

เครื่องจ่ายไฟกระแสตรงแบบโปรแกรมได้ Programable Switching DC Power Supply

เทพพนม โสกาเพิ่ม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร thepannom@mut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการพัฒนาเครื่องจ่ายไฟกระแสตรงแบบโปรแกรมได้ โดยใช้วงจรแปลงผันกำลังแบบบัค-บูสต์ เพื่อให้สามารถปรับระดับแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตได้ตามความต้องการ ทั้งในรูปแบบการลดทอนและเพิ่มทบระดับแรงดันไฟฟ้า เครื่องจ่ายไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0 - 60 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 0 - 6 แอมแปร์ โดยมีระบบควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เพื่อความสะดวกและความสามารถในการปรับแต่งค่าต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็ว สำหรับบทความนี้จะอธิบายโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัค-บูสต์ หลักการทำงานของวงจร การออกแบบพารามิเตอร์ของวงจรเพื่อเลือกขนาดของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสม และเปรียบเทียบอัตราการลดทอนและการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าของวงจรโดยการจำลองผลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลการเปรียบเทียบผลแสดงให้เห็นว่าเครื่องจ่ายไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าประสิทธิภาพไม่ต่ำกว่า 90%

คำสำคัญ: วงจรแปลงผันแบบบัค-บูสต์ ไมโครคอนโทรลเลอร์

Abstract

This paper presents the design and development of a programmable direct current (DC) power supply utilizing a buck-boost converter topology. The proposed system provides a wide operating range with an adjustable output voltage from 0 to 60 V and a current capacity from 0 to 6 A. An Arduino-based microcontroller is implemented to control the system, offering user-friendly operation and rapid parameter configuration. The study discusses the converter architecture, operating principles, and parameter design, including the selection of suitable capacitor and inductor values. Simulation-based analyses are carried out to evaluate the step-down and step-up voltage conversion characteristics of the circuit. The results demonstrate that the developed power supply can achieve efficient and stable voltage regulation, with overall efficiency exceeding 90%.

Keywords: Buck-Boost Converter, Microcontroller

1. บทนำ

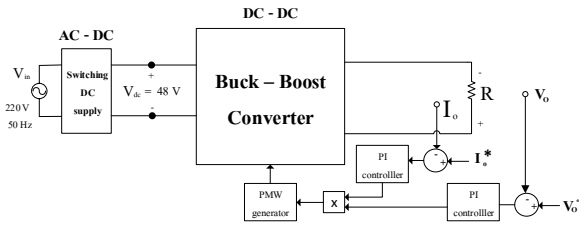
ในปัจจุบัน การพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้าเป็นไปอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ทำให้อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการจ่ายไฟฟ้าต้องมีความยืดหยุ่นและปรับแต่งได้ตามความต้องการที่หลากหลาย[1-2] ทั้งนี้เพื่อรองรับการใช้งานในด้านต่างๆ ตั้งแต่การทดลองในห้องปฏิบัติการไปจนถึงการใช้งานในอุตสาหกรรม การพัฒนาเครื่องจ่ายไฟกระแสตรง

แบบโปรแกรมได้ (Programmable DC Power Supply) จึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่สามารถปรับแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการ และมีความสามารถในการควบคุมผ่านโปรแกรมเพื่อให้การใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและสะดวกสบาย

การแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงเป็นการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากระดับแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่งไปเป็นระดับแรงดันไฟฟ้าอีกค่าหนึ่ง ดังนั้นการแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง จึงเปรียบเทียบกับเหมือนกับหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าตรง (DC transformer) ซึ่งอาจจะทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันไฟฟ้าตรงให้ลดลง (Step down) หรืออาจจะทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันไฟฟ้าตรงให้สูงขึ้น (Step up) ได้ เช่นเดียวกันกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่จะทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันไฟฟ้าสลับ สำหรับวงจรลดทอน - เพิ่มทบระดับแรงดันไฟฟ้าตรง หรือวงจรบัค - บูสต์คอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่รวมคุณสมบัติของวงจรลดทอนหรือทอนระดับแรงดันไฟฟ้าตรงและวงจรเพิ่มหรือทบระดับแรงดันไฟฟ้าตรงเอาไว้ในวงจรเดียวกัน[3-4] ซึ่งจะแตกต่างจากวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ที่ทำได้เพียงแค่ลด หรือวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ทำได้เพียงเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าตรงเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะพบได้ว่าวงจรบัค - บูสต์คอนเวอร์เตอร์นี้สามารถทำการลด หรือเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าตรงทางด้านเอาต์พุตได้ในวงจรเดียวกัน จึงทำให้มีระดับแรงดันไฟฟ้าตรงที่ต่ำกว่าหรือมากกว่าแรงดันไฟฟ้าตรงที่ถูกป้อนเข้ามาทางด้านอินพุตของวงจร ซึ่งอาศัยการควบคุมอุปกรณ์การสวิตช์กำลังด้วยสัญญาณที่เกิดจากการเปลี่ยนตามความกว้างของพัลส์ (Pulse - width modulation; PWM) ที่ความถี่ค่าหนึ่ง ในการวิเคราะห์การทำงานของวงจรบัค - บูสต์คอนเวอร์เตอร์นั้น จะแยกการวิเคราะห์ออกเป็นสองโหมด ตามสถานะการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์กำลังคือ โหมดที่สวิตช์อยู่ในสถานะปิดวงจรและโหมดที่สวิตช์อยู่ในสถานะเปิดวงจร โดยการปรับแรงดันทางด้านเอาต์พุตจะอาศัยผ่านการปรับค่าดีวตีไซเคิล (Duty Cycle) [6] ซึ่งอาจจะทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าไม่สอดคล้องตามทฤษฎี ดังนั้นในบทความนี้จะควบคุมแรงดันเอาต์พุต โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีโอ รวมถึงการควบคุมกระแสให้คงที่ได้ด้วยอีกเช่นเดียวกัน อีกทั้งนำเสนอการตรวจสอบการทำงานของวงจรโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์ผ่าน Simulink บนโปรแกรมของ MATLAB รวมไปถึงการสร้างชุดทดลองที่มีการเขียนโปรแกรมด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่าน Arduino ซึ่งมีต้นทุนที่ต่ำกว่าการใช้ DSP หรือ FPGA และการเขียนโปรแกรมที่มีความซับซ้อนน้อยกว่า

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงได้ดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 220 V_{rms} , 50 Hz วงจรแปลงไฟฟ้าเป็นดีซีขนาด 48 V วงจรแปลงผันแบบบัค-บูสต์ โหลดความต้านทาน และวงจรควบคุมแบบ PI

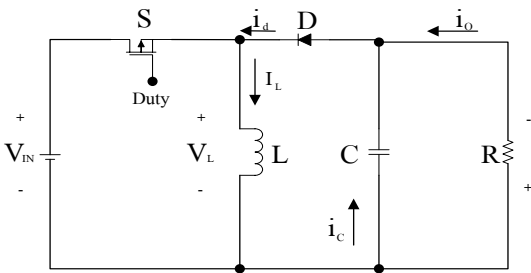


รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

จากรูปที่ 1 เป็นระบบไฟฟ้าที่รับไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสขนาด 220V และต่อผ่านผ่านสวิตชิงพาวเวอร์ซีพพลายเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) ขนาดแรงดัน 48 V โดยจ่ายให้กับวงจรแปลงผันกำลังแบบบัค - บูลสต์ที่มีการควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าผ่านตัวควบคุมแบบพีโอจำนวน 2 ชุด เพื่อใช้ในการควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าให้มีค่าคงที่

2.1 การออกแบบวงจรแปลงผันแบบบัค-บูลสต์

วงจรแปลงผันกำลังแบบบัค - บูลสต์ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (V_{IN}) อุปกรณ์สวิตช์ ไดโอด ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และโหลดตัวต้านทาน แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรแปลงผันแบบบัค-บูลสต์

จากรูปที่ 2 วงจรแปลงผันกำลังแบบบัค - บูลสต์ ในการออกแบบวงจรพิจารณาจากโหลดความต้านทานขนาดไม่เกิน 360 W โดยกำหนดค่าอัตราล่อกรูปคลื่นแรงดันมีค่าไม่เกิน 2% อัตราค่าวัฏจักรหน้าที่ (Duty Cycle) ที่ใช้ 20% ถึง 60% โดยที่ระบบมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 48 V วงจรแปลงผันกำลังแบบบัค - บูลสต์ ทำงานในโหมดกระแสไหลต่อเนื่องที่ความถี่สวิตชิ่ง (f_s) เท่ากับ 25 kHz

เลือกขนาดตัวเหนี่ยวนำ

พิจารณาการหาค่าต่ำสุดของขนาดตัวเหนี่ยวนำโดยคำนวณจากสมการที่ (1) จากสมการจะใช้อัตราส่วนค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ที่ต้องการใช้งานคือ 20% โดยกำหนดให้ $R = 10 \Omega$ (360W)

$$L_{min} = \frac{(1-D)^2 R}{2f} \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) สามารถคำนวณกำหนดและกำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำมีค่าที่มากกว่า L_{min} เพื่อให้แน่ใจว่ากระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำจะไหลต่อเนื่อง ดังนั้นเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำมีขนาด 5 mH

เลือกขนาดตัวเก็บประจุ

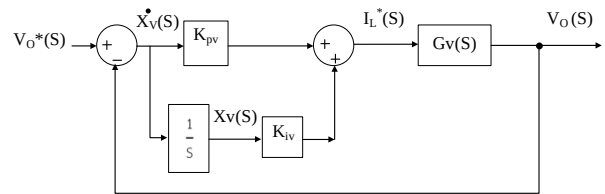
พิจารณาตัวเก็บประจุจากอัตราล่อกรูปคลื่นแรงดันไม่เกิน 2% ตามสมการที่ (2)

$$C = \frac{D}{Rf \frac{\Delta V_o}{V_o}} \quad (2)$$

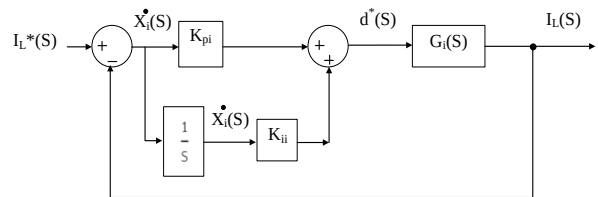
จากสมการที่ (2) จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 150 μF

2.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีโอ

ตัวควบคุมพีโอสำหรับลูปรองแรงดันไฟฟ้า รูปที่ 3 และลูประแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ รูปที่ 4 สามารถออกแบบได้จากสมการที่ (3), (4), (5) และ (6) ตามลำดับ ซึ่งสมการของตัวควบคุมดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของระบบและค่าทางสมรรถนะของตัวควบคุม [5] คือ อัตราส่วนความหน่วง (Damping ration: ζ) และความถี่ธรรมชาติ (natural frequency: ω_n) ของตัวควบคุม ซึ่งในบทความนี้จะทำการเลือกค่าอัตราส่วนความหน่วงและความถี่ธรรมชาติ เพื่อนำไปออกแบบสัมประสิทธิ์ K_p และ K_i ของตัวควบคุมแบบพีโอทั้งลูปรองแรงดันและลูประแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจากสมการที่ (4), (5), (6) และ (7) ตามลำดับ โดยจะทำการกำหนดการออกแบบให้ค่าอัตราส่วนความหน่วงซึ่ง $0 \leq \zeta \leq 1$ ดังนั้นจะทำการกำหนดให้ $\zeta = 0.8$ ทั้งลูปรองแรงดันและลูประแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3 โครงสร้างสำหรับการออกแบบตัวควบคุมแรงดันแอตพุต



รูปที่ 4 โครงสร้างสำหรับออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า

ลูปรองแรงดันไฟฟ้า

$$K_{pv} = \frac{2\zeta\omega_n RC - 1}{R} \quad (3)$$

$$K_{iv} = \omega_n^2 C \quad (4)$$

ลูประแสไฟฟ้า

$$K_{pi} = \frac{2\zeta\omega_n L}{V_{dc}} \quad (5)$$

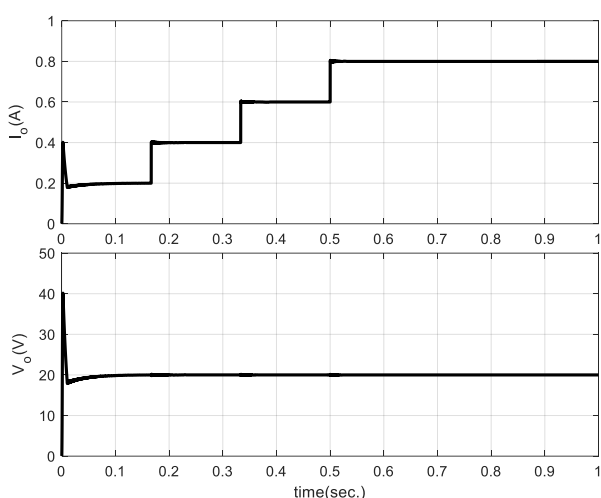
$$K_{ii} = \frac{\omega_n^2 L}{V_{dc}} \quad (6)$$

3. การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

การจำลองวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก-บูสต์ที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ในการควบคุมแรงดันและกระแสที่เอาต์พุต ตัวควบคุมพีไอมีบทบาทสำคัญในการช่วยรักษาระดับแรงดันและกระแสให้คงที่ แม้ว่าโหลดหรือแรงดันไฟฟ้าขาเข้าจะเปลี่ยนไป การจำลองนี้ใน MATLAB Simulink จะช่วยทดสอบว่าตัวควบคุมแบบพีไอสามารถทำงานได้ดีเพียงใด โดยพยายามปรับให้วงจรตอบสนองได้รวดเร็วและแม่นยำ

3.1 โหมดการควบคุมแรงดันเอาต์พุต (V_o)

รูปที่ 5 แสดงการจำลองสถานการณ์โดยการลดค่าความต้านทานโหลดของโหลดจาก 100 Ω - 25 Ω โดยที่กำหนดให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ 20 V

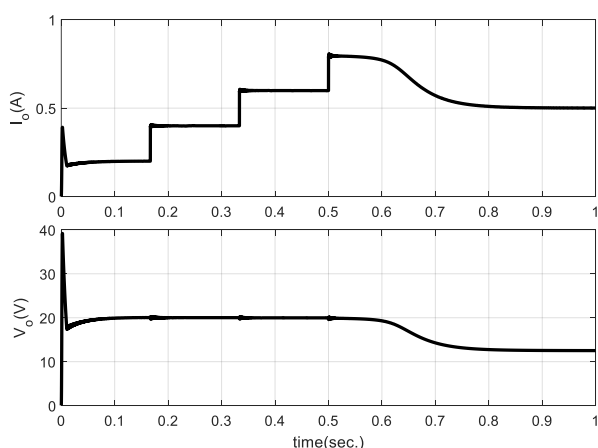


รูปที่ 5 การจำลองสถานการณ์ที่มีการควบคุมแรงดันเอาต์พุต

จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการลดความต้านทานจาก 100 Ω ไปเป็น 25 Ω จะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลดมีค่าสูงขึ้น โดยที่แรงดันเอาต์พุตที่ค่าคงที่จากการกำหนดค่าดังกล่าวไว้ นั่นคือ 20 V

3.2 โหมดการควบคุมกระแสเอาต์พุต (I_o)

รูปที่ 6 แสดงการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้กระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่ 0.5 A และมีการลดค่าโหลดความต้านทานจาก 100 Ω - 25 Ω ตามลำดับ

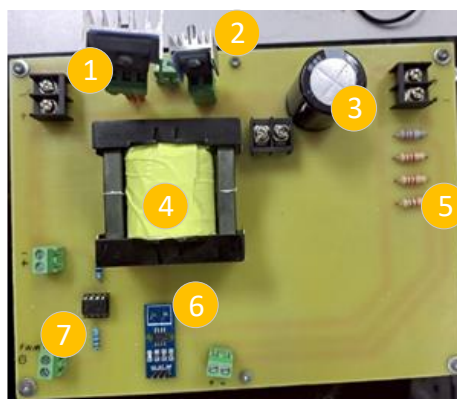


รูปที่ 6 การจำลองสถานการณ์ที่มีการควบคุมกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต

จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการลดโหลดความต้านทานจาก 100 Ω ไปเป็น 25 Ω จะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลดมีค่าสูงขึ้น และเมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าเกิน 0.5 A ที่ได้กำหนดไว้ วงจรดังกล่าวจะปรับค่ากระแสไฟฟ้าลดลง โดยจะส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงด้วย

4. การสร้างชุดทดสอบ

การสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก-บูสต์ ซึ่งจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรจริง เปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังแบบเดียวกัน โดยในหัวข้อนี้ประกอบด้วย การสร้างวงจรบัก-บูสต์ วงจรตรวจจับแรงดัน วงจรตรวจจับกระแส และการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 แสดงดังรูปที่ 7 โดยชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นจะใช้สำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุตผ่านการเขียนโปรแกรมบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยกำหนดให้แรงดันอยู่ในช่วง 10 - 60 โวลต์ เพื่อสังเกตผลการตอบสนองของวงจรภายใต้ระดับแรงดันที่แตกต่างกัน รวมถึงการประเมินประสิทธิภาพของชุดทดสอบ



1. Mosfet 2. Diode 3. Capacitor 4. Inductor
5. Voltage Sensor 6. Current Sensor 7. Gate Drive

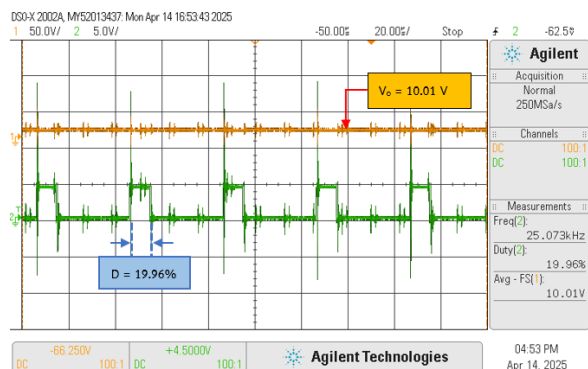
รูปที่ 7 การสร้างเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับค่าได้

จากรูปที่ 7 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้สร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก-บูสต์ สามารถสรุปเบอร์ ขนาด และพิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สร้างชุดทดสอบ ดังตารางที่ 1

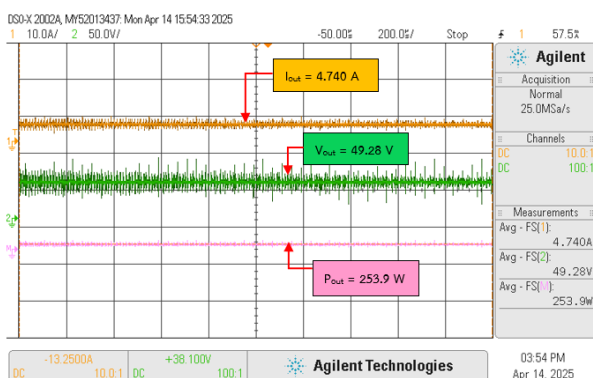
ตารางที่ 1 เบอร์, ขนาดและพิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สร้างชุดทดสอบ

อุปกรณ์	สัญลักษณ์	เบอร์	ขนาด	พิกัด
ตัวเหนี่ยวนำ	L	-	5 mH	15A
ตัวเก็บประจุ	C	-	150 μF	450V
มอสเฟต	S	IRFP250N	-	200V,30A
ไดโอด	D	MUR1560	-	600V,15A
โหลดตัวต้านทาน	R	-	10 Ω	12A

รูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบการปรับแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัก-บูสต์ที่มีขนาด 10 V โดยเส้นสีแดงแสดงสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและเส้นสีเขียวแสดงสัญญาณ PWM และรูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบการปรับค่าแรงดันเอาต์พุตที่มีขนาด 50 V โดยมีขนาดกำลังไฟฟ้าที่โหลดมีค่าเท่ากับ 253.9 W



รูปที่ 8 ผลการทดสอบเมื่อปรับแรงดันเอาต์พุตมีค่าขนาด 10 V



รูปที่ 9 ผลการทดสอบเมื่อปรับแรงดันเอาต์พุตมีค่าขนาด 50 V

จากรูปที่ 8 และ 9 จะเห็นได้ว่า ระบบที่พิจารณาในบทความนี้สามารถควบคุมแรงเอาต์พุตได้ตั้งแต่ 10 V - 60 V โดยดูได้จากรูปสัญญาณที่ได้จากการทดสอบ และผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 2 ผลจากการทดสอบแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก - บูสต์ที่มีตัวควบคุมพีไอ ในการควบคุมแรงดันเอาต์พุต

V_o^*	$V_{in}(V)$	$I_{in}(A)$	$P_{in}(W)$	$V_{out}(V)$	$I_{out}(A)$	$P_{out}(W)$	eff
10	47.79	0.27	18.16	10.01	1.25	12.51	96.97
20	47.75	0.81	62.06	19.63	1.89	37.06	95.83
30	47.69	1.92	132.58	29.93	2.88	86.16	94.10
40	46.86	3.46	221.65	39.75	3.82	151.98	93.74
50	46.65	5.42	360.14	49.28	4.74	233.59	92.38
60	46.57	8.01	406.09	59.56	5.73	341.20	91.47

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า เมื่อโหลดมีค่ากำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้น ผ่านปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัก-บูสต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ วงจรที่ได้รับนำเสนอในบทความนี้สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตมีค่าใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงและมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 91-97 % และการทดสอบในตารางที่ 3 แสดงการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน 4 ค่า คือ 10 Ω , 12 Ω , 16 Ω และ 18 Ω โดยที่มีการคงที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 50 V

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบโหลดตัวต้านทานที่แรงดันเอาต์พุต 50 V

Load(Ω)	$V_{in}(V)$	$I_{in}(A)$	$P_{in}(W)$	$V_{out}(V)$	$I_{out}(A)$	$P_{out}(W)$
10	46.65	5.66	263.97	49.28	4.93	242.85
12	47.49	4.74	224.91	50.10	4.18	209.17
16	47.58	3.54	168.22	50.30	3.14	158.13
18	47.99	3.12	149.91	50.63	2.51	142.41

จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดความต้านทานของวงจรดังกล่าวให้มามีค่าลดลง จะส่งผลทำให้กำลังไฟฟ้าที่โหลดมีค่าสูงขึ้น และเมื่อดูค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ระบบยังสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้มีความคงที่ได้

5. สรุป

ในบทความนี้นำเสนอการสร้างเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงด้วยการอาศัยวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก - บูสต์ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ ผ่านการเขียนโปรแกรมควบคุมด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ในช่วง 10V - 60V และควบคุมกระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตตั้งแต่ 1A - 6A จากผลการทดลองด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์บนโปรแกรม MATLAB ผ่าน SIMULINK และการสร้างชุดทดสอบแสดงให้เห็นว่า สมรรถนะของวงจรแปลงผันแบบบัก-บูสต์ที่มีตัวควบคุมพีไอสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามค่าอ้างอิงได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ภาณุเดช โสฬส และเอกภูมิ ตีระพัฒน์, "POWER SUPPLY ปรับแรงดัน 0-40 V และปรับกระแส 0-5 A", ปริญญาญานพนธ์การศึกษา 2548.
- [2] ประกวด หงษาชาติ และคณะ, "การพัฒนาเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบควบคุมกระแสขนาด 10 แอมป์". ใน รายงานการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมอุตสาหกรรม, , 2555, หน้า 2305-2313
- [3] A. Giyantara, D. Christover and Y. T. K. Priyanto, "Design and implementation buck-boost converter using Arduino Mega 2560". in *Proceedings of the 1st International Conference on Industrial Technology (ICONIT 2019)*, 2020, pp. 169–176.
- [4] H. Shayeghi, S. Pourjafar and F. Sedaghati, "A buck-boost converter: Design, analysis and implementation suggested for renewable energy systems". in *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 17(2), pp. 1862–1874, 2021.
- [5] T. Turahyo, "A simple strategy of control DC-DC converter as power supply on household lights", in *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 2(6), pp. 484–488, 2021.
- [6] R. Abhishek, P. Zoting and P. Ragit, "Design and analysis of a DC-DC buck converter and boost converter to achieve high efficiency by altering duty cycle and input voltage", in *International Journal of Scientific and Research Publications*, 10(6), pp. 731–738, 2020.