บทที่ 6

ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 ข้อสรุปในการวิจัย

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นนี้ เป็นเครื่องต้นแบบที่ยังต้องได้รับการพัฒนาต่ออีกระดับหนึ่งถึงจะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้อย่างเหมาะสม เพราะขนาดกำลังออกที่ชิ้นงานซึ่งวัดได้จากการทดสอบมีค่าประมาณ 5 กิโลวัตต์ ในขณะที่กำลังด้านเข้ามาประมาณ 8 กิโลวัตต์ และกำลังปรากฏประมาณ 12 กิโลโวลต์แอมป์ ซึ่งจัดว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำถ้าจะนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมจริงสำหรับกำลังออกที่ชิ้นงานขนาดนี้ เมื่อทดสอบให้ความร้อนกับชิ้นงานที่เป็นเหล็กผสมคาร์บอนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตรที่ความถี่คงที่ 40 กิโลเฮิรตซ์ จะทำให้ชิ้นงานร้อนแดงจนมีอุณหภูมิสูงประมาณ 800 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 3 วินาที และเมื่อนำไปชุบแข็งสามารถทำให้เหล็ก 0.4 เปอร์เซนต์ของคาร์บอนที่มีความแข็งก่อนการชุบ 280 Hv มีความเข็มเพิ่มขึ้นเป็น 677 Hv โดยมีความลึกผิวประมาณ 3 มิลลิเมตร

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้น ต่างจากเครื่องที่ใช้งานในปัจจุบันตรงที่ใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภททรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ ในการกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง แทนการใช้หลอดสุญญากาศ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของวงจรไฟฟ้าสูงขึ้นและขนาดโดยรวมจะลดลง แต่ความสามารถในการทำงานที่ความถี่สูงยังสู้แบบหลอดสุญญากาศไม่ได้ อย่างไรก็ตามเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นนี้ได้พัฒนาการขับนำทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ให้ทำงานที่ความถี่สูงได้ถึง 40 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่สูงมากสำหรับทรานซิสเตอร์กำลังชนิดนี้ ส่วนประกอบต่าง ๆ ที่สำคัญของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้น กล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

6.1.1 แหล่งจ่ายไฟตรงประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสและวงจรกรอง ซึ่งวงจรส่วนนี้จะรับไฟ 3 เฟส 50เฮิรตซ์ ขนาด 380 โวลต์ ผ่านวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์ เพื่อแปลงไฟสลับให้เป็นแรงดันไฟตรงโดยมีแรงดันกระเพื่อมที่ความถี่ 300 เฮิรตซ์ปนอยู่ และเพื่อจะกรองแรงดันไฟตรงให้เรียบ จึงต่อวงจรกรองโดยใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวกรองแรงดันกระเพื่อมทำให้ได้แรงดันไฟตรงที่มีค่าประมาณ 530 โวลต์ และมีแรงดันกระเพื่อมประมาณ 2 เปอร์เซนต์

นอกจากนี้ที่ทางเข้าของของวงจรเรียงกระแสยังมี Magnetic Contactor ที่ทำหน้าที่ปิดเปิดวงจร และทำหน้าที่ช่วยสตาร์ตวงจรกำลัง (Direct on line starter) กล่าวคือสามารถเริ่มต้นการทำงานของเครื่องโดยการต่อไฟ 3 เฟส 380 โวลต์ เข้าวงจรเรียงกระแสได้โดยตรง อีกทั้งยังทำหน้าที่เปิดวงจรในกรณีที่ค่าแรงดันหรือกระแสในวงจรกำลังสูงเกินกว่าที่กำหนดได้ โดยมีวงจรป้องกันควบคุมการทำงานอีกทีหนึ่ง

6.1.2 แหล่งกำเนิดไฟกระแสสลับความถี่สูง ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ ซึ่งทำหน้าที่แปลงไฟตรงขนาดประมาณ 530 โวลต์ ให้เป็นแรงดันไฟสลับความถี่สูง 40 กิโลเฮิรตซ์เพื่อจ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำโดยผ่านหม้อแปลงความถี่สูง ในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ ซึ่งเป็นวงจรพื้นฐานที่มีความเชื่อถือสูงได้ใช้ทรานซิสเตอร์กำลังแบบไบโพลาร์ทำงานเป็นสวิตช์ซึ่งมีข้อดีในแง่ราคาถูก หาง่าย มีความสามารถในการทนต่อแรงดัน และกระแสสูงทำให้ไม่จำเป็นต้องนำทรานซิสเตอร์หลายตัวมาต่ออนุกรมหรือต่อขนานกันเพื่อรับแรงดันหรือกระแส เป็นผลให้ส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์นี้มีความซับซ้อนน้อยลง ความน่าเชื่อถือของระบบจึงสูงขึ้น การทำงานของวงจรนี้ออกแบบให้เป็นแบบกระแสตามหลังแรงดัน เพื่อป้องกันปัญหาการ Shoot Through เนื่องจากสาเหตุช่วงเวลาฟื้นตัวของไดโอดเพราะวงจรทำงานในช่วงความถี่สูง

6.1.3 วงจรขับนำเบสและวงจรป้องกัน ส่วนนี้อาจถือได้ว่าเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของการพัฒนาและวิจัยเครื่องต้นแบบก็ได้ เพราะความยากหรือปัญหาหลักของงานนี้ก็คือการขับนำทรานซิสเตอร์ให้ทำงานได้ที่ความถี่ 40 กิโลเฮิรตซ์ ดังนั้นวงจรที่ใช้ในการขับนำเบสนี้จึงได้ออกแบบให้มีความสามารถในการดึงกระแสเบสตอนช่วง Turn off ได้เร็ว เพื่อลดค่า Storage Time ให้ได้มากที่สุด โดยช่วงเวลาสัญญาณ on ของสวิตช์จะต้องสั้น และมีลักษณะเป็นแบบ 3 สถานะ (Tri-state) เพื่อเป็นการเผื่อช่วง Storage Time ซึ่งเป็น Delay time ในการ Turn off และเผื่อค่า Dead Time ก่อนการ Turn on ด้วย นอกจากนั้นลำดับการสวิตช์ของวงจรขับนำเบสนี้ยังมีข้อดีของการเป็น Zero Voltage Turn on และสัญญาณขับนำตอนจังหวะ Turn on ก็มีลักษณะที่ค่อยเป็นค่อยไป (Soft Drive) ทำให้ความเครียด และกำลังสูญเสียตอนจังหวะ Turn on ที่เกิดกับสวิตช์มีค่าต่ำ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากมีความจำเป็นจะต้องลดปริมาณ Storage Time ให้ได้มากที่สุด จึงต้องพยายามดึงกระแสเบสออกจากรอยต่อให้เร็วและมากที่สุด ซึ่งการทำเช่นนี้จะก่อให้เกิดความเครียดกับสวิตช์ได้มากอันเป็นสาเหตุให้สวิตช์เกิดระเบิดขึ้นได้ ในการพัฒนาและวิจัยได้พยายามหาจุดที่เหมาะสมของการขับนำเบสที่สามารถทำให้สวิตช์ทำงานได้ที่ความถี่ที่ต้องการ โดยไม่ทำให้เกิดความเครียดมากจนเกินไป จนทำให้สวิตช์เสียหาย เทคนิคของวงจรขับนำเบสใช้วิธีการส่งสัญญาณขับนำสวิตช์ทั้งหมดผ่านหม้อแปลง Toroid เพียงตัวเดียว ซึ่งจะทำให้โอกาสของการ

เกิดความผิดพลาดในการสั่งให้สวิตช์แต่ละคู่ทำงานลดน้อยลงมาก การออกแบบหม้อแปลงชับนำเบสได้ใช้เทคนิคแกนอิ่มตัว (Saturable Core) ในการสร้างสัญญาณชับนำแบบ 3 สถานะ ซึ่งจะทำวงจรชับนำเบสมีความซับซ้อนน้อยลงมาก อันส่งผลให้มีความน่าเชื่อถือของวงจรสูงขึ้น

ส่วนวงจรป้องกันจะทำหน้าที่ตรวจจับแรงดันและกระแสที่สูงเกินกว่าที่กำหนด ทันทีที่ตรวจพบจะส่งสัญญาณไปหยุดวงจรชับนำเบส และสั่งให้ Magnetic Contactor เปิดวงจรเพื่อตัดไฟกำลัง 3 เฟสออกจากวงจรเรียงกระแส เพื่อป้องกันความเสียหายรุนแรงที่จะเกิดกับวงจรภาคกำลัง จากการทดลองพบว่าเมื่อวงจรภาคกำลังมีแรงดันหรือกระแสที่สูงเกินกว่าที่กำหนดเนื่องจากการที่แรงดันขาเข้ามีค่าสูงกว่าปกติ หรือเกิดจากการที่วงจรอินเวอร์เตอร์มีการแกว่ง วงจรป้องกันนี้จะสามารถป้องกันความเสียหายที่เกิดกับสวิตช์ได้ แต่ถ้าเป็นกรณีที่เกิด Shoot Through ในวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรป้องกันนี้จะไม่สามารถป้องกันความเสียหายของสวิตช์ได้เพียงแต่ช่วยให้ความเสียหายรุนแรงน้อยลง

6.1.4 วงจรกำลังด้านเอาต์พุต ส่วนนี้คือส่วนวงจรกำลังที่รับสัญญาณต่อจากวงจรอินเวอร์เตอร์ผ่าน หม้อแปลงความถี่สูงไปยังขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

6.1.4.1 หม้อแปลงความถี่สูง มีอัตราส่วนการแปลงแรงดันเป็น 16:1 ออกแบบให้เป็นหม้อแปลงขนาด EC-70 พันเป็นแบบ 1:1 ทั้งหมด 16 ตัว แล้วนำหม้อแปลงทั้งหมดมาต่ออนุกรมกันด้านขดปฐมภูมิ และขนานกันด้านขดทุติยภูมิ จึงได้อัตราส่วนเป็น 16:1

6.1.4.2 ขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นส่วนที่ใช้สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กชิ้นมาเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนที่ชิ้นงาน ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้เป็นแบบ 1 รอบ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25 มิลลิเมตร และความสูงของขดลวด 6 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อให้กำลังที่จ่ายไปสู่ชิ้นงานมีความหนาแน่นกำลังต่อพื้นที่ผิวมากที่สุด

6.1.4.3 ตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลัง เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้ต่อขนานกับขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งต้องเป็นชนิดที่ใช้งานได้ที่ความถี่สูง และมีกำลังสูญเสียในตัวต่ำ เนื่องจากตัวเก็บประจุที่ใช้มีค่าความจุถึง 333 ไมโครฟารัด ทำให้ต้องให้ตัวเก็บประจุหลายตัวต่อขนานกัน การออกแบบสร้างตัวเก็บประจุนี้ได้พัฒนาและแก้ปัญหาเรื่องค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากการต่อตัวเก็บประจุขนานกันหลาย ๆ ตัวซึ่งส่งผลให้ตัวเก็บประจุนั้นใช้งานที่ความถี่สูงไม่ได้ เพราะเมื่อความถี่สูงขึ้นตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันหลาย ๆ ตัวจะกลายเป็นตัวเหนี่ยวนำอันเนื่องมาจากค่าความเหนี่ยวนำของสายที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุแต่ละตัว จึงออกแบบให้ตัวเก็บประจุต่อขนานกันบนแผ่นทองแดงที่วางขนานกัน

6.1.4.4 ตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมทางด้านปฐมภูมิ มีไว้เพื่อช่วยปรับให้กระแสโหลดตามหลังแรงดัน

6.1.4.5 ตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมทางด้านปฐมภูมิ มีไว้เพื่อช่วยป้องกันกระแสไฟตรงเข้าหม้อแปลงความถี่สูง

6.1.4.6 ความต้านทานที่ต่ออนุกรมทางด้านปฐมภูมิ ความต้านทานนี้เป็นส่วนที่ไม่ได้ตั้งใจออกแบบไว้ตั้งแต่เริ่มต้น แต่ต้องมีก็เพื่อใช้หน่วงวงจร(Damp)ในการแก้ปัญหาการแกว่งของกระแสโหลด ที่เกิดขึ้นจากการป้อนกลับของกระแสโหลดโดยผ่านทาง Storage Time ที่เป็นเช่นนี้เพราะช่วง Storage Time เป็นส่วนหนึ่งของช่วงเวลาการนำกระแสของทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีค่ามากถึง 50 % ของช่วงเวลานำกระแสทั้งหมด และค่า Storage Time จะเปลี่ยนตามค่ากระแสโหลดโดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสโหลดสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงในทางที่สูงขึ้นค่า Storage Time จะเพิ่มขึ้น จึงทำให้ช่วงเวลาการนำกระแสของทรานซิสเตอร์เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาการนำกระแสมากขึ้นกระแสโหลดก็จะมีค่าสูงขึ้นไปอีก จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงมีลักษณะที่ป้อนกลับแล้วมาเสริมกัน หรือกล่าวได้ว่าเป็นการป้อนกลับแบบบวกทำให้ระบบขาดเสถียรภาพจึงเกิดการแกว่ง ซึ่งจากการทดลองพบว่าการแกว่งของกระแสโหลดจะมีลักษณะเป็นการมอดูเลตทางความสูงที่ความถี่ 2-5 กิโลเฮิรตซ์ โดยแอมปลิจูดสูงสุดของการแกว่งจะสูงเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 30 เปอร์เซนต์ ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงพอสมควร

ในการออกแบบความต้านทานที่ใช้หน่วงการแกว่งนี้ ใช้วิธีทดลองต่อวงจรแล้วเพิ่มค่าทีละน้อยจนได้ค่าที่เหมาะสม ซึ่งเป็นค่าที่แอมปลิจูดของการแกว่งลดลงในขณะที่กำลังสูญเสียที่ความต้านทานนี้ไม่สูงนัก ในที่นี้ใช้ค่า 1.35 โอห์ม ซึ่งประมาณกำลังสูญเสียได้ 1 กิโลวัตต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2 ปัญหาและข้อเสนอในการปรับปรุง

6.2.1 จากการออกแบบ และติดตั้งสนับเบอร์แรงดันนั้น ในหัวข้อที่ 4.2.3 จะเห็นว่าถ้าเราประยุกต์การใช้งานใหม่ โดยให้โหลดแช่อยู่ที่ขดลวดเหนี่ยวนำ หรือป้อนผ่านตลอดเวลา ก็จะไม่เกิดสภาวะที่มีโหลดบ้างและไม่มีโหลดบ้าง ทำให้สนับเบอร์แรงดันที่ใช้มีเพียงตัวเก็บประจุกิ่งละตัวก็พอ ไม่ต้องมีความต้านทานที่ใช้จำกัดกระแสอัดหรือคายประจุทำให้ไม่มีกำลังสูญเสียที่ความต้านทานนี้ ประสิทธิภาพรวมของเครื่องจะได้สูงขึ้น

6.2.2 เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นมีวงจรป้องกันแรงดันและกระแสเกินเท่านั้นสมควรปรับปรุงให้มีวงจรป้องกันอุณหภูมิสูงเกินด้วย เช่น อุณหภูมิที่ขดลวดเหนี่ยวนำ และที่ตัวระบายความร้อนของสวิตช์ ทั้งนี้เพราะถ้าระบบระบายความร้อนด้วยน้ำของขดลวดเหนี่ยวนำ และระบบระบายความร้อนด้วยลมของสวิตช์เกิดเสีย หรือขัดข้อง จะได้ป้องกันความเสียหายไว้ทัน

6.2.3 ปัญหาใหญ่ข้อหนึ่ง ที่ทำให้ไม่สามารถเพิ่มกำลังของเครื่องต้นแบบให้สูงมากได้ เพราะการที่พยายามขับนำทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ให้ทำงานที่ความถี่สูงจะก่อให้เกิดความเครียดที่ตัวอุปกรณ์ดังที่กล่าวไว้แล้ว จากการทดลองพบว่าถ้าปรับให้เครื่องทำงานที่กำลังสูงถึง 13 กิโลวัตต์เครื่องจะทำงานได้แค่ประมาณ 5 นาที แล้วทรานซิสเตอร์ที่เป็นสวิตช์ก็จะระเบิดโดยแผ่นระบายความร้อนที่ติดกับอุปกรณ์อุณหภูมิยังไม่สูงเท่าไรนัก ดังนั้นถ้าต้องการเพิ่มกำลังงานของเครื่อง เราอาจปรับให้เครื่องทำงานที่ความถี่ต่ำลง อาจอยู่ในช่วงประมาณ 10 - 20 กิโลเฮิรตซ์ การขับนำเบสจะได้ไม่สร้างความเครียดที่ตัวอุปกรณ์มากนัก แต่ที่ความถี่ช่วงนี้จะใช้งานเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อชุบแข็งผิวไม่ค่อยได้เพราะความถี่ค่อนข้างต่ำ

6.2.4 จากปัญหาเรื่องการขับนำสวิตช์ให้ทำงานที่ความถี่สูง และใช้ในวงจรกำลังสูง เราอาจเลือกอุปกรณ์ที่เป็นสวิตช์ชนิดใหม่ เช่น IGBT ซึ่งโครงสร้างมีลักษณะที่ผสมกันระหว่างทรานซิสเตอร์กำลังชนิดไบโพลาร์ และมอสเฟตกำลัง ซึ่งทำให้สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ดีกว่าทรานซิสเตอร์กำลังชนิดไบโพลาร์และมีขนาดกำลังสูงกว่าทรานซิสเตอร์ชนิดมอสเฟตกำลัง อีกทั้งยังมีข้อดีที่ขับนำได้ง่ายเหมือนมอสเฟตอีกด้วย แต่ข้อเสียก็คืออุปกรณ์ชนิดนี้ยังไม่ค่อยแพร่หลายในบ้านเรา จึงหาซื้อยากและมีราคาแพง