



### การทดสอบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

หลังจากที่ได้วิเคราะห์ ออกแบบ สร้างและทดสอบอุปกรณ์ย่อยต่าง ๆ แล้วได้ทำการประกอบอุปกรณ์เข้าเป็นเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ซึ่งประกอบด้วยภาคต่าง ๆ คือ โหลดซึ่งประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำที่มีลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร เป็นชิ้นงาน และมีตัวเก็บประจุเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังต่ออนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำ วงจรอินเวอร์เตอร์ที่เป็นแบบกึ่งบริดจ์ และวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ชนิด 3 เฟส ที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรอง วงจรควบคุมและวงจรป้องกัน หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยแบ่งเป็นการทดสอบทางไฟฟ้าและการทดสอบด้านความร้อนของชิ้นงานที่เป็นลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร การทดสอบทางไฟฟ้าจะประกอบด้วยการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของเครื่อง การวัดและบันทึกรูปคลื่นของกระแสและแรงดันที่ภาคต่าง ๆ ของเครื่องเช่น ภาคขั้วนำเบสของทรานซิสเตอร์และภาควงจรกำลัง เพื่อให้ทราบลักษณะการทำงานของวงจรและคุณสมบัติที่สำคัญที่ภาคต่างๆ ของเครื่อง เช่น กำลังด้านเข้า กำลังที่ขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน ตัวประกอบกำลังและประสิทธิภาพของวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ ประสิทธิภาพรวมของเครื่อง ที่ความถี่ 19.5 , 21 , 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นต้น ส่วนการทดสอบทางด้านความร้อนที่เกิดขึ้นที่ชิ้นงานซึ่งเป็นลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ทำโดยการวัดค่าอุณหภูมิของชิ้นงานที่ความถี่ 19.5 , 21 , 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ ในช่วงเวลา 1 - 10 วินาที

#### การทดสอบทางไฟฟ้า

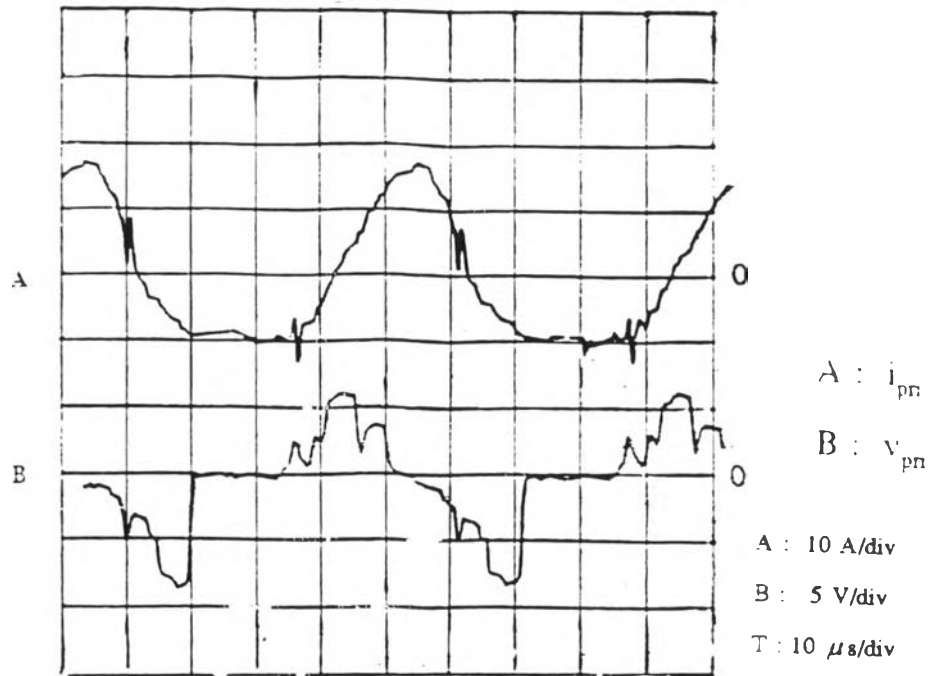
##### 1 การวัดและบันทึกรูปคลื่นของกระแสและแรงดัน

การวัดและบันทึกรูปคลื่นของกระแสและแรงดันจะทำการวัดและบันทึกที่ความถี่การทำงานของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 19.5 , 21 , 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ โดยจะทำการวัดที่จุดต่าง ๆ ของวงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานในรูปที่ 3.17 วงจรขั้วนำเบสของทรานซิสเตอร์กำลังในรูปที่ 3.18 และวงจรภาคกำลังในรูปที่ 3.3

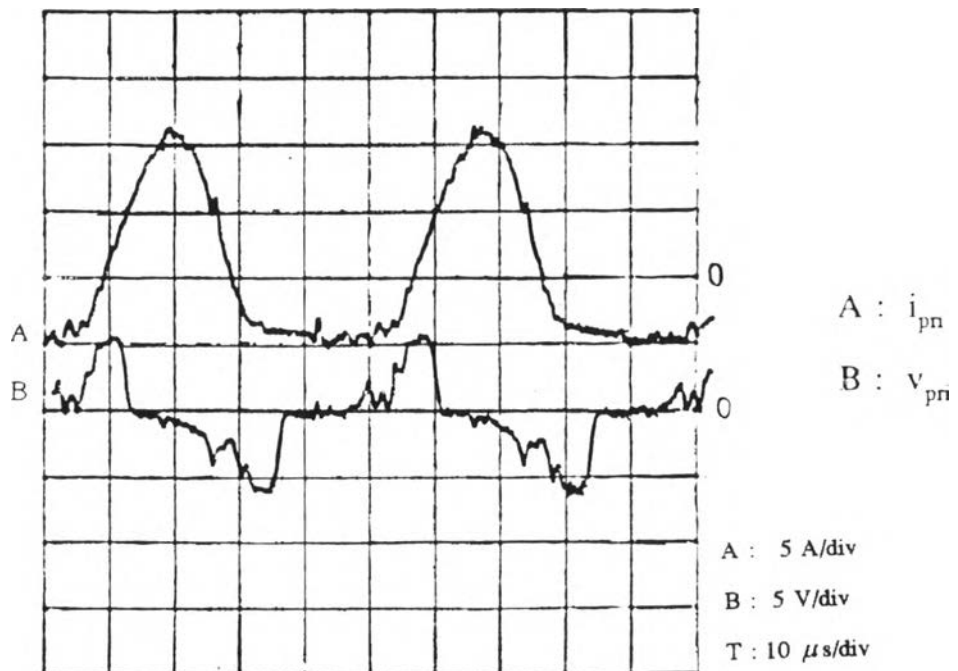
##### 1.1 รูปคลื่นของวงจรควบคุม

วงจรควบคุมประกอบด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของอินเวอร์เตอร์และวงจรขั้วนำเบสของทรานซิสเตอร์กำลัง

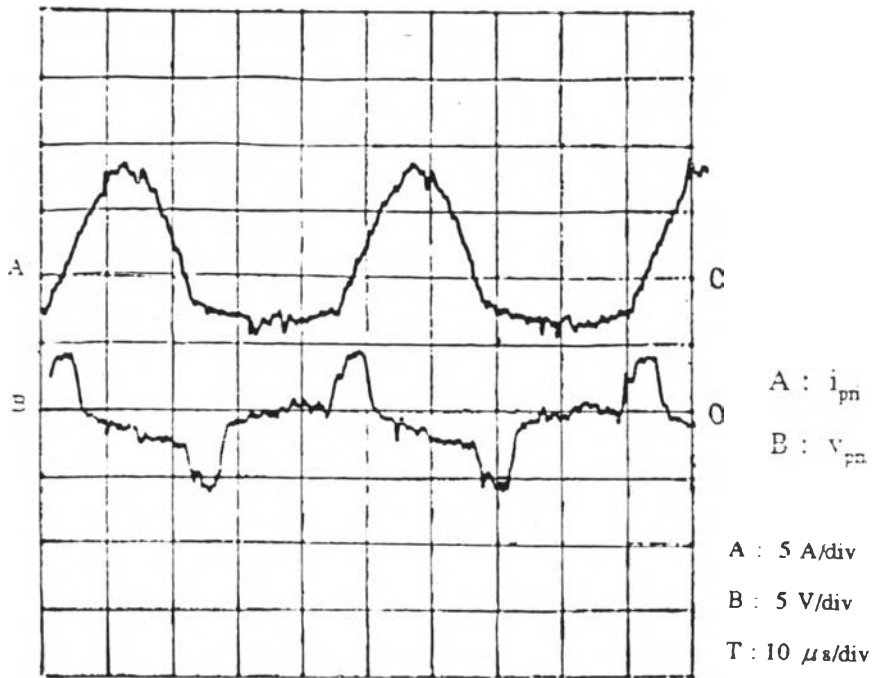
### 1.1.1 รูปคลื่นของวงจรถ่ายสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงาน



รูปที่ 4.1 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงขับนำเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  ที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 4.2 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงขับนำเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  ที่ความถี่ 21 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 4.3 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงขับนำเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  ที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์

รูปที่ 4.1 - 4.3 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงขับนำเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  ที่ความถี่ 19.5, 21, 22.5 กิโลเฮิรตซ์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นของกระแสที่ความถี่ต่างๆจะมีลักษณะไม่สมมาตรซึ่งกระแสช่วงที่เป็นบวกจะมีลักษณะเป็นไซน์เหมือนกระแสไหล

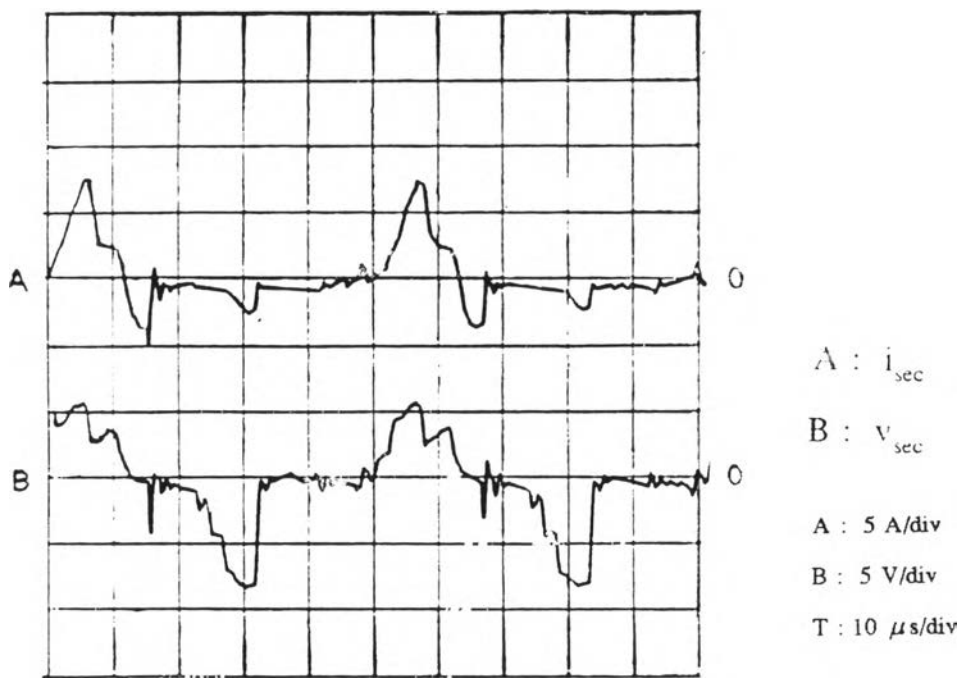
ส่วนช่วงที่กระแสเป็นลบที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงขับนำเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  จะเป็นกระแสทำแม่เหล็กเท่านั้น กระแสดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นแบบไซน์ที่มีการตัดยอด ซึ่งเป็นผลมาจากเนื่องจากแรงดันคร่อมขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงขับนำทรานซิสเตอร์  $Q_2$  ลดลงเป็นศูนย์เมื่อหม้อแปลงขับนำทรานซิสเตอร์  $Q_2$  อิ่มตัว เป็นผลทำให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงขับนำทรานซิสเตอร์  $Q_1$

จากการเปรียบเทียบกระแสด้านปฐมภูมิที่ความถี่ต่าง ๆ จะเห็นได้ว่ากระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงขับนำจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น เนื่องจากกระแสไหลมีค่าลดลง

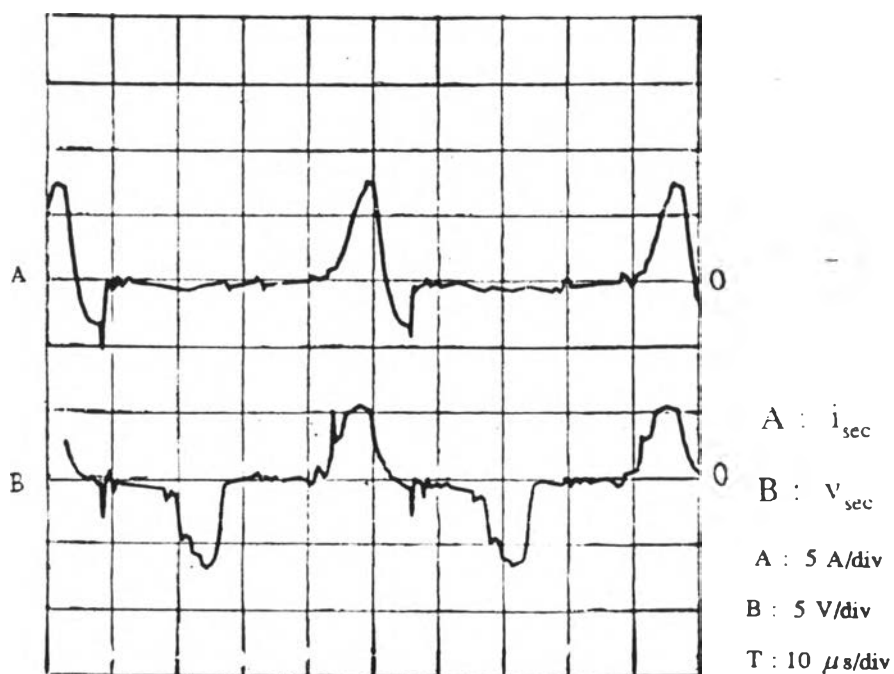
ส่วนแรงดันด้านปฐมภูมิจะเป็นแบบ 3 สถานะ โดยจะประกอบด้วย แรงดันที่เป็นบวกเป็นช่วงที่ทรานซิสเตอร์  $Q_1$  นำกระแส หลังจากนั้นแรงดันจะตกลงเป็นศูนย์ทรานซิสเตอร์  $Q_1$  ก็จะเริ่มหยุดนำกระแส เนื่องจากหม้อแปลงขับนำทรานซิสเตอร์  $Q_1$  อิ่มตัว

เมื่อกระแสไหลควมมีค่าลดลง แรงดันจะมีค่าเป็นลบ และแรงดันจะมีค่าเป็นศูนย์อีกครั้งเมื่อหม้อแปลงขั้วนำทรานซิสเตอร์  $Q_2$  อิ่มตัว

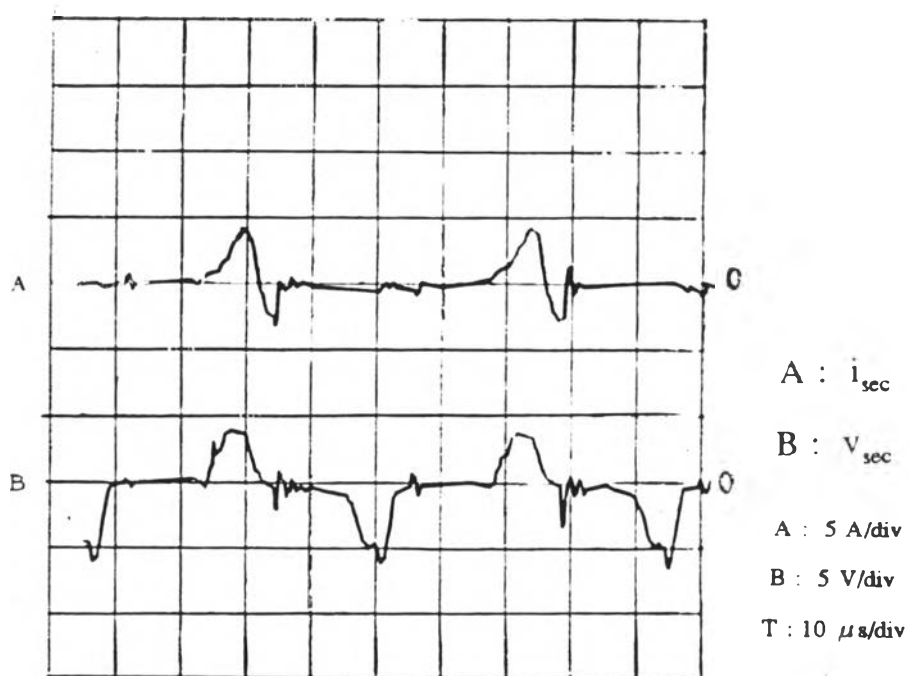
สำหรับรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงขั้วนำเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_2$  ที่ความถี่ 19.5 , 21 , 22.5 กิโลเฮิรตซ์ จะมีขนาดและรูปร่างเหมือนกับรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงขั้วนำเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  แต่จะมีเฟสต่างกัน 180 องศา



รูปที่ 4.4 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงขั้วนำเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  ที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 4.5 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงขับนำเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  ที่ความถี่ 21 กิโลเฮิรตซ์

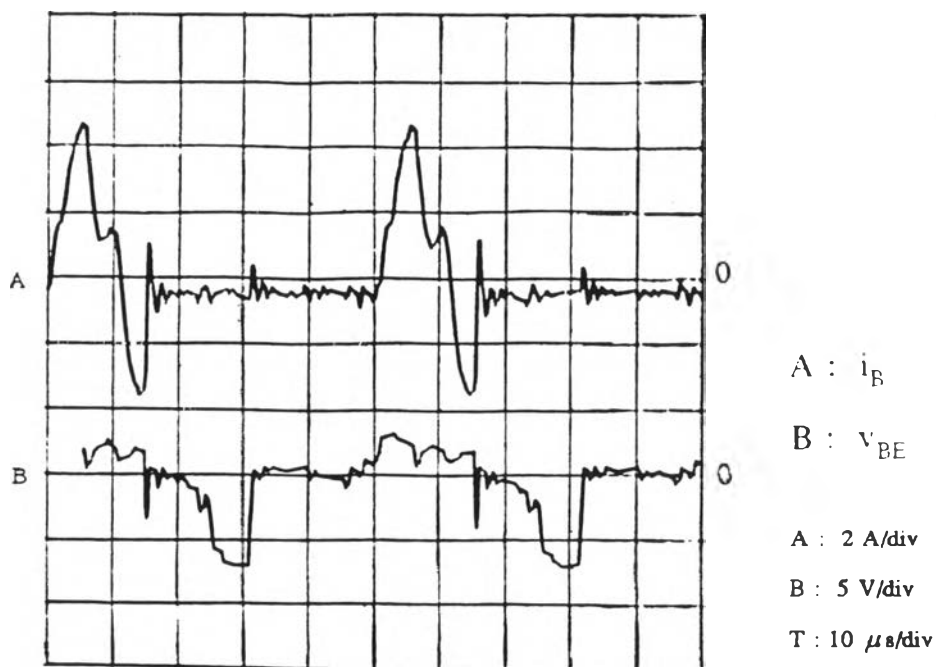


รูปที่ 4.6 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงขับนำเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  ที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์

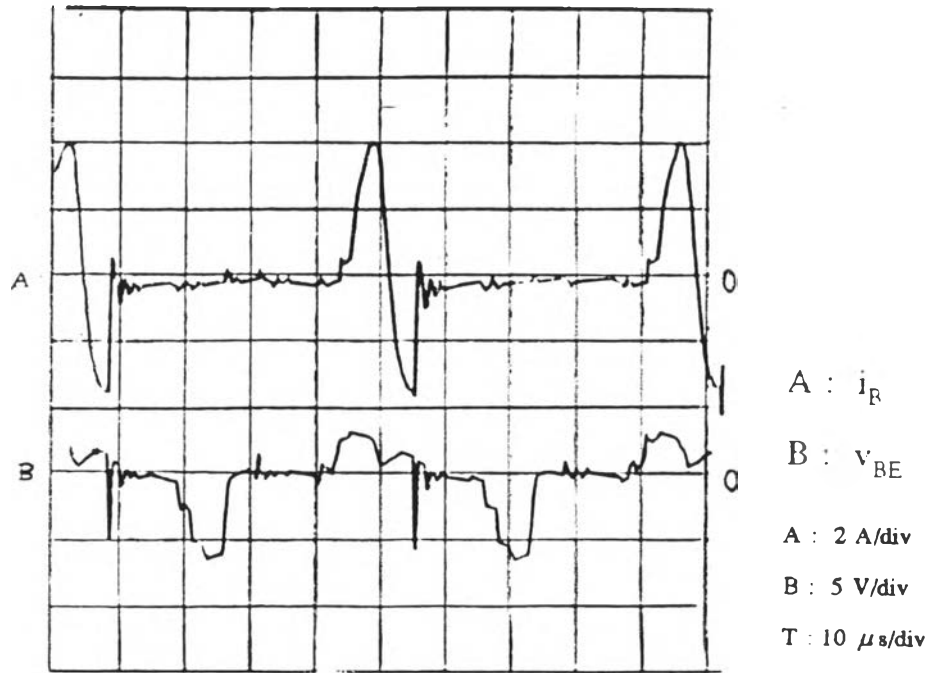
รูปที่ 4.4 - 4.6 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ขั้วนำเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  ที่ความถี่ 19.5 , 21 , 22.5 กิโลเฮิรตซ์ ตามลำดับโดยกระแส ด้านทุติยภูมินี้เป็นกระแสที่ป้อนให้กับวงจรขั้วนำเบสของทรานซิสเตอร์ ช่วงเวลาที่กระแสเป็น บวกเป็นเวลาทีทรานซิสเตอร์ถูกขั้วนำให้เข้ากระแส ช่วงเวลาที่กระแสเป็นบวกและขนาด กระแสจะเปลี่ยนแปลงตามกระแสไหลคและกระแสของขดลวดควบคุมความถี่ เมื่อแกนของ หม้อแปลงขั้วนำอิมตัว กระแสด้านทุติยภูมิจะมีค่าเป็นลบ เนื่องจากมีกระแสไหลออกจากเบส ของทรานซิสเตอร์ ช่วงเวลากระแสเป็นลบนั้นเป็นช่วง Storage Time ทีทรานซิสเตอร์ ส่วน แรงดันด้านทุติยภูมิจะเป็นแบบ 3 สถานะ เช่นเดียวกับแรงดันด้านปฐมภูมิ

สำหรับรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงขั้วนำเบสของ ทรานซิสเตอร์  $Q_2$  ที่ความถี่ 19.5 , 21 , 22.5 กิโลเฮิรตซ์ จะมีขนาดและรูปร่างเหมือนกับรูป คลื่นของกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงขั้วนำเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  แต่จะ มีเฟสต่างกัน 180 องศา

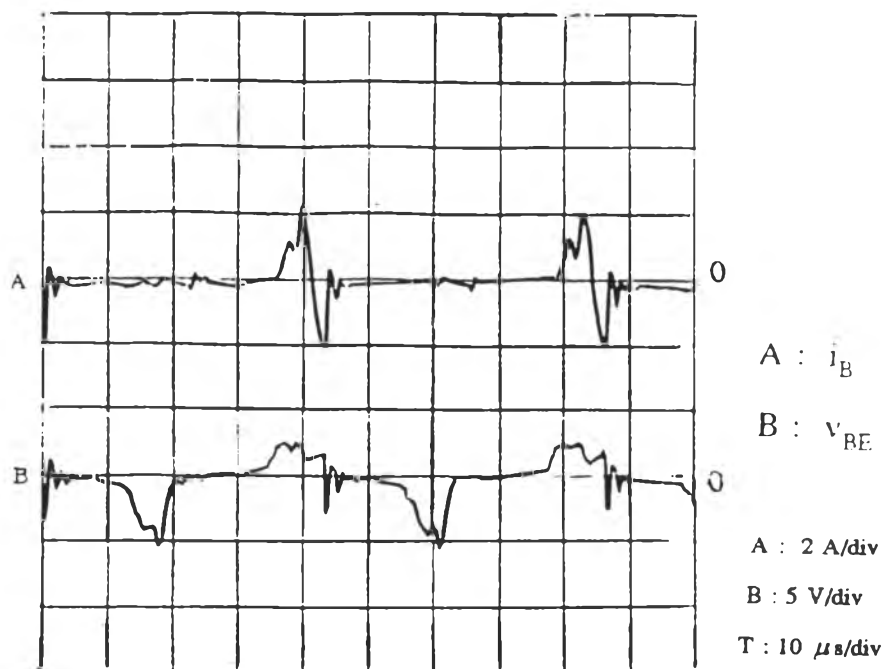
#### 1.1.2 รูปคลื่นของวงจรขั้วนำเบส



รูปที่ 4.7 แสดงรูปคลื่นของกระแสเบสและแรงดันเบส-อิมิตเตอร์ของวงจรขั้วนำเบสของ ทรานซิสเตอร์  $Q_1$  ที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 4.8 แสดงรูปคลื่นของกระแสเบสและแรงดันเบส-อิมิตเตอร์ของวงจรถับนำเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  ที่ความถี่ 21 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 4.9 แสดงรูปคลื่นของกระแสเบสและแรงดันเบส-อิมิตเตอร์ของวงจรถับนำเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  ที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์

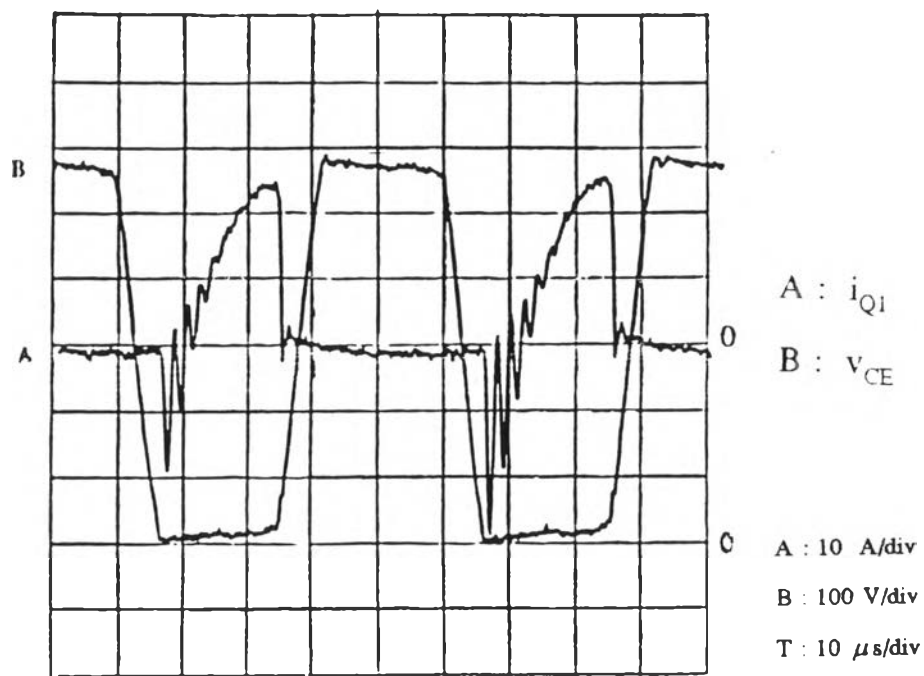
รูปที่ 4.7 - 4.9 แสดงรูปคลื่นของกระแสเบส ( $I_b$ ) และแรงดันเบส-อิมิตเตอร์ของวงจรถับนำเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  ที่ความถี่ 19.5, 21, 22.5 กิโลเฮิรตซ์ เมื่อนำมาพิจารณาจะได้ว่า ช่วงเวลาที่กระแสเบสเป็นบวก ก็คือช่วงเวลาที่วงจรถับนำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแส (Turn on Time) ซึ่งที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าประมาณ 10 ไมโครวินาที ที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าประมาณ 5 ไมโครวินาที ในขณะที่ช่วงเวลาที่กระแสเบสเป็นลบ คือช่วงเวลาที่วงจรถับนำเบสสั่งให้ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส กระแสเบสที่เป็นลบ เนื่องจากมีกระแสไหลออกจากเบสของทรานซิสเตอร์ ช่วงเวลานี้เป็นค่า Storage Time ของทรานซิสเตอร์กำลังถือได้ว่าเป็น Delay Time ในการ Turn Off และจะเปลี่ยนไปตามกระแสไหล ที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าประมาณ 5 ไมโครวินาที และที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าประมาณ 4 ไมโครวินาที เมื่อทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแสจะไม่มีกระแสไหลในวงจรถับนำเบส เมื่อเปรียบเทียบกระแสเบสที่ความถี่ต่าง ๆ สังเกตเห็นได้ว่าค่า Storage Time จะมีค่าลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น ค่า Storage Time เปลี่ยนค่าตามกระแสไหลเพราะแหล่งกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของวงจรถับนำเบส การป้อนกลับของกระแสไหล คือ เมื่อความถี่สูงขึ้นกระแสไหลมีค่าลดลง ค่า Storage Time ก็จะมีค่าลดลง

สำหรับแรงดันเบส-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์กำลัง  $Q_1$  ที่ความถี่ 19.5, 21, 22.5 กิโลเฮิรตซ์ จะประกอบด้วยช่วงเวลาที่แรงดันเป็นบวก ซึ่งเป็นช่วงที่ทรานซิสเตอร์กำลังนำกระแส ซึ่งประกอบด้วยช่วงเวลาที่สั่งให้ทรานซิสเตอร์นำกระแสและช่วง Storage Time รวมกัน ที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์ จะมีแรงดันตกคร่อมเบส-อิมิตเตอร์เท่ากับ 3 โวลต์ ช่วงที่แรงดันเป็นศูนย์และช่วงเวลาที่แรงดันเป็นลบคือ ช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส ค่าแรงดันที่เป็นลบจะมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมขดลวดค้ำทุติยภูมิของหม้อแปลงจับนำทรานซิสเตอร์ ที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์ เท่ากับ -8 โวลต์ ค่าแรงดันที่เป็นลบจะลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น

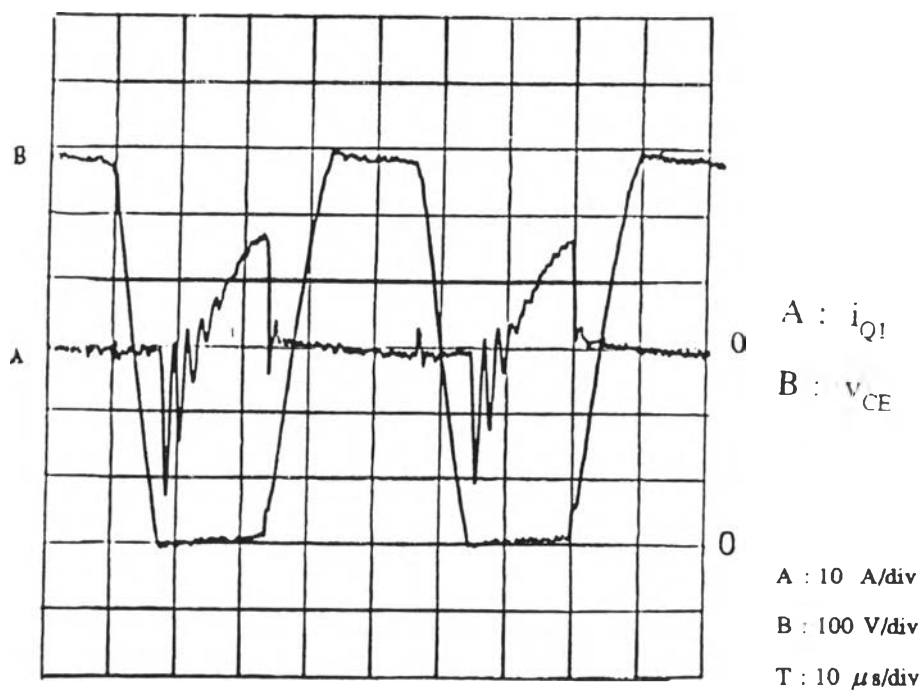
## 1.2 รูปคลื่นแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลังและกระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลัง

รูปที่ 4.10-4.12 แสดงรูปคลื่นของกระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลังและแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง  $Q_1$  ที่ความถี่ 19.5, 21, 22.5 กิโลเฮิรตซ์ ตามลำดับ ช่วงกระแสบวกเป็นช่วงที่ทรานซิสเตอร์กำลังนำกระแส ส่วนช่วงกระแสลบเป็นช่วงที่กระแสไหลผ่านไดโอดและสแน็บเบอร์ จากรูปจะเห็นได้ว่าทรานซิสเตอร์กำลัง  $Q_1$  เริ่มนำกระแสต่อจากไดโอด  $D_1$  ที่ค่อนข้างกับทรานซิสเตอร์  $Q_1$  ดังนั้นแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์  $Q_1$  จะมีค่าน้อยในตอนเริ่มนำกระแส ทำให้กำลังสูญเสียในสวิทช์ลดลง เมื่อทรานซิสเตอร์กำลังหยุดนำกระแส แรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์  $Q_1$  จะไม่เพิ่มขึ้นทันที ความลาดเอียงของแรงดันเป็นผลจากสแน็บเบอร์แรงดันที่ออกแบบไว้เพื่อให้ค่าแรงดันในช่วงที่มีการตัดกันกับกระแสของทรานซิสเตอร์ในตอนหยุดนำกระแสมีค่าต่ำ

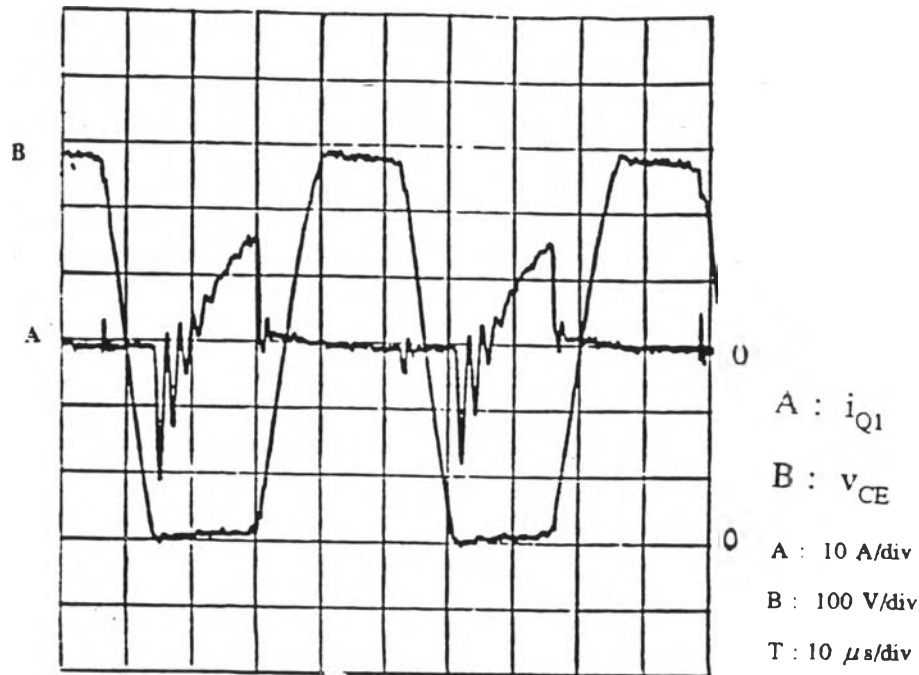




รูปที่ 4.10 แสดงรูปคลื่นของแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลังและกระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลัง  $Q_1$  ที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 4.11 แสดงรูปคลื่นของแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลังและกระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลัง  $Q_1$  ที่ความถี่ 21 กิโลเฮิรตซ์



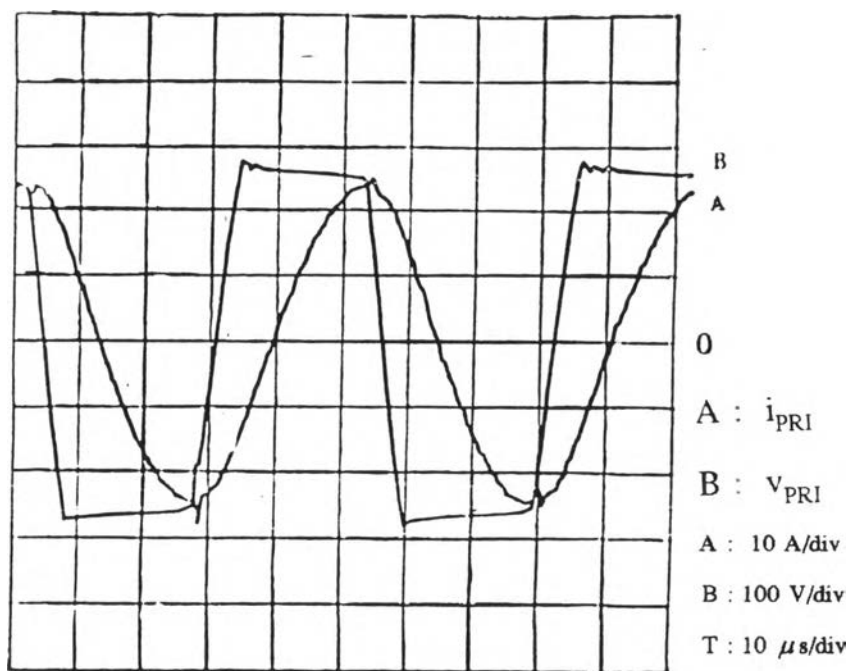
รูปที่ 4.12 แสดงรูปคลื่นของแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลังและกระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลัง  $Q_1$  ที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์

สำหรับรูปคลื่นของแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์  $Q_2$  และกระแสผ่านทรานซิสเตอร์  $Q_2$  ที่ความถี่ 19.5, 21, 22.5 กิโลเฮิรตซ์ จะมีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับรูปที่ 4.10 - 4.12 แต่จะมีเฟสต่างกัน 180 องศา

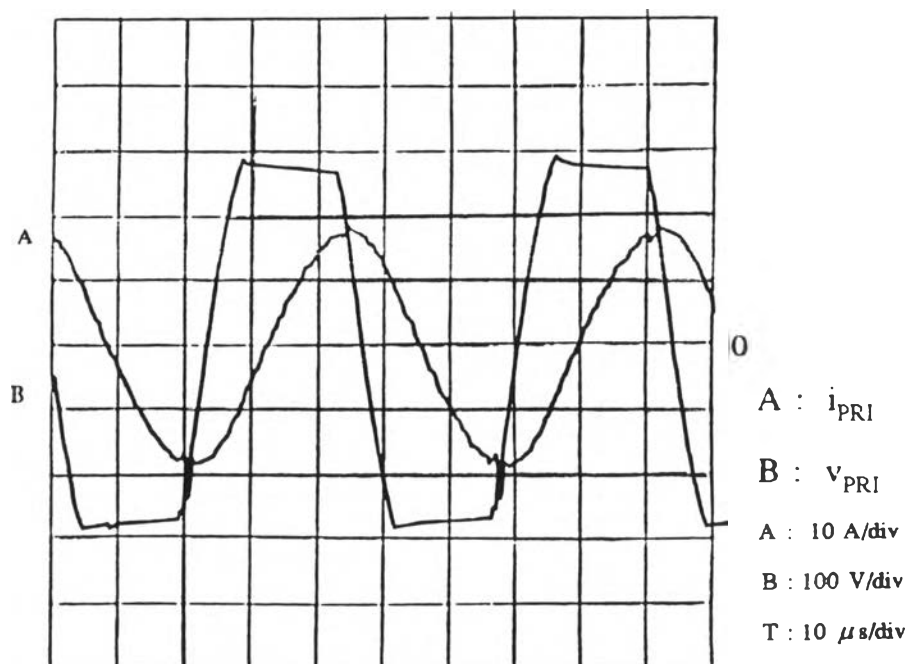
สำหรับกระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลังที่วัดได้จะรวมกระแสโคโอดที่ต่อขนานกับทรานซิสเตอร์ และกระแสในวงจรสับเบอ์แรงดันด้วย เพราะไม่สามารถใช้โพรบกระแสไปคล้องเพื่อวัดค่ากระแสคอลเลกเตอร์ได้โดยตรงเนื่องจากการต่อสายระหว่างวงจรสับเบอ์กับตัวทรานซิสเตอร์ต้องมีขนาดสั้นที่สุด จากรูปกระแสที่ผ่านทรานซิสเตอร์และโคโอดมีรูปร่างใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์ แต่จะมีความถี่สูงร่วมด้วย ซึ่งน่าจะเป็นผลจากตัวเก็บประจุระหว่างสายและค่าตัวเหนี่ยวนำของสายที่ไม่ได้คำนึงถึงในการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์

### 1.3 รูปคลื่นกระแสและแรงดันค่านปฐมภูมิของหม้อแปลงลดระดับแรงดัน

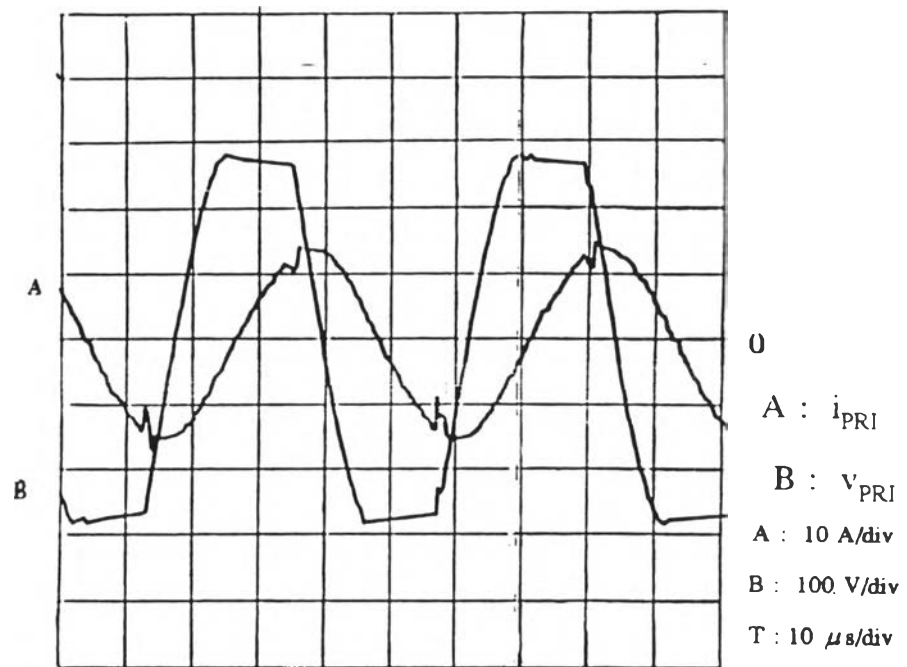
รูปที่ 4.13 - 4.15 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันค่านปฐมภูมิของหม้อแปลงลดระดับแรงดัน กระแสและแรงดันค่านปฐมภูมิของหม้อแปลงคือกระแสและแรงดันค่านขาออกของอินเวอร์เตอร์นั่นเอง จะเห็นได้ว่ากระแสจะล้าหลังแรงดันซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการให้อินเวอร์เตอร์ทำงานแบบก้ารในภาคแรงดันศูนย์ รูปคลื่นกระแสมีลักษณะเป็นไซน์ ส่วนแรงดันมีลักษณะคล้ายรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์ในรูปที่ 4.26



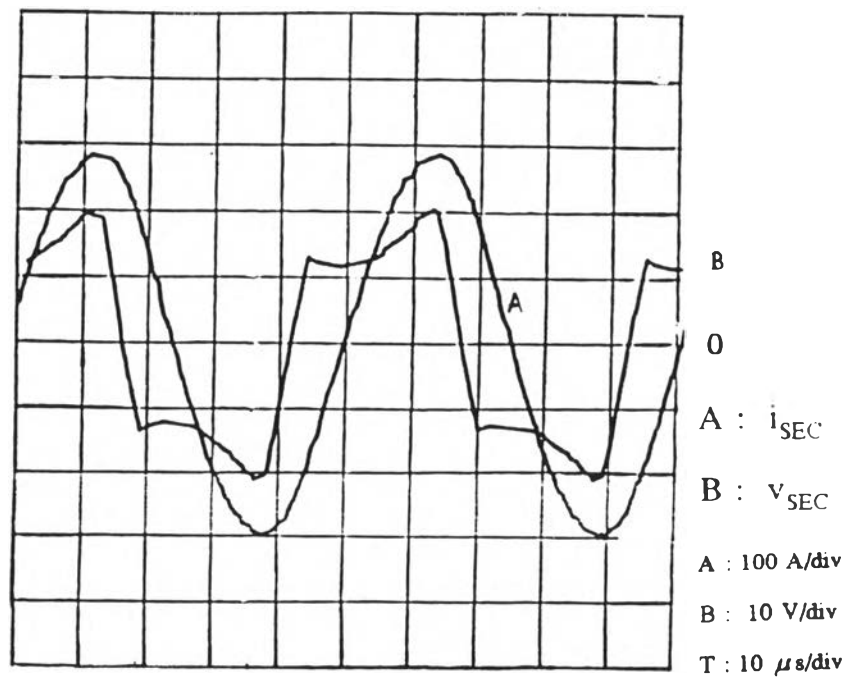
รูปที่ 4.13 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันค้ำดันปฐมภูมิของหม้อแปลง  
 ลดระดับแรงดัน ที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์



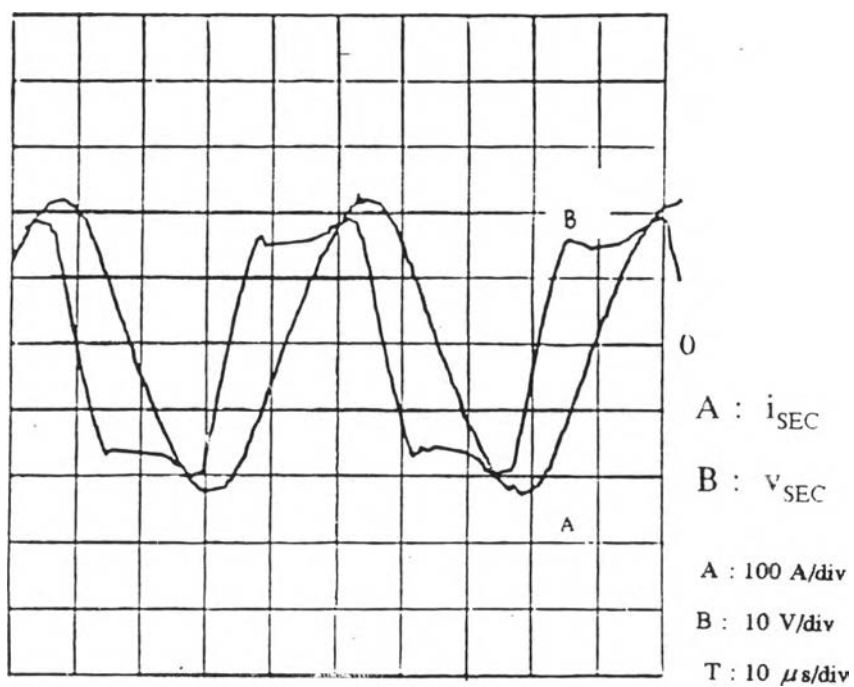
รูปที่ 4.14 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันค้ำดันปฐมภูมิของหม้อแปลง  
 ลดระดับแรงดัน ที่ความถี่ 21 กิโลเฮิรตซ์



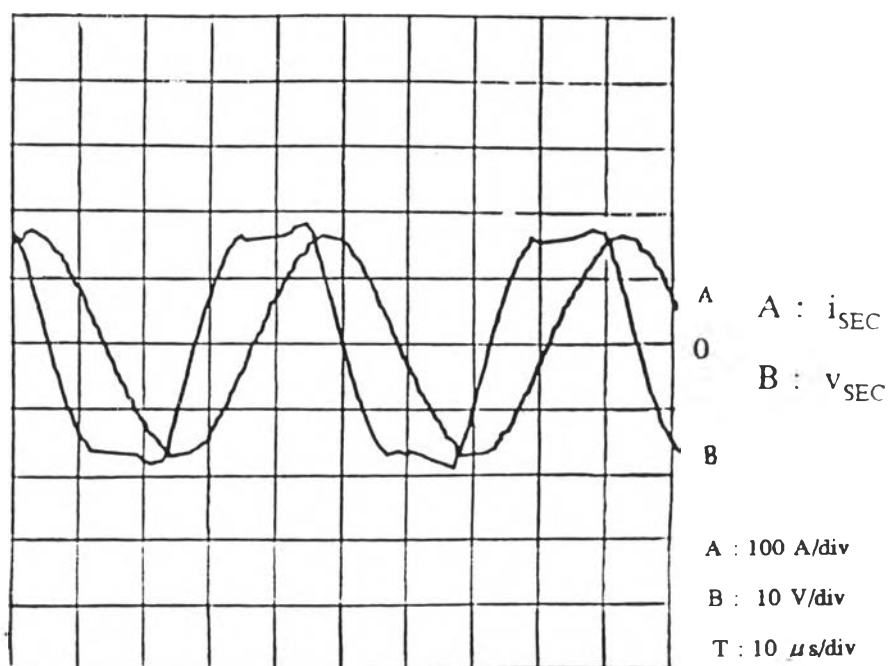
รูปที่ 4.15 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันค้ำปฐมภูมิของหม้อแปลง  
ลดระดับแรงดัน ที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 4.16 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันค้ำทุติยภูมิของหม้อแปลง  
ลดระดับแรงดันที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 4.17 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง  
 ลดระดับแรงดันที่ความถี่ 21 กิโลเฮิรตซ์



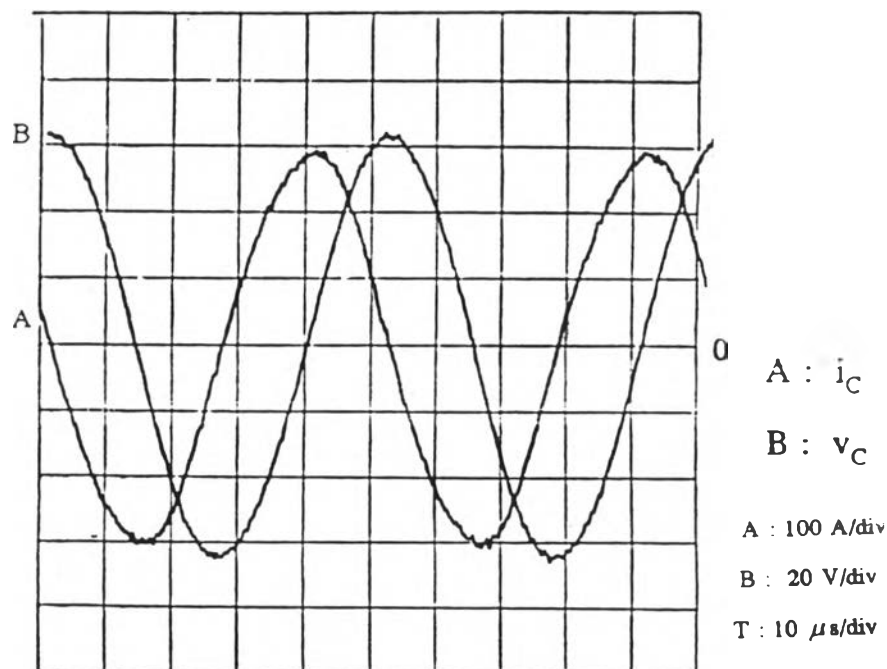
รูปที่ 4.18 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง  
 ลดระดับแรงดันที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์

#### 1.4 รูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงลดระดับแรงดัน

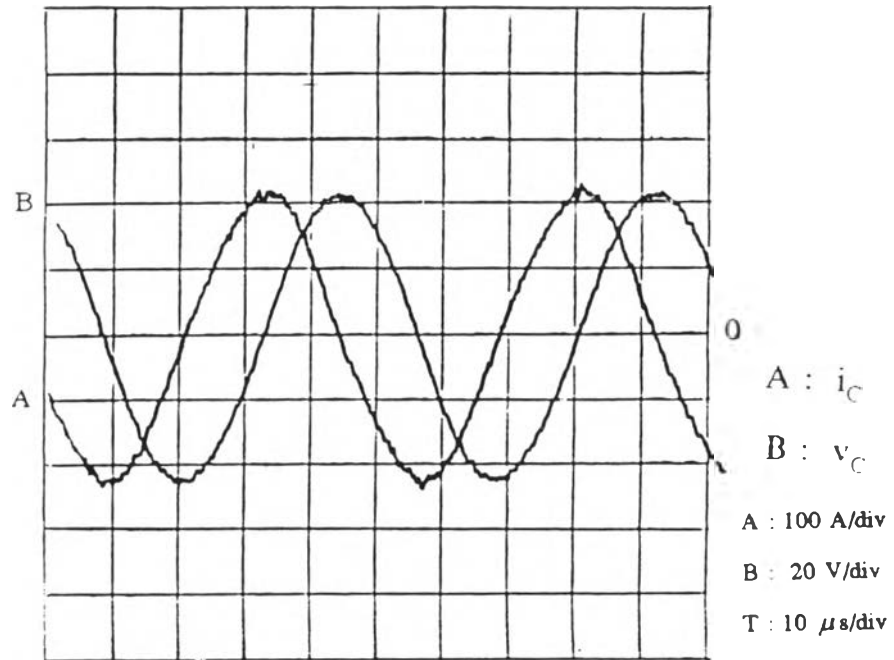
รูปที่ 4.16 - 4.18 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงลดระดับแรงดันที่ความถี่ 19.5 ,21, 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ กระแสออกของหม้อแปลงจะมีรูปคลื่นเป็นไซน์ ส่วนแรงดันออกมีลักษณะเป็นผลบวกของแรงดันคล้ายรูปคลื่นสี่เหลี่ยมกับแรงดันไซน์ที่เป็นแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำร้วไหลของหม้อแปลงเนื่องจากกระแสออกของหม้อแปลงที่มีรูปคลื่นเป็นไซน์ รูปคลื่นทั้งกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิที่ได้จากการวัดมีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ห้วงจรด้วยคอมพิวเตอร์ในรูปที่ 3.27

#### 1.5 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง

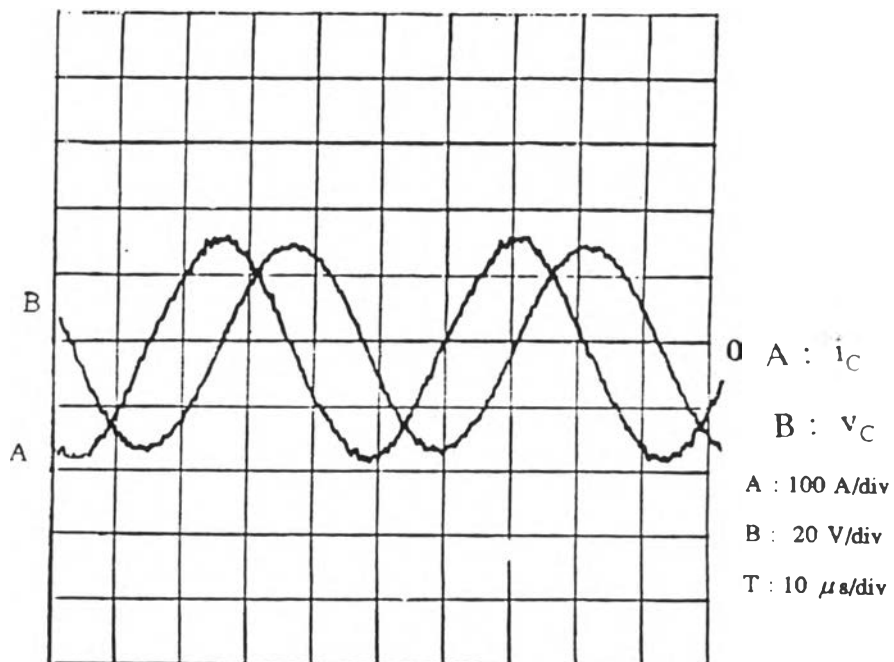
รูปที่ 4.19 - 4.21 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของโหลดที่ความถี่ 19.5 ,21, 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่ใช้ในการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังซึ่งต่ออนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำคือกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งมีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์ ทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์ โดยแรงดันจะมีเฟสล่าหลังกระแสประมาณ 90 องศา รูปคลื่นของกระแสและแรงดันจะมีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ห้วงจรด้วยคอมพิวเตอร์ในรูปที่ 3 20



รูปที่ 4.19 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิร์ตซ์



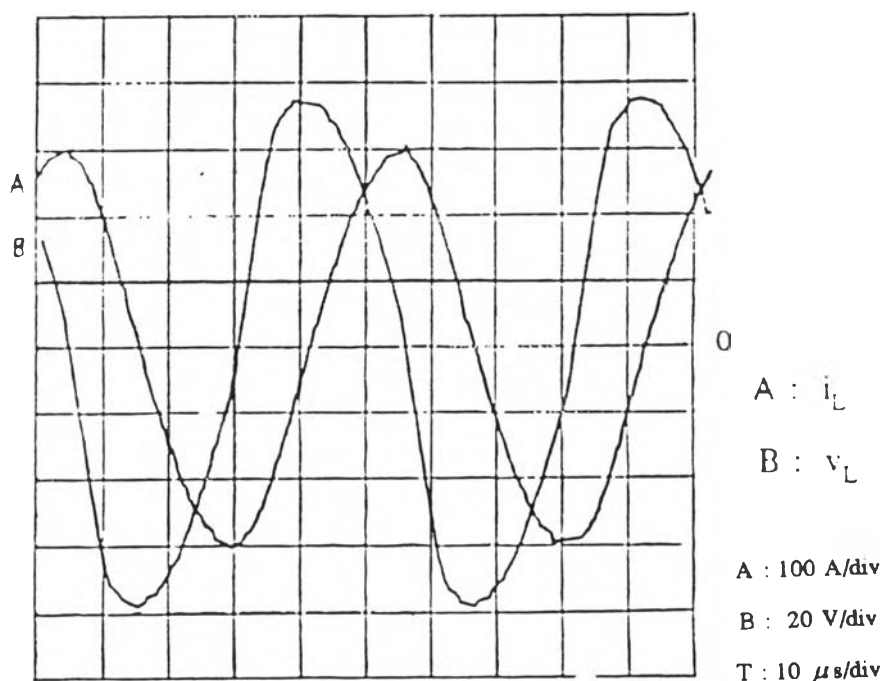
รูปที่ 4.20 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการ  
เพิ่มค่าตัวประกอบกำลังที่ความถี่ 21 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 4.21 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการ  
เพิ่มค่าตัวประกอบกำลังที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์

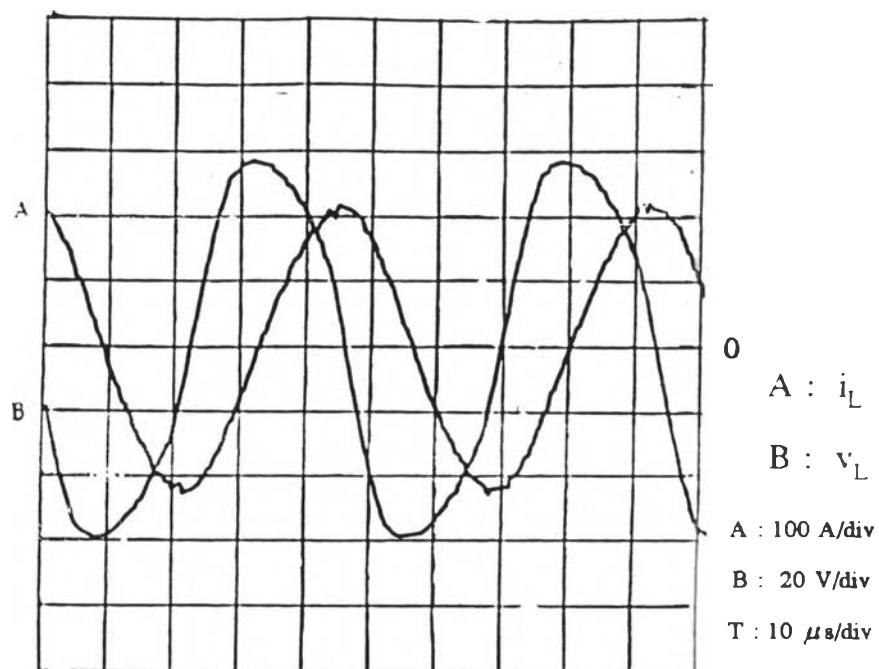
### 1.5 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของขดลวดเหนี่ยวนำ

รูปที่ 4.22 - 4.24 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของขดลวดเหนี่ยวนำที่มีลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร เป็นชิ้นงาน ที่ความถี่ 19.5 ,21, 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ จากการที่วงจรสมมูลของโหลดเป็นตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำจะทำให้ harmonic ของกระแสลดลง กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำจึงมีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์ รูปคลื่นของกระแสและแรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำมีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์ในรูปที่ 3.19

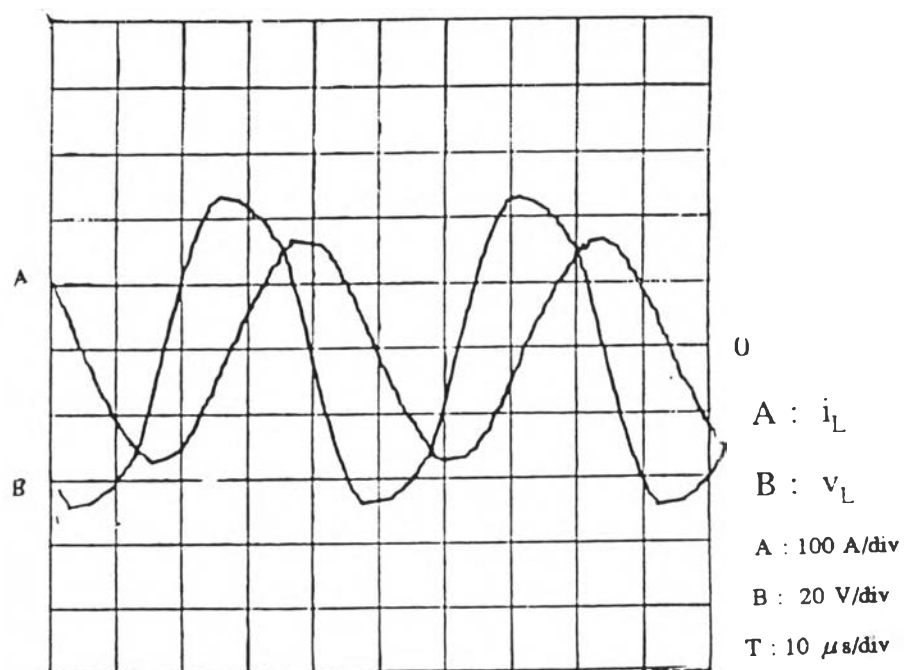


รูปที่ 4.22 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของขดลวดเหนี่ยวนำที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิร์ตซ์





รูปที่ 4.23 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของขดลวดเหนี่ยวนำที่ความถี่ 21 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 4.24 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของขดลวดเหนี่ยวนำที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์

2 การวัดค่ากำลังปรากฏ กำลังจริง ตัวประกอบกำลัง ประสิทธิภาพที่จุดต่างๆของเครื่อง

2.1 การวัดกำลังปรากฏ กำลังจริง และตัวประกอบกำลังด้านขาเข้า

ในการวัดเพื่อคำนวณหาค่าต่าง ๆ จะใช้ Digital Storage Oscilloscope วัดรูปคลื่นของแรงดันและกระแสขาเข้าของเครื่องแต่ละเฟส แล้วคำนวณหาค่ากำลังปรากฏด้านขาเข้ารวม กำลังจริงด้านขาเข้ารวมและค่าเฉลี่ยของตัวประกอบกำลังด้านขาเข้าที่ความถี่ต่าง ๆ ได้จากสูตร 4.1 และ 4.2 แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งการคำนวณโดยใช้เครื่องมือวัดนี้ จะต้องมีแฟกเตอร์มาคูณเพื่อปรับค่าที่คำนวณให้ถูกต้องตามอัตราส่วนของโพรบที่ใช้วัด

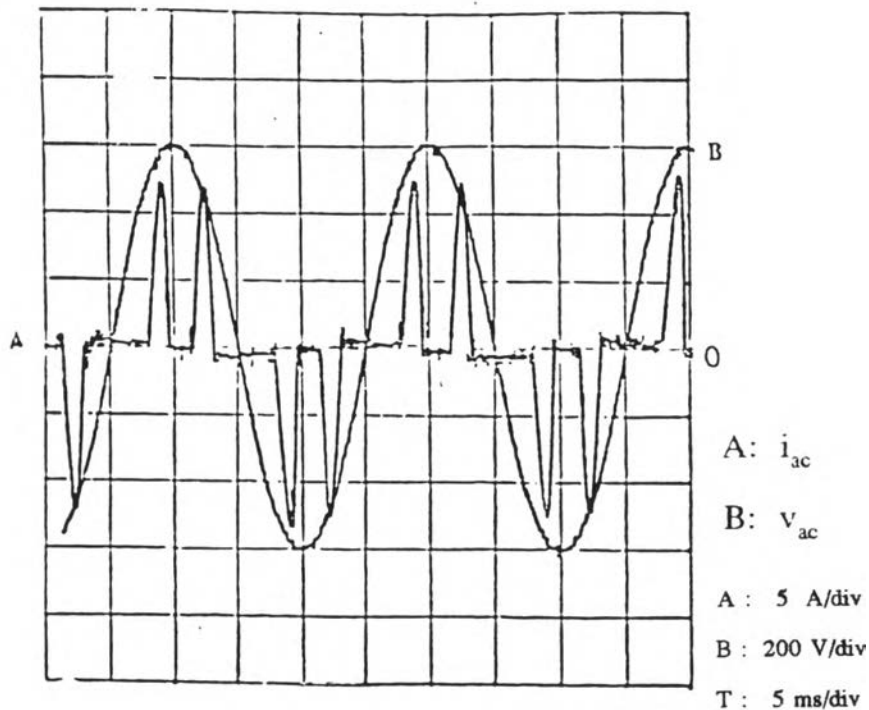
$$VA = (V_{AC} I_{AC}) \tag{4.1}$$

โดยที่  $V_{AC}$  คือ แรงดันอาร์เอ็มเอสด้านขาเข้า

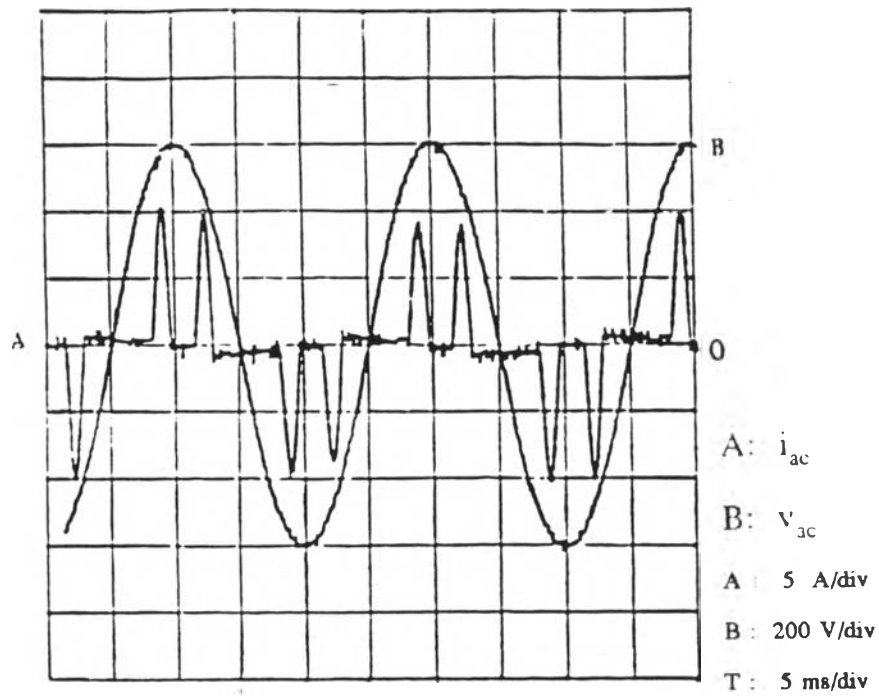
$I_{AC}$  คือ กระแสอาร์เอ็มเอสด้านขาเข้า

$$P_{IV} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T (i_{ac}(t)v_{ac}(t))dt \right] \tag{4.2}$$

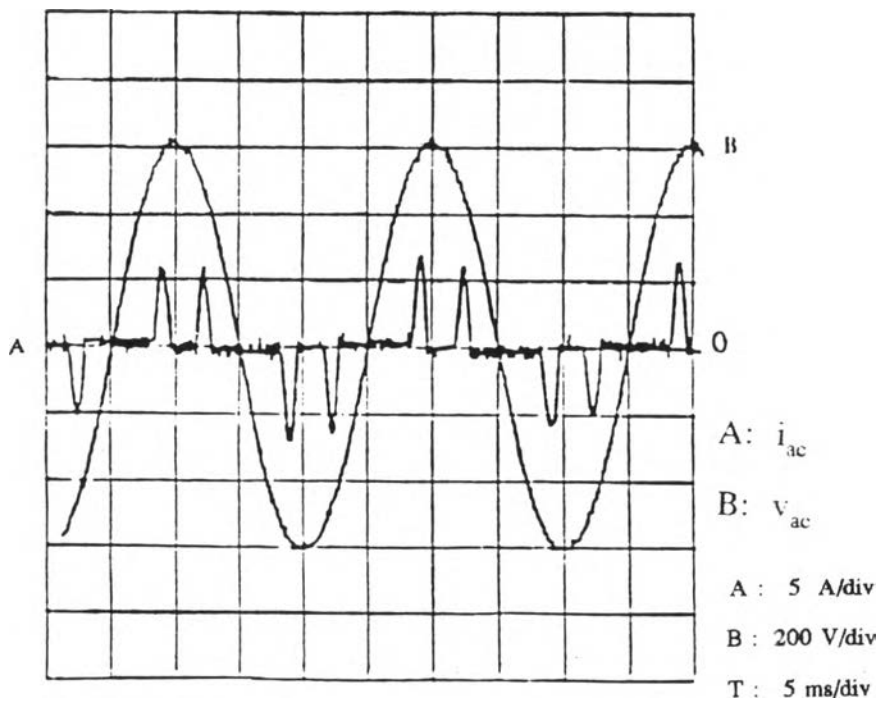
รูปที่ 4.25 - 4.27 แสดงรูปคลื่นของแรงดัน  $v_{ac}$  และกระแสไฟสลับ  $i_{ac}$  ที่ใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังต่าง ๆ และค่าตัวประกอบกำลังเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ 19.5 ,21, 22.5 กิโลเฮิรตซ์



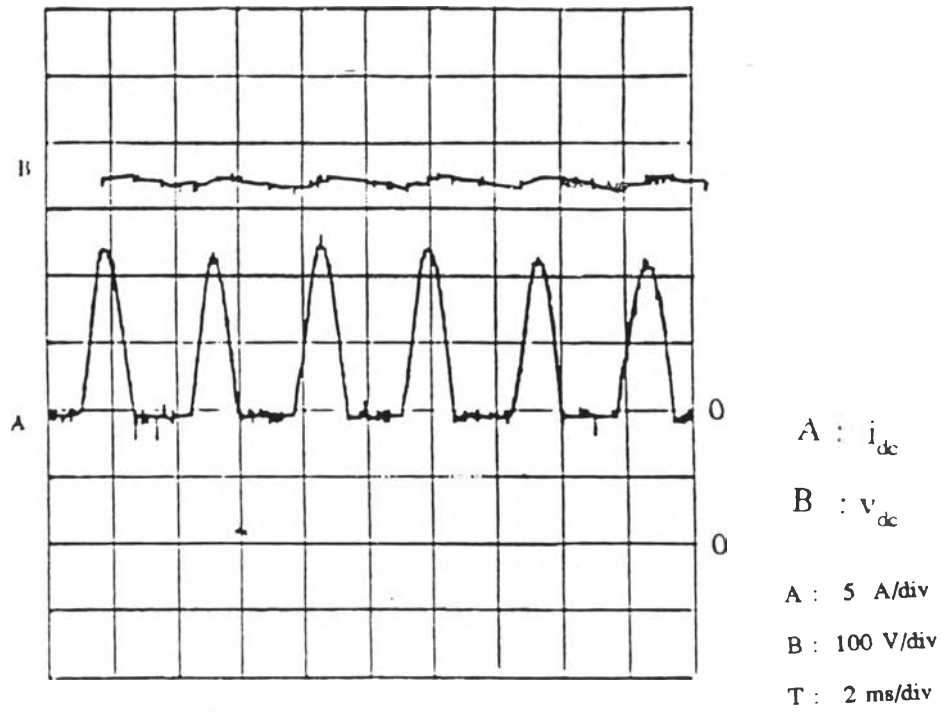
รูปที่ 4.25 แสดงรูปคลื่นของแรงดันไฟสลับ  $v_{ac}$  และกระแสไฟสลับ  $i_{ac}$  เฟส R เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์



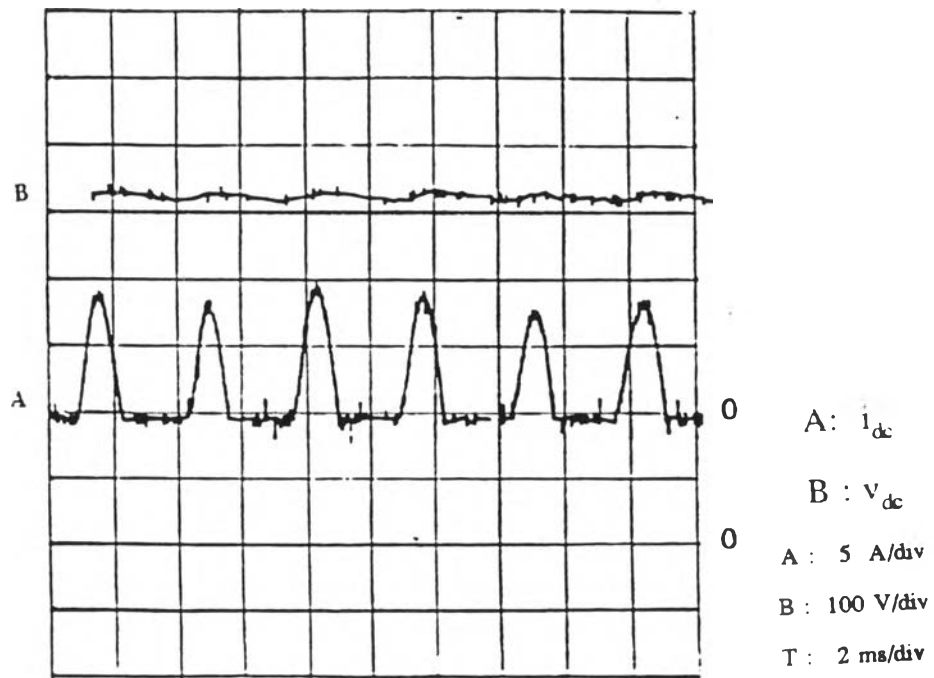
รูปที่ 4.26 แสดงรูปคลื่นของแรงดันไฟสลับ  $v_{ac}$  และกระแสไฟสลับ  $i_{ac}$  เฟส R  
เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ 21 กิโลเฮิรตซ์



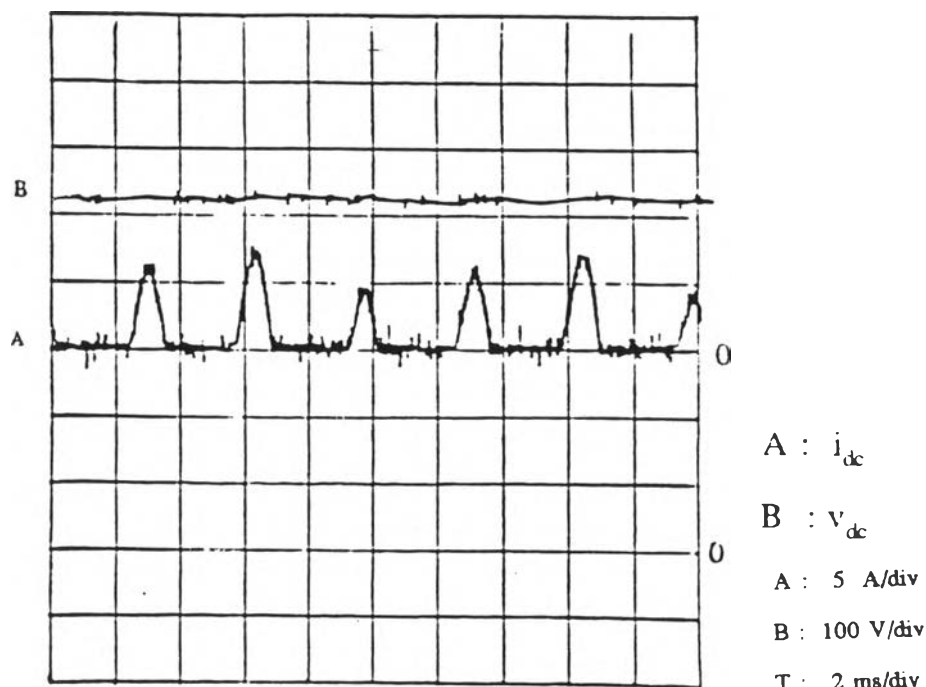
รูปที่ 4.27 แสดงรูปคลื่นของแรงดันไฟสลับ  $v_{ac}$  และกระแสไฟสลับ  $i_{ac}$  เฟส R  
เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 4.28 แสดงรูปคลื่นของแรงดันไฟตรง  $v_{dc}$  และกระแสไฟตรง  $i_{dc}$  เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 4.29 แสดงรูปคลื่นของแรงดันไฟตรง  $v_{dc}$  และกระแสไฟตรง  $i_{dc}$  เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ 21 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 4.30 แสดงรูปคลื่นของกระแสแรงดันไฟตรง  $v_{dc}$  และกระแสไฟตรง  $i_{dc}$  เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์

ตารางที่ 4.1 แสดงค่ากำลังปรากฏ กำลังเฉลี่ยและตัวประกอบกำลังด้านเข้าของเครื่อง

ความถี่ (kHz)	$VA_{IN}$ เฟส R	$VA_{IN}$ เฟส S	$VA_{IN}$ เฟส T	$VA_{total}$ (VA)	$P_{in}$ เฟส R	$P_{in}$ เฟส S	$P_{in}$ เฟส T	$P_{total}$ (watts)	PF
19.5	1210	1207	1214	3631	797	795	801	2393	0.66
21	790	785	797	2372	441	435	443	1321	0.56
22.5	479	477	483	1437	240	239	245	724	0.5

จากตารางที่ 4.1 เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจาก 19.5 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็น 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ จะเห็นว่า กำลังจริงด้านเข้าจะลดลงจาก 2,393 วัตต์ เป็น 724 วัตต์ ส่วนค่าตัวประกอบกำลังจะลดลงจาก 0.6 ลงมาเหลือ 0.5 ดังนั้น ในการเพิ่มความถี่ขึ้นไป 3 กิโลเฮิร์ตซ์ สามารถลดกำลังจริงด้านขาเข้าได้ประมาณ 3.3 เท่า

2.2 การวัดกำลังออกและประสิทธิภาพเฉพาะของวงจรเรียงกระแสที่ไม่รวมตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

รูปที่ 4.28 - 4.30 แสดงรูปคลื่นของแรงดันไฟตรง  $v_{dc}$  และกระแสไฟตรง  $i_{dc}$  ที่ใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังออก และประสิทธิภาพของวงจรเรียงกระแส โดยใช้สูตรที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ การแทนค่าจะต้องคูณด้วยแฟกเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อปรับค่าที่คำนวณให้ถูกต้องตามอัตราส่วนของโพรบที่ใช้วัด ค่ากำลังออกและประสิทธิภาพของวงจรเรียงกระแสที่ความถี่ 19.5, 21, 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

กำลังออกของวงจรเรียงกระแสได้จากผลคูณของค่าเฉลี่ยของกระแสและแรงดันของวงจรเรียงกระแส ประสิทธิภาพของวงจรเรียงกระแสเท่ากับอัตราส่วนของกำลังออกจากวงจรเรียงกระแสต่อกำลังด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส

$$P_{DC} = V_{DC} I_{DC} \tag{4.3}$$

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_{in}} \tag{4.4}$$

โดยที่  $V_{DC}$  คือ แรงดันเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแส  
 $I_{DC}$  คือ กระแสเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแส

ตารางที่ 4.2 แสดงค่ากำลังออกและประสิทธิภาพของวงจรเรียงกระแส

ความถี่ (kHz)	$V_{DC}$ (Volt)	$I_{DC}$ (A)	กำลังเฉลี่ย (W)	$\eta$ (%)
19.5	530	4.44	2353	98.3
21	530	2.45	1299	98.3
22.5	530	1.34	710	98.1

จากตารางที่ 4.2 เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจาก 19.5 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็น 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ จะเห็นได้ว่า กำลังออกจะลดลงจาก 2,353 วัตต์ เป็น 710 วัตต์ โดยที่ประสิทธิภาพของวงจรเรียงกระแสมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก คือมีค่าประมาณ 98.3 เปอร์เซ็นต์

2.3 การวัดกำลังปรากฏ กำลังออก ตัวประกอบกำลัง ประสิทธิภาพที่จุดต่าง ๆ ของเครื่อง การวัดกำลังปรากฏของวงจรอินเวอร์เตอร์ ได้จากการวัดรูปคลื่นของกระแสและแรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ และหาค่ากระแสอาร์เอ็มเอสและแรงดันอาร์เอ็มเอสแล้วมาคำนวณได้จากสูตร

$$VA = I_p V_p \quad (4.5)$$

โดยที่  $I_p$  คือ กระแสค้ำานปฐมภูมิของหม้อแปลงซึ่งเป็นกระแสอกของอินเวอร์เตอร์  
 $V_p$  คือ แรงค้ำานปฐมภูมิของหม้อแปลงซึ่งเป็นแรงค้ำานอกของอินเวอร์เตอร์  
 ค้ำานอกของอินเวอร์เตอร์ซึ่งคือค้ำานค้ำานเข้าของหม้อแปลงแยกโคคความถี่สูงได้จก  
 การอินทิเกรตรูปค้ำานของผลคูณกระแสและแรงค้ำานอกของอินเวอร์เตอร์ในช่วงหนึ่งคาบเวลา  
 ซึ่งคือกรอินทิเกรตรูปค้ำานกระแสและแรงค้ำานปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงในช่วงหนึ่ง  
 คาบเวลาดังสมการ 4.6

$$P_{PRI} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T (i_p(t)v_p(t))dt \right] \quad (4.6)$$

การหาค่าตัวประกอบค้ำานของโคคของวงจกรอินเวอร์เตอร์ ได้จกอัตราส่วนของค้ำาน  
 ออกต่อค้ำานปรากฏของวงจกรอินเวอร์เตอร์

$$PF = \frac{P_{PRI}}{VA}$$

การหาค่าประสิทธิภาพของวงจกรอินเวอร์เตอร์จกสูตร

$$\eta_{inverter} = \frac{P_{PRI}}{P_{DC}} \quad (4.7)$$

ค้ำานอกของหม้อแปลงแยกโคคความถี่สูงได้จกการอินทิเกรตรูปค้ำานของผลคูณ  
 กระแสและแรงค้ำานทุติยภูมิในช่วงหนึ่งคาบเวลา

$$P_{SEC} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T (i_s(t)v_s(t))dt \right] \quad (4.8)$$

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงความถี่สูงคำนวณจก

$$\eta_{TX} = \frac{P_{PRI}}{P_{SEC}} \quad (4.9)$$

ตารางที่ 4.3 แสดงค้ำานปรากฏ ค้ำานอก ค่าตัวประกอบค้ำาน ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์  
 ค้ำานอกและประสิทธิภาพของหม้อแปลงความถี่สูง

ความถี่ (kHz)	$VA_{inverter}$	$P_{PRI}$ (watts)	$P_{SEC}$ (watts)	PF	$\eta_{inverter}$ (%)	$\eta_{TX}$ (%)
19.5	4192	2237	2042	0.53	95	91
21	3061	1231	1125	0.4	95	91
22.5	2469	675	615	0.27	95	91

ค่าตัวประกอบกำลังของโหลด จะมีค่าลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตาม การวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์ ที่กำลังออกสูงสุด ประสิทธิภาพรวมของวงจรอินเวอร์เตอร์มี ค่าเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพของหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าเท่ากับ 91 เปอร์เซ็นต์

การวัดกำลังออกที่ขึ้นงานนั้น ไม่สามารถวัดกำลังออกได้โดยตรงเนื่องจากไม่มี เครื่องมือวัด ดังนั้นจึงใช้วิธีวัดร่วมกับการคำนวณหาค่ากำลังออกที่ขึ้นงานรวมกับกำลังสูญเสียที่ ขดลวดเหนี่ยวนำ ( $P_{coil+work}$ ) ซึ่งได้จากการอินทิเกรตผลคูณของรูปคลื่นกระแสและแรงดันของขด ลวดเหนี่ยวนำในช่วงหนึ่งคาบจากสูตร

$$P_{coil+work} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T (i_L(t)v_L(t))dt \right] \quad (4.10)$$

$$P_{work} = P_{coil+work} \times \eta_c \quad (4.11)$$

หลังจากนั้นนำค่า  $P_{coil+work}$  ที่ได้มาคูณกับประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำ ( $\eta_c$ ) ซึ่ง หาได้ในบทที่ 2 จะได้ค่ากำลังออกที่ขึ้นงาน ตามสมการที่ 4.11 ผลการคำนวณได้แสดงไว้ใน ตาราง 4.4

การหาลำดับสูญเสียที่ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังซึ่งต่ออนุกรม กับขดลวดเหนี่ยวนำ ได้จาก

$$P_C = P_{SEC} - P_{coil+work} \quad (4.12)$$

การหาประสิทธิภาพรวมของเครื่องได้จากอัตราส่วนของกำลังออกที่ขึ้นงานต่อกำลัง จริงด้านเข้าของเครื่องที่หาได้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.4 แสดงค่ากำลังที่ขึ้นงาน ขดลวดเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง ประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำ และประสิทธิภาพรวมของเครื่อง

ความถี่ (kHz)	$P_{coil+work}$ (watts)	$P_{work}$ (watts)	$P_C$ (watts)	$\eta_{coil}$ (%)	$\eta_{TOTAL}$ (%)
19.5	2001	1281	41	64	54
21	1103	706	22	64	53
22.5	603	386	12	64	53



จากตารางที่ 4.4 เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น กำลังออกที่ชิ้นงานจะมีค่าลดลง คือ ที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลังออกที่ชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 1,281 วัตต์ เมื่อเพิ่มความถี่ขึ้นเป็น 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลังออกที่ชิ้นงานจะลดลงเป็น 325 วัตต์ คิดเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังออกที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิร์ตซ์ ประสิทธิภาพรวมของเครื่องมีค่าเท่ากับ 54 เปอร์เซ็นต์

#### การทดสอบด้านความร้อน

การทดสอบด้านความร้อนจะเป็นการวัดอุณหภูมิของลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร หลังจากเดินเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ความถี่ 19.5, 21, 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 2 - 10 วินาที แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 โดยที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 28 °C

ตาราง 4.5 แสดงค่าอุณหภูมิของลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มม.ที่เวลาต่าง ๆ (°C)

อุณหภูมิของลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มม.ที่เวลาต่าง ๆ (°C)					
ความถี่ (kHz)	2 วินาที	4 วินาที	6 วินาที	8 วินาที	10 วินาที
19.5	62	78	92	102	116
21	43	54	61	70	78
22.5	36	47	54	58	63

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 19.5 kHz อุณหภูมิของลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มม เพิ่มขึ้น 60 °C จากอุณหภูมิห้อง(28 °C) ใช้เวลา 6 วินาที ที่ความถี่ 21 kHz ใช้เวลา 12 วินาที ที่ความถี่ 22.5 kHz ใช้เวลา 15 วินาที ดังนั้น ในการปรับค่าความร้อนที่เกิดขึ้นที่ชิ้นงาน สามารถทำได้โดยการปรับความถี่การทำงานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ