

บทที่ 5

การทดสอบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

ในบทนี้ได้แบ่งการทดสอบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเป็นสองส่วน โดยส่วนแรก คือการทดสอบทางไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยการวัดและบันทึกสัญญาณที่ภาคต่าง ๆ ของเครื่อง โดยเฉพาะในส่วนภาคขับนำเบสและส่วนของภาคกำลังเพื่อศึกษาการทำงานของวงจรและวัดค่าที่สำคัญต่าง ๆ ของระบบเช่น กำลังด้านเข้า กำลังที่ขึ้นงาน ตัวประกอบกำลังและประสิทธิภาพของระบบ เป็นต้น สำหรับในส่วนที่สอง เป็นการทดสอบทางโลหวิทยาโดยการนำชิ้นงานที่เป็นเหล็กผสมคาร์บอนที่มีส่วนประกอบของโลหะแตกต่างกันมาทดสอบการชุบแข็งผิว และวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่ระยะจากผิวต่าง ๆ ของชิ้นงาน รวมทั้งถ่ายรูปโครงสร้างของโลหะทั้งก่อนและหลังการชุบแข็งมาเปรียบเทียบกัน

5.1 การทดสอบทางไฟฟ้า

การพัฒนาเครื่องต้นแบบนี้ได้ใช้หม้อแปลง 3 เฟสปรับค่าได้ (Variac) ในการปรับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส เพื่อทดสอบการทำงานของวงจรกำลังในการทดสอบตอนแรกเมื่อปรับระดับแรงดันด้านเข้าให้เต็มที่ ($380 V_{line}$) และให้วงจรขับนำเบสทำงานที่ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ จะวัดกำลังเฉลี่ยสูงสุดทางด้านเข้าได้ ประมาณ 11 กิโลวัตต์ หรือวัดกำลังปรากฏสูงสุด ทางด้านเข้าได้ประมาณ 16 กิโลวัตต์แอมป์ แต่การทำงานของวงจรที่สภาวะนี้ จะทำให้เกิดความเครียด ที่ตัวทรานซิสเตอร์ที่เป็นสวิทช์ในวงจรมาก เพราะที่กำลังปรากฏด้านเข้าประมาณ 16 กิโลวัตต์แอมป์ ค่ายอดของกระแสผ่านกระแสจะสูงประมาณ 55 แอมป์ ในขณะที่สวิทช์ต้องทำงานที่ความถี่สูงถึง 50 กิโลเฮิรตซ์ ทำให้วงจรขับนำเบสต้องดึงกระแสเบสลบ ที่เร็วและเป็นปริมาณมาก (นอกจากรอยต่อเบสอิมิตเตอร์เพื่อ Turn off สวิทช์ให้ทัน) การทำเช่นนี้จะทำให้พื้นที่ทำงานที่ปลอดภัย ของทรานซิสเตอร์แคบลง จึงยังเป็นการเพิ่มความเครียดให้กับตัวอุปกรณ์มากขึ้น ดังนั้นวงจรที่สภาวะนี้จึงทำงานได้ไม่นาน กล่าวคือเมื่อเพิ่มแรงดันไฟสลับด้านเข้าจนเต็มที่ วงจรจะทำงานได้ประมาณ 5 นาที ทรานซิสเตอร์กำลังที่เป็นสวิทช์จะระเบิดและระเบิดเพียงกิ่งเดียวโดยที่วงจรป้องกันไม่สามารถทำงานได้ทัน ดังนั้นจึงพยายามลดความเครียดที่ตัวทรานซิสเตอร์ด้วยวิธีดึงกระแสเบสลบ ให้ช้า

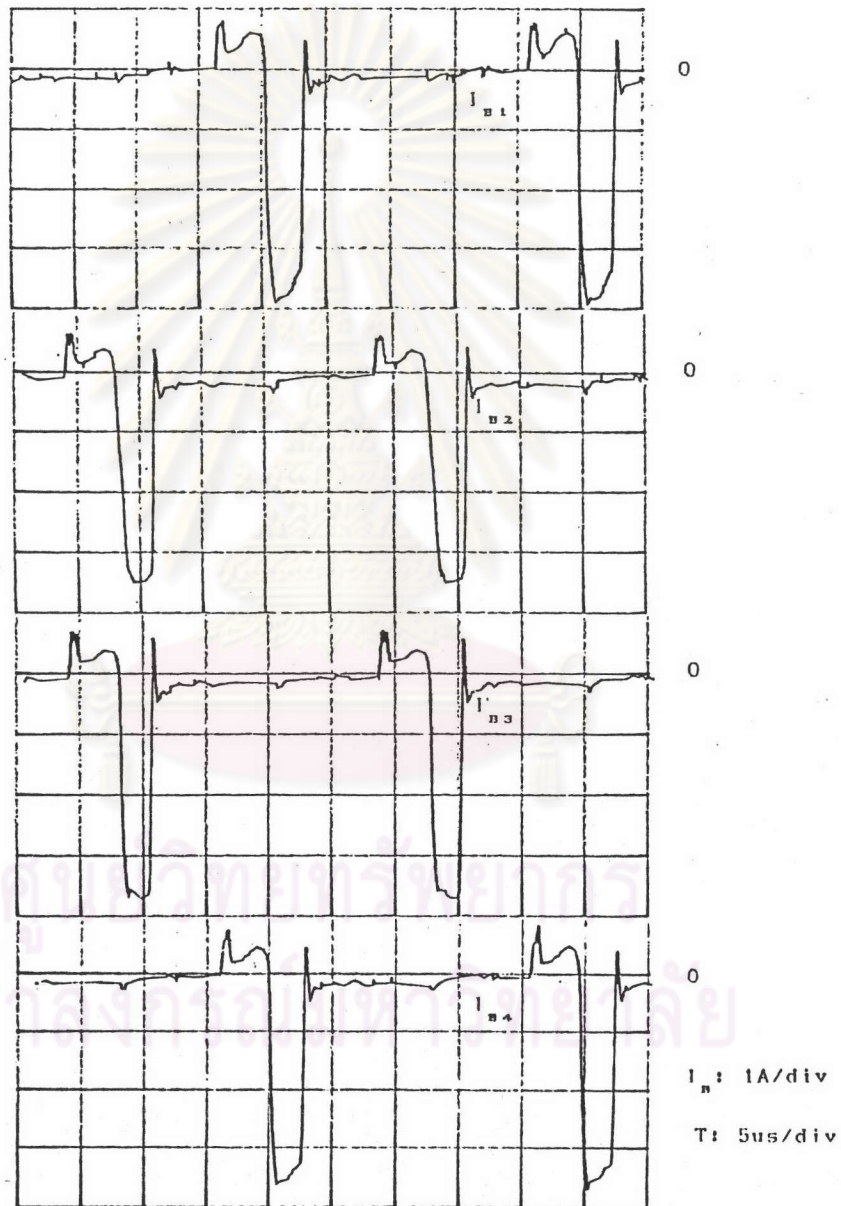
และน้อยลงพร้อมกับปรับปริมาณกระแสผ่านสวิตช์ลดลงทีละขั้น เพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ วงจรทำงานได้ทนทานมากขึ้น โดยการลดความถี่ของการขับนำสวิตช์และลดกำลังด้านเอาต์พุต ตามลำดับ จนในที่สุดกำหนดให้ด้านเข้าสูงสุดเป็น 12 กิโลวัตต์แอมป์ นอกจากนี้ปัญหาทางด้าน ความเครียดที่ตัวทรานซิสเตอร์แล้วการทำงานที่ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่ใกล้จุด เปลี่ยนของเฟส (จาก Phase lag ไปเป็น Phase lead) เพราะฉะนั้น เพื่อความปลอดภัย จึงต้องลดความถี่ลงเพื่อให้แน่ใจว่าวงจรทำงานในสภาวะ Phase lag ตลอดเวลา กล่าวโดย สรุปลแล้ว การทดลองนี้จึงทดสอบที่ความถี่ 40 กิโลเฮิรตซ์

ในการบันทึกรูปสัญญาณที่ภาคต่าง ๆ ของเครื่องเราไม่สามารถวัดสัญญาณเพื่อเปรียบเทียบพร้อมกันที่หลาย ๆ สัญญาณได้ เนื่องจากข้อจำกัดทางเครื่องมือวัดที่สามารถวัดได้ พร้อมกันเพียงครั้งละ 2 ช่อง และแต่ละช่องก็ไม่ได้แยกโดดจากกันอย่างอิสระ จึงได้ใช้วิธีวัด ในแต่ละครั้งโดยการเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ใช้โพรบกระแส ซึ่งจะช่วยให้ช่องทั้งสองของ ออสซิลโลสโคปแยกโดดจากกัน และใช้สัญญาณนี้เป็นสัญญาณอ้างอิงในการวัดสัญญาณอื่น ๆ เพื่อ จะได้เปรียบเทียบช่วงเวลาในการทำงานของสัญญาณต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้อง ในการทดสอบ ทางใหนี่งจะบันทึกรูปสัญญาณไปที่ละส่วนโดยเรียงเป็นหัวข้อไว้ดังต่อไปนี้

5.1.1 รูปคลื่นสัญญาณขับนำเบส

จากรูปที่ 5.1 แสดงวงจรขับนำเบสแบบคร่าว ๆ ซึ่งประกอบด้วยวงจร สร้างสัญญาณกระแส (Current Oscillator) หม้อแปลง Toroid และส่วนของวงจรขับนำ เบส จากรูปได้แสดงถึงสัญญาณที่สำคัญต่างๆ ที่สามารถวัดได้ซึ่งได้แก่ กระแสที่ขับนำหม้อแปลง (I_{osc}) กระแสเบส (I_B) และแรงดันเบสอิมิตเตอร์ (V_{BE}) ส่วนสัญญาณอื่น ๆ ที่ไม่ สามารถวัดได้ก็เพราะเครื่องมือวัดไปส่งผลกระทบต่อวงจรทำให้วงจรทำงานผิดพลาด และ นอกจากนั้น บางจุดที่ต้องการวัดเครื่องมือวัดยังถูกรบกวนจากวงจรถนไม่สามารถวัดได้ ในที่นี้ ในการวัดเพื่อเปรียบเทียบช่วงเวลาในการทำงาน จะใช้สัญญาณกระแสทางด้านปฐมภูมิ (I_{osc}) ของหม้อแปลง Toroid เป็นตัวอ้างอิงในการวัดสัญญาณอื่น ๆ สำหรับการวัดสัญญาณในที่นี้จะ แบ่งเป็น 2 กรณี คือ เมื่อไม่มีชิ้นงาน (No Load) และกรณีที่มีชิ้นงาน (Full Load) ซึ่งใน

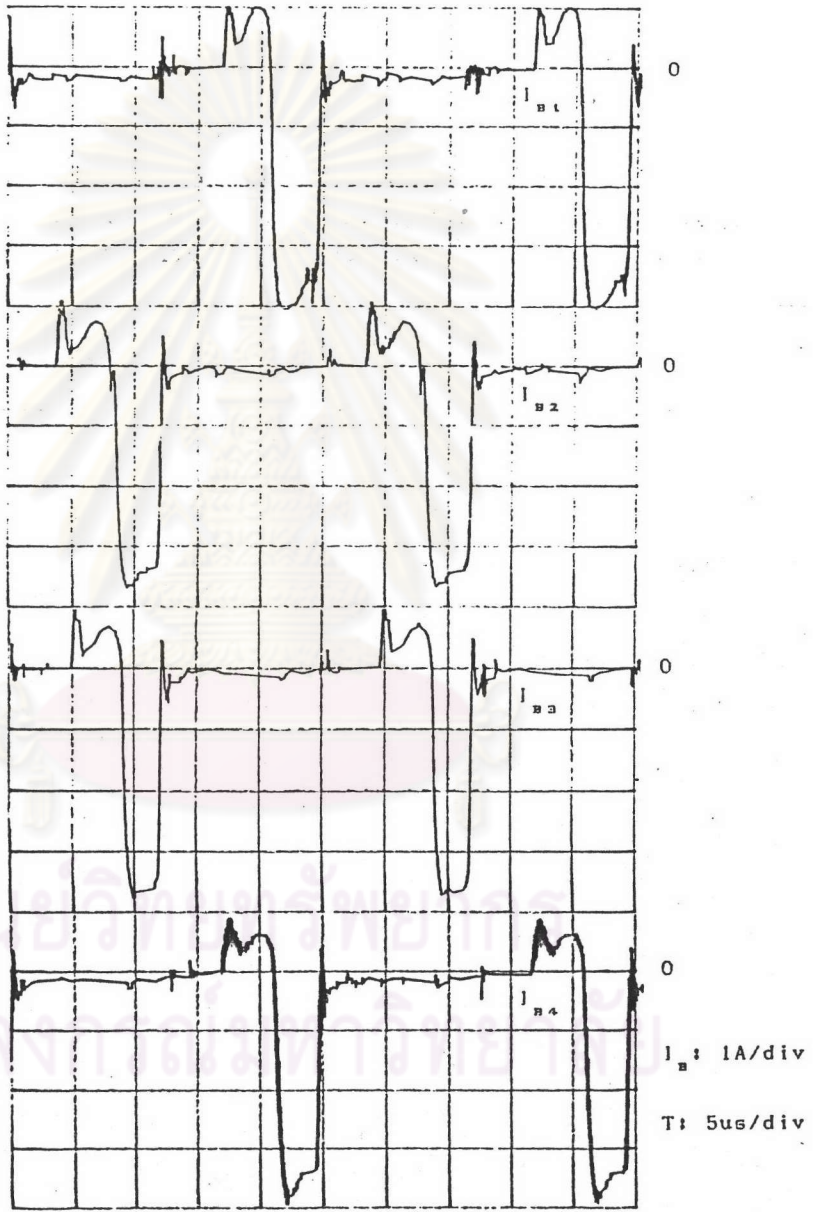
18: 48: 58 93 Feb 26



REG2 A: 200mV + 0mV T: 5us REC DCLF 93-02-26
C2 B: 10mV + 0mV D: + 0DIV / B 18: 48: 51

รูปที่ 5.2 แสดงกระแสเบสที่ขั้วนำทรานซิสเตอร์กำลัง Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4
ในกรณีไม่มีชิ้นงาน

15: 33: 46 93 Feb 28

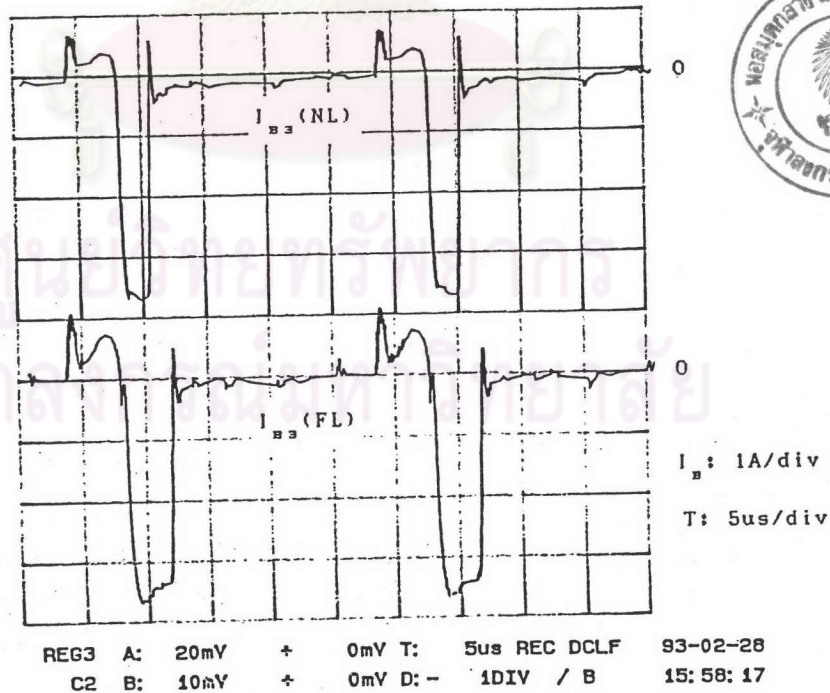


REG1 A: 20mV + 0mV T: 5us REC DCLF 93-02-26
 C2 B: 10mV + 0mV D: + 3DIV \ B 15: 29: 17

รูปที่ 5.3 แสดงกระแสเบสที่ขั้วนำทรานซิสเตอร์กำลัง Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 ในกรณีมีชิ้นงาน

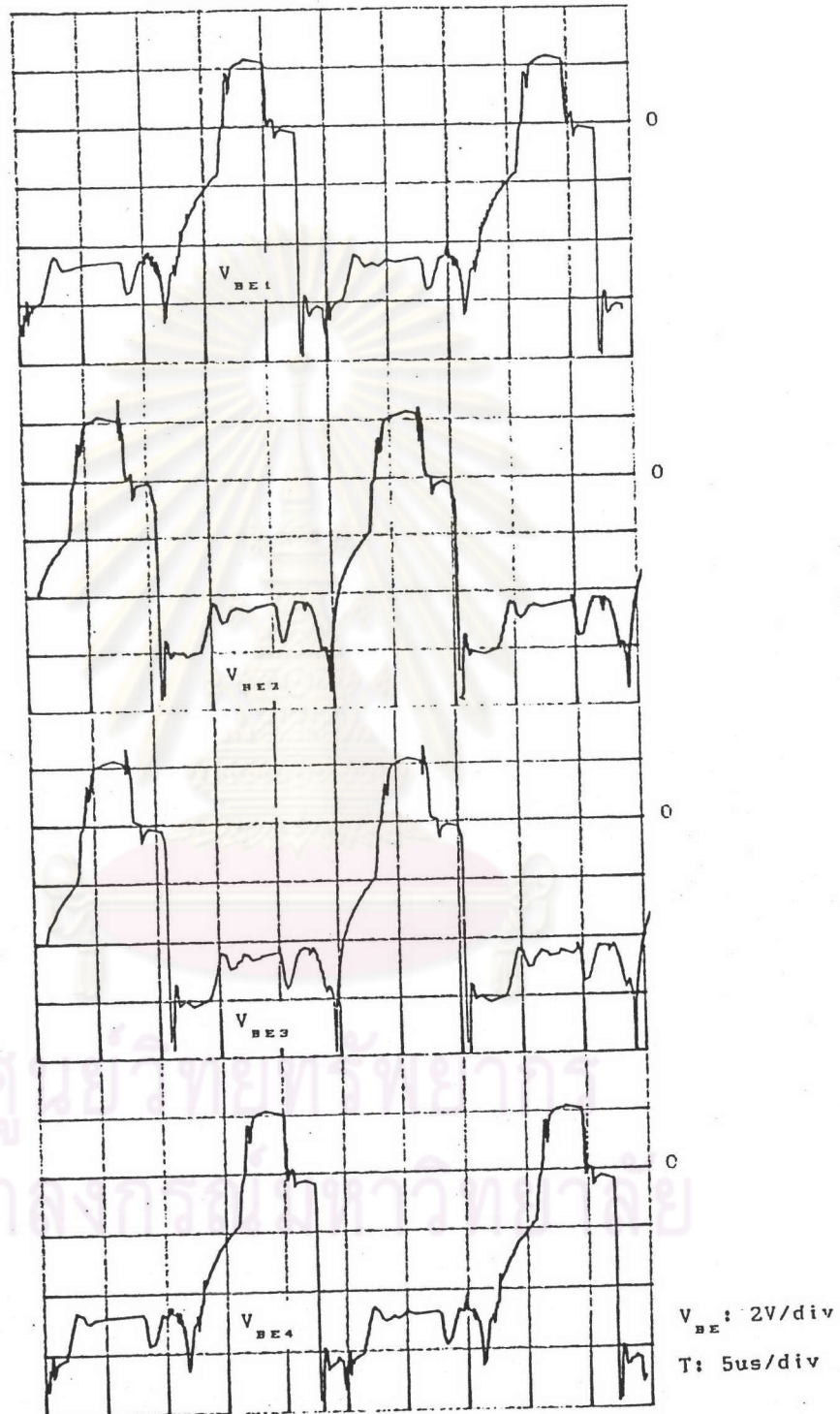
เปลี่ยนไปตามกระแสไหลต ซึ่งจากรูปที่ 5.2 Storage Time นี้มีค่าประมาณ 2-3 ไมโครวินาที และจากรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีไหลต Storage Time จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4-5 ไมโครวินาที ทำให้ช่วงเวลากำหนดกระแสจริง ๆ ของทรานซิสเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 9-10 ไมโครวินาที จากรูปที่ 5.4 ได้แสดงการเปรียบเทียบของกระแสเบสในกรณีไม่มีชิ้นงาน เพื่อให้เห็นช่วงเวลาของ Storage Time ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตได้ว่าค่า Storage Time ที่เป็นส่วนหนึ่งของช่วงเวลากำหนดกระแสของทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีค่าประมาณ 50% ของช่วงเวลานี้ จะส่งผลต่อเสถียรภาพในการนำกระแสของทรานซิสเตอร์ด้วย เพราะว่า Storage Time นี้เปลี่ยนค่าตามกระแสไหลตและ Storage Time ก็เป็นส่วนหนึ่งในการสร้างสัญญาณกำลังจ่ายให้กับไหลต ดังนั้นเมื่อกระแสไหลตมีการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลย้อนกลับมาที่การขับนำสวิตช์โดยผ่านทางค่า Storage Time และถ้าจังหวะของการเปลี่ยนแปลงของไหลต เป็นจังหวะที่ส่งผลในลักษณะที่เสริมกลับมาทางอินพุต ก็จะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ จากการทดลองพบว่าเมื่อขณะไหลตเริ่มแดงซึ่งก็คือขณะที่ชิ้นงานโลหะกำลังเปลี่ยนจากสารแม่เหล็ก (Ferro Magnetic) ไปเป็นสารที่ไม่เป็นแม่เหล็ก (Non-Ferro Magnetic) เอาต์พุตจะแกว่งที่ความถี่ต่ำประมาณ 2 - 5 กิโลเฮิร์ตซ์

15: 59: 37 93 Feb 28



รูปที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบกระแสเบสที่ขับนำทรานซิสเตอร์กำลัง Q_3 ในกรณีไม่มีชิ้นงานและกรณีมีชิ้นงาน

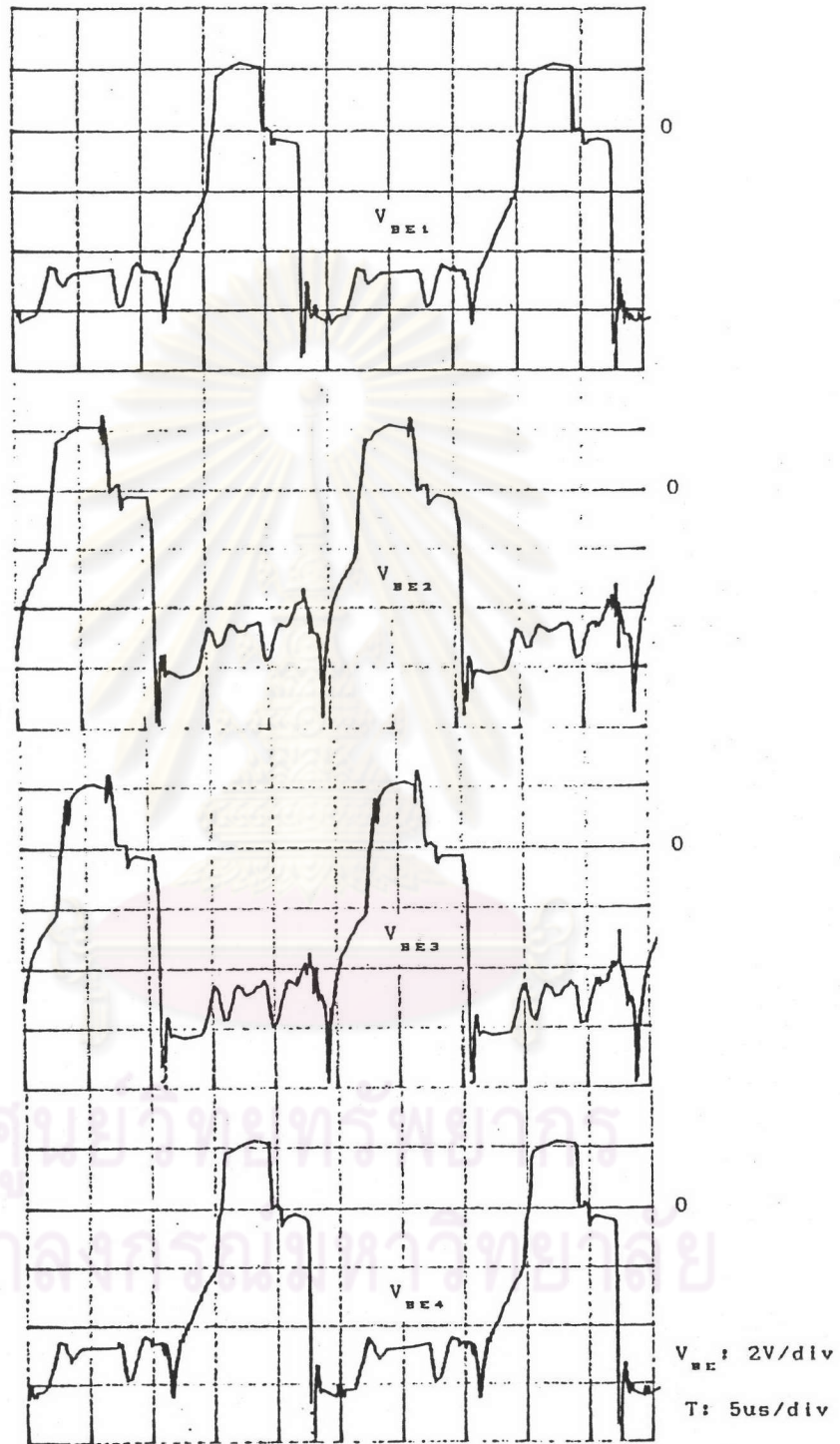
13:32:30 93 Feb 28



RE03 A: 2 V + 0mV T: 5us REC DCLF 93-02-28
 C2 -B: 10mV + 0mV D: + 2DIV \ A 13:30:45

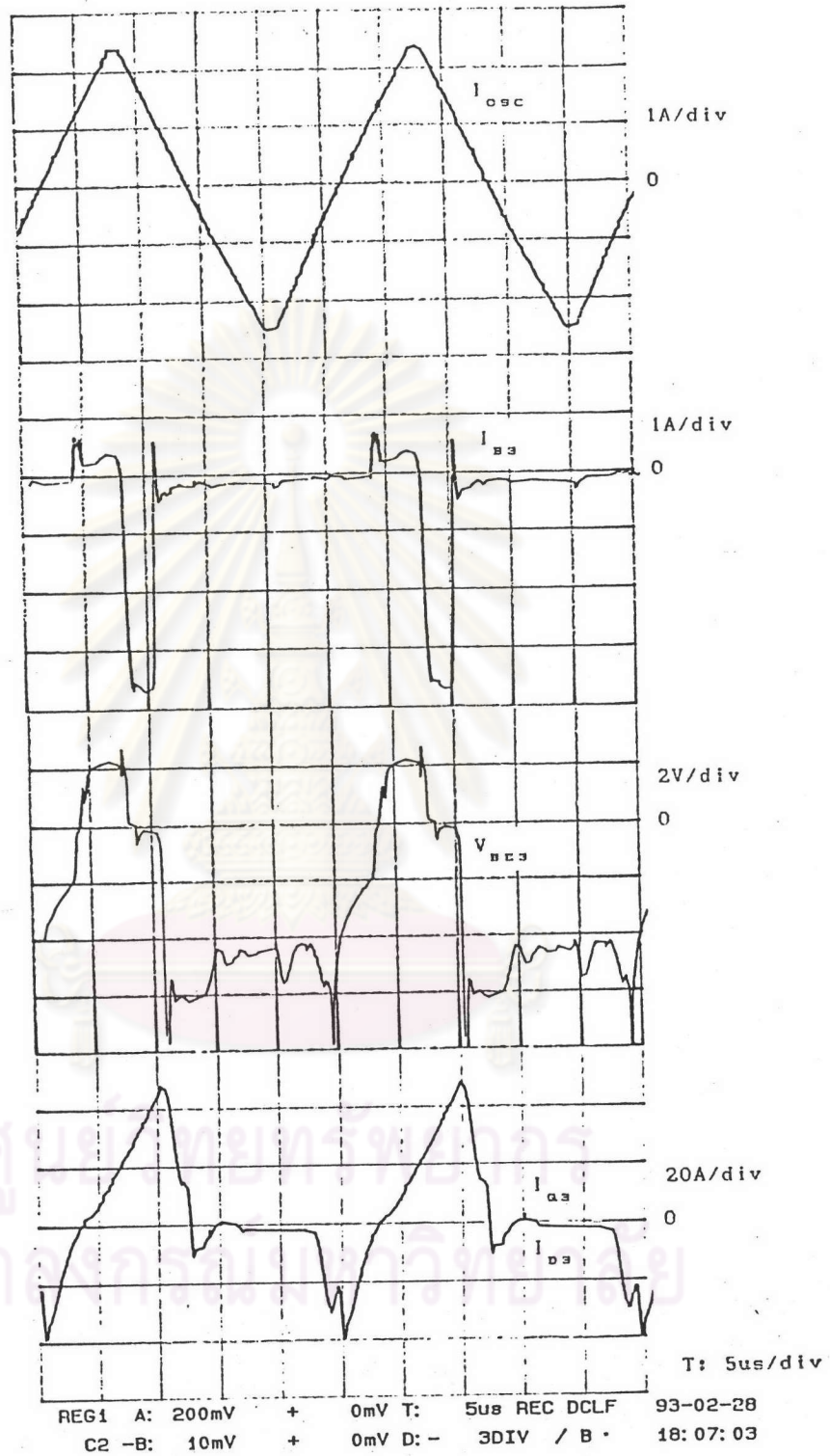
รูปที่ 5.5 แสดงแรงดันที่เบสอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์กำลัง Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 ในกรณีที่ไม่มีชิ้นงาน

15: 12: 19 93 Feb 28



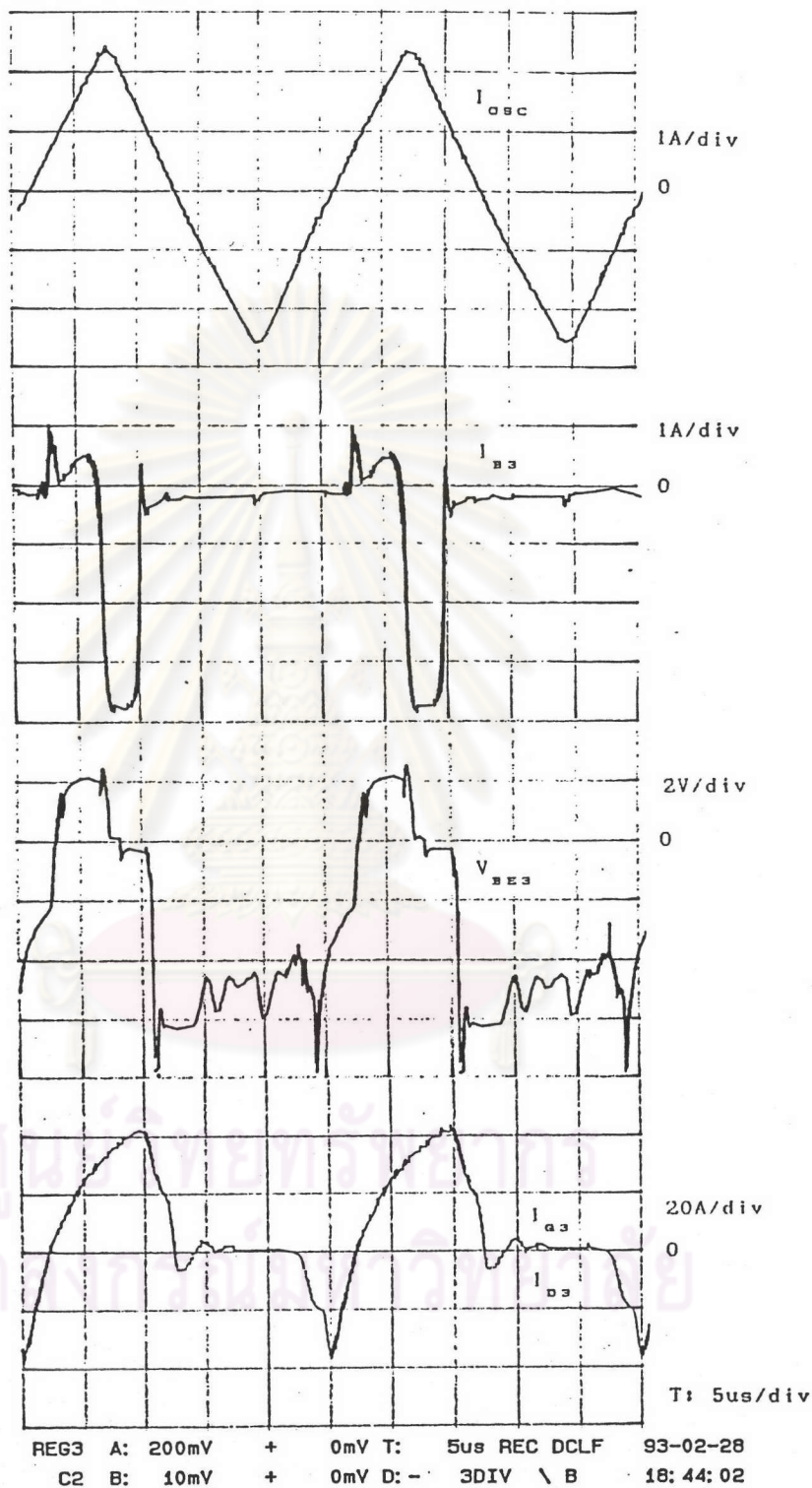
REG3 A: 2 V + 0mV T: 5us REC DCLF 93-02-28
 C2 -B: 10mV + 0mV D: + 1DIV / A 15: 11: 02

รูปที่ 5.6 แสดงแรงดันที่เบสของตัวเก็บประจุของทรานซิสเตอร์กำลัง Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 ในกรณีมีชิ้นงาน



รูปที่ 5.7 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณกระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงชั้บนำเบส กระแสเบส แรงดันเบส-อิมิตเตอร์ และกระแสผ่านทรานซิสเตอร์ ในกรณี ไม่มีโหลด

18: 45: 06 93 Feb 28



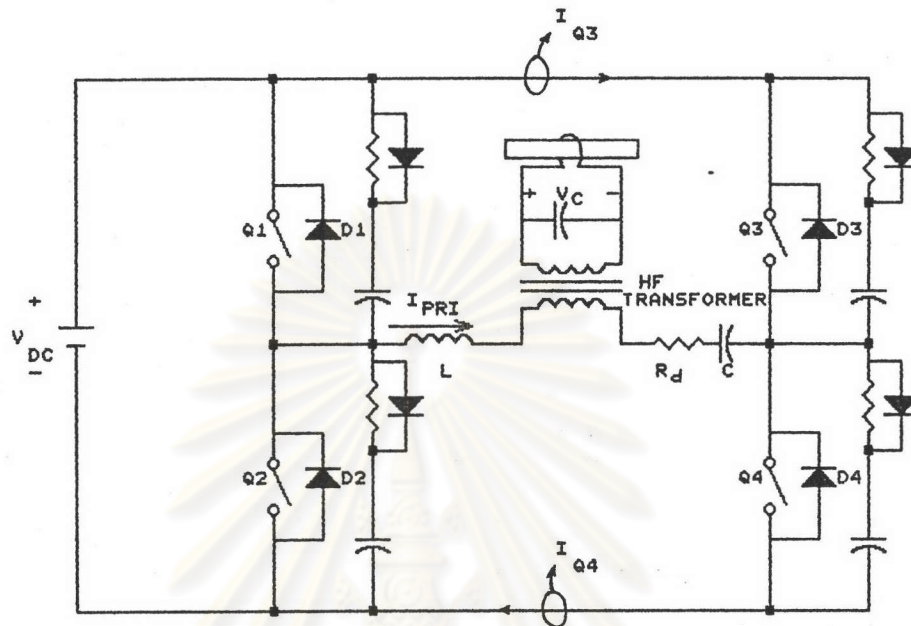
รูปที่ 5.8 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณกระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงขับนำเบส กระแสเบส แรงดันเบส-อิมิตเตอร์ และกระแสผ่านทรานซิสเตอร์ ในกรณีที่มีโหลด

จากรูปที่ 5.5 และ 5.6 แสดงแรงดันที่เบสอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์กำลังทั้ง 4 ตัวซึ่งวัดในกรณีไม่มีชิ้นงาน (No Load) และกรณีมีชิ้นงาน (Full Load) ตามลำดับ โดยนำรูปสัญญาณทั้งสองมาเปรียบเทียบกันเพื่อดูลำดับการทำงานของสวิทช์ ซึ่งจากรูปเมื่อนำมาพิจารณา จะได้ว่าช่วงเวลาที่เราแรงดันเป็นพัลส์บวก คือช่วงเวลาที่เราทรานซิสเตอร์นำกระแสซึ่งประกอบด้วยช่วงเวลาที่สั่งให้น้ำกระแส และช่วง Storage Time รวมกัน ส่วนช่วงเวลาที่แรงดันเป็นพัลส์ลบคือ ช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส ซึ่งจะเห็นว่าแรงดันประมาณ -6 V จ่ายให้กับรอยต่อเบสอิมิตเตอร์ เพื่อช่วยให้ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแสได้ดีขึ้น สำหรับกรณีมีชิ้นงานช่วงเวลาที่แรงดันเป็นพัลส์บวกจะมากขึ้น เนื่องมาจากค่า Storage Time ที่เพิ่มขึ้น และเพื่อให้เข้าใจลำดับการทำงานของวงจรขับนำเบส จึงเปรียบเทียบสัญญาณขับนำเบสซึ่งได้แก่ สัญญาณกระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง กระแสเบส และแรงดันเบสอิมิตเตอร์ กับกระแสผ่านสวิทช์ ไว้ดังรูปที่ 5.7 ในกรณีไม่มีชิ้นงาน และรูปที่ 5.8 สำหรับกรณีมีชิ้นงาน

5.1.2 รูปคลื่นแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลังและกระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลังในการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในภาคกำลัง เราจะแบ่งเงื่อนไขของการวัดเป็น 3 กรณีคือ กรณีไม่มีโหลด (No Load) กรณีมีโหลด (Full Load) และกรณีที่โหลดร้อนแดง ซึ่งหมายถึงตอนที่ชิ้นงานอุณหภูมิสูงเกิดจุดคูร์เป็นผลให้ชิ้นงานเปลี่ยนจาก สารแม่เหล็กไปเป็นสารที่ไม่เป็นแม่เหล็กทั้งนี้เพราะเงื่อนไขของโหลดในแต่ละกรณี จะให้รูปคลื่นของสัญญาณในภาคกำลังที่แตกต่างกันออกไป

ในการวัดแรงดันคร่อมสวิทช์แต่ละตัว จะใช้สัญญาณกระแสที่ผ่านสวิทช์ตัวที่ $3 : I_{Q3}$ (ดูรูปที่ 5.9) เป็นสัญญาณอ้างอิงเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบช่วงเวลาของรูปคลื่นในแต่ละรูปได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ถึงรูปที่ 5.11 (ในกรณีไม่มีโหลด) รูปที่ 5.12 ถึงรูปที่ 5.13 (ในกรณีมีโหลด) และรูปที่ 5.14 ถึงรูปที่ 5.15 (ในกรณีมีโหลดร้อนแดง) จากรูปคลื่นแรงดันคร่อมสวิทช์แต่ละตัว เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการซิมูเลตที่ได้ในหัวข้อที่ 4.2.3 จะเห็นว่ามีความลักษณะและค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะความลาดเอียงของแรงดันขาขึ้นจะมีมากเนื่องจากผลของสแน็พเบอ์แรงดันที่ออกแบบไว้เพื่อให้ค่าของแรงดันในช่วงที่มีการตัดกันของกระแสและแรงดันของสวิทช์ในตอนหยุดนำกระแสมีระดับต่ำ

สำหรับกระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลัง ไม่สามารถวัดได้ครบทุกตัวเพราะสายที่ใช้ต่อระหว่างโมดูลของสวิทช์ต้องมีขนาดที่สั้นที่สุดเพื่อลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำที่จะเกิดขึ้น จึงวัดกระแสผ่านสวิทช์ได้เพียง 2 ค่าคือ I_{Q3} และ I_{Q4} ดังแสดงในรูปที่ 5.16 ถึงรูปที่ 5.17 (ในกรณีไม่มีโหลด) รูปที่ 5.18 ถึงรูปที่ 5.19 (ในกรณีมีโหลด)

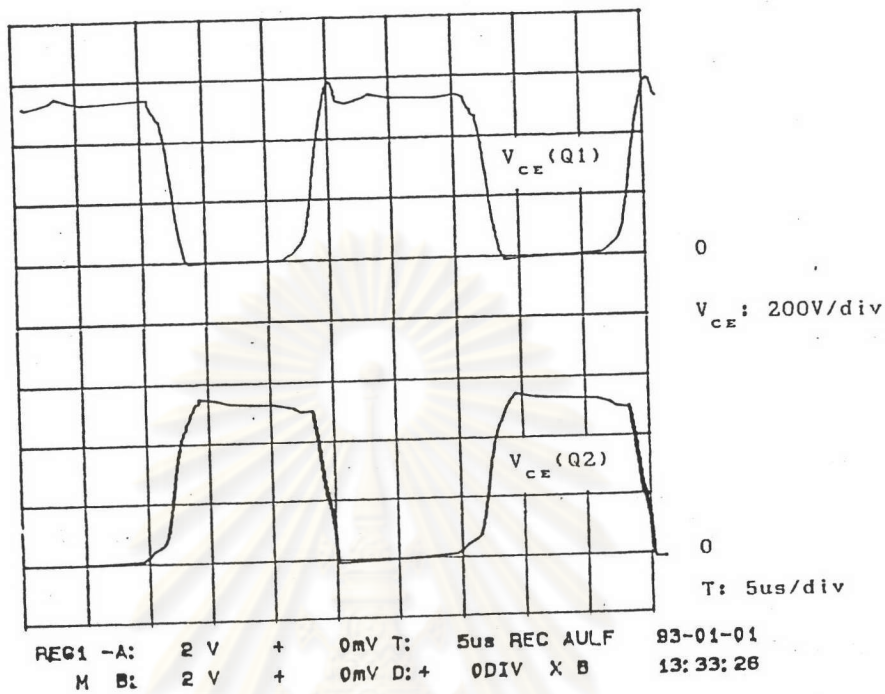


รูปที่ 5.9 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Full Bridge

และในรูปที่ 5.20 ถึงรูปที่ 5.21 (ในกรณีที่โหลดรีอเนตง) นอกจากนั้นกระแสผ่านสวิตช์ที่วัดได้จะเป็นค่าที่รวมกระแสไดโอดที่ขนานกับสวิตช์ และกระแสในวงจรสับเบอ์แรงดันด้วย เพราะไม่สามารถนำโพรบกระแสไปคล้องเพื่อวัดค่ากระแสคอลเลคเตอร์ได้โดยตรง เนื่องจาก การต่อสายระหว่างวงจรสับเบอ์กับตัวทรานซิสเตอร์ต้องมีขานสั้นที่สุด

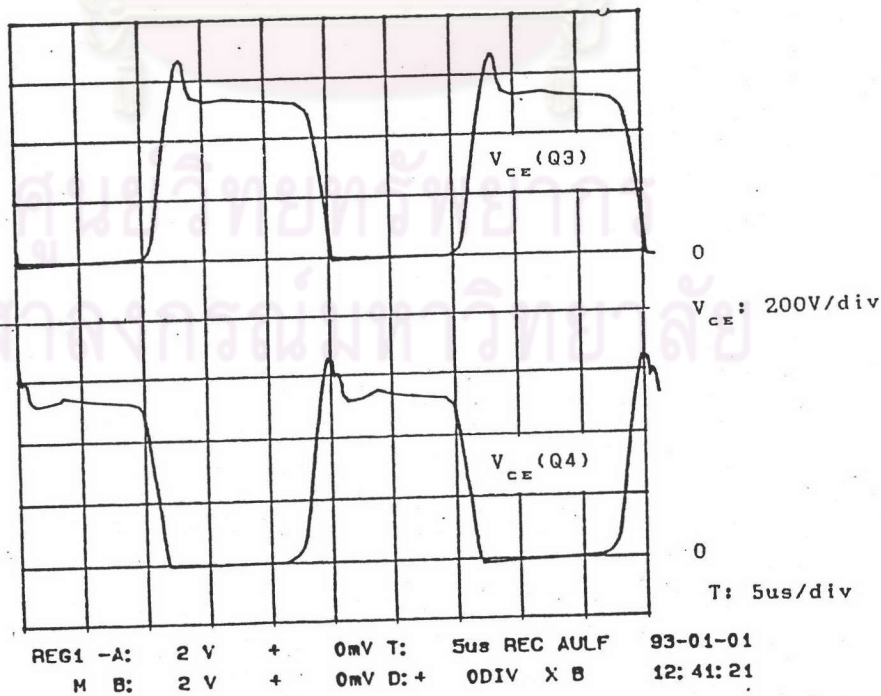
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

13:38:12 93 Jan 01



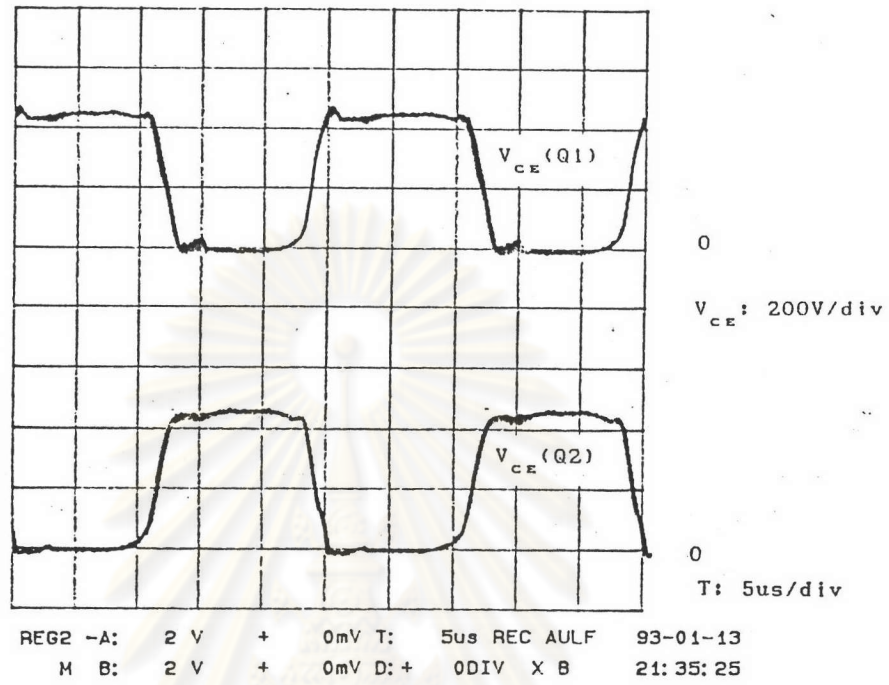
รูปที่ 5.10 แรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง Q_1 และ Q_2 (กรณีไม่มีโหลด)

12:41:42 93 Jan 01



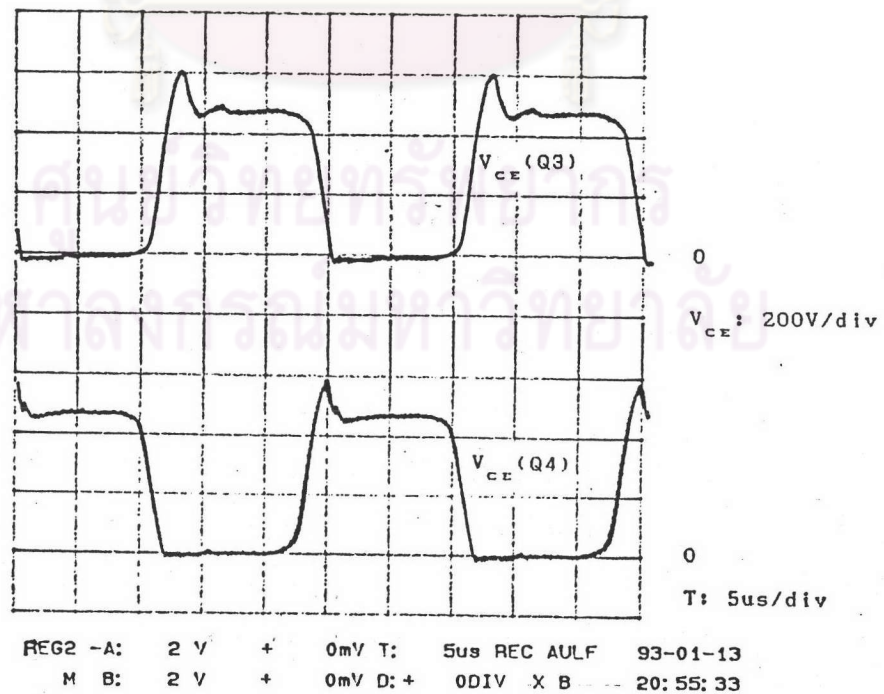
รูปที่ 5.11 แรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง Q_3 และ Q_4 (กรณีไม่มีโหลด)

21:38:16 93 Jan 13



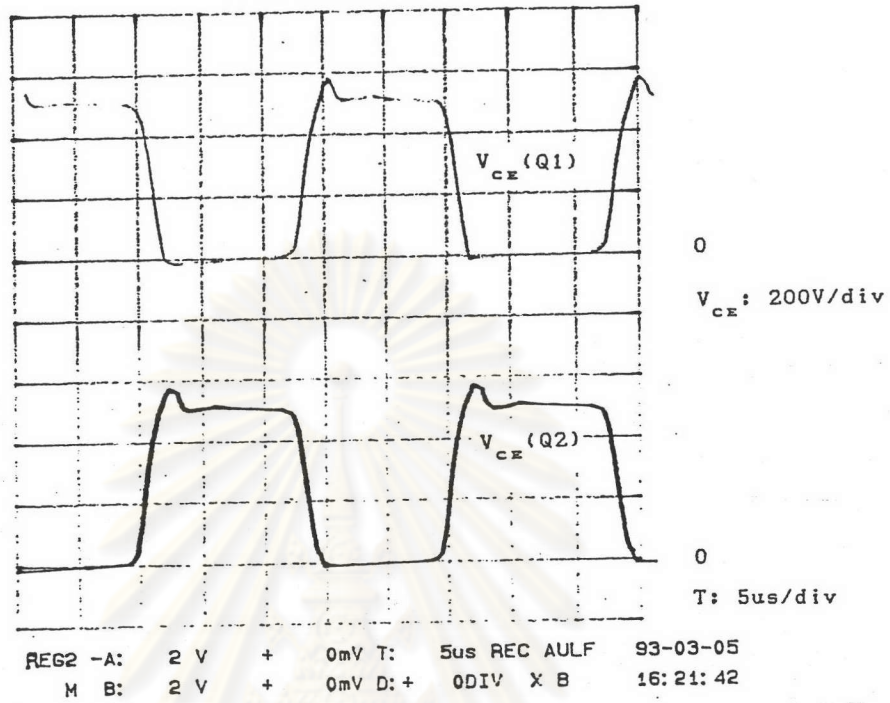
รูปที่ 5.12 แรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง Q₁ และ Q₂ (กรณีมีโหลด)

21:00:21 93 Jan 13



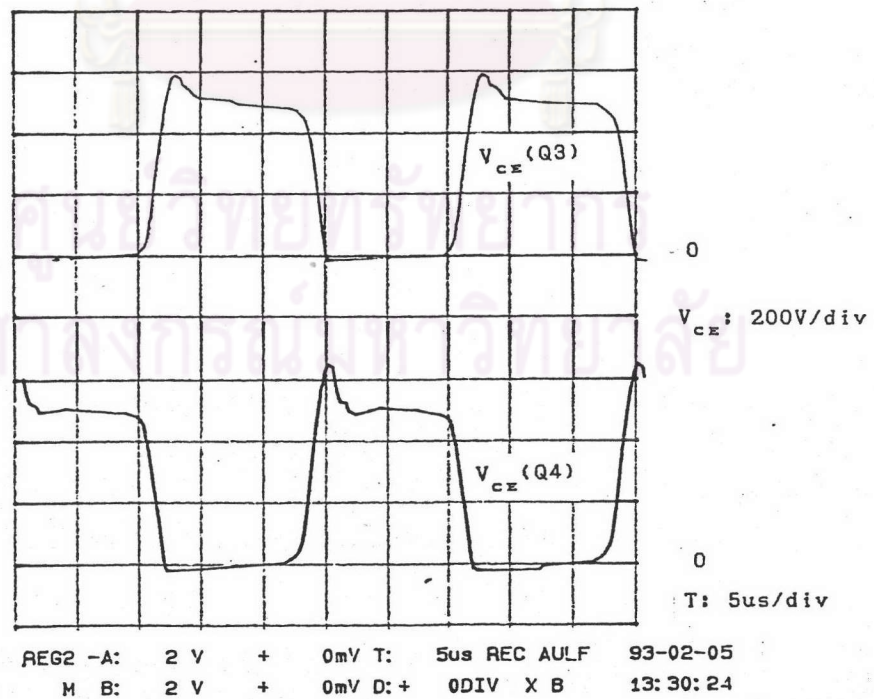
รูปที่ 5.13 แรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง Q₃ และ Q₄ (กรณีมีโหลด)

16: 28: 12 93 Mar 05



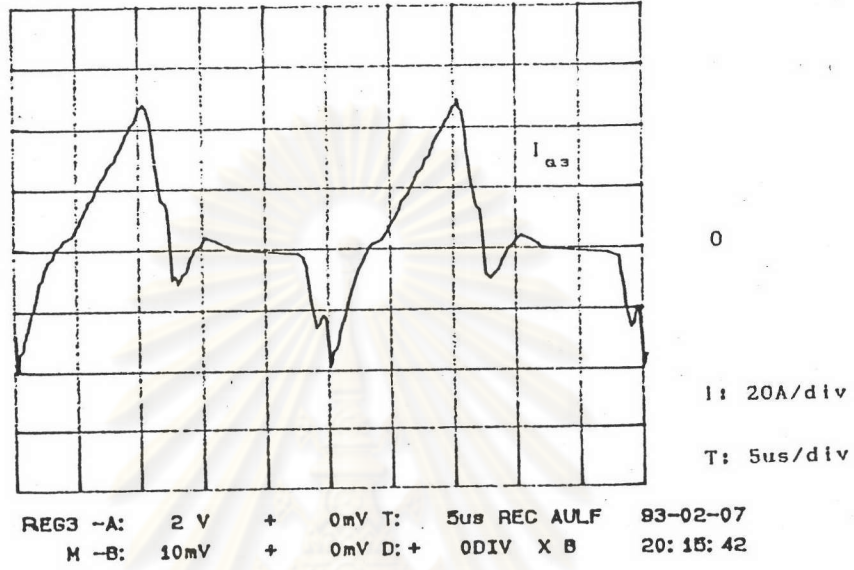
รูปที่ 5.14 แรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง Q₁ และ Q₂ (กรณีโหลดร้อนแดง)

13: 35: 18 93 Feb 05



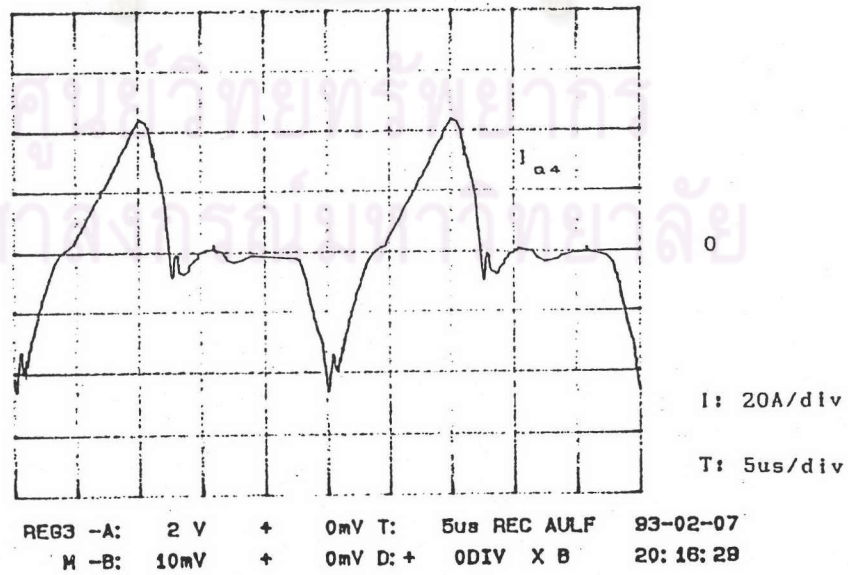
รูปที่ 5.15 แรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง Q₃ และ Q₄ (กรณีโหลดร้อนแดง)

20: 20: 23 93 Feb 07



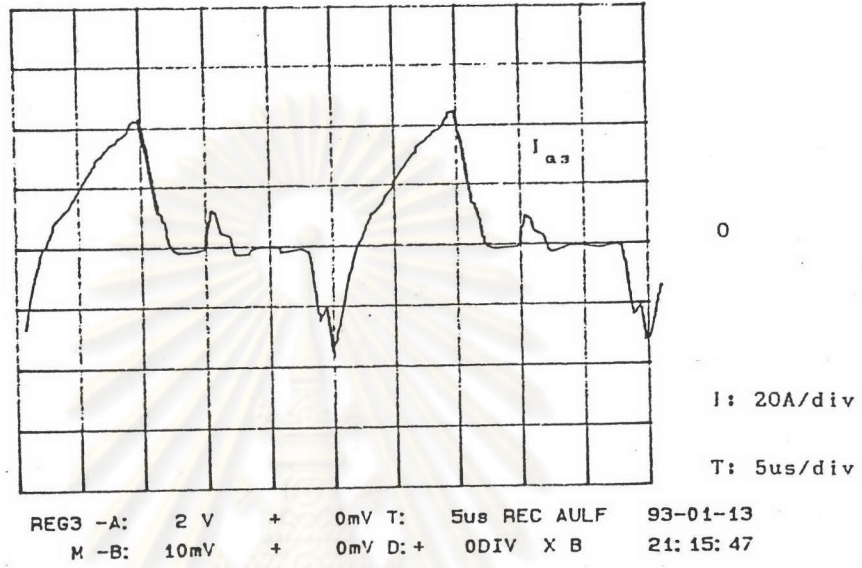
รูปที่ 5.16 กระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลัง Q_3 (กรณีไม่มีโหลด)

20: 19: 09 93 Feb 07



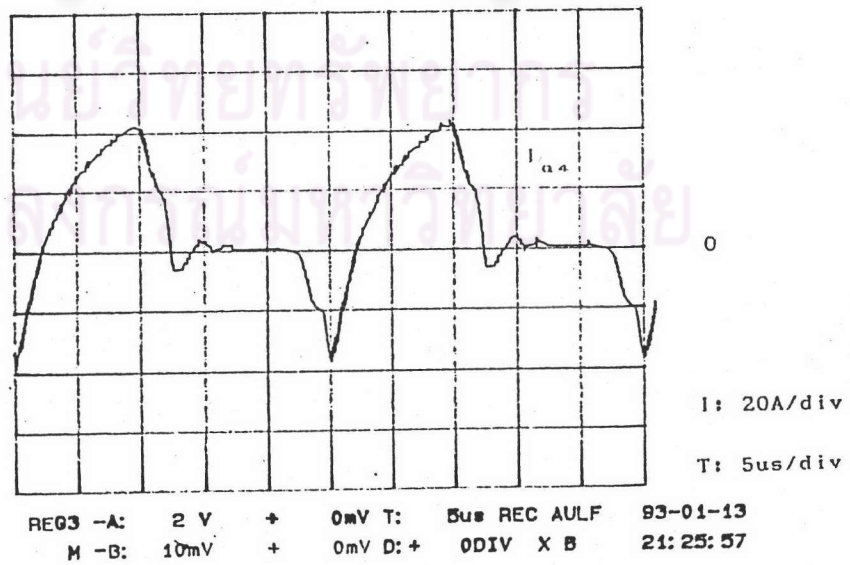
รูปที่ 5.17 กระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลัง Q_4 (กรณีไม่มีโหลด)

21: 27: 31 93 Jan 13



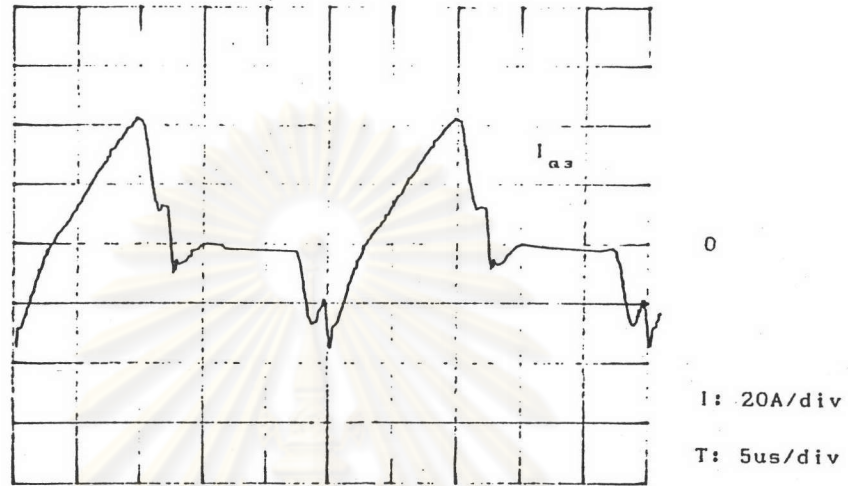
รูปที่ 5.18 กระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลัง Q_3 (กรณีมีโหลด)

21: 17: 42 93 Jan 13



รูปที่ 5.19 กระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลัง Q_4 (กรณีมีโหลด)

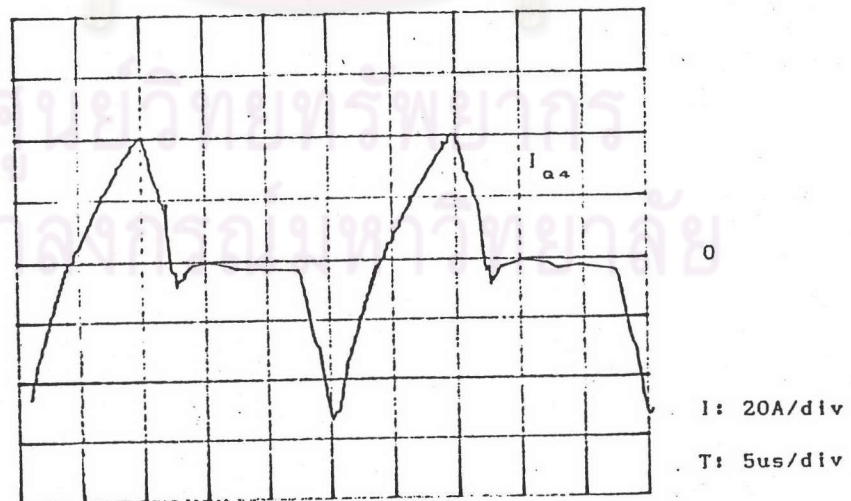
20: 16: 18 93 Mar 04



REG1 -A: 2 V + 0mV T: 5us REC AULF 93-03-04
 M -B: 10mV + 0mV D: + 0DIV X B 20: 13: 38

รูปที่ 5.20 กระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลัง Q_3 (กรณีไหลดร้อนแดง)

20: 23: 21 93 Mar 04



REG1 -A: 2 V + 0mV T: 5us REC AULF 93-03-04
 M -B: 10mV + 0mV D: + 0DIV X B 20: 20: 15

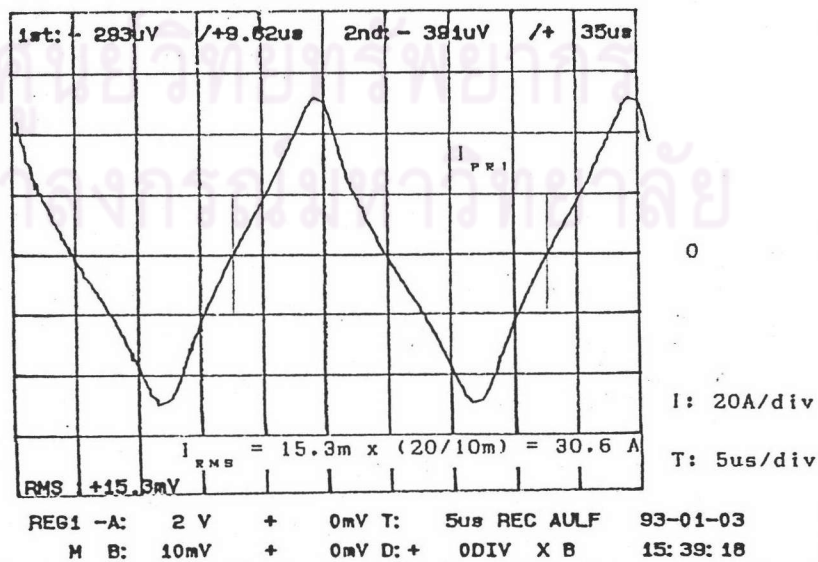
รูปที่ 5.21 กระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลัง Q_4 (กรณีไหลดร้อนแดง)

5.1.3 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง

จากรูปที่ 5.9 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังก็คือ กระแสออกของอินเวอร์เตอร์นั่นเอง รูปคลื่นของกระแสที่แสดงไว้ดังรูปที่ 5.22 ถึงรูปที่ 5.24 ซึ่งวัดในกรณีโหลดแบบต่าง ๆ จากรูปที่ 5.23 ซึ่งเป็นสัญญาณที่วัดได้ในกรณีมีโหลด เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการซิมูเลตที่ได้ในหัวข้อที่ 4.2.2 จะเห็นว่า มีลักษณะและค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่อาจจะต่างกันที่ปริมาณเล็กน้อย เพราะวงจรสมมูลของโหลดที่ใช้ในการซิมูเลตเป็นค่าที่วัดได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่รูปสัญญาณที่วัดในวงจรจริงเป็นสัญญาณขณะที่โหลดมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งวงจรสมมูลของโหลดเปลี่ยนไป เนื่องจากหม้อแปลงกำลังความถี่สูงที่ใช้เป็นหม้อแปลงชนิด 1:1 16 ตัวอนุกรมทางด้านปฐมภูมิ และขนานกันทางด้านทุติยภูมิ การวัดกระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงนี้ จึงใช้วิธีวัดกระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงตัวเดียวแล้วสเกลปริมาณโดยการคูณด้วย 16 จากการวัดกระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงตัวเดียวได้รูปคลื่นดังแสดงไว้ใน รูปที่ 5.25 ถึงรูปที่ 5.27 เมื่อเปรียบเทียบกับกระแสด้านปฐมภูมิ จะเห็นว่ารูปคลื่นที่ได้ใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าปริมาณค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กของหม้อแปลงมีค่าสูง ผลของกระแสทำแม่เหล็กจึงมีค่าต่ำ

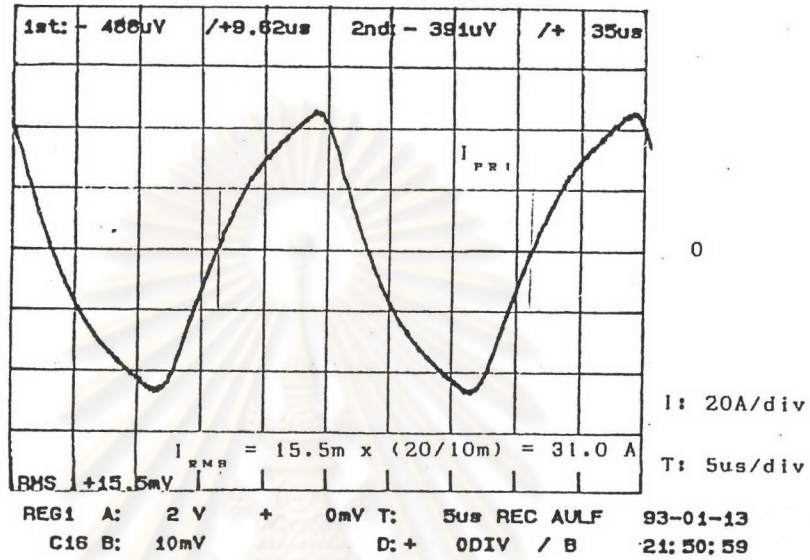
ในการวัดรูปคลื่นสัญญาณได้ใช้ Digital Storage Oscilloscope รุ่น PM 3320 ของ PHILIPS (PHILIPS Reference Manual, 1990) ซึ่งสามารถประมวลผลรูปสัญญาณที่วัดได้ เช่น การหาค่า RMS ค่าเฉลี่ย และยังคำนวณฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ ได้มากมายสำหรับการวัดรูปคลื่นกระแสของหม้อแปลงนี้ได้คำนวณค่า RMS ของแต่ละรูป พร้อมทั้งสเกลตามอัตราส่วนของโพรบกระแสที่ใช้วัด โดยแสดงประกอบไว้ในแต่ละรูปคลื่น

15: 41: 40 83 Jun 03



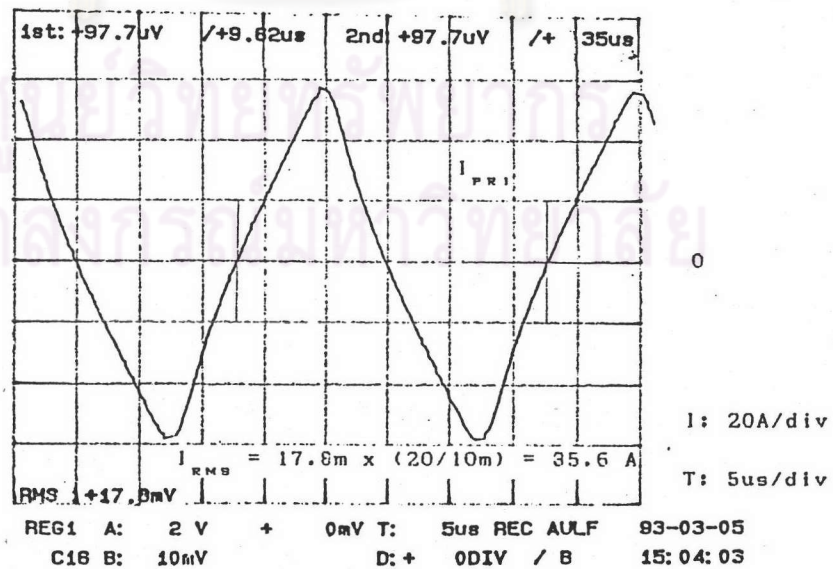
รูปที่ 5.22 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง (กรณีไม่มีโหลด)

21: 52: 29 93 Jan 13



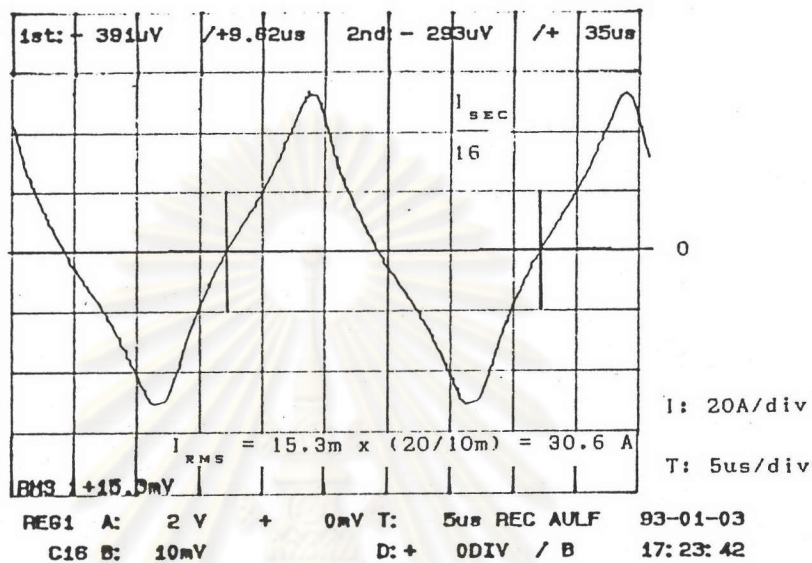
รูปที่ 5.23 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง (กรณีมีโหลด)

15: 06: 14 93 Mar 05



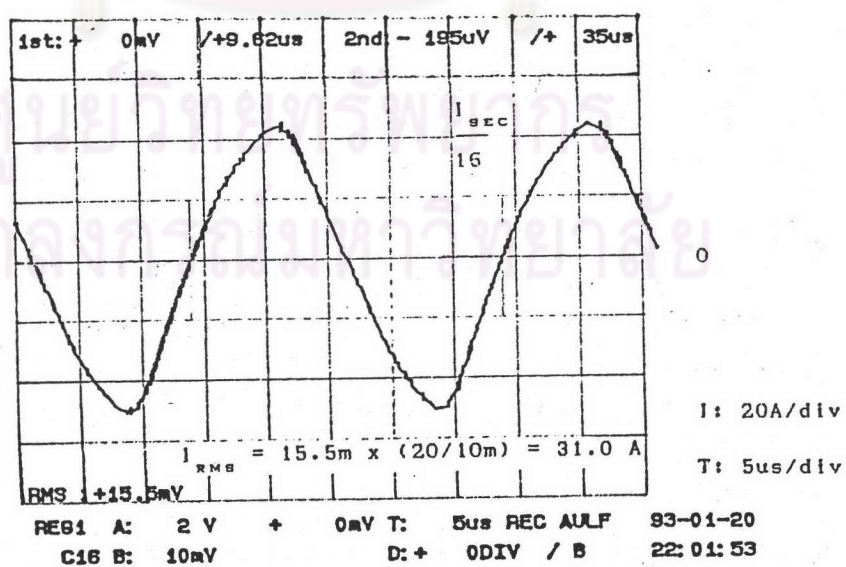
รูปที่ 5.24 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง (กรณีโหลดว่าง)

17:24:33 93 Jan 03



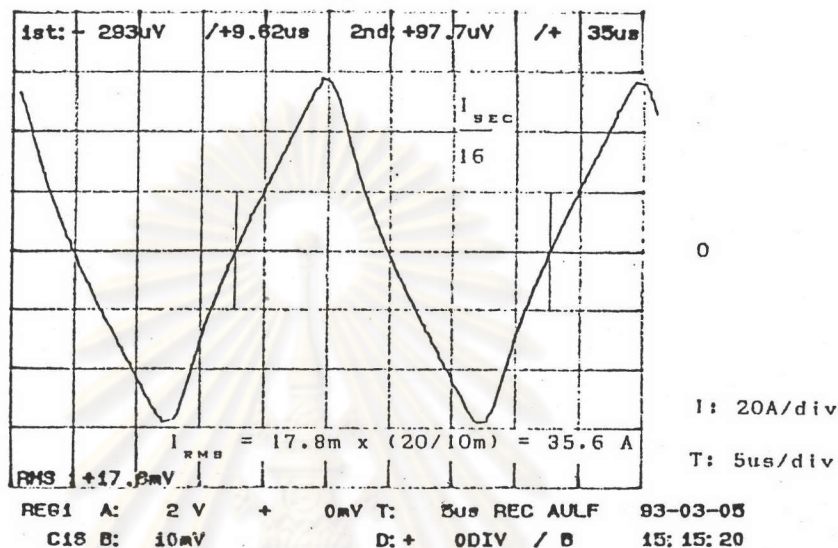
รูปที่ 5.25 กระแสที่ติดยกมีของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง 1 ใน 16 (กรณีไม่มีโหลด)

22:02:45 93 Jan 20



รูปที่ 5.26 กระแสที่ติดยกมีของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง 1 ใน 16 (กรณีมีโหลด)

15: 16: 01 93 Mar 05

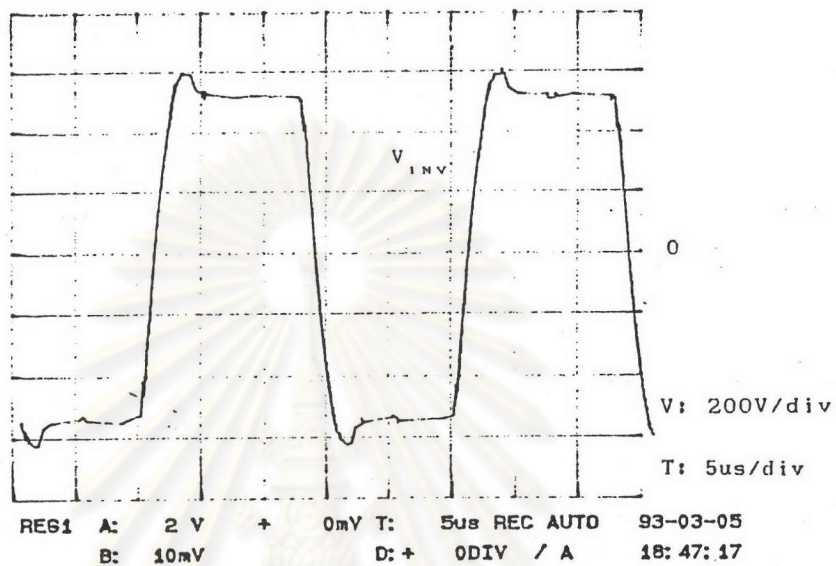


รูปที่ 5.27 กระแสที่ขั้วขั้วของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง 1 ใน 16 (กรณีโหลดร้อนแดง)

5.1.4 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

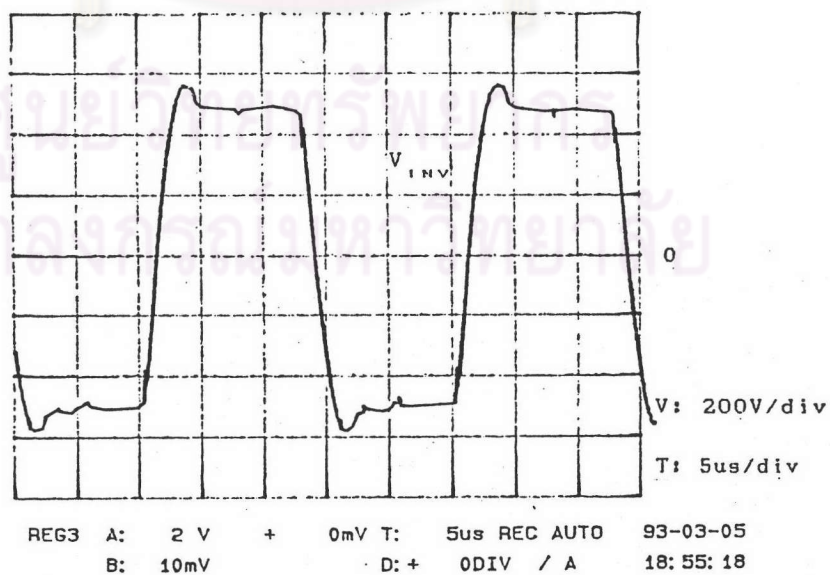
ในการวัดแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ไม่สามารถวัดที่แรงดันเต็มๆ ของการใช้งานจริงได้ โดยเฉพาะถ้าจุดที่สายกราวด์ของโพรบต่ออยู่กับจุดของวงจรที่มีการแกว่งของแรงดันเป็นปริมาณสูง จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนไปที่เครื่องมือวัดมาก จนกระทั่งรูปคลื่นที่วัดได้ผิดไปจากความเป็นจริง และอาจรบกวนการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ได้ จึงต้องแก้ไขด้วยการวัดผ่านหม้อแปลง โดยใช้หม้อแปลงความถี่สูงแยกโดด (Isolate) จุดที่ต้องการวัดในวงจรกับโพรบของเครื่องมือวัด เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น ผลการวัดได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.28 ถึงรูปที่ 5.30 (ในกรณีโหลดแบบต่าง ๆ) จากรูปที่ 5.29 ซึ่งเป็นสัญญาณที่วัดได้ในกรณีมีโหลด เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการซิมูเลตที่ได้ในหัวข้อที่ 4.2.2 จะเห็นว่ามัลติเพล็กซ์ของรูปคลื่นที่ใกล้เคียงกัน เพียงแต่รูปที่วัดได้จากวงจรจริงจะมียอดแหลมอันเนื่องมาจากความเหนี่ยวนำสมมูลจากสายตัวนำที่ใช้ เชื่อมสวิตช์แต่ละตัว

18: 47: 53 93 Mar 05



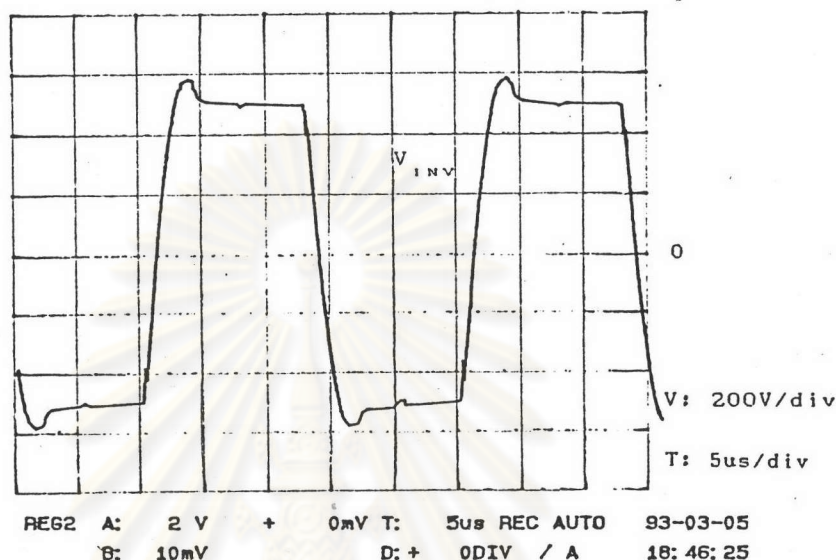
รูปที่ 5.28 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (กรณีไม่มีโหลด)

18: 56: 10 93 Mar 05



รูปที่ 5.29 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (กรณีมีโหลด)

18: 51: 41 93 Mar 05

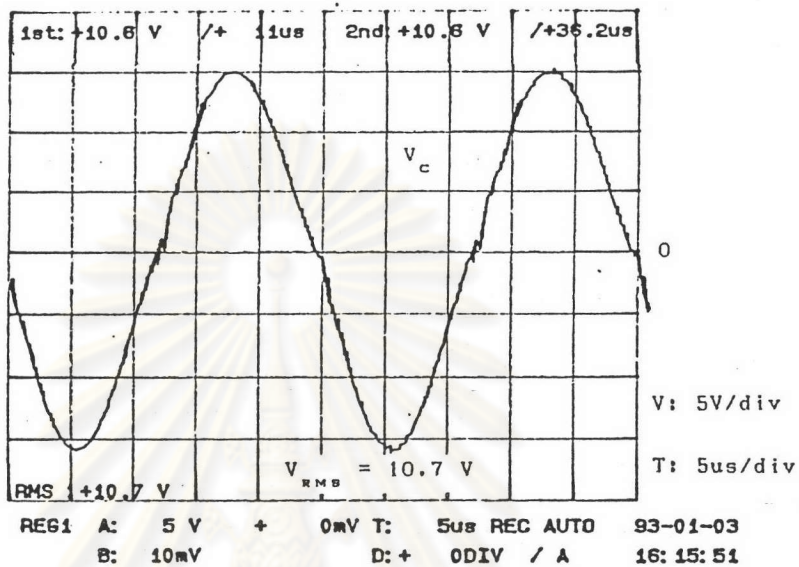


รูปที่ 5.30 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (กรณีโหลดร้อนแดง)

5.1.5 รูปคลื่นแรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ

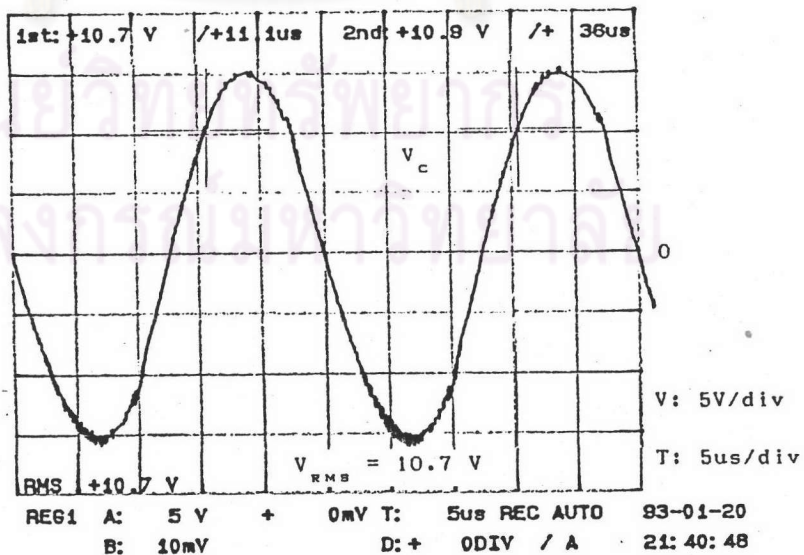
จากวงจรในรูปที่ 5.9 แรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ (V_c) ก็คือแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุที่ใช้ชดเชยตัวประกอบกำลัง หรือ เป็นแรงดันคร่อมขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูงนั่นเอง รูปคลื่นของสัญญาณที่วัดได้ในกรณีโหลดแบบต่าง ๆ แสดงไว้ดังรูปที่ 5.31 ถึงรูปที่ 5.33 ซึ่งการบันทึกรูปคลื่นดังกล่าวนี้ได้คำนวณค่า RMS ของรูปคลื่นแต่ละรูป โดยได้แสดงประกอบไว้ด้วย และเพื่อการเปรียบเทียบเฟสของ กระแสทุติยภูมิของหม้อแปลงในกรณีโหลดแบบต่าง ๆ จึงวัดรูปคลื่นของกระแสทุติยภูมิพร้อมกับวัดแรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.34 ถึงรูปที่ 5.36 จากผลการวัดดังกล่าวจะเห็นว่ารูปคลื่นของกระแสทุติยภูมิจะมียอดแหลมอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัดสัญญาณทั้งสองพร้อมกัน โดยสังเกตเปรียบเทียบกับรูปที่ 5.25 ถึงรูปที่ 5.27 นอกจากนี้รูปคลื่นของสัญญาณทั้งสองที่วัดได้นี้ ยังใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียรวมของโหลด ขดลวดเหนี่ยวนำและที่ตัวเก็บประจุได้ด้วย ดังจะกล่าวไว้ในหัวข้อถัดไป

18:31:08 93 Jan 03



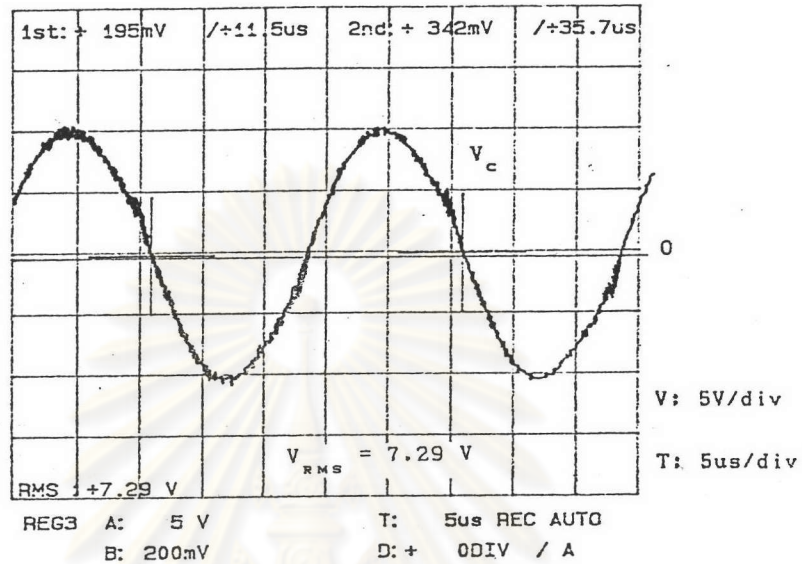
รูปที่ 5.31 แรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ (กรณีไม่มีโหลด)

21:42:25 93 Jan 20



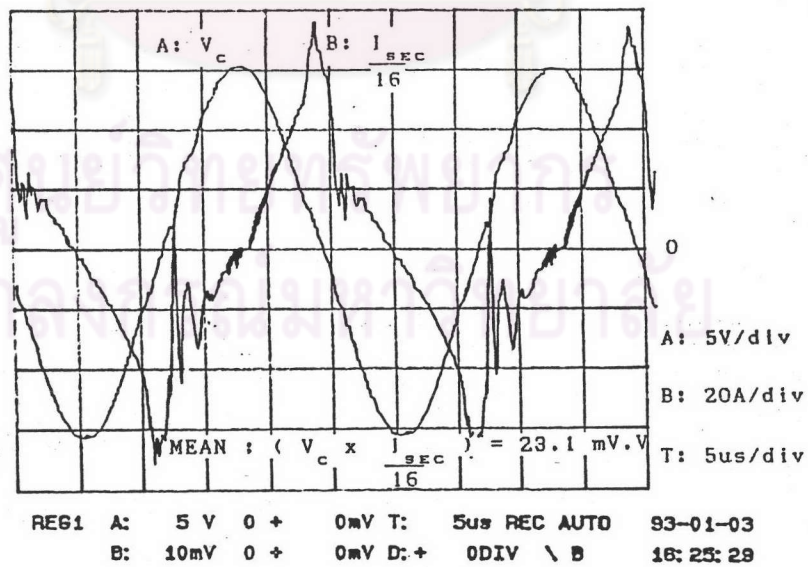
รูปที่ 5.32 แรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ (กรณีมีโหลด)

13:30:24 93 May 01



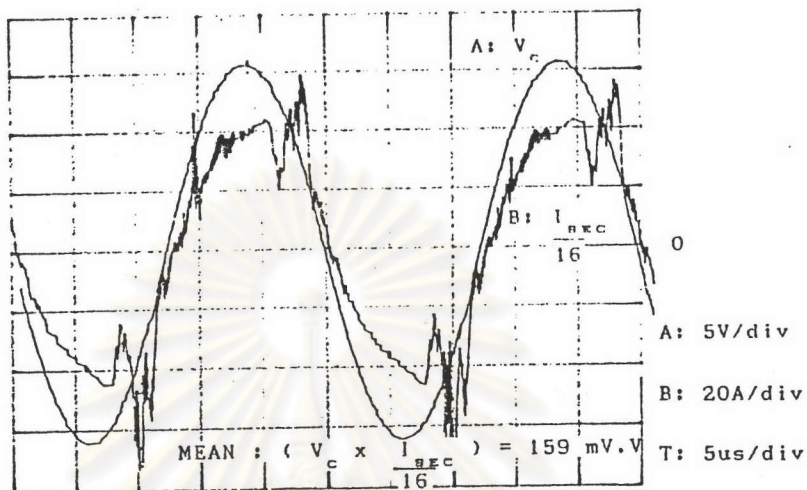
รูปที่ 5.33 แรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ (กรณีโหลดรีออนแดง)

16:28:09 93 Jan 03



รูปที่ 5.34 แรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ และกระแสตัดยภูมิของหม้อแปลงกำลัง ความถี่สูง 1 ใน 16 (กรณีไม่มีโหลด)

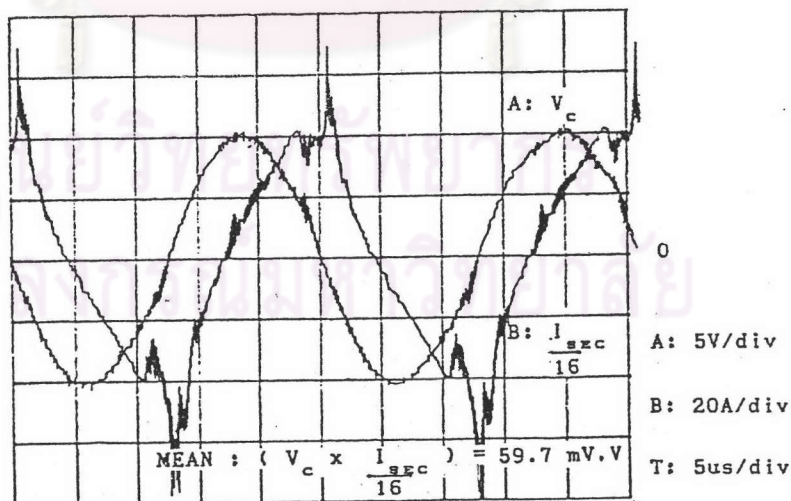
10: 55: 14 93 Feb 05



REG1 A: 5 V 0 + 0mV T: 5us REC AUTO 93-02-05
 B: 10mV 0 + 0mV D: + 0DIV \ B 10: 50: 54

รูปที่ 5.35 แรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ และกระแสขั้วขั้วของหม้อแปลงกำลัง ความถี่สูง 1 ใน 16 (กรณีมีโหลด)

12: 18: 09 93 May 05



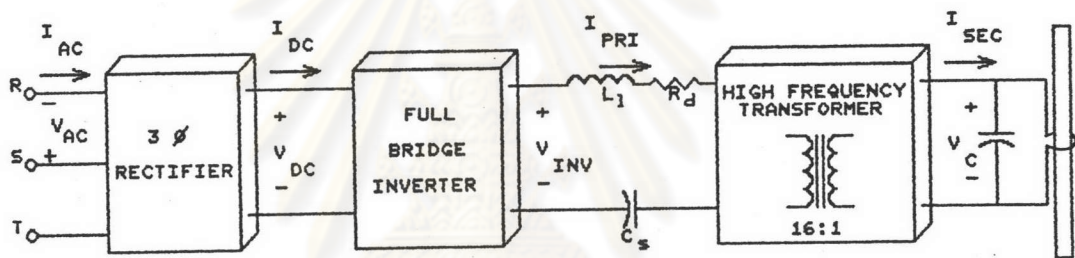
REG1 A: 5 V 0 + 0mV T: 5us REC AUTO
 B: 10mV 0 + 0mV D: + 0DIV \ B

รูปที่ 5.36 แรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ และกระแสขั้วขั้วของหม้อแปลงกำลัง ความถี่สูง 1 ใน 16 (กรณีโหลดร่อนแดง)

5.1.6 การวัดกำลัง และตัวประกอบกำลังทางด้านเข้า

ในการวัดค่าต่าง ๆ จะใช้วิธีคำนวณโดยการใช Digital Storage Oscilloscope วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสแต่ละจุด แล้วคำนวณหาปริมาณสำคัญต่าง ๆ ซึ่งการคำนวณโดยใช้เครื่องมือวัดนี้ จะต้องมีแพคเกจเตอร์มาคูณ เพื่อปรับให้ค่าที่คำนวณถูกต้องตามอัตราส่วนของโพรบที่ใช้วัด การทดสอบจะทำให้ภาวะโหลดต่าง ๆ กัน ซึ่งได้แก่กรณีไม่มีโหลด มีโหลด และกรณีที่โหลดร้อนแดง สำหรับการนิยามสัญลักษณ์ของแรงดันและกระแสที่จุดต่าง ๆ จะแสดงไว้ดังรูปที่ 5.37

การวัดกำลังทางด้านเข้าของระบบแบ่งออกเป็น กำลังปรากฏ(VA) และกำลังเฉลี่ย (W) ซึ่งความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ เป็นตามสมการต่อไปนี้



รูปที่ 5.37 แสดงแรงดันและกระแสที่จุดต่าง ๆ ในบล็อกไดอะแกรมของระบบ

$$VA = \sqrt{3} V_{AC} \cdot I_{AC} \quad (5.1)$$

$$W = V_{DC} \cdot I_{DC} \quad (5.2)$$

$$pf = \frac{W}{VA} \quad (5.3)$$

รูปคลื่นแรงดันไฟสลับ V_{AC} และกระแสไฟสลับ I_{AC} ที่วัดได้ในกรณีโหลด ภาวะต่าง ๆ แสดงไว้ดังรูปที่ 5.38 ถึงรูปที่ 5.40 พร้อมทั้งคำนวณค่า RMS ของรูปคลื่นทั้งสองด้วยเครื่องมือวัด แสดงประกอบไว้ในแต่ละรูป ส่วนรูปแรงดันไฟตรง V_{DC} และกระแสไฟตรง I_{DC} แสดงไว้ดังรูปที่ 5.41 ถึงรูปที่ 5.43 พร้อมทั้งคำนวณค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นทั้งสองด้วยเครื่องมือวัด แสดงประกอบไว้ด้วย สำหรับการคำนวณหาค่า VA และ W ตามสมการที่ (5.1) ถึง (5.3) ในการแทนค่าจะต้องคูณด้วยแฟกเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อให้ค่าที่ได้ถูกต้อง ซึ่งวิธีการคิดค่าแฟกเตอร์ได้แสดงให้ดูพอเป็นตัวอย่างไว้ดังนี้

ในรูปที่ 5.38 ค่า RMS ของแรงดันไฟสลับ V_{AC} และกระแสไฟสลับ I_{AC} ที่คำนวณได้จากเครื่อง Digital Storage Oscilloscope เท่ากับ 3.83 V และ 16.6 mA ตามลำดับ แต่เนื่องจากสายวัดแรงดันมีอัตราการทอนแรงดันเป็น 100:1 และโพรบกระแสที่ใช้มีขนาด 5 A/div นอกจากนี้ขดลวดกระแสโดยใช้โพรบนี้ จะต้องใช้ช่องวัดที่ต่อกับตัวโพรบของ Digital Storage Oscilloscope มีขนาด 10 mV/div ดังนั้นการคูณกันของค่าดังกล่าว ถ้าจะให้ เป็นค่ากำลังปรากฏ (VA) ที่ถูกต้อง ต้องคูณด้วยแฟกเตอร์ ดังนี้

$$\begin{aligned} VA &= \sqrt{3} (V_{AC} \times 100) \left(I_{AC} \times \frac{5}{10 \times 10^{-3}} \right) \\ &= \sqrt{3} (3.83 \times 100) \left(16.6 \times \frac{5}{10 \times 10^{-3}} \right) \\ &= 5.51 \times 10^3 \text{ วัตต์.แอมป์} \end{aligned}$$

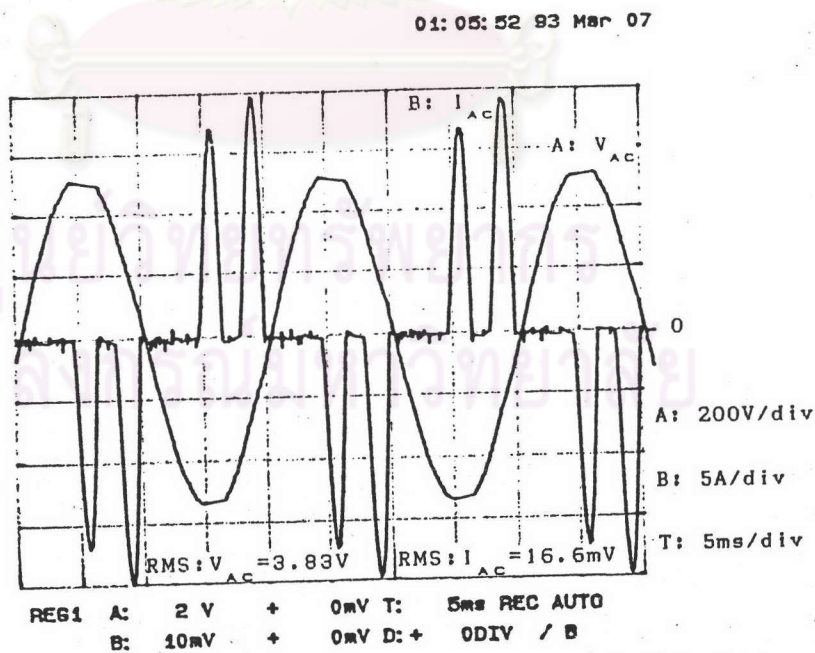
สำหรับในรูปที่ 5.41 เนื่องจากโพรบที่ใช้วัดแรงดัน มีลักษณะที่เหมือนกับการวัดข้างบนแต่โพรบกระแสเปลี่ยนเป็นขนาด 20 A/div ดังนั้นการปรับให้ผลคูณของแรงดันไฟตรง V_{DC} และกระแสไฟตรง I_{DC} เป็นค่ากำลังเฉลี่ยที่ถูกต้องจึงคูณด้วยแฟกเตอร์ดังนี้

$$\begin{aligned} W &= (V_{DC} \times 100) \left(\frac{I_{DC} \times 20}{10 \times 10^{-3}} \right) \\ &= (5.27 \times 100) \left(2.31 \times 10^{-3} \times \frac{20}{10 \times 10^{-3}} \right) \\ &= 2.43 \times 10^3 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

จากค่า VA และ W ที่คำนวณได้ในกรณีโหลดภาวะต่าง ๆ จะคำนวณค่าตัวประกอบกำลังได้ตามสมการที่ 5.3 และนำมาแสดงเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 5.1

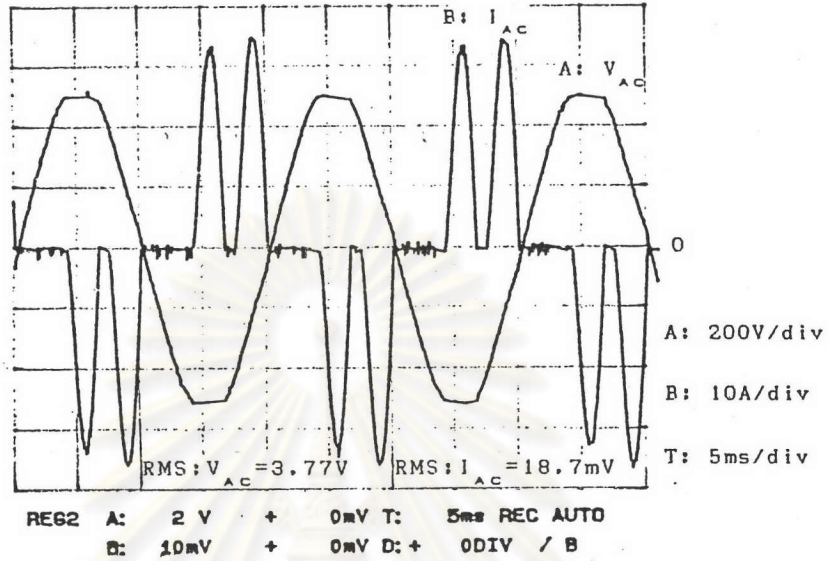
	กำลังปรากฏ (VA)	กำลังเฉลี่ย (W)	ตัวประกอบกำลัง(pf)
กรณีไม่มีโหลด	5.51×10^3	2.43×10^3	0.44
กรณีมีโหลด	12.2×10^3	8.00×10^3	0.66
กรณีโหลดร้อนแดง	8.23×10^3	3.43×10^3	0.42

ตารางที่ 5.1 แสดงค่ากำลังและตัวประกอบกำลังทางด้านเข้าที่ภาวะโหลดต่าง ๆ



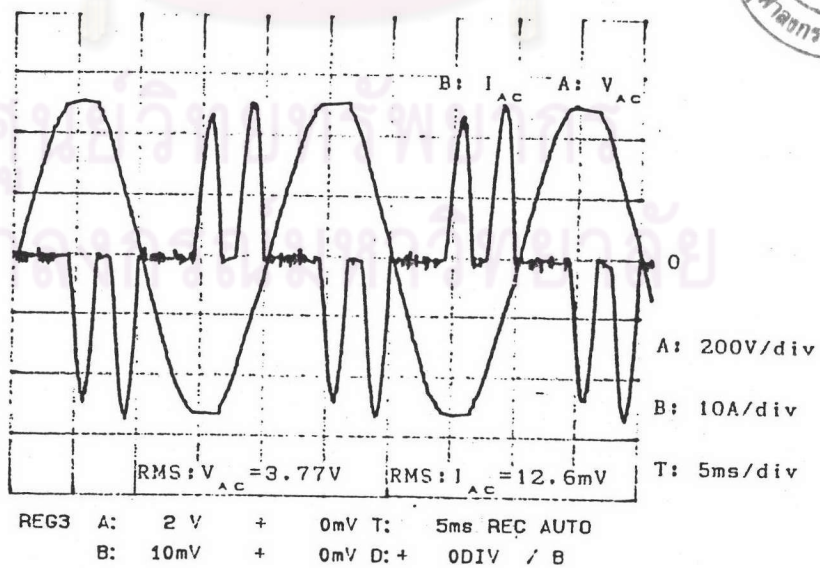
รูปที่ 5.38 รูปแสดงแรงดันไฟสลับ V_{AC} และกระแสไฟสลับ I_{AC} (กรณีไม่มีโหลด)

00: 11: 48 83 Mar 07



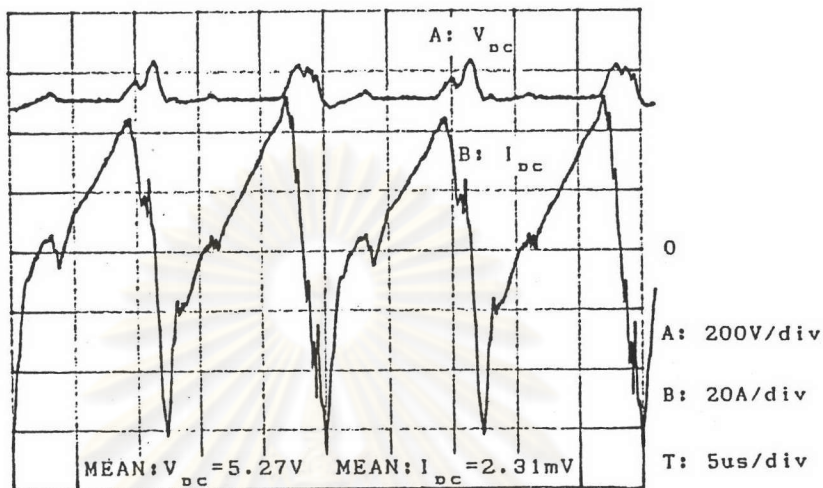
รูปที่ 5.39 แรงดันไฟสลับ V_{AC} และกระแสไฟสลับ I_{AC} (กรณีมีโหลด)

01: 24: 04 83 Mar 07



รูปที่ 5.40 แรงดันไฟสลับ V_{AC} และกระแสไฟสลับ I_{AC} (กรณีโหลดรื้อแดง)

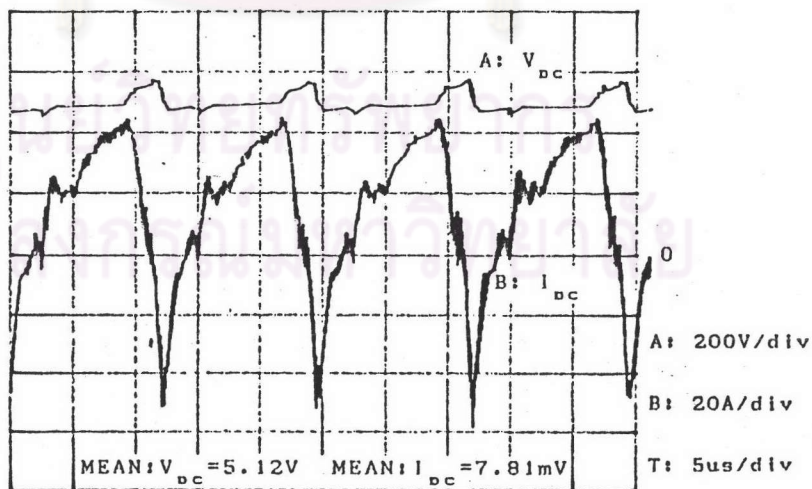
21:30:35 93 Jan 07



REG3 A: 2 V 0 + 0mV T: 5us REC AUTO 93-03-07
 B: 10mV 0 + 0mV D: + 0DIV \ B 01:01:18

รูปที่ 5.41 แรงดันไฟตรง V_{DC} และกระแสไฟตรง I_{DC} (กรณีไม่มีโหลด)

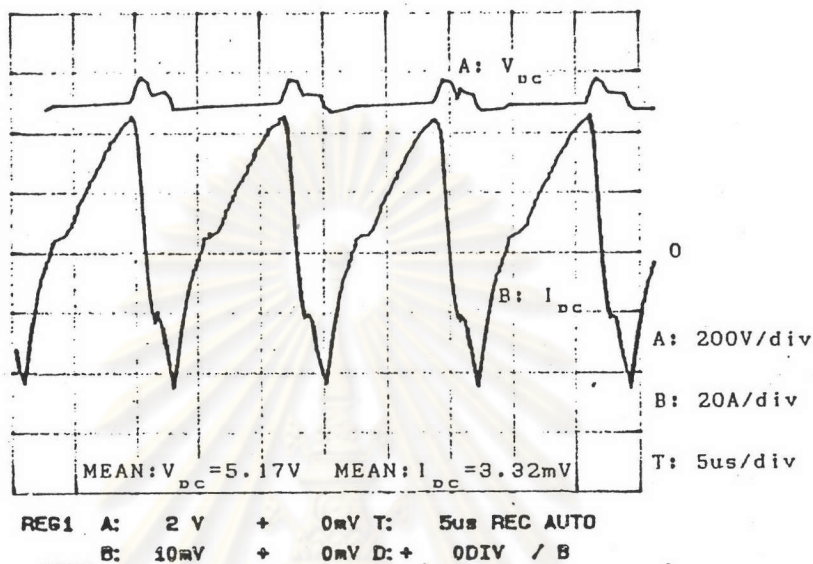
11:16:38 93 Feb 05



REG1 A: 2 V + 0mV T: 5us REC AUTO
 B: 10mV + 0mV D: + 0DIV / B

รูปที่ 5.42 แรงดันไฟตรง V_{DC} และกระแสไฟตรง I_{DC} (กรณีมีโหลด)

02: 40: 11 93 Mar 07



รูปที่ 5.43 แรงดันไฟตรง V_{DC} และกระแสไฟตรง I_{DC} (กรณีโหลดร้อนแดง)

5.1.7 การวัดกำลังที่ขึ้นงาน และประสิทธิภาพรวมของระบบ

การทดสอบวัดกำลังที่ขึ้นงานในหัวข้อนี้จะใช้วิธีวัดแรงดันและกระแสแล้วนำมาคำนวณอีกครั้งหนึ่ง จากรูปที่ 5.37 จุดที่สามารถวัดได้เข้าใกล้โหลดมากที่สุด ก็คือ แรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ (V_C) และกระแสต้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง 1 ใน 16 ($I_{sec}/16$) จากค่าแรงดันและกระแสที่วัดได้ สามารถคำนวณกำลังที่ส่วนต่างๆ ได้ ตามสมการต่อไปนี้

กำลังสูญเสียรวมของตัวเก็บประจุ, ขดลวดเหนี่ยวนำและขึ้นงาน : $W(C+COIL+LOAD)$

$$W(C+COIL+LOAD) = \frac{1}{T} \int I_{sec} \cdot V_C dt \quad (5.4)$$

กำลังสูญเสียที่ตัวเก็บประจุ : $W(C)$

$$W(C) = (V_C \omega C)^2 \times R_C \quad (5.5)$$

โดยที่ R_c คือ ความต้านทานอนุกรมสมมูลของตัวเก็บประจุ
กำลังสูญเสียรวมของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน : $W(\text{COIL}+\text{LOAD})$

$$W(\text{COIL}+\text{LOAD}) = W(\text{C}+\text{COIL}+\text{LOAD}) - W(\text{C}) \quad (5.6)$$

กำลังสูญเสียที่ชิ้นงาน : $W(\text{LOAD})$

$$W(\text{LOAD}) = W(\text{COIL}+\text{LOAD}) \times \eta(\text{COIL}) \quad (5.7)$$

โดยที่ $\eta(\text{COIL})$ คือ ประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำ

ประสิทธิภาพรวมของระบบ : η_T

$$\eta_T = \frac{W(\text{LOAD})}{W} \quad (5.8)$$

จากการบันทึกรูปคลื่นแรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ (V_c) และกระแส
หตุติภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง ($I_{\text{coil}}/16$) ในหัวข้อที่ 5.15 (รูปที่ 5.35 กรณีมีโหลด)
สามารถคำนวณหาค่าเฉลี่ยของผลคูณของ รูปคลื่นทั้งสองด้วยเครื่อง Digital Storage
Oscilloscope ได้ค่าเท่ากับ 159 mV.V แต่เนื่องจากสายวัดแรงดันเมื่ออัตราการทอนแรงดัน
เป็น 100 : 1 และโพรบกระแสที่ใช้มีขนาด 20 A/div ขณะที่ต่ออยู่กับช่อง 10 mV/div ของ
Digital Storage Oscilloscope นอกจากนั้นกระแสหตุติภูมิที่วัดได้เป็นค่าของหม้อแปลง
เพียง 1 ตัวจากทั้งหมด 16 ตัว ดังนั้นถ้าจะให้ค่ากำลังสูญเสียรวมของตัวเก็บประจุ, ขดลวด
เหนี่ยวนำและชิ้นงานที่ถูกต้อง ตามสมการที่ (5.4) จะต้องคูณด้วยแฟกเตอร์ดังนี้

$$\begin{aligned} W(\text{C}+\text{COIL}+\text{LOAD}) &= 159\text{m} \times \left(\frac{20}{10 \times 10^{-3}} \right) \times 16 \\ &= 5.09 \times 10^3 \quad \text{วัตต์} \end{aligned}$$

สำหรับการคำนวณค่ากำลังสูญเสียที่ตัวเก็บประจุ จะต้องคำนวณค่า RMS
ของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยเครื่อง Digital Storage Oscilloscope ซึ่งได้คำนวณ

ไว้แล้วในหัวข้อที่ 5.1.5 (รูปที่ 5.31 ถึงรูปที่ 5.33) แล้วจึงแทนค่าในสมการที่ (5.5) โดยใช้ค่าตัวเก็บประจุ และความต้านทานอนุกรมสมมูลที่วัดได้จากตารางที่ 4.2 (ใช้ค่าที่ความถี่ 40 kHz) โดยจะยกตัวอย่างในกรณีไม่มีโหลด (รูปที่ 5.31) ไว้ดังนี้

$$W(C) = (10.7 \times 2\pi \times 40 \text{ k} \times 333 \mu)^2 \times 0.10 \text{ m} = 80.2 \text{ วัตต์}$$

จากนั้นจะหา ค่ากำลังสูญเสียรวมของขดลวดเหนี่ยวนำ และชิ้นงานได้จากสมการที่ (5.6) และหาค่ากำลังสูญเสียที่ชิ้นงานได้จากสมการที่ (5.7) โดยใช้ค่าประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำที่คำนวณได้ในบทที่ 3 (รูปที่ 3.12) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 93.2% ที่ความถี่ 40 kHz ส่วนค่าประสิทธิภาพรวมของระบบก็จะใช้ค่ากำลังเฉลี่ยทางด้านเข้า (W) ที่คำนวณได้จากตารางที่ 5.1 แทนค่าในสมการที่ (5.8)

การคำนวณค่ากำลังสูญเสียต่างๆ และประสิทธิภาพรวมตามสมการที่ (5.4) ถึง สมการที่ (5.8) จะคำนวณในภาวะโหลดต่างๆ ซึ่งค่าที่คำนวณได้จะแสดงเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 5.2

	W(C+COIL+LOAD) (วัตต์)	W(C) (วัตต์)	W(COIL+LOAD) (วัตต์)	W(LOAD) (วัตต์)	η_T (%)
กรณีไม่มีโหลด	0.739×10^3	80.2	0.659×10^3	0	0
กรณีมีโหลด	5.09×10^3	80.2	5.01×10^3	4.67×10^3	58.4
กรณีโหลดร้อนแดง	1.91×10^3	37.2	1.87×10^3	1.74×10^3	50.7

หมายเหตุ กรณีไม่มีโหลด $W(C+COIL+LOAD) = W(C+COIL)$

$$W(COIL+LOAD) = W(COIL) , W(LOAD) = 0$$

ตารางที่ 5.2 แสดงค่ากำลังสูญเสียที่จุดต่างๆ กำลังที่ชิ้นงาน และประสิทธิภาพรวมของระบบ

จากรูปคลื่นกระแสศักติขุมมิของหม้อแปลงกำลัง(1ใน16) ที่วัดได้ในกรณีไม่มีโหลด (รูปที่ 5.25) เมื่อประมาณค่าอาร์เอ็มเอสของรูปกระแสหลักมูลจะได้เท่ากับ 28 แอมป์ ส่วนในกรณีมีโหลด (รูปที่ 5.26) ซึ่งมีรูปที่ใกล้เคียงซ้ายมากกว่า จะประมาณค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสหลักมูลได้เท่ากับ 31 แอมป์ และจากรูปคลื่นแรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำที่วัดได้ในกรณีไม่มีโหลด และกรณีมีโหลด ซึ่งมีค่าอาร์เอ็มเอสเท่ากับ 10.7 โวลต์ ประกอบกับมุมเฟสของกระแสศักติขุมมิของหม้อแปลงที่ตามหลังแรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำในกรณีไม่มีโหลด และมีโหลด ซึ่งวัดได้จากรูปที่ 5.34 และรูปที่ 5.35 มีค่าเท่ากับ 85 องศา และ 10 องศา ตามลำดับ

จากค่าที่ได้ดังกล่าว สามารถคำนวณค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ (I_{coil}) ในกรณีไม่มีโหลดได้เท่ากับ 1340 แอมป์ และกรณีมีโหลดได้เท่ากับ 1100 แอมป์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันจะได้ว่า $\frac{I_{coil,FL}}{I_{coil,NL}} = 0.82$ เท่า และคิดเป็นอัตราส่วนกำลังสูญเสียที่ขดลวด $\frac{W(COIL)_{FL}}{W(COIL)_{NL}} = 0.67$ เท่า ดังนั้นจากตารางที่ 5.2 สามารถคำนวณค่ากำลังสูญเสียในขดลวดเหนี่ยวนำกรณีมีโหลดได้เท่ากับ $0.67 \times 659 = 442$ วัตต์ จึงได้ค่ากำลังสูญเสียที่ใช้งาน $W(Load) = 5.01 \times 10^3 - 442 = 4.57 \times 10^3$ วัตต์ ซึ่งคิดเป็นค่าประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำได้เท่ากับ $\frac{4.57}{5.01} \times 100 = 91.1\%$ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ผลจากการทดลองวัดจริง มีค่าต่ำกว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองที่มีการปรับค่าด้วย Correction Factor ในหัวข้อที่ 3.4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 93.2% เล็กน้อย อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วแผ่นทองแดงที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสระหว่างตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำก็มีกำลังสูญเสียอยู่จำนวนหนึ่ง ซึ่งในทางปฏิบัติต้องใช้น้ำในการระบายความร้อนด้วย และถ้าหากคำนึงถึงผลของกำลังสูญเสียในแผ่นทองแดงด้วยแล้ว คาดว่าประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลอง จะเพิ่มขึ้นมาใกล้เคียงค่าที่ได้จากการคำนวณมากขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 การทดสอบทางโลหวิทยา

ได้มีการใช้เครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวนำที่สร้างขึ้น ในการทดสอบการชุบแข็งผิว เหล็กผสมคาร์บอนที่มีส่วนผสมต่างกัน 4 แบบ ซึ่งมีชื่อทางการค้า และส่วนประกอบดังแสดง ในตารางที่ 5.3 ในการทดสอบทำโดยการนำชิ้นงานรูปร่างทรงกระบอกตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มม. มาให้ความร้อนด้วยเครื่องเป็นเวลา 10 วินาที และชุบแข็งชิ้นงานโดยใช้น้ำในการทำให้ชิ้นงานที่ร้อนเย็นลงอย่างฉับพลัน จากนั้นนำชิ้นงานที่ชุบแข็งผิวไปวัดความแข็งเพื่อศึกษาความแข็งที่ระยะใด ๆ จากผิว โดยการวัดจะเริ่มวัดที่ระยะจากผิว 0.5 มม. แล้วเพิ่มครั้งละ 0.5 มม. จนถึง 11 มม. จากผิวชิ้นงาน

จากการทดสอบผลการทดลองได้แสดงไว้ดังตารางที่ 5.4 โดยแสดงความแข็งของชิ้นงานที่ระยะจากผิวใด ๆ ของตัวอย่างชิ้นงานทั้ง 4 แบบ พร้อมทั้งแสดงผลเป็นกราฟระหว่างความแข็งกับระยะจากผิวได้ดังรูปที่ 5.44 ถึงรูปที่ 5.47 จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งจะมีความแข็งสูงชันมาก โดยเฉพาะที่ผิว และจะค่อยลดลงเมื่อระยะจากผิวเพิ่มขึ้น ถ้าลากเส้นตรงใกล้เคียงของความแข็งที่ระยะจากผิวใด ๆ จะได้นแนวของความแข็งเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล และจากกราฟได้ประมาณค่าความลึกผิวที่แข็ง (δ) แสดงประกอบไว้ในแต่ละรูปด้วย

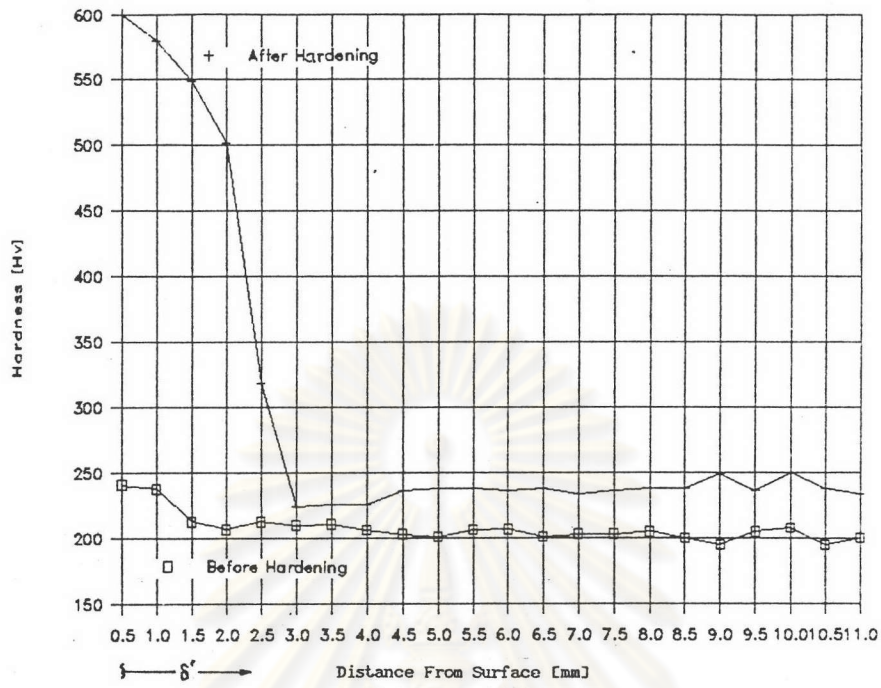
ชิ้นงานประเภทที่	ชื่อทางการค้า	ส่วนประกอบ (%)				
		C	Si	Mn	Cr	Mo
1	S50C	0.50	0.25	0.75	0.03	0.035
2	S45C	0.45	0.25	0.75	0.03	0.035
3	SCM4	0.40	0.25	0.80	1.00	0.200
4	SCM21	0.15	0.25	0.80	1.00	0.200

ตารางที่ 5.3 แสดงข้อมูลตัวอย่างชิ้นงานทั้ง 4 ประเภท

ระยะจากผิว (มม.)	ความแข็ง(Hv)							
	ชิ้นงานประเภทที่ 1 (S50C)		ชิ้นงานประเภทที่ 2 (S45C)		ชิ้นงานประเภทที่ 3 (SCM4)		ชิ้นงานประเภทที่ 4 (SCM21)	
	ก่อนชุบ	หลังชุบ	ก่อนชุบ	หลังชุบ	ก่อนชุบ	หลังชุบ	ก่อนชุบ	หลังชุบ
0.3	226	580	203	594	276	610	156	258
0.5	241	600	201	580	280	677	158	266
0.8	240	590	202	569	280	666	155	242
1.0	238	580	203	552	285	642	155	230
1.3	230	555	201	495	280	652	154	228
1.5	213	549	202	460	276	646	154	223
1.8	210	522	201	418	280	588	150	219
2.0	207	502	203	402	280	482	149	216
2.3	210	394	203	298	276	411	149	211
2.5	213	318	204	241	276	296	149	208
3.0	210	224	202	234	266	291	149	205
3.5	211	226	201	223	272	278	147	197
4.0	206	226	202	223	280	350	147	198
4.5	203	236	204	223	270	271	147	195
5.0	201	238	207	222	266	276	152	195
5.5	206	238	204	218	276	291	152	183
6.0	207	236	201	210	276	274	154	183
6.5	201	238	201	213	280	276	147	183
7.0	203	234	201	213	307	298	148	187
7.5	203	236	201	218	266	278	149	176
8.0	205	238	201	225	285	285	156	174
8.5	200	238	202	210	276	280	154	172
9.0	195	249	199	207	285	276	152	172
9.5	205	236	203	207	266	285	149	168
10.0	208	250	187	207	276	307	147	165
10.5	195	238	187	200	285	291	152	165
11.0	200	234	189	200	291	291	149	166

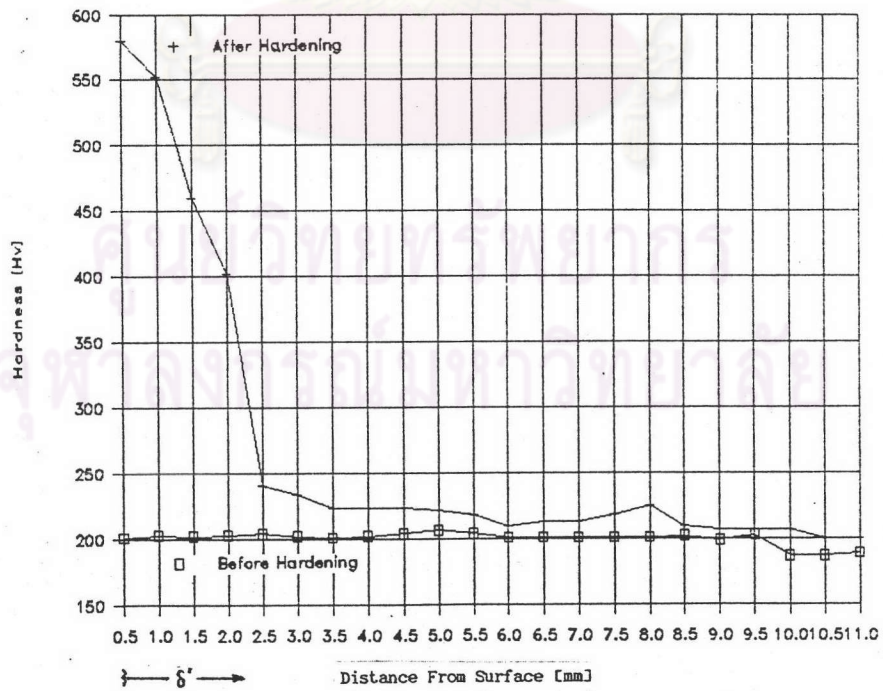
ตารางที่ 5.4 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงาน (Hv) ที่ระยะจากผิวใด ๆ
ของชิ้นงานทั้ง 4 ประเภท

Load Type 1 S50C



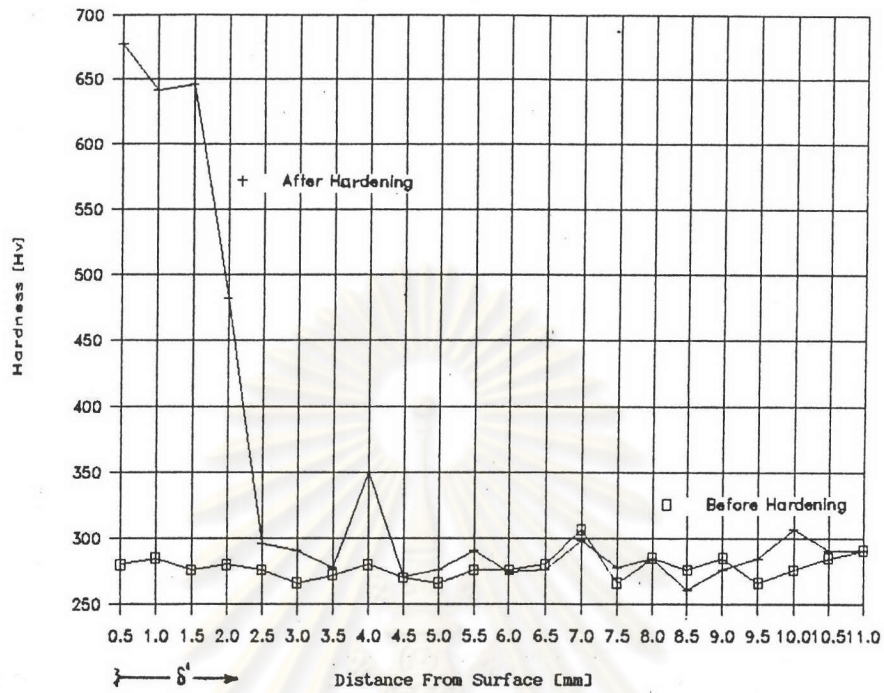
รูปที่ 5.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะจากผิวของชิ้นงานประเภทที่ 1 (S50C)

Load Type 2 S45C



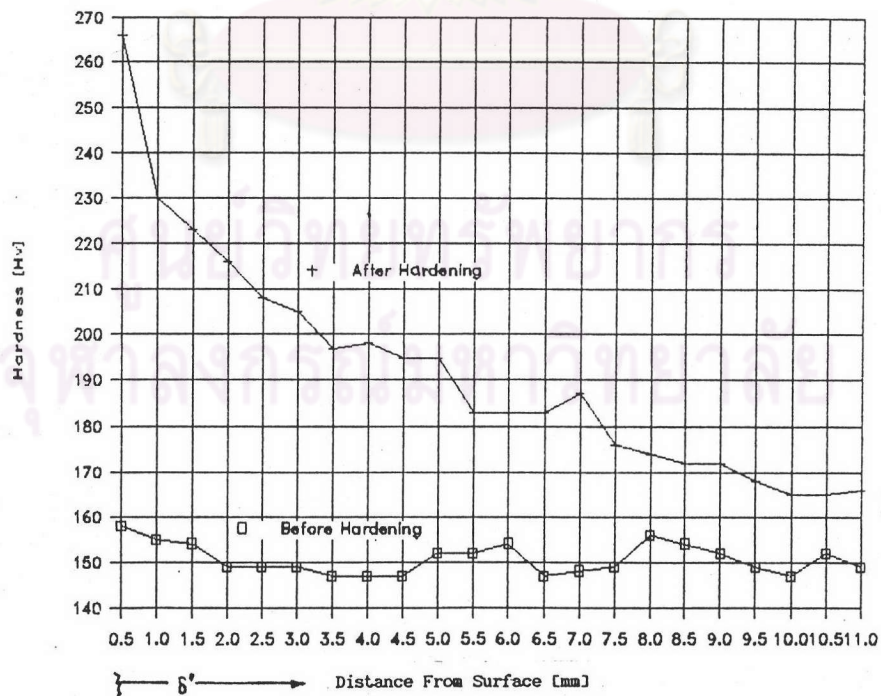
รูปที่ 5.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะจากผิวของชิ้นงานประเภทที่ 2 (S45C)

Load Type 3 SCM4

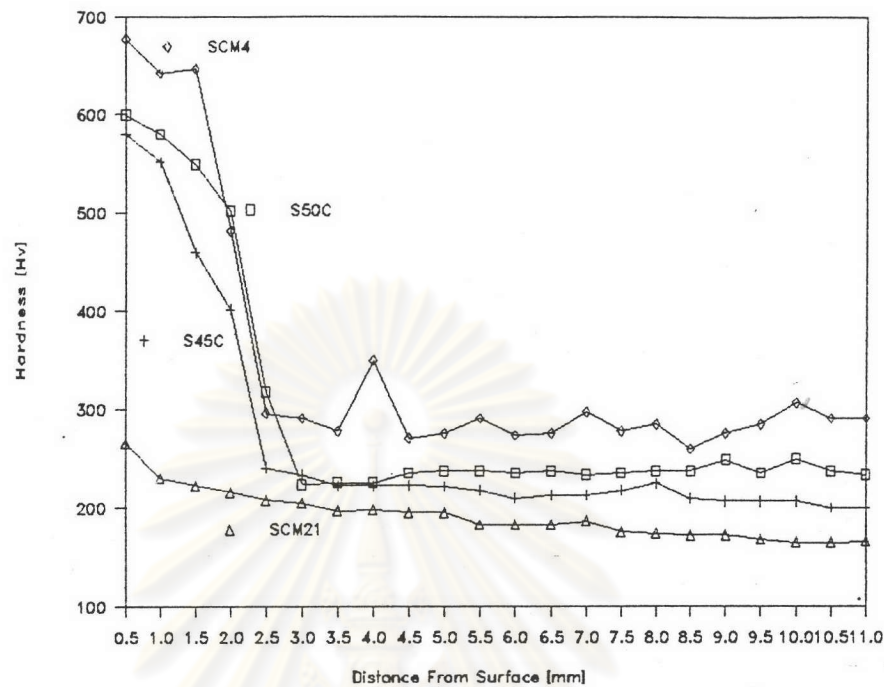


รูปที่ 5.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะจากผิวของชิ้นงานประเภทที่ 3 (SCM4)

Load Type 4 SCM21



รูปที่ 5.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะจากผิวของชิ้นงานประเภทที่ 4 (SCM21)



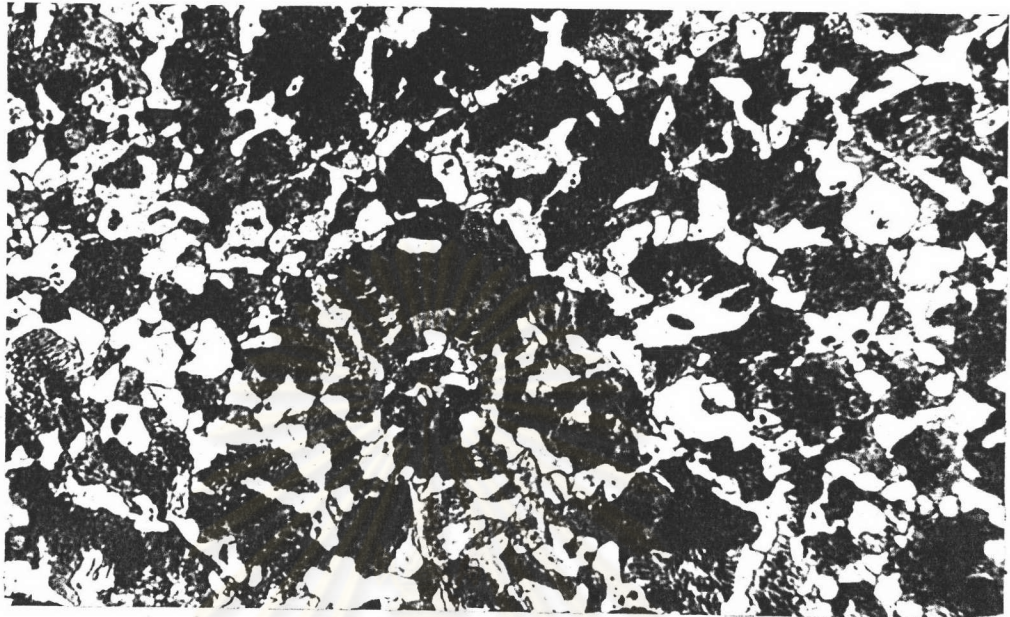
รูปที่ 5.48 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความแข็งของชิ้นงานทั้ง 4 ประเภท หลังผ่านการชุบแข็ง

จากผลการทดสอบ พบว่าความแข็งของชิ้นงานที่ได้ขึ้นกับส่วนประกอบของคาร์บอนในชิ้นงานนั้น ซึ่งจากการทดลองจะเห็นว่าชิ้นงานประเภทที่ 1 มีส่วนประกอบธาตุคาร์บอน 0.5% แต่ชิ้นงานประเภทที่ 2 มีส่วนประกอบธาตุคาร์บอน 0.45% ในขณะที่ส่วนประกอบอื่นมีเปอร์เซ็นต์เท่ากัน ถ้าพิจารณาจากรูปที่ 5.48 พบว่าชิ้นงานประเภทที่ 1 หลังจากการชุบแข็งจะมีความแข็งสูงกว่าชิ้นงานประเภทที่ 2 ในทำนองเดียวกันถ้าพิจารณาชิ้นงานประเภทที่ 3 และประเภทที่ 4 ชิ้นงานทั้งสองมีส่วนประกอบอื่นที่เหมือนกัน เพียงแต่ชิ้นงานประเภทที่ 3 มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนเป็นส่วนประกอบมากกว่า จึงทำให้ชิ้นงานประเภทที่ 3 มีความแข็งมากกว่าชิ้นงานประเภทที่ 4 และจะเห็นได้ว่า ถ้าเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในชิ้นงานมีต่ำเกินไปจะไม่สามารถทำการชุบแข็งได้ นอกจากส่วนประกอบของธาตุคาร์บอนที่เป็นส่วนประกอบของชิ้นงานที่มีผลต่อความแข็งของชิ้นงานแล้ว จากผลการทดสอบพบว่าส่วนประกอบอื่น ก็มีผลต่อความแข็งของชิ้นงานเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ชิ้นงานประเภทที่ 3 จะมีความแข็งมากกว่าชิ้นงานประเภทที่ 1 และ 2 ถึงแม้จะมีเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่เป็นส่วนประกอบน้อยกว่าก็ตาม แต่มีส่วนประกอบอื่นที่มากกว่าเช่น แมงกานีส โครเมียม และโมลิบดีนัม

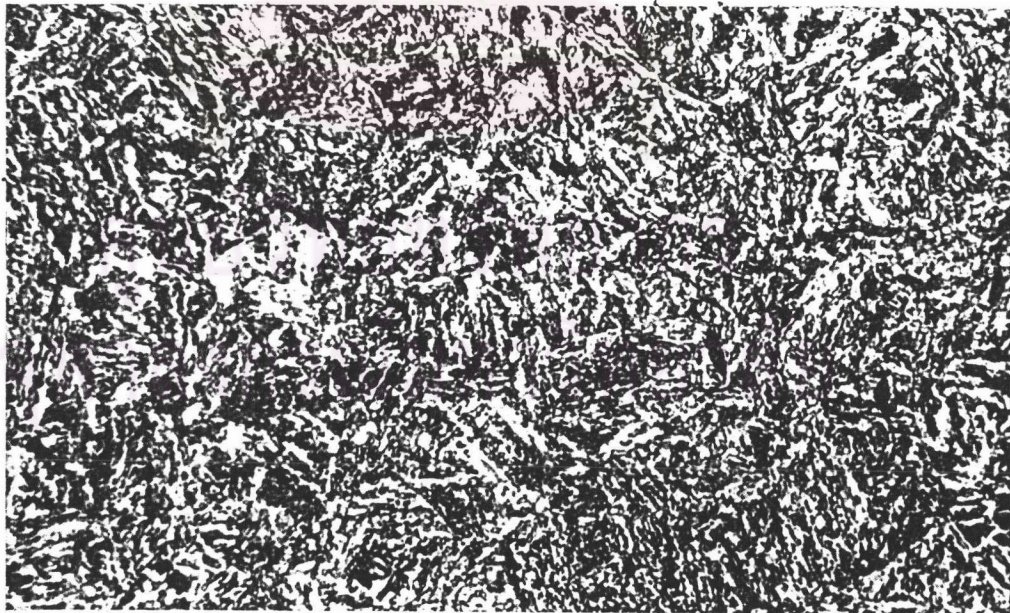
ในการทดสอบความแข็งของชิ้นงานประเภทต่าง ๆ ยังได้ถ่ายภาพโครงสร้างทางโลหะวิทยาของชิ้นงานก่อนการชุบแข็งและหลังการชุบแข็งแสดงไว้ดังรูปที่ 5.49 ถึงรูปที่ 5.56 โดยรูปที่แสดงเป็นภาพขยายขนาด 200 เท่า ซึ่งถ่ายจากชิ้นงานที่ระยะห่างจากผิวประมาณ 0.5 มม. จากรูปถ่ายโครงสร้างทางโลหะจะเห็นว่าเมื่อชิ้นงานผ่านการชุบแข็งแล้วภาพถ่ายโครงสร้างทางโลหะจะมีเกรนที่ละเอียด ซึ่งเป็นลักษณะของโครงสร้างมาร์เทนไซต์รูปที่ 5.53 ถึงรูปที่ 5.55 แต่กรณีของเหล็กชนิด SCM21 (รูปที่ 5.56) ซึ่งเป็นเหล็กเปอร์เซนต์คาร์บอนต่ำที่นำมาทำการชุบแข็งไม่ได้โครงสร้างทางโลหะจึงยังคงเป็นเกรนที่หยาบอยู่ ส่วนภาพถ่ายโครงสร้างของโลหะก่อนการชุบแข็งดังรูปที่ 5.49 ถึงรูปที่ 5.52 จะเป็นเกรนที่หยาบซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างของเฟอร์ไรต์ และเพอร์ไรท์ ซึ่งเป็นโครงสร้างจุลภาคเดิมของโลหะชิ้นงาน



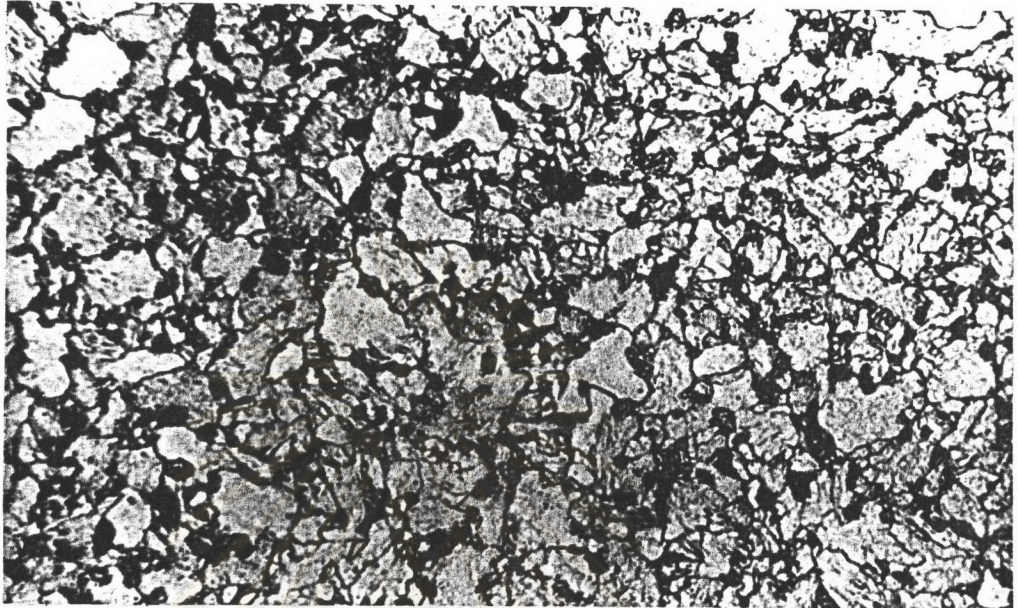
รูปที่ 5.49 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กประเภทที่ 1 (S50C) ก่อนการชุบแข็ง (ภาพขยาย 200 เท่า)



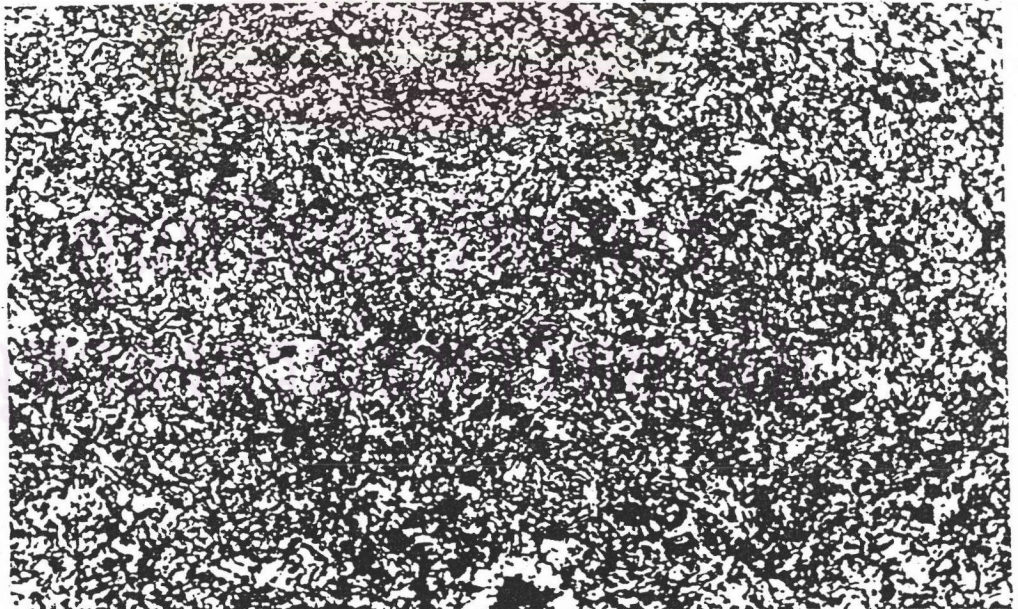
รูปที่ 5.50 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กประเภทที่ 2 (S45C) ก่อนการชุบแข็ง
(ภาพขยาย 200 เท่า)



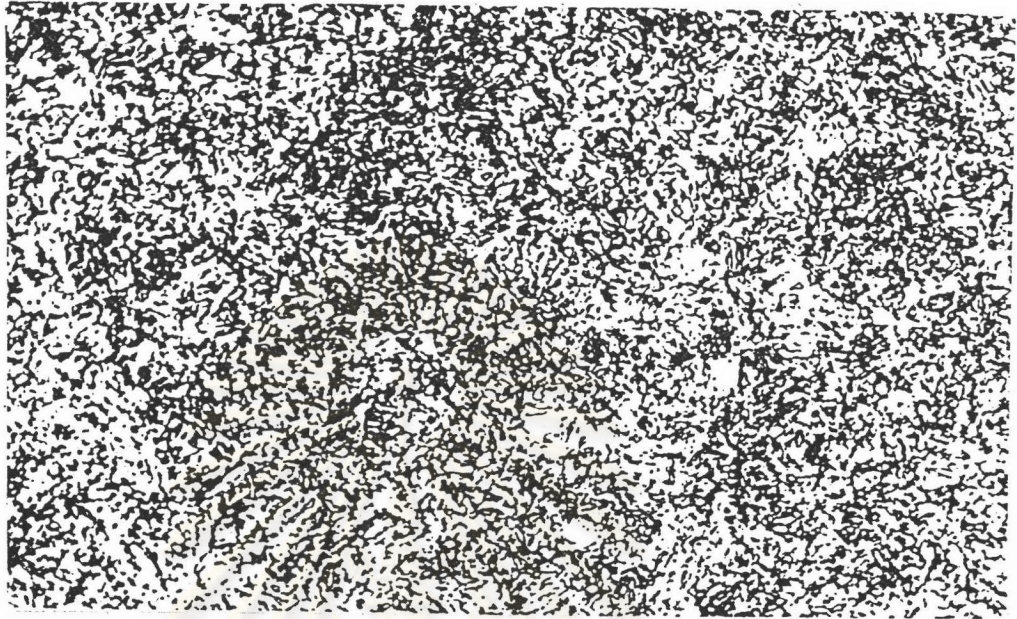
รูปที่ 5.51 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กประเภทที่ 3 (SCM4) ก่อนการชุบแข็ง
(ภาพขยาย 200 เท่า)



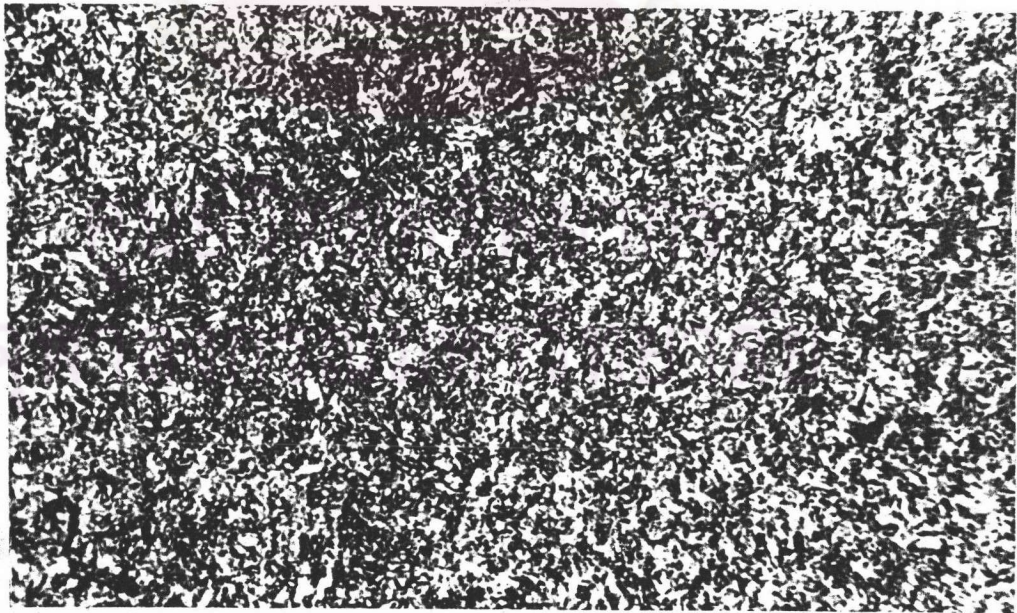
รูปที่ 5.52 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กประเภทที่ 4 (SCM21) ก่อนการชุบแข็ง
(ภาพขยาย 200 เท่า)



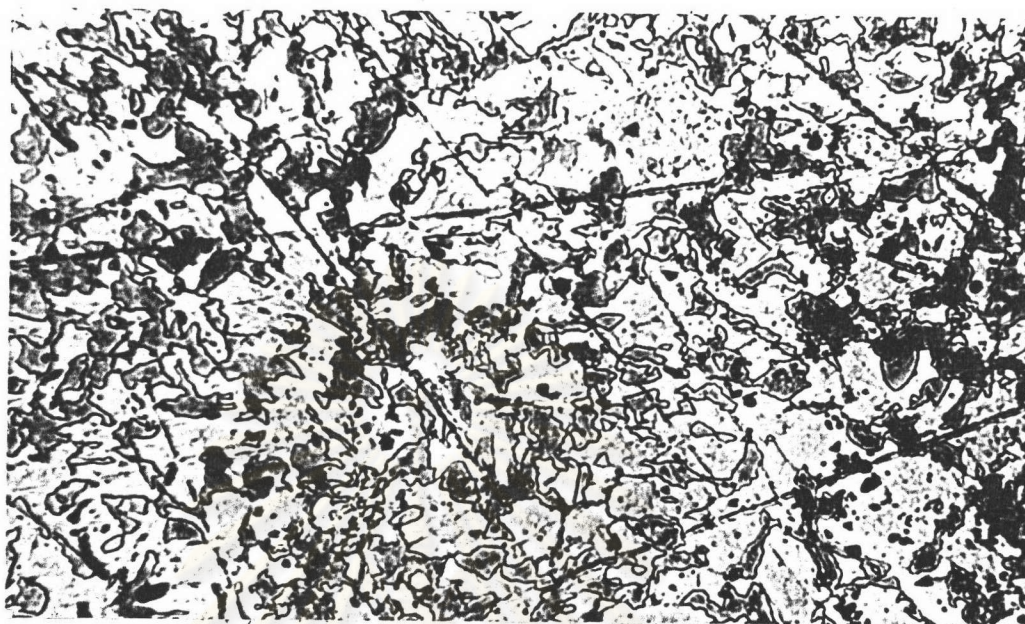
รูปที่ 5.53 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กประเภทที่ 1 (S50C) หลังการชุบแข็ง
(ภาพขยาย 200 เท่า)



รูปที่ 5.54 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กประเภทที่ 2 (S45C) หลังการชุบแข็ง (ภาพขยาย 200 เท่า)



รูปที่ 5.55 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กประเภทที่ 3 (SCM4) หลังการชุบแข็ง (ภาพขยาย 200 เท่า)



รูปที่ 5.56 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กประเภทที่ 4 (SCM21) หลังการชุบแข็ง
(ภาพขยาย 200 เท่า)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย