การออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งเก็บพลังงาน

Design of an AC/DC Converter with using Supercapacitors as Energy Storage

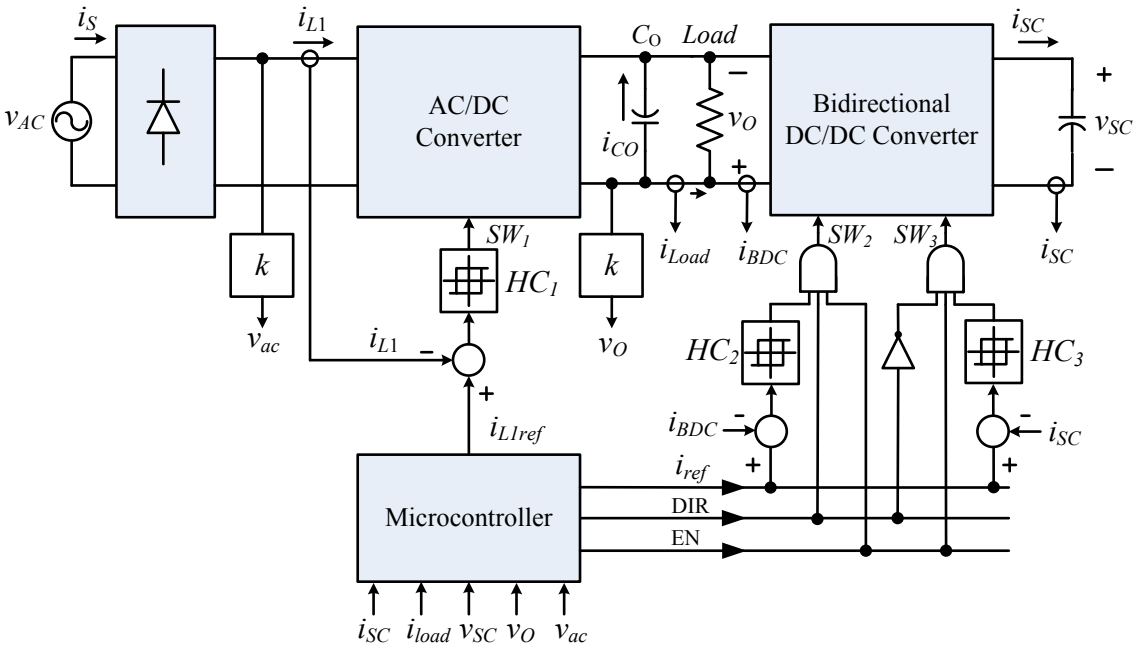
พิสิทธิ วิสุทธิเมธีกร[1]* และวิบูลย์ ชื่นแขก[2]
[1] ภาควิชาวิศวกรรมระบบวัดคุมและเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
140 ถ.เชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ
[2]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
*ผู้รับผิดชอบบทความ: pisit@mut.ac.th โทรศัพท์ 02-988-3666

บทคัดย่อ
บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงที่มีค่าตัวประกอบกำลังสูงที่มีการใช้ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งเก็บพลังงาน ระบบที่นำเสนอประกอบด้วยวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงแบบชุกและมีวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางต่อระหว่างเอาต์พุตของระบบและซุปเปอร์คาปาซิเตอร์เพื่อทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าระหว่างเอาต์พุตระบบและซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ ในโมดปกติโหลดได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟสลับโดยผ่านวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสลับเป็นกระแสตรงและวงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรงถูกควบคุมให้ชาร์จซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ สำหรับสภาวะที่แหล่งจ่ายไฟสลับเกิดขัดข้อง วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางจะถูกควบคุมให้ส่งผ่านพลังงานจากซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ไปที่โหลด เพื่อตรวจสอบหลักการ ระบบที่นำเสนอได้ทดสอบระบบต้นแบบที่แรงดันเอาต์พุตวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงมีค่าเท่ากับ 48 V ที่กำลังเอาต์พุต 250 W และซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดแรงดัน 25 V ความจุ 10 F ถูกใช้เป็นแหล่งเก็บพลังงาน จากผลการทดสอบค่าตัวประกอบกำลังด้านอินพุตของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงมีค่าประมาณ 0.99 และเวลาในการจ่ายพลังงานสำรองเท่ากับ 7 วินาทีที่โหลดด้านออกเท่ากับ 100 W
คำสำคัญ ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง วงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรงแบบสองทิศทาง

Abstract
This paper presents a design of a high power factor AC/DC converter with using supercapacitors as energy storage. The proposed system consists of a cuk topology based AC/DC power converter and a bidirectional DC/DC converter which is connected between the AC/DC converter and supercapacitors for transferring electrical energy between the system output and supercapacitors. In normal mode, load is energized by the AC line via the AC/DC converter and the DC/DC converter is controlled to charge supercapacitors. In the case of the AC line faults, the bidirectional DC/DC converter is controlled to transfer energy from supercapacitors to load. To verify the proposed system concept, the AC/DC converter and the bidirectional DC/DC converter were built and 25V/10F supercapacitors are used as energy storage. The output voltage of the AC/DC converter is 48 V at 250 W output power. From the experimental results, the input power factor of the AC/DC converter is about 0.99 and the backup time is 7s for 100 W of output power.
Keywords: Supercapacitors, AC/DC converter, Bidirectional DC/DC converter

1. บทนำ

ในโรงงานอุตสาหกรรมมีการใช้งานอุปกรณ์ควบคุมและระบบเครื่องมือวัดกันอย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิต ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้มักจะทำงานด้วยแหล่งจ่ายไฟตรงที่มาจากแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ชิ่ง ด้วยเหตุผลที่แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ชิ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าแหล่งจ่ายไฟตรงแบบเชิงเส้นและยังสามารถทำงานที่แรงดันอินพุตในย่านกว้าง อย่างไรก็ตามอาจเกิดกรณีที่แรงดันไฟสลับมีค่าลดลงต่ำเกินกว่าที่แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ชิ่งจะทำงานได้ ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของอุปกรณ์ในระบบควบคุมและเครื่องมือวัดได้ วิธีแก้ปัญหาอาจทำโดยออกแบบแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ชิ่งสามารถทำงานในย่านแรงดันอินพุตที่กว้างขึ้น [1] และถึงแม้แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ชิ่งจะสามารถทำงานในย่านแรงดันอินพุตที่กว้างแต่ก็ไม่สามารถแก้ปัญหาในกรณีแรงดันไฟสลับหายไปได้ อีกแนวทางหนึ่งของการแก้ปัญหานี้คือการใช้แหล่งจ่ายไฟแบบต่อเนื่อง [2] (Uninterruptible- Power Supply: UPS) ซึ่งนิยมใช้กันอย่าง



รูปที่ 1 โครงสร้างระบบที่นำเสนอ

กว้างขวางในระบบสื่อสารและคอมพิวเตอร์โดยภายในแหล่งจ่ายไฟแบบต่อเนื่องนี้จะมีแบตเตอรี่เป็นแหล่งเก็บพลังงานสำรองและพลังงานสำรองในแบตเตอรี่จะถูกจ่ายไปยังโหลดเมื่อแหล่งจ่ายไฟสลับเกิดขัดข้อง โครงสร้างของแหล่งจ่ายไฟแบบต่อเนื่องจะมีวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบทบแรงดันเพื่อเพิ่มขนาดแรงดันให้สูงขึ้นใช้เป็นอินพุตให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายให้โหลด อย่างไรก็ตามโครงสร้างของแหล่งจ่ายไฟแบบต่อเนื่องดังกล่าวอาจไม่เหมาะสมกับโหลดกรณีที่ต้องการแรงดันไฟตรงในการทำงานเพราะท้ายที่สุดก็ต้องมีวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟตรงที่มีขนาดแรงดันต่ำเหมาะกับโหลดด้วย ซึ่งทำให้เกิดกำลังสูญเสียในภาคต่างๆของวงจรแปลงผันไฟฟ้าที่มีในระบบ

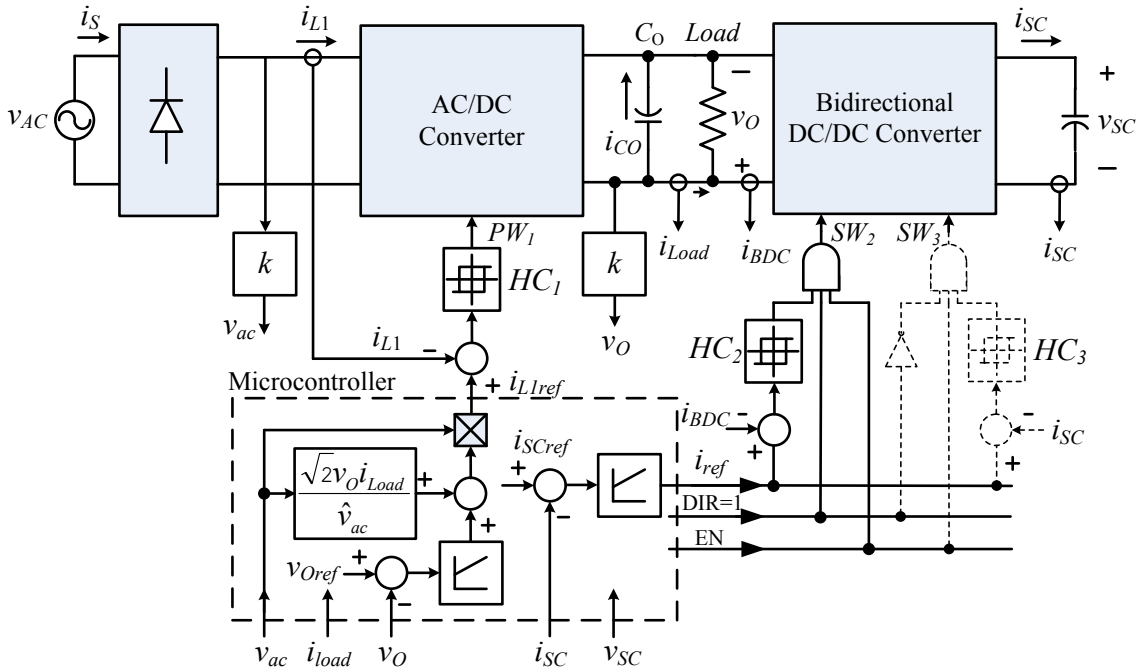
ปัจจุบันมีการนำซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะใช้เก็บพลังงานสำรองเนื่องจากซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ [3] ได้แก่ มีความหนาแน่นกำลังสูงกว่า, อายุใช้งานยาวนานกว่า, ไม่มีการบำรุงรักษาและง่ายในการชาร์จประจุ เป็นต้น อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่มีความหนาแน่นของพลังงานมากกว่าซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ ทำให้การใช้ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ไม่เหมาะกับระบบไฟฟ้าสำรองที่ต้องมีระยะเวลาสำรองนาน ๆ

ดังนั้นในที่นี้จึงนำเสนอการออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงที่มีการเก็บพลังงานสำรองโดยใช้ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ ซึ่งมีการนำเสนอรายละเอียดในส่วนต่างๆ ระบบที่นำเสนอในภาพรวมและวงจรภาคกำลัง, รายละเอียดตัวควบคุมระบบ, ผลการทดสอบและบทสรุป

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินงานวิจัย

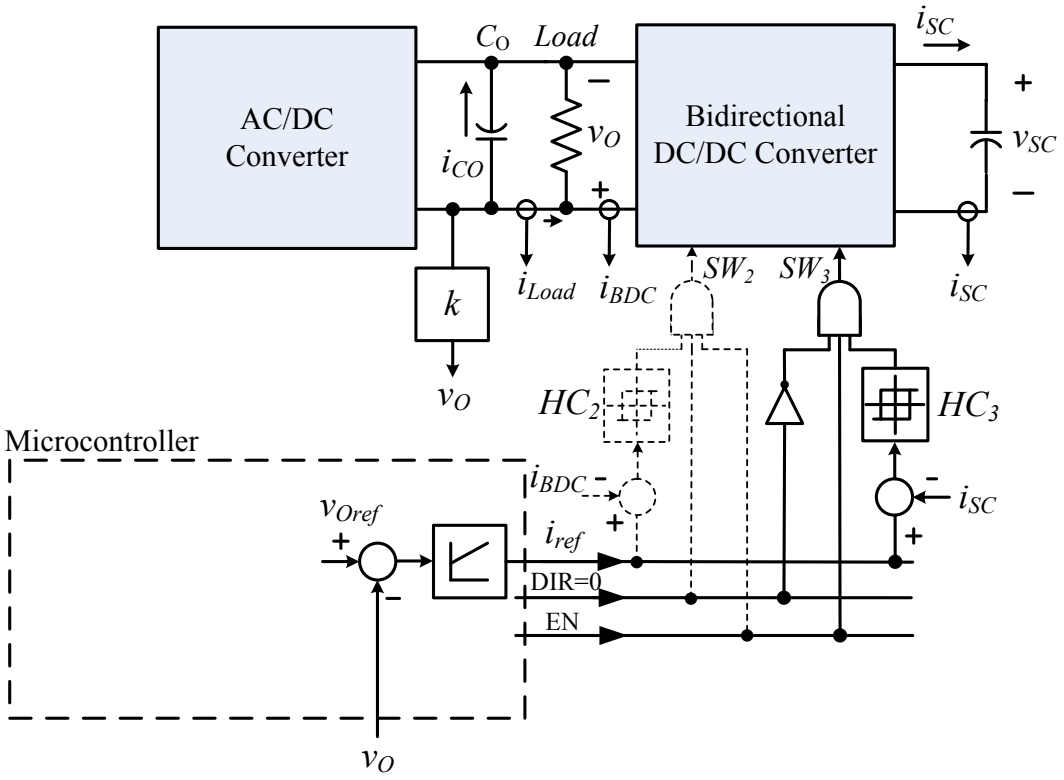
2.1. โครงสร้างระบบ

ระบบที่นำเสนอมีโครงสร้างดังรูปที่ 1 โดยภาคกำลังประกอบด้วยวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง (AC/DC Converter) และวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง (Bidirectional DC/DC Converter) โดยด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงจะต่อกับโหลดของระบบและต่อเข้ากับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางที่อีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ในส่วนของการควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมดจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุม การทำงานของระบบแบ่งออกเป็น 2 สภาวะคือ โมดปกติและโมดจ่ายพลังงานสำรองให้โหลด โมดปกติวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงถูกควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 48V เพื่อจ่ายโหลดและชาร์จประจุซุปเปอร์คาปาซิเตอร์โดยใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง การควบคุมกระแสในวงจรแปลงผันกำลังทั้งหมด จะใช้ตัวควบคุมกระแสแบบฮีสเตอร์รีซิส ค่าคำสั่งกระแสได้จากการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ การทำงานของระบบในโมดปกติเป็นสภาวะ



รูปที่ 2 ไดอะแกรมระบบเมื่อทำงานในโมดปกติมีแหล่งจ่ายไฟสลับเป็นแหล่งพลังงาน

ที่แหล่งจ่ายไฟสลับทำงานได้ปกติซึ่งกรณีนี้ วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงจะถูกควบคุมให้จ่ายพลังงานให้โหลดและชาร์จซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ ไดอะแกรมการทำงานในโมดนี้แสดงดังรูปที่ 2 การควบคุมวงจรแปลงผันทั้งสองจะแยกจากกันอย่างอิสระ โดยมีลูปควบคุมการชาร์จซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ด้วยการควบคุมค่ากระแสที่ไหลผ่านให้มีค่าคงที่และแรงดันต้องไม่เกินค่าพิกัดของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ คำสั่งกระแสซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ i_{SCref} ในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 A และการชาร์จจะสิ้นสุดเมื่อแรงดันที่ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มีค่าต่ำกว่าค่าพิกัดแรงดันของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ประมาณ 1-2 V เพื่อป้องกันการเกิดแรงดันเกินในซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ซึ่งเป็นเหตุให้อายุการใช้งานสั้น การควบคุมกระแสชาร์จซุปเปอร์คาปาซิเตอร์จะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอโดยสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมกระแสนี้จะถูกใช้เป็นคำสั่งกระแส i_{ref} ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางด้านที่ต่อกับโหลดของระบบ ซึ่งคำสั่งกระแสนี้จะถูกจำกัดไม่ให้เกิน 0.5 A นั่นคือกำลังไฟฟ้าจากบัสไฟตรงที่จะมาชาร์จซุปเปอร์คาปาซิเตอร์จะต้องมีค่าไม่เกิน 24 W (คำนวณจาก 0.5 A x 48 V) ส่วนวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงก็จะใช้วิธีการควบคุมลูปนอกที่เป็นแรงดันเอาต์พุตและลูปในมีการควบคุมกระแสด้านอินพุตของวงจร สำหรับคำสั่งกระแสที่เป็นเอาต์พุตของตัวควบคุมแรงดันจะถูกนำมาคูณด้วยสัญญาณขนาดหนึ่งหน่วยของแรงดันไฟสลับที่ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเพื่อนำไปควบคุมให้กระแสด้านอินพุตของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีมุมเฟสตรงกับแรงดันไฟสลับทำให้ค่าตัวประกอบกำลังของวงจรมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง นอกจากนั้นยังมีส่วนของการตรวจวัดกระแสโหลด เพื่อนำมาคำนวณค่าขนาดกระแสด้านอินพุตที่ต้องการของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟตรงตามหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า หรือในมุมมองของทฤษฎีระบบควบคุมคือการควบคุมแบบป้อนไปหน้า (feedforward control) รูปที่ 3 เป็นไดอะแกรมระบบที่ทำงานในโมดจ่ายพลังงานสำรองให้กับโหลดซึ่งระบบจะทำงานในโมดนี้เมื่อแรงดันไฟสลับเกิดขัดข้องหรือเกิดแรงดันตกจนไม่สามารถจ่ายพลังงานได้ จึงไม่มีการควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงแต่จะมีเฉพาะส่วนการควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงเพื่อจ่ายพลังงานให้โหลดโดยซุปเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งจ่ายแรงดันของระบบ โมดจ่ายพลังงานสำรองนี้สัญญาณ DIR ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ ‘1’ เพื่อควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงส่งผ่านพลังงานให้โหลด จากไดอะแกรมในรูปที่ 3 สัญญาณเอาต์พุตตัวควบคุมแรงดันที่โหลดถูกใช้เป็นคำสั่งกระแสของตัวควบคุมกระแส HC_3 เพื่อควบคุมกระแสของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง-เป็นกระแสตรงด้านที่ต่อกับซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ส่วนรายละเอียดของวงจรภาคกำลังจะได้อธิบายดังในหัวข้อที่ 2.2

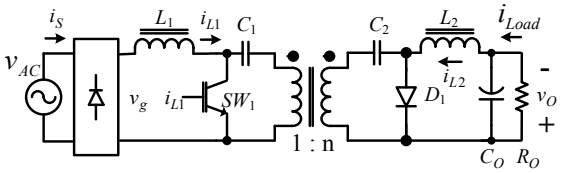


รูปที่ 3 ไดอะแกรมระบบเมื่อทำงานในโมดการจ่ายพลังงานสำรองให้กับโหลด

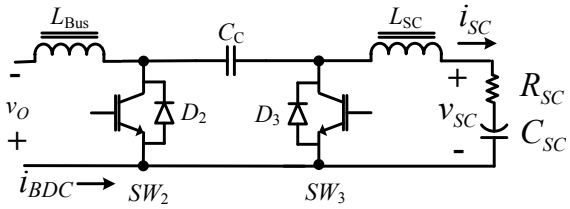
2.2. วงจรภาคกำลัง

วงจรภาคกำลังของระบบประกอบด้วยวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงแบบชุกที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าระหว่างอินพุตและเอาต์พุตด้วยหม้อแปลงความถี่สูงดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งหลักการทำงานและการออกแบบเพื่อเลือกค่าอุปกรณ์ของวงจรมีการนำเสนอในงานวิจัย [4] ส่วนวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางในที่นี้เลือกวงจรชุกดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งมีการนำเสนอในงานวิจัย [5] โดยวงจรนี้จะมีโมดการทำงานสองโมดคือ โมดการชาร์จซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ด้วยพลังงานจากบัสไฟตรง ซึ่งลักษณะวงจรแสดงดังในรูปที่ 6 สวิตช์กำลัง SW_3 จะถูกควบคุมส่วนสวิตช์กำลัง SW_2 จะถูกสั่งงานให้หยุดนำกระแสตลอดเวลาและไดโอด D_2 ก็จะไม่นำกระแสด้วยซึ่งเทียบได้กับวงจรแปลงผันกำลังชนิดชุกแบบพื้นฐาน โมดนี้แรงดันอินพุตคือบัสไฟตรงที่เป็นเอาต์พุตของระบบที่มีโหลดต่ออยู่และเอาต์พุตของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางก็คือซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ต้องการชาร์จนั่นเอง

สำหรับการทำงานอีกโมดหนึ่งของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางก็คือโมดการจ่ายพลังงานสำรองดังแสดงในรูปที่ 7 โมดนี้จะมีการควบคุมสวิตช์กำลัง SW_2 ซึ่งจะสลับกันนำกระแสกับไดโอด D_3 ส่วนสวิตช์กำลัง SW_3 จะถูกสั่งงานให้หยุดนำกระแสตลอดเวลาและไดโอด D_2 ก็จะไม่นำกระแสเช่นกัน นั่นคือเทียบกับวงจรแปลงผันชนิดชุกพื้นฐานแรงดันอินพุตของวงจรก็คือแรงดันที่ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ส่วนเอาต์พุตก็คือแรงดันที่โหลด ดังนั้นการควบคุมสวิตช์กำลัง SW_3 จะเป็นการควบคุมกำลังงานจากซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่จ่ายให้กับโหลด โดยโมดนี้จะมีลูปนอกเป็นการควบคุมแรงดันโหลดให้มีค่าเท่ากับ 48 V



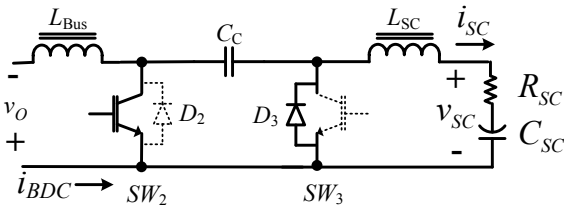
รูปที่ 4 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง



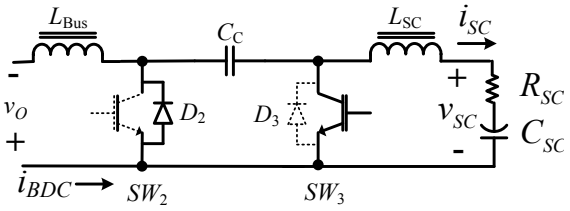
รูปที่ 5 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงสองทิศทางแบบชุก

เนื่องจากว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางทำงานในสองโมดที่ต่างกันดังนั้นจึงเลือกโมดใดโมดหนึ่งของการทำงานมาใช้เป็นเงื่อนไขในการ

ออกแบบค่าของตัวเหนี่ยวนำ L_{SC} และ L_{Bus} ในที่นี้คำนึงถึงกรณีโมดจ่ายพลังงานสำรองในซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ไปให้โหลดเป็นหลักเพราะมีการยกระดับแรงดันให้สูงขึ้น



รูปที่ 6 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงขณะทำงานในโมดการชาร์จประจุซุปเปอร์คาปาซิเตอร์



รูปที่ 7 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงขณะทำงานในโมดการจ่ายพลังงานสำรองให้กับโหลด

เนื่องจากวงจรแปลงผันแบบชุกจะทำงานแบบทบแรงดันและขณะที่ทำงานค่าแรงดันของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ดังนั้นค่าแรงดันอินพุตของวงจรในโมดจ่ายพลังงานสำรองนี้จึงใช้ค่าแรงดันที่ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่เป็นค่าระหว่างค่าสูงสุดและต่ำสุดมาใช้ออกแบบซึ่งมีเท่ากับ 15 V สำหรับสมการที่ใช้ออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำทั้งสองจะได้จากสมการของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดชุกแบบพื้นฐานดังสมการที่ (1) - (3)

$$D = \frac{v_O}{v_O + v_{SC}} \quad (1)$$

$$L_{Bus} = \frac{v_{SC} \times D}{f_{SW} \times \Delta I_{BDC}} \quad (2)$$

$$L_{SC} = \frac{v_{SC} \times D}{f_{SW} \times \Delta I_{SC}} \quad (3)$$

เมื่อ

v_O คือ ค่าแรงดันเอาต์พุต (V)

v_{SC} คือ ค่าแรงดันที่ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ (V)

f_{SW} คือ ความถี่ในการสวิตช์ (Hz)

ΔI_{BDC} คือ ค่าริปเปิ้ลกระแสที่โหลด (A)

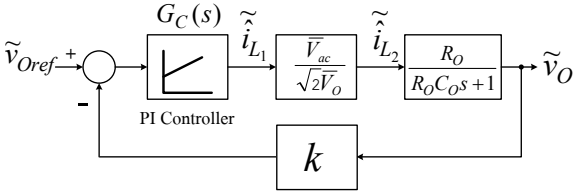
ΔI_{SC} คือ ค่าริปเปิ้ลกระแสที่ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ (A)

3. ลูปการควบคุมและการตรวจจับแรงดันไฟสลับ

ในส่วนของตัวควบคุมระบบทั้งหมดจะทำงานบนไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 ซึ่งควบคุมทั้งในส่วนของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงและวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง ถึงแม้ตัวประมวลผลที่ใช้จะมีความสามารถในการทำงานและประมวลผลด้วยความเร็วสูงก็ตาม เพื่อให้ง่ายในการสร้างและทดสอบแนวคิดในเบื้องต้นการควบคุมกระแสของวงจรแปลงผันทั้งสองวงจรจึงเลือกใช้วงจรแบบแอนะล็อกแทน

3.1. การควบคุมแรงดันเอาต์พุตโมดปกติ

ในส่วนของการควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงลูปการควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่โหลดอาจเขียนเป็นไดอะแกรมดังรูปที่ 8 โดยตัวแปรต่างๆคือ



รูปที่ 8 ลูปควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่โหลดในโมดปกติ

k คือ อัตราการลดทอนแรงดันเอาต์พุต (1/12)

$G_C(s)$ คือ ตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต

$\tilde{\tilde{i}}_{L_1}$ คือ ค่ายอดของคำสั่งกระแสตัวเหนี่ยวนำด้านอินพุตวงจร

$\tilde{\tilde{i}}_{L_2}$ คือ ค่ายอดของคำสั่งกระแสตัวเหนี่ยวนำด้านเอาต์พุตวงจร

$\tilde{v}_{Oref}$ คือ ค่าคำสั่งแรงดันเอาต์พุต

$\tilde{v}_O$ คือ ค่าแรงดันเอาต์พุต

$\overline{V}_O$ คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตวงจรที่สภาวะคงตัว (48 V)

$\overline{V}_{ac}$ คือ แรงดันเรียงกระแสที่อินพุตที่สภาวะคงตัว (220 V)

และเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมแรงดันเอาต์พุตจากรูปที่ 8 ได้ดังสมการที่ (4)

$$\frac{\tilde{v}_O(s)}{\tilde{v}_{Oref}(s)} = \frac{G_C \cdot G_P}{1 + k \cdot G_C \cdot G_P} \quad (4)$$

โดย $G_C(s)$ เป็นตัวควบคุมชนิดพีไอดังในสมการที่ (5)

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} \quad (5)$$

จากการออกแบบในโดเมนความถี่ได้คุณสมบัติส่วนควบคุมแรงดันเอาต์พุตโมดปกติดังในตารางที่ 1 โดยอัตราการสุ่มของตัวควบคุมพีไอบนไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่าเท่ากับ 200 μs

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ลูปควบคุมแรงดันเอาต์พุตโมดปกติ

พารามิเตอร์	
ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ	$K_P = 3.6$ $K_I = 123.7$
อัตราขยายส่วนตรวจจับแรงดันเอาต์พุต	1/12
ค่ามุมเผื่อเฟสของระบบที่ชดเชยแล้ว	70°
ค่าความถี่ตัดข้ามของระบบที่ชดเชยแล้ว	15 Hz

3.2. การควบคุมการชาร์จซุปเปอร์คาปาซิเตอร์

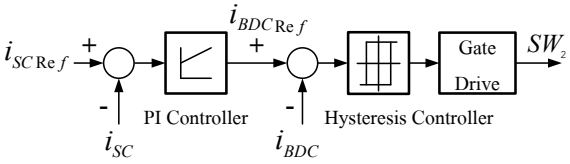
จากหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าด้านอินพุตและเอาต์พุตของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางขณะทำงานเพื่อชาร์จซุปเปอร์คาปาซิเตอร์จะเขียนสมการได้ดังสมการที่ (6)

$$v_O \cdot i_{BDC} = v_{SC} \cdot i_{SC} \quad (6)$$

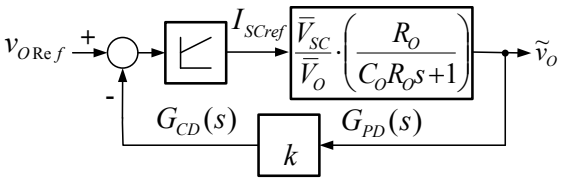
ในการชาร์จซุปเปอร์คาปาซิเตอร์จะควบคุมกระแสชาร์จให้มีค่าคงที่ซึ่งทำให้ค่าแรงดันของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ v_{SC} ค่อยๆเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นและการชาร์จจะยุติลงเมื่อแรงดันตกคร่อมซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มีค่าตามต้องการแต่ต่ำกว่าค่าพิกัดที่ระบุในคู่มือของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ จากวงจรที่นำเสนอจะมีลูปการควบคุมกระแสตัวเหนี่ยวนำทางด้านบัสไฟตรง i_{BDC} ดังนั้นจากสมการที่ (6) หากกำหนดกระแสชาร์จซุปเปอร์คาปาซิเตอร์เป็น $i_{SC\,Ref}$ จะได้คำสั่งกระแสตัวเหนี่ยวนำบัสไฟตรง i_{ref} ดังสมการที่ (7)

$$i_{ref} = \frac{v_{SC}}{v_O} \cdot i_{SC\,Ref} \quad (7)$$

อย่างไรก็ตามสมการที่ (7) ไม่ได้พิจารณาค่ากำลังสูญเสียในวงจร ดังนั้นเพื่อให้เกิดกระแสชาร์จซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ตามค่าคำสั่ง $i_{SC\,Ref}$ จึงใช้ตัวควบคุมแบบพีไอมาเป็นตัวควบคุมลูปนอกเพื่อให้มีค่าผิดพลาดเป็นศูนย์ที่สภาวะคงตัวแทนการคำนวณคำสั่งกระแสด้วยสมการที่ (7) โดยไดอะแกรมการควบคุมกระแสชาร์จซุปเปอร์คาปาซิเตอร์แสดงดังรูปที่ 9 และหากสมมุติว่าควบคุมกระแสได้ผลดีจนคำสั่งกระแส i_{ref} และค่ากระแส i_{BDC} มีค่าเท่ากันดังนั้นตอนเริ่มต้นกระแสที่ผ่านซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ i_{SC} มีค่าเป็นศูนย์และค่าคำสั่งกระแส i_{ref} จะมีค่าเท่ากับค่ากระแส $i_{SC\,Ref}$ คูณด้วยอัตราขยายเทอมสัดส่วนของตัวควบคุมแบบพีไอ ถ้าหากค่าอัตราขยายเทอมสัดส่วนมีค่าสูงเกินไปจะทำให้คำสั่งกระแส i_{ref} มีค่าสูงในตอนเริ่มต้นของการชาร์จ ดังนั้นจึงกำหนดพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอในเทอมสัดส่วนสำหรับการชาร์จซุปเปอร์คาปาซิเตอร์นี้มีค่าเพียง 0.05 และมีอัตราขยายเทอมอินทิกรัล 0.0122 ด้วยอัตราสุ่ม 200 μs



รูปที่ 9 ลูปการควบคุมกระแสชาร์จประจุซุปเปอร์คาปาซิเตอร์



รูปที่ 10 ลูปควบคุมแรงดันเอาต์พุตในโมดจ่ายพลังงานสำรองให้กับโหลด

เมื่อ

$\bar{V}_{SC}$ คือค่าแรงดันของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่จุดทำงานโดยในที่นี้กำหนดเป็น 20 V

$\bar{V}_O$ คือค่าแรงดันเอาต์พุตที่บัสไฟตรงมีค่าเท่ากับ 48 V

R_O คือค่าโหลดที่พิกัด

C_0 คือค่าตัวเก็บประจุที่ขนานกับโหลดเพื่อกรองแรงดัน
G_{PD} คือตัวควบคุมแรงดันในโมดจ่ายพลังงานสำรอง

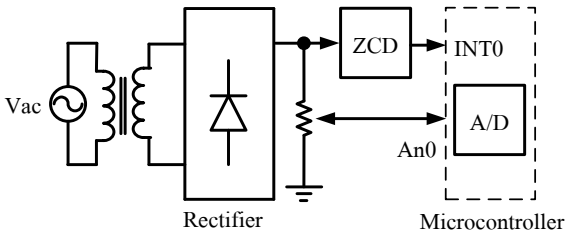
การออกแบบตัวควบคุมแรงดันในโมดนี้เลือกความถี่ตัดข้ามเท่ากับ 50 Hz และค่ามุมเผื่อเฟสเท่ากับ 70 องศา

3.3. การควบคุมแรงดันเอาต์พุตโมดการจ่ายพลังงานสำรอง การควบคุมแรงดันเอาต์พุตในโมดจ่ายพลังงานสำรองเป็นการควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง อาศัยหลักการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็กเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปควบคุมแรงดันเอาต์พุตในโมดจ่ายพลังงานสำรองได้ดังรูปที่ 10 โดยเอาต์พุตตัวควบคุมแรงดันในโมดนี้จะเป็นค่าคำสั่งกระแส i_{SCref} และฟังก์ชันถ่ายโอนระบบควบคุมวงปิดแสดงดังสมการที่ (8)

$$\frac{\tilde{v}_O(s)}{\tilde{v}_{Oref}(s)} = \frac{G_{CD} \cdot G_{PD}}{1 + k \cdot G_{CD} \cdot G_{PD}} \qquad (8)$$

3.4. การตรวจจับแรงดันไฟสลับ

รูปที่ 11 เป็นส่วนตรวจจับแรงดันชั่วขณะและจุดผ่านศูนย์ของแหล่งจ่ายไฟสลับ ZCD โดยส่วนของ ZCD จะให้สัญญาณเพื่ออินเตอร์รัพต์ไมโครคอนโทรลเลอร์ทุกๆ 10 ms ซึ่งเป็นจุดอ้างอิงในการอ่านค่าแรงดันไฟสลับมาตรวจสอบว่ามีความผิดปกติหรือไม่เพื่อใช้ตัดสินใจในการเปลี่ยนโมดการทำงานของระบบ โดยงานวิจัยนี้อาศัยสิ่งที่มีอยู่แล้วในส่วนควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงนั่นคือการตรวจจับจุดผ่านศูนย์ของแรงดันไฟสลับด้านอินพุตวงจรและให้มีการอ่านค่าชั่วขณะของแรงดันอินพุต ถ้าแรงดันมีค่าต่ำกว่า 20% ของค่าปกติ (220 Vrms) จะถือว่าเกิดการหายไปของแรงดันไฟสลับ



รูปที่ 11 ส่วนตรวจจับแรงดันไฟสลับ

4. ผลการทดสอบ

การทดสอบแนวคิดที่เสนอทำโดยสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าทั้งสองวงจรและมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2 และตารางที่ 3 และเขียนโปรแกรมควบคุมระบบ

ตารางที่ 2 คุณสมบัติวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง

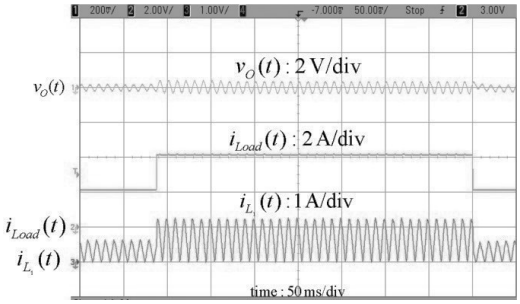
แรงดันไฟสลับด้านอินพุต	220 Vrms, 50 Hz
แรงดันเอาต์พุต	48 V
ค่าพิกัดกำลังของวงจร	250 W
ค่าตัวเก็บประจุที่เอาต์พุต (C_O)	23,600 μF
ค่าตัวเก็บประจุในวงจรแปลงผันชนิดชุก C_1, C_2	0.68 μF
ค่าตัวเหนี่ยวนำด้านอินพุต L_1	5 mH
ค่าตัวเหนี่ยวนำด้านเอาต์พุต L_2	1 mH

ตารางที่ 3 คุณสมบัติวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง

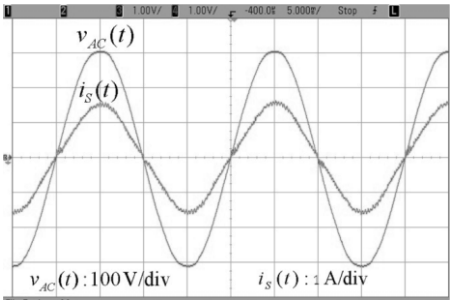
ความจุซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ (100 F อนุกรมกัน10 ตัว)	10 F
พิกัดแรงดันของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์	25 V
ค่าพิกัดกำลังของวงจร	200 W
ค่าตัวเก็บประจุในวงจรแปลงผันชนิดชุก C_C	2.2 μF
ค่าตัวเหนี่ยวนำด้านที่ต่อกับซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ L_{SC}	0.626 mH
ค่าตัวเหนี่ยวนำด้านที่ต่อกับบัสไฟตรง L_{Bus}	1.56 mH

4.1 การทดสอบระบบโมดปกติ

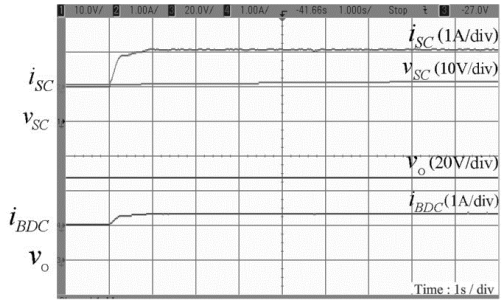
การทดสอบในโมดนี้จะดูการทำงานของวงจรแปลงผัน-ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงโดยจากรูปที่ 12 เป็นผลทดสอบเมื่อเปลี่ยนโหลด 100W เป็น 200W เพื่อดูผลตอบสนองการควบคุมแรงดันเอาต์พุต โดยการวัดแรงดันเอาต์พุตนั้นจะปรับออสซิลโลสโคปในโมดเอซีคัปปลิ้งเพื่อดูเฉพาะค่าริปเปิ้ลแรงดันเท่านั้น จากผลการทดสอบพบว่าการกระเพื่อมของแรงดันมีค่าเล็กน้อยแม้มีการเปลี่ยนโหลดแบบทันทีก็ตาม ซึ่งเป็นผลจากการควบคุมแบบป้อนไปหน้าในลูปควบคุมแรงดันเอาต์พุต รูปที่ 13 เป็นแรงดันไฟสลับและกระแสด้านอินพุตของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงที่สภาวะคงตัวเพื่อให้เห็นว่ามีค่าตัวประกอบกำลังที่ใกล้เคียงหนึ่งโดยสังเกตจากรูปคลื่นกระแสที่มีเฟสตามรูปคลื่นแรงดันไฟสลับและอ่านค่าจากเครื่องมือวัดได้ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.99 ที่พิกัดโหลด



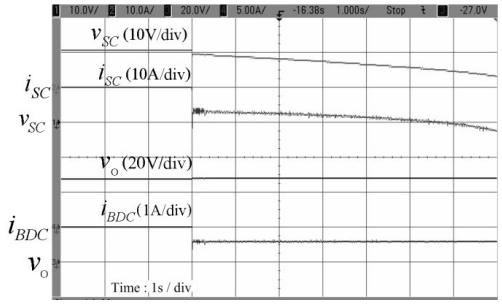
รูปที่ 12 ผลตอบสนองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตในโมดปกติเมื่อมีการเปลี่ยนโหลดแบบทันที



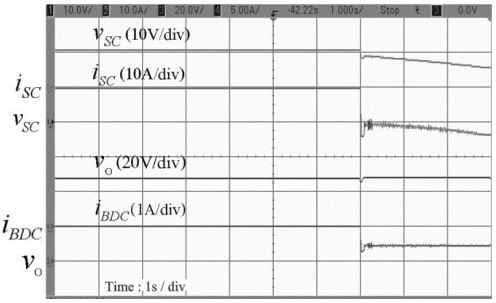
รูปที่ 13 แรงดันและกระแสด้านอินพุตวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง



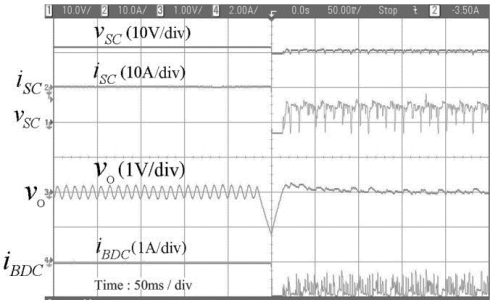
รูปที่ 14 แรงดันและกระแสที่ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์และแรงดันเอาต์พุตที่โหลดขณะเริ่มมีการชาร์จประจุ



รูปที่ 15 แรงดันและกระแสที่ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์และแรงดันที่โหลดขณะจ่ายพลังงานสำรองให้โหลด 100W



รูปที่ 16 แรงดันและกระแสที่ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์และแรงดันที่โหลดขณะจ่ายพลังงานสำรองให้โหลด 135W



รูปที่ 17 ภาพขยายเมื่อระบบเปลี่ยนไปทำงานโมดจ่ายพลังงานสำรองขณะมีโหลด 100W โดยการวัดแรงดันเอาต์พุตในแบบเอซีคัปปลิ้งเพื่อสังเกตดูการกระเพื่อม

ส่วนการชาร์จซุปเปอร์คาปาซิเตอร์จะชาร์จทันทีถ้าระบบทำงานในโมดปกติและแรงดันที่ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มีค่าต่ำกว่าค่าพิกัดแรงดัน จากรูปที่ 14 ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์จะถูกชาร์จด้วยกระแสคงที่ประมาณ 1 A โดยการเข้าสู่สภาวะคงตัวของกระแสหลังเริ่มชาร์จประจุอยู่ที่ประมาณ 1 วินาทีโดยเหตุผลที่ให้ทำงานช้าเพราะแรงดันซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ไม่ได้เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและค่ากระแสชาร์จก็มีค่าต่ำ สำหรับการบันทึกผลการชาร์จบนจอภาพของออสซิลโลสโคปนั้นไม่สามารถทำได้ใช้เวลานานกว่า 80ms

4.2 การทดสอบระบบโมดจ่ายพลังงานสำรอง

โมดนี้จะทดสอบโดยจำลองสถานการณ์ให้แรงดันไฟสลับหายไปแล้วระบบจะเริ่มทำงานในโมดจ่ายพลังงานสำรองแล้ววัดแรงดัน, กระแสที่ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์, แรงดันที่โหลดและกระแสที่จ่ายออกจากวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่โหลดขนาด 100W และ 135W ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 15 และรูปที่ 16 ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่าที่โหลด 100W ระยะเวลาจ่ายพลังงานที่สำรองประมาณ 7 วินาทีโดยที่แรงดันโหลดมีค่าคงที่ 48V กรณีโหลด135W เวลาสำรองพลังงานมีค่าเพียง 3 วินาที และในรูปที่ 17 เป็นภาพขยายเพื่อดูแรงดันเอาต์พุตขณะเปลี่ยนโมดการทำงานที่โหลด 100W ซึ่ง

พบว่าแรงดันลดลงประมาณ 1.2V และใช้เวลาประมาณ 30 ms ในการกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดัน 48V

5. สรุป

ผลการทดสอบระบบที่สร้างขึ้นกรณีโมดปกติวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงสามารถทำงานได้เป็นอย่างดีทั้งในสภาวะที่มีการเปลี่ยนโหลดแบบทันทีและที่สภาวะคงตัว โดยมีค่าตัวประกอบกำลังที่โหลดเต็มพิกัดเท่ากับ 0.99 ส่วนโมดจ่ายพลังงานสำรองจะมีระยะเวลาในการจ่ายพลังงานสำรองที่น้อยไปซึ่งอาจเกิดจากแรงดันที่ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ลดลงจนอาจมีค่าต่ำเกินกว่าที่วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงจะสามารถทบระดับแรงดันให้สูงขึ้นได้ แต่ก็อาจแก้ปัญหาด้วยการเพิ่มค่าความจุหรือแรงดันพิกัดของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ให้สูงขึ้น สำหรับแรงดันเอาต์พุตเมื่อมีการเปลี่ยนโมดการทำงานจากแหล่งจ่ายไฟสลับมาใช้ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งพลังงานพบว่าเกิดแรงดันพุ่งต่ำเพียง 1.2V และกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวด้วยเวลา 30ms ซึ่งเร็วพอกับการใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรอง สำหรับการเปรียบเทียบความคุ้มค่ากับการใช้งานแบตเตอรี่ชนิดใหม่ๆ การใช้งานซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มีข้อได้เปรียบเรื่องของอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าและวิธีการชาร์จที่ง่ายกว่า

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Yang L.S., Liang T.J. and Chen, J.F. (2007). Analysis and Design of a Single-Phase Buck-Boost Power Factor-Correction Circuit for Universal Input Voltage, *Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society 2007*, Taipei, Taiwan.

[2] Talapko, D. (2012). Telecom Datacenter Power Infrastructure Avilability Comparison of DC and AC UPS, *The 34th IEEE International Telecom- munications Energy Conference (INTELEC) 2012*, Scottsdale, AS, USA.

[3] Gualous, H., Louahlia, H. and Gallay, R. (2011). Supercapacitor Characterization and Thermal Modelling with Reversible and Irreversible Heat Effect, *IEEE Transactions on Power Electronics,* vol.26, no.11, November 2011, pp. 3402-3409.

[4] Spiazzi, G. and Mattavelli, P. (1994). Design Criteria for Power Factor Preregulators Based on Sepic and Cuk Converters in Continuous Conduction Mode. *The IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* 1994.

[5] Aboulnaga, A.A. and Emadi, A. (2004). Performance Evaluation of the Isolated Bidirectional Cuk Converter with Integrated Magnetics, *The IEEE Annual Conference in Power Electronics Specialists Conference 2004*, Aachen, Germany.