



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การวิเคราะห์และออกแบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้า
กระแสตรงโดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกพร้อมกับการลดขนาดตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้า
กระแสตรง

โดย นายอุเทน คำน่าน และคณะ

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การวิเคราะห์และออกแบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้า
กระแสตรงโดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกพร้อมกับการลดขนาดตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้า
กระแสตรง

ผู้วิจัย

1. ดร. อุเทน คำน่าน
2. รศ. ดร. วิบูลย์ ชื่นแขก

สังกัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชาไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
1. บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ก
2. บทคัดย่อภาษาไทย	ข
3. Executive summary	1
4. การจำลองการทำงาน	11
5. การติดตั้งระบบการทดลอง	27
6. ผลการทดลอง	29
7. ภาคผนวก	50
8. บทความที่ถูกต้องพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติเรื่องที่ 1	52
9. บทความที่ถูกต้องพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติเรื่องที่ 2	57
10. บทความที่ถูกต้องพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติเรื่องที่ 3	64
11. บทความที่ถูกต้องพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติเรื่องที่ 1	75

รหัสโครงการ	MRG5180328
ชื่อโครงการ	การวิเคราะห์ และออกแบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบ ซุกพร้อมกับการลดขนาดตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
ชื่อนักวิจัย	นายอุเทน คำน่าน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
E-mail Address	uthen@rmutl.ac.th
ระยะเวลาโครงการ	2 ปี นับตั้งแต่วันที่ 15 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2551 ถึงวันที่ 14 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2553

Abstract:

This paper presents an implementation and control of a high power-factor and fast dynamic transient response of the modular three-phase ac to dc converter using three CUK rectifier modules with a small dc bus capacitor. The methodology aims at finding the small dc bus capacitor which meets the desired system performance, with power balance control technique. Modeling a modular three-phase rectifier system is considered as the first step in the optimal sizing procedure. In this paper, mathematical average small-signal model for characterizing modular three-phase rectifier is proposed. Design of an analog controller for a small dc bus capacitor based modular three-phase rectifier is presented. The controller senses the parameters of the proposed system, and makes decisions about reject load and input voltage disturbances. The second step consists in minimize the sizing of the dc bus capacitor according to the transient response of dc bus output voltage and the delivered energy of capacitor concepts. Considering various types and capacities of dc bus capacitor, which can meet the desired system performance, are obtained by changing the type and size of the dc bus capacitors. The proposed system with the dc bus capacitor 470 μ F gives the optimal choice. A 750 W laboratory prototype with 470 μ F is implemented and tested to verify the feasibility of the proposed system. The experimental results show that the proposed system, meet the desired system performance. Therefore the system choice plays an important role in cost reduction.

Keywords : «Three-phase power supply», «Harmonics», «Power factor correction», «Rectifier», «Small dc bus capacitor».

บทคัดย่อ

รายงานการวิจัยนี้ได้นำเสนอ การวิเคราะห์ ออกแบบ สร้าง และควบคุมระบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยอาศัยโมดูลเรียงกระแสแบบซุกชนิดแยกโดดทางไฟฟ้าจำนวน 3 โมดูล ที่ระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง และมีผลตอบสนองทางพลวัตอย่างรวดเร็ว ขณะที่ระบบใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก วัตถุประสงค์หลักของกระบวนการที่ถูกออกแบบด้วยเทคนิคสมมูลกำลังไฟฟ้ากระทำเพื่อต้องการหาค่าความจุของตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่น้อยที่สุด พร้อมทั้งให้ระบบที่นำเสนอมีสมรรถนะที่ดีภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ ขั้นตอนของการวิจัยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้คือ ขั้นตอนที่ 1 กล่าวถึง ระบบที่นำเสนอถูกโมเดลบนหลักการของการเปลี่ยนแปลงสัญญาณขนาดเล็ก และถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK รายละเอียดของวงจรกำลัง และระบบควบคุมแบบแอนะล็อก สำหรับวงจรเรียงกระแสชนิด 3 เฟส แบบโมดูลที่ประกอบด้วยค่าตัวเก็บประจุขนาดเล็กที่บัสไฟตรงได้ถูกนำเสนอ ในกระบวนการของการควบคุม ได้ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็น เพื่อการกำจัดผลของการรบกวนที่เกิดขึ้นจากภาระ และแรงดันอินพุต ส่วนขั้นตอนที่ 2 กล่าวถึง กระบวนการของการทดสอบหาค่าตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยอาศัยแนวคิดจากผลการตอบสนองของกระแส และแรงดันที่ภาระเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงภาระอย่างทันทีทันใดพร้อมด้วยการพิจารณาจากพลังงานที่ถูกส่งผ่านจากตัวเก็บประจุ ขนาดและชนิดที่แตกต่างกันของตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟตรงถูกทดสอบ ระบบวงจรเรียงกระแส 3 เฟส ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 750 W พร้อมกับตัวเก็บประจุขนาด 470 μF ถูกติดตั้ง และทดสอบ เพื่อนำเสนอคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ได้กำหนดไว้ ผลการทดสอบที่ได้รับเป็นเครื่องยืนยันถึงความสามารถของระบบที่ได้ถูกนำเสนอในรายงานการวิจัยฉบับนี้เป็นอย่างดี เพราะฉะนั้น ด้วยเทคนิคที่นำเสนอสามารถช่วยลดขนาดของตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงลงได้ ซึ่งเป็นผลทำให้ต้นทุนของการผลิตวงจรเรียงกระแสชนิด 3 เฟส นี้ลดลงด้วยเช่นกัน

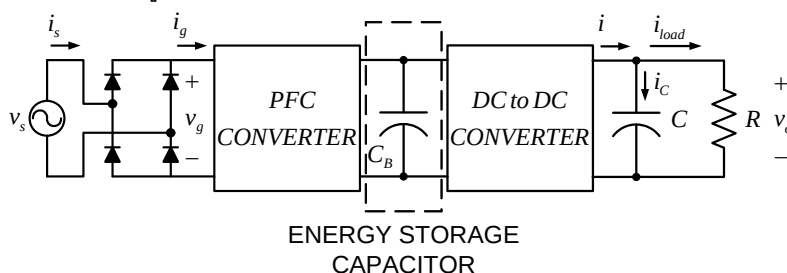
คำหลัก «แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าชนิด 3 เฟส» «ฮาร์มอนิก» «การแก้ไขตัวประกอบกำลัง» «วงจรเรียงกระแส» «ตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงขนาดเล็ก»

Executive summary

1. ความสำคัญ และที่มาของปัญหา

โดยทั่วไป ระบบการแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังที่แสดงอยู่ในภาพที่ 1 นั้นประกอบไปด้วยขั้นตอนของการแปลงผันที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ตอนที่ 1 เป็นวงจรการแก้ไขตัวประกอบกำลังและตอนที่ 2 เป็นวงจรที่ใช้เพื่อการควบคุมแรงดันเอาต์พุตพร้อมกับทำหน้าที่แยกโดเมนไฟฟ้าระหว่างภาคอินพุตและภาคเอาต์พุต [1] ตัวอย่างของระบบดังกล่าวถูกใช้งานอย่างแพร่หลายอยู่ในระบบการสื่อสารและคอมพิวเตอร์ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อภาระของระบบดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น ระบบการแปลงผันกำลังไฟฟ้าง่ายๆจำเป็นต้องถูกออกแบบใหม่ให้มีพิกัดกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นตามความต้องการของภาระนั้นๆ ทั้งในปัจจุบันและอนาคต ซึ่งการเพิ่มขึ้นของพิกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องแปลงผันในลักษณะแบบเดียวกันนี้ได้สร้างปัญหาติดตามมาอย่างมากมายให้กับผู้ออกแบบระบบดังกล่าว อาทิเช่น ปัญหาเรื่องการออกแบบระบบการระบายความร้อน ระบบต้องใช้อุปกรณ์ที่มีพิกัดแรงดันหรือกระแสเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ระบบโดยรวมมีความน่าเชื่อถือต่ำลงเมื่อเทียบกับพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบที่เพิ่มขึ้น ระบบไม่มีความคล่องตัวในระหว่างที่มีการซ่อมบำรุงเมื่อระบบเกิดความเสียหายและอื่นๆ ดังนั้น ระบบการแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังที่แสดงอยู่ในภาพที่ 1 จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้มีรูปแบบและลักษณะโครงสร้างไปเป็นแบบระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ถูกกระจาย [2] ซึ่งระบบดังกล่าวนี้ได้ให้ข้อดีหลายประการเมื่อถูกเปรียบเทียบกับส่วนส่วนของพิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่สูงขึ้น คือ ระบบมีความน่าเชื่อถือมากขึ้นเมื่อพิกัดกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ระบบทั้งหมดประกอบขึ้นจากโมดูลมาตรฐาน ระบบมีความยืดหยุ่นและมีความสามารถในการเผื่อพิกัดกำลังไฟฟ้าได้ในอนาคต อีกทั้งยังมีความสามารถในการบำรุงรักษาแม้ขณะระบบยังคงจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง จึงส่งผลให้ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในระบบการสื่อสารและระบบคอมพิวเตอร์ [3][4]

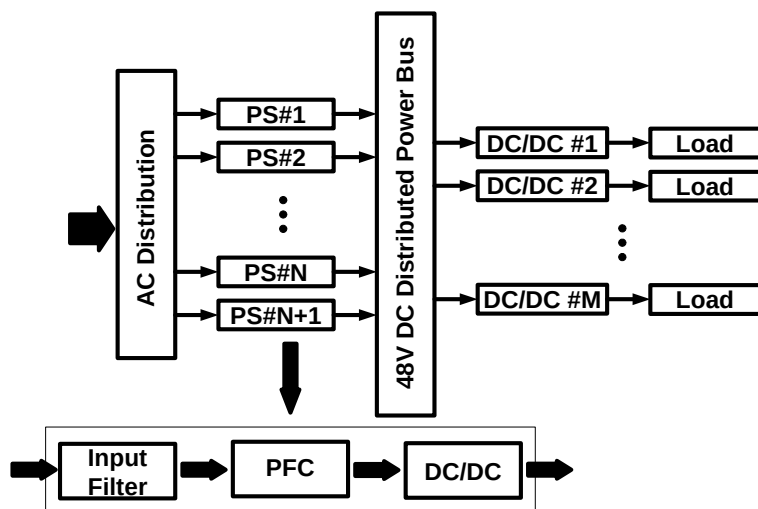
ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบรวมศูนย์ต้องมีคุณสมบัติด้านความน่าเชื่อถือที่สูงมาก เพราะเนื่องจากการทำงานที่ผิดพลาดเพียงแค่ครั้งเดียวอาจเป็นสาเหตุทำให้ระบบเกิดความเสียหายได้ แต่ในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย ความล้มเหลวของโมดูลกำลังใดๆ ทำให้เกิดผลกระทบน้อยในภาพรวมของระบบทั้งหมด เพราะเนื่องจากว่าระบบถูกออกแบบไว้ตามหลักการเผื่อกำลังไฟฟ้า (Redundancy) คือ $N+1$ ขณะที่ N คือ จำนวนต่ำสุดของโมดูลที่จำเป็นต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระ ข้อดีอีกประการระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย คือ สามารถเปลี่ยนโมดูลที่ได้รับความเสียหายได้อย่างทันทีทันใดและมีความยืดหยุ่นต่อการขยายเพิ่มพิกัดกำลังไฟฟ้าให้กับระบบภายในอนาคตตามความต้องการของภาระ แต่อย่างไรก็ตามระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายให้ข้อด้อยที่เห็นได้ชัด 2 ประการคือ ระบบที่ซับซ้อนเป็นผลทำให้ต้นทุนสูงขึ้นและผลของการรบกวนที่เกิดจากเครื่องแปลงผันที่ถูกวางติดต่อกันเป็นโครงสร้างแบบต่างๆ ประเด็นเรื่องความร้อนอาจถูกนำมาพิจารณาด้วยเพราะเนื่องจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้านั้นต้องถูกออกแบบให้มีขนาดที่เล็กหรือถูกติดตั้งและวางในพื้นที่จำกัด



ภาพที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของระบบการแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส

แต่อย่างไรก็ตาม โครงสร้างการต่อแบบขนานสามารถช่วยลดปัญหาเรื่องของการระบายความร้อนให้สามารถกระจายออกไปในแต่ละโมดูลได้เพราะเนื่องจากแต่ละโมดูลถูกออกแบบให้รองรับกำลังไฟฟ้าที่น้อยกว่าที่กักกำลังไฟฟารวมทั้งหมดในระบบ จึงส่งผลให้การออกแบบและจัดการเรื่องความร้อนทำได้ง่ายขึ้น บล็อกไดอะแกรมโดยทั่วไปของระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายถูกนำเสนออยู่ในภาพที่ 2 ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายประกอบขึ้นจากภาคส่วนต่างๆ ของการแปลงผันกำลังไฟฟ้า นิยามของคำว่าระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายมาจากความจริงที่ว่า หน่วยประมวลผลกำลังไฟฟ้าในระบบอาจไม่ได้ถูกวางไว้ในตำแหน่งเดียวกันตลอดเวลา แต่หน่วยประมวลผลกำลังไฟฟ้าดังกล่าวถูกกระจายไปในแต่ละที่โดยขึ้นอยู่กับชนิดและตำแหน่งของภาระที่ถูกติดตั้งอยู่ในระบบ สำหรับโครงสร้างที่ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 2 เครื่องแปลงผันส่วนหน้าถูกจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โดยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งบัสแรงดันดังกล่าวสามารถเป็นได้ทั้งระบบ 1 หรือ 3 เฟส กำลังไฟฟ้าถูกแปลงผันโดยเครื่องแปลงผันส่วนหน้าที่อยู่ในระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายกำลัง (Power Supplies : PSs) หมายเลข #1 จนถึงหมายเลข #N+1 แต่ละแหล่งจ่ายกำลังประกอบไปด้วยขั้นตอนของการแก้ไขตัวประกอบกำลังและเครื่องแปลงผันแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงถูกใช้เพื่อที่จะควบคุมแรงดันที่บัสกำลังไฟฟ้าที่ถูกกระจายออกไปที่พิกัดแรงดัน 48 V โมดูลเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่มีพิกัดกำลังความหนาแน่นสูงถูกกระจายอยู่ในส่วนหลังของบัสแรงดันไฟฟ้า 48 V โดยขึ้นอยู่กับความต้องการของภาระและการวางตำแหน่งเพื่อที่จะให้มีการควบคุมแรงดัน ณ จุดที่มีภาระต่ออยู่ ระบบถูกออกแบบเพื่อที่จะให้ได้การควบคุมจุดต่อเชื่อมของภาระที่ดีที่สุด นอกจากระบบจะต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระแล้ว เครื่องแปลงผันส่วนหน้าสำหรับการใช้งานในระบบการสื่อสารเองยังต้องถูกใช้เพื่อทำหน้าที่ประจุเซลล์ไฟฟ้าสำรองที่ถูกต่อคร่อมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกกระจายออกไป (ระบบไม่ได้ถูกแสดงในภาพที่ 2) แต่ในงานวิจัยฉบับนี้ได้มุ่งเน้นไปที่การหาแนวทางการควบคุมเครื่องแปลงผันส่วนหน้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายเพื่อให้ระบบมีสมรรถนะของการควบคุมที่ดีเป็นหลัก ดังนั้นในส่วนที่เป็นเครื่องแปลงผันภาระและส่วนที่ต้องทำหน้าที่ในการประจุเซลล์ไฟฟ้าสำรองจึงไม่ได้ถูกกล่าวถึง

เครื่องแปลงผันส่วนหน้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบการสื่อสารและระบบเครื่องคอมพิวเตอร์หลักในระบบโครงข่าย ระบบเครื่องแปลงผันส่วนหน้าที่มีอยู่ในตลาดอุตสาหกรรมการสื่อสารสามารถแบ่งแยกได้ด้วยระดับของพิกัดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ระดับหลัก 100 W จนถึง ระดับ 2-3 kW สำหรับการใช้งานในระบบเครื่องคอมพิวเตอร์หลักในระบบโครงข่าย ระดับกำลังไฟฟ้าจะอยู่ที่ประมาณ 1 kW อย่างไรก็ตามตลาดการค้าแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบคอมพิวเตอร์หลักในระบบโครงข่ายนั้นเติบโตอย่างรวดเร็ว ดังนั้น การเพิ่มกำลังไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งที่ต้องการสำหรับการใช้งานในระบบนี้

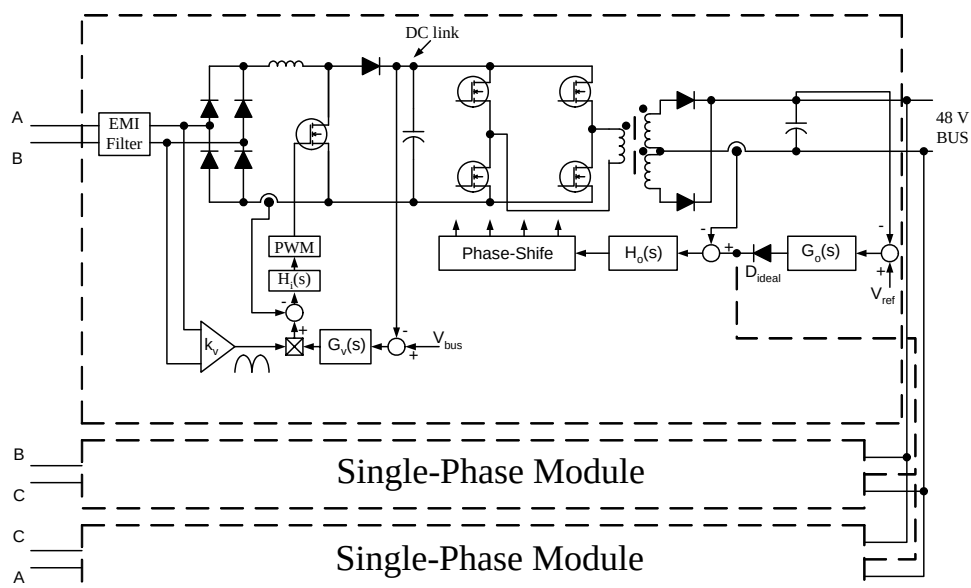


ภาพที่ 2 โครงสร้างระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย

ขั้นตอนของการแก้ไขตัวประกอบกำลังของเครื่องแปลงผันส่วนหน้าได้กลับกลายมาเป็นเรื่องที่สำคัญในระดับนานาชาติ และภูมิภาคยุโรป มาตรฐานที่ได้ถูกกล่าวถึงโดยทั่วไป เป็นการจำกัดการแพร่กระจายของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อย่างไรก็ตาม จึงเป็นเรื่องที่ยากสำหรับที่จะต้องเพิ่มฟังก์ชันของการแก้ไขตัวประกอบกำลังเข้าไปในระบบเครื่องแปลงผันส่วนหน้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายในขณะที่ต้องไม่ทำให้ราคาต้นทุนของระบบสูงขึ้น โดยเฉพาะสำหรับงานที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูง (6 kW และมากกว่า) ผลที่สุดก็คือ งานวิจัยในวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังสำหรับงานที่ต้องการพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงยังคงเปิดกว้างสำหรับนักวิจัยเพื่อที่จะหาทางออกของการแก้ไขปัญหาคือดีและสามารถลดต้นทุนให้ได้อย่างมีนัยสำคัญ ชัดเจนว่า สมรรถนะของเครื่องแปลงผันส่วนหน้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายต้องถูกทำให้ดีขึ้น โดยไม่คำนึงถึงการลดลงของต้นทุนใดๆ ในวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังของวงจรส่วนหน้า การหาวิธีการควบคุมและออกแบบระบบดังกล่าวให้มีสมรรถนะโดยรวมที่ดีจึงเป็นสิ่งที่ท้าทายอย่างยิ่ง จึงส่งผลให้ประเด็นสำคัญนี้จะต้องถูกกล่าวถึงอย่างละเอียดต่อไป

2. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

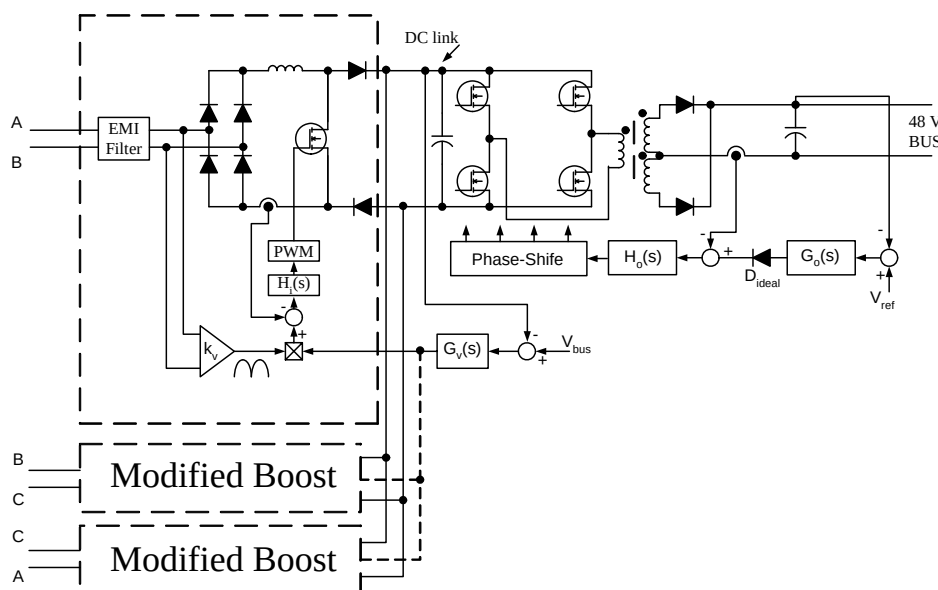
ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการออกแบบนวัตกรรมเครื่องแปลงผันส่วนหน้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูง [5][6][7] สำหรับอนาคตนั้นคือ เรื่องต้นทุนการผลิต แต่อย่างไรก็ตาม สิ่งที่ต้องพิจารณาควบคู่ไปด้วยกันคือ ประเด็นเรื่องสมรรถนะโดยรวมของระบบซึ่งต้องถูกนำมาพิจารณาร่วมอยู่ในกระบวนการของการออกแบบระบบด้วยเช่นกัน เครื่องแปลงผันส่วนหน้าสำหรับการนำไปใช้งานในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายต้องประกอบด้วยคุณสมบัติที่ดีดังนี้ ตัวประกอบกำลังสูง ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ต่ำ ประสิทธิภาพสูง ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูง ความเชื่อถือได้สูงและมีการรบกวนจากการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำ เพื่อที่จะควบคุมให้ระบบเครื่องแปลงผันส่วนหน้ามีสมรรถนะที่ดีดังที่ได้กล่าวไว้ ส่วนขั้นตอนของวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังและส่วนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต้องไม่ทำให้ระบบมีความยุ่งยากและซับซ้อน หนึ่งในบรรดาระบบเครื่องแปลงผันส่วนหน้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายที่มีพิกัดกำลังสูงแบบทั่วไปได้ใช้วิธีการแปลงแบบ 2 ตอน โดยอาศัยโมดูลกำลังชนิด 1 เฟส ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 วงจรเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่อาศัยโมดูลเครื่องแปลงผันแบบการแปลง 2 สถานะ จำนวน 3 โมดูล

ในตอนแรกของการแปลงผันของแต่ละโมดูลถูกใช้ทำหน้าที่แก้ไขตัวประกอบกำลัง เพื่อให้ระบบที่นำเสนอผ่านมาตรฐานกระแสฮาร์โมนิกส์ เช่น มาตรฐาน EN 61000-3-2 ขณะที่ ขั้นตอนที่ 2 เป็นเครื่องแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรงของระบบและเพื่อควบคุมการแบ่งกระแสในแต่ละโมดูล วงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังของแต่ละโมดูลทำงานอยู่ในโหมดกระแสไหลอย่างต่อเนื่องและถูกควบคุมด้วยโหมดการควบคุมกระแสเฉลี่ย สมรรถนะที่ได้จากวิธีการควบคุมแบบ 2 ขั้นตอนนี้ให้สมรรถนะของการควบคุมที่ดีแต่รูปแบบของระบบเองทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น เพราะเนื่องจากจำนวนของอุปกรณ์ที่ถูกใช้ภายในวงจรเพื่อที่จะให้ระบบสามารถทำงานได้จริง ยิ่งกว่านั้น เพื่อที่จะทำงานในโหมดกระแสไหลอย่างต่อเนื่อง วงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง 1 เฟส ต้องการการควบคุมที่ซับซ้อน เช่นเดียวกับระบบต้องการตัวเก็บประจุระหว่างกลางขนาดใหญ่เพื่อที่จะจำกัดแรงดันกระแสเฟสที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและเพื่อที่จะรองรับกำลังไฟฟ้าที่มีค่าความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่ไลน์บัสเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรงส่วนกลาง ถึงแม้ว่าจะเป็นเช่นนั้นก็ตาม ระบบการกระจายกำลังไฟฟ้าแบบ 2 ขั้นตอน ที่ใช้โมดูลเครื่องแปลงผันส่วนหน้าชนิด 1 เฟส ยังคงมีข้อดีตรงที่มีลักษณะการทำงานเป็นโมดูล ซึ่งเป็นตัวชี้วัดหนึ่งของระบบที่ต้องการสมรรถนะที่ดี ขณะที่หลักการเผื่อกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการออกแบบ $n=N+1$ ยังคงสามารถถูกเลือกเพื่อนำมาใช้ได้กับระบบนี้เช่นกัน

อีกวิธีทางเลือกหนึ่งที่เป็นไปได้สำหรับการช่วยลดต้นทุนของเครื่องแปลงผันส่วนหน้าคือ ให้ทำการจัดขั้นตอนของวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่าย โดยการต่อเอาต์พุตทั้งสามของแต่ละโมดูลเรียงกระแสแบบบัสชนิด 1 เฟส เข้าด้วยกัน เพื่อที่จะกำจัดกำลังไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นพัลส์ (100 Hz) ในบัสส่วนกลางเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ในขณะที่ระบบยอมให้ใช้เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพียงตัวเดียวในขั้นตอนที่ 2 ของการแปลงแรงดัน ดังถูกแสดงในภาพที่ 4 ด้วยวิธีนี้ ขนาดของตัวเก็บประจุที่บัสส่วนกลางสามารถถูกลดขนาดลงมาได้ เพราะเนื่องจาก กำลังไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นพัลส์ถูกกำจัดไปแล้ว อย่างไรก็ตาม การต่อกันโดยตรงทางด้านเอาต์พุตของโมดูลเรียงกระแสบัส 1 เฟส ก่อให้เกิดผลกระทบระหว่างกันของภาควงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง เพื่อที่จะลดผลของการมีปฏิริยาต่อกันในโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 4



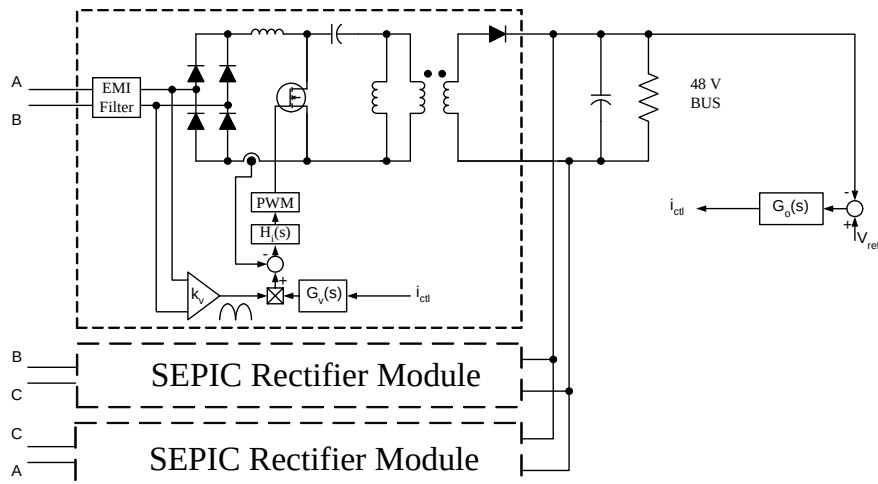
ภาพที่ 4 วงจรเครื่องแปลงผันส่วนหน้าชนิด 3 เฟส อย่างง่ายที่ใช้โมดูลเรียงกระแส 1 เฟส จำนวน 3 โมดูล ที่ระบบถูกต่อแบบขนานร่วมกันจ่ายกระแสทางภาคเอาต์พุต

ขดลวดเหนี่ยวนำจะต้องถูกแยกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ขณะที่ไดโอดถูกต่อเพิ่มเข้าไปในโครงสร้างของวงจรของแต่ละโมดูลเรียงกระแสนับ 1 เฟส สำหรับที่สภาวะของการทำงานที่เหมาะสม ค่าแรงดันบัสส่วนกลางต้องมีค่าอย่างน้อยเป็น 2 เท่าของค่ายอดแรงดันอินพุต ซึ่งหมายความว่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าของสวิตช์กำลังวงจรบัสต้องมีค่าอย่างน้อยเท่ากับ 800 V เมื่อถูกนำไปใช้ในระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีค่าพิกัดแรงดันอินพุตระหว่างไลน์กับไลน์ที่ค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าปกติเป็น 380 V ในขณะที่สวิตช์ของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะพบกับความเครียดแรงดันที่สูงกว่าปกติ เพราะฉะนั้นโครงสร้างการทำงานของสวิตช์แบบ 3 ระดับต้องถูกนำมาใช้กับระบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังกล่าว

เครื่องแปลงผันบัสชนิดไม่แยกไดโอด 1 สวิตช์เป็นวงจรต้นแบบที่ได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในการแก้ไขตัวประกอบกำลังในระบบ 1 เฟส ขณะที่เครื่องแปลงผันแบบฟีดแบคลิฟท์เอมบูสต์ 6 สวิตช์ เป็นต้นแบบของวงจรมাত্রฐานที่ถูกนำมาใช้งานในระบบ 3 เฟส แต่เป็นที่ทราบกันดีถึงข้อด้อยในวงจรต้นแบบบัสชนิดไม่แยกไดโอดว่า แรงดันเอาต์พุตที่ได้มีค่าสูงกว่าค่ายอดของแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ ทำให้ระบบต้องใช้สวิตช์กำลังที่มีพิกัดแรงดันสูงเมื่อทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่องและระบบควบคุมมีความสลับซับซ้อนมาก ส่วนในระบบวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง 3 เฟส ที่ใช้เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 สวิตช์ ได้ให้ผลของการแก้ไขกระแสฮาร์มอนิกส์ไปในอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งไม่ตรงกับเป้าหมายของงานวิจัยนี้ ในส่วนเครื่องแปลงผันที่ทำงานอยู่ในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่องยังคงไม่เป็นที่น่าสนใจเพราะเนื่องจากว่าระบบต้องใช้สวิตช์กำลังที่มีพิกัดทนต่อแรงดันตกคร่อมสวิตช์ที่สูงมากและผลกระทบของการสอดแทรกของสนามแม่เหล็กที่มีค่าสูงด้วยเช่นกัน

ระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอินพุตชนิด 3 เฟส ระบบการแปลงผันกำลังไฟฟ้างดกล่าวประกอบด้วยสถานะของการแปลง 3 ขั้นตอน ดังนี้ คือ ส่วนที่หนึ่ง เรียกว่าภาคเรียงกระแสซึ่งทำหน้าที่แก้ไขตัวประกอบกำลังและแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่พิกัดแรงดันเกิน 200 V ขึ้นไป โดยระบบไม่มีการแยกไดโอดทางไฟฟ้า ส่วนที่สองเป็นเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกแยกไดโอดทางไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงค่าสูงไปสู่ค่าต่ำ (ค่าของระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) และส่วนที่สามเป็นจุดต่อรวมของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ภาระเรียกใช้งาน ซึ่งระบบทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าต่ำให้กับภาระตามแต่ความต้องการของภาระชนิดนั้นๆ ระบบนี้ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการแปลงผันกำลังไฟฟ้าในแบบ 3 ขั้นตอนนี้ต่ำ แม้ว่าแต่ละโมดูลที่นำมาประกอบรวมกันจะมีค่าประสิทธิภาพที่สูงก็ตาม

ด้วยประเด็นปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ ยังคงมีอีกวิธีทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เป็นระบบเครื่องแปลงผันส่วนหน้าที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ดีในระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า คือ วงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง 3 เฟส แบบ 1 ตอน ที่ใช้เครื่องแปลงผันซีฟิคชนิด 1 เฟส ที่ถูกแยกไดโอดทางไฟฟ้า โดยระบบถูกควบคุมให้ทำงานอยู่ในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่อง ได้ถูกนำเสนออยู่ในภาพที่ 5 [8] เครื่องแปลงผันประกอบไปด้วย โมดูลแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบซีฟิคชนิด 1 เฟส ที่ถูกแยกไดโอดทางไฟฟ้า จำนวน 3 โมดูล (วงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบ 1 ตอน ได้ถูกนิยามขึ้นมาจากระบบที่สามารถควบคุมให้กระแสอินพุตใกล้เคียงไซน์และสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้ดีในขณะที่มีการแยกไดโอดทางไฟฟ้าระหว่างภาคอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับและภาคเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรง) วิธีการนี้ถูกค้นพบว่ามีเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานในพิกัดกำลังไฟฟ้าระดับต่ำถึงระดับกลาง การใช้วงจรเครื่องแปลงผันชนิด 1 เฟสที่ถูกแยกไดโอดทางไฟฟ้าช่วยลดปัญหาของผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างเฟสของแรงดันอินพุตได้ สิ่งที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งในการเลือกใช้งานในระบบนี้ คือ วงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังชนิด 1 เฟส เป็นวงจรที่ได้รับการศึกษาและพัฒนาจนเป็นที่รู้จักกันดีและมีความหลากหลายในการเลือกใช้งาน



ภาพที่ 5 วงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง ชนิด 3 เฟส ที่ใช้วงจรเรียงกระแสแบบซีพิก ชนิด 1 เฟสจำนวน 3 โมดูล

อย่างไรก็ตาม ระบบนี้ได้ถูกออกแบบไว้ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 500 W และแรงดันอินพุตไลน์กับไลน์เท่ากับ 200 V ถูกเลือกใช้เพื่อที่จะจำกัดแรงดันตกคร่อมสวิตช์ของซีพิกไม่เกิน 500 V ดังนั้นถ้าระบบนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับระบบงานที่มีระบบไฟฟ้ากระแสสลับอินพุตเป็น 3 เฟส 4 สาย 220V/380 V ระบบดังกล่าวจึงสามารถให้สมรรถนะที่ดีได้

3. ทฤษฎี สมมติฐาน หรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

แนวทางในการทำงานวิจัยนี้จะได้กล่าวถึงการวิเคราะห์ และออกแบบเครื่องแปลงผันส่วนหน้าในระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งในระบบการสื่อสาร ระบบเมนเฟรมคอมพิวเตอร์ และเครื่องคอมพิวเตอร์หลักในระบบโครงข่ายที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าอยู่ในระดับกลางจนถึงระดับสูง [9][10][11] ผู้วิจัยมีสมมติฐานและเหตุผลหลักอยู่ด้วยกัน 2 ประการสำหรับการวิจัยเพื่อพัฒนาเครื่องแปลงผันส่วนหน้าที่ถูกนำไปใช้ในระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูง คือ ประการที่ 1 เพื่อที่จะปรับปรุงคุณภาพของระบบกำลัง เนื่องจากค่ากระแสฮาร์มอนิกจะต้องถูกจำกัดอยู่ภายในข้อกำหนดที่ได้ถูกกำหนดขึ้นโดยมาตรฐาน EN 61000-3-2 ประการที่ 2 คือ เพื่อที่จะหาแนวทางและวิธีการการควบคุมอย่างง่าย ที่ไม่มีความยุ่งยากซับซ้อนแต่ให้ประสิทธิภาพเพื่อควบคุมให้เครื่องแปลงผันส่วนหน้าของระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าส่วนหน้ามีสมรรถนะที่ดีซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการของระบบดังกล่าว

ดังนั้น บนพื้นฐานของการสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูลดังที่ได้กล่าวมา งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอความพยายามอย่างต่อเนื่องเพื่อที่จะหาวิธีการและแนวทางใหม่ของการควบคุมระบบที่ทำให้ระบบควบคุมมีความง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อนแต่มีประสิทธิภาพสำหรับการขนานระบบเครื่องแปลงผันส่วนหน้า 3 เฟส ที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เป้าประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ เพื่อที่จะวิเคราะห์ออกแบบ สร้างระบบควบคุมและวงจรกำลังต้นแบบของเครื่องแปลงผันส่วนหน้าสำหรับจ่ายภาระที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด 750 W เพื่อให้ระบบดังกล่าวมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ คือ ลดความยุ่งยากของการวิเคราะห์ เพื่อหาระบบควบคุมและระบบมีสมรรถนะที่ดีในขณะที่ระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังสูง

เพื่อที่จะแสดงให้เห็นจริงถึงการบรรลุถึงวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ งานวิจัยฉบับนี้จึงได้แบ่งหัวข้อของงานวิจัยออกเป็น 3 ประเด็นหลักดังนี้คือ

1. สร้างระบบแก้ไขตัวประกอบกำลังชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแส
2. ทดสอบการตอบสนองของระบบภายใต้กรณีที่ใช้และไม่ใช้หลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า
3. ทดสอบสมรรถนะของระบบบนเงื่อนไขของการลดขนาดของตัวเก็บประจุเอาต์พุต

4. เอกสารอ้างอิงของโครงการวิจัย

4.1 Sebastian, J., Jaureguizar, M., and Uceda, J., "An Overview of Power Factor Correction in Single-Phase Off-Line Power Supply Systems." IEEE IECON. (1994) : 1688-1693.

4.2 Tabisz, W.A., Jovanovic, M., and Lee, F.C. "Present and Future of Distributed Power Systems." Applied Power Electronics Conference and Exposition. (1992) : 11-18.

4.3 Bodi, F. "Distributed Power Systems (Telecommunication Power Supply)." INTELEC. (1988) : 143-150.

4.4 Heath, C.C. "The Market for Distributed Power Systems." Applied Power Electronics Conference and Exposition. (1991) : 225-229.

4.5 Heldwein, M.L., Souza, A.F., and Barbi, I. "A Simple Control Strategy Applied to Three-Phase Rectifier Units for Telecommunications Applications Using Single-Phase Rectifier Modules." Power Electronics Specialists Conference. (1999) : 795-800.

4.6 Spiazzi, G., and Lee, F.C. "Implementation of Single-Phase Boost Power-Factor-Correction Circuits in Three-Phase Applications." IEEE Transactions on Industrial Electronics. vol. 44 no. 3, (June 1997) : 365-371.

4.7 Manias, S. "A 3 phase inductor fed SMR converter with high frequency transformer isolation, high power density and improved power factor." IEEE PESC. (1987) : 253-263.

4.8 Ayyanar, R., Mohan, N., and Sun, J. "Single-Stage Three-Phase Power-Factor-Correction Circuit Using Three Isolated Single-Phase Sepic Converters Operating in CCM," PESC. 2000 : 353-358.

4.9 Alves, R.L.; Barbi, I.," Analysis and Implementation of a Hybrid High-Power-Factor Three-Phase Unidirectional Rectifier ", IEEE Transactions on Power Electronics, Volume: 24 , Issue: 3, 2009 , Page(s): 632 - 640

4.10 Greul, R.; Round, S.D.; Kolar, J.W.; "Analysis and Control of a Three-Phase, Unity Power Factor Y-Rectifier ", IEEE Transactions on Power Electronics, Volume: 22 , Issue: 5, 2007 , Page(s): 1900 – 1911

4.11 Bo Yin; Oruganti, R.; Panda, S.K.; Bhat, A.K.S.; "An Output-Power-Control Strategy for a Three-Phase PWM Rectifier Under Unbalanced Supply Conditions ", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 55 , Issue: 5 , 2008 , Page(s): 2140 – 2151

5. วัตถุประสงค์

5.1 เพื่อวิเคราะห์ จำลองและออกแบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก จำนวน 3 โมดูล บนหลักการสมดุลงำลังไฟฟ้า

5.2 เพื่อสร้างระบบต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก จำนวน 3 โมดูล

5.3 เพื่อศึกษาผลกระทบจากการต่อโครงสร้างระบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก จำนวน 3 โมดูล ในรูปแบบ 3 เฟส 3 สาย (แบบเดลต้า) และ 3 เฟส 4 สาย (แบบวาย)

5.4 เพื่อทดสอบหาค่าตัวเก็บประจุเอาต์พุตที่เหมาะสมของระบบที่นำเสนอบนหลักการสมดุลงำลังไฟฟ้า

6. วิธีการทดลอง

ขั้นตอน	วิธีการ	ระยะเวลา																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1. ศึกษาผลงานวิจัยที่มีมาก่อน	สืบค้น สืบอ่านและอ่าน																								
2. รวบรวมข้อมูลที่เป็นต้องให้อ้างอิง	แบ่งแยกเป็นหมวดหมู่																								
3. ออกแบบระบบเพื่อจำลองการทำงาน	คิดและคำนวณ																								
4. จำลองการทำงานของระบบที่นำเสนอ	ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์																								
5. วิเคราะห์ผลการจำลอง	เปรียบเทียบมาตรฐาน																								
6. สรุปผล และเขียนบทความ	รวบรวม เขียน																								
7. ออกแบบระบบโมเดลกำลัง	คิดและคำนวณ																								
8. ออกแบบระบบควบคุม	คิดและคำนวณ																								
9. จัดซื้ออุปกรณ์	สั่งซื้อ																								
10. สร้างโมเดลต้นแบบจำนวน 3 โมเดล	ประกอบและติดตั้ง																								
11. สร้างชุดควบคุม ทดสอบวงจรควบคุม	ประกอบและติดตั้ง																								
12. ทดสอบระบบที่ต่อแบบลดต่ำ	ทดลอง																								
13. ทดสอบระบบที่ต่อแบบขยาย	ทดลอง																								
14. ทดสอบการลดขนาดของตัวเก็บประจุ	ทดลอง																								
15. ปรับแต่งระบบที่นำเสนอ	ทดลอง																								
16. บันทึก ยบ วิเคราะห์และสรุปผล	จัดเก็บเป็นฐานข้อมูล																								
17. เสนองานวิจัยเพื่อตีพิมพ์ / จัดสิทธิบัตร	จัดพิมพ์																								
18. ส่งรายงานฉบับสมบูรณ์	จัดพิมพ์																								
19. ส่งรายงานรอบ 6 เดือน	จัดพิมพ์																								

7. เอาต์พุตจากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

เวลา/ผลงาน	ผลงานของโครงการ	ผลงานพิเศษ
ช่วงเวลาที่ 1 เดือนที่ 1-6	- ส่งรายงานความก้าวหน้าของโครงการครั้งที่ 1 ซึ่งมีเนื้อหา ดังนี้ - ออกแบบ และวิเคราะห์ระบบเพื่อแสดงการทดสอบระบบด้วยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Simulink - วิเคราะห์และสรุปผล - บทความตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 2 บทความ [2.1] Kamnarn, U. Yousawat, S. Kanthaphayao, Y. Chunkag, V.; "Redundant three-phase AC to DC converter using single-phase CUK rectifier module with minimized DC bus capacitance", IEEE International Conference on Industrial Technology, 2009. ICIT 2009. Year: 2009 , Page(s): 1 – 6 [2.2] Kanthaphayao, Y.; Wisutmetheekorn, P.; Kamnarn, U.; Chunkag, V.; "Distributed control of parallel AC to DC converter ", 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2009. ECTI-CON 2009, Volume: 01, 2009 , Page(s): 68 - 71	ไม่มี
ช่วงเวลาที่ 2. เดือนที่ 7-12	- ส่งรายงานความก้าวหน้าของโครงการครั้งที่ 2 ซึ่งมีเนื้อหา ดังนี้ - วงจรเรียงกระแสต้นแบบจำนวน 3 โมดูล - ระบบควบคุมต้นแบบจำนวน 1 ชุด - ผลการทดสอบระบบต้นแบบที่น่าเสนอ	ไม่มี
ช่วงเวลาที่ 3. เดือนที่ 13-18	- ส่งรายงานความก้าวหน้าของโครงการครั้งที่ 3 ซึ่งมีเนื้อหา ดังนี้ - ทดสอบสมรรถนะและสภาวะต่าง ๆ ของระบบที่น่าเสนอ - แก้ไข ทดลองและบันทึกผลการทดลอง - บทความตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 1 บทความ [2.1] Kamnarn, U.; Yousawat, S.; Kanthaphayao, Y.; Chunkag, V.; "Analysis, design and implementation of a three-phase AC to DC converter using single-phase isolated CUK rectifier modules with small DC bus capacitor ", 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. 2009 , Page(s): 1 - 10 - บทความตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 1 บทความ [3.1] Kamnarn, U.; Chunkag, V.; "Analysis and Design of a Modular Three-Phase AC-to-DC Converter Using CUK Rectifier Module With Nearly Unity Power Factor and Fast Dynamic Response ", IEEE Transactions on Power Electronics, Volume: 24 , Issue: 8, 2009 , Page(s): 2000 – 2012	ไม่มี
ช่วงเวลาที่ 4 เดือนที่ 19-24	- ต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการของเครื่องแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกจำนวน 1 ชุด - รายงานฉบับสมบูรณ์ - บันทึกระดับปริญญาตรี จำนวน 3 คน - สิทธิบัตรที่อยู่ในระหว่างขั้นตอนของ การขอจดสิทธิคุ้มครอง จำนวน 1 เรื่อง การขนานเครื่องแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยใช้โมดูลเครื่องแปลงผันเรียงกระแสแบบซุกด้วยหลักการสมมูลย์กำลังไฟฟ้า	สิทธิบัตรที่กำลังอยู่ในระหว่างขั้นตอนการขอจดเพื่อคุ้มครองจำนวน 1 เรื่อง

การจำลองการทำงาน

ในตอนหนึ่งของรายงานการวิจัยได้กล่าวถึง การวิเคราะห์ ออกแบบ เพื่อจำลองการทำงานวงจรเรียงกระแสคุณภาพสูงจำนวน 2 โครงสร้าง คือ โครงสร้างการขนานเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกจำนวน 3 โมดูล และเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกจำนวน 3 โมดูล โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

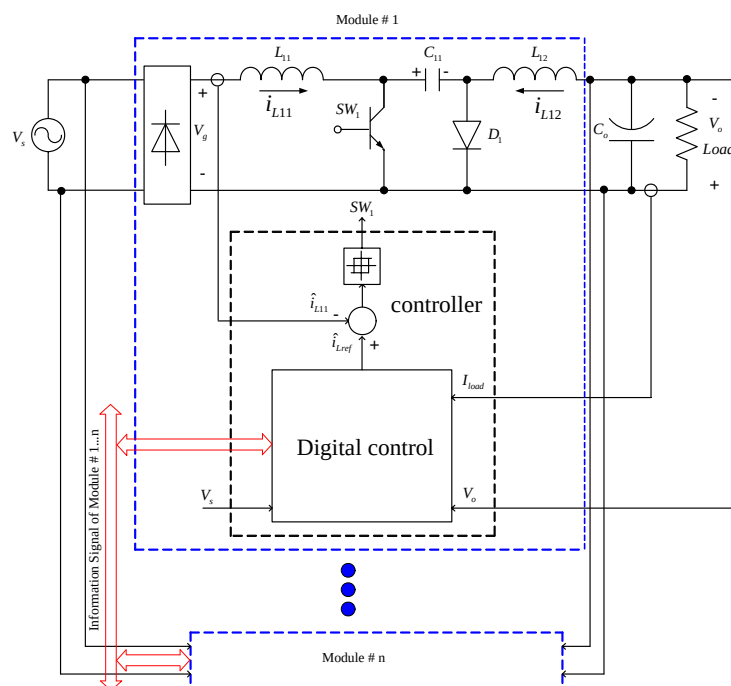
1. ทดสอบแนวคิดของหลักการสมมูลกำลังไฟฟ้า
2. เพื่อจำลองสภาวะคงตัว และสภาวะชั่วคราวของระบบก่อนสร้างระบบจริง
3. เพื่อทดสอบสภาวะการเผื่อกำลังไฟฟ้าตามหลักการ $n=N+1$
4. เพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟตรง

1. การวิเคราะห์ และจำลองการทำงานวงจรเรียงกระแสในโครงสร้างแบบขนาน ที่ระบบควบคุมถูกกระจายและฝังตัวอยู่ในแต่ละโมดูล

ในตอนนี้ได้กล่าวถึงการขนานวงจรเรียงกระแสที่ระบบควบคุมถูกออกแบบให้ฝังตัวอยู่ในแต่ละโมดูลของวงจรกำลังซึ่งระบบถูกออกแบบอยู่บนหลักการสมมูลกำลังไฟฟ้า ระบบกำลังใช้วงจรเรียงกระแสซุกชนิด 1 เฟส จำนวน 3 วงจร ซึ่งแต่ละวงจรถูกออกแบบให้ทำงานในโหมดกระแสไหลอย่างต่อเนื่อง ระบบควบคุมประกอบด้วยลู่วิธีควบคุมแรงดัน และลู่วิธีจ่ายกระแสขดลวดเหนี่ยวนำแต่ละโมดูล ระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัลถูกใช้เพื่อให้ระบบควบคุมที่นำเสนอมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดี ผลการจำลองการทำงานที่ 250 W/โมดูล ถูกนำเสนอ ซึ่งระบบให้ผลการจำลองเป็นที่น่าสนใจ และสามารถนำผลที่ได้ไปใช้เพื่อการออกแบบระบบจริงต่อไป

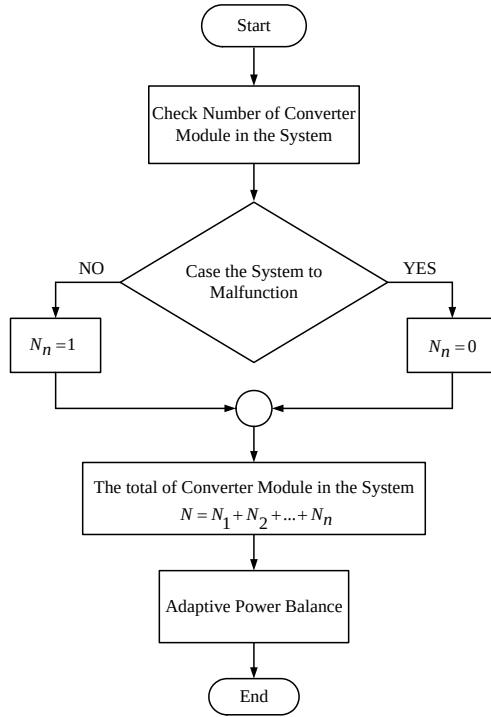
1.1 วงจรกำลัง และระบบควบคุมที่นำเสนอ

ภาพที่ 1 แสดงระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายที่ระบบควบคุมถูกออกแบบ และติดตั้งอยู่ในวงจรกำลังของแต่ละโมดูล การสื่อสารระหว่างโมดูลกระทำได้โดยผ่านบัสสื่อสารที่ถูกสร้างขึ้น ซึ่งผลของการออกแบบเช่นนี้ทำให้ระบบเครื่องแปลงผันที่นำเสนอมีความฉลาดมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 1 โดอะแกรมระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายที่ใช้ระบบควบคุมแบบฝังตัวในแต่ละโมดูล





ภาพที่ 4 ผังงานระบบควบคุมแบบฝังตัวในส่วนการตัดสินใจเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์

1.2 การวิเคราะห์ และออกแบบระบบ

การวิเคราะห์ และหาโมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบที่นำเสนออาศัยหลักการวิเคราะห์จากการเปลี่ยนแปลงสัญญาณขนาดเล็กรอบๆ จุดทำงานของระบบ ระบบถูกกำหนดให้ไม่มีการสูญเสีย และกระแสที่ขดลวดเหนี่ยวนำถูกควบคุมให้เป็นไปตามที่ได้กำหนดไว้ จึงสามารถเขียนสมการที่สำคัญได้ดังนี้ สมการสมดุลกำลังไฟฟ้าของระบบ

$$V_g \sum_{i=1}^n I_{Li} = V_o I_o \quad (1)$$

สมการกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูล

$$i_{Lref1i} = \hat{I}_{Lref1i} |\sin(\omega t)| \quad (2)$$

สมการสมดุลกำลังไฟฟ้าโดยมองผ่านอัตราการแปลงผัน k_s

$$V_g \sum_{i=1}^n \hat{I}_{Li} = k_s V_o I_o \quad (3)$$

ย้ายข้างสมการ จะได้ค่ายอดของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำ

$$\hat{I}_{Li} = \frac{k_s V_o I_o}{3V_g} \quad (4)$$

สมการค่ายอดของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำอ้างอิง

$$\hat{I}_{Lref1i} = \hat{I}_{Li} + I_{VR} \quad (5)$$

สมการพลวัตของระบบที่บัสแรงดันไฟตรง

$$\sum_{i=1}^n I_{L2i} = C_o \frac{dV_o}{dt} + I_{load} \quad (6)$$

โดยกำหนดให้

- V_g คือ ค่าประสิทธิผลของแรงดันเอาต์พุตบริดจ์ 1 เฟส
 I_{Li} คือ ค่าประสิทธิผลของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูล
 n คือ จำนวนโมดูล
 V_o คือ แรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์
 I_o คือ กระแสเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์
 $\hat{I}_{Lref\ li}$ คือ ค่ายอดของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำอ้างอิง
 I_{VR} คือ ค่าสัญญาณที่ถูกแก้ไขจากชุดควบคุมแบบพีไอ
 $i_{Lref\ li}$ คือ กระแสขดลวดเหนี่ยวนำอ้างอิง
 k_s คือ อัตราการแปลงผัน

เมื่อแทนปริมาณสัญญาณขนาดเล็ก และปริมาณในสภาวะคงตัวของแต่ละตัวแปรลงในสมการที่ (1) ถึง สมการที่ (6) สามารถเขียนโมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบที่นำเสนอในตอนนี้ได้ดังนี้

$$\frac{\tilde{v}_o}{\tilde{v}_{ref}} = \frac{3G_{VR}\bar{V}_g k_s}{\bar{V}_o C_o s + 3G_{VR}\bar{V}_g k_s k_{pb}} \quad (7)$$

สมการชุดควบคุมแบบ พีไอ อย่างง่ายถูกแสดงอยู่ในสมการที่ (8)

$$G_{VR}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (8)$$

ระบบถูกออกแบบด้วยอาศัยการพล็อตจากโพลพล็อตเพื่อพิจารณา ค่าเกนซ์ และเฟสมาจิน ระบบใช้หลักของการออกแบบดังนี้คือ เลือกความถี่ตัดผ่านเกนซ์ศูนย์ที่ความถี่เป็น 1/3 หรือ 1/5 ของความถี่ 100 Hz โดยมีเฟสมาจินต้องมากกว่า 45° เพราะฉะนั้นในกรณีนี้เลือกเฟสมาจินที่ 70° ที่ความถี่ตัดผ่านเกนซ์ศูนย์เท่ากับ 10 Hz. ดังนั้นจึงใช้ค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมแบบพีไอดังนี้คือ $K_p=0.292$ และ $K_I=6.667$ ตามลำดับ พารามิเตอร์ของระบบที่นำเสนอถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ระบบที่นำเสนอ

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
แรงดันอินพุต	220 V _{rms}
ความถี่ไลน์	50 Hz
พิกัดกำลังไฟฟ้า	250 Watt/Module
แรงดันเอาต์พุต	-48 V
L_{11}, L_{12}, L_{13}	5 mH
L_{21}, L_{22}, L_{23}	1 mH
C_{11}, C_{12}, C_{13}	1 μF
C_o	20,000 μF

หมายเหตุ จากตารางการออกแบบพบว่า ระบบต้องใช้ตัวเก็บประจุที่เอาต์พุตขนาด 20,000μF ซึ่งในการออกแบบสามารถกำหนดจาก 20,000μF/750W ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการออกแบบ ในกรณีการขนานวงจรเรียงกระแสชนิด 1 เฟส ผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้ค่า 26.66μF/W ในการออกแบบหาค่าตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงได้

1.3 การจำลองการทำงานของระบบที่นำเสนอด้วย MATLAB/SIMULINK

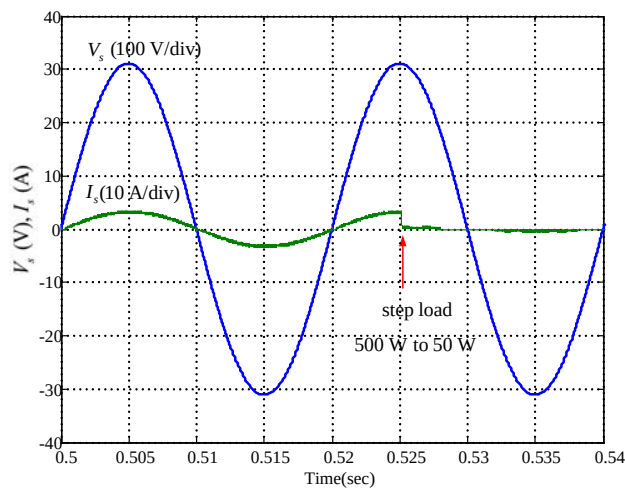
ระบบที่นำเสนอถูกกำหนดด้วยเงื่อนไขของการจำลองดังนี้คือ ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ภาระที่พิกัดกำลังไฟฟ้าปกติที่ 500 W และระบบถูกออกแบบให้มีการเผื่อกำลังไฟฟ้าไว้ที่ 250 W แต่อย่างไรก็ตาม ระบบสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 750 W ในสภาวะชั่วขณะเมื่อมีความจำเป็น ระบบถูกจำลองด้วยสถานะการดังนี้

กรณีที่ 1 การทดสอบในสภาวะคงตัว และการทดสอบในสภาวะเปลี่ยนแปลงภาระอย่างทันทีทันใด

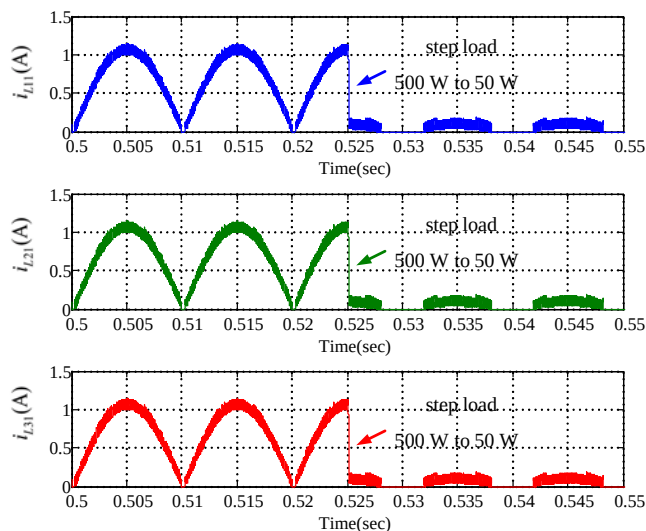
กรณีที่ 2 การทดสอบเมื่อโมดูลเกิดความเสียหาย

ผลการจำลอง กรณีที่ 1

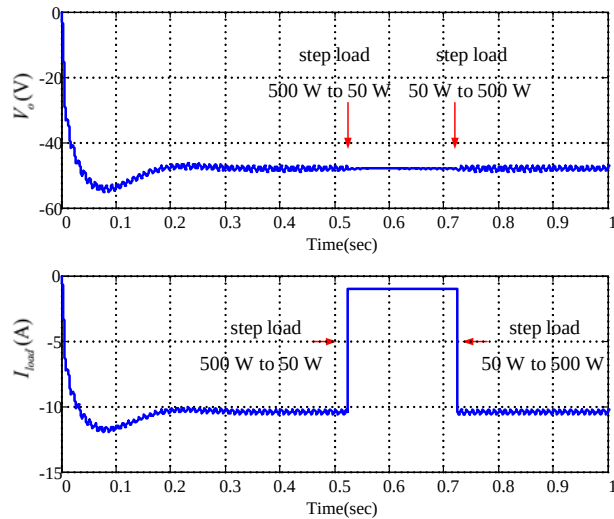
ผลของการจำลองการทำงานซึ่งแสดงด้วยรูปคลื่นของ แรงดัน และกระแสอินพุต กระแสขดลวดเหนี่ยวนำแต่ละโมดูล แรงดัน และกระแสที่เอาต์พุต ในเงื่อนไขสภาวะที่ภาระเปลี่ยนแปลงจาก 100% ไปที่ 10% และกลับมาที่ 100% ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5 ถึง ภาพที่ 7 ภาพขยายของแรงดัน และกระแสอินพุต กระแสขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อภาระถูกกำหนดให้เปลี่ยนแปลงจาก 500 W ไปที่ 50 W ถูกแสดงในภาพที่ 5 และ 6 จากผลการจำลองตัวประกอบกำลังระบบใกล้เคียงหนึ่ง กระแสขดลวดเหนี่ยวนำถูกแบ่งเท่ากัน และระบบให้ผลของการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระอยู่ภายใน 20 ms



ภาพที่ 5 แรงดัน และกระแสไลน์อินพุตเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระจาก 100% ไปที่ 10%



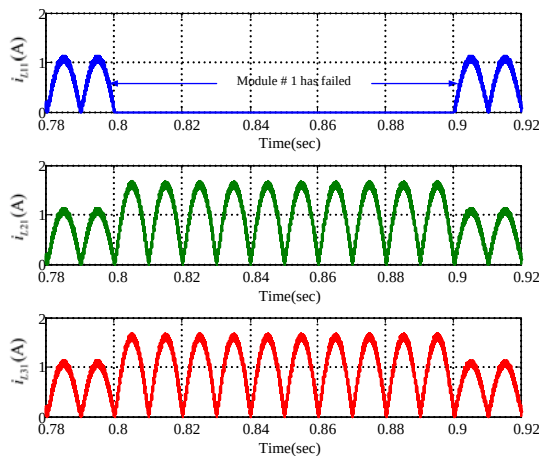
ภาพที่ 6 กระแสขดลวดเหนี่ยวนำของแต่ละโมดูลเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระจาก 100% ไปที่ 10%



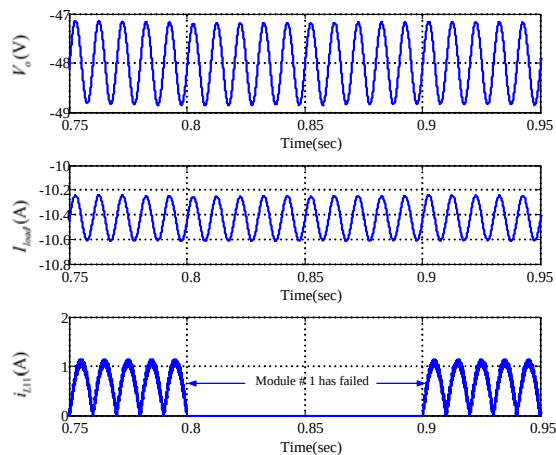
ภาพที่ 7 แรงดัน และกระแสเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระจาก 100% ไปที่ 10% และกลับมาที่ 100%

ผลการจำลอง กรณีที่ 2

ผลการจำลองการขนานวงจรเรียงกระแสภายใต้สภาวะเมื่อโมดูลเกิดความเสียหายถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 8 และ 9 ซึ่งแสดงถึงระบบที่นำเสนอได้สูญเสียโมดูลที่ 1 แต่ระบบควบคุมยังคงสามารถควบคุมให้โมดูลที่เหลือในระบบอีก 2 โมดูล ช่วยกันทำหน้าที่จ่ายกระแสให้ภาระได้อย่างต่อเนื่อง และไม่ติดขัด ขณะที่ระบบควบคุมยังคงสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ที่ -48 โวลต์ โดยที่ไม่เกิดการกระเพื่อมของแรงดัน



ภาพที่ 8 กระแสขดลวดเหนี่ยวนำของแต่ละโมดูล สภาวะเมื่อโมดูลที่ 1 เกิดความเสียหาย



ภาพที่ 9 ส่วนขยายของ แรงดัน และกระแสเอาต์พุต สภาวะเมื่อโมดูลที่ 1 เกิดความเสียหาย

1.4 สรุปผลการจำลองการทำงานการขนานระบบวงจรเรียงกระแสชนิด 1 เฟส

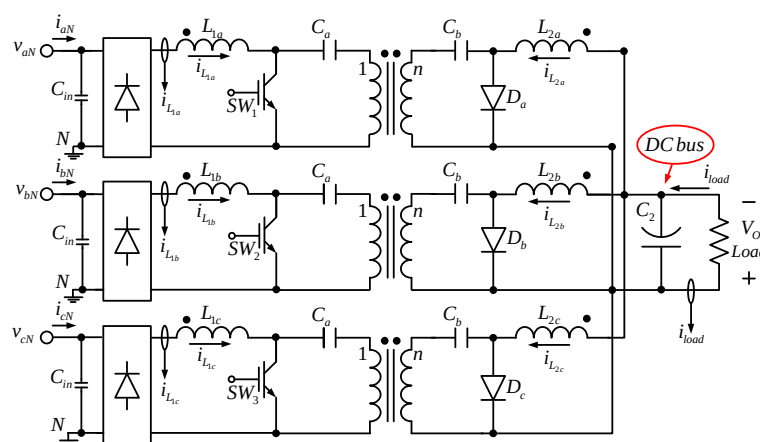
ในตอนนี้องค์งานวิจัยได้นำเสนอ ผลการควบคุม และจำลองการทำงานของระบบวงจรเรียงกระแสในโครงสร้างแบบขนานชนิด 1 เฟส ที่วงจรกำลังอาศัย เครื่องแปลงผันแบบซุกจำนวน 3 โมดูล และระบบควบคุมถูกออกแบบให้ฝังตัวอยู่ในแต่ละโมดูลกำลัง ระบบถูกออกแบบโดยใช้หลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า อ้างถึงผลการจำลองการทำงานที่ได้รับ ระบบสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่บัสไฟตรงได้ดี ให้ผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระเป็นอย่างดี กระแสขดลวดเหนี่ยวนำถูกแบ่งให้เท่ากันทุกโมดูล ตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง ระบบมีความคล่องตัวสูงเพราะเนื่องจากประกอบขึ้นจากโมดูล ระบบมีการเผื่อเมื่อโมดูลหลักได้รับความเสียหาย เพราะฉะนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า แนวทางการพัฒนาระบบดังที่ได้กล่าวมาให้ผลที่ดี และเป็นที่น่าสนใจต่อการพัฒนาเพื่อสร้างระบบจริงต่อไปในอนาคต

2. การวิเคราะห์ และการออกแบบ เพื่อจำลองระบบการเผื่อกำลังไฟฟ้าสำหรับเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก 1 เฟส และระบบใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟตรงขนาดเล็ก

ในตอนนี้ได้กล่าวถึง การวิเคราะห์ และออกแบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ระบบมีการเผื่อกำลังไฟฟ้า และระบบใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก โดยถูกออกแบบบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า วัตถุประสงค์ของการควบคุมกระทำเพื่อต้องการลดขนาดของตัวเก็บประจุภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 10% ไปที่ 100% ซึ่งระบบสามารถลดขนาดตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงได้ กระแสขดลวดเหนี่ยวนำถูกแบ่งให้เท่ากัน ระบบมีการเผื่อกำลังไฟฟ้า ตัวประกอบกำลังสูง และสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้ดี ซึ่งเป็นคุณลักษณะของระบบเรียงกระแส 3 เฟส ที่มีระบบการเผื่อกำลังไฟฟ้า ผลการจำลองของระบบที่น่าเสนอถูกแสดงเพื่อยืนยันแนวคิดที่ได้นำเสนอ

2.1 การลดขนาดของค่าตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงของวงจรเรียงกระแสชนิด 3 เฟส ที่ระบบถูกออกแบบอยู่บนหลักการพื้นฐานสมดุลกำลังไฟฟ้า

ภาพที่ 10 แสดงระบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกชนิดแยกโดดทางไฟฟ้าจำนวน 3 โมดูล ระบบถูกวิเคราะห์ และออกแบบเพื่อสร้างบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด -48 โวลต์ ซึ่งประเด็นของการนำเสนอในตอนนี้เป็น ต้องการลดขนาดของตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



ภาพที่ 10 เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลวงจรเรียงกระแสแบบซุก และใช้ตัวเก็บประจุขนาดเล็ก โดยที่ระบบถูกออกแบบบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า

การวิเคราะห์ และหาโมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบที่นำเสนออาศัยหลักการวิเคราะห์จากการเปลี่ยนแปลงสัญญาณขนาดเล็กรอบๆ จุดทำงานของระบบ ระบบถูกกำหนดให้ไม่มีการสูญเสีย และกระแสที่ขดลวดเหนี่ยวนำถูกควบคุมให้เป็นไปตามที่ได้กำหนดไว้ จึงสามารถเขียนสมการที่สำคัญได้ดังนี้
สมการสมดุลกำลังไฟฟ้าของระบบ

$$3V_{gi} I_{L_{1i}} = V_o I_o \quad (9)$$

V_{gi} คือ ค่าแรงดันประสิทธิผลของวงจรไดโอดบริดจ์, $I_{L_{1i}}$ คือค่ากระแสอาร์เอ็มเอสของขดลวดเหนี่ยวนำ, V_o คือ แรงดันเอาต์พุตเฉลี่ย และ I_o คือ กระแสเอาต์พุตเฉลี่ย

สมการค่าสูงสุดของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำคือ

$$\hat{I}_{L_{1i}} = \frac{K_2 V_o I_{load}}{3V_{gi}} \quad (10)$$

$$\hat{I}_{Lref_{1i}} = \hat{I}_{L_{1i}} + I_{VR} \quad (11)$$

$\hat{I}_{Lref_{1i}}$ คือ ค่าสูงสุดของกระแสอ้างอิงขดลวดเหนี่ยวนำ $\hat{I}_{L_{1i}}$ คือ ค่าสูงสุดของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำ I_{VR} คือ สัญญาณที่ถูกแก้ไขจากชุดควบคุมแบบพีไอ และ K_2 คือ เกณฑ์การแปลงผันของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำ

$$i_{Lref_{11}} = \hat{I}_{Lref_{11}} |\sin(\omega t)| \quad (12)$$

$$i_{Lref_{12}} = \hat{I}_{Lref_{12}} |\sin(\omega t - 120^\circ)| \quad (13)$$

$$i_{Lref_{13}} = \hat{I}_{Lref_{13}} |\sin(\omega t - 240^\circ)| \quad (14)$$

สมการพลวัตที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

$$\sum_{i=1}^3 I_{L2i} = C_2 \frac{dV_o}{dt} + I_{load} \quad (15)$$

ขณะที่ $\bar{V}$ หมายถึงปริมาณคงตัว และ $\tilde{v}$ หมายถึงค่าสัญญาณขนาดเล็ก กำหนดทั้ง 2 ปริมาณของแต่ละตัวแปล แทนลงในสมการที่ 9-11 และสมการที่ 15 จากนั้นกำหนดให้ผลคูณของเทอมสัญญาณขนาดเล็กไม่มีความหมาย ($\tilde{v} \cdot \tilde{v} = 0$) ผลลัพธ์คือ

$$\tilde{i}_o = -\frac{3K_1 \bar{I}_{Lref_{1i}}}{\bar{V}_o} \tilde{v}_{gi} + \frac{3K_1 \bar{V}_{gi}}{\bar{V}_o} \tilde{i}_{Lref_{1i}} - \frac{\bar{I}_o}{\bar{V}_o} \tilde{v}_o \quad (16)$$

$$\tilde{i}_o = C_2 \frac{d\tilde{v}_o}{dt} + \tilde{i}_{load} \quad (17)$$

$$\tilde{i}_{Lref_{1i}} = \tilde{i}_{L_{1i}} + \tilde{i}_{VR} \quad (18)$$

$$\tilde{i}_{L_{1i}} = \frac{K_2 \bar{V}_o}{3\bar{V}_{gi}} \tilde{i}_{load} + \frac{K_2 \bar{I}_{load}}{3\bar{V}_{gi}} \tilde{v}_o - \frac{K_2 \bar{V}_o \bar{I}_{load}}{3(\bar{V}_{gi})^2} \tilde{v}_{gi} \quad (19)$$

ฟังก์ชันโอนย้ายของระบบที่นำเสนอคือ

$$\frac{\tilde{V}_o}{\tilde{V}_{oref}} = \frac{3G_{VR}\bar{V}_{gi}K_1}{\bar{V}_oC_2S + 3G_{VR}\bar{V}_{gi}K_1k_{fb}} \quad (20)$$

ขณะที่ ชุดควบคุมแบบ PI กำหนดเป็น

$$G_{VR}(s) = \frac{k_p(S + \omega_z)}{S} \quad (21)$$

ฟังก์ชันโอนย้ายของ Plant คือ

$$PTF = \frac{3\bar{V}_{gi}K_1k_{fb}}{(\bar{V}_oC_2)S} \quad (22)$$

ฟังก์ชันโอนย้ายของลูปเปิดคือ

$$OLTF = \frac{3G_{VR}(s)\bar{V}_{gi}K_1k_{fb}}{(\bar{V}_oC_2)S} \quad (23)$$

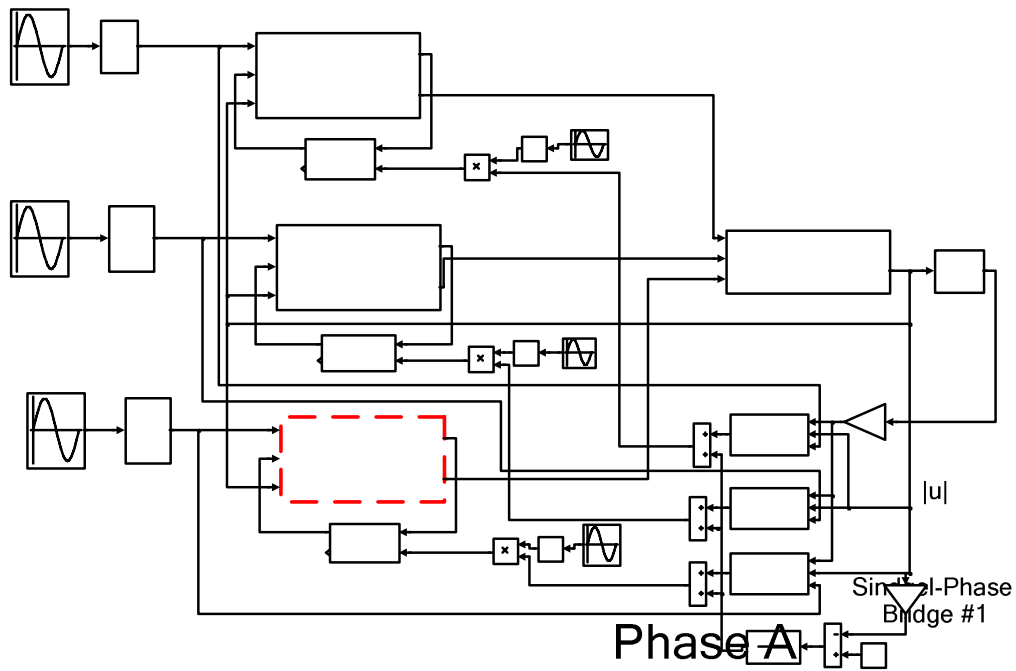
2.2 การจำลองการทำงานเพื่อลดค่าตัวเก็บประจุด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

การเขียนโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อการจำลองการทำงานของระบบที่นำเสนอด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ต้องอาศัยสมการที่ 16 ถึง สมการที่ 19 เพื่อเขียนโมเดลระบบที่นำเสนอ ระบบควบคุมแบบฟีดแบ็ก ถูกออกแบบด้วยหลักการผลตอบสนองเชิงความถี่ซึ่งสามารถพล็อตได้จากสมการที่ 21-23 วัตถุประสงค์ของการจำลองการทำงานกระทำเพื่อทดสอบระบบที่ได้ออกแบบไว้ในสภาวะเงื่อนไขที่ทั้งสามารถทดสอบได้ และทดสอบไม่ได้จริง การจำลองสามารถแบ่งได้ดังนี้

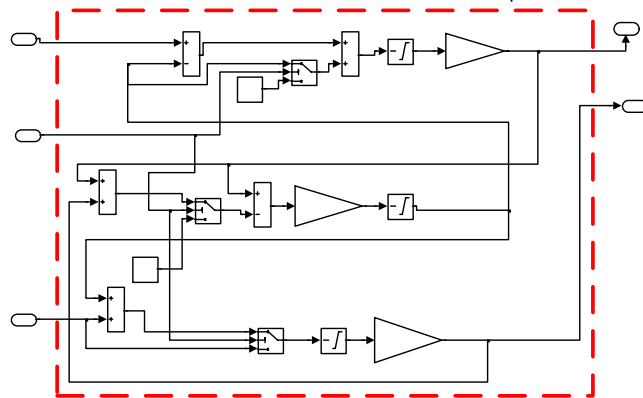
1. การจำลองระบบในสภาวะปกติ
2. การจำลองระบบในสภาวะเมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 100% ไปที่ 10% และกลับไป 100%
3. การจำลองในสภาวะแรงดันของระบบหายไป
4. การจำลองในสภาวะที่โมดูลเครื่องแปลงผันเกิดความเสียหาย
5. การจำลองระบบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรง โดยสังเกตปริมาณที่สนใจ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน และช่วงเวลาคงตัวของแรงดันเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงไป

ผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ของระบบที่นำเสนอที่แสดงอยู่ในภาพที่ 11 ถูกนำเสนอในภาพที่ 12 ถึง ภาพที่ 16 ระบบถูกจำลองเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับวงจรเรียงกระแส 3 เฟส ที่ถูกออกแบบด้วยหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า ค่าตัวเก็บประจุที่เล็กที่สุดของบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ถูกทดสอบในสภาวะเปลี่ยนแปลงภาระจาก 10% ไปที่ 100% ผลการจำลองการทำงานของระบบในสภาวะเปลี่ยนแปลงภาระอย่างทันทีทันใด โดยพิจารณาตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจาก $C_o = 500 \mu F$ ถึง $C_o = 20,000 \mu F$ ที่ภาระเปลี่ยนแปลงจาก 10% (75 W) ไป 100% (750 W) ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 12 เมื่อพิจารณาที่ค่าตัวเก็บประจุกรณีที่สูงสุด และต่ำที่สุดสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จาก $C_o = 500 \mu F$ ที่ $\Delta P_o = 675 W$ ได้ $\Delta V_{droop} = 1.5 V$, $\Delta V_{overshoot} = 0.75 V$ และ $t_{settling} = 1.5 ms$
2. จาก $C_o = 20,000 \mu F$ ที่ $\Delta P_o = 675 W$ ได้ $\Delta V_{droop} = 0.1 V$, $\Delta V_{overshoot} = 0.12 V$ และ $t_{settling} = 1.2 ms$

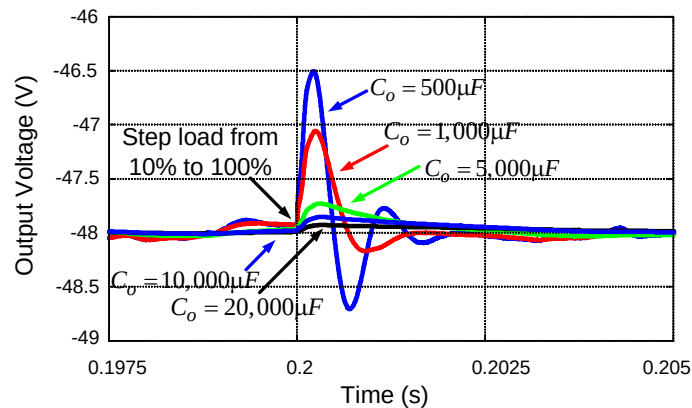


(ก) บล็อกไดอะแกรมระบบกำลัง และระบบควบคุมที่นำเสนอ



(ข) ภาพขยายโมเดลวงจรเรียงกระแส

ภาพที่ 11 โมเดลเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟสที่ใช้โมเดลวงจรเรียงกระแสแบบซุก และใช้ตัวเก็บประจุขนาดเล็ก โดยที่ระบบถูกออกแบบบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าระบบถูกเขียนเพื่อจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

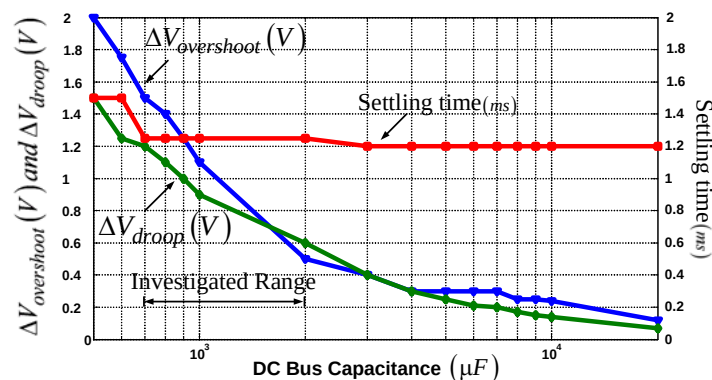


ภาพที่ 12 ผลการจำลองการทำงานของระบบในสภาวะเปลี่ยนแปลงภาระอย่างทันทีทันใดโดยพิจารณาที่ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ($C_o = 500 \mu F$ ถึง $C_o = 20,000 \mu F$) จากภาระการเป็นโหลดภาระที่ 10% (75 W) ไป 100% (750 W)

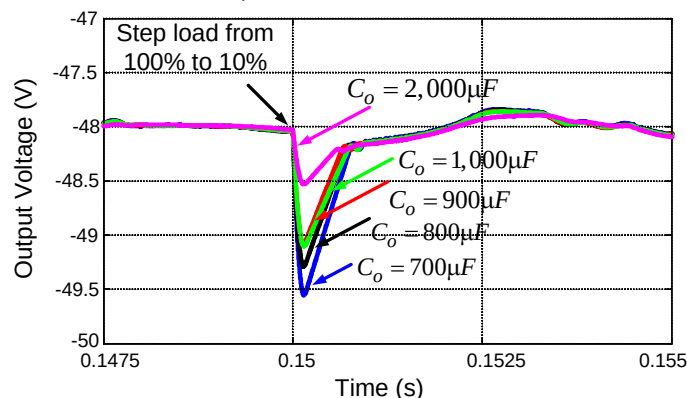
ผลของการจำลองการทำงานของระบบที่นำเสนอแสดงด้วยปริมาณ ΔV_{droop} (V), $\Delta V_{overshoot}$ (V) และค่าเวลา Settling time (ms) เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนแปลงจาก 500 μF ไปที่ 20,000 μF ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 13 ลักษณะของเส้นกราฟของการเปลี่ยนแปลงแรงดันทั้ง 2 มีลักษณะที่เป็นไปตามกัน ซึ่งมีค่าของปริมาณ $\Delta V_{overshoot}$ สูงกว่า ΔV_{droop} เล็กน้อย เส้นกราฟเวลาสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ 3 ช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลง ช่วงขีดเริ่มเปลี่ยนของความชันจากสูงไปต่ำ และช่วงเปลี่ยนระดับเวลาถูกพิจารณาซ้ำอีกครั้งเพื่อหาจุดที่ดีที่สุด

ผลของการสังเกตการณ์ ในช่วงที่ได้กำหนดไว้ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 14 ถึง ภาพที่ 15 ผลของการจำลองการทำงานของระบบที่นำเสนอภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงภาระอย่างทันทีทันใดโดยพิจารณาที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจาก 700 μF ถึง 2,000 μF ที่มีการเปลี่ยนแปลงของภาระจาก 100% (750 W) ไป 10% (75 W) ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 14 เมื่อพิจารณาที่ค่าตัวเก็บประจุกรณีที่สูงสุด และต่ำที่สุดสามารถสรุปได้ดังนี้ จาก $C_o = 700 \mu\text{F}$ ที่ $\Delta P_o = 675 \text{ W}$ ได้ $\Delta V_{overshoot} = 1.5 \text{ V}$ และ $t_{settling} = 1.22 \text{ ms}$ และจาก $C_o = 2,000 \mu\text{F}$ ที่ $\Delta P_o = 675 \text{ W}$ ได้ $\Delta V_{overshoot} = 0.5 \text{ V}$ และ $t_{settling} = 1.22 \text{ ms}$

ผลของการจำลองการทำงานของระบบที่นำเสนอภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงภาระอย่างทันทีทันใดโดยพิจารณาที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจาก 700 μF ถึง 2,000 μF ที่มีการเปลี่ยนแปลงของภาระจาก 10% (75 W) ไป 100% (750 W) ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 15 เมื่อพิจารณาที่ค่าตัวเก็บประจุกรณีที่สูงสุด และต่ำที่สุดสามารถสรุปได้ดังนี้ จาก $C_o = 700 \mu\text{F}$ ที่ $\Delta P_o = 675 \text{ W}$ ได้ $\Delta V_{droop} = 1.2 \text{ V}$ และ $t_{settling} = 1.22 \text{ ms}$ และจาก $C_o = 2,000 \mu\text{F}$ ที่ $\Delta P_o = 675 \text{ W}$ ได้ $\Delta V_{droop} = 0.5 \text{ V}$ และ $t_{settling} = 1.22 \text{ ms}$



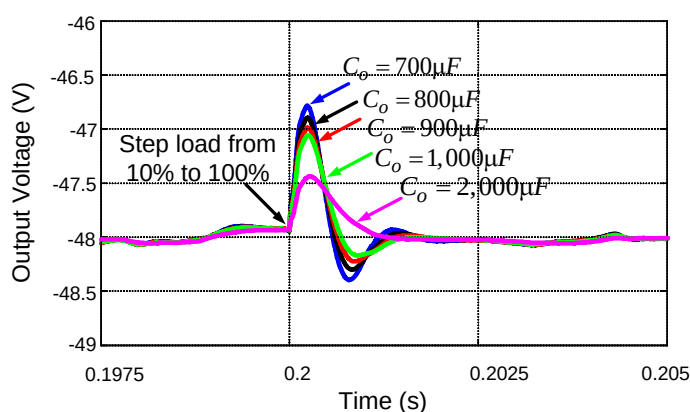
ภาพที่ 13 ผลการจำลองการทำงานของระบบแสดงด้วย ΔV_{droop} (V), $\Delta V_{overshoot}$ (V) และเวลา Settling time (ms) เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ($C_o = 500 \mu\text{F}$ ถึง $C_o = 20,000 \mu\text{F}$)



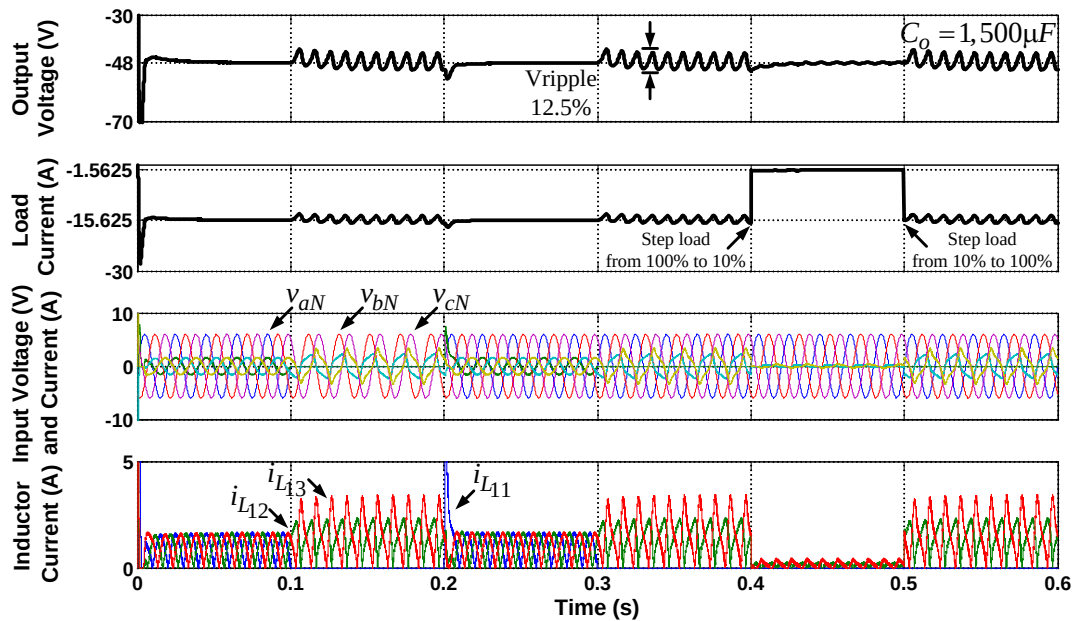
ภาพที่ 14 ผลการจำลองการทำงานของระบบในสภาวะเปลี่ยนแปลงภาระอย่างทันทีทันใดโดยพิจารณาที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ($C_o = 700 \mu\text{F}$ ถึง $C_o = 2,000 \mu\text{F}$) จากภาระการเปลี่ยนแปลงภาระที่ 100% (750 W) ไป 10% (75 W).

ผลการจำลองการทำงานของระบบที่นำเสนอที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตรวมเท่ากับ 750W ภายใต้สภาวะเงื่อนไขการทำงาน สมดุลเฟส และไม่สมดุลเฟสของระบบประจํา (คัดที่แรงดันเฟส 220V) ถูกแสดงในภาพที่ 16 กระบวนการจำลองการทำงานได้กระทำกรวิเคราะห์ประเด็นต่าง ๆ ดังนี้ คือ ที่ช่วงระหว่างเวลา 0...100 ms: เป็นสภาวะเฟสสมดุล, 100...200 ms: ระบบประจําคงเหลือ 2 เฟส (แรงดันเฟสหายไปจากระบบ), 200...300 ms: สภาวะที่ระบบกลับมาสมดุลอีกครั้ง, 300...400 ms: โมดูล 1 ตัว เกิดความเสียหาย (ในเฟส a), 400...500 ms: ช่วงการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 100% ไปที่ 10% ภายใต้สภาวะเมื่อระบบมีโมดูลเสียหายจำนวน 1 โมดูลในเฟส a และที่เวลา 500...600 ms: มีการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 10% ไปที่ 100% ภายใต้สภาวะโมดูลเสียหายจำนวน 1 โมดูลในเฟส a เช่นกัน

ที่เวลา $t = 100$ ms, ระบบที่นำเสนอเกิดความเสียหายที่ระบบประจํา ซึ่งกรณีนี้ระบบควบคุมต้องใช้เวลาในการคำนวณเพื่อชดเชยความผิดปกติที่เกิดขึ้นด้วยเวลา $t_d = 10$ ms ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของกระแสเฟสที่ปรากฏอย่างชัดเจนความผิดปกติที่เกิดขึ้นนี้เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดแรงดันเอาต์พุตตกลงมาอย่างมีนัยสำคัญต่อระบบในระหว่างช่วงเวลา $t = 100...110$ ms ตราบจนเมื่อชุดควบคุมแบบ PI คำนวณความผิดพลาดที่เกิดขึ้น และทำการแก้ไข แรงดันเอาต์พุตคงที่ กระแสขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้น และส่งผลให้กระแสเฟสมีค่าสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในสภาวะนี้ แรงดันเอาต์พุตที่ได้มีค่าการกระเพื่อมที่ 12.5% ที่เวลา $t = 200$ ms ระบบกลับเข้าสู่สภาวะปกติอีกครั้ง กระแสเฟส i_{saN} , i_{sbN} และ i_{scN} กลับเข้าสู่สภาวะปกติอย่างรวดเร็วเพราะเนื่องจากการคำนวณที่ถูกต้องของระบบควบคุมที่นำเสนอ ปรากฏการณ์เมื่อโมดูลของระบบได้รับความเสียหายถูกแสดงอยู่ในช่วงเวลา $t = 300...600$ ms ในครั้งนี้ระบบควบคุมต้องการเวลาในช่วง $t = 300...320$ ms เพื่อแก้ไขความผิดพลาดที่แรงดันบัส สภาวะของการเปลี่ยนแปลงภาระอยู่ในช่วงเวลา $t = 400...500$ ms ผลการจำลองถูกแสดงที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 750 W ไปที่ 75 W และกลับมาที่ 750 W อีกครั้งหนึ่ง เมื่อระบบกำหนดให้ตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรง $C_2 = 1,500 \mu F$ กระแสภาระถูกเปลี่ยนที่เวลา $t = 400$ ms อย่างไรก็ตาม จากการสังเกตพบว่า สภาวะการทำงานของระบบวงจรเรียงกระแสชนิด 3 เฟส ภายใต้สภาวะเมื่อโมดูลเครื่องแปลงผันเกิดความเสียหายทำให้เกิดข้อต่อของระบบดังนี้คือ เกิดแรงดันกระเพื่อมขนาดใหญ่ที่บัสแรงดันไฟตรง ($v_{ripple} = 12.5\%$), ซึ่งมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนที่ตัวเก็บประจุ ส่งผลให้อายุการใช้งานของตัวเก็บประจุสั้นลง ระบบให้ค่า THD, สูง ส่งผลให้ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นระบบจึงต้องการ ระบบแหล่งจ่ายที่มีการเผื่อกำลังไฟฟ้าเพื่อต้องการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นต่อไป



ภาพที่ 15 ผลการจำลองการทำงานของระบบในสภาวะเปลี่ยนแปลงภาระอย่างทันทีทันใดโดยพิจารณาที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ($C_o = 700 \mu F - C_o = 2,000 \mu F$) จากภาระการเปลี่ยนแปลงภาระที่ 10% (75 W) ไป 100% (750 W)



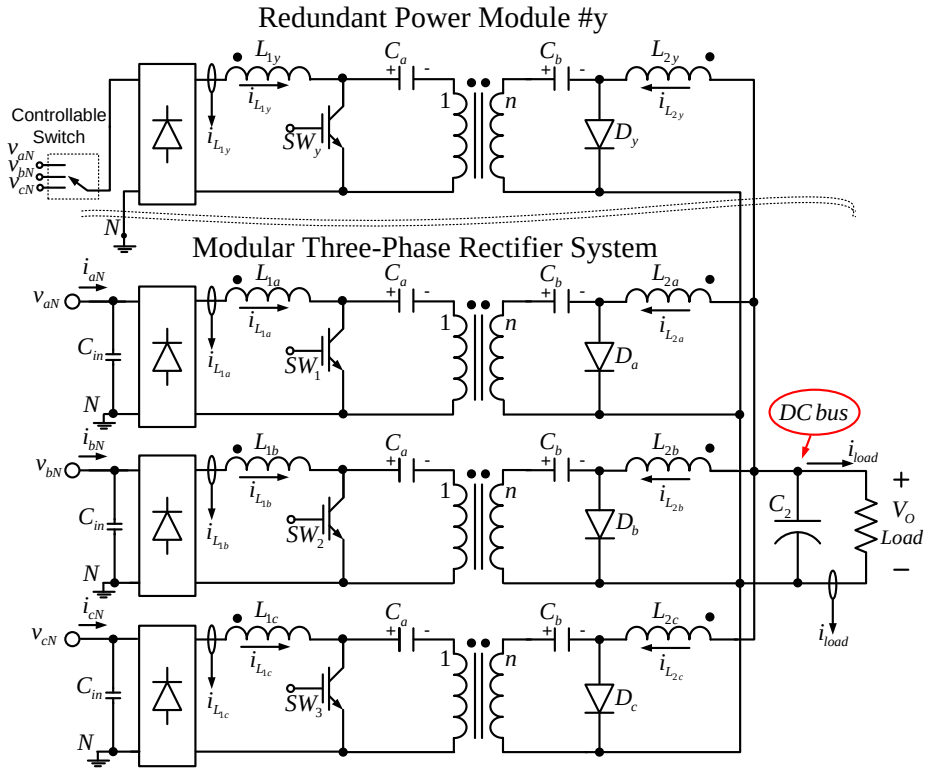
ภาพที่ 16 ผลการจำลองการทำงาน แรงดันเอาต์พุต v_o , กระแสภาระ i_{load} , แรงดันเฟสอินพุต v_{xN} ($x=a,b,c$) , กระแสเฟส i_{sx} ($x=a,b,c$) และกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละเฟส i_{lj} ($j=1,2,3$) ภายใต้เงื่อนไข ระบบสมดุล กำลังไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส เฟสใดเฟสหนึ่งของแหล่งจ่ายหายไป โมดูลเสียหาย และมีการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 100% ไป 10% และกลับมาที่ 100% ภายใต้สภาวะโมดูลของระบบเกิดความเสียหายที่ระบบใช้ตัวเก็บประจุที่ บัสไฟตรงขนาด $C_o = 1,500 \mu F$

2.2 การจำลองการทำงานของระบบที่นำเสนอเพื่อทดสอบสภาวะการเพื่อกำลังไฟฟ้าด้วย โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

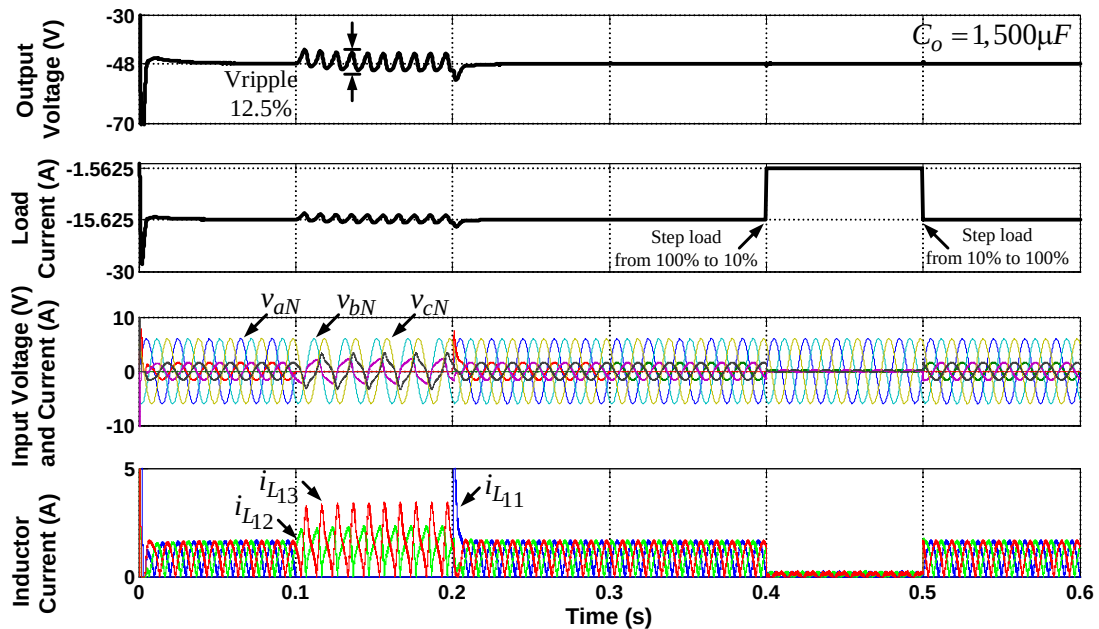
การเพื่อกำลังไฟฟ้า ($n=N+1$) โดยหลักของการออกแบบเครื่องแปลงผันแบบโมดูลนั้น ระบบต้อง กำหนดให้มีค่า N ซึ่ง ก็คือ จำนวนโมดูลขั้นต่ำที่ต้องมีอยู่ในระบบ โดยระบบนี้ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในงาน ด้านระบบโทรคมนาคม และการสื่อสาร เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบที่เกิดจากความเสียหายของ ข้อมูล และการสื่อสารที่มีความสำคัญ และในกรณีเครื่องแปลงผันชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลวงจรเรียงกระแส นั้น ระบบถูกออกแบบบนหลักการ $n= 3(N+y)$ เมื่อ " N " มีค่าเท่ากับจำนวนโมดูลต่อเฟสของระบบ และ " y " มีค่า เท่ากับจำนวนโมดูลที่ต้องถูกเพิ่มเพื่อทำการสำรอง หรือ เพื่อเพื่อกำลังไฟฟ้าให้กับระบบ

สมรรถนะหลักของระบบที่มีการเพื่อกำลังไฟฟ้าในระบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็น แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้วงจรเรียงกระแสชนิดแยกโดดแบบซุก พร้อมกับระบบใช้ตัวเก็บประจุขนาดเล็ก และระบบถูกออกแบบบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าได้ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 18-20 ระบบถูกจำลองภายใต้ สภาวะคงตัว และสภาวะการเปลี่ยนแปลงของภาระอย่างทันทีทันใด ภายใต้การเฝ้าระวังเพื่อให้เกิดสภาวะ สมดุลของกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส

ผลการจำลองของระบบที่นำเสนอถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 17 ภายใต้สภาวะการทำงานเฟสสมดุล และ เฟสไม่สมดุลซึ่งระบบมีการติดตั้งระบบสำรองโมดูลเพื่อทำงานแทนโมดูลที่ได้รับความเสียหายซึ่งรายละเอียด ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 18 กระบวนการจำลองแบ่งเป็นช่วงต่างๆ ได้ดังนี้ ช่วงเวลา : 0...100 ms : ระบบ แหล่งจ่ายไฟสมดุลทั้ง 3 เฟส ช่วงเวลา 100...200 ms : แรงดันเฟส a หายไปจากระบบ, ช่วงเวลา 200...300 ms : ระบบแหล่งจ่ายไฟมาครบทั้ง 3 เฟส ช่วงเวลา 300...600 ms : เป็นช่วงที่เกิดความเสียหายต่อโมดูลใน เฟส a พร้อมกันนี้ระบบได้ต่อเชื่อมโมดูลที่สำรองไว้เข้ามาในระบบ ในตำแหน่งที่โมดูลในเฟสนั้นที่สูญเสียไป ที่เวลา 400...500 ms: ระบบมีการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 100% ไปที่ 10% และที่เวลา 500...600 ms: ภาระ เปลี่ยนแปลงจาก 10% ไปที่ 100%.



ภาพที่ 17 ระบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่มีการเผื่อกำลังไฟฟ้า โดยใช้โมดูลวงจรเรียงกระแสแบบซุก และใช้ตัวเก็บประจุขนาดเล็ก โดยที่ระบบถูกออกแบบบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า (จำนวนของโมดูลในระบบคือ $3+y$)

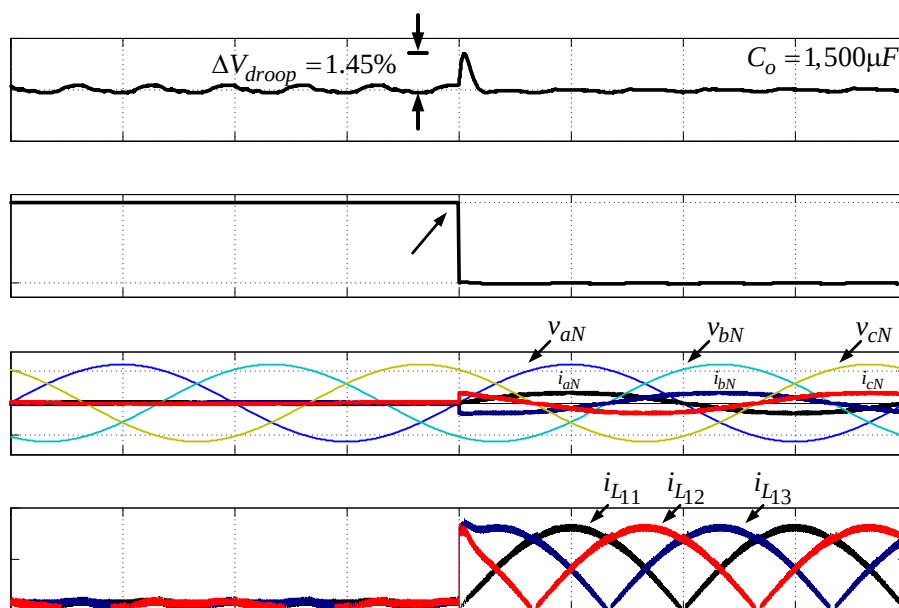


ภาพที่ 18 ผลการจำลองการทำงาน แรงดันเอาต์พุต v_o , กระแสภาระ i_{load} , แรงดันเฟสอินพุต v_{xN} ($x=a,b,c$), กระแสเฟส i_{sx} ($x=a,b,c$) และกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละเฟส i_{ij} ($j=1,2,3$) ภายใต้เงื่อนไข ระบบสมดุลกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส เฟสใดเฟสหนึ่งของแหล่งจ่ายหายไป โมดูลเสียหาย และมีการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 100% (750 W) ไป 10% (75 W) และกลับไปที่ 100% ภายใต้สภาวะระบบมีการเผื่อกำลังไฟฟ้า ที่ระบบใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟตรงขนาด $C_o = 1,500 \mu F$

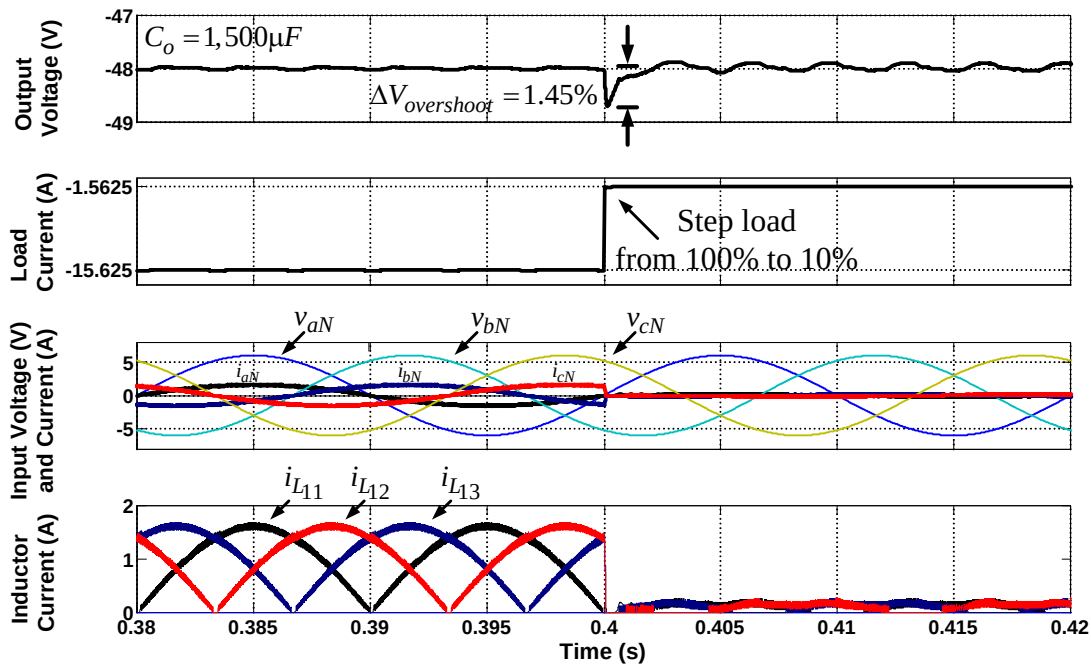
ภาพที่ 19 แสดงรูปคลื่นแรงดันของแหล่งจ่าย กระแสทั้ง 3 เฟส กระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูล กระแสภาระ และแรงดันที่บัสไฟตรงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 10% (75 W) ไปที่ 100% (750 W) กระแสแหล่งจ่ายตอบสนองอย่างรวดเร็ว และเข้าสู่สภาวะคงตัวภายใน 1.2 ms กระแสขดลวดเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามความต้องการของภาระที่เพิ่มขึ้น ระบบควบคุมสามารถควบคุมให้แรงดันที่บัสไฟตรงเข้าสู่สภาวะคงตัวภายในเวลา 1.2 ms กระแสที่แหล่งจ่ายยังคงเป็นไซน์ และตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง

ภาพที่ 20 แสดงผลลัพธ์ที่ได้เช่นเดียวกับภาพที่ 19 แต่เป็นสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 100 % (750 W) ไปที่ 10% (75 W) กระแสแหล่งจ่ายเข้าสู่สภาวะคงตัวภายใน 1.2 ms ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบมีผลตอบสนองที่ดีต่อการเปลี่ยนแปลงภาระ กระแสยังคงเป็นไซน์ และค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง ภายใต้ทุกๆ สภาวะที่ได้กำหนดไว้ โทปโพลยีที่ได้นำเสนอให้ผลลัพธ์ที่เป็นไปตามกรอบความต้องการตามมาตรฐานของการแพร่กระจายกระแสมอนิก ระบบให้ผลตอบสนองที่ดีทั้งในสภาวะคงตัว และสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงภาระ สมรรถนะที่ได้จากระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถควบคุมให้กระแสเป็นไซน์ และมีเฟสตรงกันกับแรงดัน ผลตอบสนองที่ได้เป็นไปอย่างรวดเร็ว แรงดันกระเพื่อมมีขนาดเล็ก ค่า $\Delta V_{overshoot}$ ที่บัสแรงดันไฟตรงประมาณ 1.45 % ในระหว่างที่มีการทดสอบเปลี่ยนแปลงภาระ

สรุป ในตอนนี้องค์กรวิจัยได้กล่าวถึง กระบวนการเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบเครื่องแปลงผัน 3 เฟส ด้วยการใช้โมดูลที่ถูกสำรองไว้ หรือโมดูลเครื่องแปลงผันที่ถูกเผื่อไว้ ด้วยหลักการ $n+y$ โดยที่ n คือจำนวนโมดูลต่อเฟส และ y คือจำนวนโมดูลสำรองที่ได้ต่อเชื่อมไว้กับระบบ เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบ ระบบสามารถเข้าไปซ่อมแซมได้โดยไม่จำเป็นต้องปิดกำลังไฟฟ้าหลัก และที่สำคัญ ระบบมีการสำรองโมดูล



ภาพที่ 19 ส่วนขยายของผลการจำลองการทำงาน แรงดันเอาต์พุต v_o , กระแสภาระ i_{load} , แรงดันเฟสอินพุต v_{xN} ($x=a,b,c$) , กระแสเฟส i_{sx} ($x=a,b,c$) และกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละเฟส i_{Lj} ($j=1,2,3$) ภายใต้เงื่อนไขระบบสมมูลกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส เฟสใดเฟสหนึ่งของแหล่งจ่ายหายไป โมดูลเสียหาย และมีการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 10% (75 W) ไป 100% (750 W) ภายใต้สภาวะระบบมีการเผื่อกำลังไฟฟ้า ที่ระบบใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟตรงขนาด $C_o = 1,500 \mu F$ [v_o : แรงดันเอาต์พุต (1 V/div), i_L : กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ (1 A/div), i_{sN} : กระแสไลน์ (5 A/div), v_{sN} : แรงดันเฟส (300 V/div) และ t : เวลา (5ms/div)]



ภาพที่ 20 ส่วนขยายของผลการจำลองการทำงาน แรงดันเอาต์พุต v_o , กระแสภาระ i_{load} , แรงดันเฟสอินพุต v_{xN} ($x=a,b,c$) , กระแสเฟส i_{sx} ($x=a,b,c$) และกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละเฟส i_{Lj} ($j=1,2,3$) ภายใต้เงื่อนไขระบบสมดุลกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส เฟสใดเฟสหนึ่งของแหล่งจ่ายหายไป โมดูลเสียหาย และมีการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 100% (750 W) ไป 10% (75 W) ภายใต้สภาวะระบบมีการเผื่อกำลังไฟฟ้า ที่ระบบใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟตรงขนาด $C_o = 1,500 \mu F$ [v_o : แรงดันเอาต์พุต (1 V/div), i_L : กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ (1 A/div), i_{sN} : กระแสไลน์ (5 A/div), v_{sN} : แรงดันเฟส (300 V/div) และ t : เวลา (5ms/div)]

2.3 สรุปผลการจำลองการทำงานระบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้ตัวเก็บประจุขนาดเล็ก และระบบมีการเผื่อกำลังไฟฟ้า

การวิเคราะห์ ออกแบบ และจำลองการทำงานของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลวงจรเรียงกระแสชนิดซุกชนิด 1 เฟส แยกโดดทางไฟฟ้า ที่ระบบใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก ตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง และระบบมีการสำรองโมดูลได้ถูกกล่าวถึงในตอนนี ระบบที่นำเสนอถูกออกแบบบนพื้นฐานหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า แบบแผนการควบคุมที่นำเสนอช่วยให้ระบบมีลักษณะที่โดดเด่นดังนี้ คือ ระบบให้ผลตอบสนองทางพลวัตเป็นอย่างดี และระบบสามารถควบคุมการแบ่งกระแสขดลวดเหนี่ยวนำได้เท่ากัน ในการปรับปรุงผลตอบสนองทางพลวัตของแรงดันที่บัสไฟตรงนั้น ระบบควบคุมอาศัยการวัดปริมาณที่สำคัญดังนี้ คือ กระแสภาระ และแรงดันอินพุต เพื่อนำมาสร้างสัญญาณกระแสขดลวดเหนี่ยวนำอ้างอิงสำหรับจ่ายเข้าไปที่ลูปควบคุมแรงดันของระบบ เงื่อนไขการทดสอบภายใต้สภาวะระบบปรากฏแรงดันไม่ครบทั้ง 3 เฟส โมดูลเกิดความเสียหาย และสภาวะการเปลี่ยนแปลงภาระอย่างทันทีทันใดถูกนำเสนอในตอนนี

ในตอนนี ค่าตัวเก็บประจุของบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง C_2 เท่ากับ $1,500 \mu F$ ซึ่งถูกเลือกบนเงื่อนไขของอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง Δv_{droop} , $\Delta v_{overshoot}$ และค่าเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวของแรงดันเอาต์พุต ระบบที่นำเสนอนี้ตั้งอยู่บนพื้นฐานความน่าเชื่อถือ และสมรรถนะทางไฟฟ้าสำหรับวงจรกำลังที่ใช้โมดูลเรียงกระแสทั้ง 3 โมดูล ในตอนนีแสดงให้เห็นว่า ด้วยวิธีการที่นำเสนอตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสามารถลดขนาดได้ ระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง โมดูลเครื่องแปลงผันสามารถช่วยกันจ่ายกำลังไฟฟ้าไปที่ภาระได้ และที่สำคัญ ระบบให้ความน่าเชื่อถือที่สูงขึ้นเมื่อระบบทำงานภายใต้สภาวะมีการเผื่อโมดูลกำลังในระบบ

การติดตั้งระบบเพื่อการทดสอบ

1. วิธีการทดสอบ

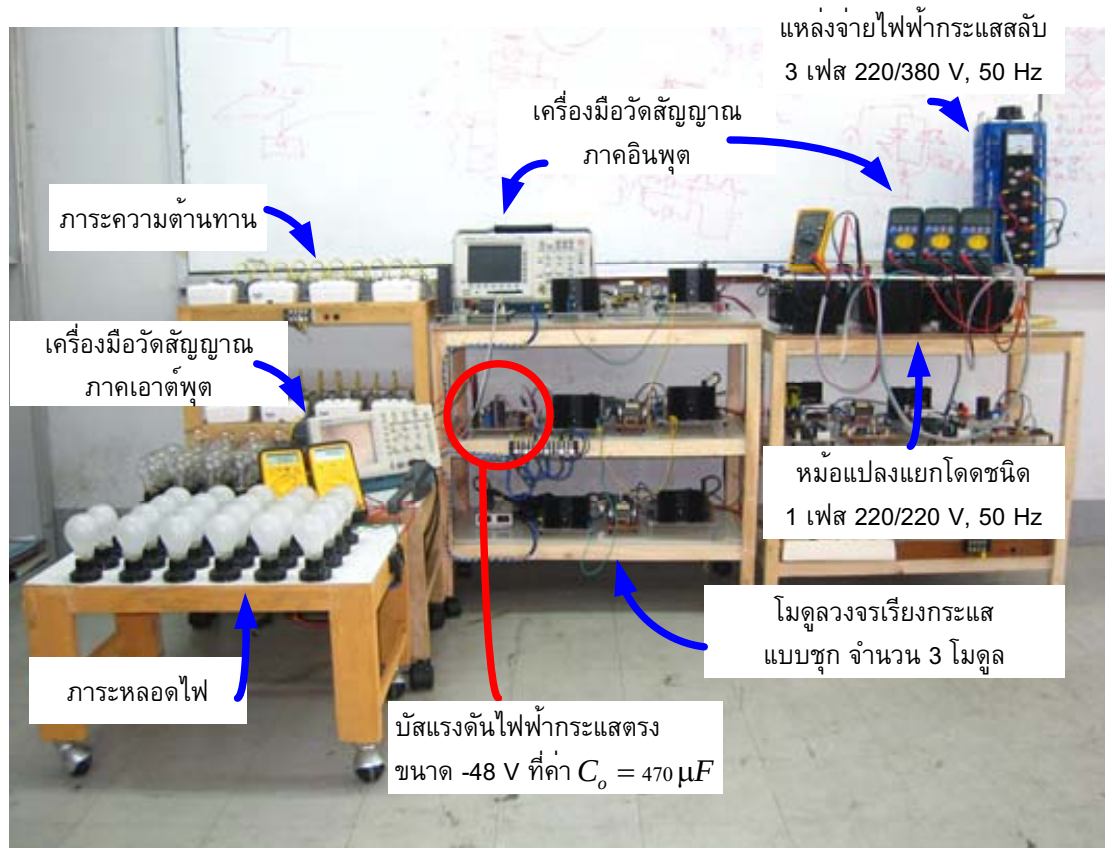
- 1.1 เตรียมห้องปฏิบัติการ
- 1.2 เตรียมวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือวัด
- 1.3 สร้าง และทดสอบโมดูลวงจรกำลังแบบลูปเปิดเมื่อจ่ายภาระที่พิกัดแรงดัน -48 V และกำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุต 250 W
- 1.4 สร้าง และทดสอบวงจรควบคุมในแบบลูปปิด
- 1.5 สร้าง และทดสอบวงจรกำลังแบบลูปปิดเมื่อจ่ายภาระที่พิกัดแรงดัน -48 V กำลัง 250 W และทดสอบระบบ 1 เฟส ภายใต้สภาวะเปลี่ยนแปลงภาระจาก 100% ไปที่ 10% และกลับมาที่ 100%
- 1.6 สร้าง และทดสอบวงจรกำลังชนิด 3 เฟส แบบลูปปิดเมื่อจ่ายภาระที่พิกัดแรงดัน -48 V กำลัง 750 W พร้อมกับการพิจารณาค่าตัวเก็บขนาดเล็กที่สุดภายใต้สภาวะเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 10% ไปที่ 100%
- 1.7 แกะไข และทดสอบ เพื่อการเก็บผลการทดลอง

2. สถานที่ทำวิจัย

- 2.1 กลุ่มวิจัย Energy Conversion & Green Technology Research Group (E&G Research Group) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่
เลขที่ 128 ถนน ห้วยแก้ว ตำบล ข้างเหมือก อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50300
โทรศัพท์ 053-892780 ต่อ 352 โทรสาร 053-213183
- 2.2 กลุ่มวิจัย Research Group of Power Electronics ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
เลขที่ 1518 ถนนพิบูลสงคราม กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์/โทรสาร 02 9132500-24 ต่อ 8518, 8519/ 02 5874357

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ
- 3.2 คอมพิวเตอร์แบบพกพา
- 3.3 เครื่องพิมพ์
- 3.4 อุปกรณ์ และเครื่องมือช่าง
- 3.5 ภาระประเภทความต้านทานทั้งแบบปรับค่าได้และปรับค่าไม่ได้ และภาระประเภทโหลดใส่
- 3.6 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป
- 3.7 ชุดวัดกระแส และชุดขยายสัญญาณ
- 3.8 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์
- 3.9 เครื่องกำเนิดสัญญาณ
- 3.10 ดิจิตอลเพาเวอร์มิเตอร์
- 3.11 หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้สามเฟส
- 3.12 หม้อแปลง 1 เฟส สำหรับการแยกโดดทางไฟฟ้า



ภาพที่ 1 การติดตั้ง และการทดสอบระบบภายใต้สภาวะที่กำหนด ของระบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลวงจรเรียงกระแสแบบซุก ชนิด 1 เฟส จำนวน 3 โมดูล ที่ระบบใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 470 μF



ภาพที่ 2 การทดสอบสมรรถนะของระบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลวงจรเรียงกระแสแบบซุก ชนิด 1 เฟส จำนวน 3 โมดูล ที่ระบบใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 470 μF โดยใช้ Digital Power Meter ชนิด 3 เฟส รุ่น WT1600

ผลการทดลอง

ในตอนหนึ่งของการวิจัยได้แสดงถึง ผลของการวิเคราะห์ และออกแบบ เพื่อใช้ในการสร้าง และทดสอบ เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบ ชุกชนิดแยกโดด จำนวน 3 โมดูล โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัยดังนี้

1. เพื่อทดสอบ และแสดงให้เห็นจริงถึงแนวคิดของหลักการสมมูลกำลังไฟฟ้า
2. เพื่อทดสอบระบบภายใต้เงื่อนไขในสภาวะคงตัว และศึกษาผลตอบสนองทางพลวัตของระบบ
3. เพื่อทดสอบตัวแปรต่างๆ ของระบบที่นำเสนอต่อการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟตรง
4. เพื่อทดสอบหาสมรรถนะของระบบ

1. การทดสอบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยอาศัยโมดูลวงจรเรียงกระแสแบบชุก ที่ระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง และให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว เมื่อระบบถูกออกแบบด้วยหลักการสมมูลกำลังไฟฟ้า

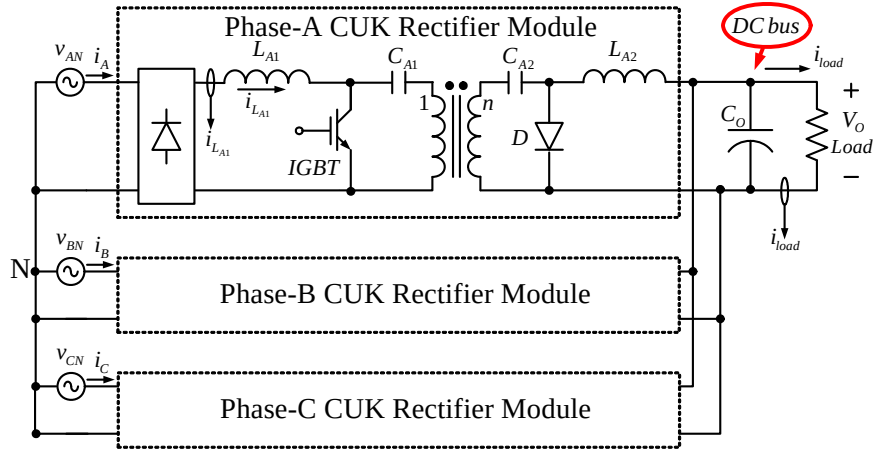
1.1 บทนำ

ในตอนนี้ได้กล่าวถึง การวิเคราะห์ และออกแบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบชุกชนิด 1 เฟส ซึ่งถูกนำเสนอบนหลักการสมมูลกำลังไฟฟ้า ระบบการแก้ไขตัวประกอบกำลังถูกวิเคราะห์ให้ทำงานอยู่ในโหมดกระแสไหลอย่างต่อเนื่อง สมการที่สำคัญถูกใช้เพื่อการออกแบบ โมเดลสัญญาณขนาดเล็กถูกสร้างขึ้นสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อความถี่ ลูปควบคุมกระแสที่ถูกบวกเพิ่มเข้าไปช่วยทำให้ระบบมีผลตอบสนองทางพลวัตที่ดี แบบแผนการควบคุมประกอบด้วยลูปป้อนกลับสัญญาณแรงดันเอาต์พุต และลูปป้อนไปหน้าของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำ วัตถุประสงค์หลักของระบบควบคุมที่นำเสนอคือ เพื่อต้องการลดจำนวนขั้นตอนของการแปลงผัน และช่วยปรับปรุงผลตอบสนองทางด้านพลวัตของระบบที่บัสไฟตรงสำหรับระบบกระจายกำลังไฟฟ้าให้ดีขึ้น รูปแบบที่นำเสนอ นั้น มีแบบแผนการควบคุมที่ง่าย ระบบกำลังมีความคล่องตัวสูงในการต่อแบบ 3 เฟส 3 สาย และ 4 สาย ออกแบบง่าย ให้ผลตอบสนองที่ดี แบ่งกระแสได้ดี และตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง ทั้งผลการจำลอง และผลการทดสอบได้ถูกนำเสนอเพื่อยืนยันความถูกต้องในทางทฤษฎี และการปฏิบัติ

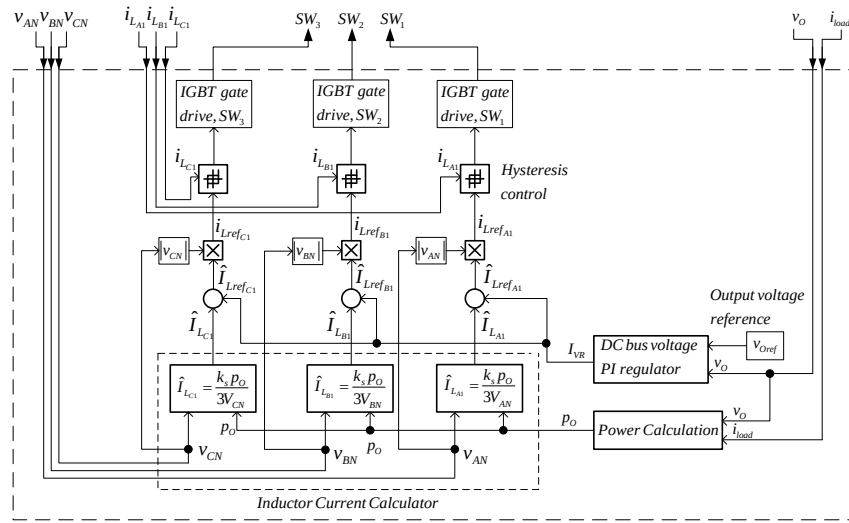
1.2 บทการวิเคราะห์ และออกแบบระบบที่นำเสนอ

ระบบที่นำเสนอถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 1 ระบบประกอบด้วยโมดูลชุก 3 โมดูล ที่ด้านอินพุตต่อแบบ Y ด้านเอาต์พุตถูกต่อแบบขนาน แต่ละโมดูลประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดบริดจ์ต่ออันดับกับเครื่องแปลงผันแบบชุกชนิดที่มีการแยกโดด ระบบที่นำเสนอช่วยลดสถานะการทำงานให้เหลือเพียง 1 สถานะ (แปลงจากไฟสลับเป็นไฟตรง พร้อมกับฟังก์ชันการแยกโดดทางไฟฟ้า) พร้อมกับตัวเก็บประจุเอาต์พุตที่บัสไฟตรง C_o เพื่อกรองแรงดันกระเพื่อม และถ่ายเทพลังงานเพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมประกอบด้วยชุดสร้างสัญญาณกระแสอ้างอิง ชุดควบคุมแบบพีไอ และชุดคำนวณกระแสขดลวดเหนี่ยวนำ

การวิเคราะห์เพื่อหาโมเดลสัญญาณขนาดเล็กของระบบที่นำเสนอ นั้น ตั้งอยู่บนแนวคิด 2 อย่างที่สำคัญคือ 1) ระบบควบคุมต้องควบคุมให้กระแสไหลติดตามรูปคลื่นแรงดันอินพุต 2) การวิเคราะห์ระบบตั้งอยู่บนพื้นฐาน วงรอบการทำงานต่อวงรอบการทำงาน ในขณะที่อุปกรณ์ในวงจรกำลังไม่เกิดการสูญเสีย สมการต่างๆ ที่ถูกนำเสนอในตอนนี้อาจหาได้จากสมการที่วงจรไฟฟ้ามีกำลังไฟฟ้าสมมูลทั้ง 3 เฟส โมเดลสัญญาณขนาดเล็กของระบบที่นำเสนอหาได้ดังนี้ คือ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 1 ระบบที่นำเสนอ (ก) เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลวงจรเรียงกระแสแบบซุกจำนวน 3 โมดูล (ข) บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างระบบควบคุม

จากภาพที่ 1 สามารถเขียนสมการสมดุลกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\sum_{i=a}^c V_{gi} I_{L_{Li}} = V_o I_o \quad (1)$$

เมื่อ $i = a, b$ และ c , V_{gi} คือ ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส $I_{L_{Li}}$ คือ ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสของขดลวดเหนี่ยวนำ V_o คือ ค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุตไฟตรงและ I_o คือ ค่าเฉลี่ยของกระแสเอาต์พุตไฟตรงในช่วงครึ่งวงรอบของความถี่ไลน์
สมการคายอดของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำ

$$\hat{I}_{L_{Li}} = \frac{K_2 V_o I_{load}}{3 V_{gi}} \quad (2)$$

$$\hat{I}_{L_{ref_{Li}}} = \hat{I}_{L_{Li}} + I_{VR} \quad (3)$$

$\hat{I}_{L_{ref_{Li}}}$ คือ ค่ายอดกระแสขดลวดเหนี่ยวนำอ้างอิง $\hat{I}_{L_{Li}}$ คือ ค่ายอดกระแสขดลวดเหนี่ยวนำ I_{VR} คือ สัญญาณที่ได้รับการแก้ไขแล้วจากชุดควบคุมแบบพีไอและ K_2 คือ เกณฑ์ของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำ

สมการกระแสขดลวดเหนี่ยวนำของแต่ละเฟส

$$i_{Lref11} = \hat{I}_{Lref11} |\sin(\omega t)| \quad (4)$$

$$i_{Lref12} = \hat{I}_{Lref12} |\sin(\omega t - 120^\circ)| \quad (5)$$

$$i_{Lref13} = \hat{I}_{Lref13} |\sin(\omega t - 240^\circ)| \quad (6)$$

สมการพลวัตของแรงดันเอาต์พุต

$$\sum_{i=1}^3 I_{oi} = I_o = C_o \frac{dV_o}{dt} + I_{load} \quad (7)$$

I_{load} คือ กระแสภาระระบบที่นำเสนอ

สำหรับการหาโมเดลสัญญาณขนาดเล็ก กำหนดให้เทอมต่างๆ เป็นดังนี้

$$V_{gi} = \bar{V}_{gi} + \tilde{v}_{gi} \quad (8)$$

$$I_{Li} = \bar{I}_{Li} + \tilde{i}_{Li} \quad (9)$$

$$V_o = \bar{V}_o + \tilde{v}_o \quad (10)$$

$$I_o = \bar{I}_o + \tilde{i}_o \quad (11)$$

$$\hat{I}_{Lref1i} = \bar{\hat{I}}_{Lref1i} + \tilde{\hat{i}}_{Lref1i} \quad (12)$$

$$I_{VR} = \bar{I}_{VR} + \tilde{i}_{VR} \quad (13)$$

$$\hat{I}_{Li} = \bar{\hat{I}}_{Li} + \tilde{\hat{i}}_{Li} \quad (14)$$

$$I_{load} = \bar{I}_{load} + \tilde{i}_{load} \quad (15)$$

ขณะที่ $\bar{V}$ คือค่าในสภาวะคงตัวและ $\tilde{v}$ คือสัญญาณขนาดเล็ก แทนปริมาณที่กำหนดลงในสมการที่ (1) (2) (3) และ (7) และกำหนดให้ผลของ $\tilde{v} \cdot \tilde{v} = 0$ จึงสามารถแยกย่อยเทอมสัญญาณขนาดเล็ก และเขียนได้เป็น

$$K_1 \bar{V}_{gi} \bar{\hat{I}}_{Lref1i} = \bar{V}_o \bar{I}_o \quad (16)$$

$$\bar{I}_o = \bar{I}_{load} \quad (17)$$

$$\tilde{i}_o = \frac{3K_1 \bar{\hat{I}}_{Lref1i}}{\bar{V}_o} \tilde{v}_{gi} + \frac{3K_1 \bar{V}_{gi}}{\bar{V}_o} \tilde{\hat{i}}_{Lref1i} - \frac{\bar{I}_o}{\bar{V}_o} \tilde{v}_o \quad (18)$$

$$\tilde{i}_o = C_o \frac{d\tilde{v}_o}{dt} + \tilde{i}_{load} \quad (19)$$

$$\tilde{\hat{i}}_{Lref1i} = \tilde{\hat{i}}_{Li} + \tilde{i}_{VR} \quad (20)$$

$$\tilde{\hat{i}}_{Li} = \frac{K_2 \bar{V}_o}{3\bar{V}_{gi}} \tilde{i}_{load} + \frac{K_2 \bar{I}_{load}}{3\bar{V}_{gi}} \tilde{v}_o - \frac{K_2 \bar{V}_o \bar{I}_{load}}{3(\bar{V}_{gi})^2} \tilde{v}_{gi} \quad (21)$$

เพื่อความง่ายในการทำความเข้าใจกำหนดให้

$$G_1 = \frac{3K_1 \bar{I}_{Lref1i}}{\bar{V}_o} \quad (22)$$

$$G_2 = \frac{3K_1 \bar{V}_{gi}}{\bar{V}_o} \quad (23)$$

$$G_3 = \frac{\bar{I}_o}{\bar{V}_o} \quad (24)$$

$$F_1 = \frac{K_2 \bar{V}_o \bar{I}_{load}}{3(\bar{V}_{gi})^2} \quad (25)$$

$$F_2 = \frac{K_2 \bar{I}_{load}}{3\bar{V}_{gi}} \quad (26)$$

$$F_3 = \frac{K_2 \bar{V}_o}{3\bar{V}_{gi}} \quad (27)$$

$$Z_L(s) = \frac{1}{C_o S} \quad (28)$$

อ้างอิงสมการที่ (16) ถึง (21) และสมการชุดควบคุมแบบ PI นำมาเขียนเป็นโมเดลสัญญาณขนาดเล็ก ซึ่งระบบถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 2 เพราะฉะนั้น นิพจน์ของระบบควบคุมแรงดันสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\tilde{v}_o = T_C \tilde{v}_{oref} + T_A \tilde{v}_{gi} - Z_o \tilde{i}_{load} \quad (29)$$

จากโมเดลในภาพที่ 2 เมื่อใช้ Mason gain formula สามารถเขียนเป็นสมการฟังก์ชันโอนย่ายได้ ดังนี้ คือ

ฟังก์ชันโอนย่ายระบบควบคุม : T_C

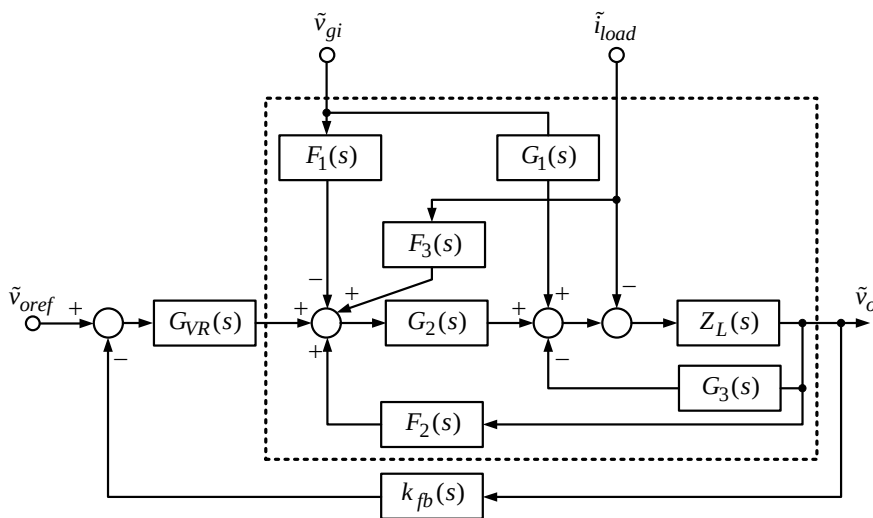
$$\frac{\tilde{v}_o}{\tilde{v}_{oref}} = \frac{G_2 Z_L G_{VR}}{1 + k_{fb} G_2 Z_L G_{VR} + G_3 Z_L - G_2 Z_L F_2} \quad (30)$$

ฟังก์ชันโอนย่ายระบบการรบกวนจากแรงดันอินพุต : T_A

$$\frac{\tilde{v}_o}{\tilde{v}_{gi}} = \frac{Z_L (G_1 - F_1 G_2)}{1 + k_{fb} G_2 Z_L G_{VR} + G_3 Z_L - G_2 Z_L F_2} \quad (31)$$

ฟังก์ชันโอนย่ายระบบการรบกวนจากภาคเอาต์พุต : Z_o

$$\frac{\tilde{v}_o}{\tilde{i}_{load}} = \frac{Z_L (1 - F_3 G_2)}{1 + k_{fb} G_2 Z_L G_{VR} + G_3 Z_L - G_2 Z_L F_2} \quad (32)$$



ภาพที่ 2 โมเดลสัญญาณขนาดเล็กของระบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยชนิด 3 เฟส บนพื้นฐานหลักการออกแบบด้วยเทคนิคสมมูลกำลังฟ้า

เมื่อต้องการให้ระบบคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต และคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ทางด้านเอาต์พุต ต้องกำหนดให้ $\tilde{v}_o / \tilde{v}_{gi} = 0$

$$\frac{Z_L (G_1 - F_1 G_2)}{1 + k_{fb} G_2 Z_L G_{VR} + G_3 Z_L - G_2 Z_L F_2} = 0 \quad (33)$$

ขณะที่

$$G_1 = G_2 F_1 \quad (34)$$

เมื่อ $\tilde{v}_o / \tilde{i}_{load} = 0$

$$\frac{Z_L (1 - F_3 G_2)}{1 + k_{fb} G_2 Z_L G_{VR} + G_3 Z_L - G_2 Z_L F_2} = 0 \quad (35)$$

ขณะที่

$$F_3 G_2 = 1 \quad (36)$$

เพราะฉะนั้น เกณฑ์ K_2 เขียนได้ดังนี้

$$K_2 = K_1^{-1} = \sqrt{2} \quad (37)$$

เมื่อ ฟังก์ชันระบบควบคุม แสดงได้ดังนี้

$$\frac{\tilde{v}_o}{\tilde{v}_{oref}} = \frac{3G_{VR}\bar{V}_{gi}K_1}{\bar{V}_o C_o S + 3G_{VR}\bar{V}_{gi}K_1 k_{fb}} \quad (38)$$

ขณะที่ ชุดควบคุมแบบ PI ถูกเลือกใช้งานเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุต

$$G_{VR}(s) = \frac{k_p (S + \omega_z)}{S} \quad (39)$$

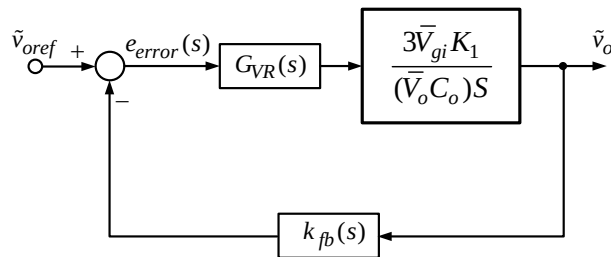
ฟังก์ชันโอนย้ายระบบ คือ

$$PTF = \frac{3\bar{V}_{gi}K_1}{(\bar{V}_o C_o)S} \quad (40)$$

ฟังก์ชันโอนย้ายระบบปิด คือ

$$OLTF = \frac{3G_{VR}(s)\bar{V}_{gi}K_1 k_{fb}}{(\bar{V}_o C_o)S} \quad (41)$$

เทคนิคสมดุลกำลังไฟฟ้าถูกออกแบบเพื่อทำการแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นจากการรบกวนของฟังก์ชันแรงดันอินพุต และอิมพีแดนซ์เอาต์พุต แนวคิดหลักอาศัยการป้อนสัญญาณไปหน้าของสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสการะ เพื่อทำการปรับปรุงสมรรถนะของระบบที่ถูกควบคุม เมื่อระบบที่นำเสนอถูกออกแบบด้วยเทคนิคสมดุลกำลังไฟฟ้า จึงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่ายของบล็อกไดอะแกรมดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 บล็อกไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบที่นำเสนอ

1.3 การเลือกขนาดค่าตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และ ช่วงเวลาการคืนตัว สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$C_{o,min} = \frac{2P_o T_{hld}}{V_o^2 - V_{o,min}^2} \quad (42)$$

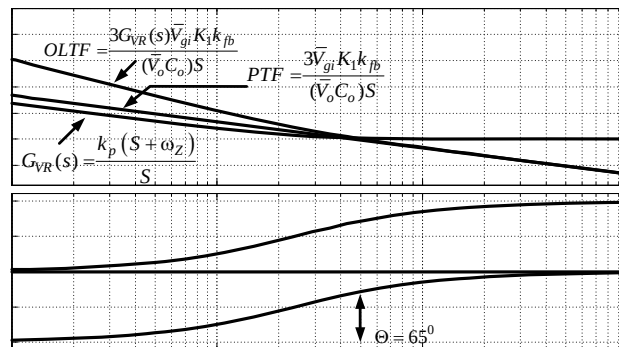
ขณะที่ P_o คือ กำลังไฟฟ้าของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง V_o คือ แรงดันพิกัดของระบบ $V_{o,min}$ คือ ค่าแรงดันที่ยอมให้ตกได้ต่ำสุด โดยทั่วไปแล้วเลือก $T_{hld} = 2 \text{ ms}$ $\Delta V_o = \pm 5\%$ จึงสามารถหา $C_{o,min}$ เท่ากับ $10,683 \text{ } \mu\text{F}$ เพื่อให้เกิดความมั่นใจจึงสามารถใช้สมการเพื่อได้ดังนี้

$$C_o = \frac{C_{o,min}}{1 - \Delta C_{tol}} = 13,353 \text{ } \mu\text{F} \quad (43)$$

เพื่อความสะดวกในการทดสอบกำหนดให้ $C_o = 13,600 \text{ } \mu\text{F}$ ตารางที่ 1 แสดงผลพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบระบบที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 750 W ที่พิกัดแรงดัน -48 V การวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อความถี่ถูกใช้เพื่อการอธิบายถึงการออกแบบระบบที่ถูกนำเสนอให้มีเสถียรภาพการออกแบบลู่วควบคุมแรงดันเอาต์พุตต้องรับประกันว่าระบบต้องมีเสถียรภาพมากพอสำหรับทุกๆ เงื่อนไขที่เกิดขึ้น ระบบควบคุมเป็นแบบ พีไอ (ที่มี zero และ เกณฑ์ความถี่สูง) ด้วยการทำงานในสภาวะสมดุลกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ระบบไม่ปรากฏแรงดันกระเพื่อมความถี่ต่ำที่เอาต์พุตเพราะฉะนั้น ลู่วควบคุมแรงดันสามารถออกแบบให้มีค่า bandwidth ของระบบควบคุมให้มีค่าสูง หรือต่ำได้ตามความต้องการของผู้ออกแบบส่งผลถึงการไม่เกิดข้อจำกัดในการเลือกผลตอบสนองทางด้านเอาต์พุต โบทโดะแกรมของสมการที่ (39), (40) และ (41) ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4 ลู่วควบคุมแรงดันถูกออกแบบให้มีค่าความถี่ตัดผ่านเกณฑ์ศูนย์เท่ากับ 50 Hz ระบบให้เฟสมาร์จินเท่ากับ 65°

ตารางที่ 1 รายละเอียด และพารามิเตอร์ของระบบที่นำเสนอ

คุณลักษณะ	โมดูลกำลัง
แรงดันอินพุต, ความถี่ไลน์	220 V, 50 Hz
ความถี่การสวิตช์	Variable frequency, $\approx 25\text{-}30 \text{ kHz}$
พิกัดโมดูล	250 W/module
พิกัดกำลังไฟฟ้าและ แรงดันเอาต์พุต	750 W, -48 V
L_{11}, L_{12}, L_{13}	5.069 mH, 5.068mH, 5.066 mH
L_{21}, L_{22}, L_{23}	1.066 mH, 1.086 mH, 1.044 mH
C_a, C_b, C_o	0.68 μF , 13,600 μF
$k_p, \omega_z, K_1, K_2, n_{Tr}$	1, 150, 0.707, 1.414, 0.5



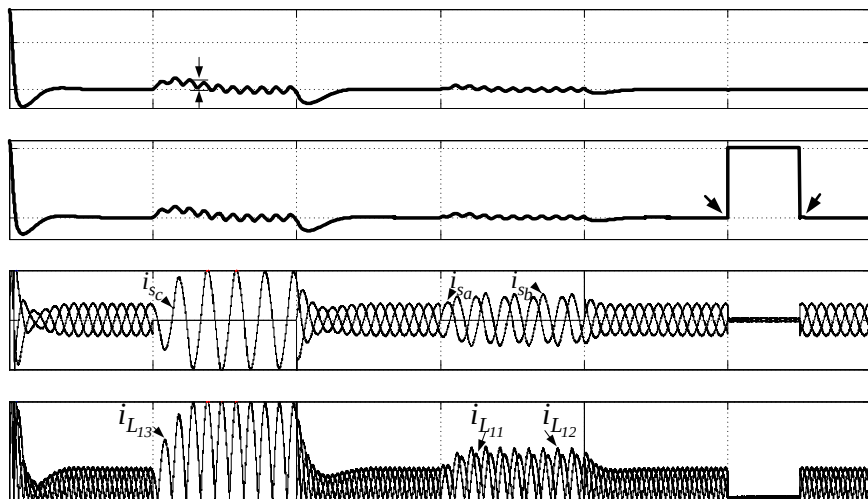
ภาพที่ 4 โบทพล็อตของระบบที่นำเสนอ

1.4 การจำลองการทำงานระบบที่นำเสนอที่ระบบใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้า

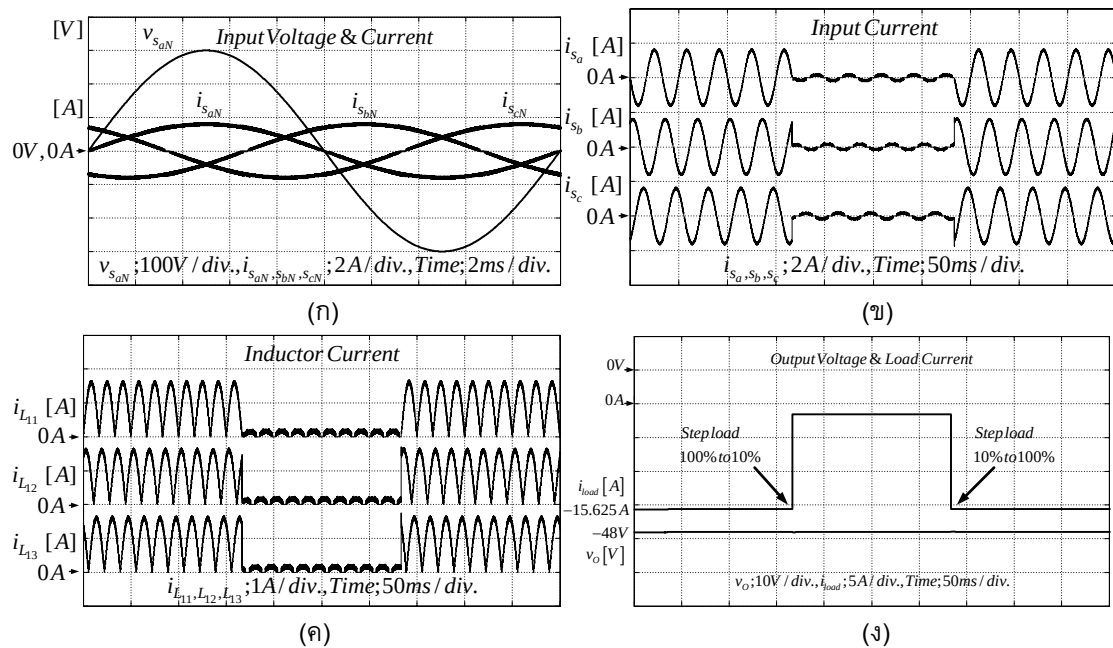
กระแสนขนาด 13,600 μF

ระบบที่นำเสนอถูกจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ดังถูกแสดงในภาพที่ 5 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ แสดงกระบวนการ และวิธีคิดของระบบควบคุมที่นำเสนอ เพื่อการออกแบบค่าพารามิเตอร์ และทำการศึกษาสมรรถนะของระบบทั้งในสภาวะคงตัว และสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์อย่างทันทีทันใด เงื่อนไขถูกพุ่งเป้าไปที่ 1) ระบบอยู่ภายใต้สภาวะสมดุลกำลังไฟฟ้า 2) โมดูลเกิดความเสียหาย และ 3) เมื่อการะมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งรายละเอียดของระบบ และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 1

การจำลองคิดที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 750 W ที่พิกัดแรงดันเอาต์พุต -48 V และที่พิกัดแรงดันอินพุต 220 V ภาพที่ 5 แสดงผลการจำลองการทำงานในสภาวะคงตัว และสภาวะเปลี่ยนแปลงการะภายใต้การจำลองสถานะการ 4 กรณีดังนี้ ที่เวลา 0 ถึง 100 ms: อยู่ภายใต้เงื่อนไขสมดุลแหล่งจ่ายทั้ง 3 เฟส ที่เวลา 100 ถึง 200 ms: อยู่ภายใต้เงื่อนไขเกิดความเสียหายใน 2 โมดูล ที่เวลา 200 ถึง 300 ms: ระบบกลับสู่สภาวะปกติ ที่เวลา 300 ถึง 400 ms: โมดูลในเฟส c เกิดความเสียหาย ที่เวลา 400 ถึง 500 ms: ระบบกลับสู่สภาวะสมดุลอีกครั้ง และช่วงเวลา 500 ถึง 550 ms: การะในระบบเปลี่ยนจาก 100% ไปที่ 10% และกลับจาก 10% ไปที่ 100% อีกครั้ง ภาพขยายถูกแสดงในภาพที่ 6(ก) ถึง 6(ง) ภาพที่ 6(ก) แสดงรูปคลื่นแรงดัน และกระแสเฟสอินพุต สังเกตได้ว่า กระแสอินเฟส และมีรูปคลื่นไม่ผิดเพี้ยน ส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังระบบใกล้เคียงหนึ่ง ผลการจำลองการทำงานของระบบในสภาวะชั่วคราวถูกแสดงในภาพที่ 6(ข) ถึง 6(ง) ตามลำดับระบบยังคงให้คุณภาพของกระแสที่ดีแม้จะอยู่ภายใต้สภาวะที่วงจรกำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าให้การะที่ค่าต่ำ แรงดันเอาต์พุตเข้าสู่สภาวะคงตัวภายใน 100 μs เพราะฉะนั้น จากผลการจำลองสามารถยืนยันได้ว่าระบบควบคุมสามารถขจัดปัญหาการรบกวนออกไปได้อย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 5 ผลการจำลองการทำงาน (พารามิเตอร์เพื่อจำลองได้จากการวัดจริง) แรงดันเอาต์พุต v_o และ กระแสการะ i_{load} , กระแสเฟสที่อินพุตแต่ละเฟส ($i_{s_a}, i_{s_b}, i_{s_c}$), กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ ($i_{L_{11}}, i_{L_{12}}, i_{L_{13}}$) สำหรับในกรณีเงื่อนไขระบบสมดุลทั้ง 3 เฟส โมดูลในเฟส a และ b เกิดความเสียหาย, โมดูลเสียหายในเฟส c และ เมื่อการะเปลี่ยนแปลงจาก 100% ไปที่ 10% และกลับมาที่ 100% อีกครั้งหนึ่ง

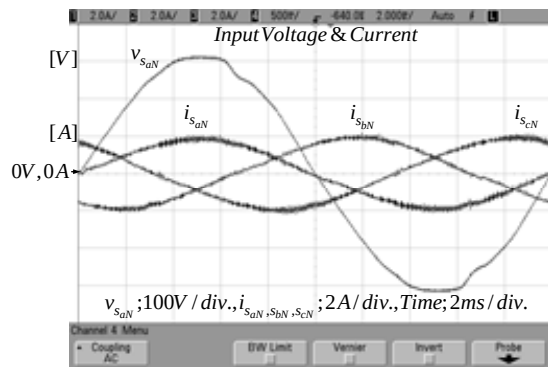


ภาพที่ 6 ส่วนขยายผลการจำลองการทำงาน (ก) และ (ข) แรงดัน และกระแสเฟสที่อินพุตแต่ละเฟส ($i_{s_a}, i_{s_b}, i_{s_c}$) (ค) และ (ง) แรงดันเอาต์พุต v_o และ กระแสภาระ i_{load} และกระแสชดลวดเหนี่ยวนำ ($i_{L11}, i_{L12}, i_{L13}$) ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงจาก 100% ไปที่ 10% และกลับมาที่ 100% อีกครั้งหนึ่ง

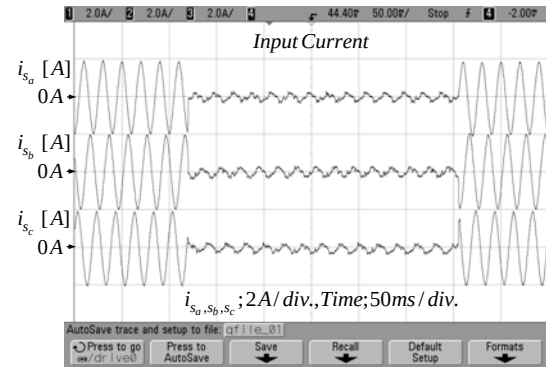
1.5 การทดสอบการทำงานระบบที่นำเสนอที่ระบบใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงเท่ากับ 13,600 μF

ต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการถูกสร้าง และทดสอบด้วยคุณสมบัติที่ถูกระบุอยู่ในตารางที่ 1 ระบบควบคุมเป็นแบบแอนะล็อก ผลการทดสอบถูกแสดงในภาพที่ 7 ถึงภาพที่ 9 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสในสภาวะคงตัวถูกแสดงในภาพที่ 7(ก) ส่วนในภาพที่ 7(ข) ถึง 7(ง) แสดงผลตอบสนองของรูปคลื่นแรงดัน และกระแสต่อภาระที่เปลี่ยนแปลงไป กระแสที่ได้ใกล้เคียงไซน์ และมีเฟสตรงกันกับแรงดัน วัดค่าตัวประกอบกำลังได้ 0.99 และค่า THD ของกระแสได้ 4% ภาพที่ 8(ก) แสดงรูปคลื่นกระแสชดลวดเหนี่ยวนำในสภาวะคงตัว ภาพขยายของกระแสถูกแสดงในภาพที่ 8(ข) และ 8(ค) เพราะเนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้มีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงมีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย ภาพที่ 9(ก) แสดงรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ -48 V และกระแสภาระที่ -15.625 A ภาพที่ 9(ข) แสดงผลการทดสอบในสภาวะชั่วคราวของแรงดัน และกระแสภาระจากการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 100% ไปที่ 10% และกลับมาที่ 100% จากภาพที่ 9(ค) และ ภาพที่ 9(ง) แสดงให้เห็นจริงว่าแรงดันเอาต์พุตกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวด้วยเวลา 100 μs และกระแสอินพุตยังคงให้รูปคลื่นที่ดี ไม่มีความผิดเพี้ยน

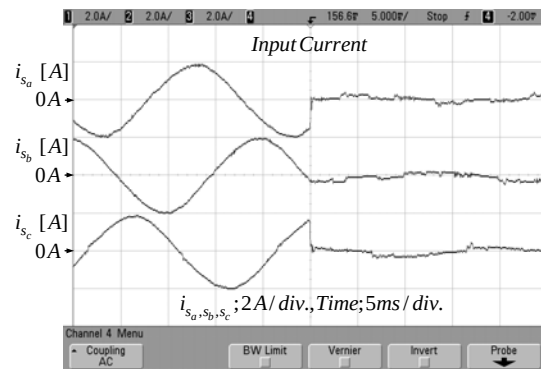
ในกรณีนี้ ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง C_o มีค่าเท่ากับ 13,600 μF ระบบสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้ดี ด้วยชุดควบคุมแรงดันเอาต์พุตแบบ พีไอ บวกกับชุดคำนวณกระแสชดลวดเหนี่ยวนำที่หาได้จากเทคนิคสมมูลกำลังไฟฟ้า สังเกตได้ว่าระบบดีเพียงพอที่จะไม่ต้องพึ่งพาเครื่องแปลงผันในสถานะที่ 2 ระบบมีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ระดับกำลังไฟฟ้าขนาดกลาง คุณสมบัติสมบัติที่ได้จากเครื่องแปลงผันนี้ ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับเครื่องแปลงผันแบบทั่วไปคือ วงจรเรียงกระแส 3 เฟส แบบฟีดแบลวเอ็มโดยใช้บูสต์ และ วงจรเรียงกระแส 3 เฟส ที่ใช้โมดูลบูสต์ที่ถูกปรับปรุงเพื่อต่อในโครงสร้าง 3 เฟส ซึ่งรายละเอียดถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 2 เพราะเนื่องจากเครื่องแปลงผันแบบบูสต์ และแบบซุกนั้นให้คุณสมบัติที่ดีเมื่อถูกนำมาใช้เป็นวงจรเรียงกระแสคุณภาพสูง



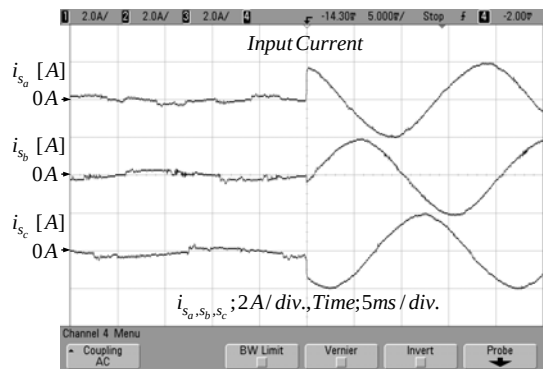
(ก)



(ข)

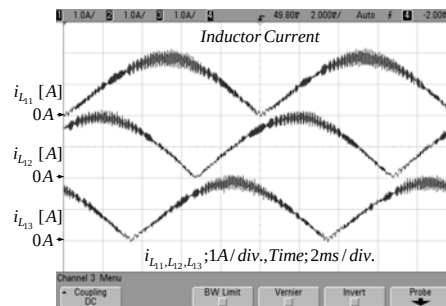


(ค)

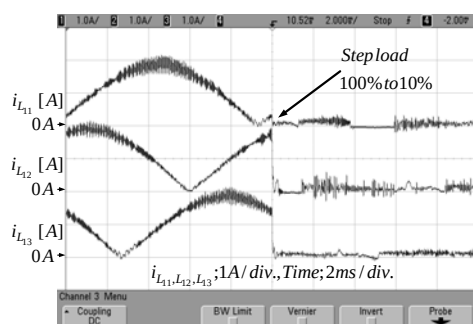


(ง)

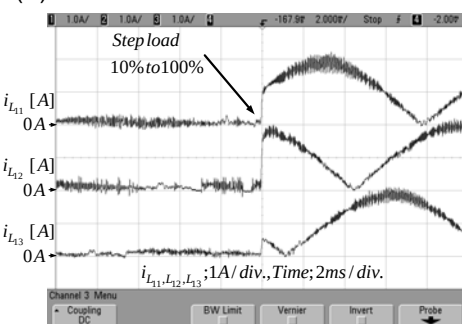
ภาพที่ 7 ผลการทดสอบระบบที่นำเสนอ (ก) และ (ข) แรงดัน และกระแสเฟสภาคอินพุต แต่ละเฟส (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc}) (ค) และ (ง) ส่วนขยายของกระแสแต่ละเฟส เมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 100% ไป 10% และกลับมาที่ 100%



(ก)

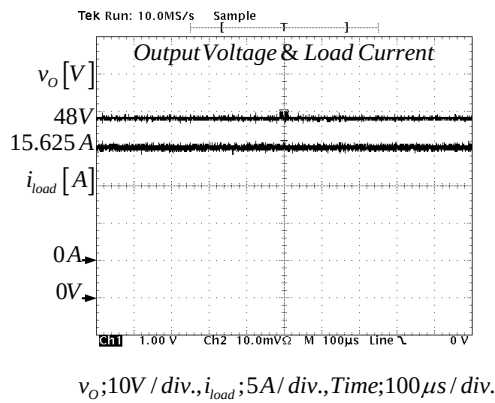


(ข)

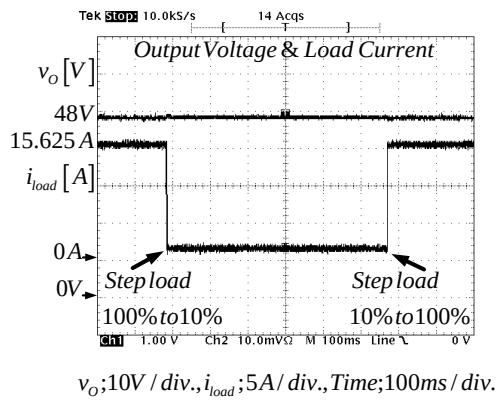


(ค)

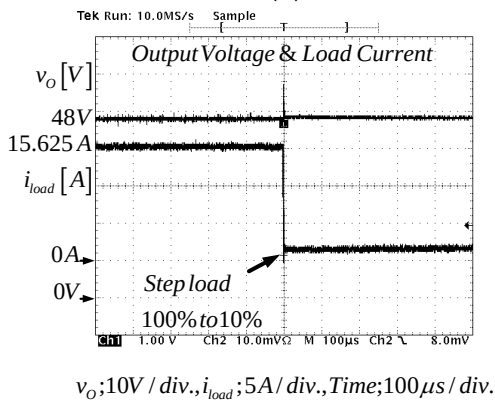
ภาพที่ 8 ผลการทดสอบระบบที่นำเสนอ (ก) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ (i_{L1} , i_{L2} , i_{L3}) ภายใต้สภาวะคงตัว (ข) และ (ค) ส่วนขยายของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละเฟส ภายใต้เงื่อนไขภาระเปลี่ยนแปลงจาก 100% ไปที่ 10% และกลับมาที่ 100% อีกครั้งหนึ่ง



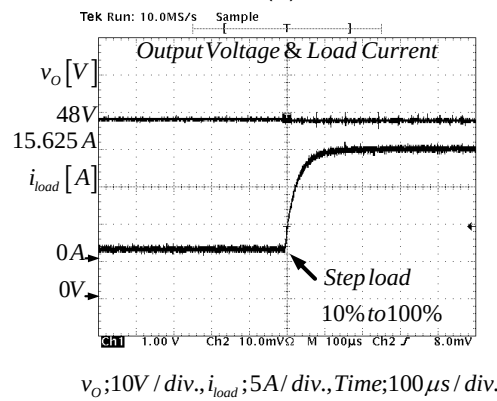
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 9 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุต v_o และ กระแสภาระ i_{load} ของระบบที่นำเสนอ (ก) การทดสอบในสภาวะคงตัว (ข) (ค) และ (ง) ระบบถูกทดสอบภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 100% ไปที่ 10% และกลับไปที่ 100% อีกครั้งหนึ่ง

1.6 สรุปผลการทดสอบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยใช้โมดูลวงจรเรียงกระแสแบบซุกที่ระบบใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 13,600 μ F

การออกแบบ และสร้างเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยใช้โมดูลวงจรเรียงกระแสแบบซุกที่ระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง และให้ผลตอบสนองทางพลวัตเป็นไปอย่างรวดเร็ว ที่ระบบตั้งอยู่บนพื้นฐานการออกแบบด้วยหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าได้ถูกนำเสนอในตอนนี้ การจำลองการทำงานกระทำเพื่อศึกษา 1) ผลตอบสนองต่อเงื่อนไขสภาวะสมดุลทั้ง 3 เฟส 2) เมื่อเกิดความสูญเสียที่โมดูลกำลัง และ 3) ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 100% ไปที่ 10% และกลับไปที่ 100% โมเดลสัญญาณขนาดเล็กของระบบนี้ได้ถูกนำเสนอในรายละเอียด จุดเด่นที่เห็นได้ชัดของระบบที่นำเสนอคือ ระบบช่วยลดขั้นตอนของการแปลงผันลง และช่วยให้ระบบมีผลตอบสนองทางพลวัตที่ดี ผลการจำลอง และทดสอบของระบบที่นำเสนอได้ยืนยันว่า ระบบสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระขนาดใหญ่ได้ ระบบสามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังได้ดีภายใต้สภาวะการรักษาซึ่งระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ด้วยหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า การวิเคราะห์ระบบในสภาวะคงตัว และทางพลวัตได้ถูกวิจารณ์ในรายละเอียด กระบวนการที่นำเสนอได้ให้ข้อดีดังต่อไปนี้คือ ระบบควบคุมง่าย และให้ผลตอบสนองทางพลวัตอย่างรวดเร็ว ผลลัพธ์ที่ได้จากการวัด คือ ตัวประกอบกำลัง 0.99 และ THD_i เท่ากับ 4% ซึ่งอยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน EN 61000-3-2 class A limits ระบบให้ประสิทธิภาพประมาณ 88 %

ตารางที่ 2 ผลของการเปรียบเทียบระบบวงจรเรียงกระแส 3 เฟสที่นำเสนอ กับระบบ 3 เฟสโดยทั่วไป

คุณลักษณะ	เครื่องแปลงผันแรงดันไฟ สลับเป็นแรงดันไฟตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลวงจรเรียง กระแสแบบซุก	เครื่องแปลงผันแรงดันไฟสลับ เป็นแรงดันไฟตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลแบบบัสต์ที่ถูก ปรับปรุง	เครื่องแปลงผันแรงดันไฟ สลับเป็นแรงดันไฟตรง ชนิด 3 เฟส พีดับบลิวเอ็ม ชนิดเต็มบริดจ์
จำนวนสวิตช์	3	3	6
ประสิทธิภาพ	ดี	พอใช้	ดี
การแก้ไขตัว ประกอบกำลัง	ดีเยี่ยม	ดี	ดี
EMI	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
แรงดันเอาต์พุต	$\hat{V}_s > V_o > \hat{V}_s$ (ให้ค่ามากกว่า หรือน้อยกว่าอินพุต)	$V_o > 1.5 \hat{V}_s$ (ต้องการเครื่อง แปลงผันตอนที่ 2 เพื่อลด แรงดัน)	$V_o > \hat{V}_s$ (ต้องการเครื่อง แปลงผันตอนที่ 2 เพื่อลด แรงดัน)
กระแสเอาต์พุต	ไฟตรง+กระแสเฟือง	พัลส์	ไฟตรง+กระแสเฟือง
พิภพการใช้งาน	แรงดันต่ำ หรือ สูง และ กำลังไฟฟ้าระดับกลาง	แรงดันสูง และ กำลังไฟฟ้ ระดับกลาง	แรงดันสูง และ กำลังไฟฟ้ ระดับสูง
ความยุ่งยาก ของการควบคุม	ง่าย (ทั้งแบบแอนะล็อกและ ดิจิตอล), ระบบมีความคงทน และให้พลวัตของการควบคุมที่ ดี (บนพื้นฐานหลักการสมดุล กำลังไฟฟ้า)	ง่าย (ทั้งแบบแอนะล็อกและ ดิจิตอล)	ยุ่งยาก
การแยกโดด	ง่ายในการแยกโดดระหว่าง ภาคอินพุตและเอาต์พุต	ยุ่งยาก และระบบต้องการเครื่อง แปลงผันในตอนที่ 2	ยุ่งยาก และระบบต้องการ เครื่องแปลงผันในตอนที่ 2
ขดลวด เหนี่ยวนำ และ หม้อแปลง	ต้องการทั้งภาคอินพุต และ ภาคเอาต์พุต (แต่สามารถใช้ แกนร่วมกันได้)	ต้องการเฉพาะภาคอินพุต	ต้องการเฉพาะภาคอินพุต

2. การทดสอบเพื่อลดขนาดของตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยอาศัยโมดูลวงจรเรียงกระแสแบบซุก ที่ระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง และให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว เมื่อระบบถูกออกแบบด้วยหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า

2.1 บทนำของการลดตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ในจำนวนวงจรเรียงกระแสชนิด 3 เฟส ที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังได้แบบแอคทีฟ เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่อาศัยโมดูลวงจรเรียงกระแสชนิด 1 เฟส 1 สวิตช์ พร้อมกับตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้าตรงจำนวน 1 ตัว ถูกนำไปใช้ในงานที่ต้องการพักกำลังไฟฟ้าระดับกลาง ถึงระดับสูง เพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในโครงสร้างแบบกระจาย โดยมีตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงแบบเดี่ยว C_o ถูกต่อที่ขั้วด้านเอาต์พุตเพื่อทำหน้าที่กรองแรงดันกระแสเพื่่อม และทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยงกับเครื่องแปลงผันภาระของระบบ

ตัวเก็บประจุที่ถูกนำมาใช้งานในปัจจุบันนั้นสามารถแยกเป็น 5 กลุ่ม คือ 1) เซรามิกซ์ 2) อลูมิเนียม 3) แทนทาลัม 4) พอลิเมอร์ (polymeric) 5) พอลิเมอร์ (mica and paper) เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตของตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กทรอนิกส์ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และรวดเร็วซึ่งสังเกตได้จาก ตัวเก็บประจุที่มีในปัจจุบันมีความสามารถในการถ่ายเทพลังงานและมีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูง แต่อย่างไรก็ตาม ตัวเก็บประจุชนิดนี้มีความสูญเสียภายใน และมีขั้ว เพราะฉะนั้นจึงถูกนำไปใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง เช่น ที่บัสแรงดันไฟฟ้าตรงของเครื่องแปลงผันแบบต่างๆ เมื่อตัวเก็บประจุถูกเลือกนำมาใช้ในวงจรไฟฟ้า คุณสมบัติต่างๆ ของตัวเก็บประจุเองต้องถูกทำให้เหมาะสมเพื่อให้มีอายุการใช้งานในวงจรที่สูงขึ้น และที่สำคัญคือช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบ

โดยทั่วไปแล้ว ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงถูกติดตั้งเพื่อทำหน้าที่ดังนี้คือ ช่วยในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิง ทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมโยงระหว่างเครื่องแปลงผัน และเพื่อทำการแก้ไขตัวประกอบกำลัง ในการทำแต่ละหน้าที่ดังที่ได้กล่าวมานั้น วิศวกรต้องทำการพิจารณาถึงประเด็นต่างๆ ดังนี้คือ ขนาดของตัวเก็บประจุ ชนิด ตำแหน่งการติดตั้ง เงื่อนไขแรงดัน การเปลี่ยนแปลงของภาระ และ วิธีการควบคุม ซึ่งประเด็นที่สำคัญในการพิจารณา คือ การหาขนาดตัวเก็บประจุเพื่อนำมาใช้ในการรักษาระดับแรงดันในวงจรเครื่องแปลงผัน บัสแรงดันไฟฟ้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายโดยทั่วไปใช้ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมโยงระหว่างวงจรเรียงกระแสและภาระ หรือเครื่องแปลงผันภาระ อย่างไรก็ตาม ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดใหญ่ นั้น มีน้ำหนัก ต้องการพื้นที่ในการติดตั้ง และราคาแพง อย่างไรก็ตาม เป็นที่ทราบกันดีว่าตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นตัวประกอบในเบื้องต้นที่ต้องใช้เพื่อพิจารณาความน่าเชื่อถือของระบบ ซึ่งปัญหานี้เป็นที่ทราบกันดีในวงการอุตสาหกรรม ในระบบของกระบวนการผลิตที่มีต้นทุนต่ำ และมีปริมาณสูง นั้นเป็นเป้าหมายที่ต้องการของผู้ประกอบการ ดังนั้น หนทางของการลดขนาดของตัวเก็บประจุจึงนำไปสู่การลดต้นทุนของการผลิตได้

ในตอนนี้ได้กล่าวถึง เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่มีการลดขนาดตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งระบบให้ข้อดีดังนี้

- ตัวประกอบกำลังสูง ระบบมีโครงสร้างแบบโมดูล ผลตอบสนองทางพลวัตเป็นไปอย่างรวดเร็ว ใช้ขนาดตัวเก็บประจุขนาดเล็ก ช่วยลดขนาด และน้ำหนักของเครื่องแปลงผัน
- ด้วยเทคนิคสมดุลกำลังไฟฟ้าช่วยทำให้กระบวนการออกแบบง่าย ระบบมีผลตอบสนองที่ดี สมรรถนะสูง และเพิ่มความน่าเชื่อถือ
- ชุดควบคุมเป็นแบบแอนะล็อก มีแบบแผนการควบคุมที่ง่าย ง่ายต่อการทำความเข้าใจ และสร้างระบบจริง

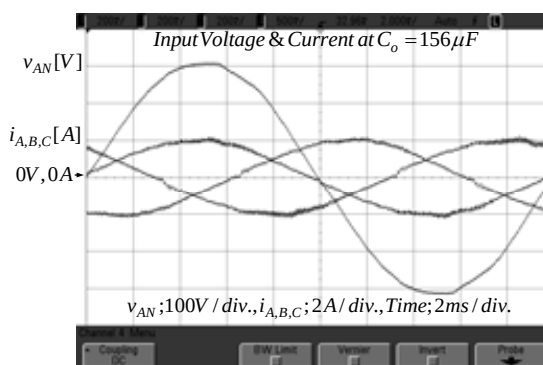
2.2 บทการทดสอบการลดตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

2.2.1 การประเมินสมรรถนะของระบบวงจรเรียงกระแส 3 เฟส ชนิดโมดูล ระบบต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการขนาด 750 W ถูกสร้าง และทดสอบเพื่อแสดงถึงวิธีการที่นำเสนอ รายละเอียดของระบบถูกแสดงในตารางที่ 1 กระแสอินพุตในสภาวะคงตัวของระบบที่นำเสนอที่ค่าของตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้าตรงถูกเปลี่ยนแปลงค่าไป 3 ค่า ดังนั้นคือ 156 μF 1,000 μF และ 13,600 μF ซึ่งถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 10 รูปคลื่นกระแสที่ได้ใกล้เคียงไซน์ ค่าตัวประกอบกำลังวัดได้ 0.99 และค่า THD ของกระแสเท่ากับ 3% ตามลำดับสรุปได้ว่า กระแสที่ได้ให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง ค่าความผิดเพี้ยนต่ำ

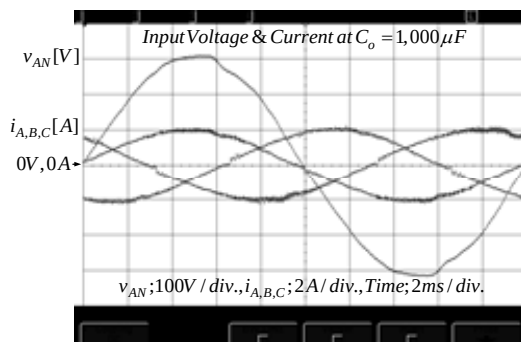
ผลการทดสอบของระบบที่นำเสนอภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 75 W ไปที่ 750 W และกลับไปที่ 75 W พร้อมกับการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรง C_o เท่ากับ 156 μF 1,000 μF และ 13,600 μF ถูกแสดงในภาพที่ 11 ผลการเปรียบเทียบแสดงว่า เกิดการเปลี่ยนของแรงดันเพียงเล็กน้อยเมื่อระบบใช้เทคนิคสมดุลกำลังไฟฟ้า คุณสมบัติด้านสมรรถนะหลักของระบบที่นำเสนอในประเด็น ค่าตัวประกอบกำลัง และ ค่าความผิดเพี้ยนรวมของกระแสอินพุตถูกแสดงในภาพที่ 12 เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรง C_o เท่ากับ 156 μF 1,000 μF และ 13,600 μF ที่พิกัดแรงดันอินพุต 220V เอาต์พุต -48 V และกำลังไฟฟ้า 750 W ตามลำดับ ปริมาณดังที่ได้กล่าวมานั้นถูกวัดด้วย Digital power meter YOKOGAWA model WT 1600

สรุปได้ดังนี้

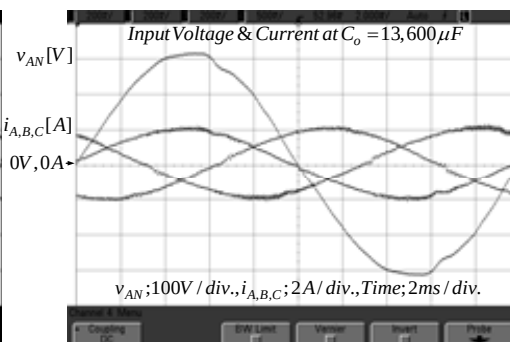
- ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง บันทึกค่าได้มากกว่า 0.99
- ค่า THD_i ของกระแสอินพุตมีค่าต่ำ บันทึกค่าได้ต่ำกว่า 3% ที่พิกัด 750 W เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงจำนวน 15 ค่า



(ก)

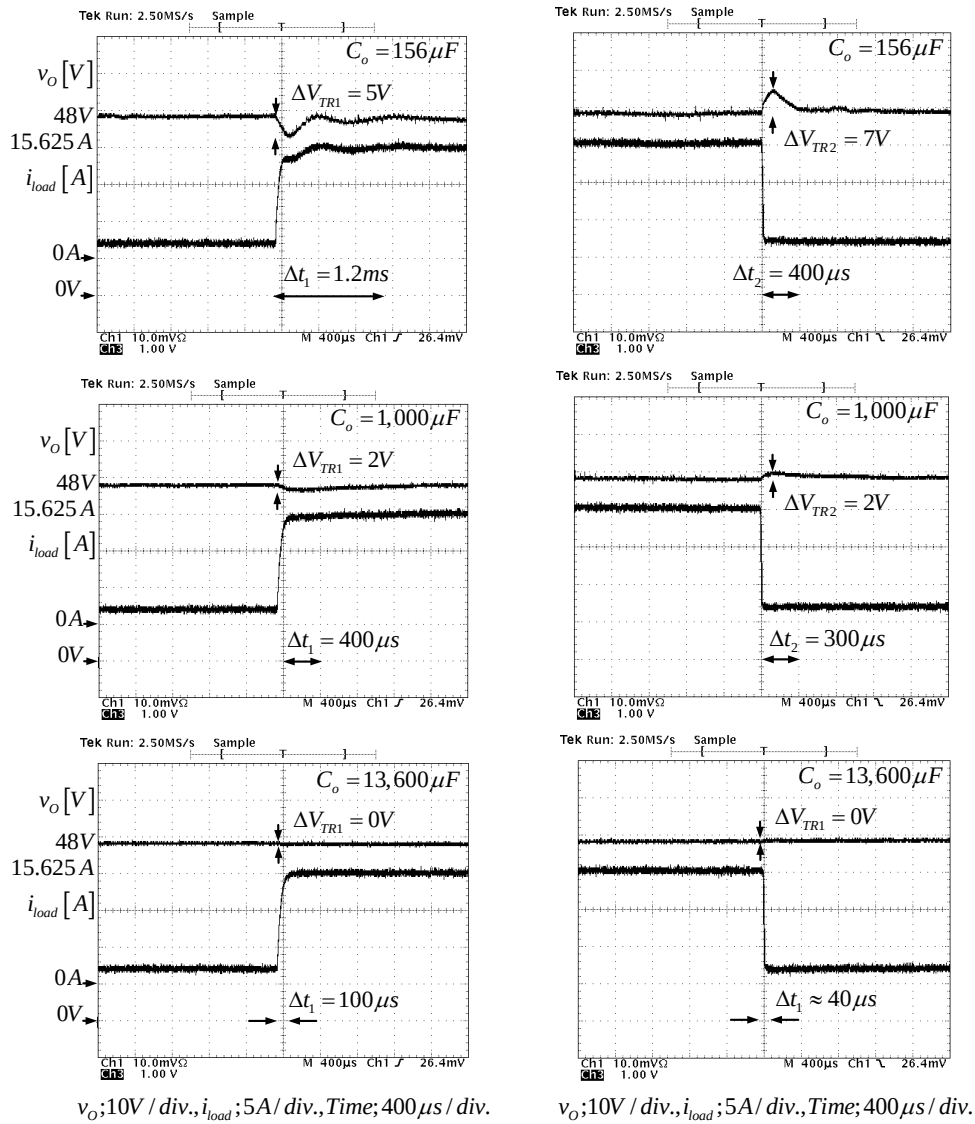


(ข)

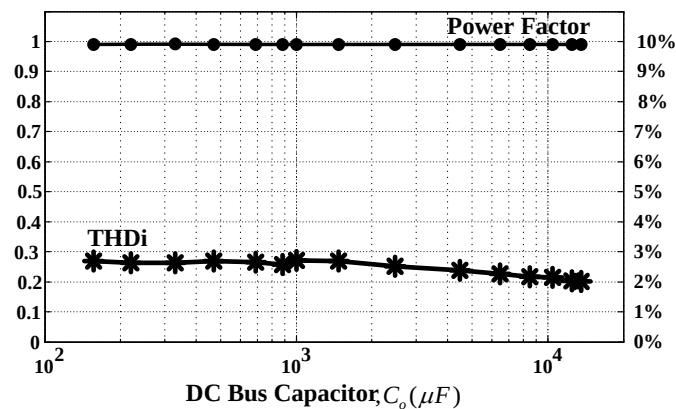


(ค)

ภาพที่ 10 ผลการทดสอบกระแสอินพุตภายใต้เงื่อนไขสภาวะคงตัวเมื่อตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้าตรงเปลี่ยนแปลงดังนี้คือ C_o เท่ากับ 156 μF 1,000 μF และ 13,600 μF



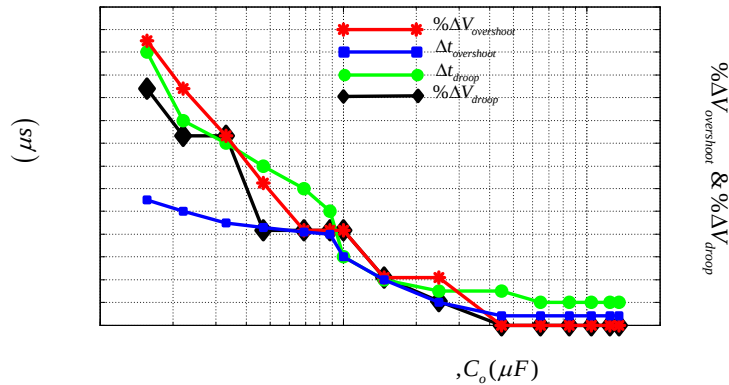
ภาพที่ 11 ผลการทดสอบสภาวะการเปลี่ยนแปลงภาระอย่างทันทีทันใดของระบบที่นำเสนอ แสดงแรงดันที่บัสไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสภาระจากการเปลี่ยนแปลงภาระที่ 10% (75 W) ไปที่ 100% (750 W) และกลับมาที่ 10% (75 W) (ที่พารามิเตอร์ พีไอ $k_p = 1$ และ $\omega_z = 150$)



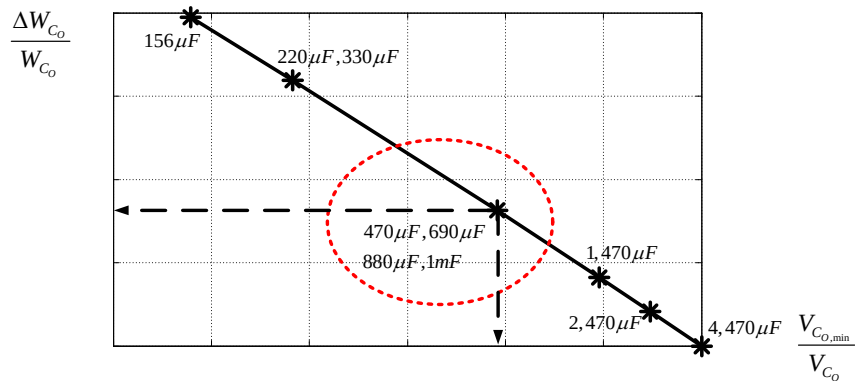
ภาพที่ 12 ผลของการทดสอบในสภาวะคงตัวของระบบที่นำเสนอเมื่อค่าของ C_o เปลี่ยนแปลงจาก 156 μF ไปที่ 13,600 μF

ผลการทดสอบของปริมาณ ΔV_{droop} , $\Delta V_{overshoot}$, Δt_{droop} และ $\Delta t_{overshoot}$ ถูกแสดงในภาพที่ 13 จากผลการทดสอบ Δt_{droop} ลดลงเมื่อค่าความจุของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าลดลงไปที่เวลา 100 μs สำหรับที่ $C_o \geq 4,000 \mu F$ ค่าของ ΔV_{droop} และ $\Delta V_{overshoot}$ ที่อ่านได้ลดลงด้วยเช่นกัน ค่าแรงดัน $\Delta V_{overshoot}$ มีค่าสูงกว่าค่าแรงดัน ΔV_{droop} ที่ $C_o < 700 \mu F$ ในส่วนค่าของตัวเก็บประจุที่ต่ำกว่า $C_o < 1,000 \mu F$ ได้ผลรวมของค่า ΔV_{droop} และ $\Delta V_{overshoot}$ มากกว่า 5% แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับค่าความจุที่อยู่ในช่วง $4,000 \mu F \leq C_o \leq 13,600 \mu F$ นั้นค่าของ ΔV_{droop} และ $\Delta V_{overshoot}$ มีค่าใกล้เคียงศูนย์ และ Δt_{droop} ใกล้เคียงศูนย์ด้วยเช่นกัน ถ้าผู้ออกแบบนิยามให้ย่านที่เหมาะสมของค่าความจุของตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง คือ $C_{o,optR}$ ค่า $\% \Delta V_{droop} \leq \% \Delta V_{transpec}$ (5%) นั้นหมายถึง แรงดันที่บัสไฟตรงของระบบต้องมีการคืนตัวที่รวดเร็ว สำหรับย่านที่เหมาะสมของค่าตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงอยู่ในช่วง $470 \mu F \leq C_o \leq 1,000 \mu F$ ที่ $\% \Delta V_{droop}$ ต่ำกว่า 5% และ Δt ของเวลาคืนตัวต่ำกว่า 400 μs

ซึ่งในตอนนี้ ผู้วิจัยต้องการช่วงเวลาของการฟื้นตัวอยู่ที่ประมาณ 400 μs หรือ 500 μs ที่พิกัดแรงดันอินพุต จึงสามารถใช้ค่าคงที่ในการออกแบบได้ตั้งนี้คือ 0.62 $\mu F/W$ เช่น ระบบมีพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 750 W ดังนั้นต้องใช้ตัวเก็บประจุขนาด 470 μF หรือเมื่อคิดที่ค่าสูงสุดต้องใช้ค่า 1.3 $\mu F/W$ ในการออกแบบแทน เมื่อ ΔW_{C_o} คือ พลังงานที่ถูกจ่ายออกมาจากตัวเก็บประจุในช่วงเวลาการคืนตัวและ W_{C_o} คือพลังงานที่ถูกจัดเก็บไว้ในตัวเก็บประจุเอาต์พุต C_o ที่พิกัดแรงดัน V_{C_o} จากที่สังเกตในภาพที่ 14 เพียงแค่ 8% ของพลังงานที่ถูกจัดเก็บไว้เท่านั้นที่ถูกส่งผ่านไปที่ภาระในช่วงเวลาของการฟื้นตัวถ้าเลือก $V_{C_{o,min}}$ ให้มีค่าเท่ากับ $0.958 V_{C_o}$ (ดังนั้น $C_{o,opt} = 470 \mu F$)



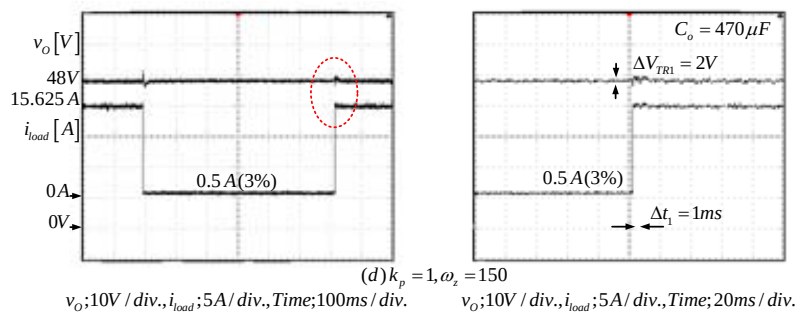
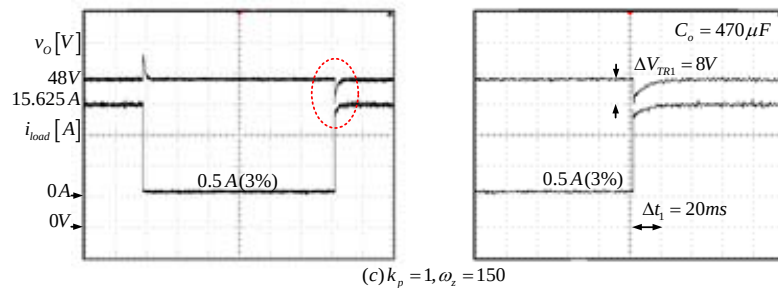
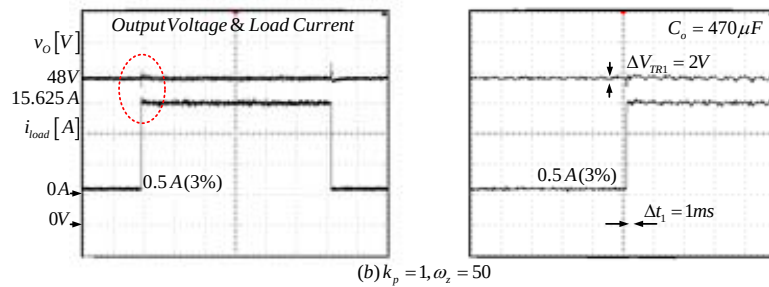
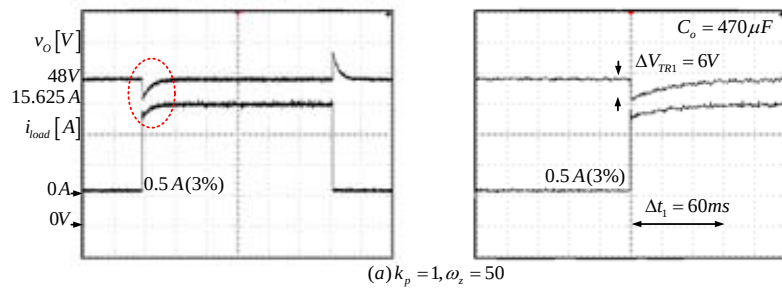
ภาพที่ 13 สมรรถนะที่เป็นฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 75 W (10%) ไปที่ 750 W (10%) และกลับมาที่เดิม (เมื่อ $v_s = 220 V$ และ $v_o = -48 V$)



ภาพที่ 14 ค่าการเปลี่ยนแปลงของพลังงานต่อ 1 หน่วย ของตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ในช่วงเวลาของการฟื้นตัว $\Delta W_{C_o} / W_{C_o}$ เป็นฟังก์ชันต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน 1 หน่วย $\Delta V_{C_{o,min}} / V_{C_o}$ for different C_o

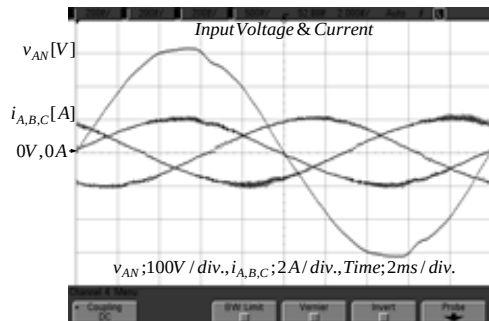
2.2.2 ผลการทดสอบระบบที่นำเสนอเมื่อใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟตรงขนาด 470 μF

ผลตอบสนองทางพลวัตของระบบที่นำเสนอภายใต้การควบคุมแบบสมดุลงำลังไฟฟ้าซึ่งเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมในโหมดแรงดันแบบทั่วไปถูกแสดงในภาพที่ 15 จากภาพได้แสดงผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุต และกระแสภาระที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อภาระเปลี่ยนจาก 24 W (3%) ไปที่ 750 W (100%) ที่ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมคือ $k_p=1$, $\omega_z=50$ และที่ $k_p=1$, $\omega_z=150$ จากผลของการทดสอบพบว่าเมื่อระบบทำงานภายใต้โหมดควบคุมแรงดันโดยทั่วไป เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตขนาดใหญ่ และใช้เวลาในการคืนตัวนาน ซึ่งแสดงว่าระบบให้ผลตอบสนองที่ไม่ดี อย่างไรก็ตามเมื่อระบบถูกออกแบบและทดสอบภายใต้การควบคุมแบบสมดุลงำลังไฟฟ้า พบว่าระบบให้ผลการตอบสนองที่รวดเร็วถึงแม้ว่าในลูปควบคุมแรงดันได้เลือกค่าพารามิเตอร์ k_p และ ω_z ของชุดควบคุมแบบ พีไอ ที่แตกต่างกัน

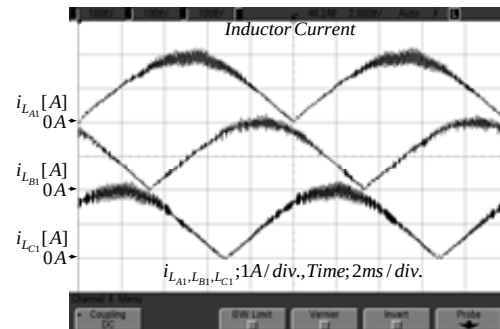


ภาพที่ 15 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุต และกระแสภาระภายใต้ระบบการควบคุมที่นำเสนอ และแบบทั่วไป

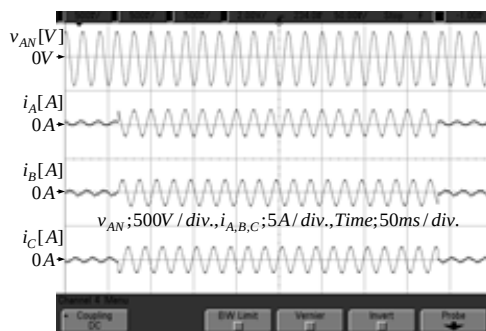
2.2.3 ผลการทดสอบสมรรถนะโดยรวมของระบบที่นำเสนอเมื่อระบบใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟตรงขนาด 470 μF ผลการทดสอบด้านสมรรถนะของระบบที่นำเสนอถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 16 ถึงภาพที่ 18 ซึ่งแสดงในเทอมของ กระแส แรงดัน ประสิทธิภาพ ตัวประกอบกำลัง และค่า THD ของกระแส



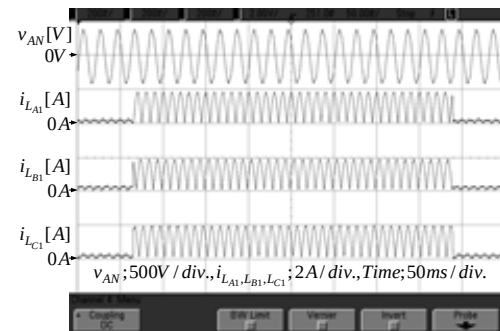
(ก)



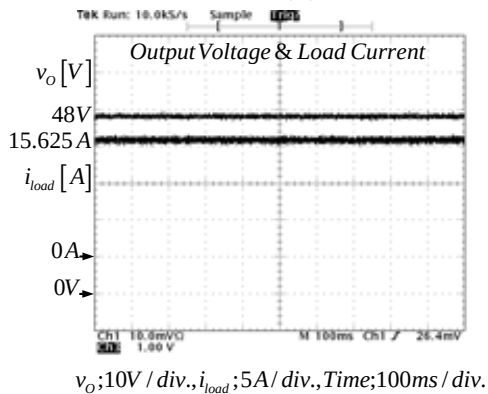
(ข)



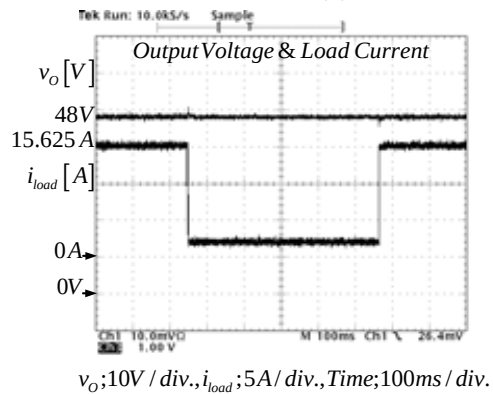
(ค)



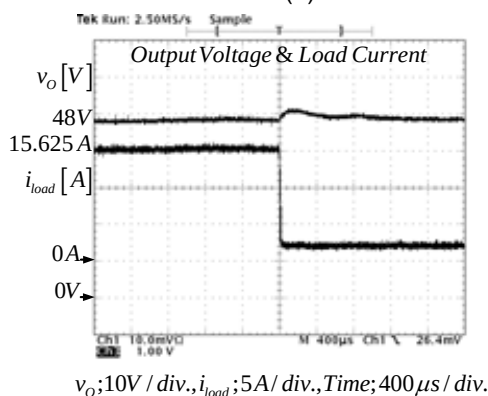
(ง)



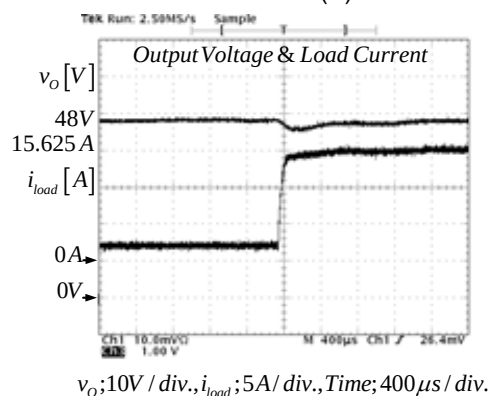
(จ)



(ฉ)



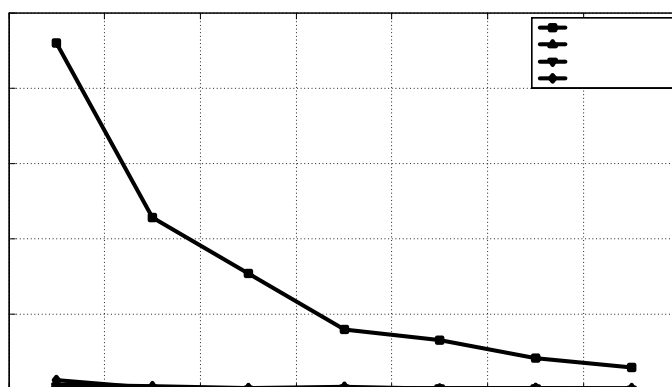
(ช)



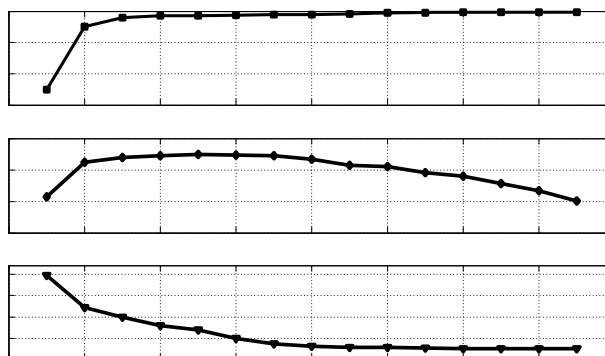
(ฐ)

ภาพที่ 16 ผลการทดสอบระบบที่นำเสนอเมื่อใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟตรงขนาด $C_o = 470 \mu\text{F}$

ผลตอบสนองในสภาวะคงตัว และในสภาวะชั่วคราวของระบบที่นำเสนอถูกแสดงในภาพที่ 16 ระบบควบคุมใช้ค่าพารามิเตอร์ PI เท่ากับ $k_p = 1$ และ $\omega_z = 150$ จากผลการทดสอบ แรงดัน และกระแสอินพุต และกระแสขดลวดเหนี่ยวนำของแต่ละโมดูลในสภาวะคงตัวถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 16 (ก) และ (ข) จากรูปคลื่นกระแส และแรงดันอินพุตนั้นอินเฟสส่งผลทำให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง กระแสขดลวดเหนี่ยวนำถูกวางจรวจควบคุมแบ่งให้มีค่าใกล้เคียงกัน ผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราวของ แรงดันและกระแสไลน์ และกระแสขดลวดเหนี่ยวนำถูกแสดงในภาพที่ 16 (ค) และ (ง) จากการทดสอบ แรงดัน และกระแสภาระในสภาวะคงตัวถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 16 (จ) และผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราวของ แรงดันและกระแสที่ภาระถูกแสดงในภาพที่ 16 (ฉ) และ (ช) จากการทดสอบ ผลตอบสนองที่ได้จากออกแบบระบบด้วยหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า โดยระบบใช้ค่าตัวเก็บประจุขนาดเล็กให้ผลของเวลาคงตัวที่ $400 \mu s$ ผลการทดสอบกระแสฮาร์มอนิกสีนในแต่ละอันดับ ที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงพิกัดกำลังไฟฟ้าของภาระไป 3 ระดับ คือ 100W, 350W และที่ 750W ผลการทดสอบถูกเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ IEC 61000-3-2 Class A limits ($V_s = 220 V$ และ $V_o = -48 V$) ถูกแสดงในภาพที่ 17 ทั้ง 3 กรณีของกำลังไฟฟ้าภาระที่เปลี่ยนไปส่งผลให้ค่า THD ของกระแสอินพุตยังคงอยู่ในกรอบของมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ ผลการทดสอบสมรรถนะ ตัวประกอบกำลัง ประสิทธิภาพ และ ค่า THD_i ที่เป็นฟังก์ชันของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ($V_s = 220 V$ and $V_o = -48 V$ with resistive load). ถูกแสดงในภาพที่ 18 ระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง ประสิทธิภาพประมาณ 88% และค่า THD ของกระแสเฟส ต่ำกว่า 3% ที่พิกัดกำลังไฟฟ้า



ภาพที่ 17 ผลการทดสอบกระแสฮาร์มอนิกของแต่ละอันดับ ที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงพิกัดกำลังไฟฟ้าของภาระใน 3 ระดับ คือ 100W, 350W และที่ 750W โดยผลการทดสอบถูกเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ IEC 61000-3-2 Class A limits ($V_s = 220 V$ และ $V_o = -48 V$)



ภาพที่ 18 ผลการทดสอบสมรรถนะ ตัวประกอบกำลัง ประสิทธิภาพ และ ค่า THD_i ที่เป็นฟังก์ชันของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ($V_s = 220 V$ และ $V_o = -48 V$).

จากผลการทดสอบที่ได้จากระบบที่นำเสนอสามารถสรุปเป็นประเด็นที่สำคัญได้ดังนี้

- ระบบใช้ตัวเก็บประจุขนาดเล็กที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
- ระบบให้ผลตอบแทนทางพลวัตที่ดี และให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง
- ระบบควบคุมที่นำเสนอเข้าใจง่าย และง่ายต่อการสร้างวงจรจริง
- ระบบง่าย และคงทน
- ระบบสามารถแยกโดดทางไฟฟ้า
- ระบบสามารถเพิ่ม หรือลดแรงดันได้
- การแปลงผันสามารถกระทำได้ภายในสถานะเดียว

2.3 บทสรุปของการทดสอบการลดตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ระบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ระบบใช้โมดูลวงจรเรียงกระแสแบบซุกชนิดแยกโดดทางไฟฟ้าพร้อมกับการใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กถูกนำเสนอ ในกรณีนี้ การทดสอบเลือกตัวเก็บประจุกระทำโดยอาศัยหลักจากการทดสอบโดยการอ้างอิงจากค่า ΔV_{droop} , $\Delta V_{overshoot}$ และค่าพลังงานที่ถูกส่งผ่านจากตัวเก็บประจุไปที่ภาระ จากผลการวิจัย ผู้ออกแบบ นักออกแบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิ่ง หรือวิศวกรสามารถใช้ค่าการออกแบบ 0.62 $\mu\text{F}/\text{W}$ หรือ 1.3 $\mu\text{F}/\text{W}$ เพื่อการออกแบบตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ ระบบที่นำเสนอถูกสร้าง และทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ ผลการจำลองการทำงาน และผลการทดสอบที่ได้ยืนยันถึงแนวคิดหลักของวิธีสมมูลกำลังไฟฟ้า ผลที่ได้อยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน IEC 61000-3-2 Class A limits

สรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. สรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ ได้นำเสนอการวิเคราะห์ และออกแบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลวงจรเรียงกระแสแบบซุกแยกโคตทางไฟฟ้า ชนิด 1 เฟส ที่ระบบถูกนำเสนอบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า ผลของการดำเนินงาน ในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้ ได้แบ่งเนื้อหาเป็น 4 ส่วน ดังนี้คือ

- ส่วนที่ 1 กล่าวถึง การวิเคราะห์ และจำลองการทำงานวงจรเรียงกระแสในโครงสร้างแบบขนานที่ระบบควบคุมถูกออกแบบให้อยู่ในรูปแบบการกระจาย และฝังตัวในแต่ละโมดูล
- ส่วนที่ 2 กล่าวถึง การวิเคราะห์ และจำลองระบบที่มีการเผื่อกำลังไฟฟ้าสำหรับเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก 1 เฟส พร้อมกับที่ระบบใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟตรงขนาดเล็ก
- ส่วนที่ 3 กล่าวถึง การวิเคราะห์ ออกแบบ และสร้างเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยอาศัยโมดูลวงจรเรียงกระแสแบบซุก ที่ระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง และให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว เมื่อใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟตรงขนาด 13,600 μF
- ส่วนที่ 4 กล่าวถึง การทดสอบ และวิเคราะห์เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยอาศัยโมดูลวงจรเรียงกระแสแบบซุก ที่ระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง และให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว เมื่อใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟตรงขนาด 470 μF

โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัยดังนี้

1. เพื่อแสดงให้เห็นจริงถึงแนวคิดของหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า
2. เพื่อเขียนโมเดลทางคณิตศาสตร์ จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สร้าง และทดสอบระบบภายใต้เงื่อนไขในสภาวะคงตัว ศึกษาผลตอบสนองทางพลวัต และศึกษาสมรรถนะของระบบ
3. เพื่อทดสอบตัวแปรต่างๆ ของระบบที่นำเสนอต่อการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟตรง สำหรับการตัดสินใจเลือกค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบที่นำเสนอ

การจำลองการทำงานของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลวงจรเรียงกระแสแบบซุกแยกโคตทางไฟฟ้า ชนิด 1 เฟส ที่ระบบใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก ตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง และระบบมีการสำรองโมดูล ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า ระบบที่ถูกออกแบบอยู่บนพื้นฐานของหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้านั้น ช่วยให้ระบบมีคุณลักษณะที่โดดเด่นดังนี้ คือ ระบบให้ผลตอบสนองทางพลวัตเป็นอย่างดี และระบบสามารถควบคุมการแบ่งกระแสขดลวดเหนี่ยวนำได้เท่ากัน ค่าตัวเก็บประจุของบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง C_o เท่ากับ 1,500 μF ถูกเลือกบนเงื่อนไขของอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ΔV_{droop} , $\Delta V_{\text{overshoot}}$ และค่าเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวของแรงดันเอาต์พุต จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ด้วยวิธีการที่นำเสนอ ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสามารถถูกลดขนาดลงได้ พร้อมกันนั้น ระบบยังคงให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง โมดูลเครื่องแปลงผันยังคงสามารถช่วยกันจ่ายกำลังไฟฟ้าไปที่ภาระได้ และที่สำคัญ ระบบให้ความน่าเชื่อถือที่สูงขึ้นเมื่อระบบทำงานภายใต้สภาวะที่มีการเผื่อกำลังไฟฟ้า

การออกแบบ วิเคราะห์ และสร้างเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้าโดยใช้โมดูลวงจรเรียงกระแสแบบซุกที่การออกแบบตั้งอยู่บนพื้นฐานหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าได้ถูกกล่าวถึงที่พิกัดกำลังไฟฟารวม 750 W แรงดันอินพุต 220 โวลต์ แรงดันเอาต์พุตที่บัลไฟตรง -48 โวลต์ การทดสอบเลือกตัวเก็บประจุกระทำโดยอาศัยหลักจากการทดสอบโดยการอ้างอิงจากค่า ΔV_{droop} , $\Delta V_{overshoot}$ และค่าพลังงานที่ถูกส่งผ่านจากตัวเก็บประจุไปที่ภาระ

จากผลการวิจัย นักออกแบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิง หรือวิศวกรสามารถใช้ค่าคงที่นี้เพื่อการออกแบบตัวเก็บประจุที่บัลแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในช่วงระหว่าง 0.62 $\mu\text{F/W}$ ถึง 1.3 $\mu\text{F/W}$ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าออกแบบเครื่องแปลงผันที่พิกัด 750 W เลือกค่าการออกแบบ 0.62 $\mu\text{F/W}$ ต้องใช้ตัวเก็บประจุที่บัลไฟตรงอย่างต่ำที่สุดคือ 465 μF จุดเด่นที่เห็นได้ชัดของระบบที่นำเสนอคือ ระบบช่วยลดขั้นตอนของการแปลงผันลง และมีผลตอบสนองทางพลวัตที่ดี ผลการจำลอง และทดสอบของระบบที่นำเสนอได้ยืนยันว่า ระบบสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระได้ดี ระบบสามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังได้ดี จากผลที่ได้จากการทดสอบ ระบบที่นำเสนอได้ให้ข้อดีดังต่อไปนี้คือ ระบบควบคุมง่าย และให้ผลตอบสนองทางพลวัตอย่างรวดเร็ว ตัวประกอบกำลังวัดได้ 0.99 และ THD_i เท่ากับ 4% ระบบที่นำเสนอถูกสร้าง และทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ ผลการจำลองการทำงาน และผลการทดสอบที่ได้ยืนยันถึงแนวคิดหลักของวิธีสมดุลกำลังไฟฟ้า ผลที่ได้อยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน IEC 61000-3-2 Class A limits

จากผลการทดสอบที่ได้สามารถสรุปเป็นประเด็นที่สำคัญได้ดังนี้

- ระบบใช้ตัวเก็บประจุขนาดเล็กที่บัลแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
- ระบบให้ผลตอบสนองทางพลวัตที่ดี และให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง
- ระบบควบคุมที่นำเสนอเข้าใจง่าย และง่ายต่อการสร้างวงจรจริง
- ระบบง่าย และคงทน
- ระบบสามารถแยกโดดทางไฟฟ้า
- ระบบสามารถเพิ่ม หรือลดแรงดันได้
- การแปลงผันสามารถกระทำได้ภายในสถานะเดียว

2. ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคตจำแนกได้เป็น 2 กรณีคือ

กรณีที่ 1. ประเด็นการเพิ่มพิกัดกำลังไฟฟ้าของโมดูลกำลัง การเพิ่มพิกัดกำลังไฟฟ้าให้กับระบบโดยอาศัยหลักการแบบโมดูลสามารถกระทำได้โดยการอาศัยหลักการโครงสร้างแบบขนานในแต่ละเฟส จากสมการดังนี้ $n = 3(N+1)$ เมื่อ n คือ จำนวนโมดูลทั้งหมดในระบบ N คือ จำนวนโมดูลวงจรเรียงกระแสต่อ 1 เฟส ซึ่งการพัฒนาในประเด็นนี้สามารถประยุกต์ใช้กับภาระได้หลากหลายชนิด เช่น สำหรับเป็นเครื่องประจุพลังงานให้กับแบตเตอรี่ ที่ระบบสามารถควบคุมการทำงานได้ทั้งโมดประจุ และโมดการคืนพลังงานให้กับระบบ และสำหรับเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิงให้กับเครื่องทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์

กรณีที่ 2. ประเด็นการสร้างระบบควบคุม ระบบควบคุมที่นำเสนอต้องถูกออกแบบ และสร้างลงบนโมดูลกำลัง โดยอาศัยชุดประมวลผลสัญญาณดิจิทัลขนาดเล็ก หรือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดเล็ก เพื่อทำหน้าที่เป็นสมองกลฝังตัว สำหรับการทำหน้าที่การสร้างความชาญฉลาดให้กับระบบเครื่องแปลงผันแบบกระจาย ซึ่งชุดควบคุมที่ได้ 1 ชุด สามารถนำไปใช้ได้กับหลากหลายโครงสร้างของการต่อโมดูลกำลัง เช่น โครงสร้างการขนาน โครงสร้างแบบแยกแหล่งจ่าย (แหล่งจ่ายผสมที่ได้จากหลากหลายแหล่งกำเนิดพลังงาน) หรือโครงสร้างแบบอื่นๆ เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีความฉลาด

1. บทความตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 3 บทความ

1.1 Kanthaphayao, Y.; Wisutmetheekorn, P.; Kamnarn, U.; Chunkag, V.; “Distributed control of parallel AC to DC converter “,6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2009. ECTI-CON 2009, Volume: 01, 2009 , Page(s): 68 – 71

1.2 Kamnarn, U. Yousawat, S. Kanthaphayao, Y. Chunkag, V.; “Redundant three-phase AC to DC converter using single-phase CUK rectifier module with minimized DC bus capacitance”, IEEE International Conference on Industrial Technology, 2009. ICIT 2009. Year: 2009 , Page(s): 1 – 6

1.3 Kamnarn, U.; Yousawat, S.; Kanthaphayao, Y.; Chunkag, V.; “Analysis, design and implementation of a three-phase AC to DC converter using single-phase isolated CUK rectifier modules with small DC bus capacitor ”, 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. 2009 , Page(s): 1 - 10

2. บทความตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 1 บทความ

2.1 Kamnarn, U.; Chunkag, V.; “Analysis and Design of a Modular Three-Phase AC-to-DC Converter Using CUK Rectifier Module With Nearly Unity Power Factor and Fast Dynamic Response ”, IEEE Transactions on Power Electronics, Volume: 24 , Issue: 8, 2009 , Page(s): 2000 – 2012

IEEE 6th International Conference on Electrical
Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and
Information Technology, 2009. ECTI-CON 2009, Volume: 01, 2009 ,
Page(s): 68–71

Distributed Control of Parallel AC to DC Converter

Yutthana Kanthaphayao* Pisit Wisutmetheekorn * Uthen Kamnarn** and Viboon Chunkag*

*Department of Electrical Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok 1518 Pibulsongkram Road, Bangsue, Bangkok, Thailand 10800

**Department of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna 128 Huay Kaew Road, Muang Distric, Chiang Mai, Thailand 50000

Abstract - This paper presents the distributed control of parallel AC to DC converter using power balance control technique. Three single-phase CUK converters based on power factor correction (PFC) are parallel connected at dc outputs. Each converter operates in continuous conduction mode. The control systems consist of the voltage loop control and hysteresis control techniques apply to the current loop control. The microcontroller is used to communication between each controller of each module for adaptive power balance technique. The simulation results, three of 250 W/module are as follows : the inductor current sharing equally, fast transient response, tight dc bus voltage regulation, system modularity, redundancy and high power factor. So, the simulation results are used to illustrate the operation and investigation of the distributed control technique.

I. INTRODUCTION

Distributed power system (DPS) has been developed for using in electronic and telecommunication systems. The modular power converter has been paralleled in a DPS is used to achieve the following characteristics: thermal management, reliability, redundancy, modularity, maintainability and size reduction [1]. A number of parallel connected single-phase PFC has been developed such as Boost, SEPIC and CUK converter. The AC to DC converter based on PFC approach of the two-stage methods which can be divided the operation into two stage: AC to DC and DC to DC. The first stage is a power factor corrected to attain good input power factor. This stage is cascaded with a DC to DC converter stage to tight output voltage regulation [2]. However, the two-stage AC to DC converter have some disadvantage such as the high cost, increases its size, weight and low efficiency. So, the single stage AC to DC converter has been improved for the dc DPS, which an AC to DC converter is responsible for both input high power factor and output voltage regulation.

The control of paralleling method for the power supply module has been divided into two groups [3]. The first is droop methods and the second is the active current sharing methods. The paralleled converter modules has been investigated in [4][5]. This focused on the current sharing methods, using single-wire current-sharing and masterless control of the converter modules respectively. The current sharing of the paralleled converter modules can be used to centralized and decentralized control [6]. The centralized control scheme requires additional communication cable interconnected among individual converter controllers to performing control calculations, and then adjusting the output of each converter modules for current sharing. This control have merit good the current sharing but have a drawbacks of the reliability and modularity of the system is degraded [6]. The decentralized control, each converter module is independently controlled based on the voltage droop method. This controller retains the modular structure compared with centralized control. However,

this controller has drawbacks such as static trade-off between power sharing and voltage regulation [6].

The distributed control exhibits merit both centralized and decentralized control topologies. Architecture of the distributed control has an external communication link between each controller but no central controller. The advantages of the distributed control are as follows : current sharing, redundancy, reliability and system modularity.

This paper proposed the distributed control of parallel AC to DC converter with CUK topology PFC based on power balance control technique that the system is shown in Fig. 1. The simulation configuration for investigating of the proposed system is shown in Fig. 2. The power circuit and control strategy are highlighted in section II. The averaged small signal model of the CUK topology base on power balance control technique is shown in section III. The voltage loop controller designed in section IV. In section V the simulation results is investigated of the proposed system. The conclusion is given in section VI.

II. PROPOSED TOPOLOGY AND CONTROL STRATEGY

A. The Power Circuit

The system schematic for a parallel single-phase AC to DC converter is proposed as shown in Fig. 2. The power circuit is CUK topology with parallel connected at dc bus of output voltage.

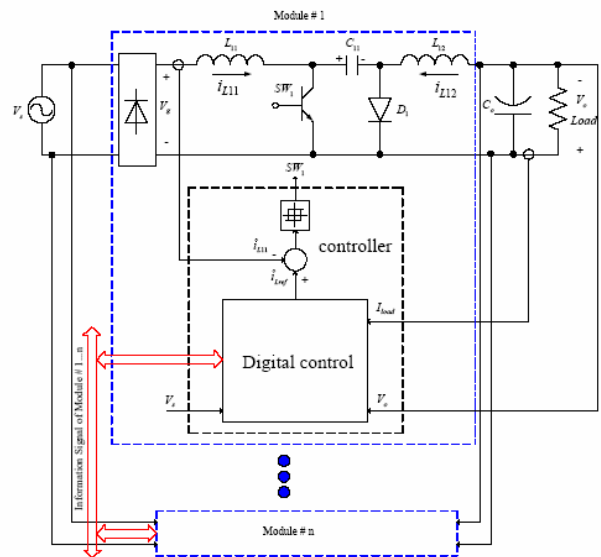


Fig. 1. System configuration block diagram of DPS with distributed control.

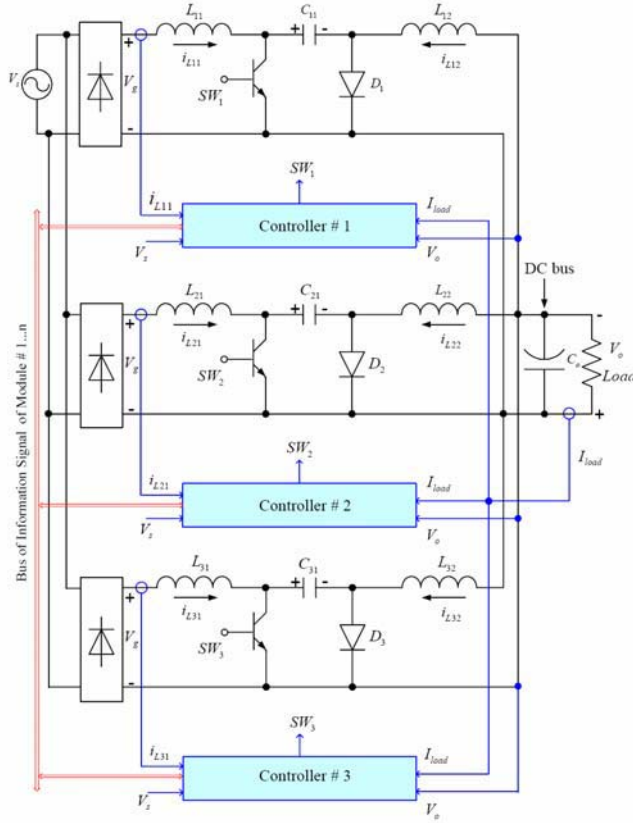


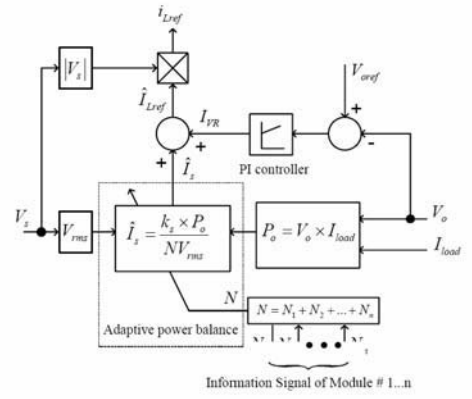
Fig. 2. Systems configuration of the proposed system.

B The Control Strategy of Distributed control

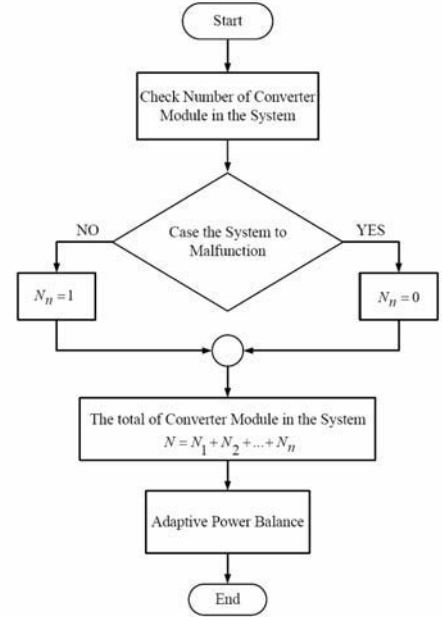
The system in Fig. 2, each modules is independently controlled but its has communicating between each controller of each modules. The detail of digital controller is shown in Fig. 3(a). The communications are information signal such as number of modules paralleled and detection of healthy or faulty modules. Where N_n is the status of each module in the DPS. If N_n equal to 1 when each module is normally work, then N_n equal 0 when the overall module to malfunction.

Where N is total of N_n used to the adaptive power balance and than to achieve the current sharing of each module it is equally. This is the detail shown in Fig.3 (b). According to the voltage loop controller the output voltage at the dc bus has been measured and compared to the reference voltage. The voltage error is compensated by proportional-plus-integral (PI) controller for an appropriate voltage controller. The peak of input current is computed based on power balance technique then summing an appropriate voltage controller. As well as, the summation signal in the block diagram is multiplied by a signal of absolute input voltage and than compared to a signal of the input inductor current.

The resulting modulation signal is processed by a suitable hysteresis current control, generating the driving signal to control the switch.



(a) Block diagram of control algorithms.



(b) The detail of an adaptive power balance.

Fig. 3. The distributed control of the proposed system.

III. AVERAGED SMALL SIGNAL MODEL [7]

The averaged small signal model of a parallel AC to DC converter is based on power balance control technique. To simplifier analysis, the assumptions are as follows, the semiconductor is considered ideals, an operation of the converter is steady state, the input current is controller to track the reference current by the current controller to be in phase with the input voltage. So, the equations of the power balance control were considered as follows.

$$V_g \sum_{i=1}^n I_{Li} = V_o I_o \quad (1)$$

$$\hat{i}_{Lref1i} = \hat{I}_{Li} + I_{VR} \quad (2)$$

$$i_{Lref1i} = \hat{I}_{Lref1i} |\sin(\omega t)| \quad (3)$$

$$V_g \sum_{i=1}^n \hat{I}_{L1i} = k_s V_o I_o \quad (4)$$

V_g is the root mean square value of the rectifier voltage.

I_{L1i} is the root mean square value of the input inductor current.

n is number of converter in the system.

V_o is the dc bus output voltage.

I_o is the average load current.

$\hat{I}_{Lref1i}$ is the peak current from the inductor current calculator.

I_{VR} is the correcting signal from PI controller.

i_{Lref1i} is the inductor reference current.

k_s is the root mean square gain.

The assumptions are the peak current of $\hat{I}_{L11} = \hat{I}_{L21} = \hat{I}_{L31}$ thus,

$$\hat{I}_{L1i} = \frac{k_s V_o I_o}{3V_g} \quad (5)$$

Besides, the dynamic equation of the output voltage is obtained in (6), while I_{L2i} is the inductor current of L_{2i} and I_{load} is the load current.

$$\sum_{i=1}^n I_{L2i} = C_o \frac{dV_o}{dt} + I_{load} \quad (6)$$

IV. CONTROLLER DESIGN [7]

The analysis and design, the parameters of CUK converter was considered and shown in table I. The objective of the voltage loop used to the tight dc bus voltage regulator and an appropriate signal controller of the reference current. So, the input current effected to track the input line voltage. Thus, the control system of the voltage loop has been considered the bandwidth of the voltage loop should be smaller than the line frequency. A suitable crossover frequency is the interval of 1/3, 1/5 of the line frequency and phase margin usually more than 45°, for the system is stable. In this paper, the phase margin chose 70° and the crossover frequency equal to 10 Hz. Thus, the parameters of PI controller are $K_p = 0.292$ and $K_I = 6.667$ respectively, while the feedback gain is $k_{fb} = 1/4.8$. Therefore, a closed loop system in [7] is shown in an equation (7) and PI controller is shown in an equation (8).

$$\frac{\tilde{v}_o}{\tilde{v}_{ref}} = \frac{3G_{VR}\bar{V}_g k_s}{\bar{V}_o C_o s + 3G_{VR}\bar{V}_g k_s k_{fb}} \quad (7)$$

$$G_{VR}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (8)$$

The parameters of the PI controller were designed in a continuous and then transform to a discrete form using the trapezoidal approximation [8]. The sampling time of digital controller was 100 μ sec.

TABLE I
CHARACTERISTICS OF THE CUK CONVERTER

Characteristic	Parallel Modules
Input Voltage	220 V _{rms}
Line Frequency	50 Hz
Rated Power	250 Watt/Module
Output Voltage	-48 V
L_{11}, L_{12}, L_{13}	5 mH
L_{21}, L_{22}, L_{23}	1 mH
C_{11}, C_{12}, C_{13}	1 μ F
C_o	20000 μ F

V. SIMULATION RESULTS

In order to verify the proposed system and control algorithms has been simulated using MATLAB/Simulink. The simulation system with a nominal output power of $P_o = 500$ W operating at the proposed system and control algorithms, that its one redundancy module. So, the simulation results are as follows.

A. Simulation Results of Steady State and Transient Response

The simulation of the proposed system is shown in Fig. 2. Figure 4 shows the dynamic response of output voltage and load current due to step load change from 500 W to 50 W and back to 500 W. The inductor current at step load change from 500 W to 50 W occurs are shown in Fig.5. Evidently, the line current is exactly in phase with the input voltage and nearly sinusoidal. So, the input power factor approaches unity and the wave form are shown in Fig. 6.

B. Simulation results of the module failed

Figure 7 shows the one module has been failed occurring at 0.8 second and back to the system at 0.9 second. This figure shows the inductor current, output voltage and load current respectively. The simulation results in Fig.7 indicate that the distributed control is effective and parallel AC to DC converter has fast transient response characteristic.

VI. CONCLUSIONS

This paper proposed the distributed control for parallel AC to DC converter by using power balance control technique. According to, the simulation results of the proposed system and control algorithm to achieve the tight dc bus voltage regulation, fast transient response, the inductor current sharing equally, ensuring system power continues uninterrupted, redundancy, modularity, power factor nearly unity and results from these studies will be improved in [7]. So, the future research will be used to fabricate prototype modules to experimentally verification of the control algorithm.

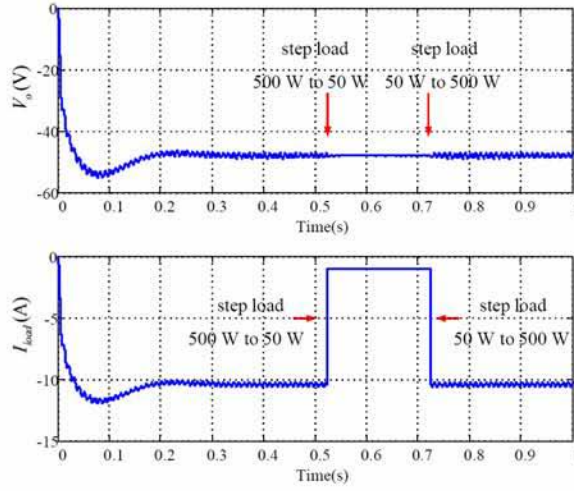


Fig. 4. Steady state and transient response of the output voltage and current waveforms.

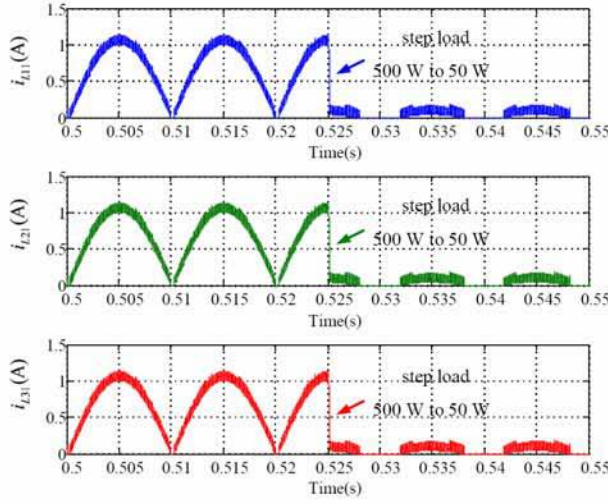


Fig. 5. Steady state and transient response of the inductor current waveform.

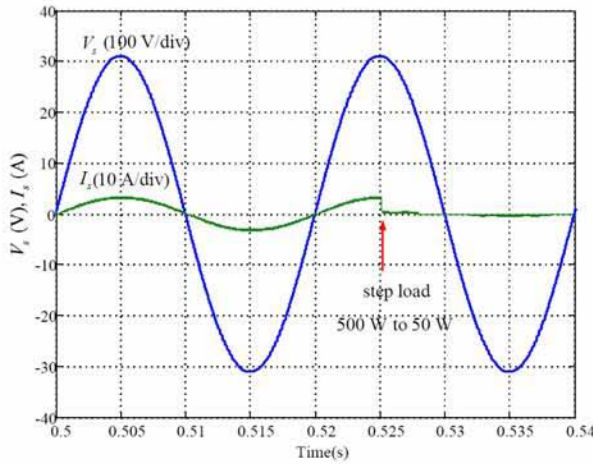
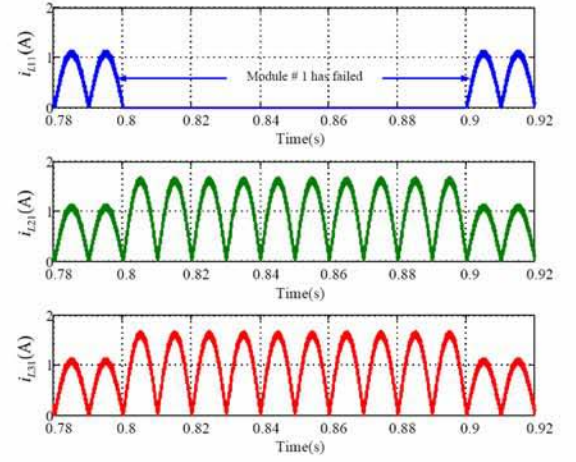
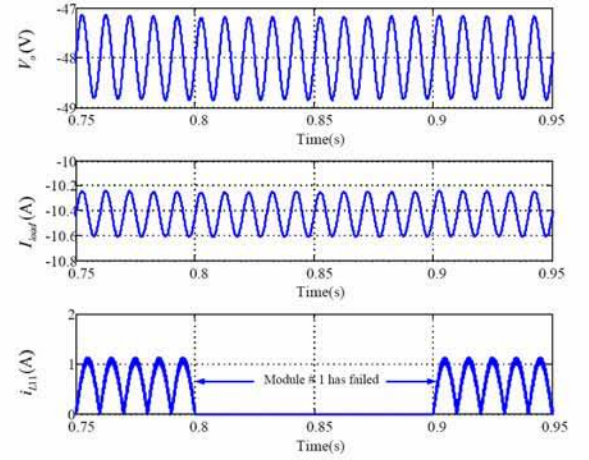


Fig. 6. The input voltage and current waveforms are interval steady state and transient response.



(a) Inductor current waveform.



(b) Output voltage, load current and inductor current waveforms.
Fig. 7. Simulation results when module #1 have been failed.

References

- [1] Wofciech A. Tabisz, Milan M. Jovanovic and Fred C. Lee, "Present and Future of Distributed Power Systems," APEC '92. Conference Proceedings, pp 11-18, 1992.
- [2] Aravind Pothana and Krishna Vasudevan, "Parallel Operation of Power Factor Corrected AC-DC Converter Modules With Two Power Stages," PEDS '07, pp 953 – 960, 2007.
- [3] Shiguo Luo, Zhihong Ye, Ray-Lee Lin and Fred C. Lee, "A Classification and Evaluation of Paralleling Methods for Power Supply Modules," PESC 30th Annual IEEE Vol.2, pp. 901 – 908, 1999.
- [4] Chang-Shiam Lin and Chern-Lin Chen, "Single-Wire Current-Share Paralleling of Current-Mode-Controlled DC Power Supplies," IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 47, No 4, August 2000.
- [5] Yang Zhang, Regan Zane and Dragan Maksimovic, "Current Sharing in Digitally Controlled Masterless Multi-Phase DC-DC Converters," PESC'05, pp 2722-2728, 2005.
- [6] Yeong Jia Cheng and Eng Kian Kenneth Sng "A Novel Communication Strategy for Decentralized Control of Paralled Multi-Inverter Systems," IEEE Transaction on Power Electronic, vol. 21, No.1, January 2006.
- [7] Kannam U. and Chunkag V. "Analysis and Design of a Parallel CUK Power Factor Correction Circuit Based on Power Balance Control Technique," IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.126-D, pp 533-540, May 2006.
- [8] Dogan Ibrahim, "Microcontroller Based Applied Digital Control," John Wiley & Sons, Ltd, 2006.

IEEE International Conference on Industrial Technology, 2009.

ICIT 2009. Year: 2009 , Page(s): 1–6