านทานแฝง  $173.08 \text{ m}\Omega$  เป็นสถานะปกติ และกำหนดสถานะการเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุที่มีค่าการเก็บประจุ  $140 \mu\text{F}$  ค่าความต้านทานแฝง  $692.32 \text{ m}\Omega$  เป็นสถานะไม่ปกติ (ตัวเก็บประจุที่เสื่อมสภาพจะทำให้ค่าการเก็บประจุลดลงและค่าความต้านทานแฝงสูงขึ้น) ซึ่งในการทดสอบได้ทำการเก็บข้อมูลจากชุดอุปกรณ์ตรวจวัดเมื่อตัวเก็บประจุค่อยๆเสื่อมสภาพไปดังตารางที่ 1.2 เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการนำไปสร้างแบบจำลองของระบบการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุในขั้นตอนถัดไป

ข้อมูลของรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากชุดอุปกรณ์ตรวจวัดจำเป็นจะต้องผ่านการกรองข้อมูลของสัญญาณรบกวน (Noise Data) ด้วยกระบวนการ PCA (Principal Component Analysis) และนำไปสร้างแบบจำลองของตัวตรวจวัดเทียม (Artificial Sensor) ที่มีความสามารถในการตรวจสอบการทำงานซึ่งกันและกันของตัวตรวจวัดเทียมด้วยวิธีการรีเกรสชัน (Regression) ซึ่งวิธีการดังกล่าวทำ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการนำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้แบบจำลองของตัวตรวจวัดเทียบสามารถเรียนรู้จากข้อมูลที่มีอยู่ เพื่อที่จะสามารถตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุแต่ละตัวได้อย่างถูกต้อง โดยการจำแนก (Classification) ความแตกต่างระหว่างตัวเก็บประจุที่ทำงานอยู่ในสภาวะปกติและไม่ปกติ

หลังจากที่ทำการสร้างระบบตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุ หากระบบพบว่าตัวเก็บประจุตัวใดตัวหนึ่งทำงานอยู่ในสภาวะไม่ปกติจะทำให้ค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า การกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้า และค่าความสูญเสียของตัวเก็บประจุที่ทำงานในสภาวะไม่ปกติมีค่าสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เองจึงจำเป็นต้องลดค่าการกระเพื่อมและค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นให้มีค่าลดลง โดยการเปลี่ยนแปลงการควบคุมวงจร  $M^2C^3$  คือเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรการทำงานและความถี่ของสัญญาณควบคุม เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นและทำให้วงจรยังคงสามารถทำงานต่อไปได้อีก ระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะทำการเปลี่ยนตัวเก็บประจุ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาโครงสร้างและวิธีการควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์
2. ศึกษาและวิเคราะห์หลักการการทำงานของตัวเก็บประจุที่อยู่ในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์
3. ศึกษาความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุ เพื่อสร้างระบบการตรวจวัดความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์
4. วิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์ภายใต้สถานะที่มีตัวเก็บประจุทำงานอยู่ในสถานะไม่ปกติ เพื่อหาวิธีการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น
5. นำองค์ความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการสร้างเครื่องต้นแบบที่มีระบบตรวจวัดความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุ

## 1.6 ขอบเขตของการวิจัย

1. สร้างเครื่องต้นแบบของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง 3 ระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์ที่มีพิกัด 500 W
2. สร้างระบบการตรวจวัดความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่อยู่ในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง 3 ระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์
3. สร้างระบบการควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง 3 ระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์หลังจากที่มีตัวเก็บประจุทำงานอยู่ในสถานะไม่ปกติ เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากตัวเก็บประจุทำงานอยู่ในสถานะไม่ปกติ

## 1.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. สามารถทราบสถานะการทำงานที่ส่งผลกระทบต่อความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุในระหว่างที่ตัวเก็บประจุกำลังทำงานอยู่ในวงจร และยังสามารถทราบได้ว่าควรเปลี่ยนตัวเก็บประจุตำแหน่งใดจึงจะมีความเหมาะสมมากที่สุด
2. เทคนิคและวิธีการที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถลดจำนวนการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดข้อมูลของการตรวจวัดความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุเมื่อเทียบกับการตรวจวัดความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม
3. ลดการใช้สมการคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนของการตรวจวัดความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุเมื่อเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิม
4. ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับชุดอุปกรณ์ตัวอื่นๆของวงจร
5. องค์ความรู้ทั้งหมดที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถนำไปบูรณาการเพื่อต่อยอดและพัฒนางานวิจัยใหม่ๆที่เกิดขึ้นในอนาคตต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.8 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

### ➤ บทที่ 1 บทนำ

กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ และระเบียบวิธีการวิจัย

### ➤ บทที่ 2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ

กล่าวถึงการศึกษาและเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ

### ➤ บทที่ 3 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์

กล่าวถึงโครงสร้าง วิธีการควบคุม และการวิเคราะห์วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์

### ➤ บทที่ 4 การหาค่าตัวแปรของตัวเก็บประจุ

กล่าวถึงการศึกษางานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าตัวแปรและความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุ

### ➤ บทที่ 5 เทคนิคการตรวจวัดและวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุ

กล่าวถึงกระบวนการสร้างแบบจำลองการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุด้วยการใช้ตัวตรวจวัดเทียบ และการวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุ

### ➤ บทที่ 6 การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบของวงจร $M^2C^3$

กล่าวถึงเทคนิคการออกแบบวงจรกำลังและวงจรควบคุมของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง 3 ระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์ที่มีพิกัด 500 W

### ➤ บทที่ 7 ผลการจำลองการทำงานและการทดสอบ

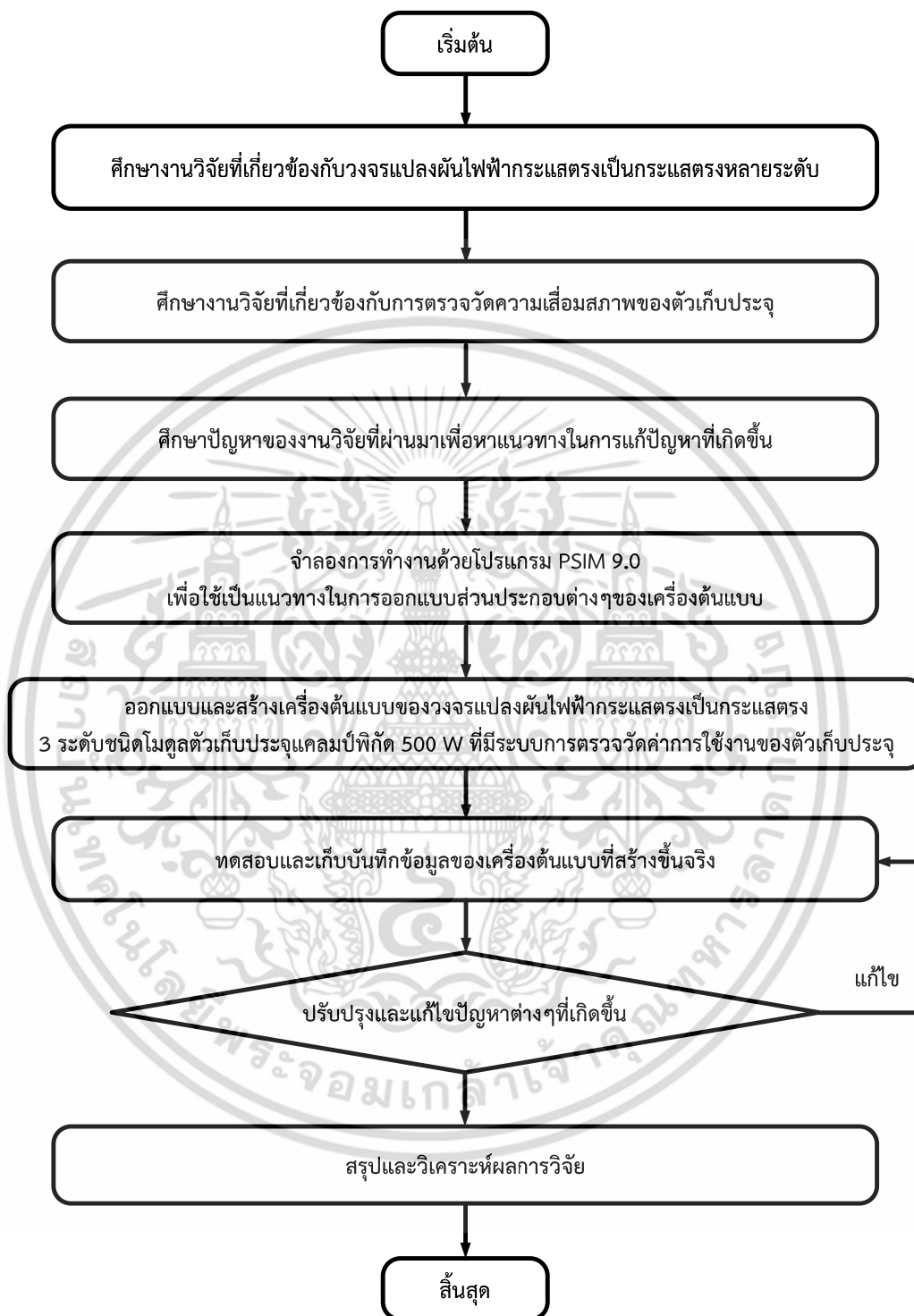
กล่าวถึงผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM 9.0 และผลการทดสอบเครื่องต้นแบบของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง 3 ระดับ ที่มีพิกัด 500 W

### ➤ บทที่ 8 สรุปและข้อเสนอแนะ

กล่าวถึงสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางในการพัฒนางานวิจัยในระดับต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.9 ระเบียบวิธีการวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ

### 2.1 บทนำ

ในบทนี้ได้ทำการศึกษางานวิจัย (Literature Review) และเปรียบเทียบคุณลักษณะของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับตามลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของวงจรในรูปแบบต่างๆที่ได้มีการศึกษาและวิจัยมาก่อนหน้านี้ รวมไปถึงการวิเคราะห์หลักการทํางานและวิธีการควบคุมวงจร เพื่อต้องการให้ได้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่มีคุณภาพและมีความเป็นไฟฟ้ากระแสตรงมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

### 2.2 การพัฒนาวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับคือวงจรที่มีความสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้หลากหลายระดับ โดยวงจรดังกล่าวได้ถูกพัฒนามาจากชุดคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรมและขนาน (Series Parallel Converter หรือ SPC) [10],[11] ที่อาศัยหลักการควบคุมชุดอุปกรณ์สวิตซ์กำลังหลายๆชุดทํางานร่วมกับตัวเก็บประจุที่ต่อเรียงอนุกรมหรือขนานกันหลายๆตัว เพื่อผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตามหลักการอัดประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุแบบสมมูล ซึ่งโครงสร้างของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่ถูกพัฒนามาจากวงจร SPC ได้เคยมีการศึกษามาก่อนหน้านี้อยู่หลายรูปแบบ และแต่ละรูปแบบจะมีโครงสร้างทางกายภาพของวงจรที่มีความแตกต่างกันออกไปดังต่อไปนี้

### 2.3 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดไฟร์อิงค์คาปาซิเตอร์ (Flying Capacitor Multilevel DC-DC Converter หรือ FCMDC)

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดไฟร์อิงค์คาปาซิเตอร์ 3 ระดับ [9],[10] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 มีความสามารถในการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าได้ 3 เท่าของแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ และมีความสามารถในการลดระดับแรงดันไฟฟ้าได้ 3 เท่าของแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง โดยอาศัยหลักการควบคุมการทํางานของสวิตซ์กำลังที่ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.2 ทำให้สามารถควบคุมการตัดต่อตัวเก็บประจุแต่ละตัวในวงจรดังแสดงในตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 เพื่อโอนย้ายพลังงานและรักษาสมดุลของแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ วงจรนี้จะมีจุดเด่นในเรื่องของโครงสร้างของวงจรไม่ซับซ้อน และมีแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตซ์กำลังแต่ละตัวมีค่าเท่ากันคือ  $V_{LV}$  แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างของวงจรยังคงมีข้อจำกัดอยู่หลายประการคือ

- เมื่อจำนวนระดับของวงจรมีค่ามาก ทำให้ยากต่อการควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง
- เมื่อจำนวนระดับของวงจรมีค่ามาก ทำให้ต้องใช้จำนวนสวิตช์กำลังมากขึ้นตาม กล่าวคือ สำหรับวงจร FCMDC ที่ N ระดับ จะใช้สวิตช์กำลังจำนวน 2N ตัว
- อุปกรณ์สวิตช์กำลังเกิดความเครียดจาก  $dv/dt$  มีค่าสูง
- โครงสร้างของวงจรไม่มีความสามารถในการบายพาสความผิดพลาดออกจากวงจร
- โครงสร้างของวงจรไม่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานในระบบที่มีความถี่สูง เนื่องจากการทำงานของวงจรที่ความถี่สูงทำให้ช่วงเวลาในการทำงานของสวิตช์กำลัง (Turn on Time) แต่ละตัวมีค่าต่ำและส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง [3]

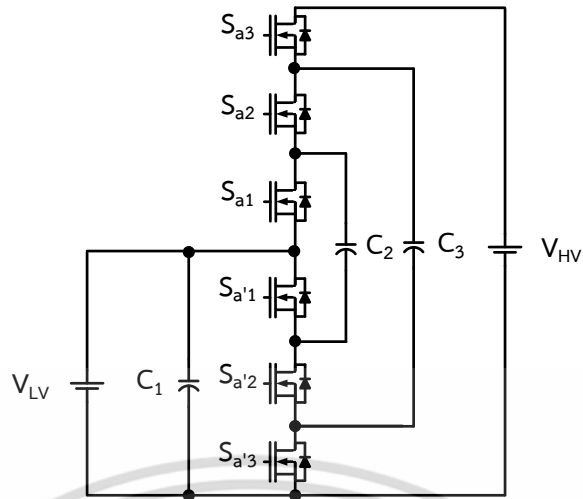
ตารางที่ 2.1 สภาวะการอัดประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ

ชั้นการทำงาน	สภาวะการทำงาน
ขั้นตอนที่ 1	$C_4 \downarrow \rightarrow C_3 \uparrow + C_1 \uparrow$
ขั้นตอนที่ 2	$C_3 \downarrow \rightarrow C_2 \uparrow + C_1 \uparrow$
ขั้นตอนที่ 3	$C_2 \downarrow \rightarrow C_1 \uparrow$
↓ คือ สภาวะการคายประจุ และ ↑ คือ สภาวะการอัดประจุ	

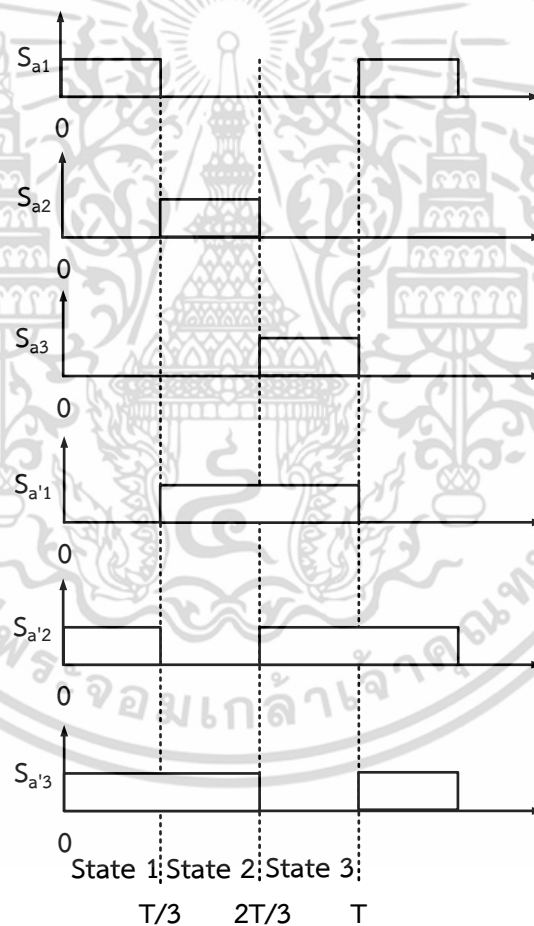
ตารางที่ 2.2 สภาวะการอัดประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง

ชั้นการทำงาน	สภาวะการทำงาน
ขั้นตอนที่ 1	$C_1 \downarrow \rightarrow C_2 \uparrow$
ขั้นตอนที่ 2	$C_2 \downarrow + C_1 \downarrow \rightarrow C_3 \uparrow$
ขั้นตอนที่ 3	$C_3 \downarrow + C_1 \downarrow \rightarrow C_4 \uparrow$
↓ คือ สภาวะการคายประจุ และ ↑ คือ สภาวะการอัดประจุ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดไฟร์อิงค์คาปาซิเตอร์ 3 ระดับ

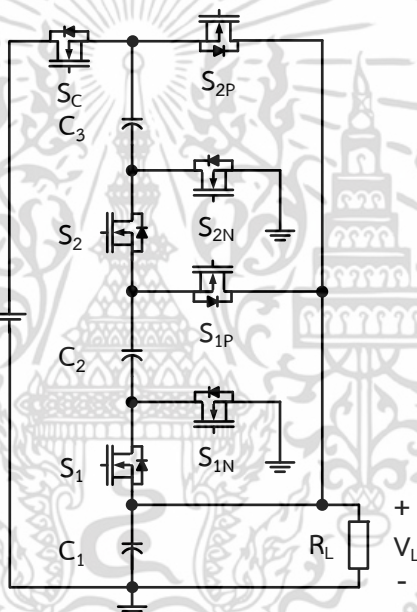


รูปที่ 2.2 สัญญาณควบคุมวงจรถ่ายแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดไฟร์อิงค์คาปาซิเตอร์ 3 ระดับ

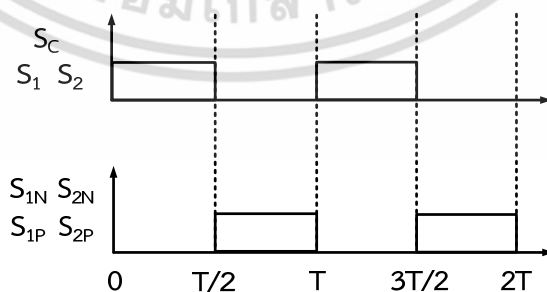
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์ (Switched Capacitor Multilevel DC-DC Converter)

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์ 3 ระดับ [12] ดังแสดงในรูป 2.3 มีความสามารถในการลดทอนแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตลงให้เหลือหนึ่งในสามของแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต ( $V_{out} = 1/3 V_{in}$ ) โดยอาศัยหลักการควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังดังแสดงในรูปที่ 2.4 เพื่อการอัดและคายประจุของตัวเก็บประจุ ซึ่งการควบคุมสวิตช์กำลังนั้นจะประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่หนึ่งสวิตช์กำลัง  $S_C$   $S_1$  และ  $S_2$  ทำงาน ส่งผลให้ตัวเก็บประจุทุกตัวในวงจรเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมและจะถูกอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต ( $V_{in}$ ) ขั้นตอนที่สองสวิตช์กำลัง  $S_{1N}$   $S_{1P}$   $S_{2N}$  และ  $S_{2P}$  ทำงาน ส่งผลให้ตัวเก็บประจุทุกตัวในวงจรเชื่อมต่อกันแบบขนานและจะถูกคายประจุทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต ( $V_{output}$ ) เพื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้า ( $V_L$ )



รูปที่ 2.3 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์ 3 ระดับ



รูปที่ 2.4 สัญญาณควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์ 3 ระดับ

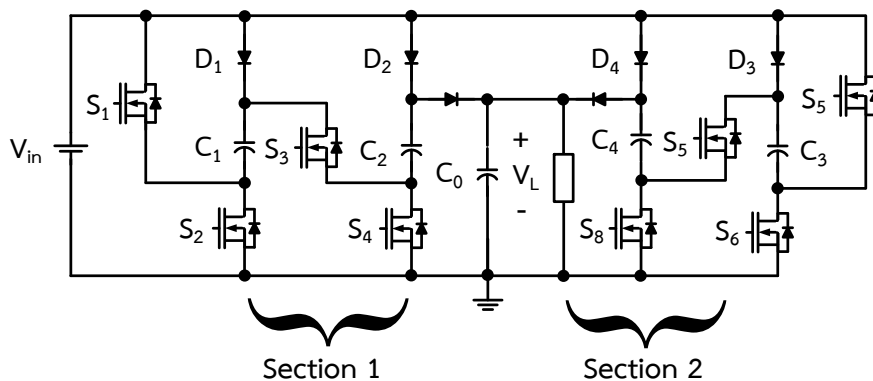
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์ จะมีจุดเด่นในเรื่องของรูปแบบการควบคุมการทำงานที่ไม่ซับซ้อน แต่อย่างไรก็ตามวงจรมีจุดบกพร่องอยู่หลายประการคือ

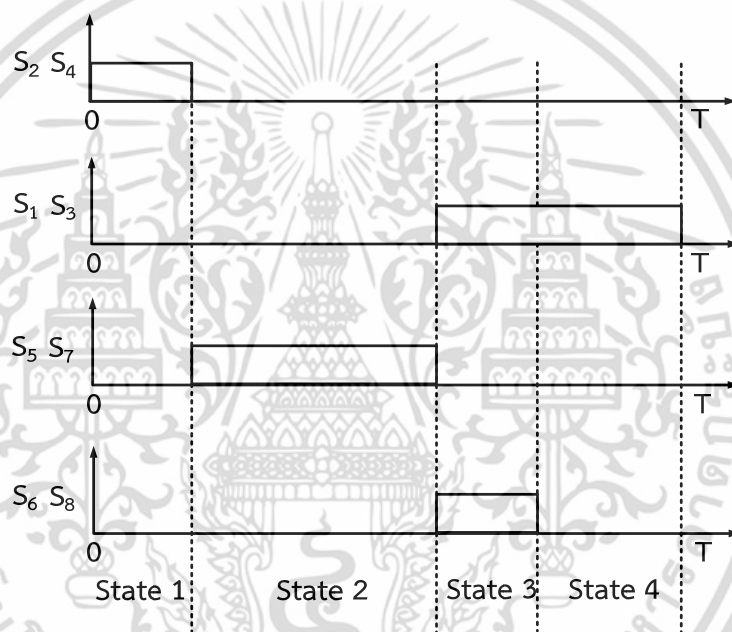
- เมื่อวงจรมีจำนวนระดับเพิ่มมากขึ้น ทำให้การรักษาความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าในตัวเก็บประจุแต่ละตัวให้มีค่าคงที่จะกระทำได้ยาก กล่าวคือตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีค่าคงที่ของเวลา (Time Constant) ซึ่งในการควบคุมคาบเวลา (Period time) ให้สวิตช์ทำงานเพื่อถ่ายเทการอัดประจุและคายประจุจากตัวเก็บประจุตัวหนึ่งไปยังอีกตัวหนึ่งนั้น อาจมีผลกระทบโดยตรงต่อค่าการกระเพื่อมของแรงดันและกระแสไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้น
- แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวสวิตช์กำลังมีค่าสูงเมื่อวงจรมีจำนวนระดับเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือสวิตช์กำลังตัวบน  $S_C$   $S_{2P}$  และ  $S_{2N}$  จะมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมากกว่า 2 เท่าของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์กำลังตัวล่าง  $S_2$  และ  $S_{1P}$  ทำให้เกิดความเครียดจากการสวิตช์  $dv/dt$  ซึ่งความเครียดจากการสวิตช์นี้อาจทำให้สวิตช์กำลังเสียหายได้
- วงจรไม่สามารถควบคุมทิศทางการโอนย้ายพลังงานแบบสองทิศทาง เนื่องจากทิศทางการโอนย้ายพลังงานมีเพียงทิศทางเดียวจากทางด้านอินพุทที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงไปยังทางด้านเอาต์พุทที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำ
- โครงสร้างของวงจรไม่มีความสามารถในการบายพาสความผิดปกติ (Bypass fault)

## 2.5 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมด (Switch Mode Step Up Multilevel DC-DC Converter)

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมด [13] ดังแสดงในรูปที่ 2.5 มีความสามารถในการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุทให้มีค่าสูงขึ้น โดยใช้ชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ต่อกันแบบคู่ขนานทั้งสองฝั่งและถูกควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังที่ประกอบไปด้วย 4 สภาวะดังแสดงในรูปที่ 2.6 คือ สภาวะที่ 1 ตัวเก็บประจุของคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 ถูกอัดประจุด้วยแรงดันอินพุท  $V_{in}$  ส่วนตัวเก็บประจุของคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 2 ถูกคายประจุไปยังเอาต์พุท สภาวะที่ 2 ตัวเก็บประจุของชุดคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองยังคงมีหน้าที่เหมือนกับสภาวะการทำงานที่ 1 แต่เปลี่ยนแปลงการควบคุมสวิตช์กำลังเพื่อเตรียมการคายประจุให้กับตัวเก็บประจุของคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 สภาวะที่ 3 ตัวเก็บประจุของคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 ถูกคายประจุไปยังเอาต์พุท สภาวะที่ 4 ตัวเก็บประจุของคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 2 ถูกอัดประจุ ส่วนตัวเก็บประจุของคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 ยังคงมีหน้าที่เหมือนกับสภาวะการทำงานที่ 3



รูปที่ 2.5 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมด



รูปที่ 2.6 สัญญาณควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมด

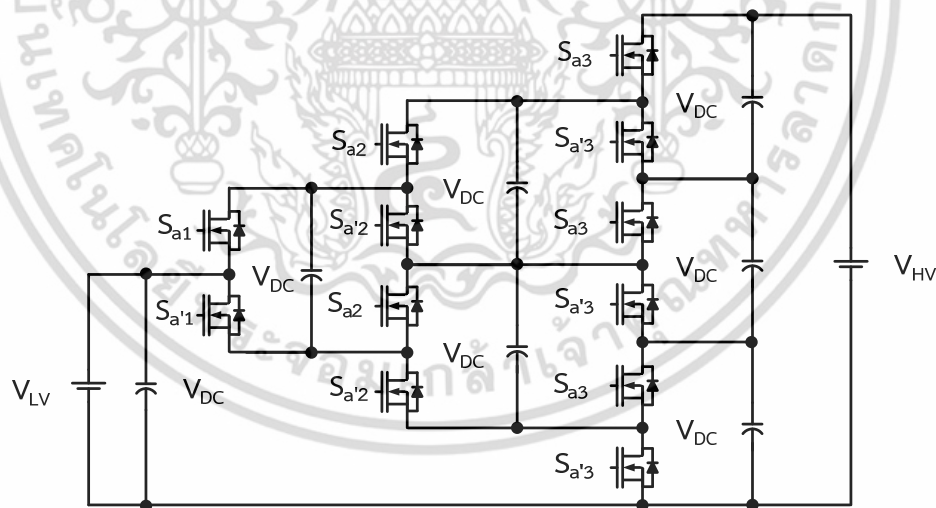
วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมดจะมีจุดเด่นในเรื่องของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตโดยการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรการทำงาน (Duty Cycle) ซึ่งค่าวัฏจักรการทำงานของสถานะที่ 1 จะมีค่าเท่ากับสถานะที่ 3 ส่วนค่าวัฏจักรการทำงานของสถานะที่ 2 จะมีค่าเท่ากับสถานะที่ 4 ทำให้วงจรสามารถทำงานที่ความถี่สูงๆได้ และนอกจากนี้จุดเด่นอีกประการหนึ่งของวงจรถังกล่าวคือ การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) น้อยเนื่องจากกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุตมีค่าต่ำ แต่อย่างไรก็ตามวงจรมีจุดบกพร่องในเรื่องของทิศทางการโอนย้ายพลังงานที่มีเพียงทิศทางเดียว อีกทั้งวงจรจะมีความสูญเสียจากการสวิตช์ (Switching Loss) สูงเมื่อประยุกต์ใช้งานในระบบที่มีความถี่และกำลังสูงมาก

## 2.6 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดปราศจากวงจรแม่เหล็ก (Magnetic Less Multilevel DC-DC Converter)

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดปราศจากวงจรแม่เหล็ก 3 ระดับ [14] ดังแสดงในรูปที่ 2.7 มีความสามารถในการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าได้ 3 เท่าของแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ และมีความสามารถในการลดระดับแรงดันไฟฟ้าได้ 3 เท่าของแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง โดยอาศัยหลักการควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังที่ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.8 ทำให้สามารถควบคุมการหมุนเวียนและตัดต่อตัวเก็บประจุแต่ละตัวในวงจรเพื่อรักษาสมดุลของแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าคงที่

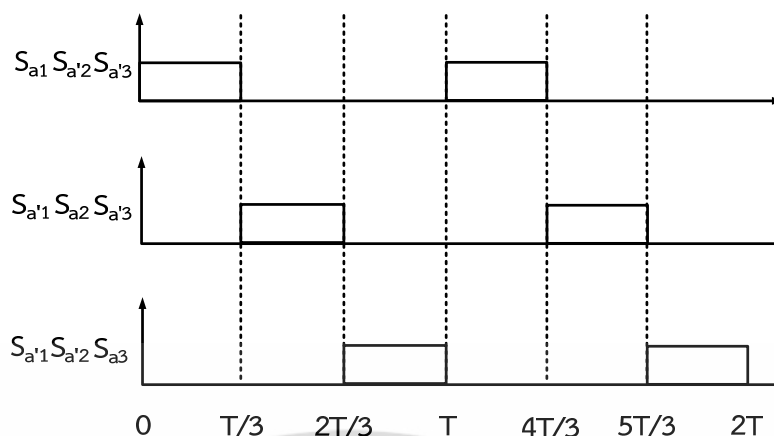
วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดปราศจากวงจรแม่เหล็กจะมีจุดเด่นในเรื่องของโครงสร้างวงจรที่เป็นโมดูล (Module) สามารถต่อรวมกันเป็นโครงข่าย (Mesh) ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์กำลังของแต่ละโมดูลมีค่าเพียง  $1V_{dc}$  และนอกจากนี้จุดเด่นอีกประการหนึ่งของวงจรถังกล่าวคือ ในแต่ละโมดูลสามารถใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงสัญญาณขับสวิตช์กำลังร่วมกันเมื่อกำลังสัญญาณขับสวิตช์แบบเดียวกัน จึงทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ได้

แต่อย่างไรก็ตามวงจรมีจุดบกพร่องในเรื่องของการใช้จำนวนสวิตช์กำลังและตัวเก็บประจุเป็นจำนวนมากกล่าวคือ สำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดปราศจากวงจรแม่เหล็ก N ระดับ จะต้องใช้ชุดโมดูล  $N(N+1)/2$  ชุด ที่มีสวิตช์กำลังจำนวน  $N(N+1)$  ตัว และใช้ตัวเก็บประจุจำนวน  $N(N+1)/2$  ตัว ซึ่งหากจำนวนระดับเพิ่มมากขึ้นจะทำให้วงจรมีต้นทุนเพิ่มสูงขึ้นตาม



รูปที่ 2.7 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดปราศจากวงจรแม่เหล็ก 3 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

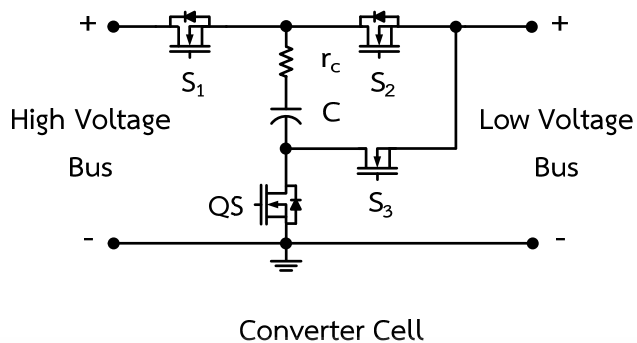


รูปที่ 2.8 สัญญาณควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดปราศจากวงจรแม่เหล็ก 3 ระดับ

## 2.7 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์แบบสองทิศทาง (Switched Capacitor Bidirectional DC-DC Converter)

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์แบบสองทิศทางจำนวน 2 ระดับ [15] ดังแสดงในรูป 2.9 มีความสามารถในการเลือกสภาวะการทำงานเพื่อเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้าระหว่างบัสแรงดันต่ำและบัสแรงดันสูง โดยอาศัยหลักการควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก) สำหรับสภาวะเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า และรูปที่ 2.10 (ข) สำหรับสภาวะลดระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งการทำงานของวงจรประกอบไปด้วย 2 สภาวะการทำงานคือสภาวะเพิ่มและลดระดับแรงดันไฟฟ้า แต่ละสภาวะจะมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานของตัวเก็บประจุอยู่ 2 สภาวะคือ อัดประจุและคายประจุดังแสดงในตารางที่ 2.3

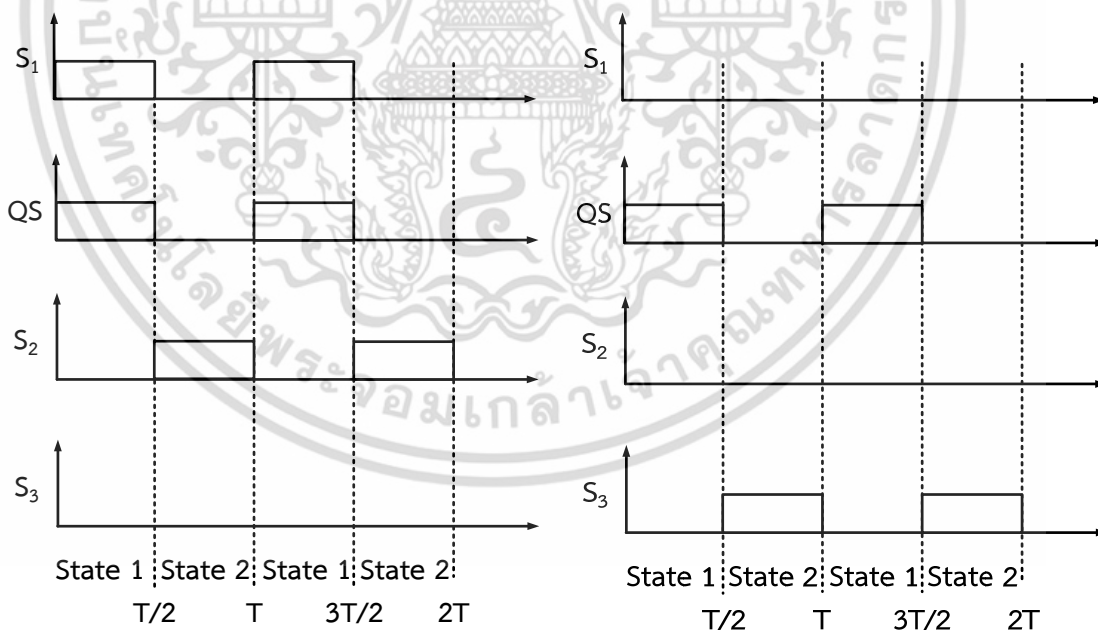
วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์แบบสองทิศทางมีจุดเด่นในเรื่องของการโอนย้ายพลังงานแบบ 2 ทิศทางและการควบคุมของวงจรไม่ซับซ้อน นอกจากนี้จุดเด่นอีกประการหนึ่งของวงจรมีดังกล่าวก็คือ สามารถนำวงจรมาต่อขนานกันดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยเป็นการทำงานแบบกลับเฟส (Anti-Phase) เพื่อลดแรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเพื่อ แต่อย่างไรก็ตามวงจรมีข้อจำกัดในเรื่องของโครงสร้างวงจรไม่มีความสามารถในการบายพาสความผิดพลาดออกทั้งยังไม่สามารถเพิ่มจำนวนระดับแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงๆได้เนื่องจาก ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงทำให้การเลือกใช้พิกัดของอุปกรณ์สวิตช์กำลังจะต้องมีค่าสูงขึ้นตาม อีกทั้งวงจรไม่มีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังสูงเนื่องจากประสิทธิภาพของวงจรมีค่าต่ำ (ประสิทธิภาพประมาณ 80%)



รูปที่ 2.9 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์แบบสองทิศทาง

ตารางที่ 2.3 สถานะการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์แบบสองทิศทาง

สถานะการทำงาน	สถานะของตัวเก็บประจุ	
	0 ถึง $T_s / 2$	$T_s / 2$ ถึง $T_s$
เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า	อัดประจุ	คายประจุ
ลดระดับแรงดันไฟฟ้า	อัดประจุ	คายประจุ

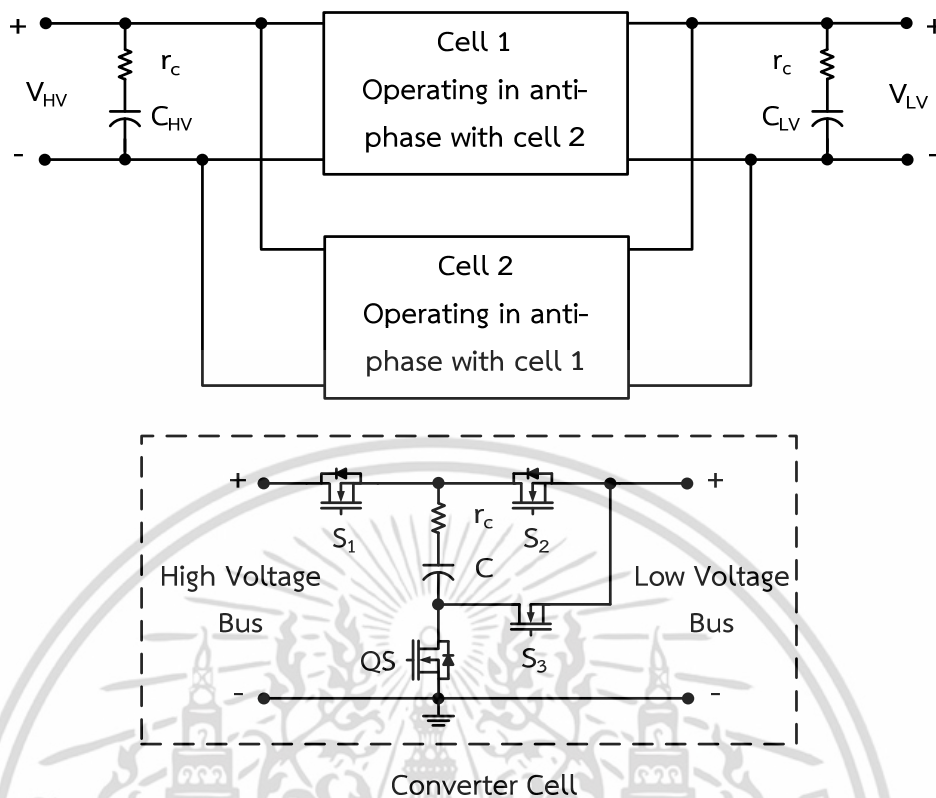


(ก) สถานะเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า

(ข) สถานะลดระดับแรงดันไฟฟ้า

รูปที่ 2.10 สัญญาณควบคุมวงจรถ่ายแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์แบบสองทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 การขนานวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์แบบสองทิศทาง

### 2.8 สรุป

จากวงจรที่ได้ทำการศึกษาพบว่า วงจรแต่ละชนิดจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ดังนั้นเพื่อเป็นการดีหากทำให้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับมีคุณสมบัติในการรวมข้อดีและลดข้อเสียของวงจรชนิดต่างๆไว้ในวงจรชุดเดียวกันเช่น วงจรสามารถควบคุมได้ง่าย วงจรสามารถควบคุมทิศทางการไหลของพลังงานไฟฟ้าได้ 2 ทิศทาง วงจรสามารถบายพาสความผิดพลาด วงจรสามารถลดจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร และมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น เป็นต้น ซึ่งในบทความต่อไปจะกล่าวถึงวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์ (Multilevel Modular Capacitor Clamped DC-DC Converter หรือ  $M^2C^3$ ) ที่มีคุณสมบัติตามที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้น

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแต่ละชนิด

ชนิดวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ	ข้อดี	ข้อเสีย
วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดไฟร์อิงค์คาปาซิเตอร์	<ul style="list-style-type: none"> <li>● โครงสร้างของวงจรไม่ซับซ้อน</li> <li>● แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์กำลังแต่ละตัวมีค่าเท่ากัน</li> <li>● สามารถโอนย้ายพลังงานแบบสองทิศทาง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● เมื่อจำนวนระดับเพิ่มมากขึ้นทำให้ยากต่อการควบคุมการทำงาน</li> <li>● เมื่อจำนวนระดับเพิ่มมากขึ้นจะมีจำนวนสวิตช์กำลังมากขึ้นตาม</li> <li>● อุปกรณ์สวิตช์กำลังเกิดความเครียดจาก <math>dv/dt</math> มีค่าสูง</li> <li>● โครงสร้างของวงจรไม่มีความสามารถในการบายพาสความผิดพลาด</li> <li>● โครงสร้างของวงจรไม่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานที่ความถี่สูง</li> </ul>
วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์	<ul style="list-style-type: none"> <li>● โครงสร้างของวงจรไม่ซับซ้อน</li> <li>● การควบคุมวงจรไม่ซับซ้อน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● เมื่อวงจรมีจำนวนระดับเพิ่มมากขึ้นทำให้การรักษาความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าในตัวเก็บประจุแต่ละตัวให้มีค่าคงที่จะกระทำได้ยาก</li> <li>● แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวสวิตช์มีค่าสูงเมื่อวงจรมีจำนวนระดับมากขึ้น</li> <li>● วงจรไม่สามารถควบคุมทิศทางการโอนย้ายพลังงานแบบสองทิศทาง</li> <li>● โครงสร้างของวงจรไม่มีความสามารถในการบายพาสความผิดพลาด</li> </ul>
วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมด	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทได้โดยการปรับวัฏจักรการทำงาน</li> <li>● การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● โครงสร้างของวงจรไม่มีความสามารถในการบายพาสความผิดพลาด</li> <li>● ความสูญเสียจากการสวิตช์สูงเมื่อประยุกต์ใช้งานที่ความถี่สูงและกำลังสูง</li> <li>● วงจรไม่สามารถควบคุมทิศทางการโอนย้ายพลังงานแบบสองทิศทาง</li> </ul>

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแต่ละชนิด

ชนิดวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ	ข้อดี	ข้อเสีย
<p>วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดปราศจากวงจรแม่เหล็ก</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● โครงสร้างของวงจรไม่ซับซ้อน</li> <li>● แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์กำลังแต่ละตัวมีค่าเท่ากัน</li> <li>● สามารถใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงสัญญาณขับสวิตช์กำลังร่วมกันเมื่อวงจรมีสัญญาณขับสวิตช์แบบเดียวกัน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● เมื่อจำนวนระดับเพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีจำนวนสวิตช์กำลังและตัวเก็บประจุมากขึ้นตาม</li> </ul>
<p>วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์แบบสองทิศทาง</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● สามารถโอนย้ายพลังงานแบบสองทิศทาง</li> <li>● การควบคุมวงจรไม่ซับซ้อน</li> <li>● สามารถนำวงจรมาต่อขนานกันแบบกลับเฟสเพื่อลดแรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเพื่อ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● อุปกรณ์สวิตช์กำลังเกิดความเครียดจาก <math>dv/dt</math> มีค่าสูง</li> <li>● ไม่สามารถเพิ่มจำนวนระดับแรงดันไฟฟ้าได้เกิน 2 เท่า</li> <li>● โครงสร้างของวงจรไม่มีความสามารถในการบายพาสความผิดพร่อง</li> <li>● ประสิทธิภาพต่ำ (ประมาณ 80%)</li> </ul>

## บทที่ 3

# วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิด

## ตัวเก็บประจุแคลมป์

### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างทางกายภาพและพฤติกรรมการทำงานรวมถึงวิธีการควบคุม วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์ (Multilevel Modular Capacitor Clamped DC-DC Converter หรือ  $M^2C^3$ ) นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์การทำงานของตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่ทำงานอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State) เพื่อนำข้อมูลและหลักการต่างๆที่ได้ไปประยุกต์กับงานวิจัยในขั้นตอนต่อไป

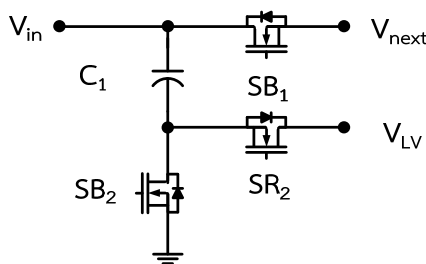
### 3.2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์

วงจร  $M^2C^3$  [1-8] คือวงจรที่สามารถในการเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้าระหว่างบัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำ โดยอาศัยชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลที่ต่อเรียงอนุกรมกันอยู่เป็นชุดๆ แต่ละชุดจะมีอุปกรณ์สวิตซ์กำลัง 3 ตัว และตัวเก็บประจุ 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เมื่อนำชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลจำนวน 2 ชุด มาต่อเรียงอนุกรมกันดังรูปที่ 3.2 จะได้วงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ ซึ่งเป็นวงจรที่ได้เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากวงจร  $M^2C^3$  มีจุดเด่นอยู่หลายประการคือ

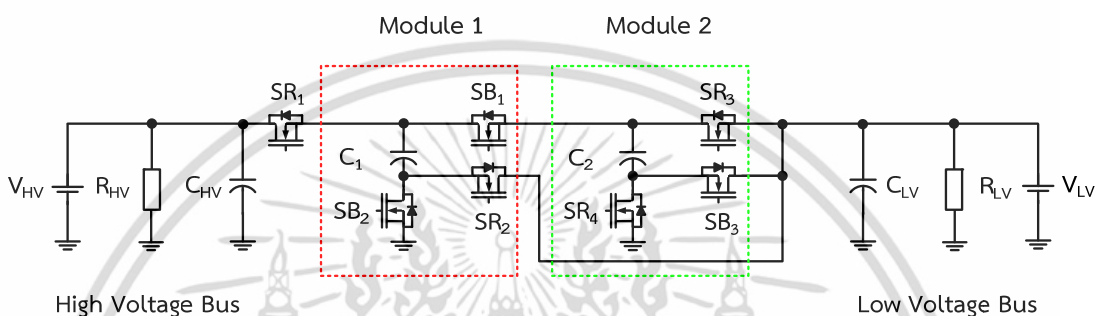
- วงจรมีน้ำหนักเบาเนื่องจากไม่มีตัวเหนี่ยวนำเป็นองค์ประกอบ
- วงจรสามารถควบคุมทิศทางการไหลของพลังงานไฟฟ้าได้ 2 ทิศทางระหว่างบัสแรงดันต่ำและบัสแรงดันสูงเปรียบเสมือนวงจรคือหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรง
- การควบคุมวงจรไม่ซับซ้อนเนื่องจากวงจรสามารถใช้สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมในการควบคุม
- แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทมีคุณภาพสูงและมีการกระเพื่อมต่ำ
- วงจรสามารถบายพาสความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้
- วงจรมีประสิทธิภาพสูง

แต่อย่างไรก็ตามวงจร  $M^2C^3$  ยังมีจุดบกพร่องในเรื่องของการใช้จำนวนสวิตซ์กำลังเป็นจำนวนมากกล่าวคือ สำหรับวงจร  $M^2C^3$  ที่  $N$  ระดับ จะใช้สวิตซ์กำลังจำนวน  $3N-2$  ตัว อีกทั้งสวิตซ์กำลังที่ติดตั้งอยู่ระหว่างขั้วบวกของตัวเก็บประจุจำเป็นต้องทนแรงดันไฟฟ้าได้อย่างน้อย 2 เท่าของแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ ซึ่งหากจำนวนระดับเพิ่มมากขึ้นจะทำให้วงจรมีราคาต้นทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้นตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล 1 ชุด



รูปที่ 3.2 วงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ

### 3.3 หลักการควบคุมการทำงานของวงจร $M^2C^3$

หลักการควบคุมการทำงานของวงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ ได้ทำการเลือกใช้ชุดสัญญาณรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยมที่มีวัฏจักรการทำงานเป็น 50 % เพื่อควบคุมอุปกรณ์สวิตช์กำลังแต่ละตัวให้ทำงานสลับกัน โดยสวิตช์กำลัง  $SR_1$  ถึง  $SR_4$  ถูกควบคุมด้วยสัญญาณดังรูปที่ 3.3(ก) ส่วนสวิตช์กำลัง  $SB_1$  ถึง  $SB_3$  ถูกควบคุมด้วยสัญญาณดังรูปที่ 3.3(ข) ซึ่งสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังจะมีผลต่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานระหว่างบัสแรงดันสูงกับบัสแรงดันต่ำ

### 3.4 ทิศทางการโอนย้ายพลังงานของวงจร $M^2C^3$

วงจร  $M^2C^3$  3 ระดับมีความสามารถในการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างอัตโนมัติแบบ 2 ทิศทาง โดยใช้หลักการของการอัดประจุและคายประจุแบบสมดุลของตัวเก็บประจุที่อยู่ในวงจร ซึ่งทิศทางการโอนย้ายพลังงานจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Ratio of Voltage Source หรือ RVS) กับค่าอัตราส่วนการอนุรักษ์พลังงาน (Conversion Ratio หรือ CR) กล่าวคือ ถ้า  $RVS < CR$  ทำให้วงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง และถ้า  $RVS > CR$  ทำให้วงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ โดยค่า RVS และ CR สามารถหาได้ดังสมการที่ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับ

$$RVS = \frac{V_{HV}}{V_{LV}} \quad (3.1)$$

เมื่อ		
RVS	คือ	ค่าอัตราส่วนของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า
$V_{HV}$	คือ	แรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง (V)
$V_{LV}$	คือ	แรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ (V)

และ

$$CR = N + 1 \quad (3.2)$$

เมื่อ		
CR	คือ	ค่าอัตราส่วนการอนุรักษ์พลังงาน
N	คือ	จำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล

### 3.4.1 ทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำของวงจร $M^2C^3$

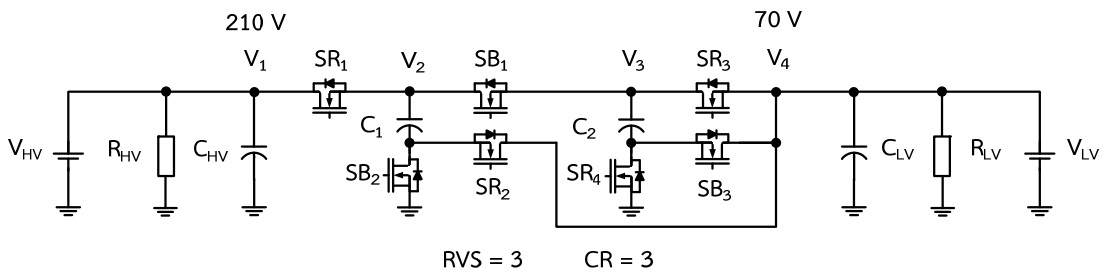
ทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำเกิดขึ้นเมื่อ  $RVS > CR$  ทำให้ของวงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ จะทำการลดระดับแรงดันไฟฟ้าลง 3 เท่าของแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูงเช่น ขณะในสภาวะปกติแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำมีค่า 210 V และ 70 V ตามลำดับดังรูปที่ 3.4(ก) ต่อมาแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำลดลงเหลือ 65 V ทำให้ค่า  $RVS > CR$  ดังรูปที่ 3.4(ข) ดังนั้นวงจร  $M^2C^3$  จะทำการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำโดยการควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง SR ดังรูปที่ 3.4(ค) และ SB ดังรูปที่ 3.4(ง) ซึ่งทำให้ตัวเก็บประจุสามารถอัดประจุและคายประจุแบบสมมูลดังแสดงในตารางที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของตัวเก็บประจุแต่ละตัวสามารถอธิบายได้ด้วยวงจรสมมูลโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



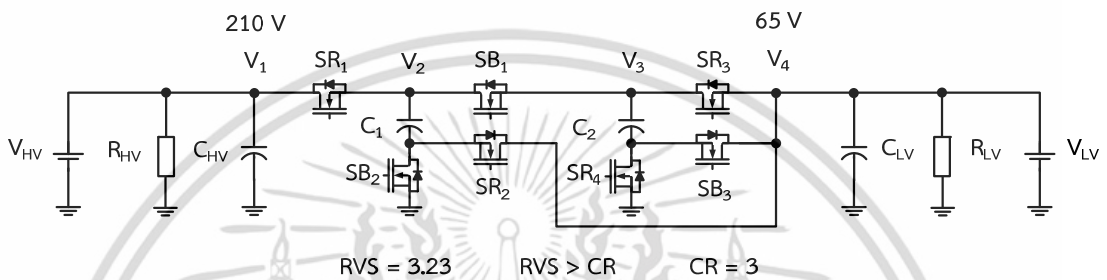
(ก) ชุดสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิตช์กำลัง  $SR_n$       (ข) ชุดสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิตช์กำลัง  $SB_n$

รูปที่ 3.3 ชุดสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิตช์กำลัง

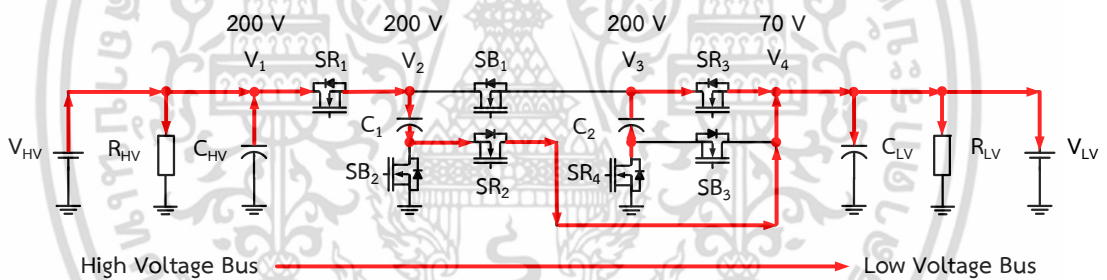
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



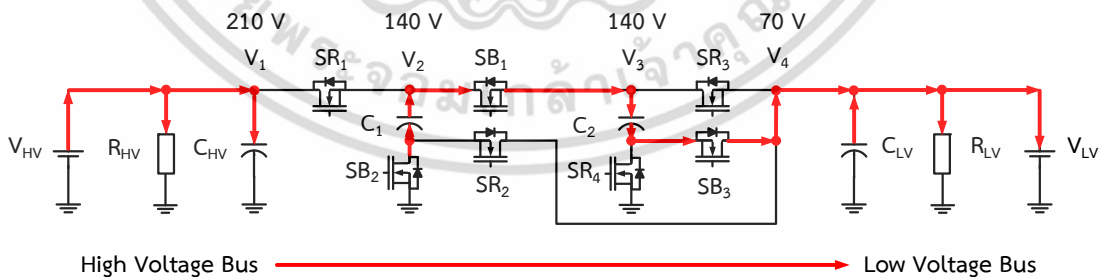
(ก) วงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ เมื่อ  $RVS = CR$



(ข) วงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ เมื่อ  $RVS > CR$



(ค) วงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ เมื่อสวิตช์กำลัง SR ทำงาน



(ง) วงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ เมื่อสวิตช์กำลัง SB ทำงาน

**รูปที่ 3.4** การทำงานของวงจรเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

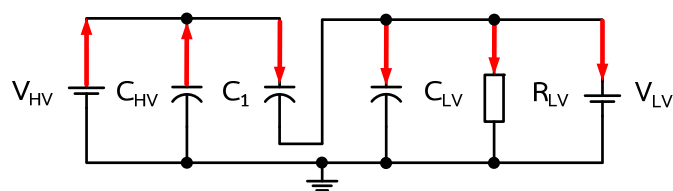
ตารางที่ 3.1 สภาวะการอัดประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ

ช่วงการทำงาน	สภาวะการทำงาน
สวิตช์ SR ทำงาน	$V_{HV} \downarrow + C_{HV} \downarrow \rightarrow C_1 \uparrow + C_{LV} \uparrow + V_{LV} \uparrow$ $C_2 \downarrow \rightarrow C_{LV} \uparrow + V_{LV} \uparrow$
สวิตช์ SB ทำงาน	$V_{HV} \downarrow \rightarrow C_{HV} \uparrow$ $C_1 \downarrow \rightarrow C_2 \uparrow + V_{LV} \uparrow$ $C_{LV} \downarrow \rightarrow V_{LV} \uparrow$
$\downarrow$ คือ สภาวะการคายประจุ และ $\uparrow$ คือ สภาวะการอัดประจุ	

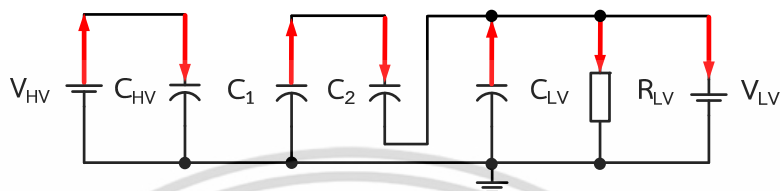
ขั้นตอนที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ก) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง  $V_{HV}$  และตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  จะทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $C_{LV}$  เพื่อทำการจ่ายภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ ในขั้นตอนนี้ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้าเป็น  $C_{HV} = V_{HV}$ ,  $C_1 = (2/3)V_{HV}$  และ  $C_{LV} = (1/3)V_{HV}$

ขั้นตอนที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ข) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง  $V_{HV}$  ทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  และในขณะเดียวกันตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_2$  และ  $C_{LV}$  จะถูกคายประจุเพื่อทำการจ่ายภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ ในขั้นตอนนี้ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้าเป็น  $C_{HV} = V_{HV}$ ,  $C_1 = (2/3)V_{HV}$  และ  $C_{LV} = (1/3)V_{HV}$

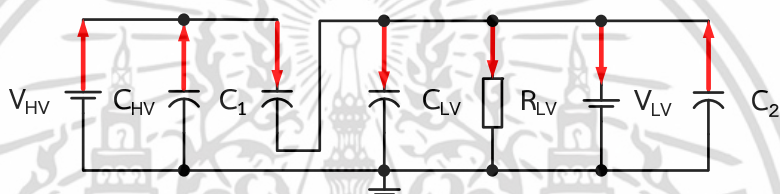
ขั้นตอนที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ค) ตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $C_{LV}$  จะถูกอัดประจุตามขั้นตอนที่ 1 อีกครั้ง และในขณะเดียวกันตัวเก็บประจุ  $C_2$  ทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุตัวเก็บประจุ  $C_{LV}$  เพื่อทำการจ่ายภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ ในขั้นตอนนี้ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้าเป็น  $C_{HV} = V_{HV}$ ,  $C_1 = (2/3)V_{HV}$  และ  $C_{LV} = (1/3)V_{HV}$  หลังจากนั้นขั้นตอนที่ 2 และ 3 จะทำงานสลับกันตามสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังในวงจร



(ก) ขั้นตอนที่ 1



(ข) ขั้นตอนที่ 2

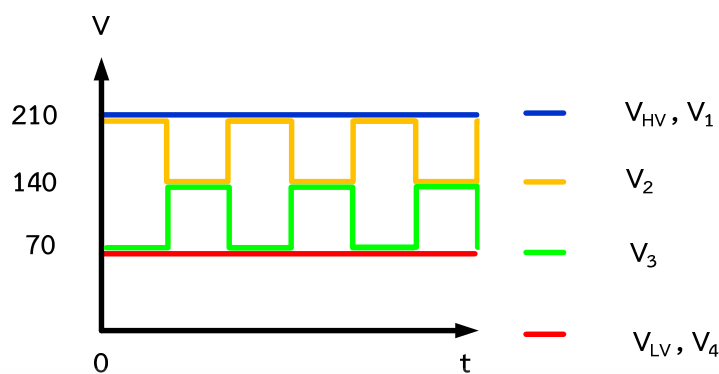


(ค) ขั้นตอนที่ 3

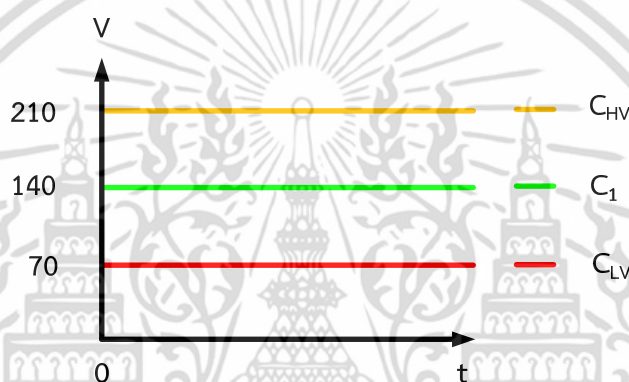
### รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการทำงานของตัวเก็บประจุแต่ละตัว

เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ

เมื่อสวิตช์ SR และสวิตช์ SB ทำงานสลับกันตามชุดสัญญาณควบคุม แรงดันไฟฟ้าที่ได้ในแต่ละโหนด (Node) เทียบกราวด์ (Ground) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามสภาวะการทำงานของสวิตช์กำลัง ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละโหนดเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 3.6 และเมื่อทำการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงรูปที่ 3.7



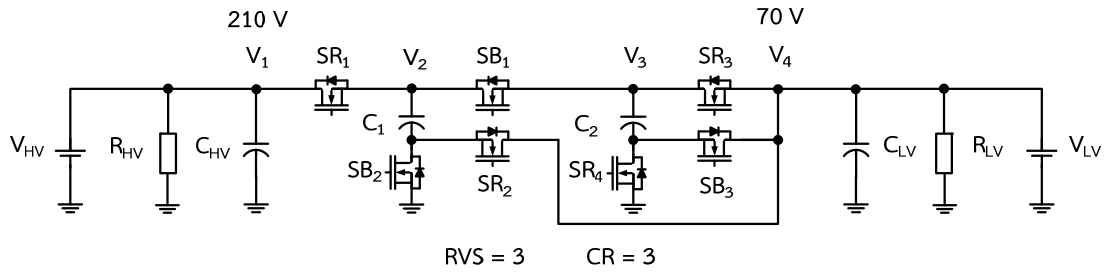
รูปที่ 3.6 แรงดันไฟฟ้าในแต่ละโหนดเทียบกราวด์  
เมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ



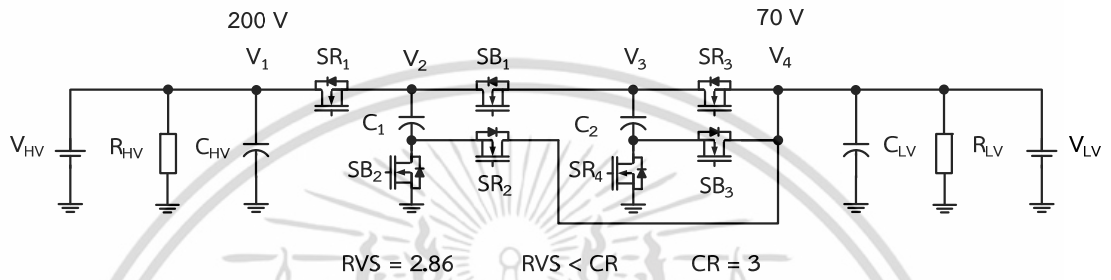
รูปที่ 3.7 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัว  
เมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ

### 3.4.2 ทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง ของวงจร $M^2C^3$

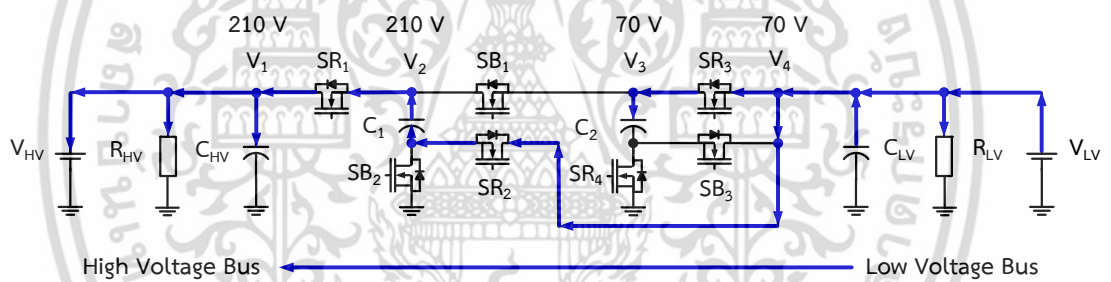
ทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูงเกิดขึ้นเมื่อ  $RVS < CR$  ทำให้ของวงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ จะทำการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าขึ้น 3 เท่าของแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ เช่น ขณะในสภาวะปกติแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำมีค่า 210 V และ 70 V ตามลำดับดังรูปที่ 3.8(ก) ต่อมาแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูงลดลงเหลือ 200 V ทำให้ค่า  $RVS < CR$  ดังรูปที่ 3.8(ข) ดังนั้นวงจร  $M^2C^3$  จะทำการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูงโดยการควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง SR ดังรูปที่ 3.8(ค) และ SB ดังรูปที่ 3.8(ง) ซึ่งทำให้ตัวเก็บประจุสามารถอัดประจุและคายประจุแบบสมดุลดังแสดงในตารางที่ 3.2 ขั้นตอนการทำงานของตัวเก็บประจุแต่ละตัวสามารถอธิบายได้ด้วยวงจรสมมูลโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



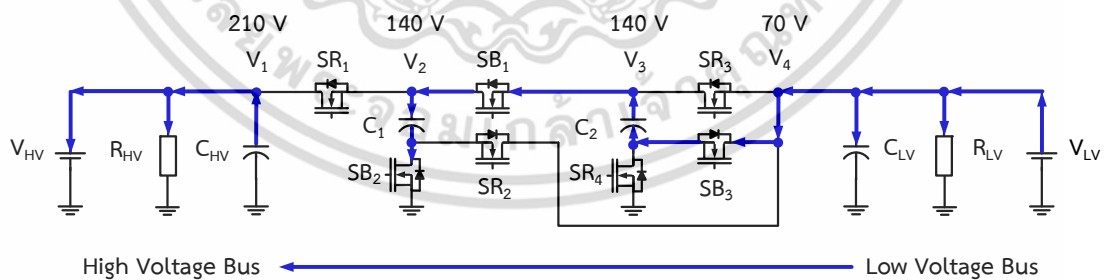
(ก) วงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ เมื่อ  $RVS = CR$



(ข) วงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ เมื่อ  $RVS < CR$



(ค) วงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ เมื่อสวิตช์กำลัง SR ทำงาน



(ง) วงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ เมื่อสวิตช์กำลัง SB ทำงาน

**รูปที่ 3.8** การทำงานของวงจรเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า จากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สภาวะการอัดประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง

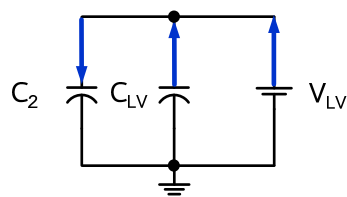
ช่วงการทำงาน	สภาวะการทำงาน
สวิตช์ SR ทำงาน	$V_{LV} \downarrow + C_{LV} \downarrow \rightarrow C_2 \uparrow$ $V_{LV} \downarrow + C_{LV} \downarrow + C_1 \downarrow \rightarrow C_{HV} \uparrow + V_{HV} \uparrow$
สวิตช์ SB ทำงาน	$V_{LV} \downarrow \rightarrow C_{LV} \uparrow$ $V_{LV} \downarrow + C_{LV} \downarrow + C_2 \downarrow \rightarrow C_1 \uparrow$ $C_{HV} \downarrow \rightarrow V_{HV} \uparrow$
$\downarrow$ คือ สภาวะการคายประจุ และ $\uparrow$ คือ สภาวะการอัดประจุ	

ขั้นตอนที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ก) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ  $V_{LV}$  และตัวเก็บประจุ  $C_{LV}$  ทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_2$  (ตัวเก็บประจุ  $C_{LV}$  จะคายประจุตามแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า  $V_{LV}$  เสมอทุกขั้นตอน) ในขั้นตอนนี้ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้าเป็น  $C_{LV} = V_{LV}$  และ  $C_2 = V_{LV}$

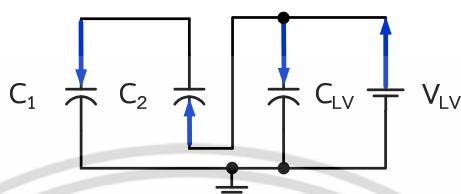
ขั้นตอนที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ข) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ  $V_{LV}$  ทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_{LV}$  และตัวเก็บประจุ  $C_2$  ทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_1$  ในขั้นตอนนี้ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้าเป็น  $C_{LV} = V_{LV}$ ,  $C_2 = V_{LV}$  และ  $C_1 = 2V_{LV}$

ขั้นตอนที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ค) ตัวเก็บประจุ  $C_2$  จะถูกอัดประจุตามขั้นตอนที่ 1 อีกครึ่ง ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  จะถูกอัดประจุด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ  $V_{LV}$  ร่วมกับตัวเก็บประจุ  $C_{LV}$  และ  $C_1$  เพื่อทำการจ่ายภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง ในขั้นตอนนี้ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้าเป็น  $C_{LV} = V_{LV}$ ,  $C_2 = V_{LV}$ ,  $C_1 = 2V_{LV}$  และ  $C_{HV} = 3V_{LV}$

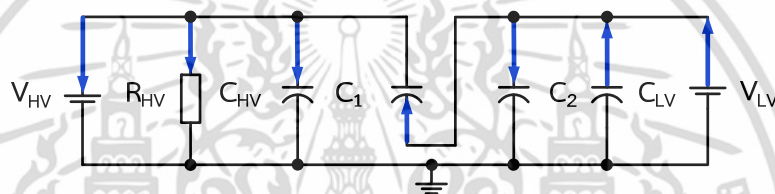
ขั้นตอนที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ง) ตัวเก็บประจุ  $C_{LV}$  และ  $C_1$  จะถูกอัดประจุตามขั้นตอนที่ 2 อีกครึ่ง ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  จะทำการจ่ายภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง ในขั้นตอนนี้ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้าเป็น  $C_{LV} = V_{LV}$ ,  $C_2 = V_{LV}$ ,  $C_1 = 2V_{LV}$  และ  $C_{HV} = 3V_{LV}$  หลังจากนั้นขั้นตอนที่ 3 และ 4 จะทำงานสลับกันตามสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังในวงจร



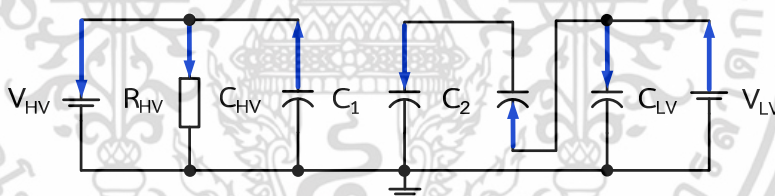
(ก) ขั้นตอนที่ 1



(ข) ขั้นตอนที่ 2



(ค) ขั้นตอนที่ 3

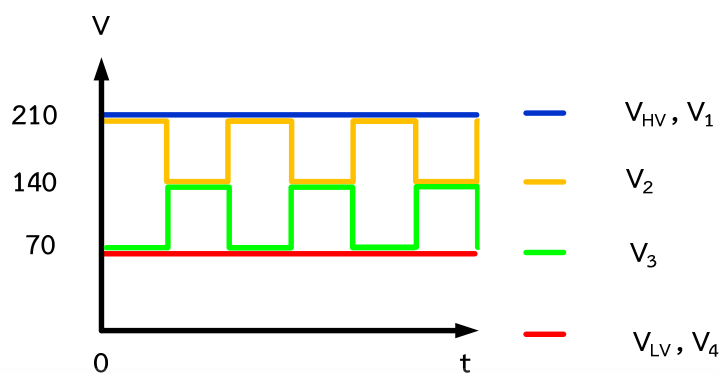


(ง) ขั้นตอนที่ 4

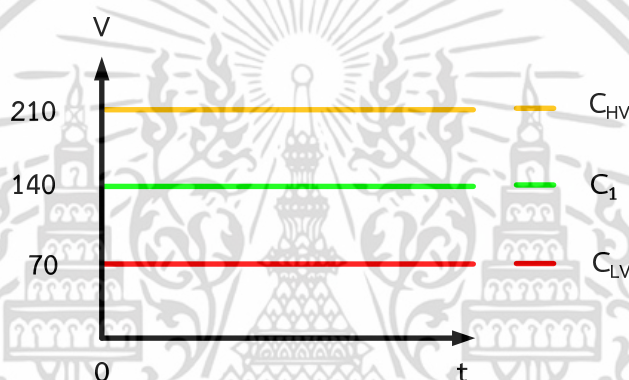
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการทำงานของตัวเก็บประจุแต่ละตัวเมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง

เมื่อสวิตช์ SR และสวิตช์ SB ทำงานสลับกันตามชุดสัญญาณควบคุม แรงดันไฟฟ้าที่ได้ในแต่ละโหนด (Node) เทียบกราวด์ (Ground) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามสภาวะการทำงานของสวิตช์กำลัง ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละโหนดเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 3.10 และเมื่อทำการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงรูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แรงดันไฟฟ้าในแต่ละโหนดเทียบกราวด์  
เมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง



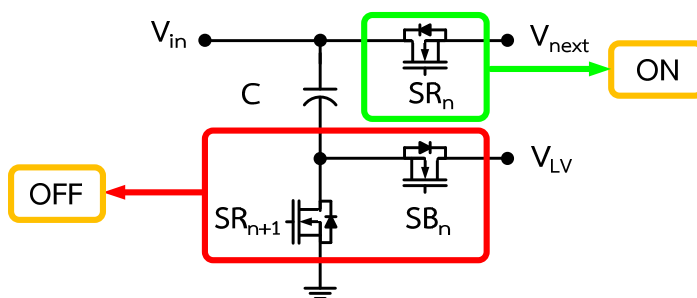
รูปที่ 3.11 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวเมื่อ  
ทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง

### 3.5 การบายพาสความผิดพลาดของวงจร $M^2C^3$

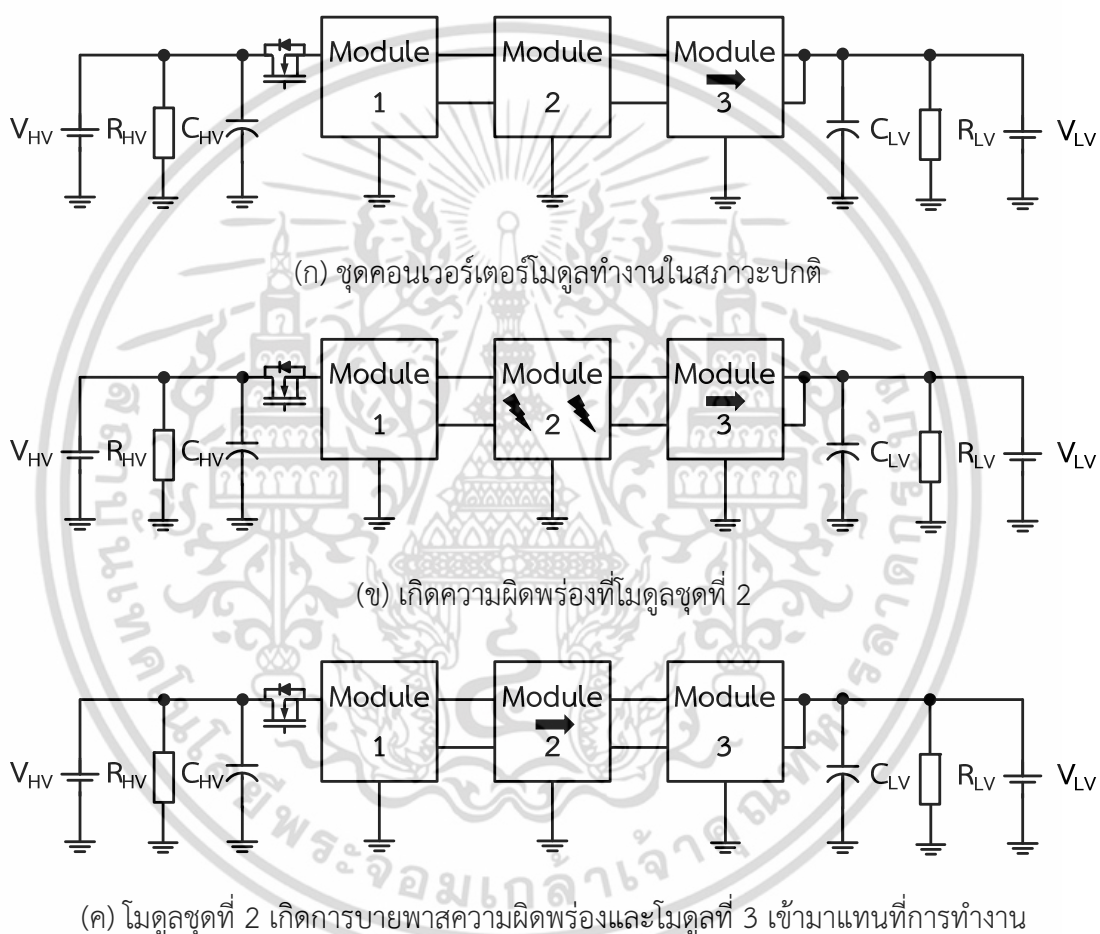
โครงสร้างของวงจร  $M^2C^3$  มีความสามารถในการบายพาสความผิดพลาดออกจากวงจร การบายพาสนั้นจำเป็นต้องมีชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลสำรองเพื่อรักษาค่า CR ให้มีค่าคงที่ ซึ่งในการบายพาสจะใช้สัญญาณควบคุมให้สวิตช์กำลัง  $SR_n$  ทำงาน (On) ส่วน  $SB_n$  และ  $SR_{n+1}$  ไม่ทำงาน (Off) ดังรูปที่ 3.12 โดยเรียกสภาวะนี้ว่าสภาวะบายพาส (Bypass State) ส่วนชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลที่ทำงานในสภาวะปกติเรียกว่าสภาวะแอคทีฟ (Active State)

เมื่อชุดควบคุมสามารถตรวจพบตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาดในวงจร  $M^2C^3$  ชุดควบคุมจะทำการส่งสัญญาณไปที่ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลที่เกิดความผิดพลาด เพื่อให้วงจรบายพาสความผิดพลาดในระบบออกไป พร้อมทั้งสั่งการให้ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลสำรองทำงานเพื่อรักษาค่า CR ให้มีค่าคงที่ แต่อย่างไรก็ตามวงจรจะไม่สามารถที่จะบายพาสความผิดพลาดได้ในกรณีของ  $SR_n$  เปิดวงจร (Open Circuit) ในขณะที่กำลังเกิดความผิดพลาด ซึ่งมีผลให้วงจร  $M^2C^3$  ไม่สามารถทำงานต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 หลักการบายพาสชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการบายพาสความผิดปกติของวงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ

การบายพาสความผิดปกติเริ่มต้นจาก ในสภาวะปกติเมื่อโมดูลชุดที่ 1 และ 2 อยู่ในสภาวะแอกทีฟ ส่วนโมดูลชุดที่ 3 (ชุดโมดูลสำรอง) อยู่ในสภาวะบายพาสดังรูปที่ 3.13(ก) ต่อมาในรูปที่ 3.13(ข) แสดงสภาวะที่เกิดความผิดปกติขึ้นที่โมดูลชุดที่ 2 ซึ่งทันทีที่โมดูลชุดที่ 2 จะถูกบายพาส และโมดูลชุดที่ 3 เข้ามาแทนที่การทำงานและอยู่ในสภาวะแอกทีฟดังรูปที่ 3.13(ค) เพื่อเป็นการรักษาค่า CR มิให้เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การวิเคราะห์ค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในวงจร $M^2C^3$

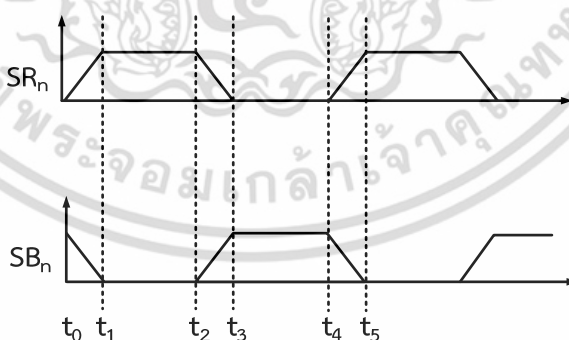
การวิเคราะห์ค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในวงจร  $M^2C^3$  จะใช้วงจรสมมูล เพื่อวิเคราะห์หาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในสภาวะคงตัวตามช่วงเวลาการควบคุม โดยแต่ละช่วงจะมีวัฏจักรการทำงานที่ 50% ซึ่งในการวิเคราะห์จะทำการกำหนดเงื่อนไขของการทำงานดังต่อไปนี้

- ค่าความต้านทานระหว่างขาเดรน (Drain) กับ ซอร์ซ (Source) ของมอสเฟตมีค่าเท่ากับศูนย์
- ค่าความต้านทานแฝง ESR (Equivalent Series Resistance) ของตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับศูนย์
- แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าในอุดมคติ
- ค่าความสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจรมีค่าเท่ากับศูนย์

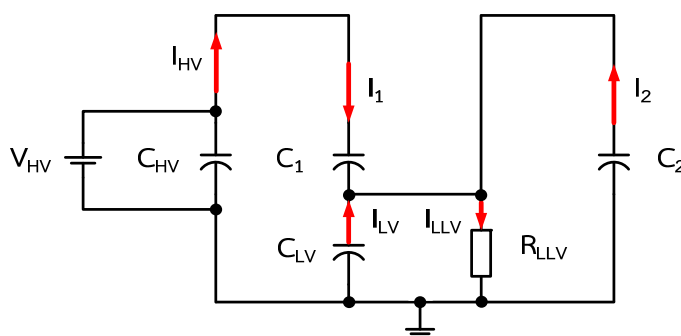
ในการวิเคราะห์จะแบ่งการวิเคราะห์การทำงานออกเป็น 2 ส่วนคือเมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ และวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.6.1 วงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ

การวิเคราะห์ค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในวงจร  $M^2C^3$  เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ ซึ่งในการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น 4 ช่วงเวลาดังรูปที่ 3.14 และใช้วงจรสมมูลดังรูปที่ 3.15 โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.14 ช่วงเวลาการวิเคราะห์วงจร  $M^2C^3$



รูปที่ 3.15 วงจรสมมูลในช่วงเวลาที่  $t_1$  ถึง  $t_2$  เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ

• ช่วงที่ 1 ที่เวลา  $t_1$  ถึง  $t_2$

ช่วงเวลา  $t_1$  ถึง  $t_2$  ตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  ที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าจะทำหน้าที่อัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_1$  เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ  $R_{LLV}$  (Low Voltage Load) ในขณะเดียวกันตัวเก็บประจุ  $C_{LV}$  และ  $C_2$  จะทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำเช่นเดียวกัน (ตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_{LV}$  มีค่าเท่ากับ  $C$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ซึ่งที่เวลา  $t_1$  ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้าดังสมการที่ (3.3) ถึง (3.6)

$$V_{C_{HV}}(t_1) = V_{HV} + \delta_1 \quad (3.3)$$

$$V_{C_1}(t_1) = \frac{2}{3}V_{HV} + \delta_2 \quad (3.4)$$

$$V_{C_2}(t_1) = \frac{1}{3}V_{HV} + \delta_3 \quad (3.5)$$

$$V_{C_{LV}}(t_1) = \frac{1}{3}V_{HV} + \delta_4 \quad (3.6)$$

เมื่อ		
$V_{HV}$	คือ	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านบัสแรงดันสูง (V)
$V_{C_{HV}}(t)$	คือ	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของตัวเก็บประจุ $C_{HV}$ ที่เวลาใดๆ (V)
$V_{C_1}(t)$	คือ	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของตัวเก็บประจุ $C_1$ ที่เวลาใดๆ (V)
$V_{C_2}(t)$	คือ	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของตัวเก็บประจุ $C_2$ ที่เวลาใดๆ (V)
$V_{C_{LV}}(t)$	คือ	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของตัวเก็บประจุ $C_{LV}$ ที่เวลาใดๆ (V)
$\delta_1$	คือ	ค่าคงที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของตัวเก็บประจุ $C_{HV}$ (V)
$\delta_2$	คือ	ค่าคงที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของตัวเก็บประจุ $C_1$ (V)
$\delta_3$	คือ	ค่าคงที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของตัวเก็บประจุ $C_2$ (V)
$\delta_4$	คือ	ค่าคงที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของตัวเก็บประจุ $C_{LV}$ (V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.15 จะได้ว่า

$$V_{HV} = V_{C_1}(t) + V_{C_{LV}}(t) \quad (3.7)$$

$$V_{C_{HV}}(t) = V_{C_1}(t) + V_{C_{LV}}(t) \quad (3.8)$$

$$V_{C_{LV}}(t) = V_{C_2}(t) \quad (3.9)$$

$$I_{LLV}(t) = I_1(t) + I_2(t) + I_{LV}(t) \quad (3.10)$$

เมื่อ

$I_1(t)$	คือ	กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ $C_1$ ที่เวลาใดๆ (A)
$I_2(t)$	คือ	กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ $C_2$ ที่เวลาใดๆ (A)
$I_{LV}(t)$	คือ	กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ $C_{LV}$ ที่เวลาใดๆ (A)
$I_{LLV}(t)$	คือ	กระแสไฟฟ้าของภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำที่เวลาใดๆ (A)

นำสมการ (3.4) และ (3.6) มาแทนค่าในสมการที่ (3.7) จะได้

$$V_{HV} = \frac{2}{3}V_{HV} + \delta_2 + \frac{1}{3}V_{HV} + \delta_4 \quad (3.11)$$

$$\delta_2 + \delta_4 = 0 \quad (3.12)$$

นำสมการ (3.3) (3.4) และ (3.6) มาแทนค่าในสมการที่ (3.8) จะได้

$$V_{HV} + \delta_I = \frac{2}{3}V_{HV} + \delta_2 + \frac{1}{3}V_{HV} + \delta_4 \quad (3.13)$$

$$\delta_2 + \delta_4 = \delta_I \quad (3.14)$$

นำสมการ (3.12) มาแทนค่าในสมการที่ (3.14) จะได้

$$\delta_I = 0 \quad (3.14)$$

นำสมการ (3.5) และ (3.6) มาแทนค่าในสมการที่ (3.9) จะได้

$$\frac{1}{3}V_{HV} + \delta_4 = \frac{1}{3}V_{HV} + \delta_3 \quad (3.15)$$

$$\delta_4 = \delta_3 \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการพิจารณาที่เวลา  $t_2$  ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้าดังสมการที่ (3.17) ถึง (3.20)

$$V_{C_{HV}}(t_2) = V_{HV} \quad (3.17)$$

$$V_{C_1}(t_2) = \frac{2}{3}V_{HV} + \delta_2 + \frac{I_1(t_2) \times 0.5T}{C} \quad (3.18)$$

$$V_{C_2}(t_2) = \frac{1}{3}V_{HV} + \delta_3 - \frac{I_2(t_2) \times 0.5T}{C} \quad (3.19)$$

$$V_{C_{LV}}(t_2) = \frac{1}{3}V_{HV} + \delta_4 - \frac{I_{LV}(t_2) \times 0.5T}{C} \quad (3.20)$$

เมื่อ

T คือ คาบเวลาการสวิตช์ (s)

นำสมการ (3.18) และ (3.20) มาแทนค่าในสมการที่ (3.7) จะได้

$$V_{HV} = \frac{2}{3}V_{HV} + \delta_2 + \frac{I_1(t_2) \times 0.5T}{C} + \frac{1}{3}V_{HV} + \delta_4 - \frac{I_{LV}(t_2) \times 0.5T}{C} \quad (3.21)$$

$$\delta_2 + \frac{I_1(t_2) \times 0.5T}{C} + \delta_4 - \frac{I_{LV}(t_2) \times 0.5T}{C} = 0 \quad (3.22)$$

นำสมการที่ (3.12) มาแทนค่าในสมการที่ (3.22) จะได้

$$\frac{I_1(t_2) \times 0.5T}{C} - \frac{I_{LV}(t_2) \times 0.5T}{C} = 0 \quad (3.23)$$

$$I_1(t_2) = I_{LV}(t_2) \quad (3.24)$$

นำสมการ (3.19) และ (3.20) มาแทนค่าในสมการที่ (3.9) จะได้

$$\frac{1}{3}V_{HV} + \delta_4 - \frac{I_{LV}(t_2) \times 0.5T}{C} = \frac{1}{3}V_{HV} + \delta_3 - \frac{I_2(t_2) \times 0.5T}{C} \quad (3.25)$$

$$\delta_4 - \frac{I_{LV}(t_2) \times 0.5T}{C} = \delta_3 - \frac{I_2(t_2) \times 0.5T}{C} \quad (3.26)$$

นำสมการ (3.16) และ (3.20) มาแทนค่าในสมการที่ (3.26) จะได้

$$I_{LV}(t_2) = I_2(t_2) \quad (3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการ (3.24) และ (3.27) มาแทนค่าในสมการที่ (3.10) จะได้

$$I_1(t) = \frac{1}{3} I_{LLV}(t) \quad (3.28)$$

$$I_2(t) = \frac{1}{3} I_{LLV}(t) \quad (3.29)$$

$$I_{LV}(t) = \frac{1}{3} I_{LLV}(t) \quad (3.30)$$

เมื่อนำสมการที่ (3.28) (3.29) และ (3.30) แทนค่าลงในสมการ (3.18) (3.19) และ (3.20) ตามลำดับจะได้ว่า

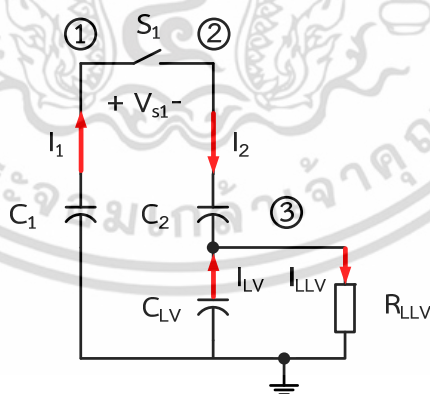
$$V_{C_1}(t_2) = \frac{2}{3} V_{HV} + \delta_2 + \frac{1}{6} \Delta \quad (3.31)$$

$$V_{C_2}(t_2) = \frac{1}{3} V_{HV} + \delta_3 - \frac{1}{6} \Delta \quad (3.32)$$

$$V_{C_{LV}}(t_2) = \frac{1}{3} V_{HV} + \delta_4 - \frac{1}{6} \Delta \quad (3.33)$$

โดยที่

$$\Delta = \frac{I_{LLV}(t) \times T}{C} \quad (3.34)$$



รูปที่ 3.16 วงจรสมมูลในช่วงเวลาที่  $t_2$  ถึง  $t_3$  เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ช่วงที่ 2 ที่เวลา  $t_2$  ถึง  $t_3$

ช่วงเวลา  $t_2$  ถึง  $t_3$  เป็นช่วงเวลาสั้นๆที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากช่วงระยะเวลาที่ 1 ไปยังช่วงระยะเวลาที่ 3 ซึ่งตัวเก็บประจุ  $C_1$  กำลังจะทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_2$  จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าระหว่างโหนดที่ 1 และ 2 ค่อยๆเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างทันทีทันใด โดยช่วงเวลานี้จะสมมติให้มีชุดสวิตช์  $S_1$  ทำหน้าที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างโหนดที่ 1 และ 2 ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าของสวิตช์  $S_1$  ในรูปที่ 3.16 มีค่าดังสมการที่ (3.35)

$$\Delta V_{s1} = V_{C1}(t_2) - V_{C2}(t_2) - V_{C_{LV}}(t_2) \quad (3.35)$$

เมื่อสวิตช์  $S_1$  ทำงาน (Turn On) ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_2$  และ  $C_{LV}$  ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวเก็บประจุ  $C_1$  เมื่อทำการพิจารณาโหนดที่ 1 จะได้ว่าปริมาณประจุที่เปลี่ยนแปลงไปของ  $C_2$  และ  $C_{LV}$  หรือ  $C_{node\ 2}$  เนื่องจากแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป  $\Delta V_{s1}$  (สมการที่ (3.36)) จะมีค่าเท่ากับปริมาณประจุที่เปลี่ยนแปลงไปของ  $C_1$  เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่จุดสมดุลใหม่  $\Delta V_{C1}$  (สมการที่ (3.39)) บวกกับปริมาณประจุที่เปลี่ยนแปลงไปของ  $C_{node\ 2}$  เนื่องจากแรงดันที่จุดสมดุลใหม่  $\Delta V_{C1}$  (สมการที่ (3.40)) จะได้ดังสมการที่ (3.41)

โดยที่

$$\Delta Q_{node\ 2, \Delta V_{s1}} = \Delta V_{s1} \times C_{node\ 2} \quad (3.36)$$

$$C_{node\ 2} = \frac{C_2 \times C_{LV}}{C_2 + C_{LV}} \quad (3.37)$$

และ

$$C_{node\ 2} = 0.5C \quad (3.38)$$

$$\Delta Q_{C1, \Delta V_{C1}} = \Delta V_{C1} \times C_1 \quad (3.39)$$

จะได้

$$\Delta Q_{node\ 2, \Delta V_{C1}} = \Delta V_{C1} \times C_{node\ 2} \quad (3.40)$$

$$\Delta Q_{node\ 2, \Delta V_{s1}} = \Delta Q_{C1, \Delta V_{C1}} + \Delta Q_{node\ 2, \Delta V_{C1}} \quad (3.41)$$

$$\Delta V_{s1} \times C_{node\ 2} = (\Delta V_{C1} \times C_1) + (\Delta V_{C1} \times C_{node\ 2}) \quad (3.42)$$

$$\Delta V_{C1} = \frac{C_{node\ 2}}{C_1 + C_{node\ 2}} \times \Delta V_{s1} \quad (3.43)$$

$$\Delta V_{C1} = \frac{0.5C}{C + 0.5C} \times \Delta V_{s1} \quad (3.44)$$

$$\Delta V_{C1} = \frac{\Delta V_{s1}}{3} \quad (3.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการพิจารณาโหนดที่ 2 จะได้ว่าปริมาณประจุที่เปลี่ยนแปลงไปของ  $C_1$  ที่ถูกคายประจุด้วยแรงดันไฟฟ้า  $\Delta V_{s1}$  (สมการที่ (3.46)) มีค่าเท่ากับปริมาณประจุที่เปลี่ยนแปลงไปของ  $C_1$  และ  $C_{node 2}$  ที่ถูกอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าที่จุดสมดุลใหม่  $\Delta V_2$  (สมการที่ (3.47)) จะได้ดังสมการที่ (3.48)

$$\Delta Q_{C_1, \Delta V_{s1}} = \Delta V_{s1} \times C_1 \quad (3.46)$$

$$\Delta Q_{C_1, C_{node 2}, \Delta V_2} = \Delta V_2 \times (C_1 + C_{node 2}) \quad (3.47)$$

จะได้

$$\Delta Q_{C_1, \Delta V_{s1}} = \Delta Q_{C_1, C_{node 2}, \Delta V_2} \quad (3.48)$$

$$\Delta V_{s1} \times C_1 = \Delta V_2 \times (C_1 + C_{node 2}) \quad (3.49)$$

$$\Delta V_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_{node 2}} \times \Delta V_{s1} \quad (3.50)$$

$$\Delta V_2 = \frac{C}{C + 0.5C} \times \Delta V_{s1} \quad (3.51)$$

$$\Delta V_2 = \frac{2}{3} \times \Delta V_{s1} \quad (3.52)$$

เมื่อทำการพิจารณาโหนดที่ 2 อีกครั้งจะได้ว่าปริมาณประจุที่เปลี่ยนแปลงไปของ  $C_2$  มีค่าเท่ากับปริมาณประจุที่เปลี่ยนแปลงไปของ  $C_1$  (สมการที่ (3.53)) และผลรวมแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของ  $C_2$  และ  $C_1$  มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปในโหนดที่ 2  $\Delta V_2$  (สมการที่ (3.55))

$$\Delta Q_{C_2, \Delta V_{C_2}} = \Delta Q_{C_{LV}, \Delta V_{C_{LV}}} \quad (3.53)$$

$$\Delta V_{C_2} \times C_2 = \Delta V_{C_{LV}} \times C_{LV} \quad (3.54)$$

และ

$$\Delta V_2 = \Delta V_{C_2} + \Delta V_{C_{LV}} \quad (3.55)$$

จากสมการที่ (3.54) และ (3.55) จะได้แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวเก็บประจุ  $C_2$  คือ

$$\Delta V_{C_2} \times C_2 = (\Delta V_2 - \Delta V_{C_{LV}}) \times C_{LV} \quad (3.56)$$

$$(\Delta V_{C_2} \times C_2) + (\Delta V_{C_2} \times C_{LV}) = \Delta V_2 \times C_{LV} \quad (3.57)$$

$$\Delta V_{C_2} = \frac{C_{LV}}{C_2 + C_{LV}} \times \Delta V_2 \quad (3.58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta V_{C_2} = \frac{C}{C+C} \times \Delta V_2 \quad (3.59)$$

$$\Delta V_{C_2} = \frac{1}{2} \times \Delta V_2 \quad (3.60)$$

นำสมการที่ (3.52) มาแทนในสมการที่ (3.60) จะได้

$$\Delta V_{C_2} = \frac{1}{2} \times \frac{2}{3} \times \Delta V_{s1} \quad (3.60)$$

$$\Delta V_{C_2} = \frac{1}{3} \times \Delta V_{s1} \quad (3.61)$$

เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวเก็บประจุ  $C_2$  และ  $C_{LV}$  มีค่าเท่ากันจะได้ว่า

$$\Delta V_{C_{LV}} = \frac{1}{3} \times \Delta V_{s1} \quad (3.62)$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่เวลา  $t_3$  มีค่า

$$V_{C_1}(t_3) = V_{C_1}(t_2) - \Delta V_{C_1} \quad (3.63)$$

$$V_{C_1}(t_3) = V_{C_1}(t_2) - \frac{\Delta V_{s1}}{3} \quad (3.64)$$

และ

$$V_{C_2}(t_3) = V_{C_2}(t_2) + \Delta V_{C_2} \quad (3.65)$$

$$V_{C_2}(t_3) = V_{C_2}(t_2) + \frac{\Delta V_{s1}}{3} \quad (3.66)$$

และ

$$V_{C_{LV}}(t_3) = V_{C_{LV}}(t_2) + \Delta V_{C_{LV}} \quad (3.67)$$

$$V_{C_{LV}}(t_3) = V_{C_{LV}}(t_2) + \frac{\Delta V_{s1}}{3} \quad (3.68)$$

นำสมการที่ (3.31) (3.32) และ (3.33) มาแทนค่าในสมการที่ (3.35) จะได้ว่า

$$\Delta V_{s1} = \left(\frac{2}{3}V_{HV} + \delta_2 + \frac{1}{6}\Delta\right) - \left(\frac{1}{3}V_{HV} + \delta_3 - \frac{1}{6}\Delta\right) - \left(\frac{1}{3}V_{HV} + \delta_4 - \frac{1}{6}\Delta\right) \quad (3.69)$$

$$\Delta V_{s1} = \frac{1}{2}\Delta + \delta_2 - \delta_3 - \delta_4 \quad (3.70)$$

และ

$$\frac{1}{3}\Delta V_{s1} = \frac{1}{6}\Delta + \frac{1}{3}\delta_2 - \frac{1}{3}\delta_3 - \frac{1}{3}\delta_4 \quad (3.71)$$

นำสมการที่ (3.31) และ (3.71) มาแทนค่าในสมการที่ (3.64) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{C_1}(t_3) = \frac{2}{3}V_{HV} + \delta_2 + \frac{1}{6}\Delta - \frac{1}{6}\Delta - \frac{1}{3}\delta_2 + \frac{1}{3}\delta_3 + \frac{1}{3}\delta_4 \quad (3.72)$$

$$V_{C_1}(t_3) = \frac{2}{3}V_{HV} + \frac{2}{3}\delta_2 + \frac{1}{3}\delta_3 + \frac{1}{3}\delta_4 \quad (3.73)$$

นำสมการที่ (3.32) และ (3.71) มาแทนค่าในสมการที่ (3.66) จะได้ว่า

$$V_{C_2}(t_3) = \frac{1}{3}V_{HV} + \delta_3 - \frac{1}{6}\Delta + \frac{1}{6}\Delta + \frac{1}{3}\delta_2 - \frac{1}{3}\delta_3 - \frac{1}{3}\delta_4 \quad (3.74)$$

$$V_{C_2}(t_3) = \frac{1}{3}V_{HV} + \frac{1}{3}\delta_2 + \frac{2}{3}\delta_3 - \frac{1}{3}\delta_4 \quad (3.75)$$

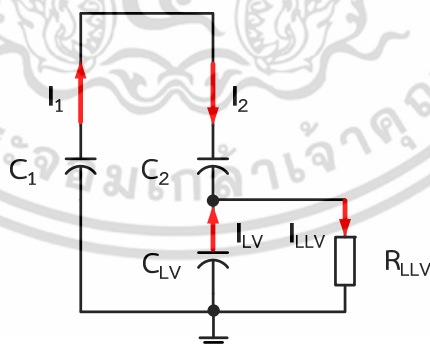
นำสมการที่ (3.33) และ (3.71) มาแทนค่าในสมการที่ (3.68) จะได้ว่า

$$V_{C_{LV}}(t_3) = \frac{1}{3}V_{HV} + \delta_4 - \frac{1}{6}\Delta + \frac{1}{6}\Delta + \frac{1}{3}\delta_2 - \frac{1}{3}\delta_3 - \frac{1}{3}\delta_4 \quad (3.76)$$

$$V_{C_{LV}}(t_3) = \frac{1}{3}V_{HV} + \frac{1}{3}\delta_2 - \frac{1}{3}\delta_3 + \frac{2}{3}\delta_4 \quad (3.77)$$

● ช่วงที่ 3 ที่เวลา  $t_3$  ถึง  $t_4$

ช่วงเวลา  $t_3$  ถึง  $t_4$  เป็นช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_2$  อย่างสมบูรณ์เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ  $R_{LLV}$  ในขณะเดียวกันตัวเก็บประจุ  $C_{LV}$  จะทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำเช่นเดียวกัน จากรูปที่ 3.17 จะได้ว่า



รูปที่ 3.17 วงจรสมมูลในช่วงเวลาที่  $t_3$  ถึง  $t_4$  เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ

$$V_{C_1}(t) = V_{C_2}(t) + V_{C_{LV}}(t) \quad (3.78)$$

$$I_{LLV}(t) = I_2(t) + I_{LV}(t) \quad (3.79)$$

$$I_1(t) = I_2(t) \quad (3.80)$$

ดังนั้นที่เวลา  $t_4$  ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้าคือ

$$V_{C_1}(t_4) = V_{C_1}(t_3) - \frac{I_1(t_4) \times 0.5T}{C} \quad (3.81)$$

$$V_{C_2}(t_4) = V_{C_2}(t_3) + \frac{I_2(t_4) \times 0.5T}{C} \quad (3.82)$$

$$V_{C_{LV}}(t_4) = V_{C_{LV}}(t_3) - \frac{I_{LV}(t_4) \times 0.5T}{C} \quad (3.83)$$

นำสมการที่ (3.73) (3.75) (3.77) (3.81) (3.82) และ (3.83) มาแทนในสมการที่ (3.78) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{2}{3}V_{HV} + \frac{2}{3}\delta_2 + \frac{1}{3}\delta_3 + \frac{1}{3}\delta_4 - \frac{I_1(t_4) \times 0.5T}{C} &= \frac{1}{3}V_{HV} + \frac{1}{3}\delta_2 + \frac{2}{3}\delta_3 - \frac{1}{3}\delta_4 \\ &+ \frac{I_2(t_4) \times 0.5T}{C} + \frac{1}{3}V_{HV} + \frac{1}{3}\delta_2 \\ &- \frac{1}{3}\delta_3 + \frac{2}{3}\delta_4 - \frac{I_{LV}(t_4) \times 0.5T}{C} \end{aligned} \quad (3.84)$$

$$I_{LV}(t_4) = I_1(t_4) + I_2(t_4) \quad (3.85)$$

นำสมการที่ (3.80) มาแทนในสมการที่ (3.85) จะได้ว่า

$$I_1(t_4) = \frac{I_{LV}(t_4)}{2} \quad (3.86)$$

$$I_2(t_4) = \frac{I_{LV}(t_4)}{2} \quad (3.87)$$

นำสมการที่ (3.86) มาแทนในสมการที่ (3.81) จะได้ว่า

$$V_{C_1}(t_4) = V_{C_1}(t_3) - \frac{1}{2} \times \frac{I_{LV}(t_4) \times 0.5T}{C} \quad (3.88)$$

$$V_{C_1}(t_4) = \frac{2}{3}V_{HV} + \frac{2}{3}\delta_2 + \frac{1}{3}\delta_3 + \frac{1}{3}\delta_4 - \frac{1}{2} \times \frac{I_{LV}(t_4) \times 0.5T}{C} \quad (3.89)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ (3.87) มาแทนในสมการที่ (3.82) จะได้ว่า

$$V_{C_2}(t_4) = V_{C_2}(t_3) + \frac{1}{2} \times \frac{I_{LV}(t_4) \times 0.5T}{C} \tag{3.90}$$

$$V_{C_2}(t_4) = \frac{1}{3}V_{HV} + \frac{1}{3}\delta_2 + \frac{2}{3}\delta_3 - \frac{1}{3}\delta_4 + \frac{1}{2} \times \frac{I_{LV}(t_4) \times 0.5T}{C} \tag{3.91}$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่เวลา  $t_4$  คือ

$$V_{C_1}(t_4) = \frac{2}{3}V_{HV} + \frac{2}{3}\delta_2 + \frac{1}{3}\delta_3 + \frac{1}{3}\delta_4 - \frac{1}{4}\Delta \tag{3.92}$$

$$V_{C_2}(t_4) = \frac{1}{3}V_{HV} + \frac{1}{3}\delta_2 + \frac{2}{3}\delta_3 - \frac{1}{3}\delta_4 + \frac{1}{4}\Delta \tag{3.93}$$

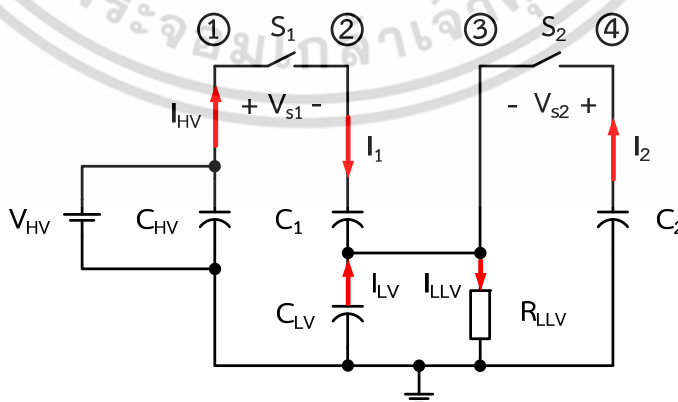
$$V_{C_{LV}}(t_4) = \frac{1}{3}V_{HV} + \frac{1}{3}\delta_2 - \frac{1}{3}\delta_3 + \frac{2}{3}\delta_4 - \frac{1}{4}\Delta \tag{3.94}$$

โดยที่

$$\Delta = \frac{I_{LLV}(t) \times T}{C} \tag{3.95}$$

● ช่วงที่ 4 ที่เวลา  $t_4$  ถึง  $t_5$

ช่วงเวลา  $t_4$  ถึง  $t_5$  เป็นช่วงเวลาสั้นๆที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากช่วงระยะเวลาที่ 4 ไปยังช่วงระยะเวลาที่ 1 อีกครั้ง ซึ่งแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า  $V_{HV}$  กำลังจะทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $C_{LV}$  จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าระหว่างโหนดที่ 1 และ 2 ค่อยๆเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างทันทีทันใด โดยช่วงเวลานี้จะสมมติให้มีชุดสวิตช์  $S_1$  ทำหน้าที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างโหนดที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ในการวิเคราะห์วงจรจะใช้หลักการวิเคราะห์แบบซ้อนทับของวงจร (Superposition) ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าของสวิตช์  $S_1$  ในรูปที่ 3.18 มีค่าดังสมการที่ (3.96)



รูปที่ 3.18 วงจรสมมูลในช่วงเวลาที่  $t_4$  ถึง  $t_5$  เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta V_{s1} = V_{HV} - V_{C1} - V_{CLV} \quad (3.96)$$

นำสมการที่ (3.92) และ (3.94) มาแทนค่าในสมการที่ (3.96) จะได้

$$\Delta V_{s1} = V_{HV} - V_{C1}(t_4) - V_{CLV}(t_4) \quad (3.97)$$

$$\Delta V_{s1} = V_{HV} - \frac{2}{3}V_{HV} - \frac{2}{3}\delta_2 - \frac{1}{3}\delta_3 - \frac{1}{3}\delta_4 + \frac{1}{4}\Delta - \frac{1}{3}V_{HV} - \frac{1}{3}\delta_2 + \frac{1}{3}\delta_3 - \frac{2}{3}\delta_4 + \frac{1}{4}\Delta \quad (3.98)$$

$$\Delta V_{s1} = -\delta_2 - \delta_4 + \frac{1}{2}\Delta \quad (3.99)$$

เมื่อสวิตช์  $S_1$  ทำงาน (Turn On) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า  $V_{HV}$  ทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $C_{LV}$  ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $C_{LV}$  ที่เวลา  $t_4$  มีค่าเท่ากันคือ

$$\Delta V_{C1, s1}(t_4) = \frac{\Delta V_{s1}}{2} \quad (3.100)$$

$$\Delta V_{C1, s1}(t_4) = -\frac{1}{2}\delta_2 - \frac{1}{2}\delta_4 + \frac{1}{4}\Delta \quad (3.101)$$

และ

$$\Delta V_{C_{LV}, s1}(t_4) = \frac{\Delta V_{s1}}{2} \quad (3.102)$$

$$\Delta V_{C_{LV}, s1}(t_4) = -\frac{1}{2}\delta_2 - \frac{1}{2}\delta_4 + \frac{1}{4}\Delta \quad (3.103)$$

หลังจากที่สวิตช์  $S_1$  ทำงานจะได้แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  $C_1$  คือ

$$V_{C1, s1}(t_4) = V_{C1}(t_4) + \Delta V_{C1, s1}(t_4) \quad (3.104)$$

นำสมการที่ (3.92) และ (3.103) มาแทนค่าในสมการที่ (3.104)

$$V_{C1, s1}(t_4) = \frac{2}{3}V_{HV} + \frac{2}{3}\delta_2 + \frac{1}{3}\delta_3 + \frac{1}{3}\delta_4 - \frac{1}{4}\Delta - \frac{1}{2}\delta_2 - \frac{1}{2}\delta_4 + \frac{1}{4}\Delta \quad (3.105)$$

$$V_{C1, s1}(t_4) = \frac{2}{3}V_{HV} + \frac{1}{6}\delta_2 + \frac{1}{3}\delta_3 - \frac{1}{6}\delta_4 \quad (3.106)$$

หลังจากที่สวิตช์  $S_1$  ทำงานจะได้แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  $C_{LV}$  คือ

$$V_{C_{LV}, s1}(t_5) = V_{C_{LV}}(t_4) + \Delta V_{C_{LV}, s1}(t_4) \quad (3.107)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ (3.94) และ (3.103) มาแทนค่าในสมการที่ (3.107)

$$V_{C_{LV},s1}(t_5) = \frac{1}{3}V_{HV} + \frac{1}{3}\delta_2 - \frac{1}{3}\delta_3 + \frac{2}{3}\delta_4 - \frac{1}{4}\Delta - \frac{1}{2}\delta_2 - \frac{1}{2}\delta_4 + \frac{1}{4}\Delta \quad (3.108)$$

$$V_{C_{LV},s1}(t_5) = \frac{1}{3}V_{HV} - \frac{1}{6}\delta_2 - \frac{1}{3}\delta_3 + \frac{1}{6}\delta_4 \quad (3.109)$$

เมื่อสวิตช์  $S_2$  ทำงานทำให้แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของสวิตช์  $S_2$  มีค่าดังสมการ

$$\Delta V_{s2} = V_{C_2} - \Delta V_{C_{LV},s1} \quad (3.110)$$

นำสมการที่ (3.93) และ (3.109) มาแทนค่าในสมการที่ (3.110) จะได้

$$\Delta V_{s2} = V_{C_2}(t_4) - \Delta V_{C_{LV},s1}(t_4) \quad (3.111)$$

$$\Delta V_{s2} = \frac{1}{3}V_{HV} + \frac{1}{3}\delta_2 + \frac{2}{3}\delta_3 - \frac{1}{3}\delta_4 + \frac{1}{4}\Delta - \frac{1}{3}V_{HV} + \frac{1}{6}\delta_2 + \frac{1}{3}\delta_3 - \frac{1}{6}\delta_4 \quad (3.112)$$

$$\Delta V_{s2} = \frac{1}{2}\delta_2 + \delta_3 - \frac{1}{2}\delta_4 + \frac{1}{4}\Delta \quad (3.113)$$

เมื่อทำการพิจารณาโหนดที่ 4 จะได้ว่าปริมาณประจุที่เปลี่ยนแปลงไปของ  $C_1$  และ  $C_{LV}$  หรือ  $C_{node\ 4}$  เนื่องจากแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป  $\Delta V_{s2}$  (สมการที่ (3.114)) จะมีค่าเท่ากับปริมาณประจุที่เปลี่ยนแปลงไปของ  $C_2$  เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่จุดสมดุลใหม่  $\Delta V_{C_2}$  (สมการที่ (3.117)) บวกกับปริมาณประจุที่เปลี่ยนแปลงไปของ  $C_{node\ 4}$  เนื่องจากแรงดันที่จุดสมดุลใหม่  $\Delta V_{C_2}$  (สมการที่ (3.118)) จะได้ดังสมการที่ (3.119)

$$\Delta Q_{node\ 4, \Delta V_{s2}} = \Delta V_{s2} \times C_{node\ 4} \quad (3.114)$$

โดยที่

$$C_{node\ 4} = C_1 + C_{LV} \quad (3.115)$$

$$C_{node\ 4} = 2C \quad (3.116)$$

และ

$$\Delta Q_{C_2, \Delta V_{C_2}} = \Delta V_{C_2} \times C_2 \quad (3.117)$$

$$\Delta Q_{node\ 4, \Delta V_{C_2}} = \Delta V_{C_2} \times C_{node\ 4} \quad (3.118)$$

จะได้

$$\Delta Q_{node\ 4, \Delta V_{s2}} = \Delta Q_{C_2, \Delta V_{C_2}} + \Delta Q_{node\ 4, \Delta V_{C_2}} \quad (3.119)$$

$$\Delta V_{s2} \times C_{node\ 4} = (\Delta V_{C_2} \times C_2) + (\Delta V_{C_2} \times C_{node\ 4}) \quad (3.120)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta V_{C_2} = \frac{C_{\text{node 4}}}{C_2 + C_{\text{node 4}}} \times \Delta V_{s2} \quad (3.121)$$

$$\Delta V_{C_2} = \frac{2C}{C + 2C} \times \Delta V_{s2} \quad (3.122)$$

$$\Delta V_{C_2} = \frac{2}{3} \Delta V_{s2} \quad (3.123)$$

นำสมการที่ (3.113) มาแทนค่าในสมการที่ (3.123) จะได้

$$\Delta V_{C_2} = \frac{2}{3} \times \left( \frac{1}{2} \delta_2 + \delta_3 - \frac{1}{2} \delta_4 + \frac{1}{4} \Delta \right) \quad (3.124)$$

$$\Delta V_{C_2} = \frac{1}{3} \delta_2 + \frac{2}{3} \delta_3 - \frac{1}{3} \delta_4 + \frac{1}{6} \Delta \quad (3.125)$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_2$  ที่เวลา  $t_5$  คือ

$$V_{C_2}(t_5) = V_{C_2}(t_4) - \Delta V_{C_2} \quad (3.126)$$

นำสมการที่ (3.93) และ (3.125) มาแทนค่าในสมการที่ (3.126)

$$V_{C_2}(t_5) = \frac{1}{3} V_{HV} + \frac{1}{3} \delta_2 + \frac{2}{3} \delta_3 - \frac{1}{3} \delta_4 + \frac{1}{4} \Delta - \frac{1}{3} \delta_2 - \frac{2}{3} \delta_3 + \frac{1}{3} \delta_4 - \frac{1}{6} \Delta \quad (3.127)$$

$$V_{C_2}(t_5) = \frac{1}{3} V_{HV} + \frac{1}{12} \Delta \quad (3.128)$$

เมื่อทำการพิจารณาโหนดที่ 2 จะได้ว่าปริมาณประจุที่เปลี่ยนแปลงไปของ  $C_{\text{node 2}}$  ที่ถูกอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้า  $\Delta V_{s2}$  (สมการที่ (3.129)) มีค่าเท่ากับปริมาณประจุที่เปลี่ยนแปลงไปของ  $C_2$  และ  $C_{\text{node 2}}$  ที่ถูกอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าที่จุดสมดุลใหม่  $\Delta V_2$  (สมการที่ 3.130)) จะได้ตั้งสมการที่ (3.131)

$$\Delta Q_{C_{\text{node 2}}, \Delta V_{s2}} = \Delta V_{s2} \times C_{\text{node 2}} \quad (3.129)$$

$$\Delta Q_{C_2, C_{\text{node 2}}, \Delta V_2} = \Delta V_2 \times (C_2 + C_{\text{node 2}}) \quad (3.130)$$

จะได้

$$\Delta Q_{C_2, \Delta V_{s2}} = \Delta Q_{C_1, C_2, \Delta V_2} \quad (3.131)$$

$$\Delta V_{s2} \times C_{\text{node 2}} = \Delta V_2 \times (C_2 + C_{\text{node 2}}) \quad (3.132)$$

$$\Delta V_2 = \frac{C_{\text{node 2}}}{C_2 + C_{\text{node 2}}} \times \Delta V_{s2} \quad (3.133)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta V_2 = \frac{2C}{C+2C} \times \Delta V_{s2} \quad (3.134)$$

$$\Delta V_2 = \frac{2}{3} \times \Delta V_{s2} \quad (3.135)$$

นำสมการที่ (3.113) มาแทนค่าในสมการที่ (3.135) จะได้

$$\Delta V_2 = \frac{2}{3} \times \left( \frac{1}{2} \delta_2 + \delta_3 - \frac{1}{2} \delta_4 + \frac{1}{4} \Delta \right) \quad (3.136)$$

$$\Delta V_2 = \frac{1}{3} \delta_2 + \frac{2}{3} \delta_3 - \frac{1}{3} \delta_4 + \frac{1}{6} \Delta \quad (3.137)$$

เมื่อทำการพิจารณาโหนดที่ 2 อีกครั้งจะได้ว่าปริมาณประจุที่เปลี่ยนแปลงไปของ  $C_1$  มีค่าเท่ากับปริมาณประจุที่เปลี่ยนแปลงไปของ  $C_{LV}$  (สมการที่ (3.138)) และผลรวมแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของ  $C_1$  และ  $C_{LV}$  มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปในโหนดที่ 2  $\Delta V_2$  (สมการที่ 3.140)

$$\Delta Q_{C_1, \Delta V_{C_1}} = \Delta Q_{C_{LV}, \Delta V_{C_{LV}}} \quad (3.138)$$

$$\Delta V_{C_1} \times C_1 = \Delta V_{C_{LV}} \times C_{LV} \quad (3.139)$$

และ

$$\Delta V_2 = \Delta V_{C_1} + \Delta V_{C_{LV}} \quad (3.140)$$

จากสมการที่ (3.139) และ (3.140) จะได้แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวเก็บประจุ  $C_{LV}$  คือ

$$(\Delta V_2 - \Delta V_{C_{LV}}) \times C_1 = \Delta V_{C_{LV}} \times C_{LV} \quad (3.141)$$

$$(\Delta V_{C_{LV}} \times C_{LV}) + (\Delta V_{C_{LV}} \times C_1) = \Delta V_2 \times C_1 \quad (3.142)$$

$$\Delta V_{C_{LV}} = \frac{C_1}{C_1 + C_{LV}} \times \Delta V_2 \quad (3.143)$$

$$\Delta V_{C_{LV}} = \frac{1}{2} \times \Delta V_2 \quad (3.144)$$

นำสมการที่ (3.137) มาแทนในสมการที่ (3.144) จะได้

$$\Delta V_{C_{LV}} = \frac{1}{2} \times \left( \frac{1}{3} \delta_2 + \frac{2}{3} \delta_3 - \frac{1}{3} \delta_4 + \frac{1}{6} \Delta \right) \quad (3.145)$$

$$\Delta V_{C_{LV}} = \frac{1}{6} \delta_2 + \frac{1}{3} \delta_3 - \frac{1}{6} \delta_4 + \frac{1}{12} \Delta \quad (3.146)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  $C_{LV}$  ที่เวลา  $t_5$  คือ

$$V_{C_{LV}}(t_5) = V_{C_{LV}, si}(t_5) + \Delta V_{C_{LV}} \quad (3.147)$$

นำสมการที่ (3.109) และ (3.146) มาแทนค่าในสมการที่ (3.147) จะได้

$$V_{C_{LV}}(t_5) = \frac{1}{3}V_{HV} + \frac{1}{12}\Delta \quad (3.148)$$

และแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  $C_1$  ที่เวลา  $t_5$  คือ

$$V_{C_1}(t_5) = V_{HV} - V_{C_{LV}}(t_5) \quad (3.149)$$

นำสมการที่ (3.148) มาแทนค่าในสมการที่ (3.149) จะได้

$$V_{C_1}(t_5) = \frac{2}{3}V_{HV} - \frac{1}{12}\Delta \quad (3.150)$$

แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่เวลา  $t_5$  มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่เวลา  $t_1$  ดังนั้นจะสามารถเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  $C_1$   $C_2$  และ  $C_{LV}$  ในสมการที่ (3.150) (3.128) และ (3.148) กับสมการที่ (3.4) (3.5) และ (3.6) ตามลำดับจะได้

$$\delta_2 = -\frac{1}{12}\Delta \quad (3.151)$$

$$\delta_3 = \frac{1}{12}\Delta \quad (3.152)$$

$$\delta_4 = \frac{1}{12}\Delta \quad (3.153)$$

เมื่อได้ค่าคงที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  และ  $\delta_4$  ดังนั้นจะเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละตัวให้อยู่เทอมของช่วงเวลาการควบคุมสวิตช์กำลังที่มีวัฏจักรการทำงานใดๆ เมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แรงดันของตัวเก็บประจุเมื่อทิศทางโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ

เวลา	สวิตช์ที่ทำงาน	แรงดันไฟฟ้า
$t_1$	$SR_n$	$V_{CHV}(t_1) = V_{HV}$ $V_{C_1}(t_1) = \frac{2}{3}V_{HV} - \frac{1}{6}\Delta_1$ $V_{C_2}(t_1) = \frac{1}{3}V_{HV} + \frac{1}{6}\Delta_1$ $V_{CLV}(t_1) = \frac{1}{3}V_{HV} + \frac{1}{6}\Delta_1$
$t_2$	$SR_n$	$V_{CHV}(t_2) = V_{HV}$ $V_{C_1}(t_2) = \frac{2}{3}V_{HV} + \frac{1}{6}\Delta_1$ $V_{C_2}(t_2) = \frac{1}{3}V_{HV} - \frac{1}{6}\Delta_1$ $V_{CLV}(t_2) = \frac{1}{3}V_{HV} - \frac{1}{6}\Delta_1$
$t_3$	$SB_n$	$V_{CHV}(t_3) = V_{HV}$ $V_{C_1}(t_3) = \frac{2}{3}V_{HV}$ $V_{C_2}(t_3) = \frac{1}{3}V_{HV}$ $V_{CLV}(t_3) = \frac{1}{3}V_{HV}$
$t_4$	$SB_n$	$V_{CHV}(t_4) = V_{HV}$ $V_{C_1}(t_4) = \frac{2}{3}V_{HV} - \frac{1}{2}\Delta_2$ $V_{C_2}(t_4) = \frac{1}{3}V_{HV} + \frac{1}{2}\Delta_2$ $V_{CLV}(t_4) = \frac{1}{3}V_{HV} - \frac{1}{2}\Delta_2$
$\Delta_1 = \frac{I_{LLV}(t) \times T_1}{C}$ $\Delta_2 = \frac{I_{LLV}(t) \times T_2}{C}$		$T = T_1 + T_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.2 วงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง

การวิเคราะห์ค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในวงจร  $M^2C^3$  เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง ซึ่งในการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น 4 ช่วงเวลาดังรูปที่ 3.19 และใช้วงจรสมมูลดังรูปที่ 3.20 โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

#### • ช่วงที่ 1 ที่เวลา $t_1$ ถึง $t_2$

ช่วงเวลา  $t_1$  ถึง  $t_2$  ตัวเก็บประจุ  $C_2, C_{LV}$  ที่ได้รับแรงดันไฟฟ้า  $V_{LV}$  จะทำหน้าที่อัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_1$  เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง  $R_{HHV}$  (High Voltage Load) ในขณะเดียวกันตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  จะทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูงเช่นเดียวกัน (ตัวเก็บประจุ  $C_{HV}, C_1, C_2$  และ  $C_{LV}$  มีค่าเท่ากับ  $C$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ซึ่งที่เวลา  $t_1$  ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้างดสมการที่ (3.154) ถึง (3.155)

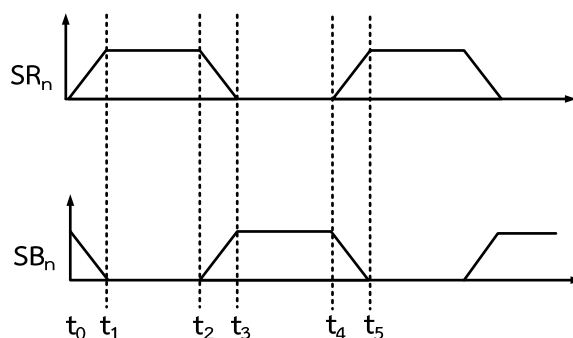
$$V_{C_{HV}}(t_1) = 3V_{LV} + \delta_1 \quad (3.154)$$

$$V_{C_1}(t_1) = 2V_{LV} + \delta_2 \quad (3.155)$$

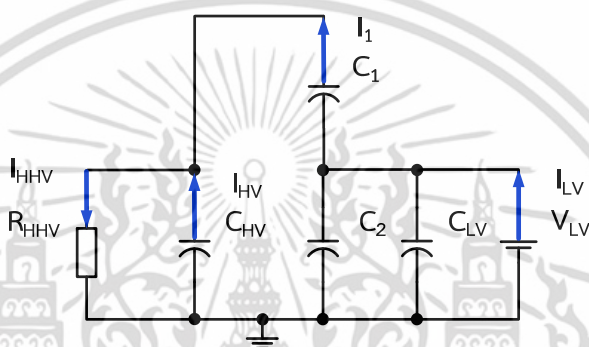
$$V_{C_2}(t_1) = V_{LV} + \delta_3 \quad (3.156)$$

$$V_{C_{LV}}(t_1) = V_{LV} + \delta_4 \quad (3.157)$$

เมื่อ		
$V_{HV}$	คือ	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านบัสแรงดันสูง (V)
$V_{C_{HV}}(t)$	คือ	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของตัวเก็บประจุ $C_{HV}$ ที่เวลาใดๆ (V)
$V_{C_1}(t)$	คือ	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของตัวเก็บประจุ $C_1$ ที่เวลาใดๆ (V)
$V_{C_2}(t)$	คือ	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของตัวเก็บประจุ $C_2$ ที่เวลาใดๆ (V)
$V_{C_{LV}}(t)$	คือ	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของตัวเก็บประจุ $C_{LV}$ ที่เวลาใดๆ (V)
$\delta_1$	คือ	ค่าคงที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของตัวเก็บประจุ $C_{HV}$ (V)
$\delta_2$	คือ	ค่าคงที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของตัวเก็บประจุ $C_1$ (V)
$\delta_3$	คือ	ค่าคงที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของตัวเก็บประจุ $C_2$ (V)
$\delta_4$	คือ	ค่าคงที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของตัวเก็บประจุ $C_{LV}$ (V)



รูปที่ 3.19 ช่วงเวลาการวิเคราะห์วงจร  $M^2C^3$



รูปที่ 3.20 วงจรสมมูลในช่วงเวลาที่  $t_1$  ถึง  $t_2$  เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง

จากรูปที่ 3.20 จะได้ว่า

$$V_{C_{HV}}(t) = V_{C_1}(t) + V_{LV} \quad (3.158)$$

$$V_{LV} = V_{C_{LV}}(t) \quad (3.159)$$

$$V_{LV} = V_{C_2}(t) \quad (3.160)$$

$$I_{HHV}(t) = I_1(t) + I_{HV}(t) \quad (3.161)$$

เมื่อ

- |              |     |  |
|--------------|-----|--|
| $I_1(t)$     | คือ | กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ $C_1$ ที่เวลาใดๆ (A)             |
| $I_{HV}(t)$  | คือ | กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ $C_{HV}$ ที่เวลาใดๆ (A)          |
| $I_{HHV}(t)$ | คือ | กระแสไฟฟ้าของภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูงที่เวลาใดๆ (A) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.159) และ (3.160) จะได้

$$\delta_3 = 0 \quad (3.162)$$

$$\delta_4 = 0 \quad (3.163)$$

นำสมการ (3.154) (3.155) (3.157) และ (3.163) มาแทนค่าในสมการที่ (3.158) จะได้

$$3V_{LV} + \delta_1 = 2V_{LV} + \delta_2 + V_{LV} + \delta_4 \quad (3.164)$$

$$\delta_1 = \delta_2 \quad (3.165)$$

เมื่อทำการพิจารณาที่เวลา  $t_2$  ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้าดังสมการที่ (3.166) ถึง (3.169)

$$V_{CHV}(t_2) = 3V_{LV} + \delta_1 - \frac{I_{HV}(t_2) \times 0.5T}{C} \quad (3.166)$$

$$V_{C1}(t_2) = 2V_{LV} + \delta_2 - \frac{I_1(t_2) \times 0.5T}{C} \quad (3.167)$$

$$V_{C2}(t_2) = V_{LV} \quad (3.168)$$

$$V_{CLV}(t_2) = V_{LV} \quad (3.169)$$

เมื่อ

T

คือ คาบเวลาการสวิตช์ (s)

นำสมการ (3.165) (3.166) และ (3.167) มาแทนค่าในสมการที่ (3.158) จะได้

$$3V_{LV} + \delta_1 - \frac{I_{HV}(t_2) \times 0.5T}{C} = 2V_{LV} + \delta_2 - \frac{I_1(t_2) \times 0.5T}{C} + V_{LV} \quad (3.170)$$

$$I_{HV}(t_2) = I_1(t_2) \quad (3.171)$$

นำสมการ (3.171) มาแทนค่าในสมการที่ (3.161) จะได้

$$I_{HV}(t_2) = \frac{1}{2} I_{HHV}(t_2) \quad (3.172)$$

และ

$$I_1(t_2) = \frac{1}{2} I_{HHV}(t_2) \quad (3.173)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสมการที่ (3.172) และ (3.173) แทนค่าลงในสมการที่ (3.166) (3.167) ตามลำดับจะได้ว่า

$$V_{CHV}(t_2) = 3V_{LV} + \delta_1 - \frac{1}{4}\Delta \quad (3.174)$$

$$V_{C_1}(t_2) = 2V_{LV} + \delta_2 - \frac{1}{4}\Delta \quad (3.175)$$

โดยที่

$$\Delta = \frac{I_{HHV}(t) \times T}{C} \quad (3.176)$$

- ช่วงที่ 2 ที่เวลา  $t_2$  ถึง  $t_3$

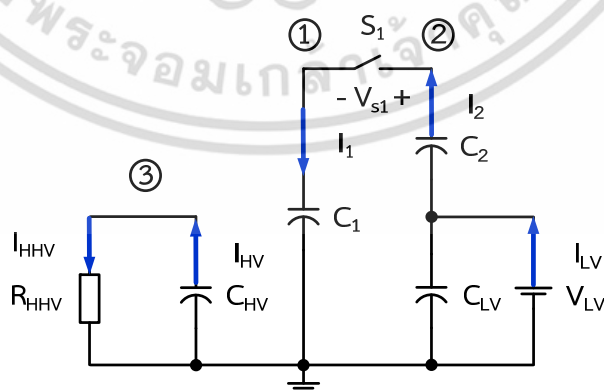
ช่วงเวลา  $t_2$  ถึง  $t_3$  เป็นช่วงเวลาสั้นๆที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากช่วงระยะเวลาที่ 1 ไปยังช่วงระยะเวลาที่ 3 ซึ่งตัวเก็บประจุ  $C_2$  และ  $C_{LV}$  กำลังจะทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_1$  จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าระหว่างโหนดที่ 1 และ 2 ค่อยๆเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างทันทีทันใด โดยช่วงเวลานี้จะสมมติให้มีชุดสวิตช์  $S_1$  ทำหน้าที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างโหนดที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.21 เมื่อสวิตช์  $S_1$  ทำงานแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  $C_1$  คือ

$$V_{C_1}(t_3) = \frac{V_{C_2}(t_2) + V_{C_{LV}}(t_2) + 2V_{C_1}(t_2)}{3} \quad (3.177)$$

นำสมการที่ (3.168) (3.169) และ (3.175) มาแทนค่าในสมการที่ (3.177)

$$V_{C_1}(t_3) = \frac{1}{3} \left( V_{LV} + V_{LV} + 4V_{LV} + 2\delta_2 - \frac{1}{2}\Delta \right) \quad (3.178)$$

$$V_{C_1}(t_3) = 2V_{LV} + \frac{2}{3}\delta_2 - \frac{1}{6}\Delta \quad (3.179)$$



รูปที่ 3.21 วงจรสมมูลในช่วงเวลาที่  $t_2$  ถึง  $t_3$  เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.21 จะได้แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  $C_2$  คือ

$$V_{C_2}(t_3) = V_{C_1}(t_3) - V_{LV} \quad (3.180)$$

$$V_{C_2}(t_3) = V_{LV} + \frac{2}{3}\delta_2 - \frac{1}{6}\Delta \quad (3.181)$$

เมื่อทำการพิจารณาในโหมดที่ 3 จะได้แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  คือ

$$V_{C_{HV}}(t_3) = V_{C_{HV}}(t_2) - \Delta \quad (3.196)$$

นำสมการที่ (3.174) มาแทนค่าในสมการที่ (3.196) จะได้

$$V_{C_{HV}}(t_3) = 3V_{LV} + \delta_I - \frac{1}{4}\Delta - \Delta \quad (3.197)$$

$$V_{C_{HV}}(t_3) = 3V_{LV} + \delta_I - \frac{5}{4}\Delta \quad (3.198)$$

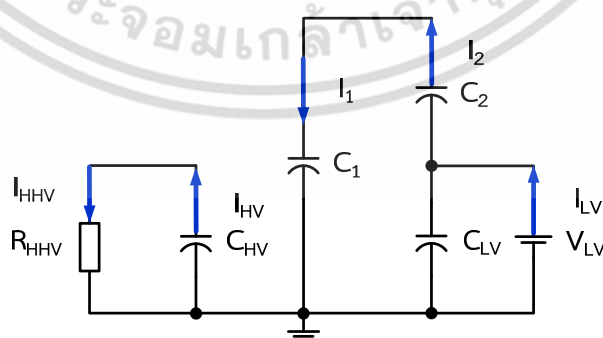
- ช่วงที่ 3 ที่เวลา  $t_3$  ถึง  $t_4$

ช่วงเวลา  $t_3$  ถึง  $t_4$  เป็นช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุ  $C_2$  ทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_1$  อย่างสมบูรณ์ และในขณะเดียวกันตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง  $R_{HV}$  จากรูปที่ 3.22 จะได้ว่า

$$V_{C_1}(t) = V_{C_2}(t) + V_{C_{LV}}(t) \quad (3.199)$$

$$I_1(t) = I_2(t) \quad (3.200)$$

$$I_2(t) = I_{LV}(t) \quad (3.201)$$



รูปที่ 3.22 วงจรสมมูลในช่วงเวลาที่  $t_3$  ถึง  $t_4$  เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{LV}(t) = 3I_{HV}(t) \quad (3.202)$$

$$I_{HHV}(t) = I_{HV}(t) \quad (3.203)$$

ดังนั้นที่เวลา  $t_4$  ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้าคือ

$$V_{CHV}(t_4) = V_{CHV}(t_3) - \frac{I_{HV}(t_4) \times 0.5T}{C} \quad (3.204)$$

$$V_{C1}(t_4) = V_{C1}(t_3) + \frac{I_1(t_4) \times 0.5T}{C} \quad (3.205)$$

$$V_{C2}(t_4) = V_{C2}(t_3) - \frac{I_2(t_4) \times 0.5T}{C} \quad (3.206)$$

$$V_{CLV}(t_4) = V_{CLV}(t_3) \quad (3.207)$$

นำสมการที่ (3.198) (3.179) และ (3.181) มาแทนค่าในสมการที่ (3.204) (3.205) และ (3.206) ตามลำดับจะได้

$$V_{CHV}(t_4) = 3V_{LV} + \delta_1 - \frac{5}{4}\Delta - \frac{I_{HV}(t_4) \times 0.5T}{C} \quad (3.208)$$

$$V_{C1}(t_4) = 2V_{LV} + \frac{2}{3}\delta_2 - \frac{1}{6}\Delta + \frac{I_1(t_4) \times 0.5T}{C} \quad (3.209)$$

$$V_{C2}(t_4) = V_{LV} + \frac{2}{3}\delta_2 - \frac{1}{6}\Delta - \frac{I_2(t_4) \times 0.5T}{C} \quad (3.210)$$

นำสมการที่ (3.202) มาแทนค่าในสมการที่ (3.208) (3.209) และ (3.210) จะได้แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่เวลา  $t_4$  คือ

$$V_{CHV}(t_4) = 3V_{LV} + \delta_1 - \frac{7}{4}\Delta \quad (3.211)$$

$$V_{C1}(t_4) = 2V_{LV} + \frac{2}{3}\delta_2 + \frac{4}{3}\Delta \quad (3.212)$$

$$V_{C2}(t_4) = V_{LV} + \frac{2}{3}\delta_2 - \frac{5}{3}\Delta \quad (3.213)$$

โดยที่

$$\Delta = \frac{I_{HHV}(t) \times T}{C} \quad (3.214)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

• ช่วงที่ 4 ที่เวลา  $t_4$  ถึง  $t_5$

ช่วงเวลา  $t_4$  ถึง  $t_5$  เป็นช่วงเวลาสั้นๆที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากช่วงระยะเวลาที่ 4 ไปยังช่วงระยะเวลาที่ 1 อีกครั้ง ซึ่งแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า  $V_{LV}$  กำลังจะทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  ผ่านตัวเก็บประจุ  $C_1$  โดยช่วงเวลานี้จะสมมติให้มีชุดสวิตช์  $S_1$  ทำหน้าที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างโหนดที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.23 เมื่อสวิตช์  $S_1$  ทำงานจะได้แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  คือ

$$V_{C_{HV}}(t_5) = \frac{V_{C_1}(t_4) + V_{C_2}(t_4) + 2V_{C_{HV}}(t_4)}{3} \quad (3.215)$$

นำสมการที่ (3.211) และ (3.212) มาแทนค่าในสมการที่ (3.215)

$$V_{C_{HV}}(t_5) = \frac{1}{3} \left( 2V_{LV} + \frac{2}{3}\delta_2 + \frac{4}{3}\Delta + V_{LV} + \frac{2}{3}\delta_2 - \frac{5}{3}\Delta + 6V_{LV} + 2\delta_1 - \frac{7}{2}\Delta \right) \quad (3.216)$$

$$V_{C_{HV}}(t_5) = 3V_{LV} + \frac{4}{3}\delta_2 + 2\delta_1 - \frac{23}{6}\Delta \quad (3.217)$$

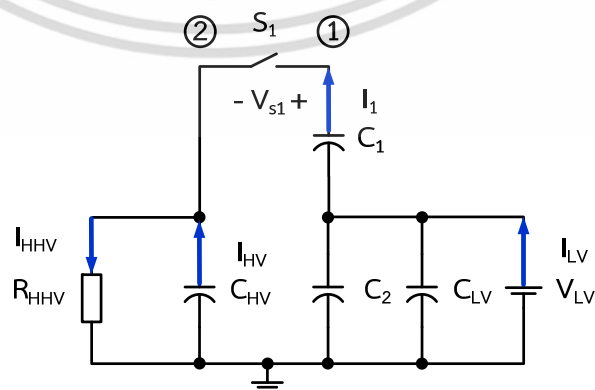
จากรูปที่ 3.23 จะได้แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  $C_1$  คือ

$$V_{C_1}(t_5) = V_{C_{HV}}(t_5) - V_{LV} \quad (3.218)$$

$$V_{C_1}(t_5) = 2V_{LV} + \frac{4}{3}\delta_2 + 2\delta_1 - \frac{23}{6}\Delta \quad (3.219)$$

แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่เวลา  $t_5$  มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่เวลา  $t_1$  ดังนั้นสามารถเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  ในสมการที่ (3.154) และ (3.217) จะได้

$$\delta_1 = \frac{4}{3}\delta_2 + 2\delta_1 - \frac{23}{6}\Delta \quad (3.220)$$



รูปที่ 3.23 วงจรสมมูลในช่วงเวลาที่  $t_4$  ถึง  $t_5$  เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกันจะสามารถเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  $C_1$  ในสมการที่ (3.183) และ (3.218) จะได้

$$\delta_2 = \frac{4}{3}\delta_2 + 2\delta_1 - \frac{23}{6}\Delta \quad (3.221)$$

จากสมการที่ (3.220) และ (3.221) มีค่าสอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (3.165) จะได้

$$\delta_1 = \frac{4}{3}\delta_1 + 2\delta_1 - \frac{23}{6}\Delta \quad (3.222)$$

$$\delta_1 = \frac{23}{14}\Delta \quad (3.223)$$

$$\delta_2 = \frac{23}{14}\Delta \quad (3.224)$$

เมื่อได้ค่าคงที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  และ  $\delta_4$  ดังนั้นจะเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละตัวให้อยู่เทอมของช่วงเวลาการควบคุมสวิตช์กำลังที่มีวัฏจักรการทำงานใดๆ เมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง ได้ดังตารางที่ 3.4

จากการวิเคราะห์ค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในวงจร  $M^2C^3$  พบว่า แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาของการสวิตช์ (T) กระแสที่ไหลผ่านภาระทางไฟฟ้า ( $I_L$ ) และขนาดของตัวเก็บประจุ (C) สิ่งหนึ่งที่สังเกตเห็นได้ชัดของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าคือ เมื่อวงจรทำงานในสภาวะที่มีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง ทำให้แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมีแนวโน้มตกลง (Voltage Drop) มากกว่าในสภาวะที่วงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร  $\Delta$  ของการทำงานในสภาวะที่มีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูงมีค่ามากกว่านั่นเอง

แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร  $\Delta$  จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่วิเคราะห์ได้ ทั้งนี้เนื่องจากการประยุกต์ใช้งานจริงวงจร  $M^2C^3$  จะมีการสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบเช่น การสูญเสียในตัวเก็บประจุจากค่า ESR การสูญเสียจากการนำกระแสของสวิตช์กำลัง (Conduction Loss) และการสูญเสียจากการสวิตช์ (Switching Loss) ดังนั้นการเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำงานของวงจร  $M^2C^3$

ตารางที่ 3.4 แรงแดันของตัวเก็บประจุเมื่อทิศทางโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง

เวลา	สวิตช์ที่ทำงาน	แรงแดันไฟฟ้า
$t_1$	$SR_n$	$V_{CHV}(t_1) = 3V_{LV} + \frac{23}{7}\Delta_1$ $V_{C_1}(t_1) = 2V_{LV} + \frac{23}{7}\Delta_1$ $V_{C_2}(t_1) = V_{LV}$ $V_{CLV}(t_1) = V_{LV}$
$t_2$	$SR_n$	$V_{CHV}(t_2) = 3V_{LV} + \frac{39}{14}\Delta_1$ $V_{C_1}(t_2) = 2V_{LV} + \frac{39}{14}\Delta_1$ $V_{C_2}(t_2) = V_{LV}$ $V_{CLV}(t_2) = V_{LV}$
$t_3$	$SB_n$	$V_{CHV}(t_3) = 3V_{LV} + \frac{11}{14}\Delta_2$ $V_{C_1}(t_3) = 2V_{LV} + \frac{13}{7}\Delta_2$ $V_{C_2}(t_3) = V_{LV} + \frac{13}{7}\Delta_2$ $V_{CLV}(t_3) = V_{LV}$
$t_4$	$SB_n$	$V_{CHV}(t_4) = 3V_{LV} - \frac{3}{14}\Delta_2$ $V_{C_1}(t_4) = 2V_{LV} + \frac{34}{7}\Delta_2$ $V_{C_2}(t_4) = V_{LV} - \frac{7}{2}\Delta_2$ $V_{CLV}(t_4) = V_{LV}$
$\Delta_1 = \frac{I_{HHV}(t) \times T_1}{C}$	$\Delta_2 = \frac{I_{HHV}(t) \times T_2}{C}$	$T = T_1 + T_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 สรุป

จากการศึกษาพฤติกรรมการทำงานและวิธีการควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์หรือวงจร  $M^2C^3$  พบว่าวงจรนี้มีข้อดีที่เหนือกว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบดั้งเดิมได้ในเรื่องของวงจรมีน้ำหนักเบาเนื่องจากไม่มีตัวเหนี่ยวนำเป็นองค์ประกอบ อีกทั้งวงจรดังกล่าวยังสามารถรวมจุดเด่นหลายๆประการของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแบบต่างๆที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เช่น วงจรสามารถควบคุมทิศทางการไหลของพลังงานไฟฟ้าได้ 2 ทิศทาง การควบคุมวงจรมิใช่ซับซ้อน วงจรสามารถขยายพาสความผิดพร่องที่เกิดขึ้นได้ และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้มีคุณภาพสูง เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในวงจร ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คือแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในแต่ละช่วงเวลาการทำงาน ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้นี้จะ เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่อยู่ในวงจร  $M^2C^3$  ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 5

## บทที่ 4

# การหาค่าตัวแปรของตัวเก็บประจุ

### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการหาค่าตัวแปรของตัวเก็บประจุด้วยวิธีต่างๆที่ได้มีการศึกษาและวิจัยมาแล้วก่อนหน้านี้ โดยแต่ละเทคนิคและวิธีการจะมีความแตกต่างกันออกไป ซึ่งในทางปฏิบัติการหาค่าตัวแปรนั้นจะเป็นเพียงการประมาณค่าให้มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เนื่องจากค่าตัวแปรดังกล่าวไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรงในขณะที่ตัวเก็บประจุกำลังทำงานอยู่ในวงจร ดังนั้นการหาค่าตัวแปรของตัวเก็บประจุจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการคำนวณหาค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุ

### 4.2 การสร้างแบบจำลองเพื่อหาค่าตัวแปรของตัวเก็บประจุ

การสร้างแบบจำลองเพื่อหาค่าตัวแปรของตัวเก็บประจุ เริ่มจากการสร้างแบบจำลองหรือวงจรสมมูลภายในของตัวเก็บประจุดังรูปที่ 4.1 [16] โครงสร้างภายในวงจรสมมูลประกอบไปด้วย ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า (C) ค่าความต้านทานแฝงขนานสมมูล (Equivalent Parallel Resistance หรือ  $R_p$ ) ค่าตัวเหนี่ยวนำแฝงอนุกรมสมมูล (Equivalent Series Inductance หรือ ESL) และค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูล (Equivalent Series Resistance หรือ ESR) โดยค่าการเก็บประจุไฟฟ้า (C) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ไฟฟ้าและอุณหภูมิ ซึ่งค่าการเก็บประจุไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุดังสมการ

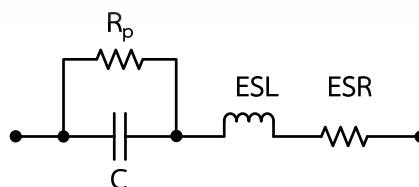
$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (4.1)$$

เมื่อ

$X_C$  คือ อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $\Omega$ )

$f$  คือ ความถี่ไฟฟ้า (Hz)

C คือ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า (F)



รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า  $R_p$  คือค่าความต้านทานของวัสดุที่ใช้ทำตัวเก็บประจุ และค่าตัวเหนี่ยวนำแฝงอนุกรมสมมูล หรือ ESL จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้นและจะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำดังสมการ

$$ESL = 2\pi fL \quad (4.2)$$

เมื่อ		
ESL	คือ	ค่าตัวเหนี่ยวนำแฝงอนุกรมสมมูล ( $\Omega$ )
$f$	คือ	ความถี่ไฟฟ้า (Hz)
L	คือ	ค่าตัวเหนี่ยวนำ (H)

ค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูล หรือ ESR จะมีค่าลดลงเมื่อค่าการเก็บประจุไฟฟ้า ความถี่ และอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งค่า ESR สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.3)

$$ESR = \frac{D.F.}{2\pi fC} \quad (4.3)$$

เมื่อ		
ESR	คือ	ค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูล ( $\Omega$ )
$f$	คือ	ความถี่ไฟฟ้า (Hz)
C	คือ	ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า (F)
D.F.	คือ	มุมระหว่างค่าเวกเตอร์ Z กับ $X_C$ (Degree)

ค่า D.F. (Dissipation Factor) สามารถหาค่าได้จากมุม  $\delta$  ในสมการที่ (4.4) ซึ่งเกิดจากมุมระหว่างค่าเวกเตอร์ Z กับ เวกเตอร์  $X_L - X_C$  ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยที่มุม  $\delta$  สามารถหาค่าได้จากสมการที่ (4.7)

$$D.F. = \tan(\delta) \quad (4.4)$$

$$\tan(\delta) = \frac{R}{|jX_L - jX_C|} \quad (4.5)$$

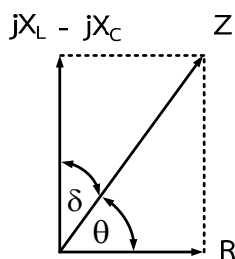
$$R = ESR \quad (4.6)$$

โดยที่

$$\delta = 90 - \theta \quad (4.7)$$

เมื่อ		
$\delta$	คือ	มุมระหว่างค่าเวกเตอร์ Z กับ $X_C$ (Degree)
$\theta$	คือ	มุมระหว่างค่าเวกเตอร์ Z กับ R (Degree)
R	คือ	ค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูล ( $\Omega$ )
$X_C$	คือ	อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $\Omega$ )
$X_L$	คือ	อิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ ( $\Omega$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 เวกเตอร์ของอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ

จากสมการที่ (4.7) มุม  $\theta$  เกิดจากมุมระหว่างค่าเวกเตอร์  $Z$  กับ เวกเตอร์  $R$  ซึ่งสามารถหามุม  $\theta$  ได้โดยการใช้หลักการของผลตอบสนองเชิงเวลาในวงจร RLC เมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าอินพุทแบบขั้นบันได (Unit Step) และจากรูปที่ 4.2 จะสามารถหาค่าเวกเตอร์ของอิมพีแดนซ์รวม ( $Z$ ) ได้จากสมการที่ (4.8) และหาขนาดของอิมพีแดนซ์รวม ได้จากสมการที่ (4.9) และ (4.10) เมื่อทำการประมาณค่าตัวแปรต่างๆในตัวเก็บประจุเสร็จเรียบร้อยแล้ว ค่าตัวแปรที่ได้จะถูกนำไปคำนวณหาความสัมพันธ์สภาพของตัวเก็บประจุตั้งสมการ

$$Z = -j\frac{1}{\omega C} + j\omega L + R \quad (4.8)$$

โดยที่

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \quad (4.9)$$

หรือ

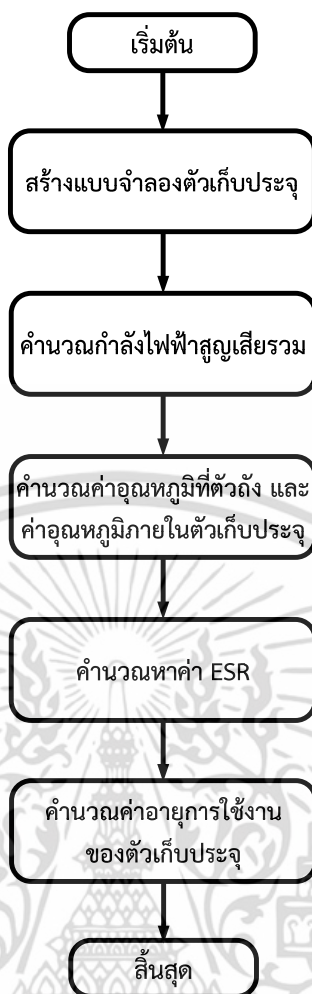
$$|Z| = \sqrt{ESR^2 + (ESL - \frac{1}{\omega C})^2} \quad (4.10)$$

การหาตัวแปรของตัวเก็บประจุด้วยวิธีนี้มีจุดเด่นในเรื่องของการใช้สมการที่ไม่ซับซ้อนของตัวเก็บประจุ ทำให้สามารถหาค่าตัวแปรต่างๆของตัวเก็บประจุได้อย่างสะดวก แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังมีจุดบกพร่องในเรื่องของการหาค่ามุม  $\theta$  โดยใช้หลักการของผลตอบสนองเชิงเวลาในวงจร RLC เมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าอินพุทแบบขั้นบันได เนื่องจากค่ามุม  $\theta$  จะมากกว่ามุม  $\delta$  อยู่มาก (มุม  $\theta$  มีค่าใกล้เคียง  $90^\circ$ ) ซึ่งจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดสูงในการวัดค่ามุมดังกล่าว จึงทำให้วิธีนี้ไม่สะดวกในทางปฏิบัติ

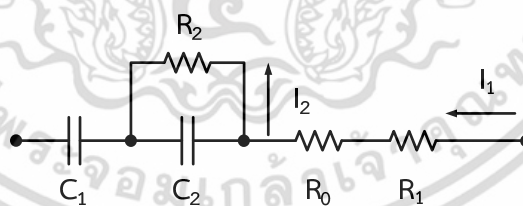
### 4.3 การหาค่าตัวแปรด้วยวิธีสร้างแบบจำลองร่วมกับโครงสร้างทางกายภาพของตัวเก็บประจุ

การหาตัวแปรของตัวเก็บประจุด้วยวิธีนี้จะมีกระบวนการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 4.3 [17] โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองภายในของตัวเก็บประจุดังรูปที่ 4.4 ที่ประกอบไปด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุหลายๆชุดต่อรวมกันอยู่ภายใน ซึ่งสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) รวมภายในตัวเก็บประจุได้ตั้งสมการที่ (4.11) ส่วนค่า ESR สามารถหาค่าได้ตั้งสมการที่ (4.12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กระบวนการหาค่าตัวแปรด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 4.4 แบบจำลองภายในของตัวเก็บประจุ

$$Z_{\text{cap}} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + j2\pi f C_2} + R_1 + R_0 - \frac{j}{2\pi f C_1} \quad (4.11)$$

$$\text{ESR} = \text{Real}(Z_{\text{cap}}) \quad (4.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Real}(Z_{\text{cap}}) = \frac{R_2}{1 + (2\pi f)^2 C_2^2 R_2^2} + R_1 + R_0 \quad (4.13)$$

เมื่อ		
$Z_{\text{cap}}$	คือ	ค่าอิมพีแดนซ์รวมภายในตัวเก็บประจุ ( $\Omega$ )
$R_0$	คือ	ค่าความต้านทานของวัสดุภายในตัวเก็บประจุ ( $\Omega$ )
$R_1$	คือ	ค่าความต้านทานของสารอิเล็กโทรไลต์ ( $\Omega$ )
$R_2$	คือ	ค่าความต้านทานที่เกิดจากความสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss, $\Omega$ )
$C_1$	คือ	ค่าการเก็บประจุไฟฟ้าระหว่างขั้ว (F)
$C_2$	คือ	ค่าการเก็บประจุไฟฟ้าที่เกิดจากความสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss, F)
$f$	คือ	ความถี่ไฟฟ้า (Hz)
ESR	คือ	ค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูล ( $\Omega$ )

หลังจากสร้างแบบจำลองภายในของตัวเก็บประจุเรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้า  $I_1$  และ  $I_2$  ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุขณะใช้งาน เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม  $P_{\text{Loss}}$  (Power Loss Dissipation) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากค่า ESR ซึ่งสามารถหาค่าได้ดังสมการที่ (4.14)

$$P_{\text{Loss}} = I_1^2 R_0 + I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (4.14)$$

เมื่อ		
$P_{\text{Loss}}$	คือ	ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นเนื่องจากค่า ESR (W)
$I_1$	คือ	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (A)
$I_2$	คือ	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน $R_2$ (A)

การเกิดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ( $P_{\text{Loss}}$ ) จะทำให้ค่าอุณหภูมิที่ตัวถัง  $T_{\text{case}}$  (Case Temperature) และค่าอุณหภูมิภายใน  $T_{\text{core}}$  (Core Temperature) ของตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลงไป โดยค่าอุณหภูมิดังกล่าวสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (4.15) และ (4.16) ตามลำดับ

$$T_{\text{case}} = T_{\text{ambient}} + \Delta T \quad (4.15)$$

$$T_{\text{core}} = T_{\text{ambient}} + \alpha \Delta T \quad (4.16)$$

เมื่อ		
$T_{\text{case}}$	คือ	ค่าอุณหภูมิที่ตัวถังของตัวเก็บประจุ ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{\text{core}}$	คือ	ค่าอุณหภูมิภายในของตัวเก็บประจุ ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{\text{ambient}}$	คือ	ค่าอุณหภูมิการทำงานของตัวเก็บประจุ ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\Delta T$	คือ	ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้ากระเพื่อม ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\alpha$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่เพิ่มสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุที่ถูกใช้งานไปแล้วเป็นระยะเวลาหนึ่งค่า ESR มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งค่า ESR นี้มีผลต่อโครงสร้างทางกายภาพของปริมาตรภายในตัวเก็บประจุ กล่าวคือเมื่อเวลาผ่านไปค่า ESR จะมีค่าเพิ่มขึ้นและทำให้ปริมาตรของตัวเก็บประจุมีค่าลดลง เนื่องจากสารอิเล็กโทรไลต์จะเกิดการระเหยและกัดกร่อนเนื้อวัสดุภายในตัวเก็บประจุ โดยค่าปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงที่เวลาใดๆสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.17) เมื่อทำการประมาณค่าตัวแปรต่างๆในตัวเก็บประจุเสร็จเรียบร้อยแล้วจะสามารถนำค่าตัวแปรที่ได้ไปคำนวณหาค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุตามสมการที่แต่ละผู้ผลิตตัวเก็บประจุกำหนด

$$\frac{ESR}{ESR_0} = \left( \frac{V_0}{V} \right)^2 \quad (4.17)$$

เมื่อ

$ESR_0$  คือ ค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูลเริ่มต้น ( $\Omega$ )

$ESR$  คือ ค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูลใหม่ ( $\Omega$ )

$V_0$  คือ ปริมาตรของตัวเก็บประจุเริ่มต้น ( $cm^3$ )

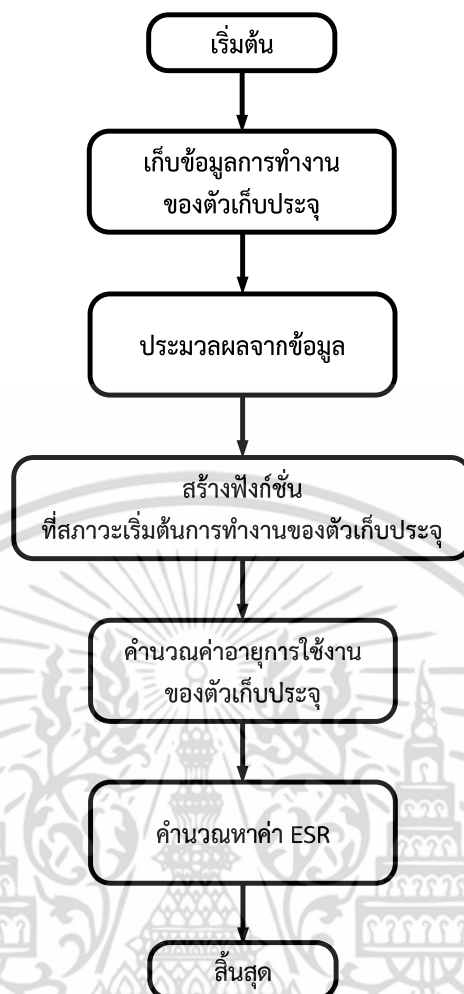
$V$  คือ ปริมาตรของตัวเก็บประจุใหม่ที่เปลี่ยนแปลง ( $cm^3$ )

การหาตัวแปรของตัวเก็บประจุด้วยวิธีนี้มีจุดเด่นในเรื่องของการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) อย่างง่าย ทำให้สามารถหาค่าตัวแปรต่างๆของตัวเก็บประจุได้อย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังมีจุดบกพร่องในเรื่องของการวัดค่ากระแสไฟฟ้า  $I_2$  ที่ไหลผ่านตัวต้านทาน  $R_2$  ซึ่งจะทำให้การวัดได้ยากในทางปฏิบัติ อีกทั้งในการใช้งานจริงปริมาตรของตัวเก็บประจุมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจึงทำให้ในการคำนวณหาค่า ESR อาจผิดพลาดขึ้นได้

#### 4.4 การหาค่าตัวแปรด้วยวิธีการสร้างฟังก์ชันการทำงานของตัวเก็บประจุ

การหาตัวแปรของตัวเก็บประจุด้วยวิธีนี้จะมีกระบวนการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 4.5 [18] โดยเริ่มจากการเก็บข้อมูลการทำงานของตัวเก็บประจุขณะใช้งานจริงเช่น ค่าอุณหภูมิตัวถังของตัวเก็บประจุ ( $T_{case}$ ) ค่าอุณหภูมิการทำงานของตัวเก็บประจุ ( $T_{ambient}$ ) แรงดันไฟฟ้าอินพุต ( $V_i$ ) แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ( $V_o$ ) แรงดันไฟฟ้ากระแสเพิ่อมเอาต์พุต ( $V_{ripple}$ ) และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต ( $I_o$ ) เป็นต้น โดยอาศัยชุดอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) เพื่อส่งข้อมูลไปยังชุดประมวลผลของคอมพิวเตอร์

ในการประมวลผลจากข้อมูลจะใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ (Least Square Method) เพื่อสร้างแบบจำลองการทำงานที่สถานะเริ่มต้นของตัวเก็บประจุ ในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ ซึ่งได้สร้างฟังก์ชัน  $V_{ripple}$  ให้อยู่ในเทอมของ  $I_o$ ,  $V_i$  และ  $T_{ambient}$  ( $V_{ripple} = f(I_o, V_i, T_{ambient})$ ) ในทำนองเดียวกันฟังก์ชัน  $T_{case}$  ได้ถูกสร้างให้อยู่ในเทอมของ  $I_o$ ,  $V_i$  และ  $T_{ambient}$  ( $T_{case} = f(I_o, V_i, T_{ambient})$ ) เช่นกัน หลังจากการสร้างแบบจำลองเสร็จ ข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปคำนวณหาค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุโดยใช้ทฤษฎีของ Arrhenius Theory ดังสมการที่ (4.18) และสามารถหาค่า ESR ของตัวเก็บประจุได้ดังสมการที่ (4.20)



รูปที่ 4.5 กระบวนการหาค่าตัวแปรด้วยวิธีการสร้างฟังก์ชันการทำงานของตัวเก็บประจุ

$$\frac{t'}{t} = \exp \left[ E \times \frac{T_{\text{ambient}} - T'_{\text{ambient}}}{(T_{\text{ambient}} + 273) \times (T'_{\text{ambient}} + 273)} \right] \quad (4.18)$$

$$E = \frac{\text{Activation Energy}}{\text{Boltzman's Constant}} \quad (4.19)$$

เมื่อ

t	คือ	ค่าอายุการใช้งานที่สภาวะเดิมของตัวเก็บประจุ (Hours)
t'	คือ	ค่าอายุการใช้งานที่สภาวะใหม่ของตัวเก็บประจุ (Hours)
T <sub>ambient</sub>	คือ	ค่าอุณหภูมิการทำงานที่สภาวะเดิมของตัวเก็บประจุ (°C)
T' <sub>ambient</sub>	คือ	ค่าอุณหภูมิการทำงานที่สภาวะใหม่ของตัวเก็บประจุ (°C)
E	คือ	ค่าคงที่ 4,700

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{\text{ESR}(t)} = \frac{1}{\text{ESR}(0)} \times \left( 1 - k \times t \times \exp\left(-\frac{E}{T_{\text{ambient}} + 273}\right) \right) \quad (4.20)$$

เมื่อ

ESR(0) คือ ค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูลที่สถานะเดิม ( $\Omega$ )

ESR(t) คือ ค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูลที่สถานะใหม่ ( $\Omega$ )

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการสร้างตัวเก็บประจุ

การหาตัวแปรของตัวเก็บประจุด้วยวิธีนี้มีจุดเด่นในเรื่องของการปรับปรุงข้อมูล (Update Data) ในขณะที่ใช้งานจริงอยู่ตลอดเวลา ทำให้สามารถทราบการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรต่างๆในตัวเก็บประจุได้ทันทีทันใด แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังมีจุดบกพร่องในเรื่องของเทคนิควิธีทางคณิตศาสตร์ (Least Square Method) เพื่อสร้างแบบจำลองการทำงานที่สถานะเริ่มต้นของตัวเก็บประจุ กล่าวคือวิธี Least Square จะเป็นเพียงการประมาณค่าตัวแปรการทำงานให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าตัวแปรในสถานะใช้งานจริงของตัวเก็บประจุ จึงทำให้ในการคำนวณหาค่า ESR อาจผิดพลาดและอาจไม่ตรงกับความเป็นจริง

#### 4.5 การหาค่าตัวแปรด้วยวิธีแปลง FFT ของค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

การหาตัวแปรของตัวเก็บประจุด้วยวิธีนี้จะมีกระบวนการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 4.6 [19] โดยเริ่มจากการเก็บข้อมูลการทำงานของตัวเก็บประจุขณะใช้งานจริงเช่น ค่าอุณหภูมิตัวถังของตัวเก็บประจุ ( $T_{\text{case}}$ ) ค่าอุณหภูมิการทำงานของตัวเก็บประจุ ( $T_{\text{ambient}}$ ) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ( $I_{\text{cap}}$ ) เป็นต้น ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่ได้จะถูกนำไปแปลง FFT (Fast Fourier Transform) เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นจากค่า ESR ( $P_{\text{ESR}}$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.21)

$$P_{\text{ESR}} = \sum_{h=1}^N (I_{\text{cap},h}^2 \times \text{ESR}_{f_h}) \quad (4.21)$$

เมื่อ

$P_{\text{ESR}}$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นเนื่องจากค่า ESR (W)

$I_{\text{cap}}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (A)

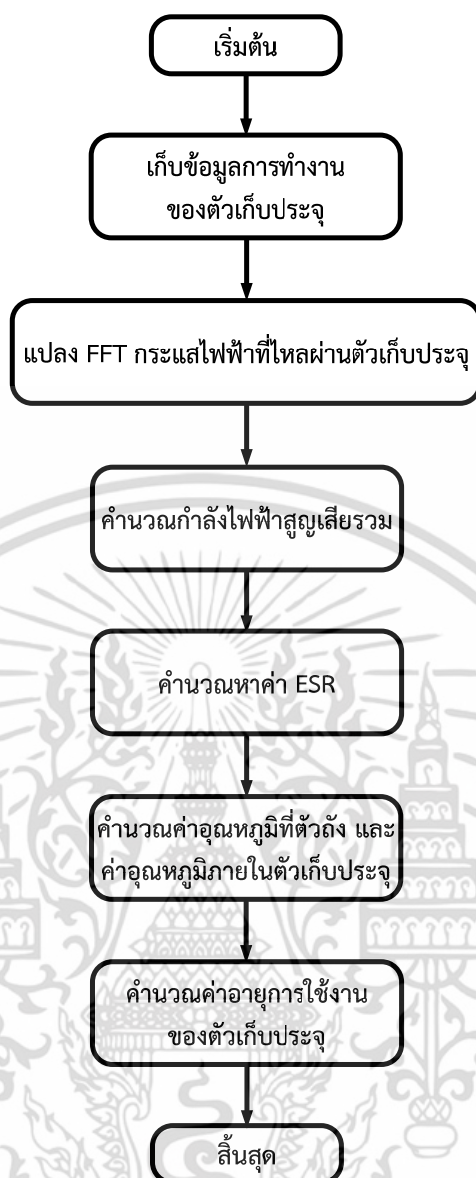
$\text{ESR}_{f_h}$  คือ ค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูลที่ลำดับความถี่สูง ( $\Omega$ )

h คือ ลำดับฮาร์มอนิกส์

N คือ ลำดับฮาร์มอนิกส์สูงสุด

ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นเนื่องจากค่า ESR จำเป็นต้องทราบค่า ESR ที่ลำดับความถี่สูง ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.22) ซึ่งในเทอมของสมการดังกล่าวพบว่าค่า ESR ที่ความถี่ 120 Hz จะมีค่าสูงสุด เนื่องการใช้งานตัวเก็บประจุที่ความถี่สูงส่งผลให้ค่า ESR ลดลง และค่า ESR จะเริ่มคงที่เมื่อมีการใช้งานตัวเก็บประจุที่ความถี่สูงมาก (มากกว่า 50 kHz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กระบวนการหาค่าตัวแปรด้วยวิธีการแปลง FFT ของค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

$$ESR_{f_h} = ESR_{120} - \frac{39,800 \times (f_h - 120)}{f_h \times C_{dc}} \quad (4.22)$$

เมื่อ

$ESR_{f_h}$	คือ	ค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูลที่ลำดับความถี่สูง ( $m\Omega$ )
$ESR_{120}$	คือ	ค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูลที่ความถี่ 120 Hz ( $m\Omega$ )
$f_h$	คือ	ความถี่สูงที่ลำดับฮาร์มอนิกสใด ๆ (Hz)
$C_{dc}$	คือ	ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า ( $\mu F$ )

เมื่อเกิดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ( $P_{ESR}$ ) จะทำให้ค่าอุณหภูมิภายใน ( $T_{core}$ ) ของตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลงไป โดยค่าอุณหภูมิดังกล่าวสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (4.23) และเมื่อได้ทราบค่าตัวแปรทุกตัวจะสามารถคำนวณค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุได้ดังสมการที่ (4.24)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาเว็บไซต์เผยแพร่เอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{\text{core}} - T_{\text{ambient}} = P_{\text{ESR}} \times T_{\text{resistance}} \quad (4.23)$$

เมื่อ

$T_{\text{core}}$	คือ	ค่าอุณหภูมิการทำงานภายในตัวเก็บประจุ ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{\text{ambient}}$	คือ	ค่าอุณหภูมิการทำงานของตัวเก็บประจุ ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{\text{resistance}}$	คือ	ค่าความต้านทานของอุณหภูมิในเนื้อวัสดุของตัวเก็บประจุ ( $^{\circ}\text{C} / \text{W}$ )
$P_{\text{ESR}}$	คือ	ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูล (W)

$$L = L_B \times M_V \times 2 \left( \frac{T_{\text{core, max}} - T_{\text{core}}}{10} \right) \quad (4.24)$$

เมื่อ

$L$	คือ	ค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุ (Hours)
$T_{\text{core, max}}$	คือ	ค่าอุณหภูมิการทำงานสูงสุดภายในตัวเก็บประจุ ( $^{\circ}\text{C}$ )
$L_B$	คือ	ค่าอายุการใช้งานสูงสุดของตัวเก็บประจุ (Hours)
$M_V$	คือ	ค่าอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้า

การหาตัวแปรของตัวเก็บประจุด้วยวิธีนี้มีจุดเด่นในเรื่องของการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อนมากนักทำให้สามารถหาค่าตัวแปรต่างๆของตัวเก็บประจุได้อย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังมีจุดบกพร่องในเรื่องการคำนวณหาค่า ESR กล่าวคือเมื่อตัวเก็บประจุถูกใช้งานไปแล้วเป็นระยะเวลาหนึ่ง ค่า ESR ที่ความถี่ 120 Hz ในทางปฏิบัติจะมีค่าไม่คงที่และอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปซึ่งทำให้ในการคำนวณหาค่า ESR เกิดความผิดพลาดขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 สรุป

จากการศึกษาวิธีการหาค่าตัวแปรของตัวเก็บประจุเพื่อคำนวณค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุพบว่า ในแต่ละวิธีจะเป็นเพียงการประมาณค่าตัวแปรให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าตัวแปรจริงมากที่สุด แต่สิ่งหนึ่งที่สังเกตอย่างเห็นได้ชัดเจนนคือวิธีการที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจะประกอบไปด้วยแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนและจำเป็นต้องใช้ข้อมูลค่าตัวแปรบางตัวจากโรงงานผู้ผลิตตัวเก็บประจุเป็นจำนวนมาก อีกทั้งค่าตัวแปรที่ได้จากโรงงานผู้ผลิตจะเปลี่ยนแปลงเมื่อตัวเก็บประจุถูกใช้งานไปแล้วเป็นระยะเวลาหนึ่ง จึงอาจทำให้การคำนวณอาจผิดพลาดขึ้นได้ นอกจากนี้ถึงแม้ว่าการทราบค่าตัวแปรต่างๆของตัวเก็บประจุจะสามารถนำไปคำนวณค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าที่คำนวณได้นั้นจะมีค่าอายุการใช้งานที่ยาวนานมากถึง 100,000 ชั่วโมง[19] ซึ่งอาจไม่เป็นประโยชน์มากนักในทางปฏิบัติ ดังนั้นเทคนิคการตรวจวัดความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุด้วยวิธีทางสถิติจึงได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ โดยเทคนิคดังกล่าวจะถูกกล่าวถึงในบทถัดไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เทคนิคการตรวจวัดและวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพ ของตัวเก็บประจุ

### 5.1 บทนำ

วงจร  $M^2C^3$  จะมีตัวเก็บประจุทำหน้าที่ผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยอาศัยหลักของการอัดประจุและคายประจุแบบสมดุลง แต่ในการอัดประจุและคายประจุแต่ละครั้งนั้น ทำให้เกิดแรงดันและกระแสไฟฟ้ากระเพื่อม (Ripple) ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุให้มีค่าลดลงและอาจนำไปสู่การเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงเทคนิคการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุด้วยการประยุกต์ใช้วิธีทางสถิติ โดยการสร้างแบบจำลองที่มีความสามารถในการเรียนรู้และประมวลผลจากสัญญาณที่วัดได้จริง เพื่อนำไปสู่การสร้างตัวตรวจวัดเทียม (Artificial Sensor) ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุ

### 5.2 การสร้างแบบจำลองเพื่อตรวจวัดสถานะการทำงานของตัวเก็บประจุ

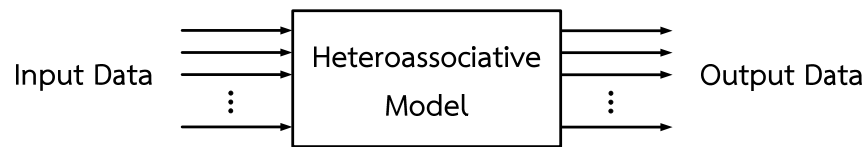
กระบวนการสร้างแบบจำลองดังรูปที่ 5.1 เป็นแบบจำลองชนิด Heteroassociative คือ การป้อนข้อมูลทางด้านอินพุตที่มีหลายตัวแปรและได้ข้อมูลทางด้านเอาต์พุตหลายตัวแปร โดยแบบจำลองดังกล่าวได้ถูกใช้เป็นกระบวนการแก้ปัญหาแบบการจำแนก (Classification) เพื่อตรวจวัดสถานะการทำงานของตัวเก็บประจุ (สถานะปกติ หมายถึง ตัวเก็บประจุยังไม่เสื่อมสภาพก่อนถึงเกณฑ์ที่กำหนด และสถานะไม่ปกติ หมายถึง ตัวเก็บประจุเสื่อมสภาพถึงเกณฑ์ที่กำหนด) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้แสดงการสร้างตัวตรวจวัดเทียมเพื่อตรวจสอบตัวตรวจวัดจริง โดยการสร้างสัญญาณอ้างอิงจากสัญญาณที่วัดได้จริงและนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณจริงของวงจรที่กำลังทำงานอยู่ในขณะนั้น ซึ่งกระบวนการสร้างแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 5.2 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 5.3 การค้นหาคุณลักษณะเด่นของระบบ (Feature Extraction System)

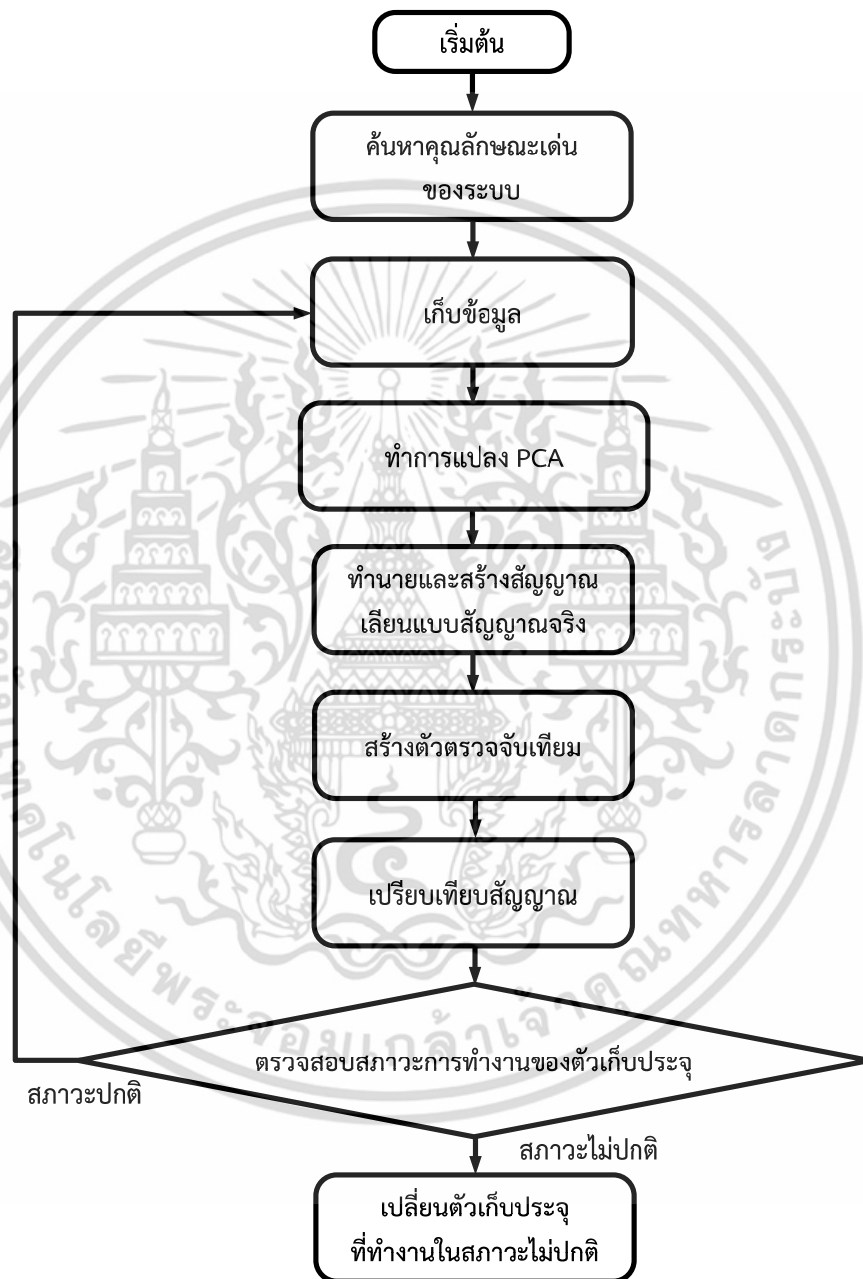
การค้นหาคุณลักษณะเด่นของระบบจะใช้หลักการวิเคราะห์ค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในวงจร  $M^2C^3$  ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งเป็นการทำงานในสถานะปกติ แต่เมื่อไรก็ตามหากมีตัวเก็บประจุตัวใดตัวหนึ่งมีความเสื่อมสภาพต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้คือค่าการเก็บประจุไฟฟ้าลดลงและค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูลเพิ่มขึ้น โดยค่าดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อให้วงจรทำงานผิดปกติ และคุณภาพของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตที่ผลิตได้ในแต่ละระดับไม่เท่าที่ควร กล่าวคือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุในแต่ละช่วงเวลาจะมีค่าลดลง เนื่องจากการที่ค่าเก็บประจุไฟฟ้าลดลงและค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูลเพิ่มขึ้นจะความสามารถในการอัดประจุและคายประจุลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้สัญญาณจากโหนดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงเมื่อวงจร  $M^2C^3$  มีทิศทางโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูงเป็นลักษณะเด่นของระบบดังแสดง

ในรูปที่ 5.3 ด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

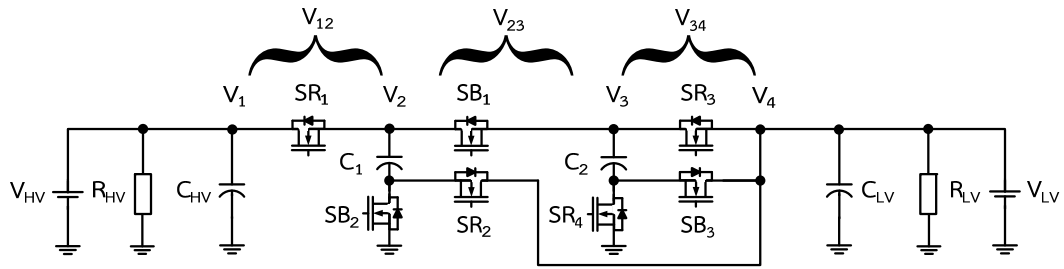


รูปที่ 5.1 แบบจำลองชนิด Heteroassociative



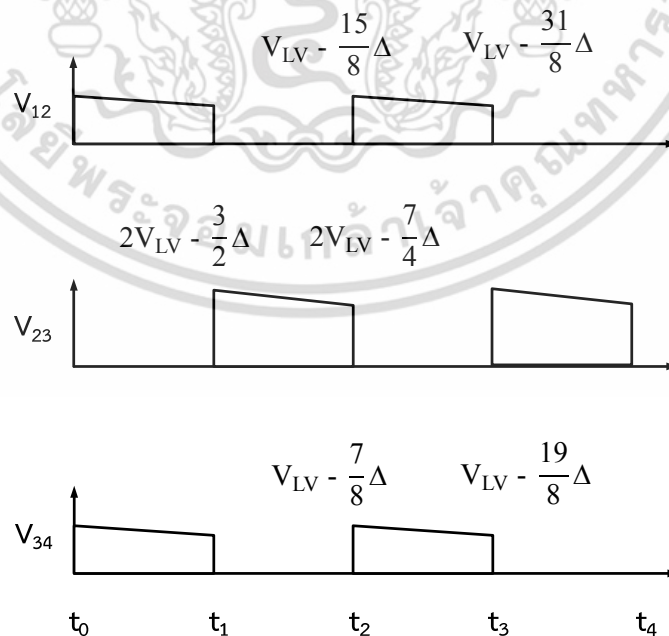
รูปที่ 5.2 กระบวนการสร้างแบบจำลองเพื่อตรวจวัดสถานะการทำงานของตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 โหนดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของระบบ

- สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของโหนดอ้างอิงขณะวงจร  $M^2C^3$  ที่มีทิศทางโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้ามากกว่าวงจร  $M^2C$  ที่มีทิศทางโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ( $\Delta$ ) ของตัวเก็บประจุขณะวงจร  $M^2C^3$  มีทิศทางโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูงจะมีค่ามาก ทำให้สามารถสังเกตค่าแรงดันไฟฟ้าอย่างเห็นได้ชัดเมื่อค่าการเก็บประจุไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงไป
- สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของโหนดอ้างอิงที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 5.4 สามารถสังเกตการณ์ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจากการอัดประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุดังตารางที่ 5.1 อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีค่าตัวแปรที่อยู่ในเทอมของ  $\Delta$  โดยค่า  $\Delta$  ดังสมการที่ (5.1) จะแปรผกผันกับค่าการเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งหมายความว่าเมื่อค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุตัวใดตัวหนึ่งลดลงจะทำให้ค่า  $\Delta$  มีค่าเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากโหนดอ้างอิงของตัวเก็บประจุมีค่าลดลงตาม



รูปที่ 5.4 แรงดันไฟฟ้าของโหนดอ้างอิงในวงจร  $M^2C^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta = \frac{I_{HHV}(t) \times T}{C} \quad (5.1)$$

เมื่อ		
$\Delta$	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (V)
$I_{HHV}(t)$	คือ	กระแสจ่ายภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง (A)
T	คือ	คาบเวลาการสวิตช์ (s)
C	คือ	ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า (F)

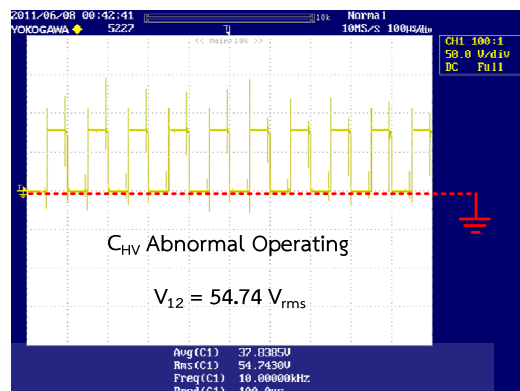
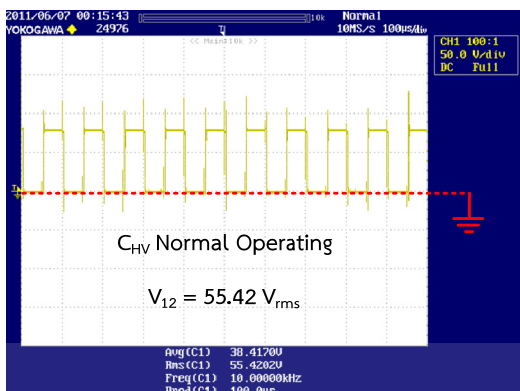
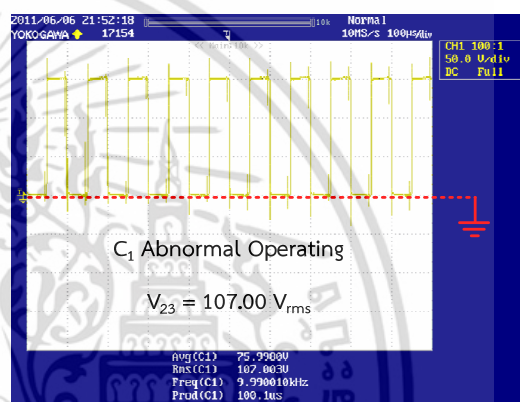
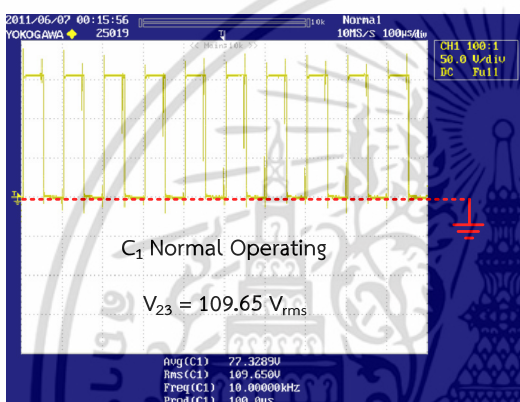
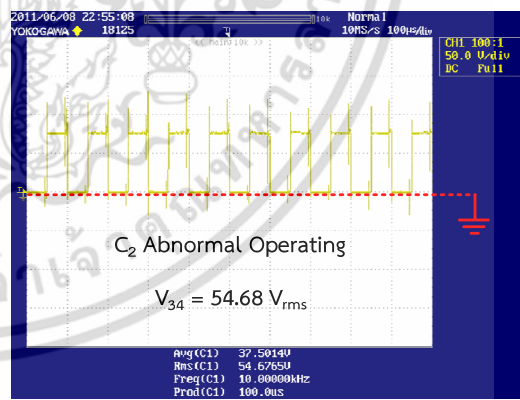
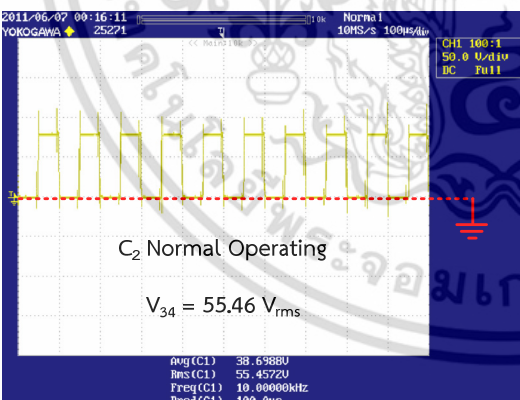
เมื่อทำการทดสอบวงจร  $M^2C^3$  ที่พิกัด 500 W โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 80 V ทางด้านบัสแรงดันต่ำ และทำการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของโหนดอ้างอิง  $V_{12}$  ของตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  ที่ทำงานในสภาวะปกติและไม่ปกติดังรูปที่ 5.5(ก) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของโหนดอ้างอิง  $V_{23}$  ของตัวเก็บประจุ  $C_1$  ที่ทำงานในสภาวะปกติและไม่ปกติดังรูปที่ 5.5(ข) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของโหนดอ้างอิง  $V_{34}$  ของตัวเก็บประจุ  $C_2$  ที่ทำงานในสภาวะปกติและไม่ปกติดังรูปที่ 5.5(ค) พบว่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีความแตกต่างกันไม่มากนัก แต่เมื่อนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของโหนดอ้างอิงมาทำการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วหรือ FFT (Fast Fourier Transform) ดังรูปที่ 5.6 จะสามารถสังเกตได้ว่าค่าแรงดันไฟฟ้าของแต่ละลำดับฮาร์มอนิกสัณฐานที่มีตัวเก็บประจุตัวใดตัวหนึ่งทำงานในสภาวะไม่ปกติจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าของแต่ละลำดับฮาร์มอนิกสัณฐานในขณะที่ยังตัวเก็บประจุทำงานในสภาวะปกติ ทั้งนี้เนื่องจากตัวเก็บประจุที่ทำงานในสภาวะไม่ปกติจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเก็บประจุลดลง อีกทั้งยังทำให้เกิดค่าความสูญเสียภายในตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น

แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติสัญญาณที่วัดได้จากวงจร  $M^2C^3$  อาจมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากวงจรได้ถูกออกแบบให้สามารถเปลี่ยนแปลงพิกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูงที่มีพิกัดอยู่ระหว่าง 300 W ถึง 500 W ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นอุปสรรคต่อการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีการแปลง FFT เพราะจะทำให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงของตัวเก็บประจุแต่ละตัวได้ยาก ดังนั้นการสร้างตัวตรวจวัดสัญญาณเทียบจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุ

ตารางที่ 5.1 แรงดันไฟฟ้าของโหนดอ้างอิงในแต่ละช่วงเวลา

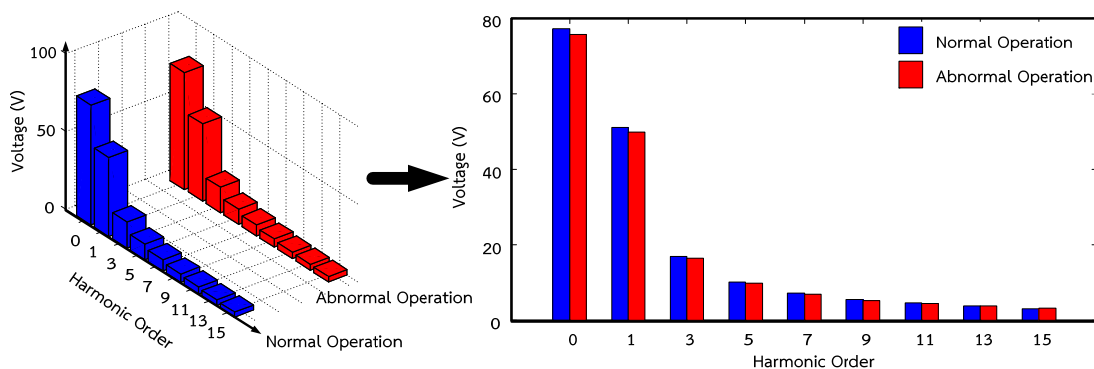
แรงดันไฟฟ้า ของโหนดอ้างอิง	แรงดันไฟฟ้าของโหนดอ้างอิงในแต่ละช่วงเวลา			
	เริ่มต้น		สิ้นสุด	
	แรงดันไฟฟ้าจาก ตัวเก็บประจุ	แรงดันไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้าจาก ตัวเก็บประจุ	แรงดันไฟฟ้า
$V_{12}$	$V_{CHV}(t_3) - V_{C_1}(t_3)$	$V_{LV} - \frac{15}{8}\Delta$	$V_{CHV}(t_4) - V_{C_1}(t_4)$	$V_{LV} - \frac{31}{8}\Delta$
$V_{23}$	$V_{C_1}(t_1)$	$2V_{LV} - \frac{3}{2}\Delta$	$V_{C_1}(t_2)$	$2V_{LV} - \frac{7}{4}\Delta$
$V_{34}$	$V_{C_2}(t_3)$	$V_{LV} - \frac{7}{8}\Delta$	$V_{C_2}(t_4)$	$V_{LV} - \frac{19}{8}\Delta$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

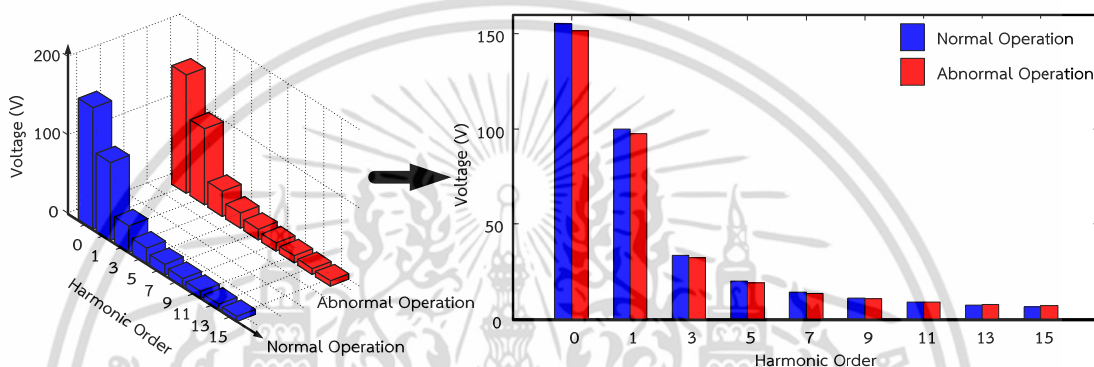
(ก) ตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  ทำงานในสภาวะปกติ(ข) ตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  ทำงานในสภาวะไม่ปกติ(ค) ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำงานในสภาวะปกติ(ง) ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำงานในสภาวะไม่ปกติ(จ) ตัวเก็บประจุ  $C_2$  ทำงานในสภาวะปกติ(ฉ) ตัวเก็บประจุ  $C_2$  ทำงานในสภาวะไม่ปกติ

### รูปที่ 5.5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าโหนดอ้างอิงของตัวเก็บประจุแต่ละตัว ที่ทำงานในสภาวะปกติและไม่ปกติ

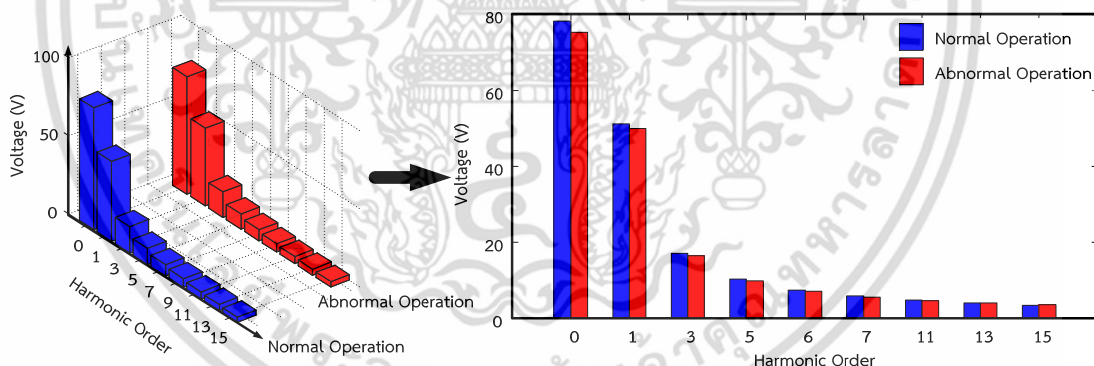
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สเปกตรัมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  ทำงานในสภาวะปกติและไม่ปกติ



(ข) สเปกตรัมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำงานในสภาวะปกติและไม่ปกติ



(ค) สเปกตรัมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  $C_2$  ทำงานในสภาวะปกติและไม่ปกติ

รูปที่ 5.6 สเปกตรัมแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่ทำงานในสภาวะปกติและไม่ปกติ

#### 5.4 การเก็บข้อมูล (Data Set Collection)

การเก็บข้อมูลจะใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากโหนดอ้างอิง  $V_{12}$ ,  $V_{23}$  และ  $V_{34}$  ที่ถูกวัดโดยชุดอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) จำนวน 3 ชุดดังแสดงในรูปที่ 5.7 ซึ่งในการตรวจวัดสภาวะการทำงานของตัวเก็บประจุแต่ละตัว จะใช้สัญญาณจากชุดอุปกรณ์ตรวจวัดที่อยู่ใกล้เคียงกันจำนวน 2 สัญญาณเพื่อตรวจวัด (monitoring) สภาวะการทำงานของตัวเก็บประจุซึ่งกันและกันดังต่อไปนี้

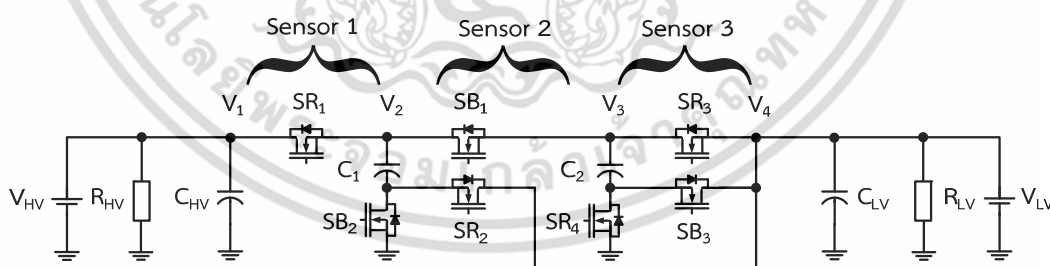
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชุดตรวจวัดตัวที่ 1 ใช้ตรวจวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงการทำงานของตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$
- ชุดตรวจวัดตัวที่ 2 ใช้ตรวจวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงการทำงานของตัวเก็บประจุ  $C_1$
- ชุดตรวจวัดตัวที่ 3 ใช้ตรวจวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงการทำงานของตัวเก็บประจุ  $C_2$

สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากโหนดอ้างอิงของตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่ได้จะเป็นข้อมูลดิบ (Raw Data) ซึ่งจำเป็นต้องทำการหาค่าเฉลี่ยกลางของข้อมูล (Mean Center Data) เพื่อให้กลุ่มของข้อมูลมีค่าเฉลี่ย (Mean) เป็น 0 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เป็น 1

เมื่อนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากโหนดอ้างอิง  $V_{12}$   $V_{23}$  และ  $V_{34}$  มาทำการหาค่าเฉลี่ยกลางของข้อมูลจะได้ดังแสดงในรูปที่ 5.8 ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าสัญญาณแต่ละชุดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้นำมาทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) [23] เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของสัญญาณว่าในสัญญาณแต่ละชุดมีทิศทางและระดับความสัมพันธ์ภายในเป็นอย่างไร กล่าวคือถ้าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเป็นบวกหมายถึง ความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นและตัวแปรตามจะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน หากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเป็นลบหมายถึง ความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นและตัวแปรตามจะเป็นไปในทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นี้มีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 ที่แสดงถึงค่าความสัมพันธ์กันในทางสถิติมากหรือน้อยเพียงใด

จากตารางที่ 5.2 คือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณแต่ละชุดพบว่าสัญญาณแต่ละชุดมีระดับความสัมพันธ์ที่สูงมาก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสัญญาณที่ถูกเลือกจะเป็นสัญญาณที่มีความสามารถในการทำนายที่ดีต่อการนำมาสร้างแบบจำลอง โดยสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากโหนดอ้างอิง  $V_{12}$  และ  $V_{34}$  มีระดับความสัมพันธ์ที่มีทิศทางเดียวกัน (Positive Relation) และสัญญาณดังกล่าวจะมีระดับความสัมพันธ์ที่มีทิศทางตรงกันข้าม (Negative Relation) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากโหนดอ้างอิง  $V_{23}$  ดังนั้นสัญญาณแต่ละชุดสามารถลดมิติ (Dimension) และลดข้อมูลที่ไม่จำเป็น (Redundancy Data) ด้วยกระบวนการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก PCA (Principal Component Analysis)

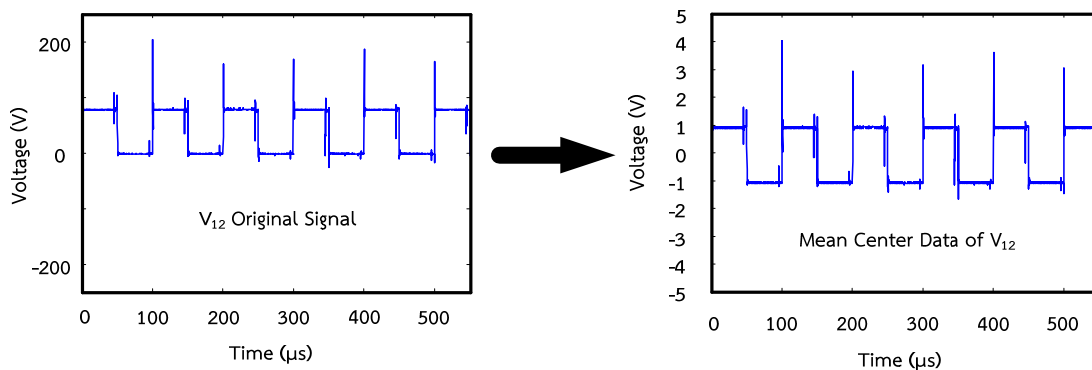
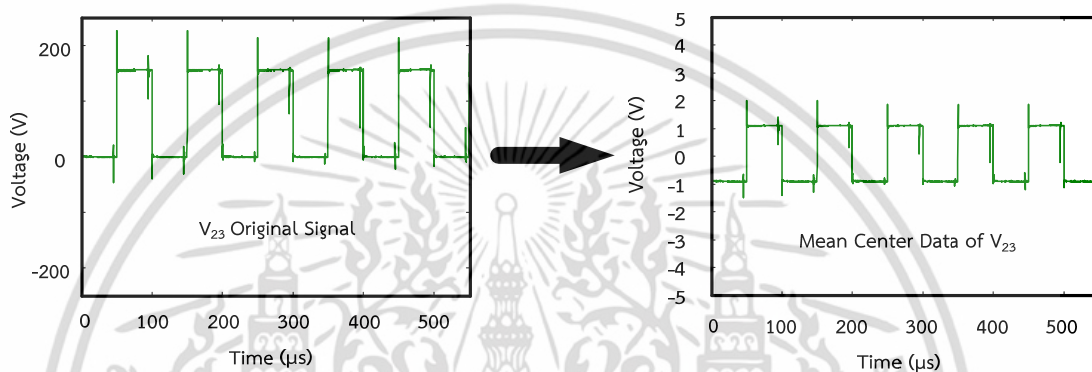
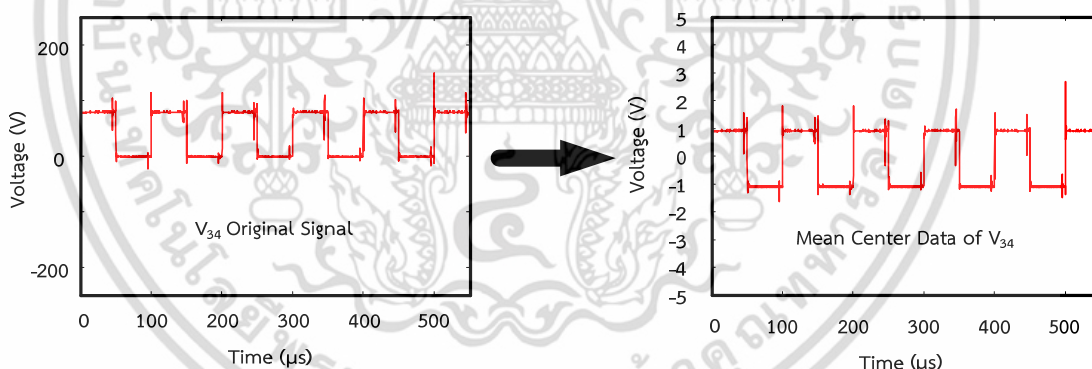


รูปที่ 5.7 ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดแต่ละตัวที่ถูกใช้ตรวจวัดสภาวะการทำงานของตัวเก็บประจุ

ตารางที่ 5.2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณแต่ละชุด

สัญญาณแรงดันไฟฟ้า	$V_{12}$	$V_{23}$	$V_{34}$
$V_{12}$	1	-0.97	0.99
$V_{23}$	-0.97	1	-0.98
$V_{34}$	0.99	-0.98	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากโหนดอ้างอิง  $V_{12}$ (ข) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากโหนดอ้างอิง  $V_{23}$ (ค) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากโหนดอ้างอิง  $V_{34}$ 

รูปที่ 5.8 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากโหนดอ้างอิงเมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยกลางของข้อมูล

## 5.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis)

กระบวนการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักหรือการแปลง PCA [20] ดังรูปที่ 5.9 มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสัญญาณขึ้นมาใหม่ที่มีความใกล้เคียงกับสัญญาณตัวเดิมให้มีค่ามากที่สุด และยังเป็นารลดมิติของข้อมูลทางด้านอินพุทให้มีขนาดเล็กลงโดยการกรองข้อมูลที่ไม่จำเป็น (Filter Data) ออกจากสัญญาณจึงทำให้สามารถลดระยะเวลาในการประมวลผลสัญญาณให้รวดเร็วยิ่งขึ้น ในการแปลง PCA จะใช้วิธี SVD (Singular Value Decomposition) ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X = A \times L \times U^T \quad (5.2)$$

และ

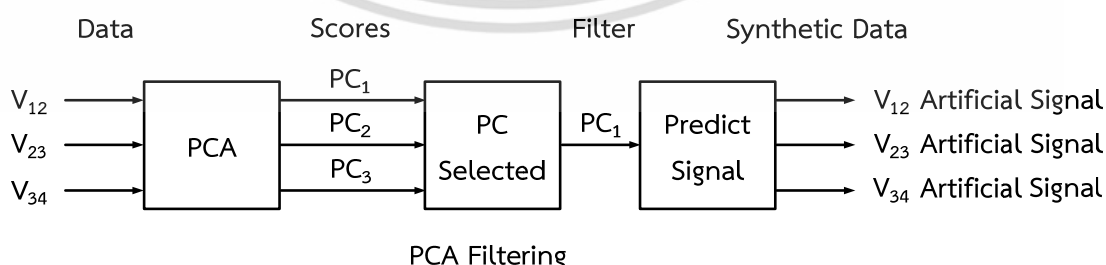
$$Z = A \times L \quad (5.3)$$

เมื่อ

X	คือ	เมตริกซ์ค่าคงตัวที่มีมิติ (n x p)
A	คือ	เมตริกซ์ค่ามาตรฐานขององค์ประกอบหลักที่มีมิติ (n x r)
L	คือ	เมตริกซ์เส้นทแยงมุมของค่าเอกฐาน (Singular Value) ที่มีมิติ (r x r)
$U^T$	คือ	ค่าทรานซ์โพสของเมตริกซ์ Eigenvector ที่มีมิติ (r x p)
Z	คือ	เมตริกซ์ของค่าองค์ประกอบหลักที่มีมิติ (n x r)

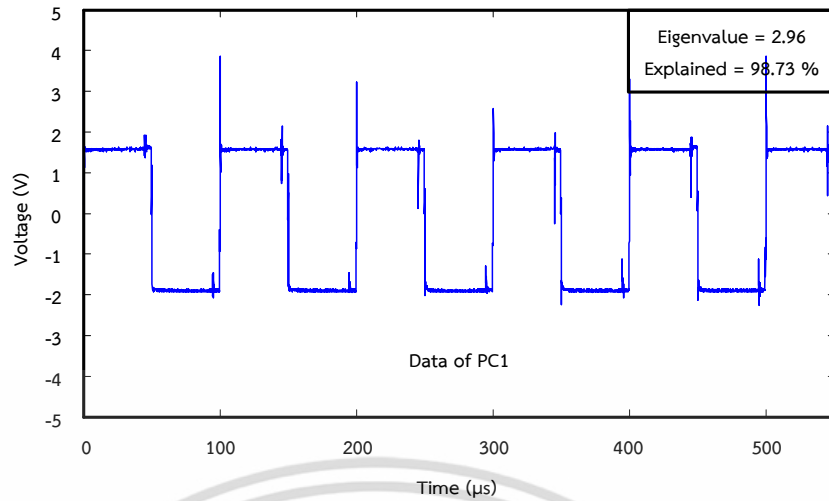
การสร้างเมตริกซ์ของค่าองค์ประกอบหลักหรือค่า PC คือการสร้างตัวแปรขึ้นใหม่ที่เป็นอิสระต่อกัน (Independent) กล่าวคือค่า PC สามารถเก็บข้อมูลที่มีลักษณะเฉพาะที่คล้ายคลึงกัน (Genetic Data) ให้อยู่ใน PC เดียวกัน เมื่อได้ค่า PC จำเป็นต้องทำการเลือกค่า PC ให้มีความเหมาะสมต่อการสร้างและทำนายสัญญาณขึ้นใหม่ ซึ่งในการเลือกจะพิจารณาตามหลักการดังต่อไปนี้

- พิจารณาค่าร้อยละความแปรปรวนจากค่า Explained ดังสมการที่ (5.4) ของ PC แต่ละตัว ให้มีค่ามากกว่าร้อยละ 80 เพื่อเป็นการตัดข้อมูลบางส่วนที่ไม่จำเป็นออกไปและยังคงรักษาข้อมูลส่วนใหญ่ไว้ในสัญญาณที่ถูกทำนายขึ้นมาใหม่ จากการนำสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า  $V_{12}$ ,  $V_{23}$  และ  $V_{34}$  มาทำการหาค่า PC จะได้ดังรูปที่ 5.9 พบว่ากราฟข้อมูลของ PC1 ดังรูปที่ 5.9(ก) สามารถเก็บข้อมูลที่มีลักษณะเดียวกันและมีค่าร้อยละความแปรปรวนสูงสุดอยู่ที่ 98.73% โดยค่าร้อยละความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้นี้คือค่าที่ชี้ให้เห็นว่า PC1 มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลมากที่สุด ส่วนกราฟข้อมูล PC2 และ PC3 ดังรูปที่ 5.9(ข) และ 5.9(ค) ตามลำดับ จะสังเกตเห็นได้ชัดว่า PC ทั้งสองประกอบไปด้วยข้อมูลที่ไม่จำเป็นต่อการทำนายสัญญาณ ซึ่งสามารถตัดทิ้งข้อมูลในส่วนนี้ได้
- พิจารณาจากค่า Eigenvalue กล่าวคือถ้าค่า Eigenvalue ของ PC ตัวใดมีค่าน้อยกว่า Eigenvalue เฉลี่ยของ PC ทั้งหมด จะทำให้ PC ตัวนั้นถูกตัดข้อมูลทิ้ง จากรูปที่ 5.10 พบว่าค่า PC1 มีค่า Eigenvalue มากกว่าค่า Eigenvalue เฉลี่ยของ PC ทั้งหมด ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า PC1 เป็นตัวแทนข้อมูลทั้งหมดสำหรับการสร้างและทำนายสัญญาณขึ้นมาใหม่

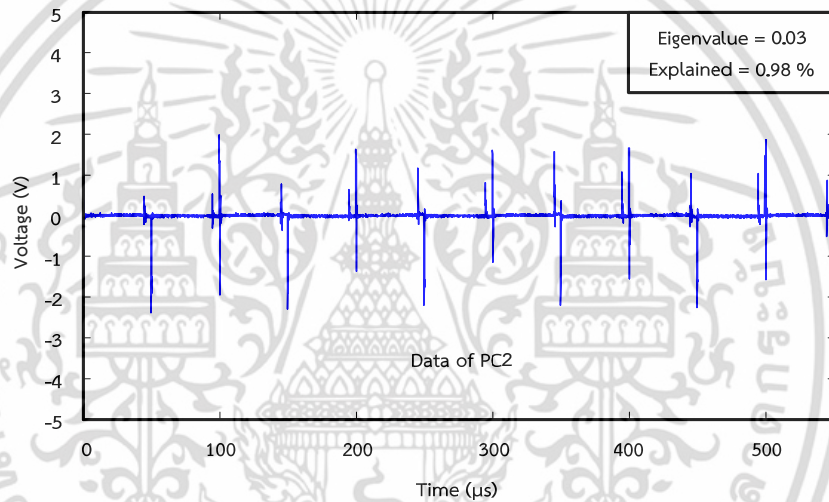


รูปที่ 5.9 แผนผังการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

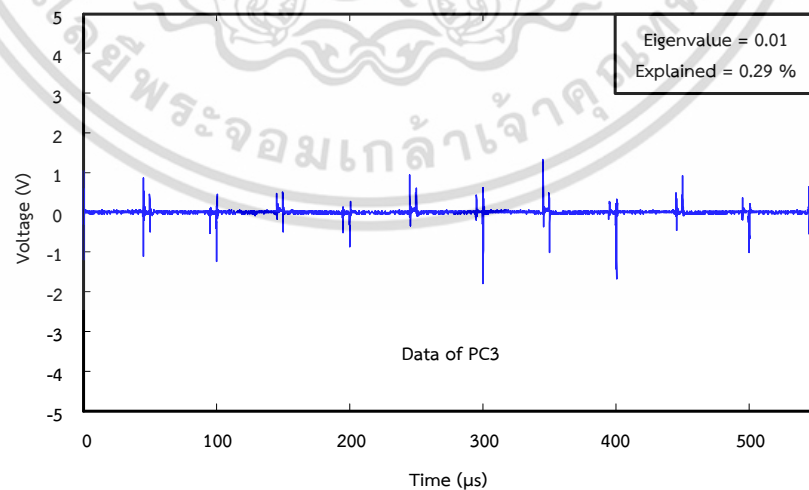
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) กราฟข้อมูลของค่าองค์ประกอบหลักตัวที่ 1



(ข) กราฟข้อมูลของค่าองค์ประกอบหลักตัวที่ 2

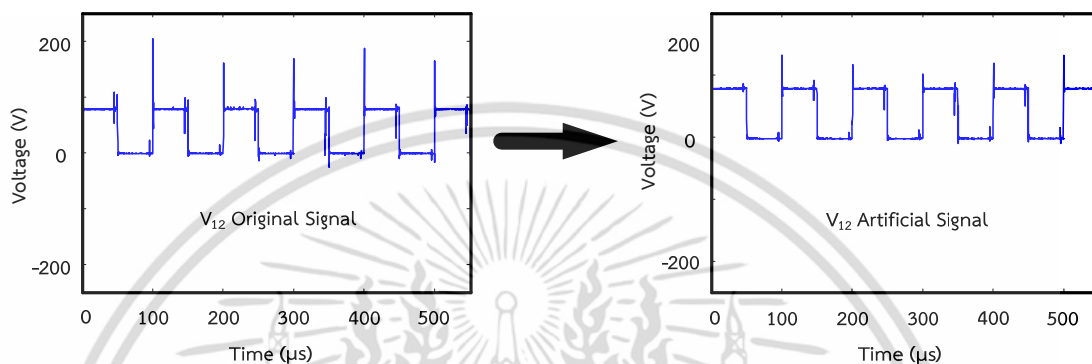


(ค) กราฟข้อมูลของค่าองค์ประกอบหลักตัวที่ 3

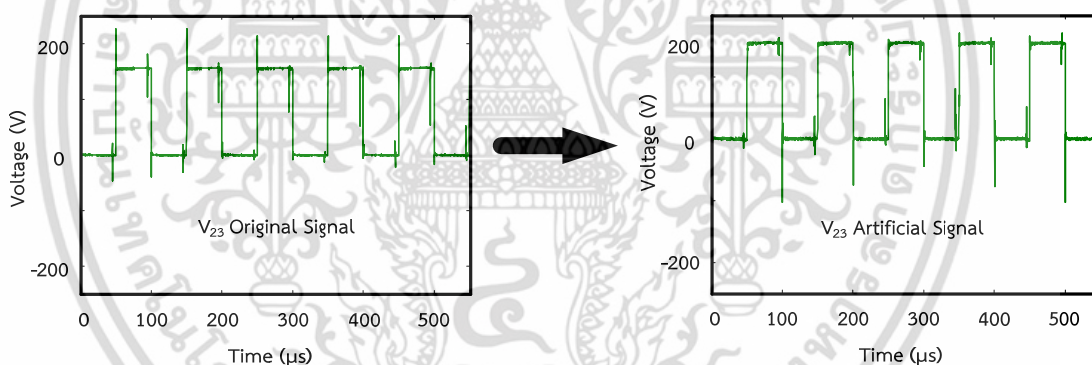
รูปที่ 5.10 กราฟข้อมูลของค่าองค์ประกอบหลักแต่ละตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

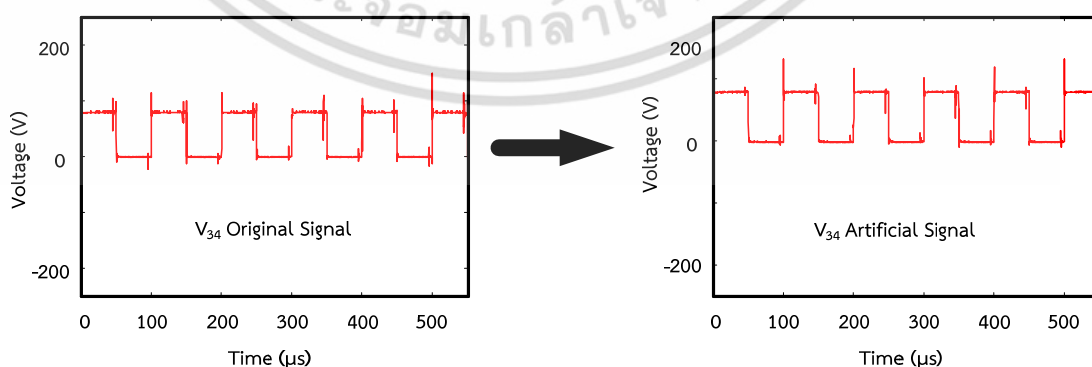
หลังจากได้ทำการเลือกค่า PC ที่มีความเหมาะสมกับการสร้างและทำนายสัญญาณเลียนแบบที่มีลักษณะเดียวกันกับสัญญาณที่วัดได้จากชุดอุปกรณ์ตัวตรวจวัดจริงโดยการแยกองค์ประกอบหลักของ PC1 ด้วยการอินเวอร์ส (Inverse) สัญญาณเพื่อทำการสร้างสัญญาณเลียนแบบจะได้สัญญาณดังรูปที่ 5.11 จากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณจากตัวตรวจวัดที่วัดได้จริงและสัญญาณเลียนแบบที่ถูกสร้างขึ้นดังรูปที่ 5.12 พบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์หรือ MAE (Mean Absolute Error) ของสัญญาณแต่ละชุดมีค่าต่ำมาก ซึ่งค่าความผิดพลาดต่ำที่เกิดขึ้นชี้ให้เห็นว่ากระบวนการ PCA สามารถกรองสัญญาณรบกวนและสร้างสัญญาณเลียนแบบสัญญาณที่วัดได้จริง



(ก) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าโหนดอ้างอิง  $V_{12}$



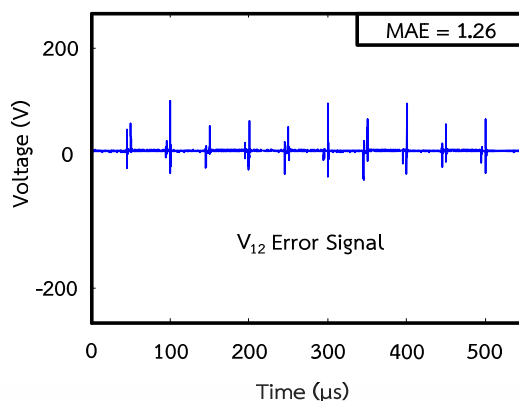
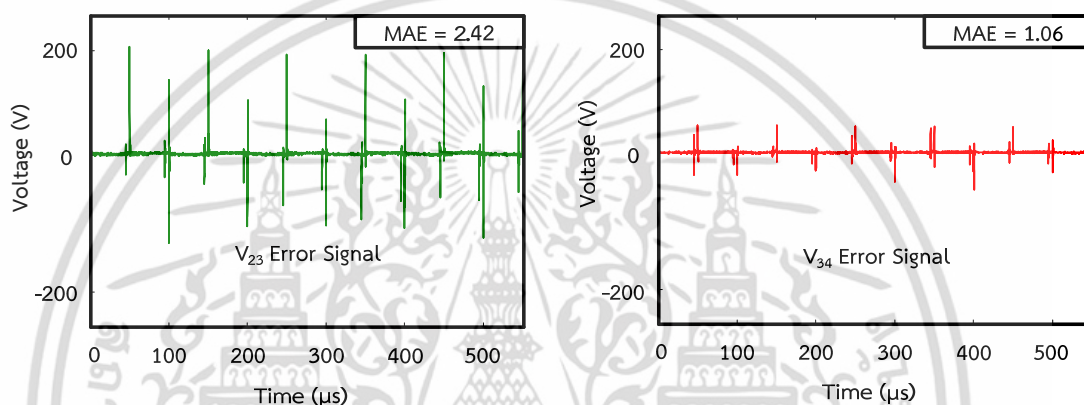
(ข) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าโหนดอ้างอิง  $V_{23}$



(ค) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าโหนดอ้างอิง  $V_{34}$

**รูปที่ 5.11** สัญญาณจากตัวตรวจวัดที่วัดได้จริงและสัญญาณเลียนแบบที่ถูกสร้างขึ้น

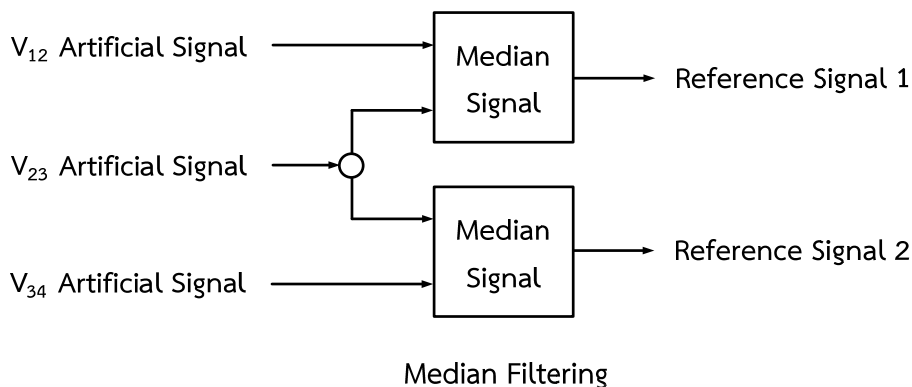
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) สัญญาณค่าความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้าโหนดอ้างอิง  $V_{12}$ (ข) สัญญาณค่าความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้าโหนดอ้างอิง  $V_{23}$  (ค) สัญญาณค่าความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้าโหนดอ้างอิง  $V_{34}$ 

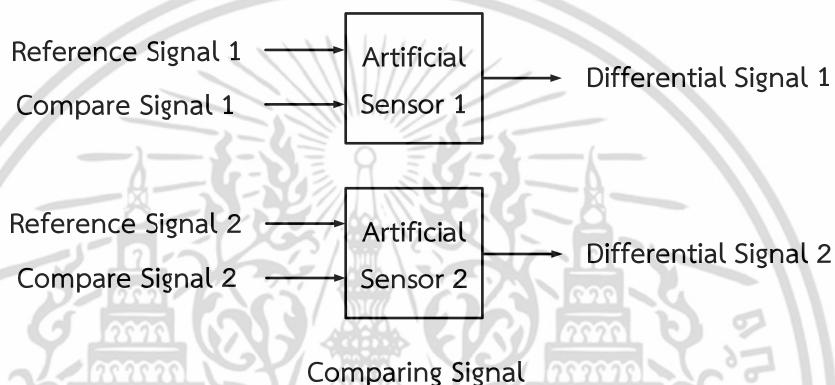
รูปที่ 5.12 สัญญาณค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณจากตัวตรวจวัดที่วัดได้จริงและสัญญาณเลียนแบบที่ถูกสร้างขึ้น

## 5.6 การสร้างตัวตรวจวัดเทียม (Artificial Sensor Construction)

การสร้างตัวตรวจวัดเทียมจะใช้สัญญาณเลียนแบบมาทำการตรวจสอบสถานะการทำงานของตัวเก็บประจุซึ่งกันและกัน (Circulate Checking) ด้วยการนำสัญญาณเลียนแบบที่อยู่ใกล้เคียงกันจำนวน 2 สัญญาณมาทำการสร้างสัญญาณอ้างอิงจำนวน 1 สัญญาณ โดยอาศัยการใช้ตัวกรองสัญญาณมัธยฐาน (Median Filtering Signal) ดังรูปที่ 5.13 ซึ่งสามารถสร้างสัญญาณอ้างอิงชุดที่ 1 จากสัญญาณเลียนแบบของ  $V_{12}$  กับ  $V_{23}$  และสามารถสร้างสัญญาณอ้างอิงชุดที่ 2 จากสัญญาณเลียนแบบของ  $V_{23}$  กับ  $V_{34}$  สัญญาณอ้างอิงทั้ง 2 ชุดที่ถูกสร้างขึ้นจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่รับค่าสัญญาณเข้ามาใหม่ด้วยตัวตรวจวัดเทียมดังรูปที่ 5.14 (สัญญาณอ้างอิงที่รับค่าเข้ามาใหม่จะต้องผ่านกระบวนการที่กล่าวถึงมาแล้วก่อนหน้านี้)



รูปที่ 5.13 กระบวนการสร้างสัญญาณอ้างอิงด้วยตัวกรองสัญญาณมัธยฐาน



รูปที่ 5.14 กระบวนการเปรียบเทียบสัญญาณด้วยตัวตรวจวัดเทียบ

สัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบด้วยตัวตรวจวัดเทียบทั้งสองคือสัญญาณความแตกต่างระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเปรียบเทียบที่รับค่าเข้ามา โดยตัวตรวจวัดเทียบที่ถูกสร้างขึ้นได้กำหนดให้ทำการตรวจสอบค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (Percentage Difference) ระหว่างค่า MAE ของตัวเก็บประจุที่ทำงานภายใต้สภาวะปกติกับค่า MAE ของตัวเก็บประจุที่ทำงานภายใต้สภาวะปกติและไม่ปกติดังสมการที่ (5.4) จากการทดสอบพบว่าหากค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมากกว่า 60% จะทำให้สถานะของตัวตรวจวัดเทียบมีค่าเท่ากับ 1 หมายถึง การตรวจพบการทำงานที่ผิดปกติของตัวเก็บประจุ และหากค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างน้อยกว่า 60% จะทำให้สถานะของตัวตรวจวัดเทียบมีค่าเท่ากับ 0 หมายถึง การตรวจไม่พบการทำงานที่ผิดปกติของตัวเก็บประจุ ซึ่งตัวตรวจวัดเทียบทั้งสองจะทำงานสัมพันธ์กันเพื่อทำการตรวจวัดสภาวะการทำงานของตัวเก็บประจุดังตารางที่ 5.3

$$\text{Percentage Difference} = \left| \frac{\text{MAE}_{\text{Reference}} - \text{MAE}_{\text{Compare}}}{\left( \frac{\text{MAE}_{\text{Reference}} + \text{MAE}_{\text{Compare}}}{2} \right)} \right| \times 100 \quad (5.4)$$

เมื่อ

- Percentage Difference คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง
- MAE<sub>Reference</sub> คือ ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์อ้างอิง
- MAE<sub>Compare</sub> คือ ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ของสัญญาณเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

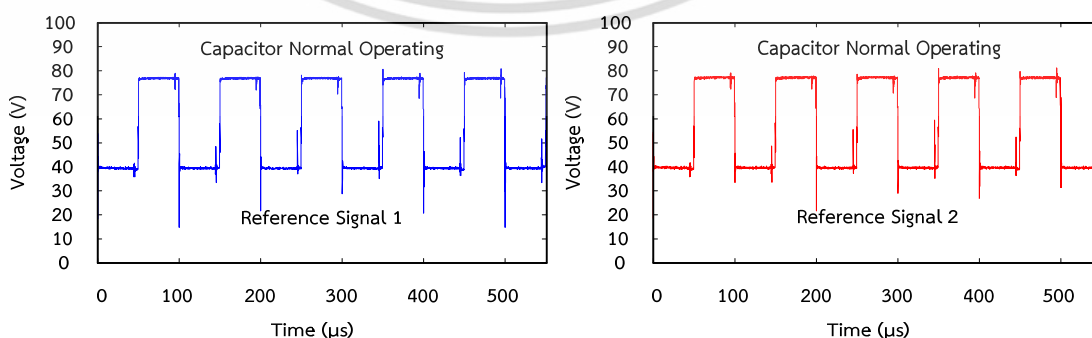
ตารางที่ 5.3 สถานะการตรวจวัดสภาวะการทำงานของตัวเก็บประจุของตัวตรวจวัดเทียบ

สภาวะการทำงานของตัวเก็บประจุ	สถานะของ ตัวตรวจวัดเทียบชุดที่ 1	สถานะของ ตัวตรวจวัดเทียบชุดที่ 2
ตัวเก็บประจุทำงานในสภาวะปกติ	0	0
$C_1$ ทำงานในสภาวะไม่ปกติ	1	1
$C_2$ ทำงานในสภาวะไม่ปกติ	0	1
$C_{HV}$ ทำงานในสภาวะไม่ปกติ	1	0
0 คือ ตรวจไม่พบความผิดปกติ	1 คือ ตรวจพบความผิดปกติ	

### 5.7 การทดสอบแบบจำลองการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุ

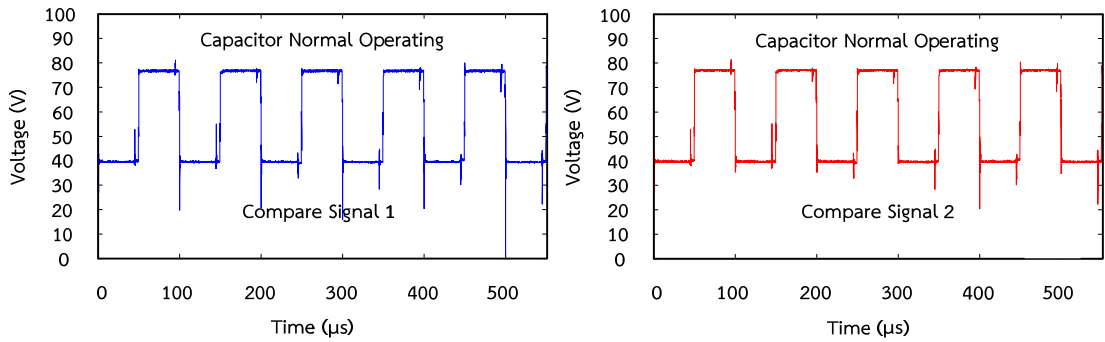
ในการทดสอบแบบจำลองการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุจะใช้สัญญาณอ้างอิงที่ถูกสร้างขึ้นของตัวเก็บประจุที่ทำงานภายใต้สภาวะปกติในวงจร  $M^2C^3$  ดังรูปที่ 5.15 เมื่อทำการทดสอบแบบจำลองโดยการป้อนสัญญาณเปรียบเทียบของตัวเก็บประจุที่ทำงานในสภาวะปกติขณะมีภาระทางไฟฟ้าดังรูปที่ 5.16(ก) จะได้กราฟสัญญาณความแตกต่างระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณเปรียบเทียบดังรูปที่ 5.16(ข) พบว่ากราฟสัญญาณความแตกต่างที่ตัวตรวจวัดเทียบทั้งสองมีลักษณะคล้ายเส้นตรง โดยที่ค่า MAE ของตัวตรวจวัดเทียบตัวที่ 1 และ 2 มีค่า 0.44 และ 0.44 ตามลำดับ จากการนำสัญญาณเปรียบเทียบของตัวเก็บประจุที่ทำงานในสภาวะปกติมาทดสอบหลายๆ ครั้ง พบว่าค่า MAE เฉลี่ยของตัวตรวจวัดเทียบตัวที่ 1 และ 2 มีค่าประมาณ 0.50 และ 0.50 ตามลำดับ ซึ่งค่า MAE ที่ได้นี้จะถูกใช้เป็นค่าอ้างอิงกับค่า MAE ของสัญญาณที่นำมาเปรียบเทียบต่อไป

เมื่อทำการทดสอบแบบจำลองโดยการป้อนสัญญาณเปรียบเทียบของตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  ที่ทำงานในสภาวะไม่ปกติขณะมีภาระทางไฟฟ้าดังรูปที่ 5.17(ก) จะได้กราฟสัญญาณความแตกต่างระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณเปรียบเทียบดังรูปที่ 5.17(ข) ซึ่งพบว่ากราฟสัญญาณความแตกต่างที่ตัวตรวจวัดเทียบตัวที่ 1 มีลักษณะคล้ายรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ส่วนตัวตรวจวัดเทียบตัวที่ 2 มีลักษณะคล้ายเส้นตรง โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของตัวตรวจวัดเทียบตัวที่ 1 และ 2 เท่ากับ 64.86 % และ 11.32 % ตามลำดับ

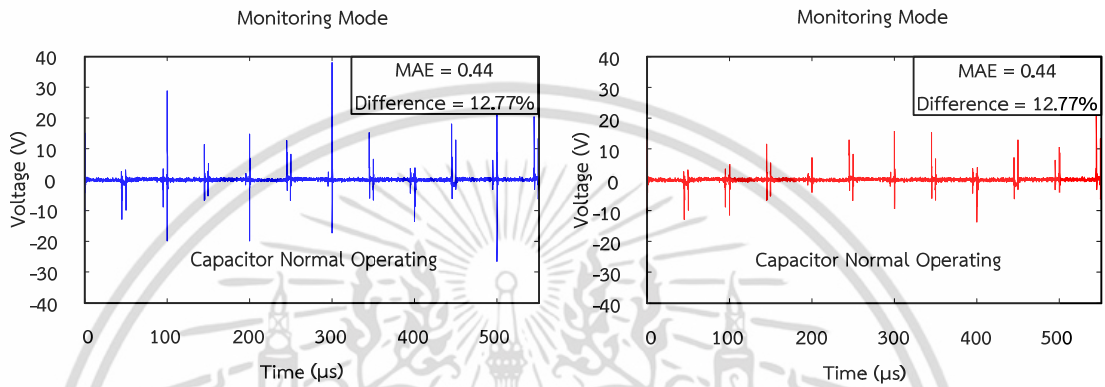


รูปที่ 5.15 สัญญาณอ้างอิงที่ถูกสร้างขึ้นของตัวเก็บประจุที่ทำงานในสภาวะปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

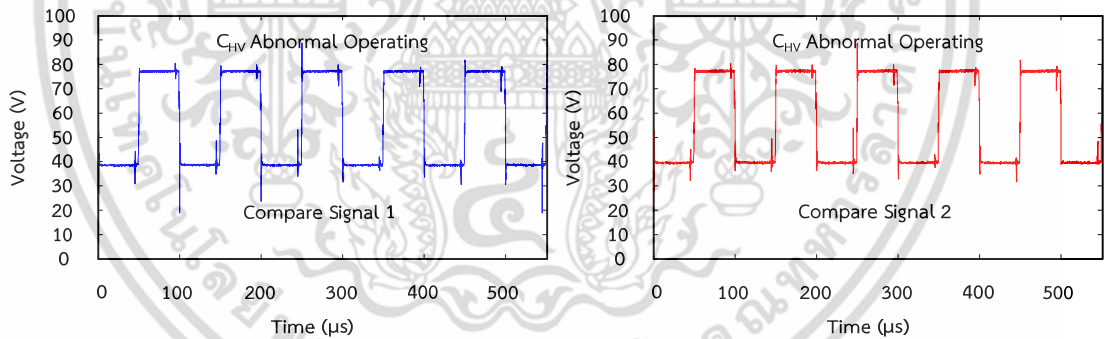


(ก) สัญญาณเปรียบเทียบของตัวเก็บประจุที่ทำงานในสภาวะปกติ

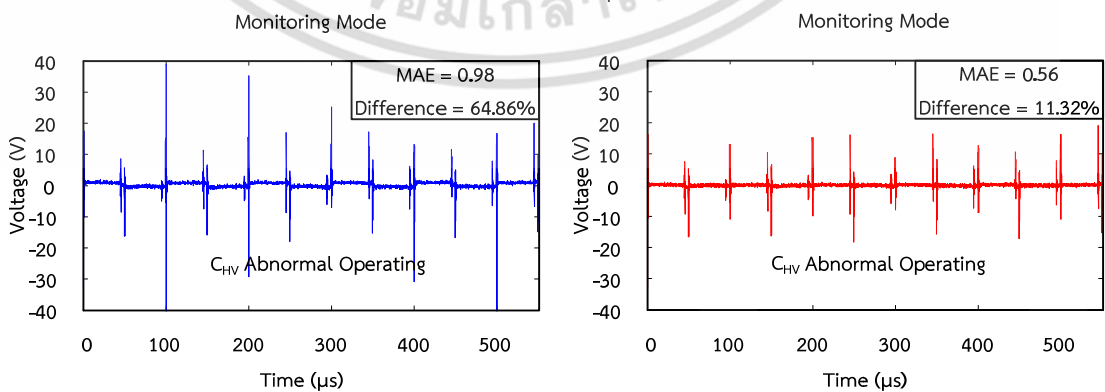


(ข) สัญญาณความแตกต่างระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณเปรียบเทียบ

รูปที่ 5.16 สัญญาณจากชุดตรวจวัดเทียมเมื่อตัวเก็บประจุทำงานในสภาวะปกติขณะมีภาระทางไฟฟ้า



(ก) สัญญาณเปรียบเทียบของตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  ที่ทำงานในสภาวะไม่ปกติ

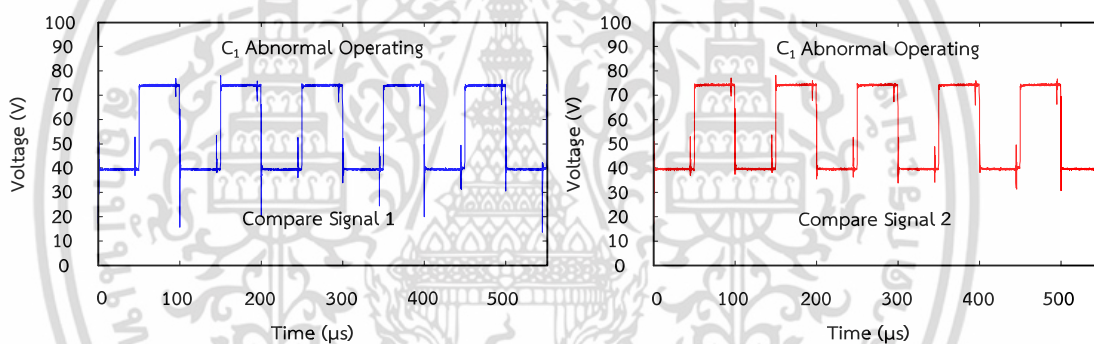


(ข) สัญญาณความแตกต่างระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณเปรียบเทียบ

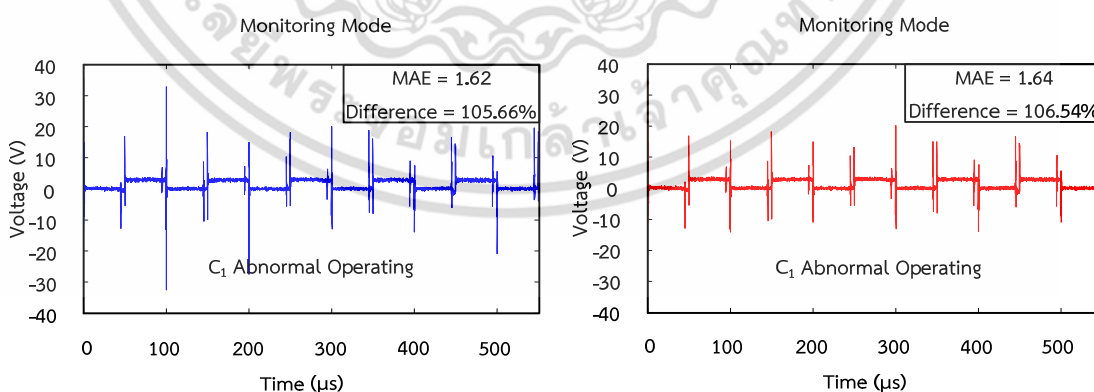
รูปที่ 5.17 สัญญาณจากชุดตรวจวัดเทียมเมื่อ  $C_{HV}$  ทำงานในสภาวะไม่ปกติขณะมีภาระทางไฟฟ้า  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการทดสอบแบบจำลองโดยการป้อนสัญญาณเปรียบเทียบของตัวเก็บประจุ  $C_1$  ที่ทำงานในสถานะไม่ปกติขณะมีภาระทางไฟฟ้าดังรูปที่ 5.18(ก) จะได้กราฟสัญญาณความแตกต่างระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณเปรียบเทียบดังรูปที่ 5.18(ข) ซึ่งพบว่ากราฟสัญญาณความแตกต่างที่ตัวตรวจวัดเทียบตัวที่ 1 มีลักษณะคล้ายรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ส่วนตัวตรวจวัดเทียบตัวที่ 2 มีลักษณะคล้ายรูปคลื่นสี่เหลี่ยม โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของตัวตรวจวัดเทียบตัวที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 105.66 % และ 106.54 % ตามลำดับ

เมื่อทำการทดสอบแบบจำลองโดยการป้อนสัญญาณเปรียบเทียบของตัวเก็บประจุ  $C_2$  ที่ทำงานในสถานะไม่ปกติขณะมีภาระทางไฟฟ้าดังรูปที่ 5.19(ก) จะได้กราฟสัญญาณความแตกต่างระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณเปรียบเทียบดังรูปที่ 5.19(ข) ซึ่งพบว่ากราฟสัญญาณความแตกต่างที่ตัวตรวจวัดเทียบตัวที่ 1 มีลักษณะคล้ายเส้นตรง ส่วนตัวตรวจวัดเทียบตัวที่ 2 มีลักษณะคล้ายรูปคลื่นสี่เหลี่ยม โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของตัวตรวจวัดเทียบตัวที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 13.08 % และ 83.72 % ตามลำดับ จากผลการทดสอบแบบจำลองการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในวงจร  $M^2C^3$  ที่สภาวะการทำงานปกติและไม่ปกติ ชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุได้อย่างถูกต้อง

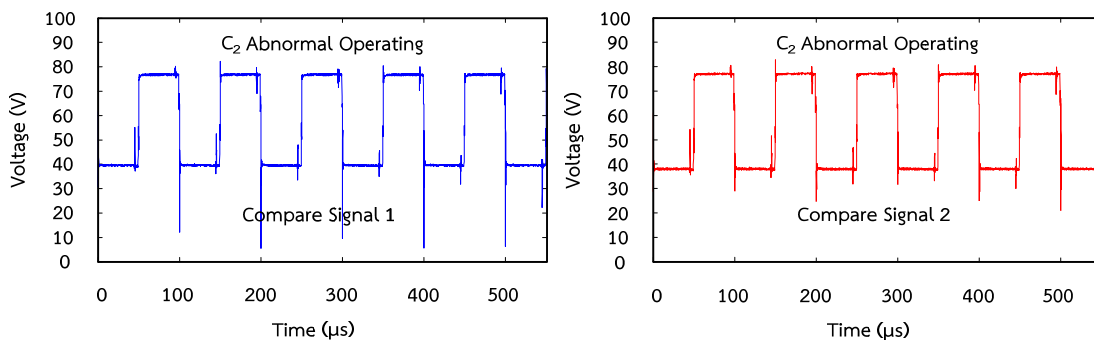


(ก) สัญญาณเปรียบเทียบของตัวเก็บประจุ  $C_1$  ที่ทำงานในสถานะไม่ปกติ

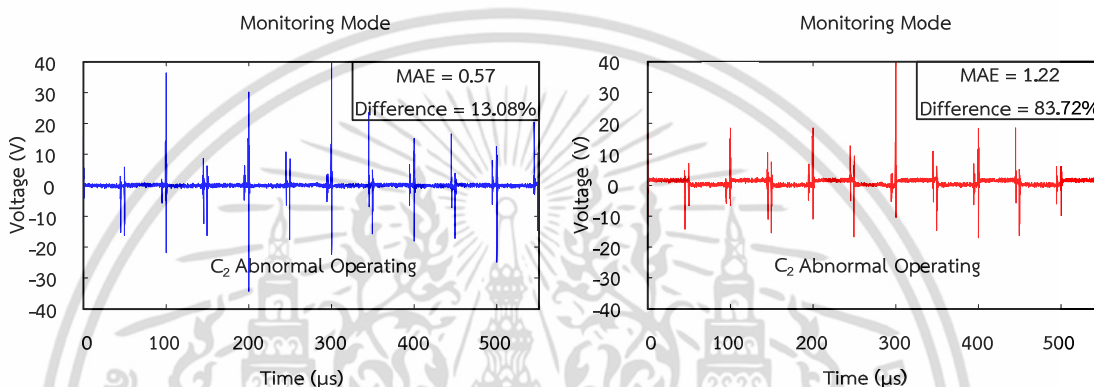


(ข) สัญญาณความแตกต่างระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณเปรียบเทียบ

รูปที่ 5.18 สัญญาณจากชุดตรวจวัดเทียบเมื่อ  $C_1$  ทำงานในสถานะไม่ปกติขณะมีภาระทางไฟฟ้า



(ก) สัญญาณเปรียบเทียบของตัวเก็บประจุ  $C_2$  ที่ทำงานในสภาวะไม่ปกติ



(ข) สัญญาณความแตกต่างระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณเปรียบเทียบ

รูปที่ 5.19 สัญญาณจากชุดตรวจวัดเทียมเมื่อ  $C_2$  ทำงานในสภาวะไม่ปกติขณะมีภาระทางไฟฟ้า

หลังจากที่ทำการสร้างตัวตรวจวัดเทียมจำเป็นต้องสร้างประสบการณ์และระบบการเรียนรู้ให้กับแบบจำลองการตรวจวัดสภาวะการทำงานของตัวเก็บประจุ เนื่องจากวงจรได้ถูกออกแบบให้สามารถเปลี่ยนแปลงพิกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูงที่มีพิกัดอยู่ระหว่าง 300 W ถึง 500 W ซึ่งการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจะทำให้สัญญาณที่ได้จากตัวตรวจวัดเทียมเปลี่ยนแปลงไปจากสัญญาณอ้างอิง โดยเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า (หลักการที่นำเสนอในบทที่ 3) ซึ่งการสร้างประสบการณ์และระบบการเรียนรู้ให้กับแบบจำลองการตรวจวัดสภาวะการทำงานของตัวเก็บประจุสามารถทำได้ด้วยการใช้วิธีการทำรีเกรสชัน (Regression)

วิธีการทำรีเกรสชันเริ่มจากการเก็บข้อมูลจากตัวตรวจวัดเทียมที่สร้างขึ้นทั้ง 2 ชุด ในการเก็บข้อมูลจะทำการสร้างตัวแปรเมตริกซ์  $X$  เป็นข้อมูลทางด้านอินพุทของระบบการตรวจสอบที่ประกอบด้วย 5 ตัวแปร (Variable) คือ ค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง (ตัวแปรที่ 1) MAE1 (ตัวแปรที่ 2) %Difference1 (ตัวแปรที่ 3) MAE2 (ตัวแปรที่ 4) และ %Difference2 (ตัวแปรที่ 5) เป็นจำนวน 80 ค่าสังเกต (Observation) ดังแสดงในสมการที่ (5.5)

$$X = \begin{bmatrix} [ \text{Normal Operation} ]_{20 \times 5} \\ [ \text{C}_{HV} \text{ Abnormal Operation} ]_{20 \times 5} \\ [ \text{C}_1 \text{ Abnormal Operation} ]_{20 \times 5} \\ [ \text{C}_2 \text{ Abnormal Operation} ]_{20 \times 5} \end{bmatrix}_{80 \times 5} \quad (5.5)$$

เมื่อ

X	คือ	เมตริกซ์ข้อมูล
แถวที่ 1 ถึง 20	คือ	ค่าสังเกตของตัวเก็บประจุในสภาวะการทำงานปกติ
แถวที่ 21 ถึง 40	คือ	ค่าสังเกตของตัวเก็บประจุ $C_{HV}$ ในสภาวะการทำงานที่ไม่ปกติ
แถวที่ 41 ถึง 60	คือ	ค่าสังเกตของตัวเก็บประจุ $C_1$ ในสภาวะการทำงานที่ไม่ปกติ
แถวที่ 61 ถึง 80	คือ	ค่าสังเกตของตัวเก็บประจุ $C_2$ ในสภาวะการทำงานที่ไม่ปกติ

หลังจากการเก็บข้อมูลจะต้องทำการสมมติค่าเป้าหมาย (Target) คือเมตริกซ์ Y ดังสมการที่ (5.6) โดยกำหนดให้เมตริกซ์ Y อยู่ในรูปของเลขฐานสองจำนวน 2 บิต (2 Bit Binary Code) เพื่อนำไปใช้ในการจำแนก (Classification) สภาวะการทำงานของตัวเก็บประจุ

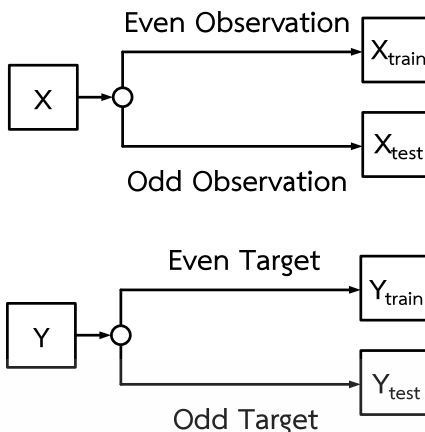
$$Y = \begin{bmatrix} [ 0 0 ]_{20 \times 5} \\ [ 0 1 ]_{20 \times 5} \\ [ 1 0 ]_{20 \times 5} \\ [ 1 1 ]_{20 \times 5} \end{bmatrix}_{80 \times 5} \quad (5.6)$$

เมื่อ

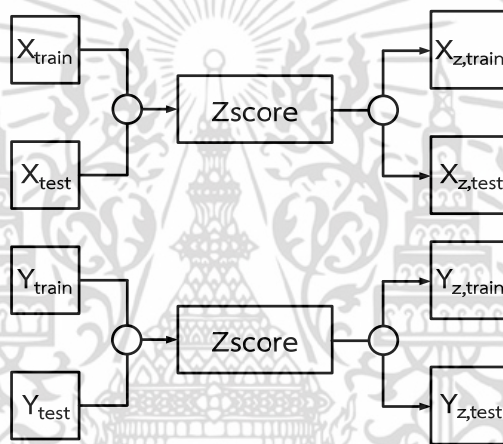
Y	คือ	เมตริกซ์เป้าหมาย
แถวที่ 1 ถึง 20	คือ	ค่าเป้าหมายของตัวเก็บประจุในสภาวะการทำงานปกติ
แถวที่ 21 ถึง 40	คือ	ค่าเป้าหมายของตัวเก็บประจุ $C_{HV}$ ในสภาวะการทำงานที่ไม่ปกติ
แถวที่ 41 ถึง 60	คือ	ค่าเป้าหมายของตัวเก็บประจุ $C_1$ ในสภาวะการทำงานที่ไม่ปกติ
แถวที่ 61 ถึง 80	คือ	ค่าเป้าหมายของตัวเก็บประจุ $C_2$ ในสภาวะการทำงานที่ไม่ปกติ

หลังจากการเก็บข้อมูลจะต้องทำการกำหนดกลุ่มข้อมูล (Data Set Selection) ในการกำหนดกลุ่มข้อมูลจะเริ่มจากการแบ่งข้อมูลของเมตริกซ์ X และ Y ด้วยวิธีคู่และคี่ (Even and Odd Method) ดังแสดงในรูปที่ 5.20 เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการฝึกฝน (Training Set) และทดสอบ (Testing Set) โดยค่าสังเกตและค่าเป้าหมายที่เป็นจำนวนคู่ 40 ตัวแรกจะถูกนำไปฝึกฝน ( $X_{\text{train}}$ ,  $Y_{\text{train}}$ ) เพื่อให้ระบบการตรวจวัดความสัมพันธ์สภาพของตัวเก็บประจุเกิดกระบวนการเรียนรู้จากฐานข้อมูลที่มีอยู่ ส่วนค่าสังเกตและค่าเป้าหมายที่เป็นจำนวนคี่อีก 40 ตัวที่เหลือจะถูกนำไปทดสอบ ( $X_{\text{test}}$ ,  $Y_{\text{test}}$ ) เพื่อตรวจสอบความสามารถของระบบในการตรวจวัดความสัมพันธ์สภาพตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่อยู่ในวงจร ซึ่งข้อมูลที่ถูกนำมาทดสอบนั้นจะต้องเป็นข้อมูลที่ยังไม่ได้ผ่านการฝึกฝน

หลังจากการแบ่งกลุ่มข้อมูลนำข้อมูลดิบ (Raw Data) ที่ได้จากเมตริกซ์  $X_{\text{train}}$ ,  $X_{\text{test}}$ ,  $Y_{\text{train}}$  และ  $Y_{\text{test}}$  ไปทำการหาค่า Zscore [23] ดังแสดงในรูปที่ 5.21 ซึ่งค่า Zscore นี้จะใช้สมการที่ (5.7) เพื่อทำให้กลุ่มของข้อมูลมีค่าเฉลี่ย (Mean) เป็น 0 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เป็น 1 และค่าความแปรปรวน (Variance) เป็น 1



รูปที่ 5.20 แผนผังการแบ่งกลุ่มของข้อมูลด้วยวิธีคู่และคี่



รูปที่ 5.21 แผนผังการทำ Zscore

$$Z = \frac{\text{Data} - \overline{\text{Data}}}{\text{SD}} \tag{5.7}$$

เมื่อ		
Z	คือ	ค่า Zscore
Data	คือ	ข้อมูล
$\overline{\text{Data}}$	คือ	ค่าเฉลี่ยของข้อมูล
SD	คือ	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

หลังจากการแบ่งกลุ่มของข้อมูลจะต้องทำการแปลง PCA (Principal Component Analysis) ดังรูปที่ 5.22 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างตัวแปรขึ้นมาใหม่ที่มีค่าความแปรปรวนสัมพันธ์กับตัวแปรเดิมให้มากที่สุด และยังเป็น การลดขนาดของข้อมูลทางด้านอินพุตให้มีขนาดเล็กลง ขั้นตอนนี้เริ่มจากการหาค่าเมตริกซ์โหลด (Loading Matrix หรือ PC ) โดยใช้สมการที่ (5.8) ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ฟังก์ชันทางสถิติ [PC, Latent, Explained]=PCACOV(X) ในโปรแกรม MATLAB เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่า PC คือ เมตริกซ์โหนด Latent คือ ค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalue) ของ PC และ Explained คือ ค่าเวกเตอร์ความแปรปรวนของ PC แต่ละตัว ในการแปลง PCA ค่าเมตริกซ์โหนดตัวแรก (PC1) ที่ได้จะมีค่าความแปรปรวนสูงสุด (Maximum Variance) ส่วนค่าเมตริกซ์โหนดในลำดับถัดไปจะมีค่าความแปรปรวนลดลงตามลำดับ ค่าความแปรปรวนของข้อมูลคือค่าที่บ่งชี้ให้เห็นว่าค่าเมตริกซ์โหนดตัวใดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลมากหรือน้อยเพียงใด กล่าวคือหากค่าเมตริกซ์โหนดมีค่าความแปรปรวนสูงทำให้ค่าเมตริกซ์โหนดตัวนั้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลสูงขึ้นไปตาม

$$T_{m \times k} = X_{m \times n} \times PC_{n \times k} \quad (5.8)$$

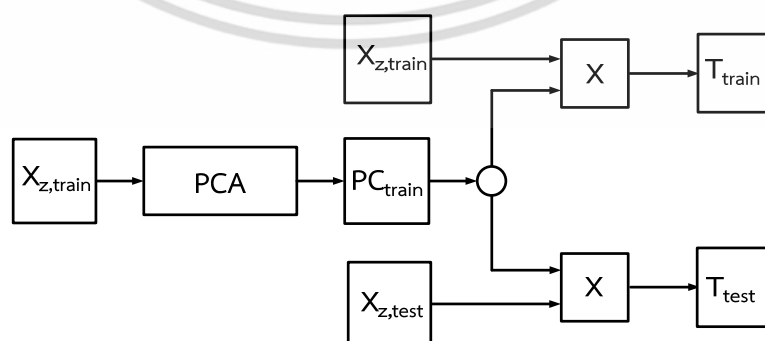
โดยที่

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1k} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{m1} & T_{m2} & \dots & T_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} PC_{11} & PC_{12} & \dots & PC_{1k} \\ PC_{21} & PC_{22} & \dots & PC_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ PC_{n1} & PC_{n2} & \dots & PC_{nk} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

เมื่อ

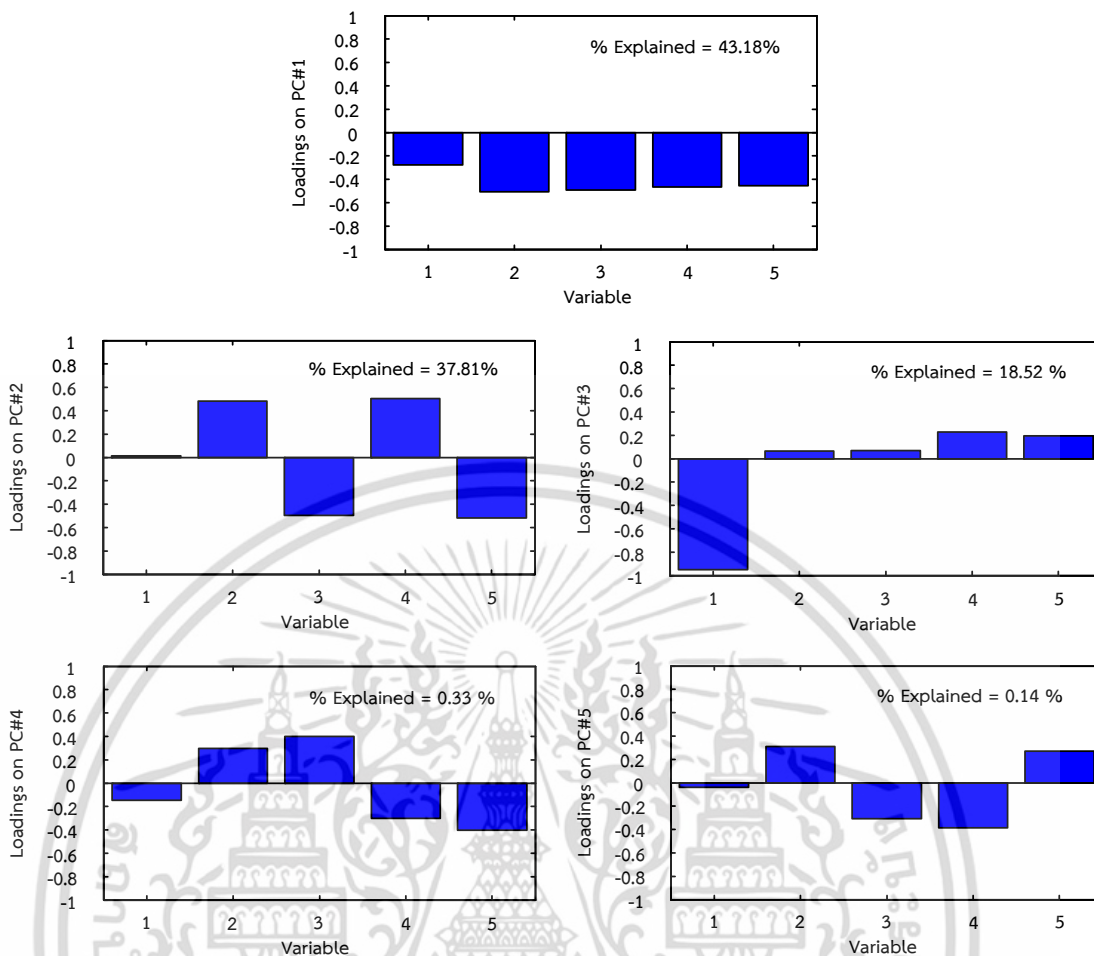
$T_{m \times k}$	คือ	เมตริกซ์ผลลัพธ์ที่มีมิติ $m \times k$ (ข้อมูลที่ถูกเปลี่ยนแปลง)
$X_{m \times n}$	คือ	เมตริกซ์ข้อมูลที่มีมิติ $m \times n$
$PC_{n \times k}$	คือ	เมตริกซ์โหนดที่มีมิติ $n \times k$
$m$	คือ	จำนวนของค่าสังเกต
$n$	คือ	มิติของตัวแปรค่าเริ่มต้น
$k$	คือ	จำนวนของค่า PC ที่ถูกเก็บไว้

เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการแปลง PCA จะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 5.23 จากรูปพบว่า PC1 PC2 และ PC3 มีค่า Explained เท่ากับ 43.19% 37.82% และ 18.52% ตามลำดับ หมายความว่าค่าตัวแปร PC1 เก็บข้อมูลส่วนใหญ่ของทุกตัวแปรไว้ด้วยกัน PC2 เก็บข้อมูลส่วนใหญ่ของตัวแปรที่ 2 3 4 และ 5 ไว้ด้วยกันส่วนตัวแปรที่ 1 ถูกเก็บข้อมูลที่น้อยมาก PC3 เก็บข้อมูลส่วนใหญ่ของตัวแปรที่ 1 ส่วนตัวแปรอื่นมีจำนวนของข้อมูลน้อยมาก ซึ่ง PC1 PC2 และ PC3 สามารถนำมาสร้างแบบจำลองการเรียนรู้ ส่วน PC4 และ PC5 เป็นข้อมูลที่ไม่จำเป็นสามารถตัดทิ้งได้และไม่ควรนำมาสร้างแบบจำลองการเรียนรู้เนื่องจากจะทำให้แบบจำลองเกิดการเรียนรู้ข้อมูลที่ไม่จำเป็น



รูปที่ 5.22 แผนผังการแปลง PCA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.23 กราฟการแปลง PCA ของข้อมูล

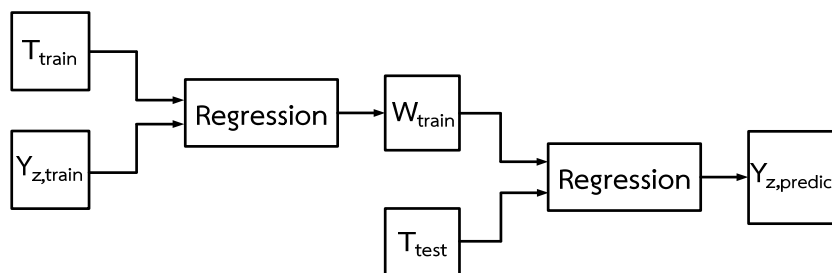
หลังจากกระบวนการแปลง PCA ค่าเมตริกซ์ผลลัพธ์  $T_{z,train}$  ที่ได้จะถูกนำไปคำนวณหาค่า น้ำหนัก (Weight หรือ  $W_{train}$ ) ด้วยการใช้วิธีการรีเกรสชันแบบเชิงเส้น (Linear Regression) เทียบ กับข้อมูลที่ถูกเลือกใช้ในการฝึกฝนของเมตริกซ์  $Y_{train}$  ดังสมการที่ (5.10)

$$Y_{z,train} = T_{train} \times W_{train} \tag{5.10}$$

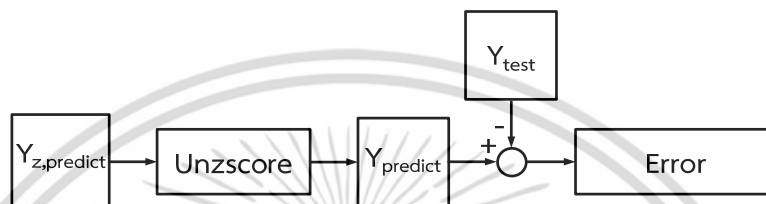
เมื่อ

- $Y_{z,train}$  คือ เมตริกซ์ Y ที่ใช้ในการฝึกฝน
- $W_{train}$  คือ ค่าน้ำหนักที่ได้จากการฝึกฝน
- $T_{train}$  คือ เมตริกซ์ผลลัพธ์ที่ใช้ในการฝึกฝน

ในการทำงานเดียวกันค่าเมตริกซ์ผลลัพธ์  $T_{test}$  และค่าน้ำหนัก  $W_{train}$  ที่ได้จะถูกนำไปคำนวณหา ค่าเมตริกซ์  $Y_{z,predict}$  ด้วยวิธีการรีเกรสชันแบบเชิงเส้นดังสมการที่ (5.11) ซึ่งสามารถเรียกกระบวนการ ทั้งหมดนี้ว่า PCR (Principal Component Regression) ดังแสดงในรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 แผนผังการทำ PCR



รูปที่ 5.25 แผนผังการตรวจสอบค่าความผิดพลาด

$$Y_{z,predict} = T_{test} \times W_{train} \tag{5.11}$$

เมื่อ

$Y_{z,predict}$

คือ เมตริกซ์  $Y$  ที่ใช้ในการทำนาย

$T_{test}$

คือ เมตริกซ์ผลลัพธ์ที่ใช้ในการทดสอบ

หลังจากได้แบบจำลองในการตรวจวัดความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุ จำเป็นต้องมีกระบวนการตรวจสอบค่าความผิดพลาดของแบบจำลองดังรูปที่ 5.25 เริ่มจากนำค่าเมตริกซ์  $Y_{z,predict}$  ไปทำการ Unzscore [23] จะได้ค่าเมตริกซ์  $Y_{predict}$  ซึ่งค่าเมตริกซ์ดังกล่าวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าเมตริกซ์  $Y_{test}$  เพื่อตรวจสอบค่าความผิดพลาด (Error) ดังสมการที่ (5.20)

$$Error = | Y_{predict} - Y_{test} | \tag{5.20}$$

เมื่อ

Error

คือ ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย

$Y_{predict}$

คือ เมตริกซ์  $Y$  ที่ใช้ในการทำนาย

$Y_{test}$

คือ เมตริกซ์  $Y$  ที่ใช้ในการทดสอบ

จากการทดสอบแบบจำลองโดยการเลือกค่าองค์ประกอบหลัก PC ที่ค่าต่างๆผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.4 จากตารางพบว่า PC1 และ PC2 สามารถนำมาสร้างแบบจำลองในการตรวจวัดความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุแต่ละตัวได้ เนื่องจากการใช้องค์ประกอบหลักดังกล่าวจะมีค่าความผิดพลาดในการทำนาย (Error) และค่าจำนวนเงื่อนไข (Condition Number) ของการทำนายที่มีค่าต่ำสุด (Condition Number คือค่าที่แสดงเสถียรภาพของแบบจำลอง) เมื่อทำการเปรียบเทียบโดยการนำ PC1 PC2 PC3 PC5 และ PC4 มาทำการสร้างแบบจำลองพบว่าค่าความผิดพลาดในการทำนายมีค่าเป็น 0 แต่ Condition Number มีค่ามากถึง 93.69 หากนำ PC ทั้งหมดมาสร้างแบบจำลองจะมีผลให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองไม่มีเสถียรภาพต่อการเปลี่ยนแปลงข้อมูลทางด้านอินพุท กล่าวคือหากข้อมูลทางด้านอินพุทเกิดการถูกรบกวนอาจทำให้การทำงานเกิดการผิดพลาดขึ้นได้ ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองจึงได้เลือกใช้ PC1 และ PC2 ที่มีความเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการแบบจำลองที่ใช้ในการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุแต่ละตัว

## 5.8 การควบคุมวงจร $M^2C^3$ ภายใต้สภาวะตัวเก็บประจุทำงานอยู่ในสภาวะไม่ปกติ

หลังจากที่ทำการสร้างระบบตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุ หากระบบพบว่าตัวเก็บประจุตัวใดตัวหนึ่งทำงานอยู่ในสภาวะไม่ปกติจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของเฟสรวมทั้งหมดของวงจรมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการทำงานปกติ จึงทำให้ค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ทำงานในสภาวะไม่ปกติมีค่าสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เองจึงจำเป็นต้องลดค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นให้มีค่าลดลง โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรการทำงานและความถี่ของสัญญาณควบคุม เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นและทำให้วงจรยังคงสามารถทำงานต่อไปได้อีกระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะทำการเปลี่ยนตัวเก็บประจุ

การเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังในวงจร  $M^2C^3$  จะใช้หลักการสร้างแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละตัวดังที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ในบทที่ 3 โดยในแต่ละช่วงเวลาแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณการควบคุมสวิตช์กำลัง จากตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4 จะสามารถหาค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าจากค่ายอดถึงค่ายอดได้ดังตารางที่ 5.5 ซึ่งจากตารางชี้ให้เห็นว่าค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากตัวเก็บประจุแต่ละตัวถูกควบคุมการทำงานให้สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าที่มีจำนวนระดับแตกต่างกันนั่นเอง

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบแบบจำลองในการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุแต่ละตัว

PC	Error	Condition Number
PC1	30 %	5.22
PC1 และ PC2	0 %	2.02
PC1 PC2 และ PC3	0 %	2.52
PC1 PC2 PC3 PC5 และ PC4	0 %	93.69

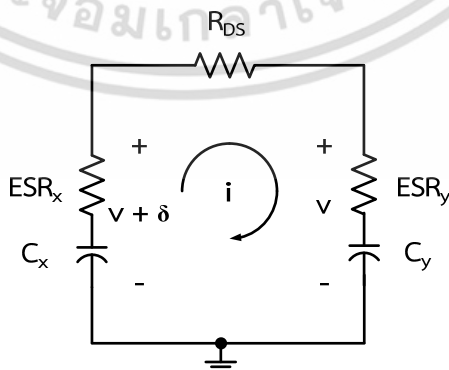
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่วัฏจักรการทำงาน 50%

ทิศทางการ โอนย้ายพลังงาน	ตัวเก็บประจุ	แรงดันไฟฟ้า		
		สูงสุด	ต่ำสุด	การกระเพื่อม
บัสแรงดันสูงไป ยังบัสแรงดันต่ำ	C <sub>1</sub>	$\frac{2}{3}V_{HV} + 0.08\Delta$	$\frac{2}{3}V_{HV} - 0.25\Delta$	0.33Δ
	C <sub>2</sub>	$\frac{1}{3}V_{HV} + 0.25\Delta$	$\frac{1}{3}V_{HV} - 0.08\Delta$	0.33Δ
	C <sub>LV</sub>	$\frac{1}{3}V_{HV} + 0.08\Delta$	$\frac{1}{3}V_{HV} - 0.25\Delta$	0.33Δ
$\Delta = \frac{I_{LLV} \times T}{C}$				
บัสแรงดันต่ำไป ยังบัสแรงดันสูง	C <sub>1</sub>	$2V_{LV} + 2.43\Delta$	$2V_{LV} + 1.64\Delta$	0.79Δ
	C <sub>2</sub>	$V_{LV} + 0.93\Delta$	$V_{LV} - 1.75\Delta$	2.68Δ
	C <sub>HV</sub>	$3V_{LV} + 1.64\Delta$	$3V_{LV} - 0.11\Delta$	1.75Δ
$\Delta = \frac{I_{HHV} \times T}{C}$				

แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการอัดประจุของตัวเก็บประจุแต่ละครั้งจะทำให้เกิดค่าความสูญเสียขึ้นเนื่องจากค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูล (ESR) และค่าความต้านทานระหว่างขาเดรนและขาซอร์ส (R<sub>DS</sub>) ของมอสเฟต [14] ดังนั้นการควบคุมวงจร M<sup>2</sup>C<sup>3</sup> ภายใต้สภาวะตัวเก็บประจุทำงานอยู่ในสภาวะไม่ปกติจึงจำเป็นต้องพิจารณาค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในตัวเก็บประจุ

การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียภายในตัวเก็บประจุจะใช้หลักการอัดประจุของตัวเก็บประจุที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าแบบขั้นบันได (Unit Step) ดังรูปที่ 5.26 โดยสมมติให้ตัวเก็บประจุ C<sub>x</sub> ที่มีแรงดันไฟฟ้า v+δ ทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C<sub>y</sub> ที่มีแรงดันไฟฟ้า v ทำให้ตัวเก็บประจุ C<sub>y</sub> มีแรงดันไฟฟ้างดสมการที่ (5.21)



รูปที่ 5.26 กระบวนการอัดประจุของตัวเก็บประจุ C<sub>x</sub> และ C<sub>y</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v(t)_{C_x \text{ to } C_y} = v \times (1 - \exp^{-\frac{t}{R_{\text{Loop}} \times C_{\text{Loop}}}}) \quad (5.21)$$

โดยที่

$$R_{\text{Loop}} = R_{\text{DS}} \quad (5.22)$$

และ

$$C_{\text{Loop}} = \frac{C_x \times C_y}{C_x + C_y} \quad (5.23)$$

เมื่อ

$v(t)_{C_x \text{ to } C_y}$	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากตัวเก็บประจุ $C_x$ ทำการอัดประจุให้กับ $C_y$ (V)
$\delta$	คือ	แรงดันไฟฟ้ากระแสเพื่อที่เปลี่ยนแปลงระหว่างตัวเก็บประจุ $C_x$ และ $C_y$ (V)
$t$	คือ	เวลา (s)
$R_{\text{Loop}}$	คือ	ความต้านทานระหว่าง $R_{\text{DS}}$ มอสเฟตและ ESR ของตัวเก็บประจุ ( $\Omega$ )
$C_{\text{Loop}}$	คือ	ลูปค่าความจุไฟฟ้าเสมือนต่ออนุกรมระหว่างตัวเก็บประจุ $C_x$ และ $C_y$ (F)

ค่ากำลังไฟฟ้าที่ถูกโอนย้ายจากตัวเก็บประจุ  $C_x$  ไปยังตัวเก็บประจุ  $C_y$  สามารถคำนวณได้ตั้งสมการที่ (5.24) และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการอัดประจุสามารถคำนวณได้ตั้งสมการที่ (5.27)

$$P_{C_x \text{ to } C_y} = V \times i \quad (5.24)$$

จะได้

$$P_{C_x \text{ to } C_y} = \left\{ v \times (1 - \exp^{-\frac{t}{R_{\text{Loop}} \times C_{\text{Loop}}}}) \right\} \times (\delta \times C_{\text{Loop}} \times f) \quad (5.25)$$

$$P_{C_x \text{ to } C_y} = \left( \frac{C_x \times C_y}{C_x + C_y} \right) \times v \times \delta \times f \times (1 - \exp^{-\frac{t}{R_{\text{Loop}} \times C_{\text{Loop}}}}) \quad (5.26)$$

เมื่อ

$P_{C_x \text{ to } C_y}$	คือ	กำลังไฟฟ้าที่ถูกโอนย้ายจากตัวเก็บประจุ $C_x$ ไปยังตัวเก็บประจุ $C_y$ (W)
$v$	คือ	แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ $C_y$ (V)
$f$	คือ	ความถี่ของการสวิตช์ (Hz)

จากสมการค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการอัดประจุของตัวเก็บประจุคือ

$$P_{\text{Charging Loss}} = w \times f \quad (5.27)$$

จะได้

$$P_{\text{Charging Loss}} = \frac{1}{2} \times C_{\text{Loop}} \times \delta^2 \times (1 - \exp^{-\frac{t}{R_{\text{Loop}} \times C_{\text{Loop}}}})^2 \times f \quad (5.28)$$

$$P_{\text{Charging Loss}} = \frac{1}{2} \times C_{\text{Loop}} \times \delta^2 \times f \times (1 - \exp^{-\frac{t}{R_{\text{Loop}} \times C_{\text{Loop}}}})^2 \quad (5.29)$$

เมื่อ

$P_{\text{Charging Loss}}$	คือ	กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการอัดประจุ (W)
$w$	คือ	กำลังไฟฟ้าสูญเสียภายในของตัวเก็บประจุ (J)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติเมื่อกำหนดให้ค่า  $t > R_{Loop} \times C_{Loop}$  จากสมการที่ (5.29) จะได้

$$\exp^{-\frac{t}{R_{Loop} \times C_{Loop}}} = 0 \quad (5.30)$$

จากสมการที่ (5.26) จะได้

$$\delta = \left( \frac{C_x + C_y}{C_x \times C_y} \right) \times \left( \frac{P_{C_x \text{ to } C_y}}{v \times f} \right) \quad (5.31)$$

นำสมการที่ (5.31) แทนค่าในสมการที่ (5.29)

$$P_{\text{Charging Loss}} = \frac{1}{2} \times \left( \frac{C_x + C_y}{C_x \times C_y} \right) \times \left( \frac{P_{C_x \text{ to } C_y}^2}{v^2 \times f} \right) \quad (5.32)$$

จากหลักการที่ได้พิสูจน์มาแล้วข้างต้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจร  $M^2C^3$  เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายกำลังไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง วงจรการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุดังแสดงในรูปที่ 5.27 จากรูปที่ 5.27(ก) คือวงจรการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุขณะที่ SRn ทำงาน ซึ่งสามารถหาค่าความจุไฟฟ้า  $C_x$  และ  $C_y$  ดังสมการ

$$C_x = C_{HV} \quad (5.33)$$

$$C_y = \frac{(C_2 + C_{LV}) \times C_1}{C_2 + C_{LV} + C_1} \quad (5.34)$$

จากรูปที่ 5.27(ข) คือวงจรการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุขณะที่ SBn ทำงาน พบว่าตัวเก็บประจุ  $C_1$  ถูกอัดประจุจากตัวเก็บประจุ  $C_2$  และ  $C_{LV}$  ส่วนตัวเก็บประจุ ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  ถูกคายประจุไปยังภาระทางไฟฟ้า ซึ่งในการคำนวณหาค่าความสูญเสียจากการอัดประจุจะไม่พิจารณาตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  เนื่องจากการคายประจุของตัวเก็บประจุจะไม่ทำให้เกิดความสูญเสียจากการอัดประจุ แต่จะทำให้เกิดค่าความสูญเสียจากการนำกระแสไฟฟ้าภายในตัวเก็บประจุจากค่าความต้านทานแผ่นอนุกรมสมมูล [14] เพราะฉะนั้นจะสามารถหาค่าความจุไฟฟ้า  $C_x$  และ  $C_y$  ดังสมการ

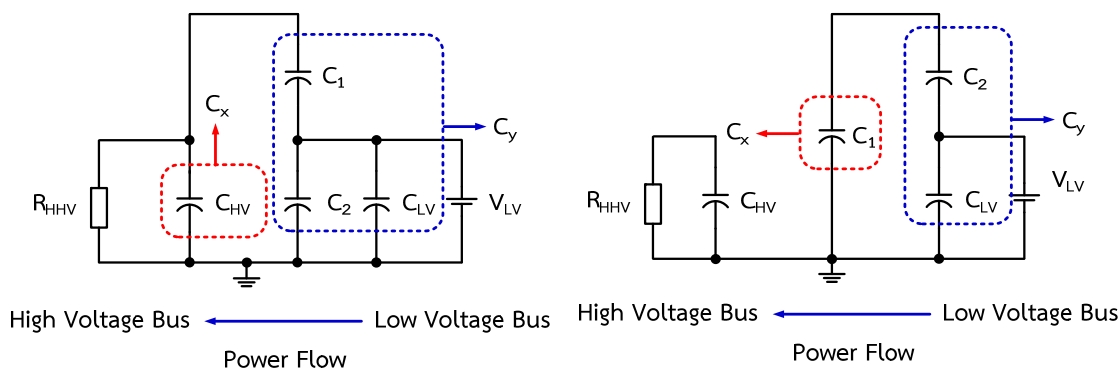
$$C_x = C_1 \quad (5.35)$$

$$C_y = \frac{C_2 \times C_{LV}}{C_2 + C_{LV}} \quad (5.36)$$

เพราะฉะนั้นจะสามารถคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมจากการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุทั้งสองช่วงการทำงานของวงจร  $M^2C^3$  ได้ดังสมการ

$$P_{\text{Total of Charging Loss}} = P_{\text{Charging Loss, SRn}} + P_{\text{Charging Loss, SBn}} \quad (5.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สวิตช์ SRn ทำงาน

(ข) สวิตช์ SBn ทำงาน

รูปที่ 5.27 วงจรการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุของ  $M^2C^3$  เมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายกำลังไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง

จากสมการที่ (5.31) และ (5.32) พบว่าความถี่การสวิตช์จะแปรผกผันกับค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการอัดประจุและแรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมที่เปลี่ยนแปลงระหว่างตัวเก็บประจุ  $C_x$  และ  $C_y$  ซึ่งจากสมการดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการปรับค่าความถี่ของการสวิตช์มีผลต่อแรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมของตัวเก็บประจุ นอกจากนี้ในระหว่างการคายประจุของตัวเก็บประจุแต่ละครั้งจะเกิดค่าความสูญเสียจากการนำกระแสไฟฟ้าจากค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูล ดังนั้นจะสามารถคำนวณค่าความสูญเสียของตัวเก็บประจุทั้งหมดในวงจร  $M^2C^3$  ได้ดังสมการ

$$P_{\text{Total of Capacitor Loss}} = P_{\text{Total of Charging Loss}} + P_{\text{Total of Discharging Loss}} \tag{5.38}$$

โดยที่

$$P_{\text{Total of Discharging Loss}} = \sum_{N=1}^n I_{\text{rms}, C_N}^2 \times ESR_N \tag{5.39}$$

เมื่อ

$P_{\text{Total of Discharging Loss}}$	คือ	ค่าความสูญเสียจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ (W)
$I_{\text{rms}}$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (A)
$ESR$	คือ	ค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูล ( $\Omega$ )
$n$	คือ	จำนวนตัวเก็บประจุทั้งหมดในวงจร $M^2C^3$

## 5.9 สรุป

การตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุในวงจร  $M^2C^3$  โดยการสร้างตัวตรวจวัดเทียม ทำให้สามารถทราบสภาวะการทำงานของตัวเก็บประจุได้เร็วกว่าการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวเก็บประจุที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 หลักการทางสถิติที่ได้เลือกใช้ในการสร้างแบบจำลองนี้คือ PCR (Principal Component Regression) ที่มีความสามารถในการกรองสัญญาณรบกวนและลดมิติของสัญญาณที่วัดได้จริง การลดมิติของข้อมูลนี้จะไม่ทำให้ข้อมูลที่สำคัญส่วนใหญ่สูญเสียไป ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำ PCR สามารถสร้างแบบจำลองที่มีความสามารถในการเรียนรู้และประมวลผลจากสัญญาณที่วัดได้จริงเพื่อนำไปสู่การสร้างตัวตรวจวัดเทียม ซึ่งจากผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นสามารถตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในวงจร  $M^2C^3$  ได้อย่างถูกต้อง และสามารถลดจำนวนการใช้ตัวตรวจวัดจริงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีแบบดั้งเดิมได้จากจำนวน 3 ชุด (แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ) เหลือเพียง 1 ชุด (แรงดันไฟฟ้า) ต่อตัวเก็บประจุหนึ่งตัวและใช้ตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้า 1 ชุดต่อตัวเก็บประจุทุกตัวที่อยู่ในวงจร นอกจากนี้หลังจากที่ทำการสร้างระบบตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุเสร็จเรียบร้อยแล้วนั้น อาจจำเป็นต้องทำการเปลี่ยนแปลงสัญญาณการควบคุมวงจร โดยการปรับค่าวัฏจักรการทำงานและความถี่ของสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์กำลัง เพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า การกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้าและความสูญเสียภายในตัวเก็บประจุ ซึ่งผลการทดสอบจะถูกกล่าวถึงในบทที่ 7

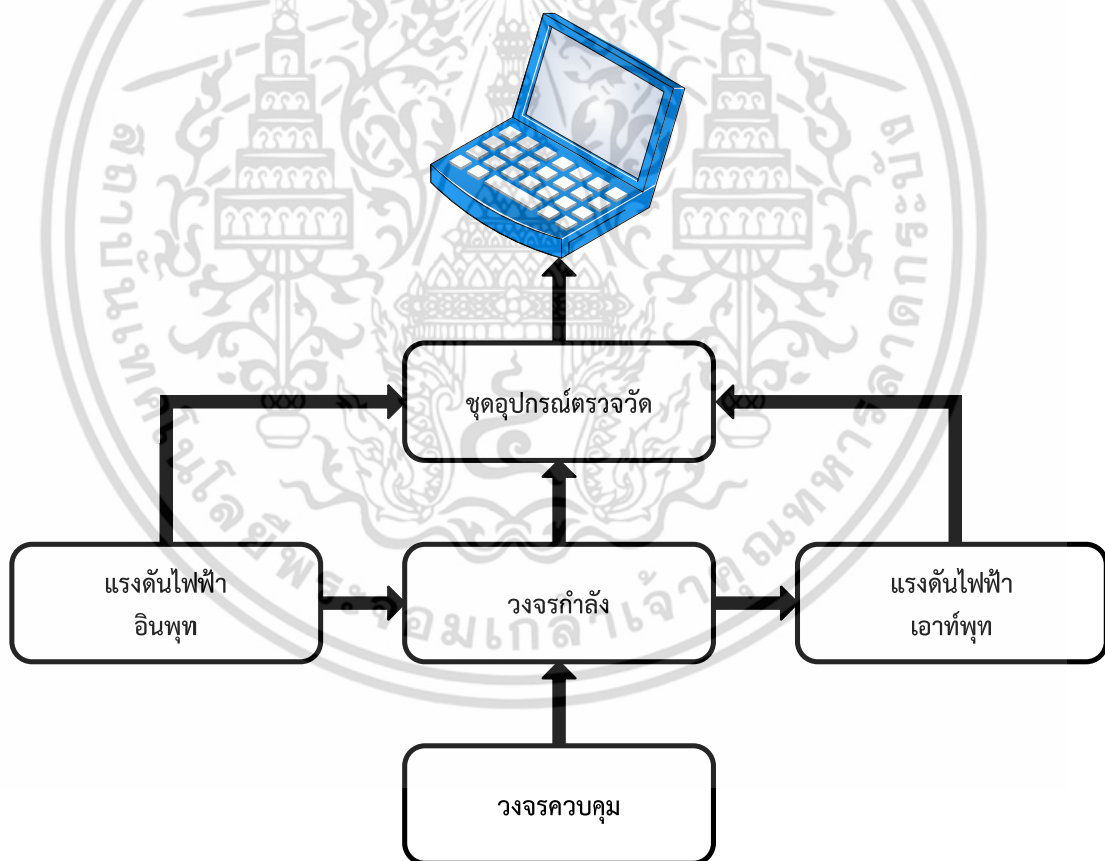
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบของวงจร $M^2C^3$

### 6.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบของวงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ ที่มีพิกัดสูงสุดอยู่ที่ 500 W โครงสร้างวงจร  $M^2C^3$  ประกอบไปด้วยส่วนหลักๆของวงจรอยู่ 2 ส่วน คือ วงจรควบคุม (Control Circuit) และวงจรกำลัง (Power Circuit) ซึ่งวงจรทั้งสองส่วนนี้จะทำงานสัมพันธ์กันดังแสดงในแผนผังการทำงานรูปที่ 6.1 โดยหลักการทำงานของเครื่องต้นแบบเริ่มจากวงจรควบคุมส่งสัญญาณขับเคลื่อนของมอสเฟต (Gate Drive Mosfet) ไปยังวงจรกำลัง หลังจากนั้นเมื่อวงจร  $M^2C^3$  ทำงานอย่างสมบูรณ์ชุดอุปกรณ์ตรวจวัด จะส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ เพื่อประมวลผลการตรวจวัดความเสื่อสภาพของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในวงจร  $M^2C^3$



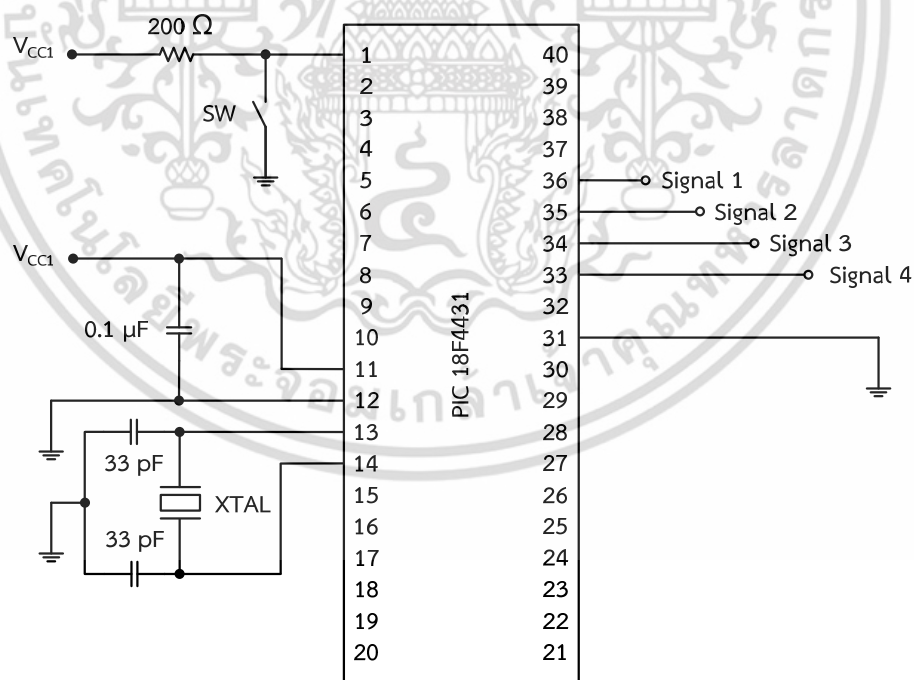
รูปที่ 6.1 แผนผังการทำงานของวงจร  $M^2C^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 วงจรควบคุม

วงจรควบคุมจะทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณขับเคลื่อนของมอสเฟตแต่ละตัวในวงจร  $M^2C^3$  โดยอาศัยหลักการของไมโครโพรเซสเซอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microprocessor and Microcontroller) ซึ่งขั้นตอนการสร้างสัญญาณการควบคุมเริ่มจากการใช้ชุดประมวลผล CPU (Control Processor Unit) คือ PIC18F4431 ดังแสดงในรูปที่ 6.2 เพื่อทำการสร้างสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave Signal) จำนวน 2 สัญญาณ ที่มีแรงดันไฟฟ้า 5 V มุมต่างเฟส  $180^\circ$  วัฏจักรการทำงาน 50 % ความถี่ 10 kHz และมีเดทไทม์ (Dead Time) 5  $\mu s$  เพื่อป้องกันการลัดวงจรของมอสเฟตระหว่างเปลี่ยนแปลงสถานะการทำงาน แต่อย่างไรก็ตามสัญญาณขับเคลื่อนที่สร้างขึ้นยังไม่สามารถนำไปใช้ควบคุมมอสเฟตได้ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณขับเคลื่อนจะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 10 V ถึง 20 V จึงจะทำให้มอสเฟตทำงานอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นสัญญาณที่ขึ้นจะต้องถูกขยายด้วยวงจรขับเคลื่อนเพื่อให้ได้สัญญาณที่สามารถควบคุมมอสเฟตแต่ละตัวในวงจรได้

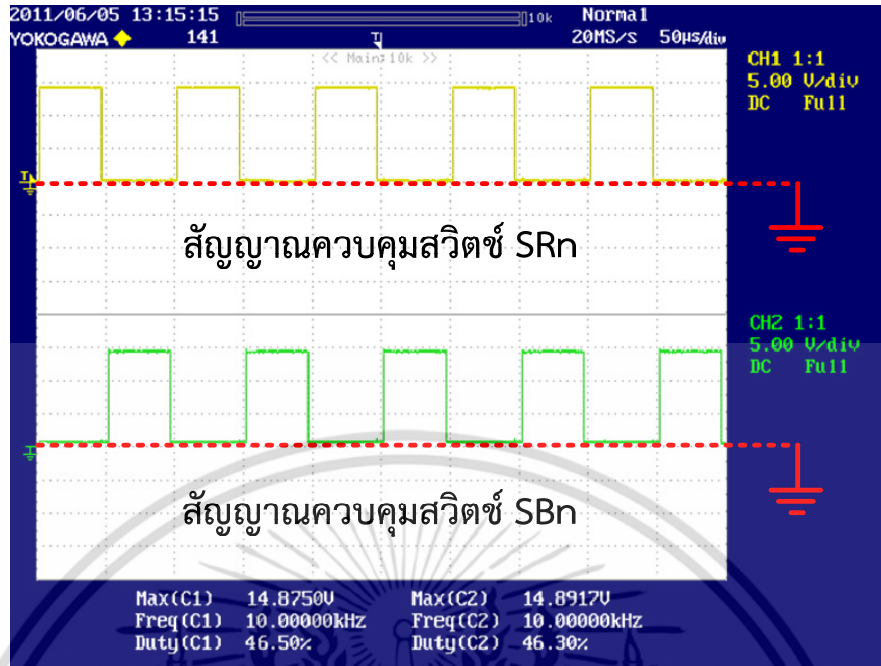
วงจรขับเคลื่อนดังแสดงในรูปที่ 6.3 โครงสร้างภายในประกอบไปด้วยภาควงจรขยายสัญญาณขับเคลื่อนและภาควงจรไฟเลี้ยงของชุดอุปกรณ์ IC (Integral Circuit) สำเร็จรูป โดยภาควงจรทั้งสองจะถูกแยกกราวด์ทางไฟฟ้า (Isolated Ground) ระหว่างวงจรถูกกำลังและวงจรควบคุม เพื่อมิให้เกิดสัญญาณรบกวนระหว่างกันอีกทั้งยังเป็นการป้องกันแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากวงจรถูกกำลังที่อาจลัดวงจรเข้ามาในวงจรถวลเมื่อเกิดความผิดปกติ (Fault) ในวงจรถูกกำลังขึ้น ซึ่งสัญญาณควบคุมหลังจากที่ถูกขยายแล้วในวงจรถวลจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 15 V ดังแสดงในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.2 ชุดประมวลผล PIC18F4431 สำหรับสร้างสัญญาณควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

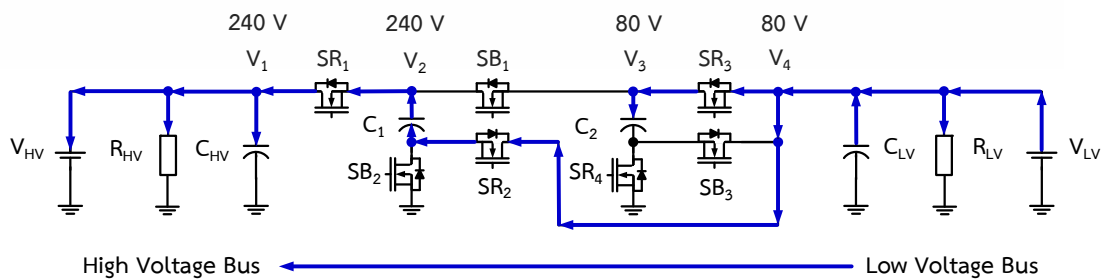




รูปที่ 6.4 สัญญาณควบคุมของวงจร  $M^2C^3$

### 6.3 วงจรกำลัง

วงจรกำลังของ  $M^2C^3$  จะทำหน้าที่ผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 3 ระดับ โคจรภายในวงจรประกอบไปด้วยมอสเฟตและตัวเก็บประจุ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบวงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ ที่มีพิกัดทางด้านบัสแรงดันสูงที่แรงดันไฟฟ้า 240 V กระแสไฟฟ้า 2.08 A และมีพิกัดทางด้านบัสแรงดันต่ำที่แรงดันไฟฟ้า 80 V กระแสไฟฟ้า 6.25 A ซึ่งหลักการเลือกใช้มอสเฟตจำเป็นต้องทนแรงดันไฟฟ้าได้อย่างน้อย 2 เท่าของแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ เนื่องจากมอสเฟต SB1 ที่อยู่ในชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลชุดแรกดังแสดงในรูปที่ 6.5 ในขณะที่มอสเฟต SR ทุกตัวทำงานมีผลให้มอสเฟต SB1 ต้องทนแรงดันไฟฟ้าระหว่างตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  และ  $C_{LV}$  ที่มีค่ามากถึง 160 V นอกจากนี้เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของวงจร  $M^2C^3$  มอสเฟตควรมีค่าความต้านทาน  $R_{DS, ON}$  ระหว่างขาเดรน (Drain) และขาซอร์ส (Source) ที่มีค่าต่ำ ดังนั้นจึงได้เลือกใช้มอสเฟตที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 600 V กระแสไฟฟ้า 7 A และ  $R_{DS, ON}$  0.4  $\Omega$



รูปที่ 6.5 วงจร  $M^2C^3$  เมื่อมอสเฟต SRn ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในวงจร  $M^2C^3$  จะทำการพิจารณาค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของตัวเก็บประจุในตารางที่ 5.4 (บทที่ 5) เมื่อวงจร  $M^2C^3$  มีทิศทางการโอนย้ายพลังงานจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ (วัฏจักรการทำงานอยู่ที่ 50%) ค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าจากค่ายอดถึงยอดที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีค่า

$$V_{C_1, \text{Ripple}} = 0.33\Delta \quad (6.1)$$

$$V_{C_2, \text{Ripple}} = 0.33\Delta \quad (6.2)$$

และ

$$V_{C_{LV}, \text{Ripple}} = 0.33\Delta \quad (6.3)$$

โดยที่

$$\Delta = \frac{I_{LLV} \times T}{C} \quad (6.4)$$

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบให้วงจร  $M^2C^3$  ทำงานที่พิกัดกระแสไฟฟ้า  $I_{LLV}$  มีค่า 6.25 A คาบเวลาของการสวิตช์ T มีค่า  $10^{-4}$  s และค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีค่าไม่เกิน 1 V จากค่ายอดถึงยอด (Peak to Peak) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุได้ดังต่อไปนี้

$$C_1 > 206.25 \mu\text{F} \quad (6.5)$$

$$C_2 > 206.25 \mu\text{F} \quad (6.6)$$

และ

$$C_{LV} > 206.25 \mu\text{F} \quad (6.7)$$

ในทำนองเดียวกันค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของตัวเก็บประจุในตารางที่ 5.8 เมื่อวงจร  $M^2C^3$  มีทิศทางการโอนย้ายพลังงานจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง (วัฏจักรการทำงานอยู่ที่ 50%) ค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าจากค่ายอดถึงยอดที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีค่า

$$C_{HV, \text{Ripple}} = 1.75\Delta \quad (6.8)$$

$$C_1, \text{Ripple} = 0.79\Delta \quad (6.9)$$

และ

$$C_2, \text{Ripple} = 2.68\Delta \quad (6.10)$$

โดยที่

$$\Delta = \frac{I_{HHV} \times T}{C} \quad (6.11)$$

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบให้วงจร  $M^2C^3$  ทำงานที่พิกัดกระแสไฟฟ้า  $I_{HHV}$  มีค่า 2.08 A คาบเวลาของการสวิตช์ T มีค่า  $10^{-4}$  s และค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีค่าไม่เกิน 1 V จากค่ายอดถึงยอด (Peak to Peak) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุได้ดังต่อไปนี้

$$C_{HV} > 364.00 \mu\text{F} \quad (6.12)$$

$$C_1 > 164.32 \mu\text{F} \quad (6.13)$$

และ

$$C_2 > 557.44 \mu\text{F} \quad (6.14)$$

จากการคำนวณควรเลือกใช้ตัวเก็บประจุทุกตัวที่มีขนาดมากกว่า 557.44  $\mu\text{F}$  เนื่องจากขนาดของตัวเก็บประจุดังกล่าวสามารถกรองแรงดันไฟฟ้ากระแสเฟอิมที่เกิดจากการทำงานของตัวเก็บประจุแต่ละตัวได้สูงที่สุด นอกจากนี้การเลือกใช้ตัวเก็บประจุต้องมีความสอดคล้องกับความถี่ของการสวิตช์เพื่อทำให้วงจร  $M^2C^3$  ทำงานในย่านที่แรงดันและกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง ซึ่งสามารถพิจารณาจากค่าคงตัวของเวลา (Time Constant) ของตัวเก็บประจุ ดังนั้นค่าคงตัวของเวลาของตัวเก็บประจุควรมีค่า

$$\tau = \text{ESR} \times C \quad (6.15)$$

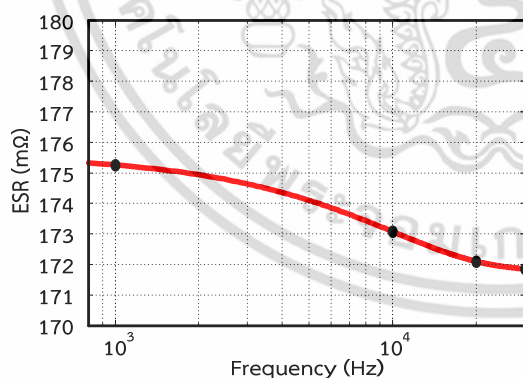
โดยที่

$$\tau \leq T \quad (6.16)$$

จะได้

$$\tau \leq 100 \mu\text{s}. \quad (6.17)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (6.15) และ (6.17) จึงควรเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์ ที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า 350 V ค่าการเก็บประจุไฟฟ้าขนาด 560  $\mu\text{F}$  และมีค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูล ESR เท่ากับ 173.08 m $\Omega$  ที่ความถี่ 10 kHz ดังแสดงในรูปที่ 6.6(ก) (ค่า ESR ได้ทำการวัดจากเครื่อง Agilent HP 4194A Impedance Gain-Phase Analyzer ดังรูปที่ 6.6(ข)) ซึ่งทำให้ตัวเก็บประจุมีค่าคงตัวของเวลา 96.88  $\mu\text{s}$ .



(ก) กราฟค่า ESR ที่ความถี่ต่างๆ



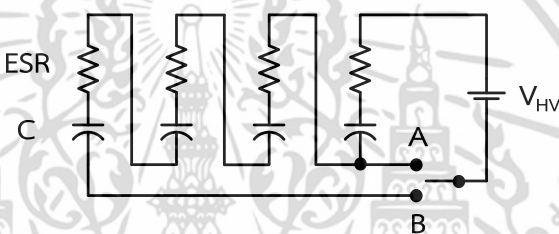
(ข) เครื่อง Impedance Gain-Phase Analyzer

รูปที่ 6.6 กราฟแสดงค่า ESR ของตัวเก็บประจุที่ได้จากเครื่อง Impedance Gain-Phase Analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยได้กำหนดให้ตัวเก็บประจุมีค่าความจุไฟฟ้าและค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูลที่ความถี่สวิตช์ 10 kHz ค่อยๆเปลี่ยนแปลงจาก 560  $\mu\text{F}$  , 173.08  $\text{m}\Omega$  (สภาวะปกติ) เป็น 140  $\mu\text{F}$  , 692.32  $\text{m}\Omega$  (สภาวะไม่ปกติ) โดยใช้ชุดบายพาสสวิตช์ดังแสดงในรูปที่ 6.7 ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

- เลื่อนสวิตช์บายพาสไปยังตำแหน่ง B เพื่อทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุทุกตัวพร้อมกัน พร้อมทั้งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ
- เลื่อนสวิตช์บายพาสไปยังตำแหน่ง A พร้อมทั้งจ่ายภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง เพื่อทำการทดสอบการทำงานของวงจร  $M^2C^3$  เมื่อตัวเก็บประจุทุกตัวทำงานอยู่ในสภาวะปกติ
- ปิดสวิตช์การจ่ายภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง และเลื่อนสวิตช์ไปยังตำแหน่ง B
- เปิดสวิตช์การจ่ายภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง เพื่อทำการทดสอบการทำงานของวงจร  $M^2C^3$  เมื่อตัวเก็บประจุทำงานอยู่ในสภาวะไม่ปกติและสังเกตการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูงที่เปลี่ยนแปลงไป

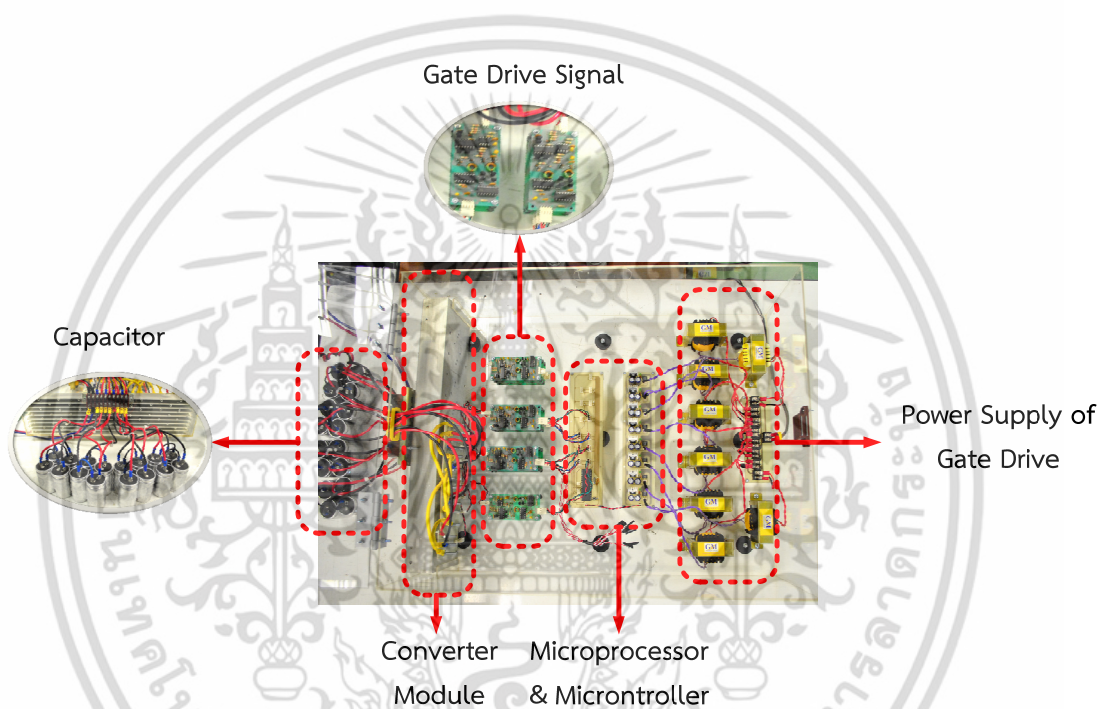


รูปที่ 6.7 วงจรการทดสอบสภาวะการทำงานของตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.4 สรุป

ในบทนี้ได้ทำการกล่าวถึงรายละเอียดของเครื่องต้นแบบ  $M^2C^3$  3 ระดับ พิกัด 500 W ที่ได้ทำการออกแบบไว้ ซึ่งโครงสร้างภายในจะมีวงจรส่วนหลักๆอยู่ 2 ส่วนคือ วงจรควบคุมที่ประกอบไปด้วยชุดวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีหน้าที่ในการสร้างสัญญาณขับเคลื่อนของมอเตอร์ไปยังวงจรกำลัง ส่วนวงจรกำลังที่ประกอบไปด้วยมอเตอร์และตัวเก็บประจุ จะทำหน้าที่ในการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าพร้อมกับการผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหลายระดับเป็นหลัก วงจรทั้ง 2 ส่วนนี้จะนำไปติดตั้งให้สามารถทำงานร่วมกันในเครื่องต้นแบบของวงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ พิกัด 500 W ดังแสดงในรูปที่ 6.8 ซึ่งเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นนี้จะถูกนำไปทดสอบการทำงานในขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 6.8 เครื่องต้นแบบของวงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ พิกัด 500 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

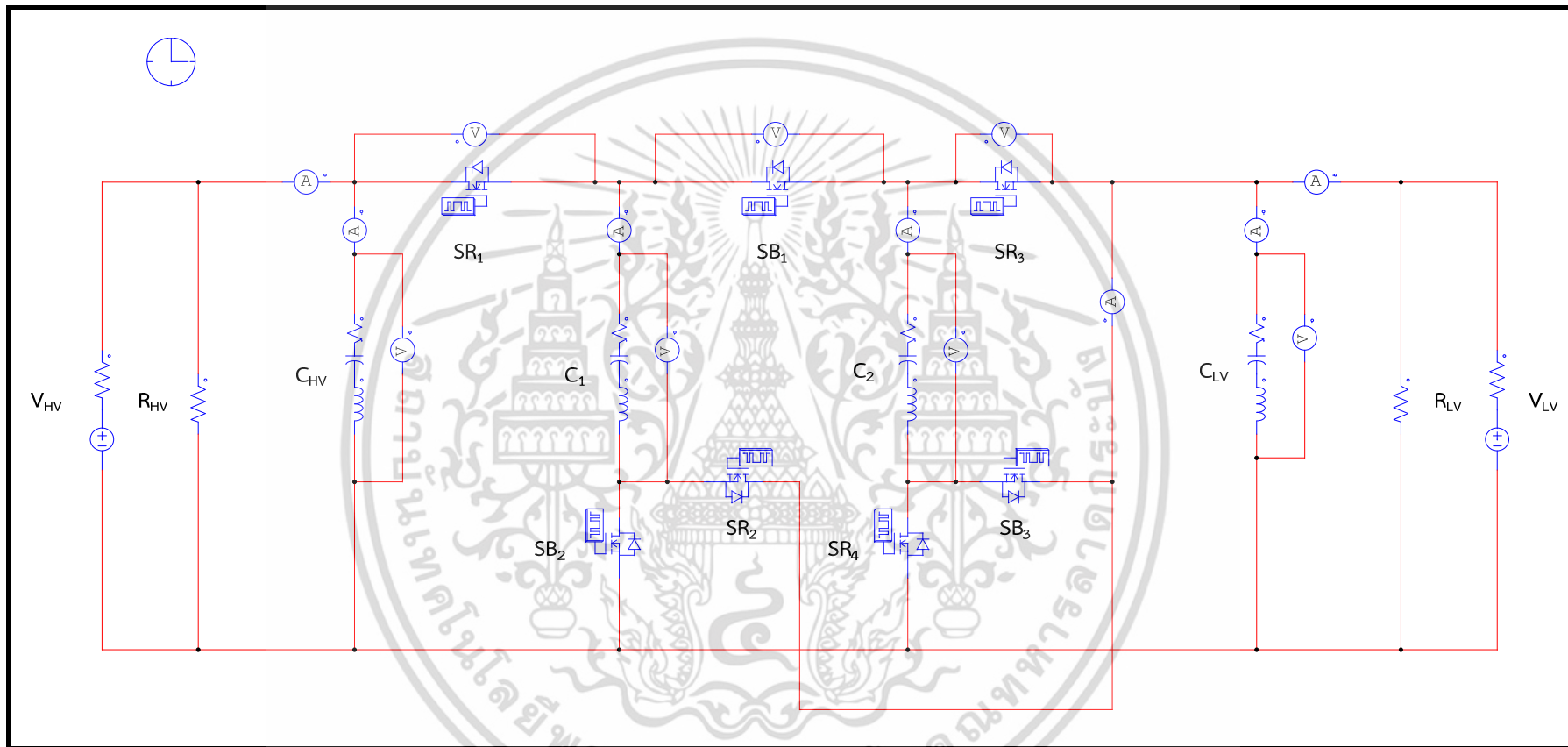
# ผลการจำลองการทำงานและการทดสอบ

### 7.1 บทนำ

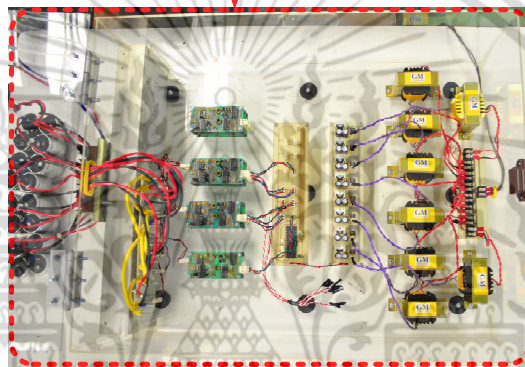
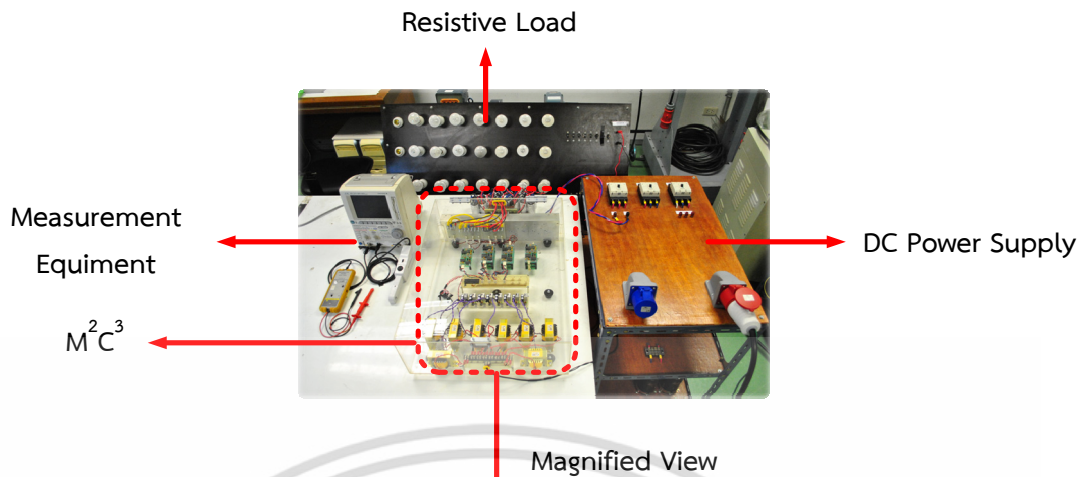
บทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองการทำงานและการทดสอบเครื่องต้นแบบ  $M^2C^3$  พิกัด 500 W ที่สร้างขึ้น ในการจำลองการทำงานได้ใช้โปรแกรม PSIM 9.0 ร่วมกับโปรแกรม MATLAB R2009a โดยโปรแกรม PSIM 9.0 ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจร  $M^2C^3$  และพฤติกรรมการทำงานของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในวงจร  $M^2C^3$  ตามค่าตัวแปรต่างๆที่ได้ทำการออกแบบไว้ก่อนหน้านี้ ส่วนโปรแกรม MATLAB R2009a ใช้ในการวิเคราะห์และตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุ ซึ่งผลการจำลองการทำงานของวงจร  $M^2C^3$  ด้วยโปรแกรม PSIM 9.0 จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง เพื่อชี้ให้เห็นว่าผลที่ได้จากการจำลองการทำงานและการทดลองมีความสอดคล้องเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

### 7.2 ขั้นตอนการเตรียมการทดลอง

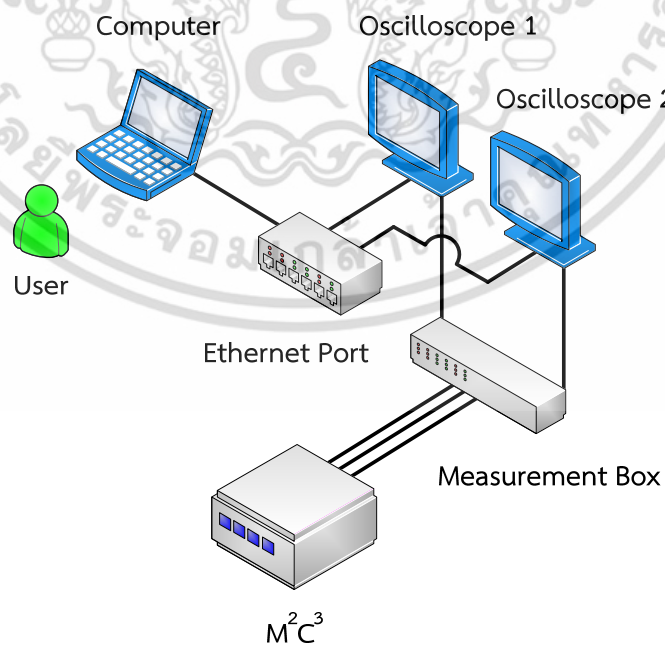
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในรูปที่ 7.2 จะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) จ่ายเข้าสู่ทางด้านอินพุทของวงจร  $M^2C^3$  ส่วนทางด้านเอาต์พุทถูกเชื่อมต่ออยู่กับภาระทางไฟฟ้า (Resistive Load) ดิจิตอลออสซิลโลสโคปจะถูกใช้เป็นชุดอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) สัญญาณของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าในแต่ละจุดตามบริเวณที่ได้กำหนดไว้คือ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มอสเฟต  $SR_1$  สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มอสเฟต  $SB_1$  สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มอสเฟต  $SR_3$  และสัญญาณแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ ซึ่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้นี้จะถูกบันทึกเป็นข้อมูลชนิดแอสกี (ASCII) ที่มีขนาดข้อมูล 10,020 แกว และมีความถี่ในการแซมปลิง 10 MHz จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์ผ่านทางอีเทอร์เน็ตพอร์ต (Ethernet Port) เพื่อแสดงผลผ่านทางโปรแกรม Xviewer หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์และประมวลผล เพื่อตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในวงจร  $M^2C^3$  ด้วยโปรแกรม MATLAB R2009a โดยแผนผังของขั้นตอนการเตรียมการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.1 วงจร  $M^2C^3$  ที่ใช้ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM 9.0



รูปที่ 7.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 7.3 แผนผังของขั้นตอนการเตรียมการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 7.3 การทดสอบความสามารถในการโอนย้ายพลังงานแบบ 2 ทิศทางของวงจร $M^2C^3$

การทดสอบความสามารถในการโอนย้ายพลังงานแบบ 2 ทิศทางของวงจร  $M^2C^3$  จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบเมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ และวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง โดยการทดสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจรและตัวเก็บประจุแต่ละตัวระหว่างโอนย้ายพลังงานว่ามีความสอดคล้องกับหลักการที่ได้นำเสนอมาแล้วก่อนหน้านี้หรือไม่อย่างไร ซึ่งในการทดสอบได้เลือกใช้ขนาดของอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 7.1 และพิกัดสูงสุดของวงจร  $M^2C^3$  แสดงดังตารางที่ 7.2

#### 7.3.1 การทดสอบวงจร $M^2C^3$ ขณะที่มิติศทางการโอนย้ายพลังงานจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ

ในการทดสอบวงจร  $M^2C^3$  ขณะที่มิติศทางการโอนย้ายพลังงานจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ จะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านบัสแรงดันสูง ส่วนทางด้านบัสแรงดันต่ำถูกเชื่อมต่ออยู่กับภาระทางไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 7.4 ซึ่งผลการทดสอบที่ได้แสดงดังตารางที่ 7.3

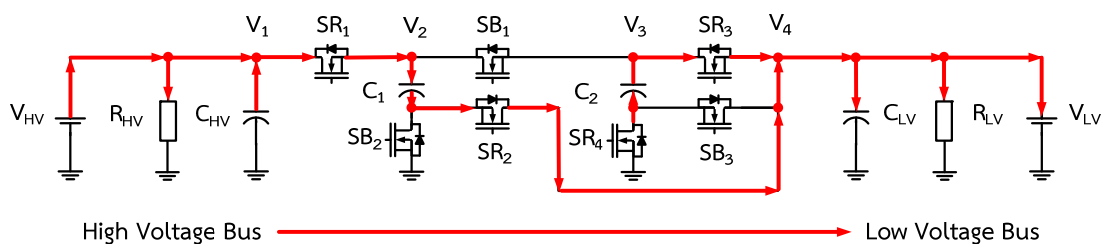
ตารางที่ 7.1 ขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์	ขนาด
ภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง ( $R_{HV}$ )	185 $\Omega$
ภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง ( $R_{LV}$ )	20 $\Omega$
ความต้านทานของมอสเฟต ( $R_{DS}$ )	0.4 $\Omega$
ความต้านทานแฝงของตัวเก็บประจุ (ESR)	173.08 m $\Omega$
ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ (C)	560 $\mu$ F

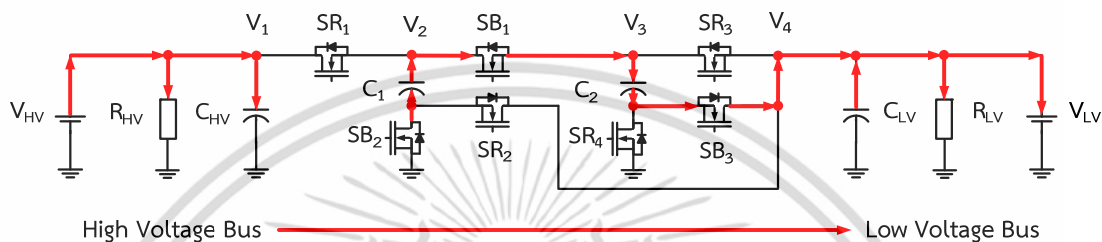
ตารางที่ 7.2 พิกัดสูงสุดของวงจร  $M^2C^3$

รายการ	พิกัดสูงสุด
กำลังไฟฟ้า (P)	500 W
แรงดัน (V) และกระแส (I) ไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ	85 V , 5.88 A
แรงดัน (V) และกระแส (I) ไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง	250 V , 2.00 A
ความถี่การสวิตช์ (f)	10 kHz , Duty Cycle 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) มอสเฟต SRn ทำงาน



(ข) มอสเฟต SBn ทำงาน

รูปที่ 7.4 วงจร  $M^2C^3$  ขณะที่ทิศทางการโอนย้ายพลังงานจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ

ตารางที่ 7.3 ผลการทดสอบวงจร  $M^2C^3$  เมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ

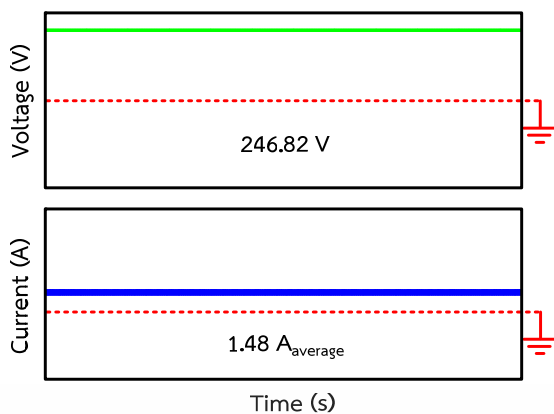
จุดสังเกตแรงดันไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)
$V_{HV}$	245.96 V	1.45 $A_{average}$
$C_{HV}$	246.55 V	1.48 $A_{rms}$
$C_1$	163.83 V	2.93 $A_{rms}$
$C_2$	80.35 V	2.83 $A_{rms}$
$C_{LV}$	82.48 V	2.14 $A_{rms}$
$V_{LV}$	82.26 V	4.53 $A_{average}$
$V_{LV}$ (ไม่มีภาระทางไฟฟ้า)	82.64 V	-
ค่าอัตราส่วนของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (RVS)		3.01
การปรับปรุงแรงดันไฟฟ้า (Voltage Regulation)		0.46 %
กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุต (Input Power)		366.48 W
กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากวงจรควบคุม (Control Circuit Loss)		26.95 W
กำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต (Output Power)		372.64 W
ประสิทธิภาพ (Efficiency)		94.72 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

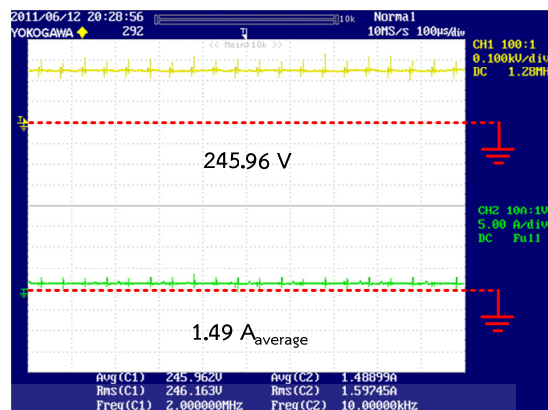
เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านบัสแรงดันสูงดังรูปที่ 7.5 จะได้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$   $C_1$   $C_2$   $C_{LV}$  และบัสแรงดันต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 7.6 , 7.7 , 7.8 , 7.9 และ 7.10 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปพบว่ากระแสไฟฟ้าที่อัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_1$  กับ  $C_{LV}$  (กระแสไฟฟ้าทางซีกบวก) และกระแสไฟฟ้าที่คายประจุของตัวเก็บประจุ  $C_2$  กับ  $C_{HV}$  (กระแสไฟฟ้าทางซีกลบ) จะเกิดขึ้นเมื่อมอสเฟส SRn ทำงานดังแสดงในรูปที่ 7.11 (ก) ส่วนกระแสไฟฟ้าที่อัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_2$  กับ  $C_{HV}$  (กระแสไฟฟ้าทางซีกบวก) และกระแสไฟฟ้าที่คายประจุของตัวเก็บประจุ  $C_1$  กับ  $C_{LV}$  (กระแสไฟฟ้าทางซีกลบ) จะเกิดขึ้นเมื่อมอสเฟส SBn ทำงานดังรูปที่ 7.11 (ข)

จากรูปที่ 7.5 และ 7.10 ซึ่ให้เห็นว่าวงจร  $M^2C^3$  สามารถโอนย้ายพลังงานจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำได้ เนื่องจากค่า RVS จะมากกว่าค่า CR ของวงจร จึงทำให้วงจรมีความสามารถในการลดระดับแรงดันไฟฟ้าลง 3 เท่าของแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง ซึ่งจากการทดสอบวงจรมีประสิทธิภาพในการลดระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 94.72 % (รวมค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจากวงจรควบคุมดังรูปที่ 7.12)



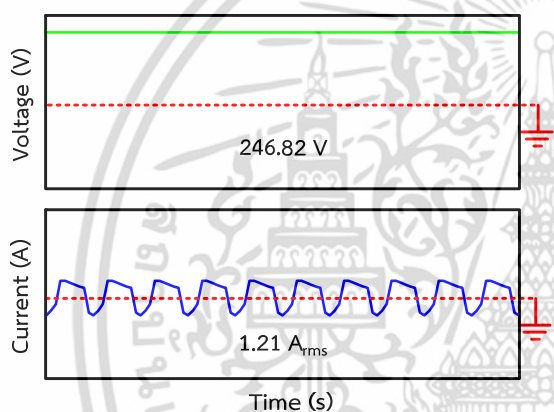


(ก) ผลการจำลอง

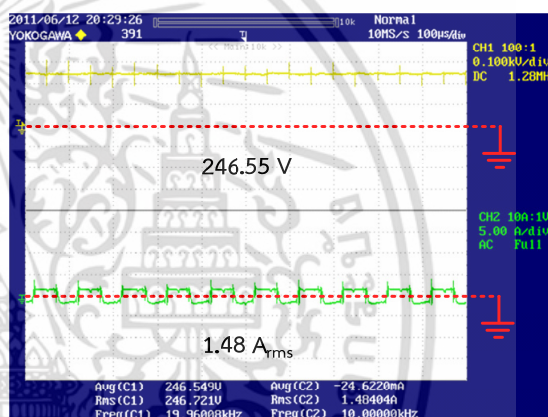


(ข) ผลการทดสอบ

รูปที่ 7.5 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง

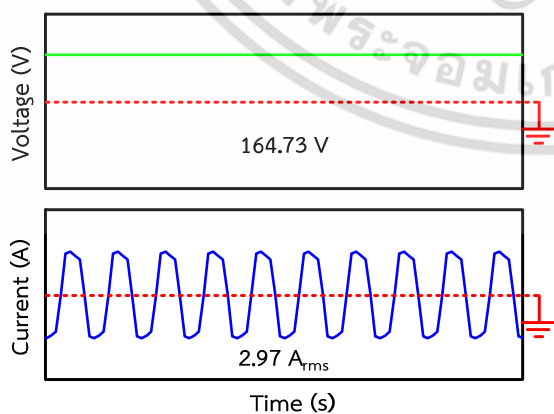


(ก) ผลการจำลอง

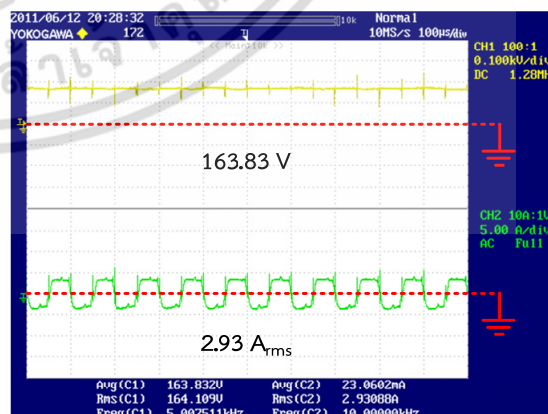


(ข) ผลการทดสอบ

รูปที่ 7.6 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C<sub>HV</sub>



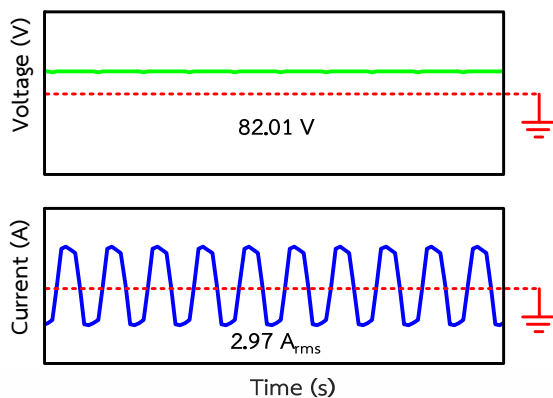
(ก) ผลการจำลอง



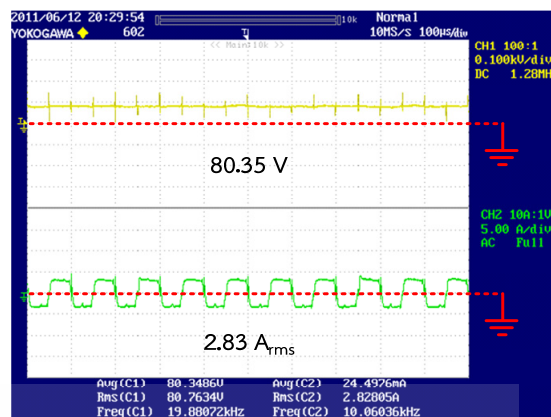
(ข) ผลการทดสอบ

รูปที่ 7.7 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C<sub>1</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

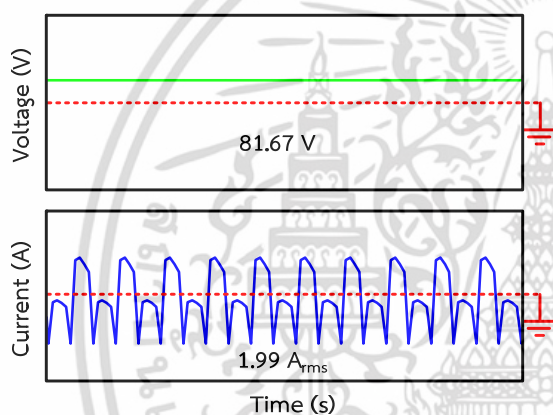


(ก) ผลการจำลอง

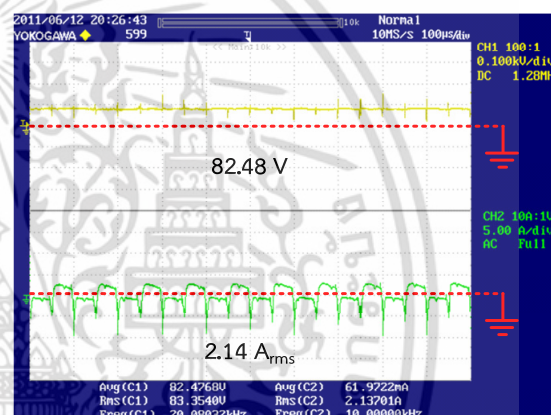


(ข) ผลการทดสอบ

รูปที่ 7.8 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C<sub>2</sub>

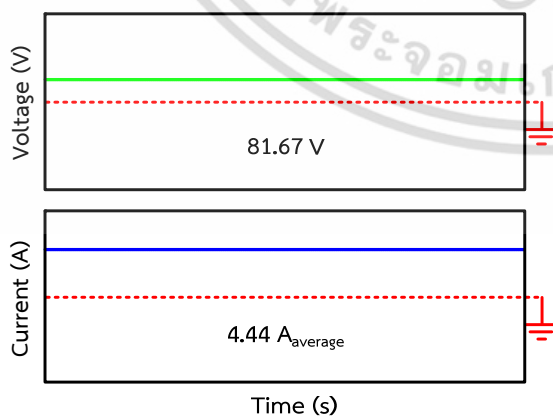


(ก) ผลการจำลอง

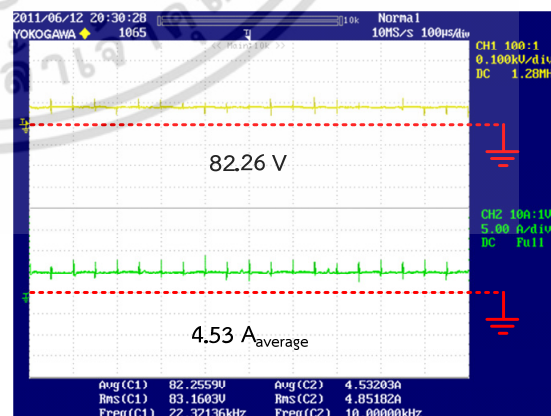


(ข) ผลการทดสอบ

รูปที่ 7.9 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C<sub>LV</sub>



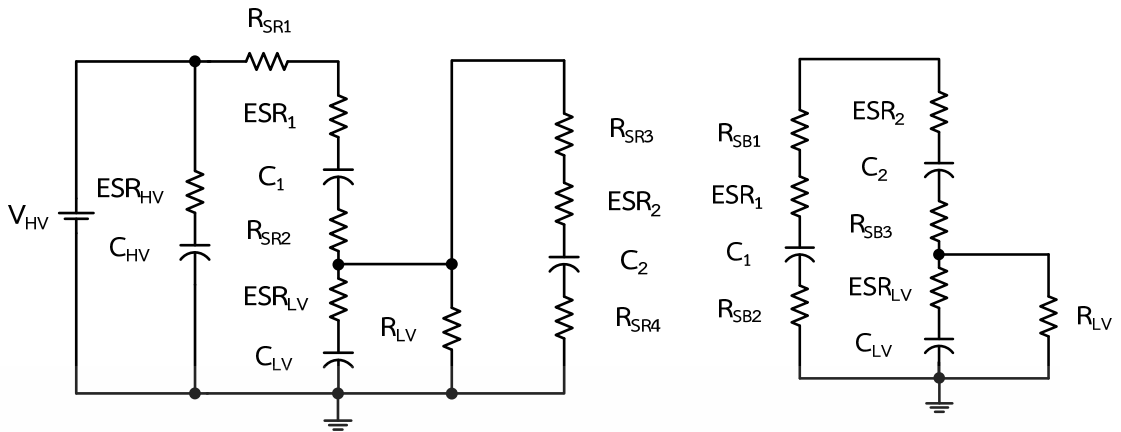
(ก) ผลการจำลอง



(ข) ผลการทดสอบ

รูปที่ 7.10 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ

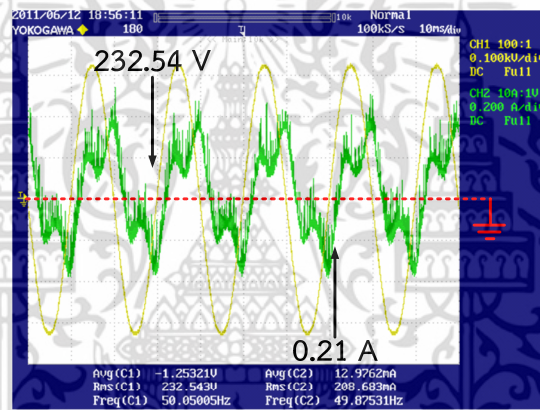
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



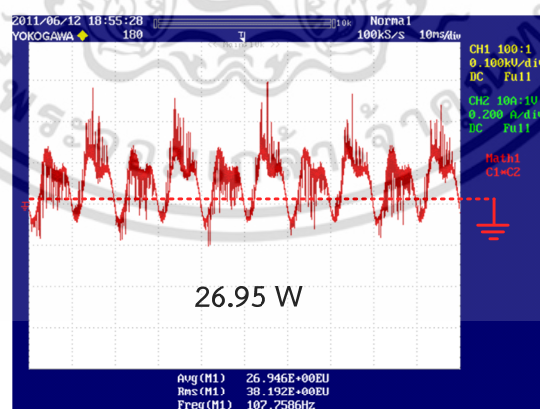
(ก) มอสเฟต SRn ทำงาน

(ข) มอสเฟต SBn ทำงาน

รูปที่ 7.11 วงจรการเชื่อมต่อเมื่อมอสเฟตแต่ละตัวทำงาน



(ก) แรงดันและกระแสไฟฟ้าของวงจรควบคุม



(ข) กำลังไฟฟ้าของวงจรควบคุม

รูปที่ 7.12 กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจากวงจรควบคุม

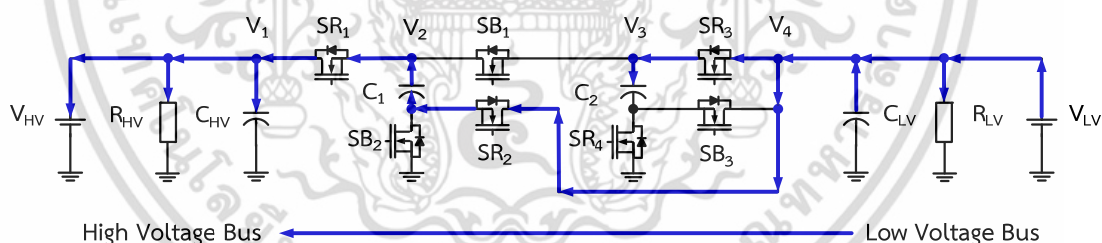
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 7.3.2 การทดสอบวงจร $M^2C^3$ ขณะที่มิติศทางการโอนย้ายพลังงานจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง

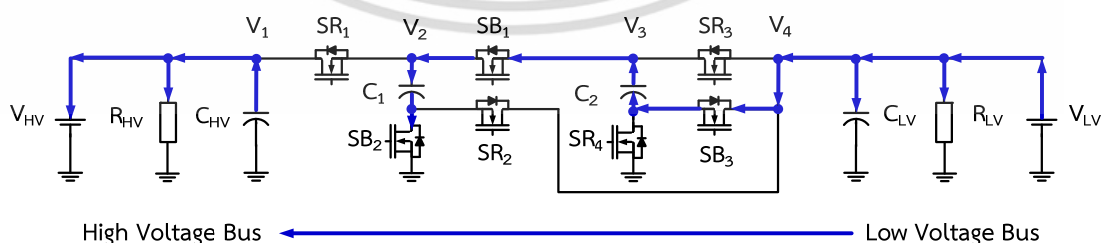
ในการทดสอบวงจร  $M^2C^3$  ขณะที่มิติศทางการโอนย้ายพลังงานจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง จะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านบัสแรงดันต่ำ ส่วนทางด้านบัสแรงดันสูง ถูกเชื่อมต่ออยู่กับภาระทางไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 7.13 ซึ่งผลการทดสอบที่ได้แสดงดังตารางที่ 7.4

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านบัสแรงดันต่ำดังรูปที่ 7.14 จะได้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$   $C_1$   $C_2$   $C_{LV}$  และบัสแรงดันสูง ดังแสดงในรูปที่ 7.15 , 7.16 , 7.17 , 7.18 และ 7.19 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปพบว่ากระแสไฟฟ้าที่อัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_2$  กับ  $C_{HV}$  (กระแสไฟฟ้าทางซีกบวก) และกระแสไฟฟ้าที่คายประจุของตัวเก็บประจุ  $C_1$  กับ  $C_{LV}$  (กระแสไฟฟ้าทางซีกลบ) จะเกิดขึ้นเมื่อมอสเฟต  $SR_n$  ทำงานดังแสดงในรูปที่ 7.20 (ก) ส่วนกระแสไฟฟ้าที่อัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_1$  กับ  $C_{LV}$  (กระแสไฟฟ้าทางซีกบวก) และกระแสไฟฟ้าที่คายประจุของตัวเก็บประจุ  $C_2$  กับ  $C_{HV}$  (กระแสไฟฟ้าทางซีกลบ) จะเกิดขึ้นเมื่อมอสเฟต  $SB_n$  ทำงานดังรูปที่ 7.20 (ข)

จากรูปที่ 7.14 และ 7.19 ชี้ให้เห็นว่าวงจร  $M^2C^3$  สามารถโอนย้ายพลังงานจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูงได้ เนื่องจากค่า  $R_{VS}$  จะน้อยกว่าค่า  $CR$  ของวงจร จึงทำให้วงจรมีความสามารถในการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าขึ้น 3 เท่าของแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ ซึ่งจากการทดสอบวงจรมีประสิทธิภาพในการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 93.03 % (รวมค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจากวงจรควบคุมดังรูปที่ 7.21)



(ก) มอสเฟต  $SR_n$  ทำงาน



(ข) มอสเฟต  $SB_n$  ทำงาน

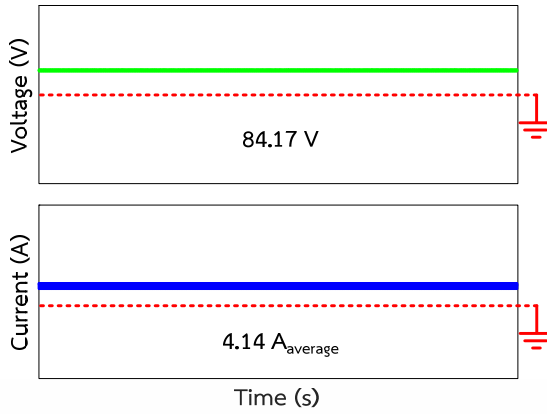
รูปที่ 7.13 วงจร  $M^2C^3$  ขณะที่มิติศทางการโอนย้ายพลังงานจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

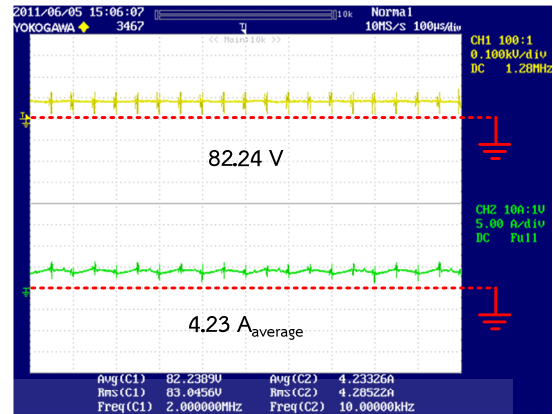
ตารางที่ 7.4 ผลการทดสอบวงจร  $M^2C^3$  เมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงาน จากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง

จุดสังเกตแรงดันไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)
$V_{HV}$ (ไม่มีภาระทางไฟฟ้า)	248.58 V	-
$V_{HV}$	246.43 V	1.46 $A_{average}$
$C_{HV}$	246.11 V	1.47 $A_{rms}$
$C_1$	163.94 V	2.75 $A_{rms}$
$C_2$	80.35 V	2.77 $A_{rms}$
$C_{LV}$	82.40 V	2.16 $A_{rms}$
$V_{LV}$	82.24 V	4.23 $A_{average}$
ค่าอัตราส่วนของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (RVS)		2.99
การปรับปรุงแรงดันไฟฟ้า (Voltage Regulation)		0.87 %
กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุต (Input Power)		359.79 W
กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากวงจรควบคุม (Control Circuit Loss)		26.95 W
กำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต (Output Power)		359.79 W
ประสิทธิภาพ (Efficiency)		93.03 %

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบวงจร  $M^2C^3$  ในตารางที่ 7.3 และตารางที่ 7.4 พบว่า ค่าประสิทธิภาพของวงจรมีค่าไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากค่าเปอร์เซ็นต์การปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าของวงจร  $M^2C^3$  ที่ทำงานในโหมดโอนย้ายพลังงานจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูงมีค่ามาก โดยค่าเปอร์เซ็นต์การปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าเป็นค่าที่แสดงถึงเสถียรภาพในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าคงที่ในขณะที่ภาระทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าวงจร  $M^2C^3$  ที่ทำงานในโหมดโอนย้ายพลังงานจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูงจะมีเสถียรภาพในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าวงจร  $M^2C^3$  ที่ทำงานในโหมดโอนย้ายพลังงานจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ชี้ให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกับทฤษฎีและหลักการที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 3

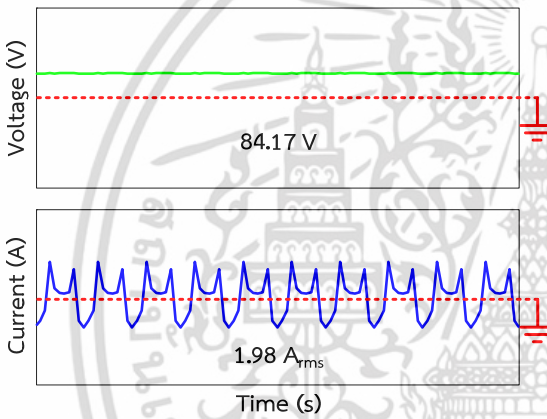


(ก) ผลการจำลอง

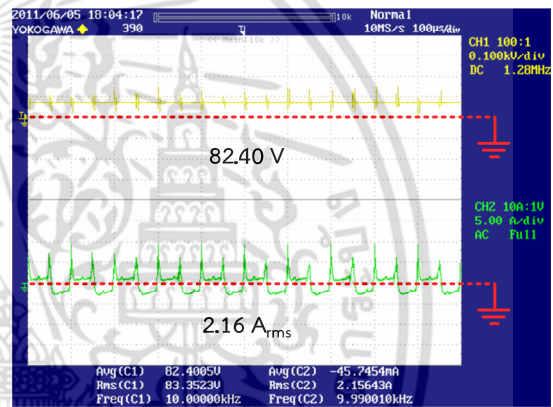


(ข) ผลการทดสอบ

รูปที่ 7.14 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ

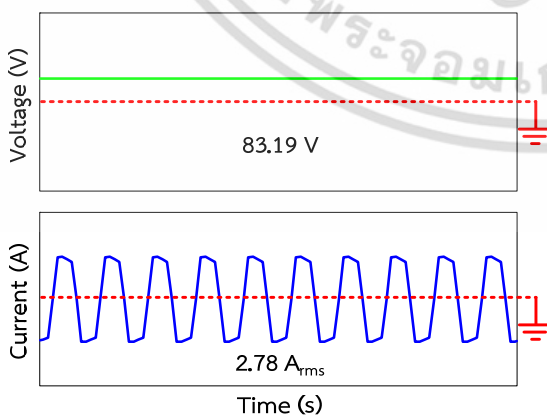


(ก) ผลการจำลอง

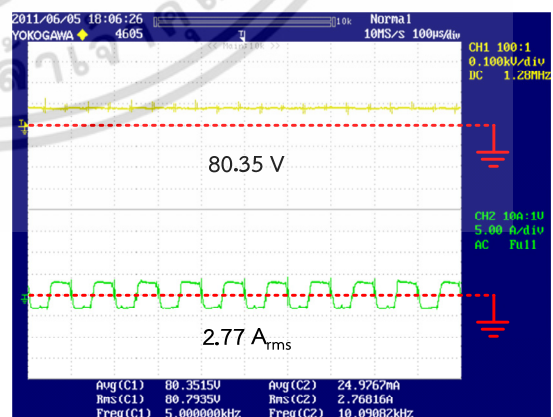


(ข) ผลการทดสอบ

รูปที่ 7.15 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C<sub>L</sub>



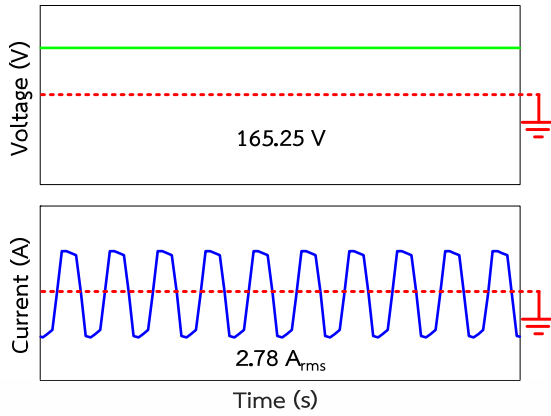
(ก) ผลการจำลอง



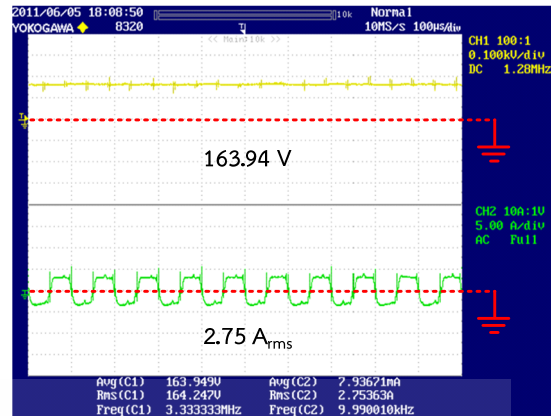
(ข) ผลการทดสอบ

รูปที่ 7.16 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C<sub>2</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

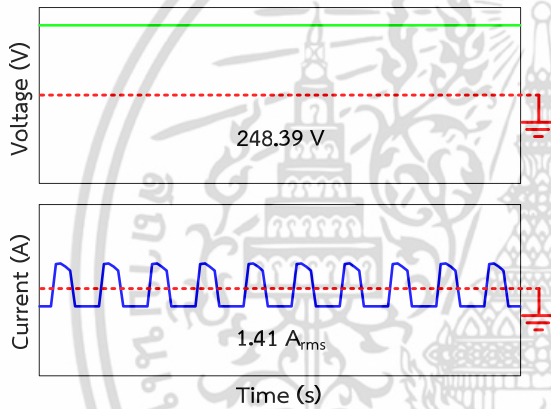


(ก) ผลการจำลอง

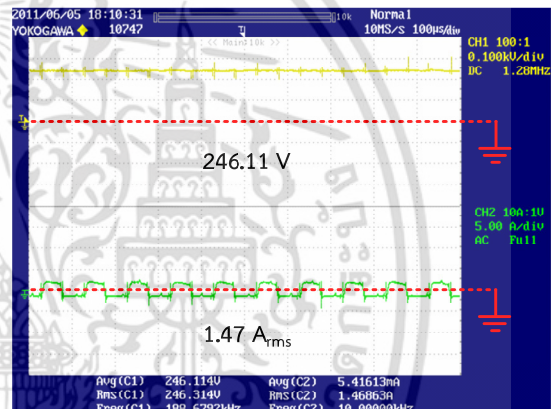


(ข) ผลการทดสอบ

รูปที่ 7.17 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  $C_1$

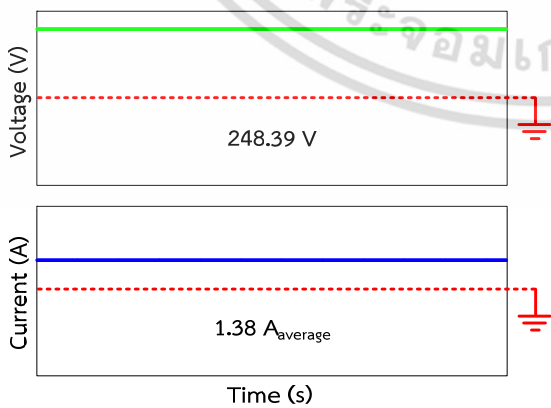


(ก) ผลการจำลอง

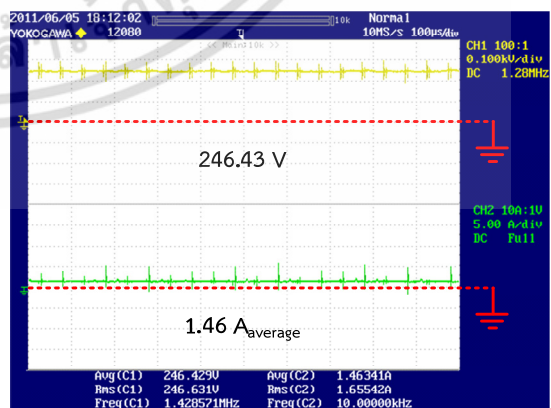


(ข) ผลการทดสอบ

รูปที่ 7.18 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$



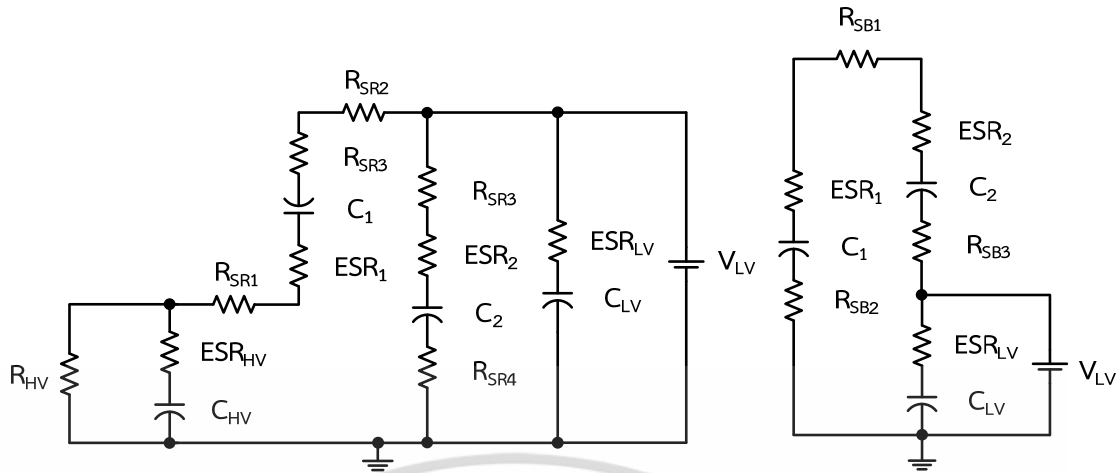
(ก) ผลการจำลอง



(ข) ผลการทดสอบ

รูปที่ 7.19 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง

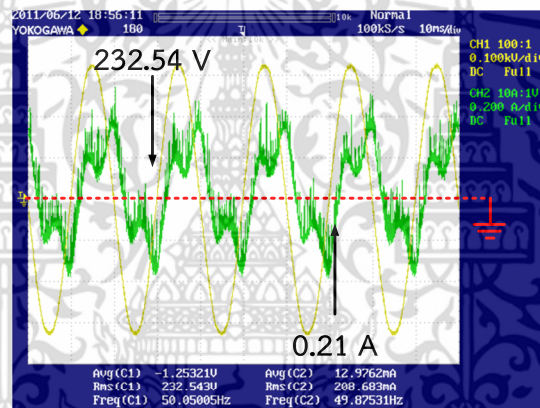
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เขียนได้เห็นว่าเป็นประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



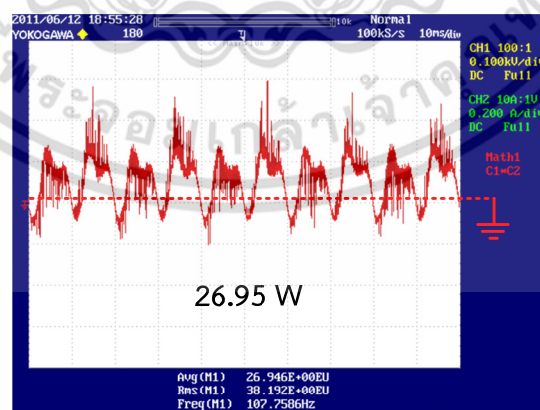
(ก) มอสเฟต SRn ทำงาน

(ข) มอสเฟต SBn ทำงาน

รูปที่ 7.20 วงจรการเชื่อมต่อเมื่อมอสเฟตแต่ละตัวทำงาน



(ก) แรงดันและกระแสไฟฟ้าของวงจรควบคุม



(ข) กำลังไฟฟ้าของวงจรควบคุม

รูปที่ 7.21 กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจากวงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7.4 การทดสอบวงจร $M^2C^3$ เมื่อมีตัวเก็บประจุทำงานในสถานะไม่ปกติ

การทดสอบวงจร  $M^2C^3$  เมื่อมีตัวเก็บประจุทำงานในสถานะไม่ปกติจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบการปรับค่าวัฏจักรการทำงานของสัญญาณควบคุม และการทดสอบการปรับค่าความถี่สวิตช์ของสัญญาณควบคุม โดยการทดสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้ากระแสเฟืองที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัวว่ามีความสัมพันธ์กับค่าวัฏจักรการทำงานและค่าความถี่สวิตช์อย่างไร ซึ่งมีสถานะการทดสอบแสดงดังตารางที่ 7.5

### 7.4.1 การทดสอบการปรับค่าวัฏจักรการทำงานของสัญญาณควบคุม

การทดสอบวงจร  $M^2C^3$  เมื่อมีตัวเก็บประจุทำงานในสถานะไม่ปกติโดยการปรับค่าวัฏจักรการทำงานของสัญญาณควบคุม ได้เลือกทำการทดสอบให้ตัวเก็บประจุ  $C_2$  ทำงานอยู่ในสถานะไม่ปกติ โดยกำหนดให้ตัวเก็บประจุ  $C_2$  มีค่าความจุไฟฟ้าค่อยๆ ลดลงจาก 560  $\mu\text{F}$  เหลือเพียง 140  $\mu\text{F}$  เหตุผลที่เลือกทำการทดสอบตัวเก็บประจุ  $C_2$  เนื่องจากตัวเก็บประจุตำแหน่งดังกล่าวเป็นตัวเก็บประจุตัวแรกที่ทำหน้าที่ในการโอนย้ายกำลังไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูงของวงจร  $M^2C^3$  ซึ่งหากตัวเก็บประจุ  $C_2$  ทำงานอยู่ในสถานะไม่ปกติอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของวงจรได้

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านบัสแรงดันต่ำที่มีการควบคุมวัฏจักรการทำงานของสัญญาณควบคุมระหว่าง 30 % ถึง 70% ดังรูปที่ 7.21 จะได้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$   $C_1$   $C_2$   $C_{LV}$  และบัสแรงดันสูง ดังแสดงในรูปที่ 7.22 , 7.23 , 7.24 , 7.25 และ 7.26 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปพบว่าค่ายอด (Peak) กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุขณะที่ถูกควบคุมให้มีวัฏจักรการทำงานน้อยกว่า 50% จะมีค่ายอดของกระแสไฟฟ้าสูงกว่าตัวเก็บประจุขณะที่ถูกควบคุมให้มีวัฏจักรการทำงานมากกว่า 50% เนื่องจากปริมาณประจุไฟฟ้าที่อัดประจุเข้าตัวเก็บประจุจะต้องมีค่าเท่ากับปริมาณประจุไฟฟ้าที่คายประจุออกจากตัวเก็บประจุนั้นเอง แต่อย่างไรก็ตามจากการทดสอบพบว่า ในการปรับค่าวัฏจักรการทำงานจะไม่ทำให้ค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปมากนัก จึงสามารถสรุปได้ว่าการปรับค่าวัฏจักรการทำงานของสัญญาณควบคุมไม่สามารถลดค่าการกระเพื่อมของแรงดันและกระแสไฟฟ้าเมื่อมีตัวเก็บประจุทำงานในสถานะไม่ปกติ เนื่องจากการปรับค่าวัฏจักรการทำงานจะเป็นเพียงการปรับสมดุลของการถ่ายเทประจุไฟฟ้าวางหว่างตัวเก็บประจุแต่ละตัวในวงจร  $M^2C^3$

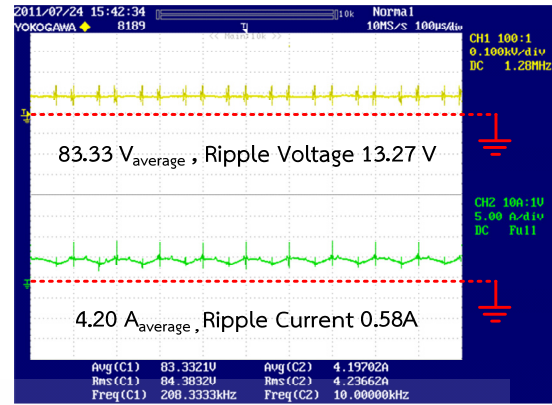
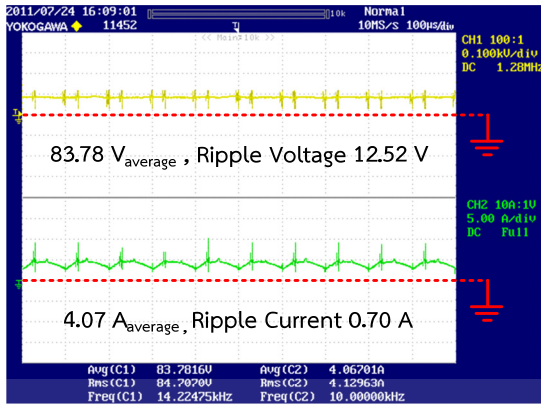
ดังนั้นในการควบคุมวงจร  $M^2C^3$  ควรเลือกใช้สัญญาณควบคุมที่มีค่าวัฏจักรการทำงานที่ 50% เพื่อเป็นการลดค่ายอดของกระแสไฟฟ้าในการอัดประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุไม่ให้มีค่าสูงเกินกว่าพิกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุดของมอสเฟต อีกทั้งยังเป็นการหมุนเวียนวัฏจักรการทำงาน (Rotate Duty Cycle) เพื่อลดค่าความสูญเสียจากการนำกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตให้มีค่าเท่ากัน จึงทำให้ความเสื่อมสภาพของมอสเฟตแต่ละตัวเฉลี่ยมีค่าเท่าๆกัน

ตารางที่ 7.5 สภาวะในการทดสอบ

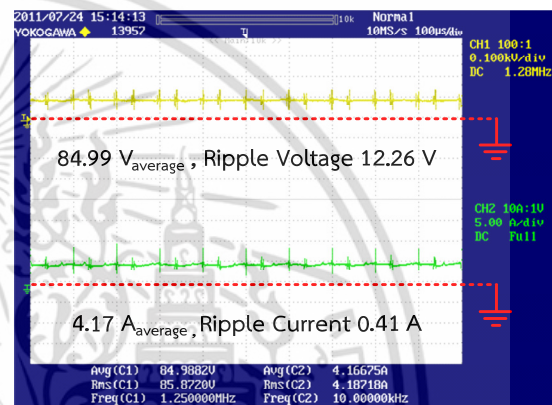
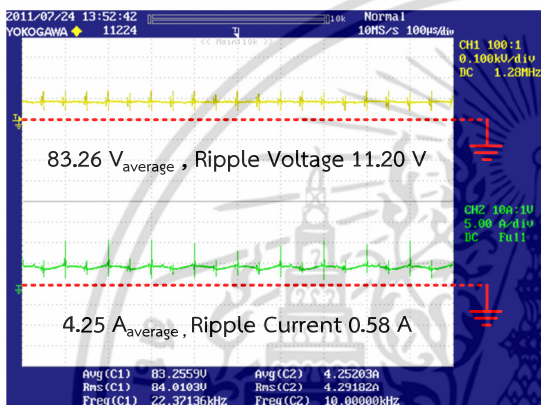
รายการ	พิกัด
แรงดัน (V) และกระแส (I) ไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ	85 V , 5.88 A
ภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง ( $R_{HV}$ )	185 $\Omega$
ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ (C) ในสภาวะปกติ	560 $\mu\text{F}$
ความต้านทานแฝงของตัวเก็บประจุ (ESR) ในสภาวะปกติ	173.08 m $\Omega$
ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ (C) ในสภาวะไม่ปกติ	140 $\mu\text{F}$
ความต้านทานแฝงของตัวเก็บประจุ (ESR) สภาวะไม่ปกติ	692.32 m $\Omega$
วัฏจักรการทำงาน (Duty Cycle)	30% ถึง 70%
ความถี่การสวิตช์ (f)	1 kHz ถึง 20 kHz



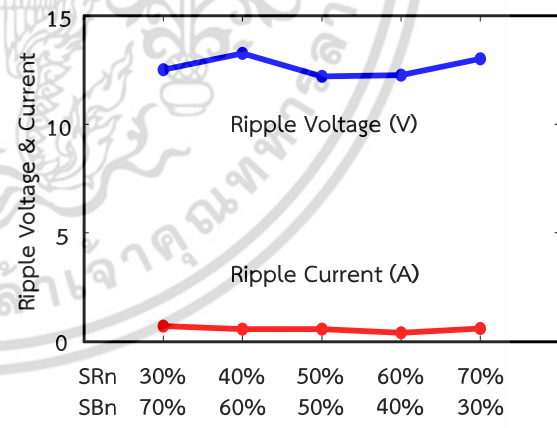
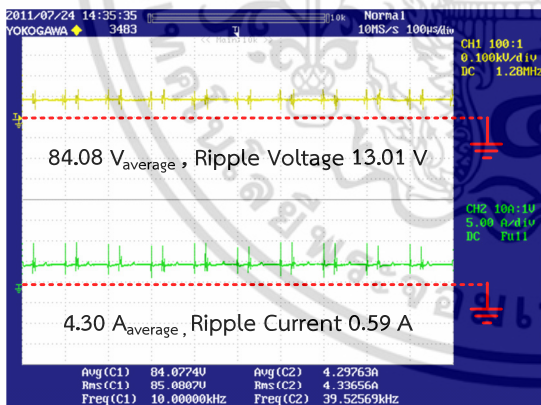
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 30% และ SBn 70% (ข) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 40% และ SBn 60%



(ค) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 50% และ SBn 50% (ง) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 70% และ SBn 30%

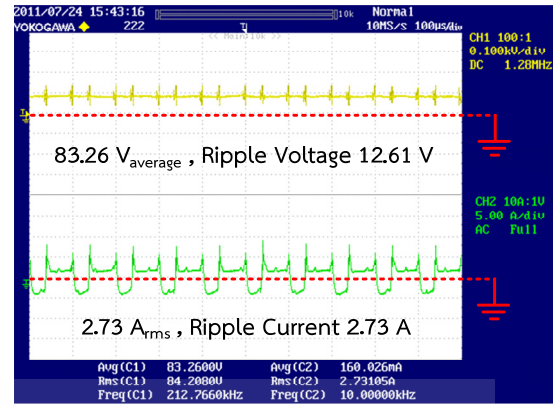
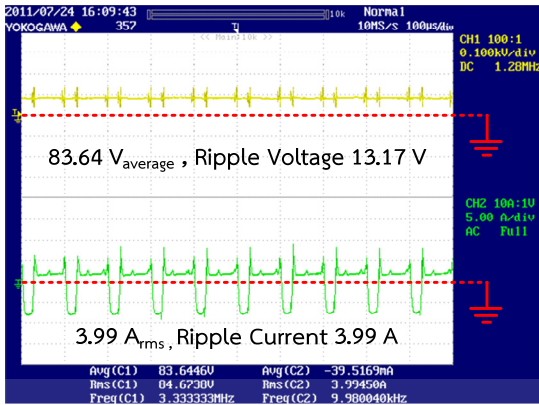


(จ) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 30% และ SBn 70%

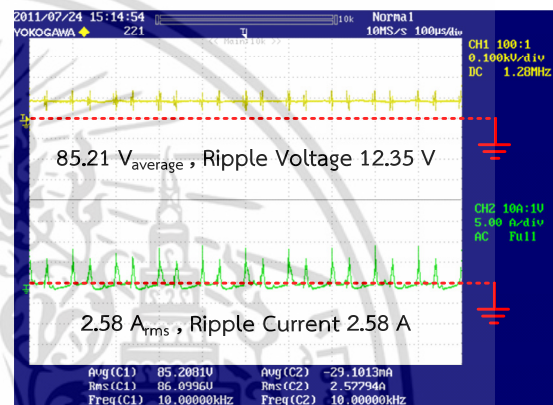
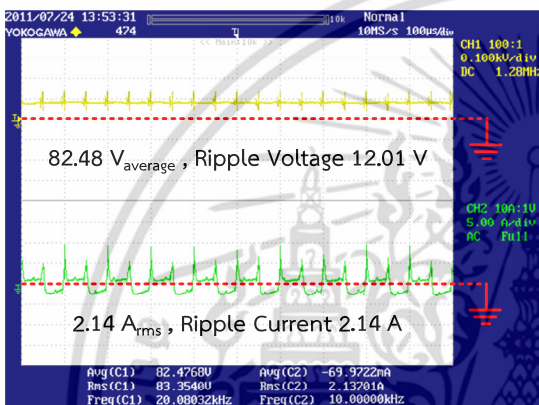
(ฉ) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ripple Voltage & Current และ Duty Cycle

รูปที่ 7.22 แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเฟืองทางด้านบัสแรงดันต่ำ  
ที่วัฏจักรการทำงาน 30% ถึง 70%

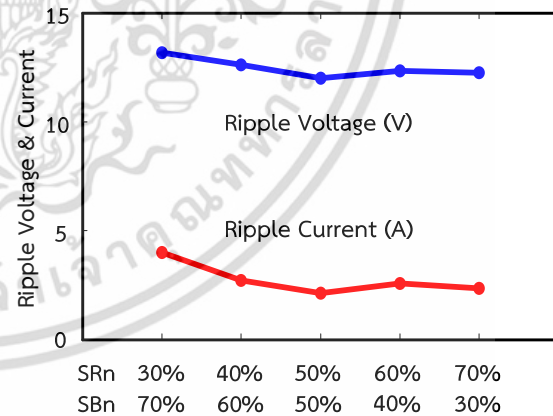
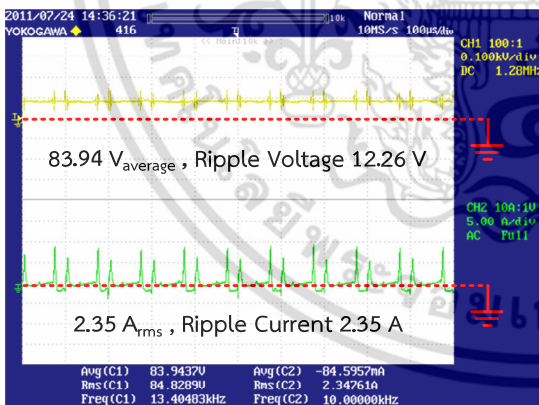
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 30% และ SBn 70% (ข) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 40% และ SBn 60%



(ค) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 50% และ SBn 50% (ง) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 70% และ SBn 30%

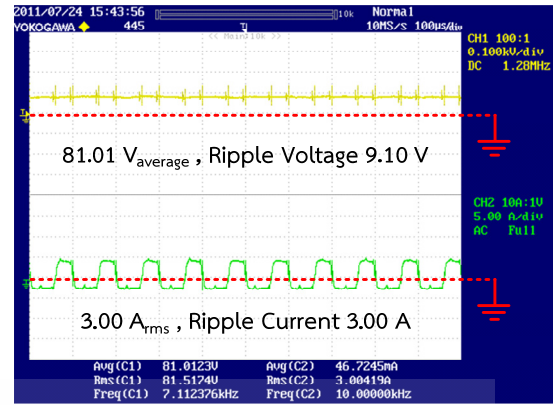
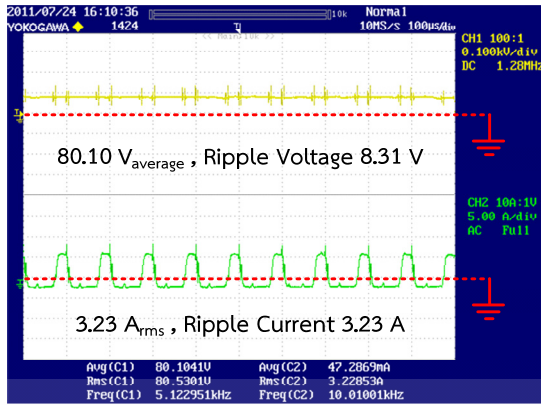


(จ) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 30% และ SBn 70%

(ฉ) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ripple Voltage & Current และ Duty Cycle

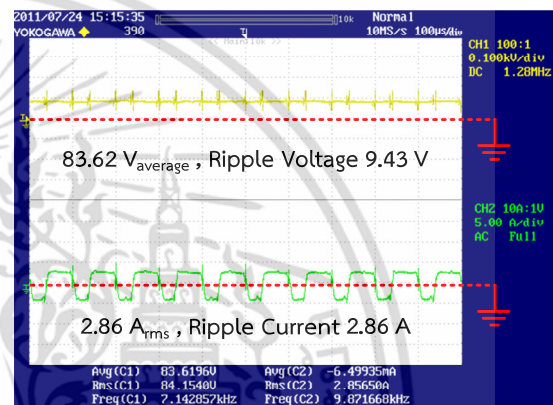
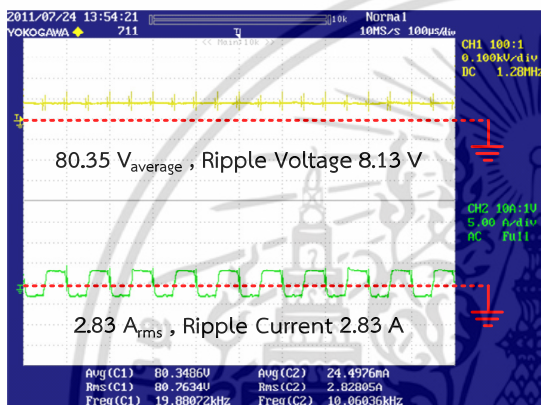
รูปที่ 7.23 แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระเพื่อมของตัวเก็บประจุ C<sub>LV</sub> ที่วัฏจักรการทำงาน 30% ถึง 70%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



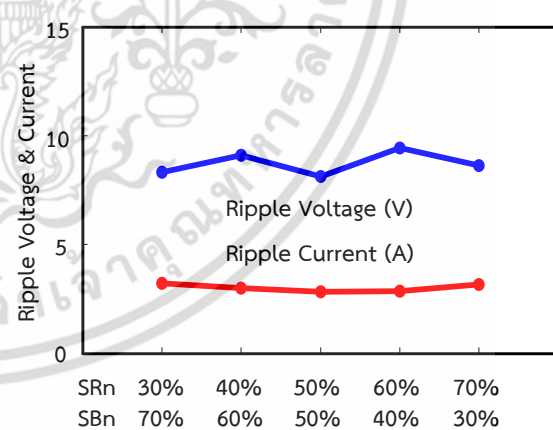
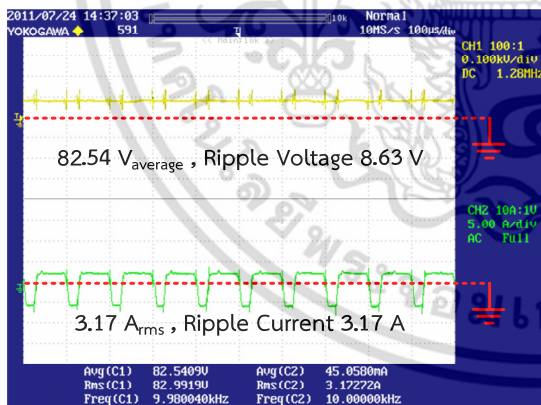
(ก) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 30% และ SBn 70%

(ข) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 40% และ SBn 60%



(ค) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 50% และ SBn 50%

(ง) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 70% และ SBn 30%

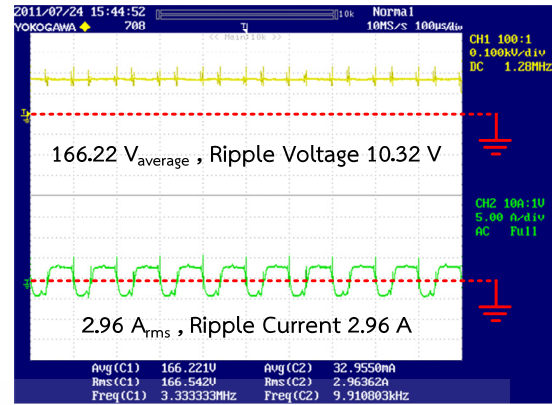
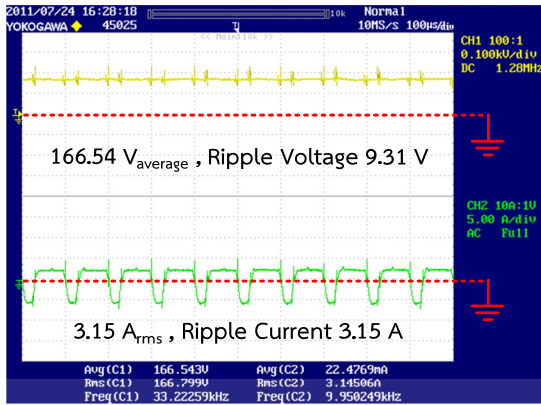


(จ) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 30% และ SBn 70%

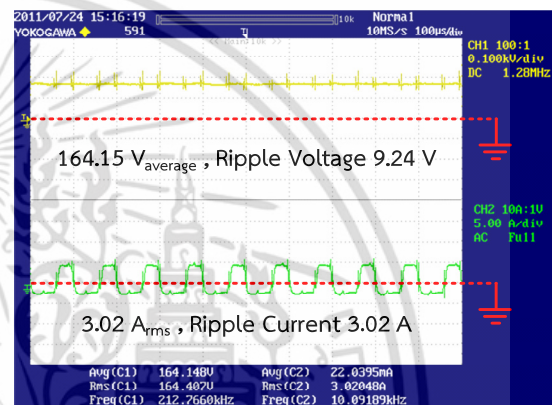
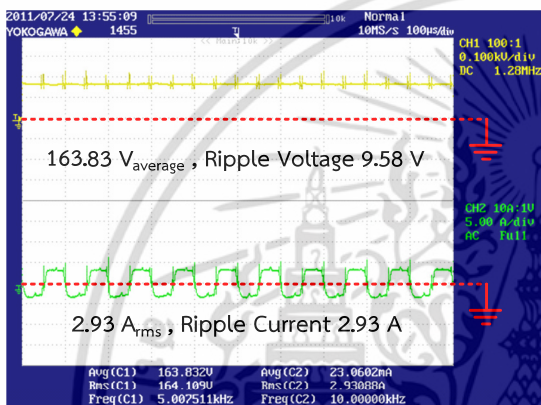
(ฉ) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ripple Voltage & Current และ Duty Cycle

รูปที่ 7.24 แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสสลับของตัวเก็บประจุ C<sub>2</sub> ที่วัฏจักรการทำงาน 30% ถึง 70%

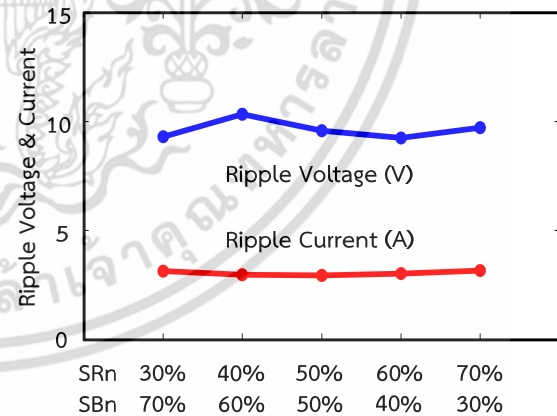
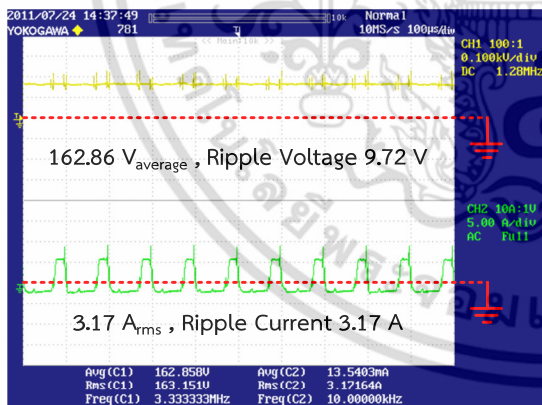
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 30% และ SBn 70% (ข) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 40% และ SBn 60%



(ค) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 50% และ SBn 50% (ง) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 70% และ SBn 30%

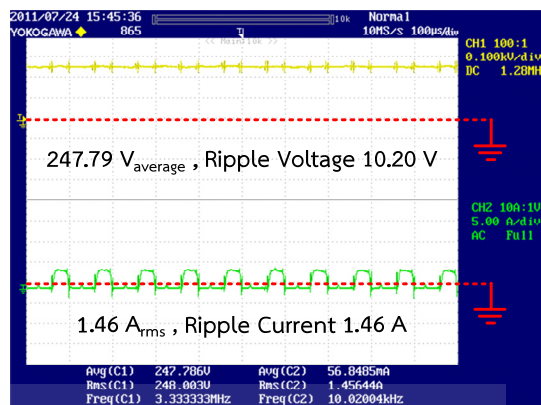
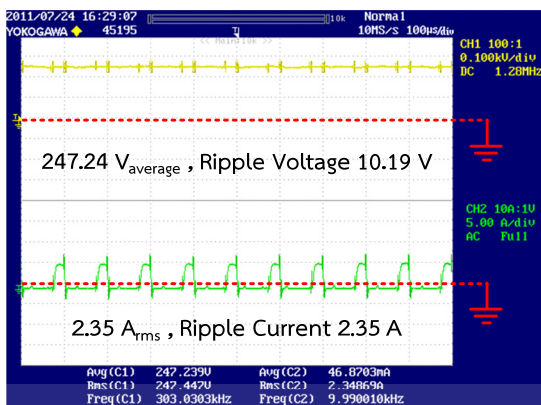


(จ) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 30% และ SBn 70%

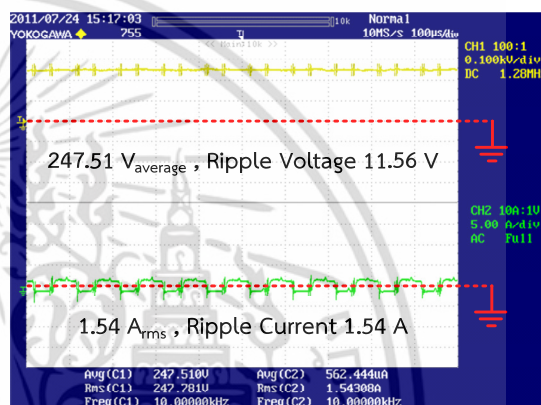
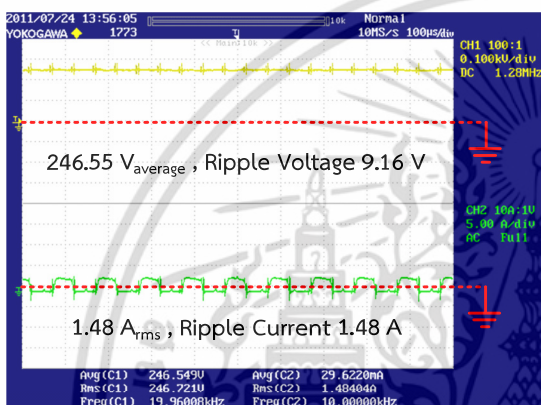
(ฉ) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ripple Voltage & Current และ Duty Cycle

รูปที่ 7.25 แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเฟืองของตัวเก็บประจุ  $C_1$  ที่วัฏจักรการทำงาน 30% ถึง 70%

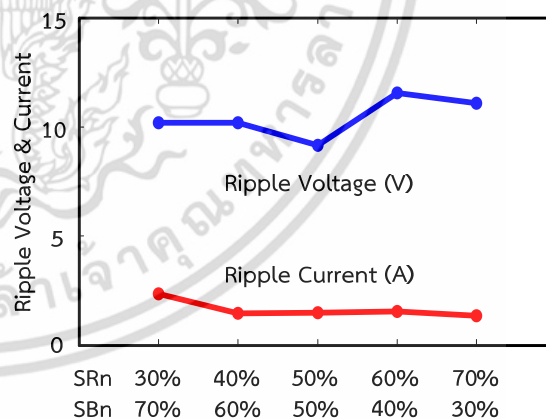
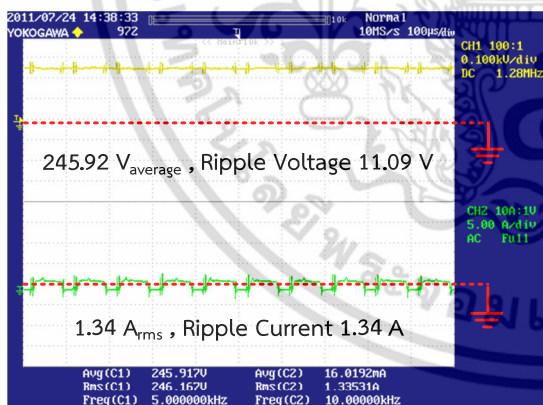
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 30% และ SBn 70%      (ข) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 40% และ SBn 60%



(ค) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 50% และ SBn 50%      (ง) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 70% และ SBn 30%

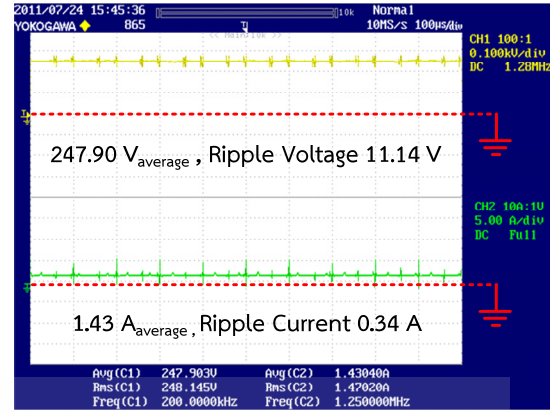
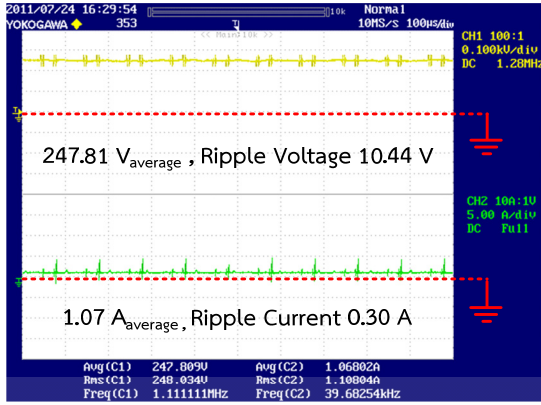


(จ) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 30% และ SBn 70%

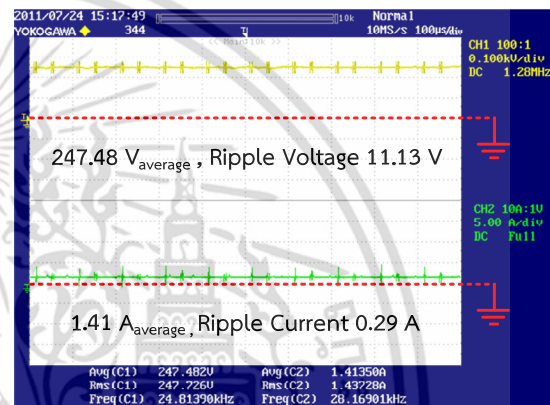
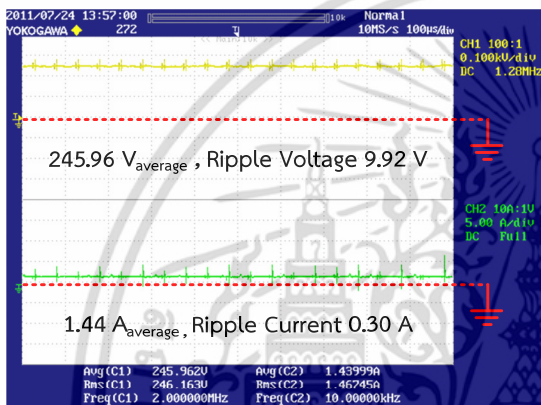
(ฉ) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ripple Voltage & Current และ Duty Cycle

รูปที่ 7.26 แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเฟืองของตัวเก็บประจุ C<sub>HV</sub> ที่วัฏจักรการทำงาน 30% ถึง 70%

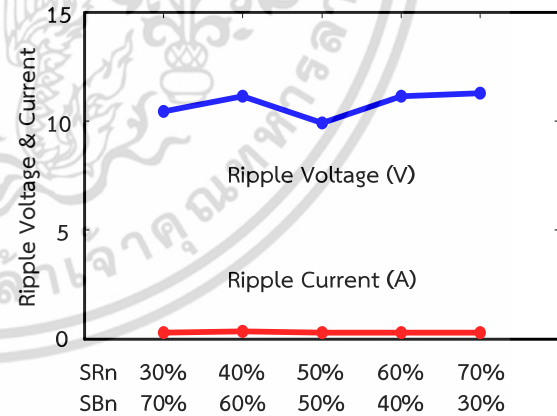
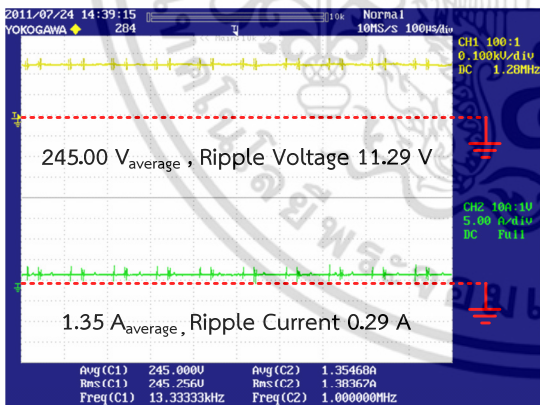
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 30% และ SBn 70% (ข) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 40% และ SBn 60%



(ค) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 50% และ SBn 50% (ง) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 70% และ SBn 30%



(จ) วัฏจักรการทำงานที่ SRn 30% และ SBn 70%

(ฉ) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ripple Voltage & Current และ Duty Cycle

รูปที่ 7.27 แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเฟืองทางด้านบัสแรงดันสูง ที่วัฏจักรการทำงาน 30% ถึง 70%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7.4.2 การทดสอบการปรับความถี่ของสัญญาณควบคุม

การทดสอบวงจร  $M^2C^3$  เมื่อตัวเก็บประจุ  $C_2$  ทำงานในสภาวะไม่ปกติโดยการปรับความถี่ของสัญญาณควบคุม เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านบัสแรงดันต่ำที่มีการควบคุมความถี่ สวิตช์ที่แตกต่างกันดังรูปที่ 7.28 จะได้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$   $C_1$   $C_2$   $C_{LV}$  และบัสแรงดันสูง ดังแสดงในรูปที่ 7.29 , 7.30 , 7.31 , 7.32 และ 7.33 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปพบว่า ค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด เพราะในการค่าปรับความถี่ของสัญญาณควบคุมให้มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณประจุไฟฟ้า ( $\Delta Q$ ) ภายในตัวเก็บประจุที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าลดลง (สามารถสังเกตได้จากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความถี่การสวิตช์) โดยปริมาณประจุไฟฟ้า ( $\Delta Q$ ) จะแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้า ( $\Delta V$ ) ของตัวเก็บประจุที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นเหตุผลที่ชี้ให้เห็นว่าทำไมการเพิ่มความถี่ของการสวิตช์จึงสามารถลดค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าได้

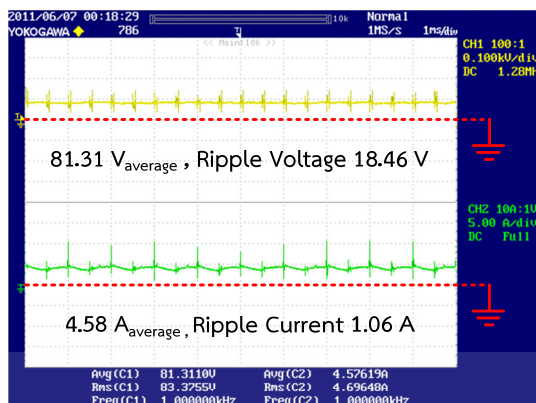
จากรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าความสูญเสียภายในตัวเก็บประจุกับความถี่การสวิตช์ดังรูปที่ 7.34 พบว่าเมื่อความถี่สวิตช์เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความสูญเสียภายในตัวเก็บประจุมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มความถี่สวิตช์มีผลให้ค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูล (ESR) ภายในตัวเก็บประจุมีค่าลดลง (ค่า ESR ทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและค่าความร้อนสะสมขึ้นภายในตัวเก็บประจุ) แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มความถี่การสวิตช์จะทำให้ประสิทธิภาพของวงจร  $M^2C^3$  ลดลงดังรูปที่ 7.35 เนื่องจากค่าความสูญเสียจากการสวิตช์ (Switching Loss) มีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพของวงจรมีค่าลดลงแต่ค่าประสิทธิภาพที่ลดลงดังกล่าวนี้สามารถยอมรับได้ในทางปฏิบัติ

ในการคำนวณค่าความสูญเสียรวมภายในตัวเก็บประจุทั้งหมดโดยใช้สมการที่ 5.38 (บทที่ 5) ของวงจร  $M^2C^3$  ได้ทำการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างตัวเก็บประจุทุกตัวทำงานอยู่ในสภาวะปกติ และตัวเก็บประจุ  $C_2$  ทำงานอยู่ในสภาวะไม่ปกติ จากตารางที่ 7.6 พบว่าเมื่อตัวเก็บประจุ  $C_2$  ทำงานอยู่ในสภาวะไม่ปกติค่าความสูญเสียรวมภายในตัวเก็บประจุทั้งหมดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ต่อมาเมื่อทำการปรับความถี่การสวิตช์เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความสูญเสียรวมภายในตัวเก็บประจุทั้งหมดมีค่าลดลง แต่จะให้ค่าความสูญเสียจากการสวิตช์เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจากเดิมและประสิทธิภาพลดลง ซึ่งจากการทดสอบและการคำนวณผลที่ได้มีความสอดคล้องกับหลักการที่ได้นำเสนอในบทที่ 5

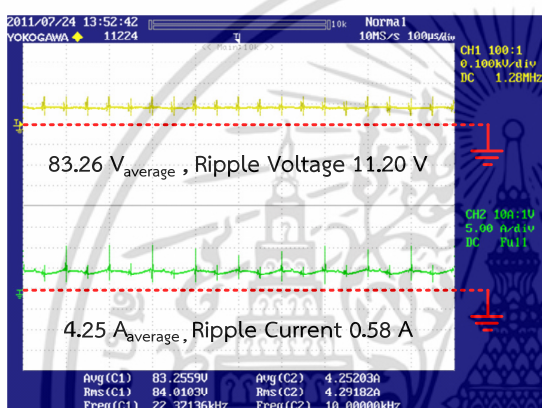
ตารางที่ 7.6 ค่าความสูญเสียรวมของตัวเก็บประจุในวงจร  $M^2C^3$

สภาวะการทำงาน	ความถี่สวิตช์ (kHz)	ค่าความสูญเสียรวมของตัวเก็บประจุในวงจร $M^2C^3$ (W)	ประสิทธิภาพ (%)
สภาวะปกติ	10	4.60	93.03 %
$C_2$ ทำงานในสภาวะไม่ปกติ	10	9.08	93.00 %
$C_2$ ทำงานในสภาวะไม่ปกติ	20	8.62	92.84 %

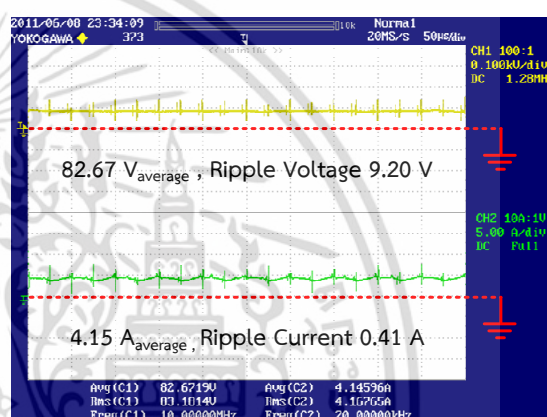
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



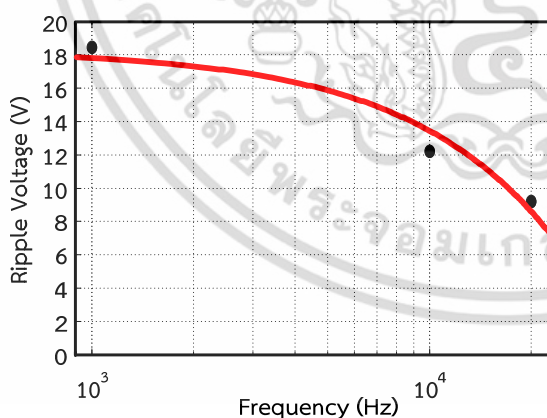
(ก) ความถี่ของการสวิตช์ที่ 1 kHz



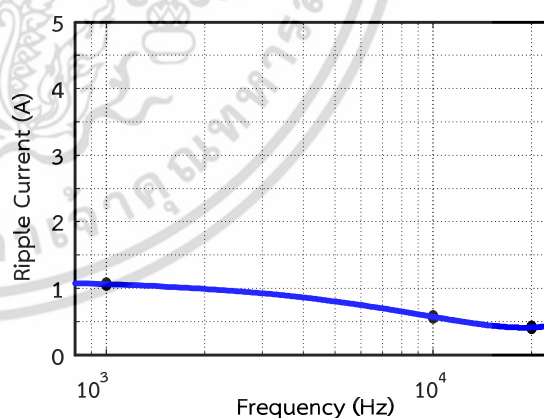
(ข) ความถี่ของการสวิตช์ที่ 10 kHz



(ค) ความถี่ของการสวิตช์ที่ 20 kHz



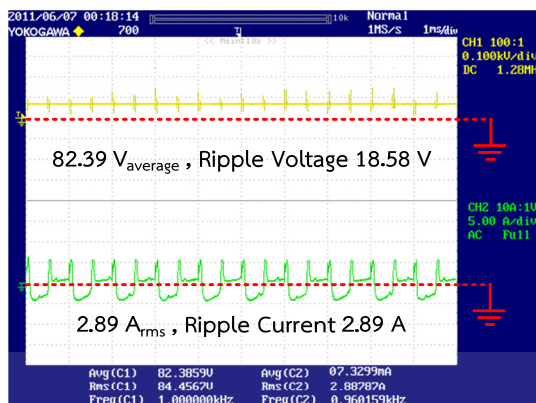
(ง) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ripple Voltage และ Frequency



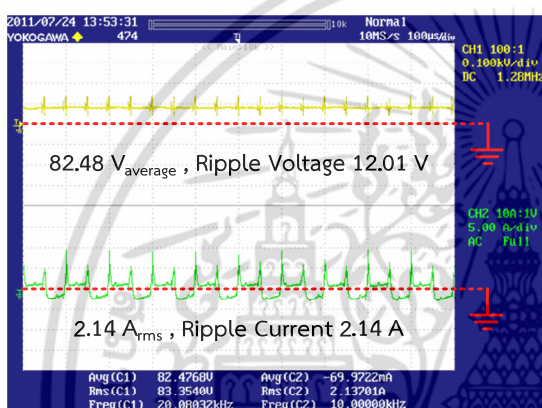
(จ) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ripple Current และ Frequency

รูปที่ 7.28 แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเพื่อทางด้านบัสแรงดันต่ำ ที่ความถี่สวิตช์ 1 kHz ถึง 20 kHz

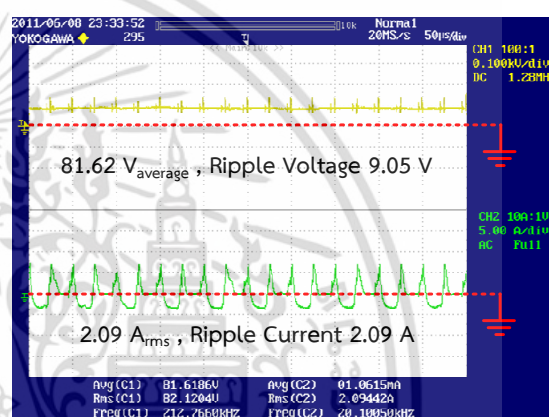
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



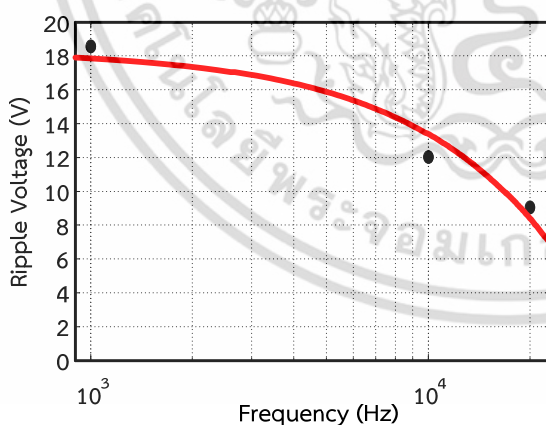
(ก) ความถี่ของการสวิตช์ที่ 1 kHz



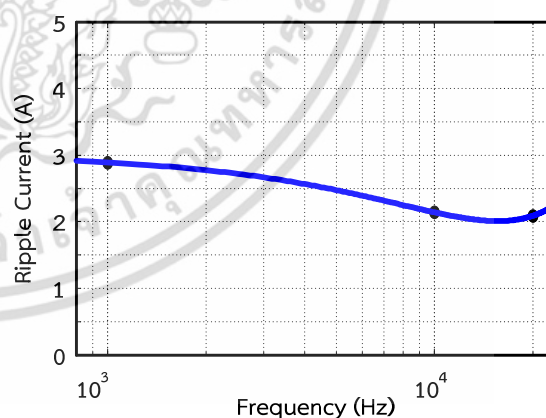
(ข) ความถี่ของการสวิตช์ที่ 10 kHz



(ค) ความถี่ของการสวิตช์ที่ 20 kHz



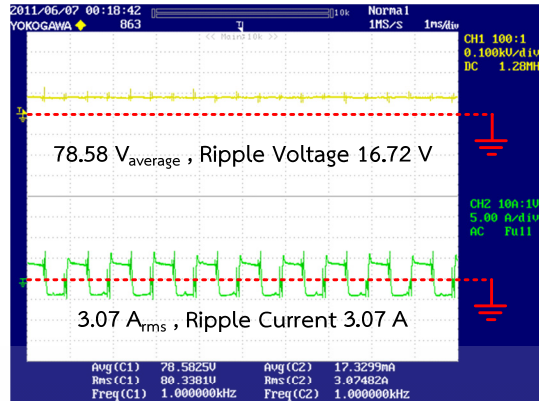
(ง) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ripple Voltage และ Frequency



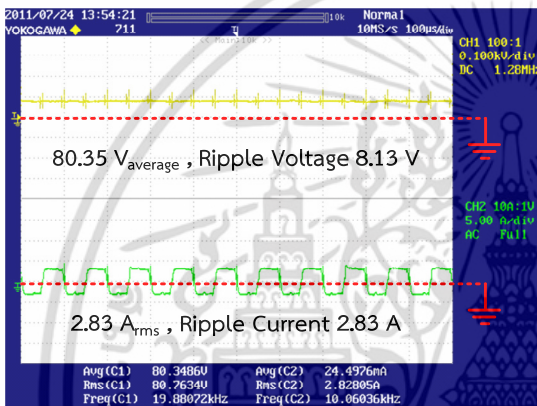
(จ) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ripple Current และ Frequency

รูปที่ 7.29 แรงแดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเฟืองของตัวเก็บประจุ  $C_{LV}$  ที่ความถี่สวิตช์ 1 kHz ถึง 20 kHz

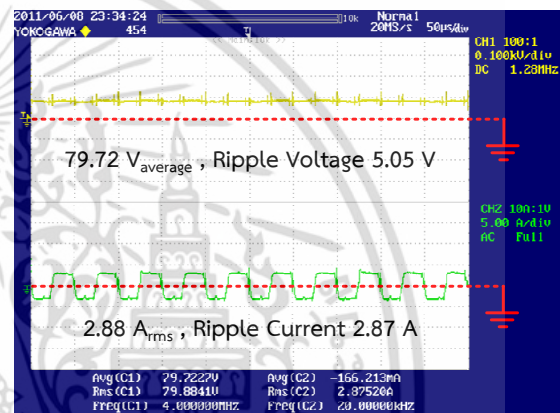
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



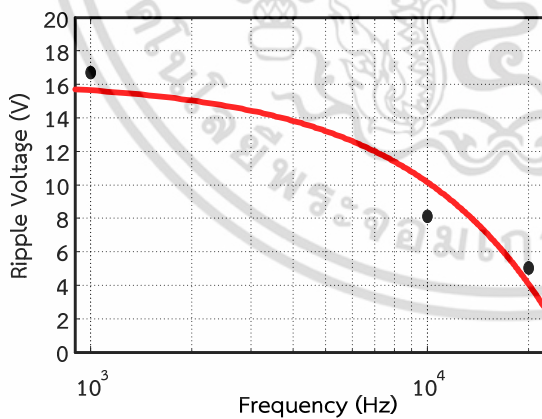
(ก) ความถี่ของการสวิตช์ที่ 1 kHz



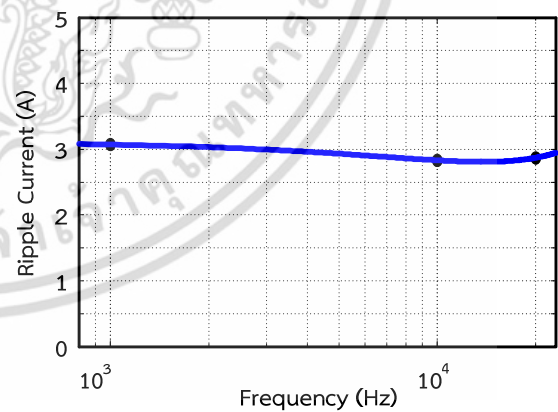
(ข) ความถี่ของการสวิตช์ที่ 10 kHz



(ค) ความถี่ของการสวิตช์ที่ 20 kHz



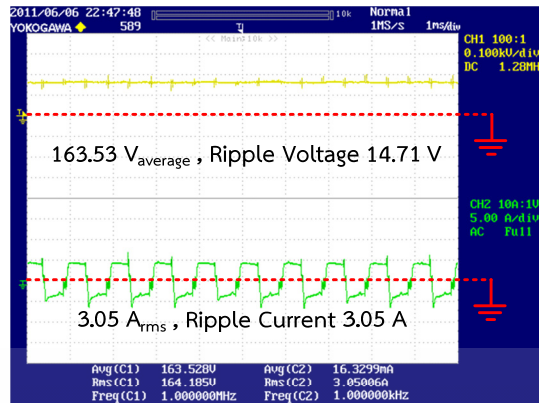
(ง) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ripple Voltage และ Frequency



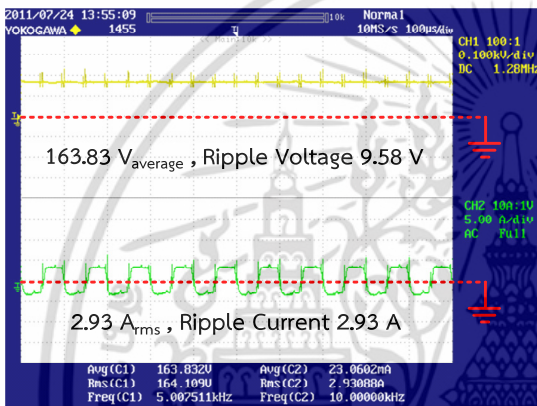
(จ) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ripple Current และ Frequency

**รูปที่ 7.30** แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเฟืองของตัวเก็บประจุ  $C_2$  ที่ความถี่สวิตช์ 1 kHz ถึง 20 kHz

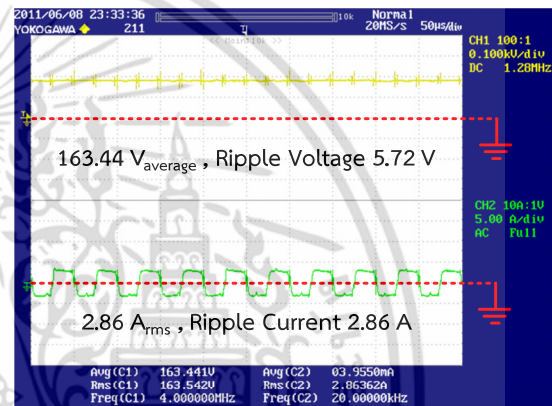
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



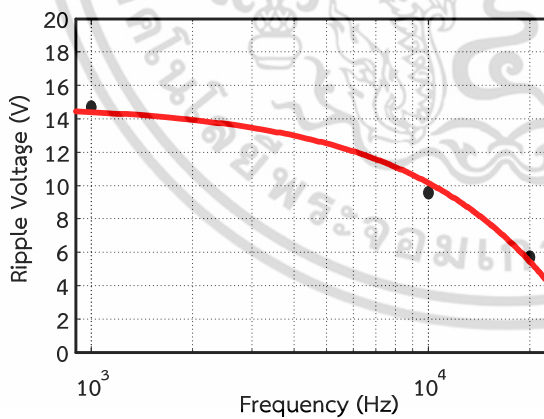
(ก) ความถี่ของการสวิตช์ที่ 1 kHz



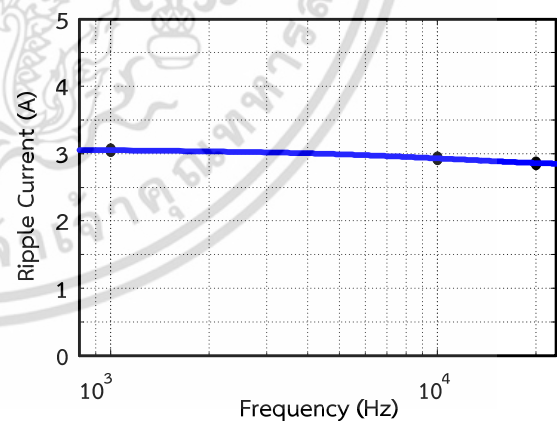
(ข) ความถี่ของการสวิตช์ที่ 10 kHz



(ค) ความถี่ของการสวิตช์ที่ 20 kHz



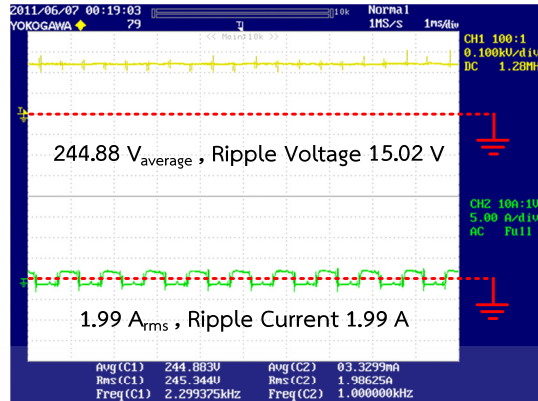
(ง) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ripple Voltage และ Frequency



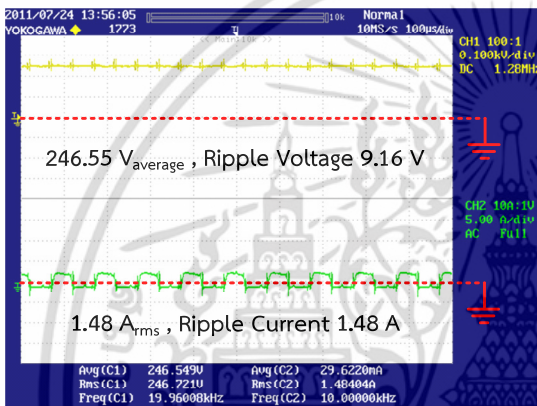
(จ) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ripple Current และ Frequency

รูปที่ 7.31 แร่งดันและกระแสไฟฟ้ากระเพื่อมของตัวเก็บประจุ  $C_1$  ที่ความถี่สวิตช์ 1 kHz ถึง 20 kHz

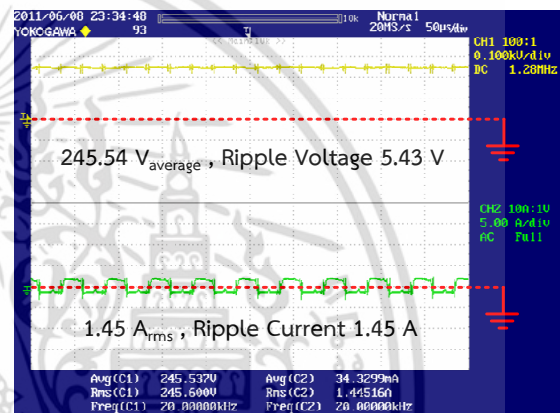
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



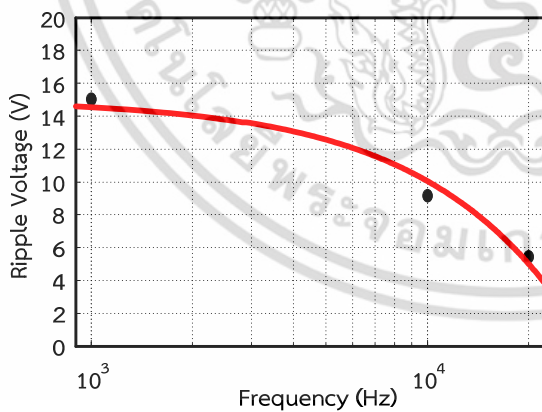
(ก) ความถี่ของการสวิตช์ที่ 1 kHz



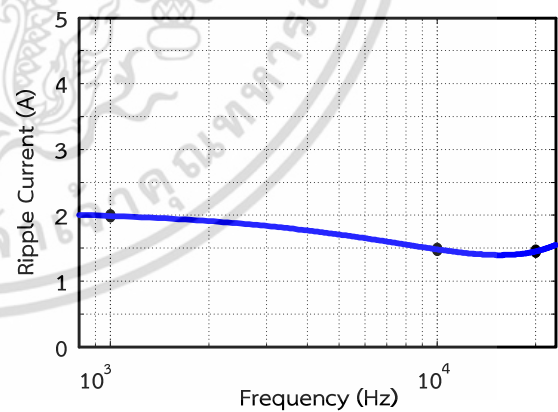
(ข) ความถี่ของการสวิตช์ที่ 10 kHz



(ค) ความถี่ของการสวิตช์ที่ 20 kHz



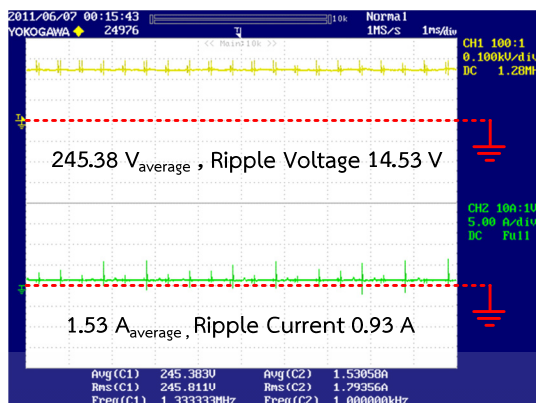
(ง) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ripple Voltage และ Frequency



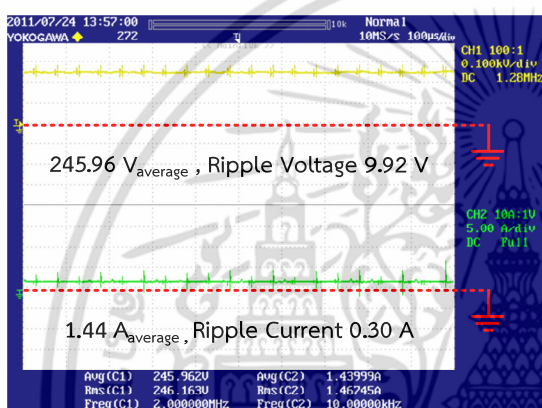
(จ) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ripple Current และ Frequency

รูปที่ 7.32 แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระเพื่อมของตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  ที่ความถี่สวิตช์ 1 kHz ถึง 20 kHz

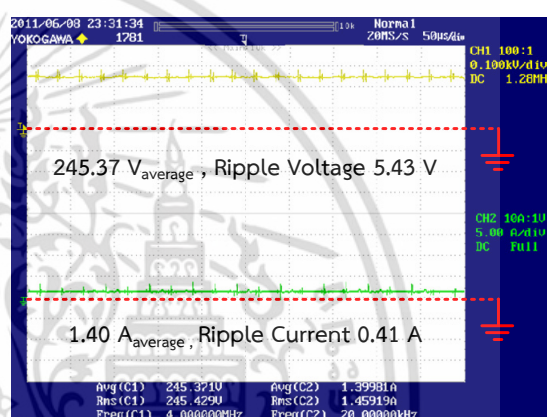
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



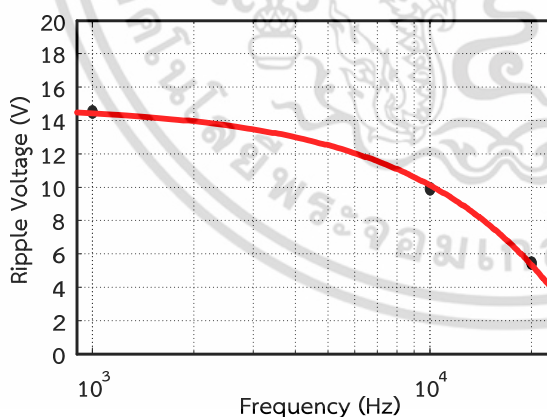
(ก) ความถี่ของการสวิตช์ที่ 1 kHz



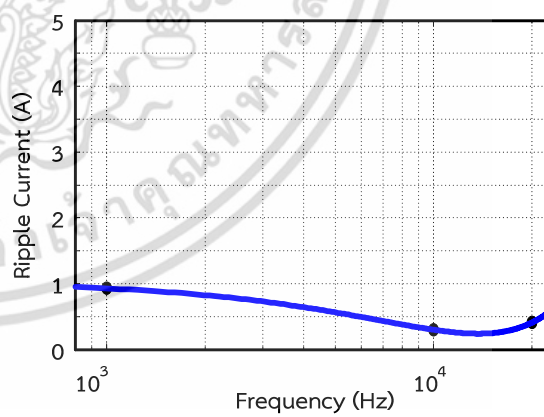
(ข) ความถี่ของการสวิตช์ที่ 10 kHz



(ค) ความถี่ของการสวิตช์ที่ 20 kHz



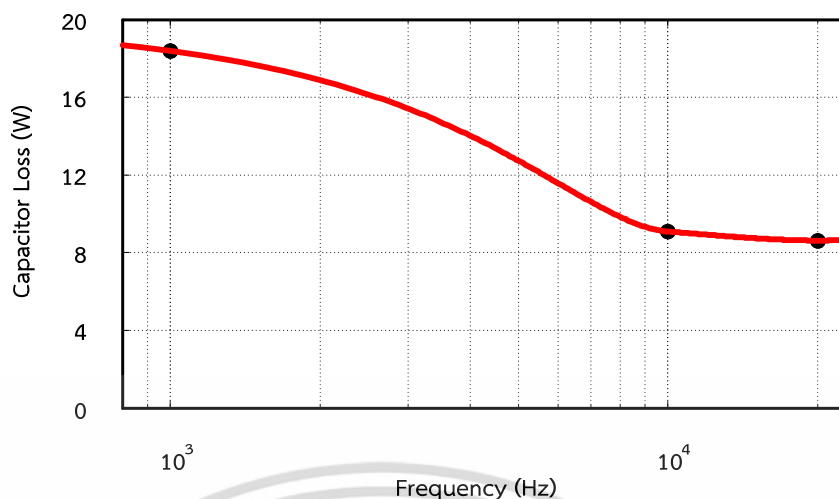
(ง) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ripple Voltage และ Frequency



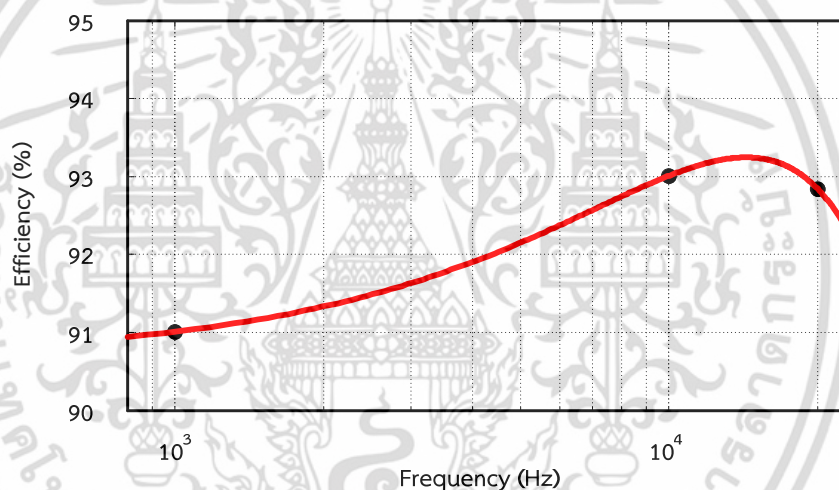
(จ) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ripple Current และ Frequency

**รูปที่ 7.33** แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระเพื่อมทางด้านบัสแรงดันสูง ที่ความถี่สวิตช์ 1 kHz ถึง 20 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความสูญเสียรวมภายในตัวเก็บประจุ กับ ความถี่สวิตช์ของวงจร  $M^2C^3$  เมื่อตัวเก็บประจุ  $C_2$  ทำงานอยู่ในสภาวะไม่ปกติ



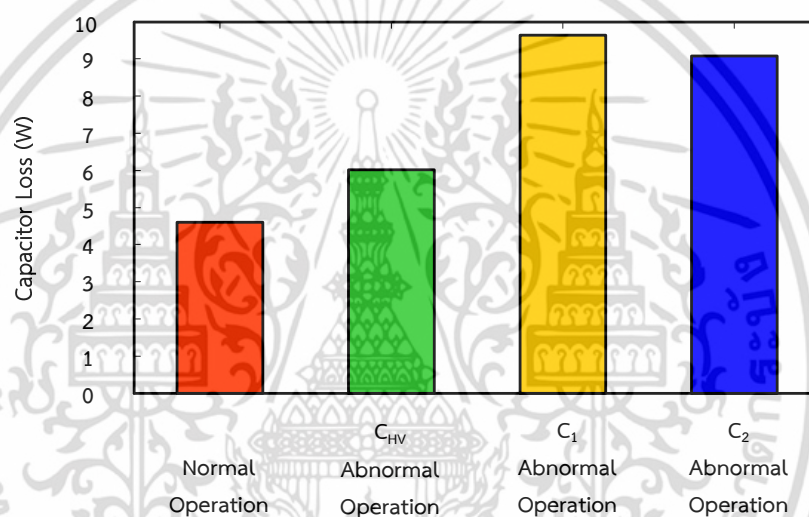
รูปที่ 7.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพ กับ ความถี่สวิตช์ ของวงจร  $M^2C^3$  เมื่อตัวเก็บประจุ  $C_2$  ทำงานอยู่ในสภาวะไม่ปกติ

จากตารางที่ 7.7 และรูปที่ 7.36 เมื่อทำการทดสอบวงจร  $M^2C^3$  ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าประมาณ 500 W ความถี่สวิตช์ 10 kHz และทำการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในวงจร  $M^2C^3$  ในขณะที่ตัวเก็บประจุตัวใดตัวหนึ่งทำงานอยู่ในสภาวะไม่ปกติ พบว่าการทำงานในสภาวะที่ไม่ปกติของตัวเก็บประจุ  $C_1$  มีผลกระทบต่อวงจรมากที่สุดเนื่องจากตัวเก็บประจุดังกล่าวจะเป็นตัวกลางในการโอนย้ายกำลังไฟฟ้าและทำให้เกิดค่าความสูญเสียรวมของตัวเก็บประจุทั้งหมดในวงจรมีค่าสูงสุด ส่งผลให้เป็นอุปสรรคต่อการโอนย้ายกำลังไฟฟ้าไปยังบัสแรงดันสูง โดยค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในตัวเก็บประจุอีกทั้งยังเป็นเหตุให้อายุการใช้งานของตัวเก็บประจุตัวอื่นๆมีค่าลดลง ด้วยเหตุนี้เองเมื่อระบบการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุนั้นพบว่าตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำงานอยู่ในสภาวะไม่ปกติ ดังนั้นตัวเก็บประจุ  $C_1$  จึงควรได้รับการแก้ไขปัญหาให้รวดเร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์สวิตช์กำลังและตัวเก็บประจุตัวอื่นๆที่อยู่ในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.7 ค่าความสูญเสียรวมภายในตัวเก็บประจุทั้งหมดของวงจร  $M^2C^3$  เมื่อมีตัวเก็บประจุตัวใดตัวหนึ่งทำงานอยู่ในสถานะที่ไม่ปกติ

ตัวเก็บประจุที่ทำงานในสถานะไม่ปกติ	ค่าความสูญเสียรวมจากการอัดประจุ (W)	ค่าความสูญเสียรวมจากการนำกระแสไฟฟ้า (W)	ค่าความสูญเสียรวมภายในตัวเก็บประจุ (W)
สภาวะปกติ	4.08	0.52	4.60
$C_{HV}$	5.23	0.79	6.02
$C_1$	8.56	1.06	9.63
$C_2$	8.26	0.81	9.08



รูปที่ 7.36 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียรวมของตัวเก็บประจุทั้งหมดในวงจร  $M^2C^3$  เมื่อมีตัวเก็บประจุตัวใดตัวหนึ่งทำงานอยู่ในสถานะที่ไม่ปกติ

## 7.5 สรุป

จากการทดสอบเครื่องต้นแบบของวงจร  $M^2C^3$  3 ระดับ พบว่าวงจรมีความสามารถในการผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ 3 ระดับ และสามารถโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าได้ 2 ทิศทางระหว่างบัสแรงดันต่ำและบัสแรงดันสูง เมื่ วงจร  $M^2C^3$  มีตัวเก็บประจุตัวใดตัวหนึ่งทำงานอยู่ในสภาวะไม่ปกติจะทำให้เกิดการกระเพื่อมของแรงดันและกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น วิธีการลดค่าการกระเพื่อมดังกล่าวสามารถทำได้โดยการปรับความถี่ของสัญญาณควบคุมให้มีค่าเพิ่มขึ้นและมีวัฏจักรการทำงานอยู่ที่ 50% นอกจากนี้การเพิ่มความถี่ของสัญญาณควบคุมสามารถลดค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในตัวเก็บประจุ แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มความถี่ของสัญญาณควบคุมจะทำให้ประสิทธิภาพของวงจร  $M^2C^3$  ลดลงเนื่องจากค่าความสูญเสียจากการสวิตช์มีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพของวงจร  $M^2C^3$  มีค่าลดลงแต่ค่าประสิทธิภาพที่ลดลงนี้สามารถยอมรับได้ในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในวงจร  $M^2C^3$  เมื่อมีตัวเก็บประจุตัวใดตัวหนึ่งทำงานอยู่ในสภาวะที่ไม่ปกติ พบว่าการทำงานภายใต้สภาวะที่ไม่ปกติของตัวเก็บประจุ C1 มีผลกระทบต่อวงจรมากที่สุด ดังนั้นตัวเก็บประจุ C1 จึงควรได้รับการแก้ไขปัญหาลงมือให้รวดเร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์สวิตช์กำลังและตัวเก็บประจุตัวอื่นๆที่อยู่ในวงจร  $M^2C^3$

## บทที่ 8

# สรุปและข้อเสนอแนะ

### 8.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาระบบการตรวจวัดและวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุแคลมป์หรือ  $M^2C^3$  โดยเริ่มจากการศึกษาโครงสร้างทางกายภาพและพฤติกรรมการทำงานรวมถึงวิธีการควบคุมวงจรในบทที่ 3 จากการศึกษาสามารถนำข้อมูลไปทำการวิเคราะห์การทำงานของตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่ทำงานอยู่ในสถานะคงตัว ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์คือแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในแต่ละช่วงเวลาที่คุณค่าการทำงาน ซึ่งในการวิเคราะห์ดังกล่าวจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการประยุกต์ใช้กับระบบการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุที่อยู่ในวงจร  $M^2C^3$

การคำนวณค่าอายุการใช้งานเพื่อตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุแต่ละตัวนั้นจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรต่างๆภายในตัวเก็บประจุ ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในบทที่ 4 พบว่าในทางปฏิบัติการหาค่าตัวแปรนั้นจะเป็นเพียงการประมาณค่าให้มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ อีกทั้งในการหาค่าตัวแปรด้วยของตัวเก็บประจุจะประกอบไปด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนจึงอาจทำให้การคำนวณอาจผิดพลาดขึ้นได้ อีกทั้งค่าตัวแปรดังกล่าวจะไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรงในขณะที่ตัวเก็บประจุกำลังทำงานอยู่ในวงจร นอกจากนี้ถึงแม้ว่าการทราบค่าตัวแปรต่างๆของตัวเก็บประจุที่สามารถนำไปคำนวณความค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าที่คำนวณได้นั้นจะมีค่ามากถึง 100,000 ชั่วโมง โดยค่าดังกล่าวอาจไม่เป็นประโยชน์มากนักในทางปฏิบัติ ดังนั้นเทคนิคการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุด้วยวิธีทางสถิติจึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้และได้นำเสนอในงานวิจัยนี้

การสร้างตัวตรวจวัดเทียมเพื่อตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุด้วยวิธีทางสถิติที่ได้นำเสนอในบทที่ 5 คือ PCR (Principal Component Regression) ที่มีความสามารถในการกรองสัญญาณรบกวนและลดมิติของสัญญาณที่วัดได้จริง การลดมิติของข้อมูลนี้จะไม่ทำให้ข้อมูลที่สำคัญส่วนใหญ่สูญเสียไปจึงทำให้สามารถลดระยะเวลาในการประมวลผลของสัญญาณ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำ PCR สามารถสร้างแบบจำลองที่มีความสามารถในการเรียนรู้และประมวลผลจากสัญญาณที่วัดได้จริงเพื่อนำไปสู่การสร้างตัวตรวจวัดเทียม

นอกจากนี้การสร้างแบบจำลองโดยใช้ตัวตรวจวัดเทียมสามารถหลีกเลี่ยงการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนของแบบจำลองการหาค่าตัวแปรภายในตัวเก็บประจุ จึงทำให้ลดระยะเวลาในการวิเคราะห์และการแก้ปัญหาในเชิงวิศวกรรม อีกทั้งยังลดการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดข้อมูลของการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุ กล่าวคือการตรวจวัดความเสื่อมสภาพด้วยวิธีดั้งเดิมจะใช้ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดจำนวน 3 ชุดต่อตัวเก็บประจุ 1 ตัวคือ ชุดตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า ชุดตรวจวัดกระแสไฟฟ้า และชุดตรวจอุณหภูมิ ส่วนวิธีการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุที่นำเสนอเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ชุดตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าเพียง 1 ชุดต่อตัวเก็บประจุ 1 ตัว และชุดตรวจวัดกระแสไฟฟ้า 1 ชุดต่อตัวเก็บประจุทุกตัวที่อยู่ในวงจร ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าวิธีที่นำเสนอสามารถลดจำนวนการใช้ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดได้ ดังนั้นจึงทำให้สามารถลดต้นทุนของอุปกรณ์ตรวจวัดและเกิดความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์อย่างเหมาะสม

จากผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นมีความสามารถในการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในวงจร  $M^2C^3$  หลังจากที่ทำการสร้างระบบตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุเสร็จเรียบร้อยแล้วนั้น จำเป็นจะต้องทำการลดการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า การกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้า และค่าความสูญเสียภายในตัวเก็บประจุ โดยการเพิ่มความถี่ของการสวิตช์ให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับวงจร

แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มความถี่ของสัญญาณควบคุมจะทำให้ประสิทธิภาพของวงจร  $M^2C^3$  ลดลงเนื่องจากค่าความสูญเสียจากการสวิตช์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพของวงจร  $M^2C^3$  มีค่าลดลงแต่ค่าประสิทธิภาพที่ลดลงนี้สามารถยอมรับได้ในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในวงจร  $M^2C^3$  ในขณะที่ตัวเก็บประจุทำงานอยู่ในสภาวะไม่ปกติ พบว่าการทำงานภายใต้สภาวะที่ไม่ปกติของตัวเก็บประจุ  $C_1$  มีผลกระทบต่อวงจรมากที่สุด เนื่องจากตัวเก็บประจุดังกล่าวจะเป็นตัวกลางในการโอนย้ายกำลังไฟฟ้าและเกิดค่าความสูญเสียของตัวเก็บประจุ  $C_1$  เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เป็นอุปสรรคต่อการโอนย้ายกำลังไฟฟ้า ดังนั้นตัวเก็บประจุ  $C_1$  จึงควรได้รับการแก้ไขปัญหาให้รวดเร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์สวิตช์กำลังและตัวเก็บประจุตัวอื่นๆที่อยู่ในวงจร  $M^2C^3$

## 8.2 ข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางการพัฒนาและต่อยอดงานวิจัยในอนาคต

ในการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุในวงจร  $M^2C^3$  ที่ใช้ในงานวิจัย ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของวิธีการที่ไม่สามารถตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุเมื่อมีตัวเก็บประจุเสื่อมสภาพพร้อมกันหลายๆตัวในวงจร อีกทั้งยังไม่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับชุดคอนเวอร์เตอร์ทั่วไปที่ประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุที่หลากหลาย เนื่องจากวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยจะใช้เพียงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งตามสัญญาณการควบคุมของสวิตช์กำลัง ซึ่งหากนำวิธีการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับชุดคอนเวอร์เตอร์อื่นๆอาจทำให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเวลาได้ยาก ด้วยเหตุนี้เองเพื่อเป็นการปรับปรุงวิธีการให้สามารถประยุกต์ใช้และเหมาะสมกับชุดคอนเวอร์เตอร์ทั่วไป การใช้รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุอาจเป็นวิธีทางเลือกที่สามารถประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดความเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุได้ แต่อย่างไรก็ตามในเบื้องต้นได้ทำการนำรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในวงจร  $M^2C^3$  มาทำการวิเคราะห์พบว่าไม่สามารถจำแนกสภาวะการทำงานของตัวเก็บประจุได้อย่างเด่นชัด ดังนั้นจึงอาจจำเป็นต้องประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) เพื่อมาทำการวิเคราะห์แก้ปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นและมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

ในการทดสอบวงจร  $M^2C^3$  เมื่อมีตัวเก็บประจุทำงานในสภาวะไม่ปกติโดยการเพิ่มความถี่การสวิตช์เพื่อลดค่าความสูญเสียภายในตัวเก็บประจุ จะมีผลให้ค่าประสิทธิภาพของวงจรลดลงเนื่องจากค่าความสูญเสียจากการสวิตช์มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นการวิเคราะห์หาค่าความถี่สวิตช์ที่เหมาะสมจึงจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการพัฒนางานวิจัยในระดับต่อไป

ในระหว่างการทดสอบวงจร  $M^2C^3$  ได้เกิดการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือ EMI (Electro Magnetic Interference) ที่มีความถี่สูง (ความถี่การสวิตช์  $M^2C^3$ ) ในสายตัวนำจึงทำให้เกิดสัญญาณรบกวนการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าข้างเคียง ซึ่งในเบื้องต้นได้ทำการแก้ไขปัญหา EMI ที่เกิดขึ้นดังต่อไปนี้

- เลือกใช้สายตัวนำไฟฟ้าในวงจรให้สั้นมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้และทำการตีเกลียวสายตัวนำเพื่อทำให้สนามแม่เหล็กเกิดการหักล้างกัน อีกทั้งยังเป็นการลดผลกระทบของค่าความเหนี่ยวนำสถิต (Stay Inductance) ที่อาจจะทำให้เกิดการรบกวนจาก  $di/dt$
- ทำการแยกสายตัวนำระหว่างวงจรกำลังและของวงจรควบคุมออกจากกัน และทำการแยกกราวด์ (Isolated Ground) ระหว่างวงจรกำลังและวงจรควบคุม เพื่อลดสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้น
- เลือกใช้ตัวเก็บประจุและมอสเฟสที่มีค่าความต้านทานแฝง ESR และ  $R_{DS}$  ตามลำดับให้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้อุปกรณ์สามารถทำงานใกล้เคียงกับสภาวะอุดมคติ และสามารถลดสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้นได้

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการแก้ไขปัญหา EMI ที่เกิดขึ้นดังกล่าวโดยใช้หลักการข้างต้น พบว่ายังไม่สามารถที่จะแก้ปัญหารบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นนี้จะต้องถูกทำการศึกษาและแก้ไขต่อไปในอนาคต

## บรรณานุกรม

- [1] Faisal H. Khan, Leon M. Tolbert, "5 kW Multilevel DC-DC Converter for Hybrid Electric and Fuel Cell Automotive Applications," **IEEE/IAS.**, Sept. 2007. pp. 628 – 635.
- [2] Faisal H. Khan, Leon M. Tolbert, "A 5 kW Bi-directional Multilevel Modular DC-DC Converter (MMCCC) Featuring Built in Power Management for Fuel Cell and Hybrid Electric Automobiles," **IEEE/VPPC.**, Sept. 2007. pp. 208 - 214.
- [3] Faisal H. Khan, Leon M. Tolbert, "A Multilevel Modular Capacitor-Clamped DC-DC Converter," **IEEE Transactions on Industry Applications.**, vol.43, no.6, Nov.-Dec. 2007. pp. 1628 - 1638.
- [4] Faisal H. Khan, Leon M. Tolbert, "Bi-directional power management and fault tolerant feature in a 5-kW multilevel dc-dc converter with modular architecture," **IET Power Electronics.**, vol.2, no.5, Sept. 2009. pp. 595 - 604.
- [5] Faisal H. Khan, Leon M. Tolbert, "Generating isolated outputs in a multilevel modular capacitor clamped dc-dc converter (MMCCC) for hybrid electric and fuel cell vehicles," **IEEE/PESC.**, June 2008. pp. 967 - 973.
- [6] Faisal H. Khan, Leon M. Tolbert, William E. Webb, "Hybrid Electric Vehicle Power Management Solutions Based on Isolated and Nonisolated Configurations of Multilevel Modular Capacitor-Clamped Converter," **IEEE Transactions on Industrial Electronics.**, vol.56, no.8, Aug. 2009. pp. 3079 - 3095.
- [7] Faisal H. Khan, Leon M. Tolbert, "Multiple-Load-Source Integration in a Multilevel Modular Capacitor-Clamped DC-DC Converter Featuring Fault Tolerant Capability," **IEEE Transactions on Power Electronics.**, vol.24, no.1, Jan. 2009. pp. 14 - 24.
- [8] Faisal H. Khan, Leon M. Tolbert, William E. Webb, "Start-Up and Dynamic Modeling of the Multilevel Modular Capacitor-Clamped Converter," **IEEE Transactions on Power Electronics.**, vol.25, no.2, Feb. 2010. pp. 519 - 531.
- [9] Zhguo Pan, Fan Zhang, Fang Z. Peng, "Power losses and efficiency analysis of multilevel dc-dc converters," **IEEE/APEC.**, vol.3, March 2005. pp. 1393 - 1398.
- [10] Fang Z. Peng, Fan Zhang, "A Novel compact DC/DC converter for 42 V systems," **Power Electronics in Transportation.**, 2002. pp. 143 - 148.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Fang Z. Peng, Fan Zhang, Zhaoming Qian, "Study of the multilevel converters in DC-DC applications," *IEEE/PESC.*, vol.2, June 2004. pp. 1702 - 1706.
- [12] H. Chung, A. Ioinovici, "Development of a generalized switched-capacitor DC/DC converter with bi-directional power flow," *IEEE/ISCAS.*, vol.3, May 2000. pp. 499 - 502.
- [13] On-Cheong Mak, Yue-Chung Wong, Adrian Ioinovici, "Step-up DC Power Supply Based on a Switched-Capacitor Circuit," *IEEE Transactions on Industrial Electronics.*, vol.42, no.1, Feb. 1995. pp. 90 - 97.
- [14] Fang Z. Peng, Fan Zhang, Zhaoming Qian, "A magnetic-less DC-DC converter for dual voltage automotive systems," *IAS.*, vol.2, 2002. pp. 1303 - 1310.
- [15] Henry S. H. Chung, W. C. Chow, S. Y. R. Hui, Stephen T. S. Lee, "Development of a switched-capacitor DC-DC converter with bidirectional power flow," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications.*, vol.47, no.9, Sep 2000. pp. 1383 - 1389.
- [16] Nichocon Co. Ltd., **Technical notes on Aluminum Electrolytic Capacitors**, 2010
- [17] Michael L. Gasperi, "Life prediction modeling of bus capacitors in AC variable-frequency drives," *IEEE Transactions on Industry Applications.*, vol.41, no.6, Nov.-Dec. 2005. pp. 1430 - 1435.
- [18] Amine Lahyani, Pascal Venet, Guy Grellet, Pierre-Jean Viverge, "Failure prediction of electrolytic capacitors during operation of a switchmode power supply," *IEEE Transactions on Power Electronics.*, vol.13, no.6, Nov. 1998. pp. 1199 - 1207.
- [19] Sriram Kumar Maddula, Juan Carlos Balda, Pierre-Jean Viverge, "Lifetime of Electrolytic Capacitors in Regenerative Induction Motor Drives," *IEEE/PESC.*, June 2005. pp. 153-159.
- [20] I. T. Joliffe, 2002. **Principal Component Analysis**. Springer. 2nd edition.
- [21] J. Wesley Hines, 1997. **Fuzzy and Neural Approaches in Engineering**. John Wiley & Sons, Inc.
- [22] Powersim Inc, 2010. **PSIM User's Guide Version**. Powersim Inc.  
<http://www.powersimtech.com>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] MathWorks Inc, 2003. **Mathlab User's Guide Version 6**. MathWorks Inc.  
<http://www.mathworks.com>.
- [24] Surin Khomfoi, Leon M. Tolbert, "Fault Diagnosis and Reconfiguration for Multilevel Inverter Drive Using AI-Based Techniques," **IEEE Transactions on Industrial Electronics.**, vol.54, no.6, Dec. 2007. pp. 2954 - 2968.
- [25] Surin Khomfoi, Leon M. Tolbert, "Fault Diagnostic System for a Multilevel Inverter Using a Neural Network," **IEEE Transactions on Power Electronics.**, vol.22, no.3, May 2007. pp. 1062 - 1069.
- [26] Surin Khomfoi, Leon M. Tolbert, "Fault Diagnosis System for a Multilevel Inverter Using a Principal Component Neural Network," **IEEE/PESC.**, June 2006. pp. 1 - 7.
- [27] Surin Khomfoi, Leon M. Tolbert, "A Diagnostic Technique for Multilevel Inverters Based on a Genetic-Algorithm to Select a Principal Component Neural Network," **IEEE/APEC.**, March 2007. pp. 1497 - 1503.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# PROCEEDINGS VOL. 1

PW - Electrical Power System  
PE - Power Electronics  
CT - Control System and Instrument Technology  
CP - Computer and Information Technology



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๒  
๒๘-๓๐ ตุลาคม ๒๕๕๒ โรงแรมทวาราวดี รีสอร์ท จ.ปราจีนบุรี

32<sup>nd</sup> Electrical Engineering Conference  
28-30 October 2009 Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand



จัดการประชุมโดย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
หลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชา  
เทคโนโลยีการจัดการระบบสารสนเทศ  
และภาควิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ทั้งนี้ ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารด้วย

# วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแบบสองทิศทางที่ปราศจากตัวเหนี่ยวนำ สำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก

## Bidirectional Modular Multilevel DC - DC Inductorless Converter for DC Microgrid Applications

ปราการ อินทพัฒน์<sup>1</sup>, ประภาส ไพรสุวรรณ<sup>1</sup>, สุรินทร์ คำฝอย<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

<sup>2</sup>ศูนย์นวัตกรรมระบบพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง แขวงลำปาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร/โทรสาร 0-2326-4550

Email : s8010517@kmitl.ac.th , kpprapar@kmitl.ac.th , kkhsurin@kmitl.ac.th

### บทคัดย่อ

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางได้ถูกพัฒนาขึ้น ที่มีความสามารถแปลงแรงดันขึ้นและลงเสมือนเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแบบกระแสตรง โดยอาศัยชุดอุปกรณ์สวิตช์กำลังหลายตัว ซึ่งวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางมีความเหมาะสมอย่างยิ่งกับการประยุกต์ใช้งานในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก เนื่องจากระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กต้องการคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถควบคุมการจ่ายพลังงานได้สองทิศทาง เพื่อใช้สำหรับเชื่อมโยงระหว่างแบตเตอรี่หรือแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียน กับระบบไฟฟ้ากระแสตรง อีกทั้งคอนเวอร์เตอร์นี้ได้ถูกออกแบบมาให้ใช้งานกับรูปแบบการสวิตช์อย่างง่าย และมีน้ำหนักเบา ในงานวิจัยนี้ได้แสดงทั้งผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และผลจากการทดสอบ เพื่อใช้ยืนยันหลักการที่ได้นำเสนอ

คำสำคัญ: ระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก, วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง

### Abstract

A bidirectional modular inductorless dc-dc converter is developed. The proposed dc-dc converter can step up and step down output voltage as a dc transformer function by using a duplicated switching module. The suitable application of the proposed dc-dc converter is a dc microgrid because a dc microgrid requires a bidirectional dc-dc converter to interface between energy storage or renewable energy sources and the dc grid. This dc-dc converter can use a simple switching function with light weight design. The simulation study and experimental result are also performed to confirm the proposed methodology.

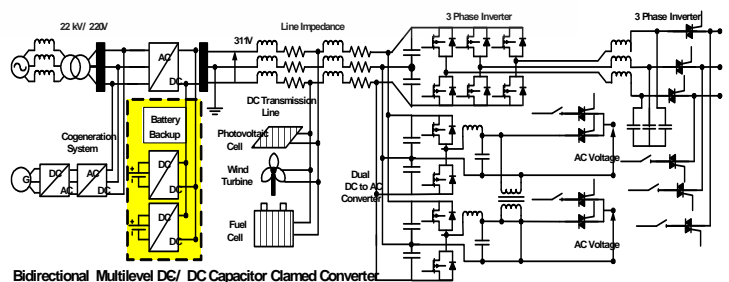
Keyword: dc microgrid , a modular inductorless dc-dc converter

### 1. บทนำ

การใช้พลังงานจากทรัพยากรธรรมชาติจำพวกก๊าซธรรมชาติ น้ำมันปิโตรเลียม ถ่านหิน เพื่อนำมาผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า ทรัพยากรเหล่านี้ทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศ ดังนั้นเพื่อเป็นการบรรเทาปัญหาจึงเกิดแนวคิดในการส่งจ่ายระบบไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก(DC Microgrid) ดังรูปที่ 1 สามารถประยุกต์ใช้กับพลังงานทดแทน ซึ่งข้อดีของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กมีดังต่อไปนี้

- อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบมีขนาดเล็กกะทัดรัดเนื่องจากใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แทนการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าในระบบส่งจ่าย (Transmission System)
- เมื่อระบบจำหน่าย(Distribution System) เกิดการลัดวงจรก็จะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบจำหน่ายอื่นๆ
- ระบบสามารถทำงานได้อย่างโดดเดี่ยว(Standalone) โดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานสำรองจากแบตเตอรี่(Battery Backup)
- สามารถใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนเช่น เซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลม เซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น

การส่งจ่ายด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กในรูปที่ 1 ประกอบไปด้วยอินเวอร์เตอร์สามเฟส (3 Phase Inverter) วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับแบบคู่ขนาน (Dual DC-AC Converter) วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่ไร้ตัวเหนี่ยวนำแบบสองทิศทาง (Bidirectional Multilevel DC-DC Inductorless Converter) เป็นต้น



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

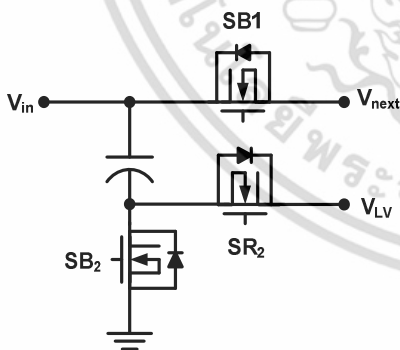
บทความนี้ได้ทำการสร้างและศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก ซึ่งทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างบัสแรงดันสูงของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นระบบไฟฟ้ากำลัง กับบัสแรงดันต่ำของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นแบตเตอรี่ โดยวงจรนี้สามารถใช้ในกรณีที่แบตเตอรี่ไม่สามารถที่จะต่อเข้ากับระบบได้โดยตรง เพราะแรงดันของแบตเตอรี่น้อยกว่าแรงดันที่บัสแรงดันสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรแปลงผันไฟฟ้าตรงเพื่อเพิ่มแรงดันให้มีค่าเท่ากับแรงดันที่บัสแรงสูง

## 2. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง

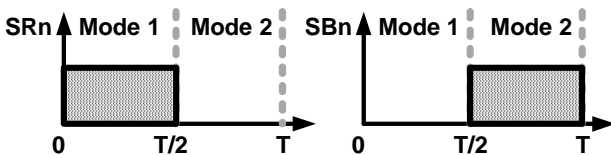
วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางที่ไร้ตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งมีข้อดีในหลายๆด้านดังนี้

- สามารถผลิตแรงดันเอาต์พุตที่มีคุณภาพสูง
- สามารถควบคุมทิศทางการไหลของพลังงานไฟฟ้าได้ 2 ทิศทาง (Bidirectional) ระหว่างบัสแรงดันต่ำและบัสแรงดันสูง
- สามารถกำจัดความผิดปกติ (Bypass Fault) ที่เกิดขึ้นได้
- อุปกรณ์มีน้ำหนักเบาเนื่องจากไม่มีตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) เป็นองค์ประกอบ

โครงสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลต่อเรียงกันอยู่เป็นชุดๆ โดยแต่ละชุดประกอบไปด้วยสวิตช์กำลัง (Power Switch) 3 ตัวและตัวเก็บประจุ 1 ตัว



รูปที่ 2 ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล 1 โมดูล



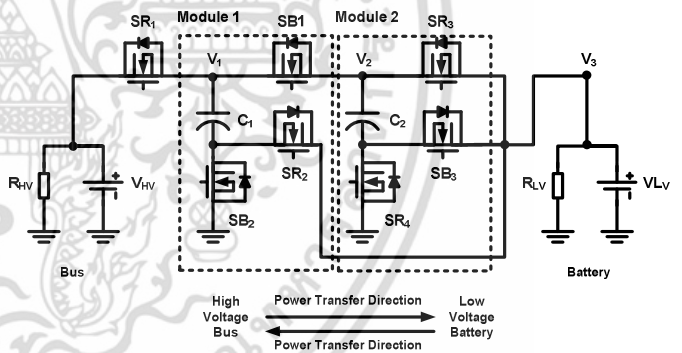
รูปที่ 3 ช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์กำลัง SRn และ SBn

## 3. หลักการทำงาน

หลักการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง 3 ระดับในรูปแบบที่ 4 มีโหมดการทำงาน 2 โหมดคือ โหมดการทำงานที่พลังงานไหลจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ และโหมดการทำงานที่พลังงานไหลจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง (บัสแรงดันสูงคือระบบไฟฟ้าส่วนบัสแรงดันต่ำคือแบตเตอรี่) ซึ่งแต่ละโหมดการทำงานจะมีสถานะการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง 2 สถานะ โดยสถานะแรกเป็นช่วงการทำงานพร้อมกันของสวิตช์กำลัง SR1 ถึง SR4 ส่วนสถานะที่สองเป็นช่วงการทำงานพร้อมกันของสวิตช์กำลัง SB1 ถึง SB3 ซึ่งช่วงเวลาการทำงานจะมีค่าเท่ากับ duty cycle (Duty Cycle) ที่ 50% ดังรูปที่ 3 และมีสถานะการทำงานของสวิตช์ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สถานะการทำงานของสวิตช์

สถานะการทำงานของสวิตช์	การชาร์จประจุ (↑) และ คายประจุ (↓)
SRn ON SBn OFF	$V_{HV} \rightarrow C_3 \uparrow + C_1 \uparrow$ $C_2 \downarrow \rightarrow C_1 \uparrow$
SRn OFF SBn ON	$C_3 \downarrow \rightarrow C_2 \uparrow + C_1 \uparrow$



รูปที่ 4 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง 3 ระดับแบบสองทิศทาง

## 4. หลักการการถ่ายโอนของพลังงานไฟฟ้า

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับสามารถถ่ายโอนพลังงานได้สองทิศทางระหว่างบัสแรงดันสูงกับบัสแรงดันต่ำ โดยบัสแรงดันสูงของคอนเวอร์เตอร์ต่อกับบัสของระบบไฟฟ้าส่วนบัสแรงดันต่ำของคอนเวอร์เตอร์ต่อกับแบตเตอรี่ ซึ่งการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงสูงกับแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำ ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\frac{V_{HV}}{V_{LV}} = n + 1 = R \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $V_{HV}$  คือ แรงดันไฟฟ้าด้านแรงดันสูงของคอนเวอร์เตอร์  
 $V_{LV}$  คือ แรงดันไฟฟ้าด้านแรงดันต่ำของคอนเวอร์เตอร์  
 $n$  คือ จำนวนชุดของคอนเวอร์เตอร์โมดูล  
 $R$  คือ อัตราการขยาย(Gain)

จากรูปที่ 4 ในวงจรมีชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล 2 ชุด จะได้ค่าอัตราการขยาย R เท่ากับ 3 ซึ่งหมายความว่า วงจรสามารถเพิ่มหรือลดระดับแรงดันได้ 3 เท่าของแรงดันด้านอินพุต ดังนั้นสามารถทราบทิศทางการไหลของพลังงานได้ดังนี้

- ทิศทางการไหลของพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปบัสแรงดันต่ำของคอนเวอร์เตอร์ที่ต่ออยู่กับแบตเตอรี่ เกิดขึ้นเมื่อต้องการชาร์จแบตเตอรี่ เพื่อสำรองพลังงานไว้ใช้ในยามจำเป็น
- ทิศทางการไหลของพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปบัสแรงดันสูงของคอนเวอร์เตอร์ที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้า เกิดขึ้นเมื่อต้องการดึงพลังงานสำรองจากแบตเตอรี่ เพื่อนำมาใช้งานในระบบไฟฟ้า

### 5. การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง ในโหมดการทำงานที่พลังงานไหลจากบัสแรงดันต่ำไปบัสแรงดันสูง และ โหมดการทำงานที่พลังงานไหลจากบัสแรงดันสูงไปบัสแรงดันต่ำ โดยใช้โปรแกรม Power simulation Demo 8

#### 5.1 โหมดการทำงานที่พลังงานไหลจากบัสแรงดันต่ำไปบัสแรงดันสูง



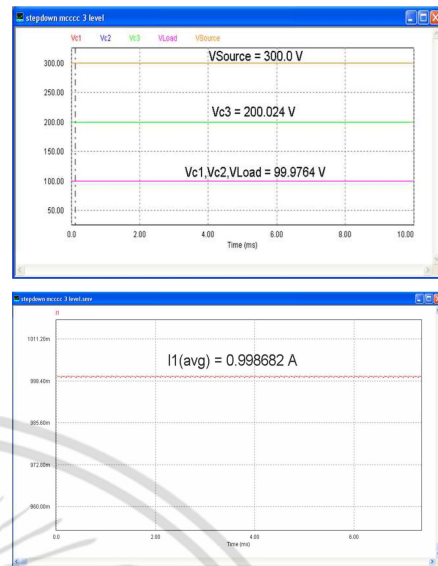
รูปที่ 5 แรงดันและกระแสเมื่อพลังงานไหลจากบัสแรงดันต่ำไปบัสแรงดันสูง

เมื่อจ่ายแรงดันไฟตรง 100 V ที่บัสแรงดันต่ำพบว่าแรงดันตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัวคือ  $C_1=100$  V  $C_2=199$  V และ  $C_3=299$  V ซึ่งเป็นแรงดันเอาท์พุท โดยผลที่ได้สอดคล้องกับหลักการที่ได้นำเสนอ และเมื่อทำการจ่ายโหลดขนาด 900 W กระแสที่ไหลในวงจรคือ 3 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2 โหมดการทำงานที่พลังงานไหลจากบัสแรงดันสูงไปบัสแรงดันต่ำ

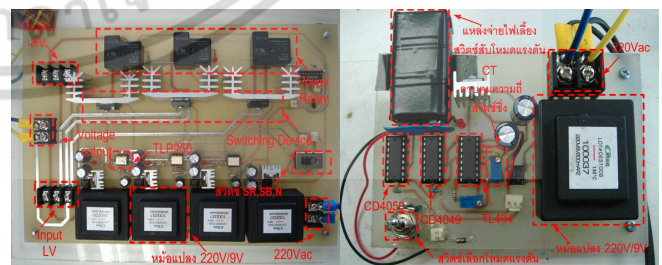


รูปที่ 6 แรงดันและกระแสเมื่อพลังงานไหลจากบัสแรงดันสูงไปบัสแรงดันต่ำ

เมื่อจ่ายแรงดันไฟตรง 300 V ที่บัสแรงดันสูงพบว่า แรงดันตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัวคือ  $C_3=200$  V  $C_2=100$  V และ  $C_1=100$  V ซึ่งเป็นแรงดันเอาท์พุท โดยผลที่ได้สอดคล้องกับหลักการที่ได้นำเสนอ และเมื่อทำการจ่ายโหลดขนาด 100 W กระแสที่ไหลในวงจรคือ 1 A

### 6. หลักการออกแบบ

การออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง โดยออกแบบให้มีพิกัดกำลังไฟฟ้าขนาด 1 kW ซึ่งในการออกแบบวงจรจะประกอบด้วยวงจรกำลังและวงจรควบคุม วงจรกำลังที่สร้างขึ้นจริงในรูปที่ 7(ก) มีหน้าที่เพื่อผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและสามารถเพิ่มหรือลดระดับแรงดันได้ ซึ่งวงจรกำลังจะประกอบด้วยมอสเฟสทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สวิตช์กำลังเพื่อผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยทำงานร่วมกับรีเลย์



(ก) วงจรกำลัง

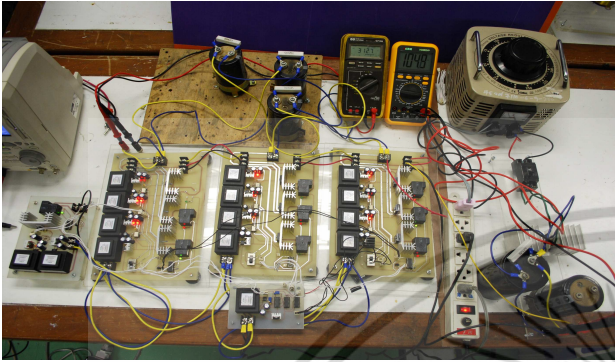
(ข) วงจรควบคุม

รูปที่ 7 วงจรกำลังและวงจรควบคุม

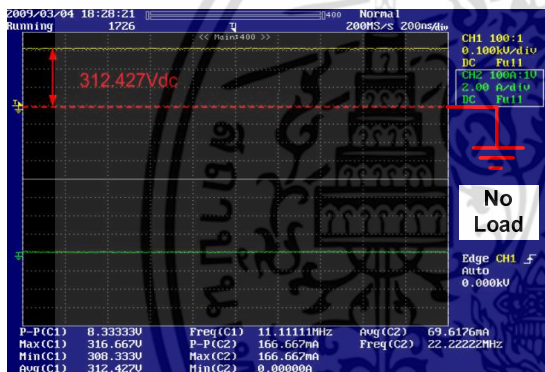
วงจรควบคุมที่สร้างขึ้นจริงในรูปที่ 7(ข) มีหน้าที่เพื่อผลิตสัญญาณควบคุมในการขับเคลื่อนของอุปกรณ์สวิตช์กำลังและสัญญาณควบคุมการตัดต่อรีเลย์ ซึ่งวงจรควบคุมจะทำงานสัมพันธ์กับวงจรกำลัง

## 7. ผลการทดสอบ

การทดสอบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางดังรูปที่ 8 จะทำการทดสอบในโหมดการทำงานที่พลังงานไหลจากบัสแรงดันต่ำไปบัสแรงดันสูง ในสภาวะที่มีและไม่มีภาระทางไฟฟ้า โดยได้ผลการทดลองดังนี้



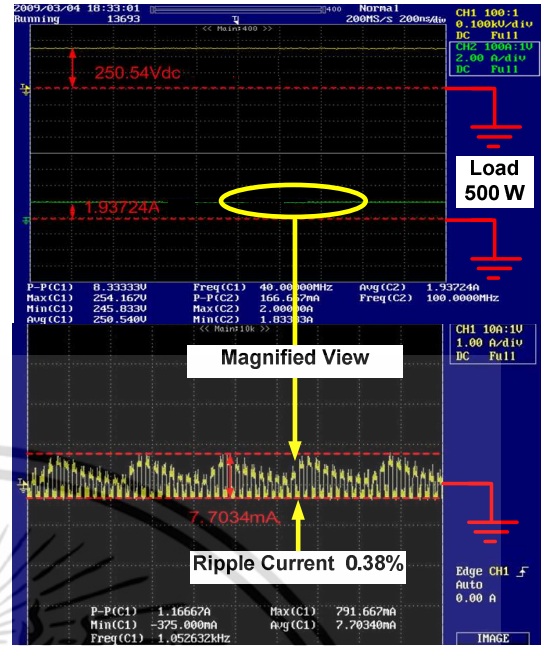
รูปที่ 8 วงจรที่พร้อมทดสอบ



รูปที่ 9 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตในโหมดการทำงานที่พลังงานไหลจากบัสแรงดันต่ำไปบัสแรงดันสูง

จากการทดสอบพบว่า ในโหมดการทำงานที่พลังงานไหลจากบัสแรงดันต่ำไปบัสแรงดันสูงที่ไม่มีภาระทางไฟฟ้าได้ผลดังรูปที่ 9 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตรงที่ด้านอินพุตประมาณ 105 V วงจรสามารถเพิ่มแรงดันเอาต์พุตได้ 3 เท่าของแรงดันอินพุต โดยได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุต 312.427 V

เมื่อทำการจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ 400 W จะได้ผลของแรงดันเอาต์พุตดังรูปที่ 10 ซึ่งคล้ายกันกับผลการทดสอบในสภาวะที่ไม่มีภาระทางไฟฟ้า แต่แรงดันเอาต์พุตที่ได้มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากไม่มีแรงดันอินพุตอ้างอิงเพื่อมาเปรียบเทียบจึงทำให้แรงดันอินพุตไม่สามารถปรับเพิ่มขึ้นเองได้ นอกจากนี้รูปคลื่นกระแสเกิดการกระเพื่อม (Ripple Current) เนื่องจากตัวเก็บประจุในวงจรชาร์จและคายประจุ กล่าวคือในช่วงแรกของการชาร์จประจุค่ากระแสเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งประจุเต็ม หลังจากนั้นตัวเก็บประจุจะค่อยๆคายประจุทำให้กระแสลดลง ซึ่งกระแสการกระเพื่อมเพิ่มขึ้นคิดเป็น 0.38 % ของค่าเฉลี่ยกระแสเอาต์พุต



รูปที่ 10 แรงดันและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตในโหมดการทำงานที่พลังงานไหลจากบัสแรงดันต่ำไปบัสแรงดันสูง

## 8. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแบบสองทิศทางที่ไร้ตัวเหนี่ยวนำสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยได้ทำการสร้างเครื่องต้นแบบที่พิกัด 1 kW เพื่อทำการทดสอบ ซึ่งการทดสอบนี้ได้เลือกวงจรที่ปราศจากตัวเหนี่ยวนำทำให้วงจรมีขนาดเล็กกะทัดรัด และผลการทดลองซึ่งให้เห็นว่าวงจรสามารถเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้มีความสอดคล้องกับหลักการที่ได้นำเสนอ

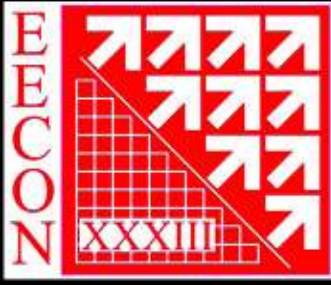
## 9. กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang Research Fund and Thailand Research Fund

## เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Kakigano, Y. Miura, T. Ise, R.Uchida "DC Voltage Control of DC Micro-grid for Super High Quality Distribution", Power Conversion Conference, Japan, April 2-5, 2007, pp. 518-525
- [2] F. H. Khan, L. M. Tolbert, "A Multilevel Modular Capacitor Clamped DC-DC Converter", Power Conversion Conference, Nagoya, Japan, April 2-5, 2007, pp. 518-525
- [3] F. H. Khan, L. M. Tolbert, "Multiple-Load-Source Integration in a Multilevel Modular Capacitor-Clamped DC-DC Converter Featuring Fault Tolerant Capability", Applied Power Electronics Conference, 2007, pp. 361-367

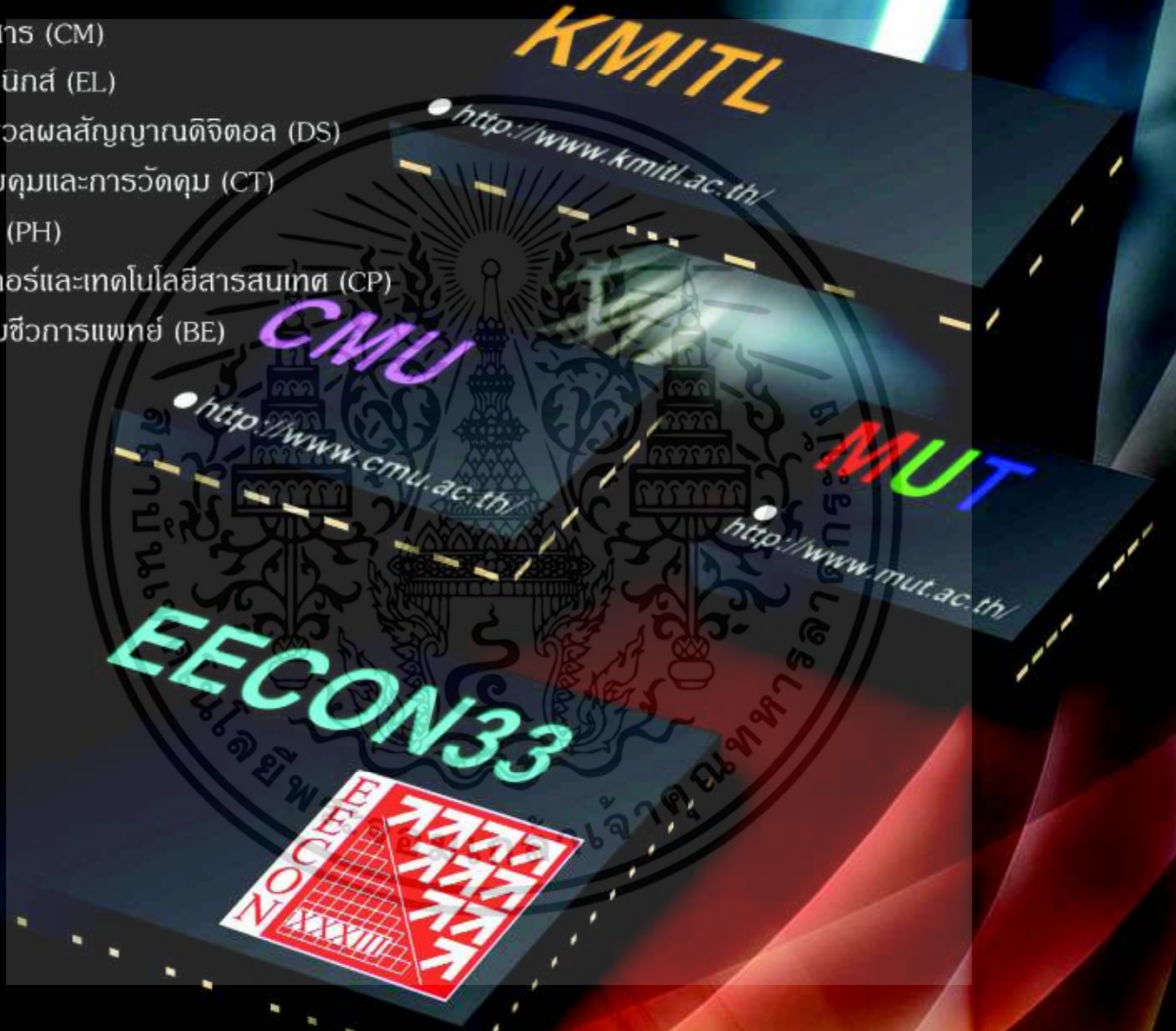
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๓

33<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-33)

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



ร่วมจัดโดย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



111 Years Engineering  
Innovation

# การตรวจจับค่าอายุการใช้งานตัวเก็บประจุในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ Capacitor Lifetime Monitoring System for Multilevel Modular Capacitor Clamped DC – DC Converter

ปรภากร อินทพัฒน์<sup>1</sup> ประกาย ไพรสุวรรณ<sup>1</sup> สุรินทร์ คำฝอย<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

<sup>2</sup>ศูนย์วิศวกรรมระบบพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์ : 0-2326-4550

Email : mr.pracon@gmail.com , kpprapar@kmitl.ac.th , kkhsurin@kmitl.ac.th

## บทคัดย่อ

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับมีความสามารถในการผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่หลากหลายระดับโดยอาศัยตัวเก็บประจุที่ทำงานร่วมกับอุปกรณ์สวิตซ์กำลังเพื่อผลิตแรงดันไฟฟ้าตามหลักการชาร์ทและดิชชาร์ตแบบสมดุล แต่อย่างไรก็ตามตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่อยู่ในวงจรจะมีอายุการใช้งานที่ไม่เท่ากันเนื่องจากตัวเก็บประจุที่ผลิตแรงดันไฟฟ้าในระดับแรงดันสูงจะมีค่าอายุการใช้งานสั้นกว่าตัวเก็บประจุที่ผลิตแรงดันไฟฟ้าในระดับแรงดันต่ำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการตรวจจับค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุด้วยวิธี PCR (Principal Component Regression Model)

คำสำคัญ: วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ , อายุการใช้งานตัวเก็บประจุ , PCR

## Abstract

A Multilevel Modular Capacitor Clamped DC – DC Converter can supply a multilevel dc output voltage by using capacitors and power switches together with a method of charge and discharge balance. Each capacitor lifetime is somehow various; the higher voltage will lead to a short lifetime of a capacitor than the low voltage one. Therefore, the prediction of capacitor lifetime methodology is proposed in this research by utilizing PCR model (Principal Component Regression Model)

Keywords: Multilevel Modular Capacitor Clamped DC – DC Converter, Capacitor Lifetime , PCR

## 1. บทนำ

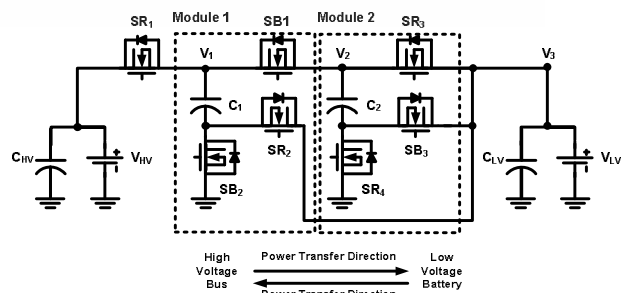
ระบบไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กเป็นระบบที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าให้กับหมู่บ้านหรือชุมชนได้เองจากพลังงานทดแทน ซึ่งระบบไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กจะประกอบไปด้วยชุดอุปกรณ์แปลงผันกำลังไฟฟ้า (Converter) หนึ่งชิ้นนั้นคือวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ [1] ทำหน้าที่ผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

หลายระดับที่แตกต่างกัน โดยใช้หลักของการชาร์ทและดิชชาร์ตแบบสมดุลของตัวเก็บประจุ แต่การชาร์ทและดิชชาร์ตในแต่ละครั้งนั้น ทำให้เกิดแรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสเพิ่ม ซึ่งค่าการกระเพื่อมนี้เองสามารถส่งผลกระทบต่อค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุให้มีค่าลดลงและอาจนำไปสู่การเกิดความเสียหายได้ กล่าวคือเมื่อเวลาผ่านไปวัสดุภายในรวมถึงโครงสร้างทางกายภาพของตัวเก็บประจุจะเปลี่ยนแปลงไปทำให้ค่าการเก็บประจุลดลง ดังนั้นการตรวจจับค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งกับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ

การวิเคราะห์ค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุได้ถูกพัฒนามาจากทฤษฎีของ Arrhenius โดยเป็นแบบจำลองในการประมาณค่าอายุการใช้งานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่ถูกอธิบายใน [2] แต่อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุด้วยวิธีข้างต้นจะมีความยุ่งยากซับซ้อนและอาจมีความผิดพลาดได้ เนื่องจากจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรต่างๆจากโรงงานผู้ผลิต ซึ่งค่าตัวแปรต่างๆมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไปขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ด้วยเหตุนี้เองจึงได้สร้างระบบการตรวจจับค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุขึ้นมาใหม่โดยการใช้วิธี PCR (Principal Component Regression Model)

## 2. หลักการตรวจจับค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง 3 ระดับ ดังรูปที่ 1 ที่มีชุดตรวจจับข้อมูล (Data Sensor) การทำงานของตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์แต่ละตัว เพื่อใช้ในการตรวจจับค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง 3 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่มีการเสีย | ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ที่แปลงเนื้อหาก และด้วยอิงอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกแห่งที่มีภาระนี้ ไปใช้  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (ECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สจล. มห. มทม.

The 33<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference, 1-3 December 2010, Organized by KMITL, CMU, MUT

หลักการตรวจจับค่าอายุการใช้งานเป็นแบบจำลองที่ใช้ในการประมาณค่าอายุการใช้งานสูงสุดของตัวเก็บประจุที่ยังคงสามารถทำงานได้อย่างปกติ โดยแบบจำลองในการคำนวณหาอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุสามารถหาได้จากสมการที่ 1 [3]

$$L = L_0 \times M_V \times 2^{\frac{T_{core,max} - T_{core}}{10}} \quad (1)$$

เมื่อ

- L คือ ค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุ (hours)
- $L_0$  คือ ค่าอายุการใช้งานสูงสุด (จากโรงงานผู้ผลิต, hours)
- $T_{core}$  คือ ค่าอุณหภูมิภายในของตัวเก็บประจุ ( $^{\circ}C$ )
- $T_{core,max}$  คือ ค่าอุณหภูมิสูงสุดในตัวเก็บประจุ (จากโรงงานผู้ผลิต,  $^{\circ}C$ )
- $M_V$  คือ ค่าอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้า (จากโรงงานผู้ผลิต)

ค่าอุณหภูมิภายในของตัวเก็บประจุจะไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรง ในการหาค่าอุณหภูมิดังกล่าวนั้นจะเป็นการประมาณค่าอุณหภูมิให้มีค่าใกล้เคียงกับของจริง โดยใช้แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนร่วมกับแบบจำลองทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$T_{core} = T_{ambient} + (\Delta T \times M_T) \quad (2)$$

โดยที่

$$\Delta T = P_{ESR} \times T_{resistance} \quad (3)$$

และ

$$P_{ESR} = I^2 \times ESR \quad (4)$$

เมื่อ

- $T_{ambient}$  คือ ค่าอุณหภูมิสภาพแวดล้อมการทำงาน ( $^{\circ}C$ )
- $\Delta T$  คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ( $^{\circ}C$ )
- $M_T$  คือ ค่าอัตราส่วนกระแสไฟฟ้าที่ระเหิด (จากโรงงานผู้ผลิต)
- $P_{ESR}$  คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากค่าความต้านทานอนุกรมสมมูลย์ (W)
- $T_{resistance}$  คือ ค่าความต้านทานของอุณหภูมิในเนื้อวัสดุ ( $^{\circ}C / W$ )
- I คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (A)
- ESR คือ ค่าความต้านทานอนุกรมสมมูลย์ของตัวเก็บประจุ ( $m\Omega$ )

แต่อย่างไรก็ตามจากหลักการข้างต้นพบว่าจะต้องใช้ชุดตรวจจับข้อมูลการทำงานของตัวเก็บประจุเป็นจำนวนมาก อีกทั้งในการคำนวณจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากโรงงานผู้ผลิตที่หลากหลายตัวแปร ซึ่งค่าตัวแปรดังกล่าวจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อตัวเก็บประจุถูกใช้งานไปแล้วในช่วงเวลาหนึ่ง ทำให้การคำนวณอาจมีความผิดพลาดได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการลดชุดตรวจจับข้อมูลและลดความผิดพลาดในการคำนวณ จึงได้สร้างระบบการวิเคราะห์ด้วยวิธี PCR โดยมีขั้นตอนการแก้ปัญหาดังนี้

1. เก็บข้อมูลอินพุตเมตริกซ์ X ดังสมการที่ 5 ประกอบด้วย 5 ตัวแปร (Variable) คือ แรงดัน กระแส แรงดันกระเพื่อม กระแสกระเพื่อม

และอุณหภูมิ ที่มี 120 ค่าสังเกต (Observation) คือ แถวที่ 1 ถึง 60 เป็นค่าสังเกตของตัวเก็บประจุในสภาวะการทำงานปกติ และแถวที่ 61 ถึง 120 เป็นค่าสังเกตของตัวเก็บประจุในสภาวะการทำงานที่ไม่ปกติ ซึ่งในการเก็บข้อมูลจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันทางด้านบัสแรงดันต่ำ เพื่อสังเกตพฤติกรรมการทำงานของตัวเก็บประจุ

$$X = \begin{bmatrix} \text{ตัวเก็บประจุทำงานปกติ} \\ \text{ตัวเก็บประจุทำงานไม่ปกติ} \end{bmatrix}_{60 \times 5} \quad (5)$$

2. สมมติค่าเป้าหมาย (Target) ของเมตริกซ์ Y ดังสมการที่ 6 โดยแถวที่ 1 ถึง 60 เป็นค่าเป้าหมายของตัวเก็บประจุในสภาวะการทำงานปกติคือ [ 1 ] และแถวที่ 61 ถึง 120 เป็นค่าเป้าหมายของตัวเก็บประจุในสภาวะการทำงานที่ไม่ปกติคือ [ 0 ]

$$Y = \begin{bmatrix} [ 1 ]_{60 \times 5} \\ [ 0 ]_{60 \times 5} \end{bmatrix}_{120 \times 5} \quad (6)$$

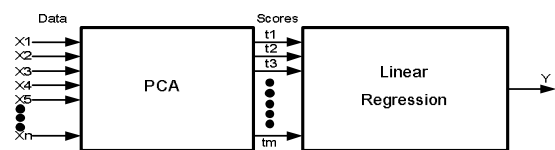
3. นำข้อมูลดิบที่ได้จากเมตริกซ์ X ไปทำการหา zscore เพื่อให้ข้อมูลในแต่ละตัวแปรมีความสำคัญเท่ากันทุกตัว และทำการแบ่งกลุ่มของข้อมูลแบบคู่และคี่ (Even and Odd) เพื่อใช้ในการฝึกฝน (Train) และทดสอบ (Test) โดยข้อมูล 60 ตัวแรกจะถูกนำไปฝึกฝน ส่วนข้อมูลอีก 60 ตัวที่เหลือจะถูกนำไปทดสอบ
4. นำข้อมูลมาทำการหาค่า Correlation Coefficient และค่า Covariance เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร
5. ทำการแปลง PCA [4] โดยใช้สมการที่ 7 เพื่อลดขนาดของข้อมูลทางด้านอินพุตตั้งรูปที่ 2 โดยการแปลงข้อมูลจากพื้นที่ (Space) เดิมไปยังพื้นที่ใหม่ จึงทำให้ข้อมูลในพื้นที่ใหม่เป็นอิสระต่อกัน

$$T_{m \times k} = X_{m \times n} * PC_{n \times k} \quad (7)$$

เมื่อ

- T คือ เมตริกซ์ผลลัพธ์ที่มีมิติ  $m \times k$  (ข้อมูลที่ถูกเปลี่ยนแปลง)
- X คือ เมตริกซ์ข้อมูลที่มีมิติ  $m \times n$
- PC คือ เมตริกซ์โพลที่มีมิติ  $n \times k$
- m คือ จำนวนของค่าสังเกต
- n คือ มิติของตัวแปรค่าเริ่มต้น
- k คือ จำนวนของค่า PC ที่ถูกเก็บไว้

6. ทำการ Regression เพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างแบบจำลอง (Model) การตรวจจับ โดยสามารถเลือกค่าตัวแปรได้จากจากการหาค่า Average Error และ Condition Number ที่น้อยที่สุด



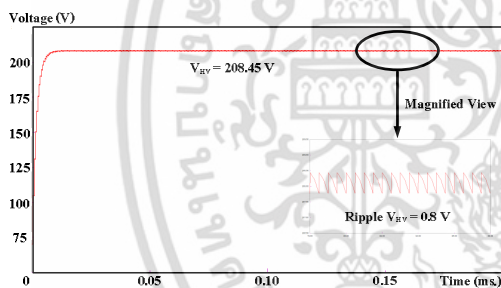
รูปที่ 2 กระบวนการแปลง PCA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

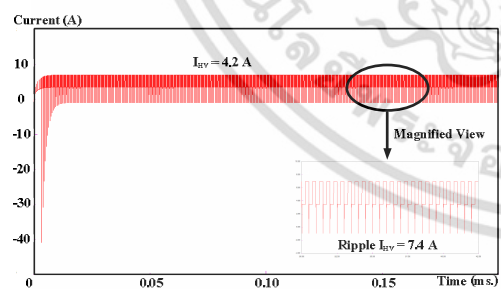
### 3. การจำลองหลักการการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองจะใช้โปรแกรม Psim 9.0 โดยทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 70 V ที่บัสแรงดันต่ำเพื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้า 30 Ω ที่บัสแรงดันสูง และในวงจรได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีพิกัด 3900 uF ซึ่งการจำลองจะสังเกตค่าตัวแปรการทำงานของตัวเก็บประจุ C<sub>HV</sub> เนื่องจากตัวเก็บประจุดังกล่าวจะรับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามากที่สุด จึงทำให้มีอายุการใช้งานสั้นกว่าตัวเก็บประจุตัวอื่นๆที่อยู่ในวงจร

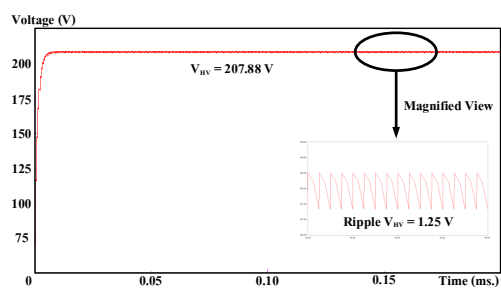
การจำลองการทำงานของตัวเก็บประจุ C<sub>HV</sub> ในสภาวะปกติ เป็นสภาวะที่ตัวเก็บประจุสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ตามค่าตัวแปรของโรงงานผู้ผลิต ผลการจำลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 3 คือแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C<sub>HV</sub> ในสภาวะปกติ 208.45 V ส่วนรูปที่ 4 คือกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C<sub>HV</sub> ในสภาวะปกติ 4.2 A ในทำนองเดียวกันการจำลองตัวเก็บประจุ C<sub>HV</sub> ในสภาวะไม่ปกติ พบว่าค่าการกระเพื่อมของแรงดันและกระแสเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยได้ทำการจำลองให้ตัวเก็บประจุ C<sub>HV</sub> มีค่าการเก็บประจุเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมคือ 3900 uF เป็น 1950 uF ผลการจำลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 5 คือแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C<sub>HV</sub> ในไม่สภาวะปกติ 207.88 V ส่วนรูปที่ 6 คือกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C<sub>HV</sub> ในไม่สภาวะปกติ 3.8 A



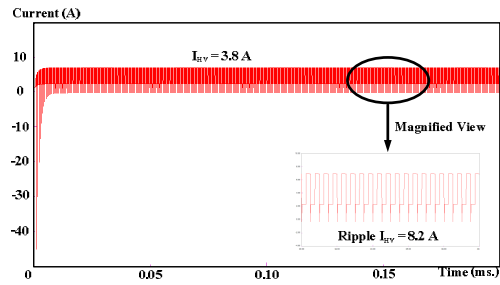
รูปที่ 3 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C<sub>HV</sub> ในสภาวะปกติ



รูปที่ 4 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C<sub>HV</sub> ในสภาวะปกติ



รูปที่ 5 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C<sub>HV</sub> ในสภาวะไม่ปกติ

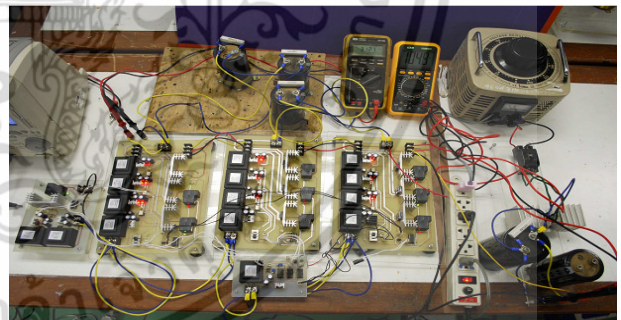


รูปที่ 6 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C<sub>HV</sub> ในสภาวะไม่ปกติ

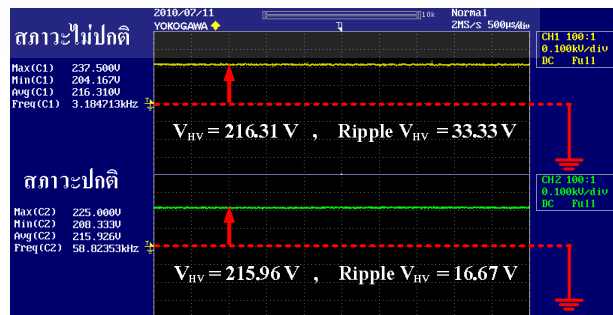
### 4. ผลการทดสอบ

การตรวจจับค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุได้ทำการสร้างเครื่องต้นแบบของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง 3 ระดับพิกัด 1 kW ดังรูปที่ 7 โดยจะทดสอบวงจรให้ทางด้านบัสแรงดันสูงถูกเชื่อมต่อกับภาระทางไฟฟ้า 20 Ω ส่วนทางด้านบัสแรงดันต่ำถูกเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 75 V ซึ่งในการทดสอบได้เลือกตัวเก็บประจุ C<sub>HV</sub> เพื่อสังเกตค่าตัวแปรต่างๆ เนื่องจากตัวเก็บประจุ C<sub>HV</sub> จะรับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามากที่สุด จึงทำให้มีอายุการใช้งานสั้นกว่าตัวเก็บประจุตัวอื่นๆที่อยู่ในวงจร

เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านบัสแรงดันต่ำเพื่อทดสอบวงจรในขณะที่ตัวเก็บประจุ C<sub>HV</sub> ทำงานอยู่ในสภาวะปกติ พบว่ามีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม 215.96 V และมีการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า 16.67 V ดังรูปที่ 8 ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีค่า 1.68 A และมีการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้า 7.49 A ดังรูปที่ 9



รูปที่ 7 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง 3 ระดับ พิกัด 1 kW

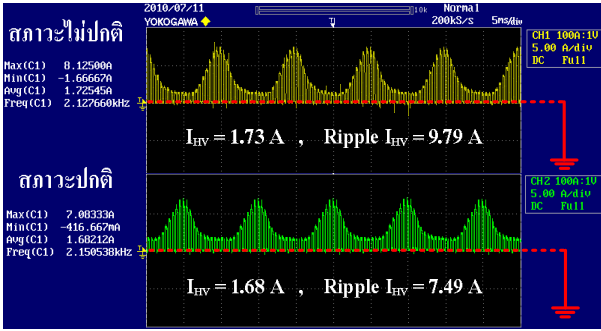


รูปที่ 8 แรงดันไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมที่ตกคร่อม C<sub>HV</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่มีการแจ้ง | ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ที่แห่งเดียว และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารที่แท้จริงที่มีภาระไปใช้  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (ECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สจล. มท. มทม.



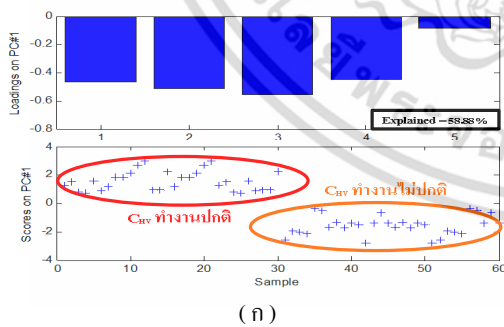


รูปที่ 9 กระแสไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากระเพื่อมที่ไหลผ่าน  $C_{HV}$

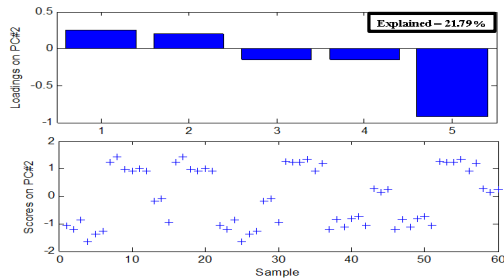
เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านบัสแรงดันต่ำ เพื่อทดสอบวงจรในขณะที่ตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  ทำงานอยู่ในสภาวะไม่ปกติค่าการเก็บประจุเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมคือ 3900  $\mu\text{F}$  เป็น 1950  $\mu\text{F}$  พบว่ามีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม 216.31 V และมีกระแสของแรงดันไฟฟ้า 33.33 V ดังรูปที่ 8 ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีค่า 1.73 A และมีกระแสกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้า 9.79 A ดังรูปที่ 9

จากการสุ่มเก็บตัวอย่างข้อมูลของตัวแปรที่ตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  เพื่อใช้ในการตรวจจับค่าอายุการใช้งานด้วยวิธี PCR ในโปรแกรม Matlab 6.67 พบว่าค่า PC ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสร้างแบบจำลองการทำนายคือ PC1 PC2 และ PC4 ดังรูปที่ 10 โดยมีค่า Average Error เท่ากับ 0.144 และมีค่า Condition Number เท่ากับ 14.98

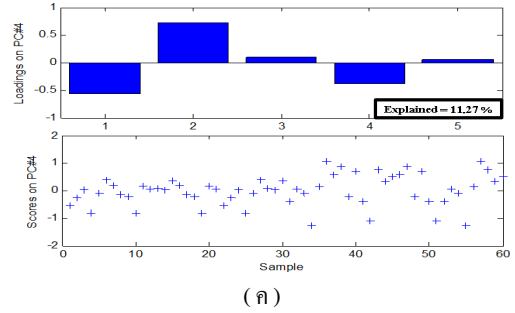
จากกราฟการแปลง PCA รูปที่ 10 (ก) พบว่าค่า PC1 สามารถแบ่งแยกข้อมูลของสภาวะการทำงานในตัวเก็บประจุ  $C_{HV}$  อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมีค่า Explained สูงสุดคือ 58.88% ส่วนกราฟรูปที่ 10 (ข) และ (ค) พบว่าไม่สามารถแบ่งแยกข้อมูลของสภาวะการทำงาน แต่จำเป็นต้องเก็บค่า PC2 และ PC4 นี้ไว้เพื่อรักษาข้อมูลบางอย่างที่จำเป็นต่อการสร้างแบบจำลอง โดยพิจารณาจากค่า Explained ที่มีค่ารองลงมา



(ก)



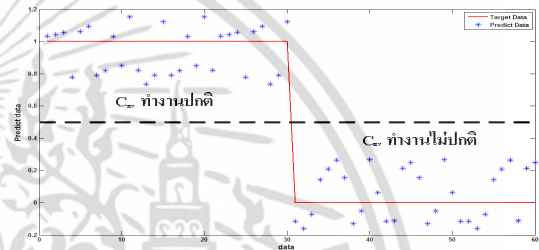
(ข)



(ค)

รูปที่ 10 กราฟการแปลง PCA (ก) PC1 (ข) PC2 และ (ค) PC4

เมื่อทราบค่าตัวแปรที่นำไปสร้างแบบจำลองในการตรวจจับค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุ ดังนั้นค่าตัวแปรที่ถูกเลือกดังกล่าวสามารถที่จะนำไปทดสอบและทำนาย (Predict) ได้ต่อไป ซึ่งผลการทดสอบที่ได้แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ผลการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างค่า Target กับ Predict Data

## 5. สรุป

การประยุกต์ใช้ PCR ในการตรวจจับค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับสามารถลดขนาดของข้อมูลทางด้านอินพุตและไม่ทำให้ข้อมูลที่สำคัญส่วนใหญ่สูญเสียไปกับการตัดตัวแปร ผลการทดสอบพบว่าตัวแปรที่สามารถสร้างแบบจำลองได้อย่างเหมาะสมมากที่สุดคือ แรงดันไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้ากระเพื่อม และกระแสไฟฟ้ากระเพื่อม ซึ่งแบบจำลอง PCR ที่ได้นำเสนอสามารถตรวจจับค่าอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] F. H. Khan, L. M. Tolbert, "A Multilevel Modular Capacitor Clamped DC-DC Converter", Industry Applications Conference, 2006, pp. 966 – 973.
- [2] Maddula, S.K., Balda, J.C., "Lifetime of Electrolytic Capacitors in Regenerative Induction Motor Drives", Power Electronics Specialists Conference, PESC 2005, pp. 153 – 159.
- [3] Hitachi Co.,Ltd., "Aluminum Electrolytic Capacitor Applications Guide", pp. 42 - 50.
- [4] S. Khomfoi, L. M. Tolbert, "Fault Diagnosis and Reconfiguration for Multilevel Inverter Drive Using AI-Based Techniques", Industrial Electronics, IEEE Transactions, 2007, pp. 2954 - 2968.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่มีการดึง | ทั้งต้น อีกทั้งยังมีให้ที่แหล่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารที่แท้จริงที่มีภาระไปใช้  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (ECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สจล. มห. มทม.



ECTI-CON 2011

KHON KAEN UNIVERSITY

8<sup>th</sup>

Electrical Engineering/ Electronics,  
Computer, Telecommunications and  
Information Technology (ECTI) Association,  
Thailand - Conference 2011

Khon Kaen, Thailand

May 17-19, 2011

Pullman Khon Kaen Raja Orchid Hotel

**ECTI**  
Association



**KHON KAEN  
UNIVERSITY**



**IEEE**  
THAILAND SESSION

# Capacitor Lifetime Monitoring for Multilevel Modular Capacitor Clamped DC to DC Converter

Pracan Inttpat<sup>1</sup> Prapart Paisuwanna<sup>1</sup> Surin Khomfoi<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup> Faculty of Engineering, <sup>2</sup> Center of Excellence for Innovative Energy Systems,  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok, 10520, THAILAND

**Abstract-** Capacitor lifetime monitoring for multilevel modular capacitor clamped dc to dc converter (M<sup>2</sup>C<sup>3</sup>) are presented in this paper. M<sup>2</sup>C<sup>3</sup> can supply a multilevel dc output voltage by using capacitors and power switches together with a method of charge and discharge balance. Each capacitor lifetime is somehow various; the higher voltage will lead to a shorter lifetime of a capacitor than the low voltage one. It is complex to monitor many capacitors in M<sup>2</sup>C<sup>3</sup> using a capacitor lifetime model because this model complexity has a mathematical model and nonlinear variables. Therefore, the prediction of capacitor lifetime methodology is proposed in this research by utilizing principal component regression model (PCR). A M<sup>2</sup>C<sup>3</sup> 1-kW prototype is developed. The experimental results are also performed to monitor a capacitor lifetime. The results show that PCR can be used to predict a capacitor life time in M<sup>2</sup>C<sup>3</sup> application; for this reason, the reliability of using M<sup>2</sup>C<sup>3</sup> can be increased.

## I. INTRODUCTION

In dc microgrid applications, a high efficiency converter is required to interface between the dc grid and energy storage or renewable energy sources [1]. A dc microgrid not only enables the use of renewable energy sources but also achieves high power efficiency. One of the promising converters is multilevel modular capacitor clamped dc to dc converter (M<sup>2</sup>C<sup>3</sup>) as clearly explained in [2-3]. M<sup>2</sup>C<sup>3</sup> can supply a multilevel dc output voltage by using capacitors and power switches together with a method of charge and discharge balance. Fig.1 shows that the M<sup>2</sup>C<sup>3</sup> is a inductorless multilevel dc to dc converter; however, M<sup>2</sup>C<sup>3</sup> will have a ripple current during charge and discharge operation. Clearly, capacitors are a key element for M<sup>2</sup>C<sup>3</sup>; thereupon, capacitor lifetime is very important for the converter and the system reliability. As known, output voltage and ripple current may cause a shorter lifetime of capacitors. The failure of capacitor should be detected as soon as possible after it occurs because if a capacitor operates continuously under abnormal conditions, the capacitor may quickly fail. In order to prevent capacitor fail, the capacitor lifetime monitoring system is necessary.

A capacitor lifetime analysis is based upon Arrhenius law. The estimated operating lifetime of capacitor are explained in [4]. However, it is complex to estimate operating lifetime of capacitor because this method complexity has a mathematical model and nonlinear variables. Therefore, the prediction of capacitor lifetime

methodology is proposed in this paper by utilizing principal component regression (PCR) model [7].

## II. CAPACITOR LIFETIME MONITORING SYSTEM

A schematic of M<sup>2</sup>C<sup>3</sup> three levels is illustrated in Fig. 1. There are four electrolytic capacitors in M<sup>2</sup>C<sup>3</sup>; C<sub>LV</sub>, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, and C<sub>HV</sub> in M<sup>2</sup>C<sup>3</sup>. Each capacitor lifetime is somehow various: the higher voltage will lead to a shorter lifetime of a capacitor than the low voltage one. C<sub>HV</sub> capacitor is focused in this research because it is operate the highest voltage of all capacitor in M<sup>2</sup>C<sup>3</sup>. However, other capacitors in M<sup>2</sup>C<sup>3</sup> will be the same monitoring system as the C<sub>HV</sub>. Generally, the capacitor lifetime monitoring system is used sensors such as voltage sensor, current sensor, and temperature sensor to collect the required data of capacitor. The capacitor lifetime can be calculated as follows [5]:

$$L = L_0 \times M_V \times 2^{\left(\frac{T_{core,max} - T_{core}}{10}\right)}, \quad (1)$$

where  $L$  is capacitor lifetime(hours),  $L_0$  is maximum capacitor lifetime(hours),  $T_{core}$  is core temperature(°c),  $T_{core,max}$  is maximum core temperature(°c), and  $M_V$  is voltage multiplier. Also, the parameter  $L_0$ ,  $T_{core,max}$  and  $M_V$  can be obtained from the provided manufacturer datasheets.

From equation (1), a core temperature ( $T_{core}$ ) can not be directly measured. Thus, it would apply electrical model and heat transfer model of capacitor to calculate core temperature. The core temperature ( $T_{core}$ ) can be calculated form (2)-(3) as follows:

$$T_{core} = T_{ambient} + (\Delta T \times M_I), \quad (2)$$

$$\Delta T = \frac{P}{ESR} \times T_{resistance}, \quad (3)$$

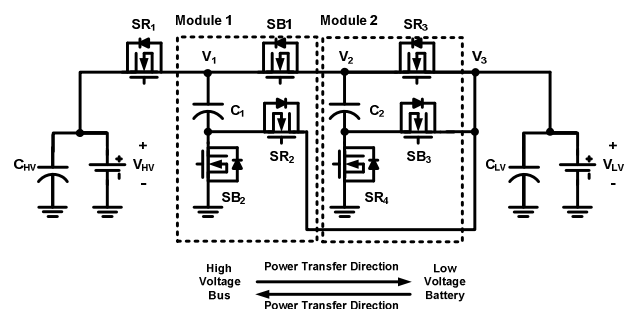


Fig. 1. Three level M<sup>2</sup>C<sup>3</sup> structure.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{ESR} = I^2 \times ESR, \quad (4)$$

where  $T_{ambient}$  is ambient temperature( $^{\circ}C$ ),  $\Delta T$  is temperature rise( $^{\circ}C$ ),  $M_I$  is ripple current multiplier,  $P_{ESR}$  is power loss of ESR(W),  $T_{resistance}$  is thermal resistance( $^{\circ}C/W$ ),  $I$  is current(A), and  $ESR$  is equivalent series resistance( $m\Omega$ ). Also the parameter  $M_I$ ,  $T_{resistance}$  and  $ESR$  can be obtained from the manufacturer datasheets.

As can be seen, above method consists of many variables requiring several sensors and the acquired data from manufacturer datasheets. It would be better if sensor and manufacturer datasheets can be reduced; then, the process of capacitor lifetime calculation could be reduced. Therefore, the PCR methodology is applied in this research. The proposed methodology utilizes data such as voltage, ripple of voltage, current, ripple current and temperature of capacitor.

### III. PCR METHODOLOGY

#### A. Input data and output data

The input data (matrix X) is collected for training and testing the PCR model. Input matrix of X contains five variables as illustrated in (5). Variables consist of voltage, ripple of the output voltage, current, current ripple and temperature data which have 120 observations for each variable. A dimension of X is 120x5. The rows 1 to 60 and 61 to 120 of X are observation data of capacitor operating at normal condition and abnormal condition, respectively.

$$X = \begin{bmatrix} \left[ \begin{array}{c} \text{normal condition} \\ \text{abnormal condition} \end{array} \right]_{60 \times 5} \\ \left[ \begin{array}{c} \text{normal condition} \\ \text{abnormal condition} \end{array} \right]_{60 \times 5} \end{bmatrix}_{120 \times 5}, \quad (5)$$

The output data or target data (matrix Y) of this methodology is 0 and 1 in binary code format as illustrated in (6). The binary code is sent to capacitor lifetime monitoring system to decode the capacitor operate in each condition. A dimension of Y is 120x1. The rows 1 to 60 and 61 to 120 of Y are observation data of capacitor operation at normal condition, and abnormal condition respectively. Also, a target data Y is the variable to be regressed.

$$Y = \begin{bmatrix} \left[ \begin{array}{c} 1 \text{ normal condition} \\ 0 \text{ abnormal condition} \end{array} \right]_{60 \times 1} \\ \left[ \begin{array}{c} 1 \text{ normal condition} \\ 0 \text{ abnormal condition} \end{array} \right]_{60 \times 1} \end{bmatrix}_{120 \times 1}, \quad (6)$$

#### B. Data set selection

The data is selected by using odd and even method to divide training and testing set. The training set is used to train the regression model; whereas, the testing is used to test the regression model. It should be noted that the testing set does not use to train the model. After data set selection, a data is scaled by using Z-score method [6]. All variables in the data set (Matrix X) are evaluated by using correlation coefficient method respecting to target data set (Matrix Y). This process will convey the relationship among variables as illustrated in table I.

TABLE I. RELATIONSHIP AMONG VARIABLES.

Variables	V	V <sub>ripple</sub>	I	I <sub>ripple</sub>	T
V	1	0.6537	0.7151	0.4000	-0.0518
V <sub>ripple</sub>	0.6537	1	0.7955	0.5718	-0.0502
I	0.7151	0.7955	1	0.6900	0.2768
I <sub>ripple</sub>	0.4000	0.5718	0.6900	1	0.1438
T	-0.0518	-0.0502	0.2768	0.1438	1

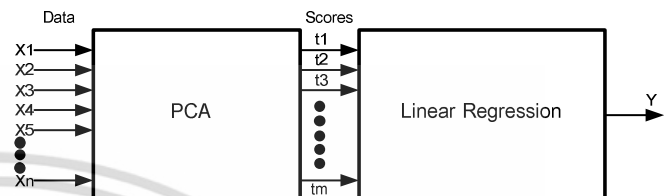


Fig. 2. PCR model.

#### C. PCR process

The PCR process as shown in Fig. 2 consists of two processes: PCA (Principal Component Analysis) and linear regression process. The PCA process can be used to reduce a dimension of X (number of input variable) without losing a significant amount of data. Thus, the transformed data in new space is independent to each other variables. The transformed data can be found follows [7]:

$$T_{m \times k} = X_{m \times n} * PC_{n \times k}. \quad (7)$$

where  $T$  is  $m \times k$  score matrix (transformed data),  $X$  is  $m \times n$  data matrix,  $PC$  is  $n \times k$  loading matrix,  $m$  is number of observations,  $n$  is number of original space and  $k$  is number of the PCs kept in the model.

The linear regression process can be used to predict output and determine the most appropriate variables to use in the model. The variables are selected by using an average error and a condition number. The variables having lowest average error and condition number are selected.

### IV. SIMULATION STUDY

The objective of this simulation study is to classify the behavior of the capacitor between normal and fault conditions of three levels  $M^2C^3$ . PSIM 9.0 is utilized to create the simulation model. The  $M^2C^3$  simulation will be simulated in the boost mode (power transfer from low voltage bus to high voltage bus). The low voltage and high voltage bus is connected to the 70 V dc voltage source and 175  $\Omega$  resistive load, respectively. A 3,900  $\mu F$  capacitor is used for all capacitor in  $M^2C^3$ . In this simulation, the  $C_{HV}$  capacitor is focused of the operation because it is operating the highest voltage, ripple voltage, current, and ripple current of all capacitors.

Fig. 3 and Fig. 4 illustrate the normal operation of  $C_{HV}$ . As can be seen, the capacitance of  $C_{HV}$  remains 3,900  $\mu F$  so that all parameters will not change from the manufacturing data. The voltage,  $V_{HV}$ , across  $C_{HV}$  is about 209.08 V with 0.20 V voltage ripple (peak-peak). Also, the current,  $I_{HV}$ , is

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

about 1.25 A with 2.32 A current ripple (peak-peak). In the abnormal operation case, the capacitor of  $C_{HV}$  will reduce to 1,950  $\mu\text{F}$  for this particular case. Fig. 5 and Fig. 6 show the simulation results during abnormal operation. The voltage,  $V_{HV}$ , is about 207.80 V with 1.05 V voltage ripple (peak-peak) and the current,  $I_{HV}$ , is about 1.13 A with 2.55 A current ripple (peak-peak). One can see that both voltage and current ripple increase comparing to the normal operation. As can be seen, if  $C_{HV}$  capacitor operates at abnormal condition, the ripple voltage and ripple current will be increases. For this reason, the capacitor may quickly fail. Therefore, the lifetime monitoring system of capacitor is necessary. Also, the simulations results suggest that voltage ripple and current ripple can be used as diagnostic signals in the model. This means that only two sensors are required.

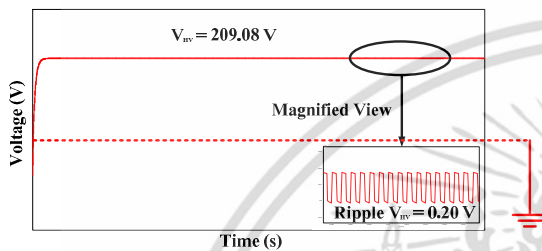


Fig. 3. The  $C_{HV}$  voltage operating at normal condition.

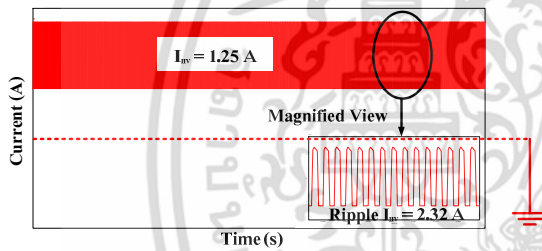


Fig. 4. The  $C_{HV}$  current operating at normal condition.

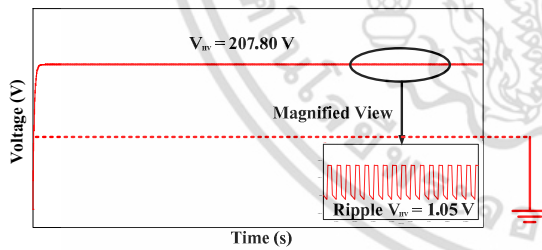


Fig. 5. The  $C_{HV}$  voltage operating at abnormal condition.

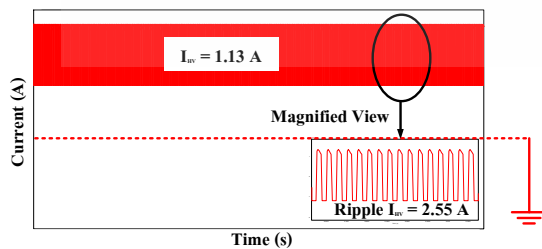


Fig. 6. The  $C_{HV}$  current operating at abnormal condition.

## V. EXPERIMENTAL SETUP AND RESULTS

The 1-kW prototype was developed by using MOSFET and electrolytic capacitor (350 V 3,900  $\mu\text{F}$ ) in all three level  $M^2C^3$ . The variable transformer together with rectifier circuit was used as 75 V dc voltage source for supplying dc voltage to  $M^2C^3$ . A 175  $\Omega$  resistance load was used. A Yokogawa oscilloscope in cooperated with a computer was used to perform a measurement and sensor unit. The experimental setup is illustrated in Fig. 7.

Experimental results are shown in Fig. 8(a) and Fig. 9(a) show the normal operation; whereas, Fig. 8(b) and Fig. 9(b) illustrate the abnormal operation. As can be seen, the voltage ripple (peak-peak) and current ripple (peak-peak) during abnormal condition increase comparing to the normal operation. Also, the experimental results and simulation results are good agreement to each others. This results suggest that the voltage and current ripple can be used as diagnostic signals for the proposed monitoring system.

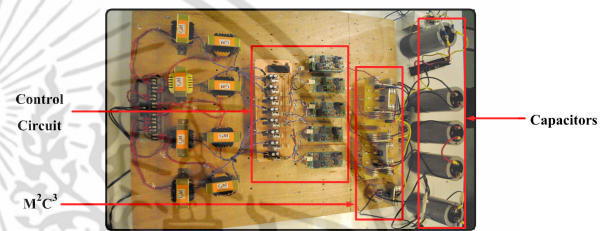
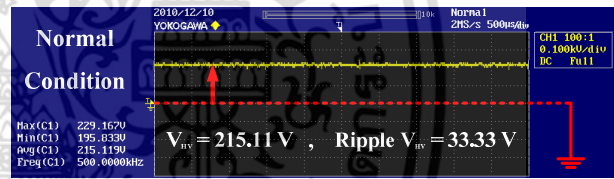
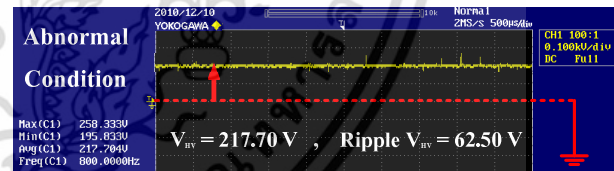


Fig. 7. Experimental setup.

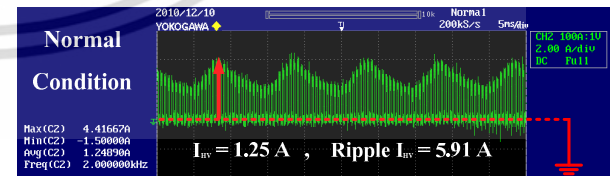


(a)

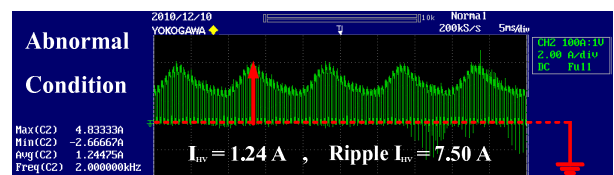


(b)

Fig. 8. DC output voltage and voltage ripple of  $C_{HV}$  capacitor operating at (a) Normal condition, and (b) Abnormal condition.



(a)



(b)

Fig. 9. DC output current and current ripple of  $C_{HV}$  capacitor operating at (a) Normal condition, and (b) Abnormal condition.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

In the capacitor lifetime monitoring system, the behavior of operating data of a  $C_{HV}$  is collected by changing input voltage from 65 V to 75 V. MATLAB is utilized to analyze the PCR methodology. The results of PCA transformation show that the most appropriate PCs to use in modeling are PC1, PC2 and PC3 meaning variables are voltage, ripple voltage and ripple current. Fig. 10 shows the graphical data of the PC transformation. The first three PCs contain 91.94% of information (sum of explained information of 58.88%, 21.79%, and 11.27%) in the data set. The PC1 can be used to distinguish between normal and abnormal condition. However, PC2 and PC3 will be kept because both PCs have a significant variance of data.

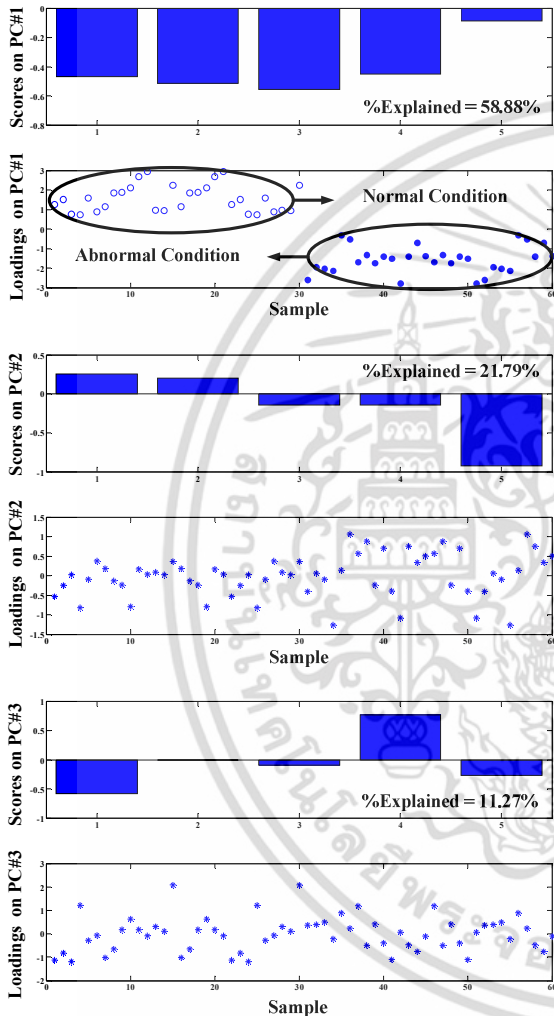


Fig. 10. PCA transformation.

After the model of capacitor lifetime monitoring has been created. The model is tested with the testing set to predict a data. Fig. 11 shows the testing result of capacitor lifetime monitoring model. This model has 0.144 average error and 14.98 condition number. Clearly, the PCA process reduces the required variables from the training set from five variables to three variables without losing any important information: this will offer the fast training process; thereafter, this method is promising to implement is a single chip microcontroller.

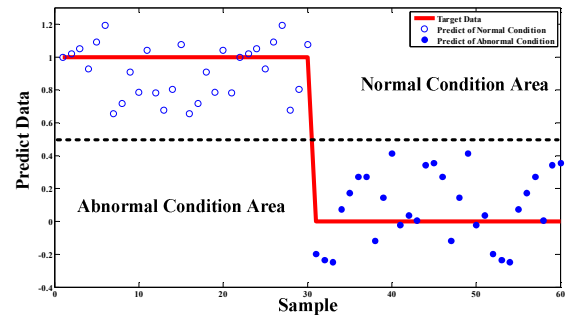


Fig. 11. The testing results of the proposed capacitor lifetime monitoring model.

## VI. CONCLUSION

The capacitor lifetime monitoring system has been proposed. PCR model has been created to monitor capacitor lifetime for  $M^2C^3$ . The results show that the PCR methodology can be applied with capacitor lifetime monitoring system. The proposed PCR model not only reduces a dimension number of input data space without losing a significant amount of data, but also reduces a sensor at capacitor in  $M^2C^3$ . The experimental results indicate that the most appropriate variables to use in the model are voltage, ripple voltage and ripple current. Therefore, the results show that the proposed PCR methodology is a promising method for capacitor lifetime monitoring system for  $M^2C^3$  application.

## REFERENCES

- [1] H. Kakigano, Y. Miura, T. Ise, R. Uchida, "DC Voltage Control of the DC Micro-grid for Super High Quality Distribution," *Power Conversion Conference*, Japan, April 2-5, 2007, pp. 518-525
- [2] F. H. Khan, L. M. Tolbert, "A Multilevel Modular Capacitor Clamped DC-DC Converter," *41st IAS Annual Meeting Industry Applications Conference*, 2006, pp. 966 – 973.
- [3] F. H. Khan, L. M. Tolbert, "Multiple-Load-Source Integration in a Multilevel Modular Capacitor-Clamped DC-DC Converter Featuring Fault Tolerant Capability," *APEC 2007 - Twenty Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference*, 2007, pp. 361 – 367.
- [4] Maddula, S.K., Balda, J.C., "Lifetime of Electrolytic Capacitors in Regenerative Induction Motor Drives," *PESC 2005 Power Electronics Specialists Conference*, 2005, pp. 153 – 159.
- [5] Hitachi Co., Ltd., *Aluminum Electrolytic Capacitor Applications Guide*, pp. 42 - 50.
- [6] MathWorks Inc, *Mathlab User's Guide Version 6*, MathWorks Inc, 2003, <http://www.mathworks.com>.
- [7] S. Khomfoi, L. M. Tolbert, "Fault Diagnosis and Reconfiguration for Multilevel Inverter Drive Using AI-Based Techniques," *Industrial Electronics, IEEE Transactions*, vol. 36, 2007, pp. 2954 - 2968.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย ปราการ อินทพัฒน์
ประวัติการศึกษา	ปี 2552 สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
งานวิจัยที่ชื่นชอบ	ระบบการวิเคราะห์ไฟฟ้ากำลัง ระบบแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ ระบบแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหลายระดับ ระบบพลังงานหมุนเวียนสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก
ผลงานวิจัย	[1] ปราการ อินทพัฒน์, ประภาส ไพรสวรรณา, สุรินทร์ คำฝอย, “วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแบบ สองทิศทางที่ปราศจากตัวเหนี่ยวนำสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบ ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 (EECON 32), ปรานีบุรี, 28-30 ตุลาคม 2552, หน้า 591 - 594. [2] ปราการ อินทพัฒน์, ประภาส ไพรสวรรณา, สุรินทร์ คำฝอย, “การตรวจวัดค่าอายุการใช้งานตัวเก็บประจุในวงจรแปลงผันไฟฟ้า กระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ,” การประชุมวิชาการทาง วิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON 33), เชียงใหม่, 1-3 ธันวาคม 2553, หน้า 713 - 716. [3] Pracan Inttpat, Prapart Paisuwanna, Surin Khomfoi, “Capacitor Lifetime Monitoring for Multilevel Modular Capacitor Clamped DC to DC Converter,” ECTI-CON 2011, Khon Kaen, Thailand, 17-19 May 2011, pp.719 - 722.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้