ปีการศึกษา 2533

ปริญญานิพนธ์ เรื่อง

Thyristor Forced Commutated

โดย

นาย ทวิช ชูเมือง 32.6108

นายทรงพล เขมาภิรมย์ 32.6408

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2533

เรื่อง Thyristor Forced Commutated

ผู้จัดทำ 1. นายทวิช ชูเมือง
2. นายทรงพล เขมาภิรมย์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ลงชื่อ_____
(อาจารย์สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์)

ลงชื่อ_____
(_____)

ลงชื่อ_____
(_____)

ลงชื่อ_____
(_____)

เลขหมู่ T 33102 ท 5
เลขทะเบียน 027935
วัน, เดือน, ปี 9 ส.ค. 34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

027935

Thyristor Forced Commutated

ทวิช	ชูเมือง	326108
ทรงพล	เขมาภิรมย์	326408
สิงห์ทอง	พัฒนเศรษฐานนท์	อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

ในการทำไทริสเตอร์ ดีซี ชอปเปอร์-อินเวอร์เตอร์ โดยใช้หลักการเคอร์เรนท์ ดิสเพลสเมนท์ คอมมิวเตเตอร์นั้น ส่วนสำคัญที่ต้องพิจารณานั้นคือ วงจรคอมมิวเตชั่นที่ประกอบด้วย คาปาซิสเตอร์และอินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีผลทำให้การสิ้นสุดในแต่ละรอบการทำงาน อินดัคเตอร์เกิดการคายพลังงานไปกักเก็บไว้ในคาปาซิสเตอร์ ดังนั้นในการวิเคราะห์และออกแบบวงจรทำได้โดย 2 วิธีคือ วิธีแรกกำจัดพลังงานที่เก็บกักไว้นั้นทิ้งไป เพื่อสะดวกในการวิเคราะห์และออกแบบ อีกวิธีก็คือมีการนำพลังงานส่วนนั้นกลับมาใช้ในการทำงานรอบต่อไป ซึ่งทำให้เวลาในการทำคอมมิวเตชั่นน้อยลงและที่ระดับกระแสสูงขึ้น โดยการใช้ค่า คาปาซิสเตอร์และอินดัคเตอร์ที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thyristor Forced Commutated

Twitch Chumuang 326108

Songphol Khemaphirom 326408

Singthong pattanasettanon Advisor

ABSTRACT

This project considers the fundamental operating principles of a number of current impulse displacement commutation techniques used in thysistor DC choopers and inverters. In each case the optimum commutation pulse is considers and the conditions for unpredictable and undesired operation due to trapped energy 'runaway' are analytically specified.A simple solution exists, preventing undesired operation whereby the trapped energy is not fed back into the supply or dissipated in resistors. The energy is safely retained and use to optimise LC commutation-circuit values. The resultant commutation circuit has a higher current commutating ability for given LC values and can result in circuit whit lower losses and shorter commutation cycle times than those circuits of conventional design.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่		หน้า
๑.	บทนำ	๑
๒.	โครงสร้างของ SCR	๓
๓.	การทำให้ SCR หยุดทำกระแส	๙
๔.	การยิงพัลส์ให้ SCR หยุดทำกระแส	๑๒
๕.	แสดงการวิเคราะห์วงจร CFD	๑๘
๖	การทดลองและผลการทดลอง	๓๐
๗.	สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	๓๖
ภาคผนวก		
บรรณานุกรม		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

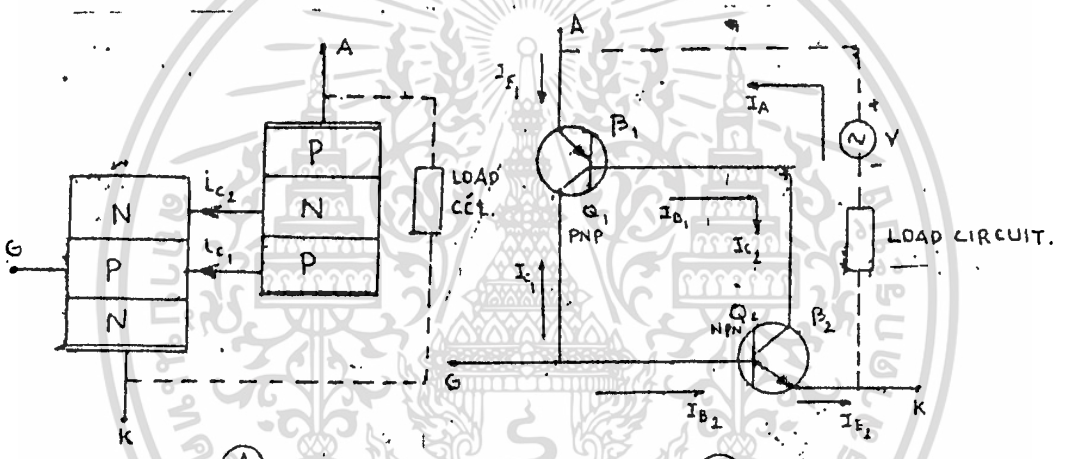
ทรานซิสเตอร์สามารถทำให้หยุดนำกระแสโดยการหยุดจ่ายกระแสเบส แต่สำหรับเอสซีอาร์จะไม่หยุดนำกระแสโดยหยุดจ่ายกระแสเข้าเกทเอสซีอาร์จะหยุดนำกระแสเมื่อลดกระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ลงต่ำกว่ากระแสยึด(Holding current) เป็นเวลานานกว่า turn-off-time (t_q)ซึ่งเป็นคุณสมบัติของเอสซีอาร์ ดังนั้นการที่จะทำให้ เอสซีอาร์ turn-off นั้นจึงต้องมีการจัดวงจรให้เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

เรื่อง โครงสร้างของ SCR

เอสซีอาร์เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำ PNPN 4 ชั้น แต่ต่อเป็นขั้วออกมาได้ 3 ขั้วคือ อาโนด(ANODE),คาโถด(CATHODE)และ เกท(GATE) ดังแสดงในรูปที่2.1 เมื่อพิจารณาโครงสร้างของเอสซีอาร์จะเห็นว่าโครงสร้าง PNPN เราสามารถแยกออกเป็นทรานซิสเตอร์ได้สองตัว โดยทรานซิสเตอร์ตัวที่หนึ่งเป็น NPN และตัวหนึ่งเป็น PNP ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเอสซีอาร์

และถ้าเขียนวงจรทรานซิสเตอร์ ทั้งสองตัวประกอบกันดังรูป ขั้วอาโนดของเอสซีอาร์ จะต่อกับสารชนิด P ที่อยู่ชั้นนอกสุด ขาคาโถดจะต่อกับสารชนิด N ที่อยู่ชั้นนอกสุดเช่นกันส่วนขาเกทต่อกับสารชนิด P ชั้นใน ถ้าจะดูกันตามวงจรสมมูลย์แล้วขาอาโนดก็คือ อิมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ชนิด PNP ขาคาโถดคือขาอิมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และขาเกทของเอสซีอาร์ คือขาเบสของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ซึ่งต่อกับขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ PNP ส่วนขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ต่อเข้าขาเบสของทรานซิสเตอร์ PNP ลักษณะเช่นนี้เป็นการต่อแบบ POSITIVE FEEDBACK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเราให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 มี $\alpha_1 = I_{C1}/I_{E1}$

ทรานซิสเตอร์ Q_2 มี $\alpha_2 = I_{C2}/I_{E2}$

และกระแสรั่ว(LEAKAGE) I_{CO}

จากรูป A และ B กระแสที่ไหลผ่านโหลดเป็น I_A

จากรูป B จะเห็นว่ากระแสที่ผ่านโหลดเป็น $I_{C1}+I_{C2}+I_{CO} = I_A$

$$I_A = \alpha_1 I_{E1} + \alpha_2 I_{E2} + I_{CO} \qquad A$$

แต่จากรูป A

$$I_{E2} = I_{E1} = I_A \qquad A$$

$$I_A = (\alpha_1+\alpha_2) I_A + I_{CO}$$

$$= I_{CO}/(1-(\alpha_1+\alpha_2))$$

ถ้าเราให้

$$\beta_1 = I_{C1}/I_{B1}$$

$$\beta_2 = I_{C2}/I_{B2}$$

เมื่อ I_{B1} และ I_{B2} เป็นกระแสขาเบส

$$I_{E1} = I_{B1}+I_{C1}$$

$$I_{E2} = I_{B2}+I_{C2}$$

$$\alpha_1 = \beta_1/(1+\beta_1)$$

$$\alpha_2 = \beta_2/(1+\beta_2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า α_1 และ α_2 ลงในสมการ I_A จะได้

$$I_A = (1+\beta_1)(1+\beta_2)I_{CO} / (1-\beta_1\beta_2)$$

จะเห็นว่าถ้า $\beta_1\beta_2$ มีค่าน้อยกว่า 1 มากๆ แล้ว I_A จะมีค่าน้อยมาก เพราะ I_{CO} มีค่าน้อย ซึ่งกรณีนี้เรียกว่า "TURNED OFF"หรือ FORWARD BIAS วงจรจะมีเสถียรภาพไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด แต่ถ้า $\beta_1\beta_2$ มีค่ามากกว่า 1 แล้วจะทำให้มีการป้อนกลับ(FEED BACK)แบบบวก ซึ่งจะเพิ่มกระแสให้ทำงานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

แต่ถ้าเราให้แรงดันที่อาโนดเป็นบวกและคาโทดมีค่าเป็นลบและแรงดันที่เกทมีค่าเป็นลบ จะเห็นว่าเกิดการไบแอสกลับ(REVERSE BIAS)ตรงรอยต่อของทรานซิสเตอร์ Q_1 ซึ่งจะเป็นผลให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 ไม่นำกระแสคือไม่มีกระแสไหลเข้าทางคอลเลคเตอร์ นอกจากกระแสรั่วไหล(I_{CO})เท่านั้น ดังนั้นเอสซีอาร์จะไม่มีกระแสไหลจากอาโนดไปยังคาโทด ในกรณีเช่นนี้ความต้านทานระหว่างอาโนดและคาโทดจะมีค่าสูงมาก

ถ้าให้แรงดันที่เกทมีค่าเป็นบวกหรือกระแสไหลเข้าขาเกทจะทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแสเป็นเหตุให้กระแสคอลเลคเตอร์มีค่ากระแสสูง และเนื่องจากค่ากระแสคอลเลคเตอร์ของ Q_2 เป็นกระแสเบสของ Q_1 จึงเท่ากับว่าเป็นการทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแสด้วย ก็จะเป็นผลทำให้กระแสที่ไหลจากอาโนดไปยังคาโทดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ถึงกระแสนี้จะถูกจำกัดโดยวงจรภายนอก ดังนั้นในกรณีเช่นนี้ค่าความต้านทานระหว่าง อาโนดและคาโทด จะมีค่าต่ำมาก

จากหลักการข้างบนนี้จะเห็นว่าเอสซีอาร์ จะทำงานว่ามีกระแสทริกให้กับขาเกทโดยกระแสทริกมนี้จะมีค่าเป็นบวก หลังจากที่ทริกแล้วกระแสจะไหลระหว่างอาโนดและ คาโทด ตลอดเวลา และไม่จำเป็นที่จะต้องคงกระแสทริกนี้ไว้ เพราะกระแสที่ทริกนี้ก็เหมือนกระแสเบสของ Q_2 สามารถมาจากกระแสคอลเลคเตอร์ของ Q_2 ได้ ส่วนกระแสในวงจรภายนอกที่ไหลขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันระหว่างเกท และแรงดันระหว่างขาอาโนดและคาโทด เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 Turn-off-time ของเอสซีอาร์

Turn-off-time (t_q) ของเอสซีอาร์ เป็นระยะเวลาตั้งแต่การทำให้กระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ไหลย้อนกลับ แล้วกลับสู่ศูนย์ (ช่วงเวลาเอสซีอาร์กลับตัวสภาวะไหม่ที่เรียกว่า reverse recovery time-t_{rr}) จนถึงเวลาที่สามารถจ่ายแรงดันฟอร์เวิดไบอัสอีกครั้งโดยไม่ทำให้เอสซีอาร์นำกระแสได้ turn-off-time เป็นค่าที่บอกไว้ใน data sheet โดยมีข้อกำหนดที่อุณหภูมิที่ junction, I_F, $-dI_R/dt$, V_R และ dv/dt ดังเช่น I_F=150 A , T_j=125 °C , dIR/dt = 50 A/usec, dV/dt= 20 V/usec linear to .8 V_{DRM} , t_{off} = 60 usec ซึ่งหมายความว่าช่วงเวลาก่อนที่เอสซีอาร์จะหยุดนำกระแส(turn-off)กระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ในทางฟอร์เวอร์ด(I_F)จะต้องไม่เกิน150 A อุณหภูมิjunction T_j ไม่เกิน 125 °C และในอัตราการลดลงของกระแสฟอร์เวอร์ดต้องไม่น้อยกว่า 50 A/usec แล้วเอสซีอาร์ยังคงรักษาสภาวะหยุดนำกระแสเป็นเวลานานอีก 60 usec จึงเริ่มจ่ายแรงดันฟอร์เวอร์ดอีกครั้งด้วยอัตราการเพิ่มที่ไม่เกิน 20 V/usec โดยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง(linear)สู่แรงดัน 0.8 V_{DRM} ($V_{F.B}$ =Forward breakdown voltage) เมื่อมีค่าอันใดมากกว่าค่าดังกล่าวturn-off-timeจะมากกว่า 60usec แสดงดังรูป

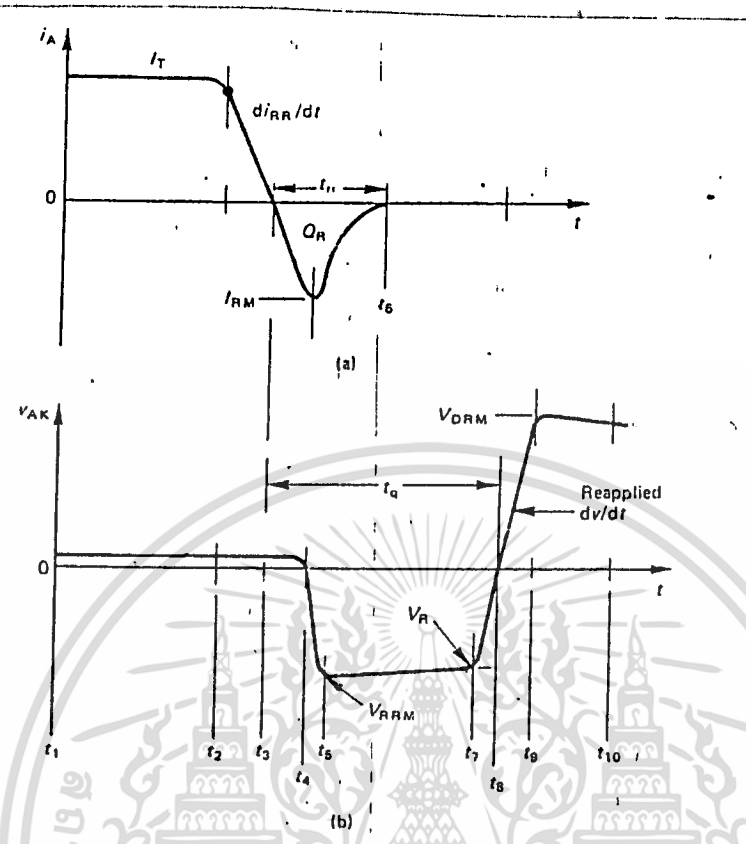
ดังนั้นวงจรที่จะทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแส (commutation circuit) จะต้องรักษาข้อกำหนดดังกล่าวเป็นเวลานานกว่า turn-off-time ของเอสซีอาร์

เอสซีอาร์จะแบ่งเป็น 2 ชนิด ตามคุณสมบัติของ turn-off-time คือ phase control SCR's ซึ่งมี turn-off-time ระหว่าง 50-250 usec ซึ่งใช้ในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยการควบคุมเฟส และFast switching SCR's หรือเรียกว่า Inverter SCR's ซึ่งมี turn-off-time ระหว่าง 5-50 usec ซึ่งใช้ในวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงโดยวิธีการชอปเปอร์ (chopper) และวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ(inverter)

สำหรับเอสซีอาร์ที่มี turn-off-time = 60 usec สามารถใช้ในวงจร phase control ซึ่งมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่สูงสุด

(f_{max})= $1/(120*10^{-6})$=8333 H_z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 *Thyristor anode waveforms for turn-off time measurement with forced commutation: (a) anode current; (b) anode-to-cathode voltage.*

2.2 ขีดจำกัดทางด้านแรงไฟของเอสซีอาร์

สัญญลักษณ์โดยทั่วไปที่ใช้สำหรับกระแส และแรงดันไฟฟ้า ซึ่งแสดงโดย subscripts ตัวที่ 1 เป็นการแสดงทิศทางหรือสภาวะต่างๆ คือ

D= ไม่นำกระแสและได้รับฟอร์เวอร์ด

F= forward, R= reverse, T= on-state

subscripts ตัวที่ 2 แสดงขีดจำกัดในสภาวะต่างๆคือ

W= ค่าขณะอยู่ในสภาวะตาม subscripts ตัวที่ 1

R= การเกิดขึ้นซ้ำ ๆ (Repetitive)

S= ไม่ได้เกิดขึ้นซ้ำๆ (Non-repetitive)

subscripts ตัวที่ 3 เป็นอักษร M แสดงค่าสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_{DWM} และ V_{RWM} = แรงดันทางด้านฟอร์เวิดและรีเวอร์สูงสุดของแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ($\sqrt{2}\ V_{rms}$)ที่จ่ายให้เอสซีอาร์และเอสซีอาร์จะไม่นำกระแสโดยไม่มีสัญญาณทริกเกอร์ โดยไม่คิด transient ที่เกิดขึ้นซ้ำๆ และไม่ซ้ำๆ ในคู่มือจะเขียนว่า Working peak off-state and reverse-vltage

V_{DRM} และ V_{RRM} = แรงดัน transient ถ้าไม่เกินกำหนดทางด้านฟอร์เวิด และรีเวอร์ ที่เกิดขึ้นซ้ำๆ ในทุกๆ ไซเคิลของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ จะไม่ทำให้เอสซีอาร์นำกระแส โดยไม่มีสัญญาณทริกเกอร์ ในคู่มือจะเขียนว่า Repetitive Peak off-state and reverse voltage หรือ Repetitive Peal. Forward and reverse blocking voltage

V_T = แรงดันที่คร่อมระหว่างแอโนดและคาโทดขณะที่นำกระแสฟอร์เวิดและมีอุณหภูมิที่ junction ที่กำหนดในคู่มือ

d_v/d_T = อัตราการเพิ่มของแรงดันที่คร่อมแอโนดและคาโทด สูงสุดที่จะไม่ทำให้เอสซีอาร์นำกระแส โดยไม่มีสัญญาณทริกเกอร์ เอสซีอาร์ซึ่งประกอบด้วยสาร PNPN มีคุณสมบัติของคาปาซิเตอร์ระหว่างแอโนดและคาโทด กระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์เท่ากับ $C\ d_v/d_T$ ดังนั้นเมื่อแรงดันระหว่างแอโนดและคาโทดเปลี่ยนแปลงด้วยอัตราสูงที่จะทำให้มีกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ ซึ่งถ้ามีกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์มากกว่ากระแสยึดเอสซีอาร์ก็จะนำกระแสได้ ดังนั้นเมื่อเกิด transient ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันคร่อมแอโนดและคาโทดสูง จะทำให้เอสซีอาร์นำกระแสได้โดยไม่มีสัญญาณทริกเกอร์

2.3 ขีดจำกัดทางด้านกระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์

I_{DRM} และ I_{RRM} = กระแสรั่วผ่านเอสซีอาร์เมื่อได้รับแรงดันสูงสุดทางด้านฟอร์เวิดและรีเวอร์ (Peak Forward and Reverse leakage current)

$I_{T(rms)}$ = กระแส rms สูงสุดที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ทางด้านฟอร์เวิดที่อุณหภูมิไม่สูงกว่าที่กำหนด แล้วจะไม่ทำให้เอสซีอาร์เสียหาย (Max. rms Forward current)

$I_{T(ave)}$ = กระแสเฉลี่ยสูงสุดที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ทางด้านฟอร์เวิดที่อุณหภูมิไม่สูงกว่าที่กำหนด แล้วจะไม่ทำให้เอสซีอาร์เสียหาย (Surge on state current)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_{TSM} และ I_{FM} = กระแส surge สูงสุดที่เกิดขึ้นในเวลาสั้นๆ ซึ่งแสดงในคู่มือ ถ้ากระแส surge เกินที่กำหนด หรือเกิดขึ้นนานกว่าที่กำหนด จะทำให้เอสซีอาร์เสียหายได้(Surge on-state current)

I^2t = เป็นค่าของกระแสยกกำลังสองคูณกับเวลาซึ่งจะต้องไม่เกินที่กำหนดในคู่มือจึงจะไม่ทำให้เอสซีอาร์เสียหายได้ซึ่งค่านี้จะเป็นคุณสมบัติของฟิวส์จำพวก semiconductor fuse จึงต้องเลือกฟิวส์ให้เหมาะสมในการใช้ฟิวส์ป้องกันไม่ให้เอสซีอาร์เสียหาย

di/dt = อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสผ่านเอสซีอาร์ที่เกิดขึ้นซ้ำๆ กันหลังจากทำการทริกเกททำให้เอสซีอาร์นำกระแส ซึ่งเป็นขีดจำกัดของเอสซีอาร์อันหนึ่ง คือ เอสซีอาร์สามารถนำกระแสสูงสุดได้ตามกำหนดในคู่มือ เมื่อกระแสไหลผ่านพื้นที่ทั้งหมดของสารกึ่งตัวนำ PNPN ที่ประกบกันอยู่ แต่ว่าเมื่อเอสซีอาร์ถูกทริกให้เริ่มนำกระแส สารกึ่งตัวนำที่อยู่ใกล้ๆ เกทของเอสซีอาร์จะนำกระแส ซึ่งมีพื้นที่เล็กๆ ก่อนแล้วค่อยๆ กระจายไปพื้นที่ทั้งหมดของสารกึ่งตัวนำ เพราะฉะนั้นถ้าอัตราการเพิ่มของกระแสต่อเวลา (di/dt) สูงกว่ากำหนด อาจจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดความร้อนเฉพาะจุด (hot spots) ที่ junction และทำให้เอสซีอาร์เสียหายได้ ในการลดอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสต่อเวลาทำโดยการต่อ inductance อนุกรมกับเอสซีอาร์

I_L = กระแสค้าง (Latching current) เป็นค่าของกระแสต่ำสุดที่ต้องรักษาเพื่อให้เอสซีอาร์นำกระแสหลังจากพัลส์ที่ทริกเอสซีอาร์ถูกนำออกจากเกทของเอสซีอาร์

I_H = กระแสยึด (holding current) เป็นค่าของกระแสมากที่สุดที่จะต้องลดลงให้ต่ำกว่า เพื่อให้เอสซีอาร์เปลี่ยนจากสภาวะนำกระแสเป็นหยุดนำกระแส กระแสยึดเกิดขึ้นเมื่อกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ในสภาวะนำกระแสลดลงจนกระทั่งเอสซีอาร์หยุดนำกระแส แต่กระแสค้างเกิดขึ้นเมื่อเอสซีอาร์อยู่ในสภาวะไม่นำกระแสไปสู่สภาวะเริ่มต้นนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 ขีดจำกัดทางด้านอุณหภูมิ

T_J = อุณหภูมิ junction ของสารกึ่งตัวนำ PNPN ซึ่งไม่สามารถจะตรวจสอบและวัดด้วยเครื่องวัดไฟฟ้าได้

T_{stg} = Storage temperture เป็น องศา C

$R\theta_{JC}$ = ความต้านทานอุณหภูมิ ระหว่าง junction กับ case มีหน่วยเป็น องศา C/ watt

$R\theta_{CH}$ = ความต้านทานอุณหภูมิ ระหว่าง case กับ Heat sink มีหน่วยเป็น องศา C/watt

2.5 ขีดจำกัดของเกท

I_{GT} = กระแสที่จะทริกให้เอสซีอาร์นำกระแส เมื่อมีแรงดันคร่อมเอสซีอาร์และมีอุณหภูมิที่ junction ตามที่กำหนด

V_{GT} = แรงดันที่จ่ายให้เกทกับคาโทดของเอสซีอาร์ เพื่อให้เอสซีอาร์นำกระแสเมื่อมีแรงดันตกคร่อมเอสซีอาร์ และอุณหภูมิที่ junction ตามที่กำหนด

I_{FGM} หรือ I_{GTM} = กระแสสูงสุดทางด้านฟอร์เวิด (Peak forward gate current)

I_{GRM} = กระแสสูงสุดทางด้านรีเวอร์ (Peak Reverse gate current)

P_{GM} = กำลังสูงสุดที่เกททนได้ (Peak gate power)

$P_{G(AV)}$ = กำลังเฉลี่ยที่เกททนได้ (Average gate power)

t_q = turn-off time

t_{on} = turn-on time

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง 027935

บทที่ 3

เรื่อง การทำให้ SCR หยุดนำกระแส

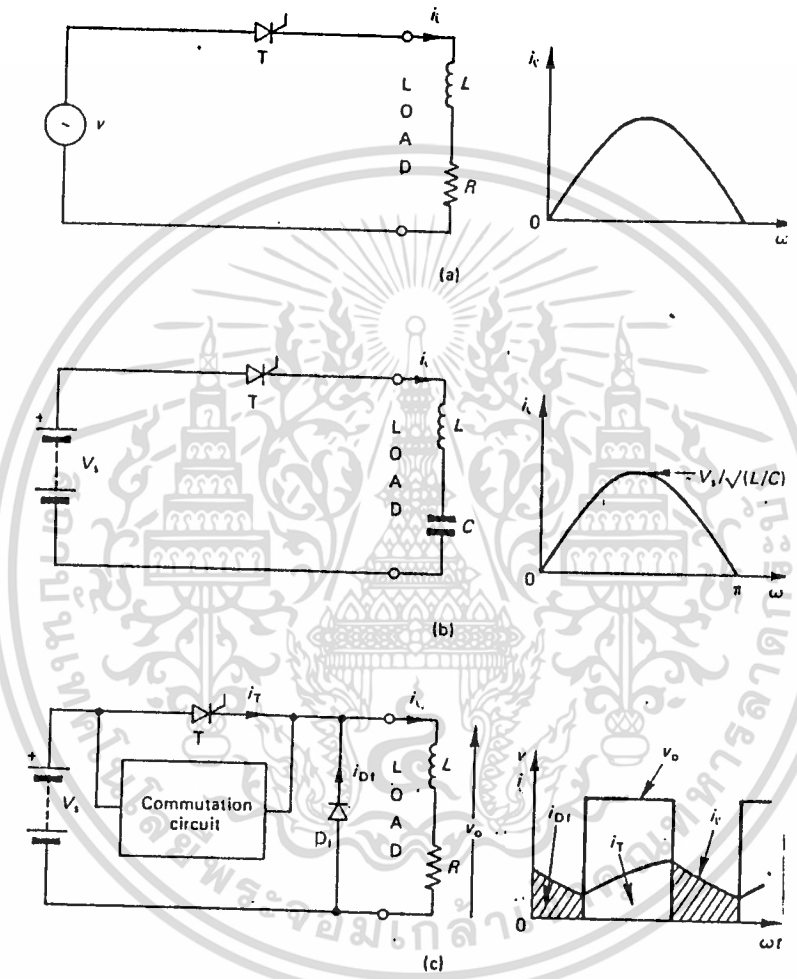
วิธีการทำให้กระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ลงต่ำกว่ากระแสยึด สามารถทำได้โดยการลดแรงดันคร่อมเอสซีอาร์ลงสู่ศูนย์ หรือจ่ายแรงดันรีเวอร์ดไบอัสให้เอสซีอาร์ วิธีการนี้เป็นพื้นฐานของการทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสสามารถจัดแบ่งได้ ๓ วิธีการคือ

3.1) การทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสโดยแหล่งจ่ายไฟเป็นกระแสสลับซึ่งเรียกว่า Line commutation หรือ Natural commutation คือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันไฟฟ้าจะตกลงสู่ศูนย์ และมีแรงดันไฟฟ้ากลับทิศทาง ซึ่งจะเป็นการจ่ายรีเวอร์ดไบอัสแก่เอสซีอาร์ในทุกๆไซเคิล และกระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์จะตกลงเป็นศูนย์ ซึ่งถ้าเป็นเวลานานกว่า turn-off-time (t_q) ก่อนที่จะจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟอร์เวอร์ดอีกครั้งหนึ่งซึ่งเป็นวิธีการทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแส ในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (converter) และการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยการควบคุมเฟส ดังรูปที่ 2.1 (a)

3.2) การทำให้เอสซีอาร์นำกระแสโดยการจัดโหลดให้เหมาะสม (load commutation) ใช้ในการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยวิธีการชอปเปอร์ (coppers) และวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (inverters) คือเมื่อเอสซีอาร์ นำกระแสจะเป็นการลวิทช์ไฟเข้าโหลด ซึ่งประกอบด้วยตัวความต้านทาน ,อินดัคเตอร์, คาปาซิสเตอร์ที่มีค่าที่เหมาะสม โดยอยู่ในสภาวะ under-damped กระแสที่ไหลผ่านโหลดจะตกลงสู่ศูนย์ โดยธรรมชาติ เมื่อกระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ต่ำกว่ากระแสยึดเป็เวลานานกว่า turn-off-time จะทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสได้ ดังรูปที่ 2.1 (b)

3.3) การทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสโดยวิธีการบังคับ(force commutation) เป็นการทำให้กระแสลดลงสู่ศูนย์ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ในกระแสเนื่องจากการคายประจุของคาปาซิสเตอร์ หรือจ่ายรีเวอร์ไบอัสซึ่งประจุในคาปาซิสเตอร์ให้แก่เอสซีอาร์ ดังรูปที่ 2.1 (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 *Three basic types of thyristor commutation: (a) source commutation; (b) load commutation; (c) forced commutation.*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

เรื่อง การบังคับให้ SCR หยุดนำกระแส (Thysistor forced commutation)

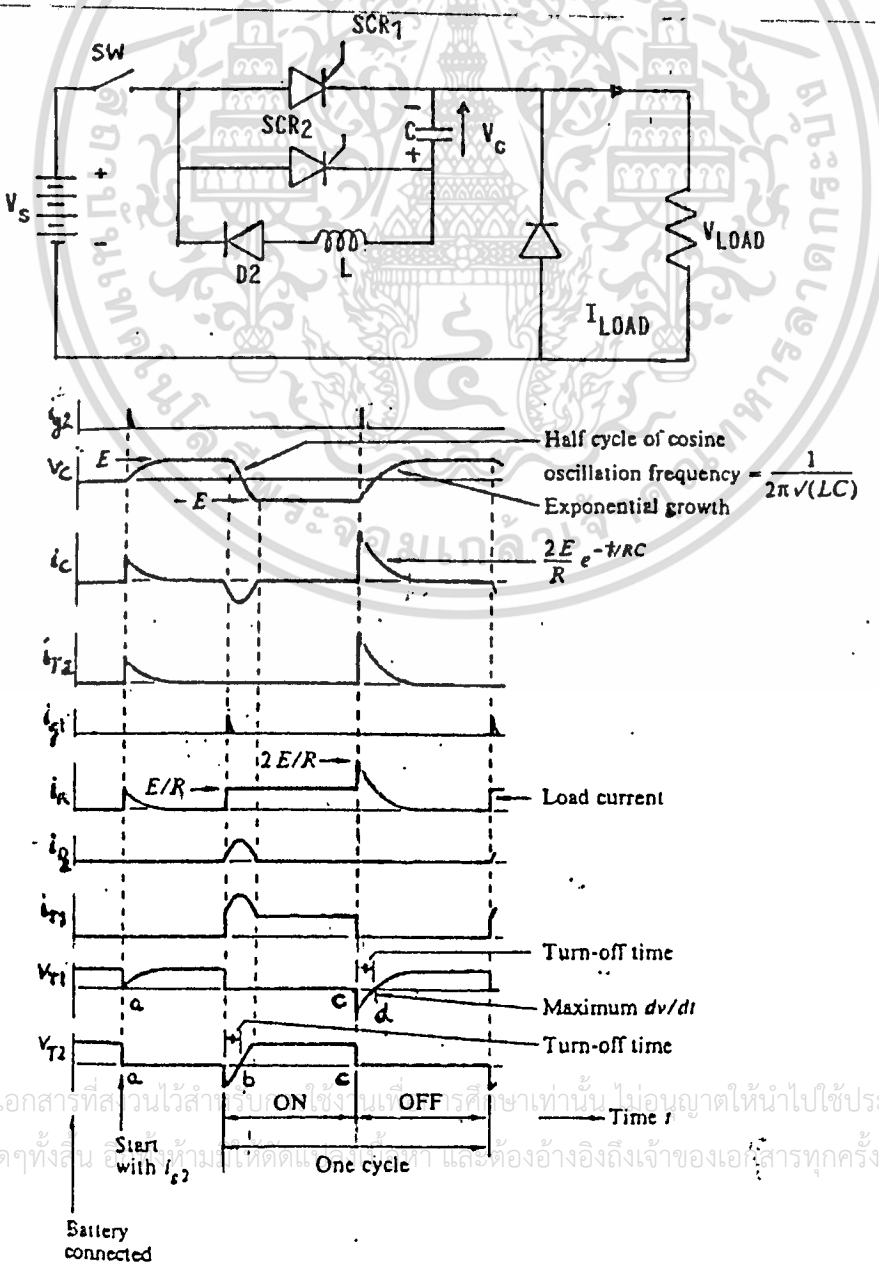
การบังคับให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสใช้มากใน DC chopper และ inverter มีพื้นฐานอยู่ 2 แบบคือ

4.1) Reverse-impressed-voltage commutation (RIV)

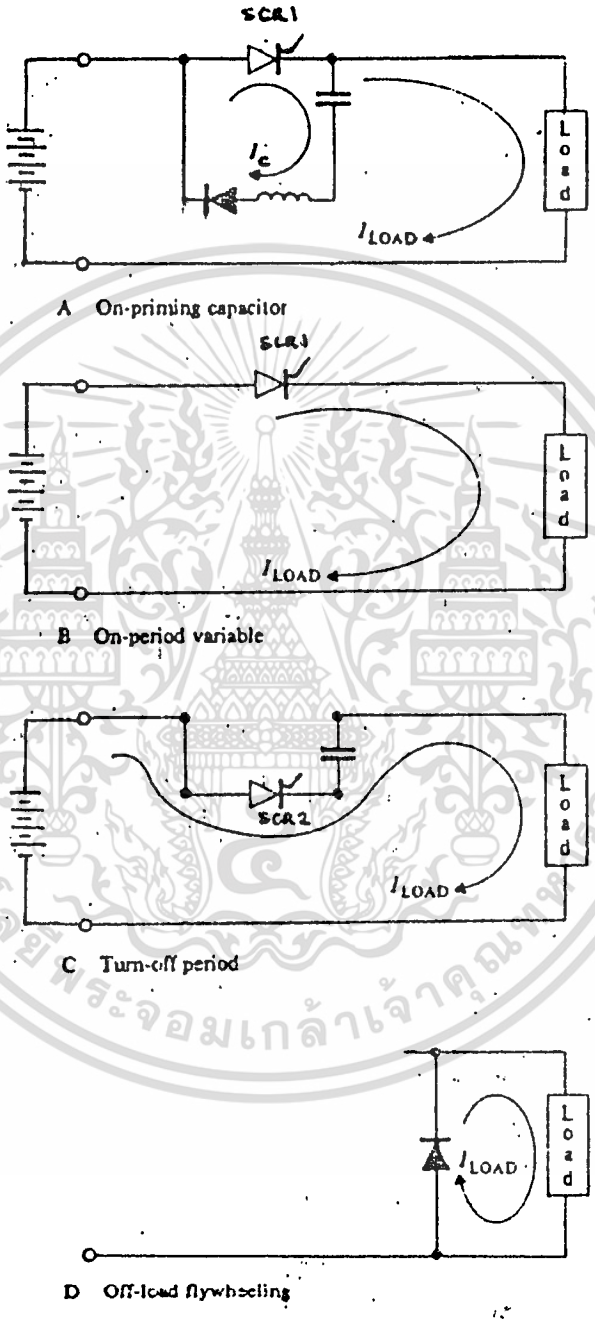
4.2) Current-impulse-displacement commutation (CID)

4.1 Reverse-impressed-voltage commutation (RIV)

จากวงจรเอสซีอาร์หลัก(SCR 1)จ่ายแรงดันจากแหล่งจ่ายไปให้โหลด และเอสซีอาร์ 2 จะเป็นตัวทำให้เอสซีอาร์หลักหยุดนำกระแส แสดงดังรูปที่ 4.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

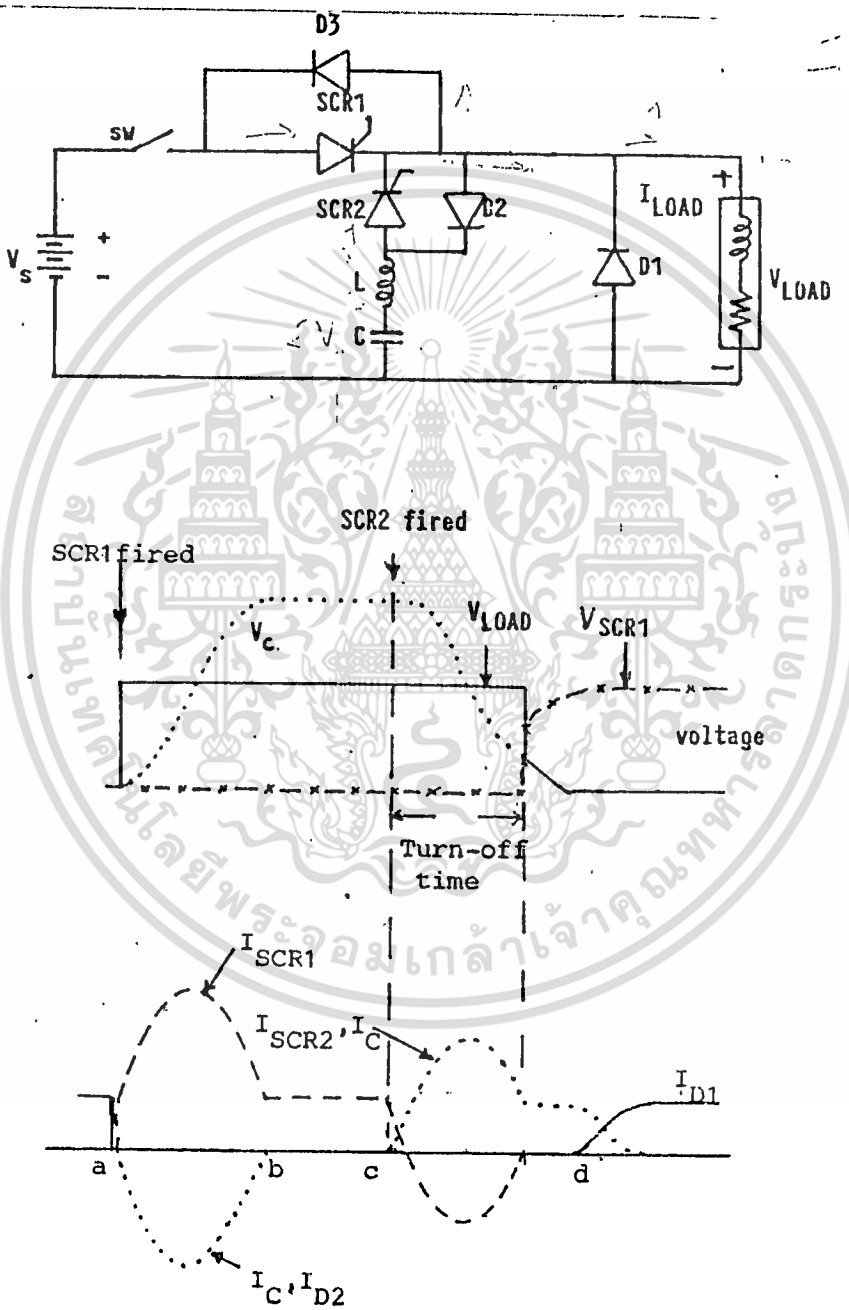
การทำงานของวงจรเริ่มต้นจะต้องทริกให้เอสซีอาร์ 2 นำกระแสเพื่อประจุไฟเข้าคาปาซิสเตอร์จนมีแรงดันไฟฟ้า (V_c) ตามทิศทางที่แสดงในรูปที่ 4.2 เอสซีอาร์ 2 ก็จะหยุดนำกระแส เมื่อกระแสไหลผ่านลดลงสู่ศูนย์ ที่จุด a เริ่มทริกเอสซีอาร์ 1 ให้นำกระแสเป็นการจ่ายไฟจากแหล่งจ่ายไฟไปสู่โหลดเป็นการเริ่มต้นสภาวะ T_{on} ขณะนี้คาปาซิสเตอร์จะคายประจุผ่านเอสซีอาร์ 1 ไดโอด D_2 และอินดัคเตอร์ L ที่จุด b กระแสไฟเนื่องจากการคายประจุของคาปาซิสเตอร์จะตกลงสู่ศูนย์ แรงดันคร่อมคาปาซิสเตอร์จะมีค่า V_c แต่มีทิศทางตรงข้ามกลับที่แสดงในรูป ไดโอด D_2 ก็จะได้รับรีเวอร์ดไบอัสก็จะหยุดนำกระแส คาปาซิสเตอร์จะไม่สามารถคายประจุไฟทางใดได้ จึงทำให้แรงดันคร่อมคาปาซิสเตอร์ยังคงที่อยู่จนกระทั่งถึงจุด c ซึ่งทำการทริกเอสซีอาร์ 2 ให้นำกระแส เอสซีอาร์ 1 ก็จะได้รับรีเวอร์ดไบอัสและกระแสจะไหลผ่านเอสซีอาร์ 2 และคาปาซิสเตอร์เข้าโหลด แทนกระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 ทำให้กระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 ลดลงสู่ศูนย์ แรงดันคร่อมคาปาซิสเตอร์ก็จะตกลงสู่ศูนย์ที่จุด d ระยะเวลาจาก c ถึง d จะต้องมากกว่า turn-off-time ของเอสซีอาร์ จึงทำให้เอสซีอาร์ 1 หยุดนำกระแส เพราะเวลาที่จุด d เอสซีอาร์ 1 จะเริ่มได้รับฟอร์เวอร์ดไบอัส

เมื่อมาถึงจุด c แรงดันคร่อมคาปาซิสเตอร์จะกลับทิศทางมาอยู่ในทิศทางเดิมตามที่แสดงในรูป โดยมีแรงดันเท่ากับแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟ และกระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ 2 ก็จะลดลงสู่ศูนย์ เป็นช่วงเวลาที่เริ่มเข้าสู่ T_{off} คือแรงดันที่โหลดตกลงเป็นศูนย์และกระแสโหลดจะไหลในไดโอด D_1 และถ้าเริ่มทริกเอสซีอาร์ 1 ให้นำกระแสก็จะเข้าสู่สภาวะ T_{on} อีกครั้ง

วงจรที่แสดงในรูป ระยะเวลาจาก c ถึง d จะเปลี่ยนแปลงตามกระแสโหลด ขณะที่คาปาซิสเตอร์คายประจุผ่านโหลด ระยะเวลาจาก c ถึง d จะสั้นที่สุดขณะที่มีกระแสโหลดสูง

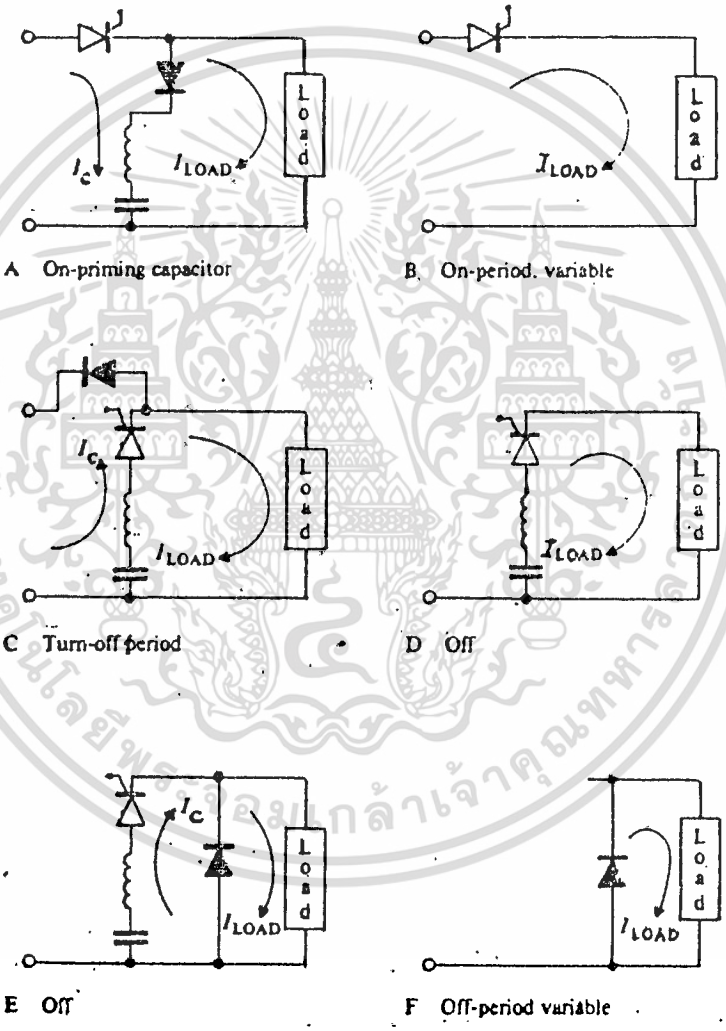
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 Current-impulse-displacement commutation



รูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของวงจรคือเมื่อทริกเอสซีอาร์ 1 ให้นำกระแสที่จุด a จะเป็นการจ่ายไฟจากแหล่งจ่ายไปยังโหลด และจะประจุไฟเข้าคาปาซิสเตอร์ โดยผ่านไดโอด D_2 และอินดัคเตอร์ L ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 เป็นผลรวมของกระแสที่ไหลเข้าโหลด และคาปาซิสเตอร์กระแสที่ไหลเข้าประจุคาปาซิสเตอร์จะตกเป็นศูนย์ที่จุด b และที่จุดนี้แรงดันที่คร่อมคาปาซิสเตอร์จะสูงเป็นสองเท่าของแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ และจะคงที่ต่อไปเพราะไดโอด D_3 ได้รับรีเวอร์ดไบอัส คาปาซิสเตอร์จะไม่สามารถคายประจุไปทางไหนได้

เมื่อทริกเอสซีอาร์ 2 ให้นำกระแสที่จุด c คาปาซิสเตอร์จะคายประจุเข้าโหลดแทนกระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 เมื่อกระแสจากการคายประจุของคาปาซิสเตอร์เท่ากับกระแสที่ไหลเข้าโหลด กระแสที่ผ่านเอสซีอาร์ 1 ก็จะตกลงสู่ศูนย์ เอสซีอาร์ 1 ก็จะเริ่มหยุดนำกระแสกระแสจากการคายประจุของคาปาซิสเตอร์จะมากกว่ากระแสโหลด ดังนั้นจึงมีกระแสไหลเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟ โดยผ่านทางไดโอด D_3 กระแสที่ไหลผ่านไดโอด D_3 จะค่อยๆลดลงสู่ศูนย์ที่จุด d คาปาซิสเตอร์จะคายประจุผ่านเอสซีอาร์ 2 สู่โหลดและแรงดันคร่อมคาปาซิสเตอร์จะค่อยๆลดลงสู่ศูนย์โวลท์ กระแสที่ไหลจากคาปาซิสเตอร์เข้าโหลดจะลดลงสู่ศูนย์ ถ้าโหลดเป็นอินดัคตันไดโอด D_1 จะนำกระแสต่อไป

4.3 ข้อเปรียบเทียบระหว่าง CID และ RIV

4.3.1)RIV จะมีเวลาในการ turn-off time สั้นกว่าแบบ CID ดังนั้นจะใช้ใน SCR ที่มี turn-off time สั้นๆ

4.3.2)สามารถควบคุม dv/dt ที่เกิดขึ้น จะมีผลต่อ RIV ดังนั้นผลของวงจรสนับเปเอร์จะมีผลต่อการทำงานของวงจร

4.3.3)การทำงานที่ Duty cycle ต่ำๆ ใน RIV จะมีเรกกูเลชั่นที่เลวกว่าแบบ CID เพราะจะเกิด สไปท์โวลท์เตจที่เวลา commutation

4.3.4)RIV จะใช้Freewheelingไดโอดที่มี rated เป็นสองเท่าของแหล่งจ่าย

4.3.5)การจ่ายพลังงานกลับไปแหล่งจ่ายจะไม่เกิดขึ้นใน RIV จะมีประโยชน์ในกรณีที่โหลดเป็น มอเตอร์

4.3.6) CID จะใช้คาปาซิสเตอร์ที่มีขนาดเล็กกว่า RIV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
เรื่อง แสดงการวิเคราะห์วงจร CID

5.1 แสดงตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์วงจร

E =supply voltage

D_f =freewheeling diode

D_r =return diode

$-I_a$ =load current

I_m =maximum load current

I_p =peak impulse current

i_c =instantaneous capacitor current

L =resonant-circuit inductance

Q =quality factor of LC circuit $=Z_o/R=\omega_o L/R=1/\omega_o CR$

q =instantaneous capacitor charge

T_c =commutation thyristor

T_m =main thyristor

T_a =set thyristor

v_c =instantaneous capacitor voltage

v_o =initial capacitor voltage

Z_c $=1/\omega C$

Z_1 $=\omega L$

Z_o =characteristic impledance$=\sqrt{(L/C)}$

α =damping factor $=R/2L$

λ =maximum load current/peak commutation impluse current

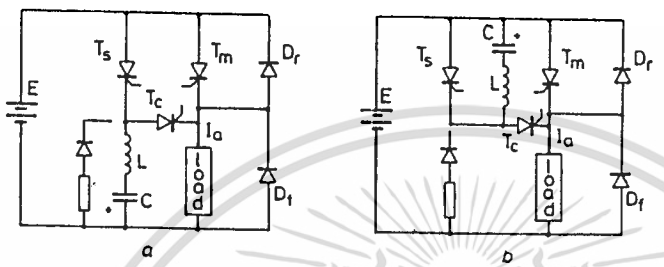
ϕ $=\tan^{-1}(\alpha/\omega)$

X =supply net output energy/commutation energy

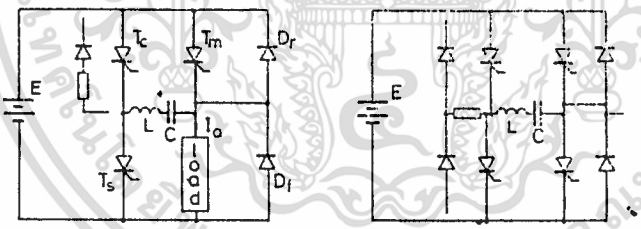
ω_o =natural frequency $= 1/\sqrt{(L/C)}$

ω =damped frequency$=\sqrt{(\omega_o^2-\alpha^2)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 *Commutation circuits*
a Parallel-load CID commutation circuit
b Parallel-main-thyristor CID commutation circuit



รูปที่ 5.2 *Commutation circuits*
a Parallel load and main thyristor CID commutation circuit
b McMurray CID commutaton circuit

จากรูปจะทำการวิเคราะห์วงจรภายในข้อกำหนดต่อไปนี้

5.1.1) ช่วงเวลาในการจ่ายโหลดต้องมากกว่าเวลาในการ commutation

5.1.2) พลังงานสามารถไหลกลับสู่แหล่งจ่ายได้

5.1.3) การสูญเสียของวงจรจะจัดให้อยู่ในรูปการสูญเสียเนื่องจาก resistance ที่ประกอบอยู่ในรูปวงจร LC

5.1.4) การสูญเสียในสารกึ่งตัวนำและผลของสนับเปอร์ตัดทิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

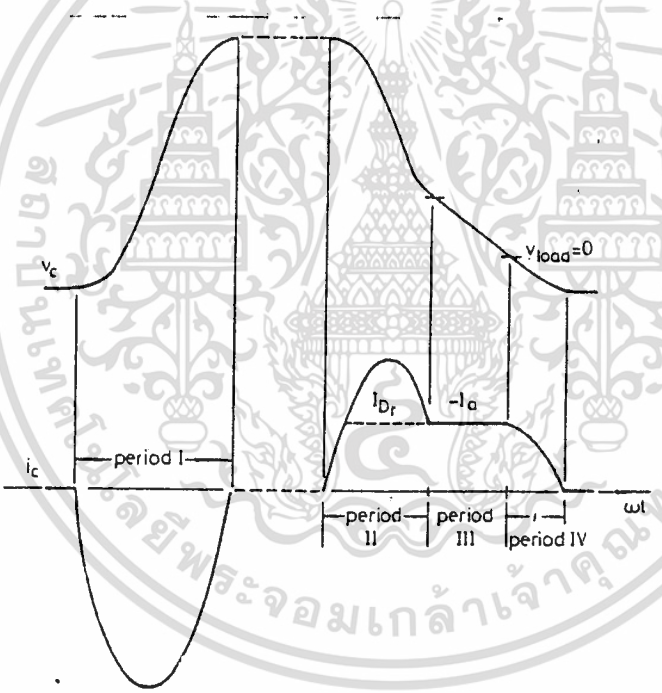
การวิเคราะห์จะทำเป็นช่วงๆเวลาของรูปคลื่นกระแสของคาปาซิสเตอร์ในวงจร commutation ดังรูปที่ 5.3

Period 1 : set cycle

Period 2 : commutation cycle

Period 3 : constant-current portion

Period 4 : trapped-energy transfer



รูปที่ 5.3 *Commutation-capacitor voltage and current waveforms*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Period 1: set cycle

ทริก T_1 ให้นำกระแส เพื่อประจุคาปาซิสเตอร์ T_1 จะหยุดนำกระแสในลักษณะ load commutation

กรณี ไม่คิดการสูญเสียของวงจร

$$V_o = q_o/C$$

$$i_o = q'(0) = 0$$

จากสมการแรงดัน

$$L(dq^2/dt^2) + q/C = E$$

ได้คำตอบของสมการแรงดัน

$$V_c(t) = E - (E - V_o)\cos \omega_o t \quad \text{(volt)}$$

$$i_c(t) = ((E - V_o)/Z_o)\sin \omega_o t \quad \text{(A)}$$

$$0 < \omega_o t < \pi \quad \text{(rad)}$$

กรณี คิดการสูญเสียของวงจร , Finite Q value

จากสมการแรงดัน

$$L(dq^2/dt^2) + Rdq/dt + q/C = E$$

ได้คำตอบของสมการแรงดัน

$$V_c(t) = E - (E - V_o)(\omega_o/\omega)e^{-\alpha t}\cos(\omega t - \phi) \text{(volt)}$$

$$i_c(t) = ((E - V_o)/\omega_L)e^{-\alpha t}\sin \omega t \quad \text{(A)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$0 < \omega_o t < \pi \qquad \text{(rad)}$$

Period 2: commutation cycle

โดยการทริก T_c นำกระแสทำให้ พลังงานในคาปาซิสเตอร์คอมพลังงานให้กับแหล่งจ่ายโดยผ่าน D_r และไหลผ่านโหลดด้วย ทำให้กระแสที่ไหลผ่าน T_m มีค่าเป็นศูนย์ และถูก reverse biased นานกว่าช่วง turn-off-time ของ T_m ทำให้ T_m หยุดนำกระแส

สำหรับรูปที่ 5.1(a)equivalent circuit ของ period นี้เหมือนกับ reset cycle

กรณี lossless

$$V_c(t) = E - (E - V_o)\cos\omega_o t \qquad \text{(volt)}$$

$$i_c(t) = ((E - V_o)/Z_o)\sin\omega_o t \qquad \text{(A)}$$

$$\omega_o t > \pi \qquad \text{(rad)}$$

กรณี Finite Q value

$$V_c(t) = E - (E - V_o)(\omega_o/\omega)e^{-\sigma t}\cos(\omega t - \phi) \text{(volt)}$$

$$i_c(t) = ((E - V_o)/\omega_L)e^{-\sigma t}\sin\omega t \qquad \text{(A)}$$

$$\omega t > \pi \qquad \text{(rad)}$$

Period 3, constant current portion

เมื่อ T_m turn-off แล้ว capacitor จะยังคงจ่ายโหลดต่อไปอีกช่วงหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี lossless

$$i_c(t) = -I_o$$

สมการแรงดันของ capacitor $V_c(t) = 1/C\int i_c(t)dt$

สมการสุดท้ายของ capacitor voltage

$$V_c(t) = V_{PII} - (I_o/C)t \qquad \text{(volt)}$$

กรณี Finite Q value

$$V_c(t) = V_{PII} - (I_o/C)t + I_oR \qquad \text{(volt)}$$

เมื่อ V_{PII} คือ capacitor voltage ที่เวลาสุดท้ายของ period II

Period 4 trapped energy transfer

เมื่อ capacitor ลดลงเป็นศูนย์ พลังงานที่สะสมใน inductor คือ $(1/2)LI_o^2$ จะ transfer ไปยัง capacitor (Capacitor voltage boost)

กรณี lossless

$$V_o = q_o/C = 0$$

$$i_o = q'(0) = -I_o$$

จากสมการแรงดัน

$$L(dq^2/dt^2) + q/C = 0$$

คำตอบของสมการแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_c(t) = -(E + I_o Z_o) \sin \omega_o t \qquad \text{(volt)}$$

$$i_c(t) = -I_o \cos \omega_o t \qquad \text{(A)}$$

$$0 < \omega_o t < \pi/2 \qquad \text{(rad)}$$

<u>กรณี</u> คิดการสูญเสียของวงจร , Finite Q value

จากสมการแรงดัน

$$L(dq^2/dt^2) + Rdq/dt + q/C = 0$$

ได้คำตอบของสมการแรงดัน

$$V_c(t) = -(I_o/\omega C)e^{-\alpha t} \sin(\omega t - 2\psi) \qquad \text{(volt)}$$

$$i_c(t) = -I_o(\omega_o/\omega)e^{-\alpha t} \cos(\omega t - \phi) \qquad \text{(A)}$$

$$0 < \omega t < \pi/2 \qquad \text{(rad)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1: Equations describing the CID commutation process, without and with losses

	Commutation circuit					
	Lossless equations			Finite Q value equations		
	Fig. 1*a*	Fig. 1*b*	Fig. 2*a*	Fig. 1*a*	Fig. 1*b*	Fig. 2*a*
1st cycle Initial capacitor voltage v_0	0	$-E$	0	0	$-E$	0
Subsequent cycle	$-I_a Z_0$	$-E - I_a Z_0$	$-E - I_a Z_0$	$-I_a Z_0 e^{-[\cos^{-1}(1-1/2Q^2)/\sqrt{4Q^2-1}]}$	$-E - I_a Z_0 e^{-[\cos^{-1}(1-1/2Q^2)/\sqrt{4Q^2-1}]}$	$-E - I_a Z_0 e^{-[\cos^{-1}(1-1/2Q^2)/\sqrt{4Q^2-1}]}$
Set cycle: period I	$v_c = E - (E - v_0)\cos\omega_0 t$	$v_c = v_0 \cos\omega_0 t$	$v_c = E - (E - v_0)\cos\omega_0 t$	$v_c = E - (E - v_0)\frac{\omega_0}{\omega} e^{-\sigma t}\cos(\omega t - \phi)$	$v_c = v_0 \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\sigma t}\cos(\omega t - \phi)$	$v_c = E - (E - v_0)\frac{\omega_0}{\omega} e^{-\sigma t}\cos(\omega t - \phi)$
$0 \leq \omega_0 t \leq \pi$ or $0 \leq \omega t \leq \pi$	$i_c = \frac{E - v_0}{Z_0}\sin\omega_0 t$	$i_c = \frac{-v_0}{Z_0}\sin\omega_0 t$	$i_c = \frac{E - v_0}{Z_0}\sin\omega_0 t$	$i_c = \frac{E - v_0}{X_t} e^{-\sigma t}\sin\omega t$	$i_c = \frac{-v_0}{X_t} e^{-\sigma t}\sin\omega t$	$i_c = \frac{E - v_0}{X_t} e^{-\sigma t}\sin\omega t$
Capacitor voltage at the end of the set cycle $v_c(\omega_0 t = \pi) = v_{pI}$	$2E - v_0$	$-v_0$	$2E - v_0$	$E + (E - v_0)e^{-\pi\tan\phi}$	$-v_0 e^{-\pi\tan\phi}$	$E + (E - v_0)e^{-\pi\tan\phi}$
Commutation cycle: period II $\omega_0 t \geq \pi$	$v_c = E - (E - v_0)\cos\omega_0 t$	$v_c = v_0 \cos\omega_0 t$	$v_c = (2E - v_0)\cos\omega_0 t$	$v_c = E - (E - v_0)\frac{\omega_0}{\omega} e^{-\sigma t}\cos(\omega t - \phi)$	$v_c = v_0 \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\sigma t}\cos(\omega t - \phi)$	$v_c = v_{pI} \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\sigma t}\cos(\omega t - \phi)$
$Z_0 = \sqrt{L/C}$ $X_t = \omega L$	$i_c = \frac{E - v_0}{Z_0}\sin\omega_0 t$	$i_c = \frac{-v_0}{Z_0}\sin\omega_0 t$	$i_c = \frac{-(2E - v_0)}{Z_0}\sin\omega_0 t$	$i_c = \frac{E - v_0}{X_t} e^{-\sigma t}\sin\omega t$	$i_c = \frac{-v_0}{X_t} e^{-\sigma t}\sin\omega t$	$i_c = \frac{v_{pI}}{X_t} e^{-\sigma t}\sin\omega t$
Load current magnitude dependent period III $v_{pII} = v_c\left(i_c = I_a \mid \omega_0 t > \frac{3\pi}{2}\right)$	$v_c = v_{pII} - \frac{I_a t}{C}$ $i_c = -I_a$			$v_c = v_{pII} - \frac{I_a t}{C} + I_a R$ $i_c = -I_a$		
v_c at the end of period III V_{pIII}	0	$-E$	$-E$	$I_a R$	$I_a R - E$	$I_a R - E$
Capacitor voltage boost cycle: period IV $0 \leq \omega_0 t \leq \pi/2$ $0 \leq \omega t \leq \pi/2$ $X_t = 1/\omega C$	$v_c = -I_a Z_0 \sin\omega_0 t$ $i_c = -I_a \cos\omega_0 t$	$v_c = -E - I_a Z_0 \sin\omega_0 t$		$v_c = -I_a X_t e^{-\sigma t}\sin(\omega t - 2\phi)$ $i_c = -I_a \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\sigma t}\cos(\omega t - \phi)$	$v_c = -E - I_a X_t e^{-\sigma t}\sin(\omega t - 2\phi)$	
Final capacitor voltage $v_{pIV} = v_0$	$-I_a Z_0$	$-E - I_a Z_0$	$-E - I_a Z_0$	$-I_a Z_0 e^{-[\cos^{-1}(1-1/2Q^2)/\sqrt{4Q^2-1}]}$	$-E - I_a Z_0 e^{-[\cos^{-1}(1-1/2Q^2)/\sqrt{4Q^2-1}]}$	

NOTE

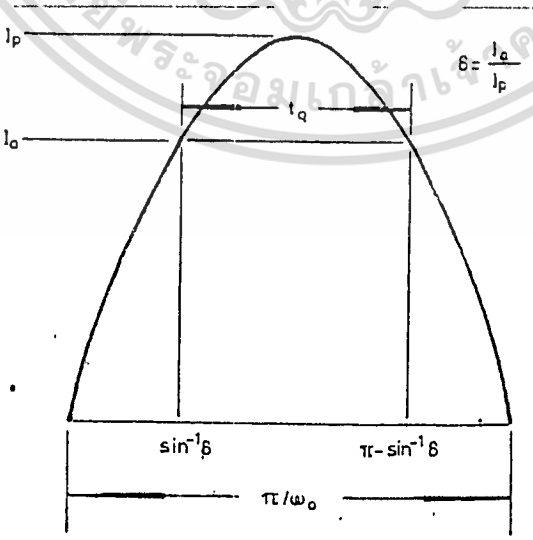
จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าเมื่อเสร็จจากการทำงานในรอบแรกแล้ว capacitor จะเก็บพลังงานเอาไว้มีผลทำให้ capacitor voltage เริ่มต้นในการทำงานรอบต่อไป มีค่าสูงกว่ารอบแรก และ capacitor voltage ส่วนนี้เองมีผลต่อการวิเคราะห์วงจรในลำดับต่อไปคือ

1) discharge capacitor voltage ส่วนนี้ทิ้งโดยผ่าน resister และ diode ที่เขียนลอยไว้ในรูปที่ ให้เป็นเช่นสภาพเริ่มต้น ของการทำงานในรอบแรก เพื่อจะทำให้การวิเคราะห์วงจรทำได้ง่ายไม่ซับซ้อน (without trapped energy)

2) นำพลังงานส่วนนี้ไปใช้กับวงจรในรอบต่อไป ซึ่งจะทำให้วงจรมีความสามารถที่จะ commutated main thyristor ในระดับกระแสที่สูงกว่าเดิมได้ กรณีนี้เรียกว่า trapped energy ซึ่งการวิเคราะห์วงจรมีความยุ่งยากซับซ้อนมากขึ้น

5.2 Optimal commutation sinusiod impluse

พิจารณา commutation (period) เพื่อให้ T_m turn-off หลักการก็คือ ลด scr current ให้เป็นศูนย์แล้วให้ reverse-biased เป็นเวลามากกว่าหรือเท่ากับ scr turn-off time , t_q เป็นอย่างน้อย และจากข้อกำหนดของวงจรที่นำมาวิเคราะห์นี้ ให้กระแสโหลดคงที่ (constant load current)



รูปที่ 5.4 *Sinusoidal-current-impulse relationships*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x = W / E I_a t_a$$

$$x = 2/\lambda(\pi - 2\sin^{-1}\lambda)$$

พลังงานที่จ่ายให้วงจร commutation/ พลังงานที่ใช้ commutated = x

ต้องการให้ x มีค่าน้อยที่สุด โดย $dx/d\lambda = 0$

ได้ $\lambda = \cos(\lambda/\sqrt{(1-\lambda^2)})$

$$\lambda = 0.6522$$

$$x = 1.78$$

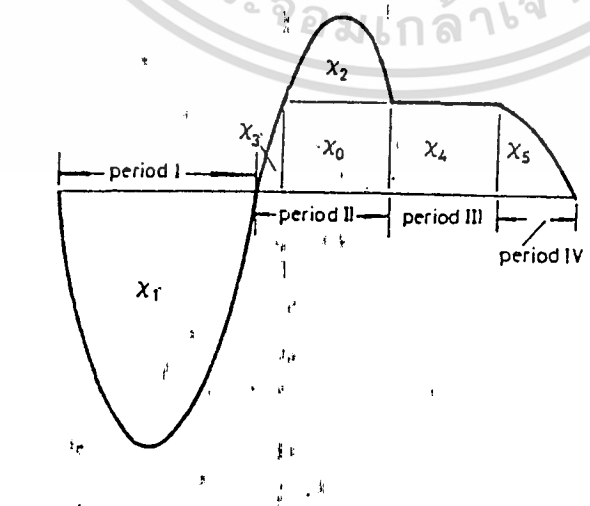
$$I_p = 1.539\ I_a$$

กรณีที่ 2 นำพลังงานกลับมาใช้ , trapped energy retained

ในการนำพลังงานกลับมาใช้นี้ก็แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ

1) นำพลังงานกลับมาใช้บางส่วน whit trapped-energy diesption

2) นำพลังงานกลับมาใช้ทั้งหมด whit trapped-energy recovered



รูปที่ 5.5 *LC-circuit commutation current waveform for all CID circuits showing energy ratio χ components*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรูป 5.1 (a)

ใน period 2 มีการคืนพลังงานให้กลับแหล่งจ่าย

$$w' = E\int_{(\pi-\sin^{-1}\lambda)/\omega_o}^{(\pi-\sin^{-1}\lambda)/\omega_o} (I_p \sin \omega_o t - I_a)dt \qquad (j)$$

$$= E((-I_p/\omega_o)\cos \omega_o t - I_a t)\Big|_{(\sin^{-1}\lambda)/\omega_o}^{(\pi-\sin^{-1}\lambda)/\omega_o}$$

$$w' = EI_a t_a (2\sqrt{(1-\lambda^2)}/\lambda(\pi-2\sin^{-1}\lambda)) - 1$$

$$x' = (2\sqrt{(1-\lambda^2)}/\lambda(\pi - 2\sin^{-1}\lambda)) - 1$$

จากที่รับพลังงานมา x มาจากแหล่งจ่ายและจ่ายกลับคืนไปให้แหล่งจ่าย x' ดังนั้น พลังงานที่แหล่งจ่ายให้กับวงจร เป็น

$$x_{s.t(a)} = x - x'$$

$$x_{s.t(a)} = 1 + 2(1-\sqrt{(1-\lambda^2)})/\lambda(\pi - 2\sin^{-1}\lambda)$$

จาก capacitor voltage boost $-I_a^2 Z_o$ (จากตารางที่ 1)ทำให้พลังงานที่เก็บใน capacitor เป็น

$$w'' = (C/2)(I_a Z_o)^2$$

$$= EI_a t_a (\lambda/2(\pi - 2\sin^{-1}\lambda))$$

$$x'' = \lambda/(2(\pi - 2\sin^{-1}\lambda))$$

ถ้าพลังงาน x'' นั้น สูญเสียไป ดังนั้นพลังงานที่ให้ commutation circuit เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X'_{s.1(a)} = X_{s.1(a)} + X''$$

$$= 1 + \frac{2(1 - \sqrt{(1-\lambda^2)})}{\lambda(\pi - 2\sin^{-1}\lambda)} + \frac{\lambda}{2(\pi - 2\sin^{-1}\lambda)}$$

$$= 1 + (2(1-\sqrt{(1-\lambda^2)}) + \lambda^2/2)/\lambda(\pi - 2\sin^{-1}\lambda)$$

ถ้านลังงาน x" นั้น ส่งคืนกลับไปให้แหล่งจ่าย ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรเพิ่มขึ้น

$$X''_{s.1(a)} = X_a - X''$$

$$= 1 + (2(1-\sqrt{(1-\lambda^2)}) - \lambda^2/2)/\lambda(\pi - 2\sin^{-1}\lambda)$$

วงจรรูป 5.1 (b)

$$X_{s.1(b)} = X_0 + X_3 + X_4 + X_5$$

$$X_{s.1(b)} = 1 + (\lambda + 2(1-\sqrt{(1-\lambda^2)}))/\lambda(\pi - 2\sin^{-1}\lambda)$$

$$X'_{s.1(b)} = 1 + (2(1-\sqrt{(1-\lambda^2)}) + \lambda^2/2)/\lambda(\pi - 2\sin^{-1}\lambda)$$

$$X''_{s.1(b)} = 1 + (2(1-\sqrt{(1-\lambda^2)}) - \lambda^2/2)/\lambda(\pi - 2\sin^{-1}\lambda)$$

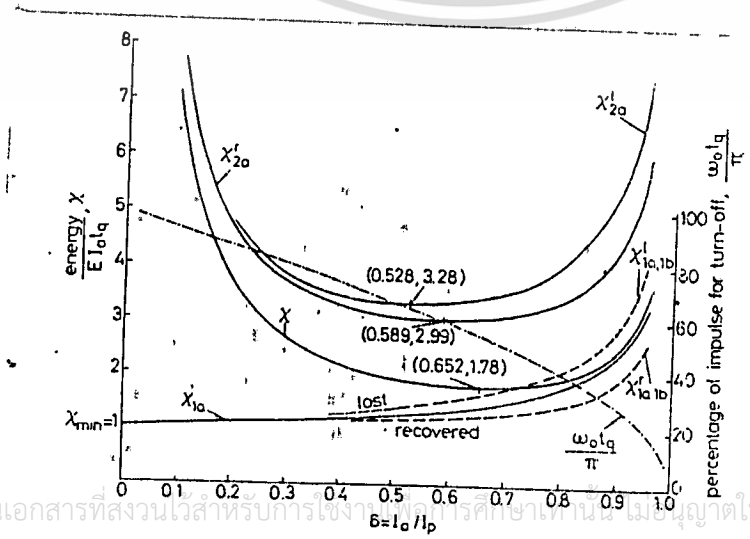
วงจรรูป 5.2 (a)

$$X_{s.2(a)} = X_0 + X_1 + X_3 + X_4 + X_5$$

$$X_{s.2(a)} = 1 + (\lambda + 2(2-\sqrt{(1-\lambda^2)}))/\lambda(\pi - 2\sin^{-1}\lambda)$$

$$X'_{s.2(a)} = 1 + (2(2-\sqrt{(1-\lambda^2)}) + \lambda^2/2)/\lambda(\pi - 2\sin^{-1}\lambda)$$

$$X''_{s.2(a)} = 1 + (2(1-\sqrt{(1-\lambda^2)}) - \lambda^2/2)/\lambda(\pi - 2\sin^{-1}\lambda)$$



Sinusoidal-impulse magnitude against commutation-circuit energy efficiency

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$J_o = (\pi - 2\sin^{-1}\lambda)/t_\alpha$$

$$L = Z_o/J_o$$

$$C = 1/Z_o J_o$$

	วงจรที่ 5.1(a,b)	วงจรที่ 5.2 (a)
ไม่มีการเก็บพลังงาน	$L=\frac{\lambda}{(\pi-2\sin^{-1}\lambda)}\frac{E\,t_\alpha}{I_m}$ $C=\frac{1}{\lambda(\pi-2\sin^{-1}\lambda)}\frac{I_m\,t_\alpha}{E}$	$L=\frac{2\lambda}{(\pi-2\sin^{-1}\lambda)}\frac{E\,t_\alpha}{I_m}$ $C=\frac{1}{2\lambda(\pi-2\sin^{-1}\lambda)}\frac{I_m\,t_\alpha}{E}$
มีการเก็บพลังงาน	$L=\frac{\lambda}{(1-\lambda)(\pi-2\sin^{-1}\lambda)}\frac{E\,t_\alpha}{I_m}$ $C=\frac{1-\lambda}{\lambda(\pi-2\sin^{-1}\lambda)}\frac{I_m t_\alpha}{E}$	$L=\frac{3\lambda}{(1-\lambda)(\pi-2\sin^{-1}\lambda)}\frac{Et_\alpha}{I_m}$ $C=\frac{1-\lambda}{3\lambda(\pi-2\sin^{-1}\lambda)}\frac{I_m t_\alpha}{E}$
ค่า λ ที่เป็นไปได้ $0<\lambda<1$	$\lambda = 0.667$	$\lambda = 0.528$ Or 0.589

ตารางที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 Critical circuit Q factor

LC circuit critical Q factor คือ ค่า Q ที่ทำให้ไม่ต้องเกิด period 3 รูปที่ 5.1(a)

$$V_c = I_L R = E - (E - V_o)(\omega_o/\omega)e^{-\alpha t} \cos(\omega t - \phi)$$

$$I_c = ((E - V_o)/\omega_L)e^{-\alpha t} \sin \omega t$$

เมื่อ $V_o = -I_L Z_o \, e^{-(\cos^{-1}(-1/2Q)/\sqrt{(4Q^2-1)})}$

$3\pi/2 < \omega t < 2\pi$ rad/s

$$Q^2 = (\tan^{-1}(\sqrt{(4Q^2-1)}/(1-2QA)) + n\pi)/\ln(B^2/(A^2+A/Q+1)))^2 + 1/4$$

เมื่อ $A = E/I_L Z_o$

$B = A + e^{-(\cos^{-1}(-1/2Q))/\sqrt{(4Q^2-1)}}$

$n = 2$

วงจร 5.1 (b) ได้ผลเช่นเดียวกับ วงจร 5.2 (a)

วงจร 5.2 (a) จะได้

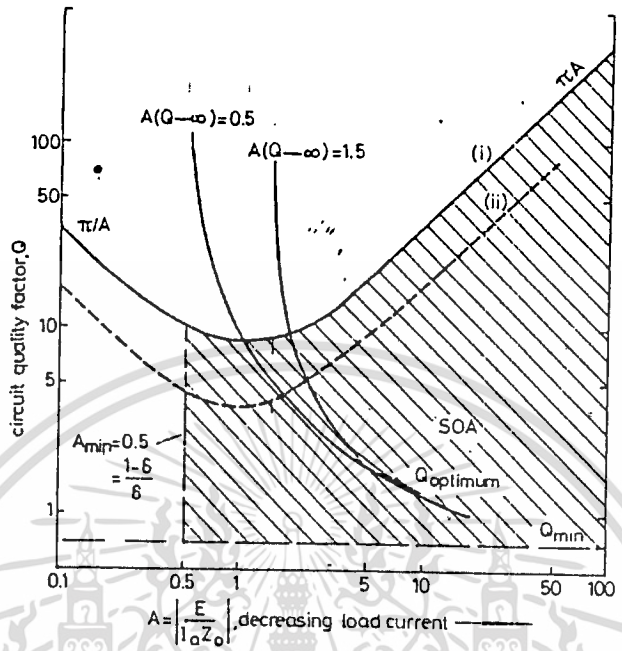
$$Q^2 = (\tan^{-1}(\sqrt{(4Q^2-1)}/(1-2QA)) + n\pi)/\ln(B^2/(A^2+A/Q+1)))^2 + 1/4$$

เมื่อ $A = E/I_L Z_o$

$B = A + 2Ae^{-\pi/\sqrt{(4Q^2-1)}} + e^{-(\cos^{-1}(-1/2Q))/\sqrt{(4Q^2-1)}}$

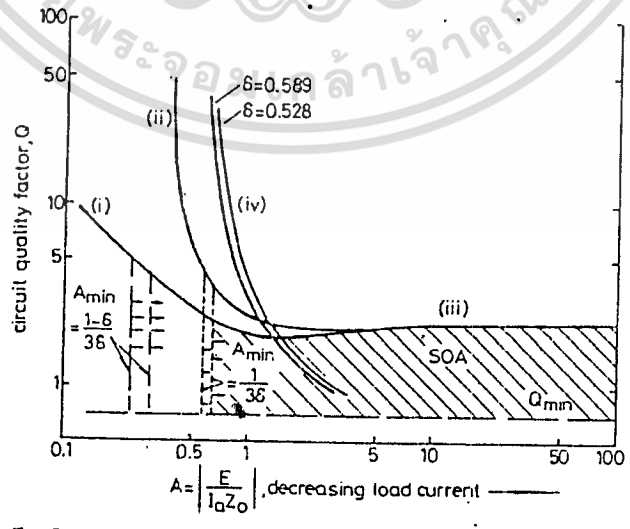
$n = 2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 *Commutation-circuit critical circuit Q against load current, for the circuits of Figs. 1a and 1b*

(i) $Q_{critical}$ for the circuits of Figs. 1*a* and 1*b* with trapped energy
(ii) $Q_{critical}$ for the circuit of Fig. 2*b* with trapped energy



รูปที่ 5.8 *Commutation-circuit critical circuit Q against load current, for the circuit of Fig. 2a*

(i) $Q_{critical}$ with trapped energy
(ii) $Q_{critical}$ without trapped energy
(iii) $Q_{critical}$ for circuit of Fig. 2*a*
(iv) $Q_{optimum}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก $A = E/I_a Z_o = I_p/I_a = 1/\lambda$

จะได้ Maximum commutable current (A_{min}, Q -> α)

	วงจรที่ 5.1(a,b)	วงจรที่ 5.2 (a)
ไม่มีการเก็บพลังงาน	$1/\lambda$ 1.5	$1/3\lambda$ 0.631 0.566
มีการเก็บพลังงาน	$(1-\lambda)/\lambda$ 0.5	$(1-\lambda)/3\lambda$ 0.298 0.233
ค่า λ ที่เป็นไปได้	0.667	λ=0.528 λ=0.589

ตารางที่ 5

Optimal or possible *LC* component values

	Circuit		
	Figs. 1*a*, 1*b*, 2*b*	Fig. 2*a*	
No trapped energy retained (or first cycle)	$L = 0.396\frac{E}{I_m}t_q$ $C = 0.892\frac{I_m}{E}t_q$	$L = 0.520\frac{E}{I_m}t_q$ or $0.781\frac{E}{I_m}t_q$ $C = 0.467\frac{I_m}{E}t_q$ or $0.311\frac{I_m}{E}t_q$	$L = 0.626\frac{E}{I_m}t_q$ or $0.939\frac{E}{I_m}t_q$ $C = 0.451\frac{I_m}{E}t_q$ or $0.300\frac{I_m}{E}t_q$
Trapped energy retained	$L = 1.189\frac{E}{I_m}t_q$ $C = 0.297\frac{I_m}{E}t_q$	$L = 1.654\frac{E}{I_m}t_q$ $C = 0.147\frac{I_m}{E}t_q$	$L = 2.284\frac{E}{I_m}t_q$ $C = 0.124\frac{I_m}{E}t_q$
δ value	0.667	0.528	0.589

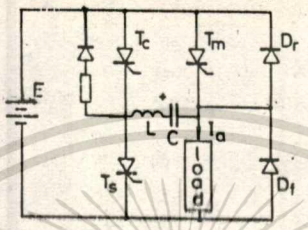
ตารางที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

เรื่อง การทดลองและผลการทดลอง

6.1 การทดลองในกรณีที่วงจรไม่มีการเก็บพลังงาน

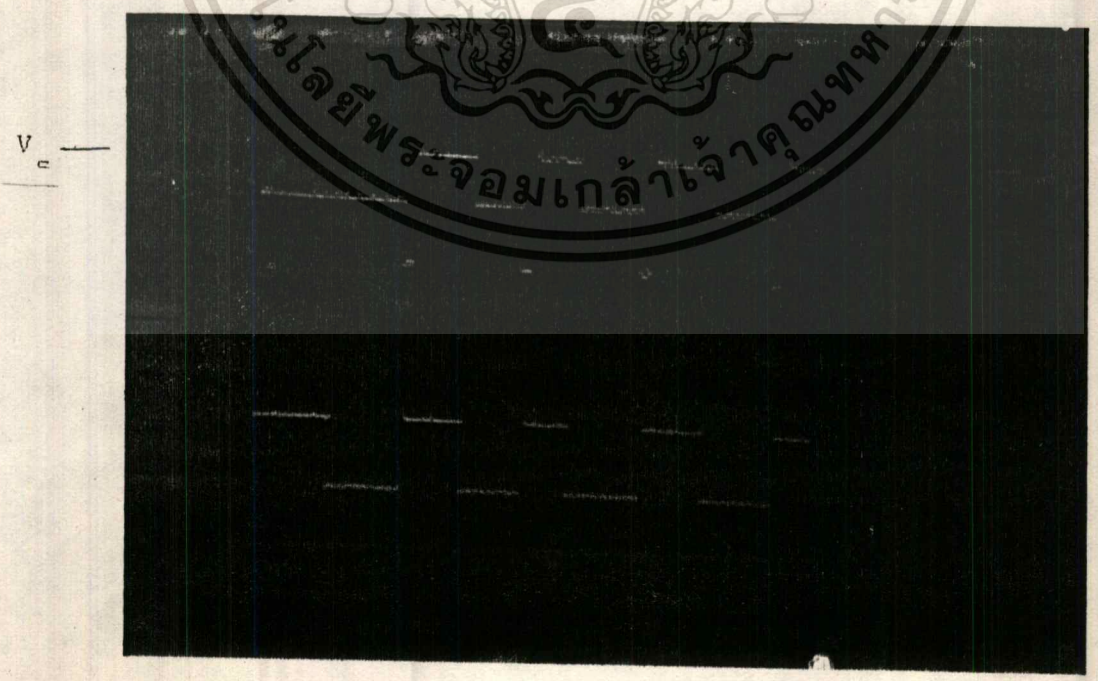


รูปที่ 6.1 รูปที่ใช้ทำการทดลอง

จากตารางที่ 5.2 (a) เมื่อไม่มีการเก็บพลังงาน จะใช้ค่า $\lambda = 0.528$ แรงดัน 40 โวลท์ กระแส 2 แอมป์ $t_\alpha = 250\ \mu s$

$$C = \frac{1}{2\lambda(\pi - 2\sin^{-1}\lambda)} \frac{I_m}{E} t_\alpha \quad , \quad L = \frac{2\lambda}{(\pi - \sin^{-1}\lambda)} \frac{E}{I_m} t_\alpha$$

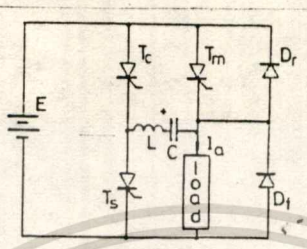
$$C = 6\ \mu F \quad , \quad L = 2.6\ mH$$



รูปที่ 6.2 รูปแสดงแรงดันที่โหลดและแรงดันที่คาปาซิสเตอร์เมื่อไม่มีการเก็บพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 การทดลองในกรณีที่วงจรมีการเก็บพลังงาน



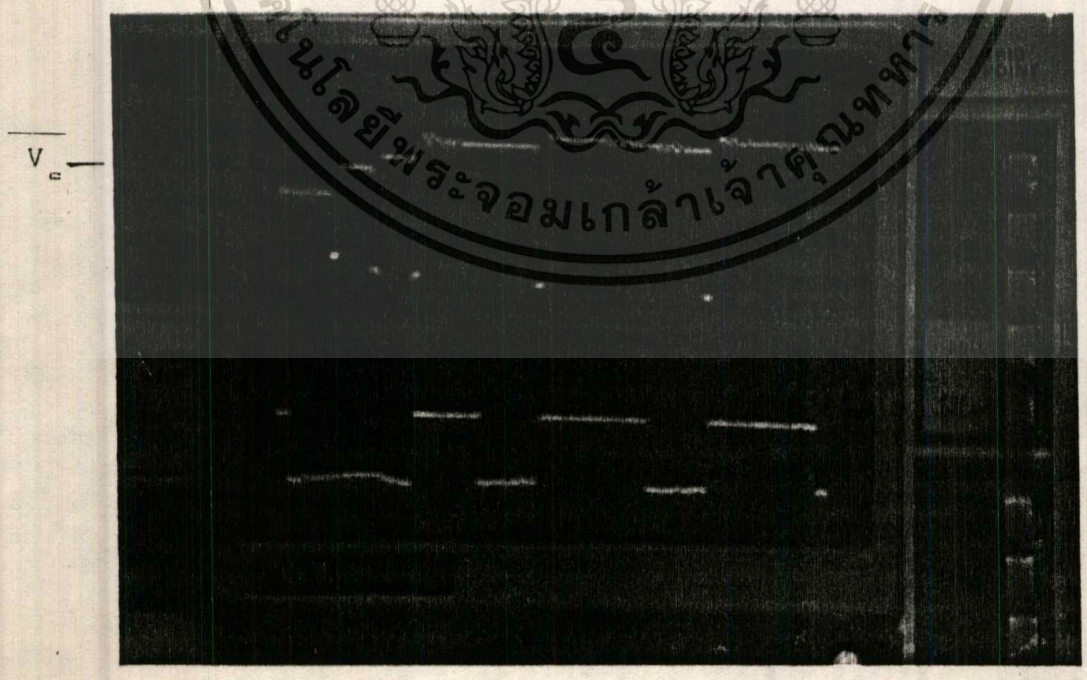
รูปที่ 6.3 รูปที่ใช้ทำการทดลอง

จากตารางที่ 5.2 (a) เมื่อมีการเก็บพลังงาน จะใช้ค่า λ = 0.528

แรงดัน 40 โวลท์ กระแส 2 แอมป์ t_α = 250 μs

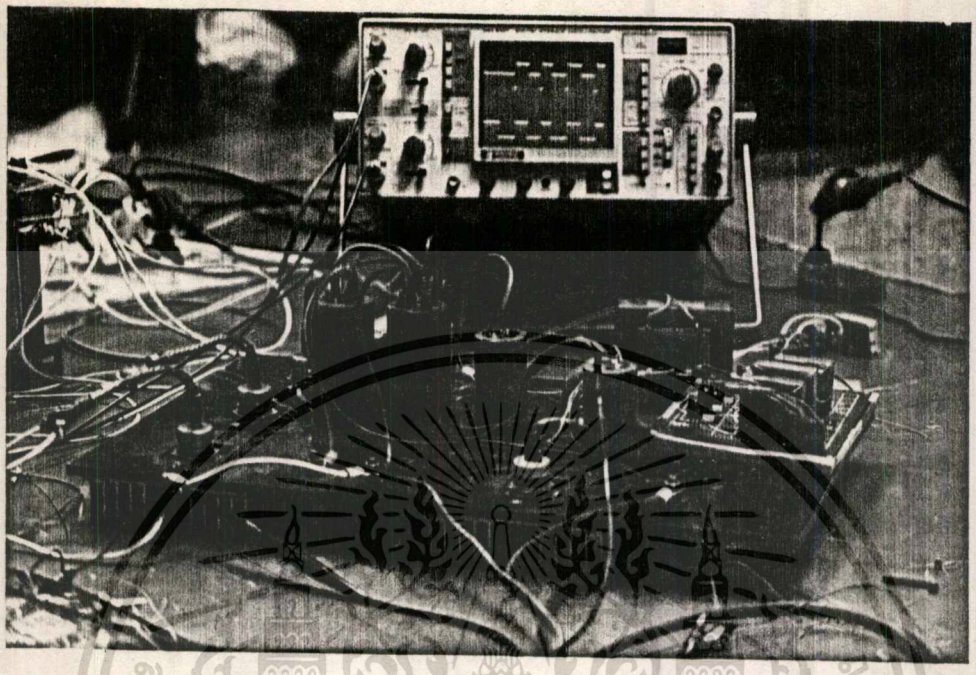
$$C = \frac{(1-\lambda)}{3\lambda(\pi-2\sin^{-1}\lambda)}\frac{I_m}{E}t_\alpha \quad , \quad L = \frac{3\lambda}{(1-\lambda)(\pi-2\sin^{-1}\lambda)}\frac{E}{I_m}t_\alpha$$

$$C = 1.8 \ \mu F \quad , \quad L = 8.26 \ mH$$



รูปที่ 6.2 รูปแสดงแรงดันที่โหลดและแรงดันที่คาปาซิสเตอร์เมื่อมีการเก็บพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 แสดงส่วนประกอบของการทดลอง

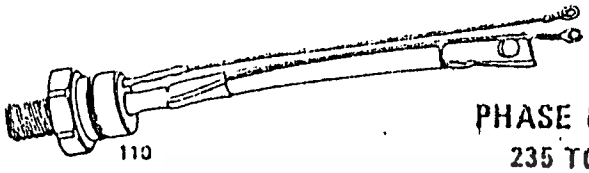
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
เรื่อง สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้ทดลองมาพบว่าค่าการทนแรงดันของคาปาซิสเตอร์นั้นจะมีค่าเป็น 2 เท่าของแหล่งจ่าย ถ้าใช้ที่แหล่งจ่ายแรงดันสูงๆ ท้าหาค่าคาปาซิสเตอร์ที่มีค่าเหมาะสมยากและมีราคาสูง และอุปกรณ์กำลังมีราคาสูงดังนั้นในการทดลองจึงต้องมีอุปกรณ์ป้องกันที่ดีมาก และจะเห็นว่าในวงจรที่มีการเก็บพลังงานนั้นจะใช้ค่าคาปาซีสเตอร์ที่มีค่าต่ำกว่าแบบที่ไม่มีการเก็บพลังงานและการออกแบบวงจรทริกต้องจัดเวลาการทำงานให้เหมาะสมไม่เช่นนั้นแล้วจะทำให้เกิดการลัดวงจรระหว่าง T_A กับ T_B

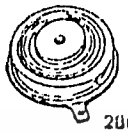
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

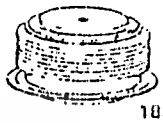


110

PHASE CONTROL SCRs
235 TO 850 AMPERES



200



186

GE TYPE		C150	C150X500	C380	C380X655	C380X800	C390	C391	C601	C602
ELECTRICAL SPECIFICATIONS										
VOLTAGE RANGE		600-1300	100-800	100-1200	100-1200	100-800	600-1300	1400-1600	700-2000	100-2200
FORWARD CONDUCTION										
$I_{T(RMS)}$	Max. RMS On-State Current (A)	238	300	380	460	600	600	800	850	850
$I_{T(AV)}$	Max. average on-state current @ 180° conduction (A) @ T_C	150 @ 80°C	255 @ 70°C	238 @ 80°C	315 @ 80°C	375 @ 70°C	500 @ 50°C	480 @ 85°C	650 @ 67°C	476 @ 80°C
$I_{T(AV)}$	Max. average on-state current for $\frac{1}{2}$ conduction (A) @ T_C	238 @ 80°C	325 @ 70°C	380 @ 80°C	315 @ 80°C	520 @ 70°C	440 @ 50°C	480 @ 85°C	525 @ 70°C	400 @ 80°C
I_{TSM}	Max. peak one cycle, non-repetitive surge current (A)	3800	8500	3800	3200	8500	8000	8000	8000	8000
I^2t	Max. I^2t for fusing for 8.3 msec (A² Sec)	60,000	125,000	60,000	42,000	125,000	265,000	266,000	265,000	265,000
V_{TM}	Peak on-state voltage @ 125°C, 180° conduction, rated $I_{T(AV)}$ (V)	1.7	1.35	1.6	2.3 (@160°C)	1.46	2.0	1.9	1.9	1.9
$R_{th\,JC}$	Max. internal thermal resistance, dc, junction-to-case (°C/W)	.14	.14	.098	96	.098	.08	.08	.08	.08
t_q	Typical turn-off time (μsec)	250	250	250	75	150	125	300	300	125
t_{gt}	Typical turn-on time (μsec)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
di/dt	Rate of rise of turned-on current (A/μsec)	200	200	200	300	200	500	150	30-75	100
T_J	Junction operating temperature range (°C)	-40 to 125°C	-40 to 125°C	-40 to 125°C	-40 to 150°C	-40 to 125°C	-40 to 125°C	-40 to 125°C	-40 to 125°C	-40 to 125°C
BLOCKING										
dv/dt	Min. critical rate of rise of off-state voltage, exponential @ max. rated T_J (V/μsec)	200	200	200	200	200	200	200	10 @ V_{DRM} 100	10 @ V_{DRM} 800
FIRING										
I_{GT}	Max. required gate current to trigger (mA @ −40°C	200	200	200	200	200	300	300	225	275
	@ 125°C	125	125	125	(@150°C) 125	125	125	125	75	50
V_{GT}	Max. required gate voltage to trigger (V) @ −40°C	3	3	3	(@150°C) 3	3	5	6	8.5	4.5
V_{GT}	Min. required gate voltage to trigger (V) @ 125°C	.15	.15	.15	(TYP@150°C) .25	.15	.25	.15	.15	.3
VOLTAGE TYPES										
Repetitive Peak Forward and Reverse Voltage	100	CONSULT FACTORY	C150AX500	C380A	C380AX655	C380AX800	—	—	CONSULT FACTORY	—
	200		C150BX500	C380B	C380BX655	C380BX800	C390B	—		—
	300		C150CX500	C380C	C380CX655	C380CX800	C390C	—		—
	400		C150DX500	C380D	C380DX655	C380DX800	C390D	—		—
	500	C160B	C150EX500	C380E	C380EX655	C380EX800	C390E	—		—
	600	C160M	C150MX500	C380M	C380MX655	C380MX800	C390M	—		—
	700	C160S	C150SX500	C380S	C380SX655	C380SX800	C390S	—		—
	800	C160N	—	C380N	C380NX655	—	C390N	—		—
	900	C160T	—	C380T	C380TX655	—	C390T	—		—
	1000	C160P	—	C380P	C380PX655	—	C390P	—		—
	1100	C160PA	—	C380PA	C380PAX655	—	C390PA	—		—
	1200	C160PB	—	C380PB	C380PBX655	—	C390PB	—	C601PB	—
	1300	C160PC	—	C380PC	—	—	C390PC	C601PC	C601PC	—
	1400	—	—	—	—	—	—	C601PD	C601PD	—
	1500	—	—	—	—	—	—	C601PE	C601PE	C602PE
	1600	—	—	—	—	—	—	C601PM	C601PM	C602PM
	1700	—	—	—	—	—	—	C601PS	C601PS	C602PS
	1800	—	—	—	—	—	—	C601PN	C601PN	C602PN
	1900	—	—	—	—	—	—	—	C601PT	C602PT
	2000	—	—	—	—	—	—	—	C601E	C602E
PACKAGE TYPE		¾" STUD	¾" STUD	1¼" PHASE PAK	¾" PRESS PAK	1¼" PHASE PAK	PRESS PAK	Hi-Rel PAK	PRESS PAK	PRESS PAK
PACKAGE OUTLINE NO.		110	110	200	200	200	276	276	186	186

(Continued)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้จัดทำขอขอบคุณอาจารย์สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำแนะนำและให้กำลังใจมาโดยตลอด และขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่คอย ติชม, ให้กำลังใจ และให้คำปรึกษา ขอบคุณสโตร์และภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม ที่เอื้อเฟื้อด้านอุปกรณ์และ สถานที่มาโดยตลอด ผู้จัดทำจึงขอขอบคุณมา ณ. โอกาสนี้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1)อุดมศักดิ์ ยั่งยืน ; "POWER ELECTRONICS"

2)Williams,B.W ; "POWER ELECTRONICS",1988

3)Williams,B.W ; 'Impulse commutated thyristor chopper'
,Proc IEE,1977,124,(9),pp 793-795

4)Williams,B.W ; 'Current impulse commutated thyristor chopper'
,IEEE Trans.,1980,IECI-27,pp 119-122

5)Williams,B.W ; 'Current-impulse-displacement thyristor
commutation whit controlled trapped energy'
,IEE Proceedings,Vol.131,Pt.B,No.2,MARCH 1984

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้