รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมชนิดครึ่งบริดจ์ 3 สวิตช์สำหรับเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำที่มีสองเอาต์พุต

Three switches series resonant half bridge inverter for two outputs Induction Cooking Appliances

คณะผู้วิจัย

นาย วิเชียร หทัยรัตน์ศิริ

นาย สายชล ชุดเจือจีน

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2557

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมชนิดครึ่งบริดจ์ 3 สวิตช์สำหรับเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำที่มีสองเอาต์พุต

Three switches series resonant half bridge inverter for two outputs Induction Cooking Appliances

คณะผู้วิจัย

นาย วิเชียร หทัยรัตน์ศิริ

นาย สายชล ชุดเจือจีน

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2557

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

หัวข้องานวิจัย	วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมชนิดครึ่งบริดจ์ 3 สวิตช์สำหรับเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำที่มีสองเอาต์พุต
ผู้เขียน	นาย วิเชียร หทัยรัตน์ศิริ
	นาย สายชล ชุดเจือจีน
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและโทรคมนาคม
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษา วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมชนิดครึ่งบริดจ์ 3 สวิตช์สำหรับเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำที่มีสองเอาต์พุตอุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวสวิตช์คือไอจีบีที (IGBT) จำนวน 3 ตัวซึ่งทำงานแบบสวิตช์เดี่ยวแรงดันศูนย์เพื่อช่วยในการลดกำลังสูญเสียขณะทำงานที่ความถี่สูง โดยมีช่วงความถี่เรโซแนนท์เป็นช่วงการทำงานในภาควงจรกำลังที่ 17-40 กิโลเฮิรตซ์ จากการประยุกต์ใช้หลักการเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับเครื่องใช้ในครัวเรือน โดยเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้สามารถให้กำลังความร้อนได้ 1200 kW การทดลองเก็บผลจากการทำงานแสดงผลด้วยผลการทดลองจริง

คำสำคัญ: เตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำสองเอาต์พุต อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม อินเวอร์เตอร์ 3 สวิตช์ การควบคุมความถี่ การควบคุมดิวตี้ไซเคิล

Title	Three switches series resonant half bridge inverter for two outputs Induction Cooking Appliances
Author	Mr. Vichien Hathairatsiri
	Mr. Saichol Chudjuarjeen
Department	Electrical and Telecommunication Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2557

Abtract

This paper studies three switches series resonant half bridge inverter for two outputs Induction Cooking Appliances. Converter is implemented by using IGBT as its switching. The switching loss is minimized by operating the 3 IGBTs in the zero voltage resonance modes. The output power can be adjust by varying the switching frequency and duty cycle of converter. The prototype is rated at approximately 1200W, with operating frequency ranging from 17-40 kHz. The operation principles of quasi- resonant are investigated and validity is verified by experimental results.

Keywords : dual output induction cooking; series resonsnt converter; 3 switches inverter; parallel resonant; frequency control; duty cycle control.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่ช่วยสนับสนุนเงินทุนในการวิจัยในการทำวิจัย และบุคลากรทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการทำงานวิจัย ทั้งทางด้านเบิกจ่ายงบประมาณ และค้นคว้าหาข้อมูล สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา-มารดา ที่สนับสนุนในการศึกษาของผู้เขียนและให้กำลังใจในการศึกษาตลอดมา

ผู้ทำวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขต	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานและสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2. ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	5
2.2 ปรากฏการณ์ทางผิว	6
2.3 ผลของอุณหภูมิ	7
2.4 ขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน	9
2.5 ตัวประกอบคุณภาพ	11
2.7 หลักการเรโซแนนท์	14
2.8 มอสเฟตกำลัง	15
2.9 หลักการทำงานของวงจรสวิตซ์	17
2.10 เรโซแนนซ์คอนเวอร์เตอร์	19
2.11 หลักการของเตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำความร้อน	21
2.12 การวิเคราะห์วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนกับโหลดภาชนะหุงต้ม	21
2.13 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ฮาร์ฟบริดจ์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม	24
2.14 การวิเคราะห์แรงดัน และกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม	25
2.15 การเปรียบเทียบสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง	27

หน้า

2.16 การเลือกใช้สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 27

2.17 คุณสมบัติไอจีบีที 28

2.18 คุณสมบัติของ dsPIC30F4011 30

2.19 การใช้งานจอแอลซีดี 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด 31

3. การออกแบบ

3.1 การออกแบบวงจรกำลัง 32

3.2 วงจรขับเกต 37

3.3 การสร้างสัญญาณ PWM ในไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 39

3.4 การต่อตัวกำเนิดสัญญาณนาฬิกาเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 40

3.5 การต่อตัววัดอุณหภูมิ 41

3.6 การต่อสวิตซ์เข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 41

3.7 การจัดสัญญาณไฟฟ้าให้กับแอลซีดีอักษร 42

3.8 การติดต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับแอลซีดีอักษร 43

3.9 การหน่วงเวลา 44

3.10 ขั้นตอนการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 45

3.11 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเตาเหนี่ยวนำความร้อน 46

4. ผลการทดสอบเตาหุงต้ม 3 สวิตซ์

4.1 การทดสอบรูปคลื่นสัญญาณขับเกต 47

4.2 การทดสอบสัญญาณรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมโหลด 48

4.3 การทดสอบกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและทางด้านเอาท์พุต 49

5. สรุปผลโครงงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลที่ได้จากการทดลอง 53

5.2 ข้อเสนอแนะ 53

เอกสารอ้างอิง 54

บทที่ 1
บทนำ

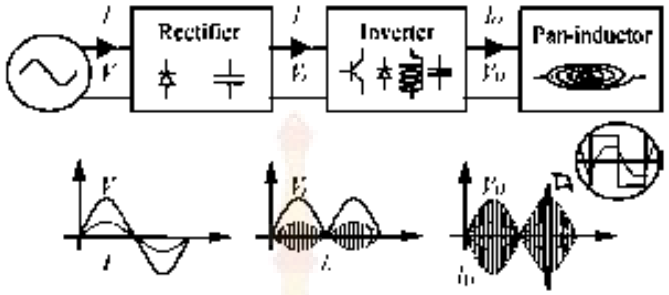
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของ

ระบบควบคุมและพัฒนาวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงที่สามารถจ่ายโหลดความร้อนเหนี่ยวนำด้านเพาเวอร์ในระดับสูง โดยอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ มอสเฟต (MOSFET) และไอจีบีที (IGBT) ซึ่งมีความไวในการสวิทช์สูง น้ำหนักเบาและจ่ายกำลังไฟฟ้าในระดับสูงขึ้น เป็นผลให้อินเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้น การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความร้อนจะเกิดที่ภาชนะโดยตรง ทำให้น้ำเดือดได้ในเวลาอันรวดเร็ว โดยมีหลักการพิจารณาคือ เมื่อจ่ายกระแสสลับความถี่สูงให้ขดลวดเหนี่ยวนำที่อยู่ใต้ภาชนะ ขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็ก เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวน(Eddy Current) ขึ้นที่ก้นภาชนะ ถ้าภาชนะเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก (Ferro-Magnetic) ทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ก้นภาชนะและถ่ายเทความร้อนไปที่น้ำ ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่มีการสัมผัสกันทางไฟฟ้าระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำกับก้นภาชนะ ใช้พลังงานน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับขดลวดความร้อนเพราะความร้อนที่ได้จะเกิดโดยตรงที่ภาชนะไม่ต้องผ่านตัวกลางในการนำหรือพาความร้อนจึงให้ความร้อนเร็ว ประหยัดเนื่องจากมีการสูญเสียน้อยมีประสิทธิภาพสูงและปลอดภัยต่อการใช้งานเนื่องจากชิ้นงานไม่ได้สัมผัสโดยตรงกับไฟฟ้าจึงลดปัญหาเรื่องการถูกไฟดูด เมื่อเลิกใช้งานก็ไม่มีความร้อนตกค้างมากเหมือนขดลวดความร้อน

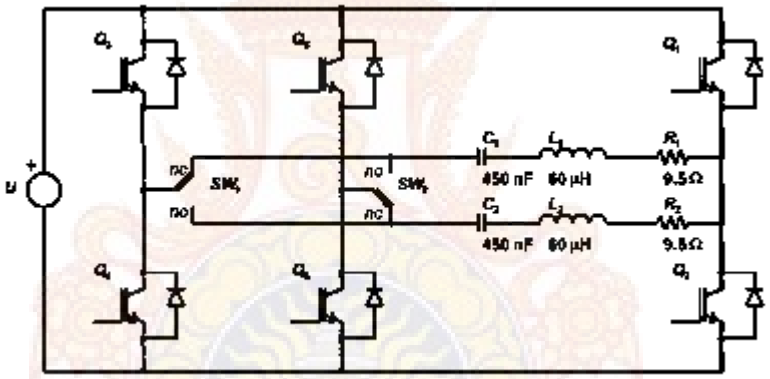
ปัจจุบันการให้ความร้อนโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำได้ถูกนำมาใช้ในงานเตาหุงต้มในครัวเรือนสูงมากเนื่องจาก ประหยัด และปลอดภัยกว่าวิธีการให้ความร้อนแบบอื่น ซึ่งเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำที่ขายกันอยู่ทั่วไปจะใช้ได้สำหรับภาชนะเพียงใบเดียวหรือมีเอาต์พุตเดียวเป็นส่วนใหญ่ ในงานโรงแรมหรือร้านอาหารจำเป็นต้องปรุงอาหารพร้อมกัน จึงได้มีการพัฒนาเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำที่ใช้สำหรับภาชนะสองใบหรือมีสองเอาต์พุตขึ้นมาใช้ แต่เตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำที่มีสองเอาต์พุตในปัจจุบันมีราคาสูงมาก เมื่อเทียบกับเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำที่มีเอาต์พุตเดียว เนื่องมาจากอุปกรณ์สวิตซ์ในวงจรมีมากขึ้นดังแสดงดังรูปที่ 1.2

การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำอาศัยเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งมีการพัฒนาสูงมากในขณะนี้ โดยมีขนาดพิกัดและความถี่ที่ใช้งานแตกต่างกันไป ขึ้นกับโหลดและงานที่ต่างกัน วงจรที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นวงจรครึ่งบริดจ์หรือเต็มบริดจ์อินเวอร์เตอร์ สำหรับเตาหุงต้มชนิดเหนี่ยวนำความร้อนก็ใช้หลักการเดียวกันคือ ทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดเหนี่ยวนำจึงเกิดสนามแม่เหล็กไปคล้องที่ภาชนะและทำให้เกิดกระแสไหลวนขึ้นจึงเกิดเป็นความร้อนดังแสดงในรูปที่ 1.1

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ถูกนำมาพัฒนาเป็นเตาหุงต้มส่วนใหญ่คือ วงจรครึ่งบริดจ์อินเวอร์เตอร์ และมีถูกออกแบบให้ขดลวดเหนี่ยวนำไว้สำหรับใช้งานภาชนะเพียงชุดเดียว

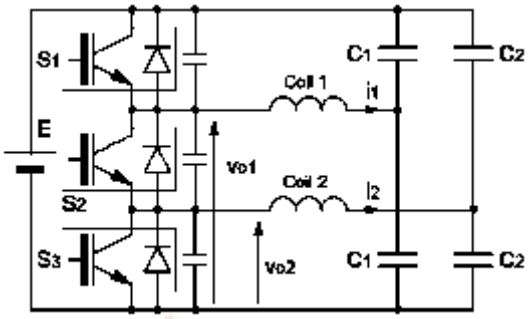


รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างวงจรเบื้องต้นของเตาหุงต้ม



รูปที่ 1.2 เตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำสำหรับสองภาชนะ

จากรูปที่ 1.2 แสดงวงจรเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำที่มีสองเอาต์พุตสำหรับสองภาชนะที่ถูกพัฒนาขึ้น โดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ [10] จะเห็นได้ว่ามีสวิตซ์ทั้งหมด 6 ตัว เพื่อใช้สำหรับขดลวดเหนี่ยวนำ 2 ชุด ดังนั้นสรุปได้ว่าเมื่อต้องการใช้ภาชนะเพิ่มทำให้ต้องเพิ่มสวิตซ์ 2 ตัวต่อภาชนะ 1 ใบ



รูปที่ 1.3 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์ 3 สวิตซ์ ในงานเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำที่ใช้สำหรับสองภาชนะที่นำเสนอ

ดังนั้นในงานวิจัยจึงทำการศึกษาเตาหุงต้มเหนี่ยวนำโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์ 3 สวิตช์สำหรับเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำแบบสองเอาต์พุตที่ใช้สำหรับสองภาชนะได้ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1.3 จึงสรุปได้ว่าเมื่อต้องการเพิ่มภาชนะ 1 ใบทำให้ต้องใช้สวิตช์เพิ่มเพียง 1 ตัว ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมีประโยชน์คือสามารถนำไปประยุกต์เพื่อเพิ่มจำนวนเตาแบบหลายหัวได้ ซึ่งจะสามารถลดต้นทุนในการผลิตเตาหุงต้มเหนี่ยวนำแบบชนิดหลายเอาต์พุตได้ต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมชนิดครึ่งบริดจ์ 3 สวิตช์สำหรับเตาหุงต้มแบบ เหนี่ยวนำที่มีสองเอาต์พุต

1.2.2 เพื่อศึกษาการควบคุมกำลังที่มีผลต่ออุณหภูมิของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมชนิดครึ่งบริดจ์ 3 สวิตช์สำหรับเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำที่มีสองเอาต์พุต

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ออกแบบ สร้างและทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมชนิดครึ่งบริดจ์ 3 สวิตช์สำหรับเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำที่มีสองเอาต์พุต

1.3.2 ออกแบบ สร้างและทดสอบวงจรควบคุมกำลังที่มีผลต่ออุณหภูมิของอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมชนิดครึ่งบริดจ์ 3 สวิตช์สำหรับเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำที่มีสองเอาต์พุต

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ค้นคว้า ศึกษาและสรุปรวมรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมชนิดครึ่งบริดจ์ 3 สวิตช์สำหรับเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำที่มีสองเอาต์พุต

1.4.2 จำลองผลการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมชนิดครึ่งบริดจ์ 3 สวิตช์สำหรับเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำที่มีสองเอาต์พุต

1.4.3 จัดหาอุปกรณ์ เครื่องมือวัดที่จำเป็นสำหรับงานวิจัย และออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมชนิดครึ่งบริดจ์ 3 สวิตช์สำหรับเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำที่มีสองเอาต์พุต

1.4.4 สร้างและทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมชนิดครึ่งบริดจ์ 3 สวิตช์สำหรับเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำที่มีสองเอาต์พุต

1.4.5 ศึกษาการควบคุมกำลังที่มีผลต่ออุณหภูมิของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมชนิดครึ่งบริดจ์ 3 สวิตช์สำหรับเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำที่มีสองเอาต์พุต

1.4.6 วิเคราะห์และเก็บผลการทดสอบ

1.4.7 สรุปผลการศึกษาวิจัย

1.4.8 นำเสนอผลงานในงานสัมมนาวิชาการ

1.4.9 จัดทำรายงานสรุปผลการศึกษาวิจัย

สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถนำไปจดสิทธิบัตรได้ นำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรมของประเทศในอนาคตต่อไป

1.5.2 สามารถนำผลงานที่สำเร็จไปตีพิมพ์เป็นวารสารงานวิจัยในระดับประเทศและต่างประเทศ

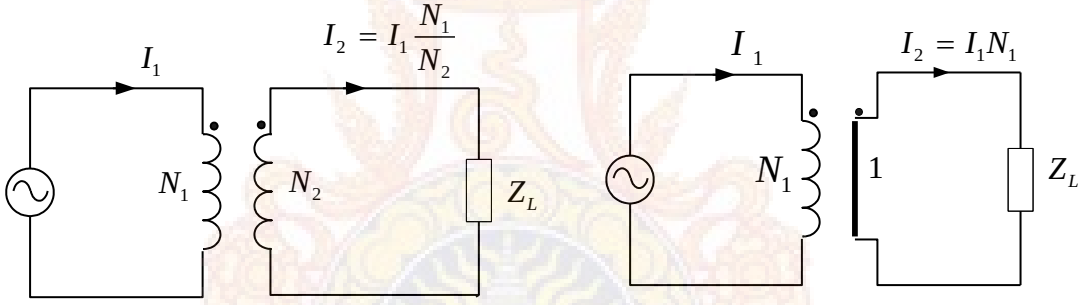
1.5.3 คาดว่าเมื่องานวิจัยสำเร็จแล้วจะสามารถใช้เป็นเครื่องต้นแบบในการวิจัยพัฒนาหรือการนำไปใช้ได้

1.5.4 เป็นทางเลือกสำหรับผู้บริโภคในปัจจุบัน

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

การเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นหลักการพื้นฐานของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ หลักการนี้ได้นำมาใช้ในมอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น เมื่อใช้งานจะเกิดความร้อนขึ้นซึ่งมีผลมาจากกระแสซึ่งเรียกว่ากระแสไหลวน (Eddy current) ความร้อนลดลงเมื่อใช้เหล็กแผ่นบางอาบฉนวน (Laminates sheet steel) ในปัจจุบันได้นำหลักการเกิดความร้อนจากการเกิดกระแสไหลวนดังกล่าวมาใช้เพื่อให้ความร้อนกับชิ้นงานที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้าเรียกว่าเตาเหนี่ยวนำ (Induction furnace) หลักการทำงานพื้นฐานคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้าโดยขดลวดทางด้านทุติยภูมิ (Secondary winding) มีเพียงรอบเดียวซึ่งหมายถึงการลัดวงจรทางทุติยภูมิดังแสดงในรูปที่ 2.1(ข)



(ก) วงจรสมมูลอย่างง่ายของหม้อแปลง (ข) วงจรสมมูลของขดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน

รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของหม้อแปลงและขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน

ชิ้นงานเปรียบเสมือนขดทุติยภูมิที่ลัดวงจรอยู่ในขดลวดปฐมภูมิที่ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กคล้องผ่าน บางส่วนคล้องผ่านขดลวด ผ่านอากาศ และคล้องผ่านชิ้นงานดังรูปที่ 2.3 สนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านชิ้นงานจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไหลวนที่ชิ้นงานและจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงานขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไหลวน (I_{eddy}) และความต้านทานของชิ้นงาน (R_w) เป็นตามสมการกำลังไฟฟ้าซึ่งมีค่าเท่ากับ $I^2_{eddy}\ R_w$ โดยที่กระแสจะหาได้จากความเข้มของสนามแม่เหล็ก ความต้านทานหาได้จากค่าความต้านทานจำเพาะ (Resistivity, ρ) และความซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงาน (Permeability, μ)

2.2 ปรากฏการณ์ทางผิว

เมื่อความถี่ของกระแสเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้กระแสที่เหนี่ยวนำขึ้นที่ชิ้นงานมีความเข้มสูงที่บริเวณรอบๆผิวของชิ้นงานและจะลดลงเมื่อลึกเข้ามาในเนื้อผิวตามแนวรัศมีดังสมการ (2.1) หลักการดังกล่าวกระแสไหลวนจะมีความหนาแน่นมากที่สุดที่บริเวณผิวของชิ้นงาน ความหนาแน่นของกระแสลดลงมาเป็นประมาณ 0.368 เท่าของค่าความหนาแน่นกระแสที่ผิวของชิ้นงานที่ค่าความลึกผิว (Skin depth) ความลึกผิวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.2) [1]

$$i_x = i_0 e^{-x/\delta} \tag{2.1}$$

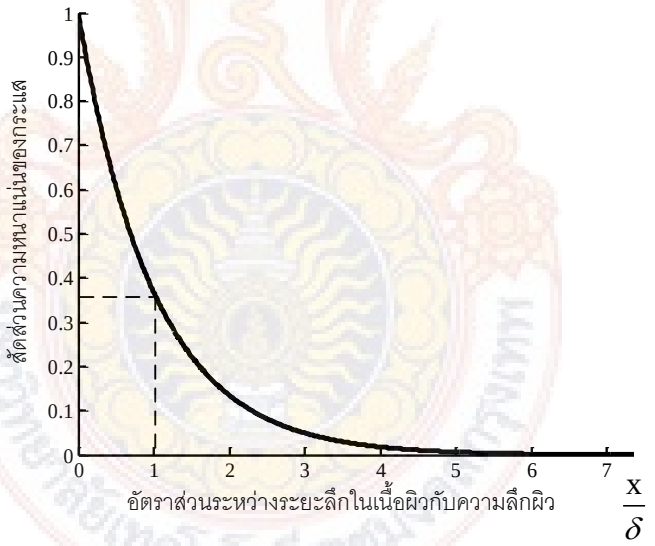
โดย

i_x : ความหนาแน่นของกระแสที่ลึกจากผิวเข้ามา x

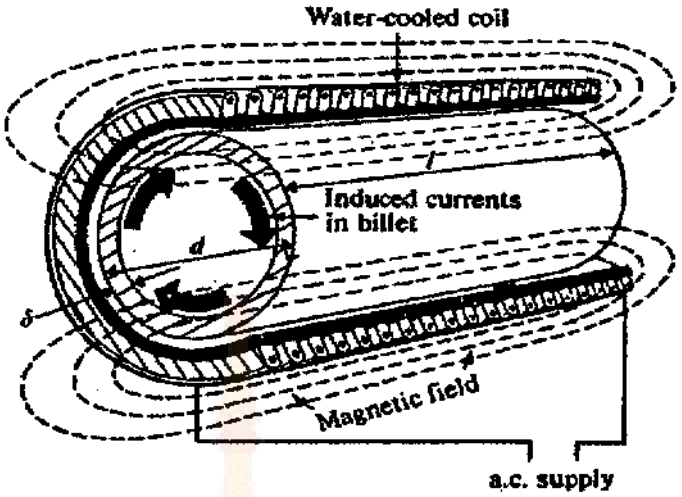
i_o : ความหนาแน่นของกระแสที่ผิว

δ : ความลึกผิว (Skin depth)

x : ระยะลึกเข้าในเนื้อผิว



รูปที่ 2.2 กราฟการกระจายความหนาแน่นของกระแสกับความลึกผิว



รูปที่ 2.3 หลักการพื้นฐานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ [1]

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu f \pi}} \tag{2.2}$$

โดย

δ : ความลึกผิว (m)

ρ : ความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน (Ω-m)

μ : ความซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงาน (H/m)

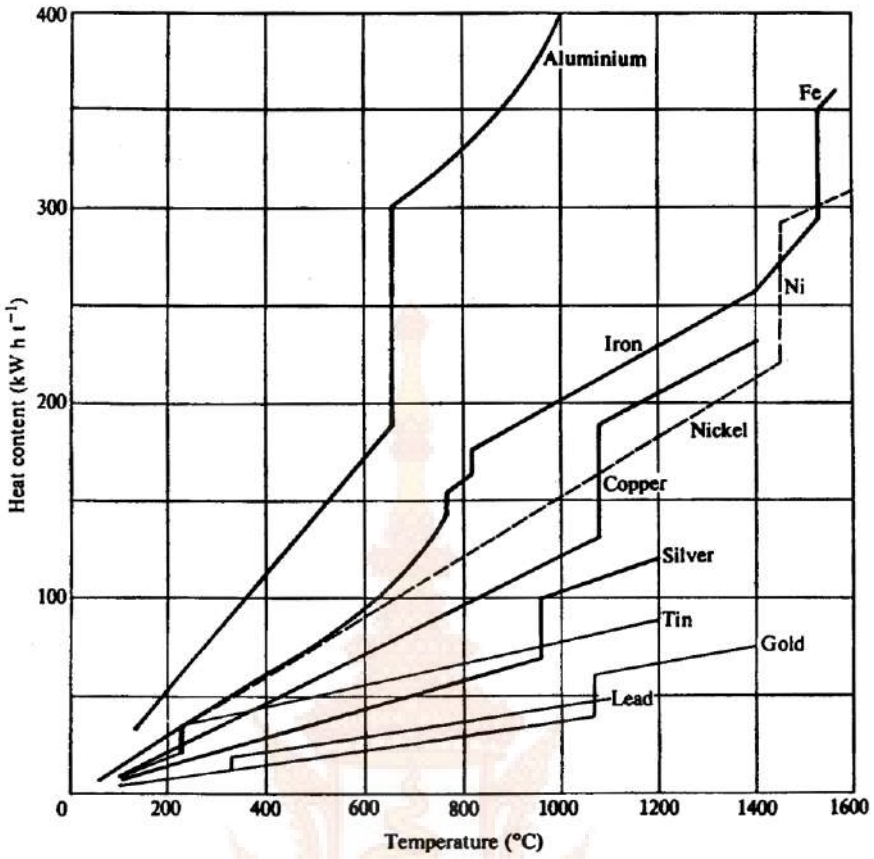
f : ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟสลับ (Hz)

2.3 ผลของอุณหภูมิ

ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนกับชิ้นงาน พลังงานความร้อนที่ให้กับชิ้นงานแต่ละชนิดที่อุณหภูมิเดียวกันจะไม่เท่ากันเนื่องจากค่าความต้านทานจำเพาะและค่าความซึมซาบของชิ้นงานแต่ละชนิดที่นำมาให้ความร้อนไม่เท่ากัน นอกจากนั้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปยังส่งผลให้ค่าความต้านทานจำเพาะและค่าความซึมซาบของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไป

2.3.1 ความร้อนจำเพาะ

เมื่อต้องการทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิตามต้องการจะต้องให้พลังงานจำนวนหนึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและน้ำหนักของชิ้นงาน โดยพลังงานที่ใช้สามารถคำนวณจากความร้อนจำเพาะของชิ้นงาน แต่ในปัจจุบันจะคำนวณจากความจุความร้อน (Heat Content) ดังรูปที่ 2.4 หน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตัน (Kilowatt-Hours per Tonne)



รูปที่ 2.4 กราฟความจุความร้อนของโลหะชนิดต่างๆ [1]

2.3.2 ความต้านทานจำเพาะ

ความต้านทานจำเพาะของโลหะจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ โดยส่วนใหญ่จะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบเชิงเส้นดังสมการ (2.3) เป็นสมการการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานจำเพาะเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป รูปที่ 2.5 เป็นกราฟของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป

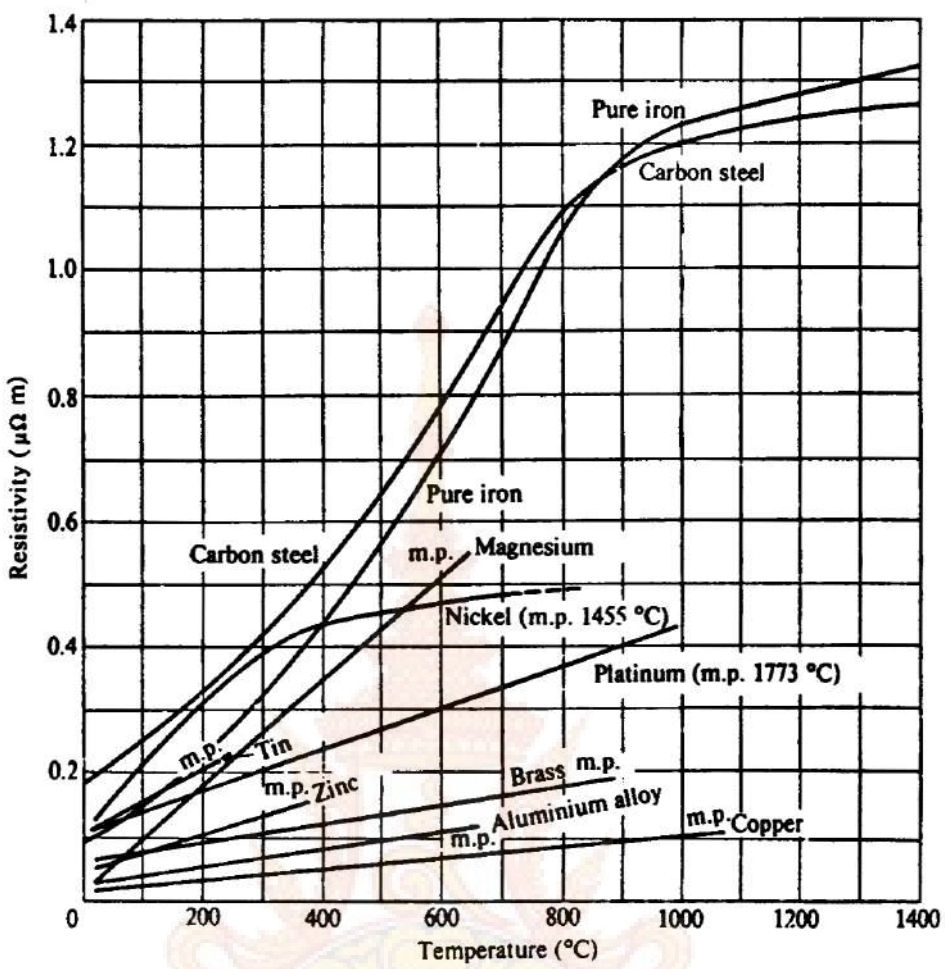
$$\rho_\theta = \rho_1\left[1+\alpha(\theta-\theta_1)\right] \tag{2.3}$$

โดย

ρ_θ : ค่าความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิ θ ใดๆ

ρ_1 : ค่าความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิ θ_1

α : สัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิ θ



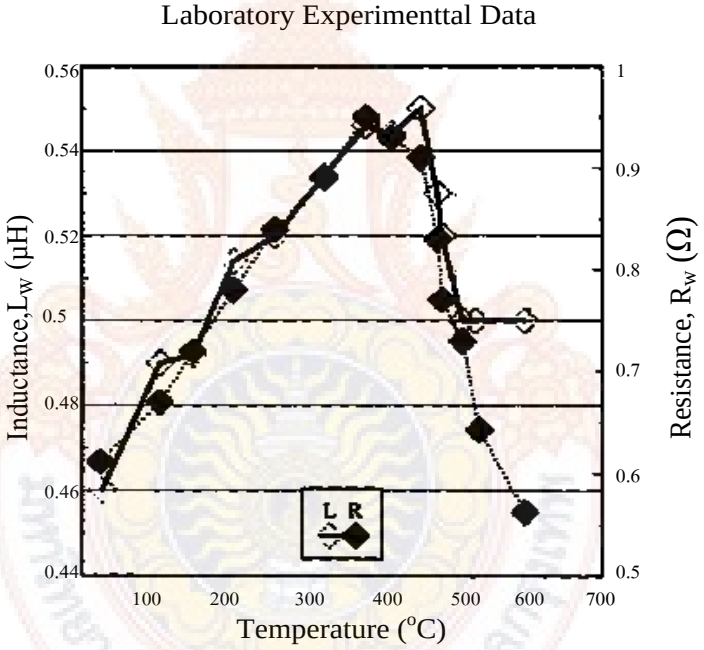
รูปที่ 2.5 กราฟของความต้านทานจำเพาะที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ [1]

2.4 ขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน

โดยทั่วไปจะแทนที่ขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงานด้วยตัวเหนียวนำต่ออนุกรมร่วมกับตัวต้านทาน ขณะให้ความร้อนอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงานที่เป็นสารแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นตาม เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงจุดกูรี่ (Curie point) ค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานจะลดลงอย่างมากแบบทันทีทันใดซึ่งมีค่าต่ำกว่าขณะที่มีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากชิ้นงานที่เป็นสารแม่เหล็กจะมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (μ_r) สูงมาก ประมาณ 5000-15,000 ขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นงาน [2] แต่เมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานสูงถึงจุดกูรี่ ค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ของชิ้นงานลดลงเหลือเพียงหนึ่งหมายถึงค่าความซึมซาบของชิ้นงานจะเท่ากับอากาศนั่นเองส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานลดลงอย่างรวดเร็ว

ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ขนาดของขดลวดนำเหนี่ยวนำ รูปร่างและขนาดของชิ้นงาน คุณสมบัติของชิ้นงาน อุณหภูมิและความเข้ม

สนามแม่เหล็ก ที่กล่าวมาไม่สามารถแสดงด้วยสมการแบบง่ายๆ ในปัจจุบันนักออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อให้เกิดความร้อนที่ชิ้นงานจะวิเคราะห์ผลการออกแบบโดยใช้โปรแกรมไฟไนท์อิลีเมนท์ (Finite element) เป็นโปรแกรมการศึกษาพฤติกรรมของโหลดระหว่างกระบวนให้ความร้อน เนื่องจากสนามแม่เหล็กจากขดลวดเหนี่ยวนำที่คล้องผ่านชิ้นงานจะมีจำนวนลดลงลดลงเป็นฟังก์ชั่นเอ็กโปรเนนเชียล (Exponential function) ตามความลึกของผิวมีผลให้กระแสไหลวนมีมากบริเวณพื้นผิวงานและจะลดลงเมื่อลึกลงในเนื้อผิวงานคล้ายกับสนามแม่เหล็ก วัตถุประสงค์ของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าจะแตกต่างกันในเรื่องของกระแสไหลวน ซึ่งไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในหม้อแปลง แต่กลับเป็นความต้องการในการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ สำหรับในรูปที่ 2.6 เป็นกราฟการทดลองวัดค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานของชิ้นงานที่เป็นสารแม่เหล็กที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิจนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิถึงจุดกูรี่ค่าของความเหนี่ยวนำและความต้านทานจะลดลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.6 กราฟผลการทดลองวัดค่าความเหนี่ยว ความต้านทานกับอุณหภูมิ [2]

เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานเปลี่ยนค่าไปเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนเพื่อไม่ให้อุณหภูมิของขดลวดเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปส่วนมากจะใช้น้ำระบายความร้อนให้กับขดลวดเหนี่ยวนำจึงถือได้ว่าค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำคงที่ตลอดกระบวนการให้ความร้อนแต่อย่างไรก็ตามความต้านทานของชิ้นงานยังคงเปลี่ยนไป แนวทางในการคำนวณหาค่าความต้านทานของชิ้นงานรูปทรงกระบอกแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 สามารถหาค่าความต้านทานของชิ้นงานรูปทรงกระบอกได้ดังนี้

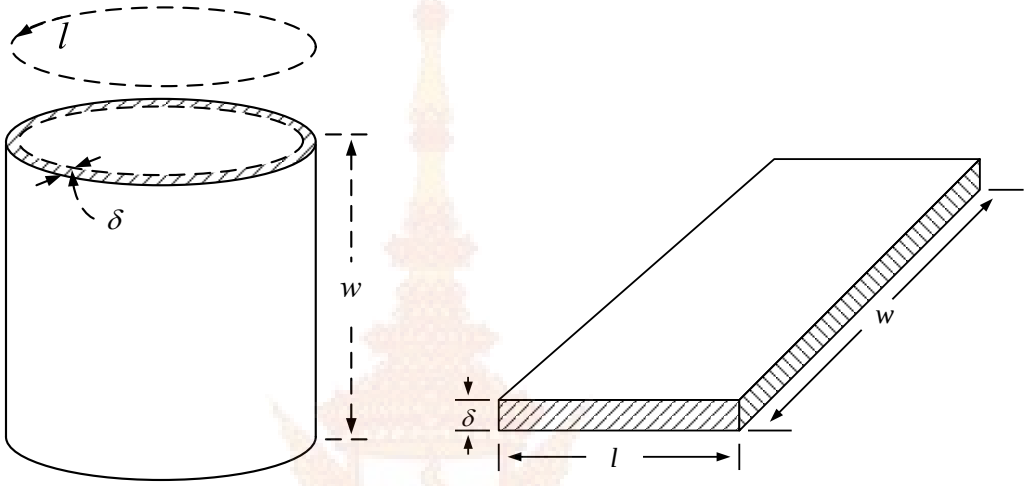
$$R_w \approx \frac{\rho l}{\delta w} \tag{2.4}$$

โดย

R_w : ความต้านทานของชิ้นงาน

l : ความยาวของความลึกผิวของชิ้นงาน

w : ความกว้างของชิ้นงานที่เกิดความร้อน



(ก) (ข)

รูปที่ 2.7 แนวการคำนวณความต้านทานชิ้นงานรูปทรงกระบอก

ค่าผลคูณของระหว่าง δ กับ w คือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่มีกระแสไหลเมื่อนำสมการที่ (2.2) แทนลงในสมการที่ (2.4) จะได้เป็นสมการที่ (2.5) จะเห็นได้ว่าค่าของความต้านทานของชิ้นงานจะเปลี่ยนเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน เนื่องจากค่าความต้านทานจำเพาะของชิ้นงานและค่าความซึมซาบแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

$$R_w \approx \frac{l}{w}\sqrt{\rho \mu f} \tag{2.5}$$

2.5 ตัวประกอบคุณภาพ

ในการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำส่วนมากจะใช้ย่านของโหลด (Load Range) เป็นค่าในย่านของตัวประกอบคุณภาพดังสมการที่ (2.6)

$$Q_l = \frac{\omega_s L_w}{R_w} \tag{2.6}$$

โดย

Q_l : ค่าตัวประกอบคุณภาพของโหลด

ω_s : ความถี่สวิตช์

ความถี่ที่ใช้ในการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำจะใช้ความถี่ที่ใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance, ω_0) โดยการนำค่าตัวเก็บประจุมาต่อร่วมกับขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน ค่าตัวประกอบคุณภาพในสมการ (2.6) นำมาเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ (2.7) ซึ่งโดยทั่วไปค่าตัวประกอบคุณภาพใช้กันอย่างอิสระแต่ค่าของตัวประกอบคุณภาพที่ควรจะใช้กับชิ้นงานที่เป็นสารแม่เหล็กและความถี่สวิตช์สูงจะใช้ค่าระหว่าง 3-10 ส่วนชิ้นงานที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กจะใช้ค่าประมาณ 10-15 เมื่อใช้ความถี่สวิตช์ที่เรโซแนนซ์จากสมการที่ (2.6) จะสามารถนำมาเขียนได้ดังสมการที่ (2.8)

$$Q_0 = \frac{\omega_0 L_w}{R_w} = \frac{\omega_0}{\omega_S} Q_l \tag{2.7}$$

$$Q_0 = \frac{1}{R_w}\sqrt{\frac{L_w}{C}} \tag{2.8}$$

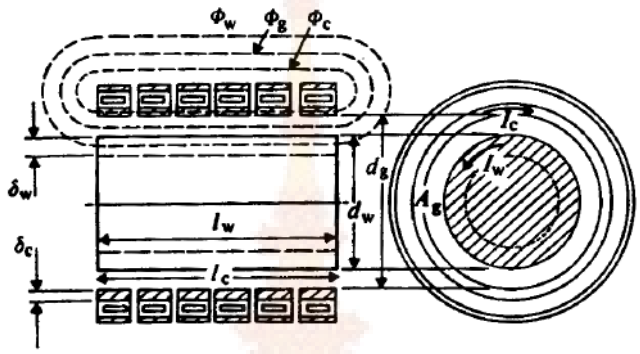
2.6 วงจรสมมูลขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน

ขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงานสามารถเขียนวงจรสมมูลด้วยตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน ขดลวดเหนี่ยวนำส่วนใหญ่จะพันขดลวดชั้นเดียว (Single Layer) ระบายความร้อนด้วยน้ำในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและความร้อนที่ได้รับมาจากชิ้นงาน นอกจากนั้นยังทำให้ให้ค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำคงที่ เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ดังรูปที่ 2.8 ได้แก่เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องชิ้นงาน (Work Flux , ϕ_w) จะทำให้เกิดกระแสไหลวนที่ชิ้นงาน กระแสที่ไหลในชิ้นงานส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้น เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องช่องว่างอากาศ (Air-gap Flux , ϕ_g) โดยปกติช่องว่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงานจะมีระยะห่างค่อนข้างมากเพื่อความสะดวกในการป้อนหรือนำชิ้นงานออก นอกจากนั้นยังเป็นฉนวนความร้อนให้กับขดเหนี่ยวนำ ส่วนที่สามเป็นเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวดเหนี่ยวนำ (Coil Flux , ϕ_c) เส้นแรงในส่วนนี้ที่ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ทางผิวเช่นเดียวกับที่เกิดที่ชิ้นงานผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นทั้งหมด (ϕ_0) แสดงไว้ในสมการที่ (2.9) เมื่อนำไปเขียนเป็นวงจรสมมูลทางแม่เหล็กและทางไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.9 และ 2.10

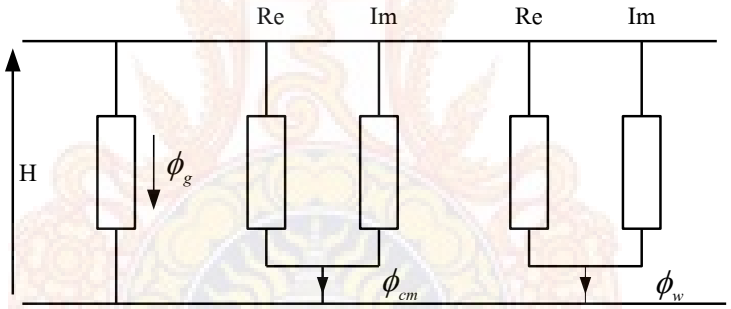
$$\phi_0 = \phi_w + \phi_g + \phi_c \tag{2.9}$$

ประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำ

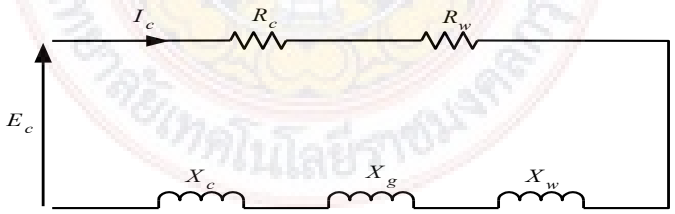
$$\eta = \frac{R_w}{R_w + R_c} \tag{2.10}$$



รูปที่ 2.8 เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องผ่านส่วนต่างๆ ของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน [1]



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลทางแม่เหล็กของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน [1]



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ [1]

ตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำ

$$\cos\theta = \frac{R_w + R_c}{Z} \tag{2.11}$$

กำลังงานที่ขดลวดเหนี่ยวนำ

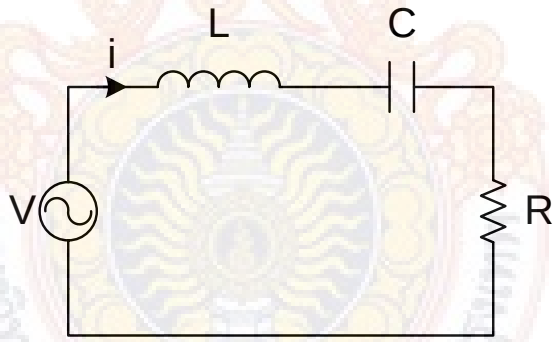
$$P_c = \frac{P_w}{\eta} \tag{2.12}$$

เมื่อนำสมการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับค่าพารามิเตอร์ของขดเหนี่ยวนำ เมื่อนำมาเชื่อมโยงจะพบว่า

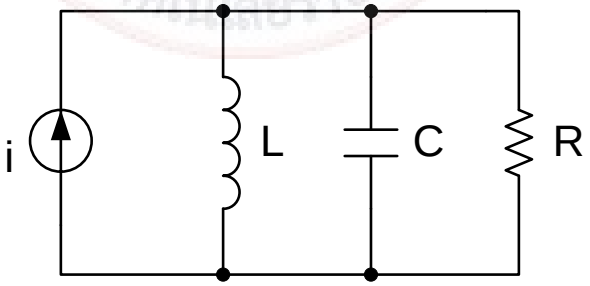
- ค่าประสิทธิภาพของขดเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นงานที่ต้องการให้ความร้อนโดยหากค่าความต้านทาน R_w กับ R_c มีค่าใกล้เคียงกันจะทำให้ประสิทธิภาพมีค่าประมาณ 50% จึงสามารถสรุปได้ว่า ถ้ากำหนดขนาดชิ้นงานที่เท่ากัน ชิ้นงานที่มีความต้านทานจำเพาะที่สูงกว่าจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของขดเหนี่ยวนำมีค่าสูงกว่า

- การที่มีช่องว่างอากาศระหว่างชิ้นงานกับขดเหนี่ยวนำที่สูง จะทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ของขดเหนี่ยวนำมีค่าสูงมีผลทำให้ตัวประกอบกำลังของขดเหนี่ยวนำมีค่าต่ำ ดังนั้นค่าช่องว่างอากาศควรมีค่าที่เหมาะสมกล่าวคือเมื่อใส่ฉนวนความร้อนกั้นแล้วยังสามารถป้อนชิ้นงานเข้าไปภายในขดเหนี่ยวนำได้สะดวก

2.7 หลักการเรโซแนนท์



รูปที่ 2.8 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม



รูปที่ 2.9 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

เรโซแนนซ์ (Resonance) หมายถึง สภาวะที่ค่า p.f. ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าเท่ากับ 1 สภาวะเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในวงจร R-L-C อนุกรม และ R-L-C ขนานจะเกิดขึ้นในสภาวะที่ค่า $X_L = X_C$ ถ้าเป็นวงจร R-L-C อนุกรม จะทำให้ $V_L = V_C$ คุณสมบัติของวงจรคือ จะมีค่า Impedance ต่ำที่ความถี่เรโซแนนซ์ ทำให้กระแสไหลได้สูงสุด แต่ถ้าเป็นวงจร R-L-C ขนาน จะทำให้ $I_L = I_C$ คุณสมบัติของวงจรคือ จะมีค่า Impedance สูงที่ความถี่เรโซแนนซ์ ทำให้กระแสไหลได้ต่ำสุด เมื่อเกิดเรโซแนนซ์ขึ้นในวงจร R-L-C อนุกรม และ วงจร R-L-C ขนาน จะทำให้

1. ค่าอิมพีแดนซ์ (Z) จะมีค่าเท่ากับค่าความต้านทาน (R) ที่ต่ออยู่ในวงจร (Z = R)
2. กระแสไฟฟ้ารวมที่ไหลในวงจรจะ inphase กับค่าแรงดันไฟฟ้ารวมของวงจร
3. Phase angle $(\theta) = 0^\circ$ เพราะ phasor ของกระแสไฟฟ้ารวม (I_t) กับแรงดันไฟฟ้ารวม (V_t)
4. Power factor มีค่าเท่ากับ 1 เพราะ p.f. $= \cos\theta = \cos 0^\circ = 1$

สามารถหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ได้ดังนี้

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.4)$$

หรือ

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L} \quad (2.5)$$

และ

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C} \quad (2.6)$$

2.8 มอสเฟตกำลัง

มอสเฟตกำลังเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้แรงดันควบคุมและต้องการกระแสอินพุตเพียงเล็กน้อยซึ่งนิยมใช้มากในวงจรสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายในการควบคุมมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์ เป็นต้น เนื่องจากมีข้อดีดังนี้

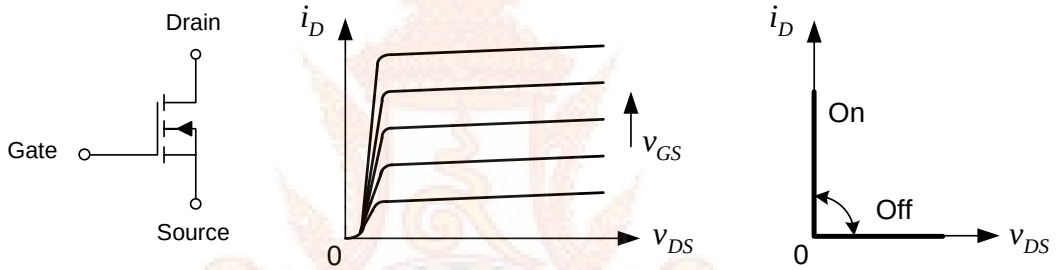
- กำลังสูญเสียขณะสวิตช์ต่ำ
- มีอัตราขยายสูงและวงจรขับสร้างได้ง่ายและราคาถูก
- มีความทนทานและมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิได้ดี
- สามารถนำมาต่อขนานได้ง่าย
- มีความเร็วในการสวิตชิ่งสูง

เมื่อต้องการให้มอสเฟตกำลังนำกระแสอย่างต่อเนื่อง จะต้องป้อนแรงดันระหว่างขาเกตกับขาซอส (v_{GS}) อย่างต่อเนื่อง ช่วงเวลาในการสวิตชิ่งของมอสเฟตกำลังจะมีค่าอยู่ระหว่างหลักสิบของนาโนวินาที ถึงหลักร้อยนาโนวินาทีซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดพิกัดของมอสเฟตกำลัง

ความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอส $R_{DS(on)}$ จะขึ้นอยู่กับพิกัดการทำงานของแรงดันไฟฟ้า หากทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงก็ยิ่งทำให้ความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอสมีค่ามากขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อกำลังสูญเสียจาการนำกระแส (conduction losses) เช่น มอสเฟตกำลังมีค่าพิกัดการทำงานของแรงดันไฟฟ้า 1,000 โวลต์ จะมีค่าความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอสมากกว่ามอสเฟตกำลังที่มีคาพิกัดการทำงานของแรงดันไฟฟ้า 200 โวลต์

ความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอสของมอสเฟตกำลังจะมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นบวก คือ เมื่ออุณหภูมิมากขึ้นความต้านทานก็จะมากขึ้น มอสเฟตกำลังสามารถนำมาต่อขนานกันได้ง่ายหากต้องการใช้งานที่ต้องการกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ทั้งนี้มอสเฟตกำลังจะต้องมีคุณสมบัติต่างๆ เหมือนกันมากที่สุดจึงจะสามารถนำมาต่อขนานกันได้

มอสเฟตกำลังมีสัญลักษณ์และคุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะสภาวะอยู่ตัว คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ ดังแสดงในภาพที่ 2.10 (ก) – (ค) ตามลำดับ



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2.10 มอสเฟตกำลัง (ก) สัญลักษณ์ (ข) คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (ค) คุณลักษณะในอุดมคติ

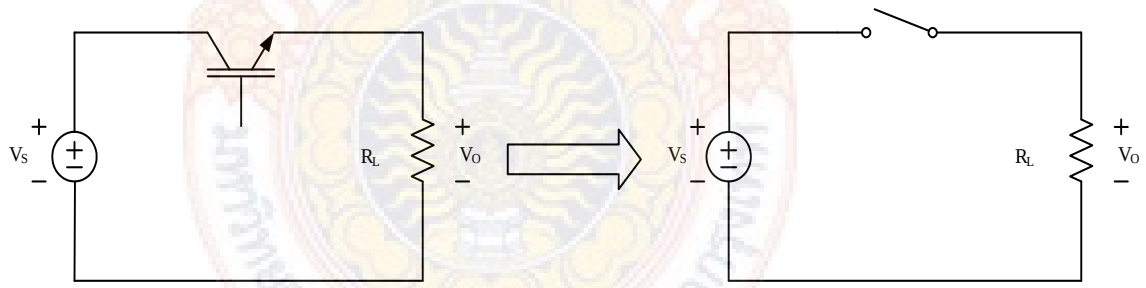
การเปรียบเทียบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถควบคุมให้นำกระแสและหยุดนำกระแสได้โดยวงจรควบคุมนั้นต้องคำนึงถึงขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าและความถี่ในการสวิตช์ดังตารางที่ 2.1

อุปกรณ์	ความสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้า	ความเร็วในการสวิตช์	ความสามารถทนแรงดันไฟฟ้าด้านลบ	ชนิดการควบคุม
จีทีโอ (GTO)	สูง	ต่ำ	ได้	กระแสไฟฟ้า
บีเจที (BJT)	กลาง	กลาง	ไม่ได้	กระแสไฟฟ้า
ไอจีบีที (IGBT)	กลาง	กลางและค่อนข้างสูง	ได้	แรงดันไฟฟ้า
มอสเฟตกำลัง (Power mosfet)	ต่ำ	สูง	ไม่ได้	แรงดันไฟฟ้า

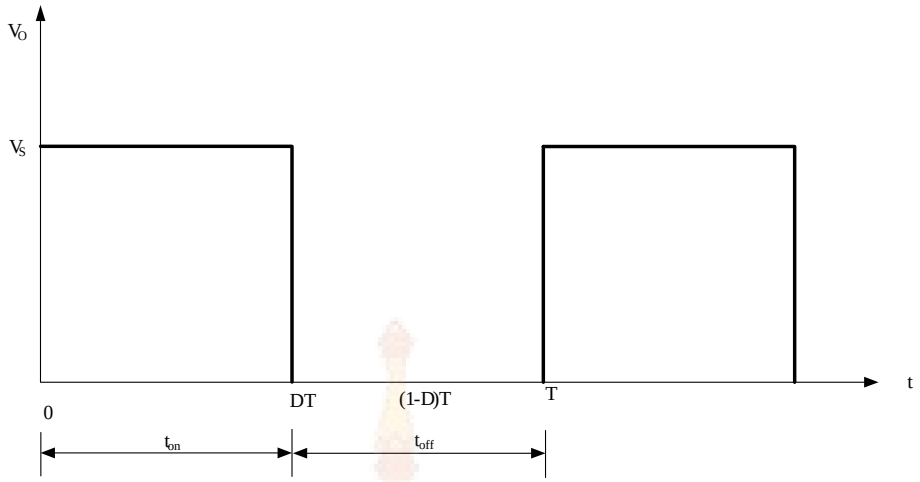
ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถของอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

2.9 หลักการทำงานของวงจรสวิตช์

อุปกรณ์สวิตช์ เช่น มอสเฟต หรือไอจีบีที จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์มีโหมดการทำงานคือโหมดนำกระแส และหยุดนำกระแสโดยสมมติให้มอสเฟต หรือไอจีบีที ที่ใช้เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ในอุดมคติในภาพที่ 2.4 หลักการทำงานคือ



(ก) วงจรสวิตช์พื้นฐาน (ข) วงจรสมมูลของสวิตช์



(ค) รูปคลื่นแสดงการทำงานของสวิตช์

รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของวงจรสวิตช์พื้นฐาน

เมื่อสวิตช์นำกระแส แรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า ($V_o = V_s$) และเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส แรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ($V_o = 0$)

ช่วงเวลาในการนำกระแสและหยุดนำกระแส จะได้จากสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นพัลส์ดังในรูปที่ 2.4 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยหรือค่าของแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นพัลส์ดังใน รูปที่ 2.4 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยหรือค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกได้จาก สมการที่ (2.3)

$$V_o = \frac{1}{T}\int_0^T v_o(t)dt$$

$$V_o = \frac{1}{T}\int_0^{DT} v_s dt$$

$$V_o = V_s D \qquad (2.3)$$

เมื่อ V_s = แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

D = ดิวตี้ไซเคิล

จากสมการที่ 2.3 จะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกจะถูกควบคุมได้จากการปรับค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle หรือ Duty ratio:D) ซึ่ง D หมายถึง อัตราส่วนของช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแสต่อช่วงเวลาหนึ่งคาบการสวิตชิ่ง มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.4

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T}$$

$$t_{on} = DT$$

$$t_{off} = (1 - D)T \qquad (2.4)$$

เมื่อ t_{on} = ช่วงเวลานำกระแส

t_{off} = ช่วงเวลาไม่นำกระแส

T = เวลาหนึ่งคาบ

การกำหนดค่า D นิยมบอกเป็นสองลักษณะคือเป็นเลขเต็มหนึ่งและบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ค่าต่ำสุดของ D คือศูนย์และค่าสูงสุดคือหนึ่ง ขณะที่บอกเป็นเปอร์เซ็นต์จะมีค่าต่ำสุดเป็นศูนย์เปอร์เซ็นต์และค่าสูงสุดคือหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์

ตัวอย่างเช่น D = 0.4 หรือ D = 40% หมายถึงช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแสอยู่ 0.4 ส่วนจากช่วงเวลาหนึ่งคาบ หรือหมายถึงช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแสมีอยู่ 40% จากช่วงเวลาหนึ่งคาบหรือหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์

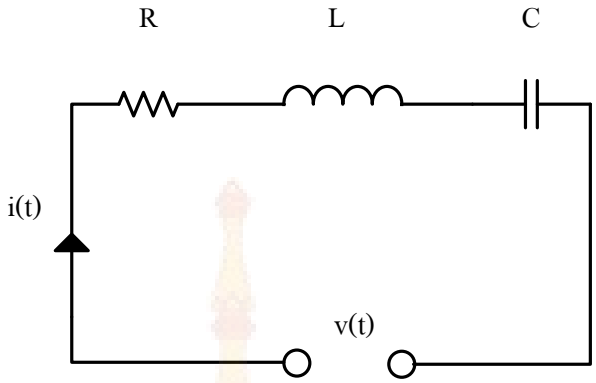
ในกรณีศึกษาเบื้องต้นนี้เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาจะสมมติให้ในขณะที่สวิตช์นำกระแสแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์มีค่าเป็นศูนย์ ทั้งนี้เพื่อสะดวกในการคำนวณและจะไม่คำนึงถึงการสูญเสียจากการทำงานของสวิตช์ ซึ่งหมายถึงวงจรนี้มีประสิทธิภาพ 100 %

2.10 เรโซแนนซ์คอนเวอร์เตอร์

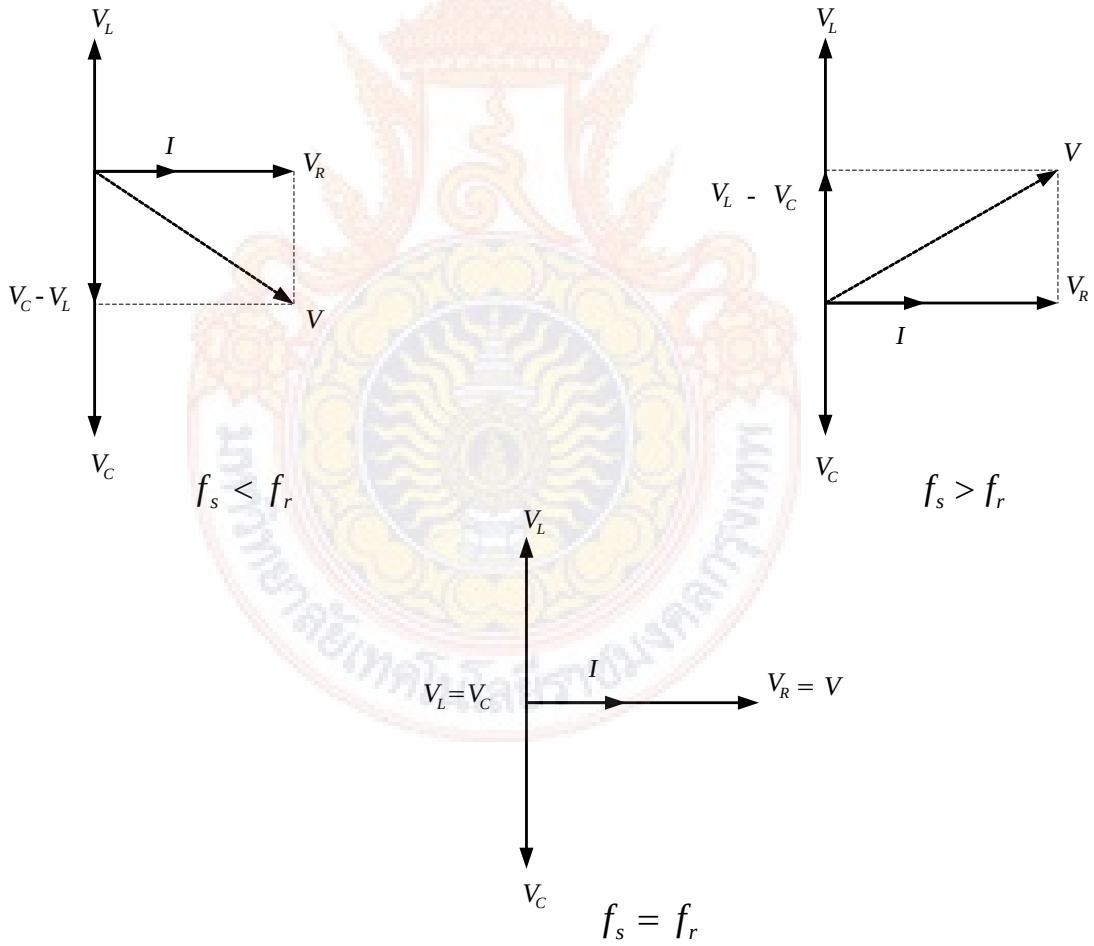
สภาวะทางไฟฟ้าที่เรียกว่า (Resonant) ซึ่งก็คือสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีเฟสเดียวกัน (In-Phase) พิจารณาจากวงจร (Series Resonant) เมื่อปรับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจนถึงจุดจุดหนึ่งที่ทำให้ค่า $X_L = X_C$ ความถี่ที่จุดนี้เรียกว่าความถี่รีโซแนนซ์ (Resonant Frequency) ทำให้อิมพิแดนซ์ในวงจรเหลือเพียงความต้านทานเพียงอย่างเดียวกระแสที่ไหลในวงจรจึงมีค่าสูงสุด

f_s คือ ความถี่สวิตช์

f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์



รูปที่ 2.12 วงจรเรโซแนนซ์อนุกรม

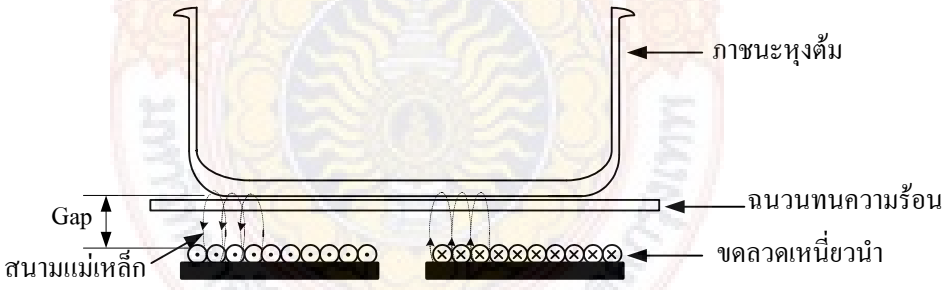


รูปที่ 2.13 เฟสเซอร์ของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมที่ค่าความถี่ต่าง ๆ

2.11 หลักการของเตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำความร้อน

เมื่อมีสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตัดผ่านตัวนำจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ตัวนำหากทำการลัดวงจรที่ตัวนำก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้นได้และผลที่ได้จากการที่กระแสไฟฟ้าไหลก็จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวนำเป็นไปตามสมกา $P_0 = I_o^2 R$ จากหลักการนี้จึงนำมาสู่การประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับเตาไฟฟ้าหรือกระทะไฟฟ้าได้ ซึ่งมีข้อดีกว่าเตาไฟฟ้าที่ใช้หลักการทำให้เกิดความร้อนโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดความร้อน ปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านไม่ได้ให้กับภาชนะทั้งหมด แต่จะมีการสูญเสียความร้อนออกสู่ภายนอกด้วย ส่วนหลักการเหนี่ยวนำความร้อนนั้น พลังงานจะถูกส่งผ่านออกไปในรูปของสนามแม่เหล็ก ไปทำให้เกิดกระแสไหลวนที่ภาชนะ การส่งผ่านพลังงานจะมีประสิทธิภาพมากกว่า การเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับเตาไฟฟ้าหรือกระทะไฟฟ้าหรือแม้กระทั่งงานทางด้าน การเชื่อม การชุบแข็ง การบัดกรี และงานหลอมล้วนใช้แหล่งจ่ายที่มีความถี่สูงทั้งนั้น จึงจำเป็นต้องทำการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีความถี่สูงเพื่อที่จะจ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กความถี่สูงที่ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน ตามกฎของแอมแปร์ที่กล่าวไว้ แหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่สูงที่ใช้ในโครงงานนี้ได้นำวงจรที่เรียกว่าวงจรอนุกรมเรโซแนนท์ มาใช้งาน

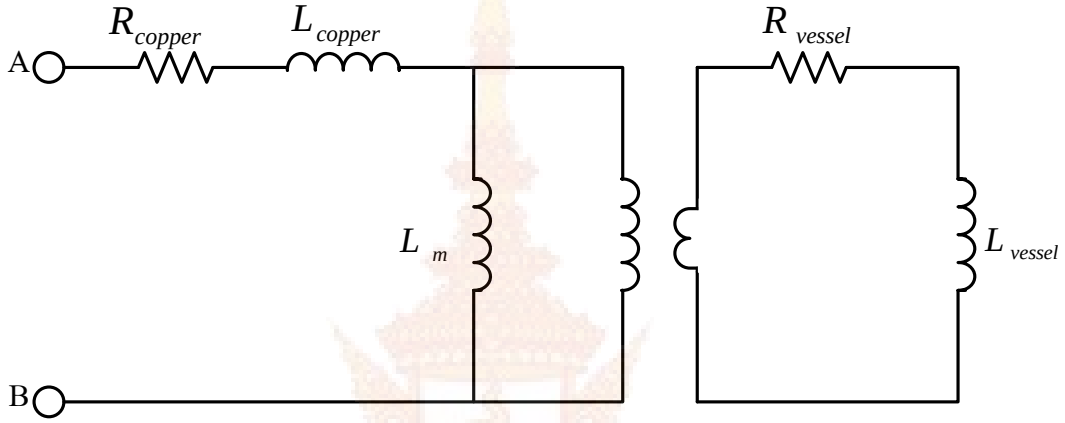
2.12 การวิเคราะห์วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนกับโหลดภาชนะหุงต้ม



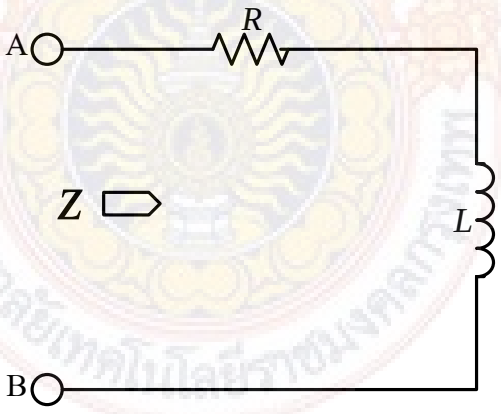
รูปที่ 2.14 หลักการให้ความร้อนของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

จากรูปที่ 2.14 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดภาชนะหุงต้มจะมีเส้นแรงแม่เหล็กคล้องผ่านซึ่งกันและกันซึ่งมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลง โดยสามารถนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลของหม้อแปลงดังรูปที่ 2.15 ซึ่งภาชนะหุงต้มทำหน้าที่เป็นขดลวดที่อยู่ทางด้านทุติยภูมมีจำนวนรอบขดลวดเพียง 1 รอบโดยมีค่าความเหนี่ยวนำรั่ว (Leakage Inductance: L_{vessel}) ของภาชนะหุงต้มและความต้านทานของภาชนะหุงต้ม(R_{vessel}) ส่วนขดลวดทางด้านปฐมภูมิสามารถ

แทนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ โดยมีค่าความเหนี่ยวนำรั่ว (Leakage Inductance: L_{copper}) ของขดลวดเหนี่ยวนำ ความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ(R_{copper}) และค่าเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก(Magnetizing Inductance: L_m) ซึ่งมีค่าน้อยมากและเมื่อรวมกับ R_{vessel} และ L_{vessel} ทางด้านทุติยภูมิที่ย้ายมารวมกับด้านปฐมภูมิแล้วจะได้อิมพีแดนซ์รวม Z ประกอบด้วย R และ L ดังรูปที่ 2.16 ดังนั้นขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดภาชนะหุงต้มนี้สามารถเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลซึ่งประกอบด้วยความเหนี่ยวนำสมมูล L และความต้านทานสมมูล R



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับภาชนะหุงต้ม



รูปที่ 2.16 อิมพีแดนซ์สมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับภาชนะหุงต้ม

ขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดภาชนะหุงต้มสามารถเขียนแทนด้วยวงจรอนุกรมสมมูลซึ่งประกอบด้วย ความเหนี่ยวนำสมมูลและความต้านทานสมมูลหาได้ดังสมการ

$$R = R_{copper} + N^2 R_{vessel} \tag{2.37}$$

$$L = L_{copper} + N^2 L_{vessel} \tag{2.38}$$

เมื่อ N คือ จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ

R_{copper} คือ ความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิหรือขดลวดเหนี่ยวนำ

R_{vessel} คือ ความต้านทานของขดลวดทุติยภูมิหรือโหลดภาชนะหุงต้ม

L_{copper} คือ ความเหนี่ยวนำรั่ว (Leakage Inductance) ทางด้านปฐมภูมิ

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ

$$P_{copper} = I_{copper}^2 R_{copper} \tag{2.39}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในโหลดภาชนะหุงต้มมีค่าเท่ากับ

$$P_{vessel} = I_{vessel}^2 R_{vessel} \tag{2.39}$$

เมื่อ I_{vessel} คือ กระแสที่ไหลในโหลดภาชนะหุงต้ม

I_{copper} คือ กระแสที่ไหลในขดลวดเหนี่ยวนำ

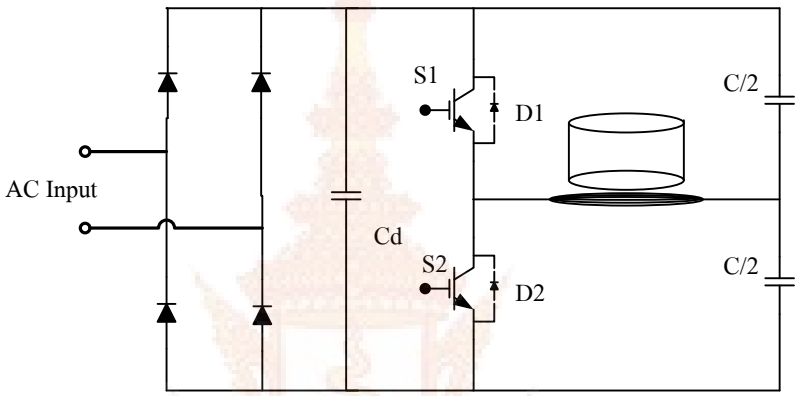
เนื่องจากผลของ Skin Depth การไหลวนของกระแสจะเกิดเฉพาะที่บริเวณที่ผิวของภาชนะหุงต้ม ดังนั้นความต้านทานที่ผิวของโหลดภาชนะหุงต้มในย่านความถี่สูง R_{vessel} มีค่าดังนี้

$$R_{vessel} = \frac{\rho_{vessel}}{\delta_{vessel}} = \sqrt{\mu_0}.\sqrt{\rho_{vessel}\mu_r f} \tag{2.40}$$

จากสมการ (2.40) จะเห็นได้ว่าความต้านทานของภาชนะหุงต้ม R_{vessel} จะแปรผันโดยตรงกับสภาพความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของภาชนะหุงต้ม(ρ_{vessel}) ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (μ_r) และความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ (f) ที่ป้อนจากอินเวอร์เตอร์ และการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดภาชนะหุงต้ม (P_{vessel}) สามารถทำได้โดยการเพิ่มความถี่ (f) ของกระแสในขดลวดเหนี่ยวนำและแอมแปร์-เทอร์น ($N.I_{copper}$) ของขดลวดด้านปฐมภูมิ

2.13 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ฮาร์ฟบริดจ์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม

จากวงจรรูปที่ 2.17 ซึ่งเป็นวงจรโดยรวมของวงจรเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยที่ขดลวดเหนี่ยวนำกับภาชนะหุงต้มสามารถแทนด้วยความต้านทานสมมูลและความเหนี่ยวนำสมมูล ซึ่งเมื่อมองวงจรที่โหลดเอาท์พุต RL ของชุดหม้อหุงต้มและขดลวดด้วยหลักการเธวินินก็จะสามารถมองวงจรที่โหลดเอาท์พุทในลักษณะของ RL และ C ต่ออนุกรมกันได้ซึ่งจากวงจร RLC อนุกรมที่โหลดสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรเรโซแนนซ์ได้ดังนี้



รูปที่ 2.17 วงจรโดยรวมของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

Resonant Frequency (ω_r)

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{2.41}$$

Characteristic Impedance (Z_0)

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \omega_r L = \frac{1}{\omega_r C} \tag{2.42}$$

Load Quality Factor (Q_L)

$$Q_L = \frac{\omega_r L}{R} = \omega_r L = \frac{1}{\omega_r C} \tag{2.43}$$

อิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมจะเป็น

$$Z = R + j\left(\omega_r L - \frac{1}{\omega_s C}\right) = R\left[1 + jQ_L\left(\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s}\right)\right]$$

$$= Z_0\left[\frac{R}{Z_0} + j\left(\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s}\right)\right] \qquad (2.44)$$

เมื่อ R คือ ความต้านทานสมมูล

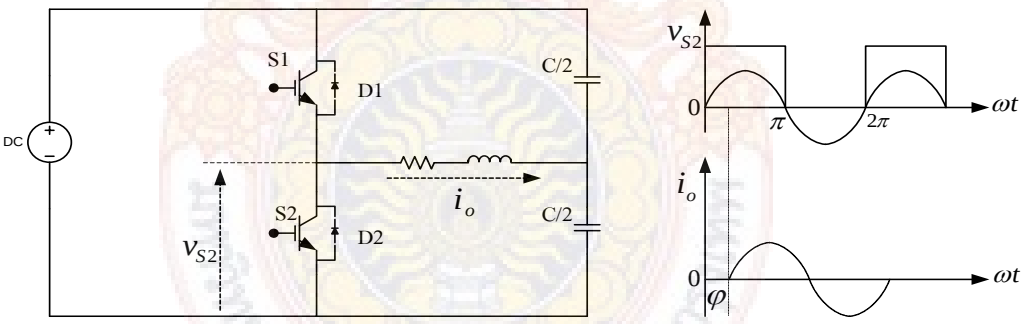
L คือ ความเหนี่ยวนำสมมูล

C คือ ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์

ω_s คือ ความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

2.14 การวิเคราะห์ แรงดัน และกระแส ของวงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม

หัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์แรงดัน และกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม



(ก) วงจรอินเวอร์เตอร์ฮาร์ฟบริดจ์ (b) รูปคลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์และกระแสโหลด

รูปที่ 2.18 วงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ และรูปคลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์ v_{s2} และกระแสโหลด i_0 เมื่อ $f_s > f_r$

จากรูปที่ 2.18 แรงดันที่ป้อนให้โหลดเรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมโดยมี Function ดังนี้

$$v_{s2} = V_d \text{ เมื่อ } 0 < \omega t \le \pi$$

$$v_{s2} = 0 \text{ เมื่อ } \pi < \omega t \le 2\pi$$

จากอนุกรมฟูเรียร์จะได้สมการแรงดันคร่อมสวิตช์ S_2 ดังนี้

$$v_{s2} = \frac{V_d}{2} + \frac{2V_d}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1-(-1)^n}{2n}\sin n\omega t$$

$$v_{s2} = V_d\left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi}\sin\omega t + \frac{2}{3\pi}\sin 3\omega t + \frac{2}{5\pi}\sin 5\omega t + ...\right) \quad (2.45)$$

Fundamental ของแรงดัน v_{s2} คือ

$$v_{s2} = V_{\max}\sin\omega t \quad (2.46)$$

ซึ่งจะได้ขนาด peak เป็น

$$V_{\max} = \frac{2V_d}{\pi} \approx 0.637V_d \quad (2.47)$$

ดังนั้นค่า rms ของ fundamental แรงดัน v_{s2} คือ

$$V_{rms} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}V_d}{\pi} \approx 0.45V_d \quad (2.48)$$

และจะได้สมการกระแสโหลด i_0 ดังนี้

$$i_0 = I_{\max}\sin(\omega t - \varphi) \quad (2.49)$$

เมื่อ

$$I_{\max} = \frac{V_{\max}}{Z} = \frac{2V_d}{\pi Z} = \frac{2V_d}{\pi R\sqrt{1+Q_L^2\left(\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s}\right)^2}}$$

$$= \frac{2V_d}{\pi Z_0 \sqrt{\left(\frac{R}{Z_0}\right)^2 + \left(\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s}\right)^2}} \qquad (2.50)$$

โดยที่ Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่หลักมูล

2.15 การเปรียบเทียบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

การเปรียบเทียบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถควบคุมให้นำกระแส และควบคุมให้หยุดนำกระแสได้โดยวงจรควบคุม โดยคำนึงถึงขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าและความถี่ในการสวิตช์ ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถของอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

อุปกรณ์	ความสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้า	ความเร็วในการสวิตช์	ความสามารถทนแรงดันไฟฟ้าด้านลบ	ชนิดการควบคุม
จีทีโอ	สูง	ต่ำ	ได้	กระแสไฟฟ้า
บีเจที	กลาง	กลาง	ไม่ได้	กระแสไฟฟ้า
ไอจีบีที	กลาง	กลางและค่อนข้างสูง	ได้	แรงดันไฟฟ้า
มอสเฟตกำลัง	ต่ำ	สูง	ไม่ได้	แรงดันไฟฟ้า

2.16 การเลือกใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมให้นำกระแส และควบคุมให้หยุดนำกระแส โดยความเร็วในการเปลี่ยนแปลงการทำงานของสวิตช์จากที่นำกระแส เป็นไม่นำกระแสจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิด ซึ่งเวลาที่ใช้ในการ

เปลี่ยนแปลงจะมีค่าประมาณในย่านไมโครวินาที (microsecond) ในขณะที่สวิตช์ทางกลจะใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงจะมีค่าประมาณในย่านมิลลิวินาที (millisecond)

พารามิเตอร์ที่บอกถึงลักษณะที่ดีของตัวสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังได้แก่ ความน่าเชื่อถือ (reliability) ประสิทธิภาพ (efficiency) ขนาดและราคา นอกจากนั้นโดยทั่วไป พารามิเตอร์ของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สำคัญ มีดังนี้

2.16.1 กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถทนได้ (Maximum Current Carrying Capability)

2.16.2 แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถทนได้ (Maximum Voltage Carrying Capability)

2.16.3 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขณะนำกระแสและการทำงานที่ขึ้นต่ออุณหภูมิ (Forward Voltage Drop During ON and Its Temperature Dependency)

2.16.4 กระแสไฟฟ้ารั่วขณะไม่นำกระแส (Leakage Current During OFF)

2.16.5 ความร้อนที่สามารถทนได้ (Thermal Capability)

2.16.6 เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากการนำกระแสเป็นหยุดนำกระแส (Switching Transition Times During Both Turn-On and Turn-Off)

2.16.7 ความสามารถในการทนต่อ $\frac{dv}{dt}$ เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแสหรือขณะเริ่มหยุดนำกระแส (Capability to Stand $\frac{dv}{dt}$ When Switch is OFF or During Turn-Off)

2.16.8 ความสามารถในการทนต่อ $\frac{di}{dt}$ เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแสหรือขณะเริ่มหยุดนำกระแส (Capability to Stand $\frac{di}{dt}$ When Switch is OFF or During Turn-Off)

2.16.9 ความสามารถในการทนต่อทั้งกระแสและแรงดันไฟฟ้าสูงอย่างทันทีทันใด (Ability to Withstand Both High Current and Voltage Simultaneously)

2.16.10 ค่าความสูญเสียจากการสวิตช์ (Switching Loss)

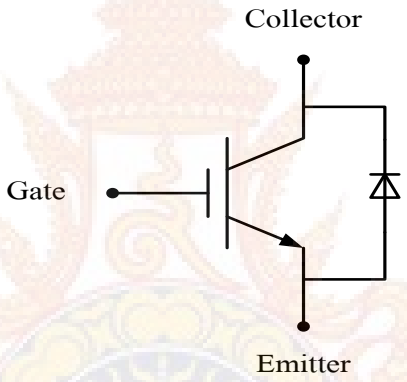
2.16.11 อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าและความซับซ้อนของวงจรลายพิมพ์

2.17 คุณสมบัติไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistors : IGBT)

อุปกรณ์เพาเวอร์อิเลคทรอนิกส์ที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวางได้แก่ เอสซีอาร์(SCR), ไตรแอค (TRIAC), ทรานซิสเตอร์กำลังและมอสเฟท โดยเฉพาะทรานซิสเตอร์กำลังและมอสเฟท นั้นเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาอุปกรณ์ชนิดใหม่ขึ้นมาที่มีชื่อว่าไอจีบีที(IGBT) โดยอุปกรณ์ทั้งสองนั้นมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป

ทรานซิสเตอร์กำลังขณะอยู่ในสภาวะนำกระแสจะมีอัตราการสูญเสียกำลังงานต่ำ มีอัตราทนแรงดันและขยายกระแสได้สูง แต่ความเร็วการสวิตช์ทำงานต่ำโดยเฉพาะในช่วงหยุดนำกระแสจะมีช่วงเวลาที่นานกว่าซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ตรงข้ามกับเพาเวอร์มอสเฟทที่มีความเร็วในการสวิตช์ทำงานนำกระแสและหยุดนำกระแสได้เร็วกว่า แต่ก็มีกำลังสูญเสียที่สูงมากเช่นกัน ด้วยเหตุผลนี้ทำให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์และเพาเวอร์มอสเฟทถูกนำมาพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพาเวอร์คอนโทรลชนิดใหม่ขึ้นมา โดยคุณสมบัติต่างๆจะรวมเอาข้อได้เปรียบของทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์และมอสเฟทเข้ามารวมไว้ในอุปกรชนิดใหม่นี้โดยมีชื่ออย่างเป็นทางการว่าไอจีบีที (Insulatd Gate Bipolar Junction Transistor: IGBT)

ไอจีบีที จัดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถควบคุมให้นำกระแส และควบคุมให้หยุดนำกระแสได้โดยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกต (V_{GE}) ไอจีบีทีมีสัญลักษณ์ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 สัญลักษณ์ของไอจีบีที

ไอจีบีที ได้รวมเอาข้อดีของมอสเฟตกำลัง (Power MOSFET) ทรานซิสเตอร์กำลัง (BJT) และจีทีโอไทริสเตอร์ (GTO) มารวมอยู่ด้วยกัน กล่าวคือ ไอจีบีที จะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ขาเกตสูงคล้ายกับมอสเฟตกำลัง ซึ่งต้องการพลังงานน้อยมากในการควบคุมการสวิตช์ ควบคุมการนำกระแส และการหยุดนำกระแสด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกต (V_{GE}) รวมทั้งสามารถใช้งานการสวิตช์ที่ความถี่สูง

ไอจีบีทีจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมต่ำขณะนำกระแสคล้ายกับทรานซิสเตอร์กำลัง ซึ่งมีค่าประมาณ 2-3 โวลต์ สำหรับพิกัดแรงดันไฟฟ้า 1,000 โวลต์ นอกจากนั้น ไอจีบีที ถูกออกแบบให้ทนแรงดันไฟฟ้าด้านลบได้คล้ายกับจีทีโอไทริสเตอร์ (GTO)

ไอจีบีที จะมีช่วงเวลานำกระแสและหยุดนำกระแสประมาณ 1ไมโครวินาที มีขนาดพิกัดกระแสไฟฟ้าถึง 2,000 แอมแปร์ และมีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 5,000 โวลต์

ไอจีบีทีเหมาะสำหรับใช้งานหลากหลายที่คล้ายกับมอสเฟตกำลังแต่มีพิกัดกำลังที่ใหญ่กว่า และสามารถออกแบบให้ทนแรงดันไฟฟ้าได้ทั้งด้านบวกและด้านลบ ไอจีบีทีจึงเรียกได้ว่า เป็นอุปกรณ์ประเภทที่ไม่จำเป็นต้องมีสนับเบอร์(Snubber) คือสามารถทนกระแสและแรงดันไฟฟ้าได้มากจนไม่จำเป็นต้องการวงจรสนับเบอร์ก็ได้

2.18 คุณสมบัติของ dsPIC30F4011

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่นำมาสร้างสัญญาณ PWM(Pulse Width Modulator) ในโครงงานนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F4011 และสัญญาณที่ได้ก็จะนำมาขับวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F4011 มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

2.18.1 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 16 บิต

2.18.2 สามารถทำงานสูงสุดได้ 30 ล้านคำสั่งต่อวินาที

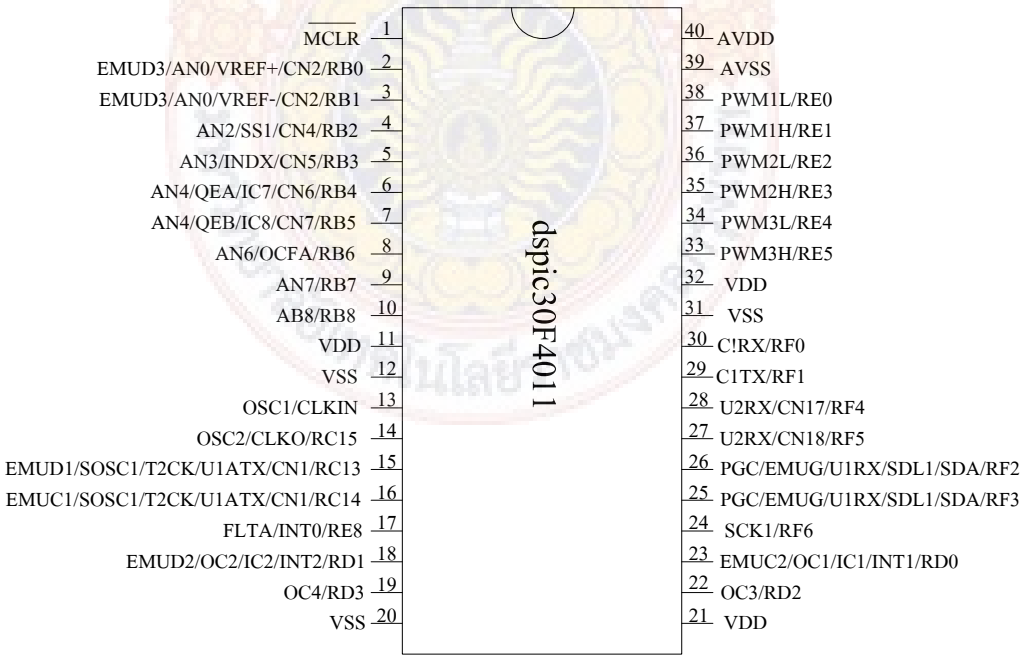
2.18.3 มีฟังชั่น PWM ในตัว 3 ชุดที่สามารถโปรแกรมให้เป็น Invert ได้

2.18.4 สามารถโปรแกรมใหม่ได้ถึง 100,000 ครั้ง

2.18.5 มีหน่วยความจำที่เอาไว้เก็บโปรแกรม 48 Kbytes

2.18.6 มีแรม 2 Kbytes

2.18.7 มีไทเมอร์ทั้งสิ้น 5 ชุด



รูปที่ 2.20 ขาใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011

2.19 การใช้งานจอแอลซีดี 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด

จอแอลซีดีนั้นมีการส่งสัญญาณเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยสัญญาณดิจิตอลซึ่งเป็นสัญญาณไฟฟ้า 2 ระดับ ขั้วต่อสัญญาณไฟฟ้าที่สำคัญของแอลซีดี 2 บรรทัด

2.19.1 ขั้วต่อสัญญาณมอบการทำงาน(Enable Pin:E) เมื่อขั้วต่อ E ได้รับสัญญาณลอจิกสูงและมีการเปลี่ยนสถานะของระดับสัญญาณระดับสูงเป็นระดับต่ำ จะหมายความว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ได้มอบการทำงานให้กับแอลซีดี จึงทำให้แอลซีดีอักษรอยู่ในสถานะที่จะพยายามตรวจสอบลักษณะงานที่มอบหมายจากขั้วต่อสัญญาณดิจิตอลอื่น แต่ถ้าให้ขั้วต่อ E มีระดับลอจิกต่ำจะหมายความว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ถอนการทำงานจากแอลซีดี

2.19.2 ขั้วต่อเลือกรีจิสเตอร์(Register Selection Pin:RS) เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ให้ระดับลอจิกสูงแก่ขั้วต่อ RS ของแอลซีดีอักษรแสดงว่าได้ทำการเลือกรีจิสเตอร์ข้อมูล(Data Register) ของแอลซีดีอักษรสำหรับการรับส่งข้อมูลระหว่างกันแต่ถ้าไมโครคอนโทรลเลอร์ให้ระดับลอจิกต่ำแก่ขั้วต่อ RS แสดงว่าได้ทำการเลือกรีจิสเตอร์คำสั่ง(Instruction Register) สำหรับการสั่งคำสั่งให้กับแอลซีดีอักษร

2.19.3 ขั้วต่อในการเลือกการอ่านการเขียน(Read/Write Selection Pin:R/W) เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งระดับลอจิกสูงแก่ขั้วต่อ RS เพื่อรับส่งข้อมูลกับแอลซีดีอักษรการส่งระดับลอจิกสูงให้กับขั้วต่อ R/W เท่ากับเป็นการเลือกอ่านข้อมูลจากแอลซีดีอักษร แต่ถ้าไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งระดับลอจิกต่ำให้กับขั้วต่อ R/W จะเป็นการเลือกเขียนข้อมูล ลงบนแอล-ซีดี

2.19.4 บัสข้อมูล (Data Bus) บัสข้อมูลแอลซีดีอักษรเป็นแบบ 8 บิตโดยข้อมูล 8 บิตของบัสข้อมูลก็คือ ระดับลอจิกที่ปรากฏบนขั้วต่อสัญญาณ 8 ขั้วบนแอลซีดีอักษร ซึ่งมักใช้สัญลักษณ์อักษรกำกับแต่ละขั้วเป็น DB0 , DB1, DB2, DB3, DB4, DB5, DB6 และ DB7 โดยระดับลอจิกปรากฏบนขั้วทั้ง 8 (บัสข้อมูล) อาจเป็นไปได้ทั้งคำสั่งที่ต้องการให้แอลซีดีอักษรปฏิบัติหรือไม่ก็เป็นข้อมูลที่ต้องการ เขียนลงบนแอลซีดี ขึ้นอยู่กับระดับลอจิกปรากฏบนขั้วต่อ RS

บทที่ 3
การออกแบบ

ระบบของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความร้อนแบบแหล่งจ่ายแรงดันใช้แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า 1 เฟส 220 V 50 Hz กำลังไฟฟ้าด้านอินพุทสูงสุด 1,200 W โดยให้ความร้อนแก่ภาชนะซึ่งเป็นแสตนเลสทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 cm

3.1 การออกแบบวงจรกำลัง

หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

3.1.1 ในขั้นตอนการออกแบบเตาหุงต้มเหนี่ยวนำ จึงจำเป็นต้องกำหนดรูปร่างของโหลดภาชนะหุงต้ม

3.1.2 ทำการกำหนดจำนวนเส้นลวดตีเกลียว เพื่อให้ได้ปริมาณวัตต์ที่ต้องการ โดยที่ IGBT สามารถรับปริมาณกระแสและแรงดันได้ที่วัตต์นั้นๆ

3.1.3 ออกแบบพันขดลวดให้ครอบคลุมก้นภาชนะของโหลดภาชนะหุงต้ม

รูปที่ 3.2 ขดลวดเหนี่ยวนำที่ออกแบบ

สำหรับเครื่องต้นแบบใช้ความถี่ในช่วง $17kHz - 40kHz$ ใช้ขดลวดเบอร์ S.WG.29 ตีเกลียว 31 เส้นพันเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 Cm เพื่อการเหนี่ยวนำได้ทั่วก้นภาชนะทำการวัดค่าโดยเครื่องวัด RL รุ่น HIOKI 3532-50 LCRHITESTER

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานในช่วงความถี่ $17kHz-40kHz$

ความถี่ (kHz)	ค่าความเหนี่ยวนำ (μH)	ค่าความต้านทาน (Ω)
17	60.242	4.0115
20	56.229	4.2655
25	51.853	4.5634
30	49.114	4.768
35	47.232	4.9428
40	45.963	5.058

3.1.4 เลือกขนาดคาปาซิเตอร์เรโซแนนซ์ เพื่อให้ได้ความถี่สวิตช์อยู่ในช่วงที่วงจรขับไอจีบีที ที่สามารถทำงานได้ จากขดเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบไปในหัวข้อที่ผ่านมานำไปวัดค่าความเหนี่ยวนำเครื่องวัด RL รุ่น HIOKI 3532-50 LCRHITESTER ในช่วงความถี่ $17kHz-40kHz$ ใช้ค่าความเหนี่ยวนำที่ $17kHz$ ไปคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุในวงจรเรโซแนนซ์ เนื่องจากใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุด

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

ดังนั้น

$$C = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 L}$$

$$C = \frac{1}{(2\times\pi\times17\times10^3)^2\times60.242\times10^{-6}}$$

$$C \approx 1.45\mu F$$

เพราะฉะนั้นเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุขนาด $1.5\mu F$ เนื่องจากใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ และถ้าเลือกค่าตัวเก็บประจุที่น้อยกว่าจะทำให้เลยจุดเรโซแนนซ์

3.1.5 เลือกขนาดพิกัดแรงดันและกระแสของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจร โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 220 Vac มาแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง วงจรบริดจ์เป็นแบบเต็มคลื่น และไอจีบีทีจะทำการสวิตช์ที่ความถี่สูง อยู่ในช่วง 17 kHz-40kHz โดยไอจีบีทีได้รับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระตุ้นที่ขาเกต ซึ่งสัญญาณที่ส่งมานั้นจะมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ และในการทำงานของไอจีบีที นั้นจะทำงานสลับกันโดยที่จะไม่ทำงานพร้อมกัน แลเมื่อไอจีบีทีสองตัวทำงานพร้อมกันสิ่งที่เกิดขึ้นก็คือ ไอจีบีทีจะเสียหาย

การทำงานในกรณีนี้คือกรณีที่ใช้ C/2 ในวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม เมื่อเราให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่สวิตช์ความถี่สูงมากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ($f_s > f_r$)

จากโหมดการทำงานทั้ง 4 โหมด แรงดันตกคร่อมสูงสุดที่จุด AB มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} V_{AB} &= \frac{V_{(\max)}}{2} \\ &= \frac{311}{2} V \\ &= 155.5 \ V \end{aligned}$$

ค่าความต้านทานสมมูล และค่าความเหนี่ยวนำสมมูลที่วัดได้จากเครื่องวัด RL รุ่น HIOKI 3532-50 LCRHITESTER ที่ความถี่ 17 kHz

วัดได้

$$R_S = 4.0115 \ \Omega$$
$$L_S = 60.242 \ \mu H$$

จะได้อิมพีแดนซ์สมมูล

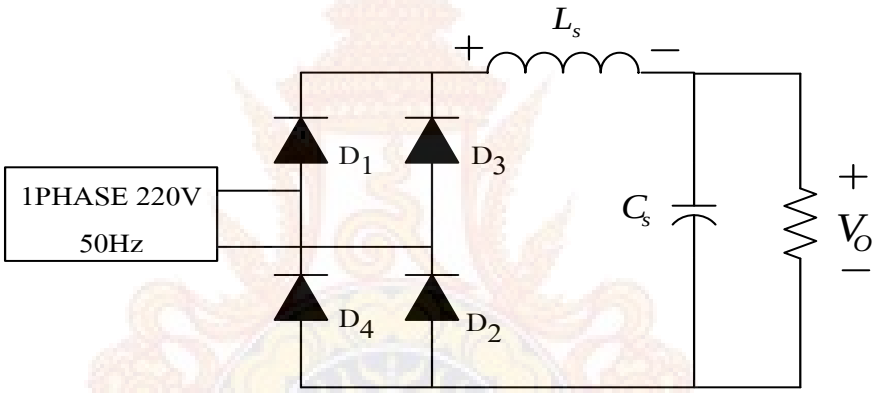
$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R_S{}^2 + XL_S{}^2} \\ &= \sqrt{(4.0115)^2 + (2 \times \pi \times 17 \times 10^3 \times 60.242 \times 10^{-6})^2} \\ &= 7.5827 \ \Omega \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นกระแสไหลสูงสุดที่จุด AB

$$\begin{aligned} I_{(\max)} &= \frac{V_{(\max)}}{Z} \\ &= \frac{155.5}{7.5827} \\ &= 20.51 \ A \end{aligned}$$

เนื่องจากไอจีบีทีอนุกรมกับโหลด RL ซึ่งเป็นอุปกรณ์สวิตช์ในอินเวอร์เตอร์ในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง จึงเลือกใช้ไอจีบีทีเบอร์ IRG4PH50UD พิกัดกระแสต่อเนื่องอยู่ที่ 24 A ที่อุณหภูมิ 100 ^{o}C พิกัดแรงดัน 1200 V และความถี่สวิตช์สูงไม่เกิน 200 kHz ซึ่งมีไดโอดชนิดฟื้นตัวเร็วภายในตัวที่ สามารถทนกระแสได้ 16 A ส่วนไดโอดบริดจ์ในวงจรเรียงกระแสจะใช้ไดโอดบริดจ์พิกัดกระแส 25 A พิกัดแรงดัน 250 V

3.1.6 วงจรเรียงกระแสทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในโครงงานนี้ใช้แรงดัน 1 เฟส 220 V 50 Hz วงจรเรียงกระแสประกอบด้วยบริดจ์ไดโอดและผ่านวงจรกรองโดยมีตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมอยู่กับตัวเก็บประจุในขณะที่วงจรเริ่มทำงานแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าประมาณศูนย์โวลต์ทำให้กระแสที่ไหลอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุมีค่าค่อนข้างสูงซึ่งกระแสในจำนวนนี้จะไหลผ่านบริดจ์ไดโอดอาจทำให้ไดโอดเสียหายได้ดังนั้นจึงใส่ตัวเหนี่ยวนำเพื่อจำกัดกระแสไว้ในช่วงเริ่มการทำงาน



รูปที่ 3.7 วงจรเรียงกระแส

การออกแบบการป้องกันการเสียหายของไอจีบีทีจาก di/dt การไหลของกระแสในไอจีบีทีต้องการเวลาอย่างน้อยที่จะทำให้การไหลของกระแสกระจายเต็มบริเวณรอยต่อสม่ำเสมอกันถ้าการเพิ่มของกระแสรวดเร็วเกินไปกว่าเวลาดังกล่าว จะทำให้กระแสไหลเฉพาะบริเวณแคบ ๆ และเกิด Hot Spot ขึ้น ความหนาแน่นของกระแสที่สูงเกินกว่าบริเวณรอยต่อทนได้นี้จะทำให้ไอจีบีทีเสียหาย

ดังนั้นในการป้องกันไม่ให้อัตราการเพิ่มของกระแส di/dt เพิ่มเร็วเกินไปทำได้โดยการเพิ่มขดลวดเหนี่ยวนำ L_s อนุกรมเข้าไปในวงจรซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนแปลงของกระแสในสภาวะใหม่เป็น

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_s}{L_s}$$

ไอจีบีทีเบอร์ IRG4PH50UD พิกัดกระแส $\frac{di}{dt} = 200A/\mu s$ ที่อุณหภูมิ 100 ^{o}C

ในการคำนวณหาค่า L_s เพื่อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อเวลาจะใช้แฟคเตอร์ความปลอดภัย(Safty Factor) เท่ากับ 2

$$\frac{200\times10^{6}}{2} = \frac{311}{L_s}$$

$$L_s = \frac{311}{100\times10^{6}}$$

$$= 3.1\ \mu H$$

เลือกใช้ค่า L_s เพื่อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อเวลาอย่างน้อย 3.1 μH

การออกแบบการป้องกันการเสียหายของไอจีบีทีจาก dv/dt การจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับไอจีบีทีโดยตรงเท่ากับป้อนรูปสัญญาณแบบขั้น(Step) ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่สูงมากให้กับวงจรจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลและไอจีบีทีเสียหายได้ ดังนั้นจึงต้องลดอัตราการเพิ่มของแรงดันไฟฟ้าโดยการขนานค่าความจุ C_s เข้ากับไอจีบีที

ตัวเก็บประจุสนับเบอร์หาได้จาก

$$C_s = \frac{I_L t_f}{2V_s}$$

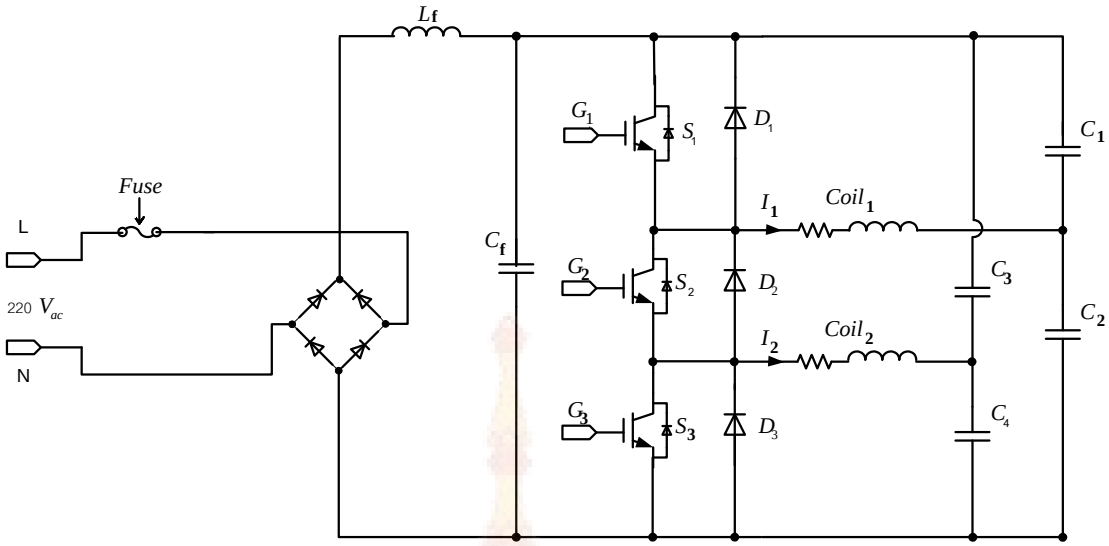
กระแสโหลด I_L จากการคำนวณได้ 20.51 A

t_f คือช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสของไอจีบีทีเท่ากับ 330 ns

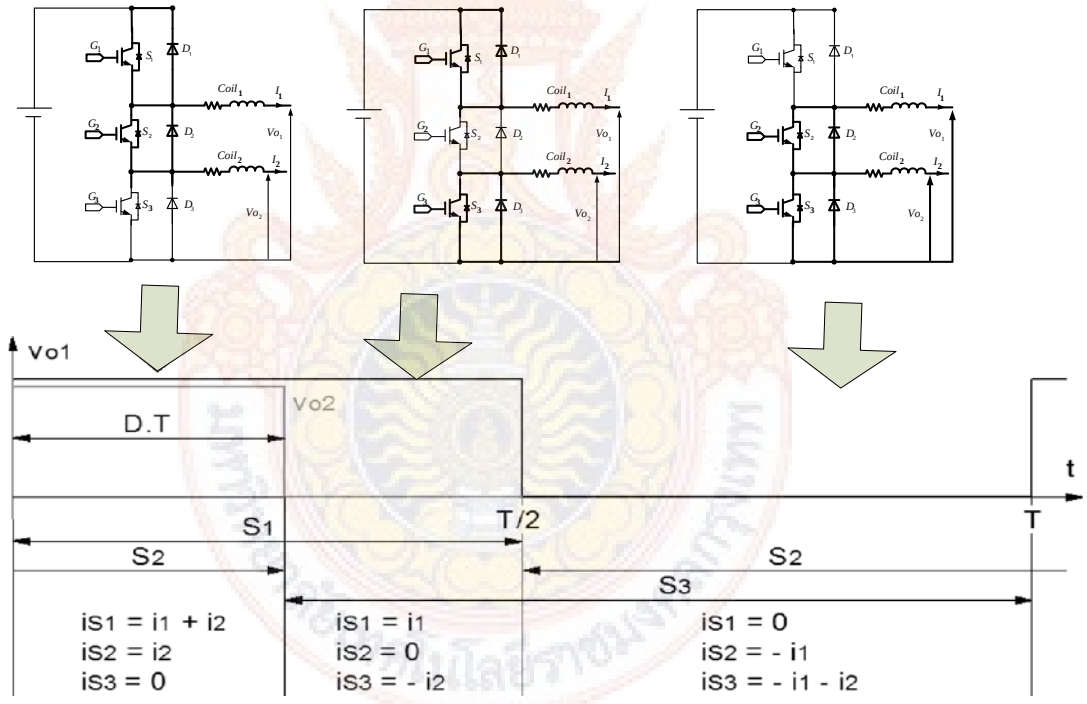
V_s คือแรงดันที่แหล่งจ่าย

$$C_s = \frac{(20.51)(330\times10^{-9})}{(2)(311)} = 10.88\ nF$$

เลือกใช้ค่า C_s เพื่อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่อเวลาอย่างน้อย 10.88 nF



รูปที่ 3.8 วงจรกำลังที่นำเสนอ



รูปที่ 3.9 โหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์

3.2 วงจรขับเกต

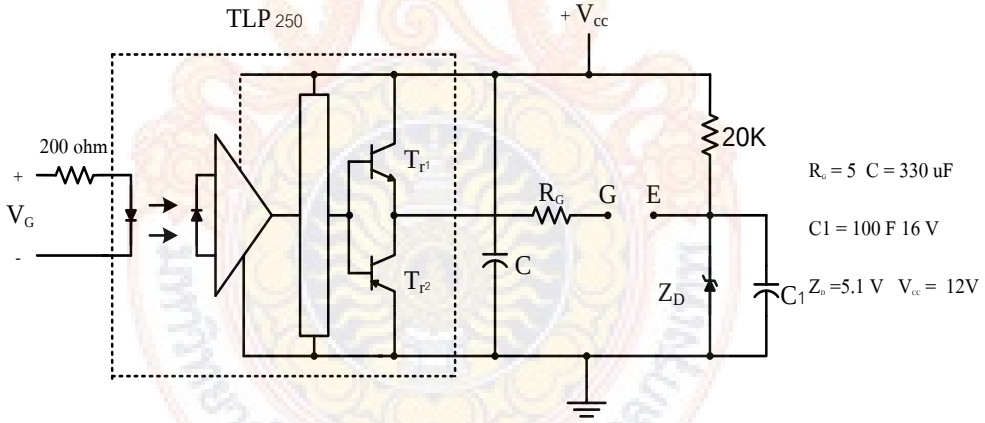
โครงงานนี้ใช้วงจรสำเร็จรูปโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250 เป็นวงจรขับเกตโดยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม จะเข้าที่ขา 2 และเอาท์พุทออกที่ขา 6 และ 7 ของเพื่อนำไปขับขาเกตของ IGBT

ไอจีบีทีต้องการแรงดันมาขับเกตเพื่อให้มันสามารถทำงานในสภาวะนำกระแส และหยุดนำกระแสได้ ซึ่งวงจรขับที่ใช้ในโครงงานนี้จะใช้ไอซี TLP250 เป็นไอซีที่แยกส่วนของสัญญาณขับกับส่วนที่ใช้ขับสวิตช์ดังวงจรในรูปที่ 3.9 จากรูปจะต่อความต้านทานอนุกรม ($R_G = 5\ \Omega$) เข้าขาเกตของไอจีบีทีเพื่อควบคุมเวลาในการสวิตช์ของไอจีบีที (Switching Time) และต่อซีเนอร์-ไดโอดเข้าที่ขาอีมิเตอร์ของไอจีบีทีเพื่อสร้างแรงดัน -5 V ในช่วงหยุดทำงานของสวิตช์สำหรับช่วยให้สวิตช์หยุดทำงานเร็วขึ้น โดยไอซีจะทำงานเมื่อได้รับสัญญาณ พีดับเบิลยูเอ็ม จะทำให้สวิตช์ T_{r1} ต่อวงจรเพื่อจ่ายแรงดันเข้าขาเกตกับขาอีมิเตอร์ของไอจีบีที โดยแรงดันตกคร่อมขาเกตและอีมิเตอร์จะเป็น

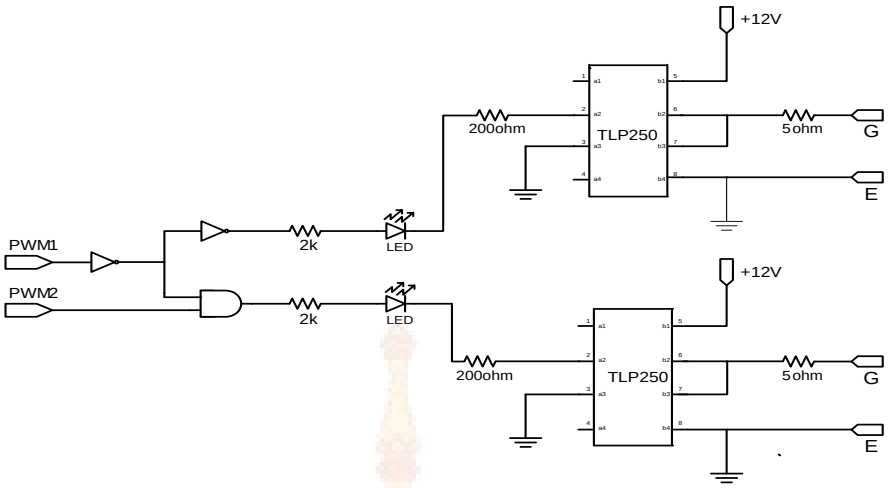
$$V_{GE} = V_{CC} - V_Z \tag{3.1}$$

เมื่อไม่มีสัญญาณขับสวิตช์ สวิตช์ T_{r2} จะต่อวงจรทำให้แรงดันตกคร่อมขาเกตและอีมิเตอร์มีค่าเท่ากับ

$$V_{GE} = -V_Z \tag{3.2}$$



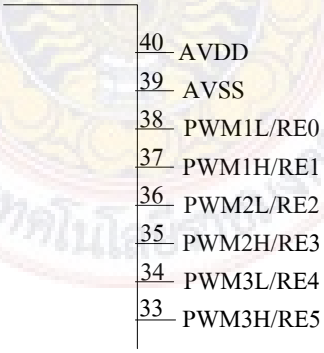
รูปที่ 3.10 วงจรขับสวิตช์ไอจีบีที



รูปที่ 3.11 วงจรใช้งานของวงจรขับเกต

3.3 การสร้างสัญญาณ PWM ในไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่นำมาสร้างสัญญาณ PWM(Pulse Width Modulator) ในโครงงานนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F4011 และสัญญาณที่ได้ก็จะนำมาขับวงจร ขับเกต dsPIC30F4011 นั้นมีเอาท์พุต PWM ในตัว 3 ชุดโดยในแต่ละชุดจะมี 2 ช่อง ซึ่ง สามารถโปรแกรมให้เป็นคู่ และสามารถกลับเฟสของสัญญาณให้เหมาะสมกับการใช้งาน เพื่อนำไปขับวงจรอินเวอร์เตอร์ อีกทั้งยังเลือกปรับความถี่ของ PWM และสามารถเลือกปรับค่า Dead Time ได้ด้วยซอฟแวร์



รูปที่ 3.12 ขาใช้งาน PWM ของ dsPIC30F4011

ในโมดูล MCPWM ของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 มีรีจิสเตอร์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณ PWM มีดังนี้

3.3.1 PTCON รีจิสเตอร์ควบคุมฐานเวลาในการกำเนิดสัญญาณ PWM

3.3.2 PTMR รีจิสเตอร์กำหนดค่าฐานเวลาของการกำเนิดสัญญาณ PWM

3.3.3 PTPER รีจิสเตอร์กำหนดคาบเวลาของฐานเวลาสำหรับการกำเนิดสัญญาณ PWM

3.3.4 PWMCON1 รีจิสเตอร์ควบคุม PWM # 1

3.3.5 DTCON1 รีจิสเตอร์ควบคุมค่าเวลาวิกฤตหรือ Dead Time # 1

3.3.6 PDC1 รีจิสเตอร์กำหนดค่าดิวตี้ไซเคิลของโมดูลกำเนิดสัญญาณ PWM ชุดที่1

3.3.7 PDC2 รีจิสเตอร์กำหนดค่าดิวตี้ไซเคิลของโมดูลกำเนิดสัญญาณ PWM ชุดที่2

3.3.8 PDC3 รีจิสเตอร์กำหนดค่าดิวตี้ไซเคิลของโมดูลกำเนิดสัญญาณ PWM ชุดที่3

การใช้งานโมดูล MCPWM นี้เริ่มจากการกำหนอค่าฐานเวลาในรีจิสเตอร์ PTMR โดยกำหนดให้เป็นฐานเวลา PWM ในโหมดนับค่าขึ้นหรือลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในโหมดนี้ค่าฐานเวลาในรีจิสเตอร์ PTMR จะเพิ่มค่าขึ้นจนกระทั่งเท่ากับค่าในรีจิสเตอร์ PTPER จากนั้นจะกลับทิศทางการนับเป็นนับค่าลง จนกระทั่งเท่ากับ “ 0 “ แล้วกลับไปเริ่มต้นนับใหม่ นั่นคือรีจิสเตอร์ PTPER เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้กำหนดค่าการนับคาบเวลาของรีจิสเตอร์ PTMR

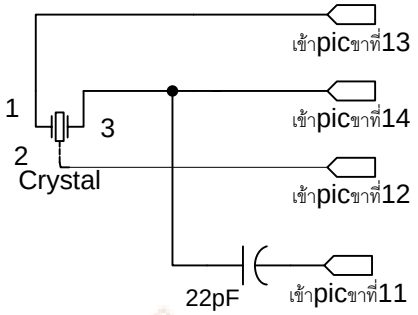
รีจิสเตอร์ PTPER ในการตั้งคาบเวลาสำหรับพัลส์ dsPIC30F4011 ใช้เพียง 15 บิตด้านในสำคัญน้อยสุดของรีจิสเตอร์นี้ในการกำหนดค่าคาบเวลา ด้วยสูตร

$$PTPER = \frac{Fcy}{F_{PWM}(PTMR_{prescaler})} - 1 \qquad (3.3)$$

เมื่อ PTPER คือค่าที่ต้องระบุใน 15 บิตด้านในสำคัญน้อยสุดของรีจิสเตอร์ PTPER และ Fcy คือความถี่ของวัฏจักรคำสั่ง

3.4 การต่อตัวกำเนิดสัญญาณนาฬิกาเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011

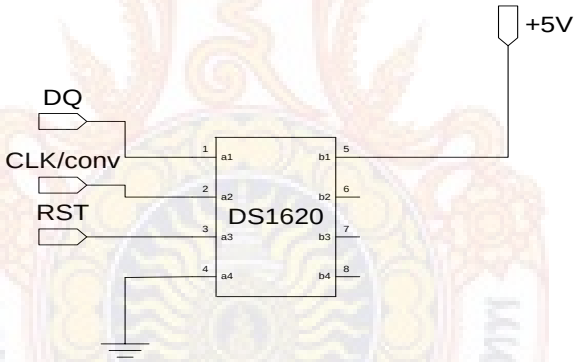
รูปที่ 3.12 เป็นการแสดงการต่อตัวกำเนิดสัญญาณนาฬิกาเข้ากับ dsPIC30F4011 ซึ่ง Crystal มีค่าเท่ากับ 20 MHz



รูปที่ 3.13 การต่อตัวกำเนิดสัญญาณนาฬิกา

3.5 การต่อตัววัดอุณหภูมิ

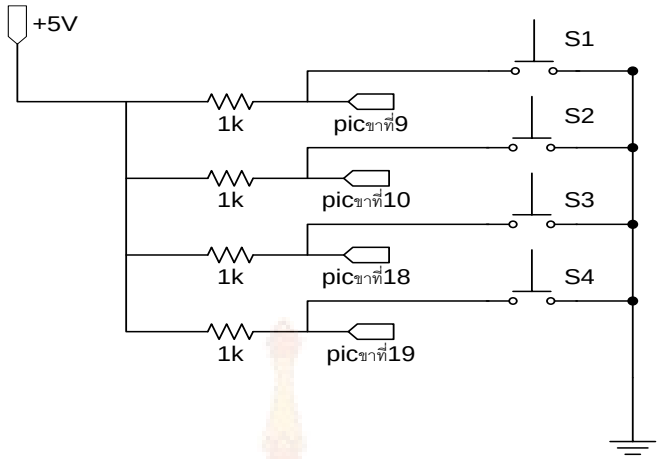
รูปที่ 3.13 แสดงการต่อตัววัดอุณหภูมิ DS1620 เข้ากับ dsPIC30F4011 โดยที่DQ(ขา 1) จะต่อเข้าขาที่ 24 ของ dsPIC30F4011 CLK/conv(ขา 2) จะต่อเข้าที่ขา 23 ของ dsPIC30F4011 และ RST(ขา 3) จะต่อเข้าที่ขา 22 ของ dsPIC30F4011



รูปที่ 3.14 การต่อใช้งาน DS1620

3.6 การต่อสวิตช์เข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011

รูปที่ 3.14 แสดงการต่อสวิตช์ใช้งานเข้ากับ dsPIC30F4011 โดยที่ S_1 จะเป็นสวิตช์ OFF เพื่อตัดสัญญาณควบคุม PMW ของวงจรขับเกต S_2 จะเป็นสวิตช์ ON เพื่อส่งสัญญาณ PMW ควบคุมให้วงจรขับเกตทำงาน S_3 จะเป็นสวิตช์ปรับลดความถี่โดยจะลดความถี่ลงครั้งละ 250 Hz และ S_4 จะเป็นสวิตช์ในการปรับเพิ่มความถี่โดยจะปรับเพิ่มครั้งละ 250 Hz เช่นเดียวกัน



รูปที่ 3.15 การต่อสวิตช์ใช้งาน

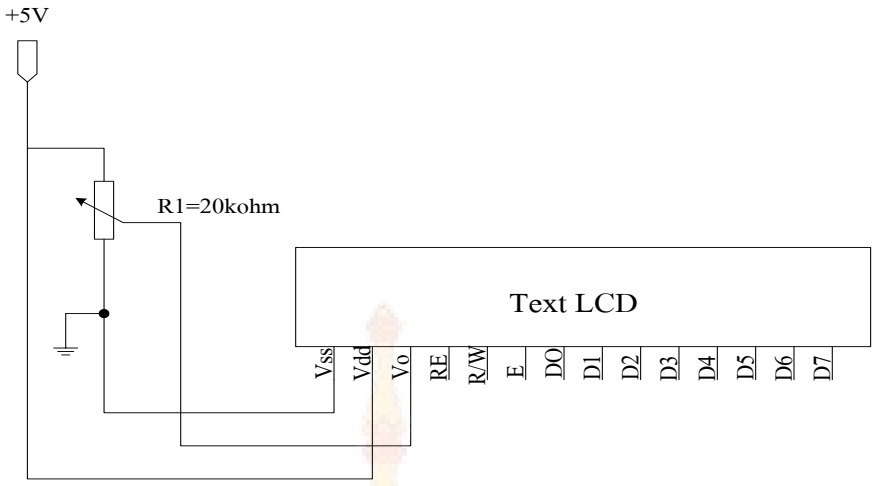
3.7 การจัดสัญญาณไฟฟ้าให้กับแอลซีดีอักษร

ทำการจัดขั้วสัญญาณของแอลซีดีอักษรในตารางที่ 3.2 ซึ่งได้แสดงการจัดสัญญาณไฟฟ้าให้กับแอลซีดีอักษรดังรูปที่ 3.15

ตารางที่ 3.2 แสดงการจัดตำแหน่งขั้วต่อสัญญาณแอลซีดีอักษรแบบ 2 บรรทัด

pin	symbol	function
1	Vss	GND
2	Vdd	+5V(+3V option)
3	Vo	Control adjustment
4	Rs	H/L register select signal
5	R/W	H/L read/write signal
6	E	H->L enable signal
7-14	DB0-7	H/L data bus line
15	A	Power supply for B/L (+)
16	K	Power supply for B/L GND

จากข้อมูลในตารางที่ 3.2 สามารถต่อวงจรไฟฟ้าให้แอลซีดีทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.16 การต่อวงจรไฟฟ้าของแอลซีดี

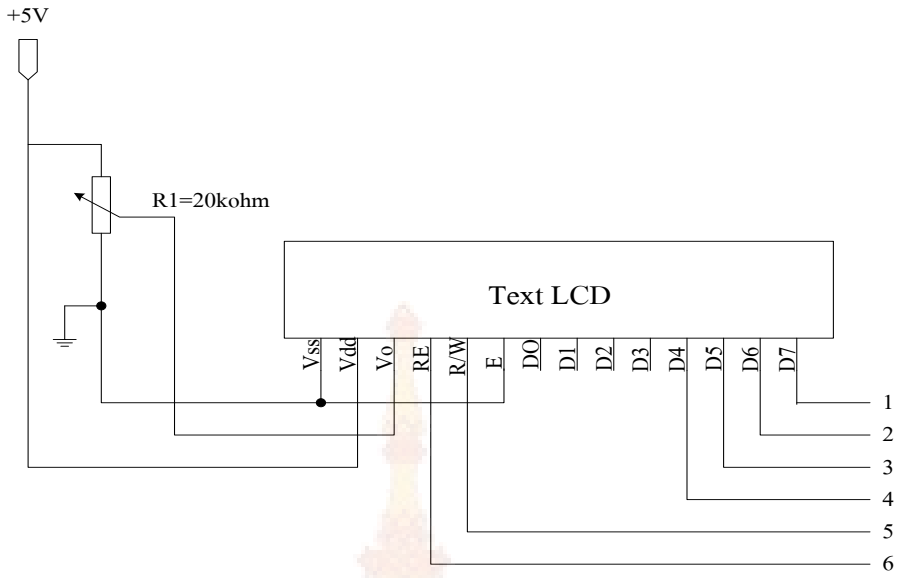
3.8 การติดต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับแอลซีดีอักษร

การสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับแอลซีดีอักษรจะทำโดยสัญญาณไฟฟ้าที่มีเพียง 2 ระดับคือ ระดับลอจิกสูง และระดับลอจิกต่ำโดยในที่นี้ จะแบ่งสัญญาณออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มสัญญาณควบคุม และกลุ่มสัญญาณข้อมูล

3.5.1 กลุ่มสัญญาณควบคุมประกอบด้วยสัญญาณสำหรับขั้วต่อ RS , R/W และ E

3.5.2 กลุ่มสัญญาณข้อมูลประกอบด้วยสัญญาณสำหรับขั้วต่อ DB0 , DB1 , DB2 , DB3 , DB4 , DB5 , DB6 , DB7

ดังนั้นการต่อแอลซีดีอักษรเข้ากับ dsPIC30F4011 อาจต้องใช้พอร์ตของ dsPIC30F4011 สำหรับรับส่งข้อมูลถึง 11 บิตอย่างไรก็ตาม เป็นไปได้ที่จะใช้รับส่งข้อมูลเพียง 6 บิต สำหรับการสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับแอลซีดีอักษร เนื่องจากโดยปกติของแอลซีดีอักษรที่มีบัสข้อมูล 8 บิตจะให้หนทางในการที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งข้อมูลขนาด 8 บิต มายังแอลซีดีอักษรถึง 2 หนทางคือ ส่งข้อมูลโดยใช้บัสส่งข้อมูล 8 บิต และส่งข้อมูลโดยใช้บัสข้อมูล 4 บิต ในกรณีหลังจะต้องส่งข้อมูล 8 บิตโดยจะส่งข้อมูลครั้งละ 4 บิต 2 ครั้ง ซึ่งจะต้องเลือกลักษณะการทำงานของอแลซีดีอักษรไว้ก่อนด้วยการโปรแกรม นอกจากนี้หากมีความต้องการเขียนข้อมูลลงแอลซีดีเพียงอย่างเดียว ก็หมายความว่าสัญญาณที่ขั้ว R/W จะมีระดับลอจิกต่ำเสมอด้วยเหตุนี้จึงสามารถต่อขั้วสัญญาณ R/W ลงจุด 0 โวลต์ ได้ตลอดไป ทั้งหมดนี้จะสามารถใช้สายสัญญาณดิจิตอลที่ต่อจากแอลซีดีอักษรไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพียง 6 เส้นดังรูปที่ 3.16



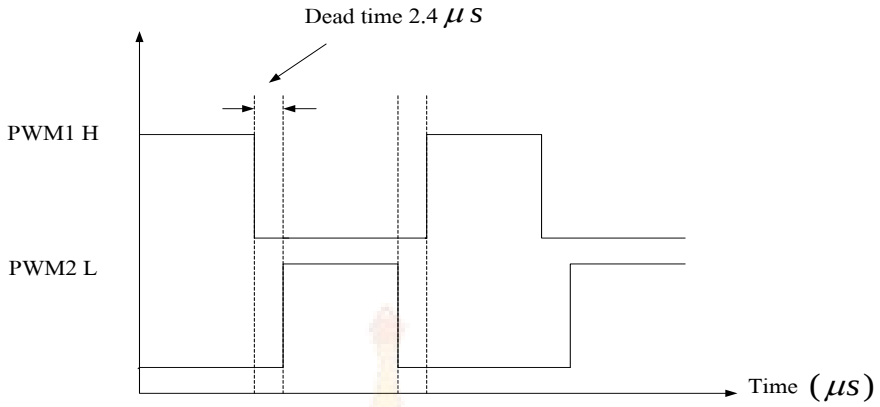
รูปที่ 3.17 แสดงสายต่อสัญญาณดิจิตอล

รูปที่ 3.17 แสดงสายต่อสัญญาณดิจิตอล 6 สายที่ใช้ต่อไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เมื่อทำการเลือกการทำงานของแอลซีดีอักษรที่มีบัสข้อมูล 8 บิตให้ทำงานเป็นแบบบัสข้อมูล 4 บิต และต้องการเยนข้อมูลลงแอลซีดีอักษรเพียงอย่างเดียว

ในการใช้บัสข้อมูลแบบ 4 บิตของแอลซีดีอักษรที่มีบัสข้อมูลแบบ 8 บิตจะต้องใช้ขั้วต่อสัญญาณ DB4 ถึง DB7 เท่านั้นโดย DB4 จะเป็นบิตนัยสำคัญน้อยสุด(Least Significant)และ DB4 เป็นบิตนัยสำคัญสูงสุด(Most Significant)ของข้อมูล4 บิต โดยข้อมูล 4 บิตแรกที่ปรากฏบนบัส D4 ถึง D7 ของแอลซีดีอักษรจะต้องเป็นบิตด้านในสำคัญสูงสุดขณะที่ 4 บิตที่ปรากฏในครั้งที่ 2 จะต้องเป็น 4 บิตด้านในสำคัญน้อยสุด ตัวอย่างเช่นถ้าไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องการส่งข้อมูล $(1F)_{16}$ ในการนี้ 4 บิตแรกที่ต้องส่งไปยังแอลซีดีอักษรคือ $(1)_{16}$ ซึ่งเป็น 4 บิตด้านในสำคัญสูงสุดของข้อมูล 8 บิต และการส่งข้อมูลครั้งที่ 2 จึงเป็นการส่ง 4 บิตด้านในสำคัญน้อยสุด $(F)_{16}$ ซึ่งจะทำให้ แอลซีดีรับข้อมูลได้เป็น $(1F)_{16}$

3.9 การหน่วงเวลา

วงจรกำลังในโครงงานนี้ได้ใช้ไอจีบีที เป็นสวิตช์ความถี่สูงทำหน้าที่สับสวิตช์ตามเอาท์พุทสัญญาณ PWM ของ dsPIC30F4011 โดยจะต้องออกแบบโปรแกรมให้มีการหน่วงเวลาเพื่อไม่ให้ไอจีบีทีทำงานพร้อมกัน การหน่วงเวลาสามารถทำได้โดยกำหนดค่าหน่วงเวลาลงในรีจิสเตอร์ DTCON1 ในโครงงานนี้กำหนดค่าหน่วงเวลาไว้ที่ 2.4 ไมโครวินาที



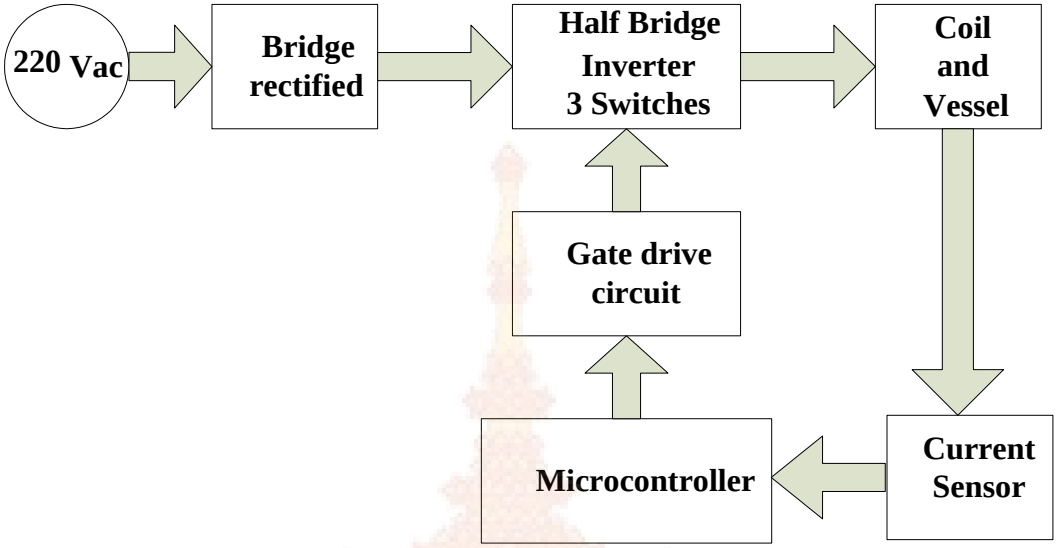
รูปที่ 3.18 กราฟแสดงการหน่วงเวลา

3.10 ขั้นตอนการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011

เมื่อกดสวิตช์จ่ายไฟฟ้าให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีค่าเริ่มต้นที่ความถี่ 40 kHz แต่ยังไม่มีสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มไปขับเกตวงจรอินเวอร์เตอร์จนกว่าจะกดสวิตช์ ON และสามารถปรับเพิ่มหรือลดความถี่ได้ด้วยการกดสวิตช์ UP และ DOWN และสามารถตัดสัญญาณขับเกตได้โดยการกดสวิตช์ OFF ซึ่งในการปรับเพิ่มหรือลดความถี่จะสามารถปรับได้ครั้งละ 250 Hz

รูปที่ 3.19 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของโปรแกรม

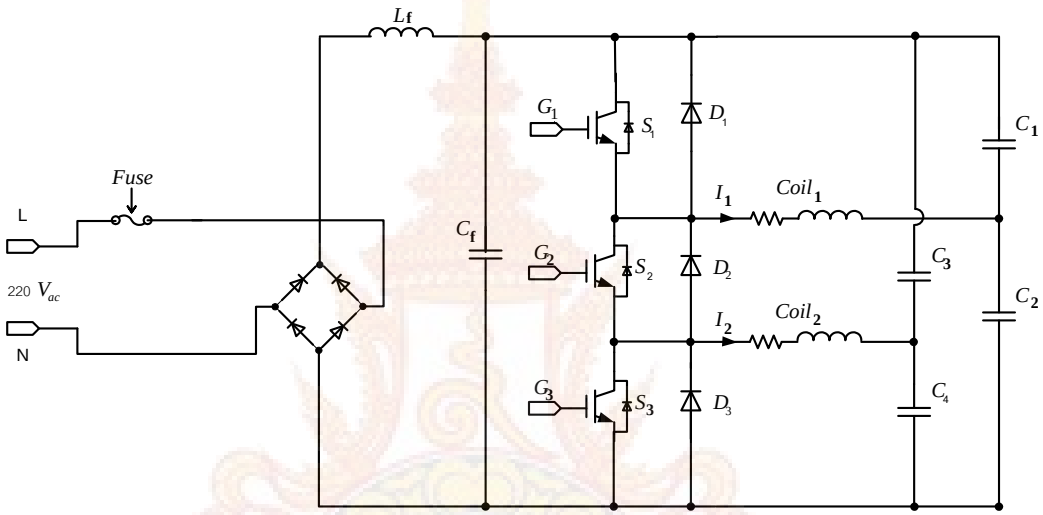
3.11 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเตาเหนี่ยวนำความร้อน



รูปที่ 3.20 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความร้อน

บทที่ 4
ผลการทดสอบเตาหุงต้ม 3 สวิตช์

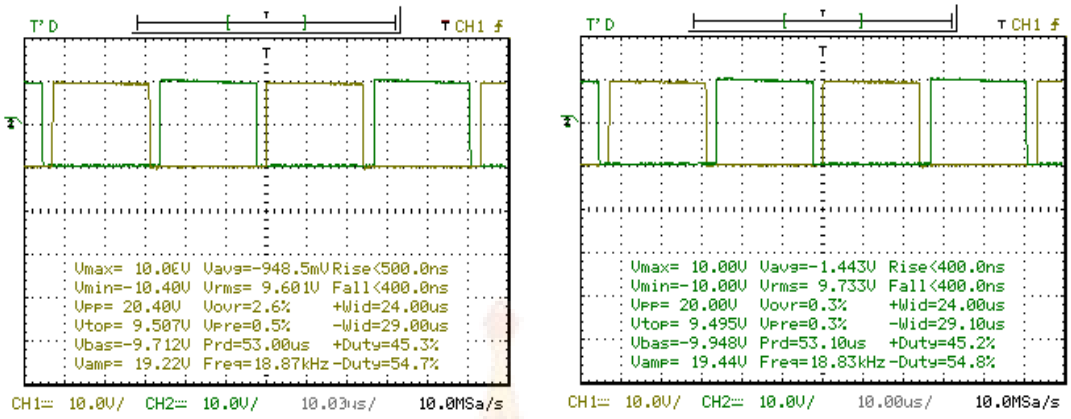
หลังจากที่ได้ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของวงจรต่าง ๆ ทั้งหมดที่จะนำมาประกอบเป็นเครื่องต้นแบบ จึงได้ทำการออกแบบและสร้างส่วนประกอบต่าง ๆ แล้วนำมาประกอบวงจรเพื่อทำการทดสอบวงจรย่อยต่างๆของเตาหุงต้ม 3 สวิตช์แบบเหนี่ยวนำความร้อนแบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วยภาคต่างๆ ดังนี้คือ ทดสอบสัญญาณวงจรขับเกตของไอจีบีทีทดสอบวงจรกำลังที่ความถี่ต่าง ๆ



รูปที่ 4.1 รูปอินเวอร์เตอร์ 3 สวิตช์ที่ถูกนำมาทดสอบ

4.1 การทดสอบรูปคลื่นสัญญาณขับเกต

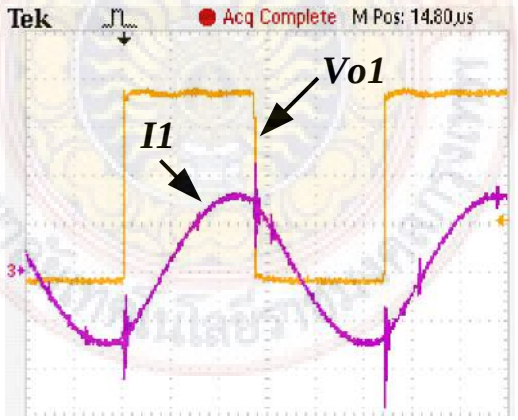
ทดสอบโดยการวัดรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากเอาท์พุตของ TLP250 ดังภาพที่ 4.1 จากภาพที่ 4.1 จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นที่ 1 กับรูปคลื่นที่ 2 จะทำงานไม่พร้อมกัน เมื่อรูปคลื่นที่ 1 ทำงานคืออยู่ในสภาวะลอจิกสูง รูปคลื่นที่ 2 จะไม่ทำงานคืออยู่ในสภาวะลอจิกต่ำ จนกว่ารูปคลื่นที่ 1 จะหยุดทำงานคืออยู่ในสภาวะลอจิกต่ำแล้ว รูปคลื่นที่ 2 จึงจะทำงานคืออยู่ในสภาวะลอจิกสูงแทน ซึ่งทั้งสองรูปคลื่นจะสลับกันทำงานโดยไม่ทำงานพร้อมกัน ในการทดสอบนี้จะใช้แรงดันที่ 20 V ทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ โดยการทดสอบจะใช้ความถี่ที่ 17 kHz



รูปที่ 4.1 รูปคลื่นสัญญาณเอาท์พุตของ TLP250

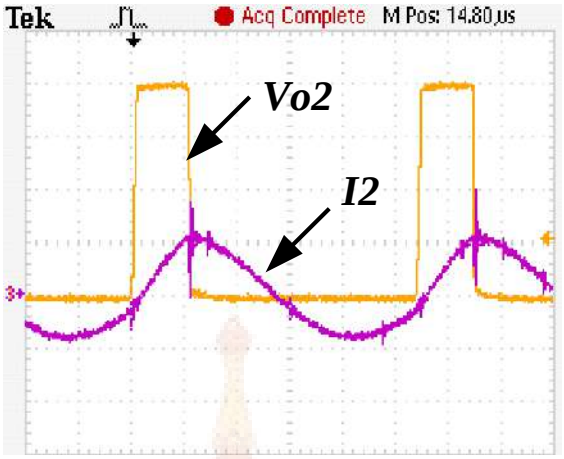
4.2 การทดสอบสัญญาณรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมโหลด

การทดสอบสัญญาณรูปคลื่นระหว่างกระแสทางด้านเอาท์พุตกับแรงดันที่ตกคร่อมโหลด ตามภาพที่ 4.2 และ 4.3 จะเห็นว่าลักษณะกระแสจะเป็นรูปคลื่นไซด์ส่วนแรงดันจะเป็นสี่เหลี่ยม ลักษณะกระแสจะล้าหลังแรงดัน และเมื่อมีการปรับความถี่เข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์จะเห็นได้ว่ามุมของกระแสกับแรงดันจะต่างกันน้อยลง ในการทดสอบนี้จะใช้แรงดันอินพุตที่ 220 V ทางด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ โดยการทดสอบจะใช้ความถี่ที่ 17 kHz



รูปที่ 4.1 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันเอาท์พุต V_{o1} และ กระแสที่ขดลวด I_1

(V_{o1} : 100 V/DIV, I_1 : 10A/DIV และ Time/DIV : 10us)



รูปที่ 4.3 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันเอาท์พุต V_{o2} และ กระแสที่ขดลวด I_2
(V_{o2} : 100 V/DIV, I_2 : 10A/DIV และ Time/DIV : 10us)

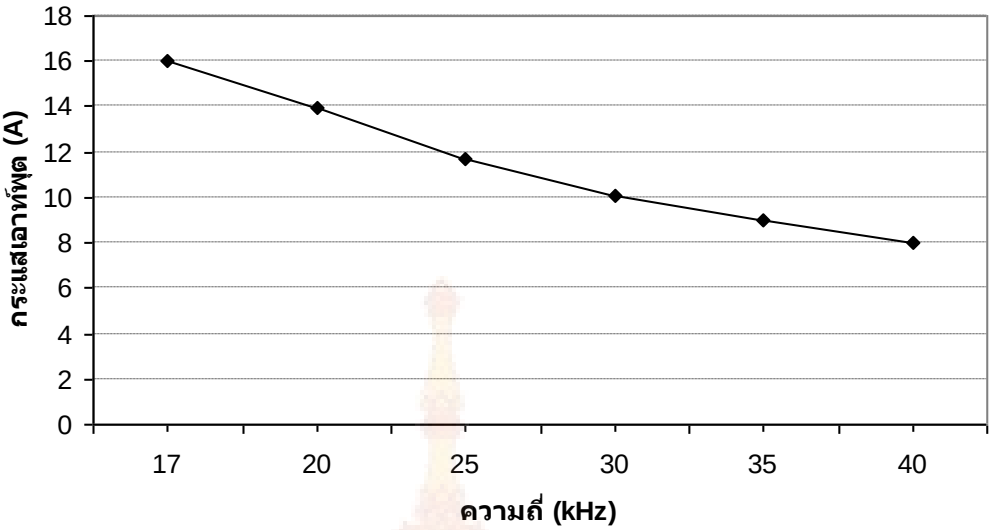
4.3 การทดสอบกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและทางด้านเอาท์พุต

การทดสอบกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาท์พุตที่ความถี่ 17 kHz-40 kHz โดยใช้เครื่องวัด POWER ANALYZER ยี่ห้อ YOGOGAWA รุ่น WT500 ผลการวัดตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การทดสอบกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและด้านเอาท์พุตที่ความถี่ 17 kHz-40 kHz

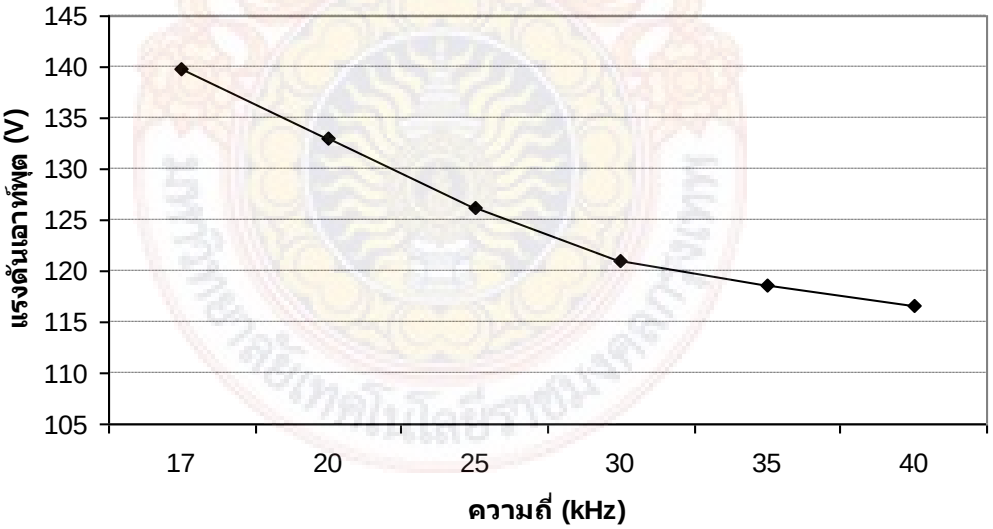
$f\,(kHz)$	V_{in} (V_{rms})	I_{in} (A_{rms})	PF.	Input Power	V_{output} (V_{rms})	I_{output} (A_{rms})	PF.	Output Power
17	220.4	6.093	0.9951	1,336	139.2	16.511	0.5491	1,262
20	223.81	4.719	0.9915	1,047	133	13.987	0.5307	988
25	225.06	3.593	0.9854	797	126.2	11.721	0.504	745
30	223.61	2.88	0.9759	628	120.9	10.079	0.4765	580
35	224.83	2.374	0.9727	519	118.6	8.964	0.4496	478
40	225.15	2.022	0.9652	439	116.6	8.047	0.4253	399

จากผลการทดสอบค่าทางไฟฟ้าของเตาหุงต้ม 3 สวิตช์แบบเหนี่ยวนำความร้อนแบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า จากตารางที่ 4.1 นำค่าผลการทดสอบมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่าต่างๆเป็นกราฟเพื่อสะดวกในการทำความเข้าใจ



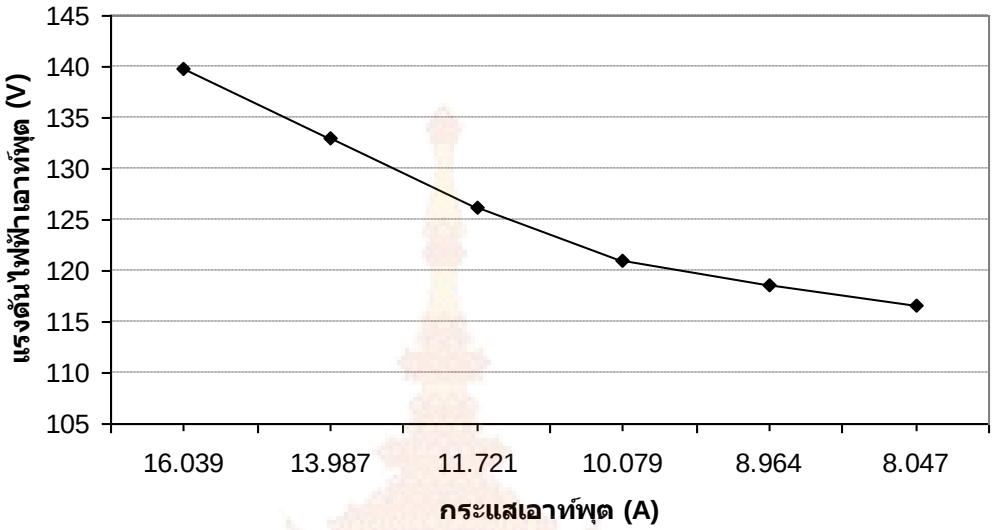
ภาพที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาท์พุต I_{output} กับความถี่ในการสวิตช์ f_s

จากภาพที่ 4.4 กราฟแสดงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าทางด้านเอาท์พุตกับความถี่ในการสวิตช์ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อความถี่ในการสวิตช์เพิ่มขึ้นค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านเอาท์พุตจะมีค่าลดลง ซึ่งจะมีความสัมพันธ์เป็นแบบผกผันกัน



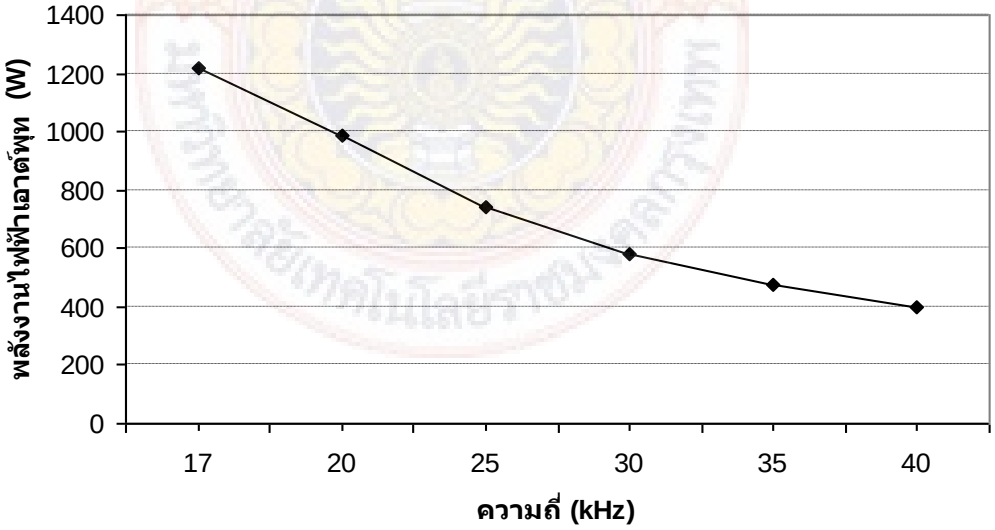
ภาพที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุต V_{out} กับความถี่ในการสวิตช์ f_s

จากภาพที่ 4.5 กราฟแสดงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาท์พุตกับความถี่ในการสวิตช์วงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาท์พุตจะมีค่าลดลงซึ่งจะมีความสัมพันธ์แบบผกผันกัน



ภาพที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาท์พุตกับกระแสเอาท์พุต

จากภาพที่ 4.4 และ4.5 เมื่อความถี่ในการสวิตช์เพิ่มขึ้นทำให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านเอาท์พุตลดลง ภาพที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาท์พุตกับกระแสเอาท์พุตซึ่งเป็นการแปรผันโดยตรงคือแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุตลดลงกระแสเอาท์พุตก็ลดลง



ภาพที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าด้านเอาท์พุต P_o กับความถี่สวิตช์ f_s

ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าด้านเอาท์พุตกับความถี่ในการสวิตช์วงจรอินเวอร์เตอร์ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังไฟฟ้าทางด้านเอาท์พุตมีค่าลดลงซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นแบบผกผันกัน

บทที่ 5
สรุปผลโครงงานและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาและสร้างเครื่องต้นแบบเตาหุงต้ม 3 สวิตช์แบบเหนี่ยวนำความร้อนแบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ เป็นแบบ อนุกรมเรโซแนนซ์แบบฮาร์ฟบริดจ์ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 สร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ควบคุมความถี่ในการสวิตช์วงจรอินเวอร์เตอร์ จากผลการทดลองสามารถสรุปและเสนอแนะได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลที่ได้จากการทดลอง

งานวิจัย ได้ทำการศึกษาค้นคว้าและสร้างเครื่องต้นเตาหุงต้ม 3 สวิตช์แบบเหนี่ยวนำความร้อนแบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าโดยการปรับความถี่ ซึ่งจะมีผลในการควบคุมกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และมุมเฟสของโหลด ทำให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาท์พุต โดยที่กำลังไฟฟ้าเอาท์พุตกระแสสลับความถี่สูงทำให้ขดลวดเหนี่ยวนำที่อยู่ใต้ภาชนะที่บรรจุน้ำ จะสร้างสนามแม่เหล็กเกี่ยวคล้องกับภาชนะจะทำให้เกิดกระแสไหลวนเป็นลักษณะเส้นทางปิด ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนเกิดความร้อนขึ้นที่ก้นภาชนะถ่ายเทความร้อนให้น้ำเดือด เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ เข้าไปในชุดควบแน่นและกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ

ผลการทดสอบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเครื่องต้นแบบเตาหุงต้ม 3 สวิตช์แบบเหนี่ยวนำความร้อนมีประสิทธิภาพสูงอยู่ในช่วงประมาณ 90.88 เปอร์เซ็นต์ถึง 94.46 เปอร์เซ็นต์โดยที่ความถี่ 17 kHz จะมีประสิทธิภาพสูงสุดคือที่ 94.46 เปอร์เซ็นต์

วงจรที่ใช้เป็นอินเวอร์เตอร์แบบฮาร์ฟบริดจ์ 3 สวิตช์ถูกทอสอบด้วยวิธีการปรับความถี่และปรับดิวตี้ไซเคิลได้ ซึ่งเหมาะกับการใช้งานในขนาดกำลังไฟฟ้าที่ไม่สูงนัก โดยจะทำงานในย่านความถี่ที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ตลอดเวลา ควบคุมสวิตชิ่งทำงานขณะแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ (Zero Voltage Switch) ทำให้กำลังสูญเสียขณะเริ่มนำกระแสต่ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการควบคุมอุณหภูมิแต่ละขดลวด
2. สามารถทำมาทดสอบกับเตาหุงต้มแบบหลายขดลวดได้
3. สวิตช์ที่ใช้ควรเลือกไอจีบีทีที่มีค่าแรงดันขณะนำกระแสมีค่าต่ำ
4. ระบบควบคุมควรเป็นระบบปิด

เอกสารอ้างอิง

ชัยณรงค์ วิเศษศักดิ์วิชัย. 2550. **ศึกษาไมโครคอนโทรลเลอร์ดีเอสพิก**. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.

นคร ภักดีชาติ, ณัฐพล วงศ์สุนทรชัย และชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล. **คู่มือการทดลอง dsPIC Microcontroller เบื้องต้น**. กรุงเทพฯ: อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์.

วิโรจน์ เพชรพันธุ์ศรี. 2546. **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 1**. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.

วีระเชษฐ ขันเงิน, วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์. 2552. **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง**. พิมครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ: วี.เจ.พริ้นติ้ง.

สุนันท์ ศรัณยนิตย์. 2535. **การถ่ายเทความร้อน**. พิมพ์ครั้งที่ 4. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สิทธิโชค สินรัตน์. 2545. **การวิเคราะห์เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงชนิดควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่**. โครงงานวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

นภดล นุ่นงาม. 2540. **เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำชนิดปรับความถี่อัตโนมัติ**. โครงงานวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

Yunus A. and Michael A. Boles. **เทอร์โมไดนามิกส์**. โดย สมชัย อัครทิวา และขวัญจิตร วงษ์ชารี. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท้อป.