

## การออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าตรงจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ บนพื้นฐานวงจรคลาสิอินเวอร์เตอร์แบบขนาน สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำภายในครัวเรือน Design of A Direct AC-AC Converter based on Parallel Class-E Inverter for Domestic induction Cooker

ปฏิพงษ์ เจริญเวียงเหนือ<sup>1</sup>, สุรศักดิ์ ศรีปาน<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

patipong.c@mail.rmutk.ac.th

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

surasak.s@mail.rmutk.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำภายในครัวเรือน โดยใช้วงจรคลาสิอินเวอร์เตอร์ที่มีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุอย่างละหนึ่ง โดยทั่วไปส่วนประกอบหลักของระบบจะประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดบริดจ์ วงจรกรองอีเอ็มไอ วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบเรโซแนนท์ ทำงานภายใต้เงื่อนไขการสวิตช์ขณะแรงดันตกคร่อมสวิตช์เป็นศูนย์ และการสวิตช์ขณะอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมสวิตช์ต่อเวลาเป็นศูนย์ โดยใช้วงจรควบคุมสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม สำหรับสร้างไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่ปานกลางให้กับชุดขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อสร้างความร้อนแก่ภาชนะจากหลักการความร้อนเหนี่ยวนำ ซึ่งในบทความนี้จะนำเสนอแนวความคิดในเรื่องการลดขั้นตอนการทำงานของระบบดังกล่าว รวมไปถึงเสนอแนวทางการออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องอย่างเหมาะสมบนพื้นฐานการแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบไม่ใช้ไดโอดบริดจ์สำหรับวงจรคลาสิอินเวอร์เตอร์ รวมถึงการใช้วงจรกรองอีเอ็มไอและวงจรควบคุมสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มร่วมกัน แนวทางการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ อย่างเหมาะสมบนพื้นฐานวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบเรโซแนนท์คลาสิเพื่อลดความซับซ้อนในการทำงานของระบบ และให้วิธีการวิเคราะห์และออกแบบที่เป็นระบบ และให้ผลลัพธ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง มากกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม โดยสวิตช์กำลังจะทำงานภายใต้เงื่อนไขการสวิตช์ขณะอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมสวิตช์ต่อเวลาเป็นศูนย์ แรงดันด้านเข้า 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 1,200 วัตต์

**คำสำคัญ :** การสวิตช์ขณะแรงดันตกคร่อมเป็นศูนย์, การสวิตช์ขณะอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมสวิตช์ต่อเวลาเป็น, ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ, เตาหุงต้มไฟฟ้าภายในครัวเรือน, วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเรโซแนนท์คลาสิ

## Abstract

This paper proposes a design of a direct AC-AC converter, based on a Class-E inverter with one inductor and one capacitor for a domestic induction cooker. Induction heating systems, are usually the core composed of such a system consists of a full-bridge rectifier, an EMI filter, and a resonant inverter, operated under the zero-voltage switching (ZVS) and the Zero-voltage derivative switching (ZVDS) conditions used to PWM control circuits for generated the medium-frequency alternating electric current flow through the induction coil to heat the vessel from the principle of induction heating. In this study, we propose a concept of reducing the operating procedure of such systems, guidelines for designing relevant parameters based on a direct AC-AC converter with a diode bridge for Class-E inverter circuits, including the use of a common EMI filter and PWM control circuit, guidelines for designing relevant parameters based on Class-E resonant inverter to reduce the complexity of the system and feasible solution than the conventional methodology. The power switch is operated under the Zero-voltage derivative switching (ZVDS) condition, 220 V line RMS voltage, 50 Hz line frequency, and 1,200 W output power.

**Keywords :** Zero-voltage switching, Zero-voltage derivative switching, Induction heating, Domestic cooker, Class-E resonant inverter

## 1. บทนำ (Introduction)

ปัจจุบันการใช้เตาหุงต้มไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในครัวเรือนของผู้บริโภคมีจำนวนมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นบนตัวภาชนะโดยตรง และทำความสะดวกง่าย จึงกลายเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับผู้บริโภคในการนำมาใช้งานภายในห้องครัว ซึ่งเป็นการประยุกต์นำเอาหลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ถูกคิดค้นโดยนักเคมีและนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษนามว่า ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ซึ่งสามารถสร้างความร้อนให้กับภาชนะหุงต้มโดยการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ปานกลางให้กับชุดขดลวดเหนี่ยวนำ ส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กความถี่ปานกลางขึ้นล้อมรอบชุดขดลวดเหนี่ยวนำนั้น เหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลบริเวณก้นภาชนะเป็นวงรอบปิด (Eddy current) และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนและถ่ายเทไปยังน้ำภายในภาชนะหุงต้มต่อไป

โดยทั่วไปวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์สำหรับเตาหุงต้มไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในครัวเรือนสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ตามขนาดของพิกัดกำลังไฟฟ้า กลุ่มแรกจะเป็นแบบสวิตช์กำลังสองตัวคือ วงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ (Half-bridge resonant inverter) สำหรับใช้กับขนาดพิกัด

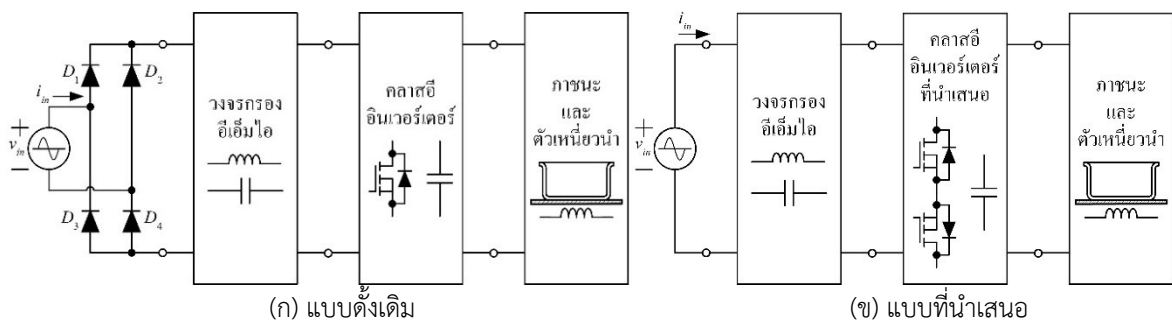
กำลังไฟฟ้าไม่เกิน 4,000 วัตต์ และวงจรควอซีเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ (Quasi resonant inverter) ใช้งานที่พิกัดกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 2,000 วัตต์ ลักษณะเด่นของวงจรดังกล่าวคือ ใช้สวิตช์กำลังเพียงหนึ่งตัว รวมถึงจำนวนวงจรขั้วนำสวิตช์น้อยกว่า ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตต่ำ โดยจะทำงานในย่านความถี่ปานกลางระหว่าง 20 - 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ในส่วนของรูปแบบโครงข่ายโหลด (Load network model) ง่ายที่นิยมใช้ในการออกแบบเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำคือตัวเหนี่ยวนำสมมูล  $L_s$  ของชุดขดลวดเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับโหลดความต้านทานสมมูล  $R_s$  ของภาชนะ (A series-resonant load network) [1] ต่อมาจึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (A direct AC-AC converter) ค่าพารามิเตอร์สมมูลของภาชนะหุงต้มและชุดขดลวดเหนี่ยวนำ จะมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อจุดการทำงานของวงจรเรโซแนนท์โดยตรง เช่น แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตช์สูงสุด กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์สูงสุด สำหรับใช้ในการเลือกขนาดพิกัดของสวิตช์กำลังรวมถึงขนาดกำลังไฟฟ้านำออก  $P_o$  ตัวเก็บประจุเรโซแนนท์  $C_r$  และชุดขดลวดเหนี่ยวนำ  $L$  เป็นต้น [2] - [3]

ดังนั้นบทความนี้ จึงได้นำเสนอแนวทางการขนานวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ บนพื้นฐานวงจรคลาสอีอินเวอร์เตอร์ ทำงานภายใต้เงื่อนไขการสวิตช์ขณะแรงดันตกคร่อมสวิตช์เป็นศูนย์ และการสวิตช์ขณะอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมสวิตช์ต่อเวลาเป็นศูนย์ ลดปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไดโอดภายในสวิตช์กำลัง ข้อดีของการออกแบบโดยใช้หลักการดังกล่าว สามารถลดความซับซ้อนในการทำงานของระบบ และกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะนำกระแสของวงจรไดโอดบริดจ์ รวมไปถึงการออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องอย่างเหมาะสมบนพื้นฐานการแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบไม่ใช้ไดโอดบริดจ์ (Bridgeless) สำหรับวงจรคลาสอีอินเวอร์เตอร์ และให้วิธีการวิเคราะห์และออกแบบที่เป็นระบบ ผลลัพธ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง มากกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม โดยวงจรเครื่องต้นแบบทั้งสองชุดจะทำงานที่แรงดันด้านเข้า 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ พิกัดกำลังไฟฟ้า 1,200 วัตต์

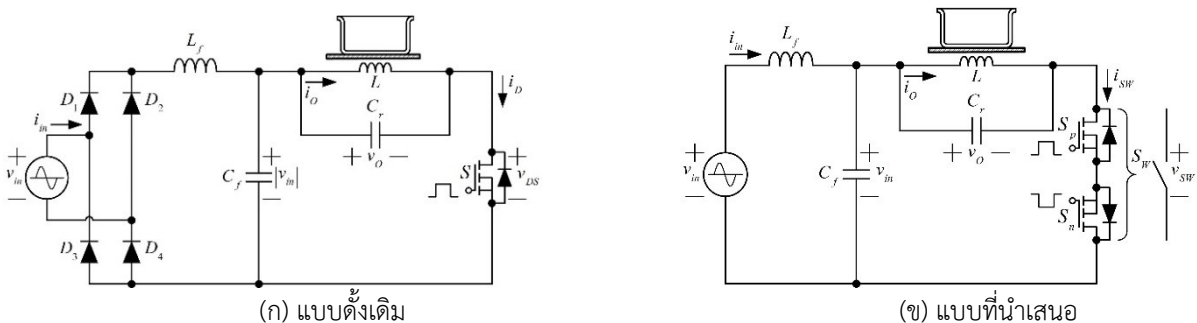
ส่วนประกอบไดอะแกรมการทำงานบนพื้นฐานของเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำภายในครัวเรือนแบบดั้งเดิมแสดงดังภาพที่ 1(ก) ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ วงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์  $D_1 - D_4$  ทำหน้าที่แปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้าเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรกรองอีเอ็มไอ (EMI)  $L_f - C_f$  เพื่อกรองระลอกคลื่นความถี่ปานกลางจากการสวิตช์ และวงจรคลาสอีอินเวอร์เตอร์ ประกอบด้วยสวิตช์กำลัง  $S$  ที่ต่ออนุกรมเข้ากับวงจรเรโซแนนท์แบบขนานที่มีขดลวดเหนี่ยวนำ  $L$  ต่อขนานกับตัวเก็บประจุเรโซแนนท์  $C_r$  เพื่อทำหน้าที่สร้างไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่ปานกลางให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ  $L$  ซึ่งจะแตกต่างกับไดอะแกรมการทำงานที่นำเสนอสำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำนั้น จะตัดวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ออกไป โดยจะเพิ่มจำนวนสวิตช์กำลังอีกหนึ่งตัวดังภาพที่ 1(ข) สำหรับรายละเอียดโครงสร้างและการต่อตัวอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระหว่างวงจรคลาสอีอินเวอร์เตอร์สำหรับเตาหุงต้มไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบดั้งเดิมแสดง กับแบบที่นำเสนอแสดงในภาพที่ 2(ก) และภาพที่ 2(ข) โดยขนาดของค่าพารามิเตอร์  $L_p$  และ  $R_p$  นั้นได้มาจากการหาค่าโดยวิธีการกระตุ้นแทนทดสอบ (Test-Bench) ด้วยความถี่สัญญาณ 33 กิโลเฮิร์ตซ์ ขดลวดเหนี่ยวนำแบบเกลียวกันหอย (Spiral coil)

## 2. วิธีการวิจัย (Methodology)

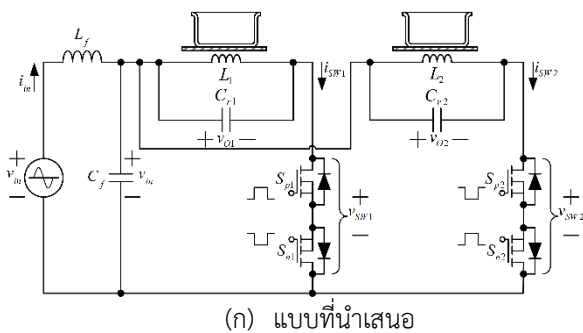
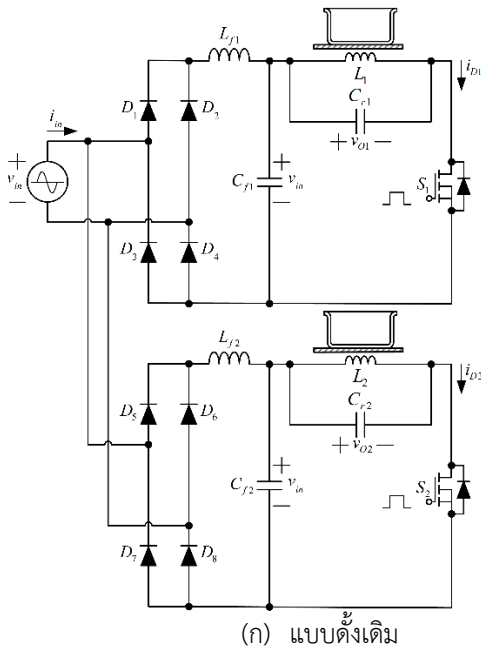
### 2.1 ส่วนประกอบวงจรกำลัง



ภาพที่ 1 เปรียบเทียบไดอะแกรมการทำงานเตาหุงต้มไฟฟ้าเหนี่ยวนำระหว่างแบบดั้งเดิมกับแบบที่นำเสนอ



ภาพที่ 2 เปรียบเทียบวงจรคลาสอีอินเวอร์เตอร์สำหรับเตาหุงต้มไฟฟ้าเหนี่ยวนำระหว่างแบบดั้งเดิมกับแบบที่นำเสนอ



ภาพที่ 3 การขนานเตาหุงต้มเหนี่ยวนำภายในครัวเรือน

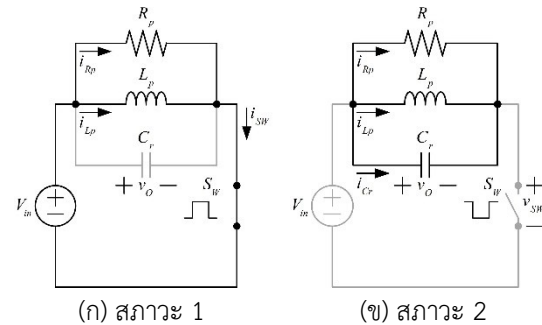
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร ลวดตัวนำทองแดงสำหรับทำลวดตีเกลียว (Litz-wire) เบอร์ 27 AWG จำนวน 18 เส้น แกนเฟอร์ไรท์แบบแกนไอ (I core) จำนวน 7 ชั้น เบอร์ 3C90 ความหนาแผ่นเซรามิก (Ceramic Plate) 4 มิลลิเมตร และภาชนะหุงต้มชนิดสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17 เซนติเมตร สำหรับภาพที่ 3 แสดงการขนานเตาหุงต้มเหนี่ยวนำภายในครัวเรือนระหว่างแบบดั้งเดิมกับแบบที่นำเสนอ

### 2.2 การวิเคราะห์ของกระบวนการที่นำเสนอ

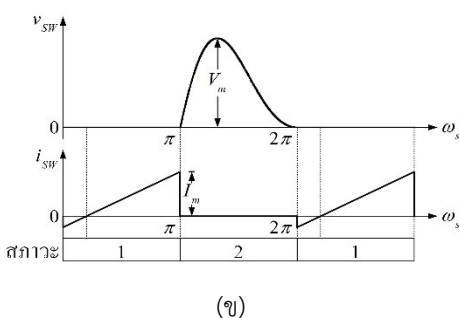
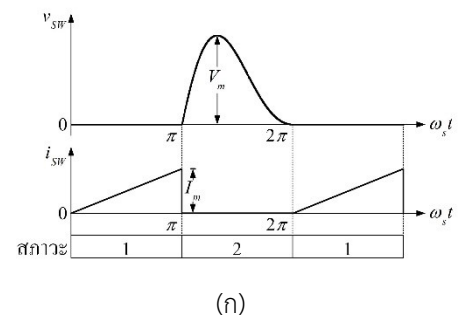
กระบวนการวิเคราะห์และการจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ บนพื้นฐานวงจรคลาสสิกอินเวอร์เตอร์ สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำ โดยใช้โปรแกรม OrCAD/PSpice จะอยู่ภายใต้สมมติฐานต่อไปนี้เพื่อการวิเคราะห์

- 1) กำหนดให้สวิตช์กำลังและไดโอดแฝงภายในสวิตช์ กำลังงานในรูปแบบอุดมคติ
- 2) อุปกรณ์ทุกตัวในโครงข่ายโหลด (Load network model) จะเป็นแบบพาสซีฟ (Passive) และไม่มีอุปกรณ์แฝง (Parasitic component)

วงจรสมมูลคลาสสิกอินเวอร์เตอร์ ร่วมกับภาชนะหุงต้มอย่างง่าย บนพื้นฐานการแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบไม่ใช้ไดโอดบริดจ์ (Bridgeless) สามารถแบ่งสภาวะการทำงานออกเป็น 2 สภาวะ คือสวิตช์กำลังนำกระแสไฟฟ้างานที่ 4(ก) และหยุดนำกระแสไฟฟ้าในภาพที่ 4(ข) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตช์กำลัง  $v_{SW}$  และกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์กำลัง  $i_{SW}$  ในส่วนแสดงการสวิตช์ขณะแรงดันตกคร่อมสวิตช์เป็นศูนย์ (Zero-voltage switching, ZVS) ของการสวิตช์ขณะอัตราการเปลี่ยนแปลง

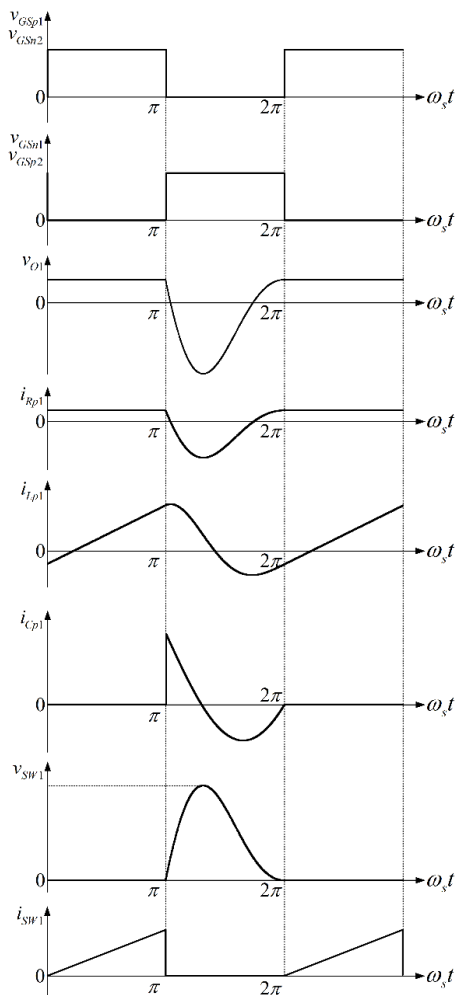


ภาพที่ 4 สภาวะการทำงานเตาหุงต้มเหนี่ยวนำ

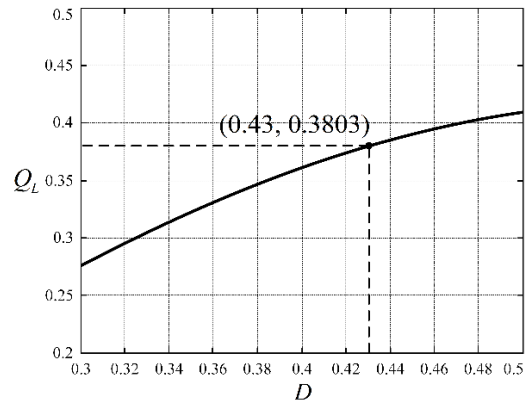


ภาพที่ 5 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม และกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์กำลังบริเวณจุดยอดด้านไฟบวก  $v_{in}$

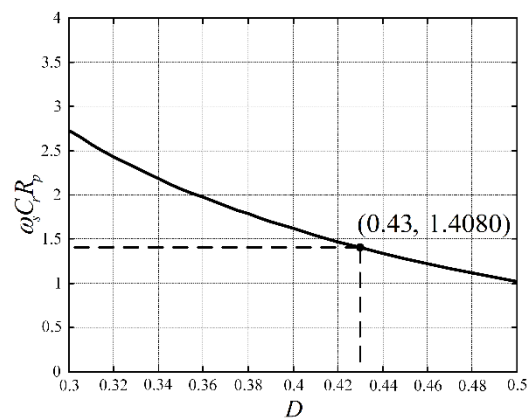
แรงดันตกคร่อมสวิตช์ต่อเวลาเป็นศูนย์ (Zero-voltage derivative switching, ZVDS) แสดงดังภาพที่ 5(ก) และภาพที่ 5(ข) ลักษณะรูปคลื่นกระแสและแรงดันวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบเรโซแนนท์คลาสอี ในแต่ละช่วงสภาวะการทำงานแสดงในภาพที่ 6 จากการคำนวณค่าพารามิเตอร์และอุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรม OrCAD/PSpice ดังตารางที่ 1 สามารถคำนวณค่าตัวประกอบคุณภาพ  $Q_L$  ได้จาก  $\omega_s L_p / R_p$  แทนค่าลงในสมการจะได้  $2\pi \times 33 \times 10^3 \times 113 \times 10^{-6} / 61 = 0.3841$  ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงค่าวิญจักรงาน  $D$  เท่ากับ 0.43 โดยที่ค่า  $C_r$  จะมีขนาดเท่ากับ  $1.4080 / \omega_s R_p$  และ  $P_o$  เท่ากับ  $1.5272 V_{in}^2 / R_p$  ดังนั้นขนาดของตัวเก็บประจุเรโซแนนท์  $C_{r1}$  และ  $C_{r2}$  คือ 111.32 นาโนฟารัด โดย  $P_{o1}$  และ  $P_{o2}$  เท่ากับ 1,211.75 วัตต์ ตามลำดับ [4]



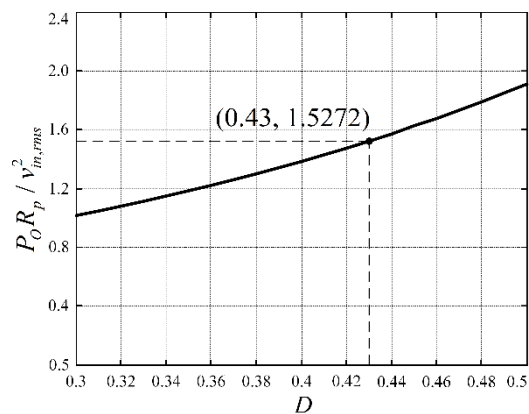
ภาพที่ 6 ลักษณะรูปคลื่นของกระแสและแรงดันในแต่ละช่วงสภาวะการทำงานของวงจรเรโซแนนท์แบบขนาน  $R_p - L_p - C_r$



ภาพที่ 7 กราฟเปรียบเทียบค่าระหว่างตัวประกอบคุณภาพ  $Q_L$  และค่าวิญจักรงาน  $D$



ภาพที่ 8 กราฟเปรียบเทียบค่าระหว่าง  $\omega_s C_r R_p$  และค่าวิญจักรงาน  $D$

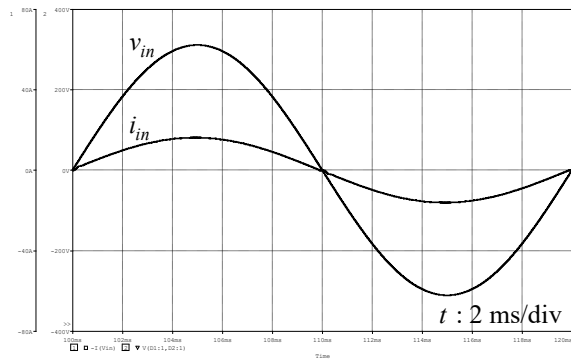


ภาพที่ 9 กราฟเปรียบเทียบค่าระหว่าง  $P_o R_p / V_{in}^2$  และค่าวิญจักรงาน  $D$

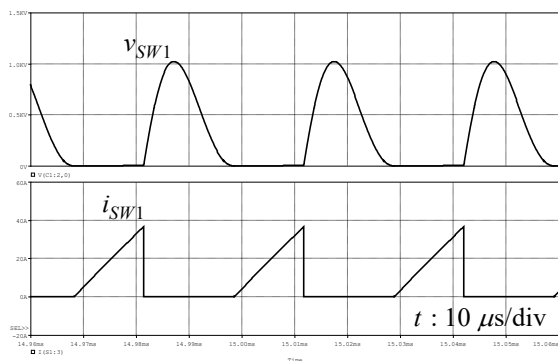
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรที่นำเสนอสำหรับใช้ใน OrCAD/PSpice

พารามิเตอร์	รายละเอียด	พารามิเตอร์	รายละเอียด
$D_1 - D_4$	Dbreak	$L_{p1}, L_{p2}$	107.50 $\mu\text{H}$
$L_f$	500 $\mu\text{H}$	$R_{p1}, R_{p2}$	58.10 $\Omega$
$C_f$	5.6 $\mu\text{F}$	$S_{p1} - S_{n1}, S_{p2} - S_{n2}$	$S_r R_{on} = 0.1 \Omega$
$C_r$	115.48 nF	$t_r, t_f$	100 ns

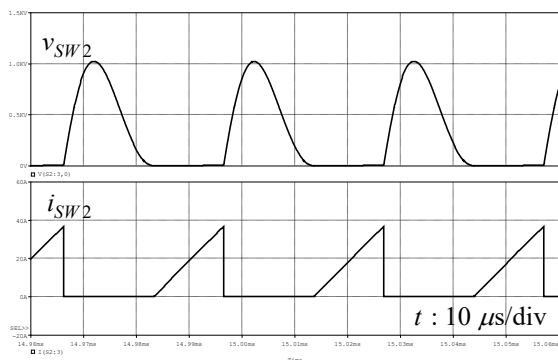
### 3. ผลการวิจัย (Results)



ภาพที่ 10 รูปคลื่นแรงดัน  $v_{in}$  (200V/div) และกระแส  $i_{in}$  (40A/div) ด้านเข้า



ภาพที่ 11 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อม  $v_{SW1}$  (500V/div) และกระแสไหลผ่านสวิตช์กำลัง  $i_{SW1}$  (20A/div) บริเวณจุดยอดด้านไฟบวกของแรงดัน  $v_{in}$



ภาพที่ 12 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อม  $v_{SW2}$  (500V/div) และกระแสไหลผ่านสวิตช์กำลัง  $i_{SW2}$  (20A/div) บริเวณจุดยอดด้านไฟบวกของแรงดัน  $v_{in}$

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าจากการคำนวณกับผลการจำลอง

พารามิเตอร์	ผลการคำนวณ	ผลการจำลอง	ความแตกต่าง
$R_{p1}, R_{p2}$ ( $\Omega$ )	61.00	58.10	-4.87 %
$L_{p1}, L_{p2}$ ( $\mu\text{H}$ )	113.00	107.50	-4.99 %
$C_{r1}, C_{r2}$ (nF)	111.32	115.48	3.67 %
$P_{O1}, P_{O2}$ (W)	1,211.75	1,220.90	0.75 %

### 4. การอภิปราย (Discussion)

ในภาพที่ 10 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเข้า โดยสวิตช์กำลังทำงานภายใต้เงื่อนไขการสวิตช์ขณะอัตราการทำงานเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมสวิตช์ต่อเวลาเป็น (ZVDS) บริเวณจุดยอดด้านไฟบวกของแรงดัน  $v_{in}$  ของแต่ละชุดแสดงดังภาพที่ 11 และ 12 ตามลำดับ ซึ่งกำลังไฟฟ้านำเข้า  $P_{in}$  ที่ได้คือ 2,505.4 วัตต์ โดยที่ กำลังไฟฟ้านำออก  $P_{O1}$  และ  $P_{O2}$  เท่ากับ 1,220.9 วัตต์ จะได้กำลังไฟฟ้านำออกทั้งหมดเท่ากับ 2,441.8 วัตต์ ในส่วนของการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณกับผลการจำลองแสดงดังตารางที่ 2

### 5. สรุปผล (Conclusion)

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับบนพื้นฐานวงจรคลาสอีอินเวอร์เตอร์แบบขนาน ด้วยการใช้วงจรกรองอีเอ็มไอและวงจรควบคุมสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มร่วมกัน โดยสวิตช์กำลังสามารถทำงานภายใต้เงื่อนไขการสวิตช์ขณะอัตราการทำงานเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมสวิตช์ต่อเวลาเป็นศูนย์ (ZVDS) ประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอเท่ากับ 97 เปอร์เซ็นต์ ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณพบว่าขนาดของค่าพารามิเตอร์จากวิธีการที่นำเสนอมีความสอดคล้องใกล้เคียงกับผลการจำลอง อีกทั้งยังให้วิธีการวิเคราะห์และออกแบบที่เป็นระบบมากกว่าวิธีที่ใช้ในปัจจุบัน

### 6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] J. Acero, J.M. Burdio, L.A. Barragan, D. Navarro, R. Alonso, J. Ramon, F. Monterde, P. Hernandez, S. Llorente, and I. Garde, Mar./Apr. 2010. Domestic induction appliances. IEEE Industry Applications Magazine, vol. 16, no. 2, pp. 39-47.
- [2] C. Ekkaravarodome, P. Charoenwiangnuea, and K. Jirasereamornkul, 2013. The simple temperature control for induction cooker based on Class-E resonant inverter. ECTI Conference, May. 2013, pp. 1-6.
- [3] H. Sarnago, O. Lucía, A. Mediano, and J. M. Burdio, May. 2014. A Class-E direct ac-ac converter with multi cycle modulation for induction heating systems. IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 61, No. 5, pp. 2521-2530.

- [4] สุพรรณณี โพธิ์เงิน, ปฏิพงษ์ เจริญเวียงเหนือ, ไชยรินทร์ อัคร  
วิโรตม, และ กมล จิรเสรีอมรกุล. (2560). แทนทดสอบเตาหุงต้ม  
ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำภายในครัวเรือน สำหรับศึกษาค่าพารามิเตอร์  
ของโหลดแบบเหนี่ยวนำบนพื้นฐานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า  
กระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบเรโซแนนท์คลาสอี. EECON  
40 (น. 1-4). ชลบุรี : ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.