

บทที่ 5

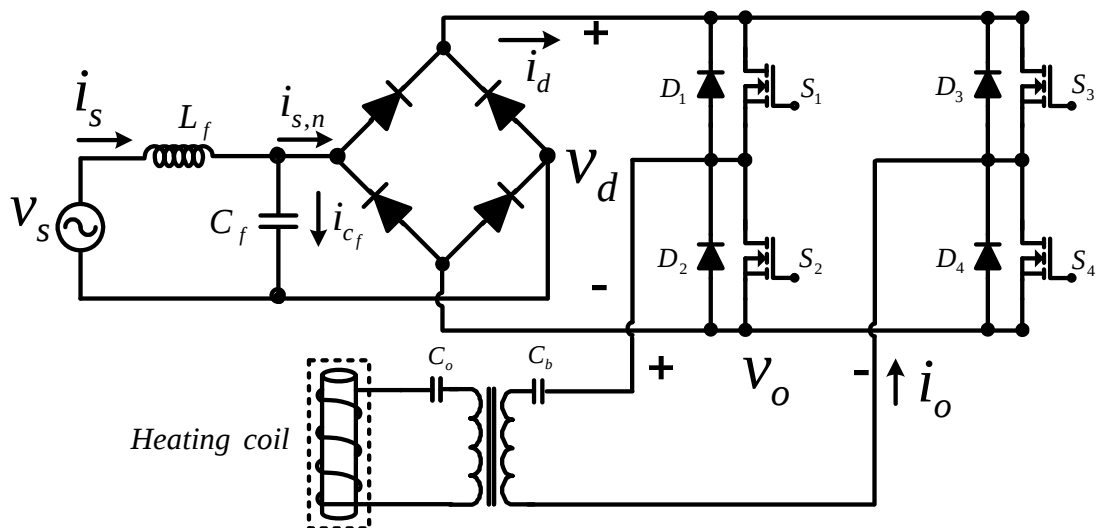
ผลการทดลองและผลการซิมูเลต

5.1 บทนำ

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการทดสอบกับอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงเพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีเพื่อยืนยันความถูกต้องในขั้นตอนสุดท้าย โดยคลื่นที่ได้จากผลการทดลองของแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุตและอินพุตของอินเวอร์เตอร์ รวมทั้งแหล่งจ่ายการไฟฟ้า จะนำมาเปรียบเทียบกับคลื่นที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อจะทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าทั้ง 3 ของระบบรวม ซึ่งได้แก่ ค่ากำลังไฟฟ้า P_{in} ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้า P_d ทางด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ ค่ากำลังไฟฟ้า P_o ทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ ค่าประสิทธิภาพของวงจรรวมระหว่างเร็กติฟายเออร์และอินเวอร์เตอร์ และค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า

5.2 ขั้นตอนการดำเนินการ

ในการทดลองจะใช้วงจรทดลองดังรูปที่ 5.1 ซึ่งมีฟังก์ชันของอุปกรณ์ต่างๆ ดังตารางที่ 5.1 โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.1 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating) ที่มีการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้าให้มีค่าสูงสุดเป็น 1 ที่ใช้ในการทดลองจริง

ตารางที่ 5.1 อุปกรณ์และค่าพิกัดต่างๆ ของวงจรอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating) ที่มีการปรับปรุงค่าเพาเวอร์เฟ็คเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ให้มีค่าสูงสุดเป็น 1 ที่ใช้ในการทดลองจริง

รายการอุปกรณ์	รายละเอียด
ตัวเหนี่ยวนำ L_f	1.48 mH
ตัวเก็บประจุ C_f	0.4 uF
ไดโอดเรียงกระแสแบบบริดจ์	KBPC10-06
อุปกรณ์สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์	IRFP460 600 V $R_{DS(on)} = 0.27 \Omega$
ตัวเก็บประจุเรโซแนนท์	6.6 uF
ขนาดเส้นลวดขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง	ลวดทองแดงเบอร์ 28 S.W.G.
จำนวนเส้นลวดตีเกลียวขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง	22 เส้น
จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ	33 รอบ
จำนวนรอบทุติยภูมิ	3 รอบ
จำนวนรอบของ working coil	2 , 3 , 4 , 5 , 6 รอบ
ชนิดแท่งโลหะ	เหล็กหล่อ (Iron)
เส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งโลหะ	27 mm
เส้นผ่าศูนย์กลางของ working coil	40 mm
ความถี่ของอินเวอร์เตอร์	60 kHz

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าและเก็บผลการทดลอง

- | | |
|--|-----------|
| 1. Digital Oscilloscope YOKOGAWA , DL 1520 | 2 เครื่อง |
| 2. OPTEX Thermo – hunter PT-3LD | 1 เครื่อง |
| 3. Variable Voltage Transformer (0 Vac – 420 Vac) 30 A max | 1 เครื่อง |
| 4. Multimeter HP-Hewlett Packard 973A | 1 เครื่อง |

5.2.1 ขั้นตอนการเก็บผลการทดลอง

ขั้นตอนการเก็บผลการทดลองคลื่นแรงดันและกระแสในวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่จ่ายโหลดอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง ด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ ด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ และด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz ซึ่งมีขั้นตอนการเก็บผลการทดลองดังต่อไปนี้

1). ปรับแรงดันที่ Variable Voltage Transformer เพื่อหาค่าตำแหน่งที่สามารถอ่านค่ากระแสทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz ที่ค่ากระแส (rms) 4.0 A ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ 60 kHz ด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข $\text{working coil} = 2 \text{ turns}$ ที่อุณหภูมิใช้งาน 400°C พร้อมทั้งบันทึกรูปคลื่นในรูปแบบแฟ้ม Bitmap และค่าข้อมูลของรูปคลื่นในรูปแบบแฟ้ม ASCII ทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ อินพุตอินเวอร์เตอร์และ แหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz

2). ทำการปรับแรงดันที่ Variable Voltage Transformer เพื่อหาค่าตำแหน่งที่สามารถอ่านค่ากระแสทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz โดยการเปลี่ยนแปลงค่ากระแส (rms) จาก 4.0 A มาเป็น 4.5 , 5.0 , 6.0 , 6.5 , 7.0 , 7.5 , 8.0 A ตามลำดับ ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ 60 kHz ด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข $\text{working coil} = 2 \text{ turns}$ ที่อุณหภูมิใช้งาน 400°C พร้อมทั้งบันทึกรูปคลื่นในรูปแบบแฟ้ม Bitmap และค่าข้อมูลของรูปคลื่นในรูปแบบแฟ้ม ASCII ทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ อินพุตอินเวอร์เตอร์ และ แหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz

3). ทำการปรับแรงดันที่ Variable Voltage Transformer เหมือนกับข้อที่ 2 เพื่อหาค่าตำแหน่งที่สามารถอ่านค่ากระแสทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz ค่ากระแส (rms) จาก 4.0 , 4.5 , 5.0 , 6.0 , 6.5 , 7.0 , 7.5 , 8.0 A ตามลำดับ ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ 60 kHz แต่จะทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไข working coil มาเป็น $\text{working coil} = 3, 4, 5, 6 \text{ turns}$ ตามลำดับ พร้อมทั้งบันทึกรูปคลื่นในรูปแบบแฟ้ม Bitmap และค่าข้อมูลของรูปคลื่นในรูปแบบแฟ้ม ASCII ทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ อินพุตอินเวอร์เตอร์ และด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz

4). ค่าข้อมูลทั้งหมดที่ได้นี้จะทำการเก็บข้อมูลในลักษณะของเส้นกราฟที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแสทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz ดังรูปที่ 5.14 , 5.15 และ 5.16 ตามลำดับ ด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไขของ $\text{working coil} = 2, 3, 4, 5, 6 \text{ turns}$ และข้อมูลเส้นกราฟทั้งหมดได้ทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่อุณหภูมิใช้งาน 400°C ส่วนค่าประสิทธิภาพ η และเพาเวอร์แฟกเตอร์ PF นั้นได้ทำการเขียนเป็นเส้นกราฟด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไขของ $\text{working coil} = 4 \text{ turns}$



working coil = 2 turns



working coil = 3 turns



working coil = 4 turns



working coil = 5 turns



working coil = 6 turns



ชุดทดสอบอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วย
การเหนี่ยวนำความถี่สูง

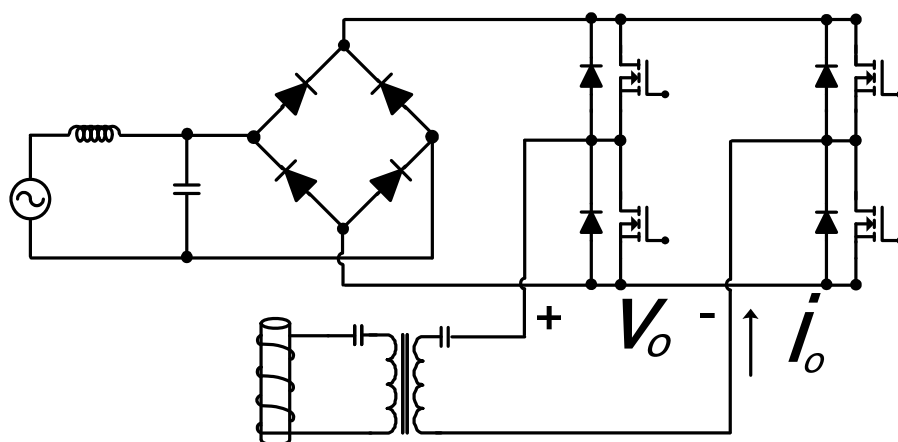
รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะ working coil ที่ใช้ทดสอบในวงจรอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating)

5.2.2 ขั้นตอนการซิมูเลตด้วยโปรแกรม MATLAB

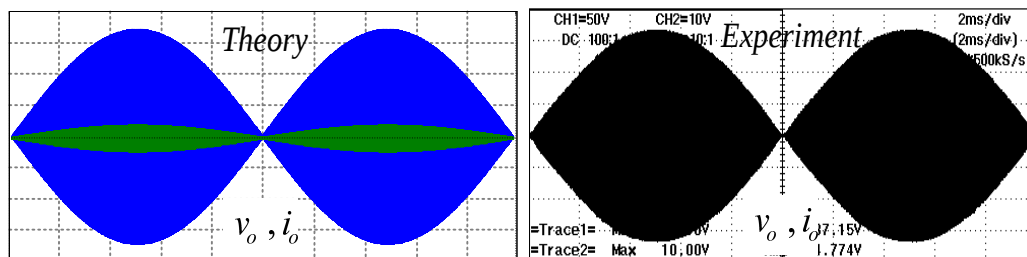
- 1) ใช้ค่าแรงดันไฟสลับที่ได้จากการทดลองที่เป็นค่า rms ซึ่งคูณด้วย $\sqrt{2}$ เพื่อให้ได้ค่า peak
- 2) ใช้ค่าความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ที่ทำการทดลอง คือ 60 kHz
- 3) ใช้ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลองซึ่งค่าดังกล่าวนี้จะได้จากการนำคลื่นแรงดันเอซีทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ v_{ok} และกระแสโหลด i_{ok} มาทำการกระจายอนุกรมฟูเรียร์เพื่อให้ได้สเปกตรัมของแรงดันเอซีทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ v_{ok} และ กระแสโหลด i_{ok} ที่อันดับฮาร์โมนิกต่างๆเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำ
- 4) ทำการซิมูเลตเพื่อจะทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าทั้ง 3 ของระบบรวม ซึ่งได้แก่ ค่ากำลังไฟฟ้า P_{in} ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า จากสมการที่ (4.7) ค่ากำลังไฟฟ้า P_d ทางด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์จากสมการที่ (4.6) และ ค่ากำลังไฟฟ้า P_o ทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ จากสมการที่ (3.21) สำหรับค่าประสิทธิภาพ η สามารถคำนวณได้จากค่ากำลังไฟฟ้า P_o และ P_{in} ดังสมการที่ (4.9) ส่วนค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ PF ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.8)

5.3 การเปรียบเทียบผลการซิมูเลต และผลการทดลอง คลื่นแรงดันและกระแส

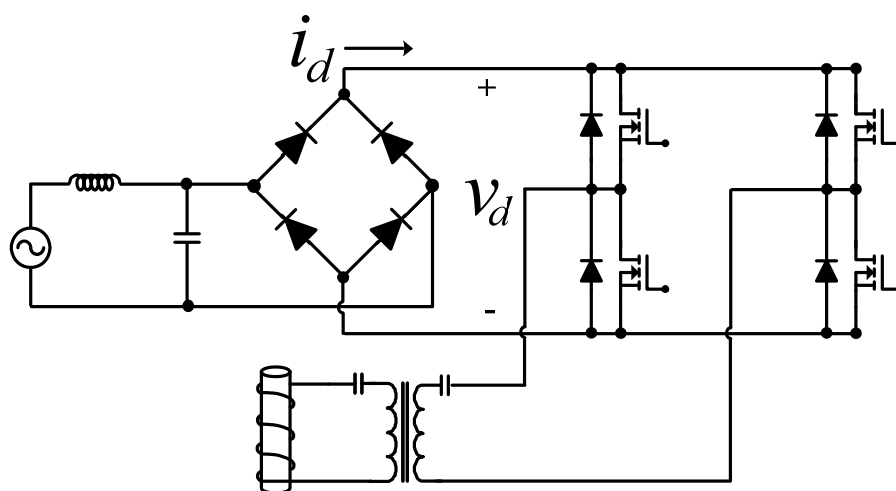
ณ จุดต่างๆในวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่จ่ายโหลดอุปกรณ์ให้ความร้อนโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำความถี่สูง จากหัวข้อ 5.2.1 และ 5.2.2 ค่าทั้งหมดนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลจากการทดสอบกับอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงเพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีเพื่อยืนยันความถูกต้องในขั้นตอนสุดท้าย โดยคลื่นที่ได้จากผลการทดลองของแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุตและอินพุตของอินเวอร์เตอร์ รวมทั้งแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไขของ working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิใช้งาน 400 °C



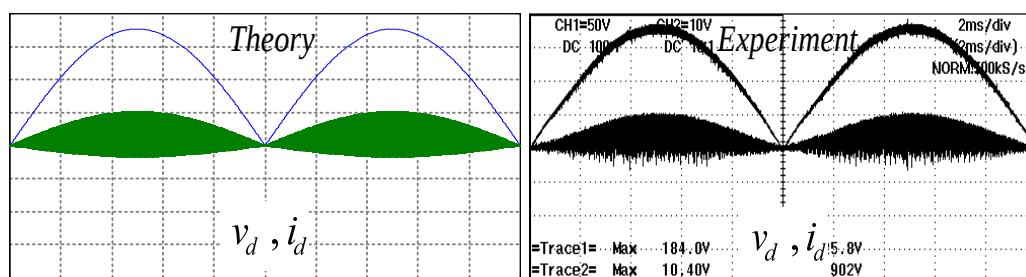
รูปที่ 5.3 ตำแหน่งเก็บผลการทดลองทางด้านเอาต์พุตของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิใช้งาน 400 °C



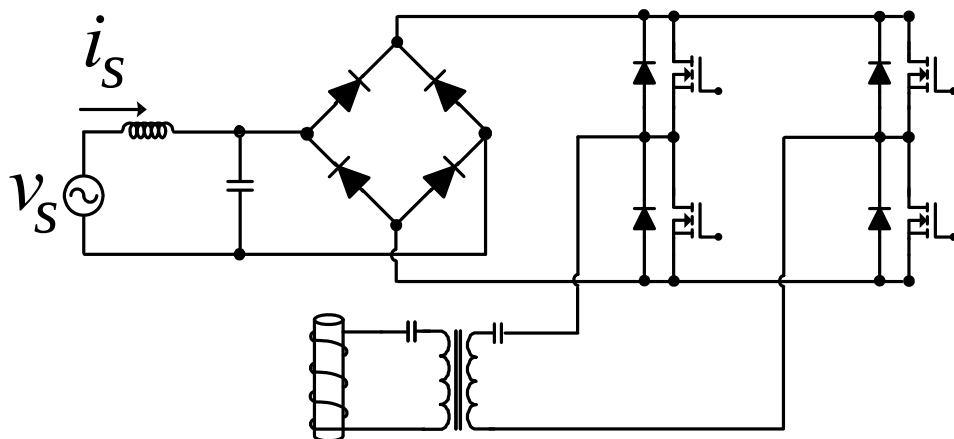
รูปที่ 5.4 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_o และกระแส i_o ที่ได้จากการซิมูเลตเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิใช้งาน $400\text{ }^{\circ}\text{C}$



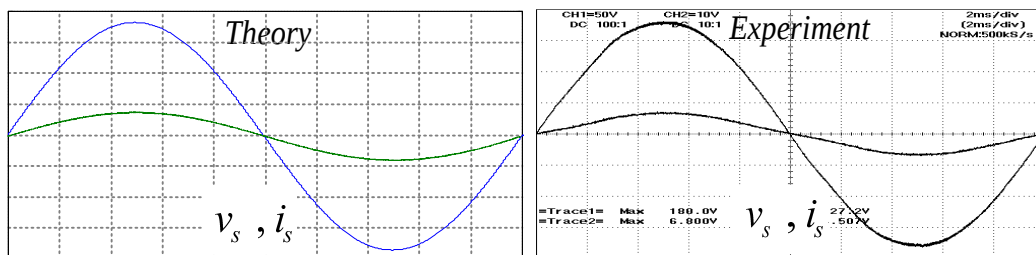
รูปที่ 5.5 ตำแหน่งเก็บผลการทดลองทางด้านอินพุตของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิใช้งาน $400\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 5.6 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_d และกระแส i_d ที่ได้จากการซิมูเลตเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิใช้งาน $400\text{ }^{\circ}\text{C}$

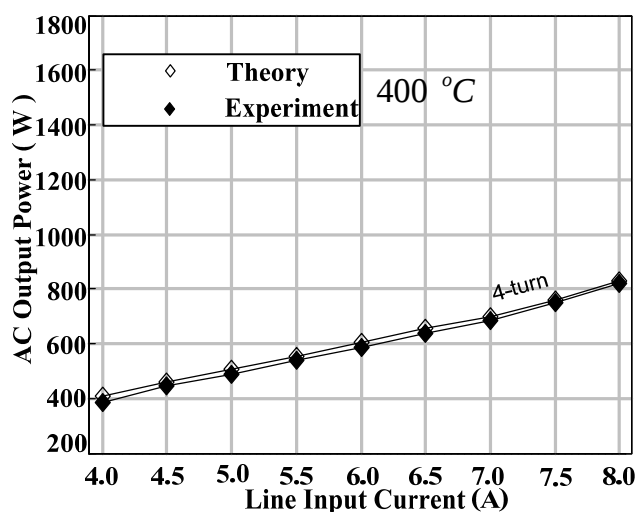


รูปที่ 5.7 ตำแหน่งเก็บผลการทดลองทางแหล่งจ่ายการไฟฟ้าของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มี โหลดเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิใช้งาน 400 °C

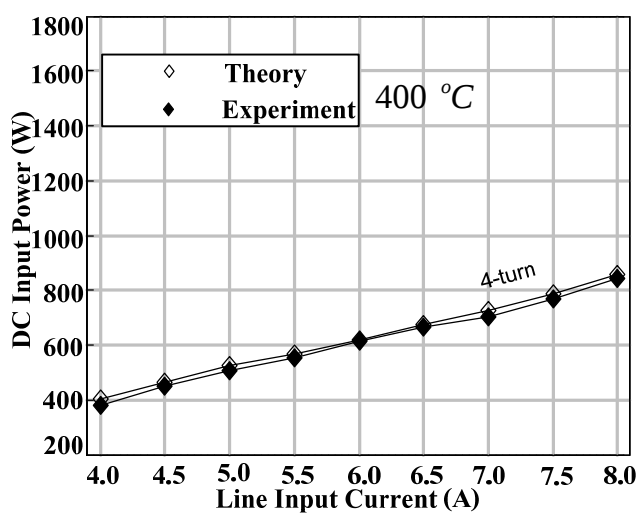


รูปที่ 5.8 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ที่ได้จากการซิมูเลตเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้าด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิใช้งาน 400 °C

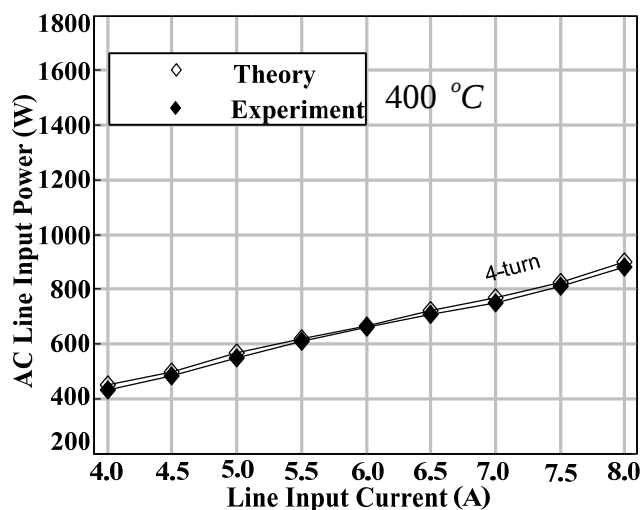
ค่าทั้งหมดนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลในลักษณะของเส้นกราฟที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแส แหล่งจ่ายการไฟฟ้าด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิใช้งาน 400 °C จาก บทที่ 4 และ บทที่ 5 สามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า P_o ด้านเอซีเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ค่ากำลังไฟฟ้า P_d ด้านดีซีอินพุตอินเวอร์เตอร์ ตลอดจนค่ากำลังไฟฟ้า P_{in} ด้านแหล่งจ่ายอินพุตการไฟฟ้า ผลการคำนวณทางทฤษฎีทั้งหมดยังได้นำมายืนยันความถูกต้องด้วยการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งได้จากเครื่องทดสอบต้นแบบขนาด 1,800 W ซึ่งปรากฏว่าได้ผลที่มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 5.9 , 5.10 และ 5.11 ตามลำดับ



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า P_o ทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแสแหล่งจ่ายการไฟฟ้าด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิใช้งาน 400 °C

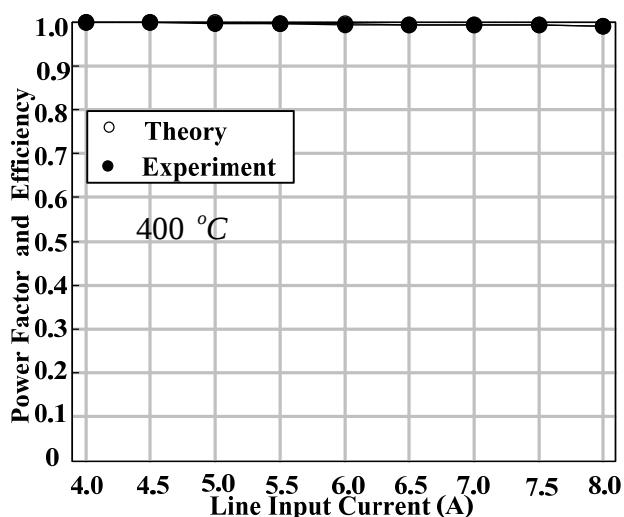


รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า P_d ทางด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแสแหล่งจ่ายการไฟฟ้าด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิใช้งาน 400 °C

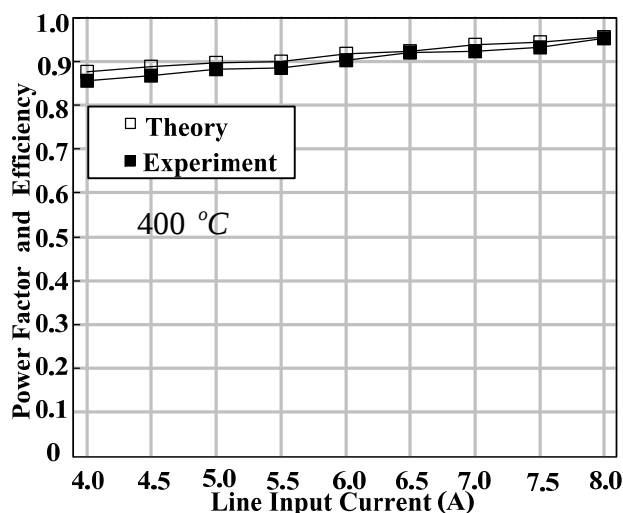


รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า P_{in} ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้าที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแสแหล่งจ่ายการไฟฟ้าด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิขึ้นงาน 400 °C

ค่ากำลังไฟฟ้า P_{in} นั้นสามารถพิจารณาพร้อมกับ v_s และ i_s เพื่อคำนวณหาค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ดังได้เขียนไว้ในสมการที่ (4.8) สำหรับค่าประสิทธิภาพ η สามารถคำนวณได้จากค่ากำลังไฟฟ้า P_o และ P_{in} จากสมการที่ (3.21) และสมการที่ (4.7) ส่วนค่าประสิทธิภาพ η และเพาเวอร์แฟกเตอร์ PF ได้เขียนเป็นเส้นกราฟแสดงในรูปที่ 5.12 ด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิขึ้นงาน 400 °C



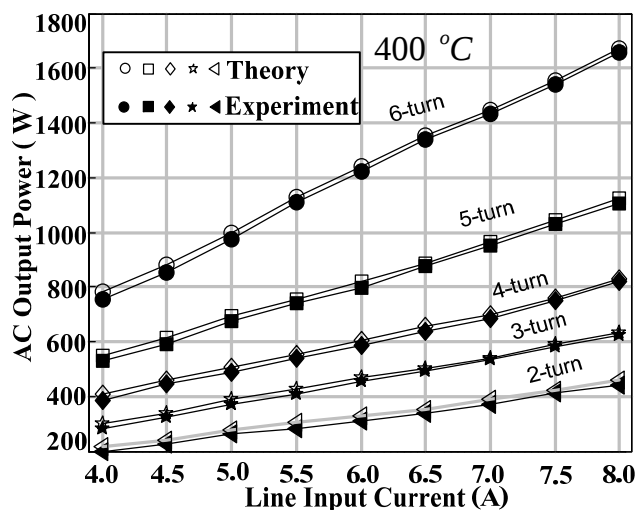
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ PF ด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้าที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแสแหล่งจ่ายการไฟฟ้าด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิขึ้นงาน 400 °C



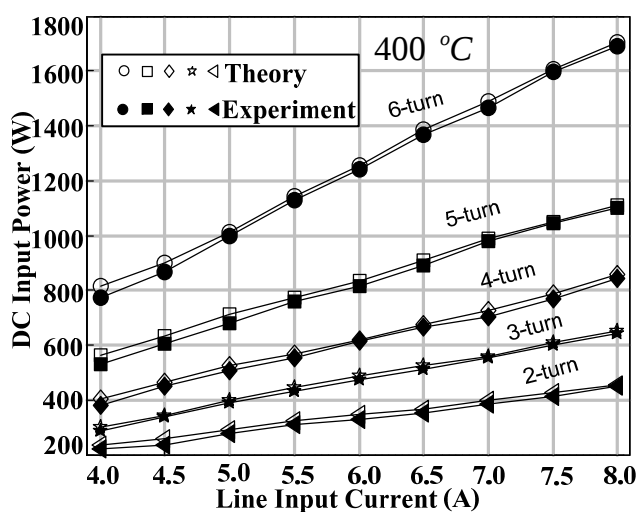
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพ η ของวงจรรวมระหว่างเรกติฟายเออร์และอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแสแหล่งจ่ายการไฟฟ้าด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิขึ้นงาน 400 °C

5.4 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าทั้ง 3 ของระบบรวม

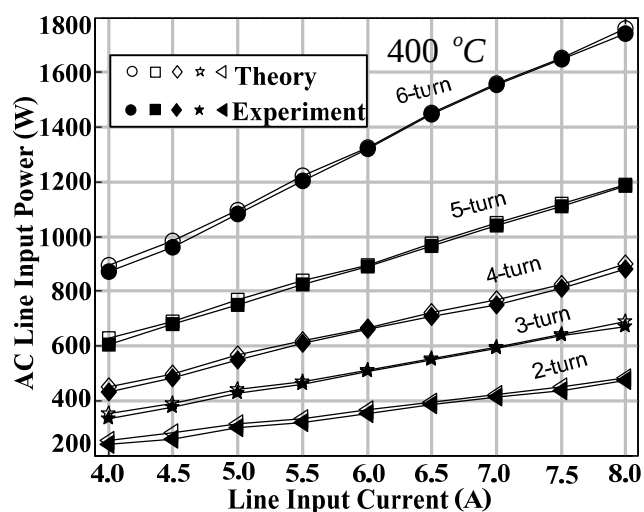
ผลการคำนวณทางทฤษฎีทั้งหมดจากหัวข้อ 5.2.2 โดยใช้โปรแกรม MATLAB ยังได้นำมายืนยันความถูกต้องด้วยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากหัวข้อ 5.2.1 เพื่อจะทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าทั้ง 3 ของระบบรวม ซึ่งได้แก่ ค่ากำลังไฟฟ้า P_{in} ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้า P_d ทางด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ ค่ากำลังไฟฟ้า P_o ทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ซึ่งค่าทั้งหมดนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลในลักษณะของเส้นกราฟที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแสแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 5.14 , 5.15 และ 5.16 ตามลำดับ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบทั้งหมดจะทดสอบภายใต้เงื่อนไขของ working coil = 2 , 3 , 4 , 5 , 6 turns และข้อมูลเส้นกราฟทั้งหมดได้ทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่อุณหภูมิขึ้นงาน 400 °C



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า P_o ทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแสแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไขของ working coil = 2, 3, 4, 5, 6 turns ที่อุณหภูมิใช้งาน 400 °C



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า P_d ทางด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแสแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไขของ working coil = 2, 3, 4, 5, 6 turns ที่อุณหภูมิใช้งาน 400 °C



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า P_{in} ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้าที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแสแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไขของ working coil = 2 , 3 , 4 , 5 , 6 turns ที่อุณหภูมิขึ้นงาน 400 °C

5.5 สรุป

จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการซิมูเลตสมการ โดยใช้โปรแกรม Matlab กับผลที่ได้จากการทดลองพบว่าลักษณะคลื่นตามจุดต่างๆของวงจรวงจรฟูลบริจอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating) กรณีที่มีการป้อนแรงดันทางด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเป็นแรงดันเรกติฟาย 100 Hz ซึ่งค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบกันระหว่างการซิมูเลตกับผลที่ได้จากการทดลองนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก โดยในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการซิมูเลตและวิธีการวัดค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ อินพุทของอินเวอร์เตอร์ และทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz โดยที่เรกติฟายเออร์-อินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอนี้มีค่าประสิทธิภาพจาก 85 – 94 % และสามารถปรับปรุงอินพุทเพาเวอร์แฟ็คเตอร์ให้มีค่าสูงขึ้นมากจนเกือบเท่ากับ 1 โดยที่อินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอนี้สามารถปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุทในช่วง 200 – 1,800 W