

การออกแบบอินเวอร์เตอร์คลาสดี LLC เรโซแนนซ์ความถี่สูง สำหรับเครื่องต้มน้ำแบบเหนี่ยวนำ

A Design Class D LLC Resonant High Frequency Inverter for Induction Cooker

ไชยยันต์ ทองสงยอด¹, อนุศักดิ์ บิสลาม², อติศักดิ์ นาถกรณกุล¹, อธิษฐา บุญญาอรุณนตรี²
(สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)
²(ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)

Chaiyan Thongsongyod¹, Anusak Bilsalam², Adisak Nartkaranakul¹, Itsda Boonyaroonate²

¹Department of Energy Technology, Faculty of Energy and Materials, Kingmongkut University of Technology Thonburi

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kingmongkut University of Technology Thonburi

126, Bangmod, Tung-Kru, Bangkok 10140, Thailand

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการออกแบบอินเวอร์เตอร์คลาสดี LLC เรโซแนนซ์ความถี่สูง ที่ใช้สำหรับเครื่องต้มน้ำโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำของกระแสไหลวน (Eddy Current) เพื่อทำให้เกิดปรากฏการณ์การเหนี่ยวนำบริเวณรอบๆ ผิวภาชนะต้มน้ำ (Skin Effect) จึงทำให้เกิดความร้อนรอบๆ ภาชนะ วงจรอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง รับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้าขนาด 48 โวลต์จากแบตเตอรี่ที่เชื่อมต่อกับระบบเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ โดยทำงานที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ข้อดีของอินเวอร์เตอร์ที่ได้นำเสนอคือ ประสิทธิภาพสูงเนื่องจากวงจรทำงานบนพื้นฐานการสวิตช์ที่แรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) ทำให้ลดการสูญเสียในขณะที่อินเวอร์เตอร์ทำงาน จากการทดลองสามารถต้มน้ำปริมาณ 0.5 ลิตร ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 6 นาที ที่ค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้า 320 วัตต์ คิดค่าพลังงานไฟฟ้าต่อครั้ง 0.032 กิโลวัตต์ชั่วโมง

คำสำคัญ : อินเวอร์เตอร์คลาสดี LLC เรโซแนนซ์, เครื่องต้มน้ำแบบเหนี่ยวนำ, สวิตช์ที่แรงดันเป็นศูนย์

Abstract

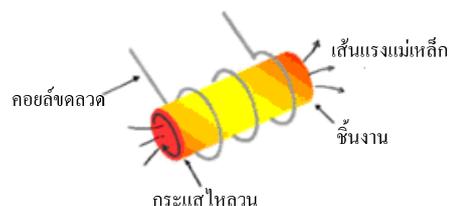
This paper presents the design and implement of class D LLC resonant inverter for induction cooker by using induction heating. The induction will occur at the surface of the vessel (skin effect) and it's heating up. The inverter converts DC to AC high frequency. Receiving input from 48 V battery which is connected to the photovoltaic solar system. It operates at 100 kHz. An advantage of this converter is high efficiency due to the zero voltage switching (ZVS), decreasing the loss while the inverter is operated. From the experiment, 0.5 litre of water can be heated up at the temperature of 75 °C in 7 minutes with maximum

power input rating of 320 watts, using 0.032 kWh of electric energy.

Key words : Class D LLC Resonant Inverter, Induction Cooker, Zero Voltage Switching (ZVS)

1. บทนำ

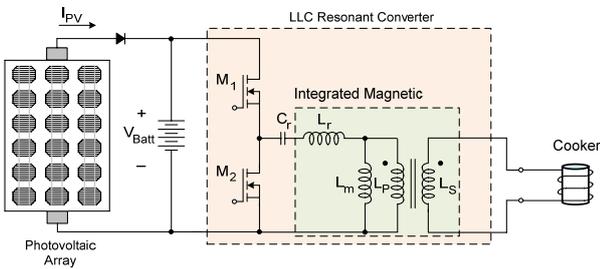
การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง เป็นที่นิยมและแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมและเครื่องใช้ไฟฟ้าหลายประเภท เนื่องจากสามารถให้ความร้อนโดยตรงหรือเป็นการให้ความร้อนเฉพาะที่ นอกจากนี้สามารถหยุดหรือให้ความร้อนกับชิ้นงานได้ตลอดเวลาเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเก่าที่เป็นการให้ความร้อนจากเชื้อเพลิงที่จะต้องเดินเครื่องให้ทำงานตลอดเวลาเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน และต้นทุนในการผลิตสูงขึ้น หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงเกิดจากการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปในขดลวดคอยล์ จึงก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลวน (Eddy Current) ที่คอยล์ขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ เมื่อชิ้นงานที่ต้องการให้ความร้อนอยู่ในขดลวดคอยล์สนามแม่เหล็กจะตัดผ่านชิ้นงานทำให้เกิด Eddy Current ที่ชิ้นงานและทำให้เกิดความร้อนที่บริเวณชิ้นงานได้ดังแสดงในรูปที่ 1 ความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดอย่างไม่สม่ำเสมอตามพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน ยิ่งความถี่ที่ใช้มีค่าสูงขึ้นจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลวนบริเวณผิวมากยิ่งขึ้นซึ่งจะเรียกว่า Skin effect [1]



รูปที่ 1. การเกิดกระแสไหลวนบริเวณรอบๆ ชิ้นงาน [7]

งานวิจัย[2]-[3] มีการเสนอวงจรฮาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (Current Fed Half-bridge Inverter : CFHI) สำหรับงานการเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยเป็นการให้ความร้อนที่ลูกกลิ้ง(Fixing Roller) แล้วนำชิ้นงานที่ต้องการให้ความร้อนไหลผ่านลูกกลิ้ง เหมาะสำหรับงานให้ความร้อนที่ผิว ต่อมา [4] ได้มีการนำเสนอวงจรฟูลบริดจ์ (Full-bridge Inverter : FI) เป็นการให้ความร้อนสำหรับงานท่ออลูมิเนียม โดยกำลังงานด้านออกสามารถเปลี่ยนแปลงได้จากกรับปรับมุมนำกระแสของวงจร

ในงานวิจัยฉบับนี้เสนอการออกแบบอินเวอร์เตอร์คลาสดี LLC เรโซแนนซ์ความถี่สูง ที่ใช้สำหรับการต้มน้ำโดยที่วงจรอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง จะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้าขนาด 48 โวลต์จากแบตเตอรี่ที่เชื่อมต่อกับระบบเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ดังรูปที่ 2 โดยวงจรที่ได้นำเสนอนี้จะทำงานบนพื้นฐานการสวิตช์ที่แรงดันเป็นศูนย์(Zero Voltage Switching : ZVS) เป็นผลให้วงจรมีประสิทธิภาพสูง



รูปที่ 2 วงจรอินเวอร์เตอร์คลาสดีที่ได้นำเสนอ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic Cells : PV Cells)

ตารางที่ 1 คุณลักษณะเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์

พารามิเตอร์	1 แผง
รุ่น	GL 136
ชนิดเซลล์	Mono crystalline Silicon Cells : MSC
จำนวนเซลล์/แผง	36 Cell
Short Circuit Current : I_{sc}	3.27 Amps
Open Circuit Voltage : V_{oc}	21.8 Volt

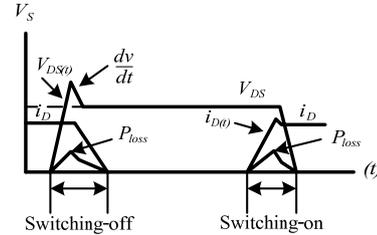
หมายเหตุ : ปริมาณแสง 1000 W/m^2 อุณหภูมิของเซลล์ 25°C
Air mass 1.5 จากบริษัทผู้ผลิต

ในงานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้ แผงเซลล์ยี่ห้อ GL136/M55 ของผู้ผลิต (SHOWA ARCO SOLAR) มีข้อมูลดังตารางที่ 1 และได้นำแผงเซลล์มาต่ออนุกรม-ขนาน แบบอาร์เรย์ (PV Array) เพื่อใช้สำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 5 ตามลำดับ

2.2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง-ไฟสลับแบบคลาสดี

วงจรแปลงผันกำลังงานไฟฟ้าโดยทั่วไปที่ใช้หลักการควบคุมความกว้างพัลส์ (Pulse With Modulate : PWM) สิ่งสำคัญที่ควรคำนึงคือการสูญเสียที่สวิตช์ไวงานโดยที่ค่าการสูญเสียมีด้วยกัน 2 ส่วนคือ

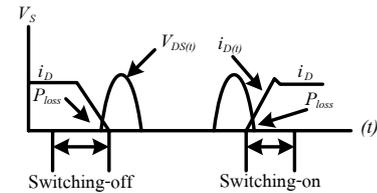
- 1). การสูญเสียขณะนำกระแส (Conduction loss)
 - 2). การสูญเสียขณะเริ่ม-หยุดนำกระแส (Switching loss)
- การสูญเสียขณะเริ่ม-หยุดนำกระแสเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3 จะเห็นว่าในขณะที่สวิตช์หยุดนำกระแส กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์จะค่อยๆ ลดลง ในขณะที่เดียวกันแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้กระแสและแรงดันตัดผ่านกัน ทำให้เกิดพื้นที่ของกำลังไฟฟ้า (Power Switching loss) และในขณะที่สวิตช์นำกระแสจะเกิดขึ้นในทำนองเดียวกัน



รูปที่ 3 การเริ่ม-หยุดนำกระแสของสวิตช์ด้วยการควบคุมแบบPWM [8]

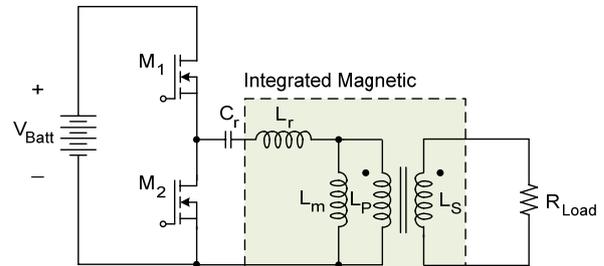
เมื่อความถี่สวิตช์ที่ใช้งานมีความถี่สูงขึ้นทำให้การสูญเสียในส่วนนี้มีค่ามากขึ้นตามไปด้วยในการแก้ไขปัญหาในส่วนนี้กระทำได้ โดยใช้หลักการ Soft Switch ที่มีด้วยกัน 2 แบบ

- 1). การสวิตช์ขณะกระแสเป็นศูนย์ (Zero Current Switch : ZCS)
- 2). การสวิตช์ขณะแรงดันเป็นศูนย์ (Zero Voltage Switch : ZVS)



รูปที่ 4 การเริ่ม-หยุดนำกระแสของสวิตช์ด้วยวิธี Soft Switching [8]

รูปที่ 4 แสดงถึงหลักการ Soft Switching จะสังเกตได้ว่าเมื่อสวิตช์หยุดนำกระแส กระแสที่ไหลผ่านที่ตัวสวิตช์จะค่อยๆ ลดลงมาถึงศูนย์ในเวลาเดียวกันแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์จะค่อยๆ เกิดขึ้นเป็นผลทำให้พื้นที่ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น



รูปที่ 5 วงจรอินเวอร์เตอร์คลาสดี LLC เรโซแนนซ์

จากรูปที่ 5 วงจรอินเวอร์เตอร์คลาสดีประกอบด้วย สวิตช์ไวงาน (Mofset) M1 และ M2 ตัวเก็บประจุ C_r หม้อแปลงในวงจรจะประกอบด้วย ขดลวดต้านเหนี่ยวนำ L_p ขดลวดต้านเหนี่ยวนำ L_s ส่วนตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล L_r และตัวเหนี่ยวนำสร้างสนามแม่เหล็ก L_m ทั้งสองตัวจะเป็นตัวเหนี่ยวนำแฝงภายในหม้อแปลง โดยการทำงานของสวิตช์

โรงงานทั้งสองตัวจะทำงานสลับกันเพื่อให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เข้าขดลวดต้านทุติยภูมิเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

3. การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์

ตารางที่ 2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์

แรงดันขาเข้าจากแบตเตอรี่ (V_{BATT})	48 V _{DC}
แรงดันขาออก (V_{SEC})	10 V _{RMS}
พิกัดกำลังไฟฟ้าขาออก (P_{out})	300 W
ความถี่สวิตช์ไวงาน (f_o)	100 kHz

จากตารางที่ 1 คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุ (C_r) จากสมการ

$$C_r = \frac{1}{(2\pi \cdot f_o)^2 \cdot L_r} \quad (1)$$

ค่าตัวเหนี่ยวนำ (L_r) ได้มาจากการวัดค่าตัวเหนี่ยวนำของขดลวดต้านปฐมภูมิ ส่วนขดลวดต้านทุติยภูมิให้ลวดวงจร โดยจำนวนรอบการพันขดลวดต้านปฐมภูมิ (N_p) จำนวน 6 รอบ ด้านทุติยภูมิ (N_s) จำนวน 3 รอบ คิดเป็นอัตราส่วนการแปลง 2:1 ซึ่งเป็นหม้อแปลงแบบลดแรงดันไฟฟ้า แต่ให้กระแสไฟฟ้าที่ด้านขาออกที่สูง

หาค่าตัวเหนี่ยวนำสร้างสนามแม่เหล็ก (L_m) จากสมการ

$$L_m = L_p - L_r \quad (2)$$

หาค่าประสิทธิภาพของวงจร $\eta(\%)$ จากสมการ

$$\eta = \frac{P_{PRI} - (P_{Core.losses} + P_{Copper.losses})}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3)$$

P_{PRI} คือ กำลังไฟฟ้าที่วัดได้ที่ขดลวดต้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

$P_{Core.losses}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในแกนหม้อแปลง

$P_{Copper.losses}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในขดลวดหม้อแปลง

4. ผลการทดลองของเครื่องต้นแบบ

ผลการทดลองของวงจรในส่วนต่างๆที่ได้จากการทดลองจากวงจรต้นแบบ จะแสดงผลการทดลองด้วยค่าที่วัดได้ในวงจร มีผลการทดลองดังต่อไปนี้

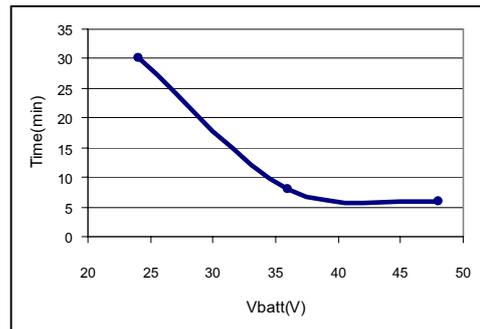
ตารางที่ 3 รายละเอียดของวงจร

อุปกรณ์	รายละเอียด
C_r	340 nF
L_r	6.323 μ H
L_p	32.88 μ H
L_s	4.834 μ H
M_1, M_2	IRFP4710
แกน Ferrite	ชนิด PQ 50/50

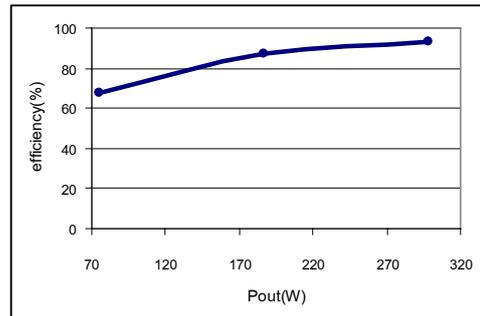
จากการทดสอบกำลังไฟฟ้าสูญเสียแกนเหล็ก ($P_{Core.losses}$) และกำลังไฟฟ้าสูญเสียของขดลวดหม้อแปลง ($P_{Copper.losses}$) มีค่าเท่ากับ 0.32 W และ 1 W ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ผลจากการทดลองที่แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า 24, 36, 48 โวลต์

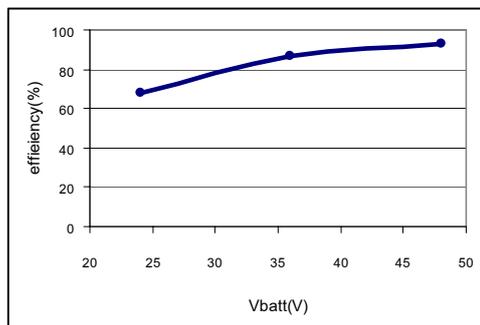
V_{batt} (V)	เวลาดำเนิน (min)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η (%)
24	30	110	74.68	67.89
36	8	214	186.28	87.05
48	6	320	298.68	93.33



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันแบตเตอรี่กับเวลาดำเนินการ

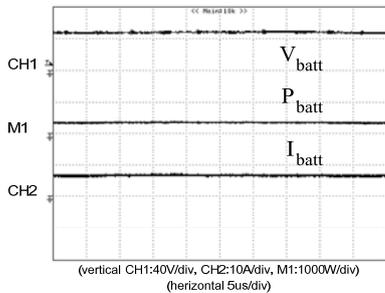


รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าขาออกกับประสิทธิภาพ

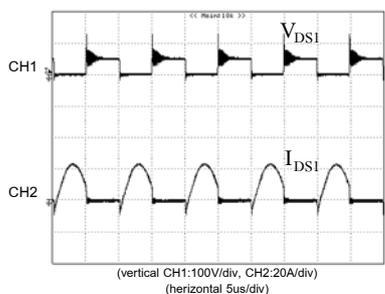


รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันแบตเตอรี่กับประสิทธิภาพ

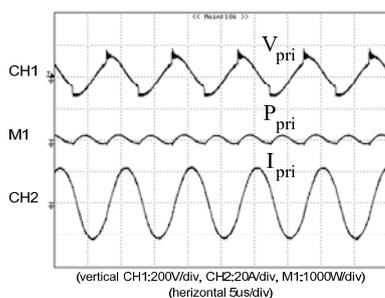
จากผลการทดลองในตารางที่ 3 จะเห็นได้ชัดว่าที่แรงดันขาเข้า 48 โวลต์ วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ได้นำเสนอจะมีประสิทธิภาพสูงและใช้เวลาในการดำเนินงานที่น้อยกว่าดังรูปที่ 6 และ 8 ตามลำดับ



รูปที่ 9 รูปคลื่นแรงดัน V_{batt} กระแส I_{batt} และกำลังไฟฟ้า P_{batt}



รูปที่ 10 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมสวิตช์ V_{DS1} และกระแสไหลผ่านสวิตช์ I_{DS1} ของสวิตช์ไวจาน M_1



รูปที่ 11 รูปคลื่นแรงดัน V_{pri} กระแส I_{pri} และกำลังไฟฟ้า P_{pri} ด้านขดลวดปฐมภูมิ L_p ของหม้อแปลง

5. สรุปผลการทดลอง

ในผลการทดลองรูปที่ 9 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ด้านเข้าหม้อแปลงความถี่สูงที่เกิดขึ้น เนื่องจากการออกแบบได้ใช้แรงดันด้านเข้าขนาด 48 V ที่ค่อนข้างต่ำ จึงเป็นผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ด้านเข้าหม้อแปลงมีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ทั่วไป ซึ่งเกิดจากกระแสต้านปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าค่อนข้างสูงมาก ในส่วนการออกแบบอินเวอร์เตอร์คลาสดี LLC เรโซแนนซ์ความถี่สูงสำหรับเครื่องต้มน้ำแบบเหนี่ยวนำที่ได้นำเสนอ นั้นสามารถต้มน้ำ 0.5 ลิตร จากอุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียสถึง 75 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 6 นาที โดยใช้พลังงานไฟฟ้าต่อครั้ง 0.032 กิโลวัตต์ชั่วโมง ประหยัดพลังงานลดลง 33%, 22.5% เมื่อเปรียบเทียบกับ [5]และ[6]ตามลำดับ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.กมล จิรเสรีอมรกุล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม ที่กรุณาให้แนวคิด คำปรึกษาและขอขอบคุณ PEMD Lab ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไว้ ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

1. J.Davies and P.Simpson. "Induction Heating Handbook" Mcgraw-Hill Book Company (UK) Limited. 1979
2. Laknath Gamage และคณะ "Series Resonant HighFrequency Inverter with Zero Current Switching Pulse Density Modulation for Induction Heated Load" IEEE Conf 2003, pp. 1739-1744
3. Hisayuki Sugimura และคณะ "Series Load Resonant Tank High Frequency Inverter with ZCS-PDM Contro Schemne for Induction-Heated Fixing Roller" IEEE Conf 2005, pp.756-761
4. Saichol Chudjuarjeen และคณะ "LLC Resonant Inverter for Induction Heating with Asymmetrical Voltage-Cancellation Control" IEEE Conf 2009, pp. 2874-2877
5. เจนณรงค์ เสนามนตรี และ วิริยะ พิเศษจำเริญ "การวิเคราะห์เรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่มี การควบคุมแรงดันเอาต์พุตเพื่อใช้ในงานเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง" EECON-30, pp. 385-388
6. อัจฉรา พิเศษจำเริญ และ วิริยะ พิเศษจำเริญ "การแปลงผันตรงจากเอชี่ 50 Hzเป็นเอชี่ 30 kHz ของ วงจรเรโซแนนซ์คอนเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์เพื่อใช้ในงานเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง" EECON-30, pp. 512-515
7. Mingxiang Chen และคณะ "Localized Induction Heating for Wafer Level Packaging" International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, IEEE Conf 2009, pp. 225-229
8. Ying-Chun Chuang and Yu-Lung Ke "A Novel High-Efficiency Battery Charger With a Buck Zero-Voltage-Switching Resonant Converter" IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 22, NO. 4, DECEMBER 2007, pp. 848-854