บทที่ 1

บทนำ

เมื่อครั้งยังไม่มีการประดิษฐ์ SCR ขึ้นนั้น การเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับ สำหรับความถี่ต่ำ (ต่ำกว่า 3 KHz)[1] อาจทำได้โดยใช้ชุด motor-generator และสำหรับความถี่สูงใช้วงจรหลอดอิเล็คตรอนสูญญากาศ ต่อมาเมื่อได้มีการประดิษฐ์ SCR ขึ้นการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับก็หันมานิยมใช้วงจร SCR แทน เพราะมีข้อดีหลายประการดังต่อไปนี้.–

1. มีขนาดเล็กกว่ามาก จึงใช้เนื้อที่ในการติดตั้งอุปกรณ์น้อยกว่า
2. มีราคาถูกกว่า
3. การบำรุงรักษาน้อยกว่า
4. อายุการใช้งานมากกว่า
5. น้ำหนักเบากว่า
6. ขณะปฏิบัติงานจะเกิดเสียงน้อยกว่าชุด motor-generator
7. คงทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศมากกว่า motor-generator
8. สามารถเริ่มทำงานได้ทันที (instantaneous starting) เพราะไม่มีการเผาให้ตะโหดร้อนเช่นในหลอดอิเล็คตรอนสูญญากาศ
9. มีประสิทธิภาพสูง

---

[1] Gray & Wallace , Principles and Practice of Electrical Engineering (8th ed., Tokyo : Kogakusha, 1962) p. 402

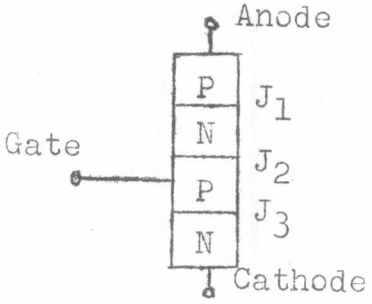
อย่างไรก็ตาม วงจร SCR แบบพื้นฐานสำหรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับไม่สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงมาก (ดังจะได้อธิบายใน 1.1.2) จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคทางวงจรไฟฟ้าบางอย่างมาปรับปรุงวงจรพื้นฐานนี้เพื่อให้ใช้งานได้ที่ความถี่สูงมาก

วิทยานิพนธ์เรื่องนี้ ได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและออกแบบวงจรเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับความถี่สูงโดยใช้ SCR โดยพยายามให้ได้กำลังไฟฟ้ามากที่สุดที่ความถี่สูง ๆ

SCR ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้เป็นเบอร์ 2N 1777A ซึ่งเป็นชนิด phase control SCR เหตุที่เลือกใช้ SCR เบอร์นี้เพราะเป็นของที่มีอยู่แล้ว

1.1 การทำงานของ SCR โดยสังเขป

SCR เป็นสิ่งประดิษฐ์ (device) ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีโครงสร้างเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด P-N-P-N ประกอบกันเป็นชั้น ๆ ดังรูปที่ 1.1



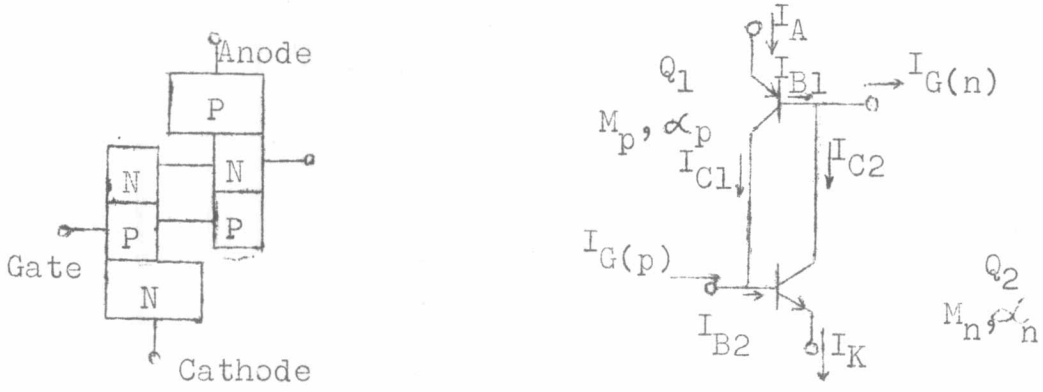
รูปที่ 1.1 โครงสร้างของ SCR แบบสังเขป เพื่อให้สะดวกแก่การเข้าใจ.

การทำงานของ SCR นั้นสามารถจะเข้าใจได้ง่ายขึ้น ถ้าจะเปรียบเทียบ SCR ว่าประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ซึ่งเป็นแบบ P-N-P และ N-P-N ต่ออยู่ด้วยกันดังในรูปที่ 1.2

จากรูปที่ 1.2 ถ้าจะวิเคราะห์ในรูปของ Common - base current gains (α_p และ α_n) และ avalanche multiplication coefficients ของโฮลและอิเล็กตรอน (M_p และ M_n) จะได้ว่า

$$I_A = \frac{\alpha_n M_n I_{G(p)} + I_{G(n)}(1-\alpha_p M_p) + I_{CBO(1)} + I_{CBO(2)}}{1 - \alpha_p M_p - \alpha_n M_n}$$

"$\alpha_p M_p + \alpha_n M_n$" มีชื่อเรียกว่า loop gain[2]



รูปที่ 1.2 แสดงการวิเคราะห์ SCR โดยคิดเป็นทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ต่อแบบป้อนกลับอย่างบวก

เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าบวกแก่อะโนด และศักย์ไฟฟ้าลบแก่กะโทด แต่ยังไม่ให้ศักย์ไฟฟ้าบวกแก่เกต ค่าของ M_n และ M_p จะประมาณ 1 และค่า α_p, α_n ของทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 จะมีค่าต่ำดังนั้นค่า I_A จะต่ำด้วย คือมีค่าสูงกว่าผลรวมของกระแสคอลเลคเตอร์รั่วของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวเพียงเล็กน้อย กรณีเช่นนี้เรียกว่า SCR อยู่ในภาวะปิดกระแส.

1.1.1 การทำให้ SCR เข้าสู่ภาวะเปิดกระแส

การที่จะทำให้มีกระแสไหลผ่าน SCR ได้ ซึ่งเรียกว่าภาวะเปิดกระแสนั้น ต้องทำให้ loop gain มีค่าเข้าใกล้ 1. ในกรณีนี้จะเกิดการป้อนกลับอย่างบวกขึ้นระหว่างทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 ตัว มีผลขั้นสุดท้ายทำให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในภาวะอิ่มตัวทั้งคู่ ซึ่งในภาวะนี้รอยต่อทุก ๆ อันจะถูกไบแอสตามทั้งหมด ทำให้กระแสอะโนดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย และถูกจำกัดกวยวงจรภายนอก

---

[2] Connolly,A.P., Fox,R.W., Golden,F.B., Gorss,D.R., Locher,R.E.,and Wu,S.J. , SCR Manual. (5th ed., New York : General Electric Companay, 1972) p. 2

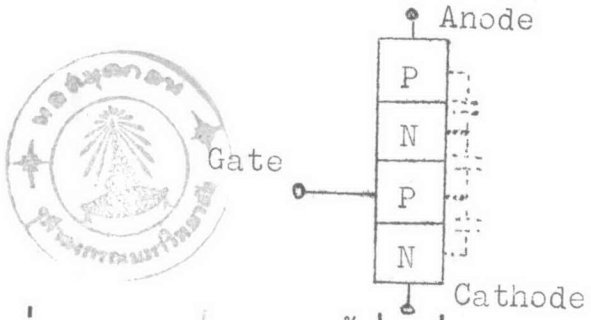
Loop gain อาจถูกทำให้มีค่าเข้าใกล้ 1 ได้โดยวิธีต่อไปนี้.-

1. เพิ่มค่า M_p หรือ M_n โดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า หรือ
2. เพิ่มค่า α โดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า หรือกระแสที่เกต

สำหรับ ซิลิกอนทรานซิสเตอร์ทั่ว ๆ ไป ค่า α จะมีค่าต่ำเมื่อกระแสอิมิตเตอร์น้อย แต่จะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อกระแสอิมิตเตอร์มีค่าสูงขึ้น ดังนั้นถ้าวิธีการใดที่ทำให้กระแสอิมิตเตอร์เพิ่มขึ้นชั่วขณะก็จะเหนี่ยวนำให้ SCR เข้าสู่ภาวะเปิดกระแสได้

วิธีทางปฏิบัติที่จะทำให้ SCR เข้าสู่ภาวะเปิดกระแสมีดังนี้.-

1. <u>แรงดันไฟฟ้า</u> เพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่อะโนดขึ้นมาก ๆ จะทำให้เกิด avalanche breakdown ซึ่งเป็นการเพิ่มค่า M_p และ M_n ทำให้กระแสอะโนดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว
2. <u>อัตราการเปลี่ยนของแรงดันไฟฟ้า</u> ที่รอยต่อ P-N ใด ๆ จะมีค่าความจุไฟฟ้าอยู่ด้วยเสมอ ยิ่งพื้นที่ของรอยต่อโตมาก ก็จะมีค่าความจุไฟฟ้ามากด้วย.



รูปที่ 1.3 แสดงความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ

เมื่อแรงดันไฟฟ้าคร่อมคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ก็จะทำให้เกิด displacement current ไหลจากอะโนดไปสู่เกต.

ในรูปที่ 1.2 ถ้าศักย์ไฟฟ้าคร่อมอะโนดและคะโทดของ SCR เพิ่มขึ้นทันทีทันใด จะทำให้เกิด displacement current ไหลในทรานซิสเตอร์ P-N-P ซึ่งจะเป็นกระแสเบส สำหรับทรานซิสเตอร์ N-P-N ดังนั้นค่า loop gain จึงเข้าใกล้ 1 ได้.

3. อุณหภูมิ ที่อุณหภูมิสูง กระแสรั่วในรอยต่อ P-N ที่ถูกไบแอสย้อน จะเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า ทุก ๆ 8 องศาเซนติเกรต ซึ่งถ้ากระแสรั่วนี้มีค่ามากพอ ก็จะทำให้ loop gain มีค่าใกล้ 1 ได้

4. วิธีการแบบทรานซิสเตอร์ กระแสคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะเพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มกระแสเบสของทรานซิสเตอร์ ซึ่งสำหรับ SCR ก็ทำโดยการเพิ่มกระแสเกต ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดการป้อนกลับอย่างบวกและในที่สุด loop gain จะมีค่าเข้าใกล้ 1 ได้.

1.1.2 วิธีการที่จะให้ SCR กลับเข้าสู่ภาวะปิดกระแส

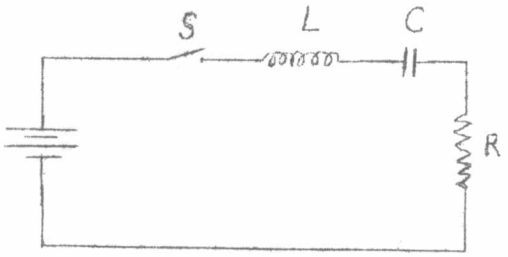
เมื่อ SCR อยู่ในภาวะเปิดกระแส รอยต่อทั้ง 3 ของ SCR จะถูกไบแอสตามทั้งหมด การที่จะทำให้ SCR กลับสู่ภาวะปิดกระแส จำเป็นที่จะต้องทำให้กระแสอะโนดเป็นศูนย์ เป็นเวลานานพอเพื่อทำให้ โฮล และ อิเล็กตรอน ส่วนเกินในเนื้อสารรวมตัวกันหมดไป

เวลานับจากที่กระแสอะโนดเป็นศูนย์ จนถึงเวลาที่ โฮลและอิเล็กตรอน ส่วนเกินในเนื้อสารรวมกันหมดไปอย่างสมบูรณ์เรียกว่า "Recovery time" ภายในช่วงเวลา Recovery time นี้ ถ้าอะโนดถูกป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกซ้ำอีก จะทำให้ SCR ไม่สามารถกลับสู่ภาวะปิดกระแสได้

หลังจากที่ความหนาแน่นของ โฮล และ อิเล็กตรอน ในเนื้อสาร P และ N ซึ่งอยู่ติดกับรอยต่อ J_2 (ดูรูปที่ 1.1) เข้าสู่ภาวะสมดุลย์ความร้อนแล้ว แม้ว่าจะให้ศักย์ไฟฟ้าบวกแก่อะโนด ก็ไม่อาจทำให้ SCR กลับไปสู่ภาวะเปิดกระแสได้ (ศักย์ไฟฟ้าบวกนี้ต้องไม่สูงกว่าค่าที่จะทำให้เกิด avalanche breakdown) Recovery time นี้เองที่ทำให้ SCR ไม่สามารถทำงานที่ความถี่สูงมากได้.

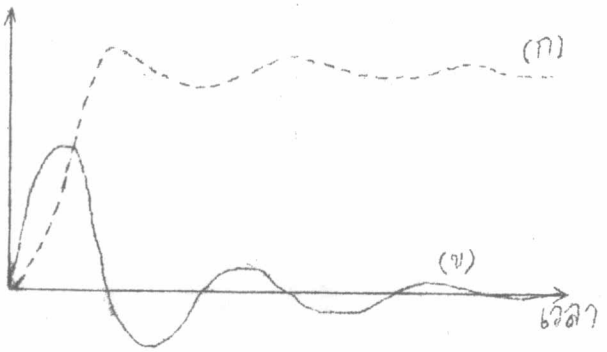
1.2 วงจรเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับ

หลักสำคัญของวงจรนี้คือ การนำเอาวงจรเรสโซแนนซ์แบบอนุกรม (รูป 1.4) มาใช้



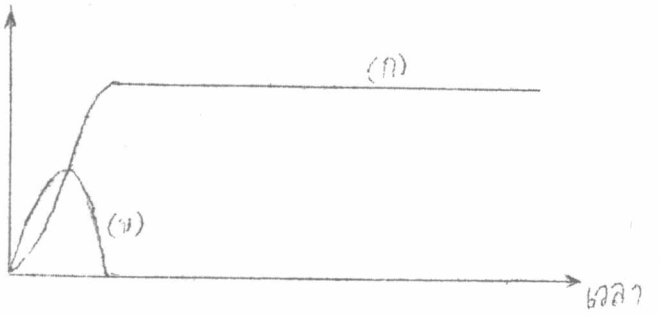
รูปที่ 1.4 วงจรเรสโซแนนซ์แบบอนุกรม

ถ้าให้ R มีค่าน้อยกว่า $2\sqrt{\frac{L}{C}}$ จะทำให้เกิดกรณี under damp ขึ้น นั่นคือ เมื่อเราปิดสวิทช์ S จะทำให้เกิดกระแสและแรงดันไฟฟ้าคร่อม C ในรูป 1.4 มีรูปคลื่น ดังในรูป 1.5



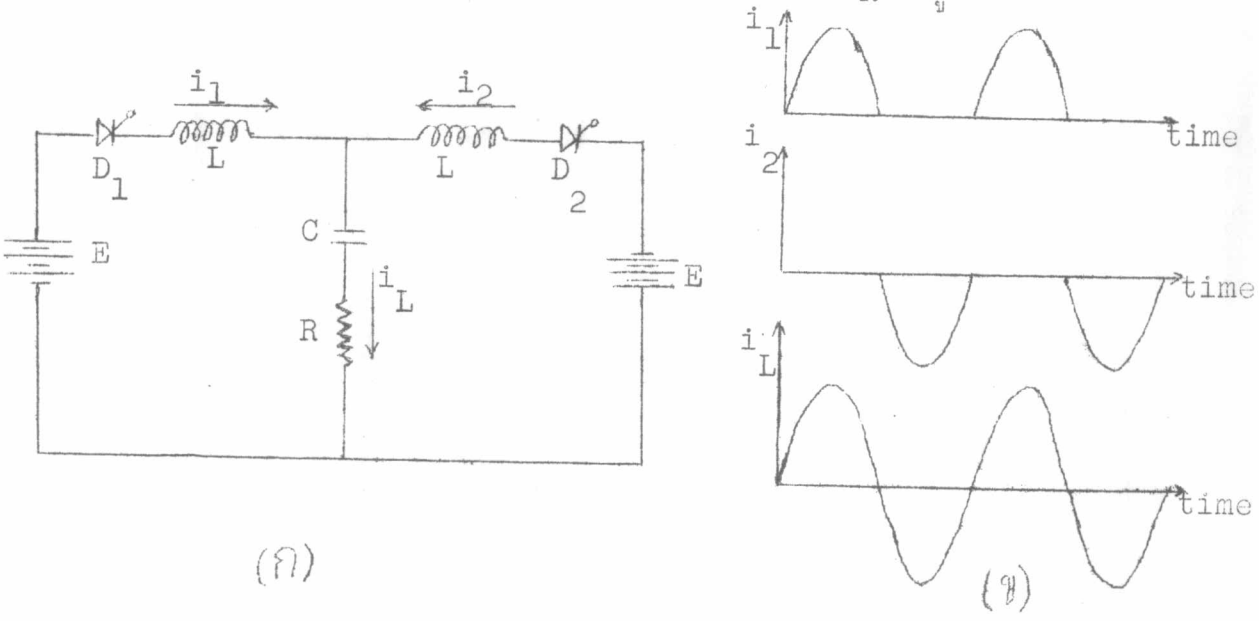
รูปที่ 1.5 (ก) รูปคลื่นของศักดาไฟฟ้าคร่อม C
(ข) รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร

ในรูปที่ 1.5 (ข) จะเห็นได้ว่า กระแสในวงจรไหลกลับทางได้ ดังนั้นถ้าเราใช้ SCR แทนสวิทช์ S รูปคลื่นในวงจรจะได้เป็นแบบรูปที่ 1.6 เพราะ SCR จะเข้าสู่ภาวะปิดกระแสเมื่อกระแสในวงจรลดค่ามาเป็นศูนย์



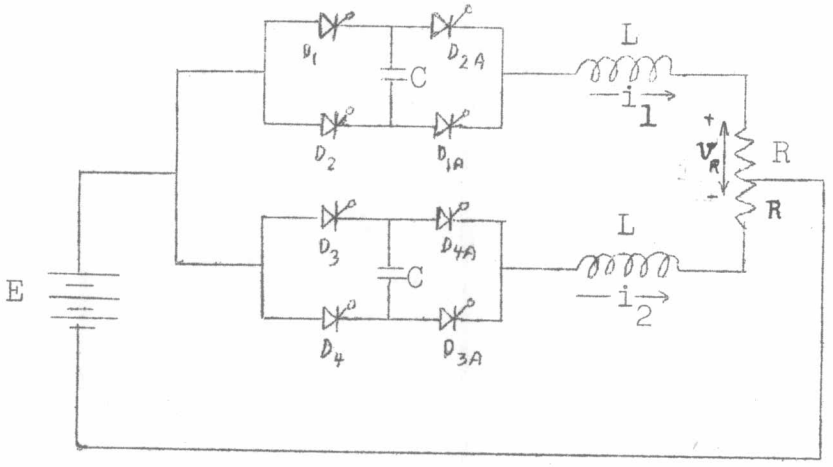
รูปที่ 1.6 (ก) รูปคลื่นของศักดาไฟฟ้าคร่อม C เมื่อใช้ SCR แทนสวิทช์ S
(ข) รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าในวงจร

ดังนั้นถ้าเราต่อวงจรเรสโซแนนซ์แบบอนุกรมเข้าด้วยกันดังในรูป 1.7 (ก) และจุดชนวน SCR D_1 และ D_2 สลับกันไป ตัวเก็บประจุจะถูก charge และ discharge ผ่าน R ตลอดเวลา ทำให้กระแสที่ไหลผ่าน R มีรูปคลื่นขายน์ได้



รูปที่ 1.7 (ก) วงจรพื้นฐานสำหรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับ
(ข) รูปคลื่นของกระแสในส่วนต่าง ๆ ของวงจร

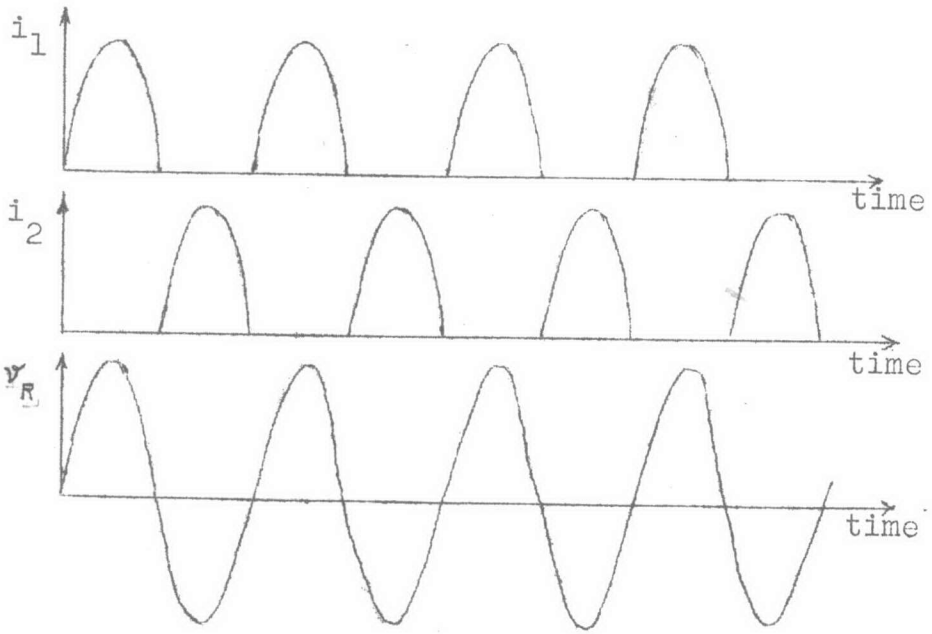
ในรูปที่ 1.7 เราจะต้องใช้แหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้ากระแสตรงถึง 2 แหล่ง เพื่อที่จะเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับ ซึ่งเป็นการไม่สะดวก ดังนั้น จึงได้มีการปรับปรุงวงจรในรูปที่ 1.7 เป็นวงจรในรูปที่ 1.8 เพื่อใช้แหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเพียงแหล่งเดียว



รูปที่ 1.8 วงจรเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับ แบบใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเพียงแหล่งเดียว

วงจรที่ได้รับการปรับปรุงนี้ ทำงานโดยการ charge และ discharge ตัวเก็บประจุ โดยการจุดชนวน SCR พร้อมกันเป็นคู่ ๆ

จากรูปที่ 1.8 ถ้าเราจุดชนวน D_1 , D_{1A} พร้อมกัน ต่อมาอีก T วินาที ก็จุดชนวน D_3 , D_{3A} พร้อมกัน ต่อมาอีก T วินาที จุดชนวน D_2 , D_{2A} และสุดท้ายในลำดับชั้นอันนี้ จุดชนวน D_4 , D_{4A} พร้อม ๆ กัน จากนั้นก็เริ่มลำดับขั้นใหม่ เนื่องจากการที่ให้ตัวเก็บประจุถูก charge และ discharge สลับกันเป็นลำดับขั้นที่แน่นอน จึงทำให้แรงดันคร่อมโหลด เป็นรูปซายน์ได้ ดังในรูปที่ 1.9



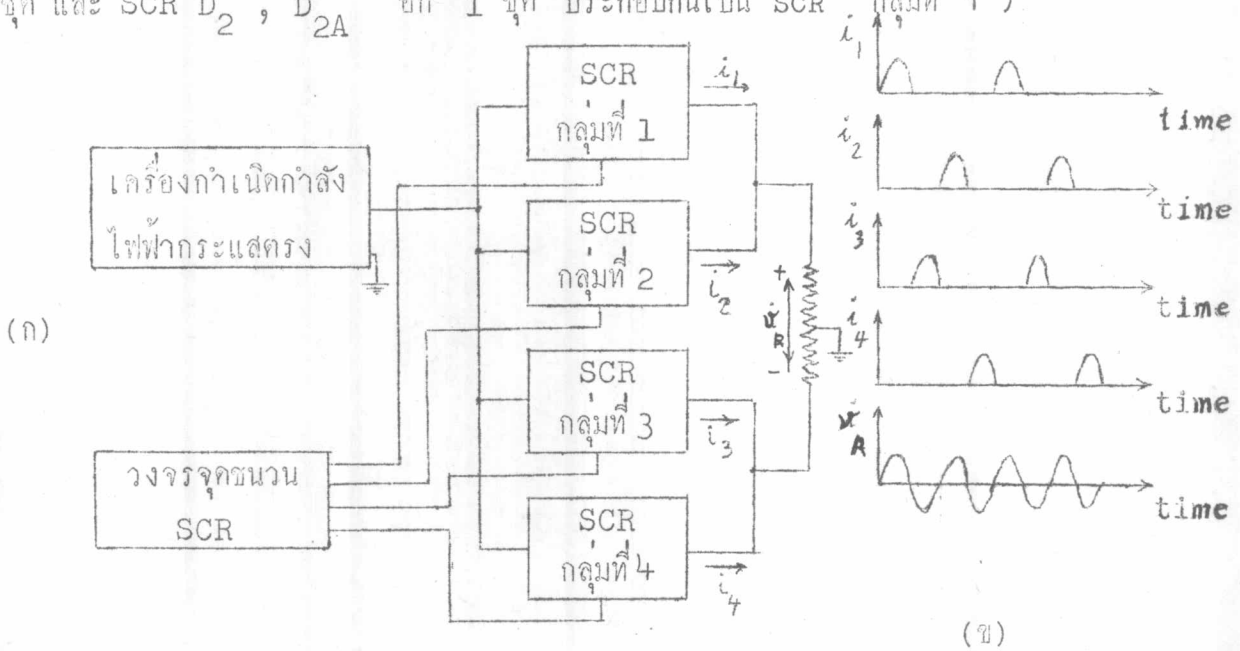
รูปที่ 1.9 (ก) รูปกระแสที่ผ่าน SCR กลุ่มที่ 1 (กลุ่มบน)
(ข) รูปกระแสที่ผ่าน SCR กลุ่มที่ 2 (กลุ่มล่าง)
(ค) รูปแรงดันคร่อมโหลด

1.3 ระบบแบ่งเวลา

เนื่องจากว่า SCR มีคุณสมบัติที่จะเข้าสู่ภาวะเปิดกระแสไฟฟ้าได้เร็วมาก (ประมาณ 1 - 3μsec) แต่การที่ SCR จะเปลี่ยนจากภาวะเปิดกระแสไฟฟ้าไปสู่ภาวะปิดกระแสไฟฟ้า จะต้องใช้เวลานานกว่ามาก (โดยทั่วไปประมาณ 20μ sec) ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการทำงานที่ความถี่สูง

ในการที่จะแก้ปัญหาอันนี้ จึงต้องนำระบบแบ่งเวลามาใช้ ซึ่งระบบนี้เป็นการจัดแบ่ง SCR ออกเป็นกลุ่ม ๆ SCR แต่ละกลุ่มจะถูกจุดชนวนตามลำดับขั้นที่แน่นอนซึ่งจะทำให้ SCR แต่ละกลุ่ม มีกระแสผ่านได้เป็นห้วง ๆ ดังในรูปที่ 1.10 ลักษณะสำคัญของระบบแบ่งเวลานี้ก็คือทำให้ SCR อยู่ในภาวะปิดกระแสเป็นเวลานานกว่าอยู่ในภาวะเปิดกระแส เพื่อที่จะให้ SCR นั้นเข้าสู่ภาวะปิดกระแสที่สมบูรณ์ ก่อนที่ SCR ชุดอื่น

ในกลุ่มเดียวกันจะถูกจุดชนวน (SCR 1 กลุ่มมี 2 ชุด แต่ละชุดประกอบด้วย SCR 2 ตัว ต่ออนุกรมกัน โดยมีตัวเก็บประจุ C คั่นอยู่ ดังรูป 1.8 มี SCR D_1 , D_{1A} อยู่ 1 ชุด และ SCR D_2 , D_{2A} อีก 1 ชุด ประกอบกันเป็น SCR กลุ่มที่ 1)



รูปที่ 1.10 (ก) การทำงานโดยสังเขปของระบบแบ่งเวลา
(ข) รูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่าน SCR กลุ่มต่าง ๆ และผ่านโหลดใน 1 ลำดับขั้น

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน SCR แต่ละกลุ่มเป็นรูปครึ่งคลื่นรูปซายน์ ดังนั้นเมื่อนำเอากระแสที่ไหลผ่าน SCR แต่ละกลุ่มมารวมกันก็จะได้กระแสรูปซายน์ตามที่ต้องการ

เพื่อให้กระแสไฟฟ้าสลับความถี่สูงที่ได้มีความเพี้ยนจากรูปซายน์น้อยที่สุด จึงต้องจัดให้ความถี่ของสัญญาณที่ไปจุดชนวน SCR เท่ากับ 2 เท่าของความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับความถี่สูงที่ต้องการ

ระบบแบ่งเวลานี้สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาเรื่อง recovery time ของ SCR ได้ ดังนั้นจึงทำให้วงจรเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงกว่าความถี่ที่ถูกจำกัดโดย recovery time ของ SCR