

วงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับระบบพลังงานทดแทน A High Step-Up Multi-Input Boost Converter for Renewable Energy Systems

เกื้อกูล กองกาญจนะ สุดารัตน์ ขวัญอ่อน*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Kuagoon Kongkanjana Sudarat Khwan-on

School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

*Corresponding author Email: sudarat_kh@sut.ac.th

(Received: October 19, 2018; Accepted: August 24, 2018)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอโครงสร้างวงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับระบบพลังงานทดแทน โดยมีอัตราขยายแรงดันสูงประมาณ 20 เท่า ทั้งนี้วงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่พัฒนาขึ้น สามารถเพิ่มระดับแรงดันอินพุต ที่ได้จากแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนซึ่งมีแรงดันค่อนข้างต่ำประมาณ 20V ถึง 40V ให้มีระดับแรงดันเอาต์พุตสูงถึง 400V รวมทั้งสามารถใช้กับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนได้มากกว่าหนึ่งแหล่งจ่าย เพื่อเพิ่มกำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลด บทความนี้อธิบายโครงสร้างวงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง และหลักการทำงานของวงจร การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจร ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ เพื่อลดการกระเพื่อมของกระแสและแรงดัน การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการ ซึ่งประกอบด้วยลู่วควบคุมแรงดันหนึ่งลู่ว และลู่วควบคุมกระแสหลายลู่ว โดยอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส เพื่อสร้างกระแสอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับลู่วควบคุมกระแสแต่ละลู่ว ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบวงจร แสดงให้เห็นว่าวงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น มีอัตราขยายแรงดันประมาณ 20 เท่า และตัวควบคุมพีไอที่อาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการภายใต้เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ ที่แตกต่างกันได้อย่างน่าพอใจ

คำสำคัญ: วงจรทบทระดับแรงดันที่มีอัตราขยายแรงดันสูง วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าหลายอินพุต แหล่งจ่ายพลังงานทดแทน ตัวควบคุมชนิดพีไอ

ABSTRACT

This paper proposes a multi-input high step-up boost converter topology for renewable energy system. The proposed converter provides a high voltage conversion ratio, approximately 20 times, in order to boost up the low input voltage generated from renewable energy sources about 20V – 40V to the high output voltage level of 400V. In addition, this proposed multi-input converter can employ with the multi-input sources to increase power to the load. In this paper, the configuration of the proposed converter and its principle of operation will be described. The converter parameters such as inductors and capacitors are designed to reduce the current and voltage ripples. The PI controller with one voltage control loop and multi current control loops is also designed to regulate the output voltage at the desired constant levels. The current control is based on the current weighting

technique in order to provide the proper reference current for each current control loop. Simulation and experimental results show that the proposed high step-up multi-input boost converter can increase the voltage conversion ratio of 20. The PI controller based on the current weighting technique can satisfactorily regulate the output voltage at the desired constant levels under different operating conditions.

Keyword: High step-up boost converter, multi-input boost converter, renewable energy, PI controller.

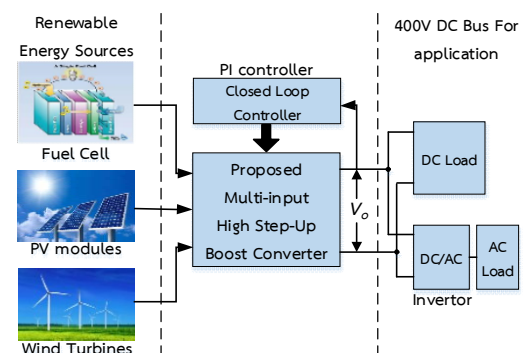
1. บทนำ

ปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรโลก ส่งผลให้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างยั่งยืนและไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ด้วยเหตุนี้พลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และ เซลล์พลังงาน จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการผลิตพลังงานไฟฟ้า เพื่อตอบสนองความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น นำไปสู่การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อช่วยให้สามารถนำพลังงานทดแทนที่มีขนาดกำลังไฟฟ้าค่อนข้างต่ำและมีระดับแรงดันต่ำประมาณ 20V ถึง 40V มาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 24V ขนาด 100W ถึง 200W โดยในอดีตมีการวิจัยเกี่ยวกับวงจรระดับแรงดันสวิตช์เดียวที่มีอัตราขยายแรงดันสูง (High Step-Up Single-Switch Boost Converter) [1]–[3] ซึ่งมีอัตราขยายแรงดันประมาณ 20 เท่า ใช้สำหรับระดับแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันต่ำประมาณ 20V ให้มีค่าสูงถึงประมาณ 400V เนื่องจากวงจรดังกล่าวมีระดับแรงดันอินพุตต่ำ ทำให้จำเป็นต้องมีกระแสอินพุตค่อนข้างสูง สำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดได้อย่างเพียงพอ ดังนั้นการใช้แหล่งจ่ายอินพุตเดียวอาจไม่เพียงพอสำหรับจ่ายโหลดที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง ๆ ด้วยเหตุนี้วงจรระดับแรงดันแบบหลายอินพุต (Multi-input Boost Converter) [4]–[6] สามารถช่วยเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด อย่างไรก็ตามวงจรดังกล่าวมีอัตราขยายแรงดันต่ำ จึงไม่สามารถนำไปใช้งานกับโหลดที่ต้องการแรงดันสูงได้

บทความนี้เสนอโครงสร้างวงจรระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับระบบพลังงานทดแทน วงจรดังกล่าวพัฒนาขึ้นเพื่อระดับแรงดันอินพุตที่ได้จาก

แหล่งจ่ายพลังงานทดแทนซึ่งมีแรงดันต่ำประมาณ 20V–40V ให้มีระดับแรงดันเอาต์พุตที่สูงถึงประมาณ 400V โดยอาศัยโครงสร้างวงจรระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง ซึ่งมีอัตราขยายแรงดันประมาณ 20 เท่า และสามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้กับระบบได้ โดยอาศัยการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายหลายแหล่งจ่ายแบบขนานเพื่อสามารถนำแรงดันเอาต์พุตที่ได้ไปใช้กับโหลดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง หรืออาจใช้สำหรับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับโดยอาศัยวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับต่อไป

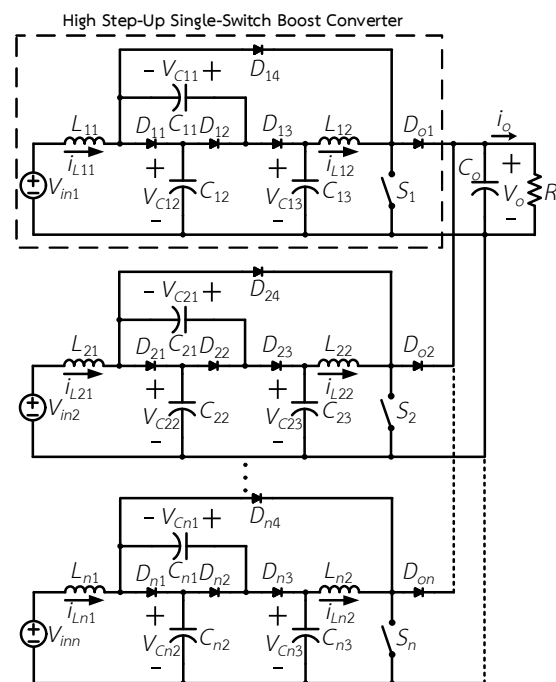
บทความนี้ยังได้นำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ที่ปรากฏในโครงสร้างวงจรที่พัฒนาขึ้น เพื่อช่วยลดการกระเพื่อมของกระแสอินพุต และแรงดันเอาต์พุต รวมทั้งได้กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่มีการเพิ่มลูบควบคุมกระแสตามจำนวนของแหล่งจ่ายอินพุตที่เชื่อมต่อเข้ากับวงจร โดยได้นำเสนอเทคนิคการถ่วงน้ำหนักค่ากระแสสำหรับลูบกระแสในแต่ละลูบ เพื่อให้สามารถควบคุมการทำงานของวงจรได้อย่างมีประสิทธิภาพ รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างระบบแรงดันอินพุตต่ำแรงดันเอาต์พุตสูงซึ่งมีพลังงานทดแทนหลายแหล่งจ่ายโดยอาศัยวงจรระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง



รูปที่ 1 โครงสร้างระบบแรงดันอินพุตต่ำแรงดันเอาต์พุตสูง

2. วงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง

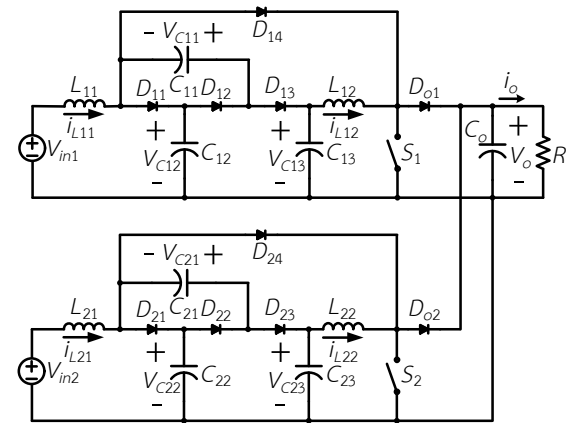
วงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงพัฒนาขึ้นจากวงจรทบทระดับแรงดันแบบสวิตช์เดียวที่มีอัตราขยายแรงดันสูง ร่วมกับวงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุต เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อแหล่งจ่ายอินพุตได้มากกว่าหนึ่งแหล่งจ่าย โครงสร้างวงจรที่พัฒนาขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยวงจรทบทระดับแรงดันแบบสวิตช์เดียวที่มีอัตราขยายแรงดันสูงหรือวงจรย่อย ที่มีจำนวนวงจรย่อยเท่ากับจำนวนแหล่งจ่าย โดยภายในหนึ่งวงจรย่อย เช่น วงจรย่อยที่หนึ่งประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ L_{11} , L_{12} ตัวเก็บประจุ C_{11} , C_{12} , C_{13} ไดโอดกำลัง D_{11} , D_{12} , D_{13} , D_{14} , D_{o1} และสวิตช์กำลัง S_1 โดยวงจรที่พัฒนาขึ้นรวมทั้งทุกวงจรย่อยที่ต่อขนานกัน ทำงานในโหมดนำกระแสต่อเนื่อง



รูปที่ 2 วงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง

ในบทความนี้จะอธิบายหลักการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงกรณีเชื่อมต่อแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตสองแหล่งจ่าย คือ V_{in1} และ V_{in2} ซึ่งจ่ายแรงดันอินพุตกับวงจรทบทระดับแรงดันแบบสวิตช์เดียวที่มีอัตราขยายแรงดันสูง จากนั้นจึงนำทั้งสองวงจรมาเชื่อมต่อกัน

ในลักษณะขนาน ร่วมกับตัวเก็บประจุเอาต์พุต (C_o) และโหลดตัวต้านทาน (R) โครงสร้างวงจรทบทระดับแรงดันแบบสองอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรทบทระดับแรงดันแบบสองอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง

การทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันแบบสองอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น พบว่าแรงดันเอาต์พุตจากทั้งสองวงจรย่อยจำเป็นต้องมีค่าเท่ากัน แม้ว่าแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} และ V_{in2} มีค่าแตกต่างกันก็ตาม ดังนั้นการทำงานของสวิตช์ S_1 และ S_2 อาจมีค่าวัฏจักรหน้าที่ที่แตกต่างกันได้ โดยจำนวนโหมดการทำงานของวงจรจะขึ้นกับจำนวนสวิตช์ที่ปรากฏอยู่ในวงจร ซึ่งมีความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (1)

$$N_m = 2^n \quad (1)$$

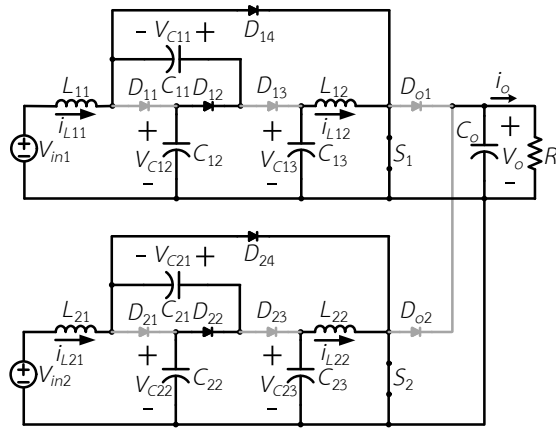
เมื่อ N_m คือ จำนวนของโหมดการทำงาน

n คือ จำนวนสวิตช์ที่ปรากฏอยู่ในวงจร

กรณีนี้มีสวิตช์ปรากฏอยู่ในวงจรที่พัฒนาขึ้นจำนวนสองตัว คือ S_1 และ S_2 จึงสามารถพิจารณาได้ 4 โหมด ดังต่อไปนี้

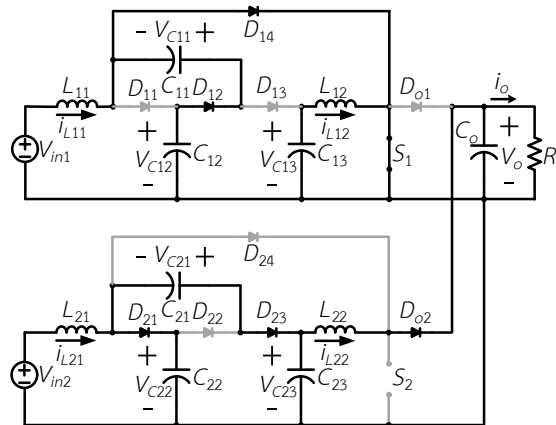
โหมดที่ 1 เมื่อสวิตช์ S_1 และ S_2 นำกระแส

เมื่อสวิตช์ S_1 และ S_2 นำกระแส ส่งผลให้ไดโอด D_{11} , D_{13} , D_{o1} , D_{21} , D_{23} และ D_{o2} หยุดนำกระแสเนื่องจากเกิดการไบอัสย้อนกลับ ตัวเก็บประจุ C_{11} และ C_{21} จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ส่วนตัวเก็บประจุ C_{12} , C_{13} , C_{22} , C_{23} และ C_o จะคายประจุทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน โดยโหลดตัวต้านทานจะได้รับพลังงานจากการคายประจุของตัวเก็บประจุเอาต์พุต C_o ซึ่งลักษณะการทำงานของวงจรในโหมดนี้แสดงได้ดังรูปที่ 4

รูปที่ 4 โหมดที่ 1 S_1 และ S_2 นำกระแส

โหมดที่ 2 เมื่อสวิตช์ S_1 นำกระแส และ S_2 หยุดนำกระแส

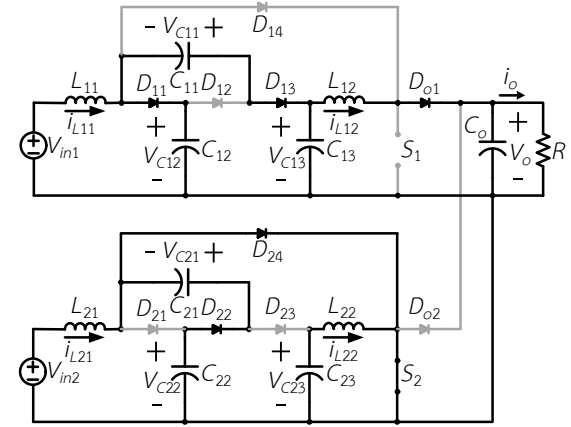
เมื่อสวิตช์ S_1 นำกระแส และ S_2 หยุดนำกระแส ส่งผลให้ไดโอด D_{11} , D_{13} , D_{o1} , D_{22} และ D_{24} หยุดนำกระแสเนื่องจากเกิดการไบอัสย้อนกลับ ตัวเก็บประจุ C_{11} , C_{22} , C_{23} และ C_o จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ส่วนตัวเก็บประจุ C_{12} , C_{13} และ C_{21} จะคายประจุทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน ในโหมดนี้ โหลดตัวต้านทานจะได้รับแรงดันจากแหล่งจ่าย V_{in2} และจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ C_{21} ซึ่งมีลักษณะการทำงานของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 5

รูปที่ 5 โหมดที่ 2 S_1 นำกระแส และ S_2 หยุดนำกระแส

โหมดที่ 3 เมื่อสวิตช์ S_1 หยุดนำกระแส และ S_2 นำกระแส

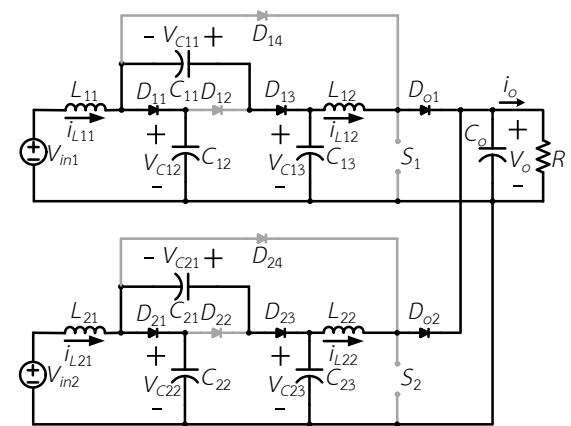
เมื่อสวิตช์ S_1 หยุดนำกระแส และสวิตช์ S_2 นำกระแส ส่งผลให้ไดโอด D_{12} , D_{14} , D_{21} , D_{23} และ D_{o2} หยุดนำกระแสเนื่องจากเกิดการไบอัสย้อนกลับ ตัวเก็บ

ประจุ C_{12} , C_{13} , C_{21} และ C_o จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ส่วนตัวเก็บประจุ C_{11} , C_{21} และ C_{23} จะคายประจุ โหลดตัวต้านทานจะได้รับแรงดันจากแหล่งจ่าย V_{in1} และจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ C_{11} ซึ่งโครงสร้างการทำงานของวงจรในโหมดนี้แสดงได้ดังรูปที่ 6

รูปที่ 6 โหมดที่ 3 S_1 หยุดนำกระแส และ S_2 นำกระแส

โหมดที่ 4 เมื่อสวิตช์ S_1 และ S_2 หยุดนำกระแส

เมื่อสวิตช์ S_1 และ S_2 หยุดนำกระแส ส่งผลให้ไดโอด D_{12} , D_{14} , D_{22} และ D_{24} หยุดนำกระแสเนื่องจากเกิดการไบอัสย้อนกลับ ตัวเก็บประจุ C_{12} , C_{13} , C_{22} , C_{23} และ C_o จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ส่วนตัวเก็บประจุ C_{11} และ C_{21} จะคายประจุทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน โดยโหลดตัวต้านทานจะได้รับแรงดันจากทั้งสองแหล่งจ่าย คือ V_{in1} และ V_{in2} และจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ C_{11} และ C_{21} การทำงานของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 7

รูปที่ 7 โหมดที่ 4 S_1 และ S_2 หยุดนำกระแส

จากการพิจารณาโหมดการทำงานของวงจรทั้ง 4 โหมด สามารถหาอัตราขยายแรงดันของวงจรที่ระดับแรงดันแบบ สวิตช์เดียวที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแต่ละวงจรย่อยได้ โดยอาศัยการวิเคราะห์วงจรด้วยทฤษฎีกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และทฤษฎีกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) ซึ่งจะได้ สมการอัตราขยายของวงจรที่ระดับแรงดันแบบสวิตช์เดียวที่มี อัตราขยายแรงดันสูงดังสมการที่ (2) โดยเป็นความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันเอาต์พุต (V_o) และแรงดันอินพุตของแหล่งจ่ายที่ กำลังพิจารณา (V_{in}) โดยมี D_n บ่งบอกถึงค่าวัฏจักรหน้าที่ของ สวิตช์ในวงจรย่อยนั้น จะเห็นได้ว่าสามารถขยายแรงดันได้สูงถึง ประมาณ 20 เท่า เมื่อมีค่าวัฏจักรหน้าที่ประมาณ 70% ซึ่งไม่ สูงมากนักในทางปฏิบัติ

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{2}{(1-D_n)^2} \quad (2)$$

นอกจากนี้ได้วิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรที่ระดับ แรงดันที่พัฒนาขึ้น สำหรับออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ และค่าตัว เก็บประจุ ที่ปรากฏในวงจร เพื่อช่วยลดกระแสพุ่มของกระแส และกระแสพุ่มของแรงดันให้อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ ทั้งนี้สมการที่ใช้ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวแสดง ดังตารางที่ 1 โดยที่ n คือลำดับของวงจรย่อยที่กำลังพิจารณา

ตารางที่ 1 สมการการออกแบบค่าพารามิเตอร์

พารามิเตอร์	สมการการออกแบบ
L_{n1}	$L_{n1} \geq \frac{V_{in} D_n}{f_{sw} \Delta i_{Ln1}}$
L_{n2}	$L_{n2} \geq \frac{V_{Cn3} D_n}{f_{sw} \Delta i_{Ln2}}$
C_{n1}, C_{n2}	$C_{n1}, C_{n2} \geq \frac{P_{o,max}}{V_{Cn1}^2 f_{sw}}$
C_{n3}	$C_{n3} \geq \frac{i_{Ln2} D_n}{f_{sw} \Delta V_{Cn3}}$
C_o	$C_o \geq \frac{i_o D}{f_{sw} \Delta V_o}$

โดยได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการออกแบบตัว เหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ดังตารางที่ 2 ดังนั้นค่าตัว เหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุที่ปรากฏอยู่ในวงจรที่พัฒนาขึ้น สามารถแสดงดังตารางที่ 3 ในการออกแบบตัวควบคุม การ จำลองสถานการณ์ และการสร้างชุดทดสอบ จะเลือกใช้ค่าตัว เหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ โดยค่า

ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่เลือกใช้แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบ

V_o	444V	V_{in1}, V_{in2}	20V
R	500Ω	i_o	0.8A
f_{ws}	20kHz	D_n	0.7
$P_{o,max}$		400W	
i_{Ln1}	19.71A	i_{Ln2}	2.96A
V_{Cn1}, V_{Cn2}	66.7V	V_{Cn3}	133.3V
ΔV_{Cn3}	1V (0.75% V_{Cn3})	ΔV_o	1V (0.23% V_o)
Δi_{Ln1}	0.2A (1% i_{Ln1})	Δi_{Ln2}	0.5A (15% i_{Ln2})

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ภายในวงจร

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
L_{11}, L_{21}	$\geq 4\text{mH}$
L_{12}, L_{22}	$\geq 11\text{mH}$
$C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22}$	$\geq 100\mu\text{F}$
C_{13}, C_{23}	$\geq 150\mu\text{F}$
C_o	$\geq 40\mu\text{F}$

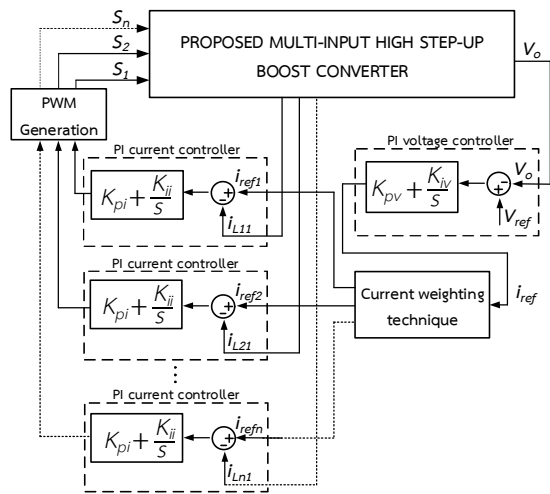
ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ภายในวงจร

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
$L_{11}, L_{12}, L_{21}, L_{22}$	15mH
$C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22}, C_o$	100μF
C_{13}, C_{23}	150μF

3. การออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรที่ระดับแรงดัน แบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง

โครงสร้างของการควบคุมวงจรที่ระดับแรงดันแบบ หลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงจะใช้ตัวควบคุมพีไอ แสดงดังรูปที่ 8 ซึ่งประกอบด้วยลูปควบคุมแรงดัน เอาต์พุตหนึ่งลูป และลูปควบคุมกระแสอินพุตหลายลูป โดยมีเพิ่มลูปควบคุมกระแส ตามจำนวนของแหล่งจ่าย

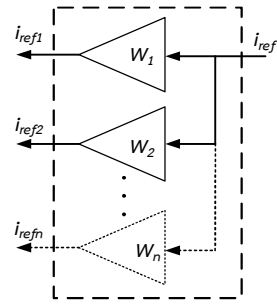
ที่จ่ายแรงดันอินพุตให้กับวงจร เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์แต่ละตัวให้เป็นอิสระต่อกัน โดยในบทความนี้พิจารณาวงจรกรณีเมื่อเชื่อมต่อแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตจำนวนสองแหล่งจ่าย ดังนั้นจึงใช้รูปควบคุมกระแสสองลูป เพื่อควบคุมกระแสอินพุตที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในแต่ละวงจรย่อย รวมทั้งอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (Current Weighting Technique) เข้าช่วยสำหรับสร้างกระแสอ้างอิงที่เหมาะสมในการควบคุมกระแสอินพุตในแต่ละลูป โดยกระแสอ้างอิงนี้จะใช้ในการเปรียบเทียบกับค่ากระแสอินพุตที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่วัดได้จากแต่ละวงจรย่อย ทั้งนี้เพื่อให้วงจรที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตแต่ละแหล่งจ่ายยังคงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดได้อย่างเหมาะสม เมื่อแหล่งจ่ายอินพุตแต่ละแหล่งจ่ายมีกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกัน



รูปที่ 8 การควบคุมวงจรพหุระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง

จากรูปที่ 8 ค่าแรงดันเอาต์พุต (V_o) ที่วัดได้จะถูกเปรียบเทียบกับค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง (V_{ref}) เพื่อเข้าสู่รูปควบคุมแรงดัน โดยรูปควบคุมแรงดันจะสร้างสัญญาณกระแสอ้างอิง (i_{ref}) จากนั้นจะอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส เพื่อสร้างค่ากระแสอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับรูปการควบคุมกระแสของแต่ละแหล่งจ่าย โดยโครงสร้างเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส แสดงดังรูปที่ 9

Current weighting technique



รูปที่ 9 กระบวนการถ่วงน้ำหนักกระแสอ้างอิง

ทั้งนี้เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสอธิบายได้ดังสมการที่ (3)

$$i_{refn} = W_n i_{ref} \quad (3)$$

เมื่อ i_{ref} คือ ค่ากระแสอ้างอิงที่ได้จากรูปควบคุมแรงดัน

i_{refn} คือ ค่ากระแสอ้างอิงสำหรับรูปควบคุมกระแสที่กำลังพิจารณา

โดยค่าปรับคูณการถ่วงน้ำหนัก W_1 และ W_2 พิจารณาได้จากสมการที่ (4)

$$W_n = \frac{P_n}{\sum_{i=1}^j P_i} \quad (4)$$

เมื่อ W_n คือ ค่าปรับคูณการถ่วงน้ำหนักที่กำลังพิจารณา

P_n คือ กำลังของแหล่งจ่ายที่กำลังพิจารณา

n คือ ลำดับของวงจรย่อยที่กำลังพิจารณา

j คือ จำนวนแหล่งจ่ายทั้งหมด

เนื่องจากบทความนี้พิจารณากรณีที่มีแรงดันอินพุตสองแหล่งจ่ายเชื่อมต่อเข้ากับวงจร จึงกำหนดให้พิกัดกำลังของแหล่งจ่ายแต่ละแหล่งจ่ายเป็นดังนี้ โดยแหล่งจ่ายที่หนึ่งมีพิกัดกำลังอยู่ที่ $P_1=60W$ และแหล่งจ่ายที่สองมีพิกัดกำลังอยู่ที่ $P_2=40W$ ฉะนั้นค่าปรับคูณการถ่วงน้ำหนัก สำหรับแหล่งจ่ายที่หนึ่ง และแหล่งจ่ายที่สอง คือ

$$W_1 = 60/100 = 0.6 \text{ และ } W_2 = 40/100 = 0.4$$

ดังนั้น ค่ากระแสอ้างอิง i_{ref1} และ i_{ref2} สำหรับรูปควบคุมกระแสแต่ละลูป แสดงได้ดังนี้

$$i_{ref1} = 0.6 i_{ref} \text{ และ } i_{ref2} = 0.4 i_{ref}$$

จากนั้นค่ากระแสอ้างอิงสำหรับลูปควบคุมกระแสแต่ละลูป จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่ากระแสอินพุตที่วัดได้จากวงจร (i_{L11} และ i_{L21}) จากนั้นสัญญาณความผิดพลาดกระแสที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่มีความถี่เท่ากับความถี่การสวิตช์ เพื่อสร้างสัญญาณในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ S_1 และ S_2 ด้วยตัวจักรหน้าที่ D_1 และ D_2 ตามลำดับ

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ สำหรับวงจรทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง อาศัยหลักการเดียวกับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิม ด้วยวิธีเทียบสัมประสิทธิ์ โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวงจรดังตารางที่ 5 สมการการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ และค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบ แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ภายในวงจร

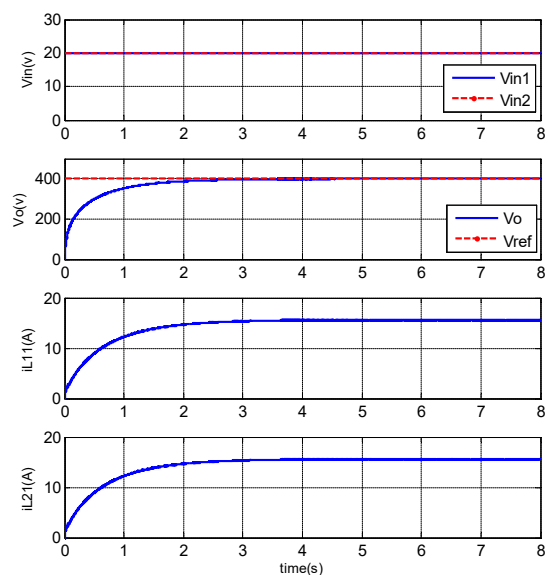
พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
V_{in}	20V
L	15mH
C	100 μ F
R	320 Ω

ตารางที่ 6 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ

สัญลักษณ์	สมการ	ค่าพารามิเตอร์
ζ	-	0.9
ω_n	$\omega_n = \frac{1}{RC}$	31.25
K_{pv}	$K_{pv} = 2\zeta\omega_n C - \frac{1}{R}$	0.0025
K_{iv}	$K_{iv} = \omega_n^2 C$	0.09765625
ω_{ni}	$\omega_{ni} = 100\omega_n$	3125
K_{pi1}, K_{pi2}	$K_{pi} = \frac{2\zeta\omega_{ni}L}{V_{in}}$	4.21875
K_{ii1}, K_{ii2}	$K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 L}{V_{in}}$	7324.21875

4. ผลการจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์วงจรทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับระบบพลังงานทดแทนอาศัยโปรแกรม MATLAB SIMULINK ช่วยในการจำลองสถานการณ์ โดยพิจารณาวงจรกรณี เมื่อมีแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตสองแหล่งจ่าย ดังแสดงโครงสร้างวงจรในรูปที่ 3 โดยมีค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ภายในวงจรแสดงดังตารางที่ 4 ในการควบคุมการทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้นอาศัยโครงสร้างของตัวควบคุมดังรูปที่ 8 โดยมีค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดังตารางที่ 6 เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพการทำงานของวงจรทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ได้ดำเนินการการจำลองสถานการณ์ทั้งหมด 6 กรณีดังนี้

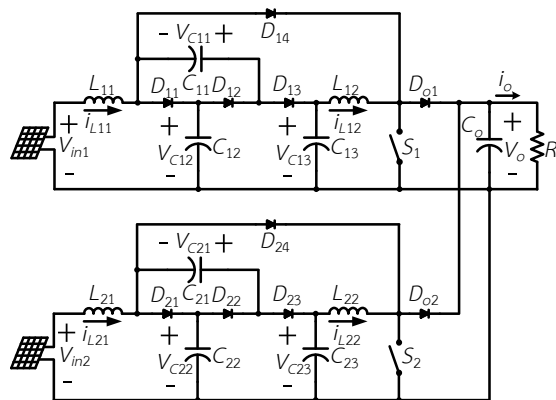


รูปที่ 10 ผลการจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบตัวควบคุม

กรณีที่ 1 เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตทั้งสองแหล่งจ่าย V_{in1} และ V_{in2} เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งไม่มีข้อจำกัดด้านกระแสอินพุต สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดได้ตามต้องการ และระดับแรงดันอินพุตคงที่ 20V ทั้งสองแหล่งจ่ายและโหลดตัวต้านทาน R มีค่าเป็น 320 Ω โดยกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีค่าคงที่ 400V และไม่มีกระบวนการปรับแก้ค่ากระแสอ้างอิงด้วยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส ผลการจำลองสถานการณ์กรณีที่ 1 แสดงดังรูปที่ 10 จะเห็นว่าจากช่วงเวลา 0 ถึง 8 วินาที ระดับแรงดันเอาต์พุตมีค่า

เพิ่มสูงขึ้น และเข้าสู่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงในสภาวะอยู่ตัวที่ 400V ส่วนค่ากระแสอินพุตของทั้งสองแหล่งจ่าย i_{L11} และ i_{L21} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกับแรงดันเอาต์พุต และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 15A เท่ากันทั้งสองแหล่งจ่าย จากผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 1 แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมชนิดพีไอและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 6 นั้นสามารถควบคุมการทำงานของวงจรให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุตตามที่ต้องการได้ โดยมีอัตราขยายแรงดันสูงถึง 20 เท่า

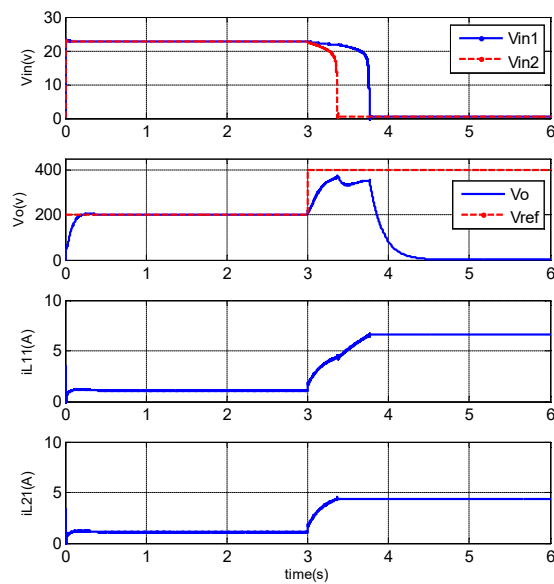
สำหรับกรณีที่ 2 ถึง กรณีที่ 6 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทั้งสองแหล่งจ่าย V_{in1} และ V_{in2} จะถูกแทนที่ด้วยแหล่งจ่ายแรงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นจากสมการทางคณิตศาสตร์ [7] โดยมีพิกัดกระแสแสงประมาณ 1.1A และอาศัยการต่อขนานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มพิกัดกระแส โดยแหล่งจ่าย V_{in1} และ V_{in2} จะใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 6 แผง และ 4 แผง ตามลำดับ ดังนั้นแหล่งจ่าย V_{in1} และ V_{in2} สามารถจ่ายกระแสอินพุตให้กับวงจรด้วยพิกัดกระแสประมาณ 6.6A และ 4.4A ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงเปลี่ยนค่าโหลดตัวต้านทาน 320Ω เป็น 1600Ω เพื่อให้กำลังไฟฟ้าที่ส่งไปยังโหลดมีค่าลดลง ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าอินพุตที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าไม่สูงมากนัก อีกทั้งช่วยลดพิกัดกำลังของชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ โครงสร้างของวงจรที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์เมื่อแหล่งจ่ายอินพุตทั้งสองแหล่งจ่ายเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 โครงสร้างวงจรสำหรับการจำลองสถานการณ์

กรณีที่ 2 เมื่อระบบควบคุมไม่มีกระบวนการปรับแก้ค่ากระแสอ้างอิงด้วยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองแหล่งจ่าย V_{in1} และ V_{in2} เป็นค่าแรงดันอินพุตคงที่เท่ากับ 20V โดยกำหนดค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงในช่วงแรกมีค่าเป็น 200V และเปลี่ยนระดับเป็น 400V ที่เวลา 3 วินาที เพื่อสังเกตผลการตอบสนองที่เกิดขึ้นเมื่อระบบควบคุมไม่มีกระบวนการปรับแก้ค่ากระแสอ้างอิง ผลการจำลองสถานการณ์กรณีที่ 2 แสดงดังรูปที่ 12 เห็นได้ว่า ในช่วงเวลาที่ 0 ถึง 3 วินาที เมื่อแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีค่าคงที่เท่ากับ 200V พบว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 200V ค่ากระแสอินพุตจากทั้งสองแหล่งจ่าย i_{L11} และ i_{L21} มีค่าเท่ากัน โดยจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 1A ต่อมาที่เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 400V จะสังเกตได้ว่าตัวควบคุมพีไอพยายามควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง เมื่อพิจารณากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} พบว่ามีค่าเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามที่เวลาประมาณ 3.4 วินาที แหล่งจ่าย V_{in2} ไม่สามารถจ่ายกระแสเกินพิกัดได้จะเห็นว่าค่ากระแสอินพุตของแหล่งจ่ายนี้มีค่าคงที่ประมาณ 4.4A จึงทำให้แรงดันจากแหล่งจ่าย V_{in2} มีค่าลดลงเป็น 0V และต่อมาที่เวลาประมาณ 3.8 วินาที แหล่งจ่าย V_{in1} ไม่สามารถจ่ายกระแสเกินพิกัดได้ ซึ่งค่ากระแสอินพุตของแหล่งจ่ายนี้คงที่ประมาณ 6.6A จึงทำให้แรงดันจากแหล่งจ่าย V_{in1} ลดลงจนเป็น 0V เช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ทำให้วงจรทบระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่พัฒนาขึ้นไม่สามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ โดยแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงจนเหลือ 0V จากผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อระบบควบคุมไม่ใช้เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส จะส่งผลให้ตัวควบคุมกระแสมีค่ากระแสอ้างอิงที่ไม่เหมาะสมกับขนาดพิกัดกระแสของแหล่งจ่ายแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อในขณะนั้น กล่าวคือแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตแต่ละแหล่งจ่ายไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดได้อย่างเหมาะสม จึงส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการได้

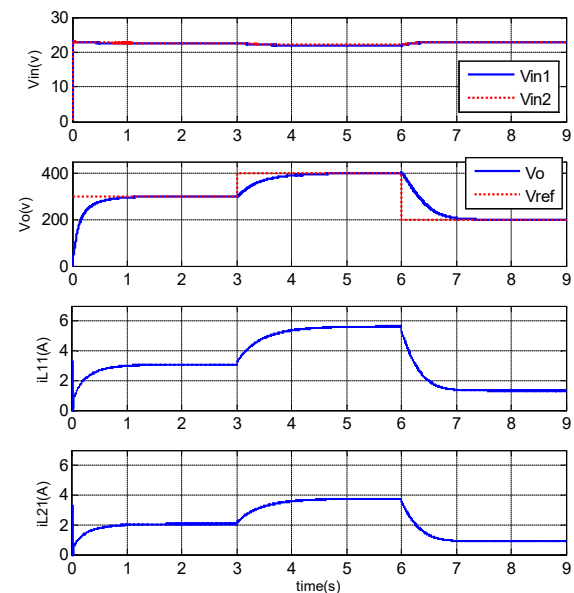
ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2561



รูปที่ 12 ผลการตอบสนองเมื่อไม่มีกระบวนการปรับแก้
ค่ากระแสอ้างอิงด้วยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส

กรณีที่ 3 เมื่อกำหนดให้แหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองแหล่งจ่าย V_{in1} และ V_{in2} มีค่าคงที่อยู่ที่ 20V โดยอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส เพื่อให้ได้กระแสอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับรูปกระแสทั้งสอง และทำการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง (V_{ref}) เป็น 300V 400V และ 200V ตามลำดับ เพื่อสังเกตผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต (V_o) รวมถึงกระแสอินพุตจากทั้งสองแหล่งจ่าย ผลการจำลองสถานการณ์กรณีนี้ที่ 3 แสดงดังรูปที่ 13 เห็นได้ว่า ในช่วงแรงที่เวลา 0 ถึง 3 วินาที ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 300V แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่ระดับอ้างอิงที่ 300V กระแสอินพุตของแหล่งจ่ายที่ 1 (i_{L11}) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 3A และ กระแสอินพุตของแหล่งจ่ายที่ 2 (i_{L21}) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 2A จะสังเกตเห็นได้ว่า กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีค่าไม่เท่ากันตามอัตราส่วนค่าปรับคูณที่ใช้ในการปรับแก้ค่ากระแสอ้างอิงภายในโครงสร้างของตัวควบคุม เพื่อช่วยให้แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตทั้งสองแหล่งทำงานภายใต้พิกัดกำลังของตัวเอง ต่อมาในช่วงเวลา 3 ถึง 6 วินาที มีการปรับเพิ่มค่าแรงดันอ้างอิงจาก 300V เป็น 400V จะสังเกตเห็นได้ว่า แรงดันเอาต์พุตมีการปรับค่าเพิ่มตามค่าแรงดันอ้างอิงและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มี

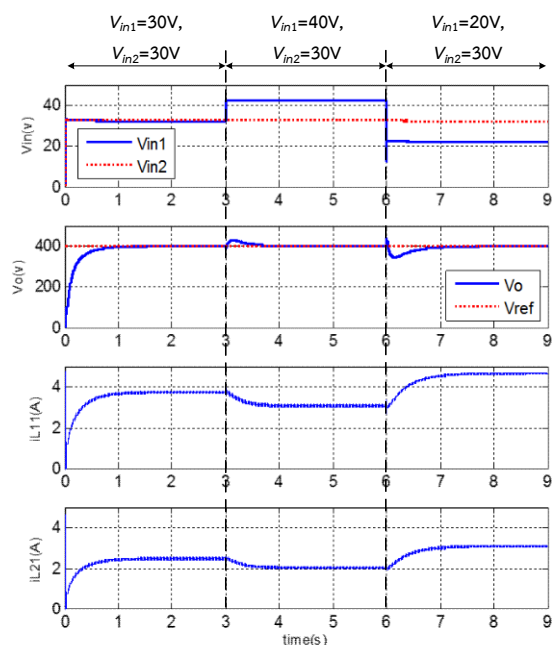
การปรับตัวเพิ่มขึ้นตามแรงดันเอาต์พุตและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 5.5A และ 4A ตามลำดับ และในช่วงสุดท้ายที่เวลา 6 ถึง 9 วินาที มีการปรับลดค่าแรงดันอ้างอิงจาก 400V เป็น 200V จะสังเกตเห็นได้ว่า แรงดันเอาต์พุตมีการปรับค่าลดลงตามและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 200V ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการปรับตัวลดลงตาม และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.5A และ 0.75A ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีนี้ที่ 3 แสดงให้เห็นได้ว่า สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรทบระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับระบบพลังงานทดแทนให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามระดับแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงได้ตามต้องการได้อย่างน่าพอใจ



รูปที่ 13 ผลการตอบสนองเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง

กรณีที่ 4 เมื่อแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ V_{in1} มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันจาก 30V เป็น 40V และ 20V ตามลำดับ โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ V_{in2} มีระดับแรงดันคงที่อยู่ที่ 30V และค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงคงที่อยู่ที่ 400V ผลการจำลองสถานการณ์กรณีนี้ที่ 4 แสดงดังรูปที่ 14 เห็นได้ว่าในช่วงแรกที่เวลา 0 ถึง 3 วินาที ระดับแรงดันของแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตทั้งสองแหล่งมีค่าเท่ากันที่ 30V แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} จะมีค่าเริ่มต้นที่ 0A และ

ปรับตัวเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 3.5A และ 2.5A ตามลำดับ ต่อมาในช่วงที่ 2 ที่เวลา 3 ถึง 6 วินาที แรงดันอินพุต V_{in1} มีการปรับค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 30V เป็น 40V สังเกตเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยก่อนปรับลดลงเข้าสู่สภาวะอยู่ที่ 400V ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการปรับลดลงจาก 3.5A เป็น 3A และจาก 2.5A เป็น 2A ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} มีค่าเพิ่มขึ้น แต่โหลดยังต้องการกำลังเท่าเดิม ตัวควบคุมจึงควบคุมให้แหล่งจ่ายอินพุตทั้งสองจ่ายกระแสให้น้อยลงกว่าเดิม เพื่อสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ตามความต้องการของโหลด และในช่วงสุดท้ายที่เวลา 6 ถึง 9 วินาที ระดับแรงดันแหล่งจ่าย V_{in1} มีการปรับค่าลดลงจาก 40V เป็น 20V แรงดันเอาต์พุต สังเกตเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงเล็กน้อย ก่อนจะปรับเพิ่มขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการปรับเพิ่มสูงขึ้นจาก 3A เป็น 4.5A และจาก 2A เป็น 3A ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีนี้ 4 แสดงให้เห็นได้ว่า สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ตามที่ต้องการได้ แม้มีการเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1}

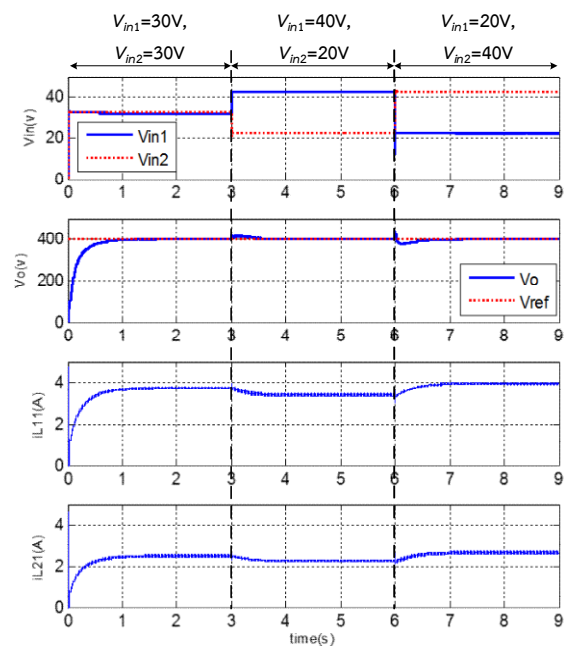


รูปที่ 14 ผลการตอบสนองเมื่อปรับเปลี่ยนแรงดัน V_{in1} โดยที่

V_{in2} คงที่ที่ 30V

กรณีที่ 5 ได้ดำเนินการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอินพุตที่ได้จากแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ V_{in1} และ V_{in2} โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันจาก 30V เป็น 40V และ 20V ตามลำดับ และแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in2} มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันจาก 30V เป็น 20V และ 40V ตามลำดับ โดยให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีค่าคงที่เท่ากับ 400V ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีนี้ 5 แสดงดังรูปที่ 15 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกใช้เวลา 0 ถึง 3 วินาที แรงดันอินพุต V_{in1} และ V_{in2} มีระดับแรงดันอยู่ที่ 30V แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 3.5A และ 2.5A ตามลำดับ ต่อมาที่เวลา 3 ถึง 6 วินาที แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 30V เป็น 40V และแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in2} มีค่าลดลงจาก 30V เป็น 20V จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} มีพิกัดกำลังที่สูงกว่าแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in2} จึงทำให้แหล่งจ่าย V_{in1} มีผลต่อแรงดันเอาต์พุตมากกว่าแหล่งจ่าย V_{in2} ฉะนั้นเมื่อแหล่งจ่าย V_{in1} มีระดับแรงดันเพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีแรงดันเพิ่มสูงขึ้น ก่อนที่จะปรับเข้าสู่ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงและรักษาระดับแรงดันคงที่เท่ากับ 400V ได้ ในขณะที่กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีค่าลดลงจาก 3.5A เป็น 3A และจาก 2.5A เป็น 2.25A ตามลำดับ และในช่วงสุดท้ายที่เวลา 6 ถึง 9 วินาที แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} มีค่าลดลงจาก 40V เป็น 20V แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in2} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 20V เป็น 40V จะสังเกตเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงเล็กน้อยก่อนจะปรับค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ที่ 400V ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการปรับค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 3A เป็น 4A และจาก 2.25A เป็น 2.75A จากผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีนี้ 5 พบว่า ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้นั้นสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ตามต้องการได้ แม้ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันของแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตทั้งสองแหล่งจ่าย

ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน - ธันวาคม พ.ศ. 2561

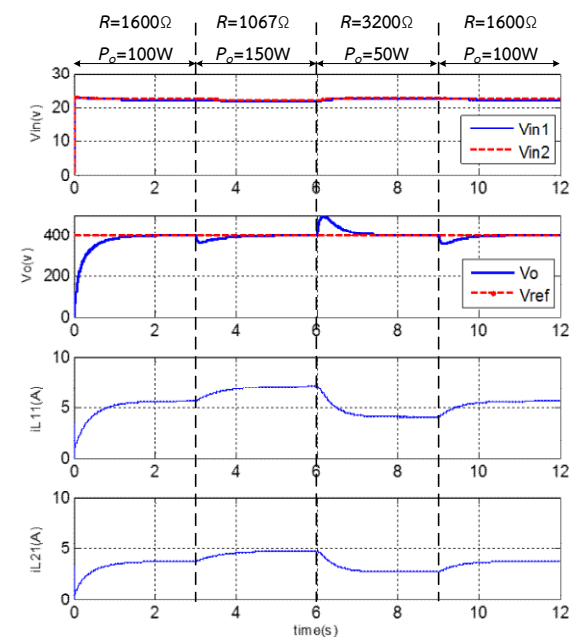


รูปที่ 15 ผลการตอบสนองเมื่อปรับเปลี่ยนแรงดัน V_{in1} และ V_{in2}

กรณีที่ 6 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดตัวต้านทาน จาก 1600Ω เป็น 1067Ω 3200Ω และ 1600Ω ตามลำดับ เพื่อสังเกตผลการตอบสนองของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง กำลังเอาต์พุต (P_o) จาก 100W เป็น 150W 50W และ 100W ตามลำดับ โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์ V_{in1} และ V_{in2} มีค่าคงที่อยู่ที่ 20V ทั้งนี้ได้มีการเพิ่มพิกัดกำลังของแหล่งจ่าย V_{in1} และ V_{in2} เป็น 100V และ 80V ตามลำดับ เพื่อให้มีกำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะสามารถจ่ายโหลดที่ 150W ทั้งนี้ค่าปรับจูน W_1 และ W_2 ยังคงเป็นเช่นเดิม ส่วนค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงคงที่ที่ 400V ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 6 แสดงดังรูปที่ 16 เห็นได้ว่า ที่เวลา 0 ถึง 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกับแรงดันเอาต์พุต และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 6A และ 4A ตามลำดับ ต่อมาที่เวลา 3 วินาที โหลดตัวต้านทานมีค่าลดลงจาก 1600Ω เป็น 1067Ω ซึ่งส่งผลให้โหลดต้องการกำลังเพิ่มขึ้นจาก 100W เป็น 150W จะสังเกตได้ว่า แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าลดลงก่อนที่จะปรับเพิ่มขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V เช่นเดิม กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ ประมาณ 8A

และ 5A ตามลำดับ ต่อมาที่เวลา 6 วินาที โหลดตัวต้านทานมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 1067Ω เป็น 3200Ω ซึ่งส่งผลให้โหลดตัวต้านทานต้องการกำลังน้อยลง จะได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และปรับลดลงเข้าสู่สภาวะอยู่ที่ 400V ในขณะที่ กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการปรับลดลงและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 4A และ 3A ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ตามต้องการได้ แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการก็ตาม ซึ่งจะเห็นได้ว่าวงจรที่พัฒนาขึ้นยังคงทำงานในโหมดนำกระแสต่อเนื่อง อัตราขยายแรงดันของวงจรยังคงสอดคล้องกับสมการที่ (2) กล่าวคือสามารถขยายแรงดันได้สูงถึง 20 เท่า ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่โหลดจะส่งผลให้กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการเปลี่ยนแปลงตามกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการ

จากผลการจำลองสถานการณ์ แสดงให้เห็นว่าวงจรทบระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง สำหรับระบบพลังงานทดแทนที่พัฒนาขึ้น และตัวควบคุมพีไอที่อาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 16 ผลการตอบสนองเมื่อปรับค่าโหลดตัวต้านทาน

5. การสร้างชุดทดสอบ

โครงสร้างชุดทดสอบวงจรระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง แสดงดังรูปที่ 17 โดยมีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

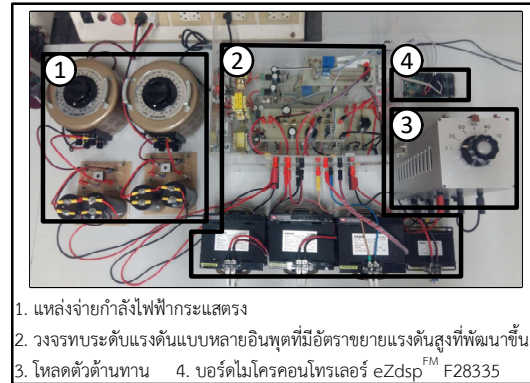
1. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจำนวนสองชุดสำหรับทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตให้กับวงจรที่พัฒนาขึ้น โดยแหล่งจ่ายทั้งสองมีพิกัดกำลังไฟฟ้าเป็น 60W และ 40W ตามลำดับ ทั้งนี้จะอาศัยหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส (variac) ที่สามารถจ่ายแรงดันในช่วง 0 ถึง 250Vrms และมีพิกัดกระแส 10A ร่วมกับวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์หนึ่งเฟส GBPC35 ซึ่งมีพิกัดแรงดัน 1000V และพิกัดกระแส 35A โดยที่ตัวเก็บประจุขนาด 5500 μ F ช่วยกรองสัญญาณแรงดันให้เรียบขึ้น เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับชุดทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้นต่อไป

2. วงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุตัวเหนี่ยวนำ ไดโอดกำลัง RURP3060 มีพิกัดแรงดัน 600V พิกัดกระแส 30A และสวิตช์มอสเฟตกำลัง IXFX80N60P3 มีพิกัดแรงดัน 600V โดยมีโครงสร้างวงจรดังได้แสดงไว้แล้วในรูปที่ 3 และมีค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรแสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งจะอาศัยเซ็นเซอร์กระแส HX 15-P ซึ่งมีพิกัดกระแส 15A และเซ็นเซอร์แรงดันเบอร์ LV 25-P ที่สามารถตรวจจับแรงดันได้ในช่วง 0V ถึง 500V ในการตรวจจับกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุต ตามลำดับ เพื่อใช้ในการกระบวนการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรทบทระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

3. โหลดตัวต้านทานปรับค่าได้ ในช่วง 140 Ω ถึง 5400 Ω โดยรับกระแสโหลดสูงสุดอยู่ได้ประมาณ 3A

4. บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ eZdspTM F28335 สำหรับใช้ในการประมวลผลและควบคุมการทำงานของวงจร โดยอาศัยการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานด้วยภาษาซี ภายในโปรแกรมควบคุมประกอบไปด้วย สมการเปรียบเทียบค่ากระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่จากเซ็นเซอร์ เพื่อใช้ในการกระบวนการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรที่พัฒนาขึ้น ซึ่งอาศัยตัวควบคุมพีไอ โดยค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอแสดงดังตารางที่ 6

รวมถึงกระบวนการถ่วงน้ำหนักกระแส การสร้างสัญญาณ PWM สำหรับควบคุมการทำงานของสวิตช์มอสเฟตกำลังในแต่ละวงจรย่อยภายใต้ค่าวัฏจักรหน้าที่ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการ



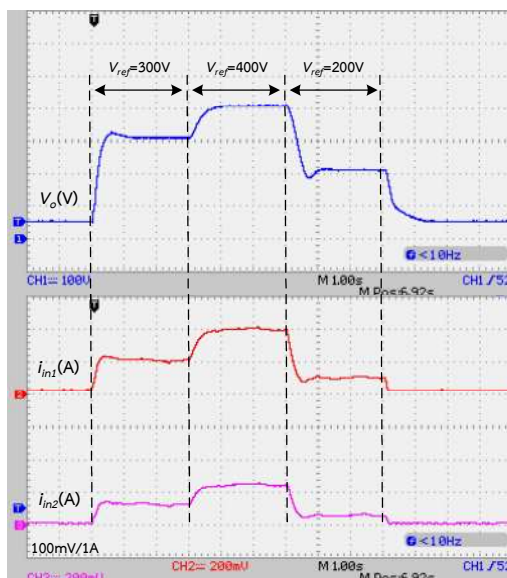
รูปที่ 17 ชุดทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้น

6. ผลการทดสอบวงจร

การทดสอบวงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง จะอาศัยชุดทดสอบที่สร้างขึ้นดังกล่าวไว้แล้วข้างต้น โดยจะพิจารณาการทดสอบการทำงานของวงจรได้เป็น 4 กรณี ดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} และ V_{in2} มีค่าคงที่อยู่ที่ 20V และทำการปรับแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเป็น 300V, 400V และ 200V ตามลำดับ ผลการทดสอบวงจรแสดงดังรูปที่ 18 จะเห็นได้ว่า เมื่อเริ่มการทำงานในช่วงเวลาที่ 0 ถึง 3 วินาที ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีค่าอยู่ที่ 300V แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่แรงดันอ้างอิงที่ 300V กระแสอินพุตของแหล่งจ่ายแรก (i_{L11}) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 2A และ กระแสอินพุตของแหล่งจ่ายที่สอง (i_{L21}) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.5A ต่อมาที่เวลา 3 ถึง 6 วินาที ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงปรับเพิ่มจาก 300V เป็น 400V พบว่าแรงดันเอาต์พุตปรับเพิ่มตามค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ 400V ซึ่งมีอัตราขยายแรงดันประมาณ 20 เท่า ในขณะที่ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการปรับเพิ่มขึ้นตามแรงดันเอาต์พุตและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 4A และ 3A ตามลำดับ และ

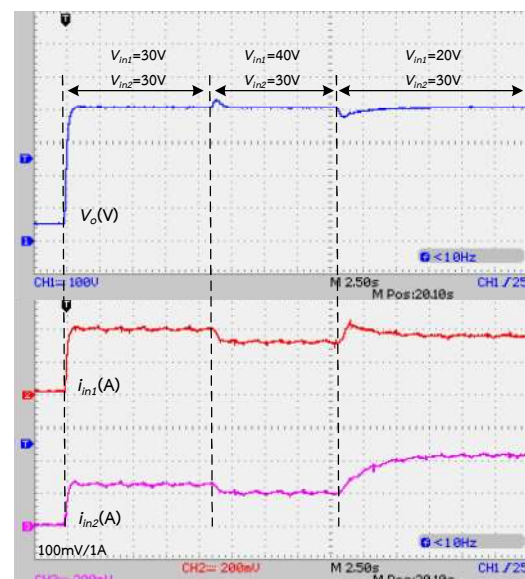
ในช่วงสุดท้ายที่เวลา 6 ถึง 9 วินาที ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงปรับลดจาก 400V เป็น 200V จะเห็นได้ว่า แรงดันเอาต์พุตมีการปรับลดลงและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 200V ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการปรับลดลงและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 1A และ 0.75A ตามลำดับ จากผลการทดสอบวงจรกรณีที่ 1 จะเห็นได้ว่า มีความคล้ายคลึงกับผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 3 แสดงให้เห็นได้ว่า ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรทดสอบให้คงที่ตามต้องการ รวมทั้งสามารถขยายแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง 20 เท่า



รูปที่ 18 ผลการทดสอบวงจรเมื่อเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง

กรณีที่ 2 พิจารณาแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 30V เป็น 40V และ 20V ตามลำดับ โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in2} มีค่าคงที่อยู่ที่ 30V และค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเป็น 400V ผลการทดสอบวงจรแสดงดังรูปที่ 19 จะเห็นได้ว่า เมื่อเริ่มการทำงานที่เวลาประมาณ 0 ถึง 10 วินาที ระดับแรงดันอินพุตของทั้งสองแหล่งจ่ายมีค่าคงที่ประมาณ 30V แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่ระดับอ้างอิงที่ 400V ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} จะมีค่าเริ่มตื้อที่ 0A และเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 4A และ 2.5A ตามลำดับ ต่อมาที่เวลาประมาณ 10 ถึง 20 วินาที แรงดันอินพุต V_{in1} มีการปรับค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 30V เป็น 40V สังเกตเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่ม

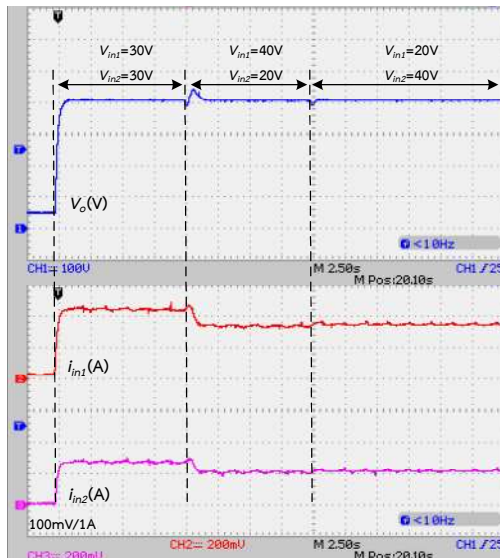
สูงขึ้นเล็กน้อยก่อนปรับลดลงเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเท่ากับ 400V โดยค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการปรับลดลงที่ประมาณ 3A และ 2A ตามลำดับ และในช่วงท้ายตั้งแต่เวลาประมาณ 20 วินาที เป็นต้นไป แรงดันอินพุตจากแหล่งจ่าย V_{in1} มีการปรับค่าลดลงจาก 40V เป็น 20V สังเกตเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงเล็กน้อย ก่อนจะปรับเพิ่มขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการปรับเพิ่มสูงขึ้นและคงที่ประมาณ 3.5A และ 4A ตามลำดับ จากผลการทดสอบวงจรจะเห็นได้ว่ามีความคล้ายคลึงกับผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมการทำงานของวงจรทดสอบให้มีแรงดันเอาต์พุตค่าคงที่ตามที่ต้องการได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1}



รูปที่ 19 ผลการทดสอบวงจรเมื่อปรับแรงดันแหล่งจ่าย V_{in1} โดยที่ V_{in2} คงที่ที่ 30V

กรณีที่ 3 พิจารณาแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} มีค่าเป็น 30V, 40V และ 20V ตามลำดับ และแหล่งจ่าย V_{in2} มีค่าเป็น 30V, 20V และ 40V ตามลำดับ โดยกำหนดให้ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 400V ผลการทดสอบวงจรแสดงดังรูปที่ 20 จะเห็นได้ เมื่อเริ่มการทำงานที่เวลาประมาณ 0 ถึง 10 วินาที แรงดันอินพุต V_{in1} และ V_{in2} มีค่าประมาณ 30V แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V ในขณะที่กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21}

จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 4.5A และ 3A ตามลำดับ ต่อมาที่เวลาประมาณ 10 ถึง 20 วินาที แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 30V เป็น 40V และแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in2} มีค่าลดลงจาก 30V เป็น 20V จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย ก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวและคงที่ 400V โดยที่กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีค่าลดลงจาก 4.5A เป็น 3A และจาก 3A เป็น 2A ตามลำดับ และในช่วงท้ายตั้งแต่เวลา 20 วินาที เป็นต้นไป แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} มีค่าลดลงจาก 40V เป็น 20V โดยที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in2} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 20V เป็น 40V จะสังเกตเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงเล็กน้อยก่อนจะปรับค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการปรับค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 3A เป็น 3.5A และจาก 2A เป็น 2.5A



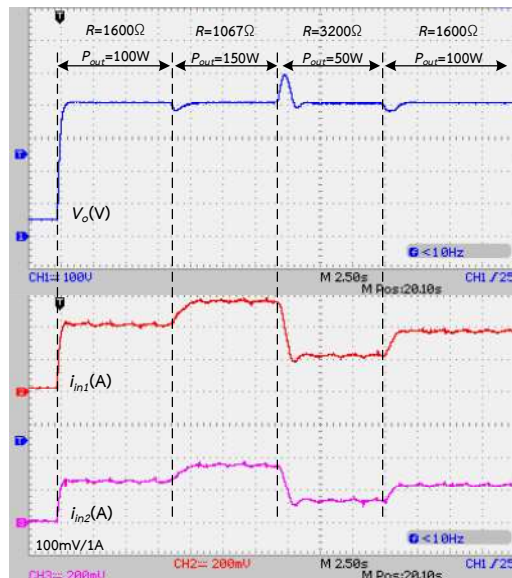
รูปที่ 20 ผลการทดสอบวงจรเมื่อปรับแรงดันแหล่งจ่าย

$$V_{in1} \text{ และ } V_{in2}$$

จากผลการทดสอบวงจรจะเห็นได้ว่ามีความคล้ายคลึงกับผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 5 อาจกล่าวได้ว่า ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้นั้นสามารถควบคุมวงจรทดสอบให้มีแรงดันเอาต์พุตค่าคงที่ตามต้องการได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันของแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตทั้งสองแหล่งจ่าย ทั้งนี้จะสังเกตได้ว่าตัวควบคุมพีโอที่อาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส ช่วยให้ได้กระแสอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับ

ควบคุมกระแสแต่ละคู่ ส่งผลให้แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตแต่ละแหล่งจ่ายที่ได้ยังคงจ่ายกระแสอินพุตที่ไม่เกินพิกัด

กรณีที่ 4 เมื่อเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานจาก 1600Ω เป็น 1067Ω, 3200Ω และ 1600Ω ตามลำดับ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (P_o) ที่โหลดต้องการจาก 100W เป็น 150W, 50W และ 100W ตามลำดับ ทั้งนี้พิกัดกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} และ V_{in2} เป็น 100W และ 80W ตามลำดับ เพื่อให้มีกำลังเพียงพอสำหรับที่โหลด 150W โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} และ V_{in2} มีค่าคงที่อยู่ที่ประมาณ 20V และค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงคงที่เท่ากับ 400V ผลการทดสอบวงจรแสดงดังรูปที่ 21 จะเห็นได้ว่า เมื่อเริ่มต้นการทำงานที่เวลาประมาณ 0 ถึง 15 วินาที แรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V โดยที่กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกับแรงดันเอาต์พุต และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 4A และ 3A ตามลำดับ ต่อมาที่เวลาประมาณ 15 วินาที โหลดตัวต้านทานมีค่าลดลงจาก 1600Ω เป็น 1067Ω ซึ่งส่งผลให้โหลดต้องการกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 100W เป็น 150W จะสังเกตเห็นได้ว่า ตัวควบคุมพีโอที่อาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสยังสามารถควบคุมการทำงานของวงจรที่ระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นได้ เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการไม่เกินกำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตทั้งสองสามารถจ่ายได้ โดยแรงดันเอาต์พุตคงที่ 400V ในขณะที่กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีค่าประมาณ 6A และ 3.5A ตามลำดับ ต่อมาที่เวลาประมาณ 30 วินาที โหลดตัวต้านทานมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 1067Ω เป็น 3200Ω ซึ่งส่งผลให้โหลดตัวต้านทานต้องการกำลังไฟฟ้าน้อยลงจากเดิม นั่นคือกำลังไฟฟ้า 150W เปลี่ยนเป็น 50W สังเกตเห็นได้ว่า แรงดันเอาต์พุตถูกควบคุมอยู่ที่ 400V กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 2A และ 1.5A ตามลำดับ จากผลการทดสอบวงจรจะเห็นได้ว่ามีความคล้ายคลึงกับผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้นั้นสามารถควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ได้ตามต้องการ แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการก็ตาม



รูปที่ 21 ผลการทดสอบวงจรเมื่อปรับค่าโหลดตัวต้านทาน

7. สรุป

บทความนี้นำเสนอโครงสร้างวงจรทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับระบบพลังงานทดแทนซึ่งมีอัตราขยายแรงดันสูงถึง 20 เท่า รวมทั้งการควบคุมการทำงานของวงจรเพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการ โดยอาศัยตัวควบคุมชนิดพีโอที่มีการเพิ่มลูบควบคุมกระแสตามจำนวนของแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต และอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสเข้าช่วย เพื่อให้ได้กระแสอ้างอิงที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้แหล่งจ่ายทำงานภายใต้พิกัดกำลังที่เหมาะสม ทั้งนี้จำเป็นต้องทราบถึงขนาดพิกัดกำลังของแต่ละแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต เพื่อสามารถใช้เป็นแนวทางในการถ่วงน้ำหนักกระแสได้อย่างเหมาะสม จากผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วงจรที่ได้พัฒนาขึ้นและตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้นั้น สามารถควบคุมการทำงานของวงจรเพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะการทำงานของวงจรที่แตกต่างกัน

8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย สถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Nakpin and S. Khwan-on, "A Novel High Step-Up DC-DC Converter for Photovoltaic Applications," *Procedia Computer Science* 86, 2016, pp. 409-412.
- [2] W. Li and X. He, "Review of Nonisolated High-Step-Up DC/DC Converters in Photovoltaic Grid-Connected Applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1239-1250, April 2011.
- [3] Y. Zhao, W. Li, Y. Deng, X. He, S. Lambert and V. Pickert, "High step-up boost converter with coupled inductor and switched capacitor," 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), Brighton, UK, 2010, pp. 1-6.
- [4] S. Khwan-on and K. Kongkanjana, "The control of a multi-input boost converter for renewable energy system applications," 2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON), Pattaya, 2017, pp. 1-4.
- [5] N. Smith and R. McCann, "Analysis and simulation of a multiple input interleaved boost converter for renewable energy applications," *IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Vancouver, BC, 2014, pp. 1-7.
- [6] A. Lavanya, J. D. Navamani, K. Vijayakumar and R. Rakesh, "Multi-input DC-DC converter topologies-a review," *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, Chennai, 2016, pp. 2230-2233.
- [7] M. F. Nayan and S. M. S. Ullah, "Modelling of solar cell characteristics considering the effect of electrical and environmental parameters," 2015 3rd International Conference on Green Energy and Technology (ICGET), Dhaka, 2015, pp. 1-6.