

## เตาหุงต้มไฟฟ้าสำหรับครัวเรือนยุคใหม่ จากหลักการความร้อนเหนี่ยวนำ ส่วนวัฏกรรมเพื่อการประหยัดพลังงาน

ไชนรินทร์ อัครวโรดม\*

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวคิดเรื่องรูปแบบการสร้างความร้อนจากหลักการความร้อนเหนี่ยวนำ สำหรับเตาหุงต้มไฟฟ้า เนื่องจากหลักการดังกล่าว เริ่มมีบทบาทในภาคครัวเรือนยุคใหม่มากขึ้น โดยจะแนะนำหลักการสร้างความร้อนจากหลักการความร้อนเหนี่ยวนำ ส่วนประกอบพื้นฐาน วงจรกำลังรูปแบบต่างๆ รวมไปถึงเสนอแนวทางการออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องอย่างเหมาะสมสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบใหม่ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้น การเลือกพิกัดของอุปกรณ์ทำได้ง่ายขึ้น เพิ่มความน่าสนใจสำหรับการแข่งขันเชิงพาณิชย์

**คำสำคัญ:** เตาหุงต้มไฟฟ้า, เตาหุงต้มไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ, ความร้อนเหนี่ยวนำ, วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบเรโซแนนท์

---

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องวัดและอิเล็กทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\* ผู้ติดต่อ อีเมล: chainarine@kmutnb.ac.th รับเมื่อ 4 ตุลาคม 2555 ตอบรับเมื่อ 9 พฤศจิกายน 2555

## **Electric Cooker for the Modern Household From the Principle of Induction Heating to Innovation for Energy Saving**

**Chainarin Ekkaravarodome**

### **Abstract**

This article presents the new concept of the induction heating principle for electric cooker application. In recent years, induction heating principle has played a very important role in the modern household. Introductions of the basic principle of induction heating, power system diagram and topologies of power circuit are presented. In order to achieve upon this new concept, the induction cooker's parameters of power circuit need to be designed properly. Details of design of this induction cooker's components are recommended. High efficiency and easier to design are the key advantages of the proposed method that make this electric cooker, an attractive for commercial applications.

**Keywords :** Electric cooker, Induction cooker, Induction heating, DC-AC resonant inverter

---

Department of Instrumentation and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North  
Bangkok

\* Corresponding author, E-mail: chainarine@kmutnb.ac.th Received 4 October 2012, Accepted 9 November 2012

## 1. บทนำ

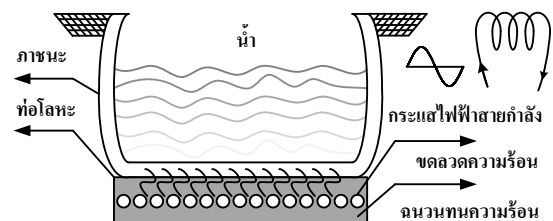
ปัจจุบันเตาหุงต้มไฟฟ้าที่ได้รับความนิยม สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ตามวิธีการสร้างความร้อนให้แก่ภาชนะหุงต้ม ประเภทแรกเป็นที่รู้จักกันดีเนื่องจากเป็นเตาหุงต้มไฟฟ้าในยุคแรกๆ คือ เตาหุงต้มไฟฟ้าแบบขดลวดความร้อน [1] สร้างความร้อนจากหลักการความต้านทานไฟฟ้า (resistance heating) โดยขดลวดความร้อนทำจากลวดนิโครมบรรจุในท่อโลหะที่มีผงแมกนีเซียมออกไซด์ ถูกหล่อติดอยู่บริเวณก้นภาชนะ เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าความถี่สายกำลัง 50 เฮิร์ตซ์ ผ่านขดลวดทำให้เกิดความร้อนขึ้นและอาศัยการนำและการแผ่รังสีความร้อนให้แก่ภาชนะหุงต้ม แสดงดังรูปที่ 1

ข้อดีของเตาหุงต้มดังกล่าวคือ ควบคุมง่าย วงจรไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการวิเคราะห์และออกแบบ อย่างไรก็ตาม เตาหุงต้มแบบขดลวดความร้อนมีข้อเสียอยู่หลายประการ เช่น การสูญเสียความร้อนจากการนำความร้อนสูง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำความร้อนต่ำ ทำความสะอาดยาก เนื่องจากภาชนะและขดลวดความร้อนเป็นชิ้นเดียวกัน การเสื่อมสภาพของฉนวนเกิดขึ้นได้ง่าย เป็นภัยอันตรายต่อผู้ใช้โดยตรง ฯลฯ

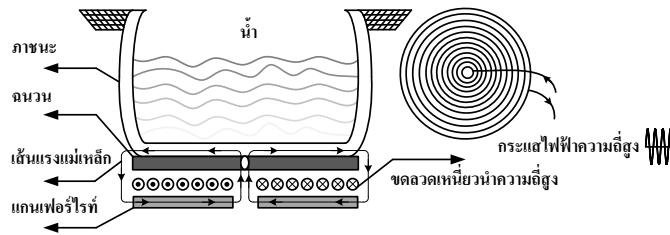
การพัฒนาเตาหุงต้มไฟฟ้าประเภทที่สองจึงเกิดขึ้น คือ เตาหุงต้มไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ สร้างความร้อนโดย วิธีการความร้อนเหนี่ยวนำ (induction heating, IH) [2] เป็นการประยุกต์ใช้หลักการพื้นฐานที่ถูกค้นพบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2374 โดยนักเคมีและนักฟิสิกส์ ชาวอังกฤษ นามว่า ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) คือ หลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือ “การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดได้ ในทางกลับกัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดก็สามารถเหนี่ยวนำให้ขดลวดเกิดสนามแม่เหล็กได้เช่นกัน” กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เรียกว่า กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งเกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ รายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อถัดไป หลักการดังกล่าวก่อให้เกิดสิ่งประดิษฐ์ที่มี

ประโยชน์ต่อมวลมนุษยชาติมากมาย เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า และอุปกรณ์ไร้สายในระบบโทรคมนาคม เป็นต้น จึงได้รับการขนานนามว่า บิดาแห่งไฟฟ้า (father of electricity) หลังจากนั้นนักวิทยาศาสตร์รุ่นหลังยังค้นพบว่า การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าอีกชนิดหนึ่งซึ่งไม่เป็นที่ต้องการไหลบริเวณผิวของโลหะและส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในรูปของความร้อน โดยเรียกกระแสไฟฟ้างี้ว่า กระแสไหลวน (eddy current) อย่างไรก็ตาม ในอดีตกระแสไหลวนถูกมองเป็นสิ่งชั่วร้ายทำให้ระบบสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ แต่ในปัจจุบันกระแสไหลวนถูกประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์และกลับกลายเป็นนวัตกรรมเพื่อการประหยัดพลังงานใหม่ๆ เช่น เครื่องชุบแข็ง ทูบขึ้นรูป เชื่อม และหลอมโลหะ เป็นต้น

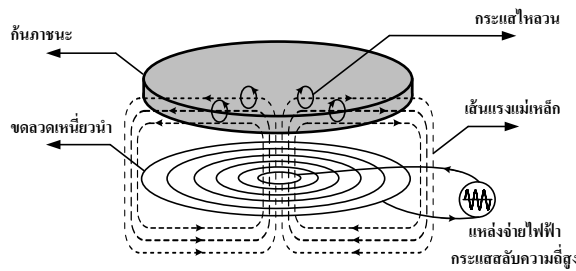
หลักการสร้างความร้อนแบบความร้อนเหนี่ยวนำ มีข้อดีหลายประการ เช่น ประหยัดพลังงาน เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงานอย่างรวดเร็ว สม่าเสมอ กำหนดความร้อนเฉพาะจุดได้ ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ชิ้นงานกับแหล่งพลังงานไม่สัมผัสกัน โดยตรงจึงปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน ฯลฯ เนื่องจากความเหมาะสมหลายประการ หลักการดังกล่าวจึงไม่ถูกจำกัดการใช้งาน เพียงภาคอุตสาหกรรมเท่านั้น ปัจจุบันเทคโนโลยีการสร้างความร้อนแบบความร้อนเหนี่ยวนำ เริ่มมีบทบาทในภาคครัวเรือนมากขึ้น เห็นได้จากเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือนชิ้นแรกๆ ที่ใช้หลักการนี้ คือ เตาหุงต้มไฟฟ้า



รูปที่ 1 หลักการเตาหุงต้มไฟฟ้าแบบขดลวดความร้อน



รูปที่ 2 หลักการเตาหุงต้มไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ



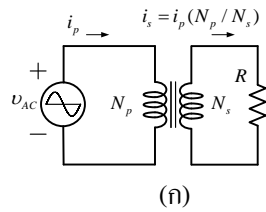
รูปที่ 3 การสร้างความร้อนเหนี่ยวนำบริเวณก้นภาชนะ

วัตถุประสงค์ของบทความนี้ คือ การเสนอแนวคิดเรื่องรูปแบบการสร้างความร้อนจากหลักการความร้อนเหนี่ยวนำสำหรับเตาหุงต้มไฟฟ้ายุคใหม่ โดยแนะนำหลักการความร้อนเหนี่ยวนำ ส่วนประกอบพื้นฐาน วงจรกำลังรูปแบบต่างๆ รวมไปถึงเสนอแนวทางการออกแบบสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้รูปแบบใหม่ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้น การเลือกพิกัดของอุปกรณ์ทำได้ง่ายขึ้น เพิ่มความน่าสนใจสำหรับการแข่งขันเชิงพาณิชย์

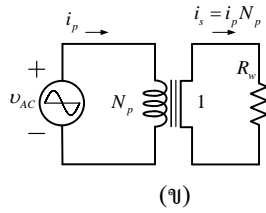
## 2. พื้นฐานการสร้างความร้อนแบบความร้อนเหนี่ยวนำ

การสร้างความร้อนแบบความร้อนเหนี่ยวนำ ประกอบด้วยปรากฏการณ์พื้นฐาน 3 เรื่อง คือ การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic induction) ปรากฏการณ์ผิว (skin effect) และการถ่ายโอนความร้อน (heat transfer) [2, 3] รูปที่ 2 แสดงหลักการเตาหุงต้มไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำเมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กเคลื่อนผ่านบริเวณก้นภาชนะซึ่งเป็นวัสดุที่มี

คุณสมบัติเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) เหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนบริเวณก้นภาชนะเป็นวงรอบปิด และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนเนื่องจากการสูญเสีย จากนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นถูกถ่ายเทไปยังน้ำในภาชนะหุงต้มต่อไป หลักการสร้างความร้อนเหนี่ยวนำบริเวณก้นภาชนะแสดงดังรูปที่ 3 ข้อดีของเตาหุงต้มไฟฟ้าแบบความร้อนเหนี่ยวนำ คือ มีความปลอดภัยสูง ทำความสะอาดง่าย เนื่องจากขดลวดเหนี่ยวนำและภาชนะแยกจากกันโดยสิ้นเชิง ความร้อนเกิดขึ้นที่ภาชนะหุงต้มโดยตรง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำความร้อนสูง สำหรับโครงสร้างเตาหุงต้มไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง ประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน และภาชนะหุงต้มที่มีเส้นแรงแม่เหล็กต้องผ่านมีลักษณะเทียบเท่าหม้อแปลงไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4 (ก) ประกอบด้วยขดลวดด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ขดลวดเหนี่ยวนำความถี่สูงเปรียบเสมือนขดลวดด้านปฐมภูมิ ภาชนะหุงต้มเสมือนขดลวดด้านทุติยภูมิ จำนวน 1 รอบ ต่อขนานกับโหลดความต้านทาน  $R_L$  แสดงดังรูปที่ 4 (ข)

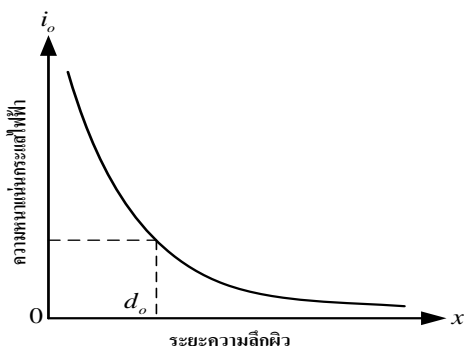


(ก)



(ข)

รูปที่ 4 หม้อแปลงไฟฟ้าเสมือนวงจรสมมูลเตาหุงต้มไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับระยะความลึกผิว [3]

2.1 การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อไฟฟ้ากระแสสลับไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก (magnetic field) ขึ้นรอบๆ ขดลวด เป็นไปตามกฎของแอมแปร์ (Ampere’s law) ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$\int Hdl = Ni = F \tag{1}$$

$$\phi = \mu HA \tag{2}$$

จากกฎของฟาราเดย์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น การวางขดลวดตัวนำไฟฟ้าวงรอบปิดไว้บริเวณที่มีสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามเวลาส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced electromotive force) ให้กระแสไฟฟ้าไหลในขดลวด เรียกว่า กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced current) โดยขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กต่อเวลา และมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็ก ตามกฎของเลนส์ (Lenz’s law)

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \tag{3}$$

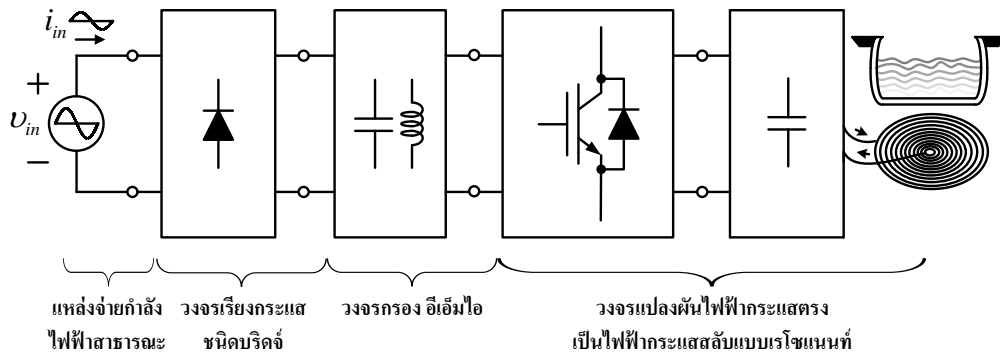
เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำ ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าอีกชนิดหนึ่งไหลบริเวณผิวของโลหะครบวงจรภายในตัวเอง ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในรูปความร้อน กระแสไฟฟ้างกล่าวคือ กระแสไหลวนเกิดขึ้นในลักษณะตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 3

$$P_w = i_s^2 R_w \tag{4}$$

เมื่อ  $P_w$  คือ การสูญเสียในรูปความร้อนที่ภาชนะหุงต้ม  $i_s$  คือ กระแสไฟฟ้าไหลผ่านภาชนะ สำหรับค่าความต้านทานภาชนะ  $R_w$  หาได้จากความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานจำเพาะ (resistivity,  $\rho$ ) และค่าความซึมซาบ (permeability,  $\mu$ ) ของภาชนะโดยปริมาณกระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก สำหรับความร้อนอีกประเภทที่เกิดขึ้นบริเวณภาชนะคือ ความร้อนที่เกิดจากรวงรอบฮิสเตอรีซิส (hysteresis loop) รายละเอียดสามารถศึกษาจากเอกสารอ้างอิง [2]

2.2 ปรากฏการณ์ผิว

เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับผ่านขดลวด จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลบริเวณผิวของโลหะโดยความสัมพันธ์



รูปที่ 6 โดอะแกรมการทำงานเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เทียบกับระยะความลึกผิว แสดงดังรูปที่ 5 สมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ โดยปริมาณกระแสไฟฟ้าจะมีความหนาแน่นมากบริเวณผิวของภาชนะและลดลงตามลำดับความลึกผิว (skin depth) ภาชนะเรียกว่าปรากฏการณ์ผิว (skin effect) หรือปรากฏการณ์เคลวิน (Kelvin effect)

$$i_x = i_o e^{-x/d_o} \tag{5}$$

$$d_o = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \tag{6}$$

- เมื่อ  $i_x$  คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่จุด  $x$
- $i_o$  คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่จุด  $x = 0$
- $d_o$  คือ ความลึกผิว
- $\rho$  คือ ความต้านทานจำเพาะ
- $\mu$  คือ ความซึมซาบ
- $\omega$  คือ ความถี่กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

### 3. ส่วนประกอบวงจรกำลัง

ส่วนประกอบพื้นฐานวงจรกำลังเตาหุงต้มแบบความร้อนเหนี่ยวนำ แสดงดังรูปที่ 6 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสาธารณะ วงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ทำหน้าที่เปลี่ยนจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์ด้านเข้า

เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเต็มคลื่น วงจรกรองอีเอ็มไอ และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบเรโซแนนท์ ทำหน้าที่สร้างไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงป้อนผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก สำหรับการสร้างความร้อนแบบความร้อนเหนี่ยวนำ

### 4. รูปแบบวงจรกำลังสำหรับการสร้างความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ได้รับความนิยม

แนวทางการพัฒนาวงจรกำลังที่ทำหน้าที่สร้างไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง สำหรับการสร้างความร้อนแบบเหนี่ยวนำ คือ จำนวนอุปกรณ์น้อย ราคาถูก ขนาดเล็ก ประสิทธิภาพสูง ความน่าเชื่อถือสูง วงจรกำลังที่ได้รับความนิยม มี 2 รูปแบบ คือ วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเรโซแนนท์อนุกรมแบบกึ่งบริดจ์ [4] – [6] และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบคลอซายน์เรโซแนนท์ [7, 8]

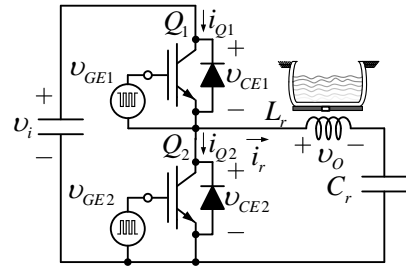
#### 4.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเรโซแนนท์อนุกรมแบบกึ่งบริดจ์

รูปที่ 7 แสดงวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเรโซแนนท์อนุกรมแบบกึ่งบริดจ์ มีข้อเด่นหลายประการ คือ การออกแบบทำได้ง่าย แรงดันตกคร่อมสวิตช์

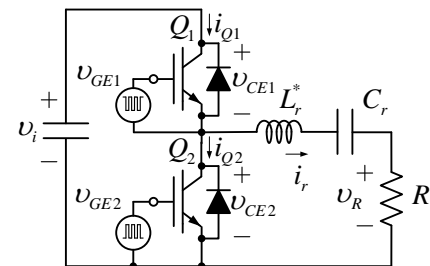
ขณะหยุดนำกระแสต่ำเท่ากับแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า ข้อดีคือ ใช้สวิตช์กำลัง 2 ตัว ต้องออกแบบวงจรจับนำสวิตช์แบบแยกกันทางไฟฟ้า ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูง ไม่น่าสนใจสำหรับการแข่งขันเชิงพาณิชย์ รูปที่ 8 แสดงวงจรสมมูลวงจรแปลงผันแบบกึ่งบริดจ์สำหรับเตาหุงต้มไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ รูปคลื่นการทำงานทางอุดมคติแสดงดังรูปที่ 9 เห็นได้ว่ามีกระแสไฟฟ้างานส่วนไหลผ่านไดโอดแฝงของสวิตช์กำลัง ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของเตาหุงต้มไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำไม่สูงเท่าที่ควร

**4.2 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบคลอซายน์เรโซแนนท์**

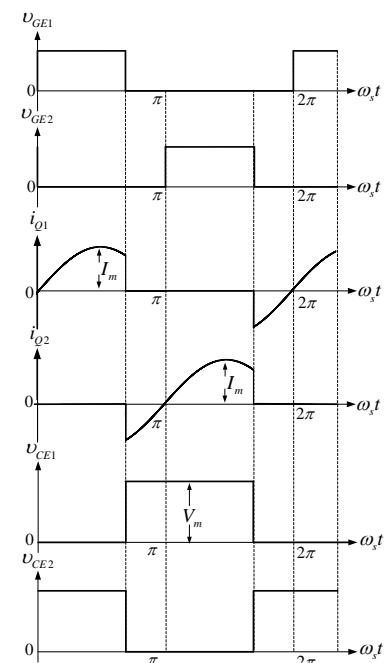
วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบคลอซายน์เรโซแนนท์ แสดงดังรูปที่ 10 มีลักษณะเด่น คือ อุปกรณ์น้อย เนื่องจากใช้สวิตช์กำลังเพียงตัวเดียว การออกแบบวงจรควบคุมทำได้ง่าย ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตต่ำ อย่างไรก็ตาม ข้อดีของวงจรดังกล่าว คือ แรงดันตกคร่อมสวิตช์ขณะหยุดนำกระแสสูงประมาณ 3.8 เท่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า การออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทำได้ยาก ส่งผลให้การเลือกพิกัดอุปกรณ์กำลังทำได้ยากเช่นกัน รวมไปถึงมีกระแสไหลผ่านไดโอดแฝงของสวิตช์กำลัง ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของเตาหุงต้มไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำไม่สูงเท่าที่ควร ที่สำคัญการเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสม เช่น ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเรโซแนนท์ จะส่งผลให้ปริมาณกระแสไฟฟ้างานส่วนไหลผ่านไดโอดแฝงของสวิตช์กำลังสูงขึ้น วงจรสมมูลวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบคลอซายน์เรโซแนนท์ สำหรับเตาหุงต้มไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ แสดงดังรูปที่ 11 รูปคลื่นการทำงานทางอุดมคติแสดงดังรูปที่ 12 อย่างไรก็ตาม วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าประเภทนี้ได้รับความนิยมสูงสุดเนื่องจากต้นทุนในการผลิตต่ำ จึงมีความน่าสนใจสำหรับการแข่งขันเชิงพาณิชย์



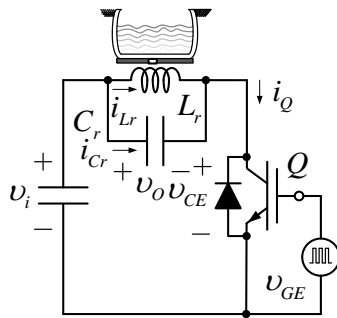
รูปที่ 7 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเรโซแนนท์แบบกึ่งบริดจ์สำหรับเตาหุงต้มไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ



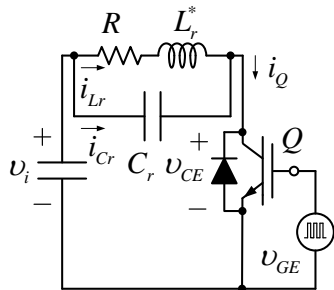
รูปที่ 8 วงจรสมมูลวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกึ่งบริดจ์สำหรับเตาหุงต้มไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ



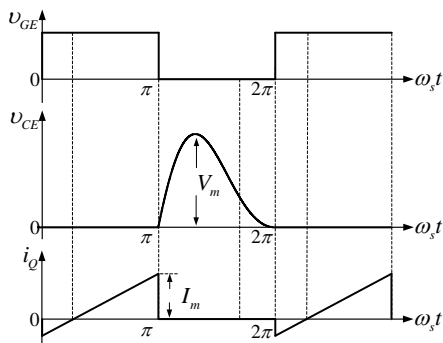
รูปที่ 9 รูปคลื่นการทำงานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเรโซแนนท์อนุกรมแบบกึ่งบริดจ์



รูปที่ 10 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบคลอซายน์เรโซแนนท์สำหรับเตาหุงต้มไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ



รูปที่ 11 วงจรสมมูลวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบคลอซายน์เรโซแนนท์สำหรับเตาหุงต้มไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ



รูปที่ 12 รูปคลื่นการทำงานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบคลอซายน์เรโซแนนท์

## 5. แนวทางการออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบใหม่สำหรับเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำ

การวิเคราะห์และออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบใหม่ มีลักษณะโครงสร้างวงจรเฉกเช่นวงจรแปลง

ผันกำลังไฟฟ้าแบบคลอซายน์เรโซแนนท์ ต่างกันที่ขั้นตอนการวิเคราะห์และออกแบบที่ใช้หลักการวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเรโซแนนท์คลาสอี [9] ข้อดีของการวิเคราะห์โดยใช้หลักการดังกล่าว สามารถลดปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไดโอดภายในสวิทช์กำลัง ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น รวมไปถึงสามารถออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง พิกัดอุปกรณ์กำลังได้ แม้ว่าหลักการดังกล่าวเคยถูกกล่าวถึงตามเอกสารอ้างอิง [10] แต่การวิเคราะห์และออกแบบไม่ได้ใช้หลักการวงจรแปลงผันเรโซแนนท์คลาสอี จึงก่อให้เกิดปัญหาดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

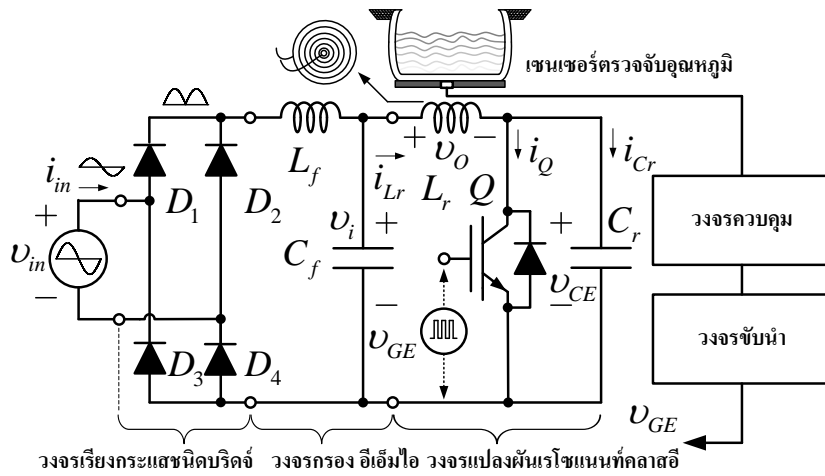
### 5.1 ส่วนประกอบ

เตาหุงต้มไฟฟ้าแบบความร้อนเหนี่ยวนำบนพื้นฐานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเรโซแนนท์คลาสอี ทำงานภายใต้เงื่อนไขการสวิทช์ขณะแรงดันเป็นศูนย์ แสดงดังรูปที่ 13 ประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์  $D_1 - D_4$  วงจรกรอง อีเอ็มไอ  $L_f - C_f$  วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเรโซแนนท์คลาสอี ตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์  $L_r$  และตัวเก็บประจุเรโซแนนท์  $C_r$  ต่ออนุกรม และขนานกับสวิทช์กำลังแบบไอจีบีที  $Q$  ตามลำดับ โดยภาชนะหุงต้มแทนด้วยโหลดความต้านทานสมมูล  $R_w$  ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้

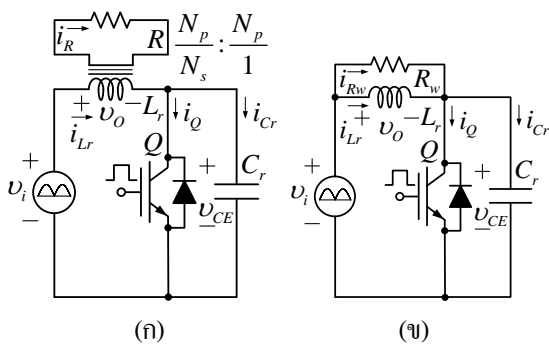
### 5.2 การวิเคราะห์

พิจารณาการทำงานจากวงจรสมมูลวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเรโซแนนท์คลาสอี สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 14 เมื่อไดโอด  $D_1$  และ  $D_4$  นำกระแสในช่วงซีกบวกของแรงดันไฟฟ้าสายกำลัง  $v_m = V_m \sin \omega t$  ไดโอด  $D_2$  และ  $D_3$  นำกระแสในช่วงซีกลบของแรงดันไฟฟ้าสายกำลัง ฉะนั้นแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ คือ  $|v_m| = v = V_m |\sin \omega t|$  วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเรโซแนนท์คลาสอี ร่วมกับภาชนะหุงต้มอย่างง่าย แทนได้โดยหม้อแปลงไฟฟ้าที่ประกอบด้วยขดลวดด้านทุติยภูมิจำนวน 1 รอบ ต่อขนานอยู่กับโหลดความต้านทาน  $R$





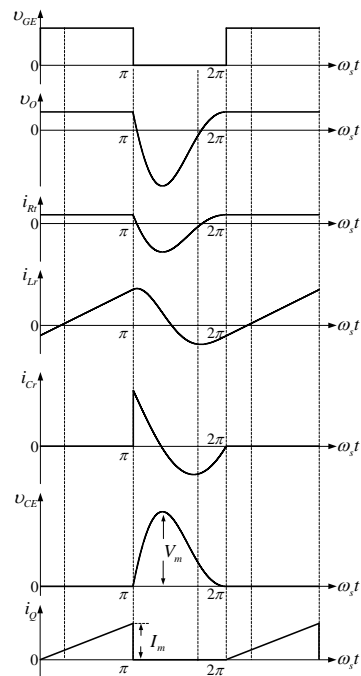
รูปที่ 13 โครงสร้างการทำงานเตาหุงต้มไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำบนพื้นฐานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเรโซแนนท์คลาสบี



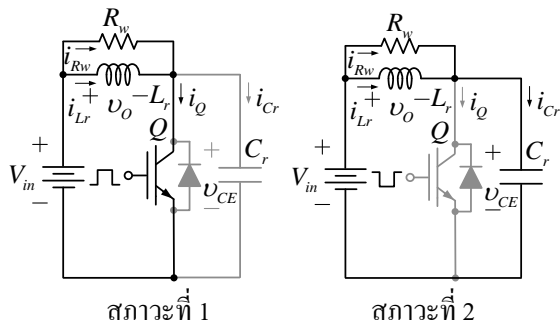
รูปที่ 14 วงจรสมมูลเตาหุงต้มไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำบนพื้นฐานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเรโซแนนท์คลาสบี

สำหรับตัวเหนี่ยวนำ  $L_r$  แทนด้วยขดลวดค้ำปฐมภูมิ แสดงดังรูปที่ 14 (ก) เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าความถี่สูงผ่านขดลวดค้ำปฐมภูมิ ส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กความถี่สูง คล้องผ่านภาชนะ เหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวน เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนขึ้นบริเวณก้นภาชนะ สำหรับวงจร สมมูลดังรูปที่ 14 (ก) สามารถแทนได้โดยวงจรงานตัวเหนี่ยวนำ  $L_r$  และ โหลดความต้านทานสมมูล  $R_w$  แสดงดังรูปที่ 14 (ข) รูปคลื่นการทำงานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเรโซแนนท์คลาสบี แสดงดังรูปที่ 15 โดยสวิทช์กำลังทำงานภายใต้เงื่อนไขการสวิทช์ขณะแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์

และไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไดโอดภายในสวิทช์กำลัง สำหรับสภาวะการทำงานเตาหุงต้มเหนี่ยวนำ สามารถแบ่งออกเป็น 2 สภาวะ แสดงดังรูปที่ 16 เมื่อสวิทช์กำลังนำกระแสไฟฟ้าและหยุดนำกระแสไฟฟ้า ตามลำดับ



รูปที่ 15 รูปคลื่นการทำงานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเรโซแนนท์คลาสบี



รูปที่ 16 สภาวะการทำงานเตาหุงต้มเหนี่ยวนำบนพื้นฐานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเรโซแนนท์คลาสบี

5.3. แนวทางการออกแบบ

5.3.1 วงจรกำลัง

จากวงจรสมมูลวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบเรโซแนนท์คลาสบี ทำงานภายใต้เงื่อนไขการสวิตช์ขณะแรงดันเป็นศูนย์ สำหรับเตาหุงต้มไฟฟ้าแบบความร้อนเหนี่ยวนำ แสดงดังรูปที่ 14 (ข) กำหนดให้ความถี่เรโซแนนท์ (resonant frequency) เท่ากับความถี่สวิตช์ (switching frequency)  $f_r = f_s$  โหลดความต้านทานสมมูลของภาชนะหุงต้ม  $R_w$  หาได้โดยวิธีการวัดจากเครื่องมือวัดชนิด LCR หรือคำนวณจากสมการที่ (7)

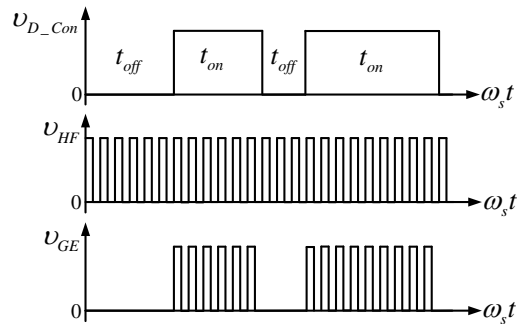
$$R_w = \frac{15.326v_{in}^2}{\pi^2 P_O} \tag{7}$$

ค่าตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์  $L_r$  คำนวณได้โดย

$$L_r = \frac{0.205R_w}{\pi f_r} \tag{8}$$

ค่าตัวเก็บประจุเรโซแนนท์  $C_r$  หาได้โดย

$$C_r = \frac{0.512}{\pi f_r R_w} \tag{9}$$



รูปที่ 17 วิธีการปรับความหนาแน่นสัญญาณขับนำสวิตช์กำลัง

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตช์กำลังสูงสุด  $V_m$  คือ

$$V_m = 5.443v_{in} \tag{10}$$

กระแสไฟฟ้าไหลผ่านสวิตช์กำลังสูงสุด  $I_m$  คือ

$$I_m = \frac{2.828P_O}{\eta v_{in}} \tag{11}$$

สำหรับการให้ความสำคัญกับปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าเพื่อลดผลกระทบต่อแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสาธารณะและอุปกรณ์ต่อรวม ทำได้โดยไม่ใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ร่วมกับวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ รวมไปถึงออกแบบให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าไม่ต่อเนื่องและนำกระแสตลอดย่านแรงดันไฟฟ้าสายกำลังโดยมีความถี่เท่ากับสัญญาณขับนำสวิตช์ ซึ่งสามารถแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังได้โดยอัตโนมัติ และมีวงจรรอง อีเอ็มไอแบบแอลซี ทำหน้าที่กรองกระแสไฟฟ้าความถี่สูง หน้าที่และการออกแบบวงจรรอง อีเอ็มไอ โดยละเอียดสามารถศึกษาจากเอกสารอ้างอิง [11]

5.3.2 วิธีการควบคุมอุณหภูมิ

การควบคุมอุณหภูมิภาชนะหุงต้ม ด้วยการควบคุมปริมาณหรือความหนาแน่นสัญญาณขับนำสวิตช์กำลัง (pulse density modulation, PDM) [6] แสดงดังรูปที่ 17 โดย  $v_{D-Con}$  คือ สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่ต่ำที่สามารถปรับวัฏจักรงาน (duty

cycle, D) ได้  $v_{HF}$  คือ สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่สูง  $v_{GE}$  คือ สัญญาณขับนำสวิตช์ ที่ได้จากการมอดูเลต  $v_{D\_Con}$  และ  $v_{HF}$  สำหรับการปรับเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ภาชนะหุงต้มทำได้ โดยการเพิ่มความหนาแน่นสัญญาณขับนำสวิตช์กำลัง  $t_{on}$  ในทางกลับกันการปรับลดอุณหภูมิให้แก่ภาชนะหุงต้มทำได้ โดยการลดความหนาแน่นสัญญาณขับนำสวิตช์กำลัง  $t_{on}$  เทคนิคดังกล่าวนี้เหมาะสำหรับเตาหุงต้มไฟฟ้าแบบความร้อนเหนี่ยวนำบนพื้นฐานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบ เรโซแนนท์ คลาสซี อย่างไรก็ตาม การเลือกช่วงเวลาการนำกระแส  $t_{on}$  และความถี่ของสัญญาณ  $v_{D\_Con}$  ที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ค่าตัวประกอบกำลังต่ำ และความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของกระแสไฟฟ้าสายกำลังสูง เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของกำลังไฟฟ้าด้านออก ส่งผลกระทบต่อระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสาธารณะโดยตรง

## 6. สรุปผล

บทความนี้นำเสนอ แนวความคิดเรื่องรูปแบบการสร้าง ความร้อนจากหลักการความร้อนเหนี่ยวนำ สำหรับเตาหุงต้มไฟฟ้าในครัวเรือน เนื่องจากหลักการดังกล่าว เริ่มมีบทบาทในภาคครัวเรือนยุคใหม่มากขึ้น โดยแนวทางการพัฒนาวงจรกำลังที่ทำหน้าที่สร้างไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงคือ จำนวนอุปกรณ์น้อย ราคาถูก ขนาดเล็ก ประสิทธิภาพสูง ความน่าเชื่อถือสูง ง่ายต่อการวิเคราะห์และออกแบบซึ่งสอดคล้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบเรโซแนนท์ คลาสซี ที่สามารถออกแบบค่าพารามิเตอร์ได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้น เนื่องจากสามารถลดปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไดโอดแฝงภายในสวิตช์กำลัง การเลือกพิกัดของอุปกรณ์ทำได้ง่าย จึงเป็นข้อมูล และแนวทางสำคัญสำหรับการออกแบบและสร้างวงจรกำลังสำหรับเตาหุงต้มไฟฟ้าแบบความร้อนเหนี่ยวนำ เครื่องต้นแบบต่อไปในอนาคต

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ทุนสนับสนุนประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Kongpala and S. Kwantong, "Electric Kiln for Craft Work", The Journal of Industrial Technology, Vol.2, Issue 1, Feb. – Jul. 2006, pp. 44 – 49 (in Thai)
- [2] E.J. Davies, J. and P. Simpson, "Induction heating handbook", McGraw-Hill, UK, 1979.
- [3] Application Notes AN9012 "Induction heating system topology review", Fairchild Semiconductor, Jul. 2000.
- [4] W.S. Choi, N.J. Park, D.Y. Lee, and D S. Hyun, "A new control scheme for a Class-D inverter with induction heating jar application by constant switching frequency", Journal of Power Electronics, Vol. 5, No. 4, Oct. 2005, pp. 272 – 281.
- [5] A. Beato, C. Bocchiola, and S. Frattesi, "Modeling and design of the half-bridge resonant inverter for induction", 14<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Control and Automation, Jun. 2006, pp. 1 – 6.
- [6] N.J. Park, D.Y. Lee, and D.S. Hyun, "A power-control scheme with constant switching frequency in Class-D inverter for induction-heating jar application", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Jun. 2007, pp. 1252 – 1260.
- [7] S. Chudjuarjeen and C. Koompai, "A high-frequency induction cooking using quasi-resonant converter", 4<sup>th</sup> ECTI International Conference, May 2007, pp. 378 – 381.

- [8] C. Charoenwiangnuea, I. Boonyaroonate, and S. Pongam, "The simple temperature control for the low cost, high efficiency and high power factor induction cooking", 9<sup>th</sup> ECTI Conference, May 2012, pp. 1 – 4.
- [9] M.K. Kazimierczuk, "Exact analysis of Class E tuned power amplifier with only one inductor and one capacitor in load network", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. SC-18, No. 2, Apr. 1983, pp. 214 – 221.
- [10] N.J. Park, D.Y. Lee, and D.S. Hyun, "Study on the new control scheme of Class-E inverter for IH-jar application with clamped voltage characteristics using pulse frequency modulation", The Institution of Engineering and Technology (IET) Journals Electric Power Application, No. 3, May 2007, pp. 433 – 438.
- [11] V. Grigore, J. Kyyra, and J. Rajamaki, "Input filter design for power factor correction converters operating in discontinuous conduction mode", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1999, pp. 145 – 150.