

แหล่งจ่ายกำลังดีซีสำหรับหลอดเทโทรดในเครื่องกำเนิดแสงสยาม

DC Power Supply for the Tetrode Tube of the Siam Photon Source

วิเวก ภาชีรัญ¹, ประพงษ์ คล้ายสุบรรณ², สราวุฒิ สุจิตจร¹Wiwek Phacheerak¹, Prapong Klysubun², Sarawut Sujitjorn¹¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี²สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร.044-224400

E-mail: sarawut@sut.ac.th, wiwekp@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาแหล่งจ่ายกำลัง ดีซี 800 Vdc 500 W สำหรับจ่ายหลอดเทโทรดในเครื่องกำเนิดแสงสยาม เทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นมีโครงสร้างหลักเป็นวงจรแปลงผันรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟส รับแรงดันด้านเข้าจากระบบไฟเฟสเดียว 220 V 50 Hz วงจรแปลงผันนี้ใช้มอเตอร์านซิสเตอร์พิกัด 1,700 V 16 A เป็นอุปกรณ์สวิตชิงจำนวน 6 ตัวต่อแบบฟูลบริดจ์ ทำงานกับแรงดันดีซีเชื่อมโยง 311 Vdc มีความถี่สวิตชิง 85.2 kHz บังคับการสวิตชิงด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F2020 โครงข่ายรีโซแนนซ์มีค่าความเหนี่ยวนำ 233 μ H ความจุไฟฟ้า 22.5 nF วงจรแปลงผันที่พัฒนาขึ้นมีฟังก์ชันถ่ายโอน ARMAX อันดับสอง ซึ่งได้จากการทำ step transient test และระบุเอกลักษณ์ด้วย MATLAB-System Identification Toolbox การคุมค่าแรงดันด้านออกทำได้ด้วยการใช้ระบบควบคุมวงปิด มีตัวควบคุมพีไอแบบแอนะล็อกสร้างจากวงจร op-amp ซึ่งมี $K_p = 3$ และ $K_i = 900$ ด้วยการยืนยันผลโดยการจำลองวงจรด้วยโปรแกรม PSIM และการทดสอบวงจรต้นแบบ แหล่งจ่ายกำลังดีซีนี้สามารถให้แรงดัน 800 Vdc เมื่อมีโหลด 1,280 Ω ที่มีความต้านทานสมมูลของหลอด เทโทรดขณะทำงานในสภาวะอยู่ตัว การตอบสนองของแหล่งจ่ายมีช่วงเวลานขึ้น 2.12 ms ช่วงเวลาเข้าที่ 6.76 ms (พิจารณาที่ความคลาดเคลื่อน 1%) และมีการฟุ้งเกิน 2.3%

Abstract

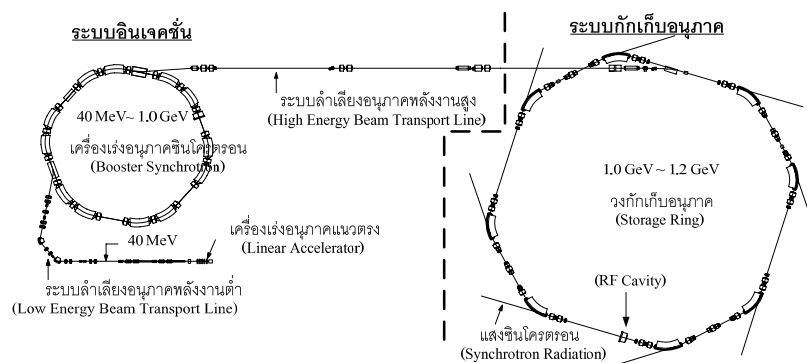
This article presents the development of a 800 V, 500 W DC power supply feeding the tetrode tube of the Siam Photon Source. The developed technology has a 3-phase parallel-resonant converter as its main structure that is fed by a single-phase source of 220 V, 50 Hz. The converter employs 6 MOS transistors of 1,700 V, 16 A ratings as its main switches connected in full-bridge topology having the DC-link voltage of 311 Vdc. A dsPIC30F2020 microcontroller drives the switches at 85.2 kHz switching frequency. Resonant tanks having $L = 233 \mu$ H and $C = 22.5$ nF are used. Based on a step transient test and identification via MATLAB-System Identification Toolbox, a second-order ARMAX transfer function is obtained for representing the converter. An output voltage regulation is accomplished by a closed-loop control using an analog PI-controller built around op-amps to achieve $K_p = 3$ and $K_i = 900$. Circuit simulations using PSIM and experiments on a prototype converter confirm that, with a 1,280 Ω load (an equivalent resistance of the tetrode tube under steady state operation), the converter produces 800 Vdc output having 2.12 ms rise time, 6.67 ms settling time (at 1 % errors), and percent overshoot of 2.3%.

คำอธิบายสัญลักษณ์

V_s	แรงดันไฟตรงที่จุดเชื่อมต่อโยงคิซี (V)
L_s	ค่าตัวเหนี่ยวนำอนุกรมของโครงข่ายรีโซแนนซ์ (H)
C_p	ค่าตัวเก็บประจุขนานของโครงข่ายรีโซแนนซ์ (F)
N	อัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิต่อทุติยภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง
L_o	ค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองแรงดันด้านออก (H)
C_o	ค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรองแรงดันด้านออก (F)
V_o	แรงดันด้านออกของแหล่งจ่ายกำลังคิซี (V)
V'_o	แรงดันด้านออก V_o ซึ่งย้ายมายังด้านปฐมภูมิ (V)
P_o	กำลังด้านออกของแหล่งจ่ายกำลังคิซี (W)
R_{ac}	โหลดความต้านทานไฟฟ้าสลับสมมูลต่อเฟสของวงจรแปลงผันรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟส (Ω)
R_L	โหลดเชิงความต้านทานของแหล่งจ่ายกำลังคิซี (Ω)
R'_L	โหลดเชิงความต้านทานด้านปฐมภูมิของแหล่งจ่ายกำลังคิซี (Ω)
M	อัตราขยายของวงจรแปลงผันรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟส
ω_s	ค่าความถี่สวิตชิงเชิงมุมของอินเวอร์เตอร์ (rad/s)
ω_r	ค่าความถี่รีโซแนนซ์เชิงมุมของโครงข่ายรีโซแนนซ์ (rad/s)
F_s	ค่าความถี่สวิตชิงของอินเวอร์เตอร์ (Hz)
F_r	ค่าความถี่รีโซแนนซ์ของโครงข่ายรีโซแนนซ์ (Hz)
F	อัตราส่วนความถี่สวิตชิงต่อความถี่รีโซแนนซ์
Q	ตัวประกอบคุณภาพ

1. บทนำ

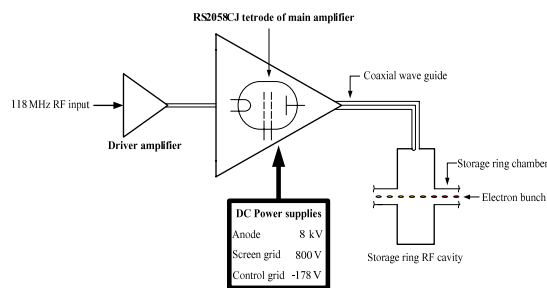
แสงซินโครตรอนเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติพิเศษเหนือกว่าแสงที่ใช้ในห้องทดลองทั่วไปหลายประการเช่น มีสเปกตรัมต่อเนื่องตั้งแต่ย่านอินฟรา-เรดถึงย่านรังสีเอ็กซ์ ความเข้มและความจำสูง มีลักษณะเป็นพัลส์สั้นๆและมีคุณสมบัติของความเป็นขั้ว เป็นต้นด้วยคุณสมบัติพิเศษเหล่านี้ จึงสามารถนำแสงซินโครตรอนไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างระดับโมเลกุลและอะตอมของสาร[1-3] ตลอดจนเซลล์และโครโมโซมของระบบทางชีวภาพได้อย่างละเอียด[4-6] ซึ่งถือว่าเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์บริสุทธิ์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ รัฐบาลไทยได้อนุมัติโครงการแสงสยาม (The Siam Photon Project) ในปี พ.ศ.2539 พร้อมจัดตั้งศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติขึ้นที่ จังหวัดนครราชสีมา มีภารกิจหลักในการสร้างเครื่องกำเนิดแสงสยาม โดยทำการปรับปรุงและดัดแปลงเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนขนาดพลังงาน 1.0 GeV ที่ได้รับบริจาคและขนย้ายมาจากกลุ่ม บริษัท ซอร์เทค (SORTECH Corporation) ประเทศญี่ปุ่น[7] ในปัจจุบันศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติได้ยกฐานะเป็นสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) และได้ดำเนินการปรับปรุงเครื่องกำเนิดแสงสยามจนกระทั่งสามารถให้บริการแสงซินโครตรอนที่พลังงาน 1.2 GeV แก่ผู้ทำงานวิจัยในหลายสาขา เช่น ฟิสิกส์ เคมี สิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม เป็นต้น



รูปที่ 1 แผนภาพโครงสร้างเครื่องกำเนิดแสงสยาม

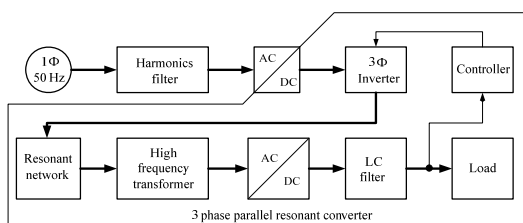
โดยทั่วไปแล้ว เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนมีโครงสร้าง ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ระบบอินเจกชัน (injection system) และระบบกักเก็บอนุภาค (storage ring) ดังตัวอย่างโครงสร้างของเครื่องกำเนิดแสงสยามในรูปที่ 1 ในขณะทำงานเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนต้องการแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าคุณภาพสูงจำนวนมาก เพื่อป้อนกำลังไฟฟ้าให้กับระบบอินเจกชันและระบบกักเก็บอนุภาค [8-9] เพื่อให้เกิดการพินิจตนเองอย่างยั่งยืนสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) มีนโยบายการพัฒนาเทคโนโลยีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าบางส่วนขึ้น เพื่อใช้ทดแทนของเดิมตามศักยภาพของนักวิชาการไทยและโครงสร้างพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของชาติ ภายใต้บริบทนี้สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จึงมีความร่วมมือกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในการพัฒนาแหล่งจ่ายกำลังดิซีเพื่อป้อนกำลังไฟฟ้าให้กับหลอดเทโทรด (tetrode) สำหรับใช้ขยายสัญญาณวิทยุ (RF) กำลังสูง 118 MHz สัญญาณวิทยุดังกล่าวนี้ออกส่งไปที่โพรงอาร์เอฟ (RF cavity) เพื่อชดเชยพลังงานให้กับอิเล็กตรอน ซึ่งได้สูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งไปจากการปลดปล่อยแสงซินโครตรอนในวงกักเก็บอนุภาคในขณะทำงานหลอดเทโทรดต้องการแหล่งจ่ายกำลังดิซีคุณภาพสูงสำหรับขั้วแอโนด (anode) สกรีนกริด (screen grid) คอนโทรลกริด (control grid) และฮีตเตอร์ (heater) ดังรูปที่ 2 การคุมค่าแรงดัน (regulation) และขนาดแรงดันกระเพื่อมของแหล่งจ่ายกำลังดิซีที่จ่ายให้กับขั้วต่างๆของหลอดสูญญากาศดังที่กล่าวมา

ข้างต้น เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณภาพและเสถียรภาพของคลื่นวิทยุที่ได้ กล่าวคือ ถ้าหากแหล่งจ่ายกำลังดิซีเหล่านั้น มีการคุมค่าแรงดันดันออกที่ไม่ดีพอและมีขนาดของแรงดันกระเพื่อมสูง จะส่งผลให้ขนาดและกำลังของคลื่นวิทยุที่ได้ไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งยังมีฮาร์โมนิกปะปนสูง[10] แหล่งจ่ายกำลังดิซีที่ใช้ในปัจจุบันเป็นครุภัณฑ์ดั้งเดิมที่ได้ใช้งานมานานกว่า 10 ปี ชิ้นส่วนอะไหล่ต่างๆจึงไม่อาจหาได้ในปัจจุบัน ทำให้ประสบกับความยุ่งยากในการบำรุงรักษา เพื่อเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีขึ้นรองรับการใช้งานแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนในส่วน of แหล่งจ่ายกำลังดิซีสำหรับ



รูปที่ 2 ระบบ RF กำลังสูงของเครื่องกำเนิดแสงสยาม

หลอดเทโทรด งานวิจัยและพัฒนานี้ จึงนำเสนอการพัฒนาแหล่งจ่ายกำลังดิซีรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟส ขนาดพิกัด 800 Vdc 500 W ชุดใหม่ สำหรับสกรีนกริดของหลอดเทโทรด RS2058CJ ซึ่งใช้ในภาคขยายหลัก (main amplifier) ของระบบคลื่นวิทยุกำลังสูงในวงกักเก็บอนุภาคของเครื่องกำเนิดแสงสยาม

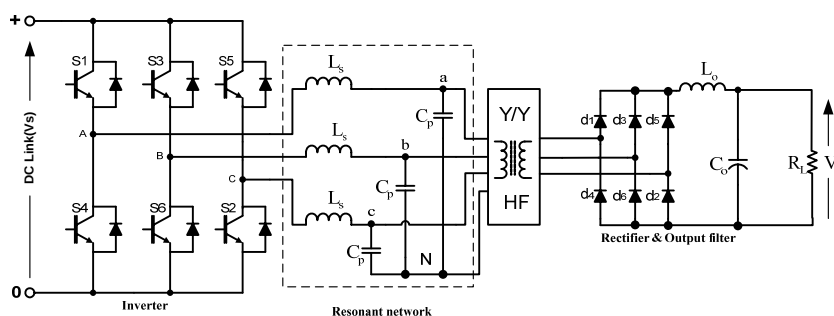


รูปที่ 3 โครงสร้างของแหล่งจ่ายกำลังดิซซีที่พัฒนาขึ้น

แหล่งจ่ายกำลังดิซซีที่พัฒนาขึ้นมีโครงสร้าง ดังรูปที่ 3 มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ วงจรแปลงผันรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟส (ส่วนที่ล้อมกรอบไว้) และวงจรกรองฮาร์มอนิก ข้อกำหนดทางเทคนิคของแหล่งจ่ายกำลังดิซซีนี้ ถูกกำหนดขึ้นตามความต้องการกำลังไฟฟ้าด้านออกที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง และคุณภาพของแรงดันด้านออกที่ได้อรวมถึงการคุมค่าจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของเครื่องเร่งอนุภาค[10-13] ดังรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดทางเทคนิคของแหล่งจ่ายกำลังดิซซี

กำลังด้านออก (P_o)	500 W
แรงดันด้านออก (V_o)	800 Vdc
การคุมค่าแรงดันด้านออก (output voltage regulation)	$\pm 1 \%$
การกระเพื่อมของแรงดันด้านออก (output voltage ripple)	$\pm 1 \%$
การฟุ้งเกินของแรงดันด้านออก	$\leq 5 \%$
แรงดันต่ำสุดที่จุดเชื่อมโยงดิซซี (V_s)	311 Vdc



รูปที่ 4 โครงสร้างของวงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟส

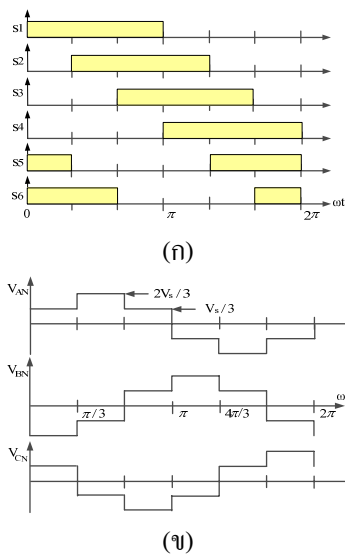
2. หลักการทำงานของวงจรแปลงผันรีโซแนนซ์แบบ

ขนาน 3 เฟส

วงจรแปลงผันที่นิยมนำมาประยุกต์สร้างเป็นแหล่งจ่ายกำลังดิซซี เพื่อจ่ายกำลังให้กับระบบต่างๆของเครื่องเร่งอนุภาคมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เช่น วงจรแปลงผันกระแส (current converter) วงจรแปลงผันคงค่ากระแส 3 เฟส และไดโอดเรียงกระแส (3 phase current regulator and diode rectifier) วงจรแปลงผันดิซซี ซอปเปอร์ (chopped d.c. regulator) และวงจรแปลงผันรีโซแนนซ์ (resonant converter)[9] วงจรแปลงผันรีโซแนนซ์ถึงแม้จะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าวงจรแปลงผันรูปแบบอื่น แต่ก็มีจุดเด่นที่เหมาะสมแก่การประยุกต์เทคนิคการสวิตช์แรงดันศูนย์ (ZVS) และสวิตช์กระแสศูนย์ (ZCS) ช่วยลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในอุปกรณ์ สวิตซิง ทำให้สามารถใช้งานกับการสวิตช์ที่ความถี่สูงได้ดี จึงทำให้อุปกรณ์ข้างเคียงสามารถใช้ขนาดเล็กลงได้นอกจากนั้น di/dt และ dv/dt ในวงจรชนิดนี้ยังมีค่าค่อนข้างต่ำอีกด้วย[14] การวิจัยพัฒนานี้จึงได้เลือกใช้วงจรแปลงผันรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟส เป็นโครงสร้างหลักในการพัฒนาแหล่งจ่ายกำลังดิซซี

วงจรแปลงผันรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟส ประกอบด้วย ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส โครงข่ายรีโซแนนซ์และหม้อแปลงความถี่สูงชุดเรียงกระแสฟูลบริดจ์ 3 เฟส ชุดกรองด้านออกและโหลดตามลำดับ ดังแผนภาพวงจรในรูปที่ 4 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส รับแรงดันด้านเข้าผ่านจุดเชื่อมโยงดิซซีและแปลงเป็นไฟสลับความถี่สูง 3 เฟส อุปกรณ์สวิตซิงแต่ละตัวของอินเวอร์เตอร์

ถูกควบคุมให้นำกระแสคาบละ 180° ดังแสดงในรูปที่ 5(ก) ทำให้แรงดันเฟสที่ออกจากอินเวอร์เตอร์เป็นแบบ 6 ขั้น (six steps) ดังรูปที่ 5(ข)แรงดันไฟสลับความถี่สูงที่ออกจากอินเวอร์เตอร์นี้ ถูกป้อนเข้าสู่โครงข่ายรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟส ซึ่งแต่ละเฟส มีตัวเหนี่ยวนำ L_s และตัวเก็บประจุ C_p ที่เปรียบเสมือนวงจรกรองที่ขอมให้เฉพาะสัญญาณที่มีความถี่เท่ากับความถี่รีโซแนนซ์ของโครงข่ายรีโซแนนซ์ผ่านไปได้ แรงดันด้านออกของโครงข่ายรีโซแนนซ์จึงมีลักษณะเป็นรูปคลื่นซายน์และถูกป้อนให้กับหม้อแปลงความถี่สูง 3 เฟส เพื่อทำหน้าที่แยกโคจรทางไฟฟ้าและแปลงระดับแรงดันให้เหมาะสมกับความต้องการของโหลด ไฟสลับความถี่สูงที่ออกจากหม้อแปลงถูกแปลงเป็นไฟตรงด้วยชุดไดโอดเรียงกระแสฟูลบริดจ์ และปรับเรียบด้วยวงจรกรองต่ำผ่าน ซึ่งประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ L_o และตัวเก็บประจุ C_o ก่อนที่จะจ่ายให้กับโหลดตามลำดับ



รูปที่ 5 (ก) ช่วงการนำกระแสของสวิตช์ S_1-S_6
(ข) แรงดันเฟสด้านออกของอินเวอร์เตอร์

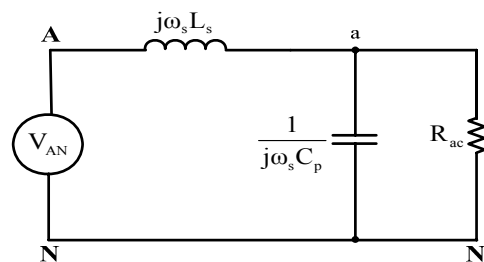
2.1 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟส

การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟส ในบทความนี้ อาศัยแนวทางเดียวกับการวิเคราะห์ห้วงจรแปลงผัน รีโซแนนซ์ชนิด LCC 3 เฟส ที่นำเสนอโดย Bhat และZheng[15] จากแผนภาพวงจรรูปที่ 4 เมื่อกำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวมีความ

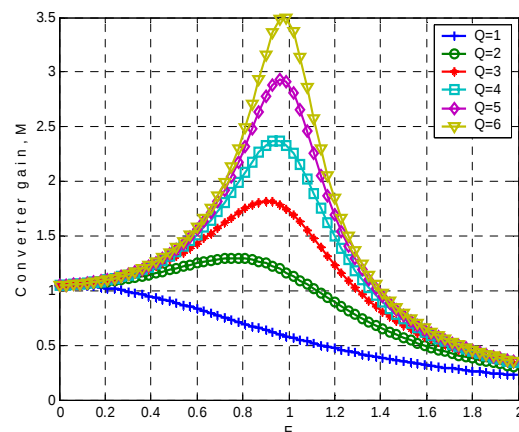
เป็นอุดมคติ สามารถสร้างวงจรสมมูลต่อเฟส (เฟส A) ของวงจรแปลงผันรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟส ได้ดังรูปที่ 6 ซึ่ง $R_{ac} = \pi^2 R'_L / 18$ และสามารถหาอัตราขยาย (M) ของวงจรแปลงผัน ได้จากสมการ (1)

$$M = \frac{V'_o}{V_s} = \frac{NV_o}{V_s} = \frac{6\sqrt{3}V_{aN}}{\pi^2 V_{AN}} = \frac{6\sqrt{3}}{\left[\left(\pi^2 - \pi^2 F^2 \right)^2 + \left(\frac{18F}{Q} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

เมื่อ $\omega_r = 1/\sqrt{L_s C_p}$, $Q = R'_L / \omega_r L_s$, และ $F = \omega_s / \omega_r = F_s / F_r$ รูปที่ 7 แสดงลักษณะสมบัติทางความถี่ของวงจรแปลงผันรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟสซึ่งแสดงอัตราขยาย M สัมพันธ์กับความถี่นอร์มัลไลซ์และค่า Q ในการออกแบบเราสามารถเลือกความถี่ สวิตชิงและค่า Q ใช้งานได้ตามความเหมาะสม



รูปที่ 6 วงจรสมมูลต่อเฟสของวงจรแปลงผัน



รูปที่ 7 ลักษณะสมบัติทางความถี่ของวงจรแปลงผันรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟส

3. การออกแบบและทดสอบวงจรแปลงผัน

หัวข้อนี้นำเสนอ วิธีการออกแบบ การจำลองผล และการสร้างฮาร์ดแวร์ตลอดจนการทดสอบวงจรแปลงผันรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟส ที่มีโครงสร้างดังแผนภาพวงจรรูปที่ 4 เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์สร้างเป็นแหล่งจ่ายกำลังดีสำหรับสกรีนกริดของหลอดเทโทรด RS2058CJ

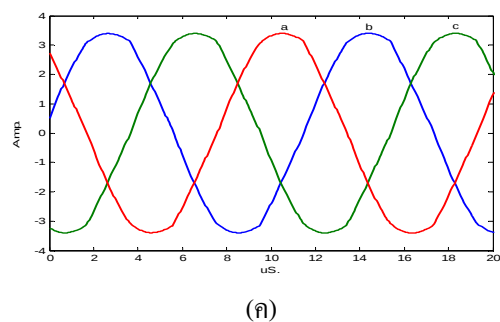
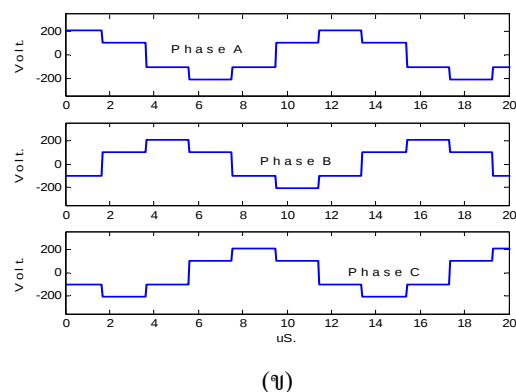
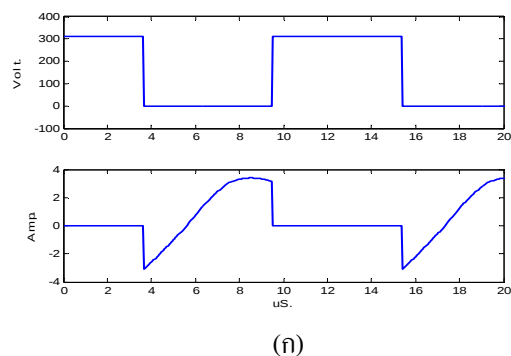
3.1 การออกแบบ

แนวทางการออกแบบวงจรแปลงผันรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟส ได้กำหนดความต้องการให้วงจรทำงานในย่านความถี่ที่สูงกว่าความถี่รีโซแนนซ์ของโครงข่ายรีโซแนนซ์ การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ใช้เทคนิคการนำกระแสในสภาวะแรงดันศูนย์ (ZVS) เพื่อให้เกิดกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าต่ำ สำหรับโครงข่าย รีโซแนนซ์ได้ออกแบบให้ทำงานที่ความถี่รีโซแนนซ์ $F_r = 71 \text{ kHz}$ จากข้อกำหนดทางเทคนิคในตารางที่ 1 ทำให้ทราบว่าจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงความถี่สูงที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบ $N = 0.57:1$ เพื่อทำหน้าที่ปรับระดับแรงดันและแยกโคจรทางไฟฟ้า การออกแบบโครงข่ายรีโซแนนซ์ LC เริ่มต้นด้วยการคำนวณหาอัตราขยาย M จากความสัมพันธ์ $M = NV_o/V_s$ ซึ่งได้ค่า $M = 1.5$ โดยอาศัยผลตอบแทนทางความถี่ดังที่แสดงด้วยกราฟในรูปที่ 7 เลือก $Q = 4$ เมื่อ $M = 1.5$ จะเห็นว่าค่า $F = 1.2 = F_s/F_r$ กรณีของการออกแบบนี้ $F_r = 71 \text{ kHz}$ ดังนั้นจะได้ว่า $F_s = 85.2 \text{ kHz}$ อาศัยความสัมพันธ์ $\omega_r = 1/\sqrt{L_s C_p}$ และ $Q = R'_L/\omega_r L_s$ อาจคำนวณได้ว่า $L_s = 233 \mu\text{H}$ และ $C_p = 21.50 \text{ nF}$ ทั้งนี้ R'_L คือ โหลดเชิงความต้านทานด้านปฐมภูมิของแหล่งจ่ายกำลังดีซึ่งสามารถคำนวณได้จาก $R'_L = N^2(V_o^2/P_o)$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 415.87Ω

การออกแบบวงจรกรองต่ำผ่านกำหนดให้ค่าความถี่คัตออฟ (f_o) มีค่าน้อยกว่า 6 เท่าของความถี่ สวิตชิงที่ต่ำสุดของวงจรแปลงผัน ในที่นี้ได้ใช้ $f_o = 3 \text{ kHz}$ จากความสัมพันธ์ $f_o = 1/2\pi\sqrt{L_o C_o}$ วงจรกรองที่เป็นไปได้ในทางเลือกหนึ่งคือ การใช้ $L_o = 1.8 \text{ mH}$ และ $C_o = 1.6 \mu\text{F}$

3.2 การจำลองผล

การจำลองผลเพื่อตรวจสอบการทำงานของวงจรแปลงผันรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟส อาศัยโปรแกรมสำเร็จรูป PSIM[16] เมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบในหัวข้อที่ 3.1 พบว่าแรงดันที่โหลดในสถานะอยู่ตัว มีขนาด 803 Vdc คลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ต้องการ (800 Vdc) เพียง 0.375% รูปที่ 8(ก) แสดงแรงดันและกระแสของอุปกรณ์สวิตชิง ซึ่งยืนยันสภาวะ ZVS อย่างชัดเจน รูปที่ 8(ข)-(ค) แสดงแรงดันเฟสที่ออกจากอินเวอร์เตอร์และกระแสด้านเข้าของโครงข่ายรีโซแนนซ์เห็นได้ชัดว่ากระแสของโครงข่ายรีโซแนนซ์มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎีของวงจรแปลงผันชนิดนี้ ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2



รูปที่ 8 ผลการจำลองด้วย PSIM: (ก) แรงดันและกระแสที่อุปกรณ์สวิตชิง (ข) แรงดันเฟสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ (ค) กระแสด้านเข้าของโครงข่ายรีโซแนนซ์

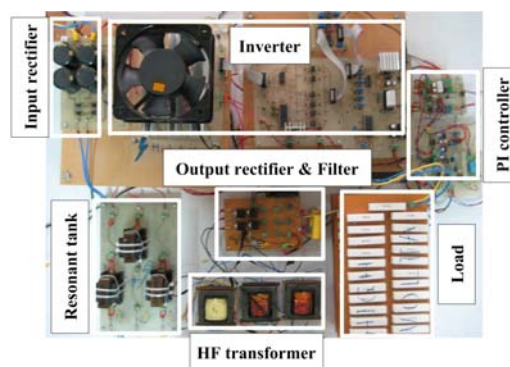
3.3 ฮาร์ดแวร์และการทดสอบ

วงจรแปลงผันรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟส รับแรงดัน 311 Vdc จากจุดเชื่อมต่อโยงติช ซึ่งได้มาจากการเรียงกระแสของวงจรฟูลบริดจ์ 1 เฟส 220 V 50 Hz แต่ละแขนของบริดจ์ใช้ไดโอด MUR4100E 3 ตัว ต่อขนานกันเพื่อรองรับกระแส 12 A การปรับเรียบแรงดันให้มีการกระเพื่อม $\leq 1\%$ ใช้ตัวเก็บประจุ 1 ชุด ให้ความจุรวม 6.72 mF วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ใช้อุปกรณ์สวิตชิงเป็น Bipolar MOS Transistor IXBH16N170A มีพิทัก 1,700 V 16 A ทรานซิสเตอร์ทุกตัวระบายความร้อนด้วยฮีตซิงค์และพัดลม แรงดันไฟสลับที่ออกจากอินเวอร์เตอร์มีความถี่อยู่ในย่าน 77 kHz - 147 kHz ส่งผลให้แรงดันคิซีด้านออกของวงจรแปลงผันอยู่ในช่วง 150-1,000 Vdc การขับอุปกรณ์สวิตชิงอาศัย 12 บิต ADC MAX174 และไมโครคอนโทรลเลอร์

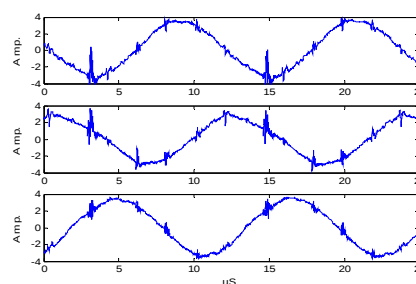
สำหรับการสร้างตัวเหนี่ยวนำอนุกรม L_s ของโครงข่ายรีโซแนนซ์ ซึ่งมีค่า 233 μH นั้น ได้ใช้ลวดทองแดงอาบน้ำยาฉนวน AWG29 จำนวน 12 เส้น ตีเกลียวเข้าด้วยกันพันบนแกนเฟอร์ไรต์ EE55 ส่วนตัวเก็บประจุ C_p ใช้ชนิด metallized polypropylene film มีความจุ 22.5nF คลาดเคลื่อนไปจากที่ออกแบบไว้เล็กน้อยสำหรับหม้อแปลงความถี่สูงแต่ละเฟส นั้น ใช้แกนเฟอร์ไรต์ EE65 โดยขดลวดปฐมภูมิพันด้วยลวดทองแดงอาบน้ำยาฉนวน AWG23 จำนวน 3 เส้น ตีเกลียวเข้าด้วยกัน ส่วนขดลวดทุติยภูมิพันด้วยลวดทองแดงอาบน้ำยาฉนวน AWG18

เพื่อรองรับการแปลงไฟสลับความถี่สูงให้เป็นไฟตรง ไดโอดที่ใช้ในวงจรเรียงกระแสฟูลบริดจ์ด้านออกของวงจรแปลงผันจะต้องเป็นชนิดความไวสูง ซึ่งได้เลือกใช้ไดโอด RHRP8120 พิกัด 1,200 V 8 A สำหรับตัวกรองต่ำผ่านมีตัวเหนี่ยวนำ $L_o = 1.8\text{ mH}$ ใช้แกนเฟอร์ไรต์ EE55 พันด้วยลวดลวดทองแดงอาบน้ำยาฉนวน AWG18 ตัวเก็บประจุ C_o ใช้ polypropylene film หลายตัวต่อขนานกันให้ค่าความจุ 1.6 μF

ต้นแบบของวงจรแปลงผันที่พัฒนาขึ้น แสดงดังรูปที่ 9 เมื่อทำการทดสอบวงจรที่ความถี่สวิตชิง 85.2 kHz มีโหลดของวงจร 1,217 Ω ซึ่งคลาดเคลื่อนจากค่าในทางทฤษฎีบ้างเล็กน้อยรูปที่ 10 แสดงกระแสทางด้านเข้าของโครงข่ายรีโซแนนซ์ที่ได้บันทึกไว้ เห็นได้ว่ามีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์และจากการวัดแรงดันที่โหลด พบว่า มีขนาด 835 Vdc คลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ต้องการ (800 Vdc) 4.375% ดังนั้น จำเป็นต้องออกแบบระบบควบคุม เพื่อคุมค่าแรงดันด้านออกให้มีความคลาดเคลื่อนภายใน $\pm 1\%$ ซึ่งเป็นเนื้อหาที่จะบรรยายในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 9 ฮาร์ดแวร์ของวงจรแปลงผันรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟส พิกัด 800 Vdc 500 W



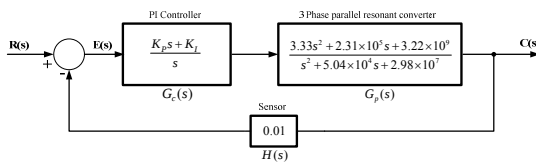
รูปที่ 10 กระแสด้านเข้าของโครงข่ายรีโซแนนซ์จากการทดสอบวงจรที่ความถี่สวิตชิง 85.2 kHz

4. การพัฒนาระบบควบคุมวงปิด

ระบบควบคุมวงปิดที่ได้พัฒนาขึ้นมีวัตถุประสงค์เพื่อคุมค่าแรงดันด้านออกของวงจร แปลงผันที่ 800 Vdc การออกแบบอาศัยวิธีการแบบคลาสสิก ซึ่งได้ทำการทดสอบวงจรแปลงผันรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟส ให้ทำงานวงปิด

โดยใช้การทดสอบแบบ step transient เพื่อระบุเอกลักษณ์แบบจำลอง (model identification) ทั้งนี้โดยใช้ System Identification Toolbox ของ MATLAB ทำให้ได้แบบจำลอง ARMAX อันดับสอง ดังสมการ (2)

$$G_p(s) = \frac{3.33s^2 + 2.31 \times 10^5 s + 3.22 \times 10^9}{s^2 + 5.04 \times 10^4 s + 2.98 \times 10^7} \quad (2)$$



รูปที่ 11 ระบบวงปิดขณะดำเนินการออกแบบตัวควบคุม

รูปที่ 11 แสดงโครงสร้างของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอ สัญญาณอ้างอิงด้านเข้าเป็นแบบขั้นบันได 8 Vdc แรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันตามที่ต้องการเป็น 800 Vdc จึงเลือกใช้เซนเซอร์วัดแรงดันที่มีเกน $K_s = 0.01$ อาจสังเกตได้จากค่าซีเกนของ $G_p(s)$ ตามสมการ (2) ว่า เมื่อวงจรแปลงผันได้รับสัญญาณด้านเข้า 8 Vdc จะให้แรงดันด้านออกมีค่าเท่ากับ 864 Vdc ดังนั้น ค่าเกน $K_c = 0.927$ สามารถนำมาใช้ลดทอนระดับแรงดันด้านออกในสถานะอยู่ตัวได้ในขั้นต้น ต่อจากนั้นสามารถออกแบบตัวควบคุมพีไอตามวิธีการมาตรฐานโดยทั่วไปที่ปรากฏในตำราระบบควบคุม

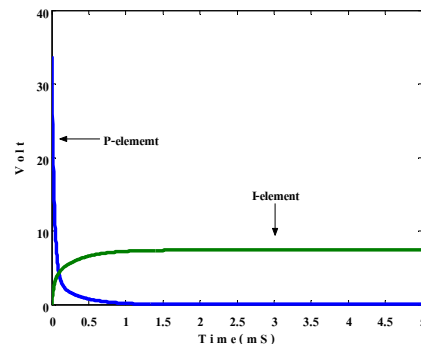
การออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอในบทความนี้ กำหนดให้ $GM \geq 8$ dB $PM \geq 50^\circ$ $P.O. \leq 5\%$ และ $e_{ss} \leq 1\%$ ดำเนินการออกแบบในโดเมนความถี่ที่ความถี่วิกฤต $\omega = \omega_1 = 3.42 \times 10^3$ rad/s จะได้

$$\hat{K}_p = 1/|G_p(j\omega_1)H(j\omega_1)| \cong 5.3$$

และ $\hat{K}_i = 0.1\omega_1\hat{K}_p \cong 1,800$ ซึ่งทำให้ระบบที่มีตัวควบคุมมีค่า $GM = \infty$ dB และ $PM = 104^\circ$ สมการ (3) แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอ

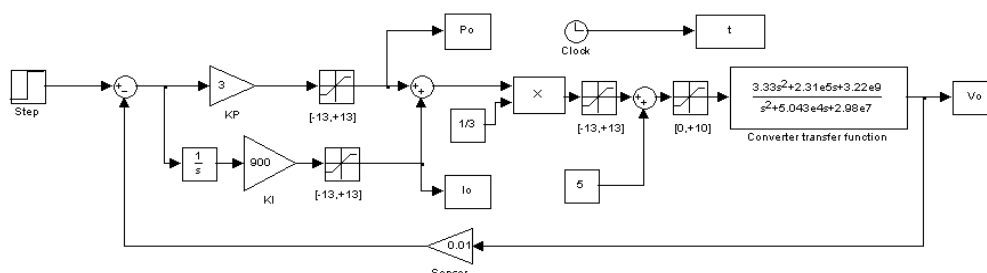
$$G_c(s) = K_c \left(\frac{\hat{K}_p s + \hat{K}_i}{s} \right) = \frac{4.90s + 1,669}{s} \quad (3)$$

การอนุมัติตัวควบคุมใช้วงจรแอนะล็อก เมื่อพิจารณาสมการ (3) อาจกล่าวได้ว่ามีพารามิเตอร์ $K_p = 4.9$ และ $K_i = 1,669$ และจากการจำลองผลการทำงานของตัวควบคุมพีไอ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 12 พบว่าสัญญาณควบคุม (control signal) จากตัวควบคุมมีขนาดสูงสุดถึง 35 Vdc ในสถานะชั่วคราว ซึ่งเกินระดับอิมิตต์ ± 13 Vdc ของวงจรแอนะล็อกที่ใช้ op-amp มีไฟเลี้ยง ± 15 Vdc ดังนั้น จึงใช้ SIMULINK ทำ



รูปที่ 12 สัญญาณควบคุมจากการจำลองผล

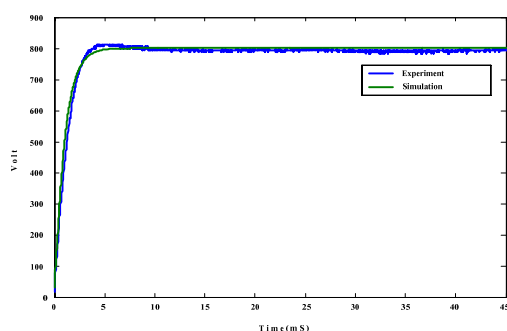
การจำลองผลระบบวงปิดโดยมีการพิจารณาระดับอิมิตต์ในสัญญาณอย่างสมจริง ดังแผนภาพการจำลองผลที่แสดงในรูปที่ 13 อีกทั้งได้ทำการปรับแต่งค่า K_p และ K_i ด้วยการลองผิดลองถูก ตลอดจนดำเนินการทดสอบระบบวงปิดเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบแอนะล็อก ผลที่ได้ปรากฏในตารางที่ 2 ซึ่งรวบรวมค่าที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะที่สำคัญได้แก่ ช่วงเวลาขึ้น (rise time, T_r) ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time, T_s) พิจารณาที่ค่าผิดพลาด 1% และการพุ่งเกิน (percent overshoot, P.O.) ซึ่งอาจสังเกตเห็นได้จากผลที่รวบรวมไว้ในตารางที่ 2 ว่า $K_p = 3$ และ $K_i = 900$ ในทางปฏิบัติให้ผลที่น่าพึงพอใจที่สุด นั่นคือแรงดันด้านออก 800 Vdc สามารถคงตัวได้ภายในเวลา 6.76 ms โดยที่ปรากฏการพุ่งเกินเพียง 2.3 % ในช่วงการตอบสนองชั่วคราว ดังการยืนยันผลด้วยภาพผลการทดสอบการตอบสนองทางเวลาในรูปที่ 14



รูปที่ 13 แผนภาพการจำลองระบบวงปิดด้วย SIMULINK

ตารางที่ 2 ช่วงเวลาขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่และการฟุ้งเกินของแรงดันด้านออก จากการทดลองปรับแต่งอัตราขยาย K_p และ K_i

อัตราขยาย	T_r (mS)		T_s (mS)		P.O.	
	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.
$K_p = 4.9$ $K_i = 1669$	1.70	1.68	11.08	10.94	5.18%	10.33%
$K_p = 3$ $K_i = 1400$	1.84	1.78	10.28	10.84	4.20%	8.44%
$K_p = 3$ $K_i = 1100$	2.02	1.94	8.58	9.74	1.61%	4.65%
$K_p = 3$ $K_i = 900$	2.20	2.12	4.44	6.76	0.02%	2.30%



รูปที่ 14 ผลตอบสนองแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันเมื่อตัวควบคุมมีค่า $K_p=3$ และ $K_i=900$

5. สรุป

แหล่งจ่ายกำลังดิซีสสำหรับป้อนขั้วสกรีนกริด ของหลอดเทโทรไดในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนประเทศไทย ได้รับการพัฒนาขึ้นด้วยเทคโนโลยี คอนเวอร์เตอร์กำลังชนิดวงจรแปลงผันรีโซแนนซ์แบบขนาน 3 เฟส มีความถี่สวิตซิง 85.2 kHz ทั้งนี้ความถี่ สวิตซิงที่ใช้งานได้อยู่ในย่าน 77 kHz - 147 kHz การสวิตซิงทำในโหมด ZVS โครงข่าย LC รีโซแนนซ์ ได้รับการออกแบบให้ทำงานที่ความถี่รีโซแนนซ์ 71 kHz

โดยมีตัวประกอบคุณภาพ $Q = 4$ แหล่งจ่ายกำลังดังกล่าวมี พิกัด 800 Vdc 500 W ประสิทธิภาพเฉพาะส่วนของวงจรแปลงผัน ซึ่งพิจารณาจากจุดเชื่อมต่อโยคดิซีสไปยังโหลดมีค่าเท่ากับ 85.4% การคุมค่าแรงดันด้านออกอาศัยการควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ มีพารามิเตอร์ $K_p = 3$ $K_i = 900$ ทำให้แหล่งจ่ายที่พัฒนาขึ้นมีผลตอบสนองวงปิดที่มีการฟุ้งเกิน 2.3% ช่วงเวลาขึ้น 2.12 mS และช่วงเวลาการเข้าที่ 6.76 mS สามารถให้แรงดันด้านออกคงค่าที่ 800 Vdc มีค่าผิดพลาดที่น้อยมากและน้อยกว่า 1% ตามข้อกำหนดการออกแบบและพัฒนาได้รับการยืนยันผลด้วยการจำลองวงจรโดยใช้โปรแกรม PSIM และการทดสอบต้นแบบ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีและผู้ประพันธ์แรกขอขอบคุณสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่สนับสนุนทุนการศึกษาตลอดจนสนับสนุนทุนการจัดหาโปรแกรม PSIM

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. H. Baker, M. Roy, S. J. Gurman and C. Binns, "Extended X-ray Absorption Fine Structure Studies of the Atomic of Nanoparticles in Different Metallic Matrices", *J. Phys.:Condens. Matter*, Vol.21, 2009, Topical Review, pp.1-17.
- [2] Y. Nishiyama, P. Langan, and H. Chanzy, "Crystal Structure and Hydrogen-Bonding System in Cellulose I β from Synchrotron X-ray and Neutron Fiber Diffraction", *J.AM.CHEM.SOC.*, Vol.124, No.31, 2002, pp.9074-9082.
- [3] Y.H. Kao, "Probing the Microstructure in Semiconductor Layer Materials Using Synchrotron Radiation", *Chinese Journal of Physics*, Vol.35, No.4, 1997, pp.353-364.
- [4] Z. Zhang, R. Zhang, A. Joachimiak, J. Schlessinger, and X.P. Kong, "Crystal Structure of Human Stem Cell Factor: Implication for Stem Cell Factor Receptor Dimerization and Activation", *PNAS*, Vol.97, No.14, Jul.2000, pp.7732-7737.
- [5] F. V. Murphy IV, R.M. Sweet, and M.E.A. Churchill, "The Structure of a Chromosomal High Mobility Group Protein-DNA Complex Reveals Sequence-Neutral Mechanisms Important for Non-Sequence-Specific DNA Recognition", *The EMBO Journal*, Vol.18, No.23, 1999, pp.6610-6618.
- [6] N. Jamin, P. Dumas, J. Moncuit, W.H. Fridman, J.L. Teillaud, G.L. Carr, G.P. Williams, "Highly Resolved Chemical Imaging of Living Cells by Using Synchrotron Infrared Microspectrometry", *PNAS*, Vol.95, No.9, April 1998, pp.4838-4840.
- [7] K. Haß, "The RF System of Siam Photon Source at NSRC in Thailand", Ph.D. Thesis, School of Physics, Suranaree University of Technology, Thailand, 1999.
- [8] P.J. Bryant, "Performance Requirements for Accelerators", CAS: Power Converters for Particle Accelerators, CERN 90-07.
- [9] H. Bühler, "Classification of Static Converters", CAS: Power Converters for Particle Accelerators, CERN 90-07.
- [10] P.L. Khilar, A. Makwana, J. Soni, K.G. Parmar, K. Sathyanarayana, Y. Srinivas, M. Kushwah, D. Bora and RF group, "Design and Development of DC Power Supply System for 1.5 MW, 40 MHz, RF Amplifier", Power Modulator Symposium, 2006. Conference Record of the 2006 Twenty-Seventh International, May 2006, pp.264-267
- [11] Siemens Aktiengesellschaft, "RS2058CJ", <http://www.ok1rr.com/tubes/Siemens/RS2058CJ.pdf>
- [12] L. Lin, "LNLS Synchrotron Light Source Parameter List Version3", Laborato'rio Nacional de Luz Sincrotron, Campinas SP, Brazil, 1995.
- [13] Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), "Instruction Manual for RF Power Supply".
- [14] S.Y.(Ron) Hui and H.S.H. Chung, "Resonant and Soft-switching Converters", *Power Electronics Handbook*, California: Elsevier, 2007.
- [15] A.K.S. Bhat and R.L. Zheng, "Analysis and Design of a Three-Phase LCC-Type Resonant Converter", *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, Vol.34, No.2, April 1998, pp.508-518.
- [16] "PSIM Professional 7.1.2- stand alone version", Powersim Inc., MA, U.S.A.