บทที่ 5

การทดสอบวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง และการขนาน

จากข้อกำหนดของชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง และระบบการขนานชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ตามขอบเขตการวิจัยดังได้กล่าวมาแล้ว ได้ออกแบบ และสร้างชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง จากนั้นจึงได้นำมาต่อขนานกันตามรายละเอียดในบทที่ 3 และ 4 เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติของชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง และระบบที่ได้จาก การขนานชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ที่สร้างขึ้น จึงได้มีการวัดคุณสมบัติของชุดวงจร และระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรที่สร้างขึ้นเพื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการออกแบบการคำนวณทางทฤษฎี ตลอดจนการจำลองการทำงานของชุดวงจร และระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรด้วยคอมพิวเตอร์ การทดสอบแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง และการทดสอบระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

5.1 การทดสอบชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

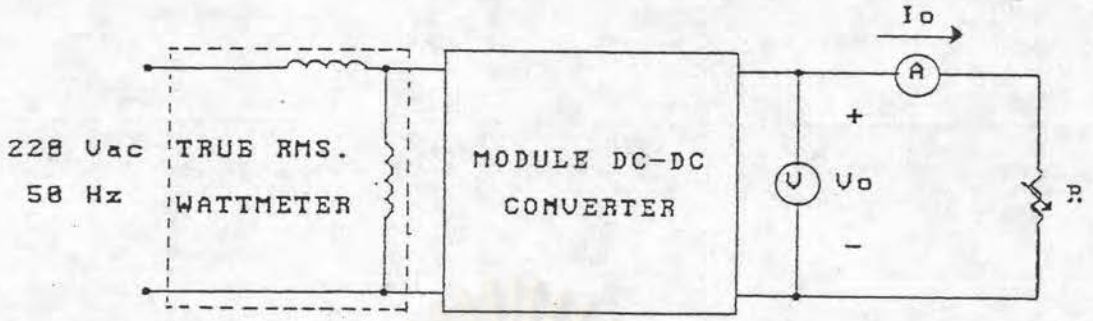
เป็นการทดสอบคุณสมบัติของชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ที่สร้างขึ้นมาแต่ละชุดก่อนที่จะนำมาขนานกัน การทดสอบจะทำโดยป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ทางด้านเข้าและใช้เป็นโหลดตัวต้านทานปรับค่าได้ โดยมีการทดสอบในสถานะต่าง ๆ ดังนี้ คือ

5.1.1 การทดสอบคุณสมบัติในสถานะอยู่ตัว (steady state characteristics) เป็นการทดสอบหาคุณสมบัติต่าง ๆ ของชุดวงจรในสถานะอยู่ตัว ได้แก่ ประสิทธิภาพ ความเป็นเชิงเส้น การคงค่ากระแสออก ตลอดจนการกระเพื่อมของกระแสออก และแรงดันออกของชุดวงจร ในการทดสอบนี้ได้ทดสอบถึงพิกัดสูงสุดของแรงดันออกเท่ากับ 30 โวลต์ และพิกัดสูงสุดของกระแสออกเท่ากับ 20 แอมแปร์ โดยมีการต่อวงจรดังรูปที่ 5.1

การปรับค่าของแรงดันออก และกระแสออกของชุดวงจร ทำได้โดยการปรับค่าแรงดันคำสั่งกระแสซึ่งอยู่ภายในชุดวงจร ร่วมกับการปรับค่าความต้านทานของโหลด

5.1.1.1 การทดสอบประสิทธิภาพ (η) เป็นการทดสอบหาอัตราส่วนระหว่างกำลังออก (P_o) ต่อกำลังงานเข้า (P_{in}) ของชุดวงจร ตามสมการ (5.1)

$$\eta = (P_o/P_{in}) \times 100\% \qquad (5.1)$$



รูปที่ 5.1 วงจรที่ใช้ในการทดสอบ

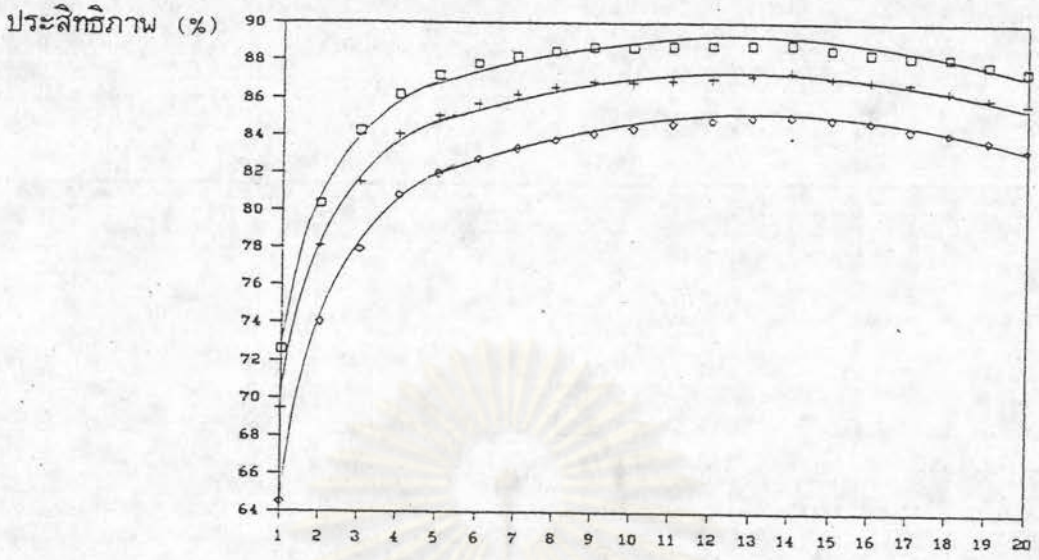
การวัดกำลังออกทำโดยการวัดกระแสออก และแรงดันออกของชุดวงจร โดยใช้แอมมิเตอร์ และโวลต์มิเตอร์กระแสตรง กำลังออกของชุดวงจร (P_o) มีค่าเท่ากับผลคูณของกระแสออก และแรงดันออก ตามสมการ (5.2)

$$P_o = I_o \times V_o \qquad (5.2)$$

การวัดกำลังงานเข้ารวมจำเป็นต้องใช้ true rms. wattmeter ในการวัด เนื่องจากชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง มีวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และมีตัวเก็บประจุทำหน้าที่เป็นวงจรกรอง ทำให้กระแสด้านเข้าของชุดวงจรมีลักษณะรูปคลื่นที่ไม่ใช่ไซน์ เนื่องจากประสิทธิภาพของชุดวงจรจะขึ้นกับค่าของกระแสออก และแรงดันออก ดังนั้นจึงได้มีการทดสอบ หาประสิทธิภาพของชุดวงจรที่กระแสออก และแรงดันออก ที่ค่าต่าง ๆ ดังในรูปที่ 5.2

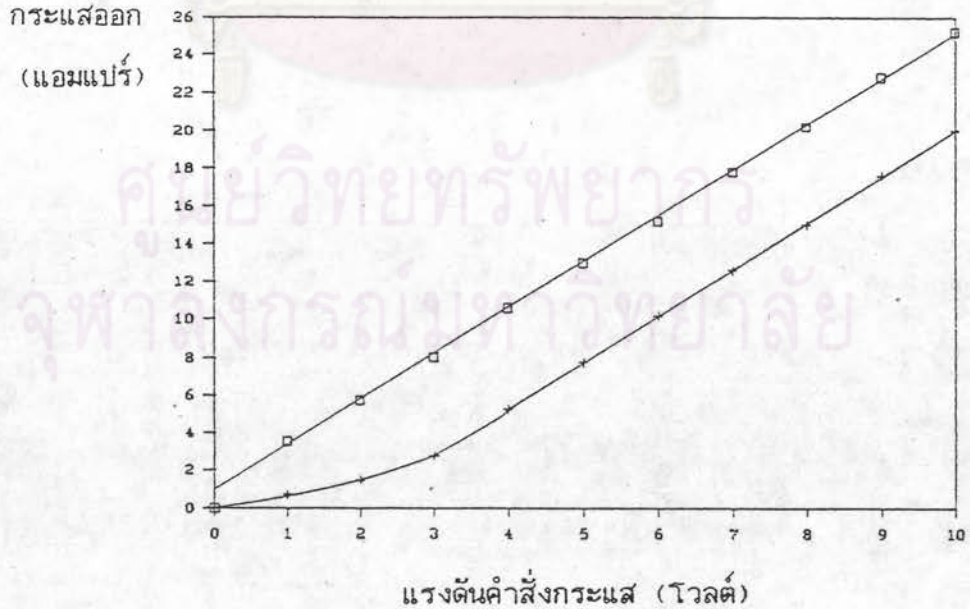
จากผลการทดสอบในรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของชุดวงจรเพิ่มขึ้น เมื่อกระแสออกเพิ่มขึ้น จากนั้นมีค่าค่อนข้างคงที่ และลดลงเล็กน้อยเมื่อกระแสออกมีค่าสูง ๆ ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันออกเพิ่ม โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 88.85% ที่กระแสออก 14 แอมแปร์ แรงดันออก 30 โวลต์ การที่ประสิทธิภาพของชุดวงจรเพิ่มเมื่อกระแสออกเพิ่ม จากนั้นมีค่าคงที่ และลดลงเล็กน้อย เพราะกำลังสูญเสียภายในชุดวงจรที่แรงดันออกเท่ากันจะมีส่วนที่คงที่ และส่วนที่ขึ้นกับกระแสออกค่อนข้างมาก ซึ่งก็คือกำลังสูญเสียในเส้นลวด นอกจากนั้นกำลังสูญเสียตอนที่สวิตช์กำลังนำกระแสจะมีค่าเพิ่มตามกระแส การที่ประสิทธิภาพลดลงเมื่อแรงดันออกลดลงนั้น เกิดเนื่องจากกำลังสูญเสียในสวิตช์นั้นไม่ได้ลดตามวัฏจักรงานที่ลดลงตามแรงดันออก

5.1.1.2 <u>การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของชุดวงจร</u> (linearity) เป็นการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคำสั่งกระแสกับกระแสออกของชุดวงจร เนื่องจากชุดวงจรจะทำหน้าที่ เป็นแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน โดยแรงดันคำสั่งกระแสทำหน้าที่กำหนดค่ายอดของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ในขณะที่กระแสออกขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยของกระแสในตัว



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงประสิทธิภาพของชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

เหนี่ยวนำ ทำให้กระแสออกสำหรับแรงดันคำสั่งกระแสต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับแรงดันออกด้วย ดังนั้น ในการทดสอบจะทดสอบที่แรงดันออก 30 โวลต์ และที่แรงดันออกตอนลัดวงจรขาออก โดยการปรับค่าแรงดันคำสั่งกระแสตั้งแต่ 0-10 โวลต์ แล้ววัดกระแสออกที่แรงดันคำสั่งกระแสต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.3



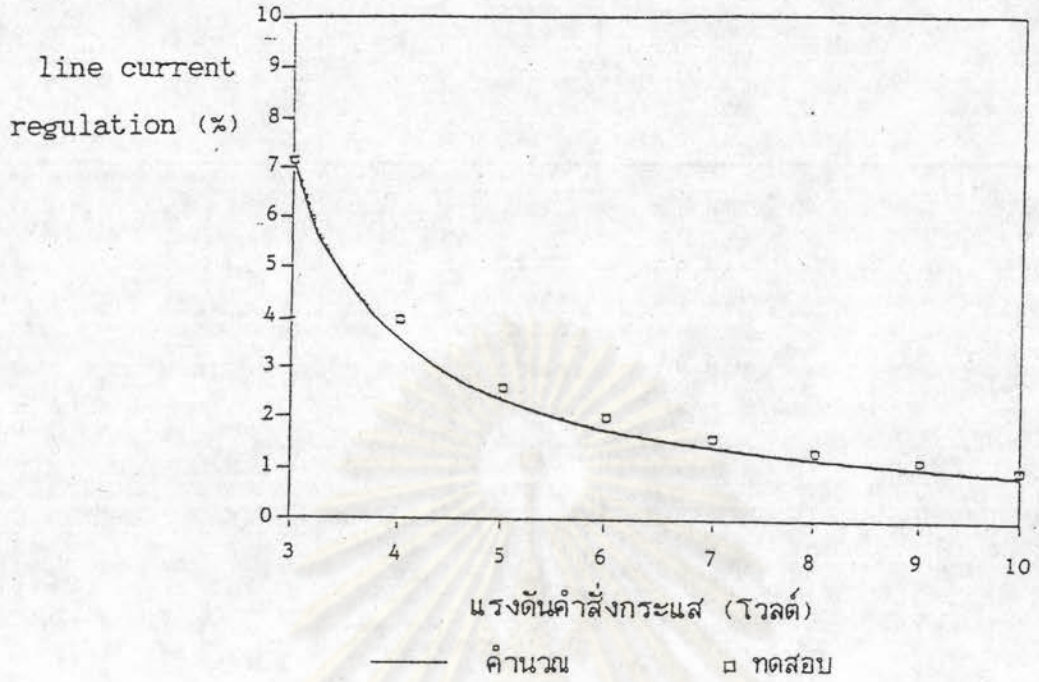
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออก กับแรงดันคำสั่งกระแส

จากรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าที่แรงดันออก 30 โวลต์ นั้น กระแสออกกับแรงดันคำสั่ง กระแสจะมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงแรงดันคำสั่ง 0-3 โวลต์ และมีความเป็นเชิงเส้นในช่วงแรงดันคำสั่ง 3-10 โวลต์ โดยมีความลาดชันประมาณ 2.5 แอมแปร์ต่อโวลต์ ส่วนตอนลัดวงจรขาออก กระแสออกกับแรงดันคำสั่งมีความเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงแรงดันคำสั่ง โดยมีความลาดชันประมาณ 2.5 แอมแปร์ต่อโวลต์ เช่นกัน แต่กระแสออกตอนลัดวงจรมีค่ามากกว่ากระแสออกที่แรงดันออก 30 โวลต์ ประมาณ 5 แอมแปร์ ในช่วงแรงดันคำสั่ง 3-10 โวลต์

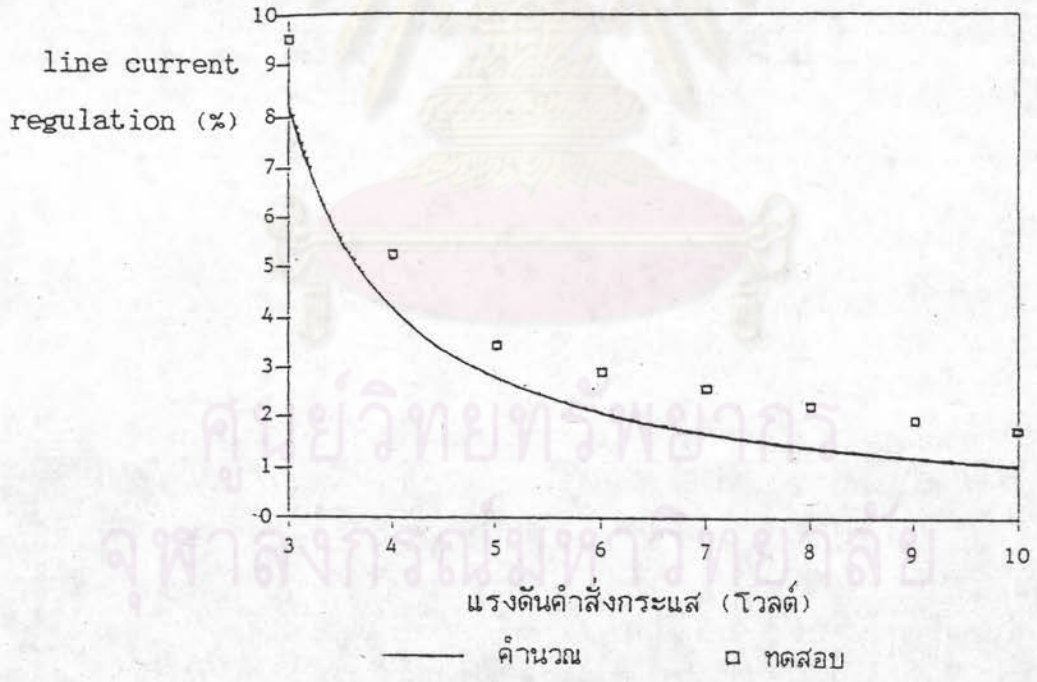
การที่ช่วงแรงดันคำสั่ง 0-3 โวลต์ ที่แรงดันออก 30 โวลต์ กระแสออกกับแรงดันคำสั่งกระแสไม่เป็นเชิงเส้นนั้นเกิดจากการทำงาน ของชุดวงจรอยู่ในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง (discontinuous mode) และในการควบคุมกระแสนั้น แรงดันคำสั่งกระแสทำหน้าที่กำหนดค่ายอดของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ในขณะที่กระแสออกมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นสำหรับแรงดันคำสั่งกระแสค่าหนึ่ง กระแสออกจะลดลงเมื่อการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้น และในการควบคุมมีสัญญาณฟันเลื่อยชดเชยมาลบออกจากแรงดันคำสั่งกระแส ทำให้แรงดันคำสั่งกระแสขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบกระแสมีค่าลดลงเนื่องจากการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้น และแรงดันคำสั่งกระแสที่แท้จริงมีการลดลง เมื่อแรงดันออกเพิ่มขึ้น ดังนั้นกระแสออกในตอนลัดวงจรขาออก จึงมีค่าสูงกว่าเมื่อแรงดันออก 30 โวลต์

5.1.1.3 <u>การทดสอบการคงค่ากระแส</u> (current regulation) การคุมค่ากระแสเป็นปริมาณที่บอกให้ทราบถึงเสถียรภาพของกระแสออก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด หรือแรงดันขาเข้า โหลดของชุดวงจรเมื่อทำงานในภาคกระแส คือ แรงดันออก ได้มีการวัดการคงค่ากระแสเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันขาเข้า และโหลด โดยวัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสออก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันขาเข้า และวัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันขาออก

5.1.1.3.1 <u>การทดสอบการคงค่ากระแสออก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันขาเข้า</u> (line current regulation) การคงค่ากระแสออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันขาเข้า คือ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของกระแสออกของชุดวงจรที่ทำงานในภาคกระแสเมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าเปลี่ยนในช่วง +/- 10% ของแรงดันปกติ (220 โวลต์) การทดสอบจะทำโดยการรักษาแรงดันออกให้คงที่เท่ากับ 30 โวลต์ ขณะที่ปรับแรงดันขาเข้าให้เปลี่ยนแปลง +/- 10% ของแรงดันปกติ แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันขาเข้า ทดสอบที่แรงดันคำสั่ง 3-10 โวลต์ ซึ่งเป็นช่วงที่ชุดวงจรทำงานในภาวะกระแสต่อเนื่อง รูปที่ 5.4 แสดงผลการทดลอง และผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งแสดงในภาคผนวก ข.



ก. กรณีการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้า +10%

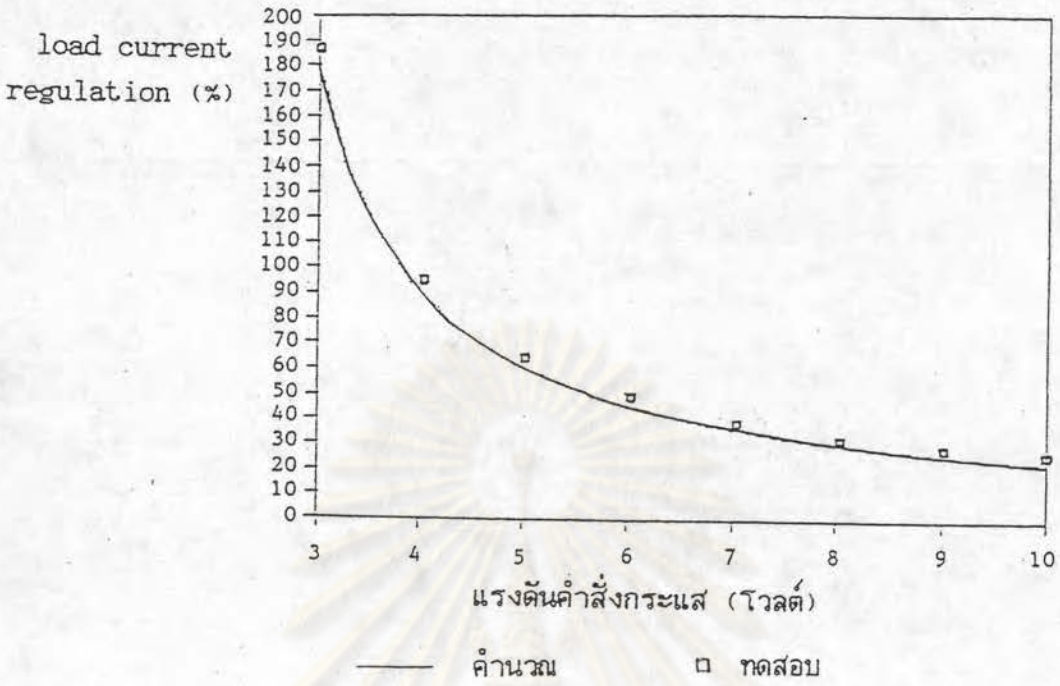


ข. กรณีการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้า -10%

รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง line current regulation กับแรงดันคำสั่งกระแสสำหรับการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้า +/-10% เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี

จากรูปที่ 5.4 ก จะเห็นได้ว่าการคงค่ากระแสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันขาเข้า +10% นั้น ค่าที่ได้จากการทดลอง และการคำนวณจะมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยมี line current regulation ต่ำสุดเมื่อแรงดันคำสั่งกระแส และกระแสออกมีค่าสูงสุด จากผลการทดสอบพบว่ากระแสออกเพิ่มขึ้น 0.2 แอมแปร์ ส่วนผลการคำนวณกระแสออกเพิ่มขึ้น 0.18 แอมแปร์ สำหรับทุกค่าแรงดันคำสั่งกระแส และจากรูป 5.4 ข พบว่าการคงค่ากระแสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันขาเข้า -10% ค่าที่ได้จากการทดลอง และการคำนวณมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยมี current regulation ต่ำสุดเมื่อแรงดันคำสั่งกระแสสูงสุด เช่นเดียวกับการคงค่ากระแส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันขาเข้า +10% จากผลการทดลองพบว่ากระแสออกลดลง 0.3 แอมแปร์ ผลการคำนวณกระแสออกลดลง 0.21 แอมแปร์ สำหรับทุกค่าแรงดันคำสั่ง จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้น และลดลงของกระแสออกคงที่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันขาเข้า +10% และ -10% มีค่าคงที่สำหรับทุกค่าแรงดันคำสั่งกระแส การเปลี่ยนแปลงแรงดันขาเข้า +10% และ -10% จะทำให้วัฏจักรงานมีการลดลง และเพิ่มขึ้นตามลำดับ เพื่อรักษาให้แรงดันออกคงที่ นั่นคือ การเปลี่ยนแปลงของวัฏจักรงานเพิ่มขึ้น หรือลดลงนั้นจะเท่ากันทุกค่าแรงดันคำสั่งกระแส รวมทั้งการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำเท่ากันด้วย นอกจากนั้นในชุดวงจรมีสัญญาณฟันเลื่อนชดเชยคงที่มาลบจากแรงดันคำสั่งกระแส ซึ่งทำให้ค่าแรงดันคำสั่งกระแสแท้จริงที่วัฏจักรงานต่าง ๆ ไม่เท่ากัน แต่ผลต่างของแรงดันคำสั่งที่แท้จริงที่วัฏจักรงานในภาวะเปลี่ยนแปลง +10% และ -10% กับวัฏจักรงานที่แรงดันขาเข้าปกติจะมีค่าเท่ากันทุกแรงดันคำสั่งกระแสจึงทำให้การเพิ่มขึ้น หรือลดลงของกระแสออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันขาเข้า +10% และ -10% มีค่าคงที่

5.1.1.3.2 <u>การทดสอบการคงค่ากระแสออกเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโหลด</u> (load current regulation) การคงค่ากระแสออกเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโหลด คือ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของกระแสออกของชุดวงจรที่ทำงานในภาคกระแสเมื่อแรงดันออกเพิ่มจาก 0 โวลต์ ขึ้นไปสู่ค่าพิกัด โดยมีการรักษาแรงดันคำสั่งกระแสให้คงที่ การทดสอบการคงค่ากระแสออกของชุดวงจร ทำโดยการวัดการลดลงของกระแสออกเมื่อแรงดันออกเพิ่มจาก 0 โวลต์ เป็น 30 โวลต์ เพื่อให้การทำงานของชุดวงจรอยู่ในสภาวะปกติ ที่ความถี่การสวิตช์ 45 กิโลเฮิรตซ์ ค่ากระแสที่แรงดันออกเท่ากับ 0 โวลต์ จะได้จากการประมาณค่านอกช่วง (extrapolate) ไปสู่ค่าแรงดัน 0 โดยจะทำการทดสอบในช่วงแรงดันระหว่าง 15-30 โวลต์ การทดสอบการคงค่ากระแสออกนี้ ได้มีการทดสอบที่แรงดันคำสั่งตั้งแต่ 3 ถึง 10 โวลต์ ซึ่งเป็นช่วงที่ชุดวงจรอยู่ในโหมดกระแสต่อเนื่อง รูปที่ 5.5 แสดงผลการทดลอง และผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งแสดงในภาคผนวก ข.



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง load current regulation กับแรงดันคำสั่งกระแส สำหรับการเปลี่ยนแปลงโหลด เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี

จากรูปที่ 5.5 จะเห็นได้ว่าผลจากการทดลอง และผลจากการคำนวณนั้นมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยมี load current regulation ต่ำสุดเมื่อแรงดันคำสั่งกระแสสูงสุด จากผลการทดลองพบว่ากระแสออกลดลง 4.8 แอมแปร์ และจากผลการคำนวณกระแสออกลดลง 4.5 แอมแปร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดจากแรงดัน 0 โวลต์ เป็น 30 โวลต์ สำหรับทุกค่าแรงดันคำสั่งกระแส การลดลงของกระแสออกมีค่าคงที่ สำหรับทุกค่าแรงดันคำสั่งกระแส เนื่องจากการลดลงของกระแสออกเกิดจากการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ อันเป็นผลจากการเพิ่มของวัฏจักรงานตามแรงดันออก ซึ่งมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันคำสั่งกระแส ส่วนการลดลงของกระแสออกเนื่องจากผลของสัญญาณฟันเลื่อยชดเชยนั้น เพิ่มตามวัฏจักรงานเช่นเดียวกัน ไม่ขึ้นกับค่าแรงดันคำสั่งกระแส

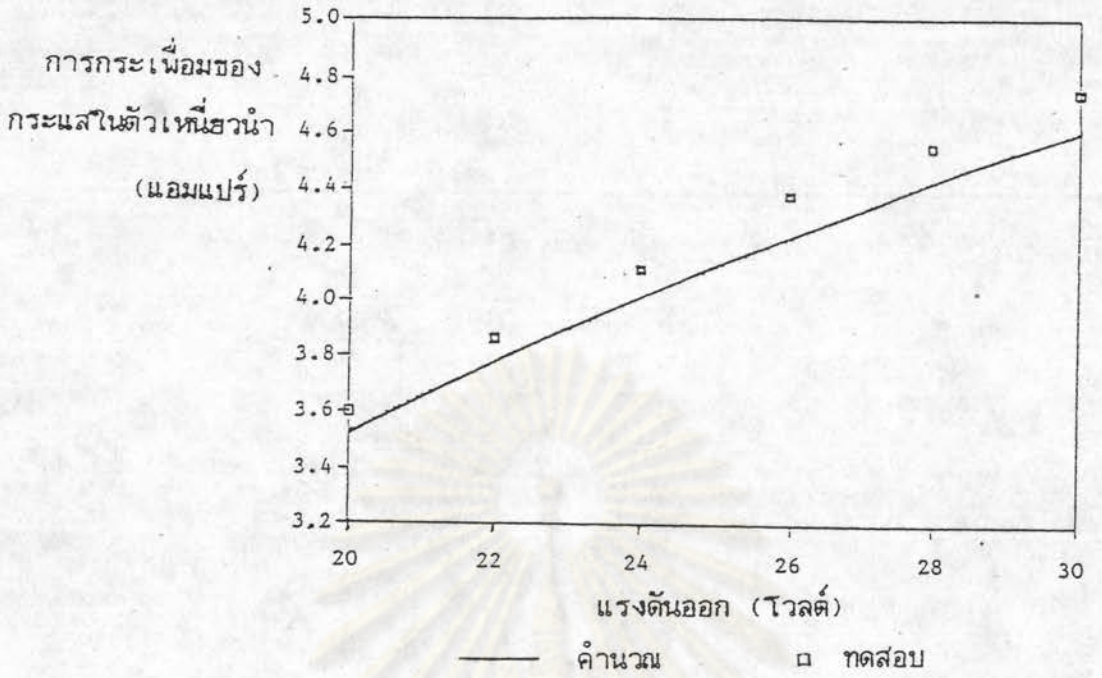
5.1.1.4 <u>การกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ และการกระเพื่อมของแรงดันออก</u> เป็นการวัดการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ และการกระเพื่อมของแรงดันออกที่แรงดันออกต่าง ๆ กัน เนื่องจากการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันออก เมื่อแรงดันขาเข้า และความถี่การสวิตช์คงที่ ส่วนการกระเพื่อมของแรงดันออกนั้นขึ้นกับการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ และขนาดตัวเก็บประจุที่ใช้ เป็นผลให้การกระเพื่อมของแรงดันออกขึ้นอยู่กับแรงดันออกเช่นเดียวกับการกระเพื่อม ของกระแสในตัว

เหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงได้วัดการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำและการกระเพื่อมของแรงดันออกสำหรับค่าแรงดันออกค่าต่าง ๆ กัน ระหว่าง 20 โวลต์ ถึง 30 โวลต์ ซึ่งเป็นภาวะที่การทำงานของชุดวงจรอยู่ในภาวะปกติ ความถี่การสวิตช์ 45 กิโลเฮิรตซ์ แรงดันขาเข้าคงที่ และกระแสออก 20 แอมแปร์ สำหรับผลของกระแสออกต่อการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันออกนั้น จะเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของวัฏจักรงานเพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงของแรงดันออก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงน่าจะมีค่าน้อย และจากการทดสอบพบว่าไม่สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ และการกระเพื่อมของแรงดันออกเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกระแสออกได้ รูปที่ 5.6 แสดงผลการทดลอง และผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งแสดงในภาคผนวก ข.

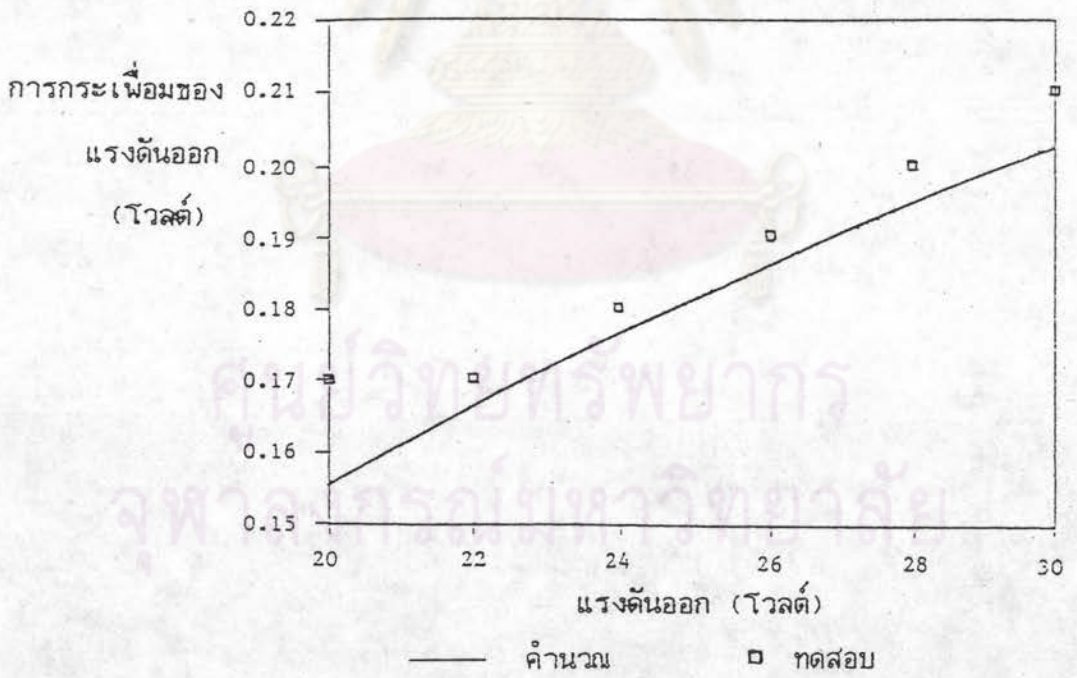
จากรูปที่ 5.6 จะเห็นได้ว่าการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ และการกระเพื่อมของแรงดันออกมีลักษณะคล้ายกัน คือ มีการกระเพื่อมน้อยที่แรงดันออกต่ำ และการกระเพื่อมสูงขึ้นเมื่อแรงดันออกสูงขึ้นคล้ายกับผลการคำนวณทางทฤษฎี การกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันออกมีค่าสูงสุดที่วัฏจักรงานของสวิตช์ประมาณ 0.5 แต่เนื่องจากชุดวงจรใช้วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง แบบกึ่งบริดจ์ไม่สมมาตร ซึ่งวัฏจักรงานของสวิตช์ไม่เกิน 0.5 ดังนั้น การกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันออกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเสมอเมื่อแรงดันออกเพิ่มขึ้นเนื่องจากวัฏจักรงานมีค่าเพิ่มขึ้นสู่ค่า 0.5

5.1.1.5 <u>การกระเพื่อมของกระแสที่ความถี่ 100 เฮิรตซ์</u> เนื่องจากการกระเพื่อมของกระแสออกที่ความถี่ 100 เฮิรตซ์ จะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันกระเพื่อมด้านขาเข้า ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของกำลังออก เมื่อแรงดันขาเข้า และความถี่สวิตช์คงที่ ดังนั้นการวัดการกระเพื่อมของกระแสออกที่ความถี่ 100 เฮิรตซ์ จะทำการวัดที่กระแสออกต่าง ๆ กัน โดยรักษาให้แรงดันออกมีค่าคงที่ 30 โวลต์ รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบกับผลการคำนวณ แสดงผลการทดลอง และผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ของการกระเพื่อมของกระแสที่ความถี่ 100 เฮิรตซ์ ซึ่งแสดงในภาคผนวก ข.

จากรูป 5.7 จะเห็นได้ว่าการกระเพื่อมของกระแสออกที่ความถี่ 100 เฮิรตซ์ มีค่าสูงขึ้นตามกระแสออก หรือกำลังออกสูงขึ้น และมีค่าสอดคล้องกับผลการคำนวณค่าการกระเพื่อมของกระแสออก เนื่องจากการกระเพื่อมของแรงดันขาเข้า

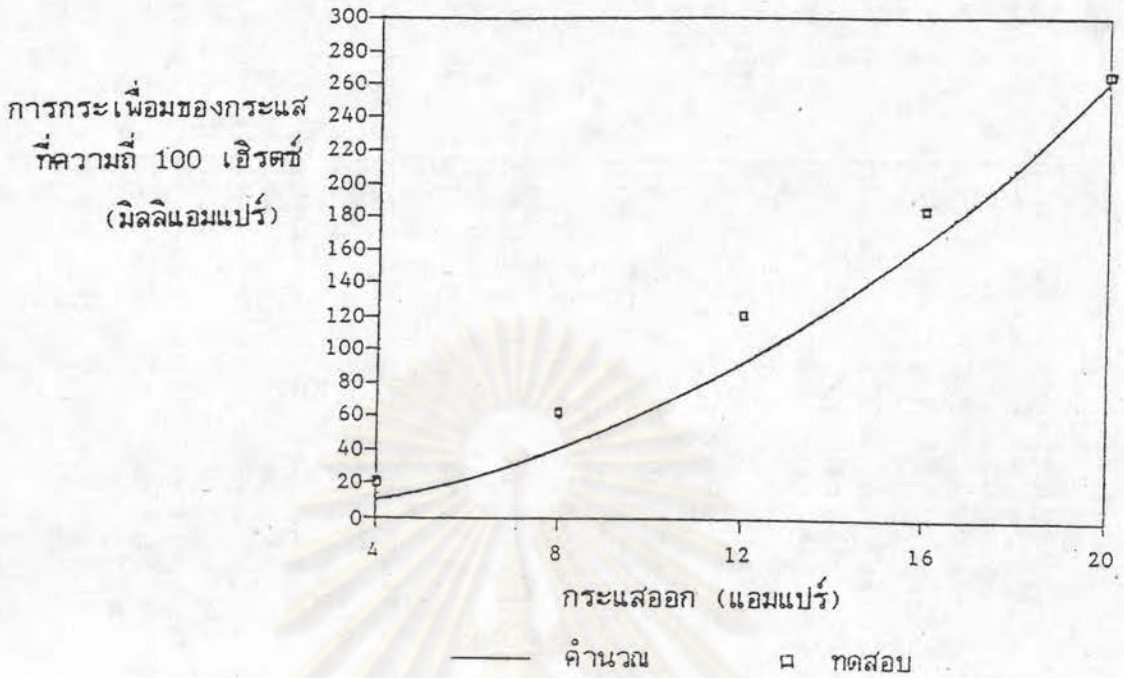


ก. กราฟแสดงการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำที่แรงดันออกค่าต่าง ๆ



ข. กราฟแสดงการกระเพื่อมของแรงดันออกที่แรงดันออกต่าง ๆ กัน

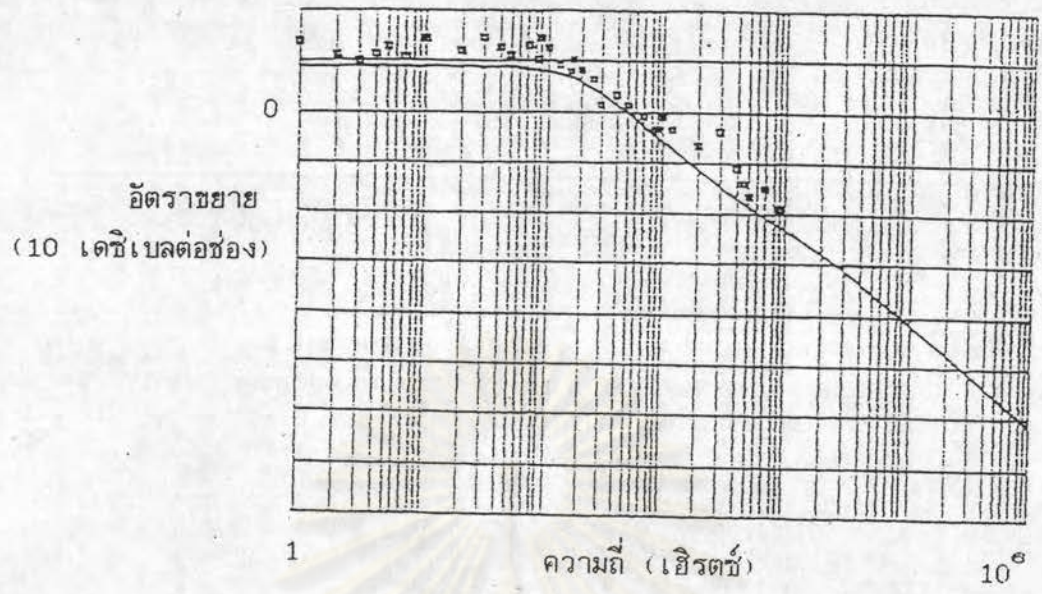
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ
และการกระเพื่อมของแรงดันออกที่แรงดันออกค่าต่าง ๆ



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงการกระเพื่อมของกระแสออกที่ความถี่ 100 เฮิรตซ์ ที่กระแสออกค่าต่าง ๆ กัน เปรียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี

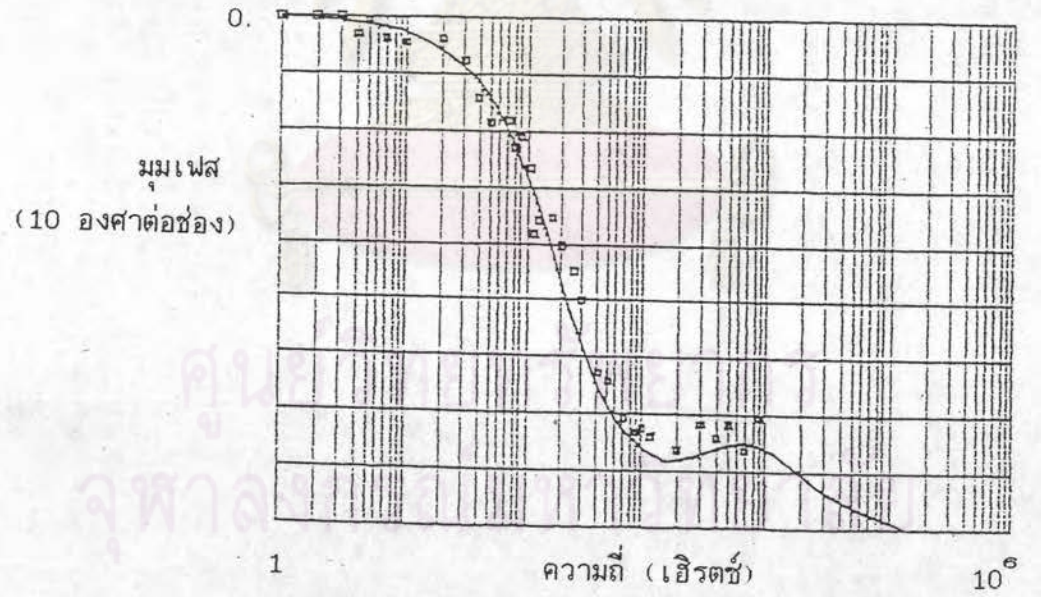
5.1.2 <u>การวัดผลตอบเชิงความถี่ของแรงดันควบคุมกระแส ($\hat{v}_c$) กับแรงดันออก ($\hat{v}_o$)</u> การวัดผลตอบเชิงความถี่ของแรงดันควบคุมกระแสกับแรงดันออก เป็นการวัดฟังก์ชันโอนย้ายสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก ระหว่างแรงดันควบคุมกระแส ($\hat{v}_c$) กับแรงดันออก ($\hat{v}_o$) เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้กับการคำนวณหาผลตอบทางทฤษฎี ในหัวข้อที่ 3.3 การทดสอบทำโดยป้อนสัญญาณควบคุมกระแสจากวงจรภายนอก โดยสัญญาณนี้จะเป็นสัญญาณไซน์ผสมอยู่บนแรงดันไฟตรง สัญญาณไซน์นี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ทั้งความถี่ และขนาด โดยการทดสอบที่แรงดันออก 30 โวลต์ กระแสออก 20 แอมแปร์ ซึ่งมีวัฏจักรงานประมาณ 0.3 ส่วนแรงดันควบคุมกระแส มีขนาดสัญญาณไซน์ประมาณ 0.4 โวลต์ (ยอดถึงยอด) ผสมกับแรงดันไฟตรง 10 โวลต์ ซึ่งแสดงรูปวงจรการทดลองในภาคผนวก ค. รูปที่ 5.8 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎีของฟังก์ชันโอนย้ายทั้งขนาด และเฟสของแรงดันออก ($\hat{v}_o$) กับแรงดันอ้างอิงของกระแส ($\hat{v}_c$)

จะเห็นได้ว่าผลการทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณทางทฤษฎี โดยมีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย คาดว่าเกิดจากความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ และการวัด ทั้งนี้เพราะสัญญาณออกมีขนาดเล็กมาก นอกจากนั้นยังมีสัญญาณความถี่ 100 เฮิรตซ์ ซึ่งมีขนาดใหญ่ผสมอยู่ด้วย



—— คำนวณ ▫ ทดสอบ

ก. อัตราขยาย



—— คำนวณ ▫ ทดสอบ

ข. มุมเฟส

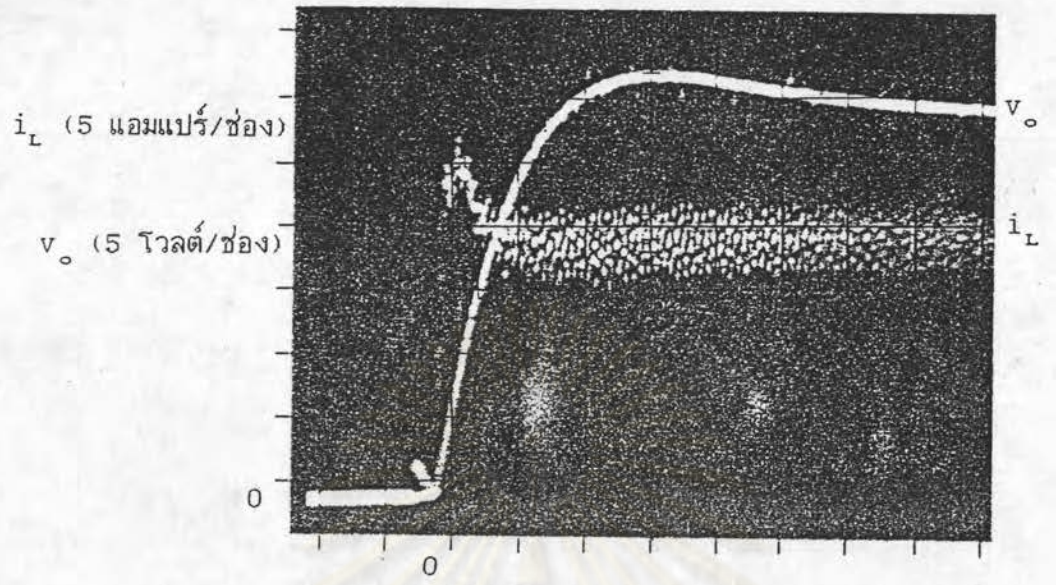
รูปที่ 5.8 ผลตอบเชิงความถี่ของ v_o/v_c ที่วัฏจักรงาน 0.3 เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1.3 <u>การทดสอบผลตอบสนองพลวัต (dynamic characteristics) ของชุดวงจร</u> การทดสอบผลตอบสนองพลวัตจะบอกให้ทราบถึงความเร็ว และลักษณะของการตอบสนองของชุดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในชุดวงจร ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงแรงดันคำสั่งกระแสและการเปลี่ยนแปลงของโหลด การทดสอบผลตอบสนองพลวัตเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันคำสั่งกระแสนั้น จะใช้สัญญาณแบบขั้น (step function) โดยรักษาโหลดให้คงที่ในการทดสอบ ส่วนการทดสอบผลตอบสนองพลวัตเนื่องจากการเปลี่ยนโหลด จะทำโดยการเปลี่ยนโหลดที่เป็นความต้านทาน เพื่อให้กำลังออกของชุดวงจรเพิ่มจาก 0 เปอร์เซ็นต์ เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ และลดจาก 100 เปอร์เซ็นต์ เป็น 0 เปอร์เซ็นต์ โดยรักษาแรงดันคำสั่งให้คงที่ ในการทดสอบผลตอบสนองพลวัตของชุดวงจร จะกำหนดให้ชุดวงจรทำงานเหมือนเป็นแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน กล่าวคือ กระแสออกถูกควบคุมด้วยแรงดันตั้งค่า ส่วนแรงดันออกของชุดวงจรนั้นจะขึ้นอยู่กับกระแสออก และโหลด ดังนั้นการทดสอบผลตอบสนองพลวัตของชุดวงจรในภาคกระแสจะประกอบด้วย การทดสอบหาผลตอบของชุดวงจรต่อแรงดันคำสั่งกระแสแบบขั้น และผลตอบของชุดวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันออก ทำโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานแบบปรับค่าได้ เนื่องจากโหลดไม่ใช่ตัวต้านทานที่แท้จริงแต่มีค่าความเหนี่ยวนำอยู่ด้วย ดังนั้นเพื่อให้เปรียบเทียบผลการทดลองกับการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ จึงบรรจุค่าความเหนี่ยวนำที่มีผลเข้าไปในแบบจำลองการทำงานของวงจร ด้วยคอมพิวเตอร์ด้วย จากนั้นบันทึกรูปคลื่นของแรงดันออก กระแสออก และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ

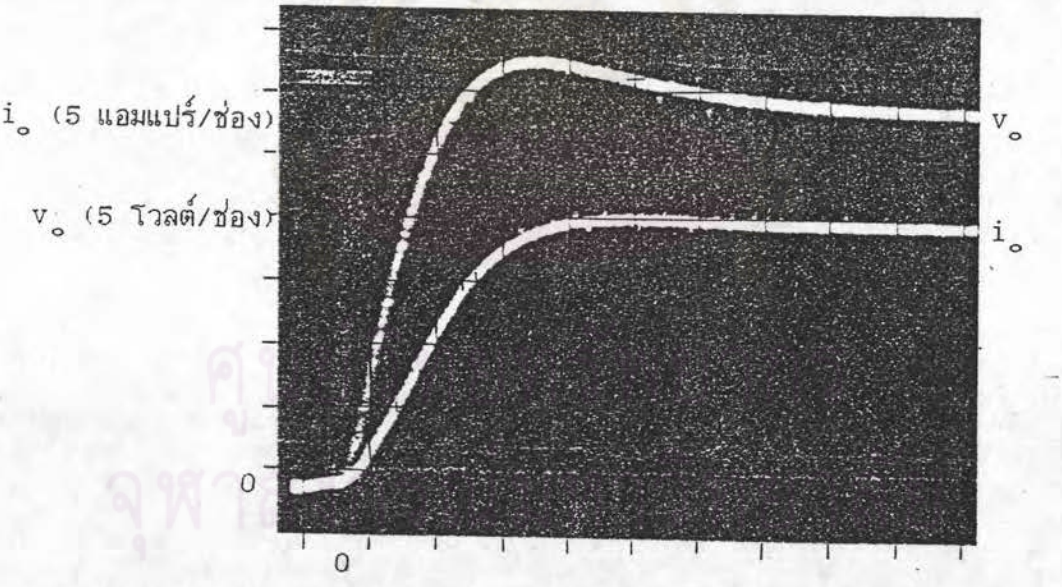
5.1.3.1 <u>ผลตอบต่อแรงดันคำสั่งแบบขั้น</u> (step response) การทดสอบผลตอบของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ กระแสออกและแรงดันออกของชุดวงจรต่อแรงดันคำสั่งกระแสแบบขั้นประกอบด้วย การป้อนแรงดันคำสั่งกระแสแบบขั้นจาก 0 เป็น 10 โวลต์ และการป้อนแรงดันคำสั่งกระแสจาก 10 เป็น 0 โวลต์ โดยการทดสอบที่แรงดันออก 30 โวลต์ กระแสออก 20 แอมแปร์ แล้วบันทึกรูปคลื่น ได้ผลดังรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10

จากรูปที่ 5.9 ก แสดงรูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (i_L) และรูปที่ 5.9 ข แสดงรูปคลื่นของแรงดันออก (v_o) และกระแสออก (i_o) เมื่อแรงดันคำสั่งควบคุมกระแสเพิ่มจาก 0 โวลต์ เป็น 10 โวลต์ กระแสในตัวเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นเพื่อให้ได้ตามแรงดันคำสั่งกระแสอย่างรวดเร็ว ส่วนกระแสออกและแรงดันออกจะเพิ่มขึ้นสู่ค่าภาวะอยู่ตัวโดยมีเวลาขึ้น (rise time) ของกระแสออกเท่ากับ 2.3 ms และเวลาขึ้นของแรงดันออกเท่ากับ 2 ms รูปที่ 3.25 ก และ รูปที่ 3.25 ข แสดงผลตอบต่อแรงดันคำสั่งกระแสแบบขั้นจาก 0 โวลต์ เป็น 10 โวลต์ ของกระแสออก แรงดันออก และกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร ที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ TUTSIM [TUTSIM, 1986] กระแสออกมีเวลาขึ้นเท่ากับ 1.8 ms และแรงดันออกมีเวลาขึ้นเท่ากับ 1.5 ms จะเห็นได้ว่า



สเกลเวลา 1 มิลลิวินาที/ช่อง

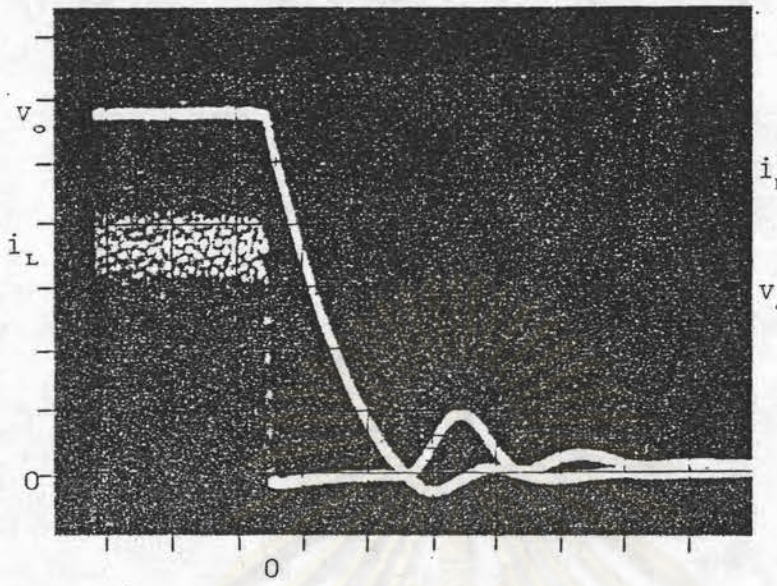
ก. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o)และกระแสในตัวเหนี่ยว (i_L)



สเกลเวลา 1 มิลลิวินาที/ช่อง

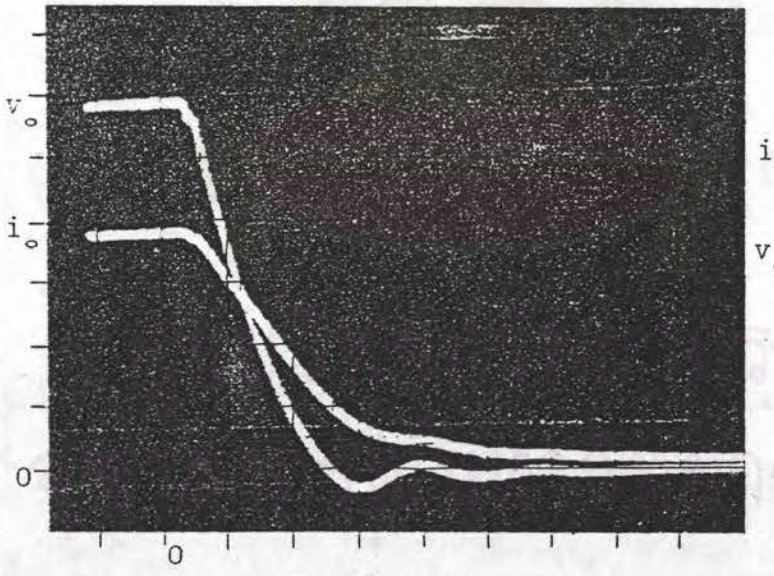
ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออก (i_o)

รูปที่ 5.9 ผลการวัดรูปคลื่นต่าง ๆ เมื่อชุดวงจรทำงานในภาคกระแส
โดยเปลี่ยนแรงดันคำสั่งกระแสแบบขั้นจาก 0 โวลต์ เป็น 10 โวลต์



สเกลเวลา 1 มิลลิวินาที/ช่อง

ก. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (i_L)



สเกลเวลา 1 มิลลิวินาที/ช่อง

ข. แสดงรูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออก (i_o)

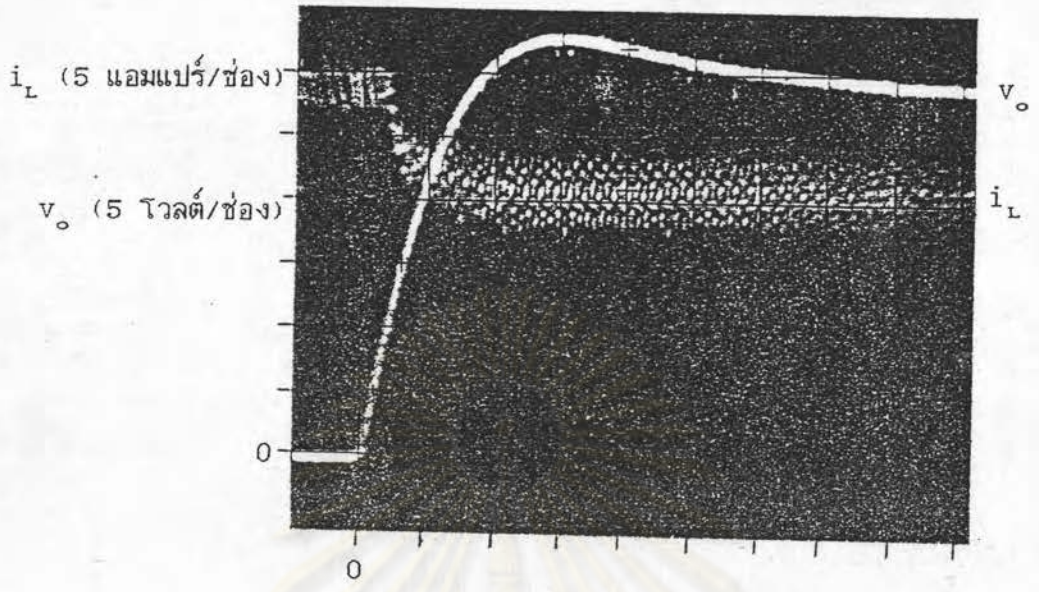
รูปที่ 5.10 ผลการวัดรูปคลื่นต่าง ๆ เมื่อชุดวงจรทำงานในภาคกระแส
โดยเปลี่ยนแรงดันคำสั่งแบบขั้นจาก 10 โวลต์ เป็น 0 โวลต์

ผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์มีรูปร่างใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีเวลาขึ้นแตกต่างกันเล็กน้อยและจากรูปที่ 5.9.ก กระแสในตัวเหนี่ยวนำจะเข้าสู่ค่ากระแสลัดวงจร ในตอนที่แรงดันออกมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อแรงดันออกเพิ่มขึ้น กระแสในตัวเหนี่ยวนำลดลงมาสู่ค่าแรงดันคำสั่งกระแส และเวลาขึ้นของกระแสออกจะช้ากว่าเวลาขึ้นของแรงดันออก เพราะว่าโหลดความต้านทานมีค่าเหนี่ยวนำดังได้กล่าวมาแล้ว

รูปที่ 5.10 ก แสดงรูปคลื่นของแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ(i_L) และรูปที่ 5.10 ข แสดงรูปคลื่นของแรงดันออก และกระแสออก เมื่อแรงดันคำสั่งควบคุมกระแสลดจาก 10 โวลต์ เป็น 0 โวลต์ กระแสในตัวเหนี่ยวนำจะลดลงตามแรงดันคำสั่งกระแสอย่างรวดเร็ว ส่วนกระแสออก และแรงดันออกจะลดลง โดยเวลาลง (fall time) ของกระแสออกเท่ากับ 2.3 ms และเวลาลงของแรงดันออกเท่ากับ 2 ms รูปที่ 3.26 ก และ 3.26 ข แสดงผลตอบต่อแรงดันคำสั่งกระแสแบบขั้นจาก 10 โวลต์ เป็น 0 โวลต์ ของกระแสออก แรงดันออกและกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร ที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ โดยมีเวลาลงของกระแสออกเท่ากับ 1.8 ms และเวลาลงของแรงดันออกเท่ากับ 1.5 ms จะเห็นได้ว่าผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ มีรูปร่างใกล้เคียงกับผลที่ได้จากผลการทดลอง โดยมีเวลาแตกต่างกันเล็กน้อย และจากรูปคลื่นที่ได้ แรงดันออกมี undershoot เนื่องจากผลของโหลดความต้านทานที่ใช้มีความเหนี่ยวนำอยู่ด้วย

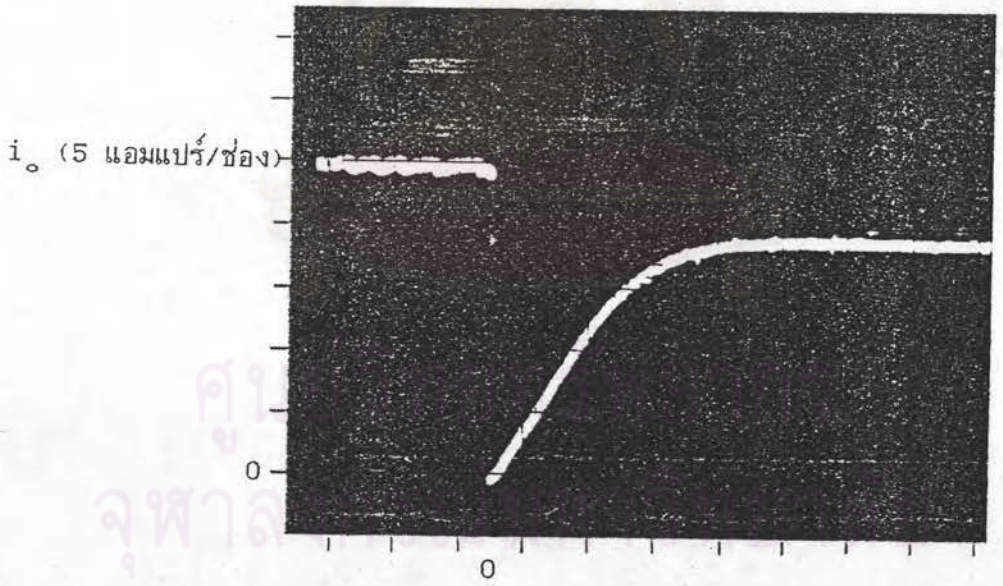
5.1.3.2 <u>ผลตอบต่อการเปลี่ยนโหลดแบบขั้น</u> (step load) การทดสอบหาผลตอบต่อการเพิ่ม และลดโหลดแบบขั้น ทำโดยให้ชุดวงจรทำงานในภาวะให้แรงดันออกมีค่าประมาณ 0 โวลต์ คือ ภาวะลัดวงจรด้านขาออก หรือให้แรงดันออกเท่ากับพิกัด 30 โวลต์ จากนั้นเพิ่ม หรือลดความต้านทานของโหลด ให้แรงดันออกอยู่ในสถานะอยู่ตัวเท่ากับพิกัด 30 โวลต์ หรือ 0 โวลต์ โดยการทดลองนี้จะให้แรงดันคำสั่งกระแสเท่ากับ 10 โวลต์ เพื่อให้กระแสออกเท่ากับ 20 แอมแปร์ แล้วบันทึกรูปคลื่นได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.12

จากรูปที่ 5.11 ก แสดงรูปคลื่นของแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (i_L) และรูปที่ 5.11 ข แสดงรูปคลื่นของแรงดันออก (v_o) และกระแสออก (i_o) เมื่อแรงดันออกเพิ่มจาก 0 โวลต์ เป็น 30 โวลต์ จะเห็นได้ว่าขณะที่แรงดันออกประมาณ 0 โวลต์ กระแสในตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าค่อนข้างสูง คือ มีค่าเฉลี่ยประมาณ 25 แอมแปร์ เมื่อเพิ่มโหลดให้แรงดันออกเป็น 30 โวลต์ กระแสในตัวเหนี่ยวนำจะลดลงเพื่อให้มีค่าเท่ากับแรงดันคำสั่งกระแสให้กระแสออกเท่ากับ 20 แอมแปร์ ซึ่งกระแสออกจะลดลงเป็น 0 จากนั้นค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเข้าสู่ภาวะอยู่ตัว มีเวลาขึ้นประมาณ 2.5 ms ส่วนแรงดันออกนั้นจะเพิ่มขึ้นเข้าสู่ภาวะอยู่ตัว โดยมีเวลาขึ้นของแรงดัน 2 ms รูปที่ 3.27 ก และรูปที่ 3.27 ข แสดงผลตอบต่อการเปลี่ยนโหลดแบบขั้น ที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ มีรูปร่างใกล้เคียงกับผลที่ได้



สเกลเวลา 1 มิลลิวินาที/ช่อง

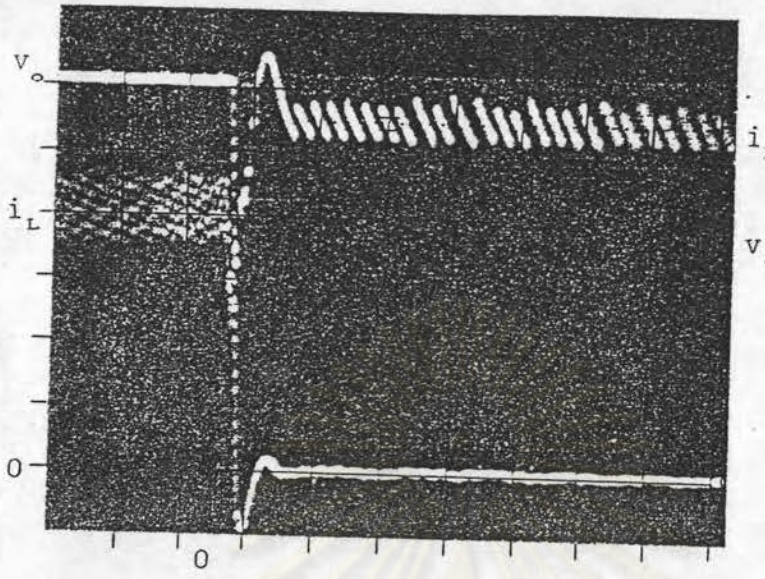
ก. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (i_L)



สเกลเวลา 1 มิลลิวินาที/ช่อง

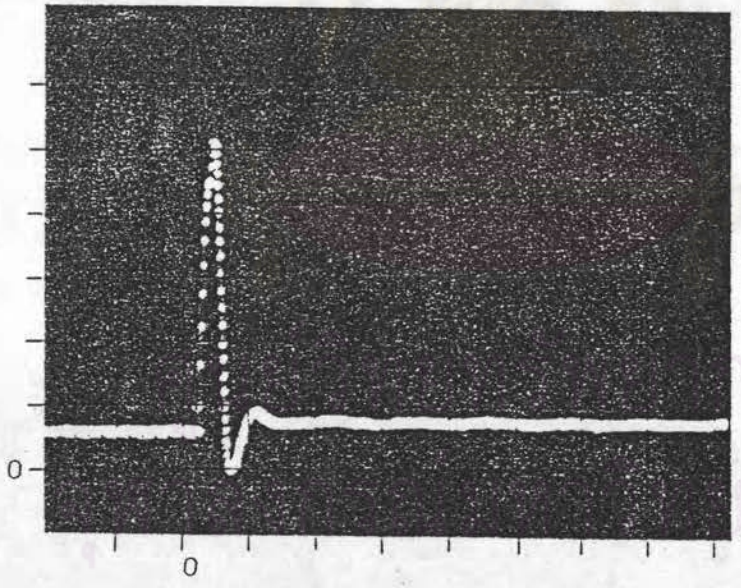
ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออก (i_o)

รูปที่ 5.11 ผลการวัดรูปคลื่นต่าง ๆ เมื่อชุดวงจรทำงานในภาคกระแส และมีการเพิ่มโหลดแบบขั้นจาก 0 เป็น 30 โวลต์



สเกลเวลา 0.5 มิลลิวินาที/ช่อง

ก. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (i_L)



สเกลเวลา 0.5 มิลลิวินาที/ช่อง

ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออก (i_o)

รูปที่ 5.12 ผลการวัดรูปคลื่นต่าง ๆ เมื่อชุดวงจรทำงานในภาคกระแส และมีการลดโหลดแบบขั้นจาก 30 เป็น 0 โวลต์

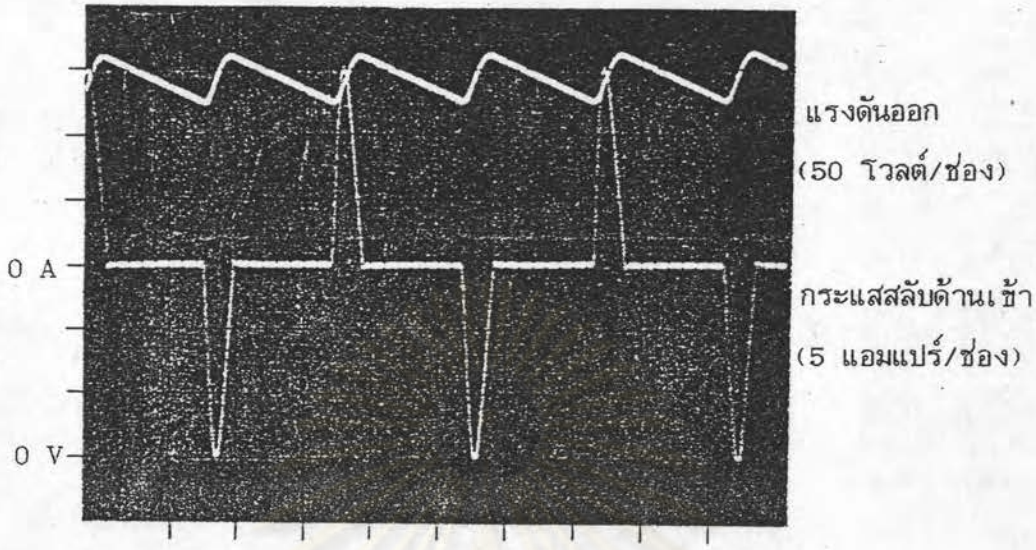
จากการทดลอง โดยมีเวลาขึ้นของกระแสประมาณ 2 ms เวลาขึ้นของแรงดันประมาณ 1.4 ms จะเห็นได้ว่าผลการการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์มีรูปร่างใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีเวลาลงแตกต่างกันเล็กน้อย จากรูป การที่กระแสออกลดลงเป็น 0 เพราะกระแสในตัวเหนี่ยวนำเกือบทั้งหมดจะไปประจุในตัวเก็บประจุด้านขาออกก่อน เมื่อแรงดันขาออกเพิ่มขึ้น กระแสในตัวเหนี่ยวนำที่เหลือจะถูกกรองเป็นกระแสออก จึงจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันออก

รูปที่ 5.12 ก แสดงรูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (i_L) รูปที่ 5.12 ข แสดงรูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออก (i_o) เมื่อแรงดันออกลดจาก 30 โวลต์ ลงมาเป็น 0 โวลต์ จะเห็นได้ว่าในขณะที่แรงดันออกเป็น 30 โวลต์ กระแสออกและกระแสในตัวเหนี่ยวนำจะทำงานในภาวะปกติตามพิกัด เมื่อลดโหลดให้แรงดันออกประมาณ 0 โวลต์ กระแสในตัวเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 25 แอมแปร์ กระแสออกจะเพิ่มขึ้น และลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนแรงดันออกจะลดลงเป็น 0 โวลต์ รูปที่ 3.28 ก และ 3.28 ข แสดงผลตอบต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้น ที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ จะเห็นได้ว่ามีรูปร่างใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง และการที่กระแสออกมีการเพิ่มอย่างรวดเร็วเพราะว่า เมื่อแรงดันออกเปลี่ยนจาก 30 โวลต์ เป็น 0 โวลต์ ตัวเก็บประจุที่วงจรกรองด้านขาออก จะคายประจุออกอย่างรวดเร็ว ทำให้กระแสออกเพิ่มอย่างรวดเร็ว และการลดลงสู่ค่าอยู่ตัวการที่แรงดันออกมี undershoot เป็นผลจากการมีความเหนี่ยวนำในโหลดที่ใช้ในการทดลอง

5.1.4 <u>การวัดสัญญาณภายในของชุดวงจร</u> การทดสอบนี้ทำเพื่อแสดงลักษณะของสัญญาณที่จุดต่าง ๆ ภายในชุดวงจร รูปที่ 5.13 แสดงรูปคลื่นของกระแสสลับขาเข้า และแรงดันออกจากวงจรเรียงกระแส เมื่อชุดวงจรจ่ายกำลังออก 30 โวลต์ 20 แอมแปร์ กระแสสลับด้านเข้ามีลักษณะเป็นพัลส์มีค่าสูงสุด 15.5 แอมแปร์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ มีค่ากระแสอาร์เอ็มเอสประมาณ 5.5 แอมแปร์ ส่วนแรงดันจะมีการกระเพื่อมประมาณ 40 โวลต์ จากยอดถึงยอด และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 295 โวลต์

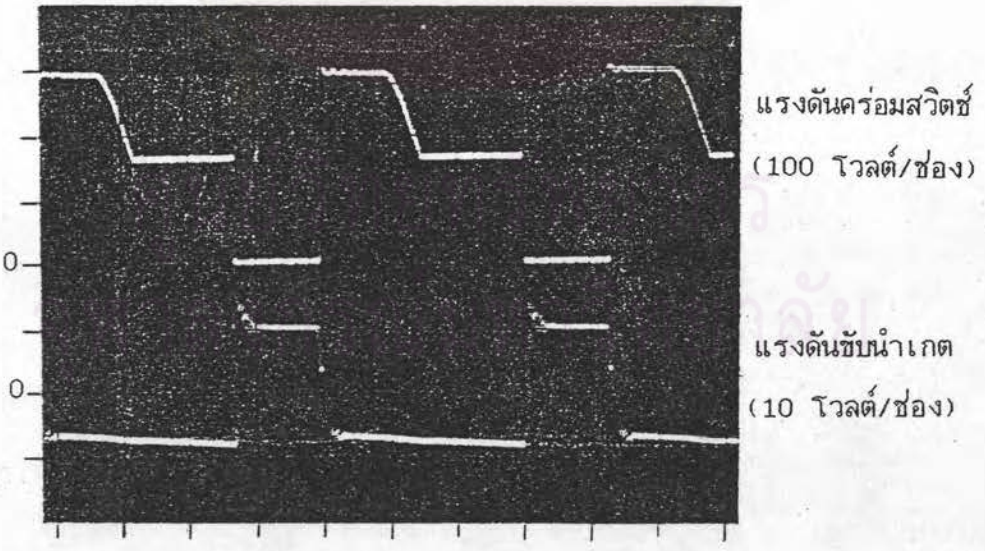
รูปที่ 5.14 แสดงรูปคลื่นของแรงดันขับนำเกต และแรงดันคร่อมสวิตช์กำลัง ขณะที่แรงดันขับนำเกตมีแรงดันบวกประมาณ 10 โวลต์ หมายถึงการสั่งให้สวิตช์นำกระแส และตอนที่สวิตช์ไม่นำกระแส แรงดันขับนำเกตมีแรงดันลบประมาณ 10 โวลต์ วัฏจักรงานประมาณ 0.3 จะเห็นได้ว่าสวิตช์กำลังมีการสวิตช์ที่ความถี่ประมาณ 45 กิโลเฮิรตซ์

รูปที่ 5.15 แสดงรูปคลื่นของกระแสในสวิตช์กำลัง เมื่อแรงดันขับนำเกตขับนำให้สวิตช์นำกระแส เมื่อชุดวงจรจ่ายกำลังออก 30 โวลต์ 20 แอมแปร์ การจะวัดกระแสในสวิตช์จะวัดจากวงจรวัดกระแสสวิตช์ ค่าที่วัดได้จะอยู่ในรูปแรงดัน ซึ่งประมาณได้ว่ามีค่ายอดเท่ากับ 7 แอมแปร์ วัฏจักรงานประมาณ 0.3



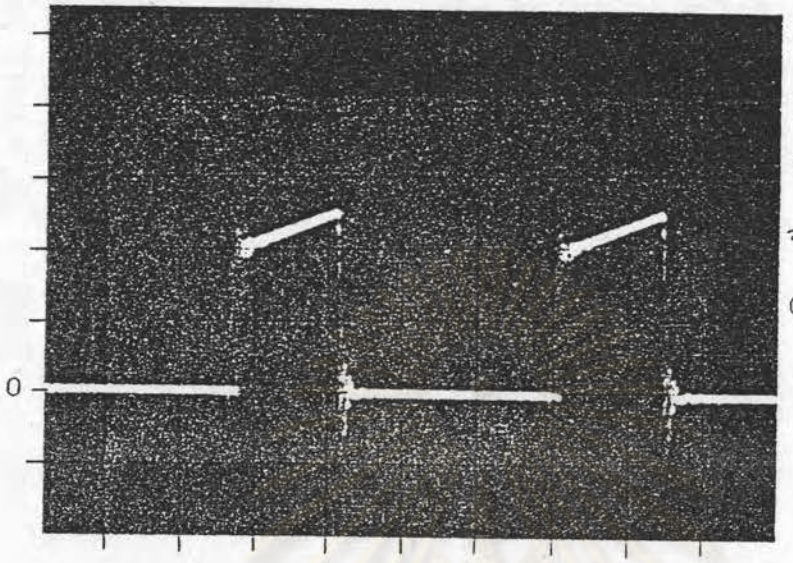
สเกลเวลา 5 มิลลิวินาที/ช่อง

รูปที่ 5.13 รูปคลื่นของกระแสสลับด้านเข้า และแรงดันออกของวงจรเรียงกระแส เมื่อชุดวงจรจ่ายกำลังออก 30 โวลต์ 20 แอมแปร์



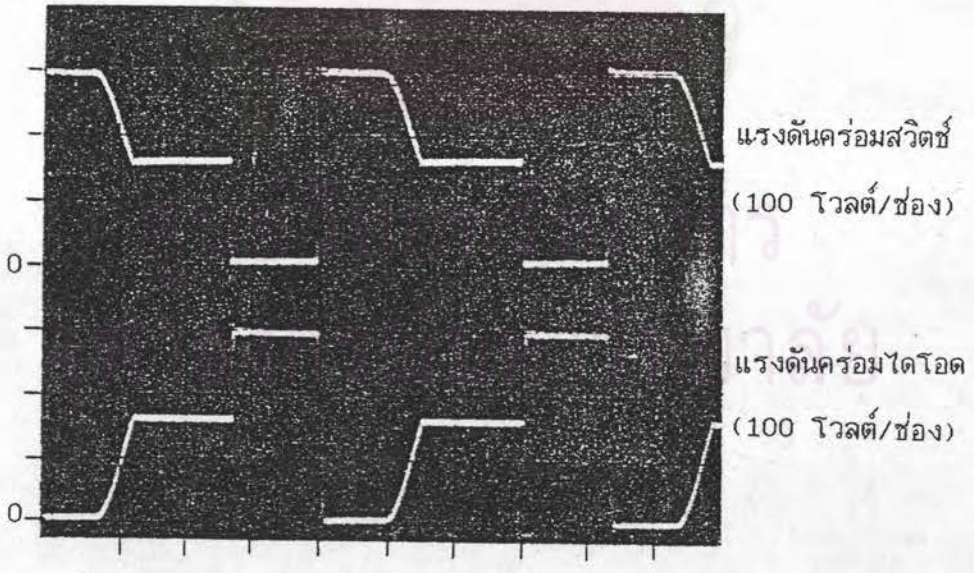
สเกลเวลา 5 ไมโครวินาที/ช่อง

รูปที่ 5.14 รูปคลื่นของแรงดันขับนำเกต และแรงดันคร่อมสวิตช์



สเกลเวลา 5 ไมโครวินาที/ช่อง

รูปที่ 5.15 รูปคลื่นของกระแสในสวิตช์กำลัง

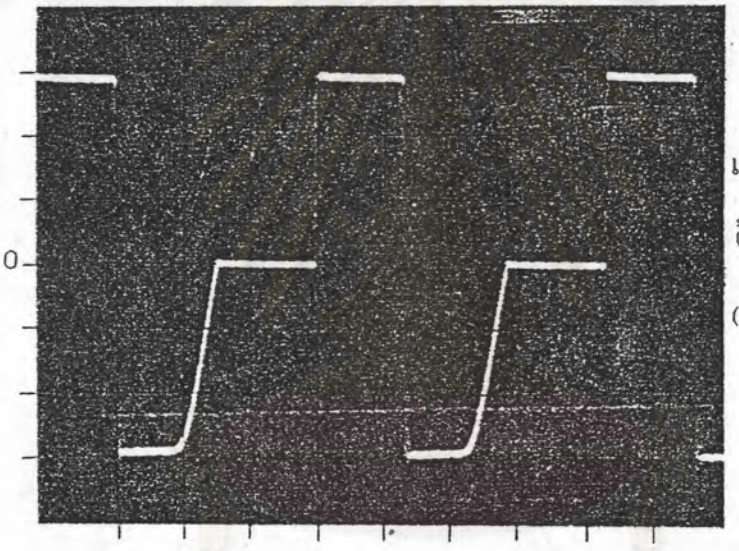


สเกลเวลา 5 ไมโครวินาที/ช่อง

รูปที่ 5.16 รูปคลื่นของแรงดันคร่อมสวิตช์ และไดโอด D_1 และ D_2

รูปที่ 5.16 แสดงรูปคลื่นของแรงดันคร่อมสวิตช์ และแรงดันคร่อมไดโอด D_1 และ D_2 จะเห็นได้ว่าสวิตช์กับไดโอดจะสลับกันนำกระแส โดยไดโอดจะนำกระแสเพื่อให้กระแสทำแม่เหล็กไหลกลับสู่แหล่งจ่าย เมื่อกระแสทำแม่เหล็กลดลงมาเป็นศูนย์ สวิตช์กับไดโอดจะแบ่งกันรับแรงดันประมาณ 150 โวลต์

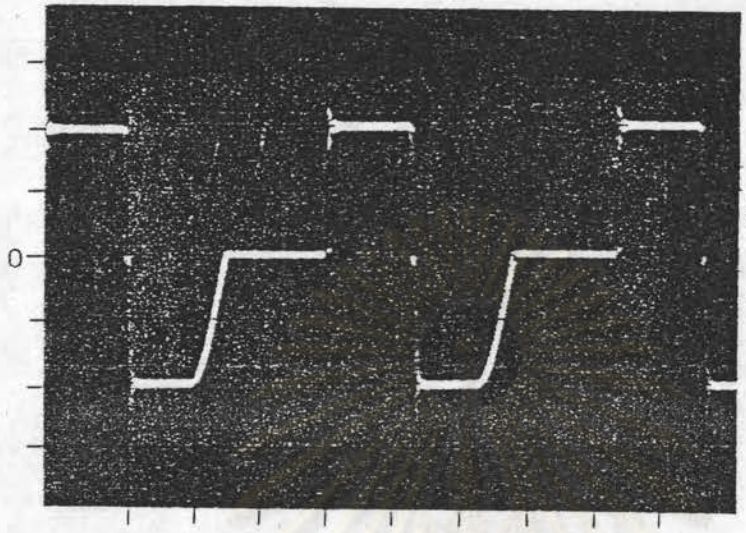
รูปที่ 5.17 และ 5.18 แสดงรูปคลื่นของแรงดันคร่อมหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ จะเห็นได้ว่าแรงดันคร่อมหม้อแปลงด้านปฐมภูมิมีค่าประมาณ +300 และ -300 โวลต์ ส่วนแรงดันคร่อมด้านทุติยภูมิมีค่าประมาณ +100 และ -100 โวลต์ นั่นแสดงว่าอัตราการหม้อแปลงเท่ากับ 3 : 1 และแรงดันคร่อมหม้อแปลงช่วงที่สวิตช์ และไดโอดไม่นำกระแสมีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ โดยสวิตช์ และไดโอดแบ่งกันรับแรงดัน



สเกลเวลา 5 ไมโครวินาที/ช่อง

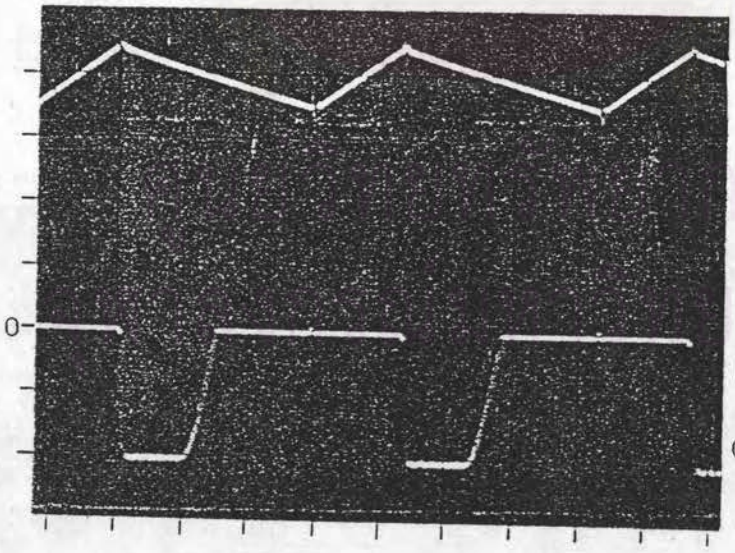
รูปที่ 5.17 รูปคลื่นของแรงดันคร่อมหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ

รูปที่ 5.19 และ 5.20 เป็นรูปคลื่นแสดงกระแสในตัวเหนี่ยวนำ แรงดันคร่อมไดโอดเรียงกระแส และแรงดันคร่อมไดโอด freewheeling จะเห็นได้ว่าการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำเมื่อแรงดันออก 30 โวลต์ กระแสออก 20 แอมแปร์ การกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำจะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม มีค่ายอดถึงยอดประมาณ 5 แอมแปร์ ในช่วงที่กระแสในตัวเหนี่ยวนำมีความเป็นบวก ไดโอดเรียงกระแสด้านขาออกจะนำกระแส แต่ในช่วงที่กระแสในตัวเหนี่ยวนำมีความชันเป็นลบ ในช่วงแรกไดโอด freewheeling จะนำกระแสแทน หลังจากนั้นเมื่อแรงดันคร่อมหม้อแปลงเป็น 0 โวลต์ ไดโอดทั้งสองจะนำกระแสพร้อมกันทั้งสองตัว เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองด้านขาออก



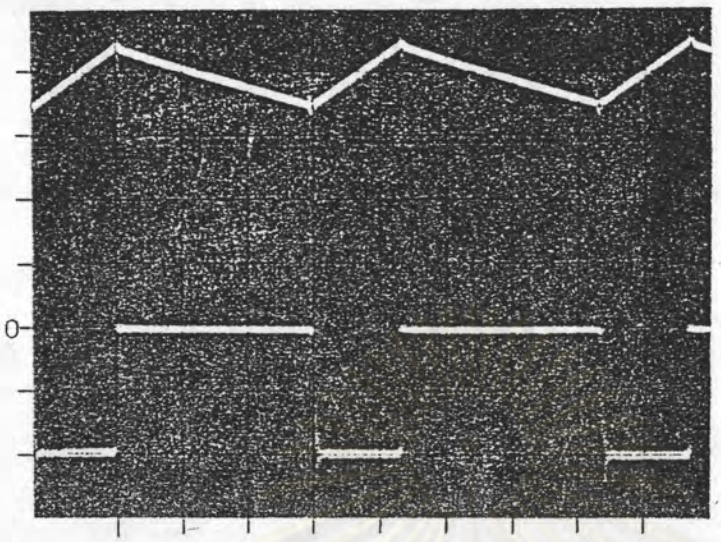
สเกลเวลา 5 ไมโครวินาที/ช่อง

รูปที่ 5.18 รูปคลื่นของแรงดันคร่อมหม้อแปลงด้านทุติยภูมิ



สเกลเวลา 5 ไมโครวินาที/ช่อง

รูปที่ 5.19 รูปคลื่นของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันคร่อมไดโอดเรียงกระแส (D_3)



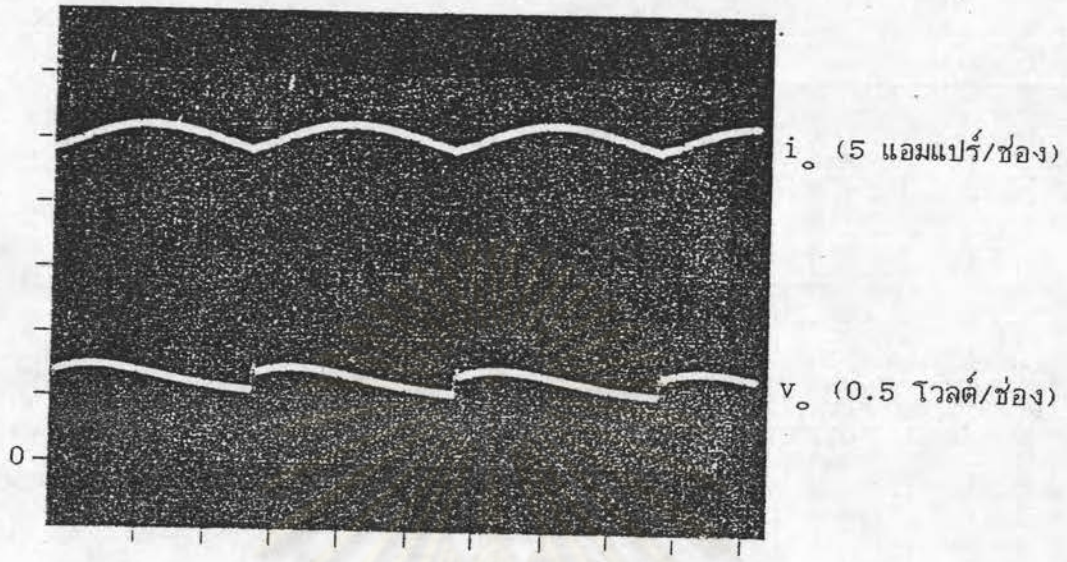
รูปที่ 5.20 รูปคลื่นของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันคร่อมไดโอด freewheeling(D_4)

รูปที่ 5.21 และ 5.22 เป็นรูปคลื่นของกระแสออก กระแสในตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันออกตอนลัดวงจรด้านขาออก จะเห็นได้ว่าเมื่อลัดวงจรด้านขาออก การทำงานจะเข้าสู่ภาวะการจำกัดกระแส โดยมีการลดความถี่การสวิตช์ลงเหลือ 6.6 กิโลเฮิรตซ์ กระแสออกประมาณ 25 แอมแปร์ แรงดันออกประมาณ 0.7 โวลต์

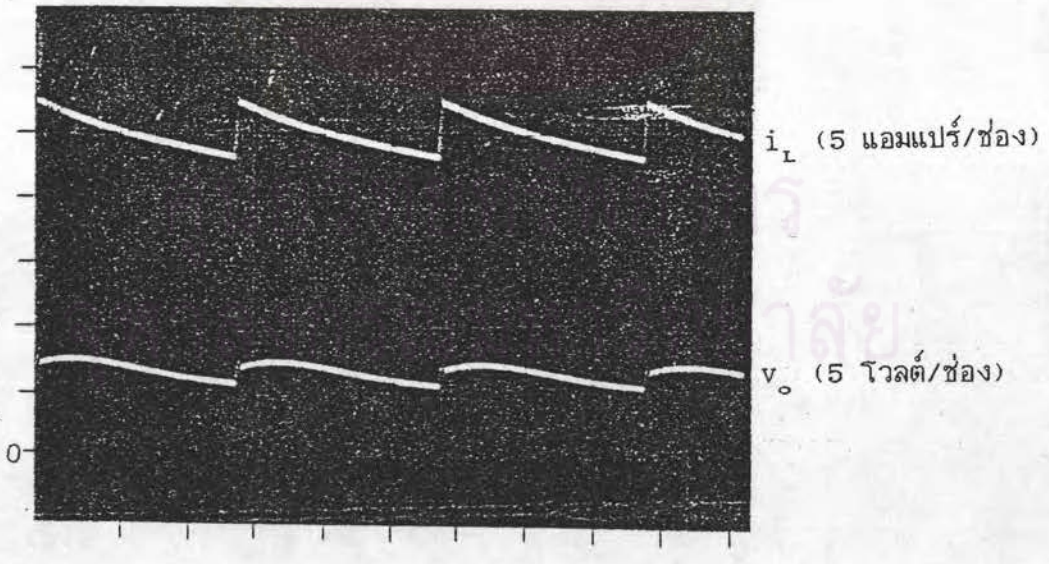
5.2 <u>การทดสอบระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจร</u>

เป็นการทดสอบคุณสมบัติของระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรที่สร้างขึ้น โดยการนำชุดวงจรมาขนานกันทั้งขาเข้า และขาออก การทดสอบทำโดยการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ ทางขาเข้าและใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้เป็นโหลด การทดสอบสถานะต่าง ๆ นั้น จะทดสอบที่กระแสออกประมาณ 45 แอมแปร์ เพื่อไม่ให้มีการเปลี่ยนโหมดการทำงานของระบบเข้าสู่ภาวะการจำกัดกระแสในบางสภาวะของการทำงาน ซึ่งอาจมีการเปลี่ยนความถี่ไปได้ และมีการทดสอบในสถานะต่าง ๆ ดังนี้

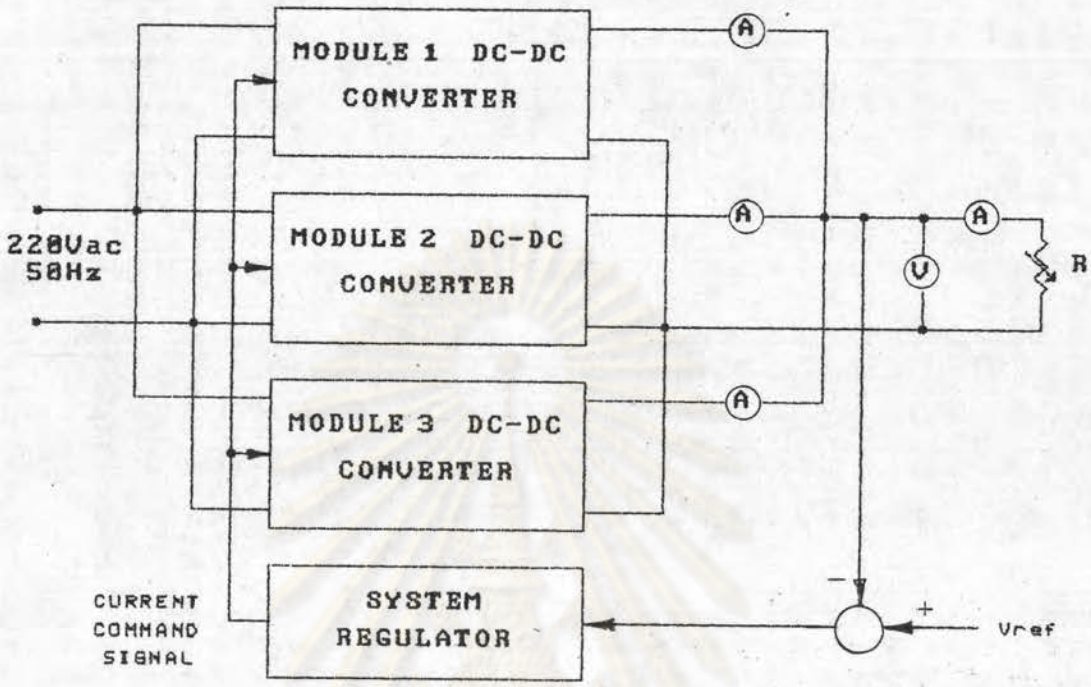
5.2.1 <u>การทดสอบคุณสมบัติในสถานะอยู่ตัว</u> (steady state characteristic) เป็นการทดสอบหาคุณสมบัติของระบบในสถานะอยู่ตัว ได้แก่ การทดสอบการแบ่งจ่ายกระแสของแต่ละชุดวงจร และการคงค่าแรงดัน การทดสอบจะทำการทดสอบที่ค่าพิกัดสูงสุดของแรงดันเท่ากับ 30 โวลต์ กระแสออก 45 แอมแปร์ โดยมีการวงจรที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.21 รูปคลื่นของกระแสออก และแรงดันออกตอนลัดวงจรด้านขาออก



รูปที่ 5.22 รูปคลื่นของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันออกตอนลัดวงจรด้านขาออก

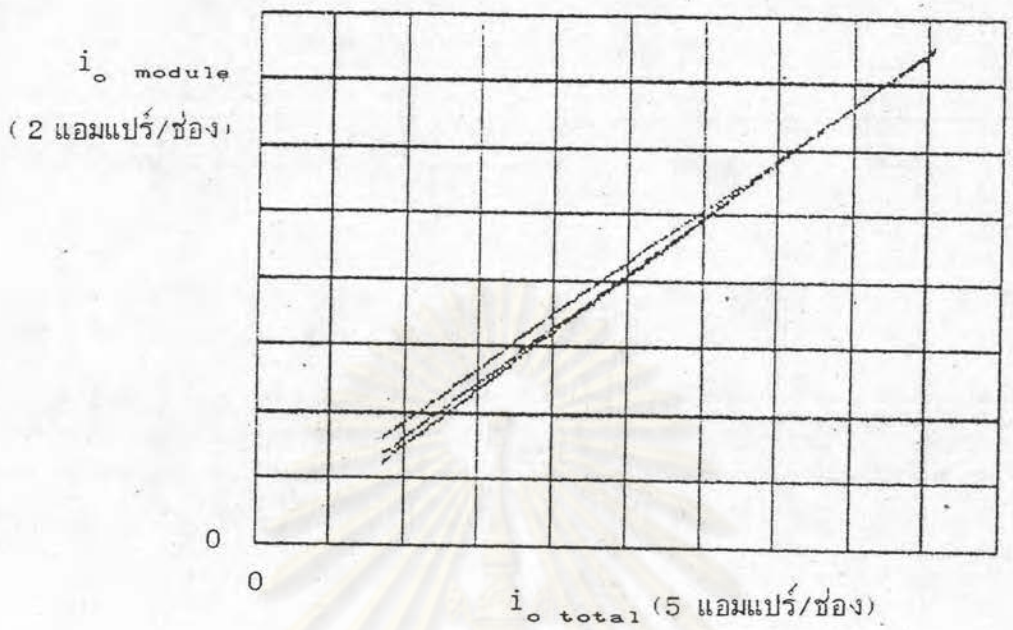


รูปที่ 5.23 วงจรที่ใช้ในการทดสอบระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจร

5.2.1.1 <u>การทดสอบการแบ่งจ่ายกระแสของชุดวงจร</u> เป็นการทดสอบการแบ่งจ่ายกระแสของชุดวงจรที่นำมาขนานกัน สำหรับกระแสออกของระบบค่าต่าง ๆ กัน การทดสอบทำโดยการวัดกระแสออกของชุดวงจรแต่ละชุด และกระแสรวมของระบบ สำหรับความต้านทานของโหลดค่าต่าง ๆ กัน โดยมีแรงดันออกคงที่ 30 โวลต์ และมีการปรับวงจรเพื่อให้กระแสออกมีค่าเท่ากัน ที่กระแสออกเท่ากับ 15 แอมแปร์ ได้ผลดังรูปที่ 5.24

จากรูปที่ 5.24 จะเห็นได้ว่าการแบ่งจ่ายกระแสของชุดวงจรแต่ละชุด จะมีค่าเท่ากันที่กระแสออก 15 แอมแปร์ ตามที่ได้ตั้งค่าไว้ แต่จะมีความแตกต่างสูงเมื่อกระแสออกของระบบต่ำ อันเป็นผลมาจากอัตราส่วนของกระแสออกต่อแรงดันควบคุม มีความแตกต่างกันเนื่องจากความแตกต่างกันของค่าอุปกรณ์ของวงจร

5.2.1.2 <u>การทดสอบการคงค่าแรงดัน</u> (voltage regulation) การคงค่าแรงดันเป็นปริมาณที่บอกให้ทราบถึงเสถียรภาพของแรงดันออก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด หรือแรงดันขาเข้า โหลดของระบบซึ่งทำงานในภาคแรงดัน คือ กระแสออก ได้มีการวัดการคงค่าแรงดันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันเข้า และกระแสออก

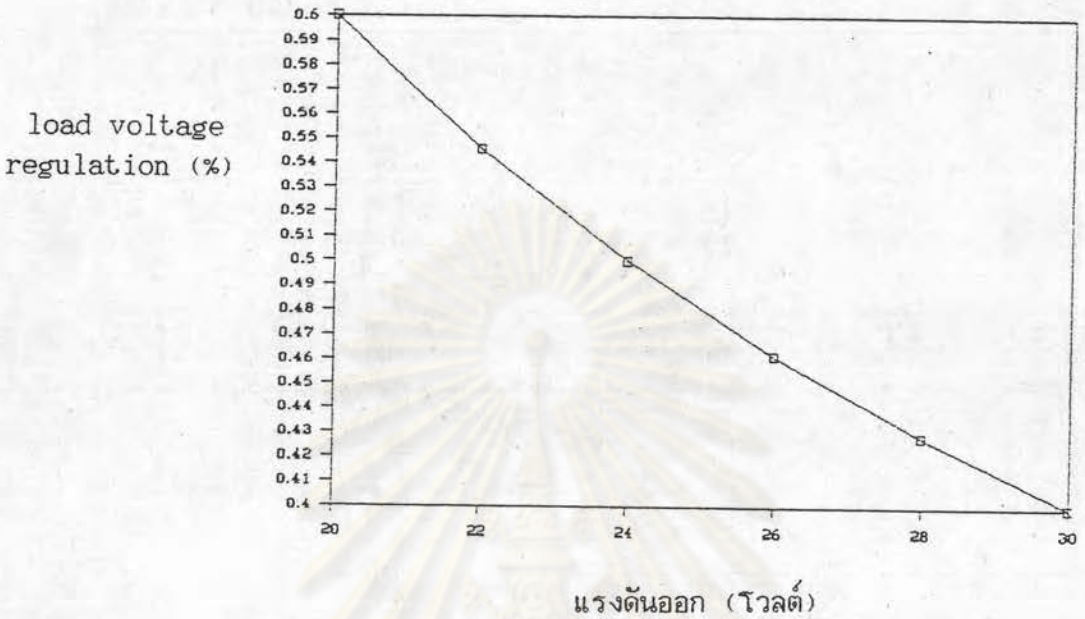


รูปที่ 5.24 กราฟแสดงการแบ่งจ่ายกระแสของชุดวงจร
สำหรับกระแสออกรวมของระบบค่าต่าง ๆ กัน

5.2.1.2.1 <u>การทดสอบการคงค่าแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านขาเข้า</u> (line voltage regulation) การคงค่าแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้า คือ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันออกเมื่อแรงดันกระแสสลับด้านขาเข้าเปลี่ยนในช่วง +/- 10% ของแรงดันปกติ การทดสอบทำโดยการรักษาโหลดของระบบให้คงที่เท่ากับ 45 แอมแปร์ ขณะที่ปรับแรงดันขาเข้าให้เปลี่ยนแปลง +/- 10% ของแรงดันปกติ แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันออก การทดสอบทำในช่วงแรงดันออก 20-30 โวลต์ จากการทดสอบพบว่าไม่สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันออกด้วยโวลต์มิเตอร์ ที่มีความละเอียดน้อยกว่า 0.01 โวลต์

5.2.1.2.2 <u>การทดสอบการคงค่าแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด</u> (load voltage regulation) การคงค่าแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด คือ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันออกของระบบ เมื่อกระแสออกเพิ่มจาก 0 แอมแปร์ ถึงค่าพิกัด การทดสอบการคงค่าแรงดันของระบบทำโดย การวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันออกเมื่อกระแสออกเพิ่มจาก 0 แอมแปร์ เป็น 60 แอมแปร์ เพื่อให้การทำงานของระบบอยู่ที่โหมดกระแสต่อเนื่อง ที่ความถี่ 45 กิโลเฮิรตซ์ การทดสอบจะทำในช่วงกระแสออก 10-45 แอมแปร์ ส่วนกระแสออกที่ 0 แอมแปร์ และพิกัด 60 แอมแปร์ จะได้จากการประมาณค่านอกช่วง (extrapolate) ไปสู่ค่ากระแสออก 0 และ 60 แอมแปร์ ตามลำดับ การทดสอบ

นี้ได้มีการทดสอบที่แรงดันตั้งค่าให้แรงดันออกอยู่ในช่วง 20-30 โวลต์ ได้ผลดังรูปที่ 5.25



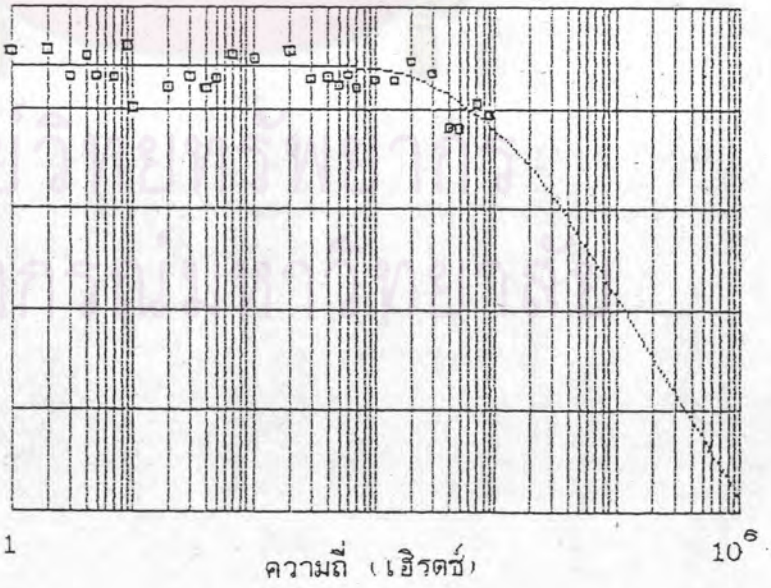
รูปที่ 5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง load voltage regulation กับแรงดันออก (v_o)

จากรูป 5.25 จะเห็นได้ว่า load voltage regulation ของระบบมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.4 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันออกลดลง จากการทดลองพบว่าการลดลงของแรงดันออกจะคงที่เท่ากับ 0.12 โวลต์ สำหรับทุกค่าแรงดันออก ซึ่งลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าความต้านทานขาออกของระบบมีค่าค่อนข้างคงที่ ไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันออก เนื่องจากการเปลี่ยนค่าของแรงดันออกไม่มีผลต่ออัตราขยายวงรอบ นอกจากนี้แล้ว การที่ความต้านทานขาออกของวงจรมีค่าค่อนข้างคงที่ ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลง ของวัฏจักรงานในช่วงกว้าง แสดงให้เห็นว่าความต้านทานขาออกของระบบ ที่เปลี่ยนแปลงวัฏจักรงานน่าจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความต้านทานที่มีค่าคงที่ เช่น ความต้านทานในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง ความต้านทานของตัววัดกระแส เป็นต้น

5.2.2 <u>การวัดผลตอบเชิงความถี่</u> (frequency response) การทดสอบในหัวข้อที่ 5.1.2 เป็นการทดสอบผลตอบเชิงความถี่ของฟังก์ชันโอนย้าย สำหรับสัญญาณขนาดเล็กระหว่างแรงดันควบคุมกระแส ($\hat{v}_c$) กับแรงดันออก ($\hat{v}_o$) แต่การทดสอบนี้ จะทดสอบผลตอบเชิงความถี่สำหรับสัญญาณขนาดเล็ก ของอัตราขยายวงรอบแรงดัน ($\hat{v}_f/\hat{v}_{error}$) และผลตอบเชิงความถี่สัญญาณขนาดเล็ก ของอัตราขยายวงรอบปิดแรงดัน ($\hat{v}_o/\hat{v}_r$) เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้กับการคำนวณผลตอบดังกล่าวทางทฤษฎี ในหัวข้อ 3.3

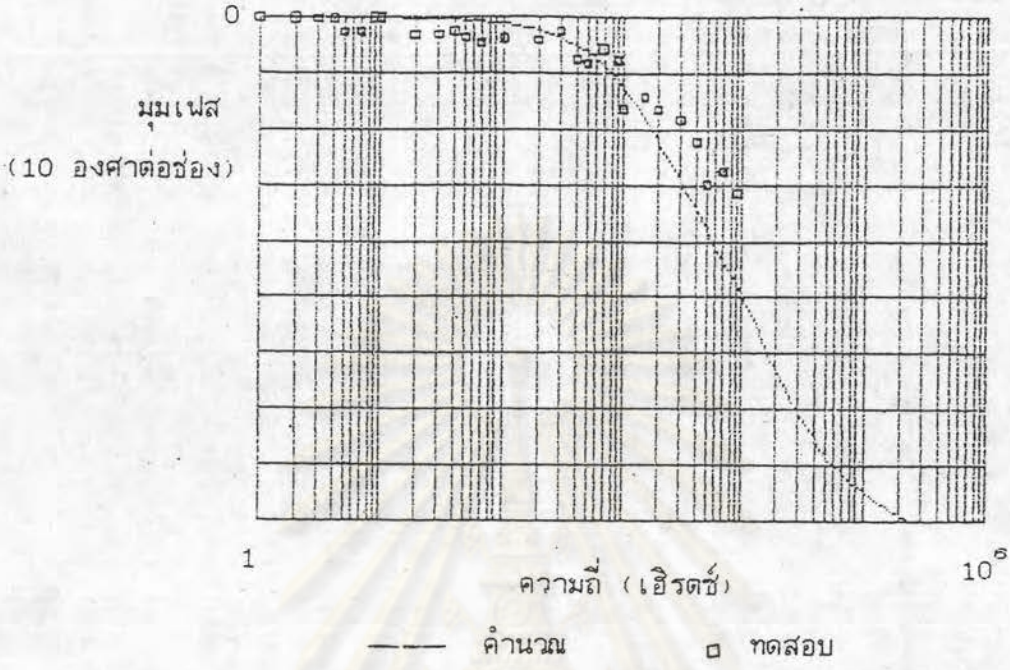
5.2.2.1 <u>การวัดผลตอบเชิงความถี่ สำหรับสัญญาณขนาดเล็กของอัตราขยายวงรอบเปิดแรงดัน</u> ($\hat{v}_f/\hat{v}_{error}$) การทดสอบทำโดยการป้อนแรงดันควบคุมกระแสจากวงจรภายนอก โดยสัญญาณนี้จะเป็นสัญญาณไซน์ และสัญญาณไซน์นี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ทั้งความถี่ และขนาด จะทดสอบที่แรงดันออก 30 โวลต์ กระแสออกรวม 45 แอมแปร์ ซึ่งมีวัฏจักรงานประมาณ 0.3 ส่วนแรงดันควบคุมกระแสประกอบด้วย สัญญาณไซน์ประมาณ 0.4 โวลต์ (ยอดถึงยอด) โดยมีวงจรการทดลองแสดงในภาคผนวก ค. ซึ่งไม่สามารถวัดอัตราขยาย และมุมเฟสได้ เพราะอัตราขยายของวงจรคุมค่ามีค่าค่อนข้างสูง จะต้องลดสัญญาณไซน์ลงไป มีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์ เพราะถ้าสัญญาณไซน์ใหญ่กว่านี้จะทำให้วงจรคุมค่าอิ่มตัว จึงไม่สามารถหาผลตอบเชิงความถี่ สำหรับสัญญาณขนาดเล็กของอัตราขยายวงรอบแรงดัน ($\hat{v}_f/\hat{v}_{error}$)

5.2.2.2 <u>การวัดผลตอบเชิงความถี่ สำหรับสัญญาณขนาดเล็กของอัตราขยายวงรอบปิดแรงดัน</u> ($\hat{v}_o/\hat{v}_r$) การทดสอบนี้ทำโดยการป้อนแรงดันตั้งค่าจากวงจรภายนอก โดยสัญญาณนี้จะเป็นสัญญาณไซน์ผสมอยู่บนแรงดันไฟตรง และสัญญาณไซน์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ทั้งความถี่ และขนาด ได้ทดสอบที่แรงดันออก 30 โวลต์ กระแสออกรวม 45 แอมแปร์ วัฏจักรงานประมาณ 0.3 ส่วนแรงดันตั้งค่ามีขนาดสัญญาณไซน์ประมาณ 0.4 โวลต์ (ยอดถึงยอด) ผสมกับแรงดันไฟตรง 5.8 โวลต์ โดยมีวงจรการทดลองแสดงในภาคผนวก ค. รูปที่ 5.26 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณ ของอัตราขยายวงรอบปิดทั้งขนาดและเฟสของแรงดันออก ($\hat{v}_o$) เปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์ของแรงดันตั้งค่า ($\hat{v}_r$) ที่ความถี่ต่างๆ



—— คำนวณ □ ทดสอบ

ก. อัตราขยาย



ข. มุมเฟส

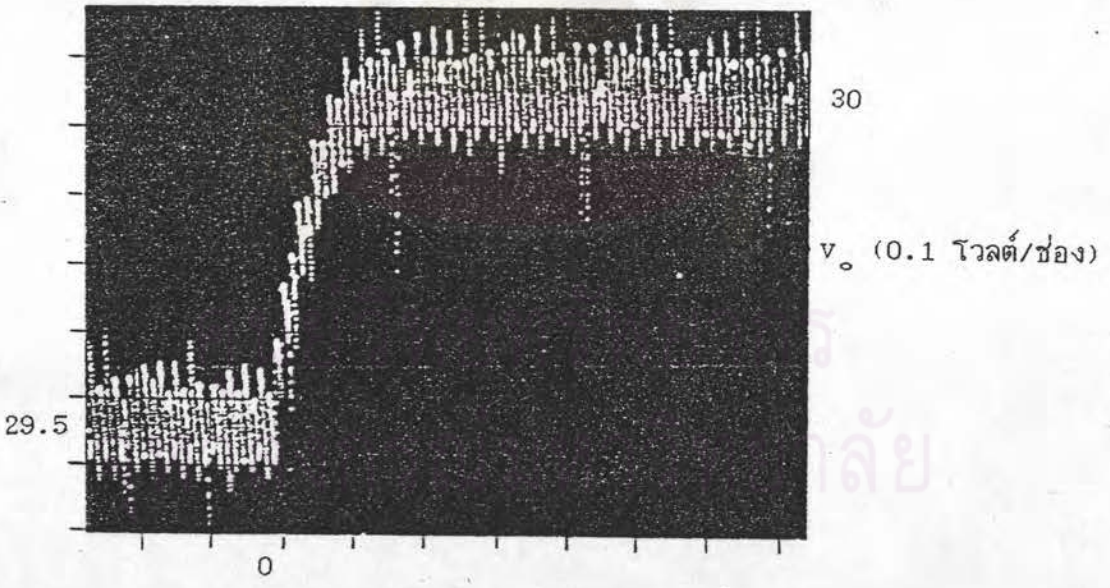
รูปที่ 5.26 ผลตอบเชิงความถี่ของอัตราขยายวงรอบปิดแรงดัน ($\hat{v}_o/\hat{v}_r$) ที่วัฏจักรงาน 0.3 เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี

จะเห็นได้ว่า ผลการทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณทางทฤษฎี โดยมีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย คาดว่าเกิดจากความคลาดเคลื่อนของค่าอุปกรณ์ และการวัด ทั้งนี้เพราะสัญญาณออกมีขนาดเล็กมาก นอกจากนั้น ยังมีสัญญาณความถี่ 100 เฮิรตซ์ ซึ่งมีขนาดใหญ่ผสมอยู่

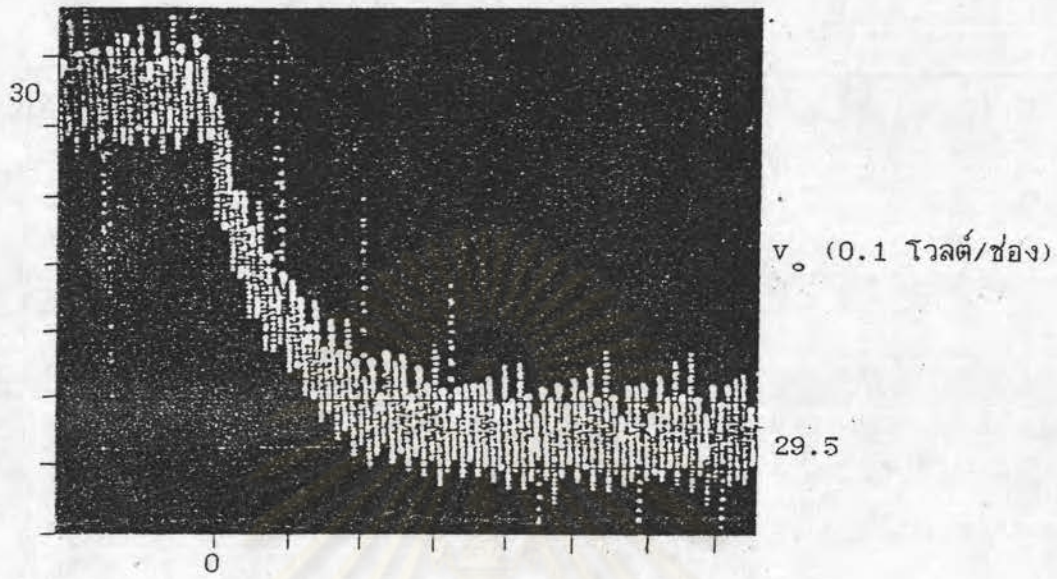
5.2.3 <u>การทดสอบการตอบสนองพลวัต</u> (dynamic response) จุดประสงค์การทดสอบการตอบสนองพลวัต ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 5.1.3 แต่ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบการตอบสนองพลวัต ของระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลัง ซึ่งการทดสอบนี้จะมีการทดสอบหาผลตอบของแรงดันออก และกระแสออกรวมของระบบต่อสัญญาณแรงดันตั้งค่าแบบขั้นและผลตอบของระบบต่อการเปลี่ยนแปลงโหลด โดยจะมีการทดสอบทั้งกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก และการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ และในกรณีการทดสอบหาผลตอบต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ได้มีการวัดกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร และกระแสออกของชุดวงจร เพื่อดูการแบ่งจ่ายกระแสของแต่ละชุดวงจร

5.2.3.1 <u>ผลตอบสนองต่อแรงดันตั้งค่าเป็นแบบขั้น กรณีการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก</u> (small signal step reponse) เป็นการทดสอบหาผลตอบสนองของแรงดันออกของระบบ และแรงดันออกจากวงจรควบคุมแรงดัน ต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตั้งค่าแบบขั้นที่มีขนาดเล็ก เพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ การทดสอบทำโดยการป้อนแรงดันตั้งแบบขั้น จาก 5.7 โวลต์ เป็น 5.8 โวลต์ และการป้อนแรงดันตั้งค่าแบบขั้น จาก 5.8 โวลต์ เป็น 5.7 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้วงจรคุมค่าไม่เข้าสู่ภาวะอิ่มตัว และให้กระแสออกเท่ากับ 30 แอมแปร์ ที่แรงดันออก 30 โวลต์ แล้วบันทึกรูปคลื่นแรงดันออก ดังรูปที่ 5.27 และ รูปที่ 5.28

รูปที่ 5.27 แสดงรูปคลื่นของแรงดันออก เมื่อแรงดันตั้งค่าเพิ่มจาก 5.7 โวลต์ เป็น 5.8 โวลต์ แรงดันออกจะปรับแรงดันออกเพิ่มจาก 29.5 โวลต์ เป็น 30 โวลต์ โดยมีเวลาขึ้นของแรงดันประมาณ 300 ไมโครวินาที รูปที่ 3.29 แสดงผลตอบของแรงดันออกต่อการเปลี่ยนแรงดันตั้งค่าแบบขั้นจาก 5.7 โวลต์ เป็น 5.8 โวลต์ ที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ มีเวลาขึ้นของแรงดันออกประมาณ 200 ไมโครวินาที จะเห็นได้ว่าการจำลองผลการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ มีรูปร่างใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองโดยมีเวลาแตกต่างกันประมาณ 30%



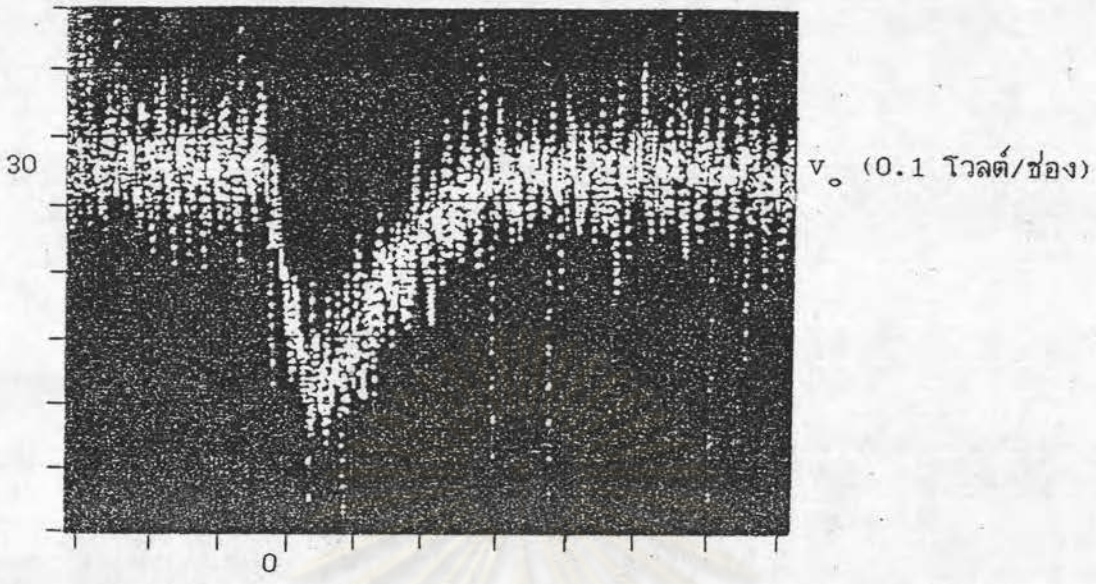
รูปที่ 5.27 ผลการวัดรูปคลื่นแรงดันออก (v_o) เมื่อระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลังทำงานในภาคแรงดัน ได้รับการเปลี่ยนแปลงแรงดันตั้งค่าแบบขั้นขนาดเล็ก จาก 5.7 โวลต์ เป็น 5.8 โวลต์



รูปที่ 5.28 ผลการวัดรูปคลื่นแรงดันออก (v_o) เมื่อระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลังทำงานในภาคแรงดัน ได้รับการเปลี่ยนแปลงแรงดันตั้งค่าแบบขั้นขนาดเล็กจาก 5.8 โวลต์ เป็น 5.7 โวลต์

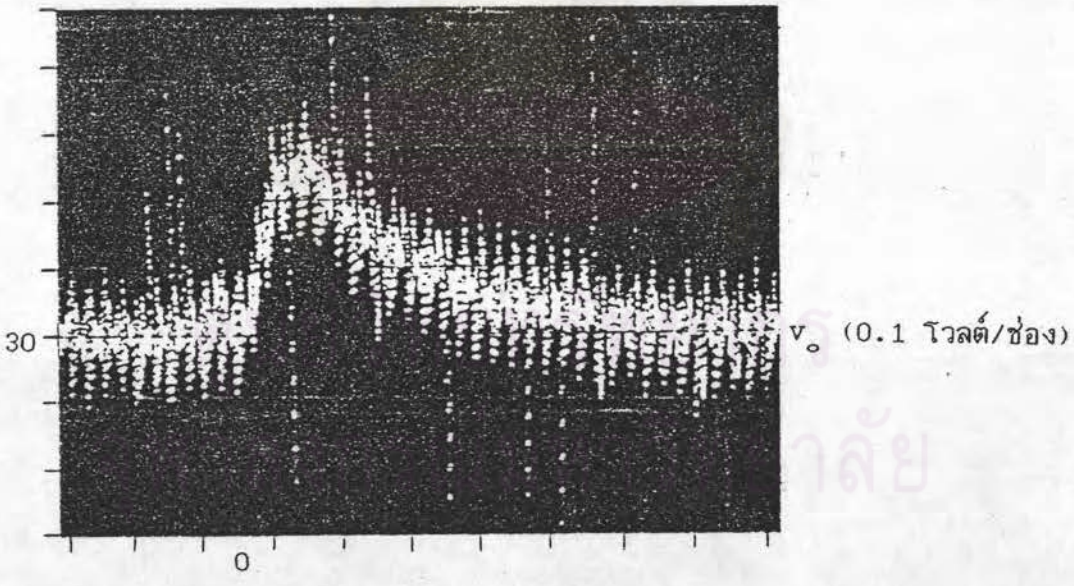
รูปที่ 5.28 แสดงรูปคลื่นแรงดันออกเมื่อแรงดันตั้งค่าลดจาก 5.8 โวลต์ เป็น 5.7 โวลต์ แรงดันออกปรับตัวลดจาก 30 เป็น 29.5 โวลต์ โดยมีเวลาลงประมาณ 400 ไมโครวินาที รูปที่ 3.30 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันออกเมื่อมีการเปลี่ยนแรงดันตั้งค่าแบบขั้นจาก 5.8 เป็น 5.7 โวลต์ ที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ เวลาลงของปรับตัวของแรงดันออกมีค่าประมาณ 300 ไมโครวินาที จะเห็นได้ว่าผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ มีรูปร่างใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีเวลาแตกต่างกันประมาณ 25%

5.2.3.2 <u>ผลตอบต่อโหลดเป็นแบบขั้น กรณีการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก</u> (small signal step load) เป็นการทดสอบผลตอบของแรงดันออกของระบบ ต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดแบบขั้นที่มีขนาดเล็ก เพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ การสอบทำโดยป้อนแรงดันตั้งค่า 5.8 โวลต์ เพื่อรักษาให้แรงดันออกคงที่เท่ากับ 30 โวลต์ จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงกระแสออกจาก 18 แอมแปร์ เป็น 30 แอมแปร์ และเปลี่ยนแปลงกระแสออกจาก 30 แอมแปร์ เป็น 18 แอมแปร์ โดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานของโหลดซึ่งจะเป็นค่าที่ไม่ทำให้วงจรควบคุมเข้าสู่ภาวะอิ่มตัว แล้วบันทึกรูปคลื่นแรงดันออก ดังรูปที่ 5.29 และ 5.30



สเกลเวลา 0.5 มิลลิวินาที/ช่อง

รูปที่ 5.29 ผลการวัดรูปคลื่นแรงดันออก(v_o) เมื่อระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลังทำงานในภาคแรงดัน ได้รับกาเปลี่ยนแปลงกระแสออกแบบขั้นที่มีขนาดเล็กจาก 18 เป็น 30 แอมแปร์



สเกลเวลา 0.5 มิลลิวินาที/ช่อง

รูปที่ 5.30 ผลการวัดรูปคลื่นแรงดันออก (v_o) เมื่อระบบได้จากการขนานชุดวงจรกำลังทำงานในภาคแรงดัน ได้รับการเปลี่ยนแปลงกระแสออกแบบขั้นที่มีขนาดเล็กจาก 30 เป็น 18 แอมแปร์

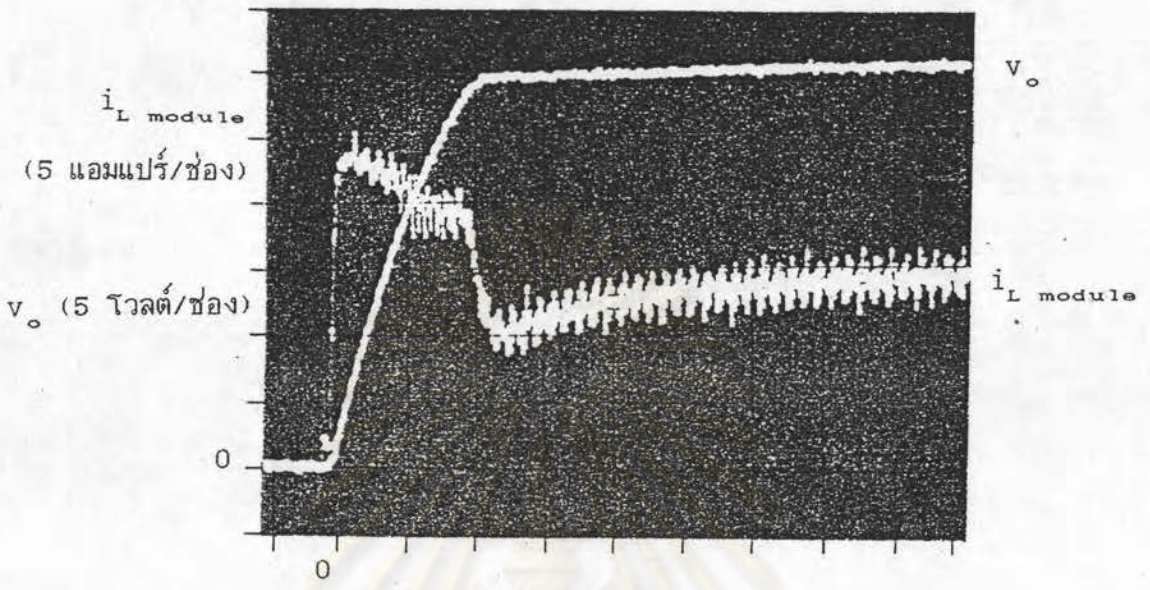
รูปที่ 5.29 แสดงรูปคลื่นแรงดันออก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสออกจาก 18 แอมแปร์ เป็น 30 แอมแปร์ แรงดันออกจะปรับค่าลงมาจาก 30 โวลต์ เป็น 29.7 โวลต์ หลังจากนั้นจะปรับตัวขึ้นไปสู่ 30 โวลต์ เช่นเดิม เวลาในการปรับตัว 1.5 มิลลิวินาที รูปที่ 3.31 แสดงผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนกระแสออกแบบขั้นจาก 18 เป็น 30 แอมแปร์ ที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ มีเวลาปรับตัวของแรงดันออกประมาณ 1.5 มิลลิวินาที จะเห็นได้ว่า ผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์มีรูปร่างใกล้เคียงกับ ผลที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 5.30 แสดงรูปคลื่นแรงดันออก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสออกจาก 30 แอมแปร์ เป็น 18 แอมแปร์ แรงดันออกจะปรับตัวเพิ่มขึ้นจาก 30 โวลต์ เป็น 30.2 โวลต์ หลังจากนั้นจะปรับตัวลงไปสู่ 30 โวลต์ เช่นเดิม เวลาในการปรับตัว 2 มิลลิวินาที รูปที่ 3.32 แสดงผลตอบสนองต่อการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสออกจาก 30 แอมแปร์ เป็น 18 แอมแปร์ มีเวลาปรับตัวของแรงดันออกประมาณ 2 มิลลิวินาที จะเห็นได้ว่าผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ มีรูปร่างใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง

5.2.3.3 <u>ผลตอบสนองต่อแรงดันตั้งค่าเป็นแบบขั้น กรณีการเปลี่ยนขนาดใหญ่</u> (large signal step response) เป็นการทดสอบหาผลตอบสนองของกระแสออกรวม แรงดันออก กระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร และกระแสออกของชุดวงจร ต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันตั้งค่าที่มีขนาดใหญ่ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ การทดสอบทำโดยการป้อนแรงดันตั้งค่าแบบขั้นจาก 0 โวลต์ เป็น 5.8 โวลต์ และการป้อนแรงดันตั้งค่าแบบขั้นจาก 5.8 โวลต์ เป็น 0 โวลต์ โดยให้กระแสออกเท่ากับ 45 แอมแปร์ ที่แรงดันออก 30 โวลต์ แล้วบันทึกรูปคลื่นกระแสออกรวม แรงดันออก กระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร และกระแสออกของชุดวงจร ดังรูปที่ 5.31 และ รูปที่ 5.32

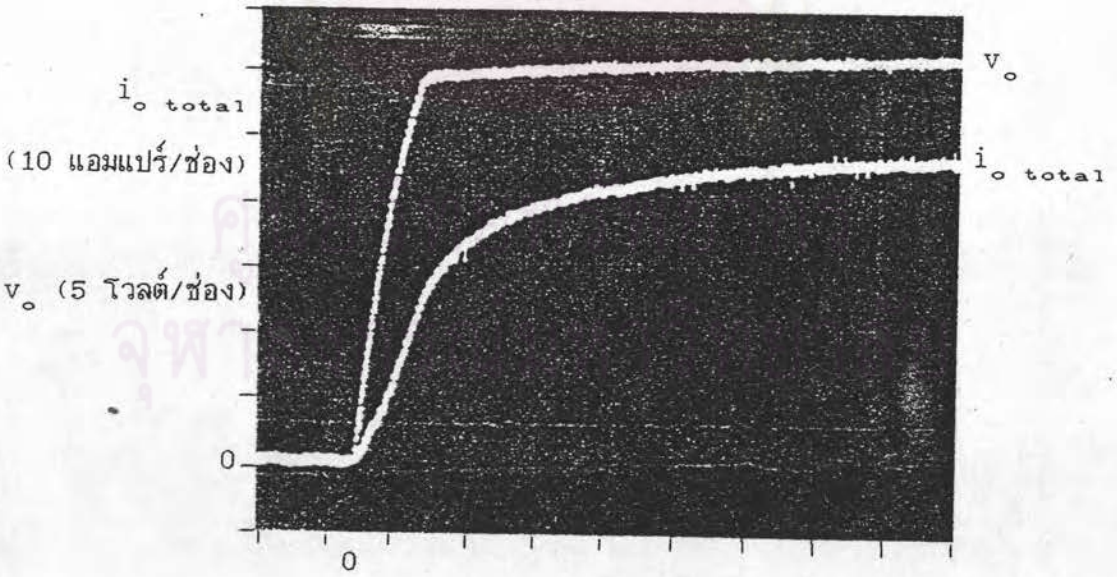
รูปที่ 5.31 ก แสดงรูปคลื่นของแรงดันออก และกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร และรูปที่ 5.31 ข แสดงรูปคลื่นแรงดันออก และกระแสออกรวม และรูปที่ 5.31 ค แสดงรูปคลื่นแรงดันออก และกระแสออกของชุดวงจร เมื่อแรงดันตั้งค่าเพิ่มจาก 0 โวลต์ เป็น 5.8 โวลต์ กระแสในตัวเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นสู่ค่าจำกัดสูงสุด และปรับตัวเข้าสู่ค่าภาวะอยู่ตัว ส่วนกระแสออกรวม และแรงดันออกจะเพิ่มขึ้นสู่ค่าภาวะอยู่ตัว โดยมีเวลาขึ้นของกระแสออกเท่ากับ 5 มิลลิวินาที และเวลาขึ้นของแรงดันออกเท่ากับ 1 มิลลิวินาที ส่วนกระแสออกจากชุดวงจรแต่ละชุดจะมีเพิ่มขึ้นสู่ภาวะอยู่ตัว มีลักษณะรูปคลื่นคล้ายกัน และกระแสออกแต่ละชุดมีค่าใกล้เคียงกัน รูปที่ 3.33 ก และ 3.33 ข แสดงผลตอบต่อแรงดันตั้งค่าแบบขั้นจาก 0 เป็น 5.8 โวลต์ ของกระแสออกรวม แรงดันออก และกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร ที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ กระแสออกรวมมีเวลาขึ้นเท่ากับ 4.5 มิลลิวินาที และแรงดันออกมีเวลาขึ้นเท่ากับ 1 มิลลิวินาที จะเห็นได้ว่าผลการจำลองการทำงานด้วย

คอมพิวเตอร์ มีรูปร่างใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีเวลาแตกต่างกันเล็กน้อย



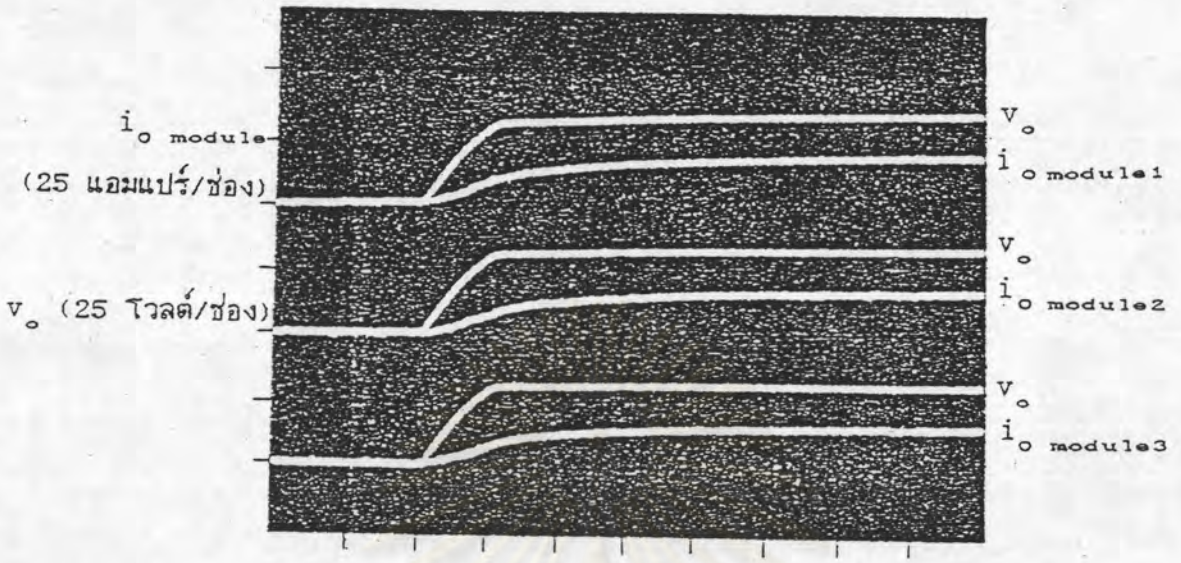
สเกลเวลา 0.5 มิลลิวินาที/ช่อง

ก. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร ($i_{L\ module}$)



สเกลเวลา 1 มิลลิวินาที/ช่อง

ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออกรวม($i_{o\ total}$)



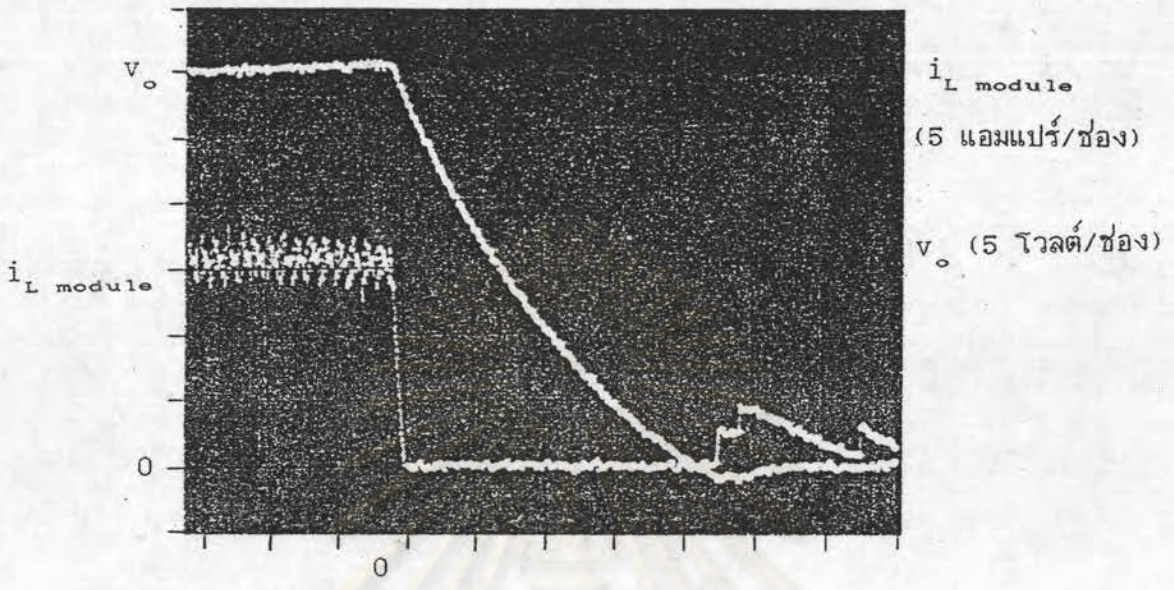
สเกลเวลา 1 มิลลิวินาที/ช่อง

ค. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออกของแต่ละชุดวงจร ($i_{o\ module}$)

รูปที่ 5.31 ผลการวัดรูปคลื่นต่าง ๆ เมื่อระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลังทำงานในภาคแรงดัน ได้รับการเปลี่ยนแปลงแรงดันตั้งค่าแบบขั้นที่มีขนาดใหญ่จาก 0 โวลต์เป็น 5.8 โวลต์

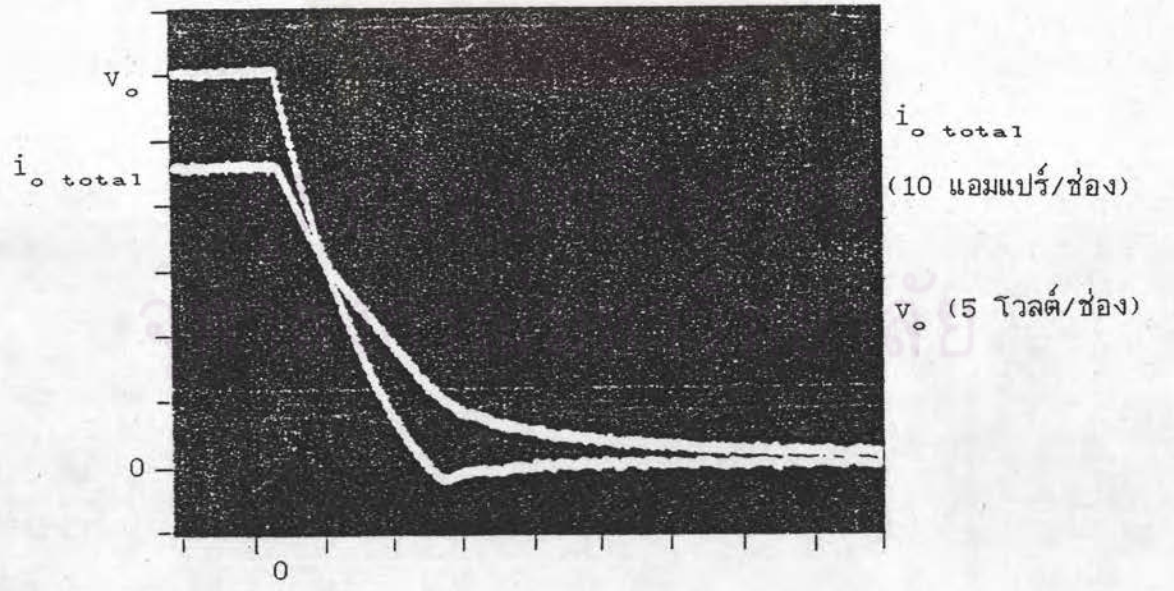
และจากรูปที่ 5.31 กระแสในตัวเหนี่ยวนำจะเข้าสู่ค่ากระแสลัดวงจร ในตอนที่แรงดันออกมีค่าเป็น 0 เมื่อแรงดันออกเพิ่มขึ้น กระแสในตัวเหนี่ยวนำจะลดลงมาสู่ค่าที่กำหนดด้วยแรงดันคำสั่งกระแสจากวงจรคุมค่า และเวลาขึ้นของกระแสออกรวมจะช้ากว่าเวลาขึ้นของแรงดันออก เพราะโหลดความต้านทานมีความเหนี่ยวนำอยู่ด้วย

รูปที่ 5.32 ก แสดงรูปคลื่นแรงดันออก และกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร รูปที่ 5.32 ข แสดงรูปคลื่นแรงดันออก และรูปที่ 5.32 ค แสดงรูปคลื่นแรงดันออก และกระแสออกของแต่ละชุดวงจร และกระแสออกรวม เมื่อแรงดันตั้งค่าลดจาก 5.8 โวลต์ เป็น 0 โวลต์ กระแสในตัวจะลดลงตามคำสั่งกระแสจากวงจรคุมค่า ส่วนแรงดันออก และกระแสออกรวมจะลดลง โดยมีเวลาลงของกระแสออกรวมเท่ากับ 5 มิลลิวินาที ส่วนกระแสออกจากชุดวงจรแต่ละชุดจะลดลงสู่ภาวะอยู่ตัว มีลักษณะรูปคลื่นคล้ายกัน และกระแสออกแต่ละชุดมีค่าใกล้เคียงกันและเวลาลงของแรงดันออกเท่ากับ 2 มิลลิวินาที รูปที่ 3.34 ก และ 3.34 ข แสดงผลตอบต่อแรงดันตั้งค่าแบบขั้นจาก 5.8 โวลต์ เป็น 0 โวลต์ ของกระแสรวม แรงดันออก และกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร ที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์



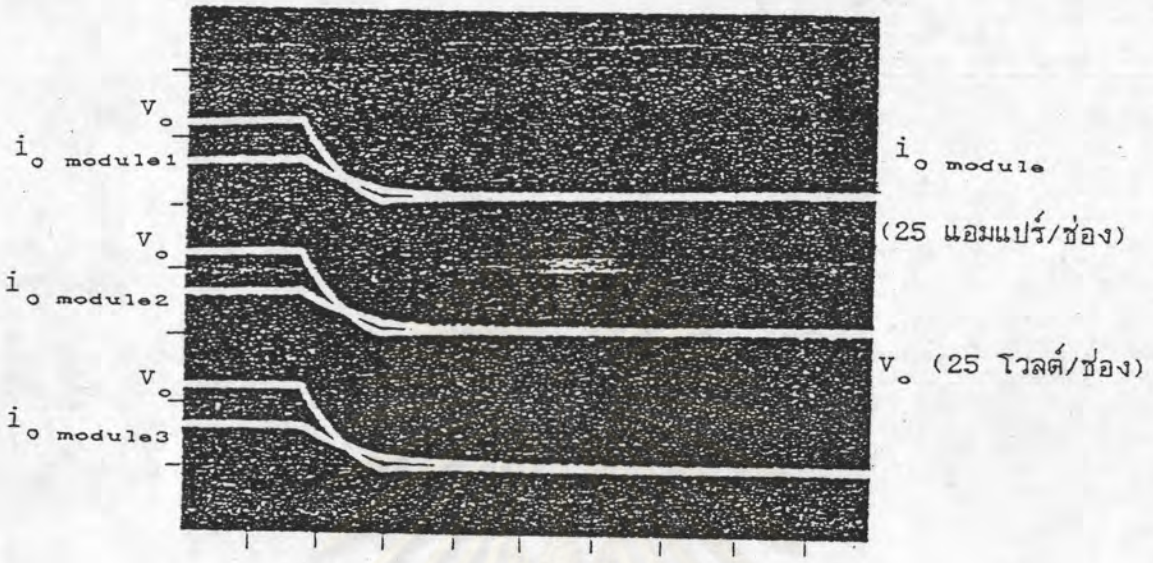
สเกลเวลา 0.5 มิลลิวินาที/ช่อง

ก. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร ($i_{L\ module}$)



สเกลเวลา 1 มิลลิวินาที/ช่อง

ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออกรวม ($i_{o\ total}$)



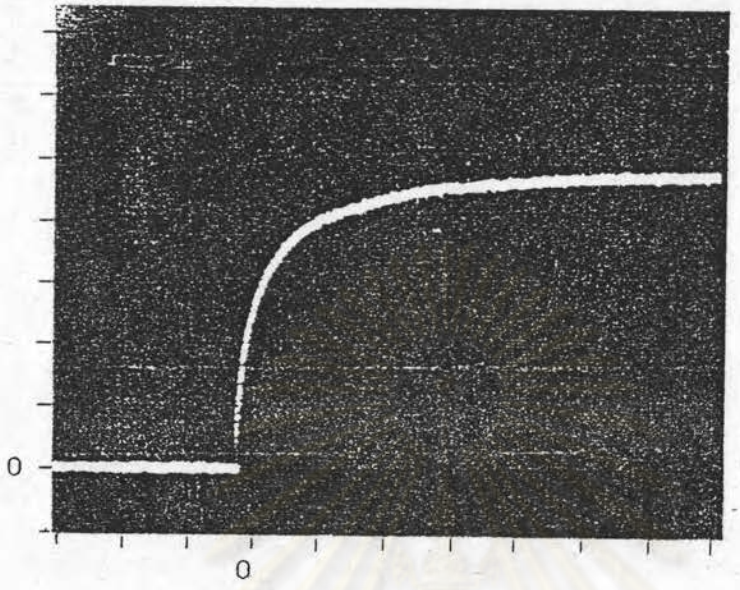
สเกลเวลา 2 มิลลิวินาที/ช่อง

ค. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออกของแต่ละชุดวงจร ($i_{o\ module}$)

รูปที่ 5.32 ผลการวัดรูปคลื่นต่าง ๆ เมื่อระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลังทำงานในภาคแรงดัน ได้รับการเปลี่ยนแปลงแรงดันตั้งค่าแบบขั้นที่มีขนาดใหญ่จาก 5.8 โวลต์ เป็น 0 โวลต์

โดยมีเวลาลงของกระแสออกเท่ากับ 4.5 มิลลิวินาที และเวลาลงของแรงดันออกเท่ากับ 1.6 มิลลิวินาที จะเห็นได้ว่าผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ มีรูปร่างใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองโดยมีเวลาแตกต่างกันประมาณ 20% และจากรูปคลื่นกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร มีการไหลของกระแส หลังจากแรงดันตั้งค่าเป็น 0 โวลต์ แล้ว เป็นผลมาจากแรงดันออกมี undershoot เนื่องจากผลของโหลดความต้านทานที่ใช้มีค่าความเหนี่ยวนำอยู่ด้วย

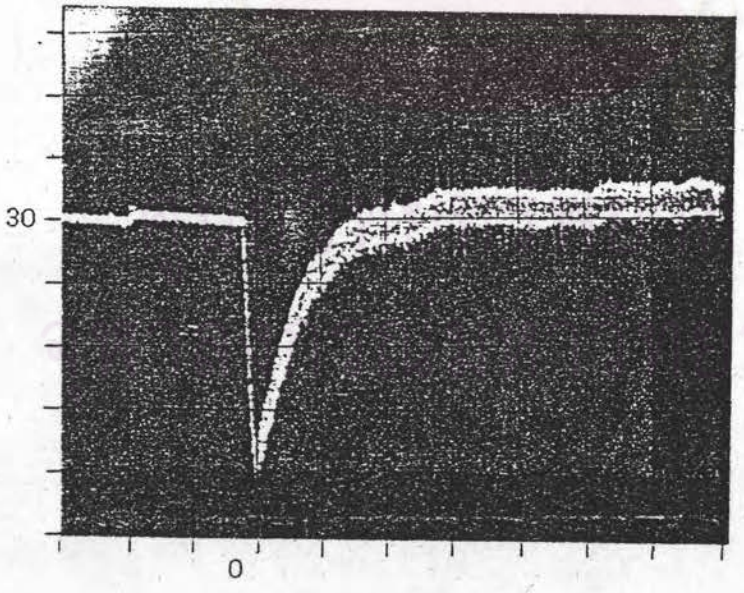
5.2.3.4 <u>ผลตอบสนองต่อโหลดแบบขั้น กรณีการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่</u> (large signal step load) เป็นผลการทดสอบผลตอบสนองของกระแสออกรวม แรงดันออก กระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร และกระแสออกของชุดวงจร ต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้น ที่มีขนาดใหญ่ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ การทดสอบทำโดยป้อนแรงดันตั้งค่า 5.8 โวลต์ เพื่อให้แรงดันออกมีค่าเท่ากับ 30 โวลต์ จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงกระแสออกรวมจาก 0 เป็น 45 แอมแปร์ และเปลี่ยนแปลงกระแสออกรวมจาก 45 เป็น 0 แอมแปร์ โดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานของโหลด แล้วบันทึกรูปคลื่นกระแสออกรวม



$i_{o\ total}$ (10 แอมแปร์/ช่อง)

สเกลเวลา 2 มิลลิวินาที/ช่อง

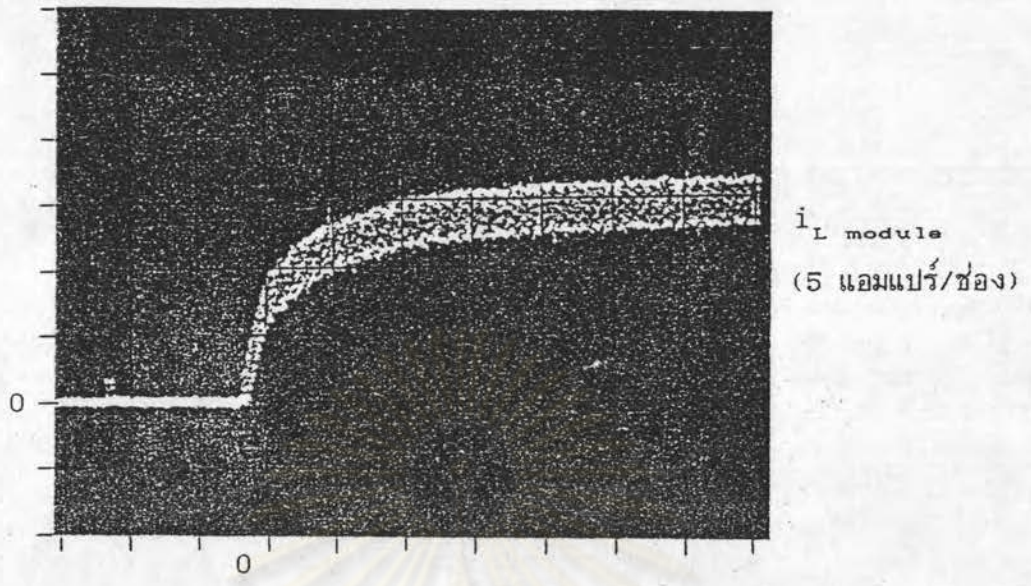
ก. รูปคลื่นกระแสออกรวม ($i_{o\ total}$)



v_o (0.2 โวลต์/ช่อง)

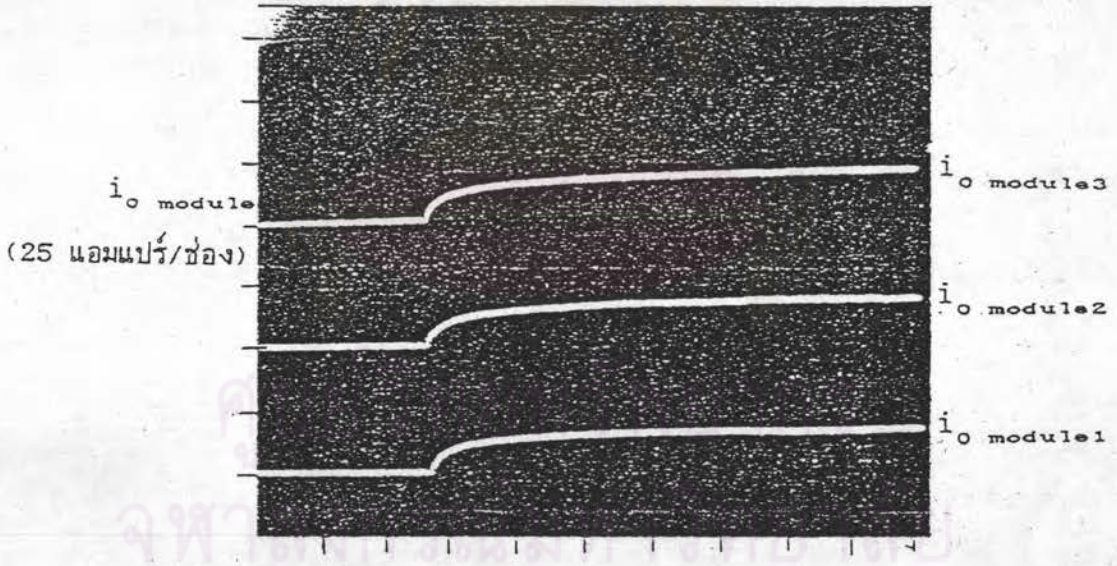
สเกลเวลา 2 มิลลิวินาที/ช่อง

ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o)



สเกลเวลา 1 มิลลิวินาที/ช่อง

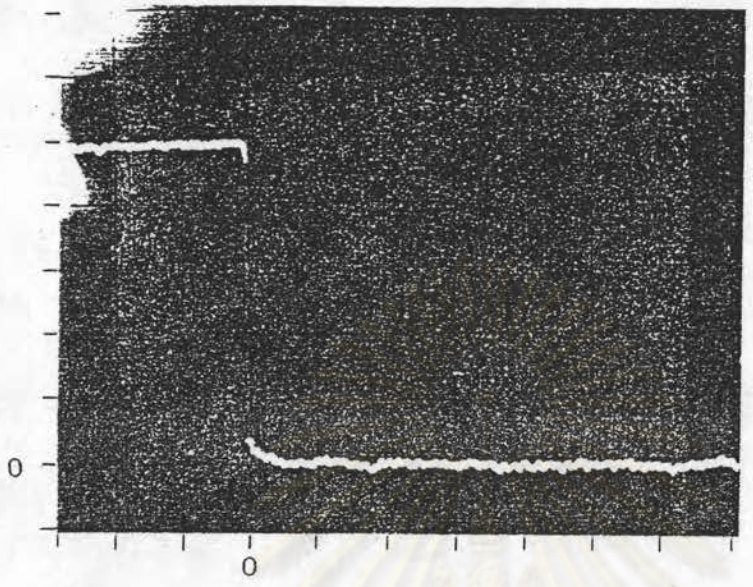
ค. รูปคลื่นกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร ($i_{L\ module}$)



สเกลเวลา 2 มิลลิวินาที/ช่อง

ง. รูปคลื่นกระแสออกของแต่ละชุดวงจร ($i_{o\ module}$)

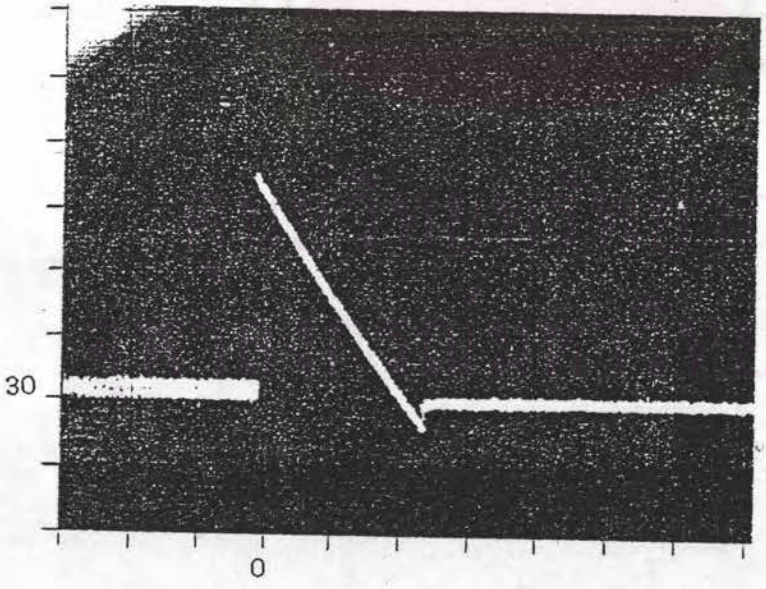
รูปที่ 5.33 ผลการวัดรูปคลื่นต่าง ๆ เมื่อระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลังทำงานในภาคแรงดัน ได้รับการเปลี่ยนแปลงกระแสออกแบบขั้นมีขนาดใหญ่จาก 0 โวลต์ เป็น 45 แอมแปร์



$i_{o\ total}$ (10 แอมแปร์/ช่อง)

สเกลเวลา 0.2 มิลลิวินาที/ช่อง

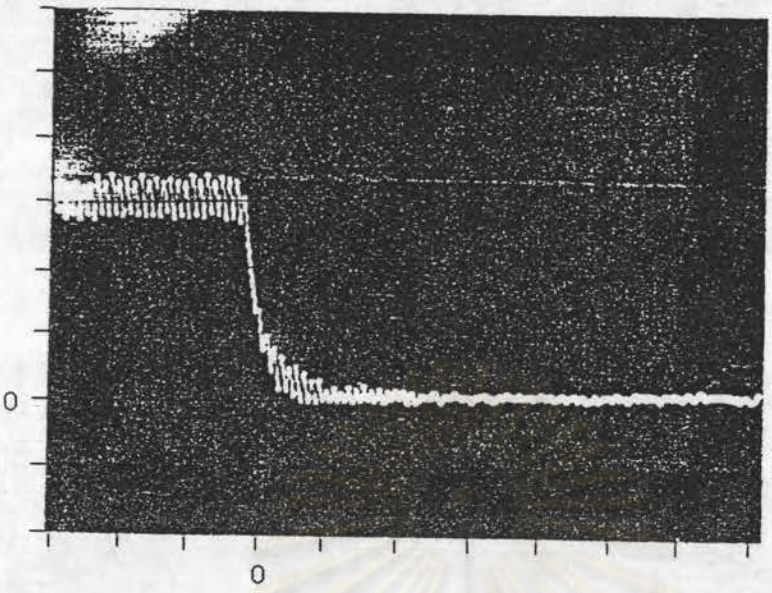
ก. รูปคลื่นกระแสออกรวม ($i_{o\ total}$)



v_o (0.5 โวลต์/ช่อง)

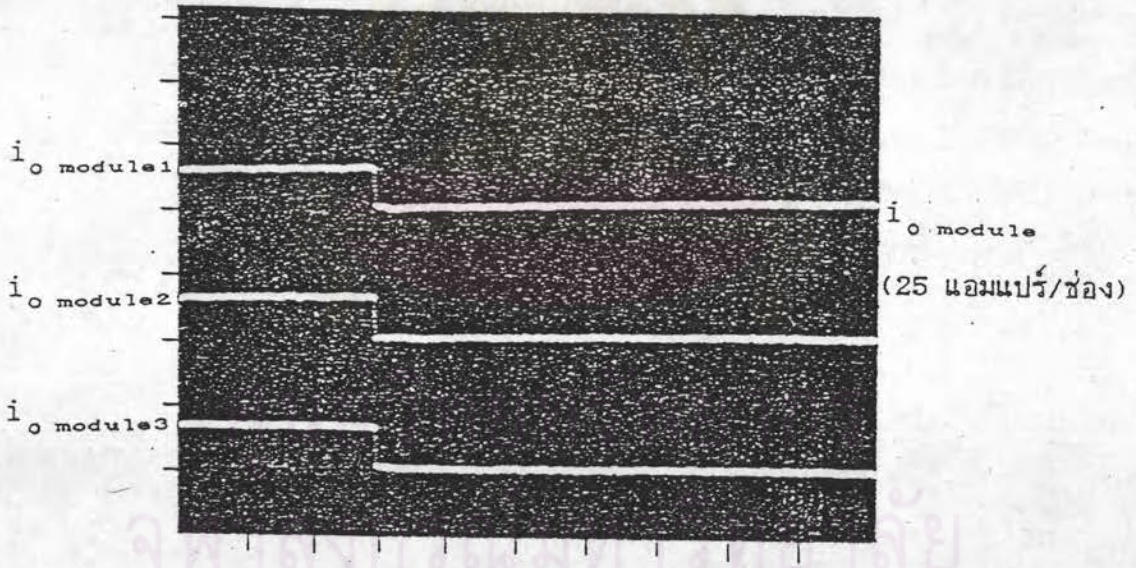
สเกลเวลา 100 มิลลิวินาที

ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o)



สเกลเวลา 0.2 มิลลิวินาที/ช่อง

ค. รูปคลื่นกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร ($i_{L\ module}$)



สเกลเวลา 0.2 มิลลิวินาที/ช่อง

ง. รูปคลื่นกระแสออกของแต่ละชุดวงจร ($i_{o\ module}$)

รูปที่ 5.34 ผลการวัดรูปคลื่นต่าง ๆ เมื่อระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลังทำงานในภาคแรงดัน ได้รับการเปลี่ยนแปลงกระแสออกแบบขั้นมีขนาดใหญ่จาก 45 โวลต์ เป็น 0 แอมแปร์

แรงดันออก กระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร และกระแสออกของชุดวงจร ดังรูปที่ 5.33 และรูปที่ 5.34

จากรูปที่ 5.33 ก รูปคลื่นของกระแสออกรวม รูปที่ 5.33 ข รูปคลื่นแรงดันออก รูปที่ 5.33 ค รูปคลื่นกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร และรูปที่ 5.33 ง รูปคลื่นกระแสออกของชุดวงจร เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสออกรวมจาก 0 แอมแปร์ เป็น 45 แอมแปร์ แรงดันออกจะปรับตัวลงที่ 29.8 โวลต์ แล้วปรับตัวขึ้นไปสู่ 30 โวลต์ เช่นเดิม โดยมีเวลาปรับตัวประมาณ 4 มิลลิวินาที ส่วนกระแสออกรวม และกระแสในตัวเหนี่ยวนำจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นสู่ค่าภาวะอยู่ตัว โดยมีเวลาขึ้นของกระแสออกรวมเท่ากับ 6.4 มิลลิวินาที และเวลาขึ้นของกระแสในตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 2 มิลลิวินาที ส่วนกระแสออกของชุดวงจรแต่ละชุด จะเพิ่มขึ้นสู่ภาวะอยู่ตัว มีลักษณะรูปคลื่นใกล้เคียงกัน และกระแสออกแต่ละชุดมีค่าใกล้เคียงกัน รูปที่ 3.35 ก รูปที่ 3.35 ข และรูปที่ 3.35 ค แสดงผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ มีเวลาปรับตัวของแรงดันออกประมาณ 4 มิลลิวินาที เวลาขึ้นของกระแสออกเท่ากับ 4 มิลลิวินาที และเวลาขึ้นของกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจรเท่ากับ 2 มิลลิวินาที จะเห็นได้ว่าผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ มีรูปร่างใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีเวลาประมาณเท่ากัน

รูปที่ 5.34 ก รูปคลื่นกระแสออกรวม รูปที่ 5.34 ข รูปคลื่นแรงดันออก รูปที่ 5.34 ค รูปคลื่นกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร และรูปที่ 5.34 ง รูปคลื่นกระแสออกของชุดวงจร เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสออกรวมจาก 45 แอมแปร์ เป็น 0 แอมแปร์ แรงดันออกจะปรับตัวขึ้นไปที่ 31.7 โวลต์ แล้วปรับตัวลงสู่ค่า 30 โวลต์ เช่นเดิม มีเวลาปรับตัวประมาณ 0.24 วินาที ส่วนกระแสออกรวม กระแสในตัวเหนี่ยวนำ และกระแสออกของชุดวงจรจะปรับตัวลงเป็น 0 เกือบทันที รูปที่ 3.36 ก รูปที่ 3.36 ข และรูปที่ 3.36 ค แสดงผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้น ที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ มีเวลาปรับตัวของแรงดันออก ประมาณ 0.22 วินาที จะเห็นได้ว่าผลจากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ มีรูปร่างใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย