

การควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกด้วยฟัซซีลอจิกสำหรับระบบถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย Fuzzy Logic-Based Output Voltage Regulation for Wireless Power Transfer Systems

อานนท์ ศรีสุข พิรณัฐ ทนจิต ณัชพิชญ์นันท์ ปิยะนันท์ โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง และ กันต์ วุฒิพฤษฯ*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

kan.v@cit.kmutnb.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกของระบบการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่มีโครงสร้างแบบอนุกรม - อนุกรม โดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก แรงดันไฟฟ้าขาออกถูกวัดโดยตรงเพื่อเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ค่าความคลาดเคลื่อนและอัตราการเปลี่ยนแปลงความคลาดเคลื่อนถูกใช้เป็นอินพุตของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก โดยมีเอาต์พุตเป็นค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุมสำหรับควบคุมวงจรแปลงผันกำลัง ซึ่งทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าขาออกสอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ผลการจำลองสถานการณ์ภายใต้สภาวะที่โหลดเปลี่ยนแปลงแสดงให้เห็นว่าวิธีการควบคุมที่นำเสนอสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกได้และให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ตัวควบคุมแบบพีโอ

คำสำคัญ: การส่งพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย, การควบคุมด้วยฟัซซีลอจิก, วงจรแปลงผันแบบบัค

Abstract

This paper presents a voltage regulation strategy for wireless power transfer with a series-series topology using a fuzzy logic controller. The output voltage is directly measured and compared with a reference voltage. The error value and error rate change are used as inputs to the fuzzy logic controller. The controller generates the rate of change of the control signal, which regulates the power converter to adjust the primary-side voltage until the output voltage corresponds to the reference voltage. The simulation results under load variation conditions demonstrate that the proposed control method can regulate the output voltage and provide superior performance compared to conventional PI controllers.

Keywords: wireless power transfer, fuzzy logic controller, buck converter

1. บทนำ

เทคนิคการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย (Wireless Power Transfer: WPT) ได้รับความสนใจอย่างมากและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เทคโนโลยีนี้ช่วยให้สามารถส่งพลังงานจากต้นทางไปยังโหลดได้โดยไม่ต้องสัมผัสกันโดยตรงผ่านสนามแม่เหล็ก ซึ่งเพิ่มความปลอดภัยและสะดวกมากกว่าการเสียบปลั๊กแบบทั่วไป รวมถึงการบำรุงรักษาที่ต่ำ เทคโนโลยีนี้ถูกนำไปใช้สำเร็จในงานต่าง ๆ เช่น ระบบขนส่งสาธารณะ เครื่องชาร์จแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า และอุปกรณ์ฝังในการแพทย์

ระบบ WPT แบบทั่วไปจะมีการชดเชยค่าปฏิกิริยา (Reactive Compensation) ในขดลวดทั้งฝั่งปฐมภูมิและทุติยภูมิเพื่อลดค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (VA) ที่ต้นทางจ่ายและเพิ่มความสามารถในการส่งพลังงาน ตัวเก็บประจุชดเชยอาจถูกต่ออนุกรมหรือขนานกับขดลวดฝั่งปฐมภูมิ ขดลวดฝั่งทุติยภูมิ หรือขดลวดทั้งสองฝั่ง ทำให้เกิดโครงสร้างการชดเชยที่นิยมใช้ด้วยกัน 4 แบบ ได้แก่ อนุกรม-อนุกรม (Series - Series: SS) อนุกรม - ขนาน (Series - Parallel: SP) ขนาน - อนุกรม (Parallel - Series: PS) และ ขนาน - ขนาน (Parallel - Parallel: PP)[1] การเลือกโครงสร้างดังกล่าวขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและข้อกำหนดทางวิศวกรรม เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าขาออกของระบบ WPT คงที่จำเป็นต้องอาศัยการควบคุมร่วมกับวงจรแปลงผันกำลัง ด้วยเหตุนี้จึงได้มีงานวิจัยที่เสนอการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกของระบบ WPT หลายวิธี[2-3] ซึ่งดำเนินการได้โดยควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังที่เชื่อมต่อด้านปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ ตัวควบคุมแบบพีโอ (PI) หรือพีไอดี (PID) เป็นตัวควบคุมที่ถูกใช้อย่างแพร่หลาย เพราะโครงสร้างตัวควบคุมมีความเรียบง่ายและสามารถจัดค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวได้ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดเมื่อนำมาใช้ร่วมกับระบบที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ประสิทธิภาพการควบคุมขึ้นอยู่กับกรอกแบบพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

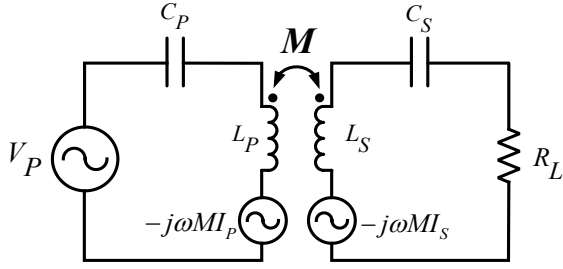
ในบทความนี้เสนอการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกของระบบ WPT แบบ SS โดยได้นำตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic control: FLC) มาประยุกต์ใช้ ตัวควบคุมนี้มีข้อได้เปรียบที่สามารถทำงานได้ดีกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ไม่ต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน การออกแบบอาศัยความรู้และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ โปรแกรม MATLAB/Simulink ถูกใช้จำลองสถานการณ์และประเมินผลภายใต้เงื่อนไขที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด เพื่อยืนยันความถูกต้องและประสิทธิภาพการควบคุมของวิธีการที่นำเสนอ นอกจากนี้ยังได้มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการควบคุมระหว่างที่นำเสนอกับตัวควบคุมแบบพีโอ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการออกแบบ

2.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

วงจรสมมูลของระบบชดเชยแบบอนุกรม-อนุกรม (Series-Series: SS) แสดงในรูปที่ 1 โดยแบ่งออกเป็นฝั่งปฐมภูมิและฝั่งทุติยภูมิ[4] ฝั่งปฐมภูมิมิแรงดันไฟฟ้าปฐมภูมิ (V_p) ถูกต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ (C_p) และขดลวดฝั่งปฐมภูมิ (L_p) อิมพีแดนซ์ฝั่งปฐมภูมิสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$Z_p = j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} \quad (1)$$



รูปที่ 1 วงจรเทียบเท่าชุดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม - อนุกรม

ขดลวดฟุ้งทุติยภูมิ (L_S) ถูกต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ (C_S) และโหลด (R_L) โดย อิมพีแดนซ์ของฟุ้งทุติยภูมิ คือ

$$Z_s = j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R_L \quad (2)$$

พิจารณาทั้งสองฝั่งของวงจรถูกเชื่อมโยกันด้วยการเหนี่ยวนำร่วมกัน (Mutual Inductance: M) โดยอิมพีแดนซ์ของฟุ้งทุติยภูมิจะถูกสะท้อนกลับมายังฟุ้งปฐมภูมิ ซึ่งสามารถคำนวณอิมพีแดนซ์สะท้อนกลับได้จาก

$$Z_r = \frac{\omega^2 M^2}{Z_s} \quad (3)$$

ดังนั้น อิมพีแดนซ์ขาเข้ารวม (Z_{in}) เขียนได้เป็น

$$Z_{in} = \text{Re}(Z_{in}) + j\text{Im}(Z_{in}) = Z_p + Z_r \quad (4)$$

ระบบ WPT มักออกแบบให้ทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ (ω_0) ที่ทั้งฟุ้งปฐมภูมิและทุติยภูมิ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดและลดค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ต้นทางแหล่งจ่าย ความถี่เรโซแนนซ์สามารถคำนวณได้จาก

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_P C_P}} = \frac{1}{\sqrt{L_S C_S}} \quad (5)$$

ระบบ WPT แบบ SS มีพฤติกรรมกระแสทุติยภูมิไม่ขึ้นอยู่กับโหลด เมื่อทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ (ω_0) โดยค่ากระแสทุติยภูมิ (I_s) ที่สัมพันธ์กับแรงดันในฟุ้งปฐมภูมิ (V_p) ณ ความถี่เรโซแนนซ์สามารถคำนวณได้จาก

$$|I_s|_{\omega=\omega_0} = \frac{V_p}{\omega_0 M} \quad (6)$$

แรงดันทุติยภูมิ (V_s) ณ ความถี่เรโซแนนซ์คำนวณได้จาก

$$V_s = j\omega_0 M I_p \text{ หรือ } V_s = \frac{j\omega_0 M V_p}{Z_p} \quad (7)$$

ส่วนขนาดของแรงดัน $|V_s|$ จะขึ้นอยู่กับ V_p และโหลด R_L และสามารถเขียนได้ดังนี้

$$|V_s|_{\omega=\omega_0} = \frac{R_L V_p}{\omega_0 M} \quad (8)$$

จากสมการที่ (6) ถึง (8) จะเห็นได้ว่ากระแสขาออกที่มีสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าขาออกของระบบ WPT จะขึ้นอยู่กับแรงดันปฐมภูมิ ดังนั้นในบทความนี้จึงได้ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของระบบ WPT โดยตรงเพื่อตรวจสอบความผิดพลาดและปรับแรงดันด้านปฐมภูมิ โดยโครงสร้างของระบบ WPT ในบทความนี้แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง วงจรแปลงผันแบบบัก วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ที่ต่อด้านขดลวดปฐมภูมิ วงจรด้านทุติยภูมิเชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์และตัวเก็บจุลสำหรับกรองแรงดันไฟฟ้าขาออกของระบบ WPT ที่นำเสนอ รายละเอียดการออกแบบการควบคุมด้วยวิธีที่นำเสนอแสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.2

2.2 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกและกฎฟัซซี

ตัวควบคุมลอจิกฟัซซีถูกนำมาใช้ในระบบควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อปรับปรุงการควบคุมแบบดั้งเดิม เช่น ประสิทธิภาพและความแม่นยำที่จำกัด สัญญาณควบคุมของ FLC จะถูกคำนวณผ่าน 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ อินพุต การประมวลผล และเอาต์พุต

การออกแบบฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุต สำหรับระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกของระบบ WPT กำหนดอินพุตของตัวควบคุมฟัซซีจำนวน 2 ตัวแปร ดังนี้

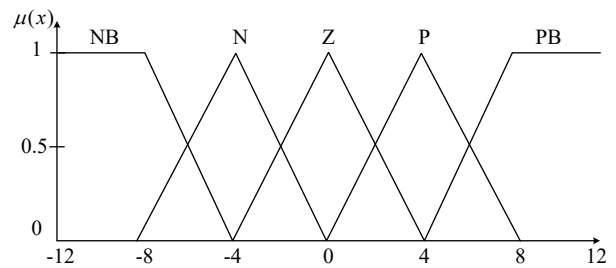
ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าขาออก (Error) เมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

$$\text{Error}(t) = V_o^*(t) - V_o(t) \quad (9)$$

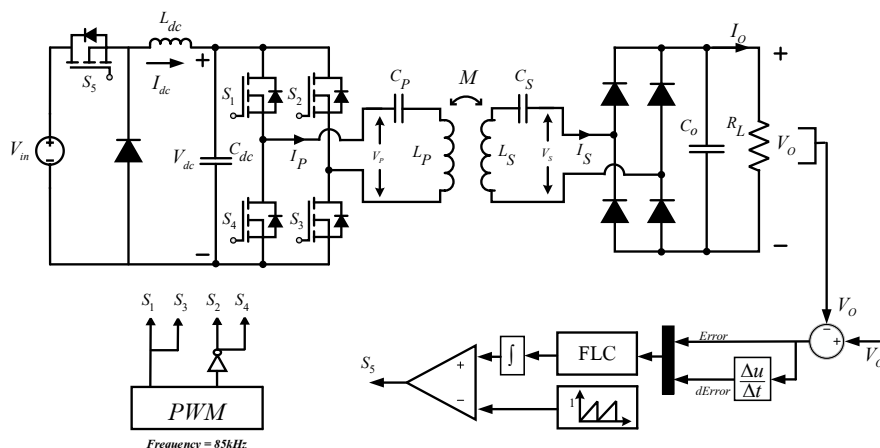
อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงเวลาปัจจุบันกับค่าก่อนหน้า (Error rated: $d\text{Error}$)

$$d\text{Error}(t) = \frac{e(t) - e(t-1)}{\Delta t} \quad (10)$$

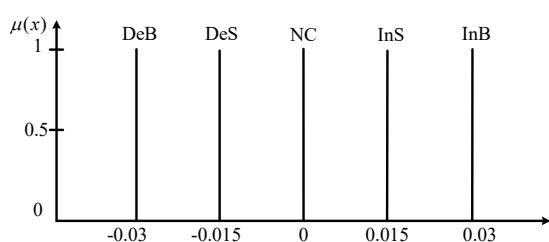
ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตทั้งสองประกอบด้วยรูปสามเหลี่ยมและรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ซึ่งกำหนดให้เป็นแบบสมมาตร 5 ตัวแปรดังแสดงในรูปที่ 3 โดยมีเอาต์พุตของฟัซซีเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุม (Δu) ที่กำหนดให้เป็นฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตเป็นเส้นตรงโทนดังแสดงในรูปที่ 4 และมีกฎของฟัซซีที่ออกแบบแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 3 ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต Error และ $d\text{Error}$



รูปที่ 2 ระบบส่งพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายที่นำเสนอ



รูปที่ 4 ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต Δu

ตารางที่ 1 กฎของฟัซซี่

Input		dError				
		NB	N	Z	P	PB
Error	NB	DeB	DeB	DeS	Nc	InS
	N	DeB	DeS	Nc	InS	InS
	Z	DeS	DeS	Nc	InS	InS
	P	InS	InS	Nc	InS	InB
	PB	InS	InS	InS	InB	InB

3. ผลการจำลอง

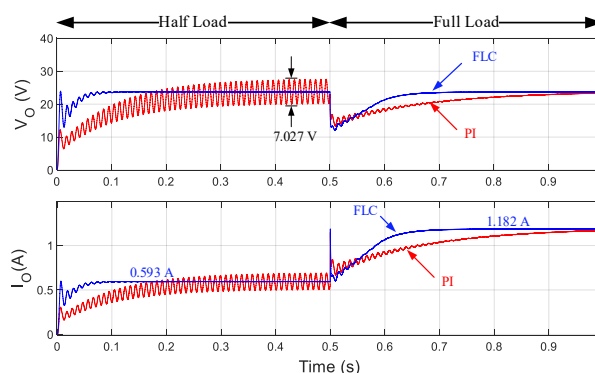
ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองสถานการณ์ของระบบ WPT เพื่อพิสูจน์การวิเคราะห์ทางทฤษฎีและยืนยันประสิทธิภาพการควบคุม โครงสร้างระบบ WPT ตามที่แสดงในรูปที่ 2 ถูกจำลองสถานการณ์โดยใช้พารามิเตอร์ในตารางที่ 2 การควบคุมความถี่คงที่ (Fixed-Frequency Control) ได้ถูกนำมาใช้ควบคุมการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ เพื่อให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ ($f_0 = 85 \text{ kHz}$) ตัวควบคุมแบบฟัซซี่พารามิเตอร์ $K_p = 0.0048$ และ $K_i = 0.15$ การจำลองสถานการณ์กำหนดให้ช่วงเวลาเริ่มต้นระบบ WPT มีการเปลี่ยนโหลดครั้งหนึ่งและเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็นโหลดเต็มพิกัดที่เวลา 0.5 วินาที

ผลการจำลองการตอบสนองของแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออกของระบบ WPT แสดงในรูปที่ 5 โดยเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่และวิธีการที่นำเสนอ พบว่าทั้งสองวิธีสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกให้เข้าสู่ค่าที่อ้างอิง 24 โวลต์ได้ เมื่อโหลดเพิ่มขึ้น

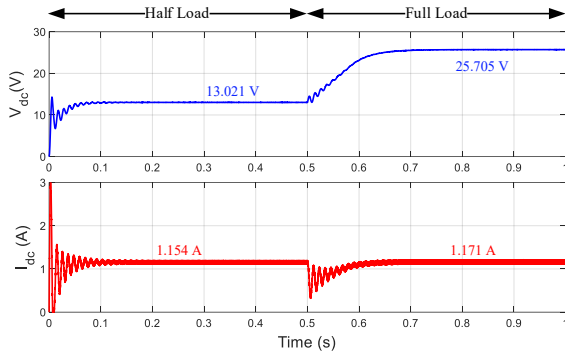
แรงดันไฟฟ้าขาออกจะลดลงชั่วขณะก่อนเพิ่มกลับเข้าสู่ค่าอ้างอิง ในขณะที่กระแสไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 1.182 แอมป์ เมื่อพิจารณาสมรรถนะการควบคุม พบว่า ในช่วงโหลดครึ่งพิกัด การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่เกิดแรงดันไฟฟ้าขาออกในสภาวะคงตัวมีการแกว่งไกวราว 7.02 โวลต์ ในขณะที่การควบคุมด้วย FLC มีแรงดันไฟฟ้าขาออกมีความราบเรียบ ส่วนการควบคุมในช่วงโหลดเต็มพิกัดทั้งสองวิธีสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่มีการแกว่งไกวของแรงดันไฟฟ้าขาออก ด้านผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงโหลด พบว่า FLC ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวน้อยกว่าตัวควบคุมแบบฟัซซี่

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของระบบ WPT

Parameters	Value	unit
กำลังไฟฟ้าพิกัด	30	W
ความถี่สวิตช์วงจรแปลงผันแบบบัส	25	kHz
แรงดันไฟตรงอินพุต (V_{in})	48	V
ตัวเก็บประจุฝั่งปฐมภูมิ (C_p)	33	nF
ตัวเก็บประจุฝั่งทุติยภูมิ (C_s)	33	nF
ขดลวดเหนี่ยวนำปฐมภูมิ (L_p)	106	μH
ขดลวดเหนี่ยวนำทุติยภูมิ (L_s)	103	μH
ขดลวดเหนี่ยวนำรวม (M)	33	μH



รูปที่ 5 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขาออกเมื่อโหลดเปลี่ยนจากครึ่งพิกัดเป็นเต็มพิกัด

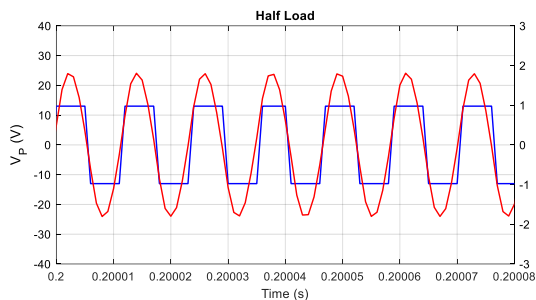


รูปที่ 6 ผลตอบสนองของแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออก
ของวงจรแปลงผันแบบบัค

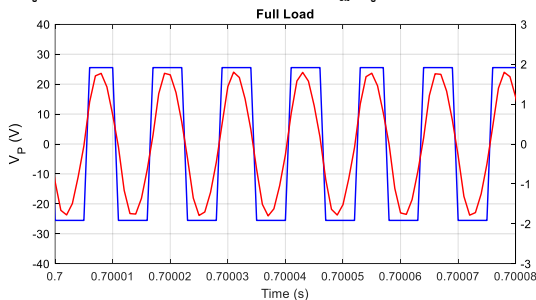
ในรูปที่ 6 แสดงผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัค ซึ่งสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขาเข้าของวงจรฝั่งป้อนภูมิ เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นจากครึ่งพิกัดเป็นเต็มพิกัด พบว่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัค (V_{DC}) เพิ่มขึ้น ในขณะที่กระแสไฟฟ้าขาออกของวงจร (I_{DC}) คงที่ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของระบบ WPT แบบ SS เมื่อ I_S เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มโหลด V_p เพิ่มขึ้นตาม สอดคล้องกับความสัมพันธ์ในสมการที่ (6)

ในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 แสดงผลตอบสนองในสภาวะคงตัวของแรงดันและกระแสไฟฟ้าฝั่งป้อนภูมิ V_p และ I_p ขณะจ่ายโหลดครึ่งพิกัดและเต็มพิกัด โดยจะสังเกตได้ว่า V_p มีรูปคลื่นสัญญาณเป็นสี่เหลี่ยม ตามสัญญาณการสวิตช์และมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ I_p มีรูปสัญญาณเป็นคลื่นไซน์และแอมพลิจูดคงที่

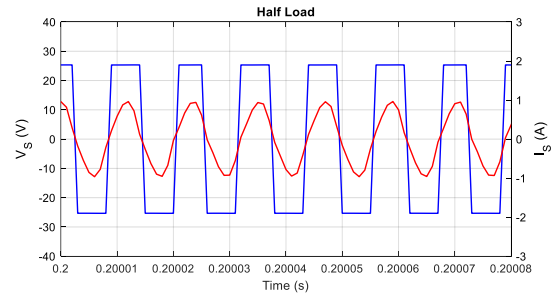
ผลตอบสนองในสภาวะคงตัวของแรงดันและกระแสไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิ V_s และ I_s ขณะจ่ายโหลดครึ่งพิกัดและเต็มพิกัด แสดงในรูปที่ 9 และรูปที่ 10 ตามลำดับ โดยจะสังเกตได้ว่า V_s มีรูปคลื่นสัญญาณเป็นสี่เหลี่ยม และมีขนาดคงที่ ในขณะที่ I_s มีรูปสัญญาณเป็นคลื่นไซน์และแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นตามโหลด



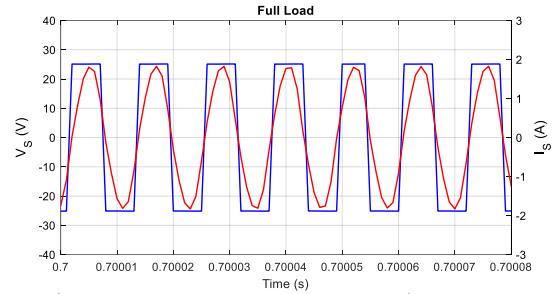
รูปที่ 7 แรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านป้อนภูมิที่โหลดครึ่งพิกัด



รูปที่ 8 แรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านป้อนภูมิที่โหลดเต็มพิกัด



รูปที่ 9 แรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิที่โหลดครึ่งพิกัด



รูปที่ 10 แรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิที่โหลดเต็มพิกัด

4. สรุป

การควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกด้วยตัวควบคุม FLC สำหรับระบบ WPT ที่มีโครงสร้างแบบ SS ได้ถูกนำเสนอในบทความนี้ การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าขาออกของระบบ WPT ที่นำเสนอสามารถควบคุมได้ผ่านการปรับตั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงฝั่งป้อนภูมิ โดยอาศัยวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีความเรียบง่ายต่อการควบคุม ในขณะที่อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สวิตช์คงที่ รายละเอียดขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุม FLC ได้รับการอธิบาย ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า การควบคุมการควบคุมแรงดันฝั่งป้อนภูมิสามารถสะท้อนถึงแรงดันไฟฟ้าขาออกของระบบ WPT ได้ โดยการควบคุมด้วยวิธีที่นำเสนอสามารถให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใด สำหรับงานในอนาคตจะเป็นการสร้างชุดทดสอบ เพื่อยืนยันความถูกต้อง

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Nutwong, A. Sangswang, and S. Naetiladdanon, "Output voltage control of the SP topology IPT system using a primary side controller," 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand, 2016.
- [2] Y. Yang, W. Zhong, S. Kiratipongvoot, S-C. Tan, and S. Y. R. Hui, "Dynamic Improvement of Series-Series Compensated Wireless Power Transfer Systems Using Discrete Sliding Mode Control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, 2018, pp. 6351 – 6360.
- [3] Y. Fei, F. Chen, R. Gao, S. Zhao, C. Tang, and L. Zhao, "Oscillation Frequency Manipulation in Autonomous WPT Systems With Series-Series Compensation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 39, Issue 1, 2024, pp. 58 - 63.
- [4] K. Voottipruex and A. Sangswang, "Dynamic IPT System Operating Under Bifurcation Phenomenon for Reducing Output Power Pulsation," *IEEE Access*, vol. 12, 2024.