



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแบบสองทิศทาง
ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก
DC to DC Multilevel Modular Capacitor Clamped Converters with
Electrical Grounding Isolation and Bidirectional Power Flow for a dc
Microgrid Applications

นายสุรินทร์ คำฝอย

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณ รายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแบบสองทิศ ทางที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่หลากหลายหลาย
 ภาระไฟฟ้า.....

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้.....

ประจำปีงบประมาณ..... 2556..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน..... 80,000..... บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย..... 1..... ปี ตั้งแต่..... 1 ตุลาคม 2555 ถึง..... 30 กันยายน 2556.....

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

..... รศ.ดร. สุรินทร์ คำผวย.....

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ (M^2C^3) แบบสองทิศทางที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่หลากหลายหลายภาระไฟฟ้า หลักการทำงานจะขึ้นอยู่กับการสะสมและคายประจุของตัวเก็บประจุในวงจร M^2C^3 ซึ่งวงจร M^2C^3 จะติดตั้งอยู่ระหว่างสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงกับแบตเตอรี่เพื่อถ่ายโอนพลังงาน วงจร M^2C^3 2 ชุดจะเชื่อมต่อกันผ่านหม้อแปลงความถี่สูงซึ่งเป็นการแยกโดดทางไฟฟ้า สำหรับพลังงานระหว่างชุด วงจร และวงจร M^2C^3 สามารถจ่ายไฟได้หลายระดับแรงดันโดยเชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุในแต่ละโมดูล วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะนำเสนอผลการจำลองผ่านโปรแกรม PSIM 9.0 และผลการทดลองเพื่อยืนยันวงจร M^2C^3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้ากระแสตรงที่หลากหลายหลาย

คำสำคัญ : วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง, หม้อแปลงความถี่สูง, ระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก

Research Title: DC to DC Multilevel Modular Capacitor Clamped Converters with Electrical Grounding Isolation and Bidirectional Power Flow for Multiple DC Loads in DC Microgrid Applications

Researcher:..... Assoc.Prof. Surin Khomfoi

Faculty: Engineering

Department: Electrical

ABSTRACT

Dc to dc multilevel modular capacitor clamped converters with electrical grounding isolation and bidirectional power flow for a various dc loads in dc microgrid applications is proposed in this paper. The principle of the particular M^2C^3 is based upon volt-sec balance of capacitors connect series as a modular cell in this circuit. The M^2C^3 can be interfaced between a battery and a dc grid. In addition M^2C^3 can be connect multiple dc load in each capacitor module. Two M^2C^3 can also be interfaced with high frequency transformer in order to achieve grounding isolation and exchange energy between M^2C^3 . This is a key function for a dc microgrid. The simulation and experimental results are investigated. The results illustrate that the proposed M^2C^3 is promising technique for a dc microgrid application.

Keywords : DC to DC converter, High frequency transformer, DC microgrid

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จะเสร็จสมบูรณ์ได้จากความร่วมมือและช่วยเหลือเป็นอย่างดี จึงขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังมา ณ ที่นี้ด้วย ที่ซึ่งการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

รศ. ดร. สุรินทร์ คำฝอย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง	XI
สารบัญรูป	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	6
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	6
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	6
1.5 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	7
1.6 แผนการดำเนินงาน	8
บทที่ 2 ระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กและวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็น	
กระแสตรงหลายระดับ	9
2.1 บทนำ.....	9
2.2 ระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก.....	9
2.2.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า	11
2.2.2 ระบบจัดการพลังงานไฟฟ้า.....	11
2.2.3 ภาระไฟฟ้า.....	12
2.3 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง	13
2.3.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดไฟร์อิงค์คาปาซิเตอร์	
(Flying Capacitor Multilevel DC-DC Converter หรือ FCMDC)	13
2.3.2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์	
(Switched Capacitor Multilevel DC-DC Converter).....	16
2.3.3 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแบบ	
สวิตซ์โหมด (Switch Mode Step Up Multilevel DC-DC Converter).....	17

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.4 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีหลากหลายอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า (Universal Multilevel DC-DC Converter with Variable Cnversion Ratio)	19
2.6 สรุป.....	20
บทที่ 3 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ แบบสองทิศทางที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า.....	23
3.1 บทนำ.....	23
3.2 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแบบสองทิศทาง	24
3.3 หลักการควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังในวงจร M^2C^3	26
3.4 หลักการถ่ายโอนพลังงานของวงจร M^2C^3	27
3.5 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแบบสองทิศทางที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า	28
3.6 ทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าในวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า.....	28
3.6.1 การทำงานของวงจร M^2C^3 แบบปกติ	29
3.6.2 การทำงานของวงจร M^2C^3 ในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้าหรือการสะสมประจุให้กับแบตเตอรี่.....	29
3.6.3 การทำงานของวงจร M^2C^3 ในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าหรือแหล่งสำรองพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบผลิตไฟฟ้า.....	32
3.7 การสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากวงจร M^2C^3	37
3.8 การทำงานของวงจร M^2C^3 ในรูปแบบถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงความถี่สูง.....	38
3.8.1 วงจร M^2C^3 2 ชุดที่มีการทำงานปกติ.....	39
3.8.2 การทำงานในแบบสำรองพลังงานให้กัน.....	40
3.8.3 การทำงานปกติขณะที่แต่ละชุดวงจรที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ไม่เท่ากัน	42
3.8.4 การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าขณะที่แต่ละชุดวงจรมีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ไม่เท่ากัน... ..	44
3.9 การบายพาสความผิดพลาดของวงจร M^2C^3	46
3.10 การเชื่อมต่อแหล่งจ่ายและภาระไฟฟ้าที่หลากหลายกับวงจร M^2C^3	48
3.11 การออกแบบอุปกรณ์ต่างๆที่สำคัญของวงจร M^2C^3	49
3.11.1 ตัวเก็บประจุ	49
3.11.2 สวิตช์กำลัง.....	53

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.11.3 หม้อแปลงกำลังความถี่สูง.....	55
3.12 การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าของวงจร M^2C^3	60
3.12.1 แรงดันตก	60
3.12.2 แรงดันเกิน.....	60
3.12.3 แรงดันกระเพื่อม.....	60
3.12.4 กระแสกระเพื่อม.....	60
3.12.5 ประสิทธิภาพ	61
3.13 สรุป.....	61
บทที่ 4 การจำลองการทำงาน.....	63
4.1 บทนำ.....	63
4.2 วิธีการจำลองวงจร M^2C^3	63
4.3 ขั้นตอนการจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3	64
4.4 การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าในรูปแบบปกติ	65
4.4.1 การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าในรูปแบบปกติที่มีการ ไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ที่บัสแรงดันต่ำ	65
4.4.2 การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าในรูปแบบปกติที่มีการ ไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ที่บัสแรงดันสูง	68
4.5 การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าในรูปแบบลดระดับ แรงดันไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 1	71
4.5.1 การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าในรูปแบบลดระดับ แรงดันไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 1 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำ.....	71
4.5.2 การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าในรูปแบบลดระดับ แรงดันไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 1 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูง.....	74
4.6 การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าในรูปแบบเพิ่มระดับ แรงดันไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 1	77
4.6.1 การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าในรูปแบบเพิ่มระดับ แรงดันไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 1 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำ.....	77
4.6.2 การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าในรูปแบบเพิ่มระดับ แรงดันไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 1 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูง.....	80

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.7 การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าในขณะที่มุมสัญญาณความถี่ของหม้อแปลงไม่ตรงกัน.....	82
4.8 สรุป.....	83
บทที่ 5 การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ	85
5.1 บทนำ.....	85
5.2 การออกแบบชุดวงจรควบคุม.....	86
5.2.1 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์.....	86
5.2.2 วงจรขับสัญญาณ	87
5.3 การออกแบบชุดวงจรกำลัง	88
5.4 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง.....	89
5.5 สรุป.....	91
บทที่ 6 การทดสอบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแบบสองทิศทางที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้า	92
6.1 บทนำ.....	92
6.2 การทดสอบวงจรขับสัญญาณ	93
6.3 การทดสอบหม้อแปลงความถี่สูง	93
6.4 การทดสอบวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าบัสมแรงดันสูง.....	95
6.4.1 วัตถุประสงค์.....	95
6.4.2 วิธีการทดสอบ.....	95
6.4.3 ขั้นตอนในการทดสอบ	95
6.4.4 การทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าที่บัสมแรงดันสูง.....	96
6.4.5 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าที่บัสมแรงดันสูงในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า.....	96
6.4.6 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าที่บัสมแรงดันสูงในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า.....	99
6.5 การทดสอบวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าบัสมแรงดันต่ำ.....	102
6.5.1 วัตถุประสงค์	102

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า	
6.5.2	วิธีการทดสอบ.....	102
6.5.3	ขั้นตอนในการทดสอบ	102
6.5.4	การทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำ.....	103
6.5.5	ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าในรูปแบบลระดับแรงดันไฟฟ้าที่มีภาระไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่ที่บัสแรงดันต่ำ	103
6.5.6	ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าที่มีภาระไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ที่บัสแรงดันต่ำ	105
6.6	การทดสอบวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า.....	108
6.6.1	วัตถุประสงค์	108
6.6.2	วิธีการทดสอบ.....	108
6.6.3	ขั้นตอนในการทดสอบ	109
6.6.4	ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า	109
6.7	การทดสอบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าในขณะที่เชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าที่หลากหลายแรงดันไฟฟ้า.....	112
6.7.1	วัตถุประสงค์	112
6.7.2	วิธีการทดสอบ.....	112
6.7.3	ขั้นตอนในการทดสอบ	113
6.7.4	การทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าขณะเชื่อมต่อหลากหลายภาระไฟฟ้า.....	113
6.7.5	ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าขณะเชื่อมต่อหลากหลายภาระไฟฟ้าในรูปแบบลระดับแรงดันไฟฟ้า.....	113
6.7.6	ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าขณะเชื่อมต่อหลากหลายภาระไฟฟ้าในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า	116
6.8	การทดสอบวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าในขณะที่ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลมีจำนวนที่ไม่เท่ากันที่เชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูง	119
6.8.1	วัตถุประสงค์	119
6.8.2	วิธีการทดสอบ.....	119
6.8.3	ขั้นตอนในการทดสอบ	119
6.8.4	การทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่เท่ากัน	120

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
6.8.5 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า.....	120
6.8.6 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า	122
6.9 การทดสอบวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าใน ขณะที่ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลมีจำนวนที่ไม่เท่ากันที่เชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำ	125
6.9.1 วัตถุประสงค์	125
6.9.2 วิธีการทดสอบ.....	125
6.9.3 ขั้นตอนในการทดสอบ	126
6.9.4 การทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า	126
6.9.5 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า.....	126
6.9.6 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า	129
6.10 การทดสอบวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าใน ขณะที่อัตราส่วนหม้อแปลงความถี่สูงไม่เท่ากันขณะที่มีภาระไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่กับบัสแรงดันสูง	132
6.10.1 วัตถุประสงค์.....	132
6.10.2 วิธีการทดสอบ	132
6.10.3 ขั้นตอนในการทดสอบ	132
6.10.4 การทดสอบวงจร M^2C^3 ที่อัตราส่วนหม้อแปลงความถี่สูงไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า.....	132
6.10.5 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่อัตราส่วนหม้อแปลงความถี่สูงไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า.....	133
6.10.6 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่อัตราส่วนหม้อแปลงความถี่สูงไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า	135
6.11 การทดสอบวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าใน ขณะที่อัตราส่วนหม้อแปลงความถี่สูงไม่เท่ากันขณะที่มีภาระไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่กับบัสแรงดันต่ำ.....	138

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
6.11.1 วัตถุประสงค์.....	138
6.11.2 วิธีการทดสอบ	138
6.11.3 ขั้นตอนในการทดสอบ	138
6.11.4 การทดสอบวงจร M^2C^3 ที่อัตราส่วนหม้อแปลงความถี่สูงไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า.....	139
6.11.5 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่อัตราส่วนหม้อแปลงความถี่สูงไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า.....	139
6.11.6 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่อัตราส่วนหม้อแปลงความถี่สูงไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า	142
6.12 สรุป.....	144
บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	146
7.1 สรุป.....	146
7.2 ข้อเสนอแนะ	147
บรรณานุกรม.....	148
ภาคผนวก	151
ประวัติผู้เขียน.....	163

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สภาวะการอัดประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่แรงดันสูงไปยังแบตเตอรี่แรงดันต่ำ	15
2.2 สภาวะการอัดประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่แรงดันต่ำไปยังแบตเตอรี่แรงดันสูง	15
2.3 วิธีการควบคุมให้ได้อัตราการแปลงผันแรงดันไฟฟ้าที่หลากหลาย	22
2.4 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแต่ละชนิด.....	21
2.5 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแต่ละชนิด(ต่อ).....	22
3.1 แรงดันไฟฟ้าแต่ละโหนดเทียบกับกราวด์	48
4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการจำลองวงจร.....	64
4.2 ประสิทธิภาพของวงจร M^2C^3 ในรูปแบบการทำงานที่แตกต่างกัน	84

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก.....	3
1.2 สถานีไฟฟ้าย่อย.....	4
1.3 สถานีไฟฟ้าย่อยที่มีวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสเชื่อมต่อกัน.....	4
1.4 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า.....	5
1.5 แรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในสภาวะอยู่ตัว.....	5
2.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดไฟร์ริงค์คาปาซิเตอร์ 3 ระดับ.....	14
2.2 สัญญาณควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง.....	14
2.3 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์ 3 ระดับ.....	16
2.4 สัญญาณควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิด.....	17
2.5 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมด.....	18
2.6 สัญญาณควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมด.....	18
2.7 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ.....	19
3.1 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า.....	25
3.2 วงจร M^2C^3 1 ชุดที่มี n ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล.....	25
3.3 ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล 1 ชุด.....	26
3.4 สัญญาณควบคุมที่มีเฟสตรงข้ามกัน.....	26
3.5 วงจร M^2C^3 ในสภาวะปกติที่ $CR = RVS$	29
3.6 การทำงานของวงจรเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า.....	30
3.7 ช่วงการทำงานของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในแบบวงจรสมมูลเมื่อวงจร.....	32
3.8 การทำงานของวงจรเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า.....	33
3.9 ช่วงการทำงานของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในแบบวงจรสมมูลเมื่อวงจรมีทิศทาง.....	35
3.10 แรงดันไฟฟ้าในแต่ละโหนดเทียบกราวด์.....	36
3.11 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัว.....	36
3.12 แสดงจุดการเชื่อมต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	37
3.13 แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	37
3.14 วงจร M^2C^3 2 ชุดที่มีการทำงานปกติ.....	38
3.15 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในแต่ละชุดวงจร.....	39
3.16 สัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงทางด้านปฐมภูมิ.....	39

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 ทิศทางการทำงานของชุดวงจรขณะเกิดความผิดพลาดขึ้นที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1	41
3.18 แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุแต่ละขณะก่อนและหลังการทำงานของชุดวงจร.....	41
3.19 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงขณะมีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า	41
3.20 วงจร M^2C^3 2 ชุดที่มีชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลไม่เท่ากัน.....	42
3.21 แสดงถึงทิศทางการไหลของกระแสของชุดวงจร M^2C^3 2 ชุดทำงานแบบปกติ	43
3.22 แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัว.....	43
3.23 แรงดันไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่	43
3.24 ทิศทางของการไหลของกระแสขณะชุดวงจรมีแรงดันไม่เท่ากัน	44
3.25 แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัว.....	45
3.26 แรงดันไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	45
3.27 หลักการบายพาสชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล.....	46
3.28 ขั้นตอนการบายพาสความผิดพลาดของวงจร M^2C^3 4 ระดับ	47
3.29 แรงดันที่ได้จากจุดต่อระหว่างโมดูล.....	48
3.30 แรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในสภาวะอยู่ตัว	49
3.31 ค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ.....	50
3.32 เวกเตอร์ของอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ.....	51
3.33 สัญญาณแรงดันที่ขาเดรนและขาซอสและกระแสไฟฟ้าที่นำมาวิเคราะห์การสูญเสีย.....	54
3.34 แรงดันที่ได้จากจุดต่อระหว่างโมดูล.....	55
3.35 (ก) แกนแม่เหล็กรูปร่างต่างๆ และ (ข) B-H curve ของแกนเฟอร์ไรท์	56
3.36 แรงดันที่มีกระแส DC Magnetizing ($n = 1$).....	58
3.37 แรงดันที่ไม่มีกระแส DC Magnetizing ($n = 2$).....	58
4.1 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า	63
4.2 สัญญาณขับสวิตช์กำลัง (SR_n และ SB_n).....	63
4.3 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสต่างๆของชุดวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า.....	66
4.4 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่บัสต่างๆ.....	66
4.5 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของแต่ละชุดวงจร	67
4.6 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของแต่ละชุดวงจร	67
4.7 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าขั้นตอนต่างๆ.....	67
4.8 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	67

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสต่างๆของชุดวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า.....	68
4.10 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่บัสต่างๆ	69
4.11 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของแต่ละชุดวงจร	69
4.12 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของแต่ละชุดวงจร	69
4.13 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าขั้นตอนต่างๆ	70
4.14 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	70
4.15 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าขณะลดระดับแรงดันไฟฟ้า.....	70
4.16 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสต่างๆของชุดวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า.....	72
4.17 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่จุดต่างๆ.....	72
4.18 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของแต่ละชุดวงจร	73
4.19 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของแต่ละชุดวงจร	73
4.20 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าขั้นตอนต่างๆ	73
4.21 แรงดันและกระแสที่หม้อแปลงความถี่สูง	73
4.22 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสต่างๆของชุดวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า.....	74
4.23 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่จุดต่างๆ.....	75
4.24 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของแต่ละชุดวงจร	75
4.25 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของแต่ละชุดวงจร	75
4.26 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าขั้นตอนต่างๆ	76
4.27 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	76
4.28 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าในขณะที่เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า.....	76
4.29 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสต่างๆของชุดวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า.....	78
4.30 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่จุดต่างๆ.....	78
4.31 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของแต่ละชุดวงจร	79
4.32 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของแต่ละชุดวงจร	79
4.33 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าขั้นตอนต่างๆ	79
4.34 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	79
4.35 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสต่างๆของชุดวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า.....	80
4.36 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่จุดต่างๆ.....	81
4.37 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของแต่ละชุดวงจร	81

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.38 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของแต่ละชุดวงจร	81
4.39 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าชั้นตอนต่างๆ	82
4.40 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	82
4.41 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	83
5.1 เครื่องต้นแบบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า	85
5.2 อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์	86
5.3 โครงสร้างวงจรขับสัญญาณ	87
5.4 อุปกรณ์ไฟเลี้ยงและขับสัญญาณ	87
5.5 วงจร M^2C^3 ที่มีชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล 3 ชุด	88
5.6 วงจรชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล	88
5.7 อุปกรณ์ในชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล	89
5.8 หม้อแปลงความถี่สูง	89
6.1 การทดสอบเครื่องต้นแบบ	92
6.2 สัญญาณควบคุมที่มีรูปคลื่นสี่เหลี่ยมและมีมมเฟสตรงข้ามกัน	93
6.3 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	94
6.4 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าบัสแรงดันสูง	94
6.5 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า	97
6.6 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 1	97
6.7 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 2	98
6.8 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	98
6.9 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า	99
6.10 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 1	100
6.11 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 2	100
6.12 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	101
6.13 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าบัสแรงดันต่ำ	101
6.14 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า	103
6.15 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1	104
6.16 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2	104
6.17 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	105

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.18 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า	106
6.19 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชดววงจร M^2C^3 ที่ 1.....	106
6.20 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชดววงจร M^2C^3 ที่ 2.....	107
6.21 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	107
6.22 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า	108
6.23 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า	110
6.24 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชดววงจร M^2C^3 ที่ 1.....	110
6.25 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชดววงจร M^2C^3 ที่ 2.....	111
6.26 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	111
6.27 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับหลากหลายภาระไฟฟ้า	112
6.28 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า	114
6.29 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชดววงจร M^2C^3 ที่ 1.....	114
6.30 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชดววงจร M^2C^3 ที่ 2.....	115
6.31 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	115
6.32 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า	116
6.33 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชดววงจร M^2C^3 ที่ 1.....	117
6.34 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชดววงจร M^2C^3 ที่ 2.....	117
6.35 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	118
6.36 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าที่มีชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลไม่เท่ากันขณะเชื่อมต่อภาระ ไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูง	118
6.37 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า	120
6.38 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชดววงจร M^2C^3 ที่ 1.....	121
6.39 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชดววงจร M^2C^3 ที่ 2.....	121
6.40 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	122
6.41 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า	123
6.42 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชดววงจร M^2C^3 ที่ 1.....	123
6.43 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชดววงจร M^2C^3 ที่ 2.....	124
6.44 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	124

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.45 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าที่มีชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลไม่เท่ากันขณะเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำ	125
6.46 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า	127
6.47 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1.....	127
6.48 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2.....	128
6.49 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	128
6.50 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า	129
6.51 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1.....	130
6.52 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2.....	130
6.53 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	131
6.54 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าที่อัตราส่วนหม้อแปลงไม่เท่ากันขณะที่เชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูง	131
6.55 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า	133
6.56 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1.....	134
6.57 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2.....	134
6.58 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	135
6.59 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า	136
6.60 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1.....	136
6.61 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2.....	137
6.62 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	137
6.63 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าที่อัตราส่วนหม้อแปลงไม่เท่ากันขณะเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำ	138
6.64 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า	140
6.65 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1.....	140
6.66 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2.....	141
6.67 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	141
6.68 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า	142
6.69 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1.....	143
6.70 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2.....	143

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.71 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง	144
6.72 ประสิทธิภาพในรูปแบบลดระดับแรงดัน	145
6.73 ประสิทธิภาพในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดัน.....	145

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีแต่จะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆเนื่องมาจากการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจและสังคมเมืองต่างๆภายในประเทศทั้งภาคอุตสาหกรรม ภาคเกษตรกรรม รวมถึงสาธารณูปโภคต่างๆในชีวิตประจำวัน จึงมีการวางแผนขยายการผลิตไฟฟ้าเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการใช้ ส่งผลให้ทรัพยากรธรรมชาติหลักที่ใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าอยู่ในขณะนี้เช่น ก๊าซธรรมชาติและถ่านหินนั้นมีปริมาณที่ลดลงอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังเป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไปและราคาต้นทุนมีแต่เพิ่มสูงขึ้น ตลอดจนเกิดมลภาวะทางอากาศที่เกิดมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้นๆ ซึ่งเป็นที่มาของปรากฏการณ์เรือนกระจก และสภาวะโลกร้อน ทำให้เกิดนโยบายที่จะหันไปผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานนิวเคลียร์ขึ้น ซึ่งเป็นโรงไฟฟ้าที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงมากเมื่อเทียบต่อเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ ลดต้นทุนของเชื้อเพลิงและยังเพิ่มการผลิตพลังงานไฟฟ้าพื้นฐานของประเทศให้เพียงพอต่อความต้องการใช้ได้ในระยะยาว แต่การนำพลังงานนิวเคลียร์มาใช้ขึ้นนั้นเป็นสิ่งอันตราย และต้องมีการวางแผนอย่างระมัดระวัง ส่งผลให้แผนที่จะสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์นั้นเกิดความล่าช้า ประกอบกับเกิดการระเบิดของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ฟูกูชิม่า ประเทศญี่ปุ่นขึ้นทำให้เกิดการตื่นกลัวของประชาชนกันอย่างกว้างขวาง จึงมีความจำเป็นที่จะหันไปศึกษาถึงความเป็นไปได้ ผลกระทบ และความเสถียรภาพของระบบที่เกิดจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทางเลือกหรือพลังงานทดแทน (Renewable Energy) ที่มีแหล่งเชื้อเพลิงที่หาได้จากธรรมชาติอาทิเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำและพลังงานความร้อนใต้พิภพ เป็นต้น ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ได้ไม่มีวันหมด ไม่มีต้นทุนจากค่าเชื้อเพลิง และที่สำคัญเป็นพลังงานสะอาดที่ไม่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้มีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์เพื่อเพิ่มการผลิตพลังงานไฟฟ้าในประเทศไทย รวมทั้งส่งเสริมการวิจัย พัฒนา และนำไปประยุกต์ให้เหมาะสมในสถานที่ต่างๆหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก (Microgrid) เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพโดยรวมสูงสุด [1]

ระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก (DC-Microgrid) [2-3] ดังรูปที่ 1.1 ที่มีหลักการสำคัญคือแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าและระบบส่งจ่ายจะต้องอยู่ใกล้กับแหล่งชุมชน ที่มีบ้านเรือนหลายๆแห่งที่เชื่อมต่อกันกลายเป็นระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก จึงทำให้การผลิตไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงสุด แต่กระนั้นการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทางเลือกนั้นยังต้องตระหนักและให้ความสำคัญอย่างยิ่งถึงแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่คงที่ เกิดการแกว่ง และแรงดันไฟฟ้าที่ได้ไม่ต่อเนื่องเนื่องจากสภาวะภายนอกเช่น กลางคืนที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ความเร็วลมมีความแรงไม่ถึงเกณฑ์ทำให้ผลิตไฟฟ้าได้ไม่เต็มที่ เป็นต้น จึงต้องนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังหรือวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC Converter) มาเชื่อมต่อระหว่างแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้ากับภาระไฟฟ้าที่ต่ออยู่ ซึ่งวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะต้องสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้มีความเรียบต่อเนื่องตลอดเวลาเพื่อให้ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้านั้นมี

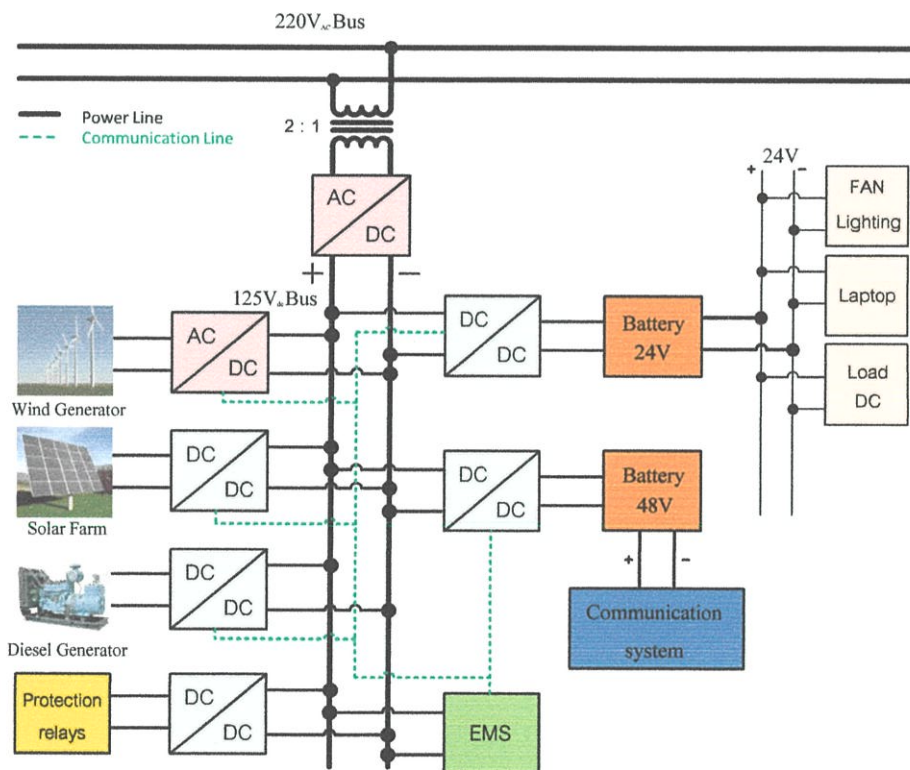
ความเสถียรภาพและประสิทธิภาพสูงที่สุด เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในอนาคตต่อไป [4-5] ที่ซึ่งระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กนั้นยังสามารถทำการประยุกต์ไปใช้ในสถานีไฟฟ้าย่อย (Substation) ที่มีความหลากหลายของแรงดันไฟฟ้า

โดยสถานีไฟฟ้าย่อยในประเทศไทยนั้นส่วนใหญ่จะมีภาระไฟฟ้าที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Electronic Loads) เป็นส่วนใหญ่ที่ซึ่งจะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันที่แตกต่างกัน อีกทั้งในสถานีไฟฟ้าย่อยยังต้องแปลงแรงดันไฟฟ้าให้มีความหลากหลายของแรงดันไฟฟ้าซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ป้องกันการตัดต่อ (Protection Relays) คอมพิวเตอร์ ระบบแสงสว่าง อุปกรณ์แสดงผล ไดรส์ปรับเปลี่ยนความเร็ว (Adjustable Speed Drives) รวมไปถึงระบบโทรคมนาคมในสถานีไฟฟ้าย่อยที่ซึ่งจะมีแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีความจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์แปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหรือชาร์จเจอร์ (Charger) เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 1.2 ที่จะเห็นว่ามีความหลากหลายของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ 3 ระดับ คือ 125 V สำหรับอุปกรณ์ป้องกันการตัดต่อ 48 V สำหรับระบบโทรคมนาคม และ 24 V สำหรับระบบแสงสว่างในอาคาร จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่จะนำแรงดันไฟฟ้าทั้งที่มีความหลากหลายนั้นมาเชื่อมต่อผ่านวงจรแปลงแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแบบสองทิศทางที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้างดรูปที่ 1.3

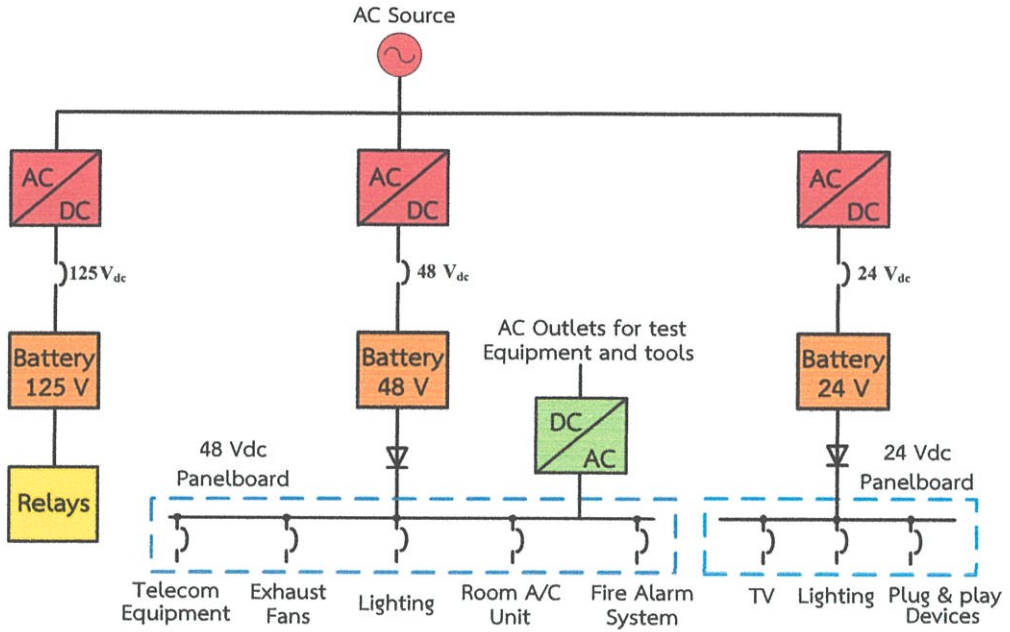
วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า (Multilevel Modular Clamped Capacitor Converter (M^2C^3) with Electrical Grounding Isolation) [6-13] ดังรูปที่ 1.4 ซึ่งวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแต่ละชุดวงจรนั้นจะใช้หลักการหลักๆอยู่ 2 หลักการคือ การสะสมและคายประจุของตัวเก็บประจุ (Volt-sec Balanced) โดยตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่ออยู่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายใต้สภาวะอยู่ตัวนั้น (Steady State) จะมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในหนึ่งคาบเวลามีค่าเท่ากับศูนย์ และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุไม่สามารถเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดดังรูปที่ 1.5 ส่งผลให้เกิดการอนุกรมและขนานของตัวเก็บประจุภายในวงจร จึงเกิดการสะสมพลังงานเป็นระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล และอีกหลักการที่สำคัญคือการสมดุลพลังงานไฟฟ้าระหว่างบัสทั้งสอง (Balanced Energy) ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานระหว่างทั้งสองบัสวงจรและผ่านหม้อแปลงความถี่สูง จากหลักการทั้ง 2 ข้อนี้ส่งผลให้วงจร M^2C^3 สามารถถ่ายโอนพลังงานได้สองทิศทาง ไม่มีตัวเหนี่ยวนำทำให้น้ำหนักเบา มีสัญญาณควบคุมง่ายที่มีดีวตีไซเคิล (Duty Cycle) 50 % ทั้งสองสัญญาณและที่สำคัญสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้หลากหลายแรงดันไฟฟ้าตามจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลและขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำเสมือนเป็นหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถเลือกแรงดันไฟฟ้าได้ (Tap-Changed DC Transformer) อีกทั้งยังสามารถกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับภายในวงจรได้โดยการเชื่อมต่อที่ขั้วลบของตัวเก็บประจุระหว่างชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล จึงเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์นี้ที่นำหม้อแปลงความถี่สูงมาเชื่อมต่อระหว่างวงจร M^2C^3 ทำให้วงจรมีการสำรองพลังงาน (Back-up Energy) ในระหว่างชุดวงจร เมื่อมีวงจรใดวงจรหนึ่งเกิดแรงดันตกขึ้นจะเกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อรักษา

กำลังไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า ซึ่งวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าจะช่วยป้องกันการเสียหายที่เกิดขึ้นระหว่างกัน ประหยัดอุปกรณ์แปลงผันที่นำมาติดตั้ง ลดต้นทุนและความซับซ้อนของการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ อีกทั้งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความเสถียรภาพให้แก่ระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก จะเห็นว่าวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้านั้นมีข้อเด่นอยู่หลายประการดังที่กล่าวมาแล้วนั้นมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่มีภาระไฟฟ้าหลากหลายแรงดันไฟฟ้า ที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าคงที่และประสิทธิภาพสูง

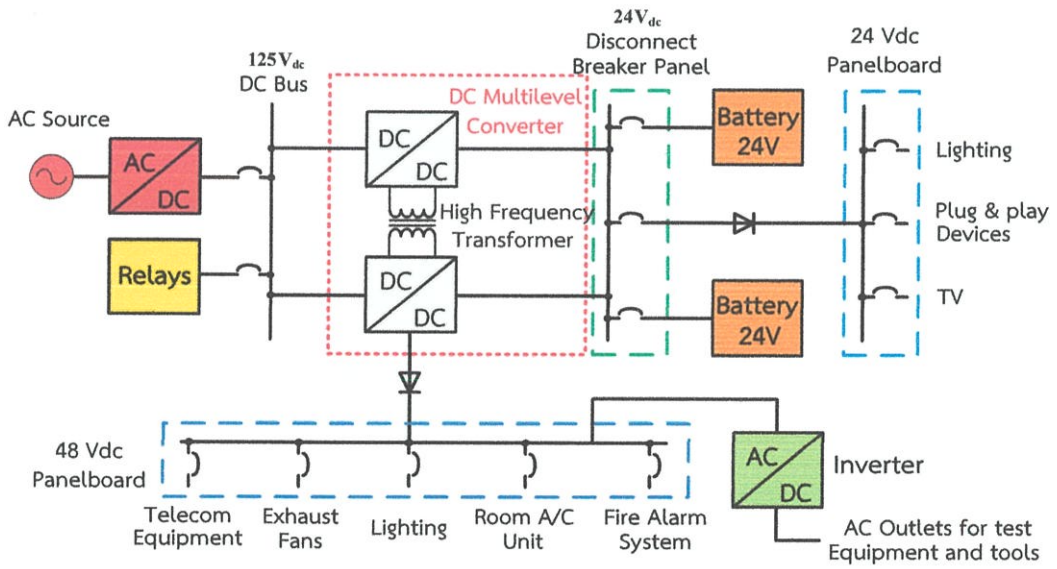
ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอถึงทฤษฎีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าระหว่างแหล่งผลิตไฟฟ้ากระแสตรง แบตเตอรี่และภาระทางไฟฟ้า รวมไปถึงการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงความถี่สูง และศึกษาถึงผลกระทบ การออกแบบขนาดของหม้อแปลงความถี่สูง สวิตช์กำลัง และตัวเก็บประจุ ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ และการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่หลากหลายแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะนำเสนอโดยการจำลองผ่านโปรแกรม PSIM 9.0 และทำการสร้างและทดสอบจากเครื่องต้นแบบจริงเพื่อยืนยันผล



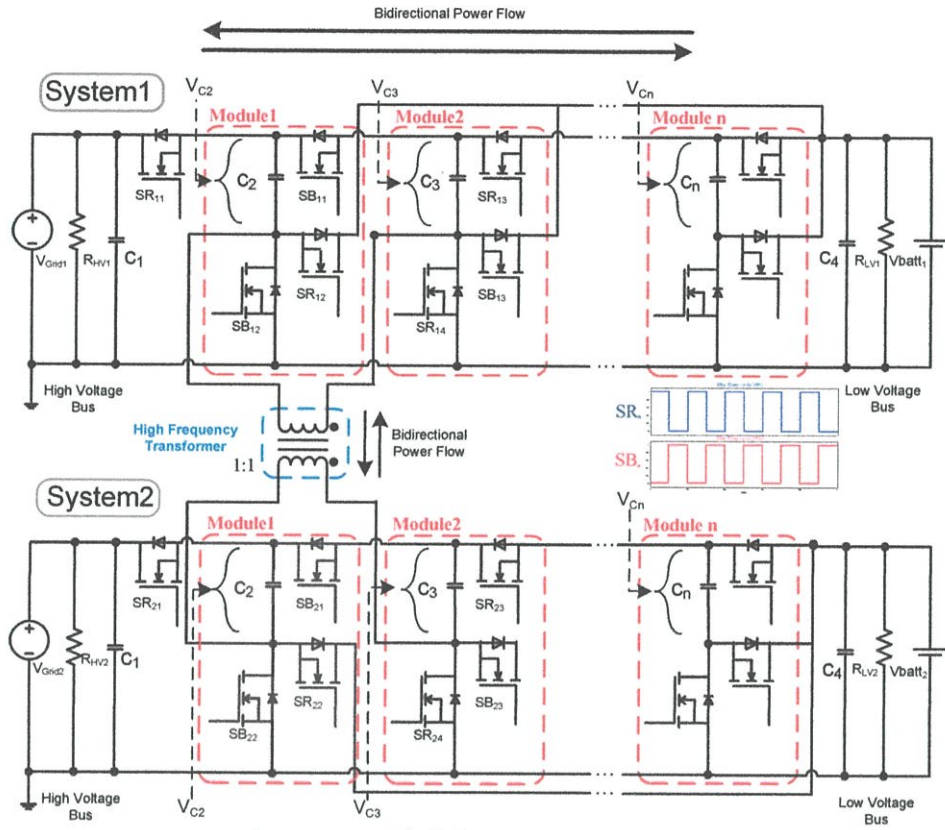
รูปที่ 1.1 ระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก



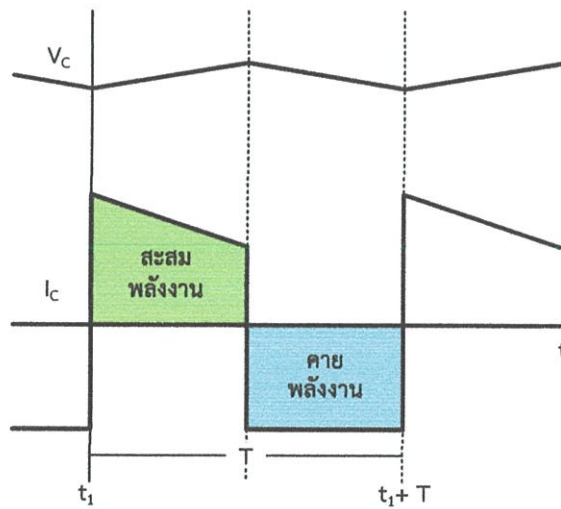
รูปที่ 1.2 สถานีไฟฟ้าย่อย



รูปที่ 1.3 สถานีไฟฟ้าย่อยที่มีวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสเชื่อมต่อยู่



รูปที่ 1.4 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้า



รูปที่ 1.5 แรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในสภาวะอยู่ตัว

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาการถ่ายโอนพลังงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแบบสองทิศทางที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับหลากหลายภาระไฟฟ้า
2. ศึกษาผลกระทบและสภาวะต่างๆของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าในขณะประยุกต์ใช้ในระบบผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก
3. วิเคราะห์การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าและขนาดของหม้อแปลงความถี่สูงที่เชื่อมต่อระหว่างวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า

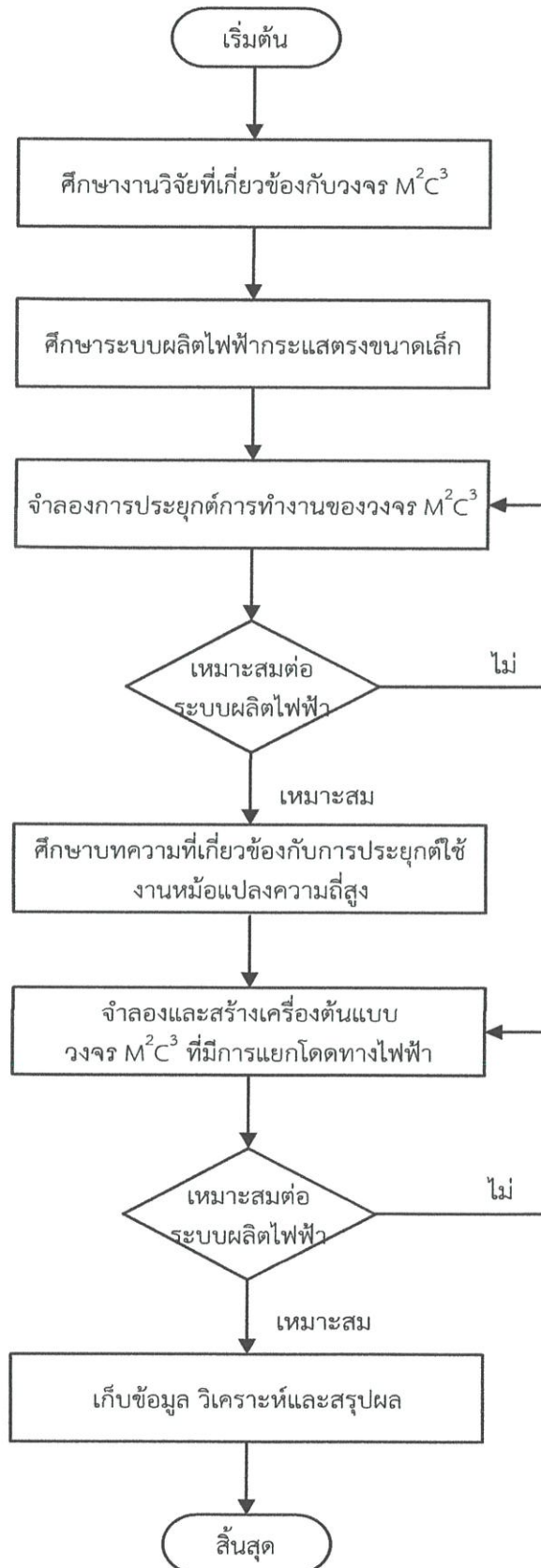
1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. สร้างเครื่องต้นแบบของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง 3 ระดับที่มีการเชื่อมระหว่างกันผ่านหม้อแปลงความถี่สูง
2. จำลองระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่มีภาระไฟฟ้าที่หลากหลายเชื่อมต่ออยู่

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. เทคนิคและวิธีการนี้ก่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ในการประยุกต์ใช้งานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแบบสองทิศทางที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า
2. เทคนิคและวิธีการที่ได้จากการวิจัยนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและเสถียรภาพให้กับระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก
3. เทคนิคและวิธีการที่ได้จากการวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าสาขาอื่นๆได้
4. องค์ความรู้ทั้งหมดที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถนำไปบูรณาการเพื่อต่อยอด ประยุกต์และพัฒนา งานวิจัยใหม่ๆเพื่อให้มีความหลากหลายต่อการใช้งานได้

1.5 ระเบียบวิธีการวิจัย



บทที่ 2

ระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กและวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็น กระแสตรงหลายระดับ

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะศึกษาถึงระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก (DC-Microgrid) ที่เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่นำพลังงานทดแทนมาใช้เพื่อผลิตไฟฟ้ากระแสตรงเป็นหลัก ซึ่งจะช่วยลดการเผาไหม้เชื้อเพลิงและลดต้นทุนการผลิต รวมไปถึงการลดการเผาไหม้ที่เป็นต้นเหตุของมลภาวะทางอากาศ ซึ่งในระบบผลิตไฟฟ้านี้จะต้องมีวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลากหลายชนิดเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมต่อภาระไฟฟ้านั้นๆ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างมากต่อระบบ จึงทำการรวบรวมและเปรียบเทียบข้อเด่นและข้อด้อยของงานวิจัย รวมไปถึงการอธิบายโครงสร้าง วิธีการควบคุมและการทำงานของวงจรในรูปแบบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC Converter) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กให้มีความเหมาะสมและประสิทธิภาพสูงที่สุด

2.2 ระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก

ระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก [1-2] เป็นระบบไฟฟ้ากำลังต่ำที่จ่ายไฟฟ้าให้กับหมู่บ้านหรือชุมชนที่มีขนาดเล็ก ที่ซึ่งอยู่ห่างไกลจากระบบสายส่งของการไฟฟ้า โดยอาจจะมียระบบผลิตไฟฟ้าอยู่เพียงระบบเดียวหรือ หลายๆระบบในพื้นที่นั้นๆหรือเรียกอีกอย่างว่าระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสม (Hybrid System) ที่มีแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน และที่ไม่ใช่พลังงานทดแทนอย่างเช่นเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Generator) ที่นำมาติดตั้งเพื่อผลิตไฟฟ้าในกรณีฉุกเฉิน ซึ่งระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมเป็นระบบที่มีความเหมาะสมที่สุดต่อระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กดังรูปที่ 1.1 ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้นจะต้องมีความคงที่และต่อเนื่องตลอดเวลา โดยประกอบไปด้วยแหล่งผลิตไฟฟ้าหลักที่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นหลักเนื่องจากในประเทศไทยมีแสงแดดที่นำมาใช้ผลิตไฟฟ้านั้นตลอดทั้งปี ซึ่งในบางพื้นที่อาจจะใช้พลังงานลมมาผลิตไฟฟ้าเพื่อเพิ่มกำลังการผลิต ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (Distribution line) ภาระไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ (Various Load) อาทิเช่นระบบแสงสว่าง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นต้น และที่สำคัญจะต้องมีระบบจัดการพลังงาน (Energy Management System, EMS) ที่เป็นระบบควบคุมให้มีการผลิตไฟฟ้าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถใช้พลังงานที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าได้อย่างเต็มที่ ซึ่งแนวคิดของระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กนั้นผู้บริโภคจะต้องมีส่วนร่วมในการเลือกใช้อุปกรณ์ที่นำมาติดตั้งให้มีความประหยัดพลังงานมากที่สุด จึงส่งผลให้ระบบผลิตไฟฟ้านั้นมีประสิทธิภาพสูง

การทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมนั้นจะแบ่งการผลิตไฟฟ้าออกเป็นช่วงเวลาดังต่อไปนี้

1) ในเวลากลางวันหรือช่วงที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงแดดหรือเครื่องกำเนิดพลังงานลมได้รับลมที่เพียงพอ จะทำให้แหล่งผลิตไฟฟ้าดังกล่าวผลิตไฟฟ้าออกมา ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้นั้นจะต้องผ่านวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (Dc-Converter) และพลังงานลมที่ผลิตไฟฟ้าได้นั้นจะมีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจึงต้องผ่านวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง (Rectifier) ก่อนถึงจะจ่ายให้กับภาระไฟฟ้าที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ ซึ่งวงจรแปลงผันต่าง ๆ นั้นจะช่วยรักษาแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ออกมาให้มีความคงที่ เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานและป้องกันความเสียหายของภาระไฟฟ้าที่นำมาเชื่อมต่อ และเมื่อแหล่งผลิตไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าภาระไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่ จะทำให้เหลือพลังงานไฟฟ้าที่ไม่ใช้งาน ซึ่งพลังงานเหล่านั้นจะนำมาสะสมประจุให้กับแบตเตอรี่ (Charge Battery) เพื่อเก็บพลังงานเหล่านั้นไว้ใช้ในยามที่เซลล์แสงอาทิตย์และเครื่องกำเนิดพลังงานลมผลิตไฟฟ้าได้ไม่เพียงพอต่อความต้องการของภาระไฟฟ้า ซึ่งแบตเตอรี่นั้นจะทำงานเป็นแหล่งสำรองพลังงานไฟฟ้า (Back-up Energy)

2) ในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งเป็นช่วงที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตพลังงานไฟฟ้าไม่ได้ ภาระไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่จะได้รับไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดพลังงานลมและพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่

3) ในกรณีฉุกเฉิน ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์และเครื่องกำเนิดพลังงานลมนั้นจะไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมาได้ ตลอดจนพลังงานไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ก็ไม่เพียงพอต่อความต้องการของภาระทางไฟฟ้า ส่งผลให้เครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Generator) จะทำงานอัตโนมัติเพื่อผลิตไฟฟ้าจ่ายให้กับภาระไฟฟ้า

ในการทำงานของแหล่งผลิตไฟฟ้าแต่ละเครื่องนั้นจะเชื่อมต่ออยู่กับวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าที่เป็นตัวควบคุมและรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ ซึ่งในระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กนั้นจะเชื่อมต่ออยู่กับภาระไฟฟ้าที่หลากหลายแรงดันไฟฟ้า จึงจำเป็นที่จะต้องมียังวงจรแปลงผันหลากหลายชนิดและขนาดแรงดันไฟฟ้า ส่งผลให้มียังระบบจัดการพลังงาน (Energy Management System) ที่ใช้ควบคุมวงจรแปลงผันต่างๆให้ทำงานสอดคล้องกันเพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กมีประสิทธิภาพสูงที่สุด ซึ่งระบบการจัดการนี้จะควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ที่สามารถแสดงผลและควบคุมอุปกรณ์ต่างๆได้ดังนี้

1) ต้องมีการแสดงผลความต้องการใช้ไฟฟ้าในทุกช่วงเวลา เพื่อควบคุมการผลิตไฟฟ้าให้มีความสอดคล้องต่อภาระไฟฟ้าช่วงเวลานั้นๆ

2) ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์แปลงผันต่างๆให้มีความสอดคล้องกันระหว่างแหล่งผลิตไฟฟ้ากับภาระไฟฟ้า

3) ในกรณีฉุกเฉินที่ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ จะต้องควบคุมเครื่องยนต์ดีเซลให้ผลิตไฟฟ้าได้อัตโนมัติ

และในระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กนั้นจะประกอบไปด้วยระบบย่อยหลายระบบอาทิเช่น ระบบจำหน่ายไฟฟ้า ระบบจัดการพลังงานไฟฟ้าและภาระไฟฟ้า ซึ่งจะอธิบายแต่ละระบบได้ดังนี้

2.2.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้นจะเป็นสายส่งแรงดันต่ำ ที่ซึ่งขนาดของสายส่งจะขึ้นอยู่กับระบบที่ติดตั้ง โดยต้องมีการเลือกใช้ชนิดของสายไฟ ขนาดและความยาวของสายส่งให้เหมาะสมต่อระบบผลิตไฟฟ้าในพื้นที่นั้นๆ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพโดยรวมสูงที่สุด

2.2.2 ระบบจัดการพลังงานไฟฟ้า

ระบบจัดการพลังงานไฟฟ้า (Energy Management System, EMS) เป็นระบบจัดการพลังงานที่ควบคุมอุปกรณ์แปลงผันแต่ละชนิด ให้มีความสอดคล้องกันระหว่างแหล่งผลิตไฟฟ้ากับภาระไฟฟ้า ซึ่งการจัดการที่ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดนั้นจะต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจากการผลิตของแหล่งพลังงานทดแทนให้ได้มากที่สุด และลดการใช้พลังงานที่ผลิตได้จากเครื่องยนต์ดีเซล หรือแบตเตอรี่ให้ได้มากที่สุด อีกทั้งยังต้องเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อลดความสูญเสียที่เกิดขึ้น โดยการจัดการพลังงานนั้นจะต้องเป็นไปตามหลักการสมดุลพลังงานของแหล่งผลิตไฟฟ้าและภาระไฟฟ้างดสมการที่ 2.1

$$E_{In} = E_{Out} \quad (2.1)$$

โดยที่

$$E_{In} = E_S + E_G \quad (2.2)$$

$$E_{Out} = E_L + E_{loss} \quad (2.3)$$

เมื่อ

E_S คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งผลิตไฟฟ้า (kWh)

E_G คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องยนต์ดีเซล (kWh)

E_L คือ พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้ภาระไฟฟ้า (kWh)

E_{loss} คือ พลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียในระบบ (kWh)

และการควบคุมอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าแต่ละชนิดให้ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดนั้นจะต้องติดตั้งอุปกรณ์แต่ละตัวให้มีความใกล้เคียงจุดทำงานสูงสุด และสภาวะเงื่อนไขของอุปกรณ์นั้นๆ จึงจะสามารถใช้ประโยชน์จากการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เต็มที่ ซึ่งการเลือกใช้อุปกรณ์แต่ละชนิดนั้นจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- เซลล์แสงอาทิตย์ จะผลิตพลังงานไฟฟ้าให้ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดนั้นจะต้องติดตั้งในพื้นที่ที่ได้รับแสงตลอดเวลาและใกล้กับภาระไฟฟ้า อีกทั้งยังต้องหมั่นทำความสะอาดแผงเซลล์เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงแดดมากที่สุด โดยที่ตัวแปรในการชี้วัดประสิทธิภาพ (Performance ratio, P_R) นั้นจะหาได้จากสมการ

$$P_R = \frac{E_{PV} \times I_{STC}}{P_N \times G \times Q} \times 100\% \quad (2.4)$$

โดยที่

E_{PV} คือ พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกใช้โดยภาระไฟฟ้า (kWh)

P_N คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะมาตรฐาน (kW)

G คือ ค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์บนพื้นโลก (kWh/m²)

I_{STC} คือ ค่ารังสีดวงอาทิตย์ตามมาตรฐาน STC = 1 kWh/m²

Q คือ ตัวแปรคุณภาพไฟฟ้า (Quality factor)

- เครื่องยนต์ดีเซลหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในกรณีฉุกเฉินเท่านั้น ซึ่งจะถูกรักษาให้ทำงานในขณะที่การผลิตไฟฟ้าของระบบลดต่ำกว่า 40% ของสภาวะปกติ ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นไม่ควรที่จะนำมาผลิตไฟฟ้าโดยไม่จำเป็นเนื่องจากเป็นการเพิ่มมลภาวะทางอากาศและค่าต้นทุนเชื้อเพลิง

- แบตเตอรี่ เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบผลิตไฟฟ้า กระแสตรงขนาดเล็ก ในการผลิตไฟฟ้าในสภาวะปกตินั้นแบตเตอรี่จะทำหน้าที่เสมือนเป็นภาระไฟฟ้าในระบบ หลังจากนั้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่แบตเตอรี่เต็มแล้วจะไม่มีภาระประจุกอีก และเมื่อระบบผลิตไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าได้ไม่เพียงพอต่อภาระไฟฟ้าที่ต้องการ แบตเตอรี่จะจ่ายอินพลังงานไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้า ซึ่งแบตเตอรี่นั้นจะทำงานได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดและมีอายุการใช้งานที่นานนั้นจะต้องถูกระบบจัดการและควบคุมให้ได้ดังนี้

- หลีกเลี่ยงการสะสมประจุแบตเตอรี่ที่กระแสไฟฟ้าสูงจนเกินมาตรฐาน
- หลีกเลี่ยงการใช้แบตเตอรี่เป็นเวลานานๆจนหมดเพราะจะทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลงอย่างรวดเร็ว
- ระวังการต่อขั้วแบตเตอรี่ผิดขั้ว
- รักษาอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้อยู่ในมาตรฐานการใช้งาน
- ตรวจสอบแผ่นธาตุและน้ำกลั่นอย่างสม่ำเสมอ

2.2.3 ภาระไฟฟ้า

ภาระไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่สำคัญมากต่อการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้า ซึ่งจะต้องมีการแสดงผลอัตราการใช้ไฟฟ้าของพื้นที่นั้นๆ อย่างแม่นยำถูกต้องเพื่อให้ระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ต้องการ เพื่อให้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆในระบบให้ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุด อีกทั้งยังส่งผลถึงการออกแบบและวางแผนการก่อสร้างระบบผลิตไฟฟ้าอีกด้วย ซึ่งค่าที่ต้องประเมิน

ของภาระไฟฟ้านั้นจะต้องดู ความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดในพื้นที่นั้นๆ พฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดวัน และอัตราการเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานไฟฟ้า เป็นต้น

2.3 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง

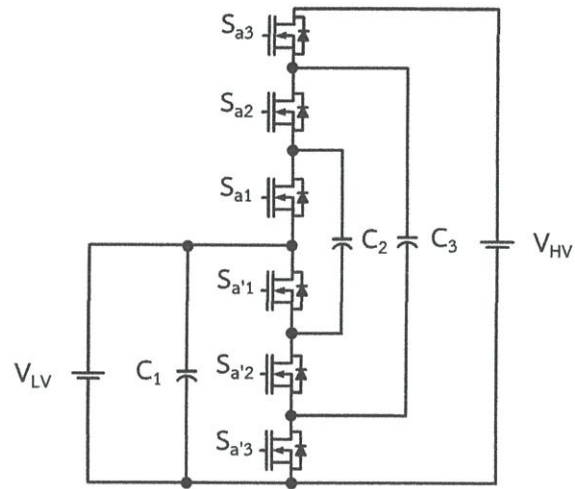
วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC Converter) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างมากต่อระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ใช้รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้มีความคงที่ต่อเนื่องและเหมาะสมต่อภาระไฟฟ้านั้นๆ ที่ซึ่งในระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะเชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าที่หลากหลายแรงดันไฟฟ้า จึงจำเป็นที่จะต้องมียังวงจรแปลงผันที่หลากหลายขนาดตามไปด้วย ส่งผลให้เกิดความซับซ้อนต่อการควบคุมการทำงาน อีกทั้งยังเพิ่มการสูญเสียที่เกิดจากวงจรแปลงผันต่างๆด้วย จึงทำให้นักวิจัยหลายๆท่านทำการวิจัยวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแรงดันไฟฟ้า (DC-DC Multilevel Converter) เพื่อลดจำนวนการใช้วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าในระบบ ซึ่งในบทนี้จะขอเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่หลากหลายระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆดังนี้

2.3.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดไฟร์อิงคาปาซิเตอร์

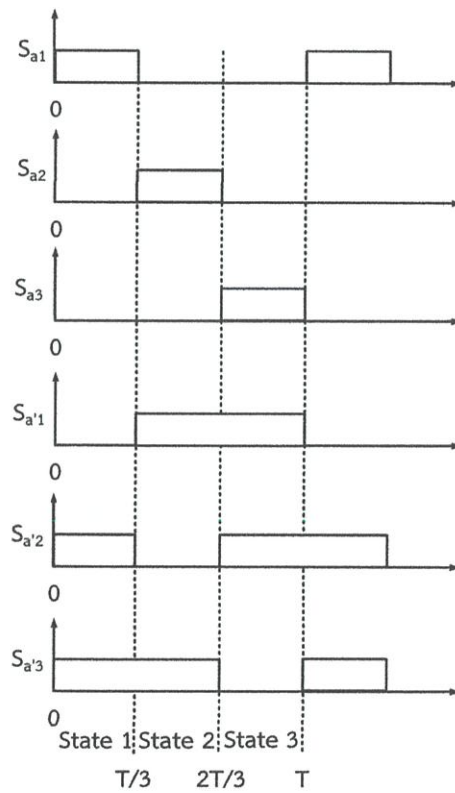
(Flying Capacitor Multilevel DC-DC Converter หรือ FCMDC)

วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดไฟร์อิงคาปาซิเตอร์ (FCMDC) [14-15] 3 ระดับดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีความสามารถในการเพิ่มและลดระดับแรงดันไฟฟ้าได้ 3 ระดับ โดยอาศัยหลักการควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังดังรูปที่ 2.2 ส่งผลให้เกิดการสะสมและคายประจุของตัวเก็บประจุในแต่ละตัวดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 เพื่อให้มีการถ่ายโอนพลังงานและรักษาอัตราการแปลงผันให้มีแรงดันไฟฟ้าคงที่ จะมีข้อเด่นในเรื่องของโครงสร้างวงจรที่ไม่ซับซ้อน และมีแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์กำลังแต่ละตัวมีค่าเท่ากันคือ V_{LV} แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างของวงจรมีข้อด้อยอยู่หลายประการคือ

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



รูปที่ 2.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดไฟร์อิงค์คาปาซิเตอร์ 3 ระดับ



รูปที่ 2.2 สัญญาณควบคุมวงจรมงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง

ตารางที่ 2.1 สภาวะการอัดประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ

ขั้นการทำงาน	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	$C_2 \downarrow \rightarrow C_1 \uparrow$
\downarrow คือ สภาวะการคายประจุ และ \uparrow คือ สภาวะการอัดประจุ	

ตารางที่ 2.2 สภาวะการอัดประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง

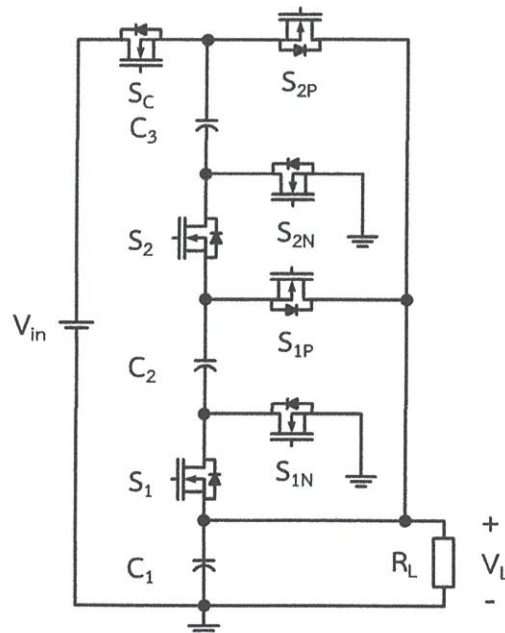
ขั้นการทำงาน	สภาวะการทำงาน
ขั้นตอนที่ 1	$C_1 \downarrow \rightarrow C_2 \uparrow$
ขั้นตอนที่ 2	$C_2 \downarrow + C_1 \downarrow \rightarrow C_3 \uparrow$
ขั้นตอนที่ 3	$C_3 \downarrow + C_1 \downarrow \rightarrow C_4 \uparrow$
\downarrow คือ สภาวะการคายประจุ และ \uparrow คือ สภาวะการอัดประจุ	

2.3.2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์

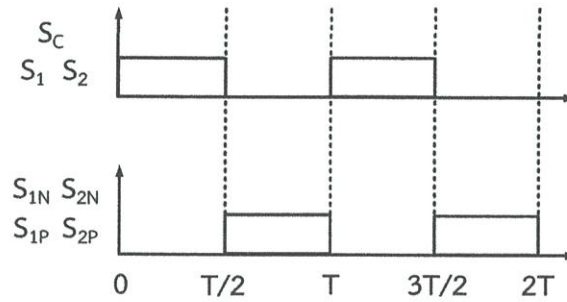
(Switched Capacitor Multilevel DC-DC Converter)

วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์ 3 ระดับ [16] ดังรูปที่ 2.3 โดยอาศัยหลักการทำงานของสวิตช์กำลังที่ควบคุมง่ายดังรูปที่ 2.4 เพื่อทำการสะสมและคายประจุให้กับชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลในแต่ละตัว ส่งผลให้เกิดการอนุกรมและขนานกันของตัวเก็บประจุขึ้น ซึ่งทำให้วงจรสามารถลดระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านขาออกลง 3 เท่าจากแรงดันไฟฟ้าขาเข้า ($V_{out} = 1/3 V_{in}$) ถึงแม้ว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์ จะมีข้อเด่นในเรื่องของรูปแบบการควบคุมการทำงานที่ไม่ซับซ้อน แต่อย่างไรก็ตามวงจรมีข้อด้อยอยู่หลายประการคือ

- เมื่อมีชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุทำได้ยาก เนื่องจากผลกระทบของการสะสมและคายประจุของตัวเก็บประจุแต่ละตัว
- แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์กำลังตัวบน S_C S_{2P} และ S_{2N} จะมีค่าสูงมากกว่า 2 เท่าของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์กำลังตัวล่าง S_2 และ S_{1P} เมื่อวงจรมีจำนวนระดับเพิ่มสูงขึ้น
- วงจรนี้ไม่มีความสามารถในการบาสพาสความถี่พ้องได้
- วงจรนี้ไม่สามารถถ่ายโอนพลังงานได้สองทิศทาง ซึ่งจะถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากทางบัสแรงดันไฟฟ้าสูงไปยังบัสแรงดันไฟฟ้าต่ำเท่านั้น



รูปที่ 2.3 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์ 3 ระดับ

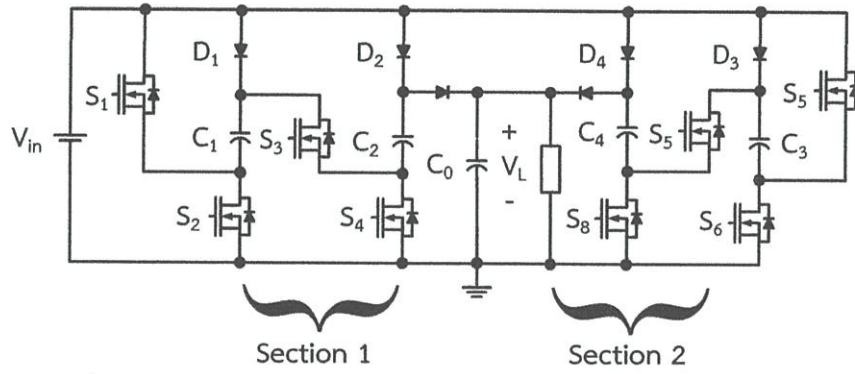


รูปที่ 2.4 สัญญาณควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิด
ตัวเก็บประจุสวิตช์ 3 ระดับ

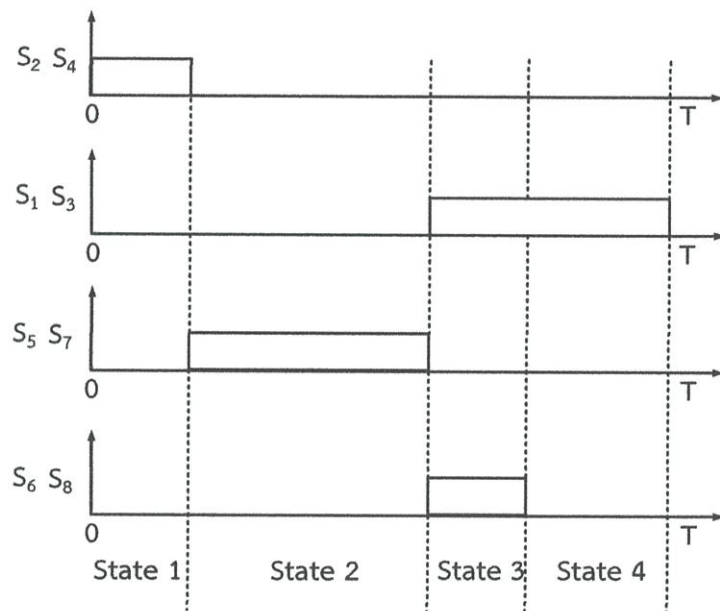
2.3.3 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแบบ สวิตช์โหมด (Switch Mode Step Up Multilevel DC-DC Converter)

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมด [17] ดังแสดงในรูปที่ 2.5 วงจรนี้จะมีความสามารถในการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น โดยใช้หลักการขนานกันของแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์ และการทำงานของวงจรมันจะถูกควบคุมด้วยสัญญาณสวิตช์กำลังที่ประกอบไปด้วย 4 สถานะดังแสดงในรูปที่ 2.6 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมดจะมีจุดเด่นในเรื่องของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตโดยการปรับเปลี่ยนค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ซึ่งดิวตี้ไซเคิลการทำงานของสถานะที่ 1 จะมีค่าเท่ากับสถานะที่ 3 ส่วนดิวตี้ไซเคิลการทำงานของสถานะที่ 2 จะมีค่าเท่ากับสถานะที่ 4 ทำให้วงจรสามารถทำงานที่ความถี่สูงๆได้ และนอกจากนี้ข้อเด่นอีกประการหนึ่งของวงจรมันก็คือ การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) น้อยเนื่องจากกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุตมีค่าต่ำ แต่อย่างไรก็ตามวงจรมันยังมีข้อด้อยคือ

- สามารถถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าได้ทิศทางเดียว คือทิศทางที่มีการถ่ายโอนพลังงานจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูงเท่านั้น
- มีความสูญเสียจากการสวิตช์ (Switching Loss) สูงเมื่อใช้งานที่ความถี่และกำลังไฟฟ้าสูงๆ
- ไม่สามารถกำจัดความผิดพร่องในชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล



รูปที่ 2.5 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิด
เพิ่มแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตซ์โหมด

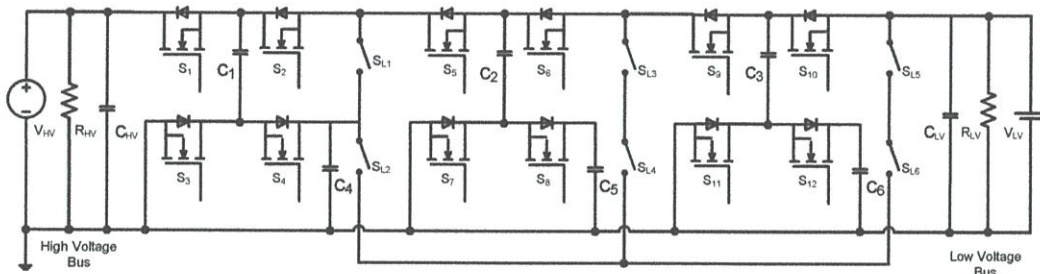


รูปที่ 2.6 สัญญาณควบคุมวงจรถ่ายแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิด เพิ่ม
แรงดันไฟฟ้าแบบสวิตซ์โหมด

2.3.4 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีหลากหลายอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า (Universal Multilevel DC-DC Converter with Variable Conversion Ratio)

วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีหลากหลายอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า [18] ดังแสดงในรูป 2.7 วงจรนี้เป็นการนำวงจร M^2C^3 มาประยุกต์เพิ่มเติมเพื่อให้สามารถเลือกใช้แรงดันได้หลากหลายมากขึ้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการควบคุมการสวิตช์ของสวิตช์ตัดต่อและสวิตช์กำลัง โดยการควบคุมนั้นจะใช้สัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีมุมเฟสตรงข้ามกันเท่านั้นเหมือนกับวงจร M^2C^3 ส่งผลให้ง่ายต่อการควบคุมวงจร และวงจรนี้จะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 แบบคือแบบปกตินั้นจะทำงานเหมือนวงจร M^2C^3 ที่มีอัตราส่วนแปลงผันแรงดันไฟฟ้าที่ 4 ระดับ และแบบยกระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งในรูปแบบนี้จะทำให้วงจรสามารถเพิ่มอัตราการแปลงผันแรงดันไฟฟ้าขึ้นไปสูงถึง 8 ระดับซึ่งเป็นข้อเด่นสำคัญของวงจรนี้ อีกทั้งยังมีข้อเด่นอื่นๆ อาทิเช่น สามารถไหลได้สองทิศทาง ไม่มีตัวเหนี่ยวนำ มีประสิทธิภาพสูงและจะสรุปอัตราการแปลงผันได้ดังตารางที่ 2.3 แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อด้อยอยู่คือ

- มีการสูญเสียจากการสวิตช์ที่สูง (Switching Loss) เนื่องจากจำนวนสวิตช์จะมีจำนวนเท่ากับ $4N$
- จำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์มากขึ้นกว่าวงจร M^2C^3 แบบดั้งเดิมส่งผลให้เกิดการสูญเสียที่ตัวอุปกรณ์มากขึ้น



รูปที่ 2.7 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีหลากหลายอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า

ตารางที่ 2.3 วิธีการควบคุมให้ได้อัตราแปลงผันแรงดันไฟฟ้าที่หลากหลาย

CR	Module 1	Module 2	Module 3
2	M	B	B
2	B	M	B
2	B	B	M
3	R	R	B
4	R	R	M
4	M	M	B
6	M	R	M
8	M	M	M

B = ทำงานแบบบายพาส , M = ตัวเพิ่มระดับแรงดัน , R = ทำงานปกติ

2.6 สรุป

จากการศึกษาถึงระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่มีภาระไฟฟ้าที่หลากหลายแรงดันไฟฟ้านั้น จะทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องใช่วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลากหลายชนิด และที่รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้มีความคงที่ต่อเนื่อง เพื่อป้องกันความเสียหายของภาระไฟฟ้าและอุปกรณ์ต่างๆในระบบผลิตไฟฟ้า แต่วงจรแปลงผันที่นำมาใช้ส่วนใหญ่จะแปลงผันแรงดันไฟฟ้าได้เพียงค่าเดียว จึงส่งผลให้มีการสูญเสียจากการแปลงผันแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มความซับซ้อนในการจัดการและควบคุมอุปกรณ์ต่างๆของระบบจัดการพลังงานไฟฟ้า จึงได้ทำการศึกษางานวิจัยอื่นๆ (Literature Review) เพื่อหาวงจรถแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแรงดันไฟฟ้า เพื่อลดการใช่วงจรแปลงผันหลายชนิด อีกทั้งยังทำให้ง่ายต่อการจัดการและควบคุมอุปกรณ์ต่างๆอีกด้วย ซึ่งในบทนี้จะอธิบายถึงโครงสร้าง วิธีการควบคุมการทำงานของวงจรถแปลงผันแต่ละชนิด และทำการเปรียบเทียบวงจรถแปลงผันแรงดันไฟฟ้าต่างๆไว้ในตารางที่ 2.4 ซึ่งจะเห็นว่าวงจรถแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแบบสองทิศทาง (Multilevel Modular Capacitor Clamped DC-DC Converter หรือ M^2C^3) มีความเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงมากที่สุด โดยจะอธิบายโครงสร้าง วิธีการควบคุมและการทำงานของวงจรถแปลงผัน รวมถึงการออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆในวงจรถแปลงผันต่อไป

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรแปลงผันไฟฟ้การะแสดงเป็นกระแสดงหลายระดับแต่ละชนิด

ชนิดวงจรแปลงผันไฟฟ้การะแสดงเป็นกระแสดงหลายระดับ	ข้อดี	ข้อเสีย
<p>วงจรแปลงผันไฟฟ้การะแสดงเป็นกระแสดงชนิดไฟร์อิงค์คาปาซิเตอร์</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● โครงสร้างของวงจรไม่ซับซ้อน ● แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์กำลังแต่ละตัวมีค่าเท่ากัน ● สามารถโอนย้ายพลังงานแบบสองทิศทาง 	<ul style="list-style-type: none"> ● เมื่อจำนวนระดับเพิ่มมากขึ้นทำให้ยากต่อการควบคุมการทำงาน ● เมื่อจำนวนระดับเพิ่มมากขึ้นจะมีจำนวนสวิตช์กำลังมากขึ้นตาม ● อุปกรณ์สวิตช์กำลังเกิดความเครียดจาก dv/dt มีค่าสูง ● โครงสร้างของวงจรไม่มีความสามารถในการบายพาสความผิดพลาด ● โครงสร้างของวงจรไม่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานที่ความถี่สูง
<p>วงจรแปลงผันไฟฟ้การะแสดงเป็นกระแสดงชนิดตัวเก็บประจุสวิตช์</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● โครงสร้างของวงจรไม่ซับซ้อน ● การควบคุมวงจรไม่ซับซ้อน 	<ul style="list-style-type: none"> ● เมื่อวงจรมีจำนวนระดับเพิ่มมากขึ้นทำให้การรักษาความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าในตัวเก็บประจุแต่ละตัวให้มีค่าคงที่ที่จะกระทำได้อย่าง ● แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวสวิตช์มีค่าสูงเมื่อวงจรมีจำนวนระดับมากขึ้น ● วงจรไม่สามารถควบคุมทิศทางการโอนย้ายพลังงานแบบสองทิศทาง ● วงจรไม่มีความสามารถในการบายพาสความผิดพลาด

ตารางที่ 2.5(ต่อ) การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแต่ละชนิด

ชนิดวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ	ข้อดี	ข้อเสีย
<p>วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับชนิดเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมด</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● ควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้โดยการปรับดิวิตีเซิล ● การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> ● โครงสร้างของวงจรไม่มีความสามารถในการขยายความผิดพลาด ● ความสูญเสียจากการสวิตช์สูงเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่และกำลังสูง ● วงจรไม่สามารถควบคุมทิศทางการโอนย้ายพลังงานแบบสองทิศทาง
<p>วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีหลากหลายอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● สามารถโอนย้ายพลังงานแบบสองทิศทาง ● การควบคุมวงจรไม่ซับซ้อน ● ผลิตแรงดันไฟฟ้าได้หลากหลายระดับแรงดัน ● สามารถทำการบาลานซ์ความผิดพลาด 	<ul style="list-style-type: none"> ● มีการสูญเสียจากการสวิตช์ที่สูง (Switching Loss) เนื่องจากจำนวนสวิตช์จะมีจำนวนเท่ากับ 4N ● จำเป็นที่จะต้องใช้ตัวเก็บประจุมากขึ้นกว่าวงจร M^2C^3 แบบดั้งเดิมส่งผลให้เกิดการสูญเสียที่ตัวอุปกรณ์มากขึ้น

บทที่ 3

วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ แบบสองทิศทางที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า

3.1 บทนำ

บทนี้จะอธิบายถึงโครงสร้างของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแบบสองทิศทางที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า (Multilevel Modular Clamped Capacitor Converter (M^2C^3) with Grounding Isolation) ซึ่งวงจร M^2C^3 จะใช้หลักการสะสมและคายประจุของตัวเก็บประจุที่ซึ่งใน 1 คาบเวลาจะต้องมีพื้นที่ของการสะสมและคายประจุที่เท่ากันและแรงดันไฟฟ้าไม่สามารถเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดได้ ส่งผลให้สัญญาณสวิตซ์จึงใช้ตัวดีไอซีเคลสที่ 50% เพื่อให้เกิดการอนุกรมและขนานกันของตัวเก็บประจุในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล ทำให้วงจร M^2C^3 ทำงานเสมือนหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถเลือกกระดบแรงดันไฟฟ้า (Tap-Changed DC Transformer) โดยการเลือกใช้แรงดันไฟฟ้านั้นจะเชื่อมต่อที่ขั้วตัวเก็บประจุในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลที่จะมีระดับแรงดันไฟฟ้าที่มีความหลากหลายแรงดันไฟฟ้า โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่นำไปเชื่อมต่อจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำและจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลของวงจร และเมื่อนำวงจร M^2C^3 แต่ละชุดวงจรมาเชื่อมต่อกันผ่านหม้อแปลงความถี่สูงจะทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าซึ่งสามารถสำรองพลังงานไฟฟ้าซึ่งกันและกัน อีกทั้งยังเป็นการแยกโดดทางไฟฟ้าเพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นจากความผิดพลาดของชุดวงจรใดวงจรหนึ่ง ซึ่งในบทนี้จะอธิบายถึงทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าในแต่ละรูปแบบการทำงาน วิธีการควบคุมสัญญาณของสวิตซ์กำลังแต่ละตัว รวมไปถึงวิธีการออกแบบและการถ่ายโอนพลังงานของหม้อแปลงความถี่สูง (High Frequency Transformer) สวิตซ์กำลังไฟฟ้าและตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจร นอกจากนั้นจะทำการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่างๆเพื่อศึกษาทิศทางการถ่ายโอนและประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ เพื่อนำไปวิเคราะห์ถึงความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก ในการอธิบายวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าดังรูปที่ 3.1 นั้นจะประกอบไปด้วยวงจร M^2C^3 2 ชุดวงจรมาเชื่อมต่อกันผ่านหม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งจะขอเริ่มอธิบายการทำงาน of วงจร M^2C^3 ชุดเดียวดังรูปที่ 3.2 เพื่อช่วยต่อการเข้าใจการทำงาน of วงจร M^2C^3 ให้ถ่องแท้ก่อนที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆ

3.2 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแบบสองทิศทาง

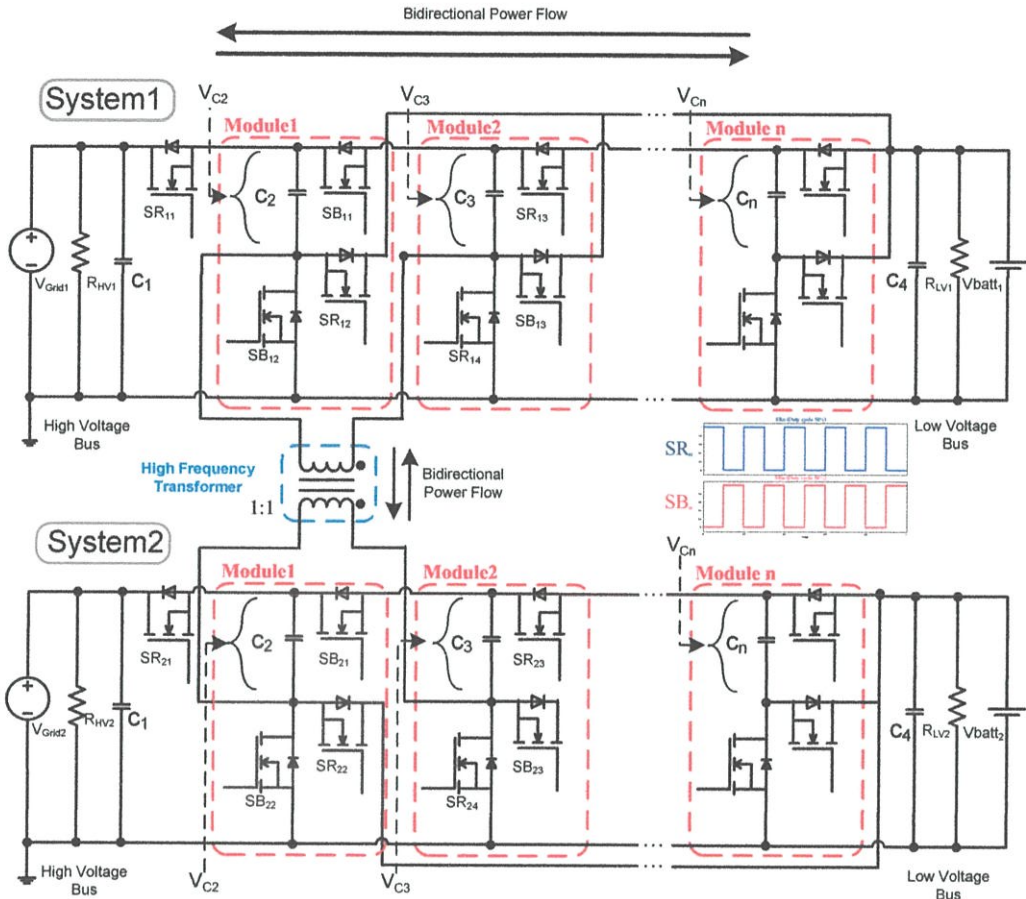
วงจร M^2C^3 [6-10] จะใช้หลักการหลักๆอยู่ 2 อย่างคือการสมดุลพลังงานระหว่างบัสทั้งสองฝั่ง (Balanced Energy) และการสะสมและคายประจุ (Charged and Discharged) ของตัวเก็บประจุที่จะต้องมามีค่าเท่ากัน เพื่อให้เกิดการสมดุลพลังงานที่ควบคุมจากทำงานของสวิตช์กำลัง ซึ่งจากหลักการดังกล่าวทำให้วงจร M^2C^3 สามารถเพิ่มและลดระดับแรงดันไฟฟ้าได้ โดยระดับแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มและลดนั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลที่เชื่อมต่อกันอยู่แบบอนุกรม ซึ่งแต่ละชุดจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์สวิตช์กำลัง 3 ตัวและตัวเก็บประจุ 1 ตัวดังแสดงในรูปที่ 3.3 และในสัญญาณที่จ่ายให้สวิตช์กำลังนั้นจะควบคุมง่าย ไม่ซับซ้อน ซึ่งทั้ง 2 ชุดวงจรจะรับสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีมมเฟสตรงข้ามกันเท่านั้น จากการศึกษาและทดลองวงจร M^2C^3 จะมีจุดเด่นอยู่หลายประการที่ทำให้เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก รวมไปถึงจุดด้อยของวงจร M^2C^3

จุดเด่นของวงจร M^2C^3 มีดังนี้

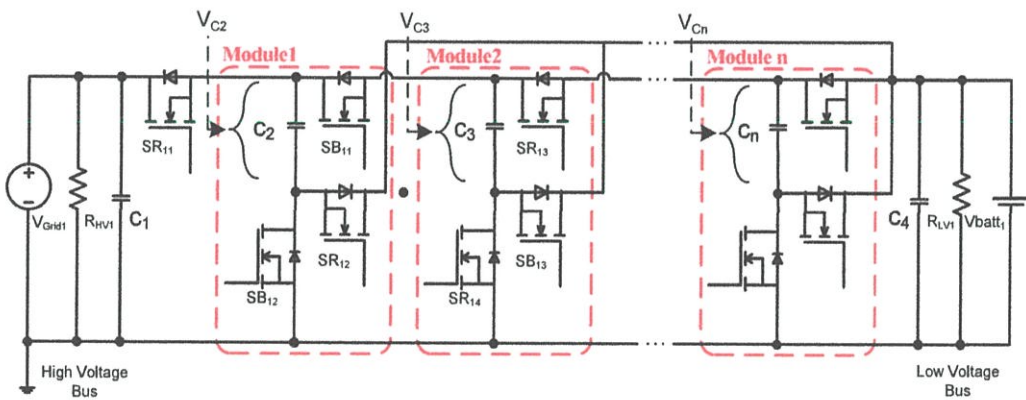
- สามารถเลือกใช้แรงดันไฟฟ้าได้หลากหลายระดับแรงดัน ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลและแรงดันไฟฟ้าบัสแรงดันต่ำ เสมือนเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่เลือกแรงดันไฟฟ้าได้หลากหลาย
- วงจร M^2C^3 นี้จะไม่มีการนำตัวเหนี่ยวนำมาเป็นองค์ประกอบจึงทำให้ขนาดของวงจรมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา
- วงจร M^2C^3 สามารถบายพาสชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลได้เพื่อกำจัดฟอลต์ที่เกิดขึ้น อีกทั้งรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กให้คงที่
- วงจร M^2C^3 ควบคุมง่าย ไม่ซับซ้อน เนื่องจากสวิตช์กำลังจะรับสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีดีวีไอซีเคิล 50%
- วงจร M^2C^3 มีแรงดันกระเพื่อม (dv/dt) ต่ำ
- วงจร M^2C^3 จะมีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบทันทีทันใดเมื่อมีบัสใดบัสหนึ่งเกิดแรงดันไฟฟ้าลดลงจากปกติ

และจุดด้อยของวงจร M^2C^3 จะมีดังต่อไปนี้

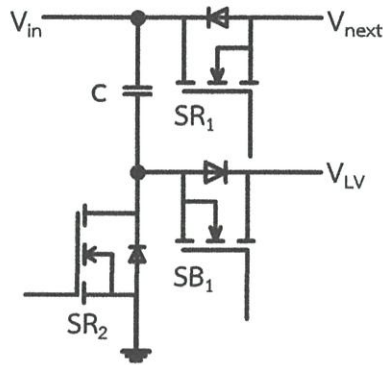
- ความสูญเสียจากสวิตช์กำลังค่อนข้างสูงเนื่องจากใช้สวิตช์กำลังเป็นจำนวนมากตามสมการ 3N-2 ตัว
- สวิตช์กำลังที่เชื่อมต่อกับขั้วบวกของตัวเก็บประจุจะต้องมีพิคกิ้งแรงดันอย่างน้อย 2 เท่าของแรงดันทางบัสแรงดันต่ำ
- วงจร M^2C^3 จะไม่สามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จะนำไปสะสมพลังงานให้กับแบตเตอรี่ได้โดยตรง ซึ่งจะควบคุมกระแสที่ไหลเข้าแบตเตอรี่ด้วยการควบคุมแรงดันทั้งสองบัสที่เชื่อมต่อกับวงจร M^2C^3 ให้เป็นไปตามหลักการสมดุลพลังงาน



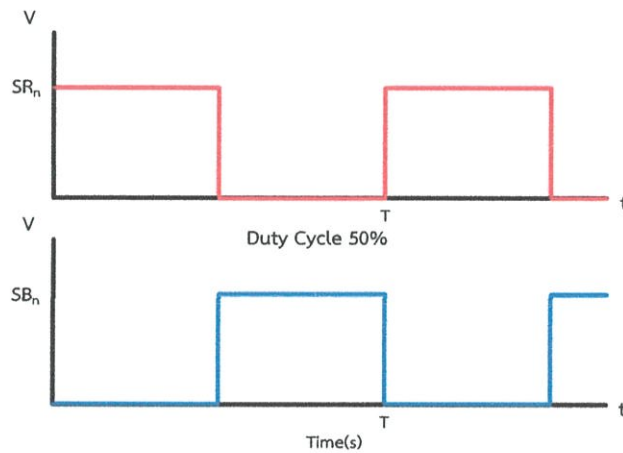
รูปที่ 3.1 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.2 วงจร M^2C^3 1 ชุดที่มี n ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล



รูปที่ 3.3 ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล 1 ชุด



รูปที่ 3.4 สัญญาณควบคุมที่มีเฟสตรงข้ามกัน

3.3 หลักการควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังในวงจร M^2C^3

หลักการควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังจะรับสัญญาณที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม 2 สัญญาณและมีมุมเฟสต่างกัน 180 องศา (Out of Phase) ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งทั้งสองสัญญาณจะแทนสัญลักษณ์ในรูปวงจรถ้าเป็นสัญญาณ SR_n และ SB_n โดยที่มีความถี่ของทั้งสองสัญญาณอยู่ที่ 10 kHz ทำให้สวิตช์กำลังทำงานสลับกัน เพื่อให้เกิดการสะสมและคายประจุของตัวเก็บประจุในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล ส่งผลให้เกิดการอนุกรมและขนานกันของตัวเก็บประจุ จึงเกิดระดับแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันที่ตัวเก็บประจุ ซึ่งมีค่าเป็นระดับเท่าของแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำ

3.4 หลักการถ่ายโอนพลังงานของวงจร M^2C^3

โดยปกติการถ่ายโอนพลังงานของวงจร M^2C^3 จะถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบทันทีทันใดได้ทั้งสองทิศทาง โดยใช้หลักการของการสมดุลพลังงานไฟฟ้าระหว่างบัสแรงดันสูงกับบัสแรงดันต่ำ จึงทำให้ธรรมชาติของวงจร M^2C^3 นั้นจะแบ่งการทำงานออกเป็น 3 รูปแบบคือการทำงานในรูปแบบปกติ เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ลดระดับแรงดันไฟฟ้า และในงานวิจัยนี้จะมีการเพิ่มการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าอีก 1 รูปแบบคือ รูปแบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้านั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการแปลงผัน (Convention ratio หรือ CR) และอัตราส่วนของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Ratio of voltage source หรือ RVS) กล่าวคือ ถ้าค่า $RVS = CR$ ซึ่งเป็นรูปแบบปกติจะไม่เกิดการถ่ายโอนพลังงานขึ้นในวงจร ส่งผลให้ไม่มีกระแสไหลผ่านภายในวงจร M^2C^3 และเมื่อ $RVS < CR$ หรือรูปแบบของการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า (Step-up mode) ส่งผลให้ทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูงของวงจร M^2C^3 หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ารูปแบบการสำรองพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรง (Back-up energy mode) และถ้าค่า $RVS > CR$ หรือรูปแบบของการลดระดับแรงดันไฟฟ้า (Step-down mode) ส่งผลให้ทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำของวงจร M^2C^3 ซึ่งเรียกรูปแบบนี้ว่ารูปแบบการสะสมพลังงานให้แบตเตอรี่ (Charge battery mode) 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 ค่าอัตราส่วนการแปลงผันพลังงาน
N	คือ จำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล

3.5 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแบบสองทิศทางที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้า

วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแบบสองทิศทางที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้า [11-12] เป็นการนำวงจร M^2C^3 2 ชุดวงจรมาเชื่อมต่อกันผ่านหม้อแปลงความถี่สูง เป็นการนำวงจร M^2C^3 มาประยุกต์ให้มีความหลากหลายต่อการนำไปใช้จริงให้เหมาะสมต่อระบบผลิตไฟฟ้า เนื่องจากชุดวงจร M^2C^3 ที่เชื่อมต่อกันผ่านหม้อแปลงความถี่สูงจะสามารถเป็นระบบสำรองพลังงานไฟฟ้าให้กับอีกชุดวงจรหนึ่ง เพื่อให้ภาระไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับกับบัสแรงดันไฟฟ้าได้รับแรงดันไฟฟ้าที่มีความคงที่ทั้งปกติและช่วงที่เกิดความผิดปกติขึ้นในวงจร M^2C^3 อีกทั้งยังมีการแยกโหนดทางไฟฟ้าจากคุณสมบัติของหม้อแปลงความถี่สูง ส่งผลให้วงจร M^2C^3 ที่เชื่อมอยู่อีกด้านของหม้อแปลงความถี่สูงจะไม่ได้รับผลกระทบใดๆจากอีกชุดวงจร จึงทำให้ภาระไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบจะได้รับแรงดันไฟฟ้าที่ต่อเนื่องคงที่ตลอดเวลา จากที่กล่าวมานั้นระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กจะมีความน่าเชื่อถือที่เพิ่มสูงขึ้นและสามารถรองรับภาระไฟฟ้าที่มีความหลากหลายระดับแรงดันไฟฟ้า จึงสรุปข้อเด่นที่เพิ่มขึ้นมาของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าได้ดังนี้

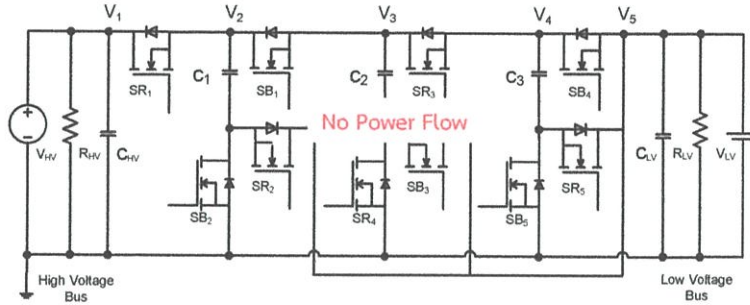
- เพิ่มความหลากหลายในการประยุกต์ใช้งานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้า
- ป้องกันความเสียหายที่เกิดจากชุดวงจร M^2C^3 โดยผ่านหม้อแปลงความถี่สูง
- เพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กเนื่องจากสามารถสำรองพลังงานไฟฟ้าระหว่างชุดวงจร M^2C^3 ในขณะที่เกิดความผิดปกติขึ้น

3.6 ทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าในวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้า

ทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าในวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้านั้นจะแบ่งการทำงานออกเป็น 4 แบบด้วยกันคือ แบบปกติ ลดระดับแรงดันไฟฟ้า เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าและการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งในการอธิบายหลักการทำงานจะยกตัวอย่างวงจร M^2C^3 4 ระดับที่บัสแรงดันต่ำมีค่า 36 V บัสแรงดันสูง 144 V และมีสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลัง SR_n กับ SB_n เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีมุมเฟสห่างกัน 180 องศา ซึ่งจะอธิบายหลักการทำงานแต่ละรูปแบบดังต่อไปนี้

3.6.1 การทำงานของวงจร M^2C^3 แบบปกติ

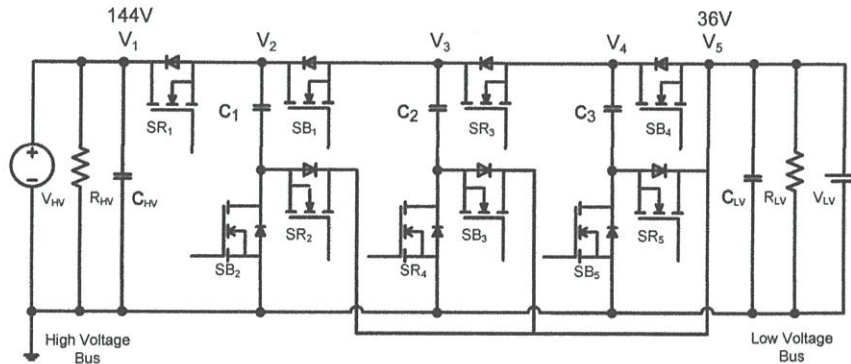
การทำงานของวงจร M^2C^3 แบบปกตินั้นคือการที่บัสแรงดันไฟฟ้าทั้งสองฝั่งมีแรงดันไฟฟ้าที่เท่ากันตามอัตราส่วนเท่าหรือ $RVS = CR$ ซึ่งในรูปแบบนี้เป็นสภาวะที่ปกติของการทำงาน จะส่งผลให้ไม่เกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าผ่านชุดวงจร M^2C^3 จึงไม่มีกระแสไหลภายในวงจร M^2C^3 ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งเป็นไปตามหลักการสมดุลพลังงานระหว่างสองบัสที่เชื่อมต่ออยู่กับวงจร M^2C^3



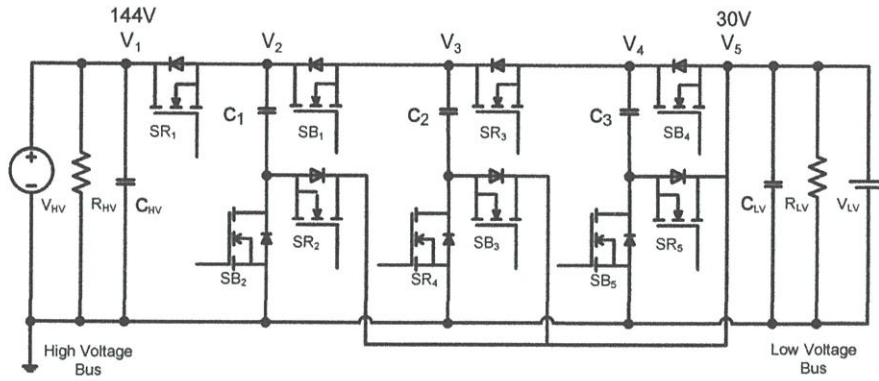
รูปที่ 3.5 วงจร M^2C^3 ในสภาวะปกติที่ $CR = RVS$

3.6.2 การทำงานของวงจร M^2C^3 ในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้าหรือการสะสมประจุให้กับแบตเตอรี่

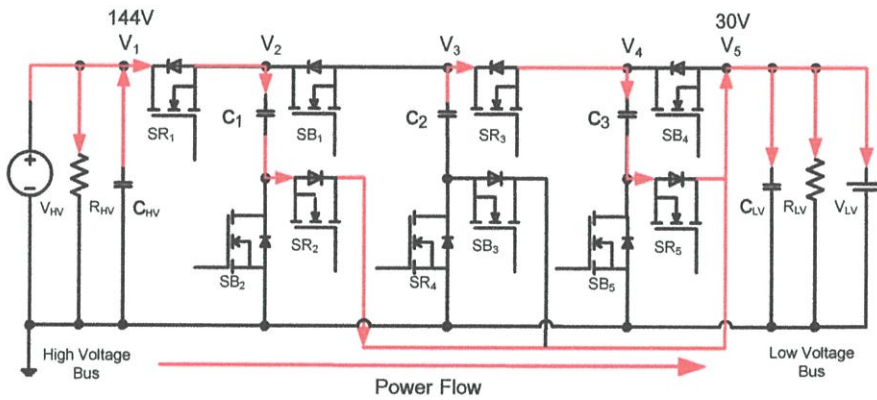
การทำงานของวงจร M^2C^3 ในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้าหรือการสะสมประจุให้แบตเตอรี่ (Step-down mode or Charge battery mode) คือการที่วงจร M^2C^3 มีกระแสไหลจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ ซึ่งจะเกิดขึ้นต่อเมื่อ $RVS > CR$ ส่งผลให้วงจร M^2C^3 เกิดการถ่ายโอนพลังงานขึ้นโดยที่วงจร M^2C^3 4 ระดับจะทำการลดกำลังไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำลง 4 เท่า หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เมื่อวงจร M^2C^3 ในสภาวะปกติดังรูป 3.5 ที่มีบัสแรงดันสูงมีค่าเท่ากับ 144 V และบัสแรงดันต่ำมีค่าเท่ากับ 36 V แล้วหลังจากนั้นบัสแรงดันต่ำมีแรงดันไฟฟ้าลดลงจาก 36 V จึงทำให้เกิดสภาวะ $RVS > CR$ ขึ้นจึงเกิดการถ่ายโอนพลังงานบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำดังรูป 3.6



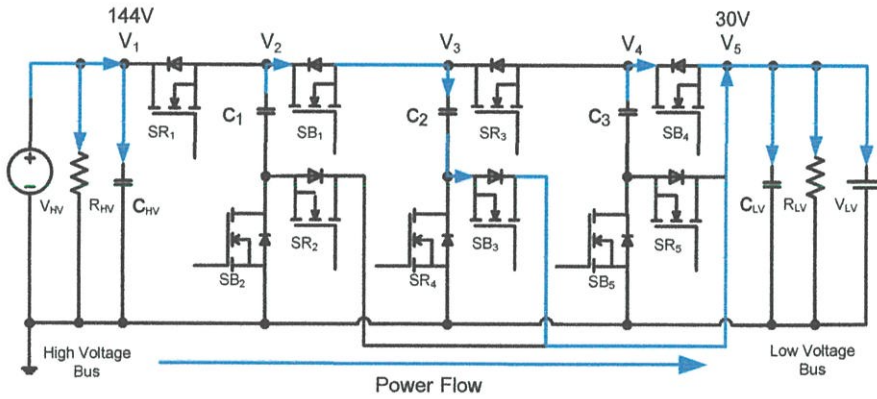
(ก) วงจร M^2C^3 4 ระดับ $CR = RVS$



(ข) วงจร M^2C^3 4 ระดับ $CR < RVS$



(ค) ทิศทางการไหลของกระแสขณะสวิตช์ SR_n ทำงาน



(ง) ทิศทางการไหลของกระแสขณะสวิตช์ SB_n ทำงาน

รูปที่ 3.6 การทำงานของวงจรเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า
จากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ

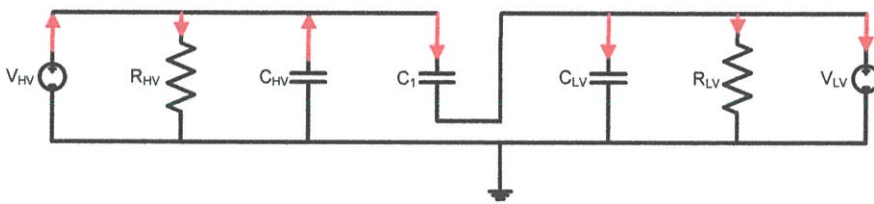
และเมื่อสวิตช์กำลังทั้งสองสัญญาณทำงานจะทำให้เกิดการสะสมประจุและคายประจุให้กับตัวเก็บประจุในแต่ละโมดูล ซึ่งจะทำให้เกิดการลดระดับแรงดันไฟฟ้าของวงจร M^2C^3 4 ระดับซึ่งแสดงและอธิบายวงจรสมมูลของตัวเก็บประจุได้ดังนี้

ช่วงที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.7(ก) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง V_{HV} และตัวเก็บประจุ C_{HV} จะทำการสะสมประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_1 และ C_{LV} เพื่อทำการจ่ายภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ ในช่วงเวลานี้ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้างี้ $C_{HV} = V_{HV}$, $C_1 = (3/4)V_{HV}$ และ $C_{LV} = (1/4)V_{HV}$

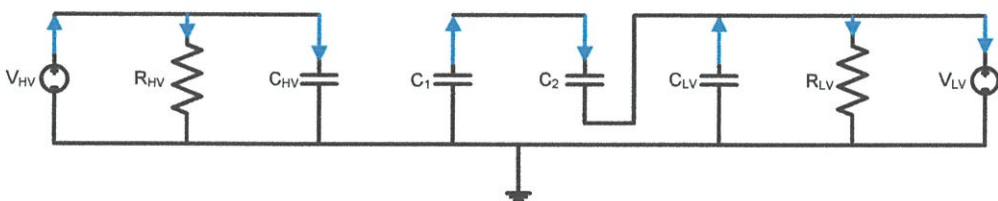
ช่วงที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.7(ข) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง V_{HV} ทำการสะสมประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_{HV} พร้อมกันกับที่ตัวเก็บประจุ C_1 ทำการสะสมประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_2 และ C_{LV} จะถูกคายประจุเพื่อทำการจ่ายภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ ในช่วงเวลานี้ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้างี้ $C_{HV} = V_{HV}$, $C_1 = (3/4)V_{HV}$, $C_2 = (2/4)V_{HV}$ และ $C_{LV} = (1/4)V_{HV}$

ช่วงที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.7(ค) ในช่วงเวลานี้จะมีการทำงานเหมือนช่วงที่ 1 อีกครั้ง แต่จะมีแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ C_2 ซึ่งจะทำให้การสะสมประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_{LV} เพื่อทำการจ่ายภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ ในขั้นตอนนี้ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้างี้ $C_{HV} = V_{HV}$, $C_1 = (3/4)V_{HV}$, $C_2 = (2/4)V_{HV}$ และ $C_{LV} = (1/4)V_{HV}$

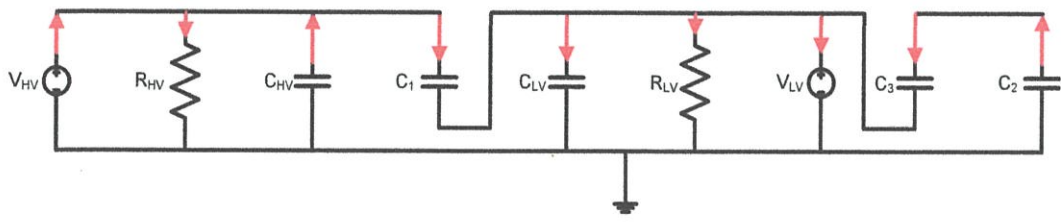
ช่วงที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 3.7(ง) ในช่วงเวลานี้จะทำงานเหมือนช่วงที่ 2 แต่จะมีแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ C_3 จะถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไปที่บัสแรงดันต่ำพร้อมกันกับตัวเก็บประจุ C_2 ในขั้นตอนนี้ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้างี้ $C_{HV} = V_{HV}$, $C_1 = (3/4)V_{HV}$, $C_2 = (2/4)V_{HV}$ และ $C_{LV} = (1/4)V_{HV}$ หลังจากนั้นวงจรสมมูลจะทำงานในช่วงที่ 3 และช่วงที่ 4 สลับกันไปตามสัญญาณควบคุม



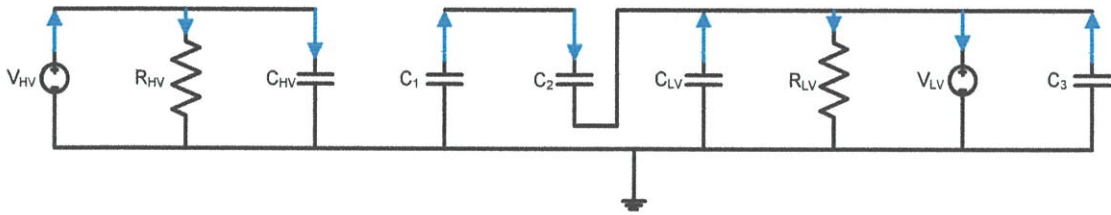
(ก) วงจรสมมูลในช่วงที่ 1



(ข) วงจรสมมูลในช่วงที่ 2



(ค) วงจรสมมูลในช่วงที่ 3

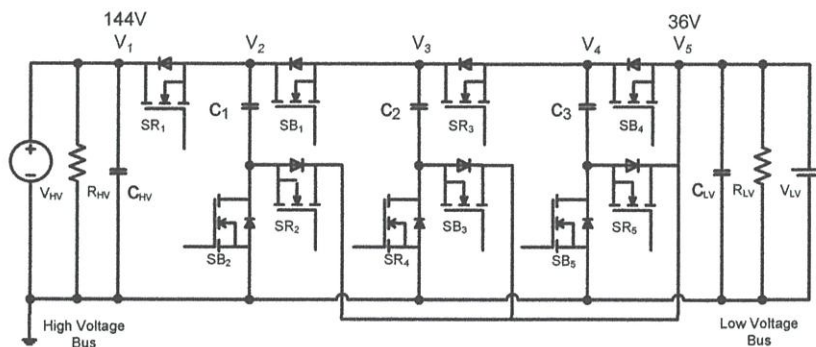


(ง) วงจรสมมูลในช่วงที่ 4

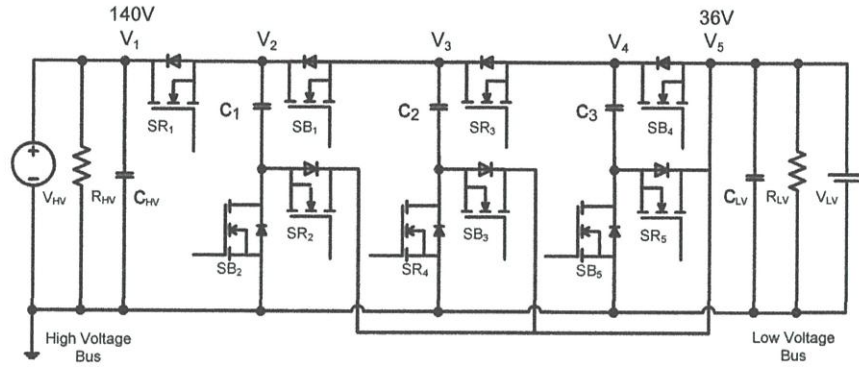
รูปที่ 3.7 ช่วงการทำงานของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในแบบวงจรสมมูลเมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ

3.6.3 การทำงานของวงจร M^2C^3 ในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าหรือแหล่งสำรองพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบผลิตไฟฟ้า

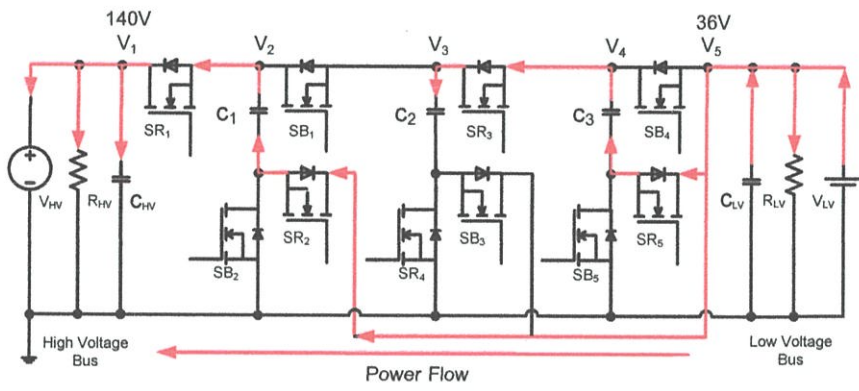
การทำงานของวงจร M^2C^3 ในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าหรือแหล่งสำรองพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (Step-up mode or Back-up energy mode) คือการที่วงจร M^2C^3 มีกระแสไหลจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง ซึ่งจะเกิดขึ้นต่อเมื่อ $RVS < CR$ ส่งผลให้วงจร M^2C^3 เกิดการถ่ายโอนพลังงานขึ้นโดยที่วงจร M^2C^4 ระดับจะทำการเพิ่มกำลังไฟฟ้าขึ้น 4 เท่า หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เมื่อวงจร M^2C^3 ในสภาวะปกติดังรูป 3.5 ที่บัสแรงดันสูงมีค่าเท่ากับ 144 V และบัสแรงดันต่ำมีค่าเท่ากับ 36 V แล้วหลังจากนั้นบัสแรงดันสูงมีแรงดันไฟฟ้าลดลงจาก 144 V จึงทำให้เกิดสภาวะ $RVS < CR$ ขึ้นจึงเกิดการถ่ายโอนพลังงานบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูงดังรูปที่ 3.8



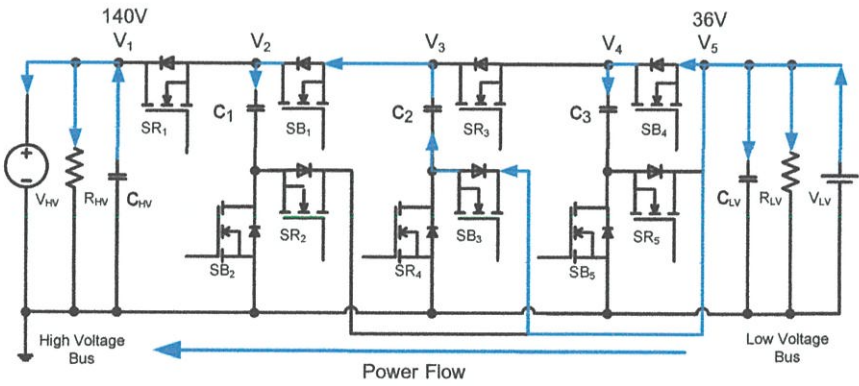
(ก) วงจร M^2C^3 4 ระดับ $CR = RVS$



(ข) วงจร M^2C^3 4 ระดับ $CR > RVS$



(ค) ทิศทางการไหลของกระแสขณะสวิตช์ SR_n ทำงาน



(ง) ทิศทางการไหลของกระแสขณะสวิตช์ SB_n ทำงาน

รูปที่ 3.8 การทำงานของวงจรเมื่อทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้า
จากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง

และเมื่อสวิตช์กำลังทั้งสองสัญญาณทำงานจะทำให้เกิดการสะสมประจุและคายประจุให้กับตัวเก็บประจุในแต่ละโมดูล ซึ่งจะทำให้เกิดการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าของวงจร M^2C^3 4 ระดับซึ่งแสดงและอธิบายวงจรสมมูลของตัวเก็บประจุได้ดังนี้

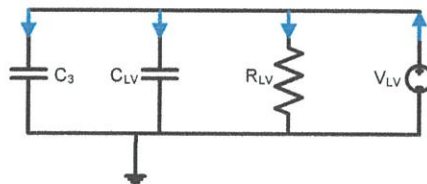
ช่วงที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.9(ก) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ V_{LV} และตัวเก็บประจุ C_{LV} ทำการสะสมประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_3 ที่ซึ่งตัวเก็บประจุ C_{LV} จะมีทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเหมือนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า V_{LV} ในทุกช่วงเวลา ในช่วงนี้ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้าดังนี้ $C_{LV} = V_{LV}$ และ $C_3 = V_{LV}$

ช่วงที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.9(ข) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ V_{LV} ทำการสะสมประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_{LV} และตัวเก็บประจุ C_3 ทำการสะสมประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_2 ในช่วงนี้ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้าดังนี้ $C_{LV} = V_{LV}$, $C_3 = V_{LV}$ และ $C_2 = 2V_{LV}$

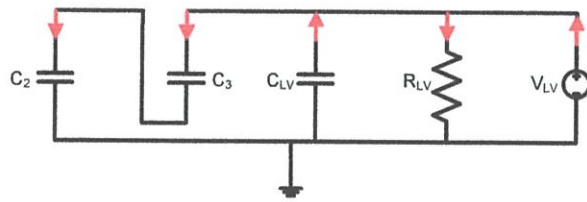
ช่วงที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.9(ค) ตัวเก็บประจุ C_3 จะทำงานเหมือนช่วงที่ 1 และตัวเก็บประจุ C_1 จะถูกสะสมประจุด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันต่ำ V_{LV} ร่วมกับตัวเก็บประจุ C_{LV} และ C_2 เพื่อทำการจ่ายภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูง ในช่วงนี้ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้าดังนี้ $C_{LV} = V_{LV}$, $C_3 = V_{LV}$, $C_2 = 2V_{LV}$ และ $C_1 = 3V_{LV}$

ช่วงที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 3.9(ง) ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะทำงานเหมือนช่วงที่ 2 และตัวเก็บประจุ C_1 จะทำการจ่ายภาระทางไฟฟ้าทางด้านบัสแรงดันสูงและสะสมประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_{HV} ในช่วงนี้ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีแรงดันไฟฟ้าเป็นดังนี้ $C_{LV} = V_{LV}$, $C_3 = V_{LV}$, $C_2 = 2V_{LV}$, $C_1 = 3V_{LV}$ และ $C_{HV} = 4V_{LV}$

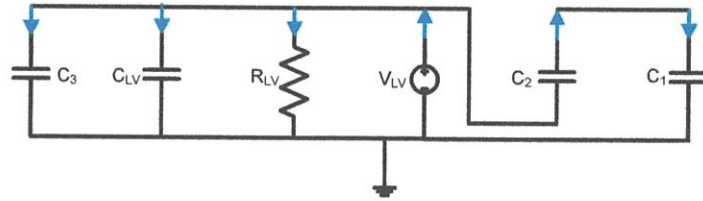
ช่วงที่ 5 ดังแสดงในรูปที่ 3.9(จ) จะทำงานเหมือนช่วงที่ 3 ซึ่งจะสะสมพลังงานให้กับตัวเก็บประจุ C_1 และยังจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปที่บัสแรงดันสูงจากตัวเก็บประจุ C_{HV} ส่งผลให้ในช่วงนี้ตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีแรงดันไฟฟ้าดังนี้ $C_{LV} = V_{LV}$, $C_3 = V_{LV}$, $C_2 = 2V_{LV}$, $C_1 = 3V_{LV}$, $C_{HV} = 4V_{LV}$ และ $C_{HV} = V_{HV}$ หลังจากนั้นวงจรจะทำงานสลับกันตามช่วงที่ 4 และ ช่วงที่ 5



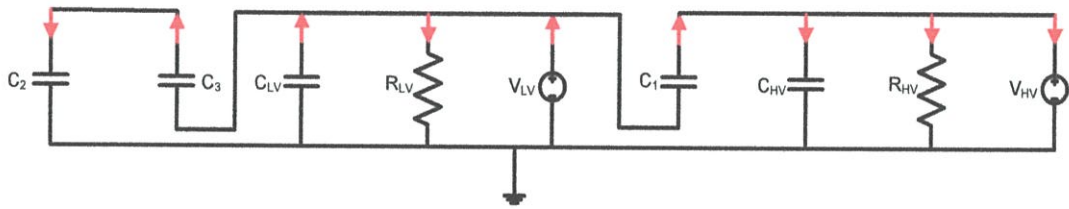
(ก) วงจรสมมูลในช่วงที่ 1



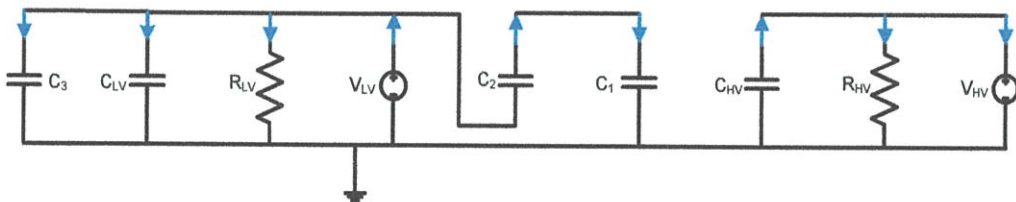
(ข) วงจรสมมูลในช่วงที่ 2



(ค) วงจรสมมูลในช่วงที่ 3

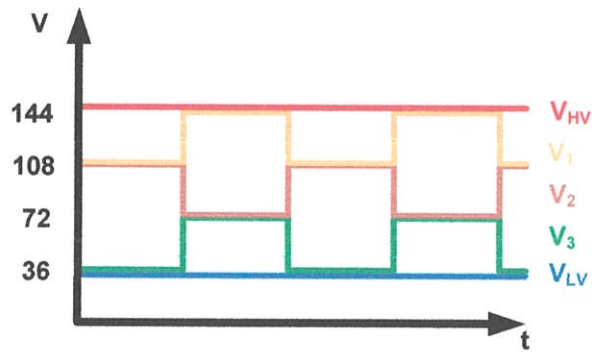


(ง) วงจรสมมูลในช่วงที่ 4



(จ) วงจรสมมูลในช่วงที่ 5

รูปที่ 3.9 ช่วงการทำงานของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในแบบวงจรสมมูลเมื่อวงจรมีทิศทางการโอนย้ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง



รูปที่ 3.10 แรงดันไฟฟ้าในแต่ละโหนดเทียบกราวด์



รูปที่ 3.11 แรงดันไฟฟ้าที่ตกรวมตัวเก็บประจุแต่ละตัว

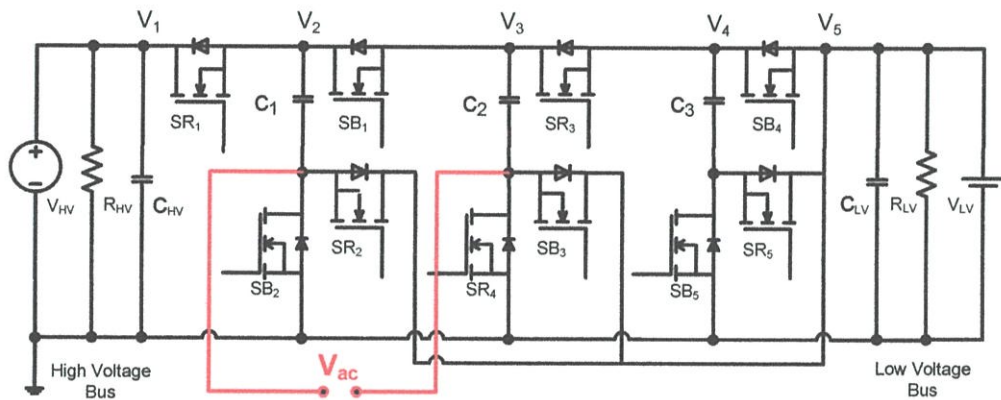
ซึ่งจากการทำงานของวงจร M^2C^3 จากการสวิตช์ SR และ สวิตช์ SB สลับกันตามสัญญาณควบคุมนั้นจะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าแต่ละโหนด (Node) เทียบกราวด์ (Ground) เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมเป็นไปตามหลักการสวิตช์และสะสมและอัดประจุ (Charge and Discharge) ดังรูปที่ 3.10 และเมื่อทำการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกรวมตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะพบว่าเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 3.11

3.7 การสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากวงจร M^2C^3

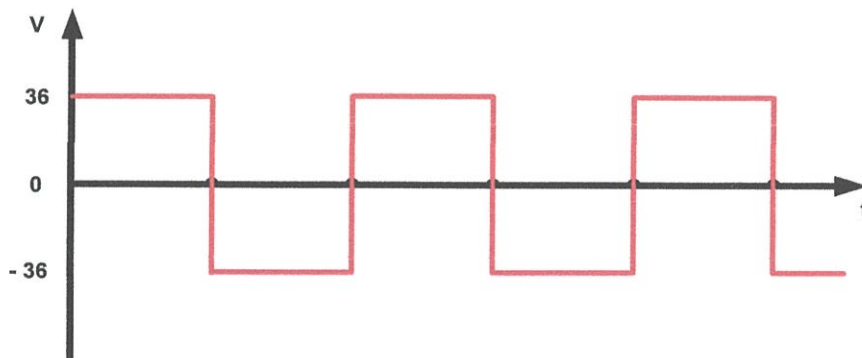
โครงสร้างวงจร M^2C^3 นั้นในธรรมชาติแล้วจะทำงานเป็นวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงเป็นหลัก แต่ด้วยการทำงานของสวิตช์ที่มีลักษณะการทำงานเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่สลับกันไปมาเพียงสองสัญญาณดังกล่าว ทำให้วงจร M^2C^3 สามารถประยุกต์ใช้งานที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้เช่นกัน ซึ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้ออกมาจากวงจร M^2C^3 นั้นจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave) ที่มีความถี่เท่ากับความถี่สวิตช์ของวงจร

ในการนำแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากวงจร M^2C^3 นั้นจะเชื่อมต่อที่ขั้วลบของตัวเก็บประจุในชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลที่อยู่ติดกันดังรูปที่ 3.12 ซึ่งจะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขนาดเท่ากับ $\pm V_{LV}$ ดังรูปที่ 3.13

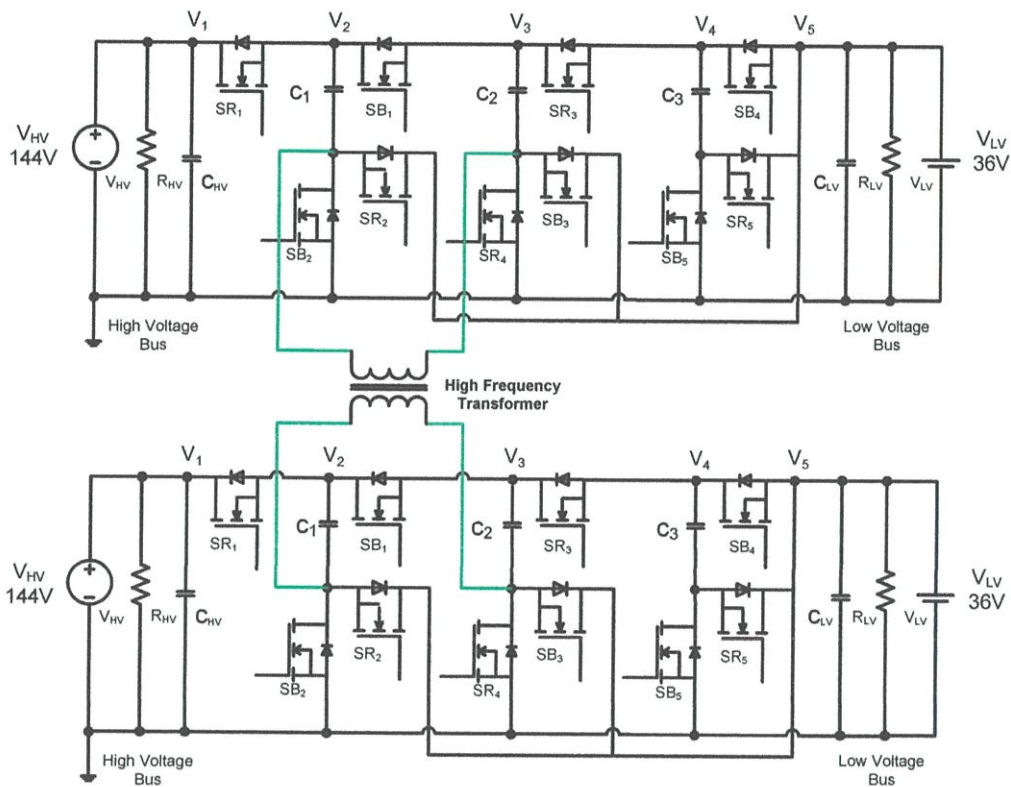
โดยการประยุกต์ใช้งานแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของชุดวงจร M^2C^3 จะสามารถนำไปใช้กับภาระไฟฟ้ากระแสสลับได้ รวมไปถึงการนำไปเชื่อมต่อกับอุปกรณ์กรองกระแส (Filter) เพื่อให้ได้สัญญาณที่ออกมาให้มีความเรียบเหมาะแก่การนำไปใช้งาน อีกทั้งยังสามารถนำไปเชื่อมต่อกับหม้อแปลงความถี่สูงได้อีกด้วย



รูปที่ 3.12 แสดงจุดการเชื่อมต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 3.13 แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 3.14 วงจร M^2C^3 2 ชุดที่มีการทำงานปกติ

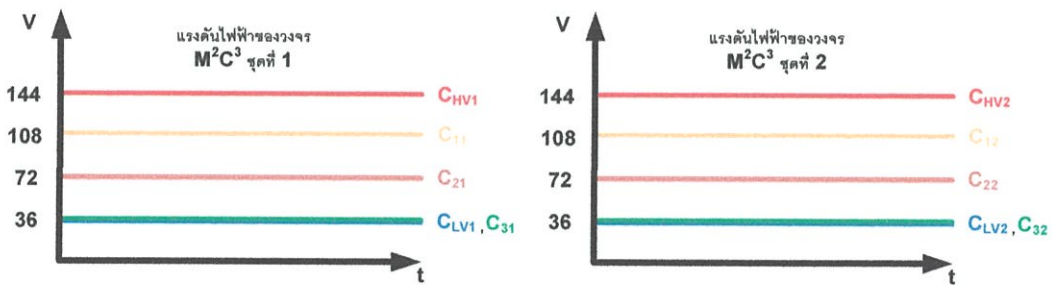
3.8 การทำงานของวงจร M^2C^3 ในรูปแบบถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงความถี่สูง

การทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดเมนทางไฟฟ้านั้นจะเป็นการนำวงจร M^2C^3 ไปประยุกต์เพื่อให้อุปกรณ์มีความหลากหลายในการใช้งาน โดยที่วงจร M^2C^3 ชุดนั้นจะสามารถถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าระหว่างกันผ่านหม้อแปลงความถี่สูง จึงสามารถสำรองพลังงานไฟฟ้าระหว่างกัน อีกทั้งมีการแยกกราวด์ระหว่างวงจรเพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดจากอีกวงจรได้ ส่งผลให้อุปกรณ์ M^2C^3 เพิ่มความน่าเชื่อถือต่อการประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก (DC-Microgrid) โดยการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงความถี่สูงจะใช้หลักการสมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่แต่ละฝั่งของหม้อแปลงความถี่สูงที่มีค่าเท่ากับบวกลบของแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำ ($\pm V_{LV}$) เนื่องจากผลของการสวิตช์กำลังที่ทำให้เกิดการสะสมและคายประจุ และเมื่อแรงดันไฟฟ้าของทั้งสองฝั่งหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าเท่ากันจะไม่มีถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งหม้อแปลงความถี่สูงจะเชื่อมต่อที่ขั้วลบของตัวเก็บประจุในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลดังรูปที่ 3.14 ที่ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดขึ้นจากหลักการทำงานของสวิตช์กำลังทำให้วงจร M^2C^3 มีข้อเด่นเพิ่มขึ้นคือ สามารถทำงานเป็นระบบสำรองพลังงานซึ่งกันและกันที่มีการแยกโดเมนทางไฟฟ้า เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพรวมถึงเสถียรภาพให้กับชุดวงจรโดยรวมได้ อีกทั้งยังสามารถเลือกใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่มีความหลากหลายได้ยิ่งขึ้น ซึ่งจะอธิบายการทำงานโดยแยกออกเป็นหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

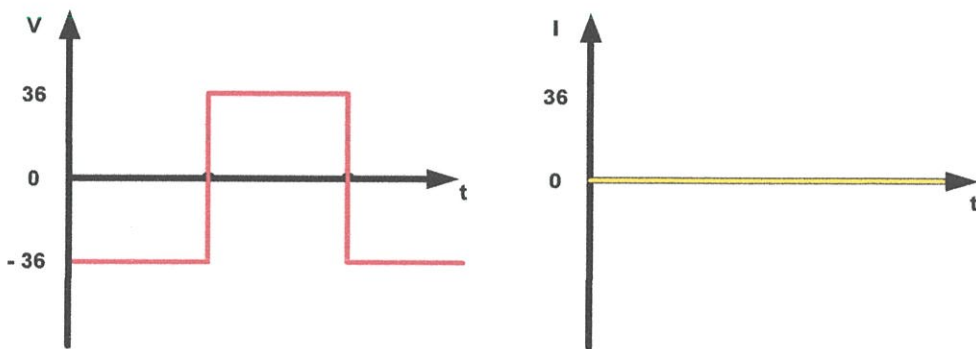
3.8.1 วงจร M^2C^3 2 ชุดที่มีการทำงานปกติ

การทำงานของวงจร M^2C^3 2 ชุดที่มีการทำงานปกตินั้น ในการทำงานแบบนี้จะเป็นการทำงานของวงจร M^2C^3 แต่ละตัวแบบปกติหรือเรียกอีกอย่างว่า วงจร M^2C^3 สมดุลพลังงานภายในชุดวงจร (Standalone) เหมือนกับในหัวข้อ 3.5.1 ซึ่งแต่ละชุดวงจรจะมีการสมดุลพลังงาน ส่งผลให้จะไม่มีการถ่ายโอนพลังงานผ่านตัววงจร M^2C^3 แต่ละชุดวงจร จึงไม่เกิดการถ่ายโอนพลังงานผ่านหม้อแปลงความถี่สูงด้วย ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุในแต่ละชุดวงจรจะแสดงดังรูปที่ 3.15 และแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงฝั่งปฐมภูมิดังแสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งเป็นการแสดงแรงดันและกระแสไฟฟ้าแบบอุดมคติ (Ideal Case)

จากรูปจะเห็นว่าเมื่อชุดวงจร M^2C^3 ทำงานแบบปกติดังรูปที่ 3.15(ก)และ(ข) แล้วจะทำให้ไม่เกิดการถ่ายโอนพลังงานผ่านหม้อแปลงความถี่สูงเลย ซึ่งดูได้จากรูปที่ 3.16(ข) ที่จะเห็นว่าจะไม่มีการไหลผ่านหม้อแปลงความถี่สูง และแรงดันไฟฟ้าที่ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 3.16(ก) จะเห็นว่าเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขนาดเท่ากับบัสแรงดันต่ำ ($\pm V_{LV}$) ของวงจร M^2C^3



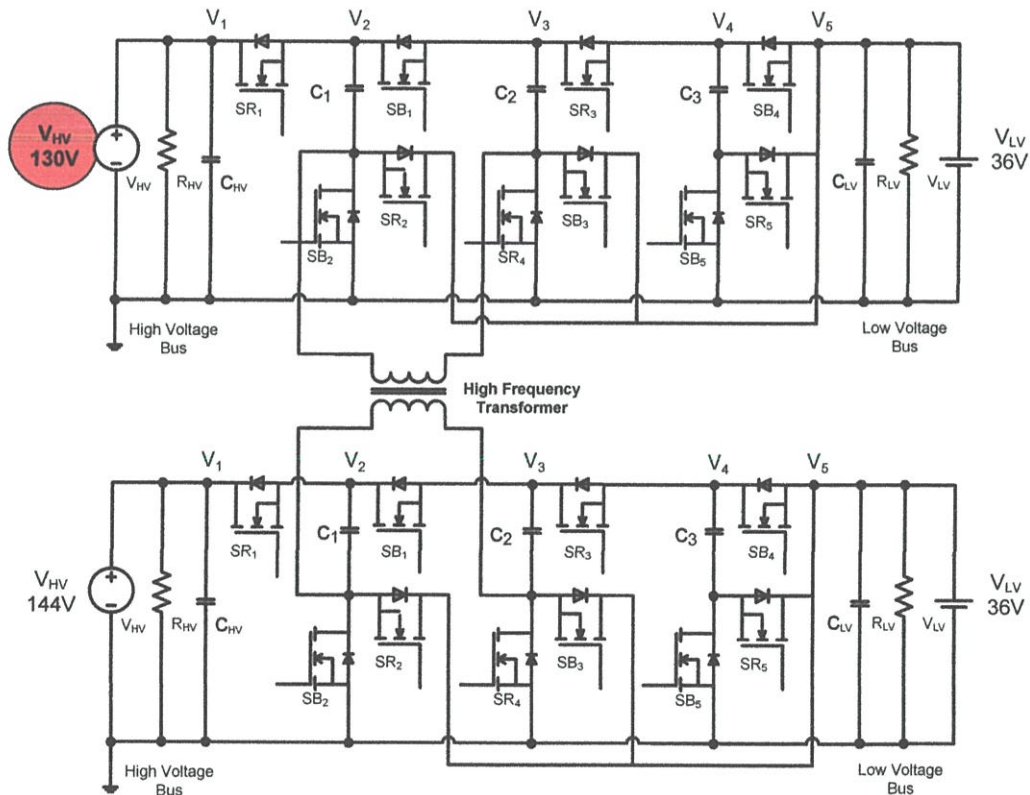
(ก) ชุดวงจรที่ 1 (ข) ชุดวงจรที่ 2
รูปที่ 3.15 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในแต่ละชุดวงจร



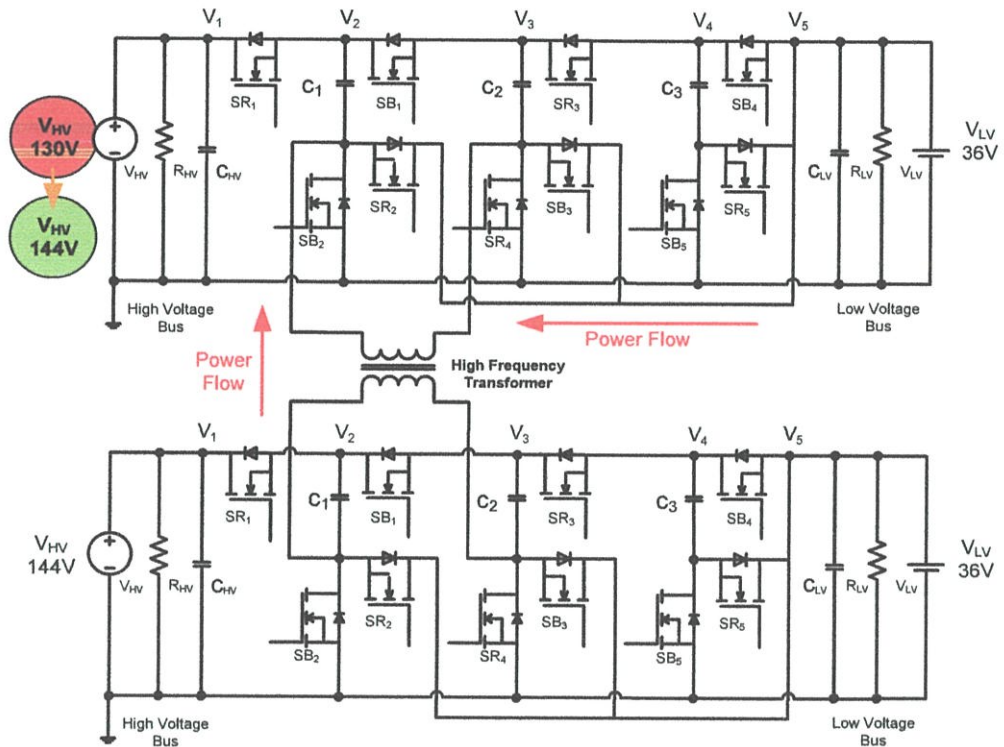
(ก) แรงดันไฟฟ้า (ข) กระแสไฟฟ้า
รูปที่ 3.16 สัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงทางด้านปฐมภูมิ

3.8.2 การทำงานในแบบสำรองพลังงานให้กัน

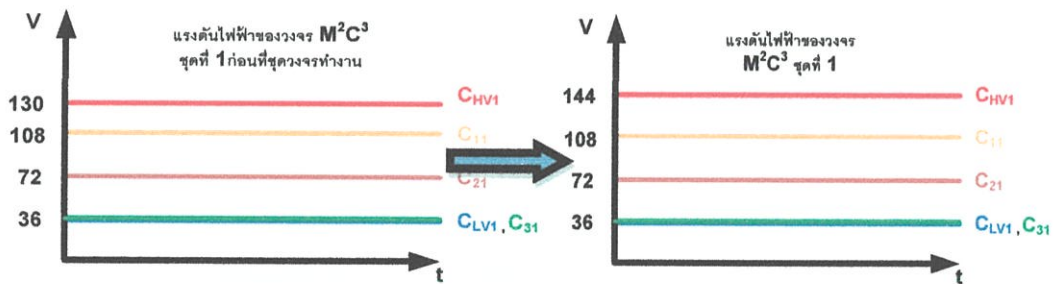
การทำงานในรูปแบบนี้เป็นการทำงานที่มีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าผ่านหม้อแปลง ความถี่สูงโดยในกรณีนี้จะเกิดจากชุดวงจรใดวงจรหนึ่ง (สมมุติให้เป็นชุดวงจรที่ 1) เกิดความผิดปกติหรือมีแรงดันไฟฟ้าในชุดวงจรลดลงทำให้แรงดันไฟฟ้าทั้งสองฝั่งของหม้อแปลงความถี่สูงไม่เท่ากันดังแสดงในรูปที่ 3.17 ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ผ่านหม้อแปลงความถี่สูงพร้อมกับกับบัสแรงดันต่ำเพื่อไปจ่ายภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 โดยจะทำงานตามหลักการสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลัง แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละตัวในชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 จะแสดงดังรูปที่ 3.18 แรงดันไฟฟ้าที่ผ่านหม้อแปลงความถี่สูงจะเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของชุดวงจรปกติ และกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลจากการถ่ายโอนพลังงานผ่านหม้อแปลงดังรูปที่ 3.19 ซึ่งจากการทำงานในรูปแบบนี้ทำให้ระบบโดยรวมมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพที่สูงขึ้น ไม่ทำให้ภาระไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่เกิดความเสียหายจากการผิดปกติของชุดวงจร M^2C^3 อีกทั้งเป็นการลดภาระของแบตเตอรี่ที่เชื่อมต่ออยู่ที่บัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 อีกด้วย และในทางกลับกันถ้าชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 เกิดความผิดปกติขึ้น ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ก็จะทำการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงความถี่สูง



(ก) ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 เกิดแรงดันตกขึ้นที่บัสแรงดันสูง



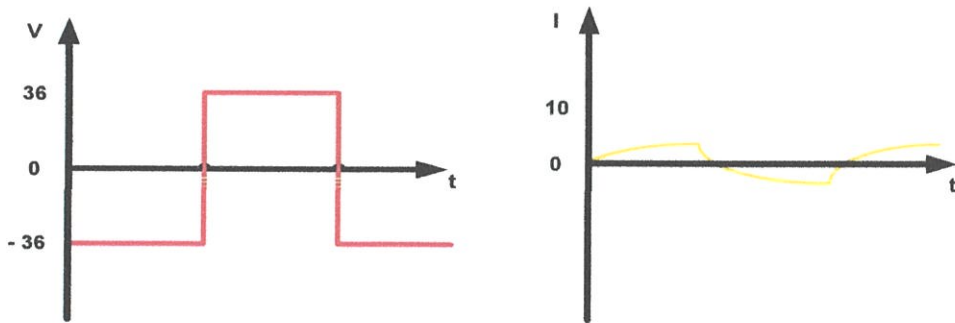
(ข) ทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไปที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 รูปที่ 3.17 ทิศทางการทำงานของชุดวงจรขณะเกิดความผิดปกติขึ้นที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1



(ก) ก่อนวงจรทำงาน

(ข) หลังวงจรทำงาน

รูปที่ 3.18 แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุแต่ละขณะก่อนและหลังการทำงานของชุดวงจร



(ก) แรงดันไฟฟ้า

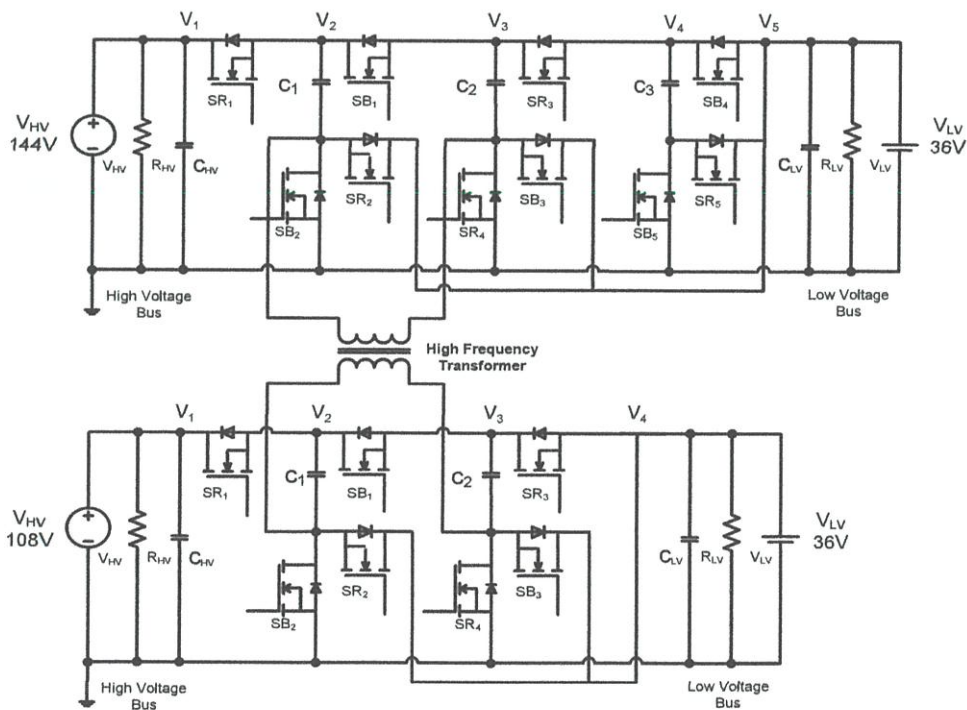
(ข) หลังวงจรทำงาน

รูปที่ 3.19 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงขณะมีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า

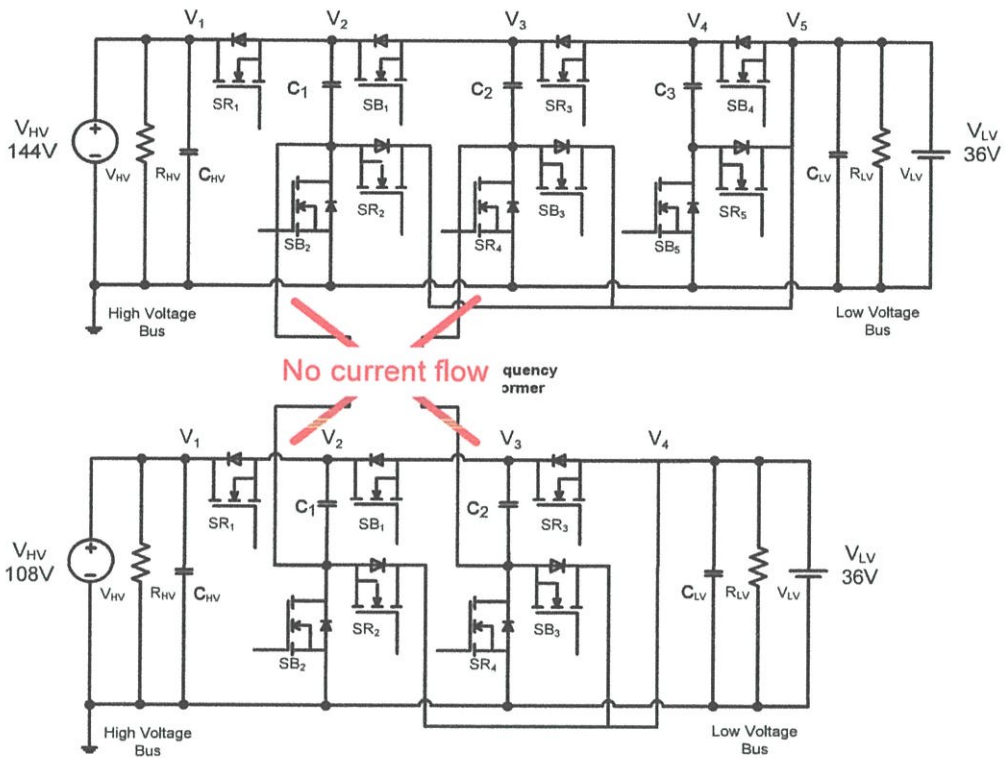
จากรูปที่ 3.18(ก) จะเป็นแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละตัวภายในชุดวงจร M^2C^3 ที่ซึ่งตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันสูงนั้นมีแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงมาจากปกติ ทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลกันจึงเกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าทั้งจากบัสแรงดันต่ำและหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อไปเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ดังรูปที่ 3.19 จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้านั้นจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าผ่านตัวหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อไปช่วยจ่ายภาระไฟฟ้าพร้อมกันกับพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำ

3.8.3 การทำงานปกติขณะที่แต่ละชุดวงจรที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ไม่เท่ากัน

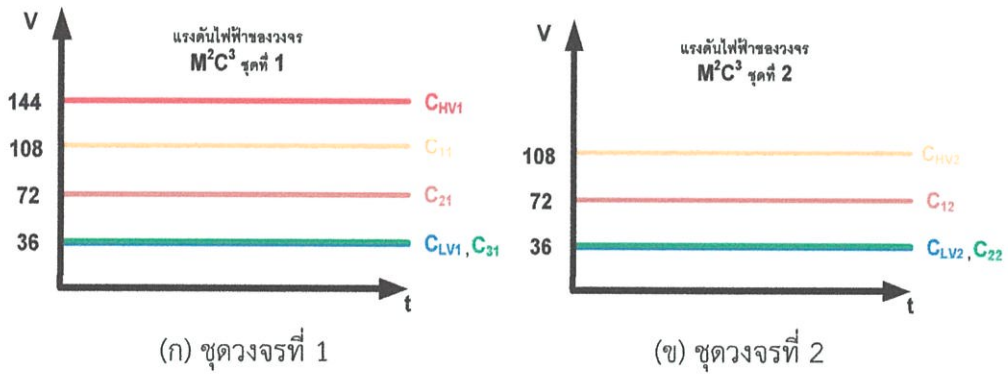
การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าขณะที่แต่ละชุดวงจรที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ไม่เท่ากันดังรูปที่ 3.20 จะเห็นว่าบัสแรงดันสูงที่ชุดวงจรที่ 1 จะเท่ากับ 144 V และชุดวงจรที่ 2 เท่ากับ 108V ซึ่งจะมีแรงดันไฟฟ้าที่ไม่เท่ากัน แต่สามารถทำงานเหมือนกับรูปแบบ 3.7.1 ที่จะไม่มีการแสไฟฟ้าไหลผ่านที่หม้อแปลงความถี่สูง เนื่องจากสมดุลพลังงานของหม้อแปลงความถี่สูง อีกทั้งมีการแยกโหนดทางไฟฟ้าระหว่างชุดวงจร ส่งผลให้เมื่อระบบไฟฟ้าในชุดวงจรใดเกิดความเสียหายขึ้นจะไม่ส่งผลกระทบต่ออีกชุดวงจรและภาระไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่กับชุดวงจรนั้นด้วย ทำให้รูปแบบนี้เหมาะสมต่อการนำไปเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าไม่เท่ากัน แต่ในการเชื่อมต่อหม้อแปลงความถี่สูงนั้นจะต้องมีค่าอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า (RVS) ที่เท่ากันทั้งสองชุดวงจรโดยที่บัสแรงดันต่ำมีค่าเท่ากัน ส่งผลให้ไม่เกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าขึ้นทั้งภายในวงจรและที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 3.21 โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะแสดงดังรูปที่ 3.22 และแรงดันไฟฟ้าทั้ง 2 ฝั่งของหม้อแปลงความถี่สูงจะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีค่าเท่ากับบัสแรงดันต่ำ ($\pm V_{LV}$) ดังรูปที่ 3.23



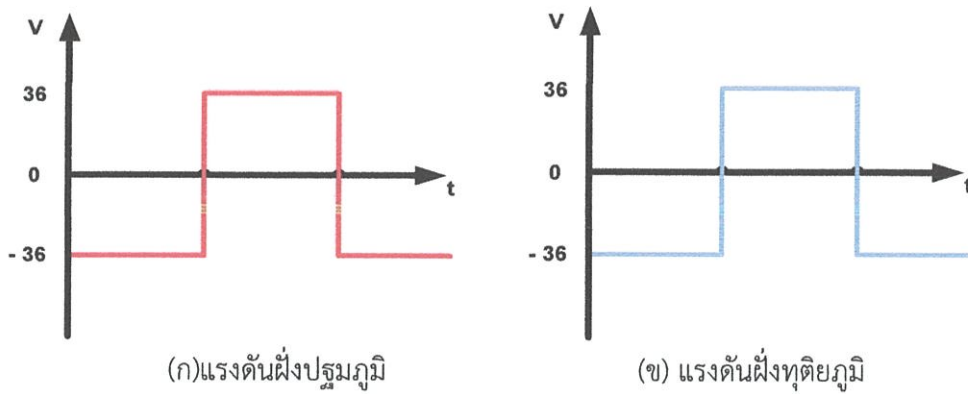
รูปที่ 3.20 วงจร M^2C^3 2 ชุดที่มีชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลไม่เท่ากัน



รูปที่ 3.21 แสดงถึงทิศทางการไหลของกระแสของวงจร M^2C^3 2 ชุดทำงานแบบปกติ



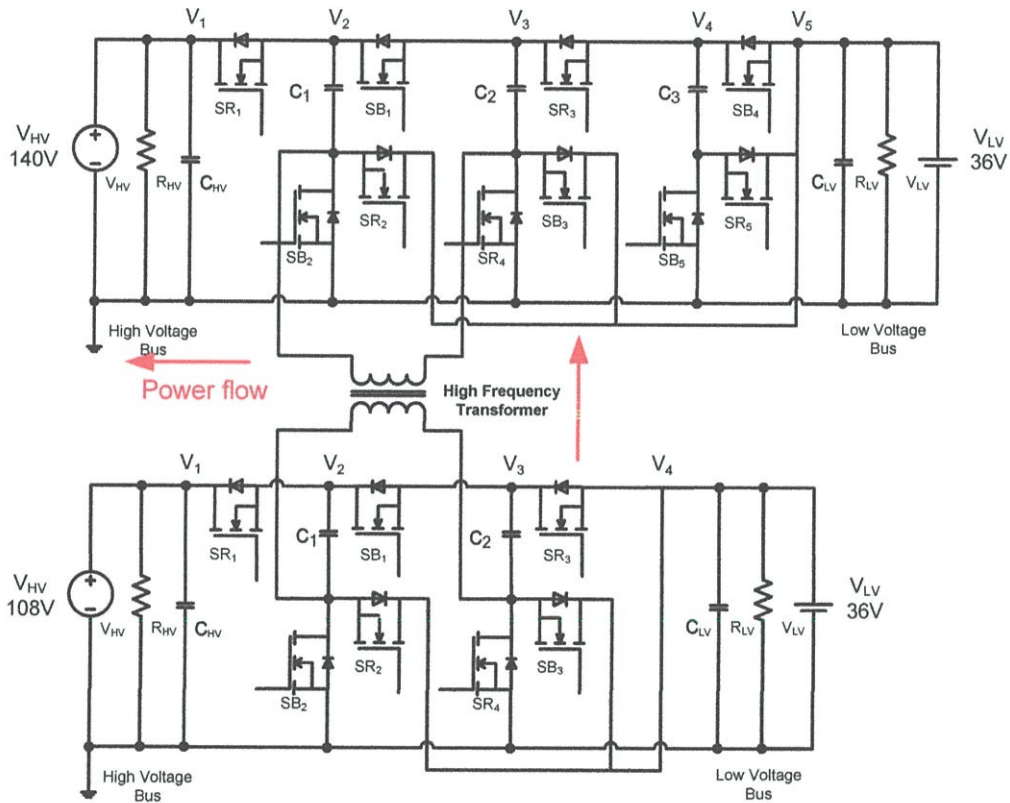
รูปที่ 3.22 แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัว



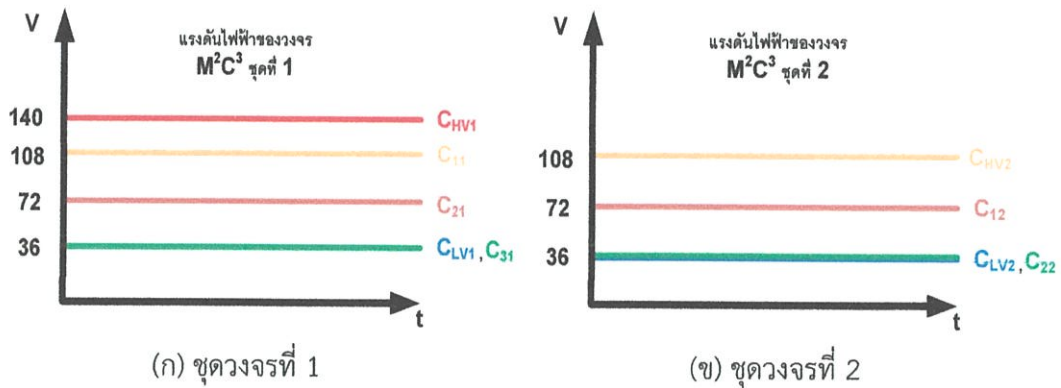
รูปที่ 3.23 แรงดันไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่

3.8.4 การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าในขณะที่แต่ละชุดวงจรมีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ไม่เท่ากัน

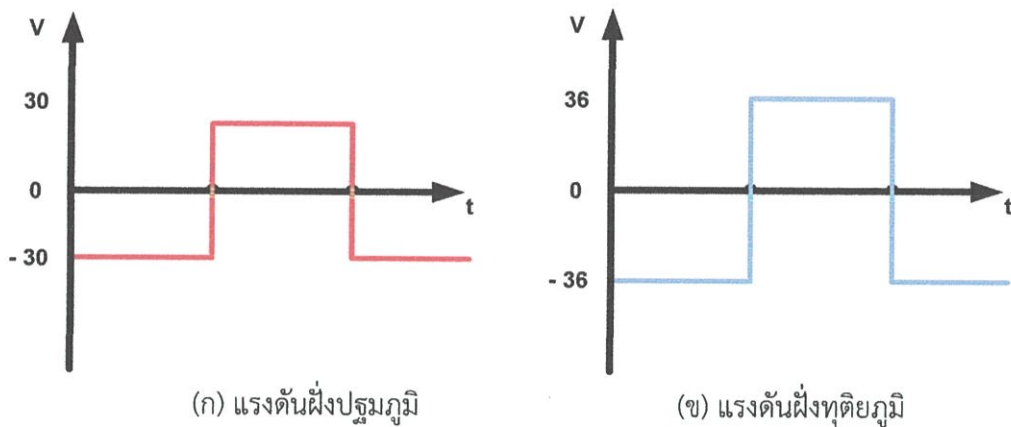
การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบนี้จะเหมือนกับ 3.7.2 ที่ซึ่งวงจร M^2C^3 แต่ละตัวทำงานในรูปแบบสำรองพลังงานซึ่งกันและกัน โดยจะใช้หลักการของการสมดุลพลังงานของอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า (RVS) โดยที่บัสแรงดันต่ำของแต่ละชุดวงจรจะต้องมีค่าเท่ากัน และเมื่อชุดวงจรที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า จะทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากชุดวงจรที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าผ่านหม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 3.24 ซึ่งจะสมมุติให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจรที่ 1 มีค่าลดลงส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าของชุดที่ 1 มีค่าน้อยกว่าชุดวงจรที่ 2 จึงเกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากชุดวงจรที่ 2 ไปยังชุดวงจรที่ 1 ที่ซึ่งแรงดันที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะแสดงดังรูปที่ 3.25 และแรงดันไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงจะแสดงไว้ในรูปที่ 3.26 ซึ่งจะมีแรงดันไฟฟ้าที่ไม่เท่ากัน



รูปที่ 3.24 ทิศทางของการไหลของกระแสขณะชุดวงจรมีแรงดันไม่เท่ากัน



รูปที่ 3.25 แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัว



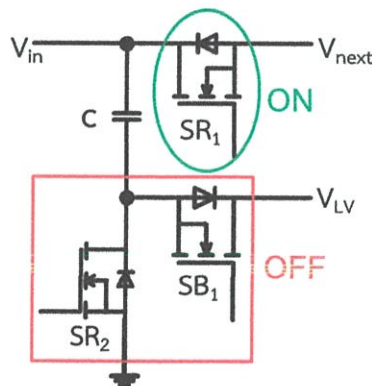
รูปที่ 3.26 แรงดันไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง

จากรูปแบบการทำงานทั้งหมดของวงจร M^2C^3 ทุกรูปแบบนั้นจะมีจุดที่สำคัญและเหมือนกันในทุกการทำงานคือ หลักการของการสมดุลพลังงานไฟฟ้า เมื่อทุกบัสแรงดันไฟฟ้ามีแรงดันไฟฟ้าที่เท่ากันหมดตามอัตราส่วนแรงดันจะไม่เกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า และเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่บัสใดเกิดลดน้อยลงจะทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าอย่างทันทีทันใด รวมไปถึงการนำวงจร M^2C^3 2 ชุดมาเชื่อมต่อกันผ่านหม้อแปลงความถี่สูงนั้นก็ใช้หลักการเดียวกันคือการสมดุลพลังงานทั้งสองฝั่งของหม้อแปลงความถี่สูงโดยใช้หลักการสมดุลพลังงานของระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งทำให้ชุดวงจรแต่ละชุดทำงานเป็นแหล่งสำรองพลังงานไฟฟ้าซึ่งกันและกัน และมีการแยกโดดทางไฟฟ้าออกจากกัน

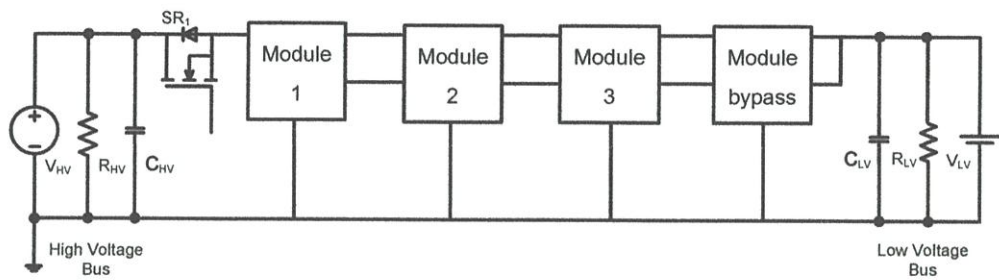
3.9 การบายพาสความผิดพลาดของวงจรถูก M^2C^3

วงจรถูก M^2C^3 มีความสามารถเฉพาะตัวหลายอย่างของวงจรถูก และสามารถบายพาสความผิดพลาด (Fault) ที่เกิดในชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลได้ก็เป็นส่วนหนึ่งเช่นกัน แต่ข้อจำกัดของการบายพาสของวงจรถูก M^2C^3 นั้นจำเป็นต้องมีชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลสำรองเพื่อรักษาอัตราส่วนของการแปลงผัน (CR) ให้มีค่าคงที่ และจำเป็นที่จะต้องให้สวิตช์กำลังตัวบนสุดของชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลทำงาน (On) ตลอดเวลา จึงทำให้การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กไม่เกิดผลกระทบขึ้น

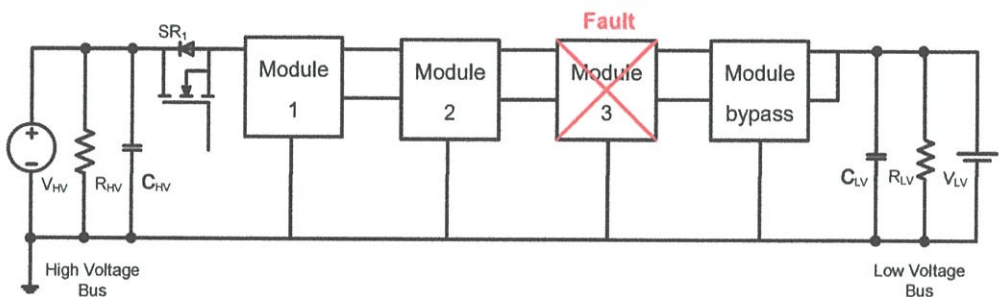
การทำงานในรูปแบบของบายพาสนั้นจำเป็นที่จะต้องให้สวิตช์กำลังตัวบนสุดของชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลทำงาน (On) ตลอดเวลา ส่วนสวิตช์กำลังอีกสองตัวนั้นจะทำงานหรือไม่ทำก็ได้ดังรูปที่ 3.27 ซึ่งจะเรียกสภาวะนี้ว่าสภาวะบายพาส (Bypass state) ส่วนชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลที่ทำงานในสภาวะปกติจะเรียกว่าสภาวะแอคทีฟ (Active state) ซึ่งในการทำงานจริงนั้นจะต้องมีชุดตรวจจับความผิดพลาด (Sensor) เพื่อตรวจหาตำแหน่งของโมดูลที่เกิดความผิดพลาดขึ้น เมื่อตรวจพบแล้วจะทำการบายพาสชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลนั้นออกจากระบบแล้วนำชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลสำรองมาเชื่อมต่อแทน เพื่อรักษาค่า CR ให้มีค่าคงที่ และป้องกันการเสียหายของระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก แต่อย่างไรก็ตามวงจรถูก M^2C^3 นั้นจะไม่สามารถบายพาสได้ในกรณีที่สวิตช์กำลังตัวบนสุดในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลเกิดความผิดพลาดขึ้น เป็นผลให้กระแสไฟฟ้าไหลขาดช่วง จึงทำให้วงจรถูก M^2C^3 ต้องหยุดตัวลงหรือไม่สามารถทำงานต่อไปได้ ซึ่งจะขออธิบายการบายพาสการทำงานของวงจรถูก M^2C^3 ดังรูป 3.28



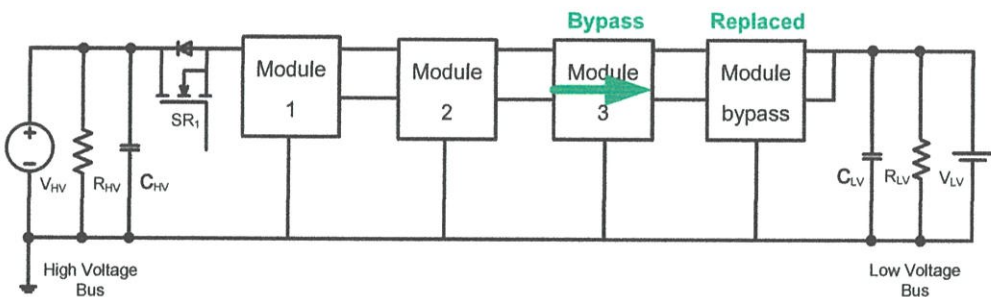
รูปที่ 3.27 หลักการบายพาสชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล



(ก) ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลทำงานในสภาวะปกติ



(ข) เกิดความผิดปกติที่ชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ 3



(ค) ชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ 3 เกิดการบายพาสความผิดปกติและชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ 4 เข้ามาแทนที่การทำงาน

รูปที่ 3.28 ขั้นตอนการบายพาสความผิดปกติของวงจร M^2C^3 4 ระดับ

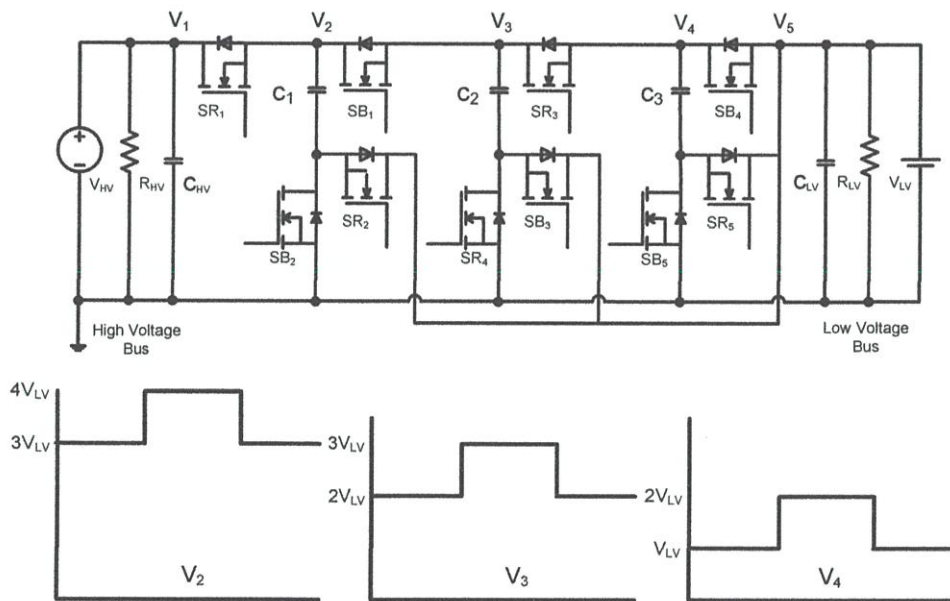
จากรูปดังกล่าวจะเห็นว่าเมื่อมีการทำงานปกติดังรูปที่ 3.28(ก) ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลบายพาสจะเชื่อมต่ออยู่กับวงจรโดยที่ทำงานเฉพาะสวิตช์กำลังที่อยู่บนสุดเท่านั้น และเมื่อตรวจพบความผิดปกติขึ้นในชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ 3 ดังรูปที่ 3.28(ข) ที่ซึ่งสวิตช์กำลังตัวบนสุดยังทำงานได้อยู่ นั้น ชุดประมวลผลจะควบคุมสัญญาณให้สวิตช์กำลังตัวบนสุดทำงานเพียงตัวเดียว เพื่อให้ชุดคอนเวอร์เตอร์ที่เกิดความผิดปกติทำงานเป็นชุดบายพาสแทน พร้อมกับส่งสัญญาณไปให้ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลบายพาสเพื่อให้งานแทนดังรูปที่ 3.28(ค) เพื่อรักษาระดับของการแปลงผันให้มีอัตราส่วนเท่าเดิม

3.10 การเชื่อมต่อแหล่งจ่ายและภาระไฟฟ้าที่หลากหลายกับวงจร M^2C^3

วงจร M^2C^3 นั้นจะมีชุดคอนเวอร์เตอร์หลายๆชุดเชื่อมต่อกันอยู่แบบอนุกรม ส่งผลให้เกิดแรงดันแต่ละระดับขึ้นที่จุดเชื่อมต่อของชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล ซึ่งในแต่ละระดับแรงดันจะขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันที่บัสแรงดันต่ำกับลำดับของชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลดังรูปที่ 3.29 ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลจึงมีขนาดเป็นจำนวนเท่าของทางบัสแรงดันต่ำ ส่งผลให้สามารถนำภาระไฟฟ้าที่มีความหลากหลายระดับแรงดันไฟฟ้ามาเชื่อมต่อกับชุดวงจร M^2C^3 ได้ ส่งผลให้สามารถนำชุดวงจร M^2C^3 ไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบเสมือนเป็นหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถเลือกกระดบแรงดันไฟฟ้าได้ (Tap-Change DC Transformer) ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่วัดแต่ละโหนดเทียบกับกราวด์จะได้แรงดันไฟฟ้างดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แรงดันไฟฟ้าแต่ละโหนดเทียบกับกราวด์

สถานะ	การทำงาน	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
1	SR_N on	$4V_{LV}$	$4V_{LV}$	$2V_{LV}$	$2V_{LV}$	$1V_{LV}$
2	SB_N on	$4V_{LV}$	$3V_{LV}$	$3V_{LV}$	$1V_{LV}$	$1V_{LV}$



รูปที่ 3.29 แรงดันที่ได้จากจุดต่อระหว่างโมดูล

3.11 การออกแบบอุปกรณ์ต่างๆที่สำคัญของวงจร M^2C^3

การออกแบบอุปกรณ์ต่างๆที่สำคัญของวงจร M^2C^3 โดยมีอุปกรณ์หลักๆคือ ตัวเก็บประจุ สวิตช์ กำลัง และหม้อแปลงความถี่สูงที่ซึ่งอุปกรณ์แต่ละตัวจะต้องคำนึงถึงแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับ เพื่อทำการคำนวณหาค่าพิกัดอุปกรณ์ต่างๆเพื่อให้ได้วงจรที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

3.11.1 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุในวงจร M^2C^3 นี้จะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นหลัก เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างมากต่อวงจร M^2C^3 ที่ไว้สะสมและคายประจุเพื่อให้ชุดวงจรเกิดการอนุกรมและขนานตามการทำงานของสวิตช์กำลังในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล ส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าได้หลายระดับ รวมไปถึงสามารถทำการรักษาแรงดันไฟฟ้าให้มีความคงที่ต่อเนื่อง โดยตัวเก็บประจุในแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตัวหนึ่งของวงจร ที่ใช้หลักการที่ว่าในช่วงที่ตัวเก็บประจุทำงานที่สภาวะอยู่ตัวแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด และกระแสไฟฟ้าใน 1 คาบเวลาจะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ พื้นที่การสะสมและคายประจุต้องมีค่าเท่ากัน ดังรูปที่ 3.30 ซึ่งค่าการเก็บประจุไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุดังสมการ

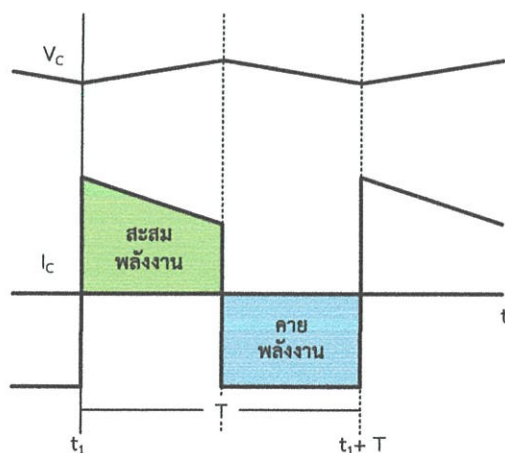
$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3.3)$$

เมื่อ

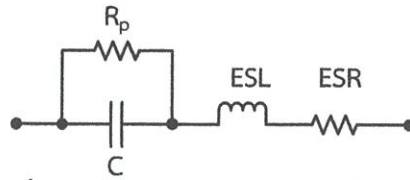
X_C คือ อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ (Ω)

f คือ ความถี่ไฟฟ้า (Hz)

C คือ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า (F)



รูปที่ 3.30 แรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในสภาวะอยู่ตัว



รูปที่ 3.31 ค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ

แต่การเลือกใช้ตัวเก็บประจุทางปฏิบัตินั้นจะมีตัวพารามิเตอร์แฝงอาทิเช่นค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูล (Equivalent Series Resistance หรือ ESR) ค่าความเหนี่ยวนำแฝงอนุกรมสมมูล (Equivalent Series Inductance หรือ ESL) และค่าความต้านทานแฝงขนานสมมูล (Equivalent Parallel Resistance หรือ R_p) ดังรูปที่ 3.31 ซึ่งค่าพารามิเตอร์นี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของความถี่ไฟฟ้าและอุณหภูมิขณะใช้งาน โดยที่พารามิเตอร์ต่างๆไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรงและรู้ได้จากทางบริษัทจำหน่าย แต่พารามิเตอร์เหล่านี้จะส่งผลในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ถ้าในอุปกรณ์มีค่าพารามิเตอร์แฝงสูงจะทำให้เกิดความสูญเสียภายในอุปกรณ์เพิ่มขึ้น ค่า R_p คือค่าความต้านทานของวัสดุที่ใช้ทำตัวเก็บประจุ และค่าตัวเหนี่ยวนำแฝงอนุกรมสมมูล หรือจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้นและจะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปสามารถคำนวณได้จากค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวสามารถหาได้ดังสมการ

$$ESL = 2\pi fL \quad (3.4)$$

เมื่อ

ESL คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำแฝงอนุกรมสมมูล (Ω)

f คือ ความถี่ไฟฟ้า (Hz)

L คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำ (H)

ค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูล หรือ ESR จะมีค่าลดลงเมื่อค่าการเก็บประจุไฟฟ้า ความถี่ และอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งค่า ESR สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$ESR = \frac{D.F.}{2\pi fC} \quad (3.5)$$

เมื่อ

ESR คือ ค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูล (Ω)

f คือ ความถี่ไฟฟ้า (Hz)

C คือ ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า (F)

D.F. คือ มุมระหว่างค่าเวกเตอร์ Z กับ X_C (Degree)

ค่า D.F. (Dissipation Factor) สามารถหาค่าได้จากมุม δ ในสมการที่ 3.6 ซึ่งเกิดจากมุมระหว่างค่าเวกเตอร์ Z กับ เวกเตอร์ $X_C - X_L$ ดังแสดงในรูปที่ 3.30 โดยที่มุม δ สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 3.9

$$D.F. = \tan(\delta) \quad (3.6)$$

$$\tan(\delta) = \frac{R}{X_C} \quad (3.7)$$

$$R = ESR \quad (3.8)$$

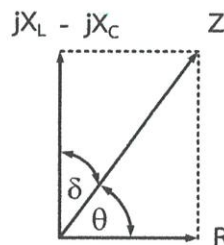
โดยที่

$$\delta = 90 - \theta \quad (3.9)$$

เมื่อ

- δ คือ มุมระหว่างค่าเวกเตอร์ Z กับ X_C (Degree)
- θ คือ มุมระหว่างค่าเวกเตอร์ Z กับ R (Degree)
- R คือ ค่าความต้านทานแฝงอนุกรมสมมูลย์ (Ω)
- X_C คือ อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ (Ω)

จากสมการที่ 3.9 มุม θ เกิดจากมุมระหว่างค่าเวกเตอร์ Z กับ เวกเตอร์ R ซึ่งสามารถหามุม θ ได้โดยการใช้หลักการของผลตอบสนองเชิงเวลาในวงจร RLC และจากรูปที่ 3.32 จะสามารถหาค่าเวกเตอร์ของอิมพีแดนซ์รวม (Z) ได้จากสมการที่ 3.10 และหาขนาดของอิมพีแดนซ์รวม ได้จากสมการที่ 3.11 และ 3.12



รูปที่ 3.32 เวกเตอร์ของอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ

โดยที่

$$Z = \frac{1}{j\omega C} + j\omega L + R \quad (3.10)$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (3.11)$$

หรือ

$$|Z| = \sqrt{ESR^2 + \left(ESL - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (3.12)$$

ซึ่งจากสมการที่ 3.12 ถ้าค่าอิมพีแดนซ์รวมมีค่ามากจะส่งผลให้เกิดการกระเพื่อมของแรงดันและกระแสมากขึ้น ทำให้ความสูญเสียที่เกิดจากตัวเก็บประจุมีค่ามาก แต่พารามิเตอร์เหล่านี้ทางผู้ผลิตจะไม่ได้บอกมาโดยตรง จึงต้องเลือกขนาดของตัวเก็บประจุในวงจรได้จากแรงดันไฟฟ้าที่ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลที่ต่ออยู่ ซึ่งจะรับแรงดันไฟฟ้าไม่เท่ากันจึงทำให้ขนาดของตัวเก็บประจุมีขนาดที่ไม่เท่ากันด้วย แต่ในการทำงานจริงนั้นจำเป็นที่จะต้องคำนึงหลักการสะสมและคายประจุของตัวเก็บประจุ (Volt-sec Balance) ที่ซึ่งควรจะมีค่าความจุไฟฟ้าที่เท่ากันเพื่อให้ลักษณะการสะสมและคายประจุเหมือนกัน เป็นการลดการกระเพื่อมของแรงดันและกระแสไฟฟ้าให้น้อยที่สุด ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุนั้นจะต้องมีค่าดังสมการ 3.13 ที่ซึ่งตัวเก็บประจุในแต่ละตัวจะได้รับแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ $V_{C1} = 4V_{CLV}$, $V_{C2} = 3V_{CLV}$, $V_{C3} = 2V_{CLV}$, $V_{C4} = V_{C5} = V_{CLV}$

$$P = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3.13)$$

โดยที่

- P คือ กำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ (W)
- C คือ ค่าความจุไฟฟ้า (F)
- V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ (V)

และขนาดของตัวเก็บประจุของที่เหมาะสมสามารถหาได้จากสมการที่ 3.14 ที่ซึ่งแรงดันไฟฟ้าสามารถเลือกพิกัดแรงดันได้จากอัตราส่วนการแปลงผันของชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล แต่ขนาดของความจุไฟฟ้าจะต้องมีค่าที่มีขนาดเท่ากันทุกตัวเก็บประจุเพื่อลดความสูญเสียของการสะสมและคายประจุที่ซึ่งค่าความจุที่เหมาะสมหาได้จากสมการ

$$V_m = v_C(t) + RC \frac{dv_C(t)}{dt} + LC \frac{d^2v_C(t)}{dt^2} \quad (3.14)$$

$$v_C(0) = V_C \quad (3.15)$$

โดยที่

L	คือ	ค่าความเหนี่ยวนำแฝง
R	คือ	ความต้านทานหาได้จาก $\sum R_{ON} + \sum R_{ESR}$
C	คือ	ค่าความจุไฟฟ้า
$v_C(t)$	คือ	แรงดันที่ตัวเก็บประจุ ณ เวลาใดๆ
V_C	คือ	แรงดันตัวเก็บประจุแรกเริ่ม

3.11.2 สวิตช์กำลัง

อุปกรณ์สวิตช์กำลังเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีความสำคัญอย่างมากต่อวงจร ซึ่งทำหน้าที่สวิตช์ตามสัญญาณควบคุมที่ได้รับเพื่อให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า โดยสวิตช์กำลังจะมีคุณลักษณะอุดมคติ (Ideal Characteristics) ดังนี้

- สามารถทนแรงดันเบรกไดวอน์ได้สูง
- แรงดันตกคร่อมและความต้านทานขณะนำกระแสต่ำ
- มีการเปลี่ยนสถานะช่วงเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแสที่เร็ว
- สามารถใช้งานที่ระดับความร้อนสูง

อุปกรณ์สวิตช์กำลังในวงจร M^2C^3 จะต้องสามารถใช้งานที่ความถี่สูง การสวิตช์ให้นำและหยุดนำกระแสจะต้องเร็ว และในการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังนั้นจะต้องมีขนาดแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์เท่ากับ 1.5 เท่าของแรงดันที่ใช้งานและกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์เท่ากับ 2 เท่าของกระแสที่ใช้งาน เพื่อป้องกันการเสียหายจากการสวิตช์ที่จะมีช่วงที่เกิดกระแสพุ่งขึ้นสูง (Inrush current) รวมไปถึงสามารถหาความสูญเสียจากการสวิตช์ (Loss of Switching) ได้จากรูปที่ 3.33 และสมการที่ 3.18 [19]

$$P_{SW_ON} = \left(\int_0^{t_1} \left(\frac{I_D}{t_1} t \right) \left(V_{DS} - \frac{V_{DS}}{t_1} t \right) dt \right) f_S$$

$$= \frac{1}{6} I_D V_{DS} t_1 f_S \quad (3.16)$$

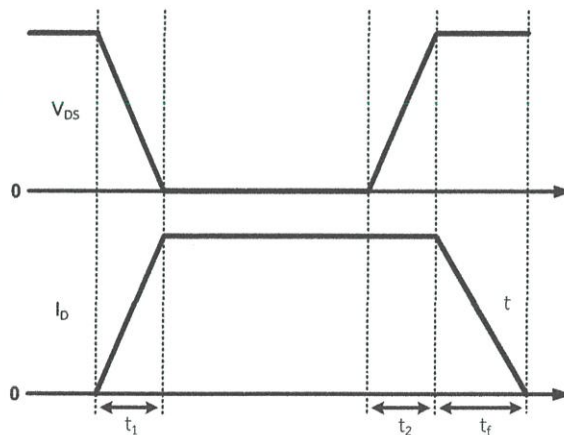
$$P_{SW_OFF} = \frac{1}{2} V_{DS} I_D (t_1 + t_f) f_S \quad (3.17)$$

$$P_{SW} = P_{SW_ON} + P_{SW_OFF} \quad (3.18)$$

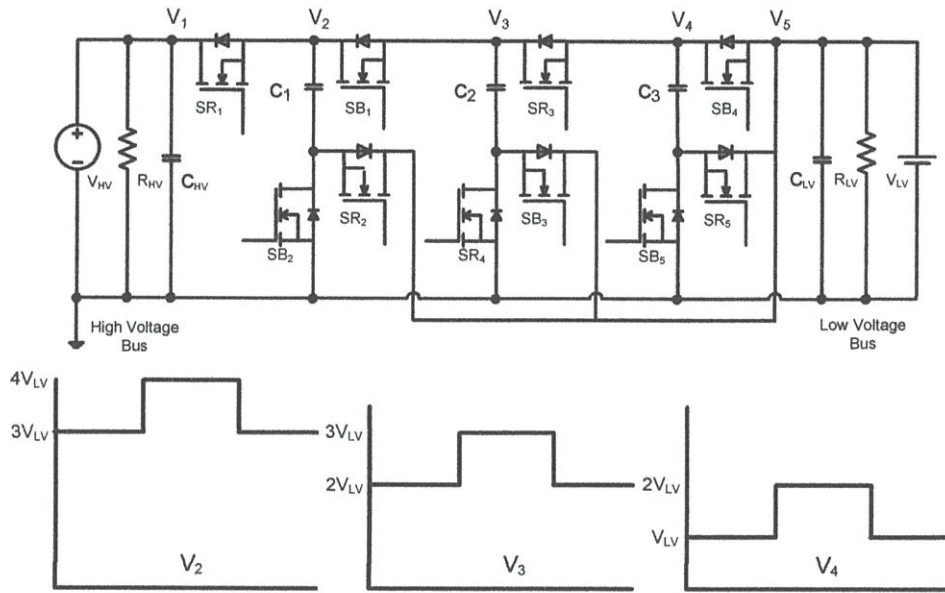
โดยที่

P_{SW}	คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียของสวิตช์กำลังทั้งหมด (W)
P_{SW_ON}	คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียของสวิตช์กำลังขณะทำงาน (W)
P_{SW_OFF}	คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียของสวิตช์กำลังหยุดทำงาน (W)
V_{DS}	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขาเดรนกับขาซอส (V)
I_D	คือ กระแสไฟฟ้าที่ขาเดรน (A)
f_S	คือ ความถี่ของการสวิตช์ (Hz)

และจะต้องทนแรงดันไฟฟ้าในขณะที่มีการสวิตช์ได้ดังรูปที่ 3.34 ที่ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อของชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลที่มีขนาดแรงดันไม่เท่ากันตามอัตราส่วนของการแปลงผัน ส่งผลให้ในทางทฤษฎีสามารถใช้พิกัดของสวิตช์กำลังได้หลายพิกัดแต่ในความเป็นจริงควรใช้ที่ขนาดเดียวกันเพื่อให้สวิตช์มีการทำงานที่เหมือนกันและลดการกระเพื่อมของแรงดันและกระแสไฟฟ้าให้น้อยที่สุด



รูปที่ 3.33 สัญญาณแรงดันที่ขาเดรนและขาซอสและกระแสไฟฟ้าที่นำมาวิเคราะห์การสูญเสีย



รูปที่ 3.34 แรงดันที่ได้จากจุดต่อระหว่างโมดูล

3.11.3 หม้อแปลงกำลังความถี่สูง

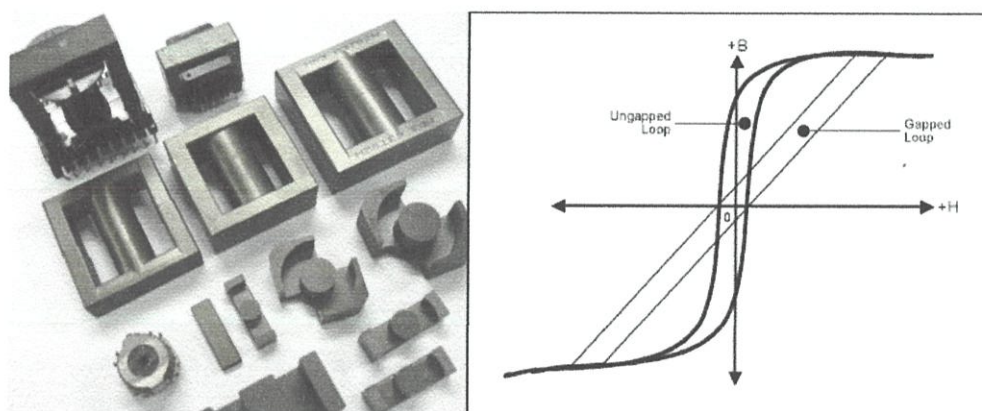
หม้อแปลงความถี่สูงในวงจร M^2C^3 มีหน้าที่หลักในการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าระหว่างวงจรทั้งสองฝั่งที่เชื่อมต่อกัน ซึ่งจะใช้หลักการสมดุลพลังงานระหว่างวงจร โดยสภาวะปกติที่แรงดันไฟฟ้าสองฝั่งมีค่าเท่ากันจะไม่เกิดการถ่ายโอนพลังงานระหว่างกัน แต่ถ้าแรงดันทั้งสองฝั่งมีค่าไม่เท่ากันแล้วจะทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานไปยังฝั่งที่มีแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่า โดยที่หลักการของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กให้เหนี่ยวนำกับตัวนำไฟฟ้า โดยสามารถแบ่งหม้อแปลงไฟฟ้าออกเป็น 3 ชนิดหลักๆตามแกนแม่เหล็กคือ หม้อแปลงไฟฟ้าแกนเหล็ก หม้อแปลงไฟฟ้าแกนอากาศ และหม้อแปลงไฟฟ้าแกนเฟอร์ไรท์ ที่ซึ่งจะต้องคำนึงถึง

- พิกัดกำลังไฟฟ้าของทั้งสองฝั่งที่เชื่อมต่อกับหม้อแปลงไฟฟ้า
- แรงดัน กระแสและความถี่ที่ใช้งาน
- ประสิทธิภาพและกำลังสูญเสีย

ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติต่างๆดังที่กล่าวมาแล้วนั้น จึงต้องไปทำการเลือกขนาดของลวดทองแดงที่นำมาพันเพื่อให้ได้รอบตามที่ต้องการและทนกระแสที่ใช้งานได้ อีกทั้งยังต้องเลือกแกนเหล็กที่มีคุณสมบัติที่สอดคล้องกับการใช้งานเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดสำหรับวงจร M^2C^3 ที่ในวงจรจะมีความถี่ของการสวิตซ์สูง ทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตออกมาจากขั้วลบบของตัวเก็บประจุนั้นมีความถี่สูงด้วย จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแกนเฟอร์ไรท์ ที่ซึ่งเป็นแกนที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งานในย่านความถี่สูงโดยเฉพาะ

3.11.3.1 แกนแม่เหล็ก

แกนแม่เหล็กรูปแบบต่างๆดังรูปที่ 3.35(ก) และกราฟ B-H ของแกนแม่เหล็กที่ทำมาจากเฟอร์ไรท์ (Ferrite) ดังรูปที่ 3.35(ข) โดยเฟอร์ไรท์เป็นสารประกอบของโลหะออกไซด์ซึ่งจัดว่าเป็นเซรามิกชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถใช้เป็นแกนแม่เหล็กสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำงานในย่านความถี่สูงได้ถึงระดับเมกะเฮิรตซ์ ซึ่งเหตุผลที่แกนแม่เหล็กชนิดนี้ได้รับความนิยมสำหรับการเลือกเป็นแกนแม่เหล็กของหม้อแปลงความถี่สูงเนื่องจากมีค่าความสูญเสียที่แกนแม่เหล็กต่ำและมีราคาที่ถูกกว่าเมื่อเทียบกับแกนแม่เหล็กชนิดอื่น เช่น แกนชนิดพาวเดอร์เมทัล (Powdered Metal) และถึงแม้ตัวแกนชนิดเฟอร์ไรท์จะมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กอิ่มตัวที่ต่ำกว่าแกนชนิดอื่น แต่ในการทำงานที่ความถี่สูงนั้นคุณสมบัติของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กอิ่มตัวไม่ใช่เป็นข้อควรพิจารณาที่สำคัญของการทำงานของหม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญมากที่สุดในการพิจารณาคือ ความสูญเสียของแกนแม่เหล็ก



รูปที่ 3.35 (ก) แกนแม่เหล็กรูปร่างต่างๆ และ (ข) B-H curve ของแกนเฟอร์ไรท์

3.11.3.2 ลักษณะรูปคลื่นแรงดันที่ใช้งาน

จากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่าวงจร M^2C^3 สามารถสร้างแรงดันกระแสสลับที่มีรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยมที่ความถี่สวิตช์ ดังนั้นในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อใช้งานร่วมกับวงจรดังกล่าวจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงเรื่องนี้ด้วยเช่นกัน โดยสมการสำหรับการออกแบบจำนวนรอบที่ใช้ร่วมกับหม้อแปลงความถี่สูงที่มีรูปคลื่นเป็นสี่เหลี่ยมคือ

$$N = \frac{V}{2n \cdot B_{\max} \cdot S \cdot f_s} \quad (3.19)$$

โดยที่

- N คือ จำนวนรอบของขดลวด(Turns)
 V คือ ระดับแรงดันไฟฟ้า(V)
 B_{\max} คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด(T)
 S คือ พื้นที่ผิวของแกนแม่เหล็ก(m²)
 f_s คือ ความถี่ของการสวิตช์(Hz)
 n คือ ตัวคูณลักษณะกระแส DC Magnetizing

สำหรับตัวคูณกระแส DC Magnetizing นี้พิจารณาได้จากรูปคลื่นของแรงดันที่ใช้
 งานร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยแบ่งเป็น 2 กรณีคือ

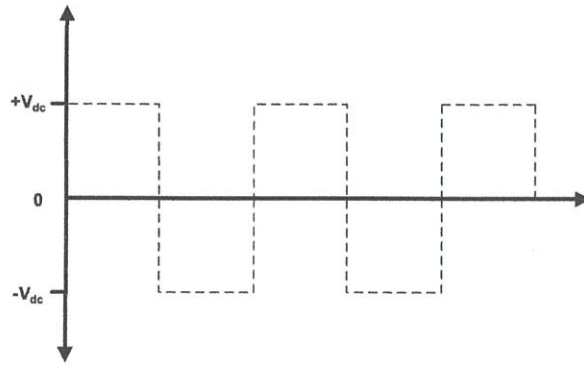
- มีกระแส DC Magnetizing กรณีนี้ n จะมีค่าเป็น 1
- ไม่มีกระแส DC Magnetizing กรณีนี้ n จะมีค่าเป็น 2

สำหรับการใช้งานในกรณีใช้ร่วมกับวงจร M^2C^3 แรงดันที่ป้อนให้กับหม้อแปลงจะ
 เป็นแรงดันชนิดที่ไม่มีกระแส DC Magnetizing ดังนั้นค่า n จึงเท่ากับ 1 [3] เมื่อคำนึงถึงขีดจำกัดของ
 หน้าต่างของแกนแม่เหล็กซึ่งเป็นพื้นที่ที่สามารถใส่ลวดเข้าไปได้ในแกน จะเป็นไปตามสมการ

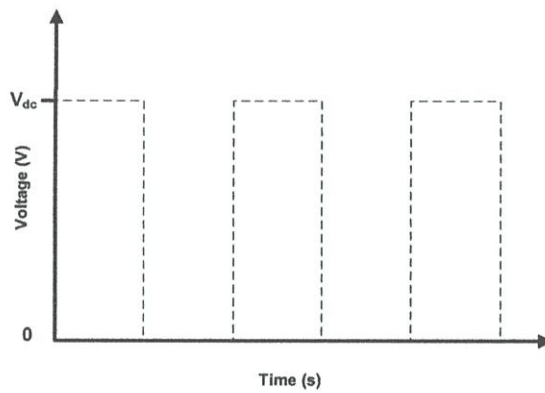
$$k \cdot W = N_1 \cdot A_{w1} + N_2 \cdot A_{w2} \quad (3.20)$$

โดยที่

- W คือ พื้นที่ของหน้าต่างแกนแม่เหล็ก
 k คือ ตัวประกอบการใช้งานหน้าต่าง
 N คือ จำนวนขดลวดที่ฝั่งปฐมภูมิหรือฝั่งทุติยภูมิ
 A_w คือ พื้นที่หน้าตัดลวดฝั่งปฐมภูมิหรือฝั่งทุติยภูมิ



รูปที่ 3.36 แรงดันที่มีกระแส DC Magnetizing ($n = 1$)



รูปที่ 3.37 แรงดันที่ไม่มีกระแส DC Magnetizing ($n = 2$)

และ

$$A_w = \frac{I_{rms}}{J} \quad (3.21)$$

โดยที่

I_{rms} คือ กระแสประสิทธิผลในขดลวด
 J คือ ความหนาแน่นกระแส

เมื่อนำสมการที่ (3.21) แทนลงในสมการที่ (3.20) จะได้ว่า

$$k \cdot W = N_1 \cdot \frac{I_{rms1}}{J} + N_2 \cdot \frac{I_{rms2}}{J} \quad (3.22)$$

แทนสมการที่ (3.22) ลงในสมการที่ (3.19) และจัดรูปใหม่จะได้

$$W \cdot S = \frac{V_1 \cdot I_{rms1} + V_2 \cdot I_{rms2}}{4k \cdot B_{max} \cdot S \cdot f_s \cdot J} = A_p \quad (3.23)$$

โดยทั่วไปแล้ว $V_1 I_{rms1} = V_2 I_{rms2} = P_{out}$ ทำให้สมการ (3.23) เหลือเพียง

$$A_p = W \cdot S = \frac{P_{out}}{2k \cdot B_{max} \cdot S \cdot f_s \cdot J} \quad (3.24)$$

ซึ่ง A_p จะแสดงขีดจำกัดทางกายภาพของแกนแม่เหล็กนั้นๆ ในสภาวะการทำงานทางแม่เหล็กที่ต้องการใช้งาน โดยค่าของตัวแปรต่างๆ สามารถหาได้จากข้อมูลของแกนแม่เหล็กที่ผู้ผลิตแกนแม่เหล็กกำหนด พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าจะสามารถหาได้จากแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานกับกระแสไฟฟ้าของขดลวดที่นำมาใช้ ที่ซึ่งจะได้พิกัดหม้อแปลงไฟฟ้างดสมการ 3.25

$$S = VI \quad (3.25)$$

โดยที่

V	คือ	แรงดันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งาน
I	คือ	พิกัดกระแสไฟฟ้าของขดลวด

และค่าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงที่เกิดจากการพันขดลวดจะของแกนเฟอร์ไรท์จะตามสมการที่ 3.26

$$L = \frac{2\mu NA}{l} \quad (3.26)$$

โดยที่

L	คือ	ค่าความเหนี่ยวนำ(H)
μ	คือ	ค่าความซึมซาบของแกนแม่เหล็ก
N	คือ	จำนวนรอบของขดลวด
A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของแกนขดลวด(m^2)
l	คือ	ความยาวของแกนที่พันขดลวด(m)

3.12 การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าของวงจร M^2C^3

การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าของวงจร M^2C^3 นั้นเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กเนื่องจากว่าในการผลิตไฟฟ้านั้นจำเป็นต้องมีแรงดันไฟฟ้าที่เรียบและคงที่เหมาะแก่การใช้งาน มิเช่นนั้นแล้วจะทำให้อุปกรณ์ที่เชื่อมต่ออยู่มีโอกาสชำรุดได้งาน ส่งผลให้ความน่าเชื่อถือของระบบลดลง ซึ่งการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าของวงจร M^2C^3 จะพิจารณาถึงการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าในแต่ละทิศทางเพื่อศึกษาที่ผลกระทบที่เกิดจากแรงดันเกิน (Voltage swell) แรงดันตก (Voltage sag) แรงดันและกระแสกระเพื่อม (Voltage and Current Ripple) ของสัญญาณเมื่อมีการต่อภาระไฟฟ้าที่หลากหลายระดับแรงดันไฟฟ้า รวมไปถึงประสิทธิภาพ (Efficiency) ของวงจร M^2C^3 ซึ่งจะอธิบายความหมาย ผลกระทบและวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลแต่ละข้อมูลของวงจร M^2C^3 ดังนี้

3.12.1 แรงดันตก

แรงดันตก (Voltage sag) คือแรงดันอาร์เอ็มเอส (V_{rms}) มีขนาดลดลงเหลือ 0.8-0.9 p.u. ในช่วงเวลานานกว่า 1min โดยที่แรงดันตกนั้นจะส่งผลให้ภาระไฟฟ้าโดยเฉพาะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงได้รับความเสียหายได้ ซึ่งวงจร M^2C^3 จะต้องมีการถ่ายโอนพลังงานจากบัสแรงดันต่ำหรือแบตเตอรี่ให้มีความไวเพียงพอต่อการป้องกันแรงดันตกที่จะเกิดขึ้นในระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก

3.12.2 แรงดันเกิน

แรงดันเกิน (Voltage swell) คือแรงดันอาร์เอ็มเอส (V_{rms}) มีขนาดเพิ่มขึ้นถึง 1.1-1.2 p.u. ในช่วงเวลานานกว่า 1min โดยที่แรงดันเกินจะส่งผลให้ภาระไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่เกิดความเสียหายได้ ซึ่งวงจร M^2C^3 จะทำการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าที่เกินจากระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กมาที่แบตเตอรี่ซึ่งเป็นการสะสมประจุให้กับแบตเตอรี่ไปในตัว

3.12.3 แรงดันกระเพื่อม

แรงดันกระเพื่อม (Voltage ripple) คือการที่สัญญาณแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (V_{rms}) จะมีขนาดไม่เกิน (0.9-1.1 p.u.) ซึ่งในวงจร M^2C^3 จะมีแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากวงจร M^2C^3 เป็นไฟกระแสตรง ส่งผลให้หาค่าแรงดันกระเพื่อมได้จากสมการที่

$$\Delta V = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{rms}} \quad (3.27)$$

3.12.4 กระแสกระเพื่อม

กระแสกระเพื่อม (Current ripple) คือการที่กระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงต่อเนื่อง ซึ่งค่ากระแสอาร์เอ็มเอส (I_{rms}) จะมีขนาดไม่เกิน (0.9-1.1 p.u.) ซึ่งในวงจร M^2C^3 จะมีกระแสไฟฟ้าที่ออกจากวงจร M^2C^3 เป็นไฟกระแสตรง ส่งผลให้หาค่าแรงดันกระเพื่อมได้จากสมการที่

$$\Delta I = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{rms}} \quad (3.28)$$

3.12.5 ประสิทธิภาพ

ประสิทธิภาพของวงจรเป็นสิ่งสำคัญต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อให้มีการสูญเสียในระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กมีค่าต่ำที่สุด อีกทั้งยังบ่งบอกถึงความเหมาะสมในการนำวงจร M^2C^3 มาประยุกต์ใช้งานในระบบผลิตไฟฟ้าอีกด้วย ซึ่งค่าประสิทธิภาพนั้นจะหาได้จากสมการที่

$$eff = \frac{P_{out}}{P_{IN}} \times 100 \quad (3.29)$$

3.13 สรุป

บทนี้จะอธิบายถึงวิธีการควบคุมและการทำงานของวงจร M^2C^3 การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า ทั้งภายในชุดวงจร และ 2 ชุดวงจรผ่านหม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งวงจร M^2C^3 นั้นจะมีโครงสร้างเป็นชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล ควบคุมง่าย ไม่มีตัวเหนี่ยวนำ ถ่ายโอนพลังงานได้ทั้งสองทิศทาง และสามารถกำจัดความผิดพลาดในชุดคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งวงจร M^2C^3 จะเป็นวงจรที่ถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าระหว่างบัสแรงดันที่เชื่อมต่ออยู่ด้วยหลักการสมดุลพลังงานไฟฟ้า และการสะสมและคายประจุของตัวเก็บประจุ จึงทำให้วงจร M^2C^3 สามารถทำการเพิ่มและลดระดับแรงดันไฟฟ้าได้ตามอัตราส่วนการแปลงผัน อีกทั้งยังสามารถใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้หลากหลายแรงดันไฟฟ้าด้วยการเชื่อมต่อที่ตัวเก็บประจุในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลซึ่งทำให้วงจร M^2C^3 ทำงานเสมือนเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถเลือกกระดบแรงดันไฟฟ้า (Tap-Changed DC Transformer) รวมไปถึงการนำแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับไปประยุกต์ใช้งานด้วยการเชื่อมต่อที่ขั้วลบของตัวเก็บประจุระหว่างชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล ที่ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำมาประยุกต์ใช้กับหม้อแปลงความถี่สูง

วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้านั้นจะให้ลักษณะที่เด่นคือการเพิ่มเสถียรภาพให้กับวงจรด้วยการแยกโดดทางไฟฟ้ากล่าวคือจะไม่เกิดความเสียหายระหว่างกันผ่านหม้อแปลงความถี่สูง สามารถถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าระหว่างกันได้ด้วยการถ่ายโอนพลังงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเสมือนเป็นแหล่งพลังงานสำรองไฟฟ้าระหว่างกัน อีกทั้งยังถ่ายโอนพลังงานแบบทันทีทันใด รวมไปถึงการออกแบบและวิธีการคำนวณอุปกรณ์ต่างๆภายในวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าอาทิเช่น ตัวเก็บประจุ สวิตช์กำลังไฟฟ้า และหม้อแปลงความถี่สูง และการคำนวณคุณภาพไฟฟ้าเพื่อศึกษาถึงความเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก

บทที่ 4

การจำลองการทำงาน

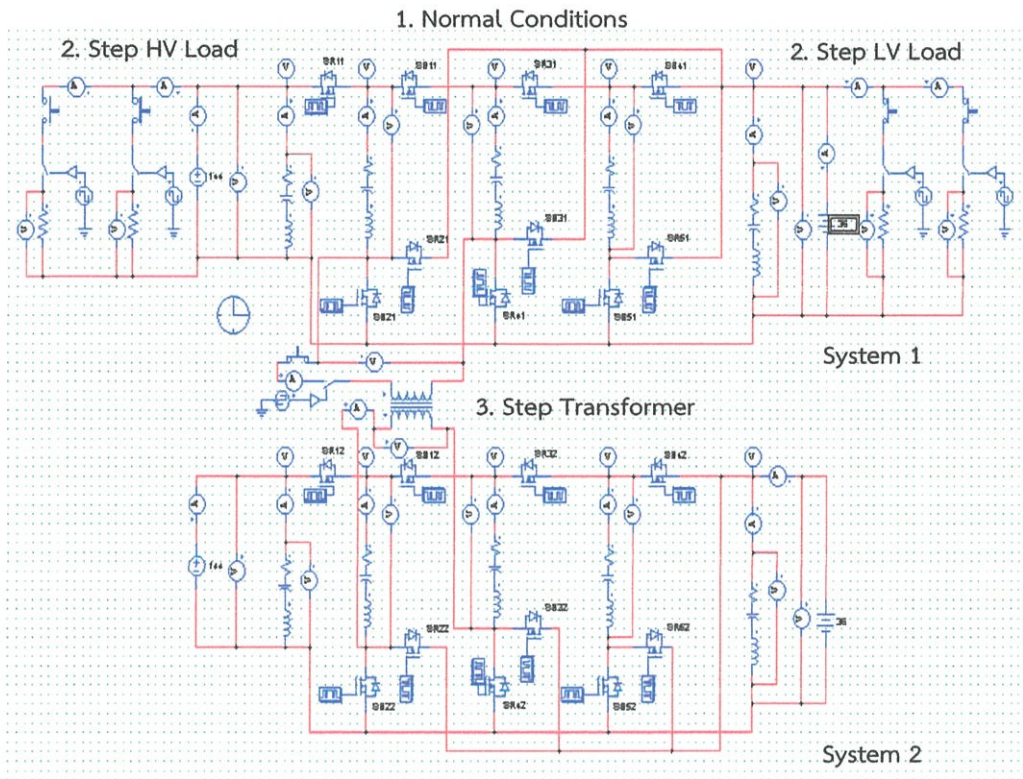
4.1 บทนำ

บทนี้จะอธิบายรายละเอียดและวิธีการจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ผ่านทางโปรแกรม PSIM 9.0 เพื่อจำลองการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของวงจร M^2C^3 ในลักษณะการถ่ายโอนพลังงานภายในวงจร เชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้า (Step load) ที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำ และการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงความถี่สูงระหว่างชุดวงจร เพื่อศึกษาถึงการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าในลักษณะต่างๆ ที่วงจร M^2C^3 ทำงานในสภาวะแบบไดนามิก (Dynamic State) โดยที่วงจร M^2C^3 จะทำงานเสมือนหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถเลือกกระดပ်แรงดันไฟฟ้าตามอัตราส่วนการแปลงผัน การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับการสมดุลพลังงานไฟฟ้า และการสะสมและคายประจุของตัวเก็บประจุ ในการจำลองจะนำสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้ามารวบรวมเพื่อศึกษาถึงการทำงาน ประสิทธิภาพและความเหมาะสมของวงจร M^2C^3 ในการนำวงจร M^2C^3 มาประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่มีการเชื่อมต่อกับหลากหลายภาระไฟฟ้า

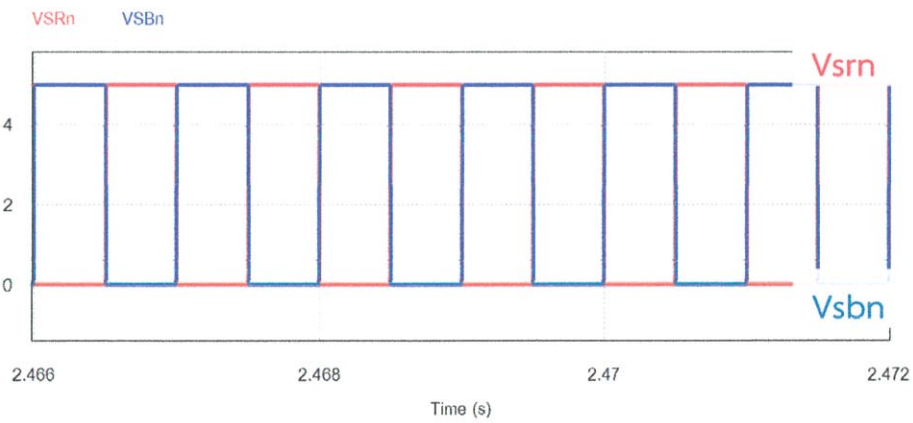
4.2 วิธีการจำลองวงจร M^2C^3

การจำลองวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะใช้โปรแกรม PSIM 9.0 ในการศึกษาถึงการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าและวิเคราะห์การทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะประกอบไปด้วยวงจร M^2C^3 2 ชุดที่เชื่อมต่อกันระหว่างหม้อแปลงความถี่สูง โดยขั้นตอนที่ 1 จะจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 1 ชุดทำการถ่ายโอนพลังงานภายในวงจรทั้งแบบปกติลดระดับแรงดันไฟฟ้า (Step-down mode) และเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า (Step-up mode) ที่ซึ่งในกรณีต่างๆของขั้นตอนที่ 1 จะมีการต่อภาระไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ขั้นตอนที่ 2 จะทำการสวิตช์ภาระไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับบัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำ (Step load) เพิ่มเข้ามาที่บัสแรงดันนั้นๆ หลังจากนั้นขั้นตอนที่ 3 จะทำการเชื่อมต่อดังวงจร M^2C^3 ชุดที่ 2 ผ่านหม้อแปลงความถี่สูง (Step transformer) เพื่อศึกษาการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าในแต่ละกรณี

ในการจำลองการทำงานจะใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์กำลัง (MOSFET) ของวงจร M^2C^3 ที่ซึ่งจะได้รับสัญญาณสวิตช์ที่เป็นพัลส์สี่เหลี่ยม 2 สัญญาณ (SR_n และ SB_n) มุมเฟสตรงข้ามกัน 180 องศา (Out of Phase) ดังรูป 4.2 โดยความถี่ในการสวิตช์นั้นจะใช้ความถี่ที่ 10 kHz ซึ่งทั้ง 2 สัญญาณจะมีค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) 50 เปอร์เซ็นต์ ($D = 0.5$) การทำงานของสวิตช์กำลังแบบนี้จะทำให้เกิดการสะสมและคายประจุของตัวเก็บประจุขึ้น ส่งผลให้เกิดการอนุกรมและขนานกันของตัวเก็บประจุในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล จึงเกิดการเพิ่มและลดระดับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.1 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดทางไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 สัญญาณขับสวิตช์กำลัง (SR_n และ SB_n)

4.3 ขั้นตอนการจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3

ในการจำลองการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าจะเริ่มจากการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าภายในชุดวงจรที่ 1 ที่ซึ่งจะมีการะไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ที่บัสดับสหนึ่งและทำการสวิตช์ภาระไฟฟ้าเชื่อมต่อที่บัสด้านเดียวกันกับภาระไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่ก่อนหลังจากนั้นจะทำการเชื่อมต่อกับชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ผ่านหม้อแปลงความถี่สูง เพื่อดูพฤติกรรมถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของวงจร M^2C^3 ทั้งที่เป็นช่วงสวิตช์ และสภาวะคงตัว ในการจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 จะมีการใส่ค่าพารามิเตอร์แฝงที่อาจจะเพิ่มเข้ามาจากอุปกรณ์ต่างๆ ให้มีความใกล้เคียงกับเครื่องต้นแบบมากที่สุด ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในสภาวะปกติของวงจร M^2C^3 จะแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 โดยที่วงจร M^2C^3 แต่ละชุดจะมีชุดคอนเวอร์เตอร์ 3 ชุด ทำให้อัตราส่วนการแปลงผันแรงดันไฟฟ้าจะเท่ากับ 4 เท่า และในโปรแกรม PSIM 9.0 จะให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบอินฟินิต (Infinite voltage source) ซึ่งทำให้ผลการจำลองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ จึงต้องทำการจำลองการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าผ่านค่าของกำลังไฟฟ้าเนื่องจากว่าวงจร M^2C^3 นี้มีการทำงานเสมือนหม้อแปลงความถี่สูงที่ซึ่งจะต้องมีขนาดของกำลังไฟฟ้าทั้งสองฝั่งเท่ากัน และเมื่อสังเกตค่ากระแสไฟฟ้าจะทำให้ทราบถึงทิศทางของการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการจำลองวงจร

พารามิเตอร์	ขนาด
แรงดันไฟฟ้าที่บัสด้านสูง	144 V
แรงดันไฟฟ้าที่บัสด้านต่ำ	36 V
ตัวเก็บประจุในแต่ละชุด	560 μ F
ตัวเหนี่ยวนำแฝงที่ตัวเก็บประจุ	100 pH
ตัวต้านทานแฝงที่ตัวเก็บประจุ	173 m Ω
ตัวต้านทานภายในหม้อแปลง	1 m Ω
ตัวเหนี่ยวนำภายในหม้อแปลง	4 μ H
ตัวต้านทานภายในสวิตช์กำลัง	0.1 Ω

4.4 การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดคทางไฟฟ้าในรูปแบบปกติ

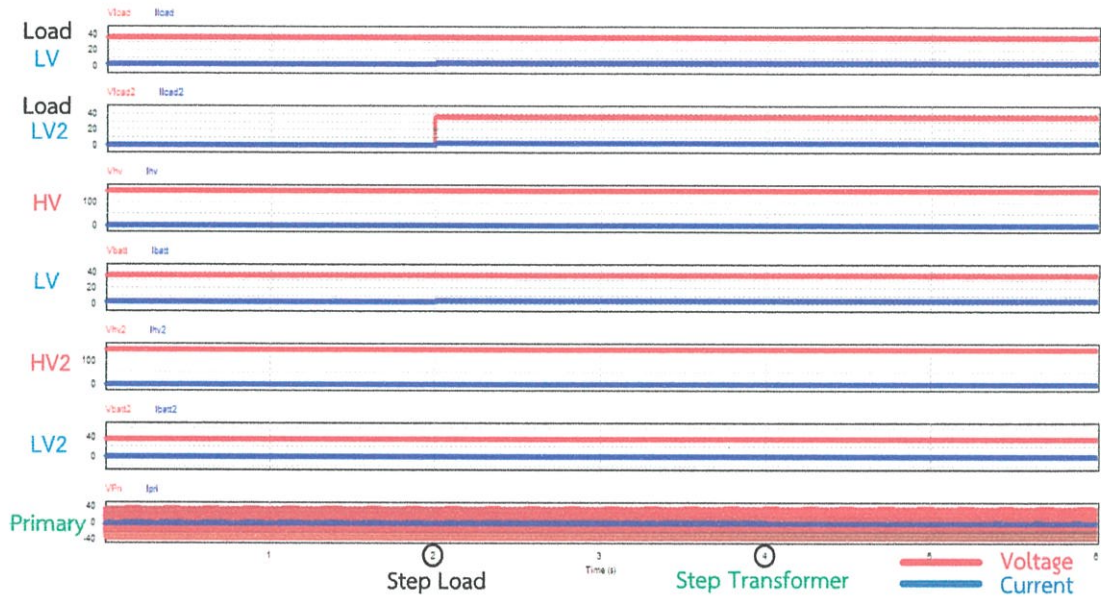
การทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดคทางไฟฟ้าในรูปแบบปกติดังรูปที่ 4.1 ที่แต่ละชุดวงจรมีอัตราการแปลงผันเท่ากันที่ 4 เท่า ซึ่งเป็นรูปแบบของการทำงานขั้นพื้นฐาน เนื่องจากไม่มีการไหลภายในของวงจรตามหลักการสมดุลพลังงานไฟฟ้า ที่มีอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงต่อบัสแรงดันต่ำมีค่าเท่ากับอัตราส่วนการแปลงผันแรงดัน ($RVS = CR$) ซึ่งเป็นการทำงานในขั้นตอนที่ 1 ที่อยู่ในรูปแบบปกติของวงจร M^2C^3 เพียงชุดเดียว (Normal Conditions) เมื่อการทำงานอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State) ในรูปแบบนั้นแล้วจะเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าเข้ามาที่บัสใดบัสหนึ่งเพื่อเสมือนระบบผลิตไฟฟ้าจริง แล้วจึงทำการเพิ่มภาระไฟฟ้า (Step Load) เข้ามาที่บัสใดบัสหนึ่งของวงจร M^2C^3 เพื่อศึกษาการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับบัสแรงดันนั้นๆ หลังจากนั้นจะทำขั้นตอนที่ 3 ที่จะเชื่อมต่อกับชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ผ่านหม้อแปลงความถี่สูง (Synchronize System 2) เพื่อศึกษาการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไปให้กับภาระไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับบัสแรงดันนั้นๆ ทำให้วงจร M^2C^3 มีการทำงานเสมือนหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถเลือกระดับแรงดันไฟฟ้า (Tap-Changed DC-Transformer) ที่กำลังไฟฟ้าทั้งสองฝั่งของชุดวงจร M^2C^3 จะต้องมีค่าเท่ากัน ($P_{IN} = P_{OUT}$) ตามหลักการหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งในการจำลองรูปแบบนี้จะแบ่งการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าออกเป็น 2 แบบดังนี้

4.4.1 การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดคทางไฟฟ้าในรูปแบบปกติที่มีภาระไฟฟ้าเชื่อมต่อกับบัสแรงดันต่ำ

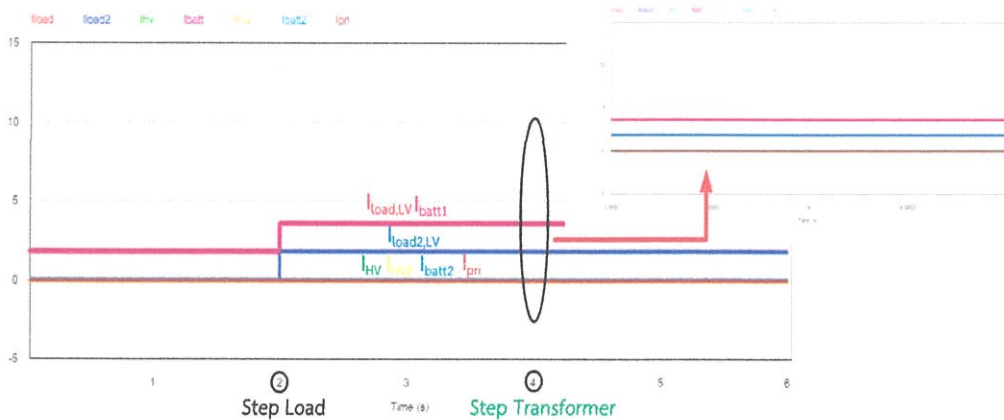
การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดคทางไฟฟ้าในรูปแบบปกติที่มีภาระไฟฟ้าเชื่อมต่อกับบัสแรงดันต่ำจะมีแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสต่างๆดังรูปที่ 4.3 ซึ่งจะเห็นว่ากระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากในการจำลองจะเริ่มจากการที่วงจร M^2C^3 ทำงานในสภาวะปกติที่มีภาระไฟฟ้าขนาด 20 โอห์มเชื่อมต่อกับและเวลาที่ 2 วินาทีจะทำการสวิตช์เพิ่มภาระไฟฟ้าขนาด 20 โอห์มที่บัสแรงดันต่ำหลังจากนั้นในวินาทีที่ 4 จะสวิตช์ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ผ่านหม้อแปลงความถี่สูง เพื่อดูการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าที่บัสต่างๆและหม้อแปลงความถี่สูงจากขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้างดรูปที่ 4.4 ซึ่งจะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของชุดวงจรที่ 1 นั้นจะมีขนาดของกระแสเท่ากับภาระไฟฟ้าเนื่องจากในการจำลองแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะเป็นอินฟินิทบัส (Infinite Bus) ที่แรงดันไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงเกิดเป็นสมดุลพลังงานไฟฟ้าที่ทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลภายในวงจร และทำการขยายแรงดันและกระแสไฟฟ้าแต่ละบัสเพื่อทำการหาประสิทธิภาพโดยเริ่มจากแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจรที่ 1 ดังรูปที่ 4.5(ก) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของชุดวงจรที่ 1 ดังรูปที่ 4.5(ข) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจรที่ 2 ดังรูปที่ 4.6(ก) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของชุดวงจรที่ 2 ดังรูปที่ 4.6(ข) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าขั้นตอนที่ 1 ดังรูปที่ 4.7(ก) และขั้นตอนที่ 2 ดังรูปที่ 4.7(ข) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 4.8 จากการขยายแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดต่างๆจะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าจะคงที่ตลอดระยะเวลาการจำลองและไม่มี

การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าระหว่างเนื่องจากไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้า
ภาระไฟฟ้าจะมาจากบัสแรงดันต่ำของชุดวงจรที่ 1 เท่านั้น

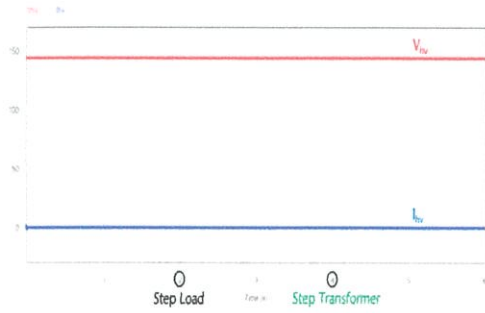
ในการคำนวณประสิทธิภาพของรูปแบบนี้จะไม่สามารถคิดได้เนื่องจากจะไม่มีถ่ายโอน
พลังงานไฟฟ้าผ่านชุดวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า เนื่องจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่าย
แบบอุดมคติที่จะไม่เกิดแรงดันตกขณะทำการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าเข้ามาในชุดวงจร M^2C^3 ส่งผลให้ภาระ
ไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่บัสแรงดันต่ำจะได้รับกำลังไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำเท่านั้น



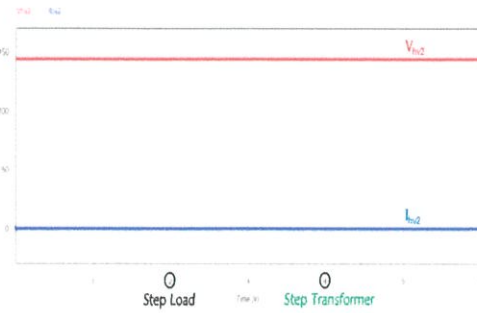
รูปที่ 4.3 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสต่างๆของชุดวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า



รูปที่ 4.4 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่บัสต่างๆ

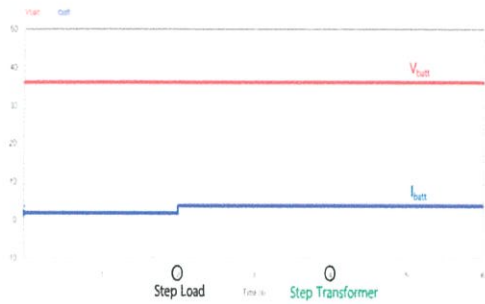


(ก) ชุดวงจรที่ 1

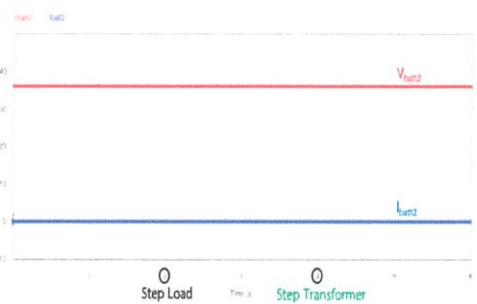


(ข) ชุดวงจรที่ 2

รูปที่ 4.5 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของแต่ละชุดวงจร

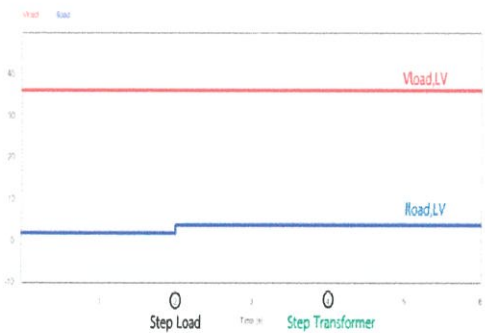


(ก) ชุดวงจรที่ 1

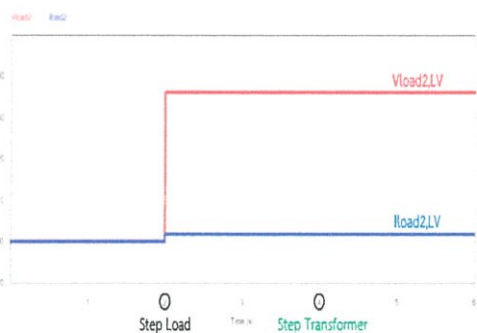


(ข) ชุดวงจรที่ 2

รูปที่ 4.6 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของแต่ละชุดวงจร

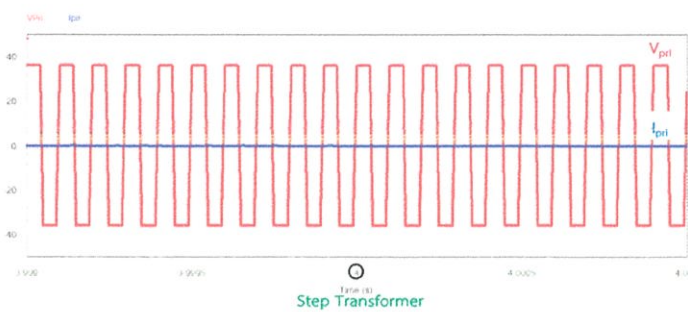


(ก) ชั้นตอนที่ 1



(ข) ชั้นตอนที่ 2

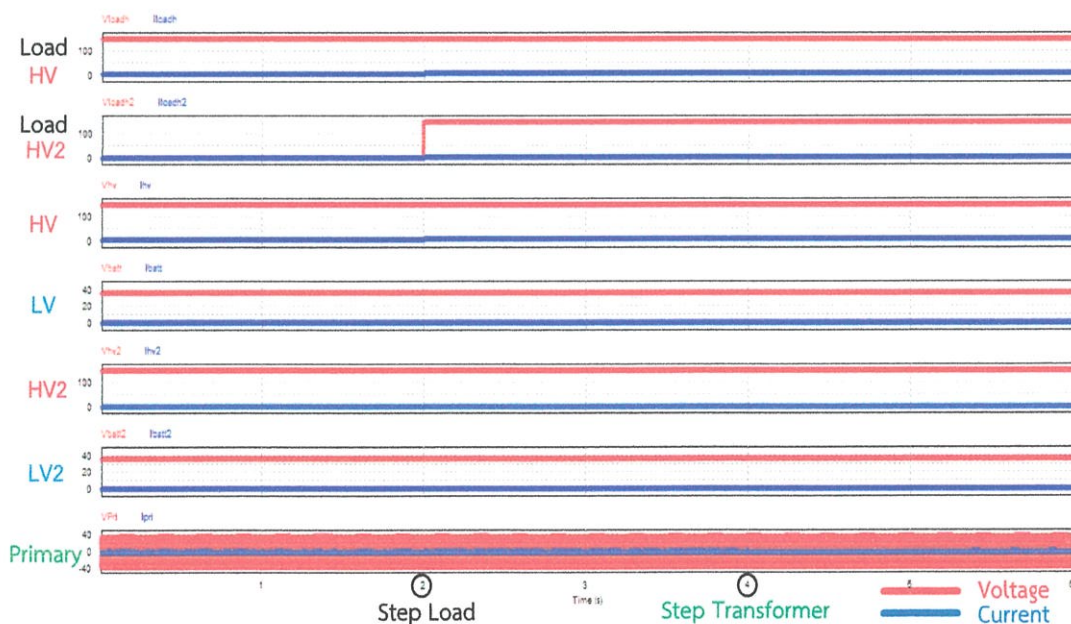
รูปที่ 4.7 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าชั้นตอนต่างๆ



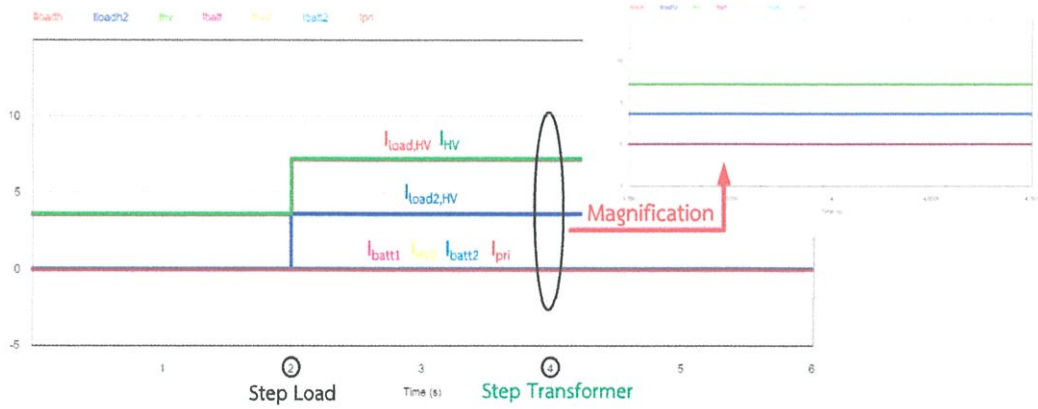
รูปที่ 4.8 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง

4.4.2 การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าในรูปแบบปกติที่มีภาระไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ที่บัสแรงดันสูง

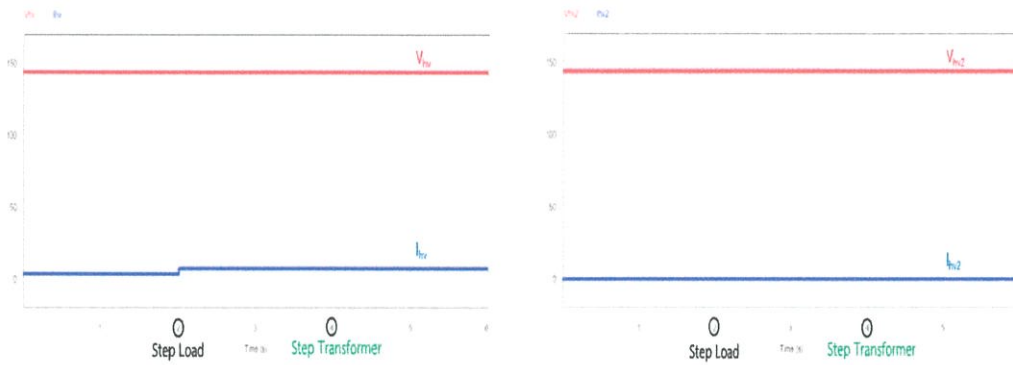
การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าในรูปแบบปกติที่มีภาระไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ที่บัสแรงดันสูงจะมีขั้นตอนการทำงานเหมือนกับ 4.4.1 ที่ซึ่งให้วงจร M^2C^3 อยู่ในสภาวะสมดุลพลังงานและมีภาระไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่กับบัสแรงดันสูงขนาด 40 โอห์ม หลังจากนั้นจะเพิ่มภาระไฟฟ้าขนาด 40 โอห์มที่บัสแรงดันสูง เมื่อวงจร M^2C^3 ที่มีภาระไฟฟ้าอยู่ในสภาวะคงตัวแล้วจะทำเชื่อมวงจร M^2C^3 ชุดที่ 2 ผ่านหม้อแปลงความถี่สูง ที่ซึ่งแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่แต่ละจุดขณะทำการจำลองจะแสดงดังรูปที่ 4.9 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่จุดต่างๆของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้างดรูปที่ 4.10 ซึ่งจะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงเนื่องจากเป็นรูปแบบที่มีการสมดุลพลังงานระหว่างชุดวงจร ที่ซึ่งแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจรที่ 1 ดังรูปที่ 4.11(ก) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของชุดวงจรที่ 1 ดังรูปที่ 4.11(ข) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจรที่ 2 ดังรูปที่ 4.12(ก) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของชุดวงจรที่ 2 ดังรูปที่ 4.12(ข) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าขั้นตอนที่ 1 ดังรูปที่ 4.13(ก) และขั้นตอนที่ 2 ดังรูปที่ 4.13(ข) และแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 4.14 ซึ่งจะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าจะไหลจากบัสแรงดันสูงของชุดวงจรที่ 1 ไปจ่ายให้กับภาระไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่เท่านั้น เนื่องจากรูปแบบนี้เป็นการจำลองขณะที่ชุดวงจรมีการสมดุลพลังงาน ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลภายในวงจร M^2C^3 ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าจะเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจรที่ 1 จึงทำให้ไม่สามารถหาประสิทธิภาพของวงจรได้



รูปที่ 4.9 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสต่างๆของชุดวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้า



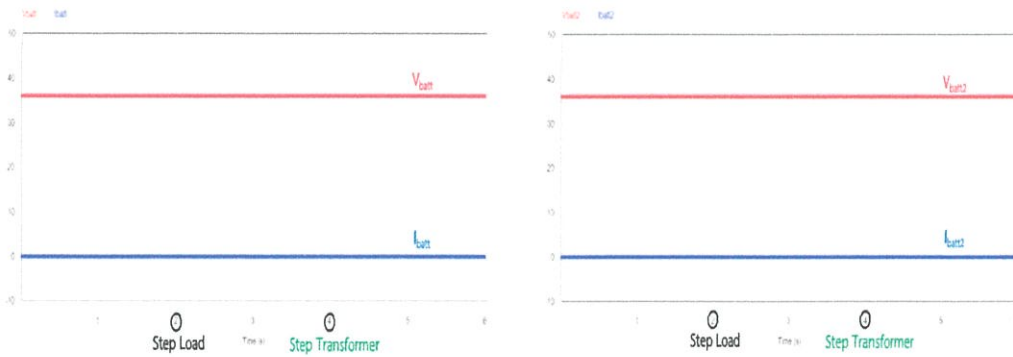
รูปที่ 4.10 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่บัสต่างๆ



(ก) ชุดวงจรที่ 1

(ข) ชุดวงจรที่ 2

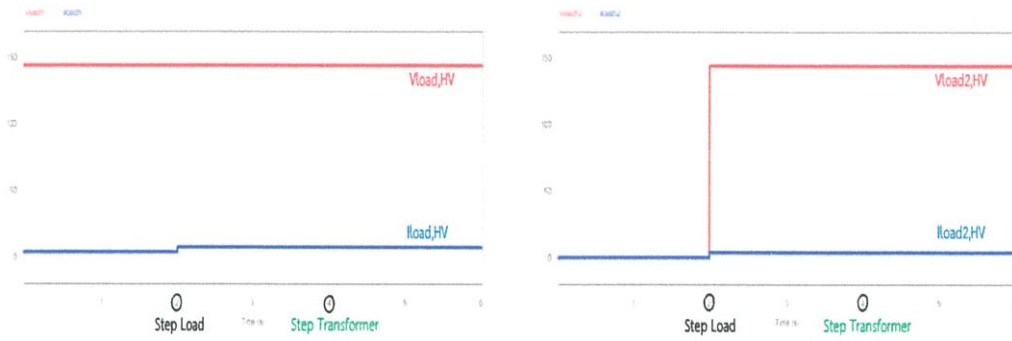
รูปที่ 4.11 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของแต่ละชุดวงจร



(ก) ชุดวงจรที่ 1

(ข) ชุดวงจรที่ 2

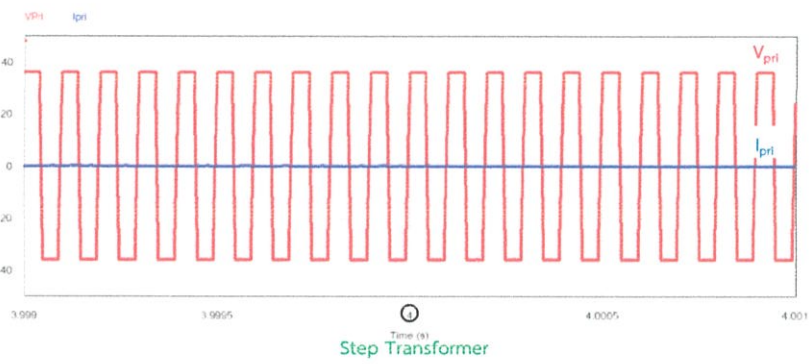
รูปที่ 4.12 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของแต่ละชุดวงจร



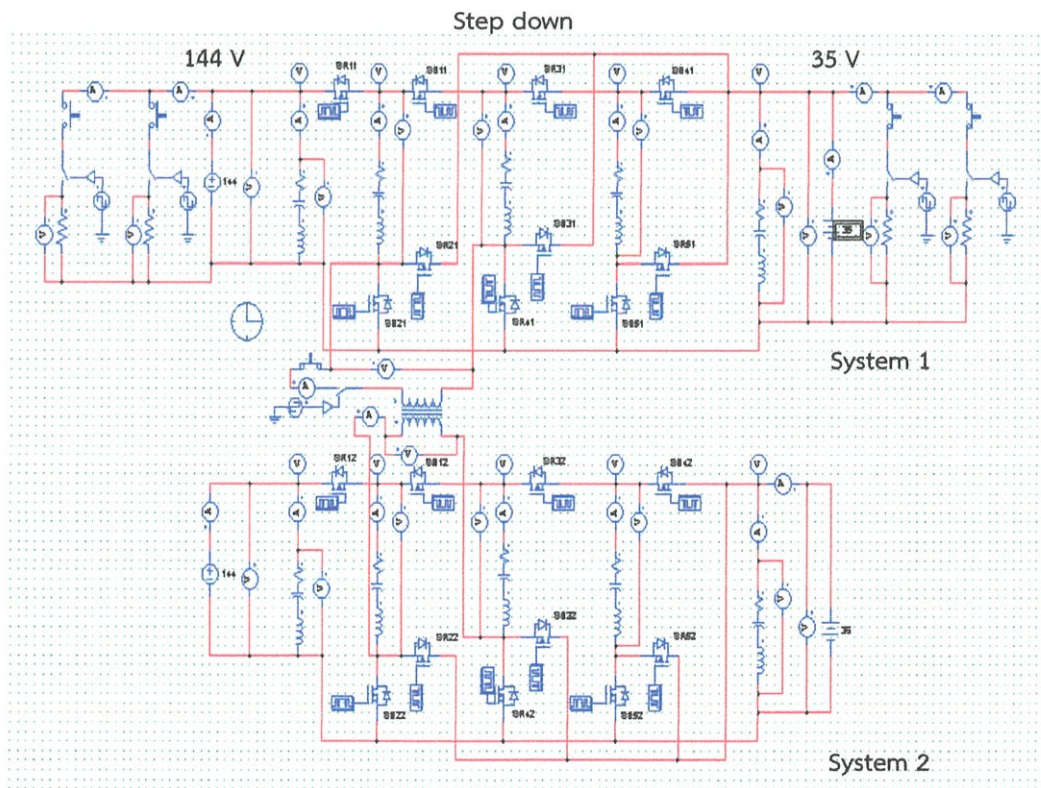
(ก) ขั้นตอนที่ 1

(ข) ขั้นตอนที่ 2

รูปที่ 4.13 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าขั้นตอนต่างๆ



รูปที่ 4.14 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง



รูปที่ 4.15 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าขณะลดระดับแรงดันไฟฟ้า

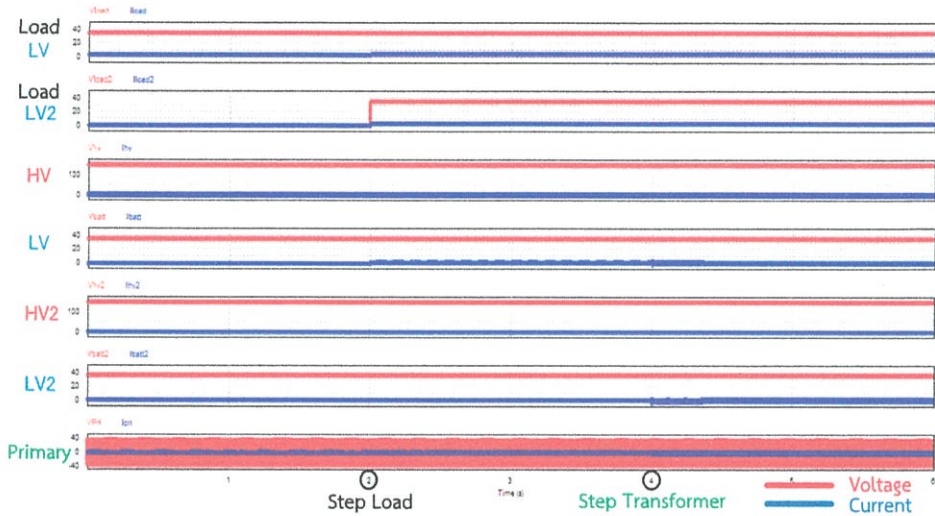
4.5 การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 1

การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 1 ที่ซึ่งจะให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของชุดวงจรที่ 1 ลดลงเหลือ 35 V ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งเป็นการทำงานในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า (Step-down mode) หรือการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำซึ่งจะเรียกรูปแบบนี้ว่าการสะสมประจุให้กับแบตเตอรี่ (Battery Charger) เนื่องจากเกิดการไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าทั้งสองบัสแรงดันหรือกล่าวคืออัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงสูงต่อบัสแรงดันต่ำมีค่าน้อยกว่าอัตราส่วนของการแปลงผันไฟฟ้า ($RVS < CR$) จึงเกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ โดยในการจำลองจะเริ่มจากวงจร M^2C^3 ที่ชุดวงจรที่ 1 อยู่ในรูปแบบลดหรือเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าและเชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าที่บัสใดบัสหนึ่ง หลังจากนั้นจะทำการเพิ่มภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันเข้ามาที่เวลา 2 วินาที และเชื่อมต่อหม้อแปลงความถี่สูงที่เวลา 4 วินาที เพื่อศึกษาถึงการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของแต่ละชุดวงจรจากค่ากำลังไฟฟ้าที่แต่ละบัสแรงดัน

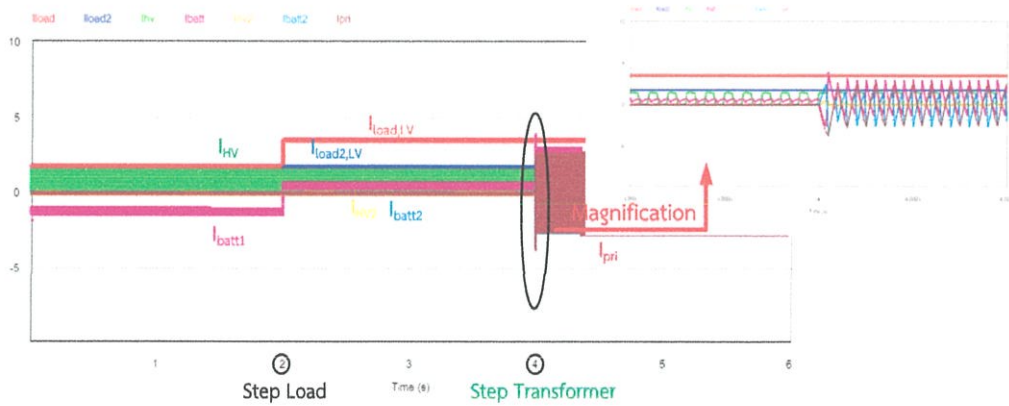
4.5.1 การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 1 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำ

การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 1 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำ ซึ่งเป็นการจำลองวงจร M^2C^3 ในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้าหรือสะสมประจุให้กับแบตเตอรี่ ซึ่งจะมีขั้นตอนในการจำลองคือ ชุด วงจร M^2C^3 ที่ 1 จะทำงานในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้าและมีภาระไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ที่บัสแรงดันต่ำขนาด 20 โอห์ม หลังจากนั้นเมื่อเข้าสู่วินาทีที่ 2 จะทำการเพิ่มภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำขนาด 20 โอห์ม เพื่อศึกษาทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าและเมื่อเข้าสู่วินาทีที่ 4 จะทำการเชื่อมวงจร M^2C^3 2 ชุดผ่านหม้อแปลงความถี่สูง โดยที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 จะทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งสำรองพลังงานไฟฟ้าให้กับชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ซึ่งแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันขณะทำการจำลองขั้นตอนต่างๆดังรูปที่ 4.16 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่จุดต่างๆของวงจร M^2C^3 ดังรูปที่ 4.17 ซึ่งจะเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในแต่ละบัสแรงดันรวมไปถึงที่หม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งแสดงว่ามีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ไปยังชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 เพื่อจ่ายให้กับภาระไฟฟ้า แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจรที่ 1 ดังรูปที่ 4.18(ก) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของชุดวงจรที่ 1 ดังรูปที่ 4.18(ข) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจรที่ 2 ดังรูปที่ 4.19(ก) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของชุดวงจรที่ 2 ดังรูปที่ 4.19(ข) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าขั้นตอนที่ 1 ดังรูปที่ 4.20(ก) และขั้นตอนที่ 2 ดังรูปที่ 4.20(ข) และแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 4.21(ก) ซึ่งจากกระแสไฟฟ้าที่จุดต่างๆจะเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงของขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้า จึงเกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไปยังบัสแรงดันต่ำเพื่อจ่ายให้กับภาระไฟฟ้า

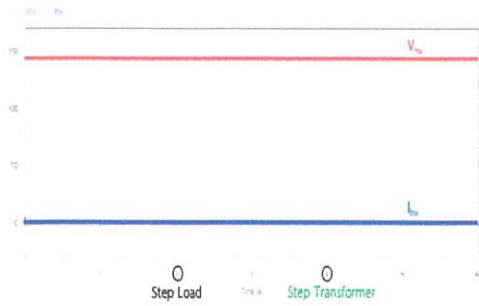
ในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้าสามารถคำนวณประสิทธิภาพ โดยคิดกำลังไฟฟ้าในแต่ละ
บัสแรงดัน ที่ซึ่งขั้นตอนที่ 1 จะได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 97.29% ขั้นตอนที่ 2 ที่มีการเพิ่มภาระไฟฟ้าที่บัส
แรงดันต่ำจะมีประสิทธิภาพเท่ากับ 97.56% และขั้นตอนที่ 3 ที่มีหม้อแปลงความถี่สูงเชื่อมต่อระหว่างวงจร
 M^2C^3 จะมีประสิทธิภาพเท่ากับ 97.05%



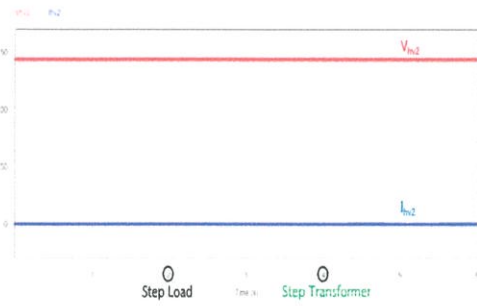
รูปที่ 4.16 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสต่างๆของชุดวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า



รูปที่ 4.17 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่จุดต่างๆ

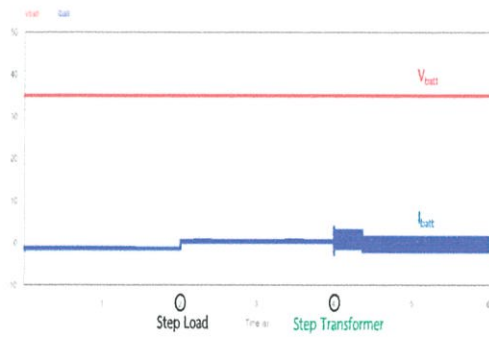


(ก) ชุดวงจรที่ 1

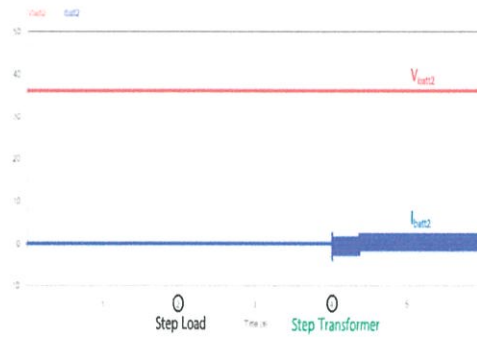


(ข) ชุดวงจรที่ 2

รูปที่ 4.18 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของแต่ละชุดวงจร

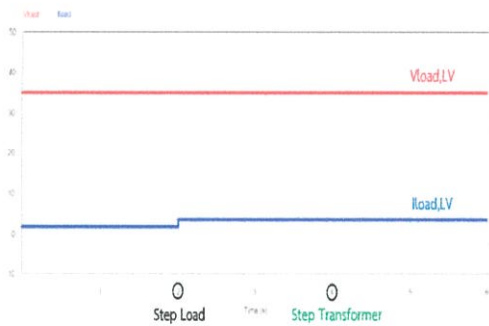


(ก) ชุดวงจรที่ 1

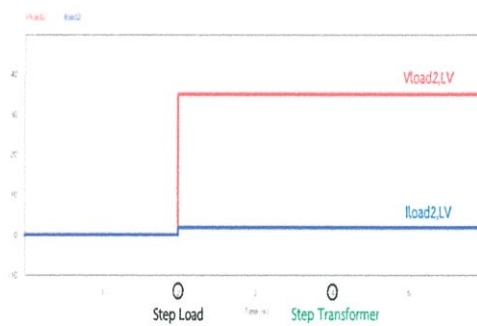


(ข) ชุดวงจรที่ 2

รูปที่ 4.19 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของแต่ละชุดวงจร

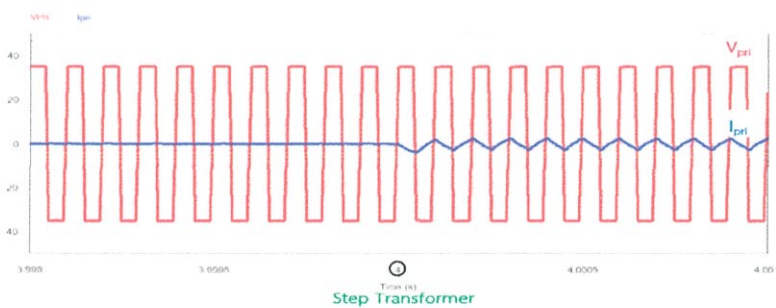


(ก) ชั้นตอนที่ 1



(ข) ชั้นตอนที่ 2

รูปที่ 4.20 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าชั้นตอนต่างๆ

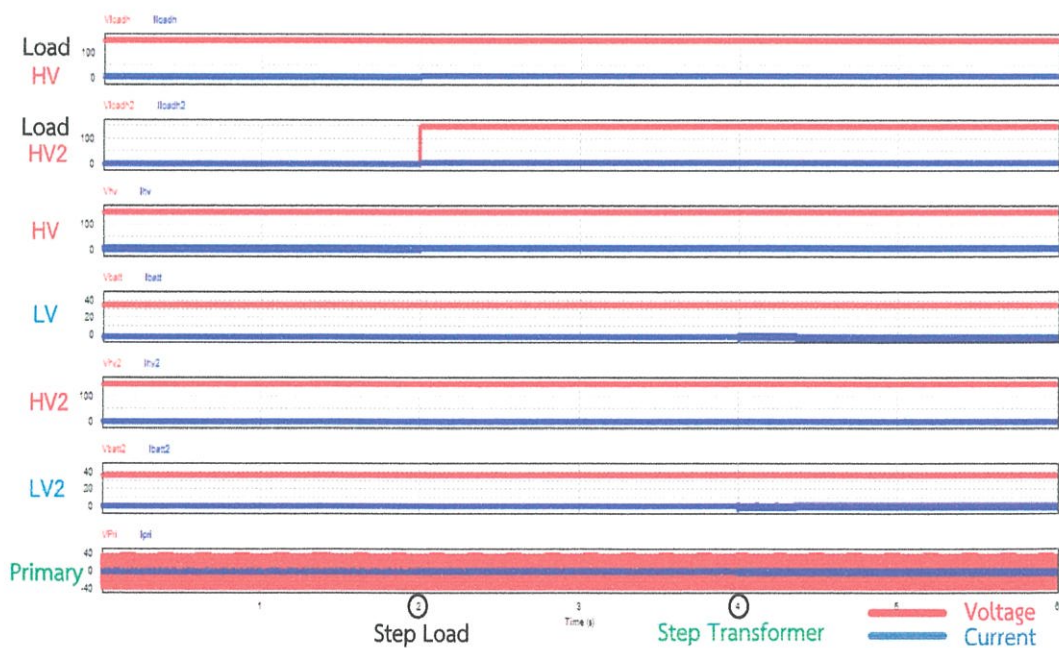


รูปที่ 4.21 แรงดันและกระแสที่หม้อแปลงความถี่สูง

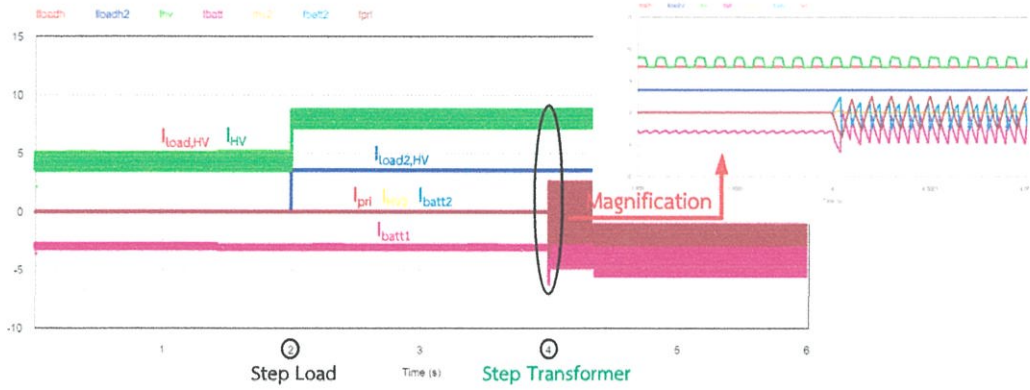
4.5.2 การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 1 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูง

การจำลองวงจร M^2C^3 ในรูปแบบนี้จะเหมือนกับ 4.5.1 แต่ทำการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงขนาด 40 โอห์ม เพื่อศึกษาการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพของการจำลองรูปแบบนี้ โดยที่แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันขณะทำการจำลองขั้นตอนต่างๆดังรูปที่ 4.22 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่จุดต่างๆดังรูปที่ 4.23 ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะถ่ายโอนพลังงานมาที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 โดยที่กระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของชุดวงจรที่ 1 จะมีทิศทางไม่เหมือนกันกับรูปแบบ 4.5.1 ที่กระแสไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลบตลอดเวลานี้เนื่องจากถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไปยังบัสแรงดันสูง แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจรที่ 1 ดังรูปที่ 4.24(ก) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของชุดวงจรที่ 1 ดังรูปที่ 4.24(ข) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจรที่ 2 ดังรูปที่ 4.25(ก) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของชุดวงจรที่ 2 ดังรูปที่ 4.25(ข) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าขั้นตอนที่ 1 ดังรูปที่ 4.26(ก) และขั้นตอนที่ 2 ดังรูปที่ 4.26(ข) และแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 4.27 ซึ่งจะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าที่บัสต่างๆของวงจร M^2C^3 มีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทาง ส่งผลให้มีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าในแต่ละบัสวงจรรวมไปถึงการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงความถี่สูง

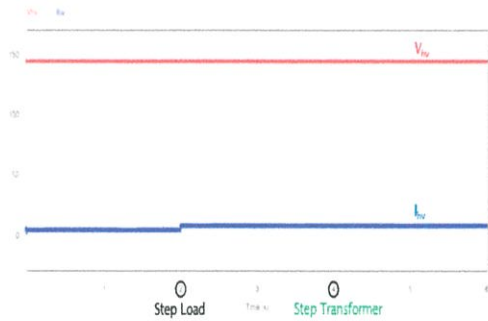
การคำนวณประสิทธิภาพของรูปแบบนี้จะคิดกำลังไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ที่ซึ่งขั้นตอนที่ 1 จะได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 99.54% ขั้นตอนที่ 2 ที่มีการเพิ่มภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำจะมีประสิทธิภาพเท่ากับ 99.73% และขั้นตอนที่ 3 ที่มีหม้อแปลงความถี่สูงเชื่อมต่อระหว่างวงจร M^2C^3 จะมีประสิทธิภาพเท่ากับ 99.65%



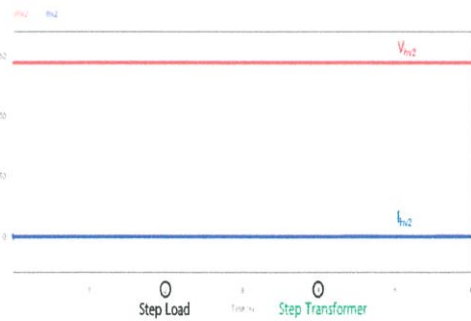
รูปที่ 4.22 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสต่างๆของชุดวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้า



รูปที่ 4.23 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่จุดต่างๆ

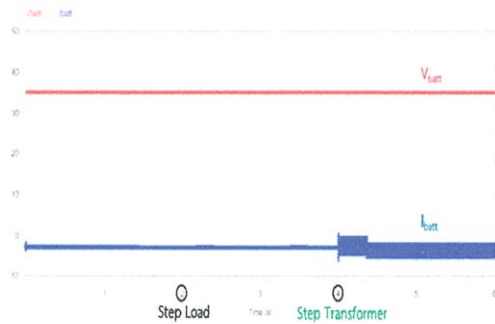


(ก) ชุดวงจรที่ 1

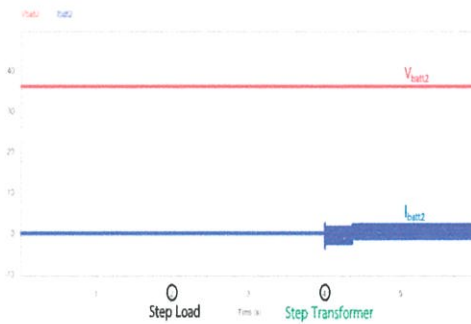


(ข) ชุดวงจรที่ 2

รูปที่ 4.24 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของแต่ละชุดวงจร

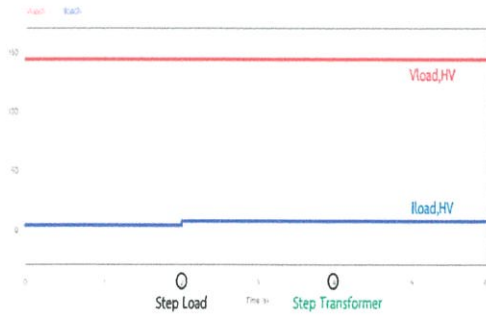


(ก) ชุดวงจรที่ 1

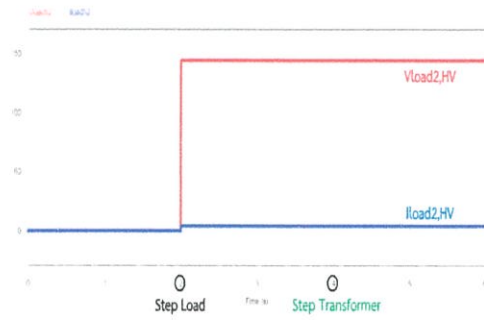


(ข) ชุดวงจรที่ 2

รูปที่ 4.25 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของแต่ละชุดวงจร

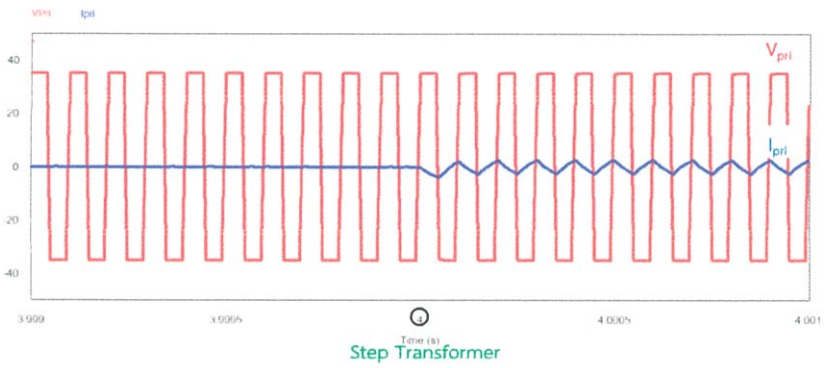


(ก) ขั้นตอนที่ 1

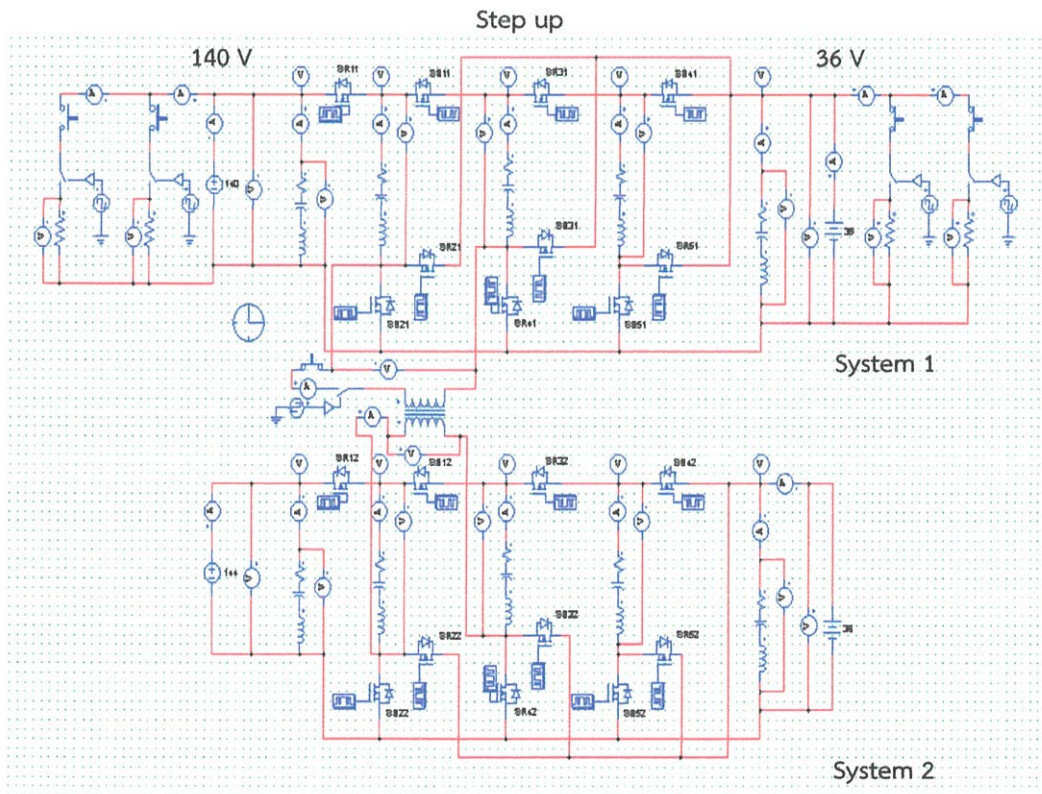


(ข) ขั้นตอนที่ 2

รูปที่ 4.26 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าขั้นตอนต่างๆ



รูปที่ 4.27 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง



รูปที่ 4.28 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าในขณะที่เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า

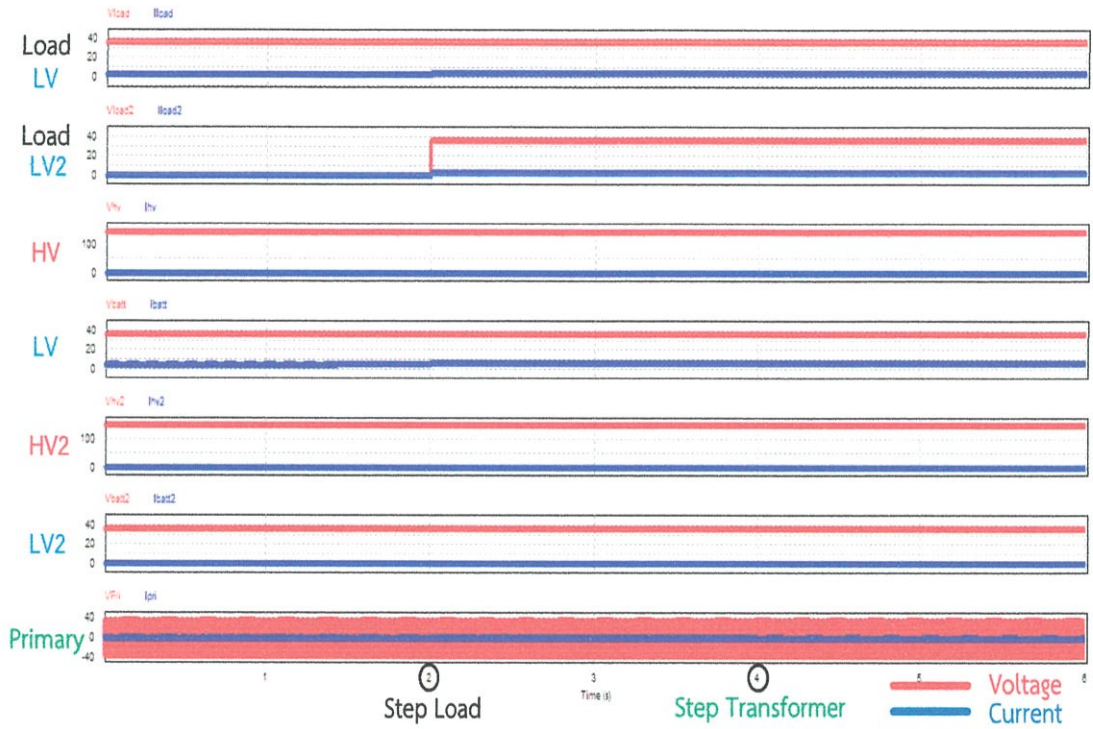
4.6 การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 1

การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 1 ที่ซึ่งจะให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจรที่ 1 ลดลงเหลือ 140 V ดังรูปที่ 4.28 ซึ่งเป็นการทำงานรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า (Step-down mode) หรือการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูงซึ่งจะเรียกรูปแบบนี้ว่าการสำรองพลังงานให้กับระบบผลิตไฟฟ้า (Back-up Energy) เนื่องจากเกิดการไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าทั้งสองบัสแรงดันหรืออัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงต่อบัสแรงดันต่ำมีค่ามากกว่าอัตราส่วนของการแปลงผันไฟฟ้า ($RVS > CR$) จึงเกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปยังบัสแรงดันสูง โดยจำลองในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าและมีภาระไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ หลังจากนั้นจะทำการเพิ่มภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันเข้ามาที่เวลา 2 วินาที และเชื่อมต่อหม้อแปลงความถี่สูงที่เวลา 4 วินาที เพื่อศึกษาถึงการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของแต่ละชุดวงจรจากค่ากำลังไฟฟ้าที่แต่ละบัสแรงดัน

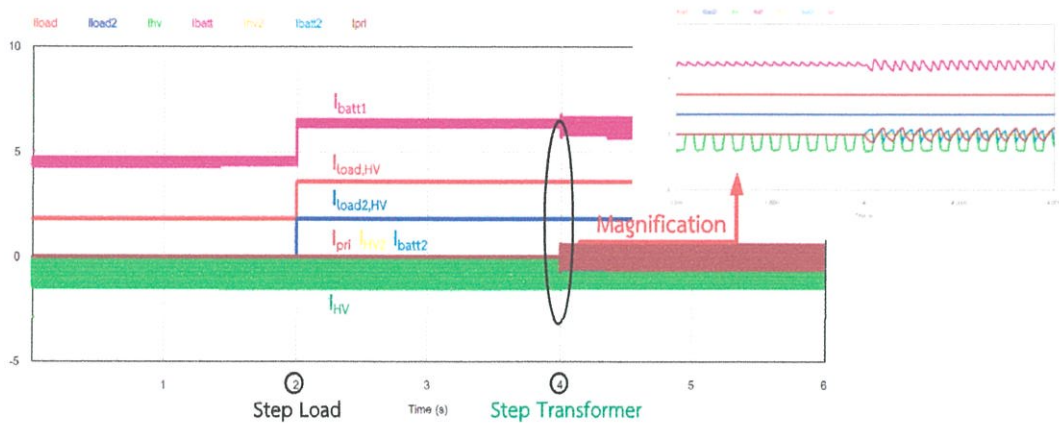
4.6.1 การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 1 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำ

การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 1 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำ ซึ่งเป็นการจำลองวงจร M^2C^3 ในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าหรือแหล่งสำรองพลังงานไฟฟ้า ซึ่งจะมีขั้นตอนในการจำลองคือ ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 จะทำงานในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าและมีภาระไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ที่บัสแรงดันต่ำหลังจากนั้นเมื่อเข้าสู่วินาทีที่ 2 จะทำการเพิ่มภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำเพื่อศึกษาทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าและเมื่อเข้าสู่วินาทีที่ 4 จะทำการเชื่อมวงจร M^2C^3 2 ชุดผ่านหม้อแปลงความถี่สูง โดยที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 จะทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งสำรองพลังงานไฟฟ้าให้กับชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ซึ่งแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันขณะทำการจำลองขั้นตอนต่างๆดังรูปที่ 4.29 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่จุดต่างๆจะแสดงดังรูปที่ 4.30 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่จุดต่างๆเพื่อไปจ่ายให้กับชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทั้งบัสแรงดันสูงและภาระไฟฟ้า แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจรที่ 1 ดังรูปที่ 4.31 (ก) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของชุดวงจรที่ 1 ดังรูปที่ 4.31 (ข) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจรที่ 2 ดังรูปที่ 4.32 (ก) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของชุดวงจรที่ 2 ดังรูปที่ 4.32 (ข) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าขั้นตอนที่ 1 ดังรูปที่ 4.33 (ก) และขั้นตอนที่ 2 ดังรูปที่ 4.33 (ข) และแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 4.34 ซึ่งจะเห็นว่ากระแสที่บัสต่างๆมีขนาดและทิศทางที่เปลี่ยนแปลงไปขณะทำการสวิตซ์ภาระไฟฟ้าและหม้อแปลงความถี่สูง ส่งผลให้มีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงความถี่สูงจากชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ไปจ่ายให้กับชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1

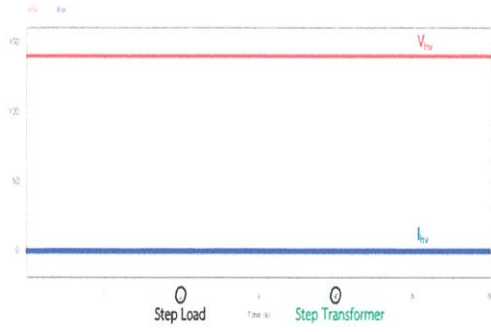
ในการคำนวณประสิทธิภาพของรูปแบบนี้จะคิดจากกำลังไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่างๆ ที่ซึ่งขั้นตอนที่ 1 จะได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 98.45% ขั้นตอนที่ 2 ที่มีการเพิ่มภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำจะมีประสิทธิภาพเท่ากับ 98.86% และขั้นตอนที่ 3 ที่มีหม้อแปลงความถี่สูงเชื่อมต่อระหว่างวงจร M^2C^3 จะมีประสิทธิภาพเท่ากับ 98.88%



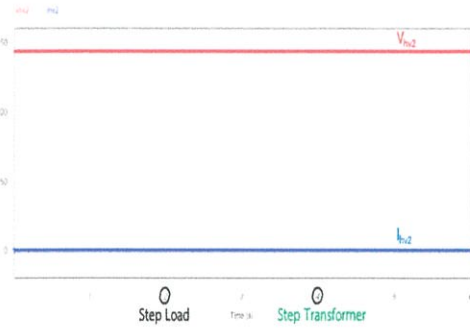
รูปที่ 4.29 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสต่างๆของชุดวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า



รูปที่ 4.30 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่จุดต่างๆ

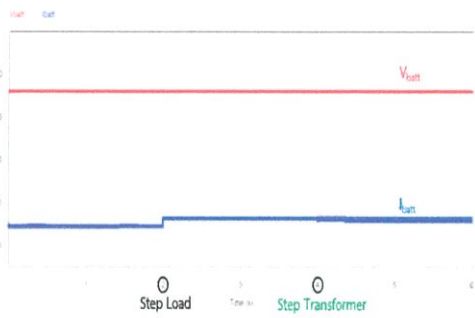


(ก) ชุดวงจรที่ 1

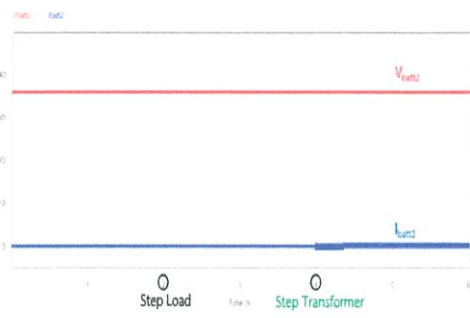


(ข) ชุดวงจรที่ 2

รูปที่ 4.31 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของแต่ละชุดวงจร

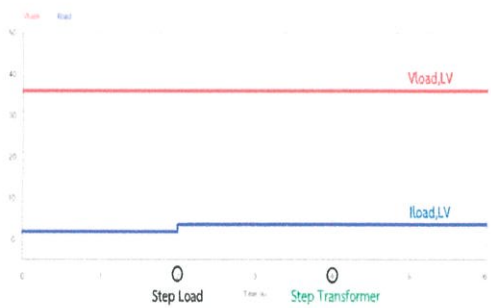


(ก) ชุดวงจรที่ 1

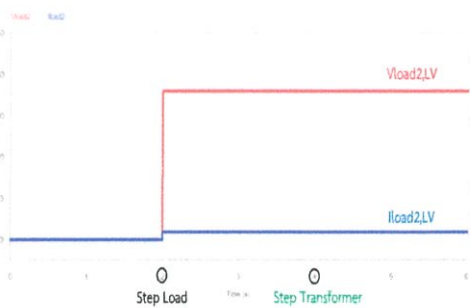


(ข) ชุดวงจรที่ 2

รูปที่ 4.32 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของแต่ละชุดวงจร

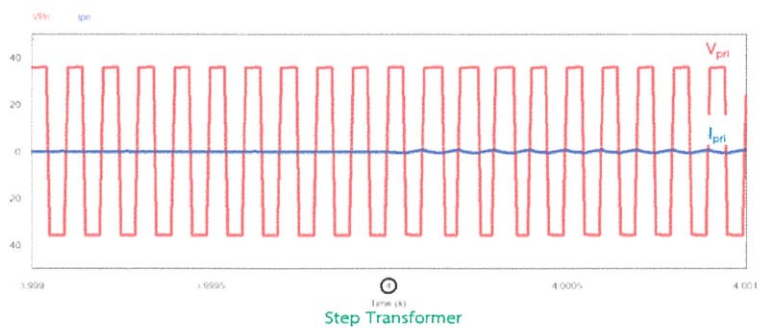


(ก) ชั้นตอนที่ 1



(ข) ชั้นตอนที่ 2

รูปที่ 4.33 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าชั้นตอนต่างๆ

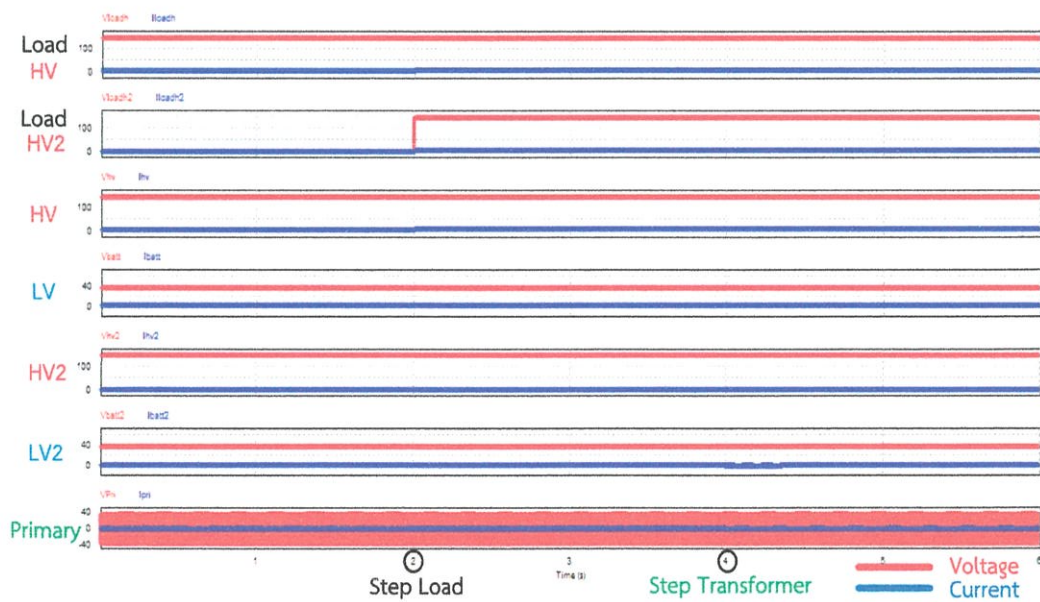


รูปที่ 4.34 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง

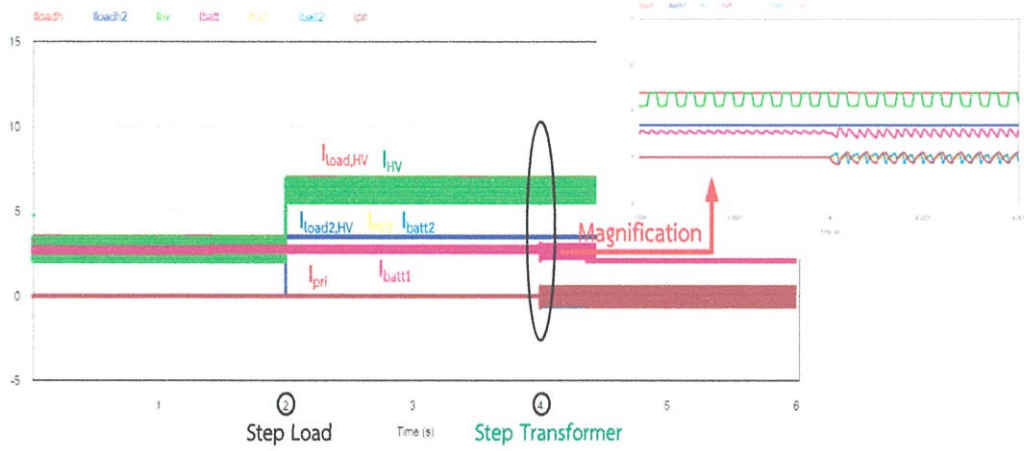
4.6.2 การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 1 ที่มีการเชื่อมต่องาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูง

การจำลองวงจร M^2C^3 ในรูปแบบนี้จะเหมือนกับ 4.6.1 แต่ทำการเชื่อมภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูง เพื่อศึกษาการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพของการจำลองรูปแบบนี้ โดยที่แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันขณะทำการจำลองขั้นตอนต่างๆดังรูปที่ 4.35 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่จุดต่างๆดังรูปที่ 4.36 ซึ่งจะเห็นการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าแต่ละบัสแรงดันไฟฟ้า เพื่อถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าขณะทำงานในขั้นตอนต่างๆ แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจรที่ 1 ดังรูปที่ 4.37(ก) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของชุดวงจรที่ 1 ดังรูปที่ 4.37(ข) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจรที่ 2 ดังรูปที่ 4.38(ก) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของชุดวงจรที่ 2 ดังรูปที่ 4.38(ข) แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าขั้นตอนที่ 1 ดังรูปที่ 4.39(ก) และขั้นตอนที่ 2 ดังรูปที่ 4.39(ข) และแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 4.40 จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าแต่ละบัสจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามขั้นตอนต่างๆ ในรูปแบบนี้กระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 จะเป็นภาระไฟฟ้าขณะที่ยังไม่มีการเชื่อมต่องาระไฟฟ้าแต่เมื่อทำการเชื่อมต่องาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงทำให้เกิดการเปลี่ยนทิศทางของกระแสของวงจร M^2C^3 ที่ 1 ขึ้นและเมื่อเชื่อมต่อหม้อแปลงความถี่สูงจะทำให้มีพลังงานไฟฟ้าถ่ายโอนมาจ่ายให้กับชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1

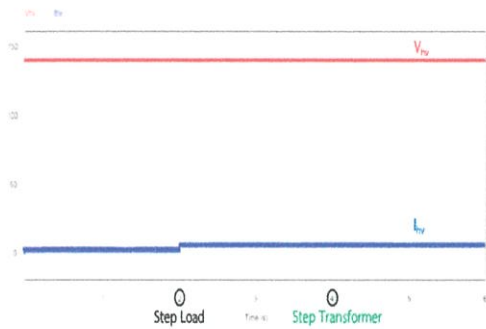
การคำนวณประสิทธิภาพของรูปแบบนี้จะคิดจากกำลังไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่างๆ ที่ซึ่งขั้นตอนที่ 1 จะได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 99.63% ขั้นตอนที่ 2 ที่มีการเพิ่มภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำจะมีประสิทธิภาพเท่ากับ 99.72% และขั้นตอนที่ 3 ที่มีหม้อแปลงความถี่สูงเชื่อมต่อระหว่างวงจร M^2C^3 จะมีประสิทธิภาพเท่ากับ 99.73%



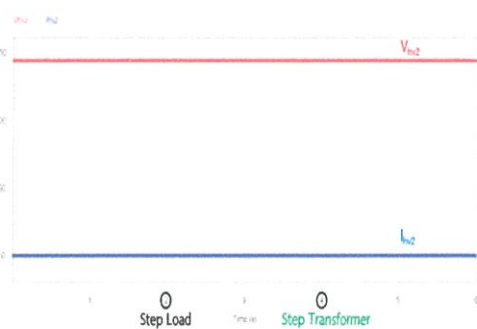
รูปที่ 4.35 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสต่างๆของชุดวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้า



รูปที่ 4.36 ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่จุดต่างๆ

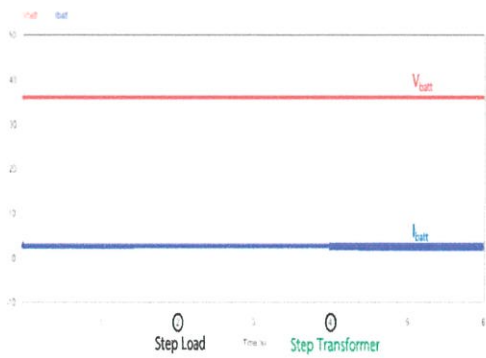


(ก) ชุดวงจรที่ 1

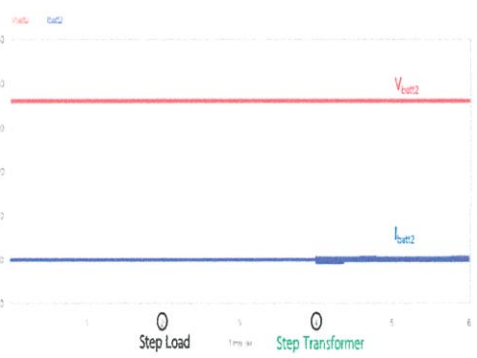


(ข) ชุดวงจรที่ 2

รูปที่ 4.37 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของแต่ละชุดวงจร

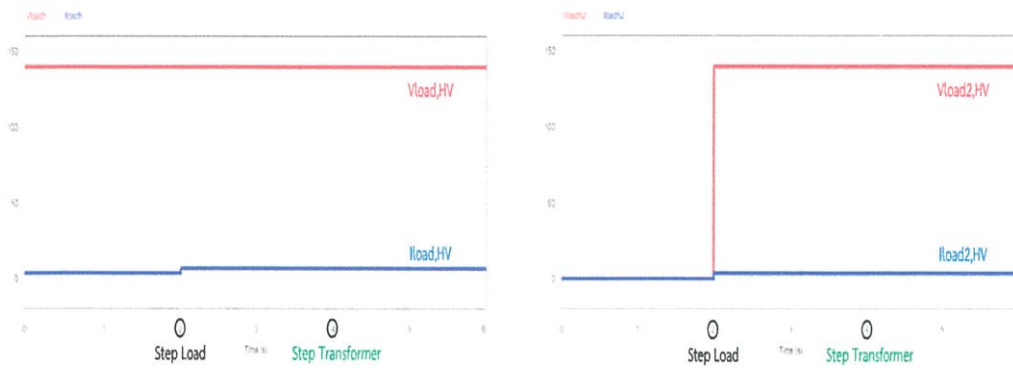


(ก) ชุดวงจรที่ 1



(ข) ชุดวงจรที่ 2

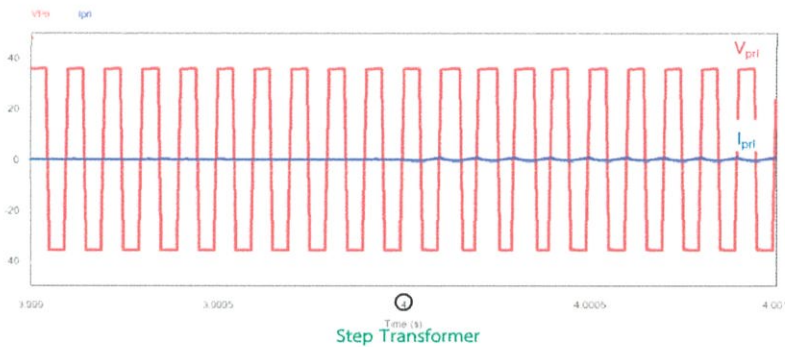
รูปที่ 4.38 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของแต่ละชุดวงจร



(ก) ขั้นตอนที่ 1

(ข) ขั้นตอนที่ 2

รูปที่ 4.39 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าขั้นตอนต่างๆ

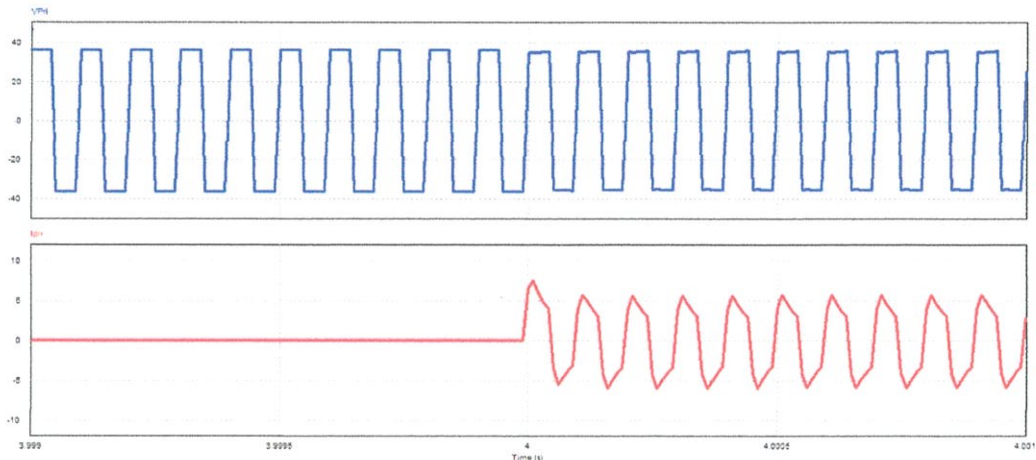


รูปที่ 4.40 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง

4.7 การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดเมนไฟฟ้าในขณะที่มัมสัญญาณความถี่ของหม้อแปลงไม่ตรงกัน

การจำลองการทำงานของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดเมนไฟฟ้าในขณะที่มัมสัญญาณความถี่ของหม้อแปลงไม่ตรงกัน (Phase-Shift Transformer) ที่ซึ่งเป็นการจำลองที่มัมเฟสสัญญาณความถี่ทั้งสองฝั่งของหม้อแปลงไม่ตรงกันจะส่งผลให้เกิดทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าระหว่าง 2 ชุดวงจรที่เชื่อมต่ออยู่กับหม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งสามารถทำการควบคุมการถ่ายโอนพลังงานผ่านหม้อแปลงความถี่สูงจากการทำการปรับมัมเฟส โดยมัมเฟสและความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงจะขึ้นอยู่กับสัญญาณควบคุม ส่งผลให้การจำลองนั้นจะทำการใส่มัมสัญญาณของแต่ละชุดวงจรให้มีความแตกต่างกันประมาณ 2 องศาซึ่งจะทำให้มีการถ่ายโอนผ่านหม้อแปลงไฟฟ้างรูปที่ 4.41 ขณะที่มัมสัญญาณของหม้อแปลงไฟฟ้าชุด 1 นำหน้าชุดที่ 2 ซึ่งจะเห็นว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสขึ้น และเมื่อให้มัมสัญญาณของชุดที่ 2 นำหน้าชุดที่ 1 ก็จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้ามมีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าเหมือนกับรูป 4.41

จากการจำลองจึงส่งผลให้สามารถควบคุมการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าระหว่าง 2 ชุดวงจรผ่านหม้อแปลงความถี่สูงได้โดยการควบคุมมุมสัญญาณความถี่ของสวิตช์กำลัง โดยที่แรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัสคังที่ตลอดเวลาหรือในแต่ละชุดวงจรมีการทำงานในรูปแบบปกติตลอดเวลา



รูปที่ 4.41 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง

4.8 สรุป

บทนี้เป็นการจำลองการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าที่ซึ่งจะทำการจำลองโดยการให้ชุดวงจร M^2C^3 ชุดที่ 1 ถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าภายในชุดวงจรจนเข้าสู่สภาวะปกติจึงเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำและสุดท้ายจะเชื่อมต่อชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ผ่านหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อให้เป็นแหล่งสำรองพลังงานไฟฟ้าให้กับอีกชุดวงจรหนึ่ง ซึ่งการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของวงจร M^2C^3 จะใช้หลักการสมดุลพลังงานในแต่ละบัสแรงดันไฟฟ้า รวมไปถึงหลักการของการสะสมและคายประจุของตัวเก็บประจุในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลทำให้วงจร M^2C^3 มีการทำงานเสมือนเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถเลือกระดับแรงดันไฟฟ้า โดยที่กำลังไฟฟ้าทั้งสองฝั่งจะต้องมีค่าเท่ากัน

ในการจำลองด้วยโปรแกรม PSIM 9.0 นั้นจะมีข้อจำกัดอยู่อย่างหนึ่งคือแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะเป็นอินฟินิตี้บัส (Infinite Bus) ที่มีแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาคงที่ ทำให้ในการจำลองการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของวงจร M^2C^3 นี้จะต้องศึกษาที่ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันไฟฟ้าต่างๆ และจากผลการจำลองจะเห็นว่าเมื่อวงจร M^2C^3 มีการสมดุลพลังงานแล้วจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลภายในวงจร และเมื่อวงจร M^2C^3 ทำงานในรูปแบบลดหรือเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าจึงเกิดกระแสไฟฟ้าไหลภายในวงจรขึ้นซึ่งเมื่อทำการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำจะส่งผลให้ขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่บัสต่างๆมีค่าเปลี่ยนแปลง อีกทั้งเมื่อเชื่อมต่อกับหม้อแปลงความถี่สูงจะเกิดการถ่ายโอนพลังงานมาจากอีกชุดวงจรหนึ่งด้วย ซึ่งเป็นการลดกำลังไฟฟ้าของชุดวงจรที่ 1 ในการจ่ายให้กับภาระไฟฟ้าส่งผลให้ในขณะที่มีการเชื่อมต่อหม้อแปลงความถี่สูงเข้ามาในระบบจะช่วยลดการทำงานของบัสแรงดันไฟฟ้า

ที่ชุดวงจรที่ 1 อีกทั้งยังสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าขณะที่ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลของชุดวงจรที่ 1 เกิดความผิดปกติขึ้น (Fault) ซึ่งชุดวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าจะทำงานเป็นแหล่งพลังงานสำรองซึ่งกันและกันจึงช่วยให้ระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กมีความเสถียรภาพมากขึ้น โดยที่ประสิทธิภาพของวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าในแต่ละลักษณะการทำงานนั้นจะมีค่าดังตารางที่ 4.2 ที่จะเห็นว่าประสิทธิภาพของวงจรในการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงจะมีค่าสูงกว่าการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำเนื่องจากที่บัสแรงดันสูงจะมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับภาระไฟฟ้าน้อยกว่าภาระไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่กับบัสแรงดันต่ำ ประสิทธิภาพของหม้อแปลงความถี่สูงขณะวงจรทำงานขณะลดระดับแรงดันไฟฟ้าจะเท่ากับ 97.74% และขณะเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า 99.22%

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพของวงจร M^2C^3 ในรูปแบบการทำงานที่แตกต่างกัน

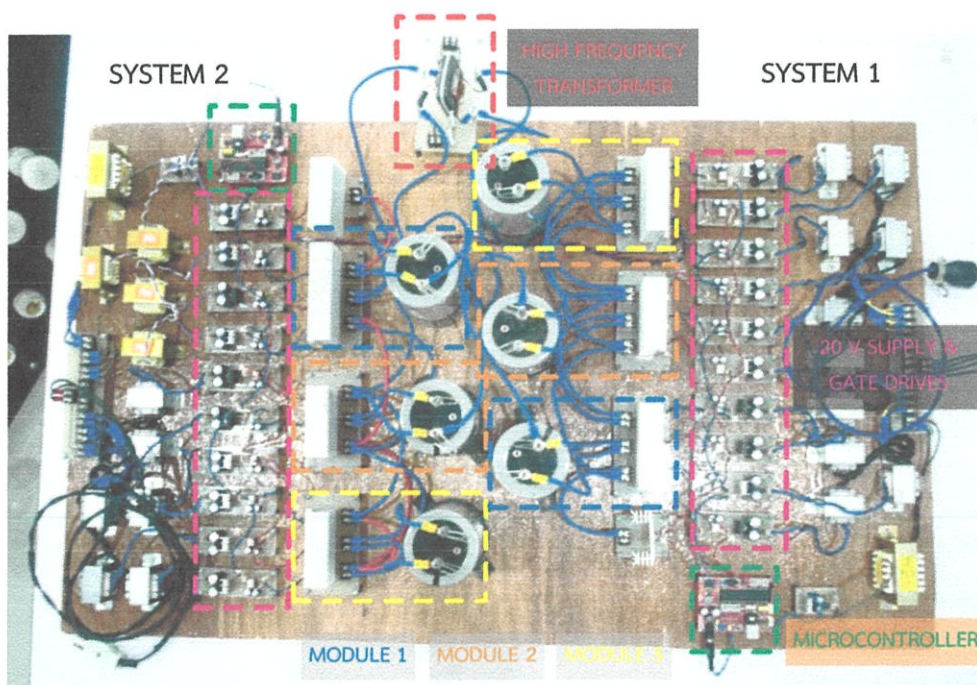
รูปแบบการจำลอง	ตำแหน่งของภาระไฟฟ้า	ประสิทธิภาพของวงจร (%)	ประสิทธิภาพขณะเพิ่มภาระไฟฟ้า (%)	ประสิทธิภาพขณะเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าและหม้อแปลงความถี่สูง (%)
ลดระดับแรงดันไฟฟ้า	Load LV	97.29	97.56	97.05
	Load HV	99.54	99.73	99.65
เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า	Load LV	98.45	98.86	98.88
	Load HV	99.63	99.72	99.73

บทที่ 5

การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแบบสองทิศทางที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก พิกัดของเครื่องต้นแบบมีขนาด 500 W โดยมีโครงสร้างวงจร M^2C^3 ที่มีการเชื่อมต่อผ่านหม้อแปลงความถี่สูงตามบทที่ 3 ซึ่งเครื่องต้นแบบจะแสดงดังรูปที่ 5.1 จะประกอบไปด้วยวงจรควบคุมและกำลังดังนี้ ชุดวงจรควบคุมจะประกอบไปด้วยวงจรขับสัญญาณ (Gate Drive) ที่ใช้เป็นชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ชุดกำลังไฟฟ้าที่มีตัวเก็บประจุและสวิตช์กำลัง (MOSFET) และหม้อแปลงความถี่สูง (High Frequency Transformer)



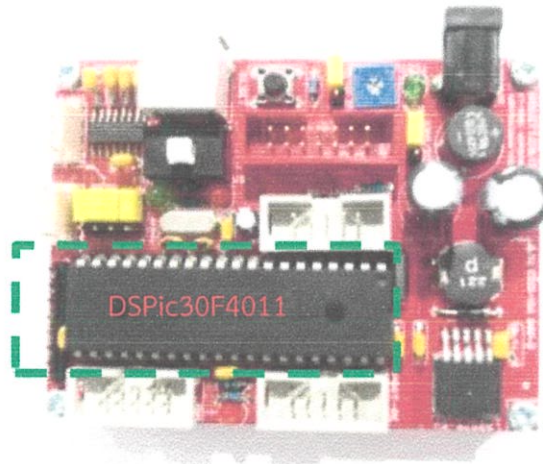
รูปที่ 5.1 เครื่องต้นแบบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า

5.2 การออกแบบชุดวงจรควบคุม

การออกแบบชุดวงจรควบคุม ซึ่งเป็นชุดวงจรที่สำคัญในวงจร M^2C^3 เนื่องจากเป็นชุดสร้างสัญญาณเพื่อควบคุมการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า โดยชุดควบคุมและประมวลผลนั้นจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์สร้างสัญญาณ และมีชุดขับสัญญาณทำหน้าที่ขยายสัญญาณเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าเพียงพอต่อการนำกระแสของสวิตช์กำลัง ซึ่งชุดวงจรควบคุมนั้นจะประกอบไปด้วยชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ และชุดวงจรขับสัญญาณ

5.2.1 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

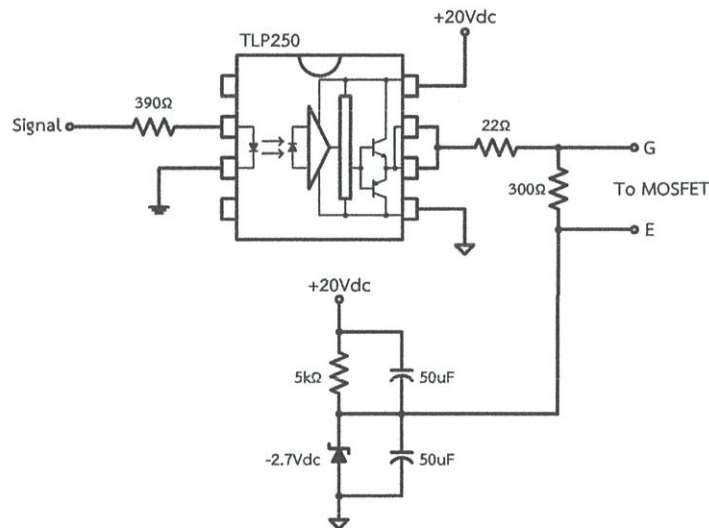
วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ทำหน้าที่หลักในการสร้างสัญญาณควบคุมการสวิตช์ของสวิตช์กำลัง ที่ซึ่งการสร้างสัญญาณควบคุมจะใช้ CPU (Control Processor Unit) ในการสร้างสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีแรงดันไฟฟ้า 5V ความถี่ของสัญญาณเท่ากับ 10kHz 2 สัญญาณ ซึ่งมี duty cycle (Duty cycle) 50% มุมเฟสต่างกัน 180 องศา และมีค่าเดดไทม์ (Dead time) 5 μ s สัญญาณที่ได้นั้นจะนำไปผ่านชุดวงจรขับสัญญาณก่อนที่จะจ่ายไปให้กับสวิตช์กำลังเพื่อไปควบคุมวงจร M^2C^3 ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 เป็นตัวประมวลผล วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ของอุปกรณ์ต้นแบบนั้นจะใช้ของ ET-BASE dsPIC30F แสดงในรูปที่ 5.2



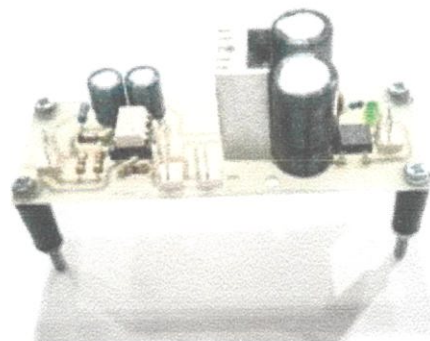
รูปที่ 5.2 อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์

5.2.2 วงจรขับสัญญาณ

วงจรขับสัญญาณ (Gate Drive) มีหน้าที่หลักคือการขยายสัญญาณควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าของสัญญาณมีขนาดเพียงพอต่อการควบคุมการสวิตช์ให้สามารถนำกระแสและหยุดนำกระแสได้ โดยตัวขับสัญญาณที่ใช้จะเป็น TLP250 ที่โครงสร้างภายในจะสามารถแยกกราวด์ระหว่างอุปกรณ์ ซึ่งป้องกันความเสียหายจากวงจรถูกกัดได้ โดยที่วงจรขับสัญญาณนี้จะรับแรงดันไฟฟ้า 20V และสัญญาณควบคุมที่สร้างขึ้นจากชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งจะมีขนาดแรงดันที่ 5V ส่งผลให้เมื่อนำมาผ่านชุดวงจรขับสัญญาณจึงได้สัญญาณควบคุมที่มีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ +15 V และ -3 V ซึ่งสัญญาณขาลบจะช่วยให้หยุดนำกระแสได้รวดเร็วและนานพอที่จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุคายประจุออกให้หมดซึ่งโครงสร้างของชุดวงจรขับสัญญาณจะแสดงดังรูปที่ 5.3 และอุปกรณ์ต้นแบบจะแสดงในรูปที่ 5.4



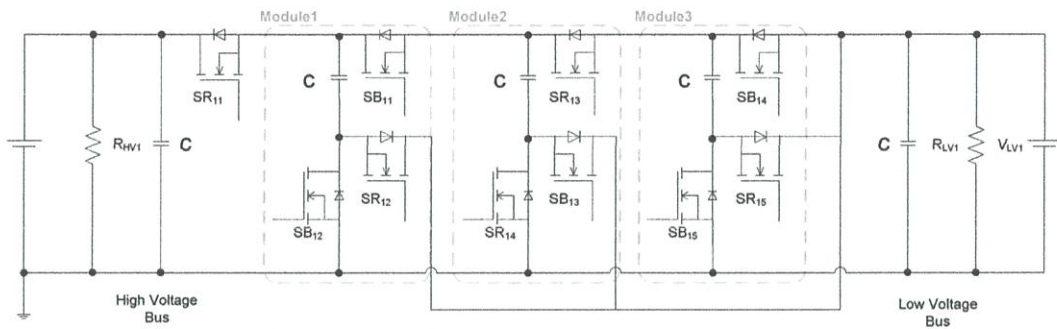
รูปที่ 5.3 โครงสร้างวงจรขับสัญญาณ



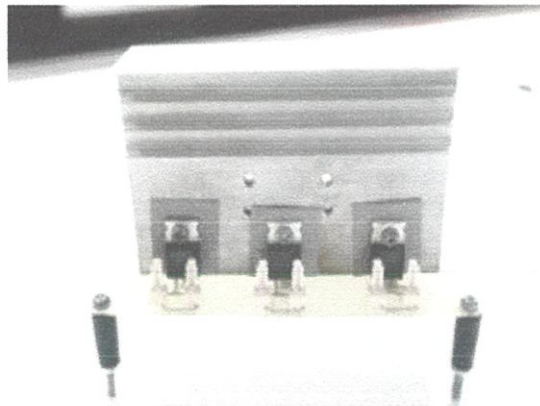
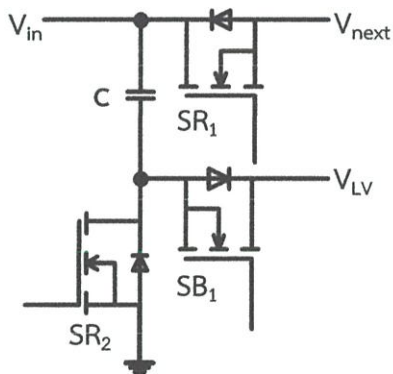
รูปที่ 5.4 อุปกรณ์ไฟเลี้ยงและขับสัญญาณ

5.3 การออกแบบชุดวงจรกำลัง

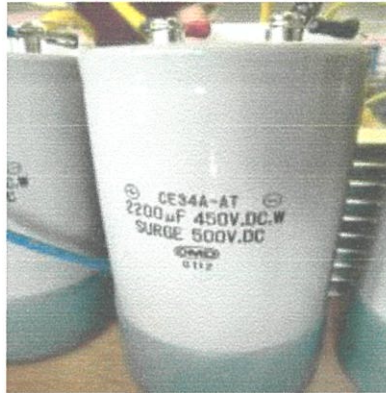
ในการออกแบบชุดวงจรกำลังนั้นจะขออธิบายเฉพาะชุดคอนเวอร์เตอร์ 1 โมดูลเท่านั้นดังรูปที่ 5.5 เนื่องจากว่าแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลจะมีโครงสร้างเหมือนกันทุกอย่าง ซึ่งใน 1 ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลจะประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุ 1 ตัวและสวิตช์กำลัง 3 ตัว โดยในที่นี้จะใช้สวิตช์กำลังเป็นมอสเฟต (Mofet) ทั้งหมดในชุดวงจร M^2C^3 เพื่อทำการสวิตช์ให้เกิดการสะสมและคายประจุของตัวเก็บประจุ ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าขึ้น โดยชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล 1 ดังรูปที่ 5.6 ที่ประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุขนาด $2200\mu F$ และสวิตช์กำลังรหัส FQP630 ดังรูปที่ 5.7(ก) และ(ข) ตามลำดับ



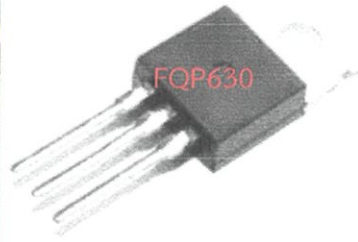
รูปที่ 5.5 วงจร M^2C^3 ที่มีชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล 3 ชุด



รูปที่ 5.6 วงจรชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล



(ก) ตัวเก็บประจุ



(ข) มอสเฟตกำลัง

รูปที่ 5.7 อุปกรณ์ในชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล



รูปที่ 5.8 หม้อแปลงความถี่สูง

5.4 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง

การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่เป็นส่วนสำคัญของวิทยานิพนธ์นี้จะมีทฤษฎีอยู่ในบทที่ 3 โดยหม้อแปลงความถี่สูงนั้นจะต้องรับแรงดันไฟฟ้าให้ได้อย่างน้อยเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำ และมีความถี่เท่ากับความถี่สวิตช์ ซึ่งมีความถี่ที่สูงมาก ส่งผลให้หม้อแปลงนั้นมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ซึ่งจากที่ใช้งานที่ความถี่สูงนั้นจึงนำแกนเฟอร์ไรท์มาใช้เป็นแกนแม่เหล็กของหม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งแกนเฟอร์ไรท์นั้นมีคุณสมบัติคือ

- สามารถใช้งานได้ที่ความถี่สูง
- มีความเข้มของสนามแม่เหล็กสูง
- การสูญเสียที่แกนเหล็กและความร้อนที่เกิดจากกระแสไหลวนนั้นต่ำ

ซึ่งจะเลือกใช้แกน EC เป็นแกนของหม้อแปลงที่ซึ่งจะทำงานที่ความถี่ 10 kHz และวิธีการคำนวณเพื่อหาขนาดของแกนและขดลวดของหม้อความถี่สูงนั้นจะแสดงดังต่อไปนี้

$$A_p = \frac{P_{OUT}}{2 \cdot k \cdot B_{MAX} \cdot f_s \cdot J} \quad (5.1)$$

$$P_{OUT} = 2 \cdot k \cdot A_p \cdot B_{MAX} \cdot f_s \cdot J \quad (5.2)$$

เมื่อ $A_p = A_s \cdot A_w$ จะได้

$$P_{OUT} = 2 \cdot k \cdot A_s \cdot A_w \cdot B_{MAX} \cdot f_s \cdot J \quad (5.3)$$

กำหนดให้ A_s ประมาณ $22 A_w$

$$A_w = 0.85 \times 1.5 = 127.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

ดังนั้น A_s ประมาณ $280.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ดังนั้นเราจึงใช้

$$A_w = 127.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$A_s = 280.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

นำค่า A_s และ A_w ที่ได้มาแทนในสมการที่ (5.3)

$$P_{OUT} = 2 \times 3.57 \times 10^{-8} \times 0.6 \times 10 \times 10^3 \times 3 \times 10^6 = 1287 \text{ watt}$$

ถ้าใช้ $V_{MAX} = 220V$

$$I_{MAX} = 5.85A$$

$$N_1 = N_2 = \frac{V}{4 \cdot B_{MAX} \cdot A_s \cdot f_s} \quad (5.4)$$

$$= \frac{220}{4 \times 0.6 \times 280 \times 10^{-6} \times 10^4}$$

$$= 32.679 \text{ รอบ}$$

หาขนาดลวดได้จาก

$$\frac{I}{J} = \frac{5.85}{3 \times 10^6}$$

$$= 1.95 \text{ mm}$$

รัศมีขนาด 1.95 mm ดังนั้นต้องใช้ขนาดลวดขนาด SWG 18

5.5 สรุป

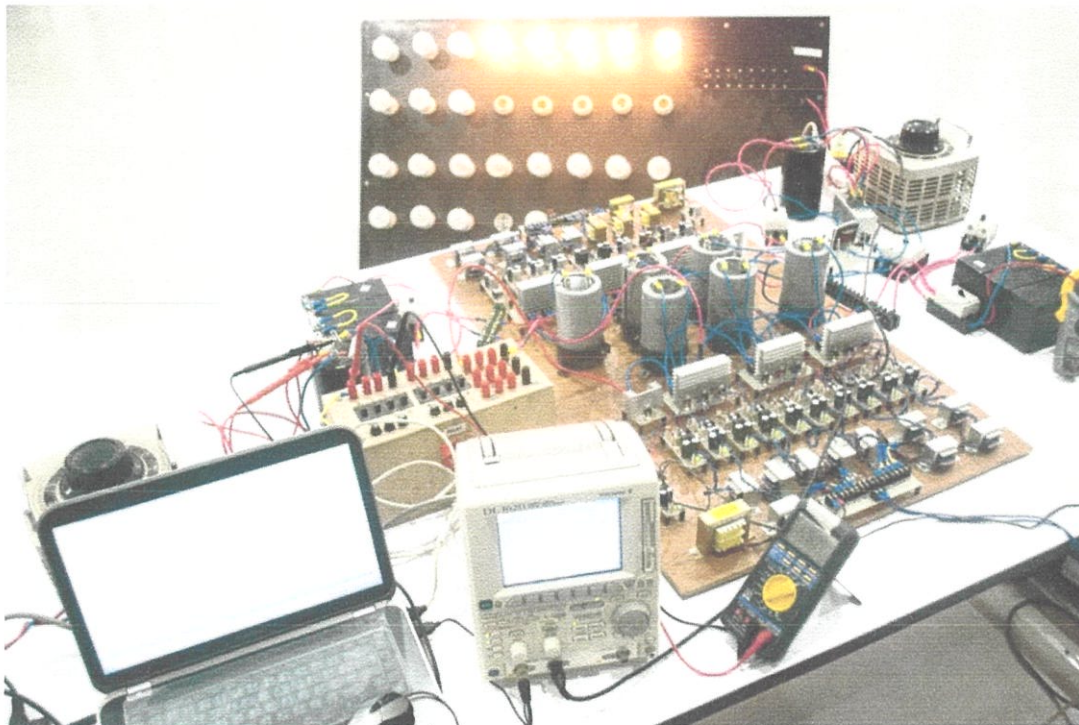
ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบของเครื่องต้นแบบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าที่ซึ่งมีอุปกรณ์ของวงจร M^2C^3 ที่สำคัญ อาทิเช่น วงจรควบคุมที่ประกอบไปด้วยวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ และ วงจรขับสัญญาณสวิตซ์ที่ซึ่งเป็นชุดที่สร้างสัญญาณสี่เหลี่ยม 2 สัญญาณที่มีมุมเฟสต่างกัน 180 องศา เพื่อนำไปขับสวิตซ์กำลังในชุดวงจรกำลัง โดยที่ชุดวงจรกำลังนั้นจะมีลักษณะเด่นคือเป็นชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลมาเชื่อมต่อกันหลายๆชุด และมีการอธิบายถึงการออกแบบและการคำนวณหาขนาดและขนาดลวดของหม้อแปลงความถี่สูง เพื่อนำหม้อแปลงความถี่สูงมาเชื่อมต่อระหว่าง 2 ชุดวงจร M^2C^3 ส่งผลให้เกิดการแยกกราวด์ระหว่าง 2 ชุดวงจรและยังเป็นการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าระหว่างกันอีกด้วย

บทที่ 6

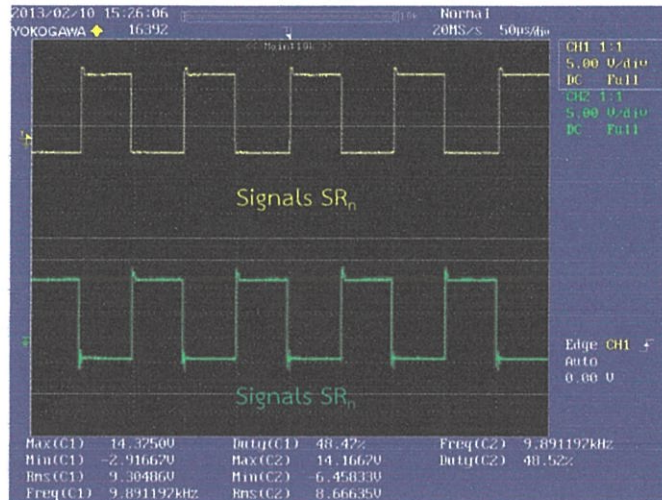
การทดสอบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแบบ สองทิศทางที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า

6.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น เพื่อศึกษาการถ่ายโอนพลังงานระหว่างบัสแรงดันทั้งสองบัสและการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงความถี่สูง วงจร M^2C^3 จะรับสัญญาณสี่เหลี่ยม 2 สัญญาณที่มีมุมเฟสตรงข้ามกัน ซึ่งการทดสอบเครื่องต้นแบบจะเริ่มจากการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 เพียงชุดเดียว เมื่ออยู่สถานะคงที่ จะทำการเพิ่มภาระไฟฟ้าเพื่อให้เสมือนกับการนำไปใช้จริงในระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก หลังจากนั้นจึงเชื่อมต่อวงจร M^2C^3 อีกชุดเข้ามาผ่านหม้อแปลงความถี่สูง โดยรวมไปถึงการนำวงจร M^2C^3 ไปประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่างๆ เช่น สองชุดวงจรมีคอนเวอร์เตอร์โมดูลที่ไม่เท่ากัน และอัตราส่วนของหม้อแปลงความถี่สูงที่ใช้เชื่อมต่อมีอัตราส่วนสองต่อหนึ่ง ซึ่งแต่ละขั้นตอนจะนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของวงจร M^2C^3 การทดสอบเครื่องต้นแบบแสดงดังรูปที่ 6.1 ประกอบไปด้วยวงจร M^2C^3 2 ชุดเชื่อมต่อกันผ่านหม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งแต่ละชุดจะเชื่อมต่ออยู่กับแบตเตอรี่ 12V 7.2Ah จำนวน 3 ลูก และอุปกรณ์ในการวัด



รูปที่ 6.1 การทดสอบเครื่องต้นแบบ



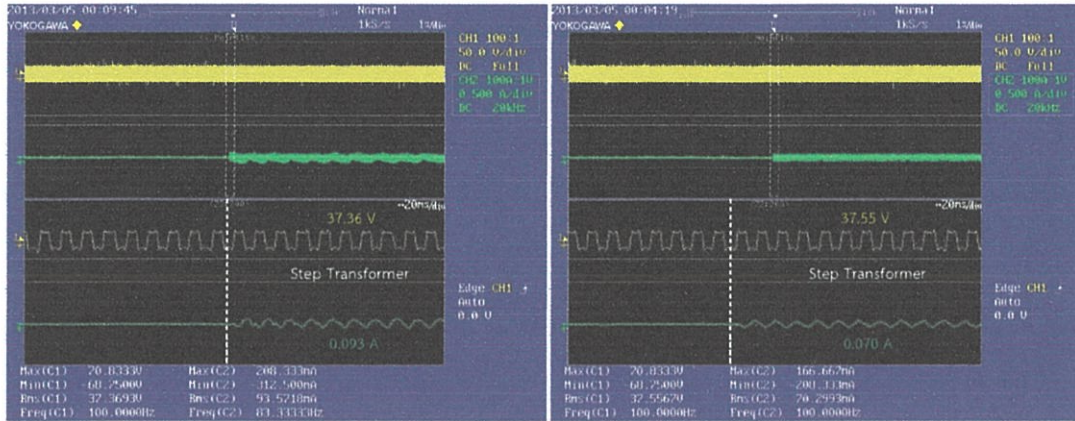
รูปที่ 6.2 สัญญาณควบคุมที่มีรูปคลื่นสี่เหลี่ยมและมีมุมเฟสตรงข้ามกัน

6.2 การทดสอบวงจรขับสัญญาณ

การควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ จะแบ่งสัญญาณควบคุมออกเป็น 2 สัญญาณที่มีรูปคลื่นเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมและมีมุมเฟสที่ตรงข้ามกัน 180 องศา ซึ่งแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณควบคุมจะต้องผ่านวงจรขับสัญญาณก่อนที่จะนำไปจ่ายให้กับสวิตซ์กำลัง โดยที่แรงดันไฟฟ้าจะมีขนาดเท่ากับ 15V กับ -3V โดยที่ให้มีแรงดันไฟฟ้าที่เป็นลบเนื่องจากต้องการให้สวิตซ์มีการหยุดนำกระแสที่รวดเร็วเพียงพอเพื่อป้องกันช่วงเวลาการสวิตซ์ที่พร้อมกันดังรูปที่ 6.2

6.3 การทดสอบหม้อแปลงความถี่สูง

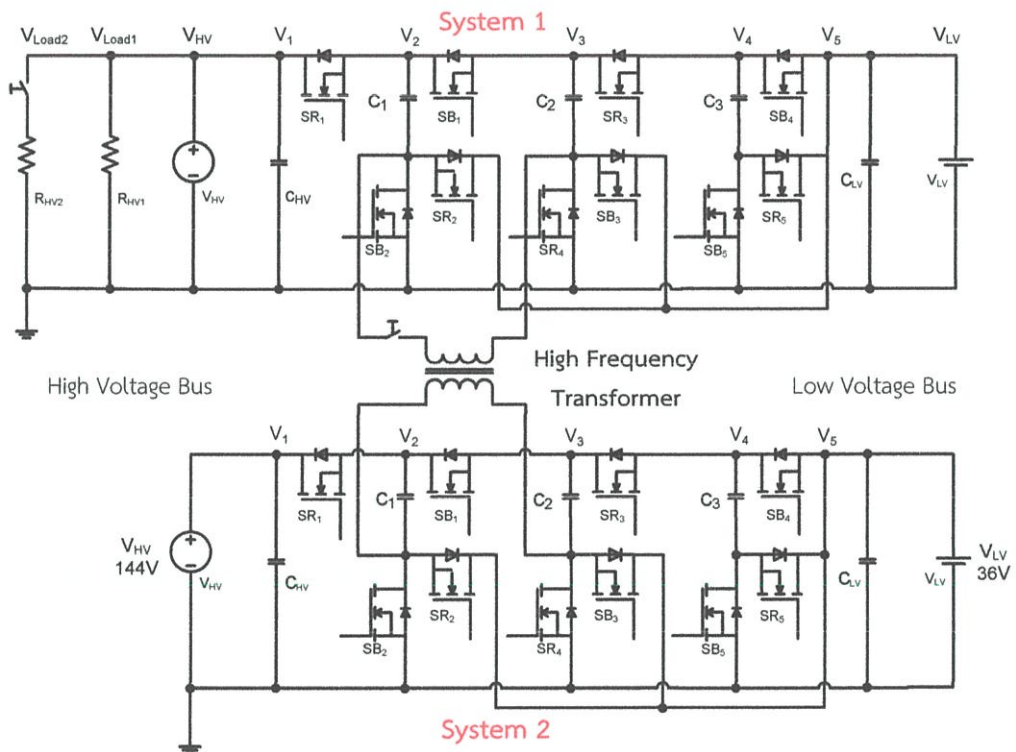
การทดสอบหม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับการแยกโดดทางไฟฟ้าและถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าระหว่างชุดวงจร M^2C^3 โดยเชื่อมต่ออยู่กับขั้วลบของตัวเก็บประจุในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลที่มีความถี่เท่ากับความถี่สัญญาณควบคุมการสวิตซ์ ซึ่งในการทดสอบจะทำการเชื่อมต่อหม้อแปลงความถี่สูงในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 แต่ละชุดมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน จึงทำการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าของทั้งสองฝั่งของหม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 6.3(ก) ที่เป็นแรงดันและกระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิ และแรงดันและกระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิจะแสดงดังรูปที่ 6.3(ข) ซึ่งการทดสอบนี้ที่มีแรงดันไฟฟ้าของทั้งสองชุดวงจรเท่ากันนั้นจะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าที่ถ่ายโอนผ่านหม้อแปลงความถี่สูงจะมีขนาดที่น้อยมาก เสมือนไม่เกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงความถี่สูงและเมื่อทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของหม้อแปลงความถี่สูงจะมีค่าเท่ากับ 84.31%



(ก) ปฐมภูมิ

(ข) ทุตติยภูมิ

รูปที่ 6.3 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง



รูปที่ 6.4 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าบัสแรงดันสูง

6.4 การทดสอบวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าบัสด้านสูง

6.4.1 วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับสำหรับระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่มีภาระไฟฟ้าเชื่อมต่อกับบัสด้านสูง ทั้งที่ชดวจร M^2C^3 ที่ 1 มีการทำงานในรูปแบบลดและเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า

6.4.2 วิธีการทดสอบ

การทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าที่บัสด้านสูงดังรูปที่ 6.4 จะทำการทดสอบโดยเริ่มจากให้ชดวจรที่ 1 มีการทำงานในรูปแบบลดหรือเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าจึงทำการเชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าที่บัสด้านสูงซึ่งจะเรียกว่ารูปแบบปกติ (Normal Conditions) หลังจากนั้นทำการเพิ่มภาระไฟฟ้าที่บัสด้านสูงซึ่งจะเรียกว่ารูปแบบการเพิ่มภาระไฟฟ้า (Step Loads) และจึงทำการเชื่อมต่อระหว่าง 2 ชดวจรผ่านหม้อแปลงความถี่สูง (Step Transformer) ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะทำการเก็บข้อมูลของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในทุกบัสด้าน

6.4.3 ขั้นตอนในการทดสอบ

- ทำการจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงให้กับวงจรควบคุม คือ วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรขับสัญญาณ พร้อมทั้งวัดสัญญาณที่สร้างจากวงจรควบคุม
- ทำการเชื่อมต่อบัสด้านต่ำในแต่ละชดวจร M^2C^3 พร้อมทั้งวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุในแต่ละชดวจรคอนเวอร์เตอร์โมดูล ซึ่งต้องมีแรงดันไฟฟ้าตามอัตราส่วนการแปลงผัน
- ทำการเชื่อมต่อบัสด้านสูงในแต่ละชดวจร M^2C^3 ที่มีแรงดันไฟฟ้าตามอัตราส่วนการแปลงผันของวงจร M^2C^3
- ทำการวัดแรงดันไฟฟ้า ความถี่ และมุมเฟสของหม้อแปลงความถี่สูงทั้งสองฝั่ง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณที่ฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงกับขั้วลบของตัวเก็บประจุของชดวจรที่ 1 ก่อนที่จะทำการเชื่อมต่อระหว่างสองชดวจร
- ทำการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสด้านสูงที่มีขนาด 200 W และเพิ่มภาระไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับ 400 W แล้วจึงทำการเชื่อมต่อดวจร M^2C^3 ทั้ง 2 ชดผ่านหม้อแปลงความถี่สูง โดยที่ทำการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าในแต่ละบัสด้านในทุกขั้นตอน

6.4.4 การทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูง

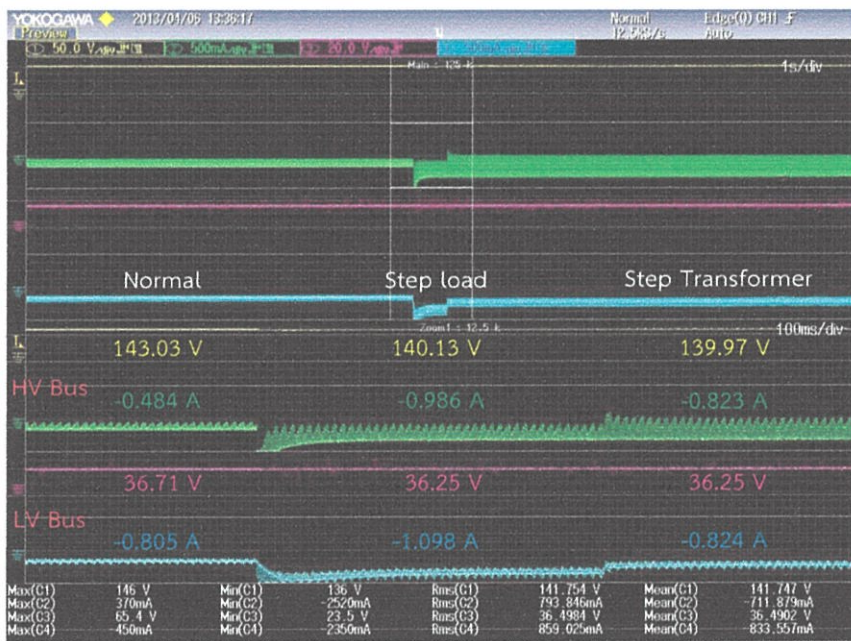
การทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงตามขั้นตอนการทดสอบนั้น จะเห็นว่าพลังงานไฟฟ้ามีการถ่ายโอนตามหลักการสมดุลพลังงาน ที่ซึ่งจะถ่ายโอนพลังงานจากบัสแรงดันไฟฟ้าสูงไปยังบัสแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าตามอัตราส่วนการแปลงผัน โดยผลการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบขึ้นอยู่กับการทำงานของวงจร M^2C^3 ในกรณีที่ไม่มีภาระไฟฟ้าคือ รูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้าและเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้การทดสอบทั้งสองแบบในสถานะไดนามิก (Dynamic State) เพื่อแสดงทิศทางการถ่ายโอนพลังงานในแต่ละบัสแรงดันขณะที่มีการไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ที่บัสแรงดันสูง

6.4.5 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า

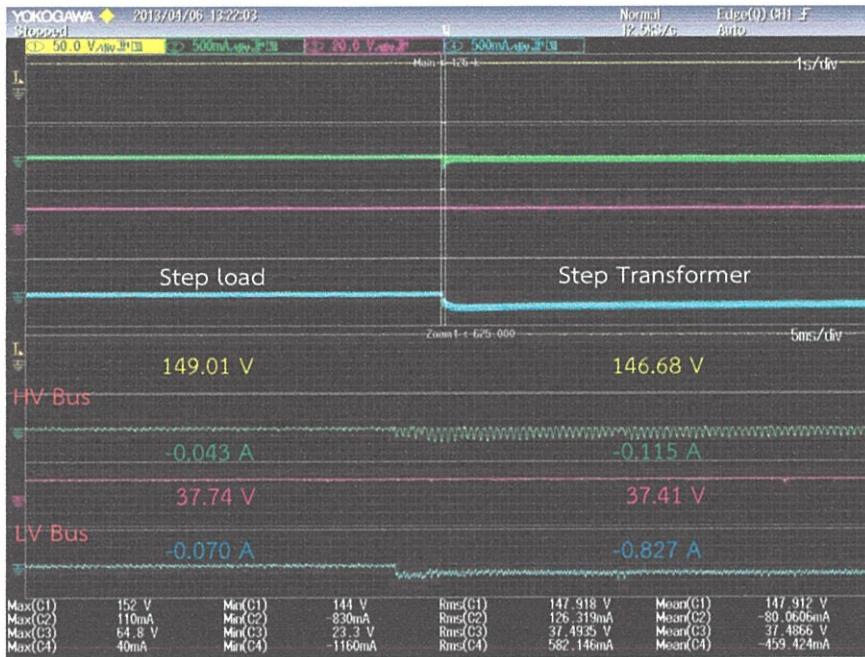
ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า จะได้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าแรงดันสูงดังรูปที่ 6.5 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ดังรูปที่ 6.6 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ดังรูปที่ 6.7 และแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 6.8 จะเห็นว่าในขั้นตอนที่ 1 (Normal Conditions) จะมีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากทั้งสองบัสแรงดันไฟฟ้าไปจ่ายให้กับภาระไฟฟ้าเนื่องจากว่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงขณะเชื่อมต่ออยู่กับภาระไฟฟ้ามักมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำตามอัตราส่วนการแปลงผัน ส่งผลให้เมื่อเพิ่มภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูง (Step Load) บัสแรงดันไฟฟ้าทั้ง 2 จะต้องถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้ามากขึ้นซึ่งดูได้จากกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้น หลังจากนั้นจึงทำการเชื่อมต่อชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ผ่านหม้อแปลงความถี่สูงเข้ามา (Step Transformer) จะเห็นว่าที่หม้อแปลงความถี่สูงจะมีกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นซึ่งแสดงว่ามีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ผ่านหม้อแปลงความถี่สูง รวมไปถึงยังช่วยลดการทำงานของแต่ละบัสแรงดันไฟฟ้าของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1



รูปที่ 6.5 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า



รูปที่ 6.6 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 1



รูปที่ 6.7 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 2



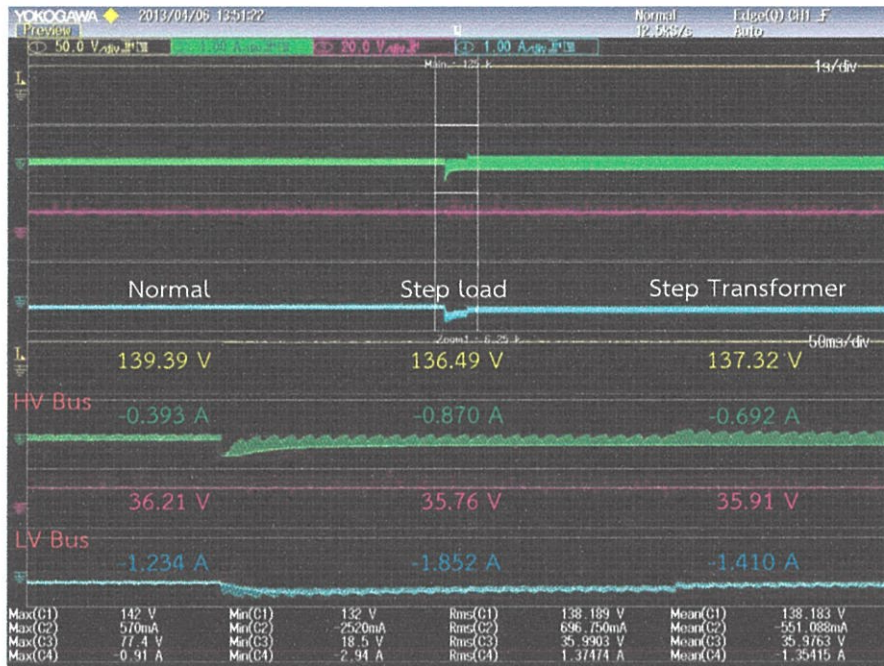
รูปที่ 6.8 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง

6.4.6 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า

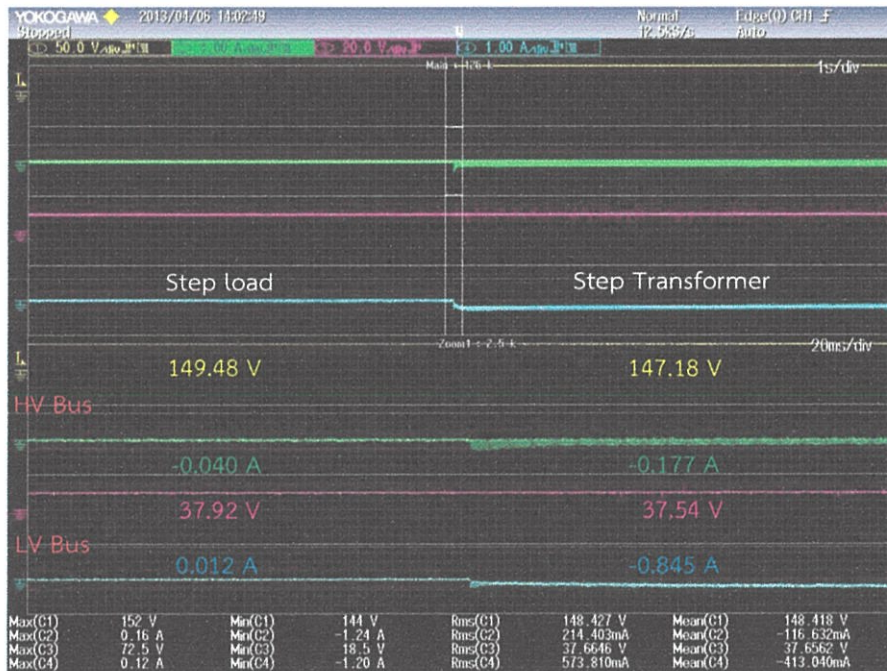
ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า จะได้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าแรงดันสูงดังรูปที่ 6.9 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ดังรูปที่ 6.10 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ดังรูปที่ 6.11 และแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 6.12 จะเห็นว่าการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจะคล้ายกับหัวข้อที่ 6.4.5 แต่กระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 จะมีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าสูงขึ้น และเมื่อทำการเพิ่มภาระไฟฟ้าจะเห็นว่าการถ่ายโอนพลังงานจากบัสแรงดันต่ำสูงขึ้นซึ่งเป็นการช่วยบัสแรงดันสูงในการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่ หลังจากนั้นจึงทำการเชื่อมต่อหม้อแปลงความถี่สูงจะเห็นว่าชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 จะถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้ามาให้กับภาระไฟฟ้าและยังเป็นการลดภาระของบัสแรงดันไฟฟ้าในชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1



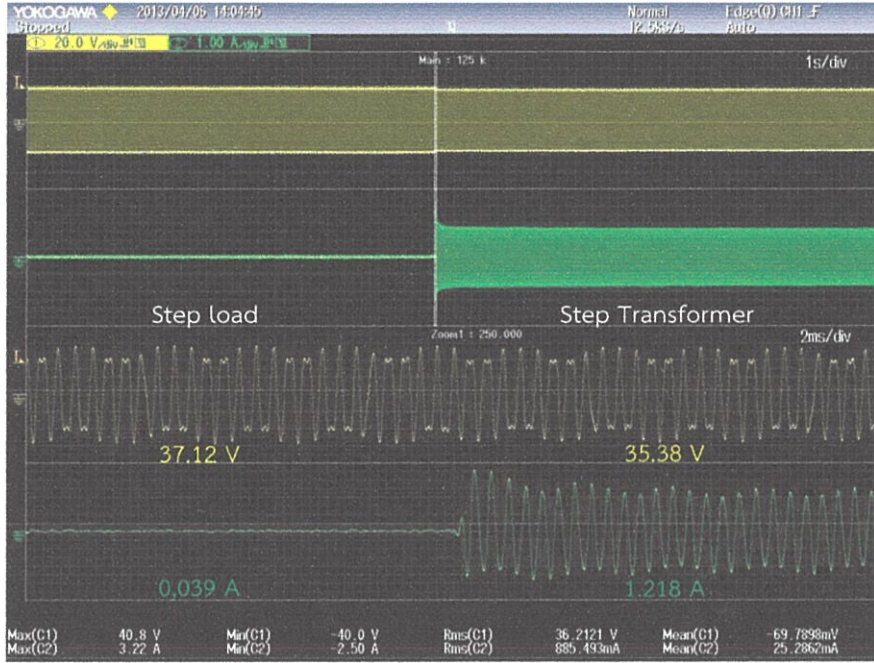
รูปที่ 6.9 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า



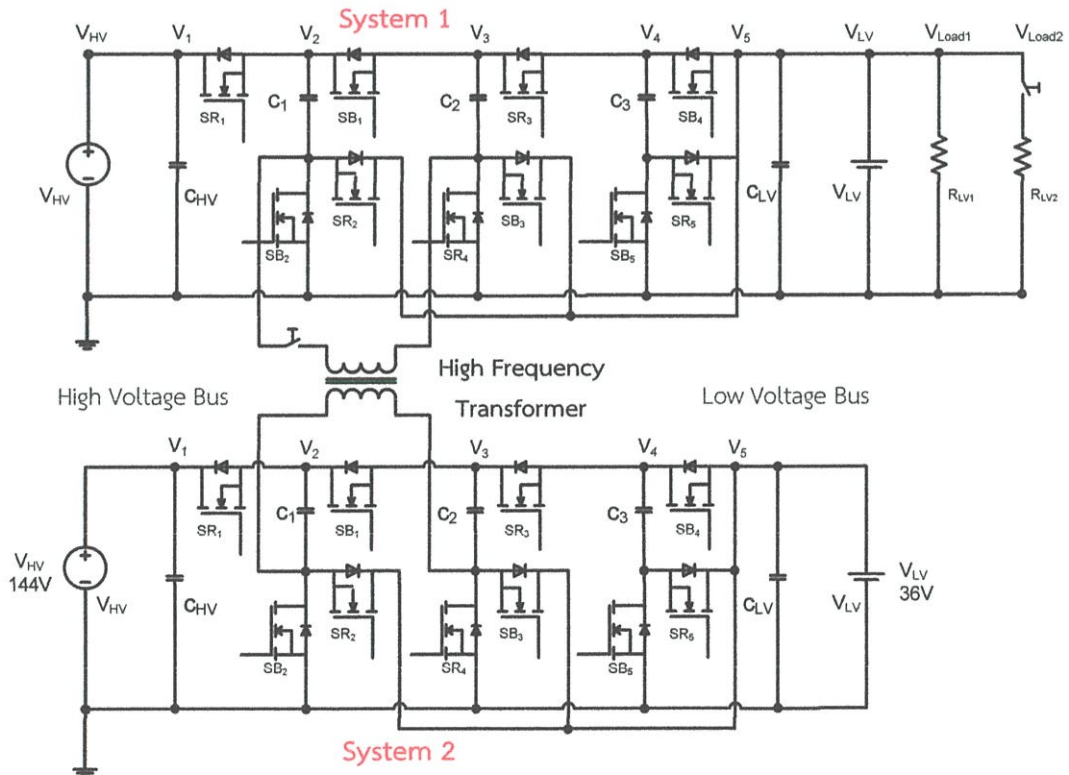
รูปที่ 6.10 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 1



รูปที่ 6.11 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจรที่ 2



รูปที่ 6.12 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง



รูปที่ 6.13 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโคตทางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าบัสแรงดันต่ำ

6.5 การทดสอบวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าบัสดังต้นต่ำ

6.5.1 วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับสำหรับระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่มีการไฟฟ้าเชื่อมต่อกับบัสดังต้นต่ำ ทั้งที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 มีการทำงานอยู่ในรูปแบบลดและเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า

6.5.2 วิธีการทดสอบ

การทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าที่บัสดังต้นต่ำดังรูปที่ 6.13 จะมีวิธีการทดสอบที่เหมือนกันกับหัวข้อ 6.4 แต่จะแตกต่างกันตรงที่ตำแหน่งของภาระไฟฟ้า จะทำการศึกษาการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าในแต่ละบัสดังต้น โดยจะกำหนดให้วงจร M^2C^3 มีการเชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าที่บัสดังต้นต่ำ ขณะที่วงจร M^2C^3 ทำงานในรูปแบบลดระดับแรงดันและรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า และทำการเพิ่มภาระไฟฟ้าที่บัสดังต้นต่ำ หลังจากนั้นจึงเชื่อมชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ผ่านหม้อแปลงความถี่สูง

6.5.3 ขั้นตอนในการทดสอบ

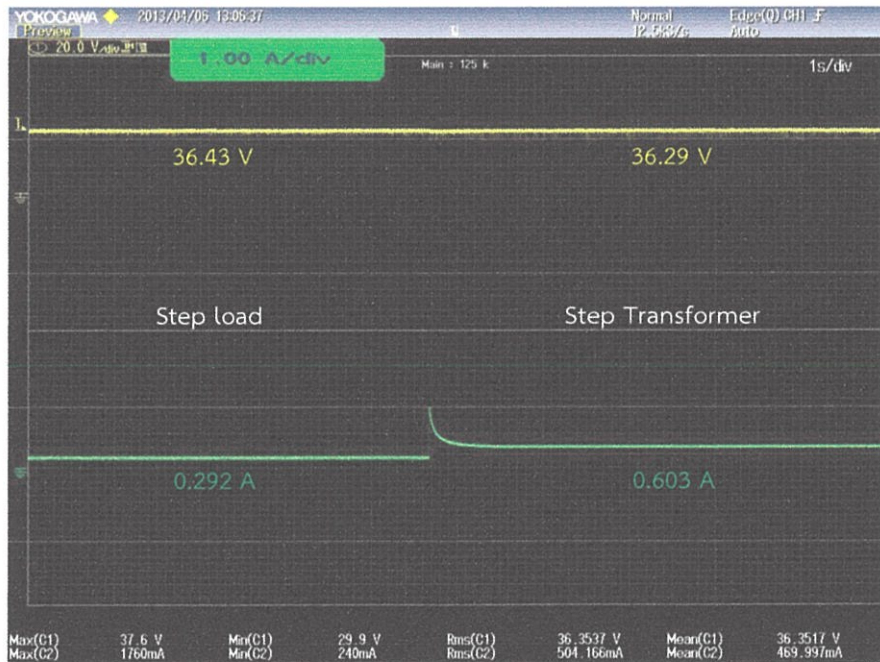
- ทำการจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงให้กับวงจรควบคุม คือ วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรขับสัญญาณ พร้อมทั้งวัดสัญญาณที่สร้างจากวงจรควบคุม
- ทำการเชื่อมต่อบัสดังต้นต่ำในแต่ละชุดวงจร M^2C^3 พร้อมทั้งวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล ซึ่งต้องมีแรงดันไฟฟ้าตามอัตราส่วนการแปลงผัน
- ทำการเชื่อมต่อบัสดังต้นสูงในแต่ละชุดวงจร M^2C^3 ที่มีแรงดันไฟฟ้าตามอัตราส่วนการแปลงผันของวงจร M^2C^3
- ทำการวัดแรงดันไฟฟ้า ความถี่ และมุมเฟสของหม้อแปลงความถี่สูงทั้งสองฝั่ง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณที่ฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงกับขั้วลบของตัวเก็บประจุของชุดวงจรที่ 1 ก่อนที่จะทำการเชื่อมต่อระหว่างสองชุดวงจร
- ทำการเชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าที่บัสดังต้นต่ำที่มีขนาด 200 W และเพิ่มภาระไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับ 400 W แล้วจึงทำการเชื่อมต่อกับวงจร M^2C^3 ทั้ง 2 ชุดผ่านหม้อแปลงความถี่สูง โดยทำการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าในแต่ละบัสดังต้นในทุกขั้นตอน

6.5.4 การทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำ

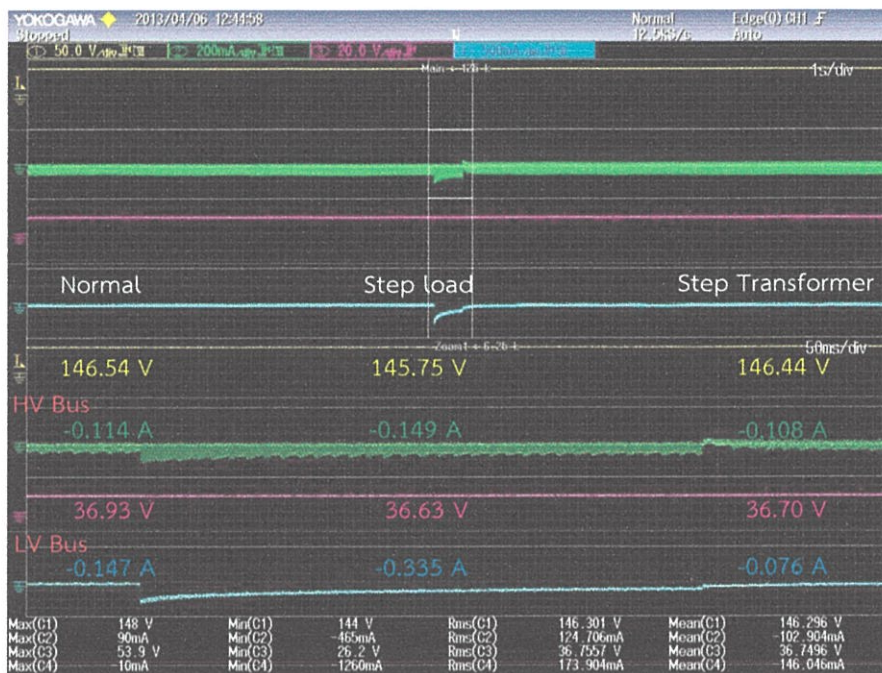
การทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำตามขั้นตอนการทดสอบนั้น จะเป็นการทดสอบที่คล้ายกับการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูง ซึ่งในการทดสอบจะให้วงจร M^2C^3 ทำงานในสภาวะไดนามิก โดยที่จะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบการทำงานคือ รูปแบบลระดับแรงดันไฟฟ้าและเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า

6.5.5 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าในรูปแบบลระดับแรงดันไฟฟ้าที่มีภาระไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่ที่บัสแรงดันต่ำ

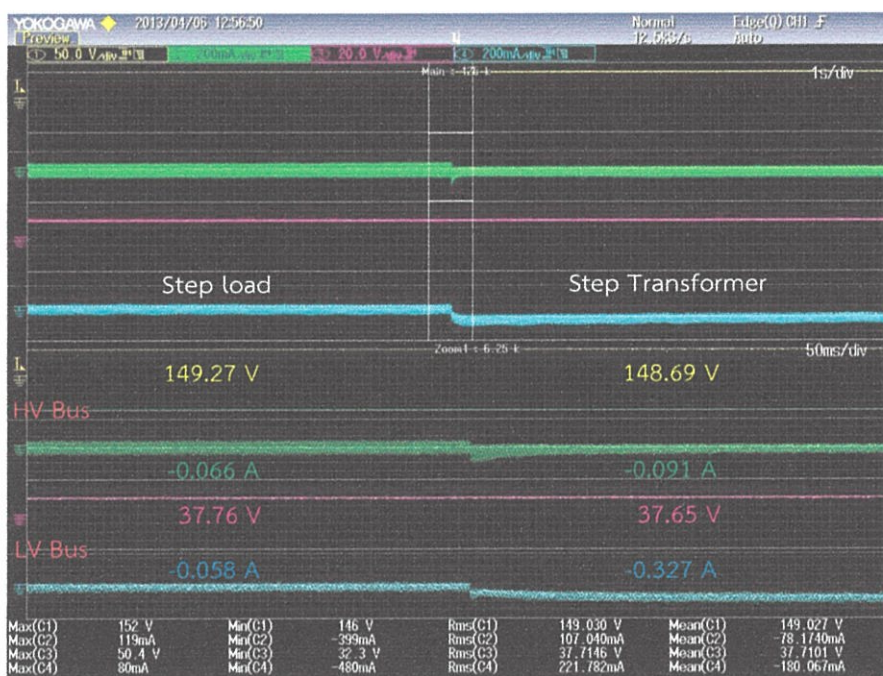
ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำในรูปแบบลระดับแรงดันไฟฟ้า จะได้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าแรงดันสูงดังรูปที่ 6.14 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ดังรูปที่ 6.15 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ดังรูปที่ 6.16 และแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 6.17 จะเห็นว่าบัสแรงดันสูงมีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้ามาให้กับภาระไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่กับบัสแรงดันต่ำและเมื่อทำการเพิ่มภาระไฟฟ้าส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานเพิ่มมากขึ้นหลังจากนั้นทำการเชื่อมต่อหม้อแปลงความถี่สูงจะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าที่บัสต่างๆของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 มีค่าลดลง



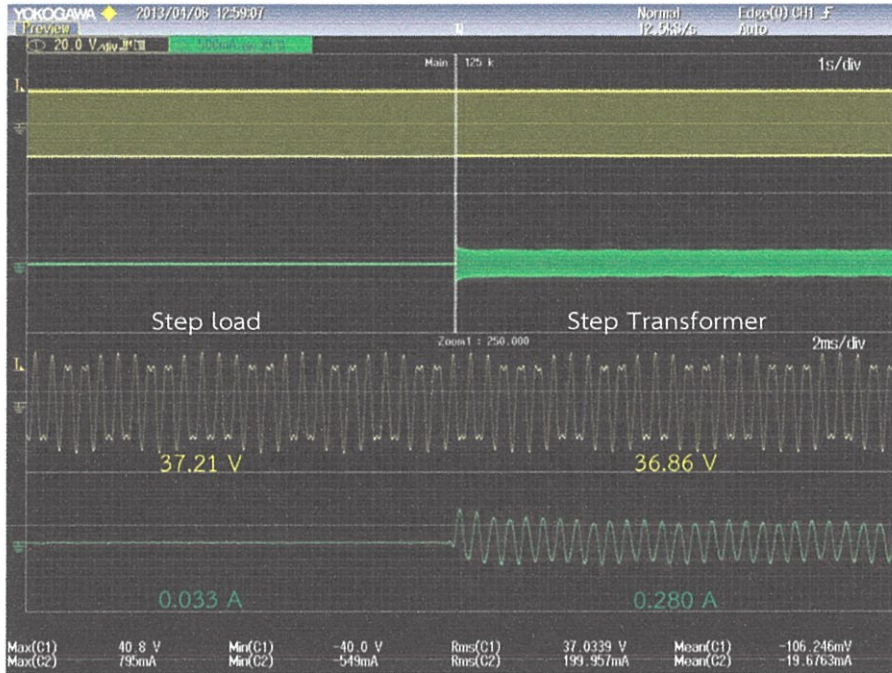
รูปที่ 6.14 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า



รูปที่ 6.15 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดวงจร M²C³ ที่ 1



รูปที่ 6.16 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดวงจร M²C³ ที่ 2



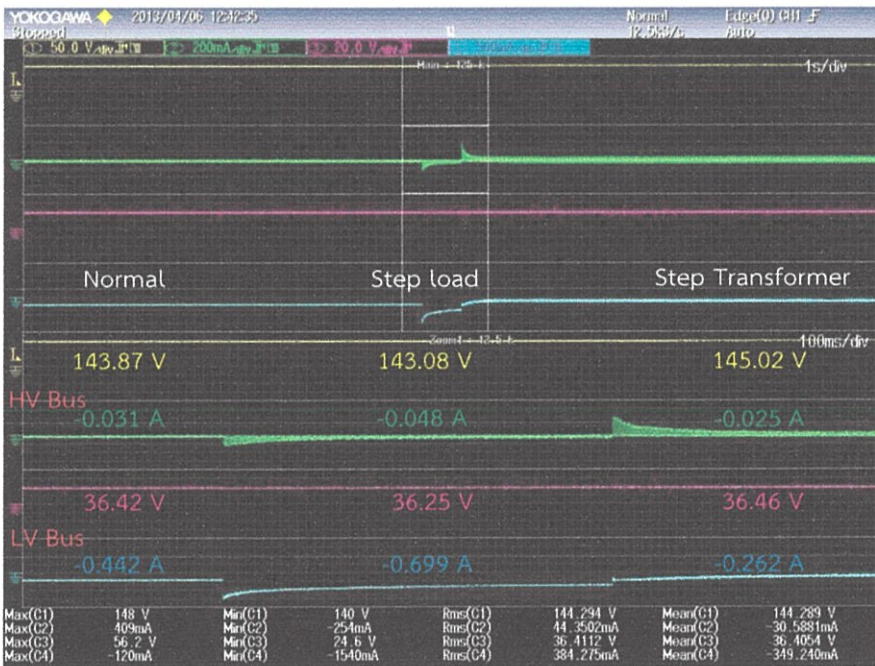
รูปที่ 6.17 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง

6.5.6 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าที่มีภาระไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ที่บัสแรงดันต่ำ

ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า จะได้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าแรงดันสูงดังรูปที่ 6.18 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ดังรูปที่ 6.19 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ดังรูปที่ 6.20 และแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 6.21 จะเห็นว่าการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าจะมาจากบัสแรงดันต่ำเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงมีค่าต่ำกว่าบัสแรงดันต่ำตามอัตราส่วนการแปลงผัน ซึ่งเมื่อเพิ่มภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำก็เห็นว่ากระแสไฟฟ้าจะถูกถ่ายโอนมาจากบัสแรงดันต่ำ หลังจากนั้นจึงทำการเชื่อมต่อหม้อแปลงความถี่สูงเข้ามา ส่งผลให้ลดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปให้กับภาระไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่



รูปที่ 6.18 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า



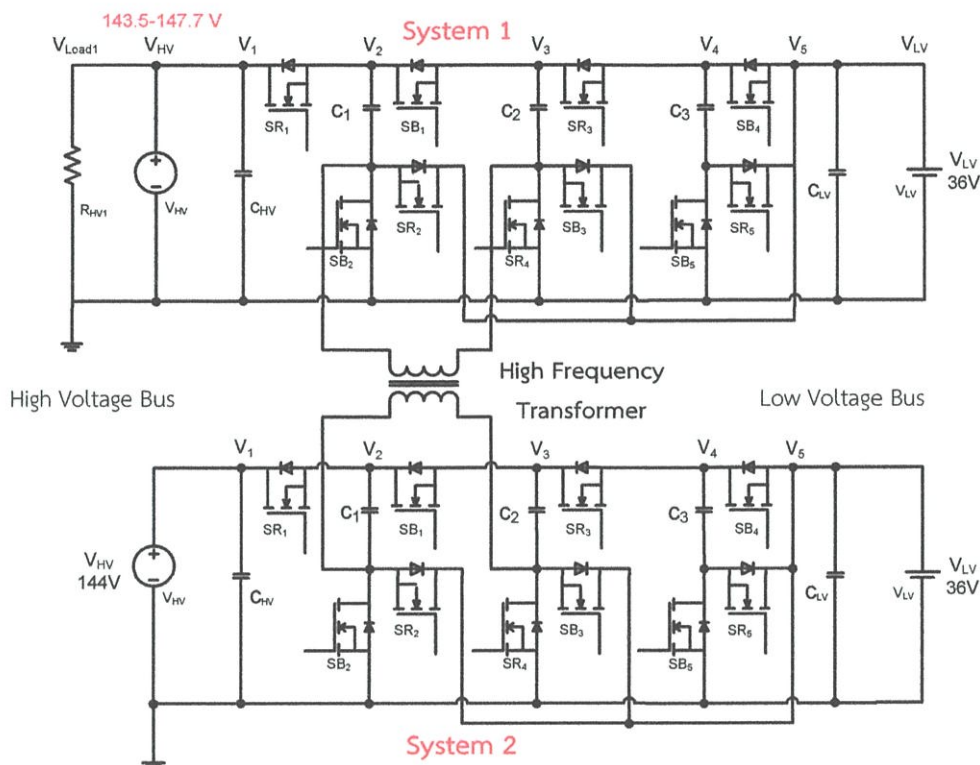
รูปที่ 6.19 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M²C³ ที่ 1



รูปที่ 6.20 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M²C³ ที่ 2



รูปที่ 6.21 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง



รูปที่ 6.22 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า

6.6 การทดสอบวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า

6.6.1 วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับสำหรับระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในสภาวะไดนามิก

6.6.2 วิธีการทดสอบ

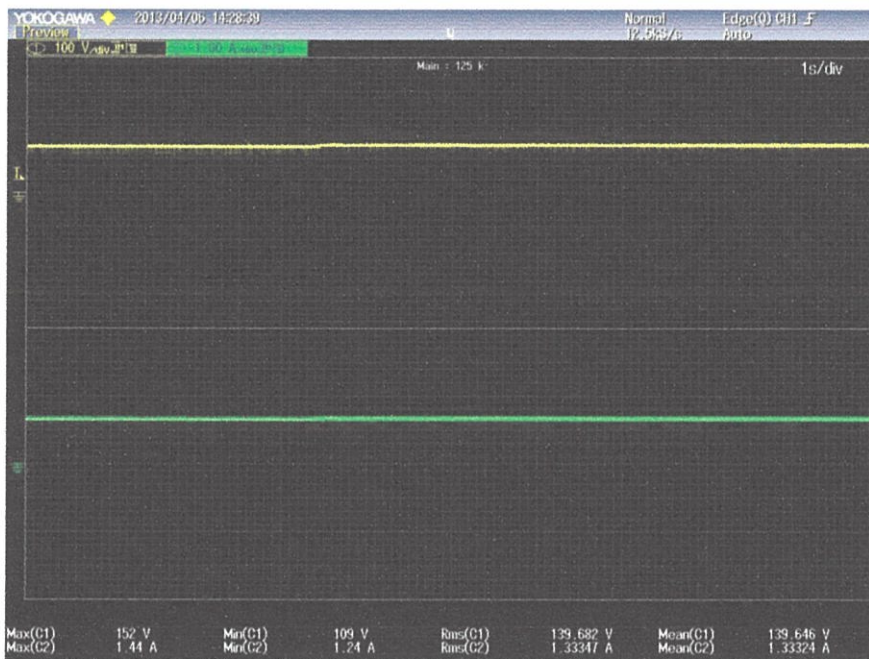
การทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงดังรูปที่ 6.22 จะทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 โดยเริ่มจากสภาวะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าหลังจากนั้นจะทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้มีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำ ส่งผลให้ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 จะทำงานในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า

6.6.3 ขั้นตอนในการทดสอบ

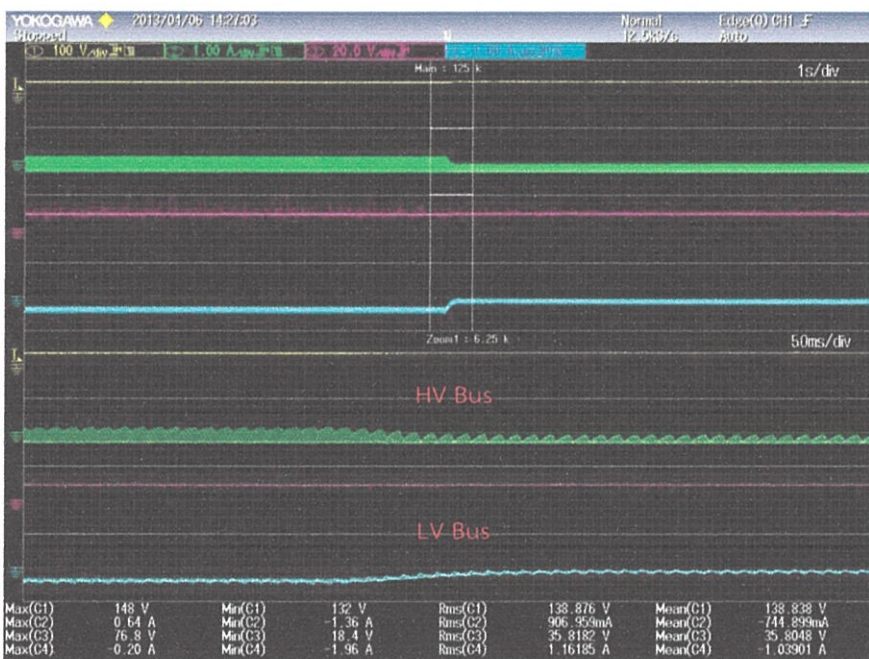
- ทำการจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงให้กับวงจรควบคุม คือ วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรขับสัญญาณ พร้อมทั้งวัดสัญญาณที่สร้างจากวงจรควบคุม
- ทำการเชื่อมต่อบัสแรงดันต่ำในแต่ละชุดวงจร M^2C^3 พร้อมทั้งวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล ซึ่งต้องมีแรงดันไฟฟ้าตามอัตราส่วนการแปลงผัน
- ทำการเชื่อมต่อบัสแรงดันสูงในแต่ละชุดวงจร M^2C^3 ที่มีแรงดันไฟฟ้าตามอัตราส่วนการแปลงผันของวงจร M^2C^3
- ทำการวัดแรงดันไฟฟ้า ความถี่ และมุมเฟสของหม้อแปลงความถี่สูงทั้งสองฝั่ง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณที่ฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงกับขั้วลบของตัวเก็บประจุของชุดวงจรที่ 1 ก่อนที่จะทำการเชื่อมต่อระหว่างสองชุดวงจร
- ทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 จากที่มีค่าน้อยกว่าไปจนถึงค่าที่มากกว่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำตามอัตราส่วนการแปลงผันแล้วทำการวัดแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัสแรงดันไฟฟ้า

6.6.4 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า

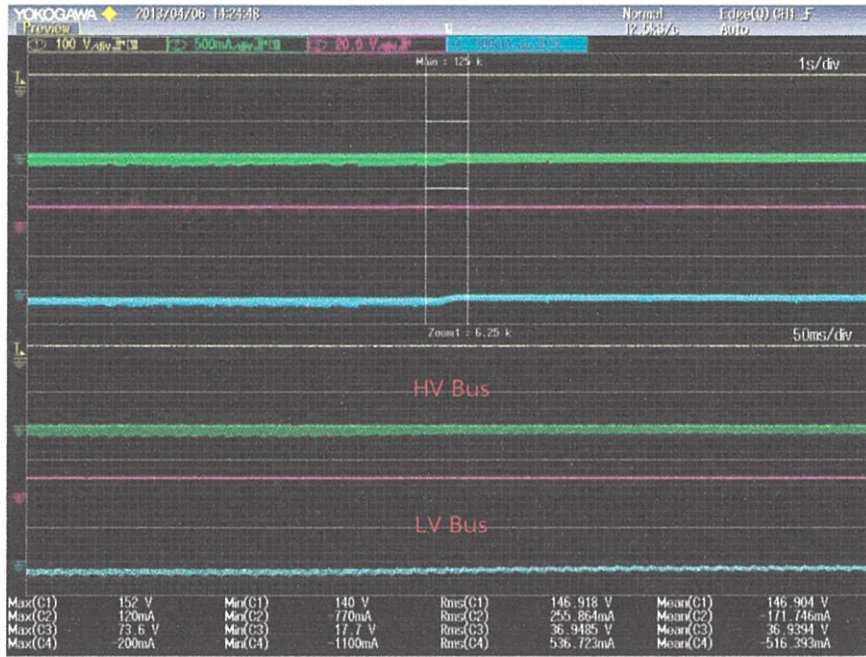
ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของบัสแรงดันสูงของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 จะได้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าแรงดันสูงดังรูปที่ 6.23 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ดังรูปที่ 6.24 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ดังรูปที่ 6.25 และแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 6.26 จะเห็นว่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้ามีความคงที่ต่อเนื่องขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ที่ซึ่งเริ่มแรกชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งกระแสไฟฟ้ามักมีค่าใกล้เคียงศูนย์และเมื่อดูที่บัสแรงดันต่ำจะเห็นว่ากระแสไฟฟ้ามีขนาดที่สูงมากและมีทิศทางเป็นลบ ทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำไปให้กับภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูง หลังจากนั้นแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ทำให้มีแรงดันไฟฟ้ามากกว่าบัสแรงดันต่ำตามอัตราส่วนการแปลงผัน ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลออกจากบัสแรงดันสูงสูงขึ้นเพื่อไปจ่ายให้กับภาระไฟฟ้าแทนที่ของบัสแรงดันต่ำ ซึ่งการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของวงจร M^2C^3 นั้นจะเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดตามหลักการของการสมดุลพลังงานไฟฟ้าทั้งภายในชุดวงจร M^2C^3 และระหว่างชุดวงจร M^2C^3 ผ่านหม้อแปลงความถี่สูง



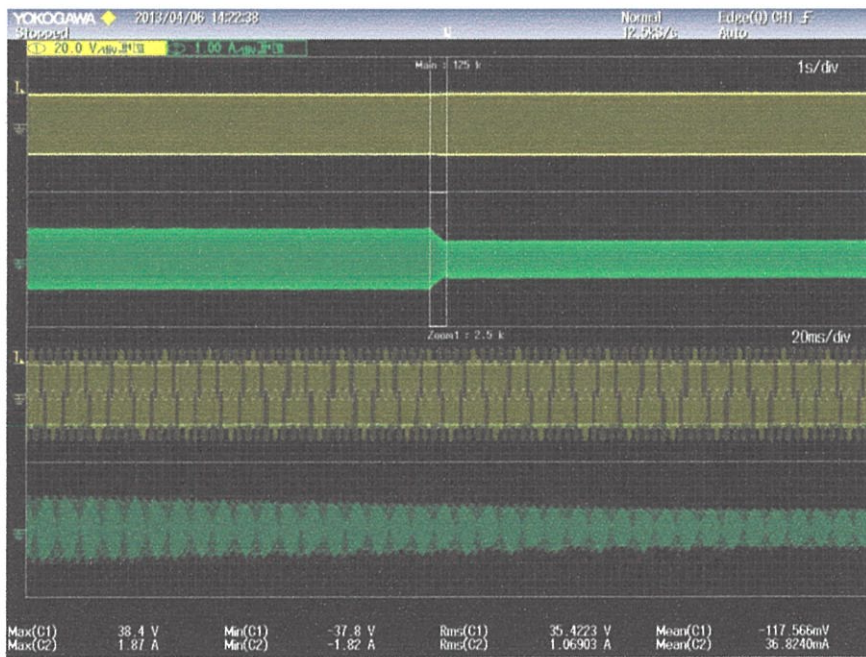
รูปที่ 6.23 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า



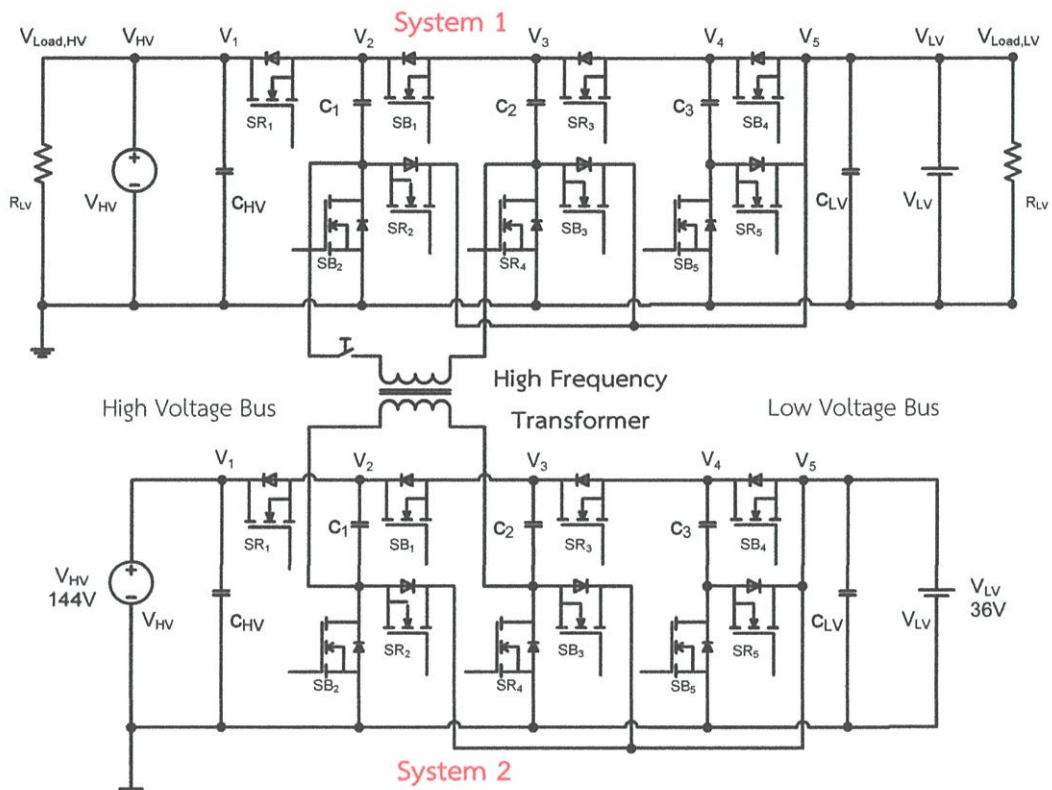
รูปที่ 6.24 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M²C³ ที่ 1



รูปที่ 6.25 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M²C³ ที่ 2



รูปที่ 6.26 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง



รูปที่ 6.27 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับหลากหลายภาวะไฟฟ้า

6.7 การทดสอบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าในขณะที่เชื่อมต่อกับภาวะไฟฟ้าที่หลากหลายแรงดันไฟฟ้า

6.7.1 วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าในขณะที่เชื่อมต่อกับภาวะไฟฟ้าทั้งสองบัสแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้มีความครอบคลุมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน

6.7.2 วิธีการทดสอบ

การทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับภาวะไฟฟ้าทั้งสองบัสแรงดันดังรูปที่ 6.27 ซึ่งภาวะไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่ในแต่ละบัสแรงดันไฟฟ้าจะมีขนาด 200 W และให้ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 มีการทำงานอยู่ในรูปแบบโหลดและเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า

6.7.3 ขั้นตอนในการทดสอบ

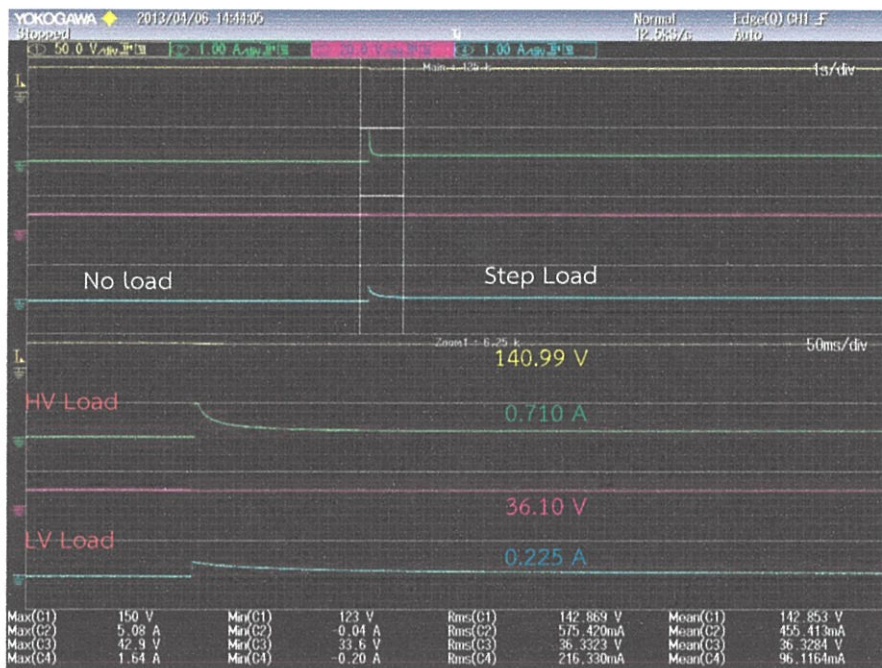
- ทำการจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงให้กับวงจรควบคุม คือ วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรขับสัญญาณ พร้อมทั้งวัดสัญญาณที่สร้างจากวงจรควบคุม
- ทำการเชื่อมต่อบัสแรงดันต่ำในแต่ละชุดวงจร M^2C^3 พร้อมทั้งวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล ซึ่งต้องมีแรงดันไฟฟ้าตามอัตราส่วนการแปลงผัน
- ทำการเชื่อมต่อบัสแรงดันสูงในแต่ละชุดวงจร M^2C^3 ที่มีแรงดันไฟฟ้าตามอัตราส่วนการแปลงผันของวงจร M^2C^3
- ทำการวัดแรงดันไฟฟ้า ความถี่ และมุมเฟสของหม้อแปลงความถี่สูงทั้งสองฝั่ง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณที่ฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงกับขั้วลบของตัวเก็บประจุของชุดวงจรที่ 1 ก่อนที่จะทำการเชื่อมต่อระหว่างสองชุดวงจร
- ทำการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าทั้งสองบัสแรงดัน และทำการจำลองแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบลดและเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า และทำการวัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าในแต่ละบัสแรงดัน

6.7.4 การทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าขณะเชื่อมต่อหลากหลายภาระไฟฟ้า

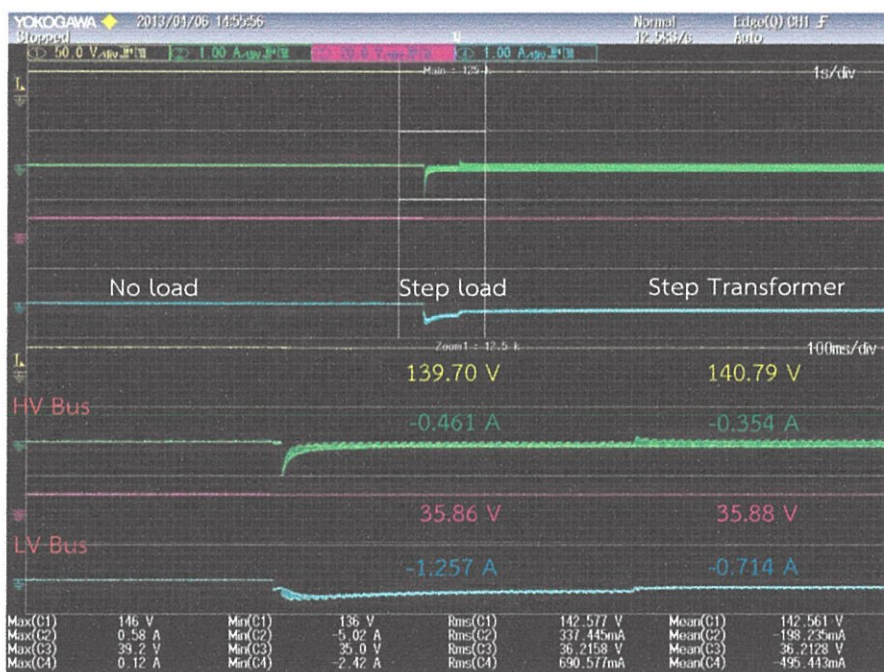
การทดสอบวงจร M^2C^3 ที่หลากหลายภาระไฟฟ้า จะให้ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานอยู่ในรูปแบบลดและเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ที่ซึ่งเป็นการทดสอบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าทั้งสองที่เชื่อมต่ออยู่ ซึ่งในการทดสอบจะให้อยู่ในสภาวะแบบไดนามิก

6.7.5 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าขณะเชื่อมต่อหลากหลายภาระไฟฟ้าในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า

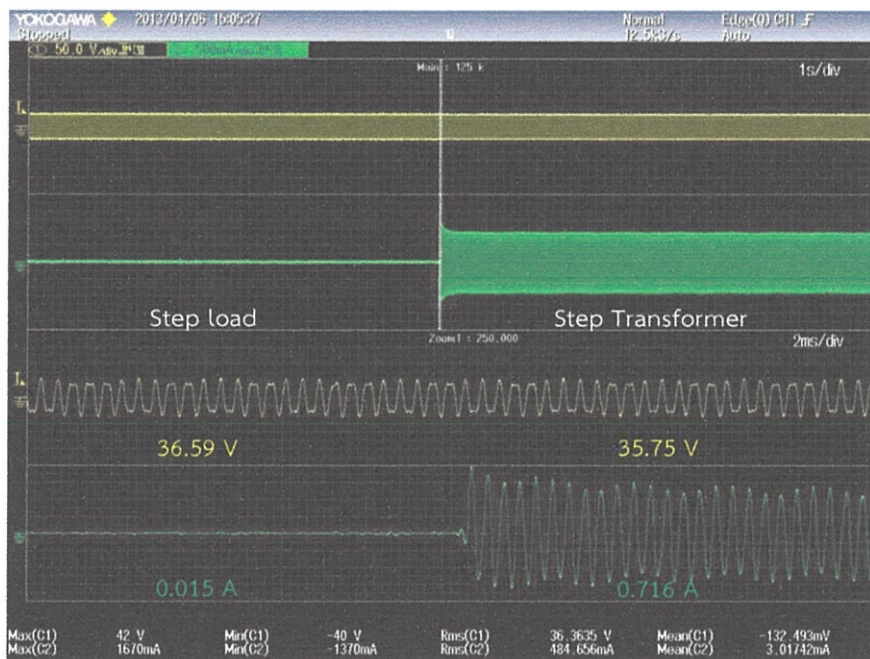
ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าขณะเชื่อมต่ออยู่กับภาระไฟฟ้าที่หลากหลายแรงดันไฟฟ้า ที่ซึ่งจะให้ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานอยู่ในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า จะได้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้างดรูปที่ 6.28 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ดังรูปที่ 6.29 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ดังรูปที่ 6.30 และแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 6.31 จะเห็นว่าในขั้นตอนที่ 1 (No load) จะมีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไปให้กับบัสแรงดันต่ำ เมื่อทำการเพิ่มภาระไฟฟ้าทั้งสองบัสเข้ามา จะเห็นว่าทั้งสองบัสแรงดันไฟฟ้าจะถ่ายโอนพลังงานไปให้กับภาระไฟฟ้าทั้งสองบัสและทำการเชื่อมต่อหม้อแปลงความถี่สูงก็จะมีถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ไปให้กับภาระไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่



รูปที่ 6.28 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า



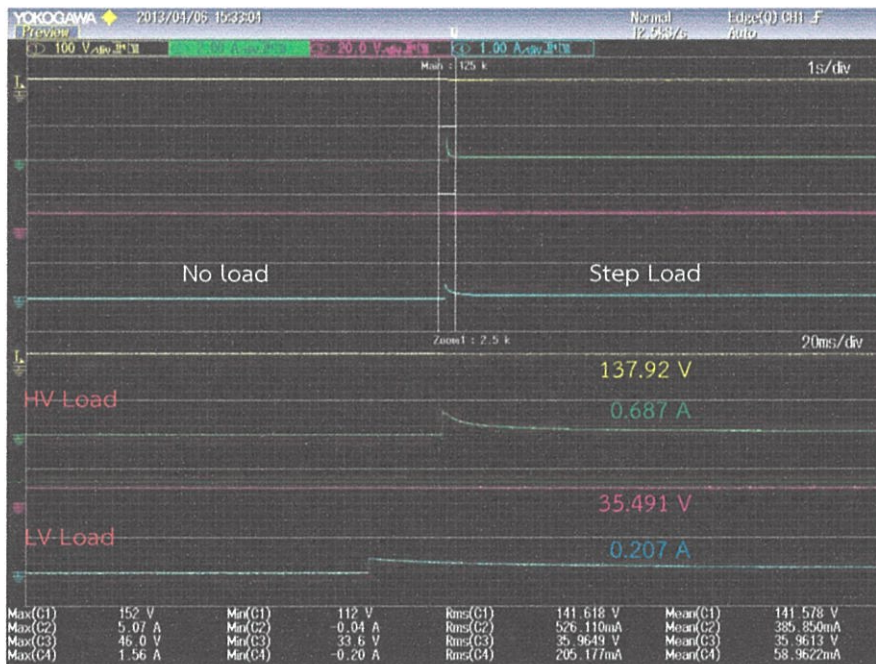
รูปที่ 6.29 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1

รูปที่ 6.30 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2

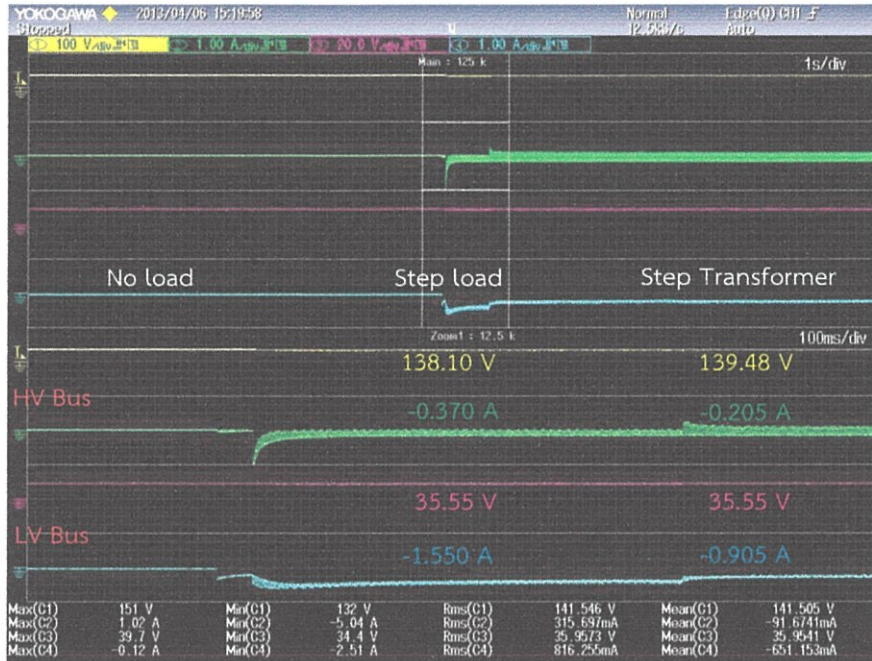
รูปที่ 6.31 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง

6.7.6 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าขณะเชื่อมต่อหลากหลายภาระไฟฟ้าในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า

ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าขณะเชื่อมต่ออยู่กับภาระไฟฟ้าที่หลากหลายแรงดันไฟฟ้า ที่ซึ่งจะให้ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า จะได้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้างดรูปที่ 6.32 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ดังรูปที่ 6.33 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ดังรูปที่ 6.34 และแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 6.35 จะเห็นว่าในขั้นตอนที่ 1 (Normal Condition) จะเกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าตามรูปแบบของการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่หลากหลายจะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละบัสแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดเพื่อถ่ายโอนพลังงานและรักษาแรงดันให้มีความคงที่กับภาระไฟฟ้า หลังจากนั้นทำการเชื่อมต่อหม้อแปลงความถี่สูงส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ไปยังชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1



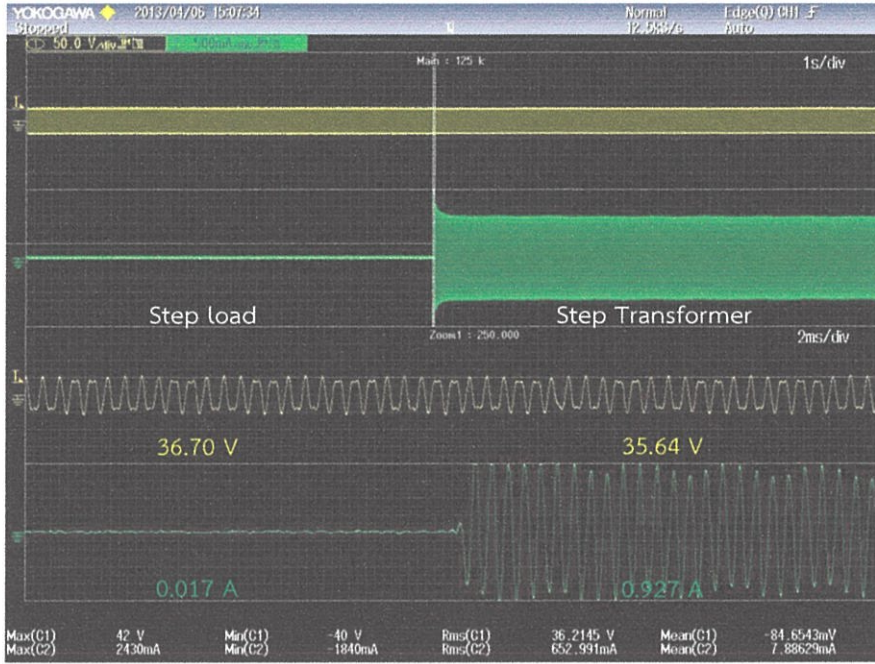
รูปที่ 6.32 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า



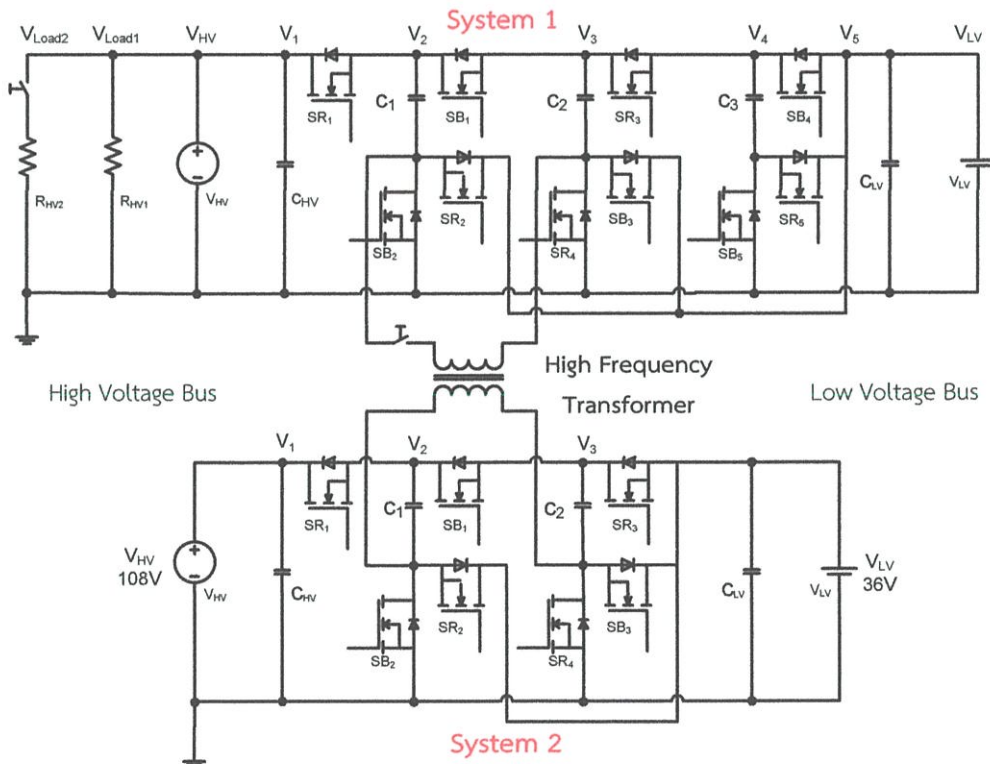
รูปที่ 6.33 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M²C³ ที่ 1



รูปที่ 6.34 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M²C³ ที่ 2



รูปที่ 6.35 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง



รูปที่ 6.36 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าที่มีชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลไม่เท่ากันขณะเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูง

6.8 การทดสอบวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้า ในขณะที่ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลมีจำนวนที่ไม่เท่ากันที่เชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูง

6.8.1 วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าในขณะที่ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลมีจำนวนที่ไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นรูปแบบของการนำวงจร M^2C^3 ไปประยุกต์ให้กับระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กมีความหลากหลายของแรงดันไฟฟ้าในขณะที่มีการนำไปใช้งานจริง

6.8.2 วิธีการทดสอบ

การทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าที่มีชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลไม่เท่ากันและเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงดังรูปที่ 6.36 ซึ่งวิธีการทดสอบจะเหมือนกับหัวข้อ 6.4 จะเริ่มจากการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงให้กับชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ที่ทำงานอยู่ในรูปแบบลดและเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า หลังจากนั้นจึงทำการเพิ่มภาระไฟฟ้าให้มีขนาดสูงขึ้น และทำการเชื่อมต่อชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลไม่เท่ากัน

6.8.3 ขั้นตอนในการทดสอบ

- ทำการจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงให้กับวงจรควบคุม คือ วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรขับสัญญาณ พร้อมทั้งวัดสัญญาณที่สร้างจากวงจรควบคุม
- ทำการเชื่อมต่อบัสแรงดันต่ำในแต่ละชุดวงจร M^2C^3 พร้อมทั้งวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล ซึ่งต้องมีแรงดันไฟฟ้าตามอัตราส่วนการแปลงผัน
- ทำการเชื่อมต่อบัสแรงดันสูงในแต่ละชุดวงจร M^2C^3 ที่มีแรงดันไฟฟ้าตามอัตราส่วนการแปลงผันของวงจร M^2C^3
- ทำการวัดแรงดันไฟฟ้า ความถี่ และมุมเฟสของหม้อแปลงความถี่สูงทั้งสองฝั่ง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณที่ฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงกับขั้วลบของตัวเก็บประจุของชุดวงจรที่ 1 ก่อนที่จะทำการเชื่อมต่อระหว่างสองชุดวงจร
- ทำการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงที่มีขนาด 200 W และเพิ่มภาระไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับ 400 W แล้วจึงทำการเชื่อมต่อชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ที่มีชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลที่ไม่เท่ากันผ่านหม้อแปลงความถี่สูง โดยที่ทำการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าในแต่ละบัสแรงดันในทุกขั้นตอน

6.8.4 การทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่เท่ากัน

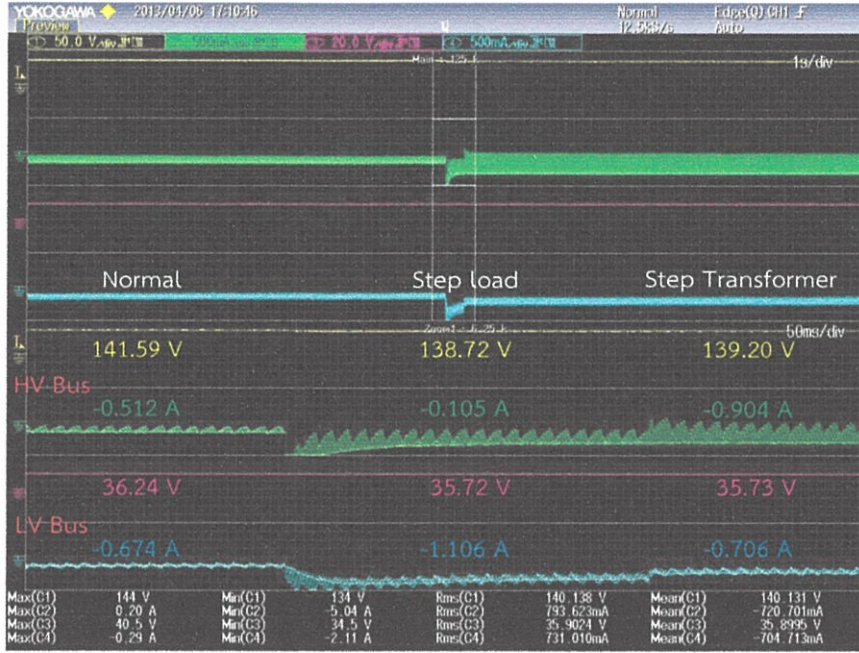
การทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงที่ 2 ชุดวงจรมีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ไม่เท่ากันตามขั้นตอนการทดสอบนั้น ที่ซึ่งเป็นการทดสอบในขณะที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 มีการทำงานในรูปแบบโหลดและเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้านั้น จะส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานภายในชุดวงจร M^2C^3 ในสภาวะไดนามิก

6.8.5 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบโหลดระดับแรงดันไฟฟ้า

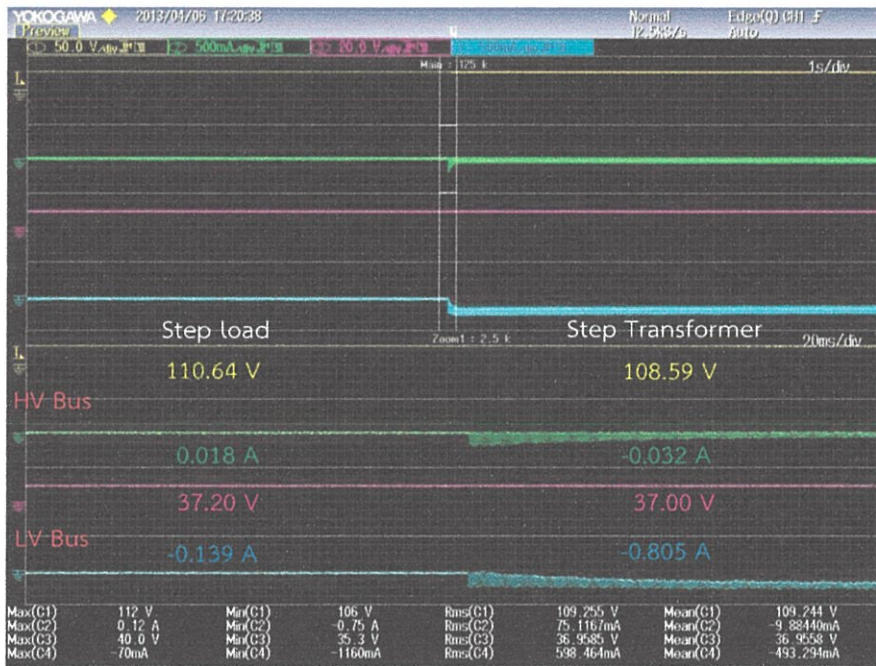
ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบโหลดระดับแรงดันไฟฟ้า จะได้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้างดรูปที่ 6.37 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ดังรูปที่ 6.38 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ดังรูปที่ 6.39 และแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 6.40 จะเห็นว่าในขณะที่มีภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงในขั้นตอนที่ 1 นั้นจะทำให้เกิดการช่วยกันถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากทั้งสองบัสแรงดัน เมื่อเพิ่มภาระไฟฟ้าให้กับบัสแรงดันสูงส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงมีค่าลดลงใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าของบัสแรงดันต่ำตามอัตราส่วนการแปลงผันทำให้กระแสไฟฟ้าที่ถ่ายโอนให้กับภาระไฟฟ้าจะมาจากบัสแรงดันต่ำและเมื่อทำการเชื่อมต่อชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 มีค่าเพิ่มขึ้นจึงเกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าและลดการถ่ายโอนพลังงานจากบัสแรงดันต่ำอีกด้วย



รูปที่ 6.37 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า



รูปที่ 6.38 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M²C³ ที่ 1



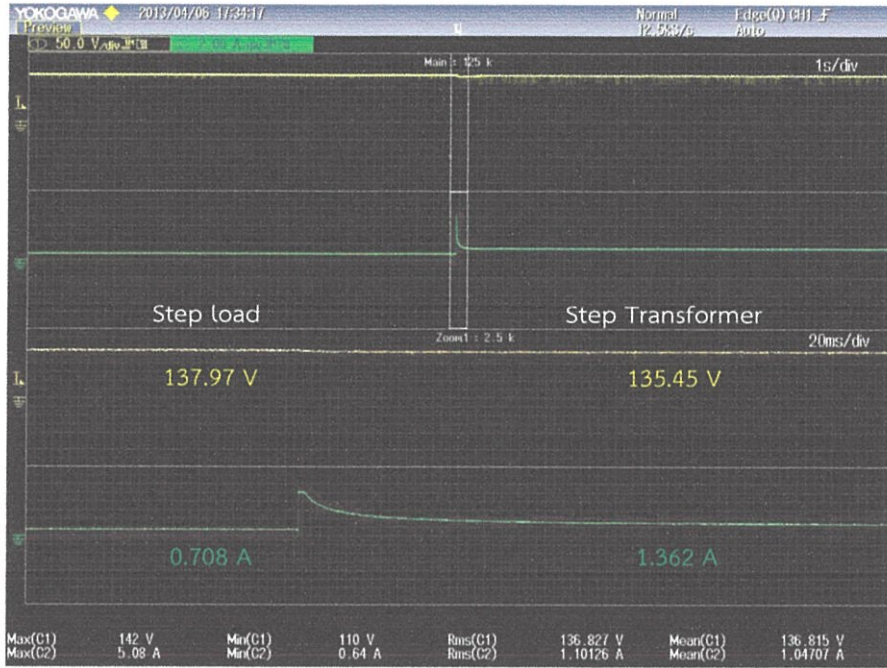
รูปที่ 6.39 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M²C³ ที่ 2



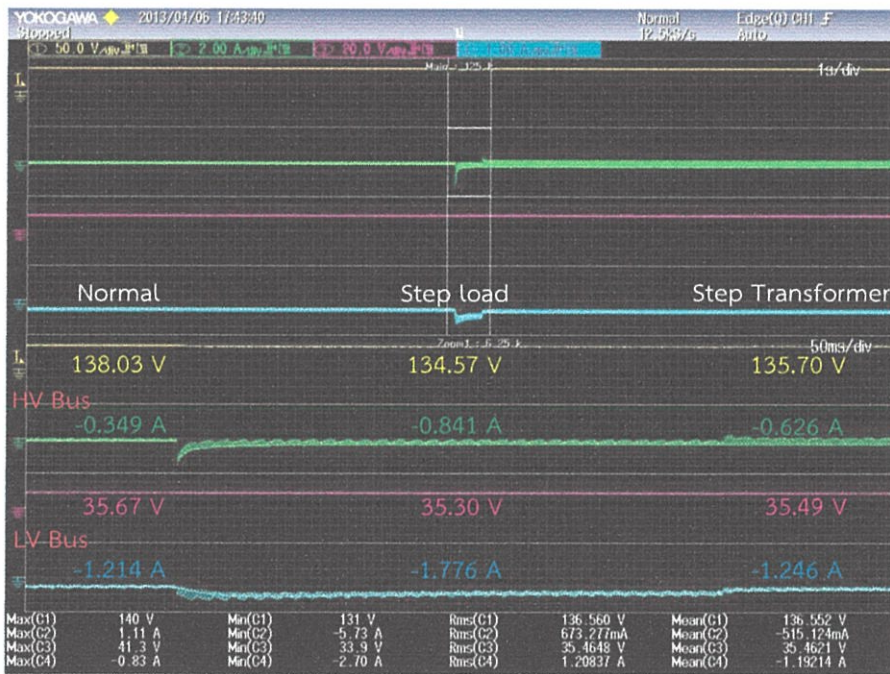
รูปที่ 6.40 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง

6.8.6 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า

ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า จะได้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้างดรูปที่ 6.41 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ดังรูปที่ 6.42 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ดังรูปที่ 6.43 และแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 6.44 จะเห็นว่าในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้านี้บัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 จะมีการถ่ายโอนพลังงานมากกว่าปกติทั้งที่มีภาระไฟฟ้าปกติและมีการเพิ่มภาระไฟฟ้าเข้ามา ซึ่งเมื่อทำการเชื่อมต่อหม้อแปลงความถี่สูงจะทำให้ลดการทำงานของบัสแรงดันต่ำลงเนื่องจากการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2



รูปที่ 6.41 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า



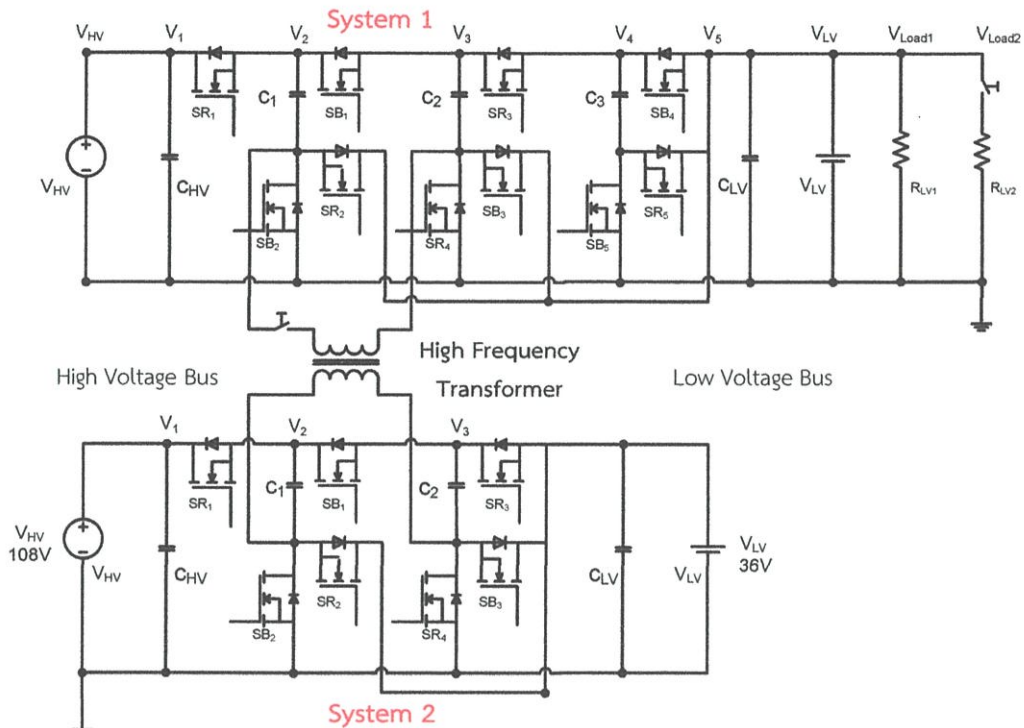
รูปที่ 6.42 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M²C³ ที่ 1



รูปที่ 6.43 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M²C³ ที่ 2



รูปที่ 6.44 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง



รูปที่ 6.45 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าที่มีชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลไม่เท่ากันขณะเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำ

6.9 การทดสอบวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า ในขณะที่ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลมีจำนวนที่ไม่เท่ากันที่เชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำ

6.9.1 วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าในขณะที่ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลมีจำนวนที่ไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นรูปแบบของการนำวงจร M^2C^3 ไปประยุกต์ให้กับระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กมีความหลากหลายของแรงดันไฟฟ้าในขณะที่มีการนำไปใช้งานจริง

6.9.2 วิธีการทดสอบ

การทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าที่มีชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลไม่เท่ากันและเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำดังรูปที่ 6.45 ซึ่งวิธีการทดสอบจะเหมือนกับหัวข้อ 6.5 จะเริ่มจากการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำให้กับชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ที่ทำงานอยู่ในรูปแบบลดและเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า หลังจากนั้นจึงทำการเพิ่มภาระไฟฟ้าให้มีขนาดสูงขึ้น และทำการเชื่อมต่อชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลไม่เท่ากัน

6.9.3 ขั้นตอนในการทดสอบ

- ทำการจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงให้กับวงจรควบคุม คือ วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรขับสัญญาณ พร้อมทั้งวัดสัญญาณที่สร้างจากวงจรควบคุม
- ทำการเชื่อมต่อบัสแรงดันต่ำในแต่ละชุดวงจร M^2C^3 พร้อมทั้งวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล ซึ่งต้องมีแรงดันไฟฟ้าตามอัตราส่วนการแปลงผัน
- ทำการเชื่อมต่อบัสแรงดันสูงในแต่ละชุดวงจร M^2C^3 ที่มีแรงดันไฟฟ้าตามอัตราส่วนการแปลงผันของวงจร M^2C^3
- ทำการวัดแรงดันไฟฟ้า ความถี่ และมุมเฟสของหม้อแปลงความถี่สูงทั้งสองฝั่ง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณที่ฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงกับขั้วลบของตัวเก็บประจุของชุดวงจรที่ 1 ก่อนที่จะทำการเชื่อมต่อระหว่างสองชุดวงจร
- ทำการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำที่มีขนาด 200 W และเพิ่มภาระไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับ 400 W แล้วจึงทำการเชื่อมต่อชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ที่มีชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลที่ไม่เท่ากันผ่านหม้อแปลงความถี่สูง โดยที่ทำการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าในแต่ละบัสแรงดันในทุกขั้นตอน

6.9.4 การทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า

การทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำที่ 2 ชุดวงจรมีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ไม่เท่ากันตามขั้นตอนการทดสอบนั้น ที่ซึ่งเป็นการทดสอบในขณะที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 มีการทำงานในรูปแบบลดและเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้านั้น จะส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานภายในชุดวงจร M^2C^3 ในสถานะไดนามิก

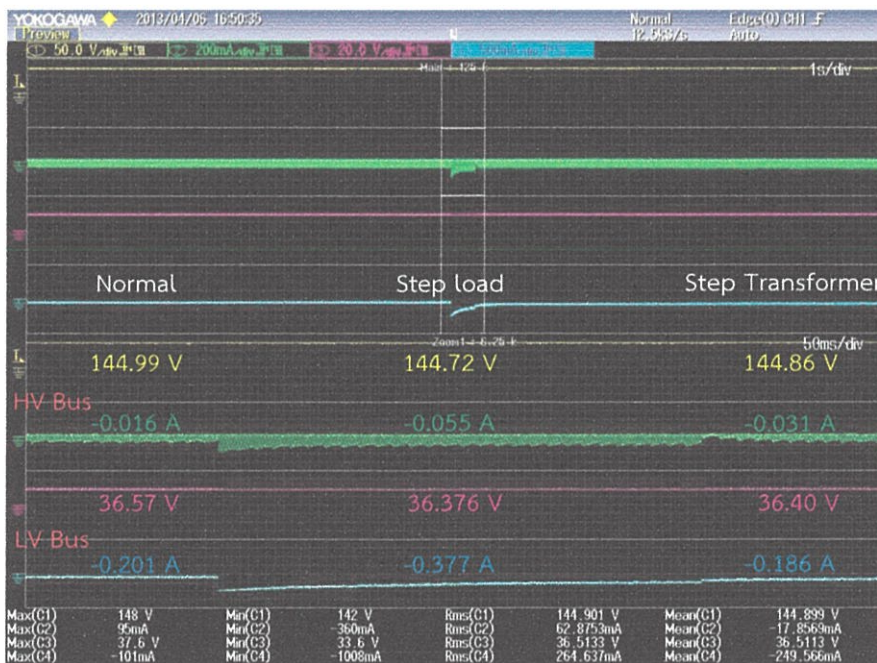
6.9.5 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า

ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า จะได้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้างดรูปที่ 6.46 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ดังรูปที่ 6.47 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ดังรูปที่ 6.48 และแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 6.49 จะเห็นว่าในขณะที่มีภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงในขั้นตอนที่ 1 นั้นจะทำให้เกิดการช่วยกันถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากทั้งสองบัสแรงดัน เมื่อเพิ่มภาระไฟฟ้าให้กับบัสแรงดันสูงส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงมีค่าลดลงใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าของบัสแรงดันต่ำตามอัตราส่วนการแปลงผันทำให้กระแสไฟฟ้าที่ถ่ายโอนให้กับภาระไฟฟ้าจะมาจากบัสแรงดันต่ำและเมื่อทำการ

เชื่อมต่อชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจึงเกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าและลดการถ่ายโอนพลังงานจากบัสแรงดันต่ำอีกด้วย



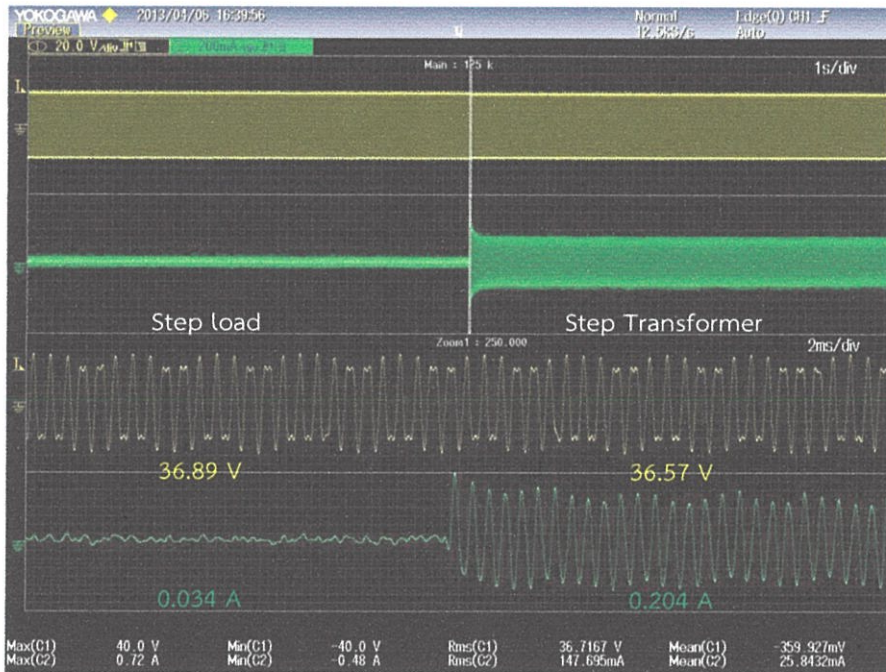
รูปที่ 6.46 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า



รูปที่ 6.47 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1



รูปที่ 6.48 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M²C³ ที่ 2



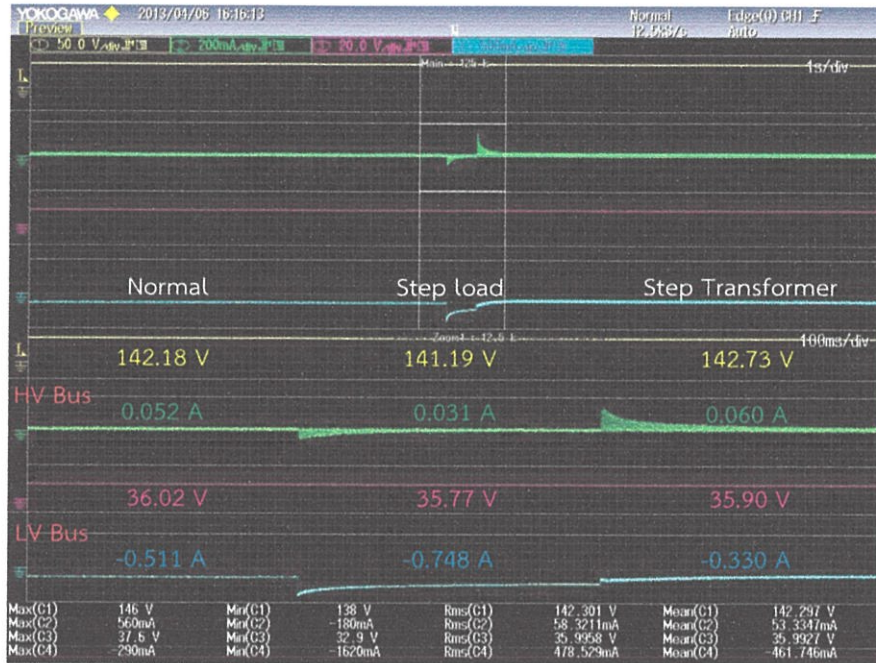
รูปที่ 6.49 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง

6.9.6 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า

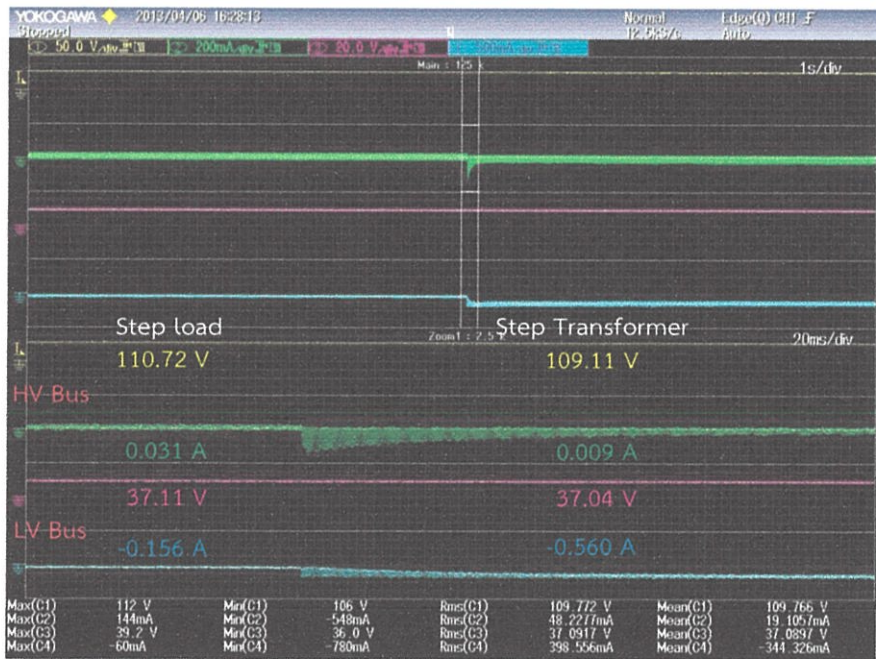
ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีจำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า จะได้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้างดรูปที่ 6.50 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ดังรูปที่ 6.51 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ดังรูปที่ 6.52 และแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 6.53 จะเห็นว่าชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าขณะที่ทำการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าในขั้นตอนที่ 1 จะเห็นว่าบัสแรงดันสูงของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำตัวเป็นภาระไฟฟ้าในวงจร เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าของบัสแรงดันสูงของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 มีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำตามอัตราส่วนการแปลงผัน ซึ่งดูได้จากกระแสไฟฟ้าที่มีค่าเป็นบวกในทุกขั้นตอนการทำงานเสมือนบัสแรงดันสูงเป็นภาระไฟฟ้าอีกจุดหนึ่ง



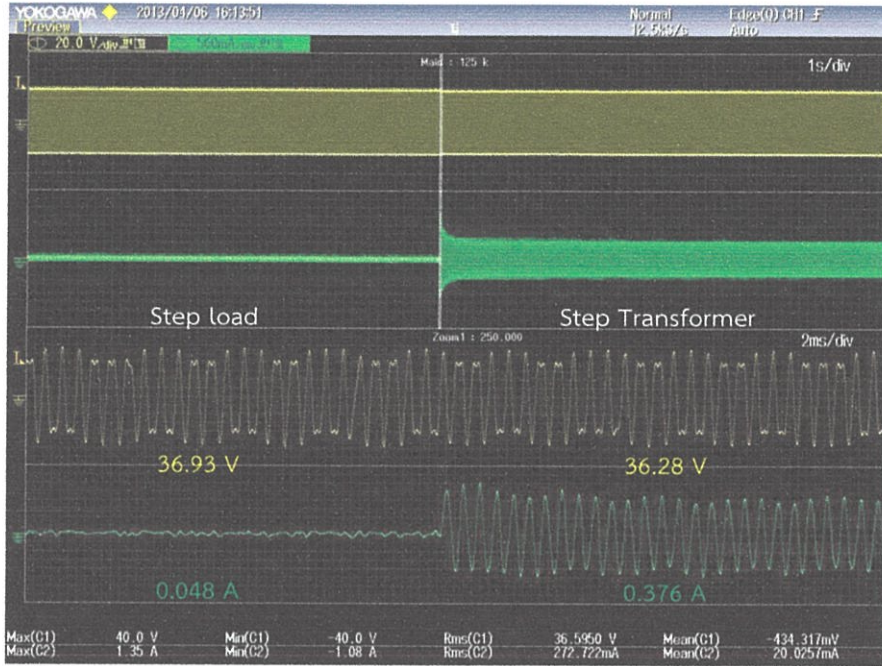
รูปที่ 6.50 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า



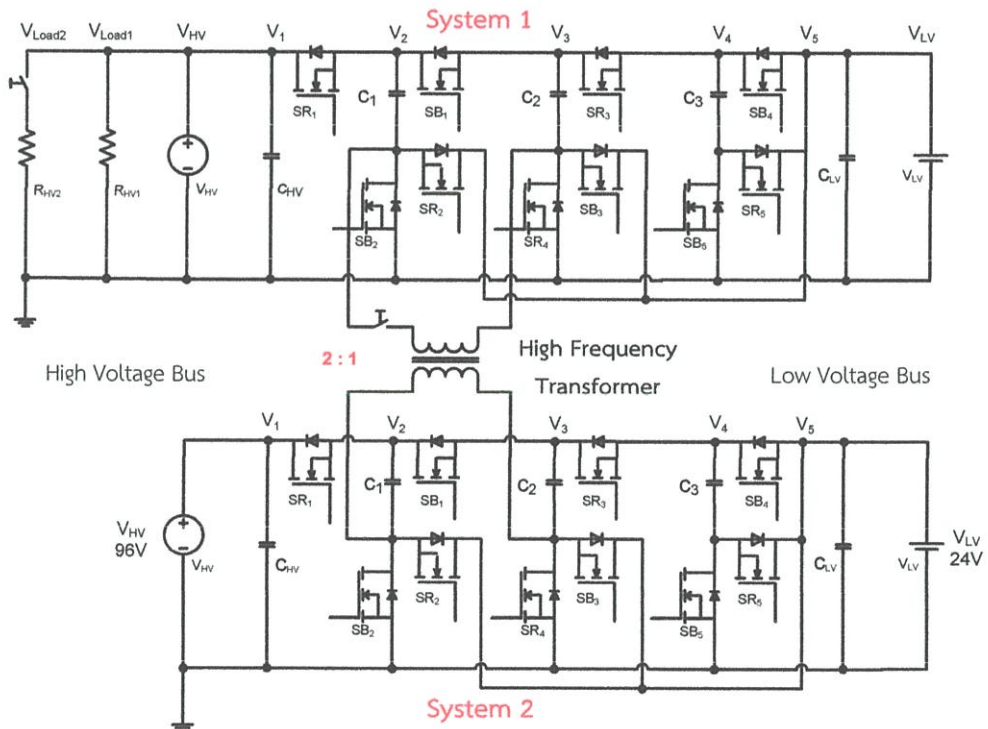
รูปที่ 6.51 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M²C³ ที่ 1



รูปที่ 6.52 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M²C³ ที่ 2



รูปที่ 6.53 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง



รูปที่ 6.54 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าที่อัตราส่วนหม้อแปลงไม่เท่ากับขณะที่ยังเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูง

6.10 การทดสอบวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโอดทางไฟฟ้า ในขณะที่อัตราส่วนหม้อแปลงความถี่สูงไม่เท่ากันขณะที่มีการะไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่กับบัสแรงดันสูง

6.10.1 วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโอดทางไฟฟ้าในขณะที่อัตราส่วนหม้อแปลงความถี่สูงไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของการนำวงจร M^2C^3 ไปประยุกต์ให้กับระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กให้มีความหลากหลายของแรงดันไฟฟ้าในขณะที่มีการนำไปใช้งานจริง

6.10.2 วิธีการทดสอบ

วิธีการทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโอดทางไฟฟ้าในขณะที่อัตราส่วนไม่เท่ากันที่เชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงดังรูปที่ 6.54 จะมีวิธีการทดสอบเหมือนกับหัวข้อ 6.4 จะเริ่มจากการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำให้กับชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ที่ทำงานอยู่ในรูปแบบลดและเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า หลังจากนั้นจึงทำการเพิ่มภาระไฟฟ้าให้มีขนาดสูงขึ้น และทำการเชื่อมต่อชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ที่มีอัตราส่วนหม้อแปลงไม่เท่ากัน

6.10.3 ขั้นตอนในการทดสอบ

- ทำการจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงให้กับวงจรควบคุม คือ วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรขับสัญญาณ พร้อมทั้งวัดสัญญาณที่สร้างจากวงจรควบคุม
- ทำการเชื่อมต่อบัสแรงดันต่ำในแต่ละชุดวงจร M^2C^3 พร้อมทั้งวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล ซึ่งต้องมีแรงดันไฟฟ้าตามอัตราส่วนการแปลงผัน
- ทำการเชื่อมต่อบัสแรงดันสูงในแต่ละชุดวงจร M^2C^3 ที่มีแรงดันไฟฟ้าตามอัตราส่วนการแปลงผันของวงจร M^2C^3
- ทำการวัดแรงดันไฟฟ้า ความถี่ และมุมเฟสของหม้อแปลงความถี่สูงทั้งสองฝั่ง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณที่ฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงกับขั้วลบของตัวเก็บประจุของชุดวงจรที่ 1 ก่อนที่จะทำการเชื่อมต่อระหว่างสองชุดวงจร
- ทำการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงที่มีขนาด 200 W และเพิ่มภาระไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับ 400 W แล้วจึงทำการเชื่อมต่อชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ที่มีอัตราส่วนหม้อแปลงที่ไม่เท่ากันผ่านหม้อแปลงความถี่สูง โดยที่ทำการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าในแต่ละบัสแรงดันในทุกขั้นตอน

6.10.4 การทดสอบวงจร M^2C^3 ที่อัตราส่วนหม้อแปลงความถี่สูงไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า

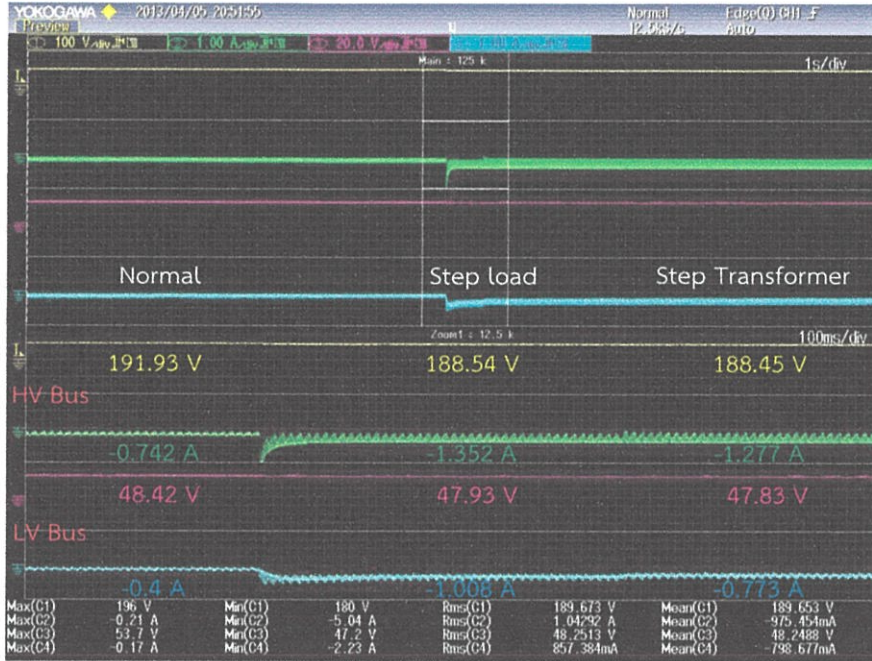
ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงตามขั้นตอนการทดสอบนั้น ที่ซึ่งเป็นการทดสอบในขณะที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 มีการทำงานในรูปแบบลดและเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานภายในชุดวงจร M^2C^3 ทั้งสองรูปแบบในสถานะไดนามิก

6.10.5 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่อัตราส่วนหม้อแปลงความถี่สูงไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า

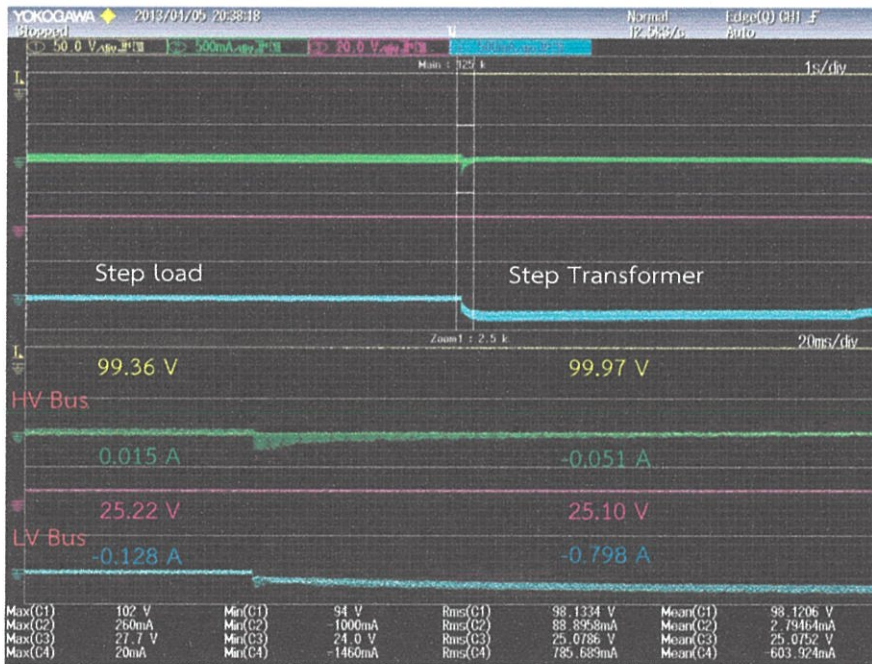
ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า จะได้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าบัสแรงดันสูงดังรูปที่ 6.55 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ดังรูปที่ 6.56 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ดังรูปที่ 6.57 และแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 6.58 จะเห็นว่าในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้านั้นภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงจะรับพลังงานจากบัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำ ซึ่งดูได้จากรูปต่างๆของกระแสไฟฟ้าจะมีค่าติดลบทั้งหมดแสดงว่ามีการถ่ายโอนพลังงานออกจากบัสแรงดัน และเมื่อทำการเชื่อมต่อหม้อแปลงความถี่สูงกระแสไฟฟ้าของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 จะมีขนาดที่ลดลงและหม้อแปลงความถี่สูงจะมีกระแสไฟฟ้าที่สูงมากขึ้น แสดงว่ามีการถ่ายโอนพลังงานจากชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 มาช่วยถ่ายโอนให้กับภาระไฟฟ้าให้มีความคงที่ต่อเนื่อง



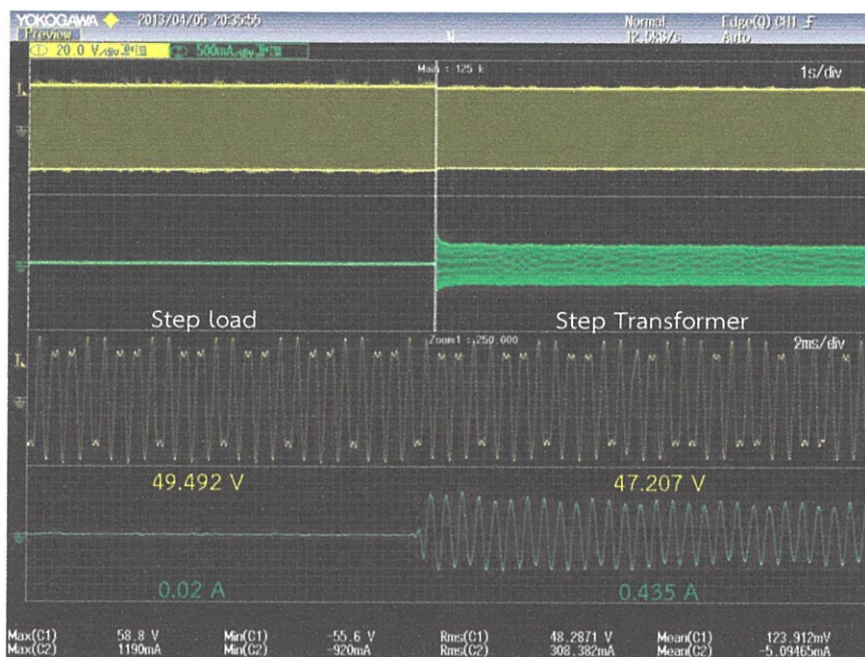
รูปที่ 6.55 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า



รูปที่ 6.56 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M²C³ ที่ 1



รูปที่ 6.57 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M²C³ ที่ 2



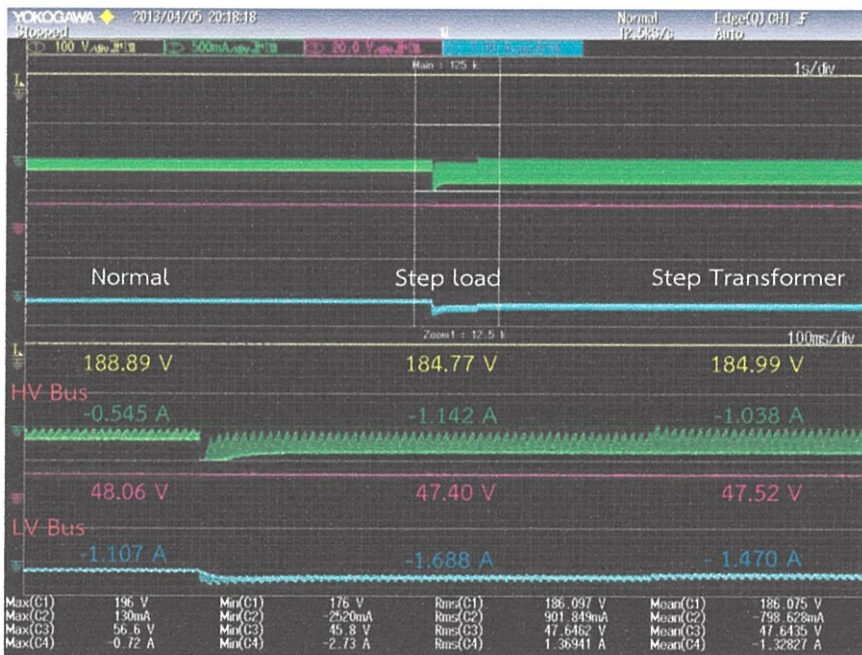
รูปที่ 6.58 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง

6.10.6 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่อัตราส่วนหม้อแปลงความถี่สูงไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า

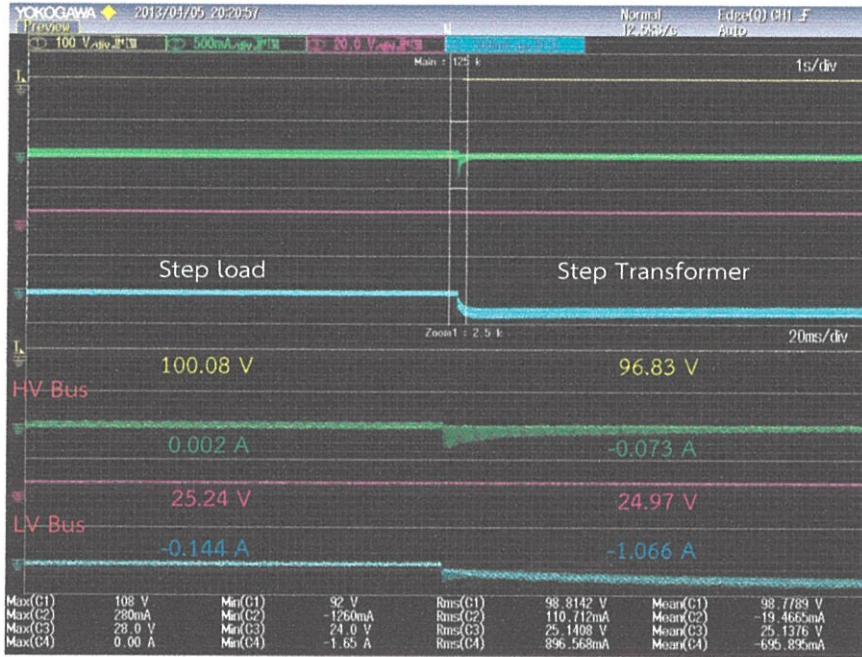
ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า จะได้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าแรงดันสูงดังรูปที่ 6.59 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ดังรูปที่ 6.60 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ดังรูปที่ 6.61 และแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 6.62 จะเห็นว่าในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าในขั้นตอนที่ 1 จะมีกระแสไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำสูงกว่าในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า เมื่อเพิ่มภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงก็จะทำให้มีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่างๆเพิ่มสูงขึ้น และทำการเชื่อมต่อหม้อแปลงความถี่สูงจะสามารถลดการถ่ายโอนพลังงานจากชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ซึ่งกระแสไฟฟ้าในแต่ละบัสแรงดันจะมีขนาดลดลง



รูปที่ 6.59 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า



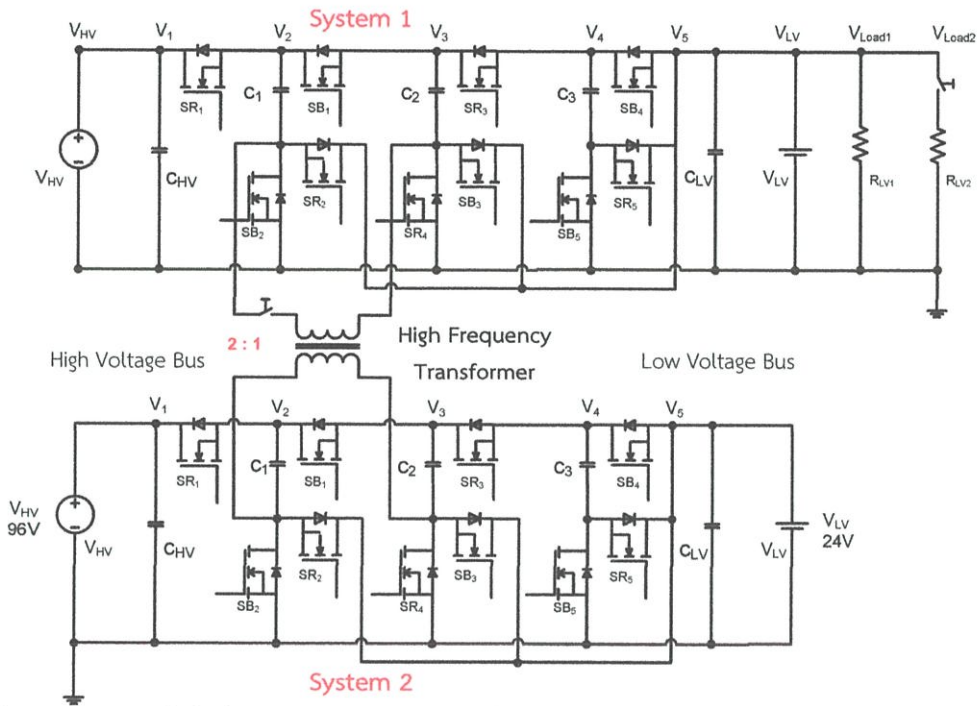
รูปที่ 6.60 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1



รูปที่ 6.61 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดวงจร M²C³ ที่ 2



รูปที่ 6.62 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง



รูปที่ 6.63 วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าที่อัตราส่วนหม้อแปลงไม่เท่ากันขณะเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำ

6.11 การทดสอบวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้า ในขณะที่อัตราส่วนหม้อแปลงความถี่สูงไม่เท่ากันขณะที่มีภาระไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่กับบัสแรงดันต่ำ

6.11.1 วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าในขณะที่อัตราส่วนหม้อแปลงความถี่สูงไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของการนำวงจร M^2C^3 ไปประยุกต์ให้กับระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กให้มีความหลากหลายของแรงดันไฟฟ้าในขณะที่มีการนำไปใช้งานจริง

6.11.2 วิธีการทดสอบ

วิธีการทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าในขณะที่อัตราส่วนไม่เท่ากันที่เชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำดังรูปที่ 6.63 จะมีวิธีการทดสอบเหมือนกับหัวข้อ 6.5 จะเริ่มจากการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำให้กับชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ที่ทำงานอยู่ในรูปแบบลดและเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า หลังจากนั้นจึงทำการเพิ่มภาระไฟฟ้าให้มีขนาดสูงขึ้น และทำการเชื่อมต่อชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ที่มีอัตราส่วนหม้อแปลงไม่เท่ากัน

6.11.3 ขั้นตอนในการทดสอบ

- ทำการจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงให้กับวงจรควบคุม คือ วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรขับสัญญาณ พร้อมทั้งวัดสัญญาณที่สร้างจากวงจรควบคุม
- ทำการเชื่อมต่อบัสแรงดันต่ำในแต่ละชุดวงจร M^2C^3 พร้อมทั้งวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล ซึ่งต้องมีแรงดันไฟฟ้าตามอัตราส่วนการแปลงผัน
- ทำการเชื่อมต่อบัสแรงดันสูงในแต่ละชุดวงจร M^2C^3 ที่มีแรงดันไฟฟ้าตามอัตราส่วนการแปลงผันของวงจร M^2C^3
- ทำการวัดแรงดันไฟฟ้า ความถี่ และมุมเฟสของหม้อแปลงความถี่สูงทั้งสองฝั่ง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณที่ฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงกับขั้วลบของตัวเก็บประจุของชุดวงจรที่ 1 ก่อนที่จะทำการเชื่อมต่อระหว่างสองชุดวงจร
- ทำการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำที่มีขนาด 200 W และเพิ่มภาระไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับ 400 W แล้วจึงทำการเชื่อมต่อชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ที่มีอัตราส่วนหม้อแปลงที่ไม่เท่ากันผ่านหม้อแปลงความถี่สูง โดยที่ทำการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าในแต่ละบัสแรงดันในทุกขั้นตอน

6.11.4 การทดสอบวงจร M^2C^3 ที่อัตราส่วนหม้อแปลงความถี่สูงไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า

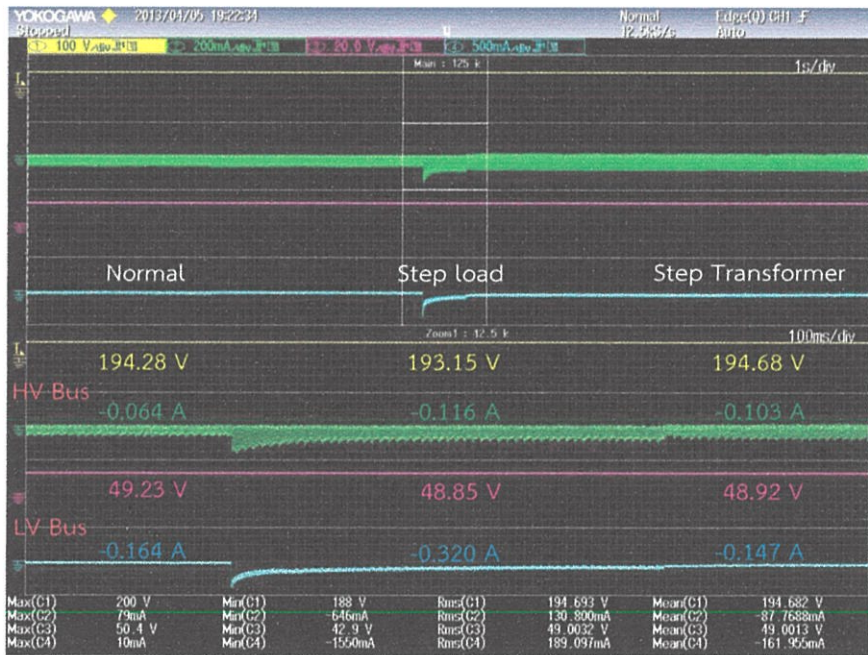
ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่มีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำตามขั้นตอนการทดสอบนั้น ที่ซึ่งเป็นการทดสอบในขณะที่บัสแรงดันสูงของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 มีการทำงานในรูปแบบลดและเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานภายในชุดวงจร M^2C^3 ทั้งสองรูปแบบในสถานะไดนามิก

6.11.5 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่อัตราส่วนหม้อแปลงความถี่สูงไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า

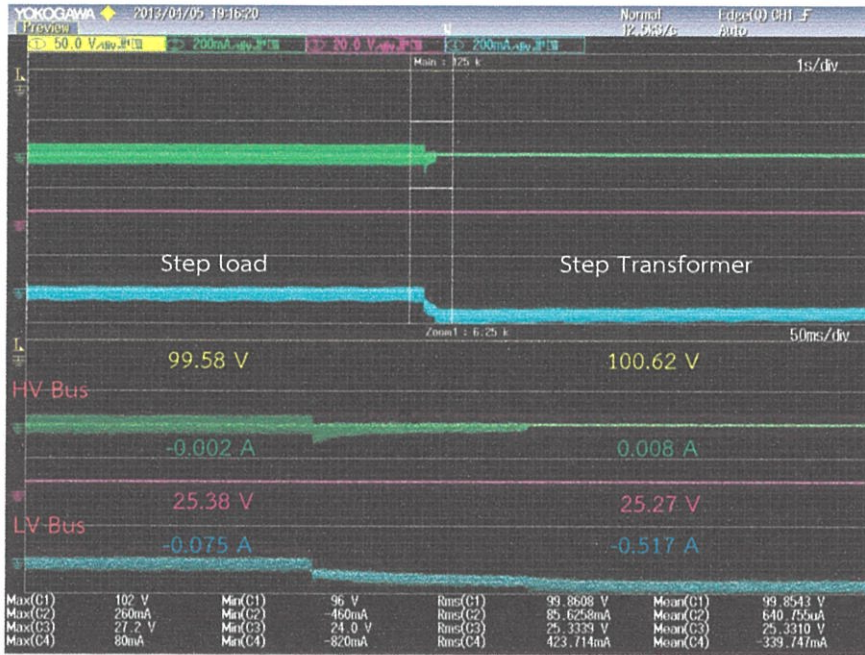
ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้า จะได้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าบัสแรงดันต่ำดังรูปที่ 6.64 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ดังรูปที่ 6.65 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ดังรูปที่ 6.66 และแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 6.67 จะเห็นว่าในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้านั้นบัสแรงดันต่ำจะมีการถ่ายโอนพลังงานที่น้อยกว่ารูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากมีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงไปยังบัสแรงดันต่ำ ซึ่งเมื่อทำการเชื่อมต่อหม้อแปลงความถี่สูงจะเกิดการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า แต่ในขณะที่ทำการทดสอบแรงดันที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกับชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 จึงมีการถ่ายโอนพลังงานที่น้อยมาก



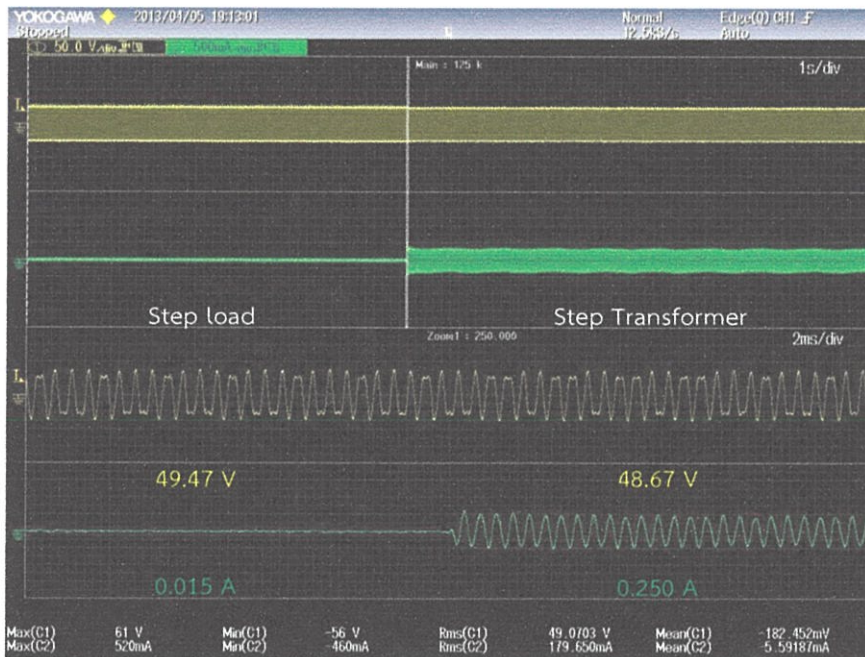
รูปที่ 6.64 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า



รูปที่ 6.65 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1



รูปที่ 6.66 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชุดวงจร M²C³ ที่ 2



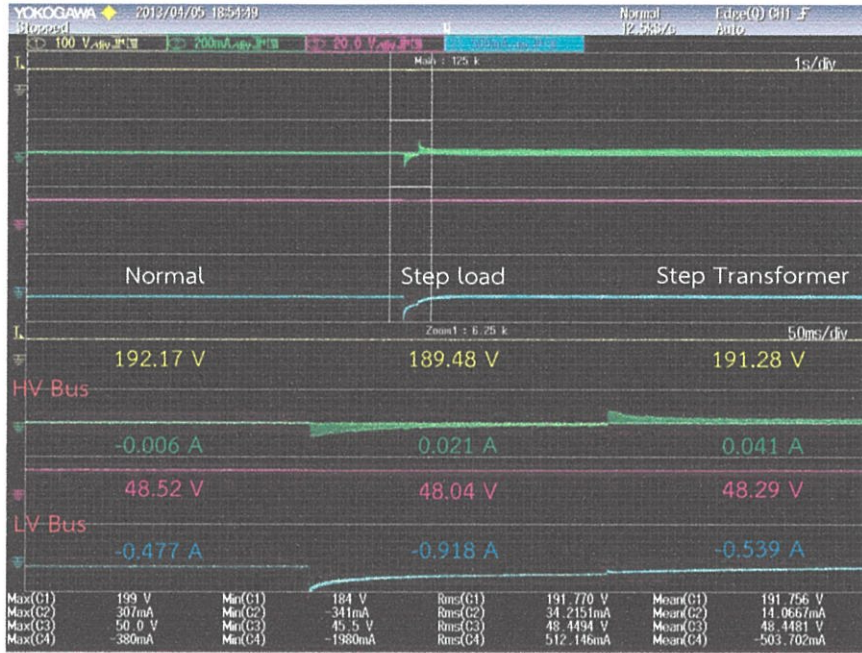
รูปที่ 6.67 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง

6.11.6 ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่อัตราส่วนหม้อแปลงความถี่สูงไม่เท่ากันในขณะที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า

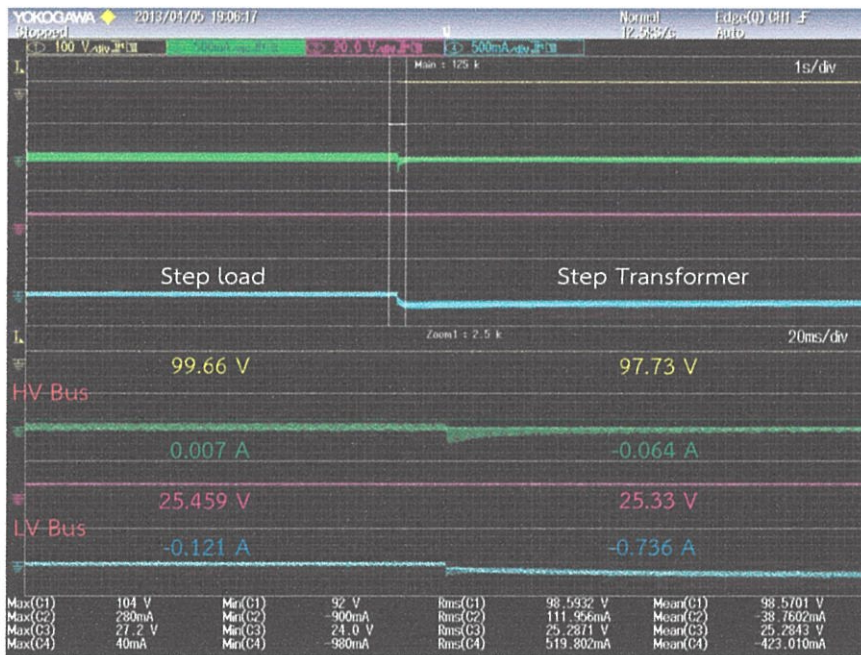
ผลการทดสอบวงจร M^2C^3 ที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า จะได้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าแรงดันสูงดังรูปที่ 6.68 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ดังรูปที่ 6.69 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 2 ดังรูปที่ 6.70 และแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงดังรูปที่ 6.71 จะเห็นว่าในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้านั้น ภาระไฟฟ้าที่บัสแรงดันต่ำจะได้รับพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 เท่านั้น ซึ่งเมื่อทำการเพิ่มภาระไฟฟ้าจะส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานจากบัสแรงดันต่ำมากขึ้นและเมื่อทำการเชื่อมต่อหม้อแปลงความถี่สูงจึงทำให้ลดการถ่ายโอนพลังงานที่บัสแรงดันต่ำของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1



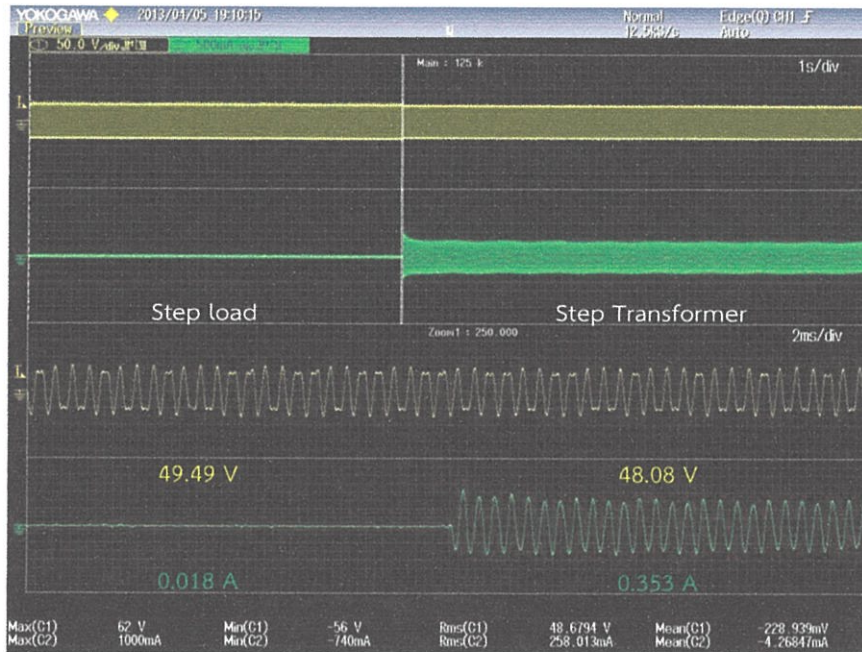
รูปที่ 6.68 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้า



รูปที่ 6.69 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดวงจร M²C³ ที่ 1



รูปที่ 6.70 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดวงจร M²C³ ที่ 2



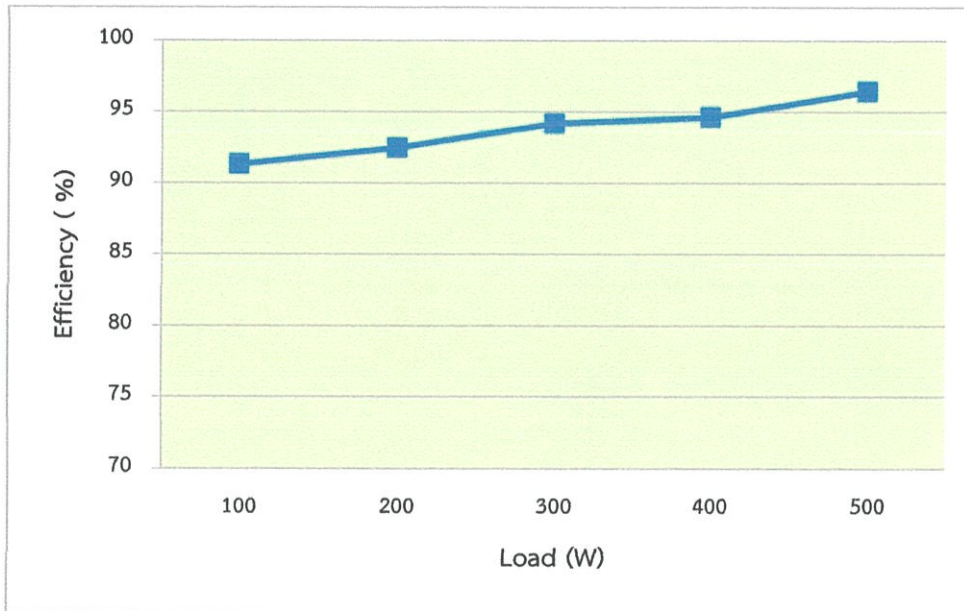
รูปที่ 6.71 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง

6.12 สรุป

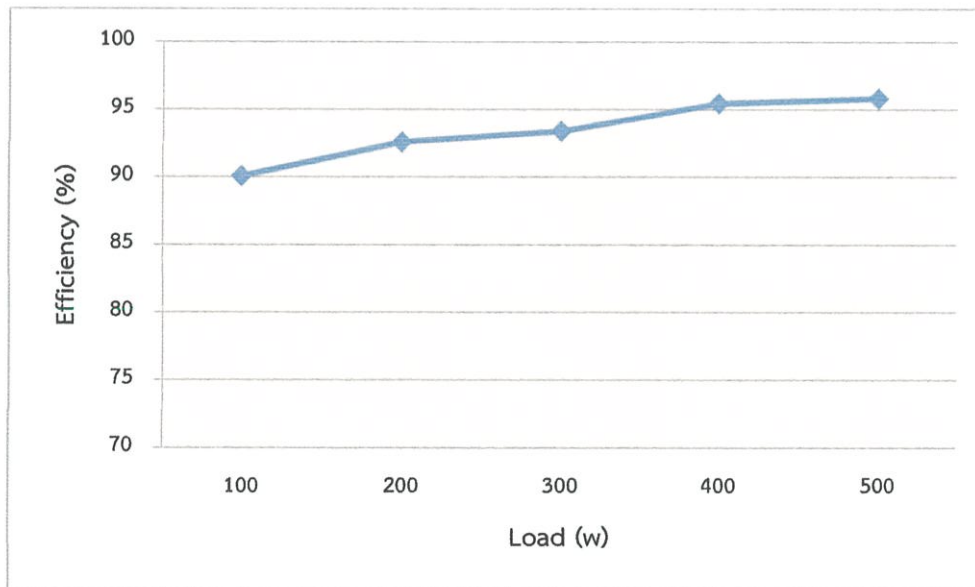
การทดสอบเครื่องต้นแบบชุดวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าในระบบผลิตไฟฟ้า กระแสตรงขนาดเล็กนั้นจะทำการทดสอบทั้งที่เป็นระบบแบบปกติและการนำชุดวงจร M^2C^3 ไปประยุกต์ อาทิเช่น จำนวนชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลไม่เท่ากันและอัตราส่วนของหม้อแปลงความถี่สูงที่ไม่เท่ากันเพื่อเพิ่มความหลากหลายต่อการนำเชื่อมต่อการไฟฟ้าที่มีหลากหลายแรงดันไฟฟ้า โดยที่ในแต่ละรูปแบบจะแบ่งการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ออกเป็น 2 รูปแบบคือ การทำงานในรูปแบบลดและเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานของบัสแรงดันสูงและบัสแรงดันต่ำที่แตกต่างกัน ซึ่งในการทดสอบนั้นจะทำการเชื่อมต่อการไฟฟ้าในแต่ละบัสแล้วจึงทำการเพิ่มภาระไฟฟ้าเข้ามา หลังจากนั้นจึงทำการเชื่อมต่อหม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งจากการทดสอบจะเห็นว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในทุกบัสแรงดันไฟฟ้าเพื่อรักษากำลังไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าให้มีความคงที่ต่อเนื่อง อีกทั้งยังทำการทดสอบวงจร M^2C^3 ด้วยการเชื่อมต่อการไฟฟ้าทั้งสองบัสของชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 และทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 อย่างทันทีทันใด ซึ่งจะเห็นว่า การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าภายในชุดวงจร M^2C^3 นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ทันที่ตามหลักการของการสมดุลพลังงานไฟฟ้า

เมื่อนำค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าขณะชุดวงจร M^2C^3 มีการแยกโหนดทางไฟฟ้าและชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ทำงานในรูปแบบต่างๆ มาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพจะเห็นว่า ประสิทธิภาพการทำงานในรูปแบบต่างๆ อาทิเช่น แบบปกติ ชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลไม่เท่ากันและอัตราส่วนของหม้อแปลงไม่เท่ากันนั้น จะให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันในขณะที่เชื่อมต่อการไฟฟ้าที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยที่ในรูปแบบลดระดับ

แรงดันไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 91-97% ดังรูปที่ 6.72 รูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 90-96% ดังรูปที่ 6.73 และประสิทธิภาพของหม้อแปลงความถี่สูงจะเท่ากับ 84.31%



รูปที่ 6.72 ประสิทธิภาพในรูปแบบลดระดับแรงดัน



รูปที่ 6.73 ประสิทธิภาพในรูปแบบเพิ่มระดับแรงดัน

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าเพื่อประยุกต์ใช้งานในระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่หลากหลายภาระไฟฟ้า วงจร M^2C^3 ใช้หลักการของการสมดุลพลังงานไฟฟ้าและการสะสมและคายประจุของตัวเก็บประจุจากการทำงานของสวิตช์กำลังส่งผลให้เกิดการอนุกรมและขนานกันของตัวเก็บประจุในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์ โมดูลทำให้วงจรนี้สามารถเพิ่มและลดระดับแรงดันไฟฟ้าได้ตามอัตราส่วนการแปลงผันอีกทั้งตัวเก็บประจุในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลจะมีแรงดันไฟฟ้าที่หลากหลายระดับแรงดัน ที่ซึ่งทำให้วงจรนี้ทำงานเสมือนเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถเลือกระดับแรงดันไฟฟ้าได้ (Tap-Changed DC Transformer)

วงจร M^2C^3 ยังสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้โดยการเชื่อมต่อที่ขั้วลบของตัวเก็บประจุในแต่ละชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูล ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงนำแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตได้มาเชื่อมต่อกับหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อให้วงจรสามารถถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าระหว่างกัน ส่งผลให้วงจร M^2C^3 สามารถทำงานเป็นแหล่งสำรองพลังงานไฟฟ้า (Back-up system) ทำให้วงจรมีข้อเด่นในเรื่องของเสถียรภาพเนื่องจากถ้ามีชุดวงจรใดเกิดความผิดปกติ วงจรอีกชุดหนึ่งจะถ่ายโอนพลังงานผ่านหม้อแปลงความถี่สูงมาช่วยจ่ายให้กับภาระไฟฟ้าทำให้แรงดันไฟฟ้ามีความคงที่ และคุณสมบัติของหม้อแปลงยังแยกกราวด์ออกจากกันส่งผลให้ไม่เกิดความเสียหายระหว่างชุดวงจร ซึ่งเมื่อรวมจากข้อเด่นของวงจร M^2C^3 อาทิเช่น สามารถถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าได้สองทิศทาง ควบคุมการทำงานง่าย และสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้หลากหลายระดับ จึงทำให้วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้ามีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก

การจำลองและทดสอบของวงจร M^2C^3 นั้นจะจำลองรูปแบบของสภาวะไดนามิก (Dynamic State) ซึ่งจะมีการเชื่อมต่อภาระไฟฟ้าและหม้อแปลงความถี่สูงตามลำดับ เพื่อศึกษาการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงที่บัสแรงดันต่างๆรวมถึงที่หม้อแปลงความถี่สูง ที่มีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากชุดวงจรที่ 2 ไปยังชุดวงจรที่ 1 ตามหลักการสมดุลพลังงานไฟฟ้า ซึ่งหม้อแปลงความถี่สูงจะมีประสิทธิภาพเท่ากับ 84.31% และประสิทธิภาพของชุดวงจร M^2C^3 ในรูปแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าประมาณ 91-97% และรูปแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าประมาณ 90-96%

7.2 ข้อเสนอแนะ

วงจร M^2C^3 จะต้องทำการเชื่อมต่อบัสแรงดันต่ำก่อนเพื่อให้ตัวเก็บประจุมีแรงดันไฟฟ้าตามอัตราส่วนการแปลงผัน ซึ่งในการเชื่อมต่อนั้นจะต้องระวังเรื่องของกระแสพุ่งเกิน (Inrush Current) ในขณะทำการชิ่งโครนัสบัสแรงดันไฟฟ้า และในการบายพาสชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลนั้นจะต้องมีชุดสำรองและอุปกรณ์ตรวจจับความผิดปกติเพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงชุดคอนเวอร์เตอร์โมดูลให้ถูกต้องเหมาะสม และในการเลือกใช้อุปกรณ์ควรเลือกให้มีขนาดของอุปกรณ์ให้มีความเหมาะสมเพื่อให้วงจร M^2C^3 มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

ในการทดสอบเครื่องต้นแบบนั้นได้เกิดการรบกวนของสนามแม่เหล็กขึ้น EMI (Electro Magnetic Interference) ที่มาจากการใช้ของวงจร M^2C^3 ในย่านความถี่สูง ซึ่งการทดสอบได้ทำการแก้ปัญหาเบื้องต้นด้วยการเลือกอุปกรณ์ที่มีค่าพารามิเตอร์แฝงให้น้อยที่สุดและทำการตีเกลียวและลดขนาดของสายตัวนำต่างๆ เพื่อให้ค่า EMI มีขนาดน้อยที่สุดและวงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้านั้นจะต้องศึกษาลักษณะกราฟ B-H ของหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อป้องกันการอิ่มตัวของหม้อแปลงความถี่สูง

ซึ่งงานวิจัยนี้ยังสามารถที่จะนำไปต่อยอดวงจรได้โดยให้วงจรสามารถทำการแก้ปัญหาคความผิดปกติได้โดยอัตโนมัติ และในการทดสอบวงจร M^2C^3 ควรนำไปใช้กับสถานที่จริงเพื่อให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานให้เหมือนกับความเป็นจริงมากที่สุด

บรรณานุกรม

- [1] S. Khomfoi, N. Praisuwanna, L.M. Tolbert, "A Hybrid Cascaded Multilevel Inverter Application for Renewable Energy Resources including a Reconfiguration Technique" **IEEE ECCE**, 2010, pp. 3998-4005, Sep. 12-16, 2010.
- [2] R. Lasseter, "Microgrid, "Proc. **IEEE Power Engineering Society Winter Meeting**, 2002, pp. 305-308.
- [3] F. Z. Peng, Y. W. Li, L. M. Tolbert, "Control and Protection of Power Electronics Interfaced Distributed Generation Systems in a Customer-Driven Microgrid," **IEEE Power and Energy Society General Meeting**, Alberta, Canada, July 26-30, 2009.
- [4] Hiroaki Kakigano, Yushi Miura, Toshifumi Ise, Ryohei Uchida, "DC Micro-grid for Super High Quality Distribution -System Configuration and Control of Distributed Generations and Energy Storage Devices," **37th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference**, Korea, 2006, pp. 3148-3154.
- [5] D. Salomonson, and A. Sannino, "Low-Voltage DC Distribution System for Commercial Power System with Sensitive Electronic Loads," **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 22, no. 3, July 2007 pp 1620-1627
- [6] Faisal H. Khan, Leon M. Tolbert, "A Multilevel Modular Capacitor-Clamped DC-DC Converter," **IEEE Transactions on Industry Applications.**, Nov./Dec. 2007. pp. 1628-1638.
- [7] 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.
- [8] 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.

- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Fang Z. Peng, Fan Zhang, "A Novel compact DC/DC converter for 42 V systems," **Power Electronics in Transportation.**, 2002. pp. 143 - 148.
- [16] 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.

- [17] 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.
- [18] Faisal H. Khan, Leon M. Tolbert, "Hybrid Electric Vehicle Power Management Solutions Based on Isolated and Nonisolated Configurations of Multilevel Modular Capacitor-Clamped Converter," **IEEE Transactions on Industry Applications.**, vol. 56, no. 8, Aug. 2009
- [19] 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.

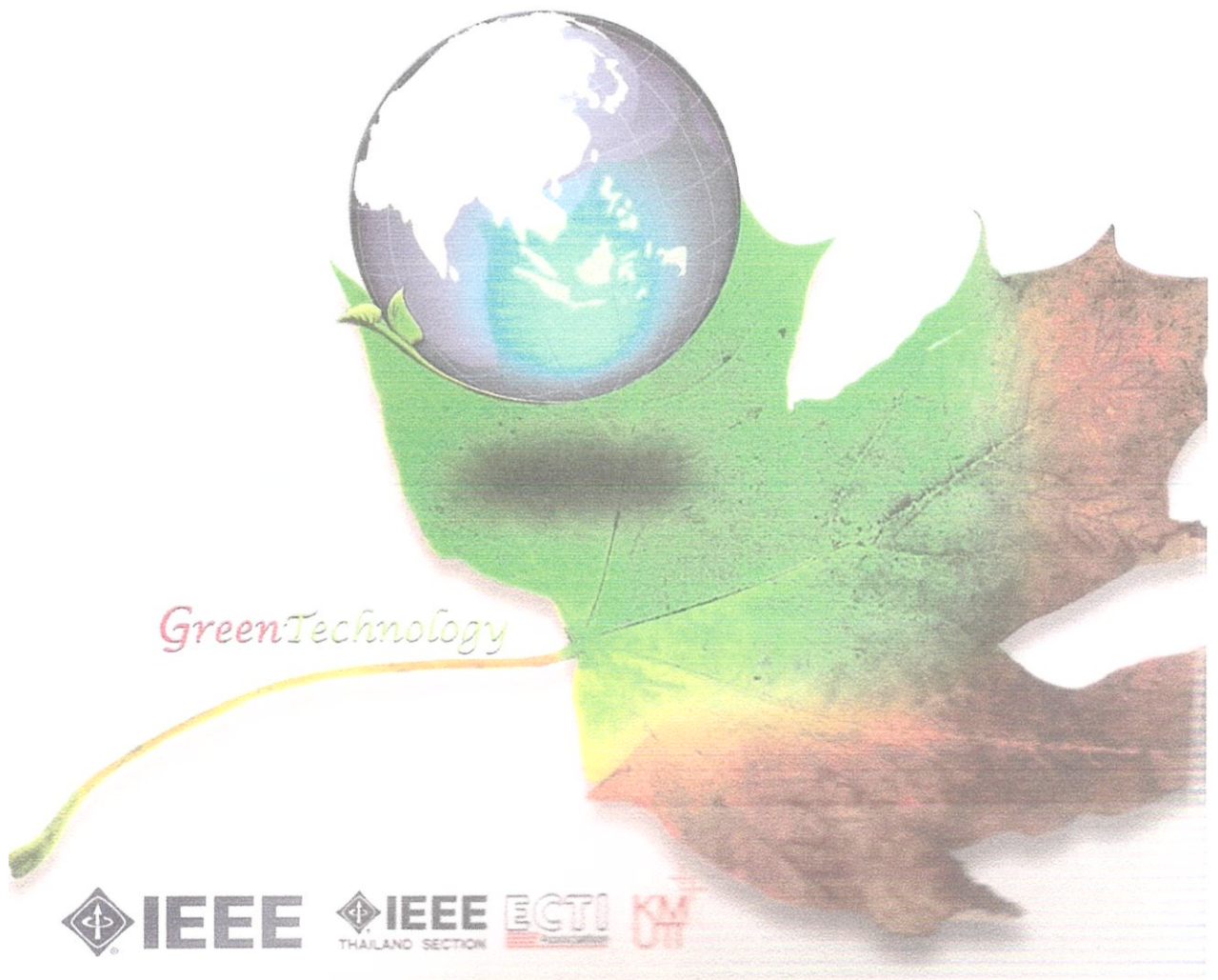
ภาคผนวก
บทความวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่



ECTI-CON
2012

BOOK OF ABSTRACTS

16-18 May 2012
Phetchaburi, THAILAND



IEEE



IEEE
THAILAND SECTION

ECTI
THAILAND SECTION

KT

A dc to dc Multilevel Modular Capacitor Clamped Converter with Electrical Grounding Isolation and Bidirectional Power Flow for a dc Microgrid Application

Pongsakorn Sintupatsuk

Electrical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
s4610608@kmitl.ac.th

Surin Khomfoi, Prapart Paisuwanna

Center of Excellence for Innovative Energy Systems
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
kkhsurin@kmitl.ac.th, kpprapar@kmitl.ac.th

Abstract

A dc to dc multilevel modular capacitor clamped converter (M^2C^3) with electrical grounding isolation and bidirectional power flow for a dc microgrid application is proposed in this paper. The principle of this particular M^2C^3 is based upon volt-sec balance of capacitors connected as a modular cell in the circuit so that the M^2C^3 can be similarly operated as a dc transformer. The M^2C^3 can be interfaced between a battery and a dc grid. Moreover, two M^2C^3 can be interfaced using a high frequency transformer in order to achieve grounding isolation and exchange energy between M^2C^3 . The transferred energy would provide the fault tolerance ability in the case of a M^2C^3 is malfunctioned. Both grounding isolation and bidirectional power flow are one of key functions for dc microgrid applications. The simulation study is performed using PSIM 9.0. Also, the 3-kw prototype is developed to investigate the notion for a dc microgrid application.

Keyword: Dc to dc converter, dc microgrid, multilevel dc to dc converter, energy storage system.

I. INTRODUCTION

Nowadays, renewable energy resources (RES) have had increasing penetration levels for grid connected distributed generation (DG). Photovoltaic, micro-turbine, wind turbine and fuel cell put forward many promising applications with high efficiency and low emissions. Together with power electronics technologies, these have delivered an important enhancement for interfacing RES and DG to a utility grid [1]. A microgrid concept is introduced in [2] to provide more system capacity and control flexibility when several RESs with different

electric behaviors are integrated in the same grid. There are two types of microgrids: dc microgrid and ac microgrid. A dc microgrid is smaller than ac microgrid and suitable for buildings applications; whereas, an ac microgrid is proper for local community grid which is required longer distribution lines. The main concept of microgrid that differs from a conventional utility grid is that the power generators are small; usually, a small DG or RES. These DGs and RESs are located close to the load (end users or consumers). Then, the generator and the load can be managed to achieve a local energy and power balance. The microgrid also offers extra degrees of freedom to optimize RESs connected to the utility grid; additionally, power quality requirements, system reliability and control flexibility would be achieved by using the microgrid concept as discussed in [3].

Power substation buildings of utilities in Thailand normally consist of large nonlinear electronic loads; for instance, protective relays, personal computers (PC), monitors, dc power supply for electronic devices, lighting, and adjustable speed drives (ASD) for air conditioning system. The electrical system used in power substation devices are a dc voltage equal to 125 V. A single phase 220 V, 50 Hz electrical system is used for PCs, monitors, and lighting; whereas, three phase 220/380 V, 50 Hz is utilized for the air conditioning system. A diesel generator set as a standby source is implemented so that net-zero energy for power substation buildings could be accomplished. The dc microgrid with superb quality distribution system for residential application has been proposed in [4], and

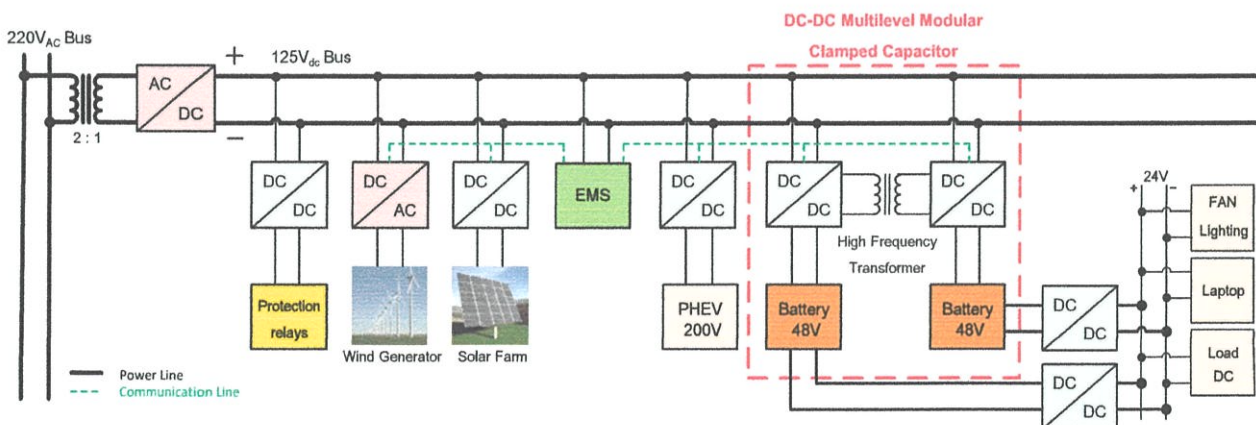


Fig. 1. A proposed dc microgrid for power substation building.

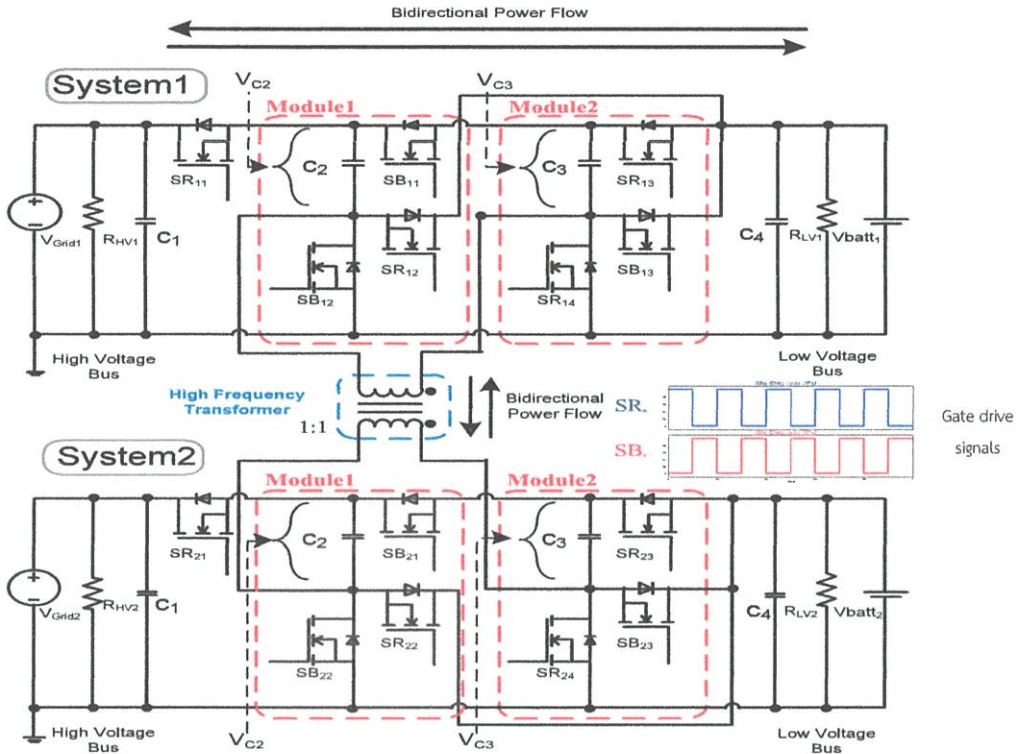


Fig. 2. A dc to dc Multilevel Modular Capacitor Clamped Converter with Electrical Grounding Isolation

the low voltage distribution system for commercial power systems with sensitive electronic loads has been investigated in [5]. For dc distribution in substation buildings, a dc to dc converter (about 10 kW) to change dc voltage levels for interfacing between a battery and a dc grid with grounding isolation is required. A possible structure for the dc microgrid applied in a substation building is illustrated in Fig. 1. As can be seen, RES such as Photovoltaic and wind turbine can be interface to the dc grid via a dc to dc converter and an ac to dc converter respectively. All dc loads such as protective relays, personal computers (PC), monitors, dc power supply for electronic devices, lighting are also connected to the dc grid. Two M²C³ are used to interface between dc grid and a set of batteries: this can be applied both storage energy and energy backup. The proposed dc microgrid may offer the premium power quality, higher reliability and higher efficiency than ac power grid as discussed in [4].

M²C³ has originally proposed by Khan [6] and the circuit operation together with ability to integrate multiple sources as clearly explained in [7]. However, limited research has focused on the application of M²C³ in dc microgrid which requires multiple dc voltage levels, electrical grounding isolation and bidirectional power flow functions. Therefore, M²C³ with electrical grounding isolation and bidirectional power flow for a dc microgrid application is developed in this paper. Both simulation and experimental results are performed to investigate the nation of use a M²C³ in a dc microgrid.

II. CIRCUIT OPERATION OF M²C³

The configuration of M²C³ is illustrated in Fig. 2. As can be seen, M²C³ consists of three power switches and a capacitor connected as a module. The voltage levels can be step-up or step-down by connecting a number of modules in series as the relationship in (1). With a nature of a capacitor, volt-sec area during charge and discharge is equal; therefore, gate drive signals of SRs and SBs are out of phase with 0.5 duty cycle. With this gate drive signals, the current will flow to the side that the voltage is lower than the expected voltage level. For instance, the 48 V in battery side and 144 V for the grid side with three conversion ratio (k) are used in M²C³. If the grid side has a voltage drop, the current will automatically flow to the grid side to supply energy to the grid: this will be the same phenomenal for the battery side. The current in M²C³ will not flow in the circuit if the voltage level is equal to the expected voltage level. One can see that M²C³ is operating like a dc transformer: the voltage level can be change with a turn ratio, but the power is equal with the both primary and secondary sides. In addition, a couple M²C³ can be interfaced via a high frequency transformer as shown in Fig. 2. This function offers both the fault tolerance and electrical grounding isolation as explained in [7]. The current will flow through the transformer if either M²C³ system requires the energy to supply the connected loads. What is more, electrical grounding isolation can provide a multiple dc voltage level with safety in a dc microgrid system. The voltages across C₂ and C₃ are depicted in Fig.3. We can

see that the voltage V_{C3} is lower than voltage V_{C2} by the conversion ratio (k).

$$\frac{V_{Grid}}{V_{Batt}} = n + 1 = k \quad (1)$$

- V_{batt} = battery side voltage,
- V_{grid} = grid side voltage,
- n = the number of module,
- k = conversion ratio.

III. SIMULATION RESULTS

Simulation study of the proposed M^2C^3 as shown in Fig. 2 was performed by using PSIM 9.0. The switching frequency of this particular application is 10 kHz. The 48 V on battery side and 125 V on grid side are interfaced to M^2C^3 . The simulation results are shown in Fig. 4-Fig. 6. Fig. 4 shows the study on charging mode. As can be seen, the battery voltage level is lower than 48 V, so the current flows to the battery. The negative current also proves that the current flows to the battery side. In the case of discharging mode, the battery supplies the energy to the grid side with the positive current as shown in Fig. 5. This means that the voltage at the grid side is reduced; therefore, the energy is transferred to the grid side due to equal volt-sec area principle. This results illustrate that M^2C^3 can be performed as the energy storage and energy backup in a dc microgrid application.

Two system of M^2C^3 can be connected in parallel via a high frequency transformer as demonstrated in Fig. 2. The simulation results on parallel M^2C^3 is presented in Fig. 6. During normal condition, the current flowing through the transformer is nearly zero; whereas, the transformer current will increase if one system is required the energy to feed the load from others in the case that the M^2C^3 cannot supply their load alone. Fig. 6 demonstrates that M^2C^3 system 1 is disconnected from the dc grid and required the energy from M^2C^3 system 2 to help for serving the load demand at the system 1. Clearly, the transformer current flows from the system 2 to system 1 as shown in Fig. 6. This results show that the electrical grounding isolation and transferred energy between M^2C^3 can be achieved which are the key functions needed in a dc microgrid application.

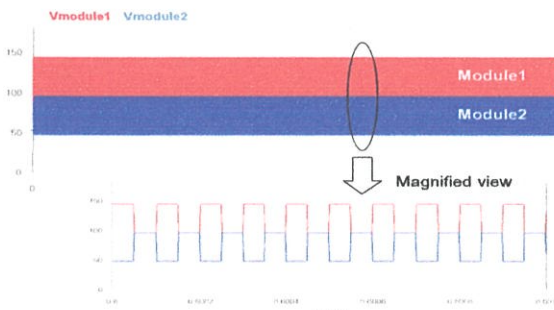


Fig. 3. Output voltages at module 1 and module 2 of M^2C^3 shown in Fig.2.

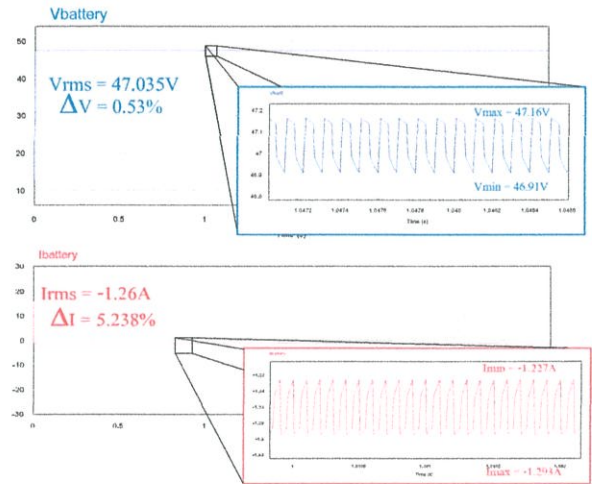


Fig.4. Battery voltage and current in charging mode.

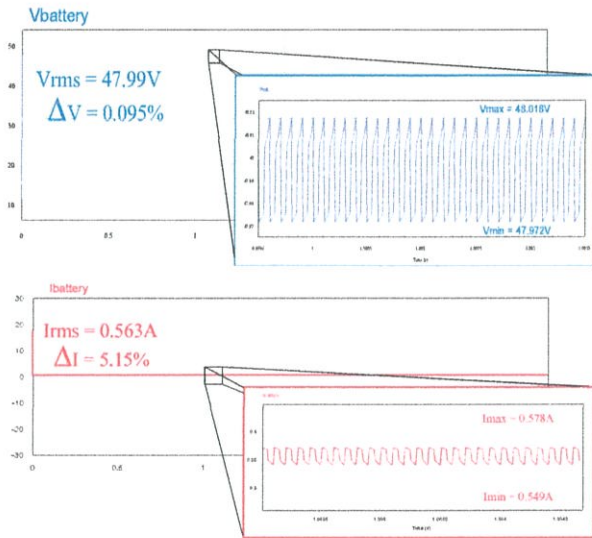


Fig.5. Battery voltage and current in discharging mode.

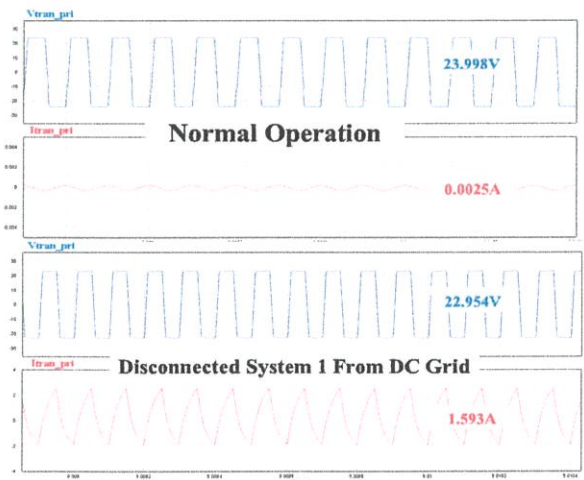


Fig.6. Energy transfer during normal operation and M^2C^3 system 1 is disconnected from the dc grid.

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

The 3-kw prototype of proposed dual M^2C^3 system was developed as shown in Fig. 7. All capacitors in M^2C^3 were 2,200 μF 450 V and MOSFETs (IRF 450) were used as power switches. Two M^2C^3 were interfaced with the high frequency transformer. Each M^2C^3 was connected to 125 V at the grid side and 48 V at battery side. Experimental results are illustrated in Fig. 8 – Fig. 10. Fig. 8 shows battery voltage and current during charging mode as confirmed by a negative current, whereas Fig. 9 demonstrates battery voltage and current during discharging mode showing a positive current. Fig. 10 illustrates the energy transfer mode during M^2C^3 system 1 is disconnected from the dc grid, so M^2C^3 is required the energy from the M^2C^3 system 2. As shown in Fig. 10, the transformer current is increased compared to a normal operation. Obviously, experimental results show that the bidirectional power flow, electrical grounding isolation and energy transfer between M^2C^3 can be accomplished and agree with simulation results. The results indicate that M^2C^3 is suitable to use in a dc microgrid application in the function of both energy storage and energy backup mode.

V. CONCLUSION

A dc to dc multilevel modular capacitor clamped converter (M^2C^3) with electrical grounding isolation and bidirectional power flow for a dc microgrid application has been proposed. The simulation study has also been performed using PSIM 9.0. The 3-kw prototype has been developed to investigate the notion for a dc microgrid application. The simulation and experimental results are in good agreement. The results show that the bidirectional power flow, electrical grounding isolation and energy transfer between M^2C^3 can be accomplished; therefore, M^2C^3 is suitable to use in a dc microgrid application in the function of both energy storage and energy backup mode.

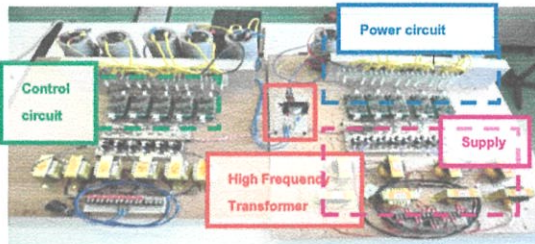


Fig. 7. 3 kw prototype of proposed M^2C^3

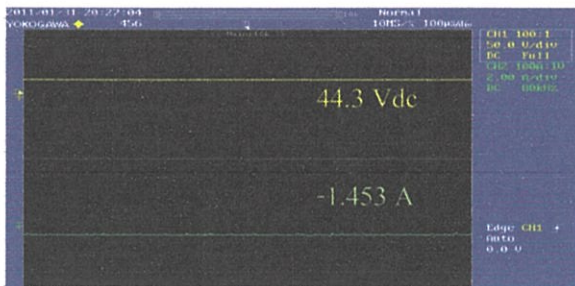


Fig. 8. Experimental results in charging mode.

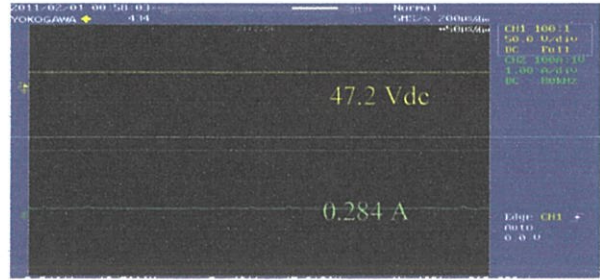


Fig. 9. Experimental results in discharging mode.

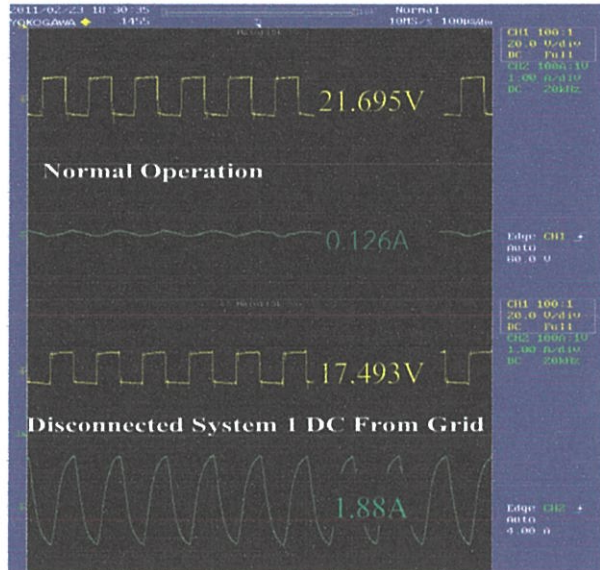


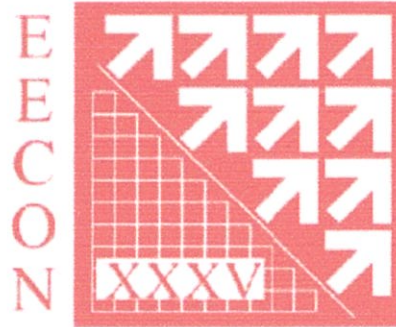
Fig. 10. Experimental results of energy transfer mode during M^2C^3 is disconnected from the dc grid.

Acknowledgement

The authors would like to thank Energy Policy and Planning Office (EPPO), Ministry of Energy for supporting research fund and King's Mongkut's Institute of Technology Ladhrabang research fund

References

- [1] S. Khomfoi, N. Praisuwanna, L.M. Tolbert, "A Hybrid Cascaded Multilevel Inverter Application for Renewable Energy Resources including a Reconfiguration Technique" IEEE ECCE 2010, pp. 3998-4005, Sep. 12-16, 2010.
- [2] R. Lasseter, "Microgrid," Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2002, pp. 305-308.
- [3] F. Z. Peng, Y. W. Li, L. M. Tolbert, "Control and Protection of Power Electronics Interfaced Distributed Generation Systems in a Customer-Driven Microgrid," IEEE Power and Energy Society General Meeting, Alberta, Canada, July 26-30, 2009.
- [4] Hiroaki Kakigano, Yushi Miura, Toshifumi Ise, Ryohei Uchida, "DC Micro-grid for Super High Quality Distribution -System Configuration and Control of Distributed Generations and Energy Storage Devices," 37th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Korea, 2006, pp. 3148-3154.
- [5] D. Salomonson, and A. Sannino, "Low-Voltage DC Distribution System for Commercial Power System with Sensitive Electronic Loads," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 3, July 2007 pp 1620-1627
- [6] Faisal H. Khan, Leon M. Tolbert, "A Multilevel Modular Capacitor-Clamped DC-DC Converter," IEEE Transactions on Industry Applications., Nov./Dec. 2007, pp. 1628-1638.
- [7] Faisal H. Khan, Leon M. Tolbert, "Hybrid Electric Vehicle Power Management Solutions Based on Isolated and Nonisolated Configurations of Multilevel Modular Capacitor-Clamped Converter," IEEE Transactions on Industry Applications., vol. 56, no. 8, Aug. 2009

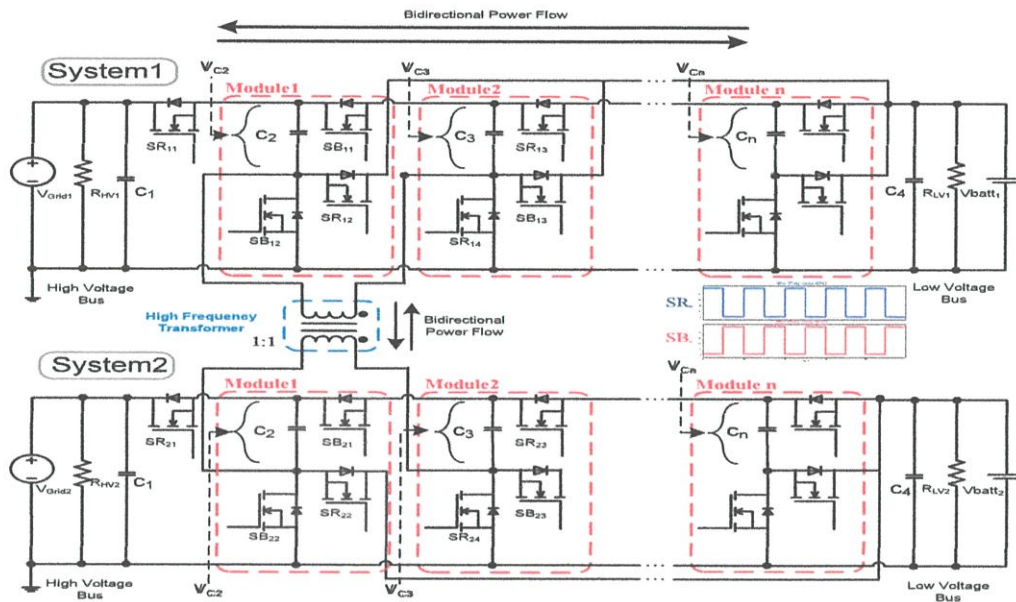


The 35th Electrical Engineering Conference (EECON-35)



SCHOOL OF
ENGINEERING
BANGKOK UNIVERSITY

NECTEC
a member of NSTDA



รูปที่ 2 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับแบบสองทิศทางที่มีการแยกโคจรทางไฟฟ้า

ความน่าเชื่อถือและการควบคุมในระบบไมโครกริดจะอธิบายอยู่ใน [3]

ระบบสื่อสารและสถานีผลิตไฟฟ้าข้อย่อยในประเทศไทยจะประกอบไปด้วยภาระไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ที่ไม่เป็นเชิงเส้น อาทิเช่น คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ ระบบตรวจวัด (monitor) แสงสว่าง และมอเตอร์ที่อยู่ในเครื่องปรับอากาศ ซึ่งทั้งสองระบบนี้จะทำงานที่ระดับแรงดันไฟฟ้าไม่เท่ากัน ในระบบสื่อสารจะใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ -48V ส่วนในสถานีไฟฟ้าข้อย่อยจะใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ 125V ซึ่งพัดลม แสงสว่าง และคอมพิวเตอร์แบบพกพาจะใช้แรงดัน 24V และมีระบบสำรองพลังงานเช่นแบตเตอรี่และเครื่องจักรดีเซลเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าในสภาวะฉุกเฉิน

ส่งผลให้ระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กจำเป็นต้องมีวงจรแปลงผันแรงดันกระแสตรงเป็นกระแสตรงเพื่อช่วยเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันและรักษาแรงดันไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าและสายส่งแรงดันกระแสตรงที่เชื่อมต่ออยู่ ระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กดังรูปที่ 1 จะติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์และกักเก็บลมเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าโดยผ่านวงจรแปลงผันกระแสตรงเป็นกระแสตรงและกระแสตรงเป็นกระแสสลับตามลำดับและมีการไฟฟ้าที่เป็นแรงดันกระแสตรงที่ใช้แรงดันไม่เท่ากันเชื่อมต่ออยู่ ดังนั้นจึงขอเสนอวงจร M^2C^3 2 ชุดที่เชื่อมต่อกันผ่านหม้อแปลงความถี่สูงไว้ติดตั้งอยู่ระหว่างสายส่งกับชุดแบตเตอรี่เพื่อทำหน้าที่หลักคือสะสมพลังงานและเป็นตัวถ่ายโอนพลังงานสำรอง อีกทั้งยังสามารถเชื่อมต่อแรงดันที่แตกต่างกันในตัวเก็บประจุที่อยู่แต่ละโมดูลได้ให้กับภาระไฟฟ้าที่มีแรงดันหลายระดับ จึงช่วยลดอุปกรณ์แปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงในส่วนต่างๆ ดังนั้นระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กจึงมีเหมาะสมอย่างมากต่อการประยุกต์ใช้กับภาระไฟฟ้าในอาคาร [4] และในระบบส่งจ่ายแรงดันต่ำในระบบอุตสาหกรรมมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลง [5] อีกทั้งยังเพิ่มความ

น่าเชื่อถือและมีประสิทธิภาพให้กับระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก

วงจร M^2C^3 ได้ถูกสร้างขึ้นโดย Khan [6] ที่ซึ่งให้วงจรสามารถทำงานได้ในแหล่งจ่ายที่มีความหลากหลายซึ่งจะอธิบายไว้ใน [7] บทความนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงที่ซึ่งต้องการให้อุปกรณ์มีความสามารถถ่ายโอนพลังงานได้ทั้งสองฝั่ง รับแรงดันหลายระดับและแยกกราวด์ออกจากกัน ดังนั้นวงจร M^2C^3 2 ชุดที่เชื่อมกันด้วยหม้อแปลงความถี่สูงจึงถูกพัฒนาและนำเสนอในบทความนี้ ทั้งการจำลองผ่านโปรแกรม PSIM 9.0 และผลการทดลองชิ้นงานจริง

2. หลักการทำงานของวงจร M^2C^3

วงจร M^2C^3 2 ชุดที่เชื่อมกันด้วยหม้อแปลงความถี่สูงจะแสดงดังรูปที่ 2 จะเห็นว่าภายในวงจร M^2C^3 จะประกอบไปด้วย 3 สวิตช์กำลังและ 1 ตัวเก็บประจุซึ่งเชื่อมต่อกันเป็นโมดูล ระดับแรงดันทั้งสองฝั่งจะขึ้นอยู่กับจำนวนโมดูลที่เชื่อมต่อกันอยู่แบบอนุกรมภายในวงจร และในธรรมชาติของตัวเก็บประจุคือการที่สะสมและคายพลังงานเป็นไปอย่างสมดุล สัญญาณขับสวิตช์ SR_n และ SB_n ทำงานที่ค่าดีวีไอเคิลที่ 0.5 เฟสตรงข้ามกัน ซึ่งจากหลักสมดุลพลังงานนั้นทำให้กระแสไฟฟ้าจะไหลไปฝั่งที่แรงดันน้อยกว่าแรงดันที่กำหนดไว้ และแรงดันที่ตัวเก็บประจุจะมีค่ามากขึ้นเป็นจำนวนเท่าของแบตเตอรี่ในทุกๆ โมดูล ยกตัวอย่างเช่นกำหนดให้แรงดันฝั่งแบตเตอรี่ 24V และฝั่งสายส่งมีแรงดัน 144V ซึ่งเป็นอัตราส่วนแรงดันที่ 6 เท่า และถ้าแรงดันไฟฟ้าที่สายส่งลดลง กระแสจากฝั่งแบตเตอรี่จะถ่ายโอนมาฝั่งสายส่งทันทีซึ่งเรียกการทำงานนี้ว่าสำรองพลังงาน และถ้าแรงดันที่แบตเตอรี่ลดลง กระแสฝั่งสายส่งจะถ่ายโอนมาฝั่งแบตเตอรี่เพื่อสะสมประจุ และถ้าทั้งสองฝั่งมีแรงดันไฟฟ้าปกติจะไม่มีการแสวงไหลอยู่ในวงจร ซึ่งระดับแรงดันทั้งสองฝั่งจะต้องสัมพันธ์กับจำนวนโมดูลที่ติดตั้งมากกว่านั้นในบทความนี้จะเพิ่มหม้อแปลงความถี่

พลังงานขณะเกิดผิดปกติขึ้นในชุด โมดูล กระแสจะไหลผ่านหม้อแปลง เพื่อไปให้กับภาระไฟฟ้า อีกทั้งยังแยกโคจรทางไฟฟ้าระหว่างวงจร M^2C^3 และเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมให้กับระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้าจะเป็นไปตามสมการ

$$\frac{V_{HV}}{V_{LV}} = N + 1 = CR \quad (1)$$

เมื่อ V_{HV} = แรงดันไฟฟ้าฝั่งแรงดันสูง(สายส่ง)
 V_{LV} = แรงดันไฟฟ้าฝั่งแรงดันต่ำ(แบตเตอรี่)
 CR = อัตราแปลงผันแรงดันไฟฟ้า
 N = จำนวนโมดูล

3. การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

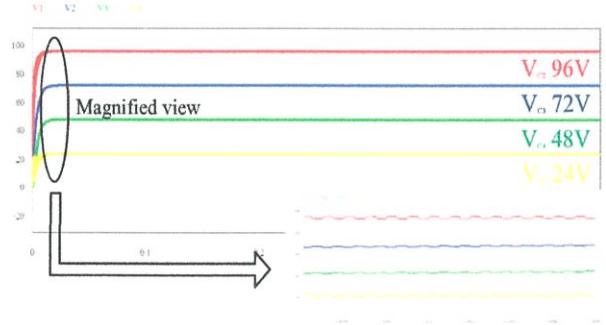
การจำลองวงจร M^2C^3 ตามรูปที่ 2 จะจำลองด้วยโปรแกรม PSIM 9.0 ความถี่สวิตช์ 10 kHz แรงดันแบตเตอรี่ 24V และแรงดันที่สายส่ง 125V ซึ่งจะเชื่อมต่อกับวงจร M^2C^3 4 โมดูล ผลการจำลองจะแสดงตามรูปที่ 3-6 รูปที่ 3 จะแสดงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วตัวเก็บประจุในแต่ละโมดูล จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าจะมีหลายระดับเป็นจำนวนเท่าของแรงดันที่แบตเตอรี่ รูปที่ 4 แสดงการทำงานแบบสะสมประจุ ซึ่งจะทำงานเมื่อแรงดันแบตเตอรี่ต่ำกว่า 24V ดังนั้นกระแสจะไหลเข้าไปสะสมพลังงานให้แบตเตอรี่ ทำให้กระแสเป็นค่าลบและในการทำงานแบบสำรองพลังงานให้กับระบบสายส่งคือแรงดันที่สายส่งมีค่าลดลงทำให้ กระแสจะไหลออกจากแบตเตอรี่เพื่อสำรองพลังงานให้ระบบสายส่ง กระแสจึงเป็นค่าบวกดังรูปที่ 5 เมื่อแรงดันทั้งสองฝั่งมีค่าไม่เท่ากับที่กำหนดไว้ จะมีการถ่ายโอนพลังงานในวงจร M^2C^3 อย่างทันที

วงจร M^2C^3 2 ระบบที่เชื่อมขนานกันผ่านหม้อแปลงความถี่สูง ตามรูปที่ 2 จะแสดงในรูปที่ 6 จะแบ่งออกเป็น 2 แบบในการจำลองคือแบบปกติและแบบที่ระบบที่ 1 เกิดความสภาวะผิดปกติขึ้นทำให้ไม่สามารถถ่ายโอนพลังงานให้กับสายส่งได้ในแบบการทำงานปกตินั้น แรงดันไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากันทำให้กระแสไฟฟ้าไม่ไหลผ่านหม้อแปลงความถี่สูง ในขณะที่เดียวกันกระแสจะไหลผ่านหม้อแปลงเพิ่มขึ้นถ้าวงจรที่ 1 เกิดสภาวะผิดปกติเพื่อช่วยให้กระแสไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่กับชุดวงจร M^2C^3 ที่ 1 ยังคงทำงานต่อไปได้

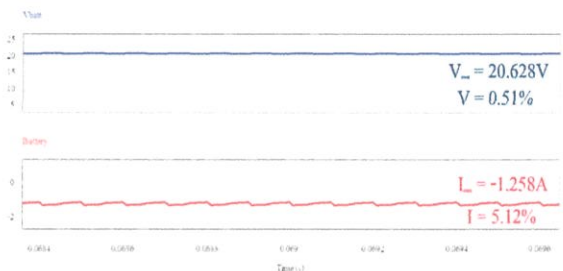
4. ผลการทดลอง

เครื่องต้นแบบวงจร M^2C^3 2 ชุดที่เชื่อมต่อกับหม้อแปลงความถี่สูงขนาด 3kW ได้แสดงดังรูปที่ 7 ตัวเก็บประจุทุกตัวในวงจรจะมีขนาด 2200 μF 450V และใช้ MOSFETs(IRF 450) เป็นสวิตช์กำลัง ซึ่งแต่ละระบบจะเชื่อมต่อกับระบบสายส่งที่ 125V และแบตเตอรี่ 24V ผลการทดลองจะแสดงตามรูปที่ 8-10 รูปที่ 8 แสดงแรงดันและกระแสในขณะทำงานแบบสะสมประจุซึ่งกระแสที่ไหลเข้าแบตเตอรี่จะมีค่าลบ ในขณะที่เดียวกันกระแสมีค่าเป็นบวกเมื่อทำงานในรูปแบบสำรองพลังงาน

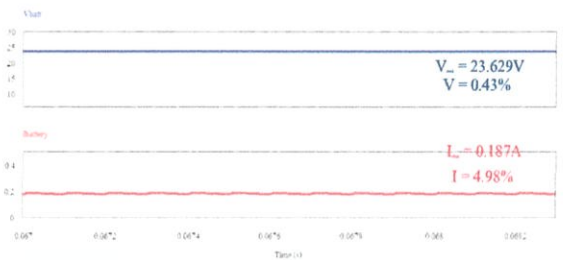
ดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10 จะแสดงการไหลของกระแสที่หม้อแปลงความถี่สูงขณะทำงานปกติและเกิดความผิดปกติกับระบบที่ 1 ซึ่งกระแสจะเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะปกติ ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับผลการจำลองในการถ่ายโอนพลังงานของวงจร M^2C^3 ส่งผล



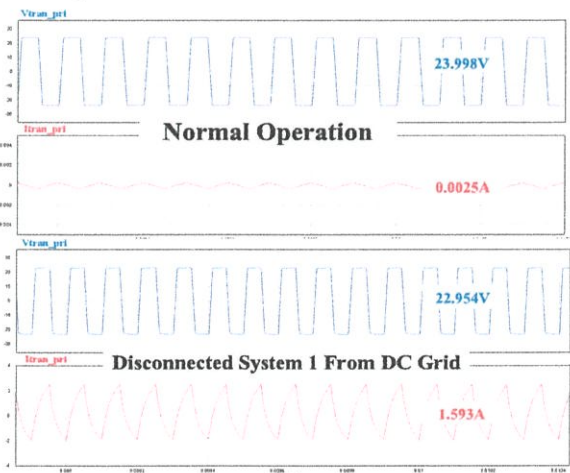
รูปที่ 3 ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุในแต่ละโมดูล



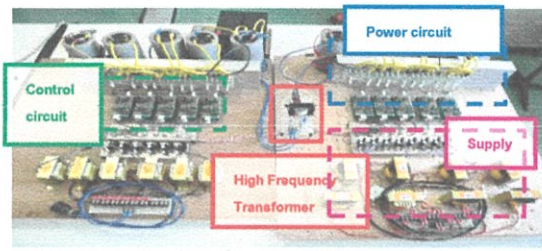
รูปที่ 4 การจำลองการสะสมประจุให้แบตเตอรี่



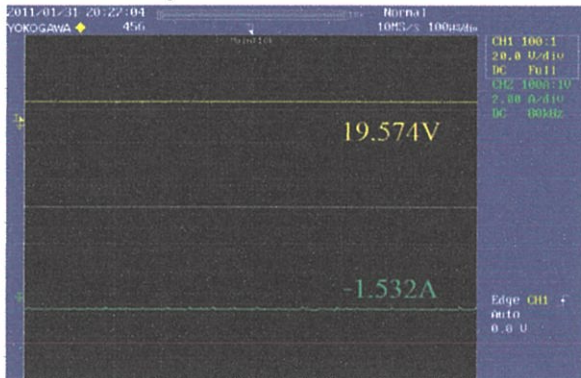
รูปที่ 5 การจำลองการสำรองพลังงานให้ระบบสายส่ง



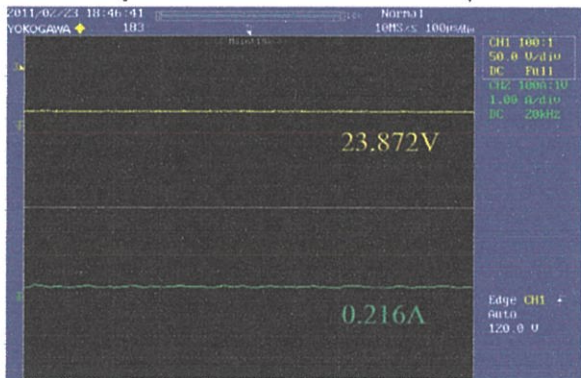
รูปที่ 6 การถ่ายโอนพลังงานระหว่างระบบ M^2C^3 2 ระบบ



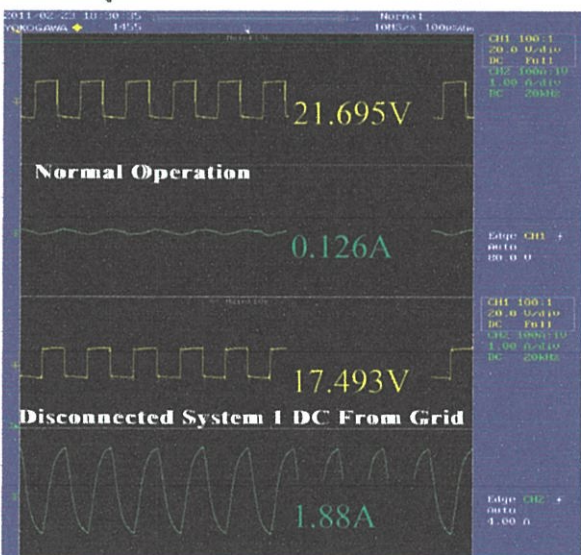
รูปที่ 7 เครื่องต้นแบบขนาด 3kW



รูปที่ 8 แรงดันและกระแสขณะเสถียรประจุ



รูปที่ 9 แรงดันและกระแสขณะสำรองพลังงาน



รูปที่ 10 การถ่ายโอนพลังงานผ่านหม้อแปลงขณะระบบที่ 1 ถูกตัดออก

ให้วงจร M^2C^3 ที่มีการแยกโคจรทางไฟฟ้ามีความเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กทั้งการสำรองพลังงานและสะสมประจุให้กับแบตเตอรี่ อีกทั้งยังเชื่อมต่อกับการไฟฟ้าที่หลากหลาย

5. บทสรุป

บทความวิจัยนี้เสนอวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงหลายระดับ (M^2C^3) แบบสองทิศทางที่มีการแยกโคจรทางไฟฟ้าสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้ากระแสตรงที่หลากหลาย ผลการจำลองและทดลองได้ถูกจำลองในบทความนี้ ซึ่งมีความสอดคล้องระหว่างกันเป็นอย่างดี ซึ่งได้แสดงการถ่ายโอนพลังงานภายในวงจร M^2C^3 และผ่านหม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งการถ่ายโอนพลังงานจะเป็นไปอย่างทันที ดังนั้นวงจร M^2C^3 จึงเหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบผลิตไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณกระทรวงพลังงานและ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่สนับสนุนทุนการทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Khomfoi, N. Praisuwan, L.M. Tolbert, "A Hybrid Cascaded Multilevel Inverter Application for Renewable Energy Resources including a Reconfiguration Technique" IEEE ECCE 2010, pp. 3998-4005, Sep. 12-16, 2010.
- [2] R. Lasseter, "Microgrid," Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2002, pp. 305-308.
- [3] F. Z. Peng, Y. W. Li, L. M. Tolbert, "Control and Protection of Power Electronics Interfaced Distributed Generation Systems in a Customer-Driven Microgrid," IEEE Power and Energy Society General Meeting, Alberta, Canada, July 26-30, 2009.
- [4] Hiroaki Kakigano, Yushi Miura, Toshifumi Ise, Ryohei Uchida, "DC Micro-grid for Super High Quality Distribution -System Configuration and Control of Distributed Generations and Energy Storage Devices," 37th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Korea, 2006, pp. 3148-3154.
- [5] D. Salomonson, and A. Sannino, "Low-Voltage DC Distribution System for Commercial Power System with Sensitive Electronic Loads," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 3, July 2007 pp 1620-1627
- [6] Faisal H. Khan, Leon M. Tolbert, "A Multilevel Modular Capacitor-Clamped DC-DC Converter," IEEE Transactions on Industry Applications., Nov./Dec. 2007. pp. 1628-1638.
- [7] Faisal H. Khan, Leon M. Tolbert, "Hybrid Electric Vehicle Power Management Solutions Based on Isolated and Nonisolated Configurations of Multilevel Modular Capacitor-Clamped Converter," IEEE Transactions on Industry Applications., vol. 56, no. 8, Aug. 2009

A Single Chip PWM Scheme for a Hybrid Cascaded Multilevel Inverter Including a Reconfiguration Technique Application for Low Voltage DC Distribution

Surin Khomfoi^{1,2}, Nattapat Praisuwanna¹

Abstract – A single chip PWM scheme hybrid cascaded multilevel inverter including a reconfiguration technique application for low voltage dc distribution is developed. The objective of this research is to propose an alternative topology of hybrid cascaded multilevel inverter applied to a low voltage dc microgrid in telecommunication buildings. The modified PWM technique is also developed to reduce switching losses. Also, the proposed topology can reduce the number of required power switches compared to a traditional cascaded multilevel inverter. A possible reconfiguration technique after faulty condition is also discussed. PSIM and Simulink/MATLAB are used to simulate the circuit operation and control signal. A 3-kVA prototype is developed to validate the proposed technique. The switching losses of the proposed multilevel inverter are also investigated. By using the modified PWM technique and reconfiguration method, the proposed hybrid inverter can improve system efficiency and reliability. The prototype experimental inverter efficiency is 97.45% under tested condition. The results show that the proposed hybrid inverter topology is a promising method for a low voltage dc distribution interfacing with renewable energy resources and can be applied for multiple loads in telecommunication buildings.

Keywords: A hybrid cascaded multilevel inverter , Reconfiguration technique , Microgrid, Single chip PWM scheme

Nomenclature

$f(t)$	reference signal
m_a	modulation index (0.0/1.0-1.0/1.0)
A_1	multiplexing signal #1
A_2	multiplexing signal #2
$\frac{T_p}{T_c}$	pulse width of PWM (0.0–1.0)

I. Introduction

Renewable energy resources (RESs) have had increasing penetration levels for grid connected distributed generation (DG) in recent years. Photovoltaic, micro-turbine, wind turbine and fuel cell put forward many promising applications with high efficiency and low emissions. Together with power electronics technologies, these have provided an important improvement for RES and DG applications; especially, a microgrid concept is introduced in [1] to provide more system capacity and control flexibility when several RESs with different electric behaviors are integrated in the same grid. A microgrid also offers extra degrees of

freedom to optimize RESs connected to the utility grid; additionally, power quality requirements, system reliability and control flexibility would be achieved by using the microgrid concept as discussed in [2].

Data center or telecommunication buildings in Thailand normally consist of large nonlinear electronic loads; for instance, switching router units, personal computers (PC), monitors, lighting, and adjustable speed drives (ASD) for air conditioning systems. The electrical system used in telecommunication equipment is a low voltage dc system with a dc voltage equal to -48 V. A single phase 220 V, 50 Hz electrical system is used for PCs, monitors, and lighting; whereas, three phase 220/380 V, 50 Hz is utilized for the air conditioning system. It is promising that a dc microgrid consisting of a photovoltaic panel as a RES, battery as an energy storage (ES), and a diesel generator set as a standby source is implemented so that net-zero energy for telecommunication building could be accomplished. The dc microgrid with superb quality distribution system for residential application has been proposed in [3], and the low voltage distribution system for commercial power systems with sensitive electronic loads has been investigated in [4]. For dc distribution in telecommunication buildings, a high power converter (about 100 kW) with high quality output voltage

waveform, high efficiency, and single phase and three phase electrical system is required. Therefore, multilevel inverters are suitable for this application because a multilevel inverter can provide the high voltampere ratings; more specially, in renewable energy applications, a cascaded H-bridge multilevel inverter can be applied to interface a group of batteries, photovoltaic or fuel cells. As explained in [5], a cascaded multilevel inverter may have more potential than other multilevel topologies since input separated dc sources (SDCS) could be naturally interfaced to a multilevel inverter to provide higher output voltages with high quality waveforms. However, a cascaded multilevel inverter contains many power switches, and the number of power switches will depend upon the number of required output voltage levels. Consequently, higher switching losses will be traded off with output voltage quality. Multilevel inverter topologies for stand-alone PV systems have been discussed in [6]. The prototype in [6] shows that 96% efficiency at 3 kVA for a single phase inverter was achieved. It would be better if we could reduce the number of power switches in a multilevel inverter with the same functionality in order to reduce switching losses and improve inverter efficiency. Thereupon, a hybrid multilevel inverter (HMI) or also known as an asymmetrical multilevel inverter is developed for a dc microgrid in a telecommunication building as shown in Fig. 1. One can see that the proposed HMI can supply both single phase and three phase electrical systems. As previously mentioned, three phase 220/380 V is supplied for an air conditioning unit and single phase 220 V is supplied for a lighting and PC load. The HMI consists of two types of inverter: a conventional three phase six switches inverter and a single phase four switches H-bridge inverter. HMI has been proposed with several applications as clearly explained in

[7-9]. Also,

A new configuration for three-phase asymmetrical multilevel inverter together with PWM technique with higher resolution was originally proposed in [10]. In addition, an effective space vector PWM modulation for HMI applications with low current distortion has been clearly described in [11]. However, so far, the applications for a telecommunication building with 48 V dc distributions are limited. For this reason, a hybrid cascaded multilevel inverter application at low voltage for dc distribution in telecommunication building including a reconfiguration technique is developed to improve the system efficiency and reliability.

II. Proposed PWM Scheme

The main inverter refers to the six-switch three phase inverter, and the auxiliary inverter refers to the four-switch H-bridge inverter. Since low switching losses during PWM operation is required, the main inverter will

operate in square wave mode, and the auxiliary inverter will operate in PWM mode as depicted in Fig. 2. In practice, if a single chip is used to generate the PWM signals, it normally has only one carrier signal with six PWM channels; nevertheless, the HMI requires 12 PWM channels for both the main and auxiliary inverter. Thereafter, the reference signal of sinusoidal PWM (SPWM) used for the auxiliary inverter is modified by using (1)-(4). The multiplexing signals from (3) and (4) are used to synthesize a PWM signal by using the logic diagram as shown in Table I and Fig. 3. In this particular application, PIC18F4431 single chip is used to generate the PWM signals incorporated with a CPLD XC9536XL to fabricate the PWM signals for the proposed HMI.

$$f(t) = m_a \cdot \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\frac{T_p}{T_c} = \begin{cases} 2\left(f(t) - \frac{1}{2}\right); & \frac{1}{2} \leq |f(t)| \leq 1 \\ 2\left(\frac{1}{2} - f(t)\right); & 0 \leq |f(t)| \leq \frac{1}{2} \end{cases} \quad (2)$$

$$A_1 = \begin{cases} 1; & f(t) \geq 0 \\ 0; & f(t) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$A_2 = \begin{cases} 1; & |f(t)| \geq \frac{1}{2} \\ 0; & |f(t)| < \frac{1}{2} \end{cases} \quad (4)$$

where $f(t)$ is a reference signal,

m_a is modulation index (0.0/1.0-1.0/1.0),

A_1 is a multiplexing signal #1,

A_2 is a multiplexing signal #2,

$\frac{T_p}{T_c}$ is pulse width of PWM (0.0-1.0).

T_c

TABLE I
FABRICATED PWM SIGNAL FOR PROPOSED HYBRID MULTILEVEL INVERTER

S_n	Hybrid PWM mixing operator
S_{a1}	$A1$
S_{a2}	$\overline{A1}$
S_{a3}	$PWM \bullet ((A2 \bullet A1) + (\overline{A2} \bullet \overline{A1}))$
S_{a4}	$\overline{PWM} + ((A2 \bullet A1) + (\overline{A2} \bullet \overline{A1}))$
S_{a5}	$PWM \bullet ((A2 \bullet A1) + (\overline{A2} \bullet \overline{A1}))$
S_{a6}	$\overline{PWM} + ((A2 \bullet A1) + (\overline{A2} \bullet \overline{A1}))$

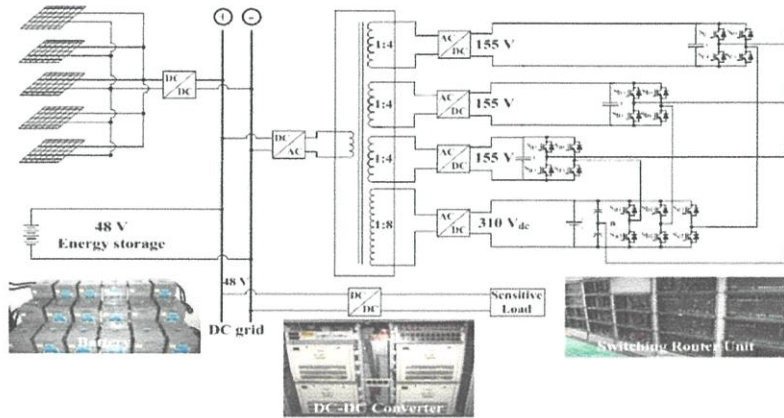


Fig. 1. Low voltage dc distribution for telecommunication buildings.

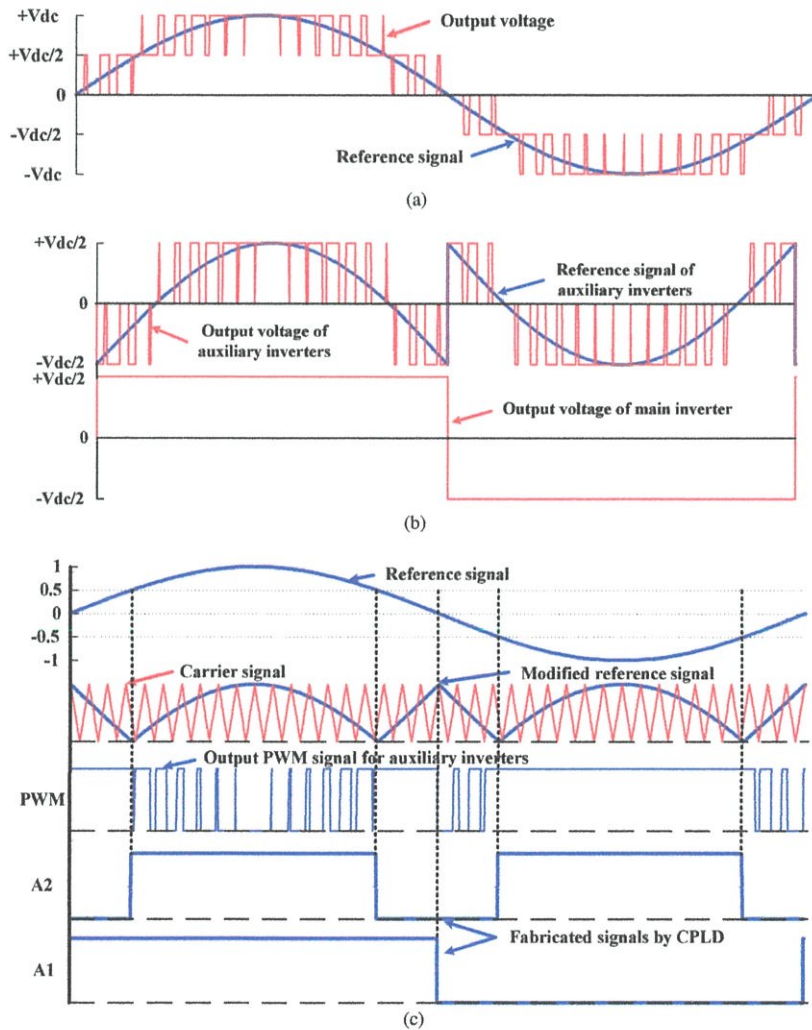


Fig. 2. Proposed PWM paradigm: (a) output phase voltage, (b) auxiliary and main inverter output voltages, and (c) modulation signals and fabricated signal of both main and auxiliary inverter.

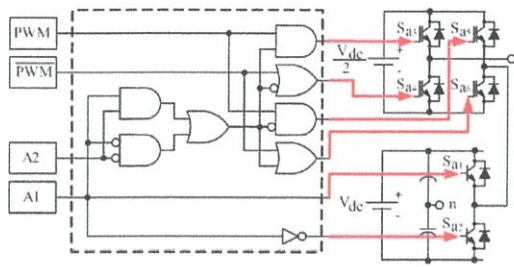


Fig. 3. Logic diagram for converter control signal.

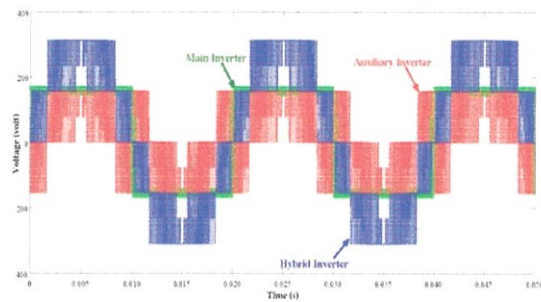


Fig. 4. Output voltage of main and auxiliary inverter operated at $m_a = 0.9/1.0$.

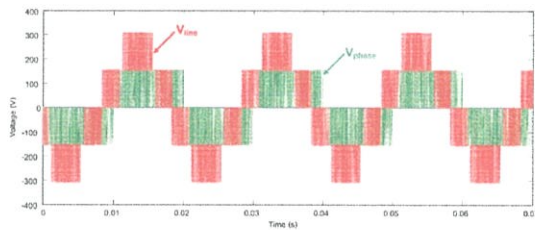


Fig. 5. Line to line and line to neutral output voltage of the hybrid inverter operated at $m_a = 0.48/1.0$.

III. Hybrid Converter Simulation

PSIM (Powersim) and MATLAB/Simulink are utilized to create the simulation model. MATLAB/Simulink is used to simulate the control signals and PSIM acts as a hardware prototype. This simulation model could offer the simplicity of a changing control scheme and is simple to transfer the control model from simulation to implementation in a single chip. Fundamental output voltages can be controlled by changing a modulation index (m_a) of the reference signal; also, the fundamental output frequency can be adjusted by changing the frequency of the reference signal.

The simulation results of the proposed hybrid multilevel inverter are illustrated in Figs. 4-6. As can be seen, the simulation model can operate at different modulation indices. The simulation results for switching losses have been performed in [12] to compare between the conventional cascaded multilevel inverter and the

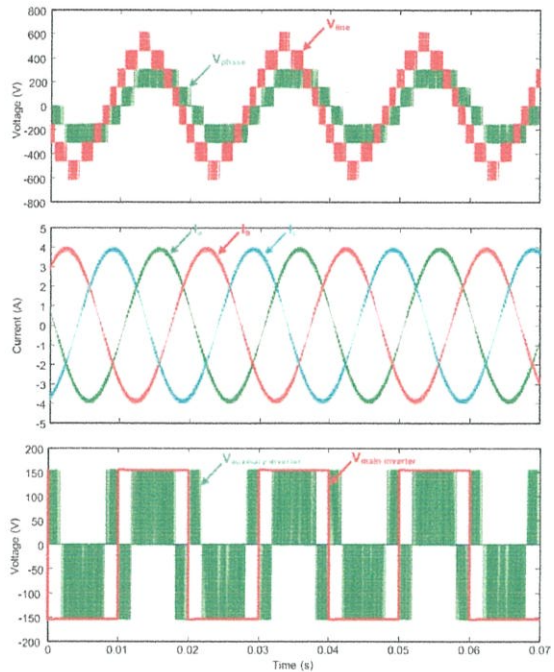


Fig. 6. Line to line and line to neutral output voltage and output current of the hybrid inverter operated at $m_a = 0.9/1.0$.

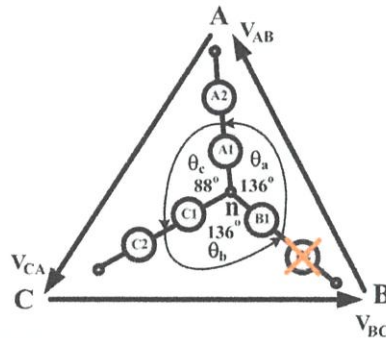


Fig. 7. "Neutral shift method [7]" for a reconfiguration technique.

proposed hybrid multilevel inverter. The simulation study in [12] shows that switching losses of the proposed HMI are less than the conventional cascaded multilevel inverter by about 26 % for the 3 kW load. This result illustrates that the system efficiency could improve by using the proposed HMI.

IV. Reconfiguration Technique

The neutral shift (NS) technique proposed in [13] can also be applied to the HMI during a fault condition. The essence of NS technique is the adjustment of the angle of the neutral point of the three phase wye-connection system as shown in Fig. 7. Obviously, the line to neutral voltages (V_{an}, V_{bn}, V_{cn}) are not out of phase with each

other by 120° as usual; however, the line to line voltages (V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}) are balanced even though the auxiliary power cell on phase b is malfunctioning. The angles of reference signals to shift the neutral point under a fault condition at an auxiliary inverter in each phase can be calculated as follows:

A. Faulty auxiliary cell at phase a:

$$\theta_a = 60^\circ + \cos^{-1}\left(\frac{V_{an} \cdot \sin(30^\circ)}{V_{bn}}\right) \quad (5)$$

$$\theta_c = \theta_a \quad (6)$$

$$\theta_b = 360^\circ - \theta_a - \theta_c \quad (7)$$

B. Faulty auxiliary cell at phase b:

$$\theta_b = 60^\circ + \cos^{-1}\left(\frac{V_{bn} \cdot \sin(30^\circ)}{V_{cn}}\right) \quad (8)$$

$$\theta_a = \theta_b \quad (9)$$

$$\theta_c = 360^\circ - \theta_a - \theta_b \quad (10)$$

C. Faulty auxiliary cell at phase c:

$$\theta_c = 60^\circ + \cos^{-1}\left(\frac{V_{cn} \cdot \sin(30^\circ)}{V_{an}}\right) \quad (11)$$

$$\theta_b = \theta_c \quad (12)$$

$$\theta_a = 360^\circ - \theta_b - \theta_c \quad (13)$$

A calculated example of the faulty auxiliary inverter at phase b is elucidated as follows:

$$\theta_b = 60^\circ + \cos^{-1}\left(\frac{120 \cdot \sin(30^\circ)}{150}\right);$$

$$\theta_b = 136.66^\circ;$$

$$\theta_a = \theta_b = 136.33^\circ$$

$$\theta_c = 360^\circ - 136.66^\circ - 136.66^\circ$$

$$\theta_c = 87.34^\circ$$

One can see that the computational process is simple so that this reconfiguration method would possibly be implemented in a single chip. It should be noted that this proposed reconfiguration can only be performed under a fault in the auxiliary inverter. If the fault occurs at the main inverter, all auxiliary inverters are bypassed; then, the conventional six switches fault tolerance technique

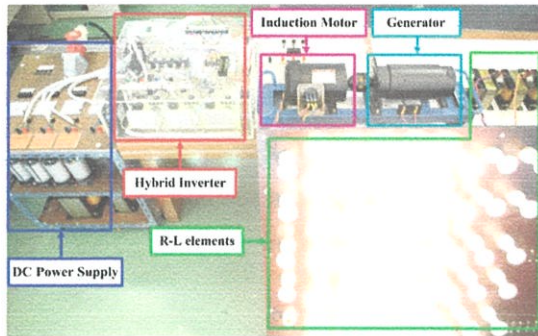
could be used as discussed in [14]. Of course, the high quality output voltage waveform and full rated power operation cannot be possible; however, the amount of reduction of the rated power and waveform quality that can be tolerated depends upon the HMI applications; nevertheless, in most cases a reduction of the converter power is more preferable than a complete shutdown. In this particular application, the HMI is used to supply the air conditioning system; therefore, the reduced power operation and waveform quality would be acceptable.

V. Experimental Setup and Results

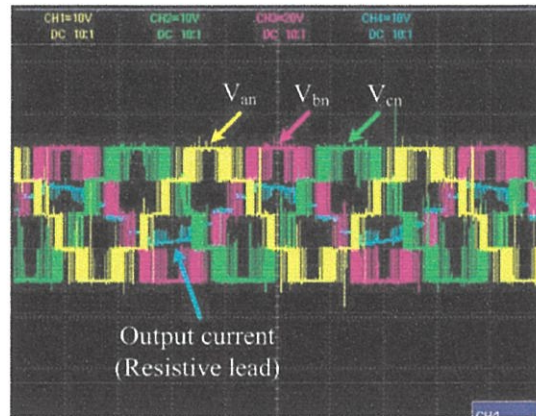
The 3-kVA prototype was developed by using an IGBT module (Mitsubishi, CM20TH-24H 1200V 20A) in the main inverter and MOSFETs (Fairchild, IRFP 450, 500 V, 14 A) in the auxiliary inverter. A multiple winding transformer with bidirectional ac-dc converters was used as SDCS for supplying dc voltages to the HMI. A 2-hp induction motor and R-L elements were used as electric loads to emulate an air conditioning compressor. A Yokogawa oscilloscope incorporated with a PC was used to perform measurements. The experimental setup is shown in Fig. 8.

Experimental results illustrated in Fig. 9(a) shows the output line to neutral voltage and output line current of the proposed HMI operating at unity modulation index. As can be seen, the HMI can operate in PWM mode with an output current. The output voltages of main and auxiliary inverter are depicted in Fig. 9(b). Clearly, the main inverter operates in square wave mode, but the auxiliary inverter operates in PWM mode. The output waveform quality in PWM mode is shown in Fig 9(c). The output voltages of the HMI with different ma operation are shown in Fig. 10. One can see that the fundamental output voltage can be controlled by adjusting ma; this implies that the HMI can also be applied in drive applications requiring V/f control mode.

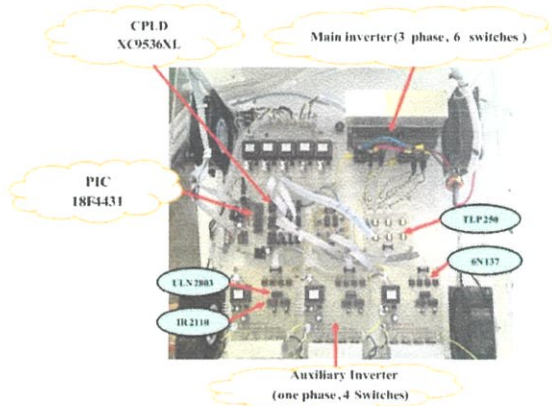
The proposed HMI efficiency is evaluated as illustrated in Figs. 11-13. The voltage, current, and power waveforms on the dc side are shown in Fig. 11; whereas the voltage, current, and power waveforms on the ac side are depicted in Fig. 12. The total power consumption operating at unity modulation index on dc and ac side including control board together with gate drives are summarized in Table II. The results show that the proposed HMI efficiency is 97.45% in this particular load condition. It should be noted that the HMI efficiency would vary depending on the load condition; and normally, the efficiency would be lower at light load condition. As can be seen, the proposed HMI can be applied with renewable energy resources; more specially, when multiple separate dc sources are available. For instance, a battery or fuel cell can interface with main inverter and ultra capacitor or photovoltaic cell can also connect to auxiliary inverter [15].



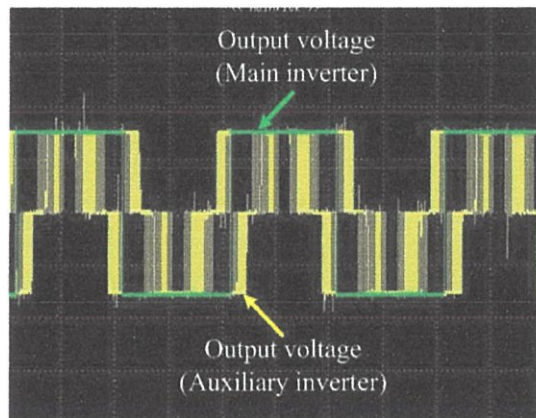
(a)



(a)



(b)

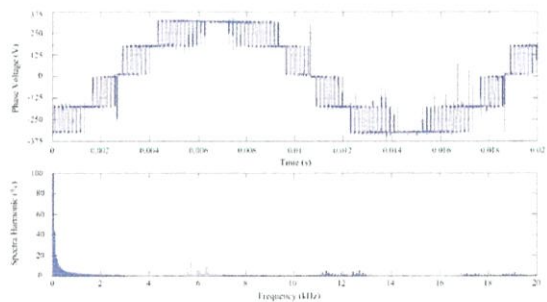


(b)

Fig. 8. Experimental setup: (a) connected with load and measurement unit and (b) proposed hybrid multilevel inverter.

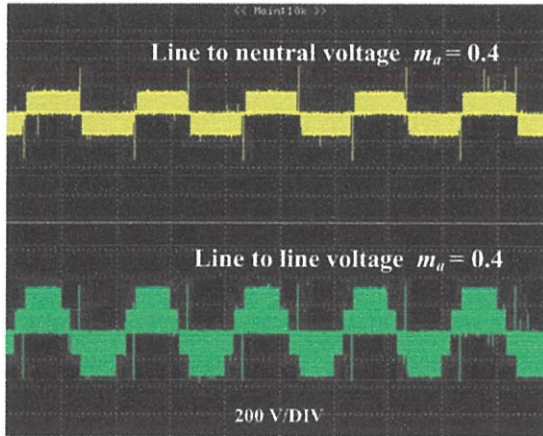
TABLE II
EFFICIENCY EVALUATION OF PROPOSED HYBRID MULTILEVEL INVERTER

Description	dc side		ac side	Control board and gate drives
	Main inverter	Auxiliary inverter	Hybrid inverter	
Voltage (V)	306.7	153.3	224.86	221.13
Current (A)	1.87	4.52	3.95	0.059
Power (W)	2652.7		2597.8	13.09
Total losses (W)			67.94	
% losses			2.55 %	

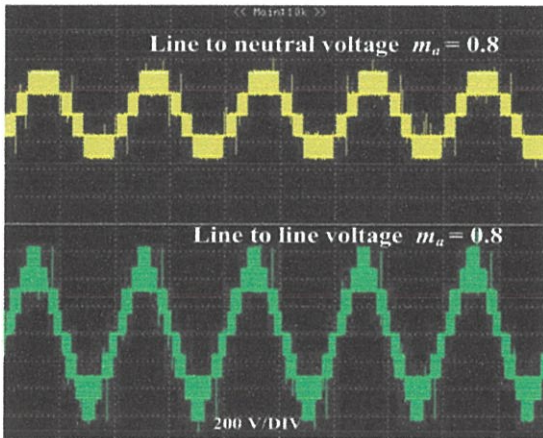


(c)

Fig. 9. Experimental results operating at $m_a=1.0/1.0$ for the resistive load : (a) output line to neutral voltages and line current, (b) output voltages of main and auxiliary inverter, (c) waveform quality of output voltage.

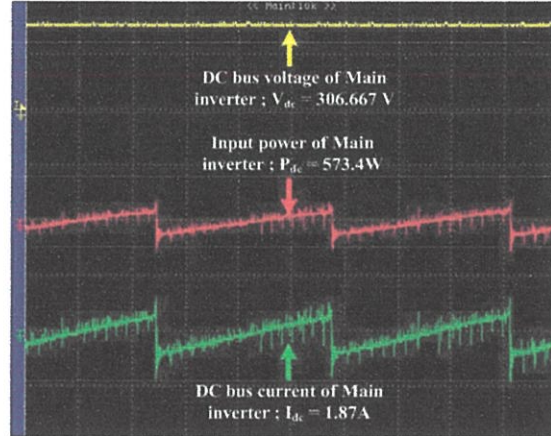


(a)

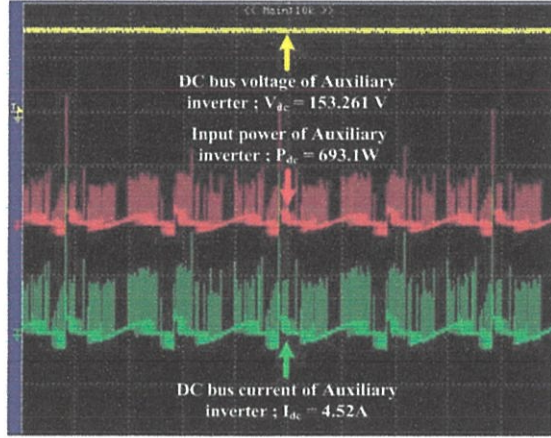


(b)

Fig. 10. Line to neutral and line to line voltage: (a) operating at $m_a = 0.4$, (b) operating at $m_a = 0.8$.



(a)



(b)

Fig. 11. Voltage, current and power waveforms operating at $m_a = 1.0/1.0$ on dc side: (a) main inverter, (b) auxiliary inverter.

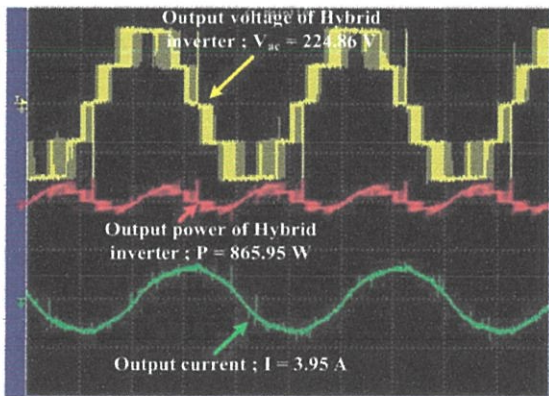


Fig. 12. Voltage, current and power per phase waveforms operating at $m_a = 1.0/1.0$ on ac side.

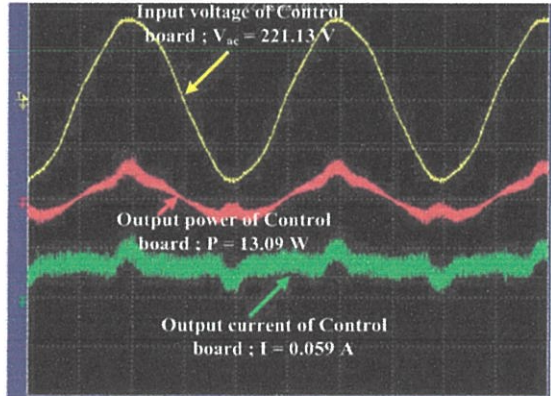


Fig. 13. Voltage, current and power waveforms on control board.

Fig. 14 shows the experimental results of the proposed HMI operating under faulty condition of auxiliary inverter at phase b. As can be seen, the waveform quality of output line to neutral voltages and line to line voltages is distorted and unbalanced as depicted in Fig. 14(a) and (b). The deteriorated waveform quality and unbalanced line to line voltages due to the fault occurring at phase b auxiliary inverter are solved by using the reconfiguration technique as previously explained in section IV.

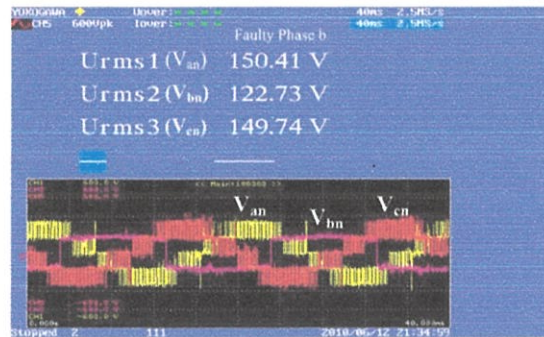
By utilizing the proposed HMI, a high quality output voltage waveform with high inverter efficiency and reliability can be achieved. In most cases, the HMI in renewable energy applications may not require a wide range of modulation indices; however, a wide range modulation index is needed for drive applications. Also, this HMI does require a half of dc input voltage of the main inverter supplying to the auxiliary inverter in order to achieve balanced output voltages.

VI. Conclusion

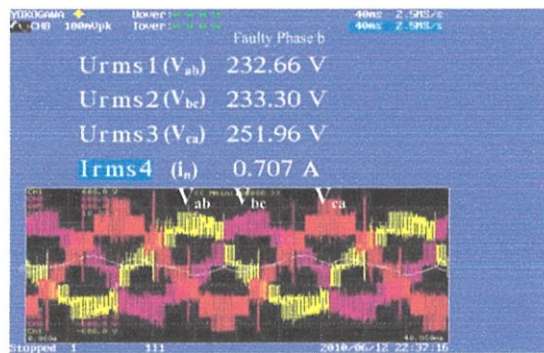
The hybrid cascaded multilevel inverter including a reconfiguration technique application for a low dc voltage distribution such as in telecommunication buildings has been developed. The modified PWM technique has also been proposed to reduce switching losses. Also, the proposed topology can reduce the number of required power switches compared to a traditional cascaded multilevel inverter. Simulation and experimental results have been validated including efficiency evaluation. The switching losses of the HMI are less than the conventional multilevel inverter; consequently, the system efficiency would be improved by utilizing the HMI. In addition, 97.45% inverter efficiency has been achieved based on this particular load condition. A possible reconfiguration technique after a fault condition has also been developed to improve the system reliability. The results show that proposed hybrid inverter topology is a promising method for a low voltage dc microgrid interfacing with renewable energy resources in a telecommunication building.

Acknowledgements

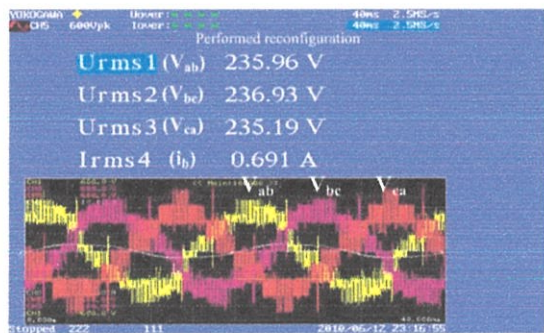
This work is supported by King's Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund and Thailand Research Fund under MRG5280027 contact number.



(a)



(b)



(c)

Fig. 14. Voltage and current waveforms showing: (a) Line to neutral voltages during fault at phase b condition, (b) Line to line voltages and neutral current during fault at phase b condition, (c) Line to line voltages and a line current after reconfiguration.

References

- [1] R. Lasseter, Microgrid, *Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2002*, pp. 305-308.
- [2] F. Z. Peng, Y. W. Li, L. M. Tolbert, Control and Protection of Power Electronics Interfaced Distributed Generation Systems in a Customer-Driven Microgrid, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, July 26-30, 2009, Alberta, Canada.
- [3] H. Kakigano, Y. Miura, T. Ise, R. Uchida, DC Micro-grid for Super High Quality Distribution -System Configuration and Control of Distributed Generations and Energy Storage Devices, *37th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2006, Korea.
- [4] D. Salomonson, A. Sannino, Low-Voltage DC Distribution System for Commercial Power System with Sensitive Electronic Loads, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 3, July 2007, pp 1620-1627.
- [5] S. Khomfoi, L. M. Tolbert, Multilevel Power Converters, *Power Electronics Handbook, 2nd Edition Elsevier, 2007*, ISBN 978-0-12-088479-7, Chapter 17, pp. 451-482.
- [6] S. Daher, J. Schmid, F. L. M. Antunes, Multilevel Inverter Topologies for Stand-Alone PV Systems, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 7, July 2008, pp. 2703-2711.
- [7] M. D. Manjrekar, P. Steimer, T. A. Lipo, Hybrid Multilevel Power Conversion System: A Competitive Solution for High Power Applications, *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 36, no. 3, May/June 2000, pp. 834-841.
- [8] Z. Du, B. Ozpineci, L. M. Tolbert, J. N. Chiasson, A Novel Inductor-less DC-AC Cascaded H-bridge Multilevel Boost Inverter for Electric/Hybrid Electric Vehicle Applications, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, September 23-27, 2007, New Orleans, Louisiana.
- [9] H. Liu, L. M. Tolbert, B. Ozpineci, Z. Du, Comparison of Fundamental Frequency and PWM Methods Applied on a Hybrid Cascaded Multilevel Inverter, *IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference*, Nov. 10-13, 2008, Orlando, Florida.
- [10] S. Mariethoz, A. Rufer, New Configurations for the Three-phase Asymmetrical Multilevel Inverter, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, October 3-7, 2004, Seattle, Washington.
- [11] S. Lu, S. Mariethoz, K. A. Corzine, Asymmetrical Cascade Multilevel Converters with Noninteger or Dynamically Changing DC Voltage Ratios: Concepts and Modulation Techniques, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 7, July 2010, pp. 2411-2418.
- [12] S. Khomfoi, N. Praisuwanna, A Hybrid Cascaded Multilevel Inverter for Interfacing with Renewable Energy Resources, *Proceedings of The 2010 International Power Electronics Conference (IPEC)*, June 21-24, 2010, Sapporo, Japan.
- [13] D. Eaton, J. Rama, P. W. Hammond, Neutral Shift, *IEEE Industry Applications Magazine*, Nov./Dec. 2003, pp. 40-49.
- [14] B. A. Welchko, T. A. Lipo, T. M. Jahns, S. E. Schulz, Fault Tolerant Three-Phase AC Motor Drive Topologies: A Comparison of Features, Cost, Limitations, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 4, Jul. 2004, pp. 1108-1116.
- [15] S. Khomfoi, N. Praisuwanna, L. M. Tolbert, A Hybrid Cascaded Multilevel Inverter Including a Reconfiguration Technique Application for Low Voltage DC Distribution, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Sept. 12-16, 2010.

Authors' information

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalokkrung Rd. Ladkrabang, Bangkok, 10520, THAILAND.

² Center of Excellence for Innovative Energy Systems, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalokkrung Rd. Ladkrabang, Bangkok, 10520, THAILAND.



Surin Khomfoi was born in Bangkok, Thailand, on September 1974. He received the B.Eng and the M.Eng in Electrical Engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, in 1997 and 2000 and the Ph.D. degree from University of Tennessee, USA in 2007. His research interests are electrical machines, electric drive and power electronic application. Currently, he is a lecturer at Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok Thailand.



Nattapat Praisuwanna was born in Bangkok, Thailand, on February 1988. He received the B.Eng and the M.Eng in Electrical Engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, in 2008 and 2011 His research interests are energy conversion and power electronic application. Currently, he is a researcher at Renewable Energy Application Laboratory, Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok Thailand.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ รองศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ คำฝอย

Name Assoc. Prof. Dr. Surin Khomfoi (S. Khomfoi)

เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3-1005-03667-16-5

หน่วยงาน

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
10520

โทร. 0-2326-4550, 0-2737-3000 ext 3936, 3515

Email: kkhsurin@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

- 1997 Bachelor's degree in Electrical Engineering (B.Eng), King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand
- 2000 Master's degree in Electrical Engineering (M.Eng), King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand
- 2007 Doctor of Philosophy (Ph.D.) in Electrical Engineering, University of Tennessee, USA.

ความถนัดในสาขา Power Electronics, AI-based Technique and Renewable Energy Applications

ทุนวิจัยที่เคยได้รับ

- 2007: หัวหน้าโครงการ, Grant from Faculty of Engineering, KMITL, Thailand on a Novel A Multilevel Inverter for Interfacing with Renewable Energy Sources.
- 2008: หัวหน้าโครงการ, Grant from Faculty of Engineering, KMITL, Thailand on a Hybrid inverter Hybrid Inverter for Renewable Energy Applications.

ผลงานวิจัยที่มีค่า Impact factor

- S. Khomfoi, L. M. Tolbert, "Fault Diagnostic System for a Multilevel Inverter Using a Neural Network," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, May 2007 pp. 1062-1069. มีค่า impact factor 2006: **1.029**
- S. Khomfoi, L. M. Tolbert, "Fault Diagnosis and Reconfiguration for Multilevel Inverter Drive Using AI based Techniques," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, 2007 (accepted - in press) มีค่า impact factor 2006: **0.59**
- S. Khomfoi, W. Sae-Kok, I. Ngamroo, "An Open Circuit Fault Diagnostic Technique in IGBTs for AC to DC Converters Applied in Microgrid Applications" *JPE Journal of Power Electronics*, vol. 11, No. 6 , November 2011, pp.801-810. มีค่า impact factor 2011: **0.3**