

บทที่ 3

ผลการทดลองและวิจารณ์

วิทยานิพนธ์เรื่องนี้ได้แบ่งผลงานออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

- 1) วงจรจุกชนวน
- 2) วงจร SCR เปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับ

3.1 วงจรจุกชนวน SCR

จากแผนผังการทำงานโดยสังเขปของวงจรมัน ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 ได้ถูกนำมาสร้างเป็นวงจรทางปฏิบัติดังในรูป 3.1 การทดลองปรากฏผลว่า วงจรมันสามารถจุกชนวน SCR ให้เข้าสู่ภาวะเบิกกระแสไปตามลำดับขั้นที่ต้องการได้

เมื่อสัญญาณรูปซายน์ถูกป้อนเข้ามาทางขั้วเข้าของวงจรมิซทริกเกอร์ วงจรมันจะทำให้เกิดสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มี rise time สั้นที่ขั้วออก เพราะทรานซิสเตอร์ที่ขั้วออก (Q_2 ในรูป 3.1) จะทำงานอยู่ในภาวะอิ่มตัวและภาวะตัดกระแส ซึ่งสัญญาณสี่เหลี่ยมนี้ก็จะถูกนำไปจุกชนวนวงจรฟลิป-ฟลอปที่อยู่ถัดไป เนื่องจากทรานซิสเตอร์ในวงจรฟลิป-ฟลอปแบบที่ใช้นี้จะเปลี่ยนสถานะต่อเมื่อมีสัญญาณ negative going มาจุกชนวนเท่านั้น ดังนั้นจึงทำให้สัญญาณออกของวงจรฟลิป-ฟลอปตัวที่ถูกจุกชนวนนั้นมีความถี่เป็นครึ่งเท่าของความถี่จากวงจรมิซทริกเกอร์ (ดูรูป 2.5) และเมื่อเอาสัญญาณออกของวงจรฟลิป-ฟลอปตัวนี้ไปจุกชนวนวงจรฟลิป-ฟลอปตัวถัดไปเรื่อย ๆ (ดูรูป 3.1) ก็จะได้สัญญาณออกของวงจรฟลิป-ฟลอปทั้ง 3 ตัว ดังในรูป 2.5

เพื่อกันไม่ให้ loading effect ของวงจรถัดไปมีผลต่อวงจร COUNTER นี้ จึงได้ใช้วงจรคอลเลคเตอร์ร่วมคั่นระหว่างขั้วออกของวงจรฟลิป-ฟลอปทั้งสาม Y และ \bar{Y} กับวงจรถัดไป (ดูรูป 3.1) จากนั้นจึงได้นำเอาสัญญาณออกของวงจรคอลเลคเตอร์ร่วมทั้ง 6 ตัวไปเข้าวงจร AND-GATE แบบ 3 - inputs (ดูรูป 3.1) ซึ่งจะทำ

ให้สัญญาณออกของวงจร AND - GATE ทั้ง 8 ชุดนั้นเป็นสัญญาณที่มีลำดับขั้นตามต้องการ แต่เนื่องจากสัญญาณออกจาก AND - GATE แต่ละชุดต้องไปจุดชนวนวงจร Blocking Oscillator ถึง 2 ตัว จึงจำเป็นต้องนำสัญญาณออกของวงจร AND - GATE แต่ละชุดมาเข้าวงจรคอลเลกเตอร์ร่วมเสียก่อน (ดูรูป 3.1) ซึ่งจะได้อสัญญาณออกของวงจรคอลเลกเตอร์ร่วมแต่ละตัว ดังรูป 3.2 (ค) และสัญญาณออกของ Blocking Oscillator ที่นำไปจุดชนวน SCR ดังรูป 3.2 (ง)

3.2 วงจร SCR สำหรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ

เมื่อสร้างวงจรจุดชนวน SCR เรียบร้อยแล้ว ก็ได้ทำการทดสอบวงจรนี้ โดยการใช้นาฬิกาของความถี่ 400 Hz, ตัวเก็บประจุและขดลวดในวงจรรูป 2.1 ดังต่อไปนี้
ค่าความต้านทานของโหลด = 8 โอห์ม ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด
= $150 \mu\text{H}$

ค่าตัวเก็บประจุ = $0.47 \mu\text{F}$ แรงดันไฟตรง = 25 โวลต์

ปรากฏว่า SCR สามารถเปิดและปิดกระแสได้ ในลำดับขั้นที่ต้องการและรูปคลื่นต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.3

ในรูปที่ 3.3 (ก) จะเห็นได้ว่าสวิตช์ไฟฟ้าย่อมโหลด (ในที่นี้ใช้ Rheostat) ขณะเริ่มมีกระแสไหลผ่านจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด ซึ่งเป็นลักษณะของสวิตช์ไฟฟ้าย่อมโหลด ซึ่งแสดงว่าค่าความเหนี่ยวนำของโหลดที่ใช้มีค่าสูงเมื่อเทียบกับค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดในวงจร ซึ่งหลังจากการทดสอบด้วยการวัดค่าความเหนี่ยวนำโดยใช้ Impedance Bridge แล้ว ปรากฏว่า โหลดที่ใช้มีค่าความเหนี่ยวนำถึง $310 \mu\text{H}$

ในรูป 3.3 (ข) สวิตช์ไฟฟ้าย่อมโหลดมีค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ทั้งนี้เพราะว่าโหลดที่ใช้มีค่าความเหนี่ยวนำมาก ดังนั้นสวิตช์ไฟฟ้าย่อมโหลดที่ใช้จึงเสมือนเป็นค่าสวิตช์ไฟฟ้าย่อมตัวเหนี่ยวนำเพียงบางส่วนของวงจร

ในรูป 3.3 (ค) สวิตช์ไฟฟ้าย่อมตัวเก็บประจุมีลักษณะคล้ายรูป 1.6(ก)

หลังจากต่อความต้านทานซึ่งเป็นลวดเตาไฟฟ้าขนาด 0.3 โอห์มอนุกรมกับ โหลด ก็จะได้รูปคลื่นของกระแสในวงจร ดังในรูป 3.3 (ง) รูปคลื่นของกระแสที่ได้มี ลักษณะเป็นรูปซายน์ แต่เลี่ยนเล็กน้อย เนื่องจากการ damp ซึ่งก็เป็นไปตามสมการที่ (3) หัวข้อ 2.5.1

แต่เมื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟตรง ให้สูงมากขึ้นเรื่อย ๆ ปรากฏว่าการ oscillate ของกระแสได้หยุดลง แต่เกิดมีกระแสตรงไหลผ่านโหลดนั้นแทน ทั้งนี้เนื่องจาก SCR ไม่เข้าสู่ภาวะปิดกระแส จึงทำให้กระแสในวงจรไม่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ดังนั้น จึงได้ทำการ วิเคราะห์วงจรเพื่อหาสาเหตุที่ทำให้การทำงานของวงจรเปลี่ยนกระแสตรงเป็นกระแสสลับ ล้มเหลวที่ค่าแรงดันไฟตรงสูง ๆ

รูปที่ 3.3 (จ) และรูปที่ 3.3 (ฉ) แสดงศักย์ไฟฟ้าที่เกตของ SCR เมื่อไม่มีกระแสไหลผ่าน SCR และเมื่อมีกระแสไหลผ่าน SCR ตามลำดับ ในรูป 3.3 (ฉ) ปรากฏว่ามีพัลส์ขนาดเล็กเกิดขึ้นทุกครั้งที่มี SCR ตัวใดตัวหนึ่งในวงจรมอบให้กระแสไหล ผ่านได้ ที่เป็นเช่นนี้เพราะเหตุว่า เมื่อ SCR ตัวใดตัวหนึ่งในวงจรเข้าสู่ภาวะเปิดกระแส ศักย์ไฟฟ้าคร่อมขดลวดที่กระแสไหลผ่าน จะมีค่าสูงขึ้นทันทีทันใดเท่ากับค่าแรงดันไฟ ตรงที่ให้แก่วงจร จึงทำให้เกิดการ radiate ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากขดลวดนั้นมา เข้าสู่วงจรเกตของ SCR ตัวอื่น ๆ จากรูป 3.3 (ฉ) จะเห็นได้ว่า พัลส์ขนาดใหญ่ ที่สุด ซึ่งเข้ามารบกวนลำดับขั้นของการจุดชนวน SCR คือพัลส์ ซึ่งเกิดจากการที่ SCR ชุดที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันเข้าสู่ภาวะเปิดกระแส ซึ่งถ้าพัลส์นี้มีขนาดใหญ่พอ ก็จะสามารถจุด ชนวน SCR ได้เช่นกัน ซึ่งจะทำให้ SCR ทั้งหมดในกลุ่มเข้าสู่ภาวะเปิดกระแส ดังนั้น การทำงานของวงจรก็จะล้มเหลวได้

เพื่อหาสาเหตุอื่น ๆ ที่จะทำให้การทำงานของวงจรมีล้มเหลว จึงได้เปลี่ยนค่า ต้านทานของโหลด (ในที่นี้ได้ใช้ลวดเตาไฟฟ้าเป็นโหลด เพื่อให้ความเหนี่ยวนำของโหลด มีค่าน้อยที่สุด), ค่าตัวเก็บประจุ, ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด และบันทึกค่าแรงดันไฟ ตรงสูงสุดที่ให้แก่วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ ก่อนที่การทำงานของวงจร นี้จะล้มเหลว ซึ่งปรากฏผลดังในตารางที่ 2

รูปคลื่นของศักย์ไฟฟ้าคร่อมโหนด, ตัวเก็บประจุ และขดลวดแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 ถึงรูปที่ 3.14

ซึ่งพอจะสรุปผลอย่างคร่าว ๆ ได้ว่า ถ้าใช้ความต้านทานค่าสูงเข้าใกล้ค่าวิกฤตของวงจร ($= 2\sqrt{\frac{L}{C}}$) จะทำให้ใช้ค่าของแรงดันไฟตรงได้สูงขึ้น เมื่อใช้ค่าของความต้านทานเท่ากัน (ให้ใกล้เคียงกับค่าวิกฤตของวงจร) ถ้าใช้ความถี่ของสัญญาณจุกชนวนต่ำลง จะทำให้ใช้ค่าของแรงดันไฟตรงที่ให้แก่วงจรได้สูงขึ้น

เนื่องจาก SCR¹ เมื่อออกจากภาวะเบิกระแสใหม่ ๆ จะยอมให้กระแสที่ไหลผ่านมันไหลกลับทางได้เล็กน้อย ดังนั้นจึงทำให้รูปคลื่นของกระแสในวงจรเป็นไปดังรูป 3.6 (ค) จะเห็นได้ว่า เมื่อ SCR เข้าสู่ภาวะความต้านทานสูงนั้น วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับยังคงเป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมอยู่ แต่ค่าตัวเก็บประจุทั้งหมดในวงจรกลายเป็นตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรก่อกวนกับตัวเก็บประจุที่รอยต่อใน SCR (junction capacitance) ดังนั้นจึงทำให้กระแสในขณะนี้มีค่าที่สูงขึ้น และ damp หายไปในที่สุด การ oscillate ของกระแสในช่วงนี้ถ้ามีค่ามากเกินไป (โดยการเพิ่มแรงดันไฟตรงให้สูงขึ้น) ก็อาจเป็นสาเหตุหนึ่งซึ่งทำให้การทำงานของวงจรล้มเหลวได้ เพราะเมื่อทดลองเพิ่มค่าความต้านทานในวงจรให้สูงขึ้น จะทำให้สามารถใช้แรงดันไฟตรงกับวงจรนี้ได้สูงขึ้น

จากการคำนวณโดยใช้สมการในหัวข้อ 2.5 เพื่อหาศักย์ไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุเมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุเป็นศูนย์ และหาค่าของกระแสรีรูปคลื่นชานันท์ เมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทาน, ค่าตัวเก็บประจุ และค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด ดังในวงจรรูป 2.1 จะได้ผลดังปรากฏในตารางที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณดังในตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าผลการทดลองและผลการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน แต่

¹ Connolly, A.P., Fox, R.W., Golden, F.B., Gorss, D.R., Korn, S.R., Locher, R.E., and Wu, S.J., SCR Manual (5th ed. : General Electric Company, 1972) pp 4 - 5.

ที่แตกต่างกันอาจเนื่องมาจากค่าต่าง ๆ ของความต้านทาน, ค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้ในวงจรไม่ตรงกับค่าที่แท้จริงนัก เช่น ลวดความต้านทานเมื่อร้อนก็จะมีค่าความต้านทานสูงขึ้น และในทางปฏิบัติ ตัวเก็บประจุก็จะมีคุณสมบัติแตกต่างไปจากตัวเก็บประจุในอุดมคติดังนี้ คือ²

- 1) ค่าความจุไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นกับความถี่, อุณหภูมิ และอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุ
- 2) ตัวเก็บประจุจะมีค่าความเหนี่ยวนำอยู่ด้วย ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายมีค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้ต่ออนุกรมกับค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาดเล็กน้อย ๆ ดังนั้นที่ความถี่สูงมาก ตัวเก็บประจุอาจมีคุณสมบัติคล้ายชกชดได้
- 3) ตัวเก็บประจุเมื่อใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับจะมีค่าความต้านทานอยู่ด้วย ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานขึ้นในตัวเก็บประจุ
- 4) ตัวเก็บประจุต้องการเวลาในการประจุ ตัวเก็บประจุจะเก็บประจุได้ไม่เร็วเท่ากับความเร็วที่แหล่งจ่ายประจุไฟฟ้าจะให้แก่นั่นได้ และไม่อาจปล่อยประจุ (discharge) ได้ในทันทีทันใดเมื่อเกิดลัดวงจร ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกที่ใช้ในตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เรื่องนี้เป็นแบบกระดาษ (Impregnated paper capacitor) ซึ่งเมื่อใช้กับกระแสสลับ ๆ จะใช้ได้ไม่เกินความถี่ 1000 Hz.³ แต่ในวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ได้ใช้ตัวเก็บประจุทำงานที่ความถี่สูงกว่า 1000 Hz. มาก ดังนั้นจากการทดลองเมื่อใช้ค่าตัวเก็บประจุ = $0.47 \mu F$ ค่าความเหนี่ยวนำของชกชด = $36 \mu H$ และค่าความต้านทาน = 16.5 โอห์ม

² Brotherton, M. , Capacitors (New Jersey : D. Van Nostrand Company, Inc. , 1959) pp. 12 - 13

³ Ibid. , p. 58



เมื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟตรงขึ้นเรื่อย ๆ จะได้รูปคลื่นของกระแสในรูป 3.11 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในรูปที่ 3.11 (ก) เมื่อใช้แรงดันไฟตรงประมาณ 25 โวลต์ รูปคลื่นของกระแสจะเป็นไปตามสมการที่ (3) หัวข้อ 2.5.1 แต่เมื่อเพิ่มแรงดันไฟตรงมากขึ้นเรื่อย ๆ จนถึง 66 โวลต์ จะได้รูปของกระแสในรูปที่ 3.11 (ข) ซึ่งอาจเป็นเพราะว่า ตัวเก็บประจุรับอัตราการประจุจากแหล่งกำเนิดไฟตรงไม่ทัน และผลอันนี้ก็จะยิ่งเกิดมากขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันไฟตรงให้สูงขึ้น ดังในรูปที่ 3.11 (ค)

สาเหตุอีกประการหนึ่งซึ่งทำให้การทำงานของวงจรมืดลง เมื่อเพิ่มค่าของแรงดันไฟตรงที่มาเลี้ยงวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับให้สูงขึ้น อาจเนื่องมาจากการที่เอากระแสที่ผ่าน SCR แต่ละกลุ่มมารวมกันโดยไม่ใช้ switching diode คั่นไว้ก่อน จึงทำให้กระแสของ SCR แต่ละกลุ่มมารบกวนภาวะสงบของ SCR กลุ่มอื่น ๆ ที่ยังไม่ได้อุบัติจนครบ จึงจะเห็นได้จากรูปสัจภาพไฟฟ้าของ SCR แต่ละตัวในกลุ่มเมื่อให้ทำงานกลุ่มเดียวเปรียบเทียบกับสัจภาพไฟฟ้าของ SCR แต่ละตัวในกลุ่ม เมื่อให้ทำงานหลายกลุ่ม ดังในรูป 3.12 และรูป 3.13 เมื่อให้ทดลองให้ SCR ทำงานกลุ่มเดียวปรากฏว่า สามารถใช้กับแรงดันไฟตรงได้สูงกว่าให้ SCR ทำงานด้วยกันทุกกลุ่มมาก เช่น เมื่อใช้ $L = 36 \mu\text{H}$, $C = 0.47 \mu\text{F}$ และ $R = 16.5 \Omega$ เมื่อให้ทำงานกลุ่มเดียว โดยใช้ความถี่ของสัญญาณที่ให้แก่วงจรจุดชนวน SCR = 30 K Hz ปรากฏว่าใช้ค่าแรงดันไฟตรงได้ถึง 120 โวลต์ แต่เมื่อให้ SCR ทำงานด้วยกันทุกกลุ่ม ปรากฏว่าสามารถใช้ค่าแรงดันไฟตรงได้เพียง 35 โวลต์เท่านั้น

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าตัวเก็บประจุแบบนี้ผลิตไม่ได้แนะนำให้ใช้เกินความถี่ 1 K Hz. เมื่อใช้กระแสสูง แต่ในการวิจัยครั้งนี้ก็ได้ทำการทดลองที่ความถี่ 100 K Hz เพื่อทดสอบว่าวงจรเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ จะสามารถทำงานที่ความถี่ 100 K Hz. ได้หรือไม่ ปรากฏว่า เมื่อใช้ค่าตัวเก็บประจุ = $0.027 \mu\text{F}$ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด = $40 \mu\text{H}$, ค่าความต้านทาน = 17 โอห์ม, ความถี่ที่ให้แก่วงจรจุดชนวน = 200 K Hz. , แรงดันไฟตรง = 5 โวลต์ ปรากฏได้รูปคลื่นดังในรูป 3.13 รูปของกระแสในวงจรแสดงไว้ในรูป 3.14 (ก) ซึ่งเป็นรูปชานันลักษณะเพี้ยน เพราะเป็นผลของกระแส

ในรูป 3.14 (ค) ซึ่งมีการ oscillate เมื่อ SCR เข้าสู่ภาวะความต้านทานสูงไหลเข้าสู่โหลดที่ปลายทั้ง 2 ด้านมารวมกัน เมื่อให้แรงดันไฟตรงสูงกว่า 5 โวลต์ จะทำให้การทำงานของวงจรมืดเหลว เนื่องจาก SCR ไม่เข้าสู่ภาวะบิกกระแส ซึ่งอาจเป็นเพราะว่า SCR ที่ใช้เป็นแบบ phase-shift SCR ดังนั้น turn-off time ของมันจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม สำหรับกระแสเล็กน้อย ๆ จะเห็นได้ว่าระบบแบ่งเวลานี้ช่วยให้วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับทำงานที่ความถี่ 100 KHz ได้

3.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานชิ้นต่อไป

ในการทำการวิจัยชิ้นต่อไป ควรหาอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้พร้อม เช่น

- 1) SCR ที่ใช้สำหรับความถี่สูง (Inverter type) เพื่อทดลองเปรียบเทียบกับ SCR แบบ phase - shift type
- 2) ตัวเก็บประจุชนิดที่เมื่อมีกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ไหลผ่านก็ยังสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง ๆ
- 3) switching diode ซึ่งสามารถทนกระแสได้สูง เพื่อใช้ต่ออนุกรมกับขั้วโหลด ดังในรูป 3.15 เพื่อกันผลของกระแสจาก SCR แต่ละกลุ่ม ไม่ให้มารบกวนกัน
- 4) ferrite cup เพื่อไว้ทำ Blocking Oscillator เพื่อให้พัลส์ที่ออกมาในช่วงเวลาของพัลส์ (duration of pulse) แคบ
- 5) saturated core เพื่อใช้ในการลดอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาในตอนเริ่มแรก เพราะถ้ากระแสในวงจรมีค่าสูงมาก ๆ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาในวงจรอาจเกินขีดจำกัดของ SCR ได้
- 6) แหล่งกำเนิดแรงดันไฟตรงที่ให้ค่ากระแสและแรงดันไฟตรงสูง
- 7) เมื่อกระแสในวงจรมากถึงค่าหนึ่ง interaction ในวงจร (ดูรูป 3.3 ฉ) อาจทำให้ SCR จุดชนวนผิดพลาดกับขั้นได้ จึงควร shield วงจรจุดชนวนหรือ shield เฉพาะ Blocking

Oscillator ก็ได้ และสายจากวงจร Blocking Oscillator ไปยังเกทของ SCR ควรใช้สาย shield แบบที่ใช้กับความถี่สูง

- 8) โทลคที่ใช้ในรูป 3.15 อาจใช้เป็นหม้อแปลงไฟแบบแท่งกลาง (center-tap transformer) ซึ่งทำให้สามารถเปลี่ยนค่าความต้านทานค่านอกของวงจรได้ตามต้องการ.

ตารางที่ 2 แสดงค่าแรงดันไฟตรงสูงสุดที่ให้แก่วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแส
สลับ เมื่อใช้ค่า R,L,C และ f_T ต่าง ๆ กัน

f_T	R	C	L	$E_{max.}$
23	7.4	0.47	340	12
23	16.5	0.47	340	25
23	33.0	0.47	340	70
64	33.0	0.056	340	20
64	66.0	0.056	340	40
64	132	0.056	340	120
56	11.0	0.47	36	30
56	16.5	0.47	36	35
20	16.5	0.47	36	70
17	16.5	0.47	36	90
15	16.5	0.47	36	95

หมายเหตุ

- f_T = ความถี่ของสัญญาณรูปซายน์ที่ให้แก่วงจรจุดชนวน (หน่วยเป็น K Hz.)
R = ค่าความต้านทานของโหลดในวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแส
สลับ (รูป 2.1) มีหน่วยเป็นโอห์ม
C = ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจร ฯ (หน่วยเป็น μF)
L = ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดที่ใช้ในวงจร ฯ (มีหน่วยเป็น μH)
 $E_{max.}$ = แรงดันไฟตรงสูงสุดที่ให้แก่วงจร ฯ (รูป 2.1) ก่อนที่การทำงาน
ของวงจรมันจะล้มเหลว (หน่วยเป็นโวลต์)

ตารางที่ 3 แสดงผลการคำนวณหารูปคลื่นของกระแส
และค่าศักย์ไฟฟ้าตลอดตัวเก็บประจุ

R	L	C	E	f	T	V _{co}	I	
							wt	i
7.4	340	0.47	11	12.48	80.15	±51.22	0	0
							0.2	0.451
							0.4	0.860
							0.6	1.213
							0.8	1.499
							1.0	1.710
							1.2	1.843
							1.4	1.895
							1.6	1.869
							1.8	1.771
							2.0	1.609
							2.2	1.391
							2.4	1.130
							2.6	0.839
							2.8	0.530
33.0	340	0.47	65	9.95	100.52	±77.41	3.0	0.217
							0	0
							0.2	1.140
							0.4	1.914

ตารางที่ 3 (ต่อ)

R	L	C	E	f	T	V _{co}	I	
							wt	i
33.0	340	0.47	65	9.95	100.52	±77.41	0.6	2.375
							0.8	2.583
							1.0	2.594
							1.2	2.460
							1.4	2.227
							1.6	1.934
							1.8	1.613
							2.0	1.289
							2.2	0.981
							2.4	0.702
							2.6	0.459
							2.8	0.255
							3.0	0.092
33.0	340	0.056	15	35.66	28.04	±45.76	0	0
							0.2	0.159
							0.4	0.285
							0.6	0.396
							0.8	0.481
							1.0	0.541
							1.2	0.573
							1.4	0.580

ตารางที่ 3 (ต่อ)

R	L	C	E	f	T	V _{co}	I	
							wt	i
33.0	340	0.056	15	35.66	28.04	±45.76	1.6	0.564
							1.8	0.526
							2.0	0.470
							2.2	0.401
							2.4	0.320
							2.6	0.234
							2.8	0.146
							3.0	0.059
66.0	340	0.056	35	33.06	30.25	±55.93	0	0
							0.2	0.233
							0.4	0.416
							0.6	0.549
							0.8	0.636
							1.0	0.679
							1.2	0.685
							1.4	0.660
							1.6	0.609
							1.8	0.541
							2.0	0.460
							2.2	0.372
2.4	0.283							

ตารางที่ 3 (ต่อ)

R	L	C	E	f	T	V _{co}	I	
							wt	i
66.0	340	0.056	35	33.06	30.25	±55.93	2.6	0.197
							2.8	0.117
							3.0	0.045
132.0	340	0.056	120	19.40	51.55	±121.6	0	0
							0.2	0.842
							0.4	1.201
							0.6	1.266
							0.8	1.170
							1.0	0.998
							1.2	0.803
							1.4	0.618
							1.6	0.455
							1.8	0.323
							2.0	0.219
							2.2	0.142
							2.4	0.086
							2.6	0.048
							2.8	0.023
3.0	0.007							

ตารางที่ 3 (ต่อ)

R	L	C	E	f	T	V _{co}	I	
							wt	i
11.0	36	0.47	25	30.11	33.21	±29.29	0	0
							0.2	1.348
							0.4	2.248
							0.6	2.773
							0.8	2.998
							1.0	2.991
							1.2	2.819
							1.4	2.536
							1.6	2.188
							1.8	1.814
							2.0	1.441
							2.2	1.090
							2.4	0.775
							2.6	0.503
16.5	36	0.47	90	12.92	77.39	±90.02	0	0
							0.2	6.960
							0.4	7.754
							0.6	6.392
							0.8	4.616

ตารางที่ 3 (ต่อ)

R	L	C	E	f	T	V _{co}	I	
							wt	i
16.5	36	0.47	90	12.92	77.39	±90.02	1.0	3.078
							1.2	1.938
							1.4	1.165
							1.6	0.672
							1.8	0.372
							2.0	0.197
							2.2	0.100
							2.4	0.047
							2.6	0.021
							2.8	0.008
							3.0	0.002

E = แรงแค้นไฟตรงที่ให้แก่วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ
(รูปที่ 2.1) มีหน่วยเป็นโวลต์

f = ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็น K Hz.

T = คาบ (period) ของไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็น μ sec

V_{co} = ศักย์ไฟฟ้าค่อมตัวเก็บประจุเพื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุเป็นศูนย์
มีหน่วยเป็นโวลต์

wt = เฟส (phase) ของไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็น เรเดียน

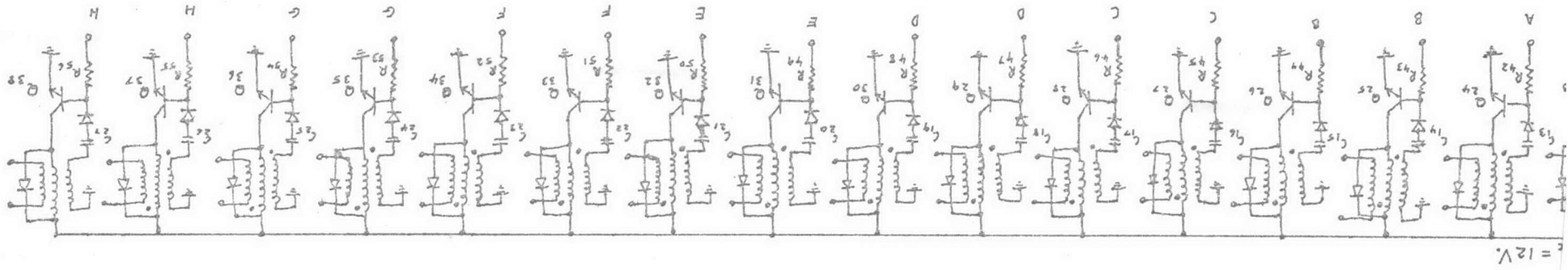
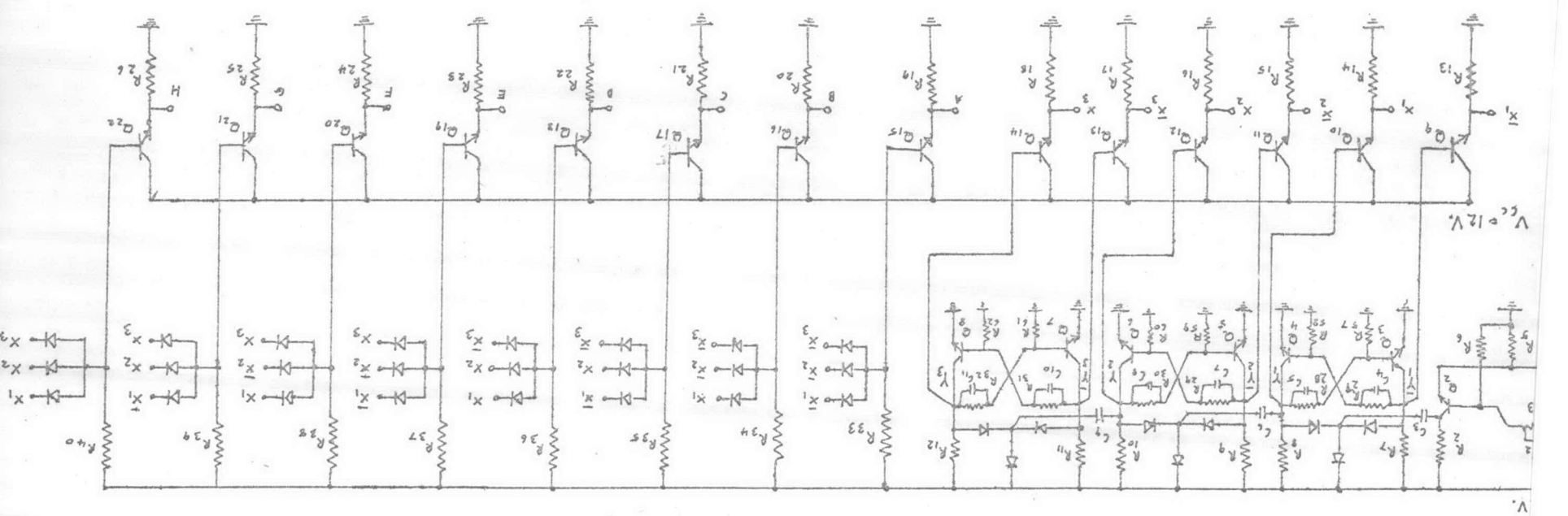
i = ค่าขณะใด ๆ ของกระแสสลับที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็นแอมแปร์

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ

R	L	C	E	ผลการคำนวณ			ผลการทดลอง		
				I_{max}	V_{co}	f	I_{max}	V_{co}	f
7.4	340	0.47	11	1.9	± 51.2	12.47	1.4	± 34	12.5
33	340	0.47	65	2.6	± 77.4	9.95	2.4	± 75	10.4
33	340	0.056	15	0.6	± 45.7	35.6	0.5	± 38	35.8
66	340	0.056	35	0.7	± 55.9	33.0	0.6	± 56	33.4
132	340	0.056	120	1.3	± 121.6	19.4	1.2	± 140	20.8
11	36	0.47	25	3.0	± 29.3	30.1	2.7	± 27	25.0
16.5	36	0.47	90	8.0	± 90.0	12.9	6.1	± 150	11.9

$I_{max.}$ = ค่ายอด (peak) ของกระแสลับที่เกิดขึ้นในวงจร
เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสลับ มีหน่วยเป็นแอมแปร์





V_c = 12V

Q₁ - Q₂₂ = BC 238 B ;
 Q₂₃ - Q₃₈ = 2 N 2222 A ;

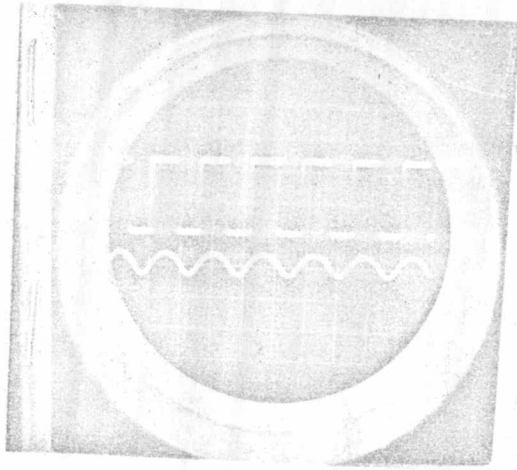
R₁, R₂ = 820 Ω ;
 R₃ = 3.3 kΩ ;

R₄ = 560 Ω ;
 R₅ = 56 Ω ;
 R₆ = 750 Ω ;
 R₇ - R₂₆ = 1 kΩ ;

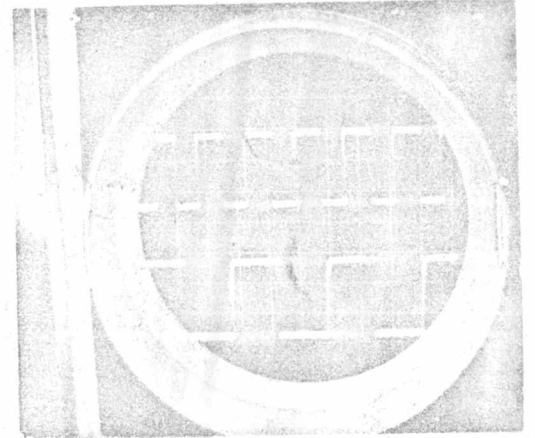
R₂₇ - R₃₂ = 100 kΩ ;
 R₃₃ - R₄₀ = 47 kΩ ;
 C₁ ;
 R₄₁ - R₅₆ = 100 kΩ ;
 C₂ ;

R₅₇ - R₆₂ = 3 MΩ ;
 C₃, C₆, C₉ = 300 μF ;
 C₄, C₅, C₇, C₈ = 100 μF ;
 C₁₀, C₁₁ = 80 μF ;

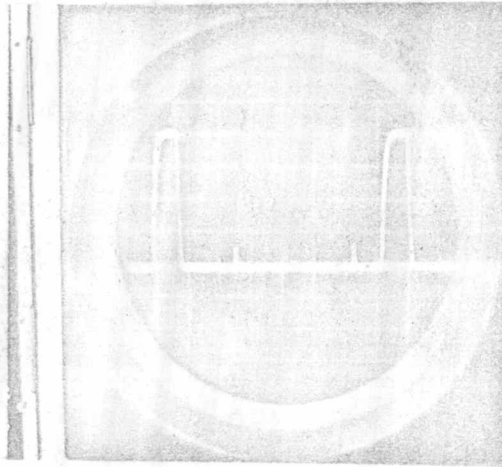
3.1 229900000 SCR



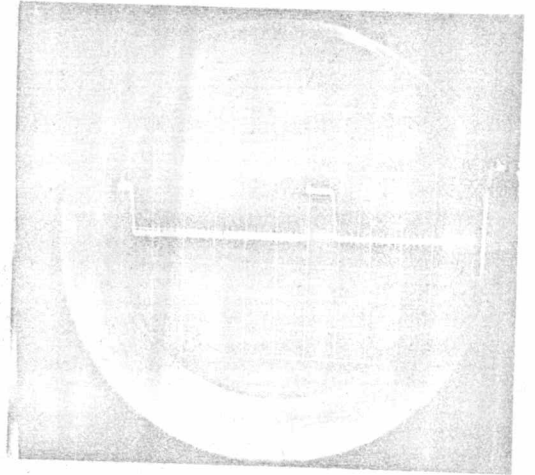
(ก)



(ข)



(ค)



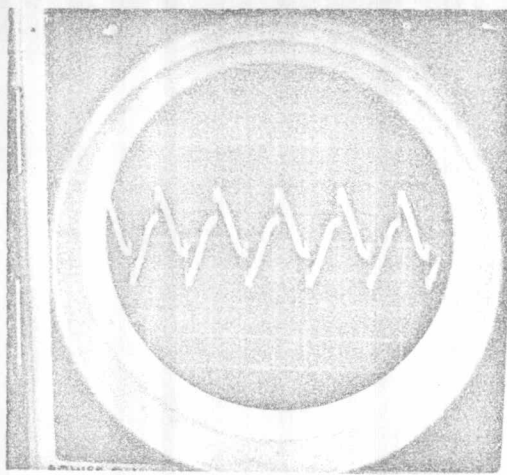
(ง)

- รูป 3.2 (ก) รูปล่าง สัญญาณรูปซายน์ที่ป้อนเข้าสู่วงจรที่มีทรานซิสเตอร์
 รูปบน สัญญาณออกของวงจรมีทรานซิสเตอร์
 (ข) รูปล่าง สัญญาณออกของวงจร ฟลิป - ฟลอป
 รูปบน สัญญาณที่นำมาจุดชนวนวงจรมีฟลิป - ฟลอป
 (ค) สัญญาณออกของวงจรคอลลเล็กเตอร์รวมที่นำมาจุดชนวนวงจรมีฟลิป - ฟลอป

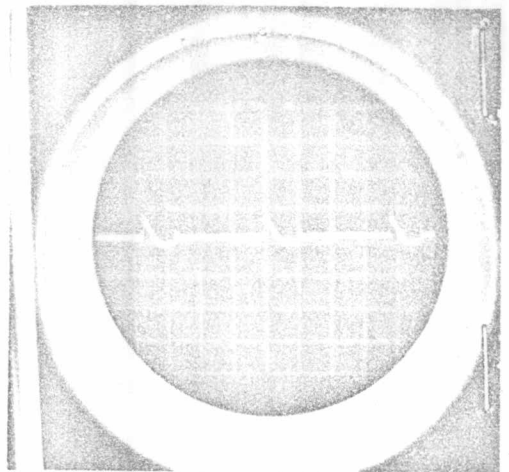
Blocking Oscillator

- (ง) สัญญาณออกของวงจร Blocking Oscillator วัคทีเกต
 ของ SCR

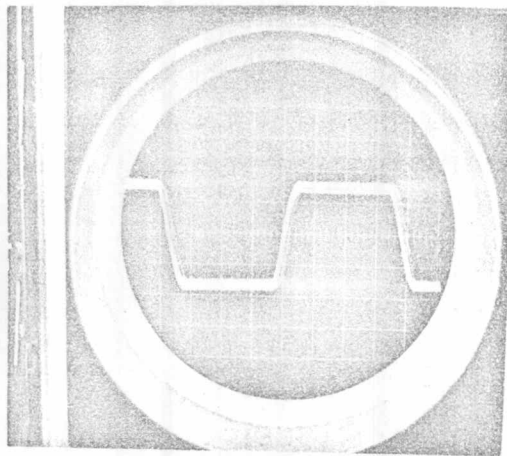
หมายเหตุ	รูป (ก),(ข)	แกน X: 1 ช่อง = 20 μ sec	แกน Y: 1 ช่อง = 5 V.
	รูป (ค)	แกน X: 1 ช่อง = 20 μ sec	แกน Y: 1 ช่อง = 2 V.
	รูป (ง)	แกน X: 1 ช่อง = 20 μ sec	แกน Y: 1 ช่อง = 0.5 V.



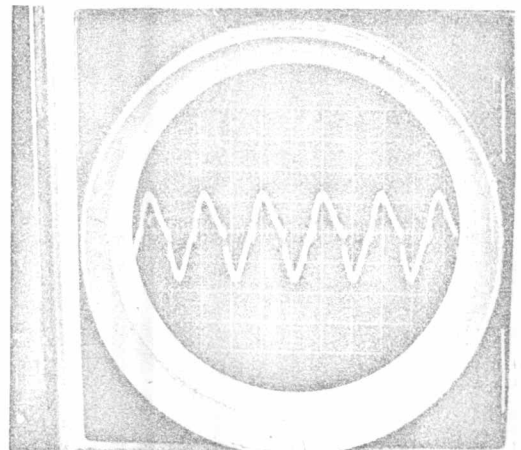
(ก) สัญญาณที่เข้ากรอมโหนด



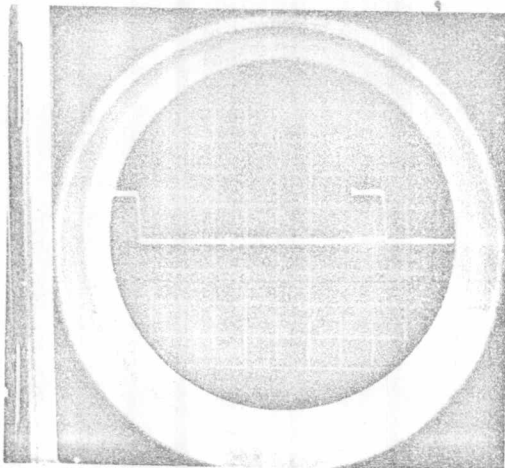
(ข) สัญญาณที่เข้ากรอมขดลวด



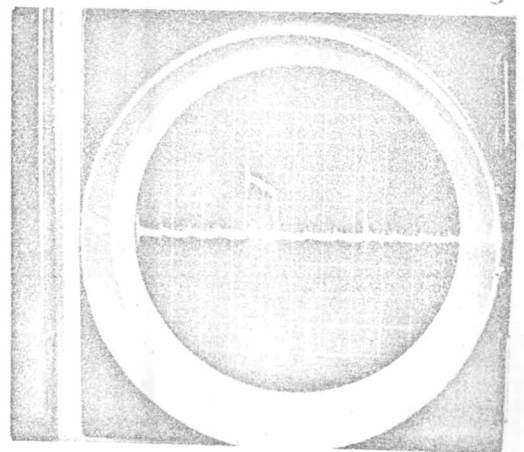
(ค) สัญญาณที่เข้ากรอมตัวเก็บประจุ



(ง) สัญญาณที่เข้ากรอมตัวต้านทาน 0.3 Ω



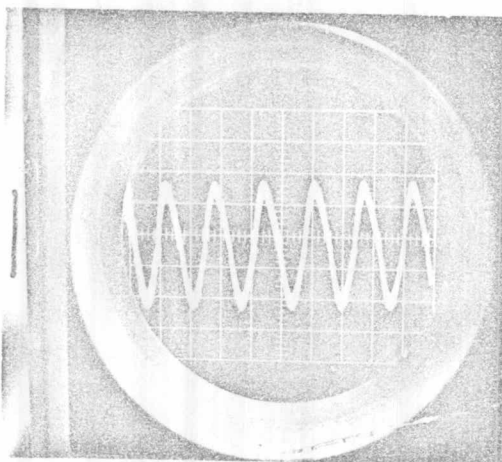
(จ) สัญญาณที่แตก เมื่อไม่มีกระแสในวงจร



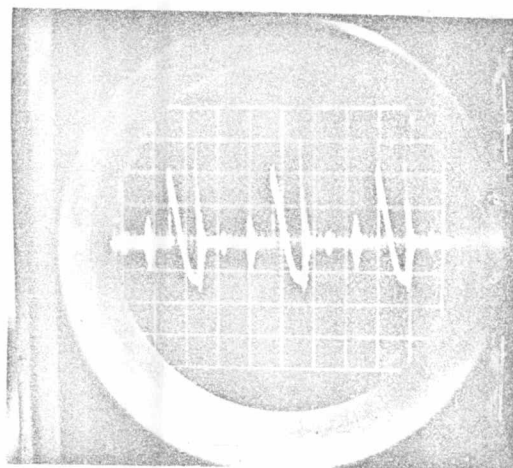
(ฉ) สัญญาณที่แตก เมื่อมีกระแสในวงจร

รูปที่ 3.3 แสดงรูปคลื่นต่าง ๆ ในวงจรรูป 2.1 เมื่อใช้ Rheostat เป็นโหนด และใช้ค่าต่าง ๆ ในวงจรดังนี้ $R = 8\Omega$, $L = 150\mu H$, $C = 0.47\mu F$, $E = 25 V$.

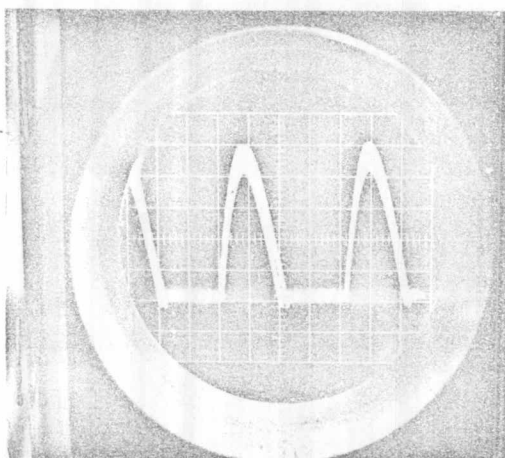
หมายเหตุ - รูป(ก) - (ค) แกน X, 1 ช่อง = $50 \mu sec$; แกน Y, 1 ช่อง = $50 V$.
 - รูป(ง) - (ฉ) แกน X, 1 ช่อง = $50 \mu sec$; แกน Y, 1 ช่อง = $0.5 V$.



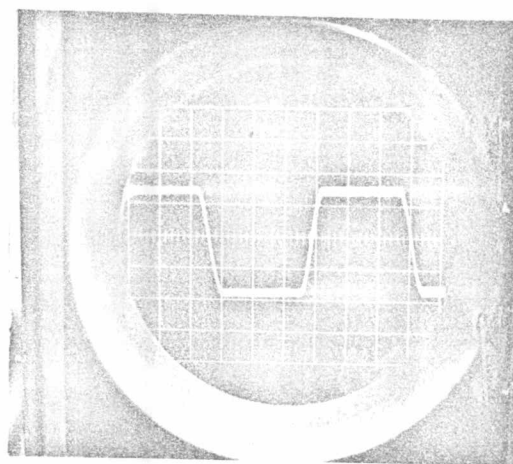
(ก) ศักย์ไฟฟ้าคร่อมโหลด



(ข) ศักย์ไฟฟ้าคร่อมขดลวด



(ค) ศักย์ไฟฟ้าคร่อมโหลดกริ่งตัว



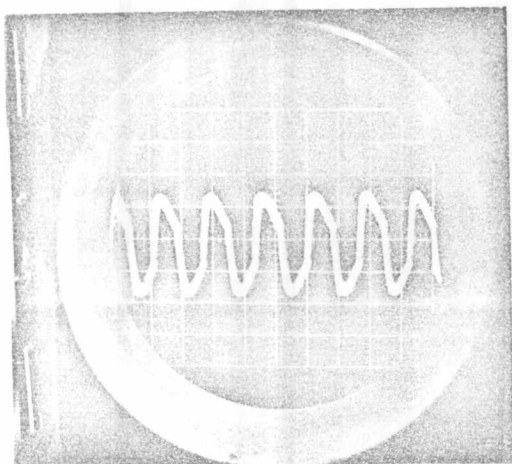
(ง) ศักย์ไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุ

รูป ที่ 3.4 แสดงรูปคลื่นต่าง ๆ ในวงจรรูป 2.1 เมื่อใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นโหลด และใช้ค่าต่าง ๆ ในวงจรดังนี้ $R = 7.4 \Omega$, $L = 340 \mu H$, $C = 0.47 \mu F$
 $E = 11 V.$, $f_T = 23 KHz.$

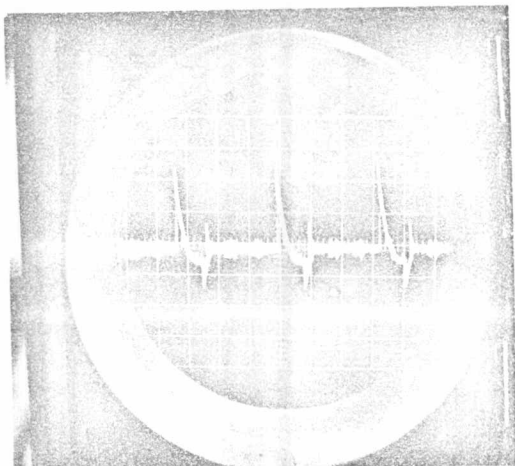
หมายเหตุ รูป (ก) แกน X, 1 ช่อง = $50 \mu sec$; แกน Y, 1 ช่อง = $5 V.$

รูป (ข), (ง) แกน X, 1 ช่อง = $50 \mu sec$; แกน Y, 1 ช่อง = $20 V.$

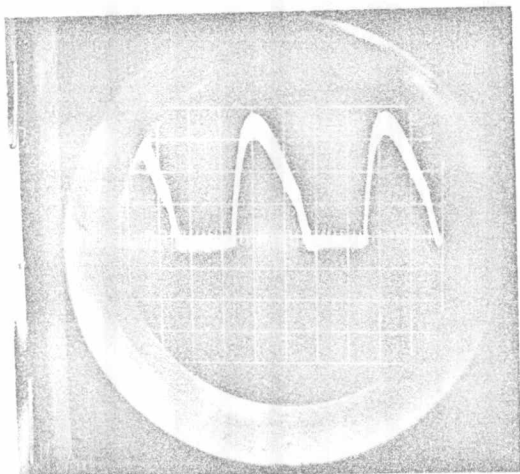
รูป (ค) แกน X, 1 ช่อง = $20 \mu sec$; แกน Y, 1 ช่อง = $2 V.$



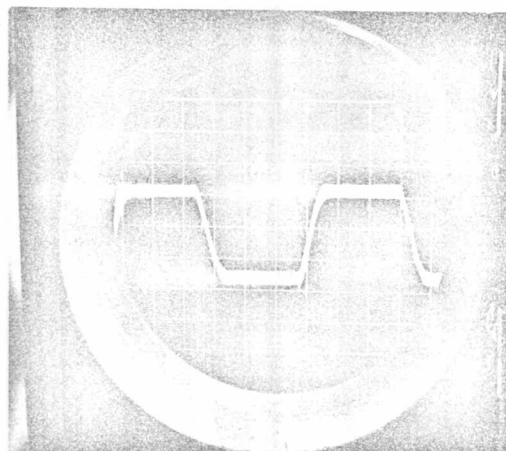
(ก) ค่ายไฟฟ้ากรอมโหนด



(ข) ค่ายไฟฟ้ากรอมชดลวด



(ค) ค่ายไฟฟ้ากรอมโหนดครึ่งตัว



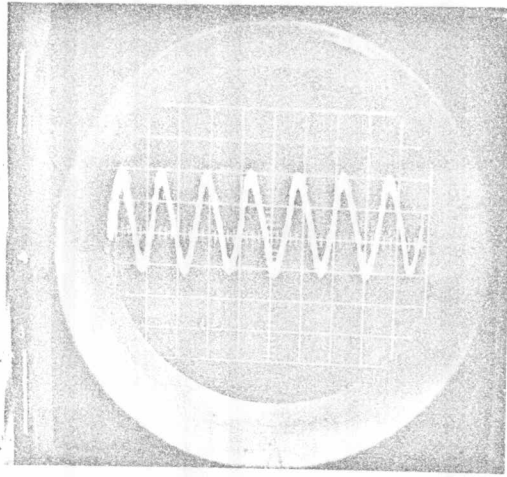
(ง) ค่ายไฟฟ้ากรอมกัวเก็บประจุ

รูปที่ 3.5 แสดงรูปคลื่นต่าง ๆ ในวงจรรูป 2.1 เมื่อใช้หลอดเตาไฟฟ้าเป็นโหนด และใช้ค่าต่าง ๆ ในวงจรดังนี้ $R = 33 \Omega$, $L = 340 \mu H$ $C = 0.47 \mu F$

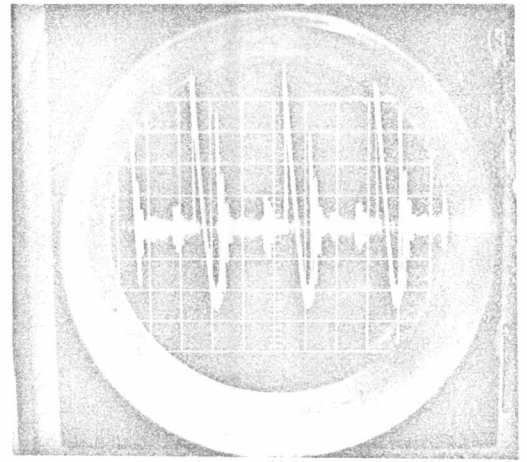
$E = 65 V.$, $f_T = 23 K Hz.$

หมายเหตุ รูป(ก),(ข),(ง) แกน X, 1 ช่อง = $50 \mu sec$; แกน Y, 1 ช่อง = $50 V.$

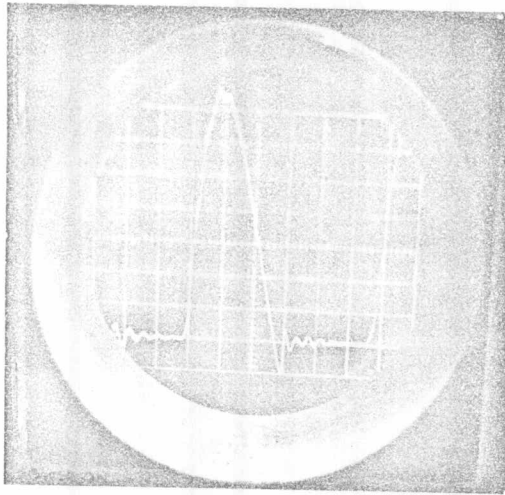
รูป (ค) แกน X, 1 ช่อง = $20 \mu sec$; แกน Y, 1 ช่อง = $20 V.$



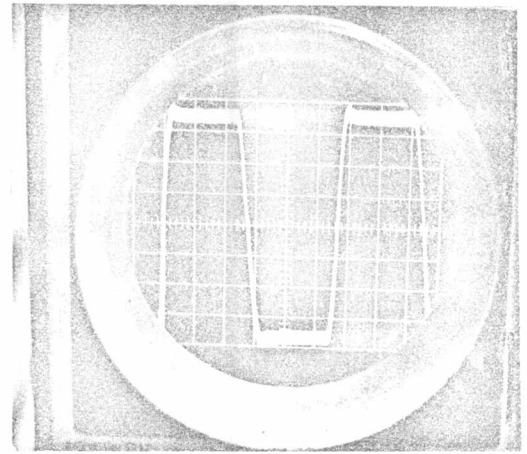
(ก) สัญญาณไฟ้ากร่อมโหลด



(ข) สัญญาณไฟ้ากร่อมวกลวด



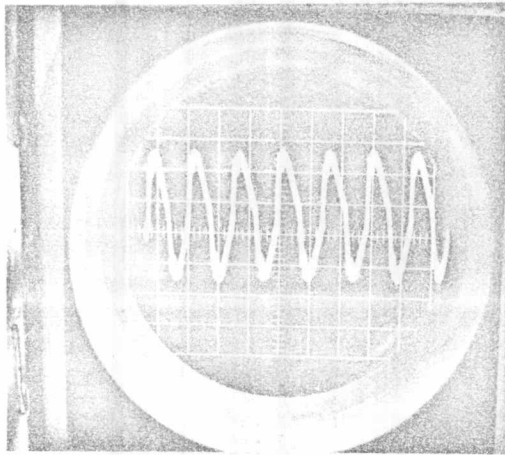
(ค) สัญญาณไฟ้ากร่อมโหลดกริ่งคว



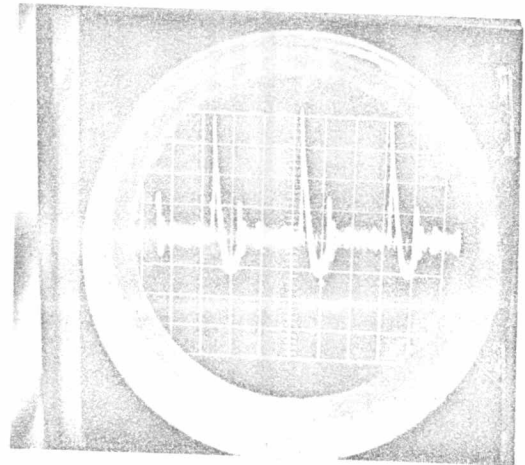
(ง) สัญญาณไฟ้ากร่อมควเก็บประจุ

รูปที่ 3.6 แสดงรูปคลื่นต่าง ๆ ในวงจรรูป 2.1 เมื่อใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นโหลด และใช้ค่าต่าง ๆ ในวงจรดังนี้ $R = 33 \Omega$, $L = 340 \mu H$, $C = 0.056 \mu F$
 $E = 15 V.$, $f_T = 64 K Hz.$

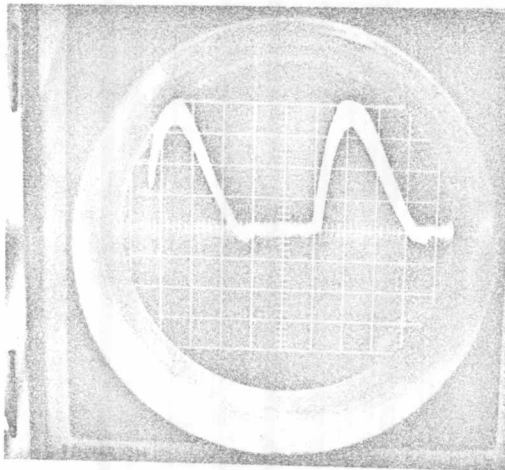
หมายเหตุ รูป(ก), (ข), (ง) แกน X, 1 ช่อง = $20 \mu sec$; แกน Y, 1 ช่อง = $10 V.$
 รูป (ค) แกน X, 1 ช่อง = $5 \mu sec$; แกน Y, 1 ช่อง = $2 V.$



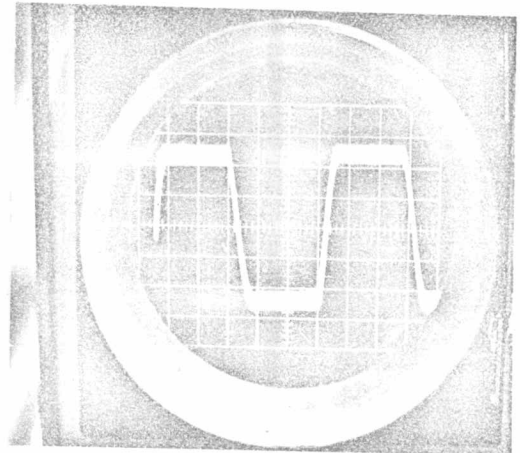
(ก) ศักย์ไฟฟ้าคร่อมโหลด



(ข) ศักย์ไฟฟ้าคร่อมขดลวด



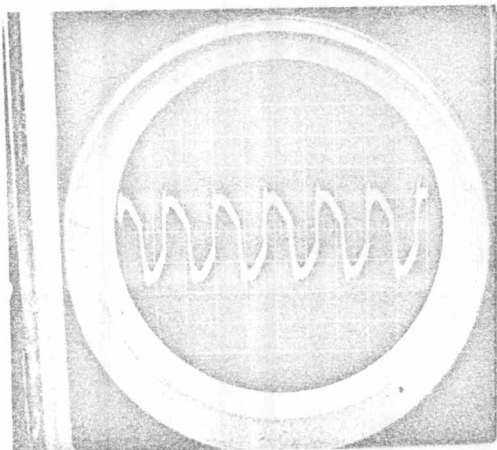
(ค) ศักย์ไฟฟ้าคร่อมโหลดครึ่งตัว



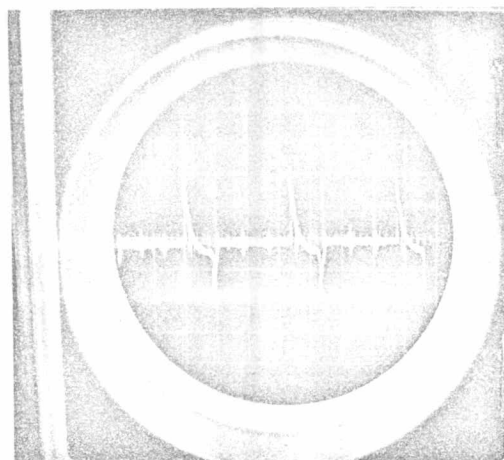
(ง) ศักย์ไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุ

รูปที่ 3.7 แสดงรูปคลื่นต่าง ๆ ในวงจรรูป 2.1 เพื่อใช้วัดเกาไฟฟ้าเป็นโหลด และใช้ค่าต่าง ๆ ในวงจรดังนี้ $R = 66 \Omega$, $L = 340 \mu H$, $C = 0.056 \mu F$, $E = 35 V.$, $f_T = 64 K Hz.$

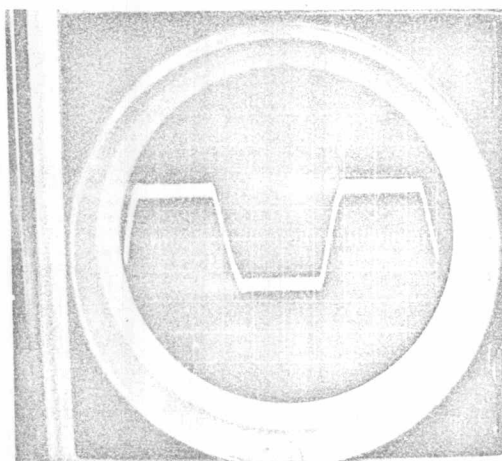
หมายเหตุ รูป(ก),(ข),(ง) แกน X,1 ช่อง = $20 \mu sec$; แกน Y,1 ช่อง = $20 V.$
รูป (ค) แกน X,1 ช่อง = $5 \mu sec$; แกน Y,1 ช่อง = $10 V.$



(ก) ตั๊กยกไฟฟ้ากรรรมโหนด.



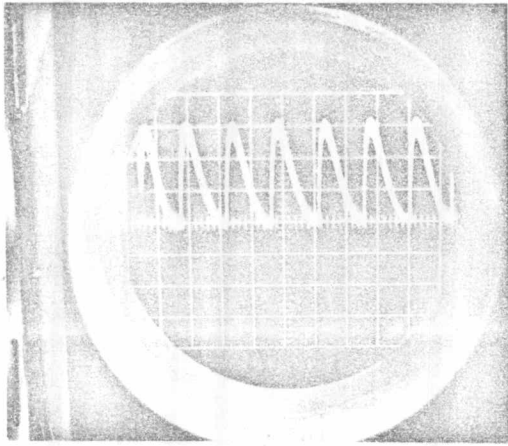
(ข) ตั๊กยกไฟฟ้ากรรรมซดลวด.



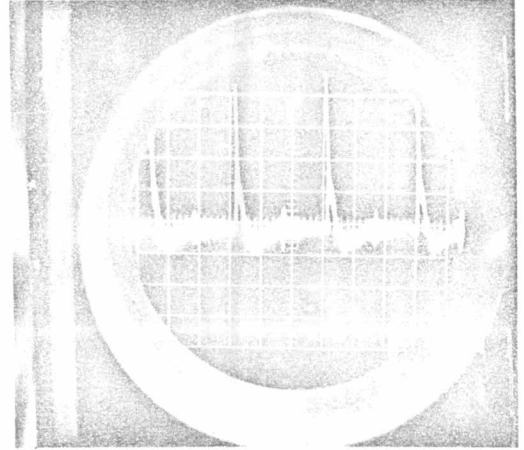
(ค) ตั๊กยกไฟฟ้ากรรรมตัวเก็บประจุ.

รูปที่ 3.8 แสดงรูปคลื่นต่าง ๆ ในวงจรรูป 2.1 เมื่อใช้หลอดเตาไฟฟ้าเป็นโหนด และใช้ค่าต่าง ๆ ในวงจรดังนี้ $R = 11 \Omega$, $L = 36 \mu H$, $C = 0.47 \mu F$, $E = 25 V.$, $f_T = 56 K Hz.$

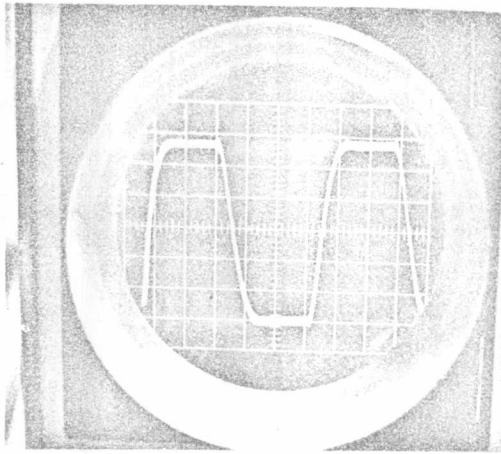
หมายเหตุ แกน X, 1 ช่อง = $20 \mu sec$; แกน Y, 1 ช่อง = $20 V.$



(ก) ศักย์ไฟฟ้าคร่อมโหนดครึ่งตัว



(ข) ศักย์ไฟฟ้าคร่อมขดลวด

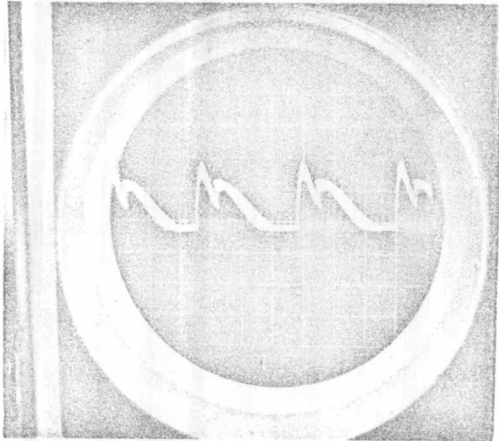


(ค) ศักย์ไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุ

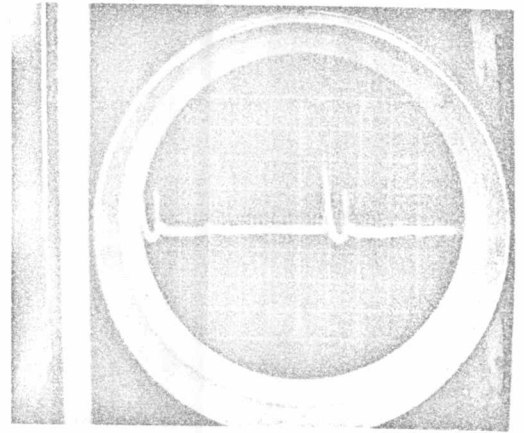
รูปที่ 3.9 แสดงรูปคลื่นต่าง ๆ ในวงจรรูป 2.1 เมื่อใช้ลวดเตาไฟฟ้าเป็นโหนด

และใช้ค่าต่าง ๆ ในวงจรดังนี้ $R = 132 \Omega$, $L = 340 \mu H$, $C = 0.056 \mu F$,
 $E = 120 V.$,

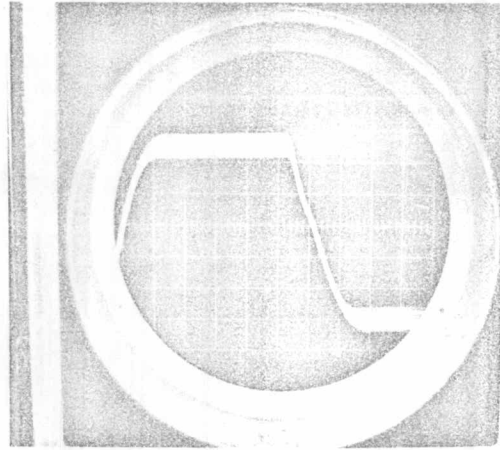
หมายเหตุ - แกน X, 1 ช่อง = 20 sec; แกน Y, 1 ช่อง = 50 V.



(ก) ตักย์ไฟฟ้าพร้อมโหลด



(ข) ตักย์ไฟฟ้าพร้อมขดลวด



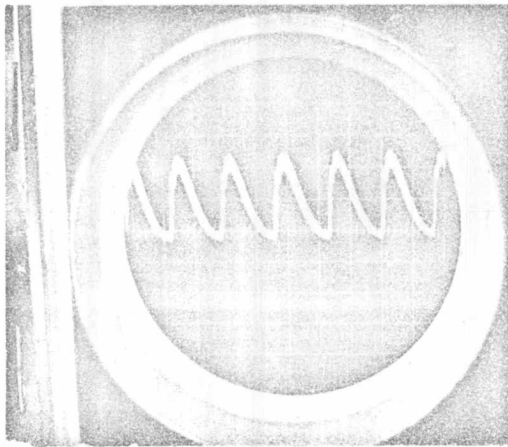
(ค) ตักย์ไฟฟ้าพร้อมตัวเก็บประจุ

รูปที่ 3.10 แสดงรูปคลื่นต่าง ๆ ในวงจรรูป 2.1 เมื่อใช้วคเตาไฟฟ้าเป็นโหลด

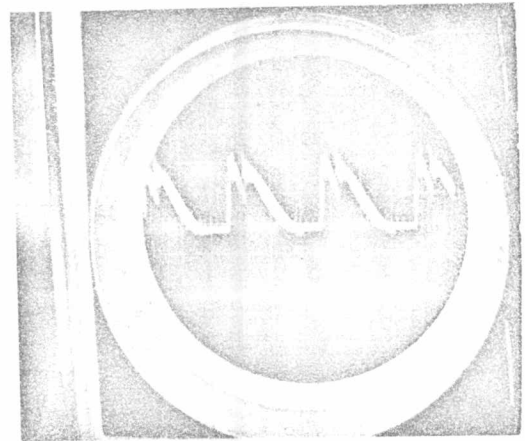
และใช้ค่าต่าง ๆ ในวงจรดังนี้ $R = 16.5 \Omega$, $L = 36 \mu H$, $C = 0.47 \mu F$

$E = 90 V$.

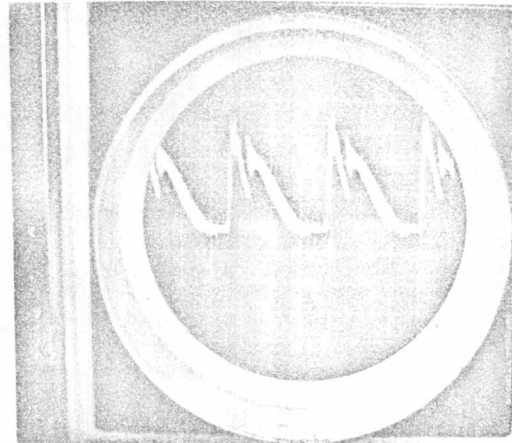
หมายเหตุ แกน X, 1 ช่อง = $20 \mu sec$; แกน Y, 1 ช่อง = $50 V$.



(ก) เมื่อใช้แรงดันไฟตรง = 25 V.



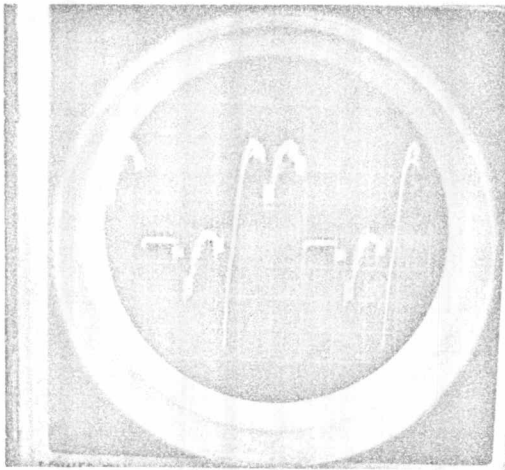
(ข) เมื่อใช้แรงดันไฟตรง = 66 V.



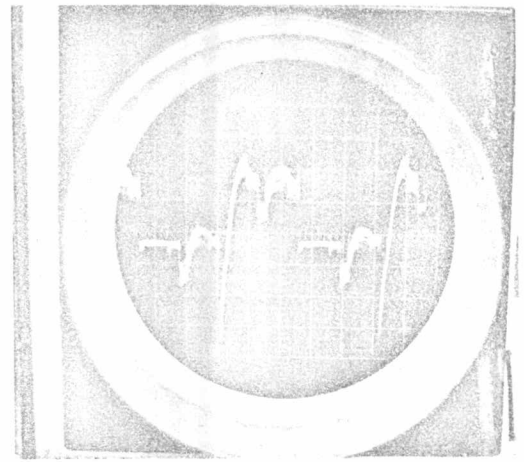
(ค) เมื่อใช้แรงดันไฟตรง = 90 V.

รูปที่ 3. 11 แสดงรูปกระแสที่ไหลผ่าน SCR กลุ่ม 1 และกลุ่ม 2 ในวงจรรูป 2.1 เมื่อ
 เปลี่ยนค่าแรงดันไฟตรง ขณะเมื่อใช้ค่า $R = 16.5 \Omega$, $L = 36 \mu H$.
 $C = 0.47 \mu F$.

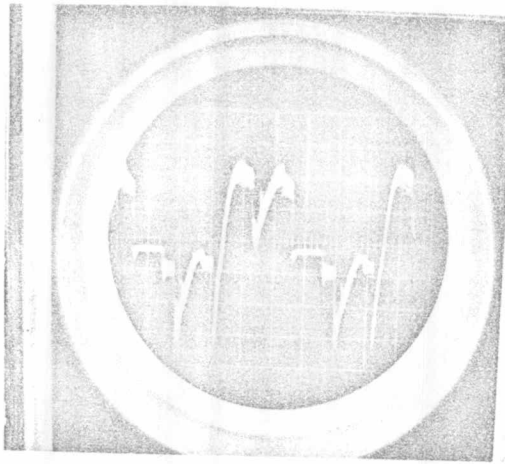
หมายเหตุ รูป (ก) แกน X, 1 ช่อง = $20 \mu sec$. แกน Y, 1 ช่อง = $2/3$ Ampere
 รูป (ข), (ค) แกน X, 1 ช่อง = $20 \mu sec$. แกน Y, 1 ช่อง = $5/3$ Ampere



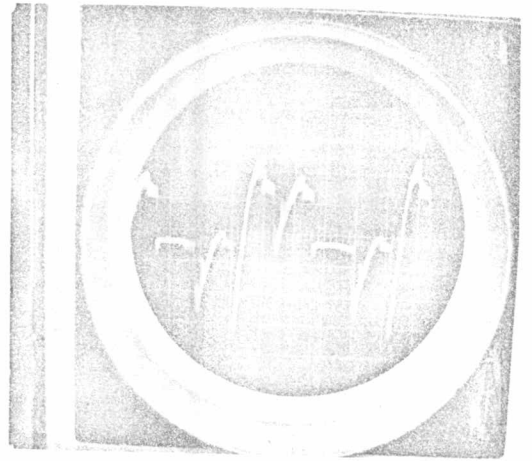
(ก) ตั๋วไฟฟ้ากร่อม SCR D₁



(ข) ตั๋วไฟฟ้ากร่อม SCR D₂



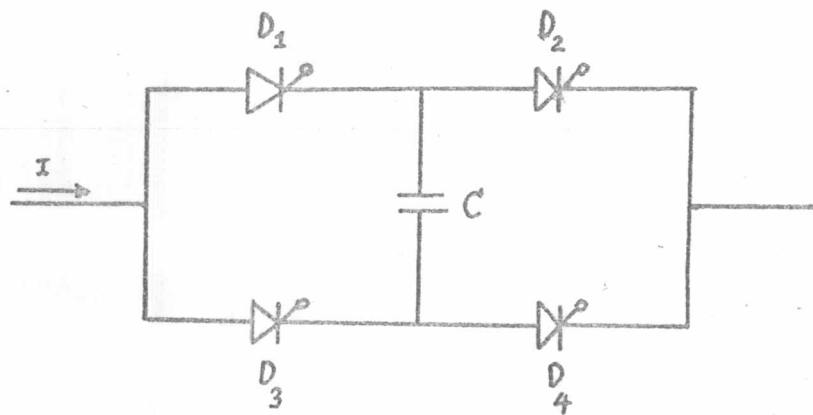
(ค) ตั๋วไฟฟ้ากร่อม SCR D₃

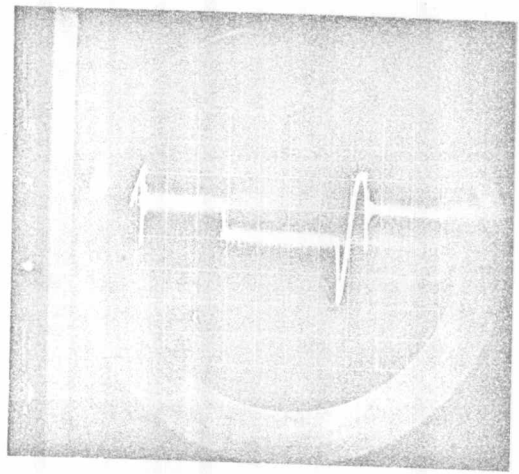


(ง) ตั๋วไฟฟ้ากร่อม SCR D₄

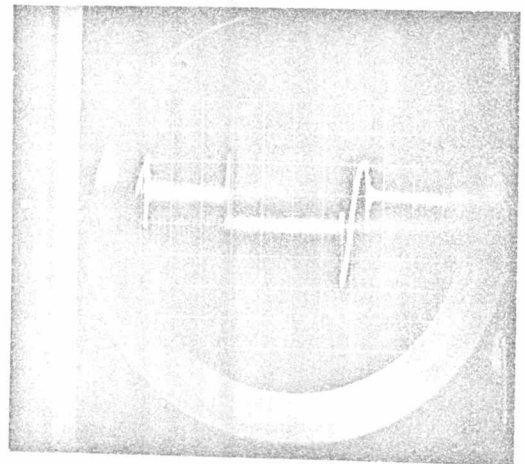
รูปที่ 3.12 แสดงตั๋วไฟฟ้ากร่อม SCR แต่ละตัวใน 1 กลุ่ม เมื่อมีกระแสไหลผ่าน SCR ทุกกลุ่ม

หมายเหตุ

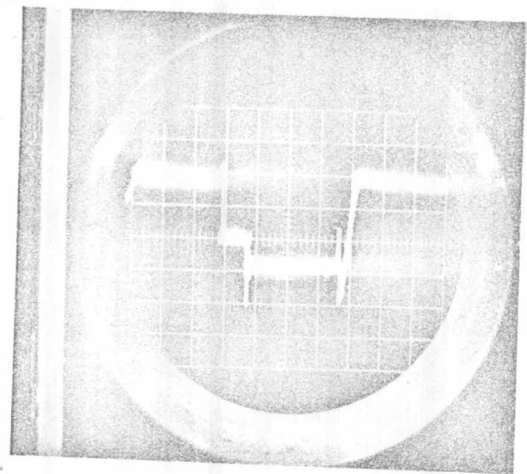




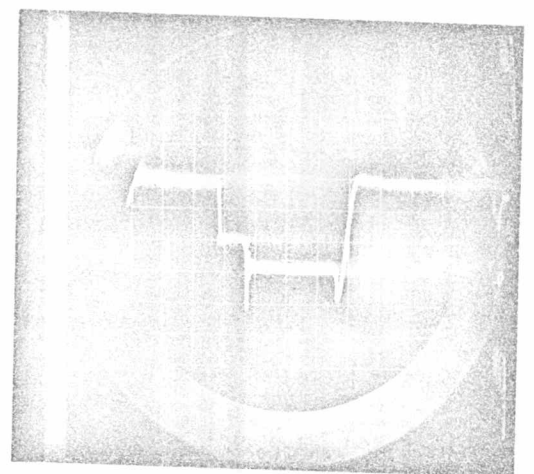
(ก) ศักย์ไฟฟ้ากร่อม SCR D₁



(ข) ศักย์ไฟฟ้ากร่อม SCR D₂



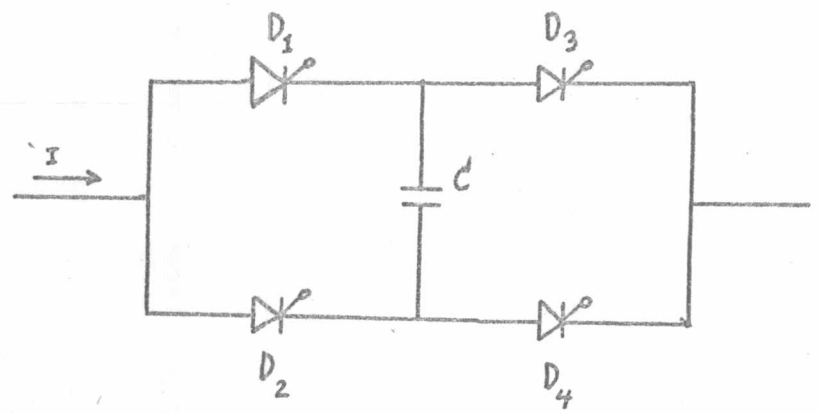
(ค) ศักย์ไฟฟ้ากร่อม SCR D₃

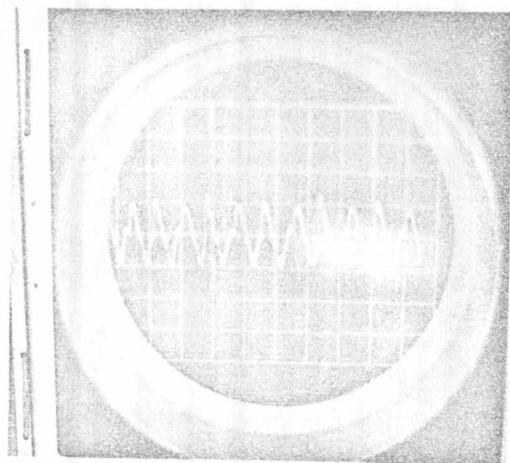


(ง) ศักย์ไฟฟ้ากร่อม SCR D₄

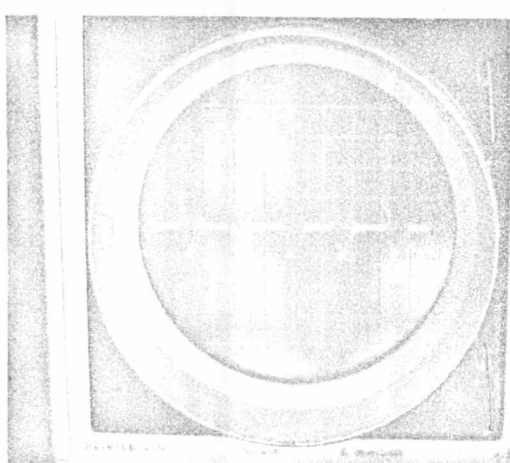
รูปที่ 3.13 แสดงศักย์ไฟฟ้ากร่อม SCR แต่ละตัวใน 1 กลุ่ม เมื่อมีกระแสไหลผ่าน SCR กลุ่มนั้นเพียงกลุ่มเดียว

หมายเหตุ-

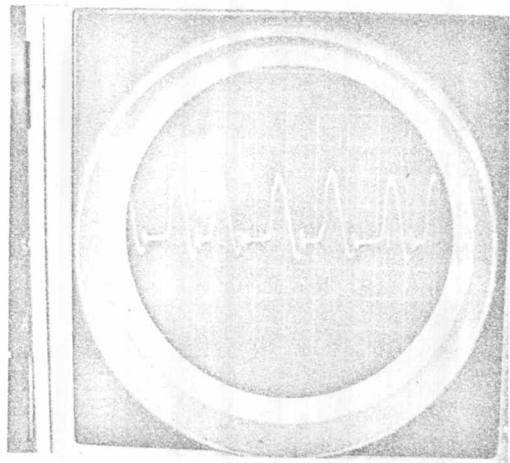




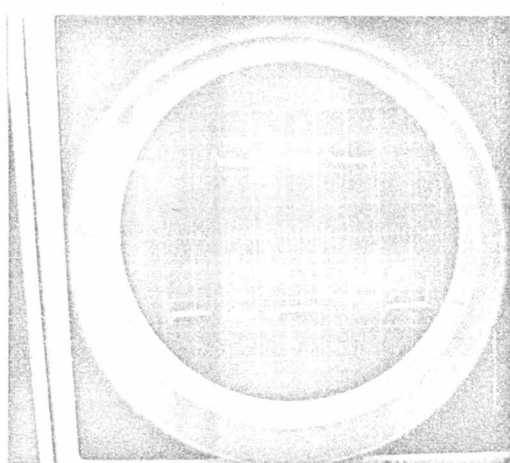
(ก) ศักย์ไฟฟ้าคร่อมโหลด



(ข) ศักย์ไฟฟ้าคร่อมขดลวด



(ค) ศักย์ไฟฟ้าคร่อมโหลดครึ่งตัว

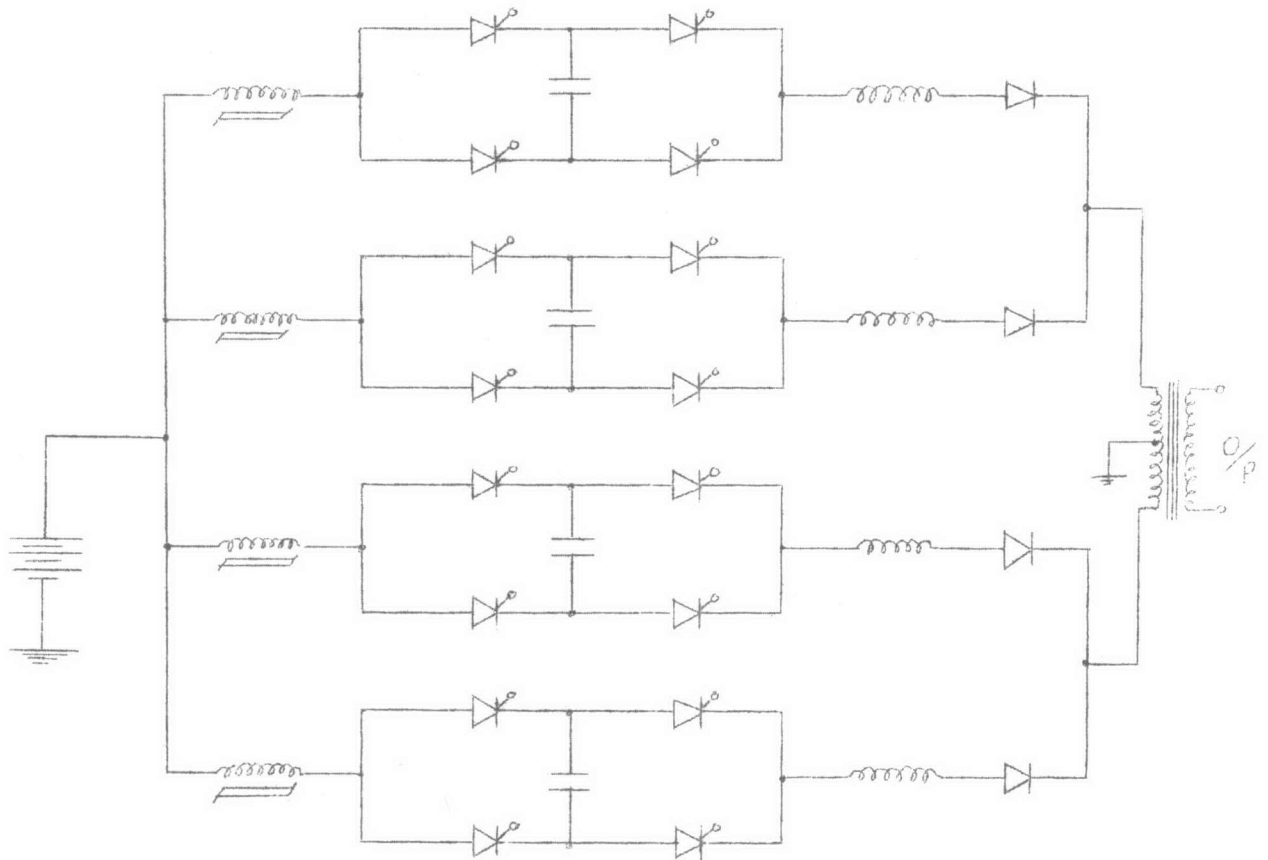


(ง) ศักย์ไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุ

รูปที่ 3.14 แสดงรูปคลื่นต่าง ๆ ในวงจรรูป 2.1 เมื่อใช้ลวดเคาไฟฟ้าเป็นโหลด และใช้ค่าต่าง ๆ ในวงจรดังนี้ $R = 17 \Omega$, $L = 40 \mu H$
 $C = 0.027 \mu F$, $E = 5 V.$, $f_T = 200 KHz.$

หมายเหตุ

- แกน X , 1 ช่อง = 10 $\mu sec.$
- แกน Y , 1 ช่อง = 5 V.



รูปที่ 3.15 วงจรเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับที่ควรทำการวิจัย
ต่อไป