

BIDANG PENDIDIKAN DAN PENGAJARAN

BERITA ACARA PERKULIAHAN

KULIAH ONLINE/OFF LINE

(LEARNING)

PERIODE SEMESTER GENAP 2022-2023

MATA KULIAH

ELEKTRONIKA DAYA

LAMPIRAN BERITA ACARA PERKULIAHAN

- 1. SK DEKAN FTI SEMESTER GANJIL 2022-2023*
- 2. PRESENSI KEHADIRAN DOSEN DAN MATERI AJAR*
- 3. NILAI KOMULATIF : KEHADIRAN, TUGAS, UTS DAN UAS*
- 4. CONTOH HAND OUT MATERI AJAR*

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL



**YAYASAN PERGURUAN CIKINI
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL**

Jl. Moh. Kahfi II, Bhumi Srengseng Indah, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12640
Telp. 021-7270090 (hunting), Fax. 021-7866955, hp: 081291030024
Email : humas@istn.ac.id Website : www.istn.ac.id

SURAT PENUGASAN TENAGA PENDIDIK

Nomor : 164/03.1 - G / III / 2023

SEMESTER **GENAP**, TAHUN AKADEMIK 2022 / 2023

| | | | |
|------------------|------------------|----------------|--------------------------------|
| Nama | : Sugianto,Ir,MT | Status Pegawai | : Edukatif Tetap / Tidak Tetap |
| NIK | : 186489 | Program Studi | : Teknik Elektro |
| Jabatan Akademik | : Lektor | | |

| Bidang | Perincian Kegiatan | Tempat | Jam/ Minggu | Kinerja (sks) | Keterangan |
|--|---|--------|-------------|---------------|--------------------|
| I PENDIDIKAN Dan PENGAJARAN | MENGAJAR DI KELAS (KULIAH / RESPONSI DAN LABORATORIUM) | | | | |
| | 1.Elektronika Daya (Kls A) | | | 2 | Kamis,08.00-14.40 |
| | 2.Elektronika Daya (Kls K) | | | 2 | Sabtu ,13.00-14.40 |
| | 3.Mesin- Mesin Listrik (Kls A) | | | 3 | Rabu, 10.00-12.30 |
| | 4.Mesin- Mesin Listrik (Kls K) | | | 3 | Jumat,17.00-18.40 |
| | 5.Ekonomi Teknik (Kls A) | | | 2 | Kamis,13.00-14.40 |
| | 6. | | | | |
| | 7. | | | | |
| | 8. | | | | |
| | 9. | | | | |
| | 10. | | | | |
| | 11. | | | | |
| | 12. | | | | |
| | 13. | | | | |
| | 14. | | | | |
| | 15. | | | | |
| | 16. | | | | |
| | 17. Membimbing Skripsi / Tugas Akhir | | | | 1 |
| 18. Menguji Skripsi / Tugas Akhir | | | | 1 | |
| II PENELITIAN | 1. Penelitian Ilmiah | | | | |
| | 2. Penulisan Karya Ilmiah | | | | |
| | 3. Penulisan Diktat Kuliah | | | | |
| | 4. Menerjemahkan Buku | | | | |
| | 5. Pembuatan Rancangan Teknologi | | | | |
| | 6. Pembuatan Rancangan & Karya Pertunjukan | | | | |
| III PENGABDIAN DAN MASYARAKAT | 1. Menduduki Jabatan di Pemerintahan | | | | |
| | 2. Pengembangan Hasil Pendidikan Dan Penelitian | | | | |
| | 3. Memberikan Penyuluhan/Pelatihan/Ceramah pada masyarakat | | | | 1 |
| | 4. Memberikan Pelayanan Kepada Masyarakat Umum | | | | 1 |
| | 5. Menulis Karya Pengabdian Pada Masyarakat yang tidak dipublikasikan | | | | |
| | 6. Komersial / Kesepakatan | | | | |
| IV UNSUR-UNSUR PENUNJANG | 1. Jabatan Struktural | | | | |
| | 2. Penasehat Akademik | | | | |
| | 3. Berperan serta aktif dalam pertemuan ilmiah / seminar | | | | |
| | 4. Pengembangan program kuliah / Kelompok Ilmu Elektro | | | | |
| | 5. Menjadi anggota panitia / Badan pada suatu Perguruan Tinggi | | | | |
| | 6. Menjadi anggota Badan Lembaga Pemerintah | | | | |
| | 7. Menjadi Anggota Organisasi Profesi | | | | |
| | 8. Mewakili PT / Lembaga Pemerintah duduk dalam Panitia antar Lembaga | | | | |
| | 9. Menjadi Anggota Delegasi Nasional ke Parlemen - Parlemen Internasional | | | | |
| Jumlah Total | | | | 16 | |

Kepada yang bersangkutan akan diberikan gaji / honorarium sesuai dengan peraturan penggajian yang berlaku di Institut Sains dan Teknologi Nasional
Penugasan ini berlaku dari tanggal **20 Maret 2023** sampai dengan tanggal **31 Agustus 2023**.



Jakarta, 20 Maret 2023
Dekan,

(Signature)
(Dr. Musirah Cahya F.T.S.Si.,M.Si.)

- Tembusan :**
1. Direktur Akademik – ISTN
 2. Direktur Non Akademik – ISTN
 3. Ka. Biro Sumber Daya Manusia – ISTN
 4. Kepala Program Studi Fak.
 5. Arsip



BERITA ACARA PERKULIAHAN
(PRESENTASI KEHADIRAN DOSEN)
SEMESTER GENAP TAHUN AKADEMIK 2022/2023
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO S.1 & D.III –ISTN

| | | | |
|-------------|---|----------|----------------------|
| Mata Kuliah | : Elektronika Daya | Semester | : Genap 2022-2023 |
| Dosen | : Poedji Oetomo, ST.MT /Ir.Sugianto, MT | SKS | : 2 |
| Hari | : Kamis | Kelas | : A (S-1) |
| Jam | : 08.00-09.40 | Ruang | : On line / off line |

| No. | TANGGAL | MATERI KULIAH | JML MHS HADIR | Tanda Tangan Dosen | Tanda Tangan Dosen |
|-----|-------------------|------------------------------------|---------------|--------------------|--------------------|
| 1. | 30/3/2023 | Pendahuluan | 3 | | |
| 2. | 6/4/2023 | Pengantar elektronika daya | 2 | | |
| 3. | 13/4/2023 (bag.1) | Komponen semikonduktor | 3 | | |
| 4. | 13/4/2023 (bag.2) | Komponen semikonduktor (lanjutan) | 2 | | |
| 5. | 27/4/2023 | Penyearah daya | 2 | | |
| 6. | 4/5/2023 | Pemicu komponen semikonduktor | 2 | | |
| 7. | 11/5/2023 | Penyearah terkendali satu fasa | 2 | | |
| 8. | 25/5/2023 | UJIAN TENGAH SEMESTER (UTS) | 3 | | |

DOSEN PENGAJAR

(Ir. Sugianto,MT)



BERITA ACARA PERKULIAHAN
(PRESENTASI KEHADIRAN DOSEN)
SEMESTER GENAP TAHUN AKADEMIK 2022/2023
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO S.1 & D.III –ISTN

| | | | |
|-------------|---|----------|----------------------|
| Mata Kuliah | : Elektronika Daya | Semester | : Genap 2022/2023 |
| Dosen | : Poedji.Oetama.ST,MT /Ir.Sugianto, MT | SKS | : 2 |
| Hari | : Kamis | Kelas | : Kls.A/Reg. |
| Jam | : 08:00 s/d 09.40 | Ruang | : On line |

| No. | TANGGAL | MATERI KULIAH | JML MHS HADIR | TANDA TANGAN DOSEN |
|-----|-----------|--|---------------|--------------------|
| 9. | 1-6-2023 | Model Thyristor dua Transisto, Struktur Dasar dan Rangkaian Ekuivalen | 2 | |
| 10. | 8-6-2023 | Membuat Transistor Off, dan tipe-tipe Transistor | 2 | |
| 11. | 15-6-2023 | Rangkaian Karakteristik , Turn Off Thyristor, Gerbang Turn off thyristor | 3 | |
| 12. | 22-6-2023 | FET Controlled Thyristor , MOS controller Thyristor | 3 | |
| 13 | 29-6-2023 | Thyristor di Operasikan Serial dan contoh soal | 1 | |
| 14. | 6-7-2023 | Transistor Unit Junction, Programable unit Junction Transistor | 2 | |
| 15. | 13-7-2023 | Prinsip operasi Konverter, Thyristor dan Penyearah Terkendali dan contoh soal. | 3 | |
| 16. | | UJIAN AKHIR SEMESTER (UAS) | | |

DOSEN PENGAJAR

(Ir. Sugianto, MT)

DAFTAR NILAI

SEMESTER GENAP REGULER TAHUN 2022/2023

Program Studi : Teknik Elektro S1

Matakuliah : Elektronika Daya

Kelas / Peserta : A

Perkuliahan : Semester Genap

: 2022-2023

Kampus ISTN Bumi Srengseng Indah

Poedji Oetomo,

ST.,MT/Ir.Sugianto,MT

Hal. 1/1

| No | NIM | N A M A | ABSEN | TUGAS | UTS | UAS | MODEL | PRESENTASI | NA | HURUF |
|----|----------|------------------------------|-------|-------|-----|-----|-------|------------|------|-----------|
| | | | 10% | 20% | 30% | 40% | 0% | 0% | | |
| 1 | 16220037 | Tirta Bayu Saputra | 79 | 60 | 68 | 67 | 0 | 0 | 67.1 | B- |
| 2 | 21220002 | Wahyu Octaviano | 93 | 70 | 78 | 75 | 0 | 0 | 76.7 | A- |
| 3 | 21220003 | Harry Toding Karurung | 100 | 70 | 82 | 70 | 0 | 0 | 76.6 | A- |

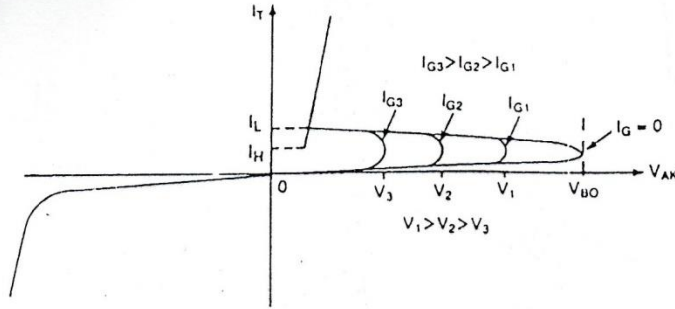
| Rekapitulasi Nilai | | | | | | | |
|--------------------|---|----|---|----|---|----|---|
| A | 0 | B+ | 0 | C+ | 0 | D+ | 0 |
| A- | 2 | B | 0 | C | 0 | D | 0 |
| | | B- | 1 | C- | 0 | E | 0 |

Jakarta,7 August 2023

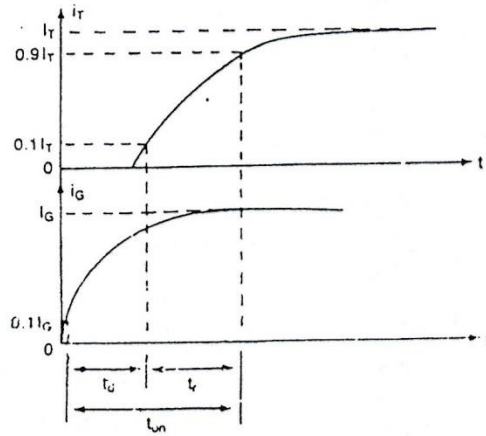
Dosen Pengajar



Ir.Sugianto,MT



Gambar 4-6 Efek arus gerbang pada tegangan maju blocking



Gambar 4-7 Karakteristik turn-on

thyristor keadaan tunak ($0,9I_T$). t_{on} adalah jumlah waktu tunda t_d dan waktu mulai t_r . t_d didefinisikan sebagai interval waktu antara 10% arus gerbang ($0,1I_G$) dan 10% arus keadaan on thyristor ($0,1I_T$). t_r adalah waktu yang diperlukan agar arus anode meningkat dari 10% arus keadaan on thyristor ($0,1I_T$) ke 90% arus keadaan on thyristor ($0,9I_T$). Semua waktu ini diperlihatkan pada Gambar 4-7.

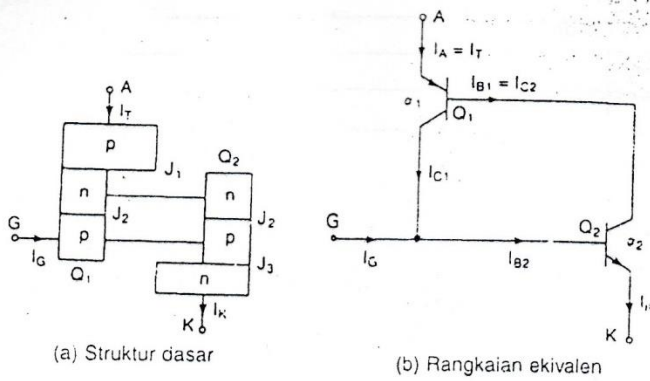
Beberapa hal berikut harus diperhatikan ketika merancang rangkaian kendali gerbang.

1. Sinyal gerbang harus dihilangkan setelah thyristor dihidupkan. Suatu sinyal penggerbangan kontinyu akan meningkatkan daya yang terbuang di sambungan gerbang.
2. Ketika thyristor pada kondisi reverse bias, tidak boleh ada sinyal gerbang; jika ada sinyal gerbang, thyristor akan rusak karena peningkatan arus bocor.
3. Lebar pulsa gerbang t_G harus lebih lama dari waktu yang diperlukan untuk arus anode meningkat ke nilai arus holding I_H . Secara praktis, lebar pulsa t_G biasanya diambil lebih dari waktu turn-on t_{on} dari thyristor.

Contoh 4-1

Kapasitansi dari sambungan J_2 yang di-reverse-bias pada thyristor adalah $C_{J2} = 20$ pF dan dapat diasumsikan bebas dari tegangan off-state. Nilai batas arus pengisiannya yang membuat thyristor on adalah 16 mA. Tentukan nilai kritis dari dv/dt .
Solusi $C_{J2} = 20$ pF dan $i_{J2} = 16$ mA. Karena $d(C_{J2})/dt = 0$, kita dapat tentukan nilai kritis dv/dt dari Persamaan (4-6):

$$\frac{dv}{dt} = \frac{i_{J2}}{C_{J2}} = \frac{16 \times 10^{-3}}{20 \times 10^{-12}} = 800 \text{ V}/\mu\text{s}$$



Gambar 4-3 Model thyristor dua transi

Arus kolektor I_C dari thyristor secara umum berkaitan dengan arus emiter I_E dan arus sambungan kolektor- I_{CBO} , sebagai

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \quad (4)$$

dan penguatan *arus common-base* yang didefinisikan sebagai $\alpha \cong I_C / I_E$. Untuk transistor Q_1 , arus emiter adalah anode I_A , dan arus kolektor I_{C1} dapat diperoleh dari Persamaan (4-1):

$$I_{C1} = \alpha_1 I_A + I_{CBO1} \quad (4)$$

dengan α_1 adalah penguatan arus dan I_{CBO1} adalah arus bocor dari Q_1 . Juga, untuk transistor Q_2 , arus kolektor adalah

$$I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{CBO2} \quad (4)$$

dengan α_2 adalah penguatan arus dan I_{CBO2} adalah arus bocor untuk Q_2 . Dengan mengkombinasikan I_{C1} dan diperoleh:

$$I_A = I_{C1} + I_{C2} = \alpha_1 I_A + I_{CBO1} + \alpha_2 I_K + I_{CBO2} \quad (4)$$

Tetapi untuk suatu arus penggerak $I_G, I_K = I_A + I_G$ dan dengan menggunakan Persamaan (4-4), diperoleh I_A sebagai

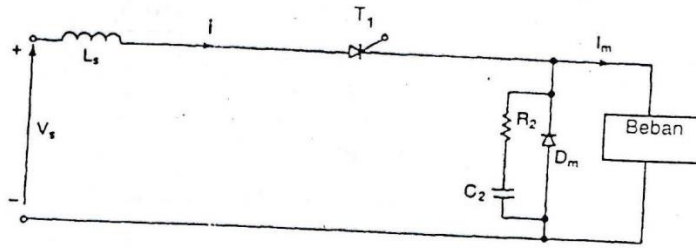
$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{CBO1} + I_{CBO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (4)$$

Penguatan arus α_1 bervariasi sesuai dengan $I_A = I_E$; dan α_2 bervariasi sesuai dengan $I_K = I_A + I_G$. Variasi umum penguatan arus α dengan arus emiter I_E diperlihatkan pada Gambar 4-4. Jika arus gerbang I_G tiba-tiba meningkat, misalnya dari 0 ke 1 mA, akan meningkatkan arus anode I_A secara tiba-tiba juga, selanjutnya α_1 dan akan meningkat. α_2 akan bergantung pada I_A dan I_G . Peningkatan nilai α_1 dan α_2 akan meningkatkan lebih jauh. Sehingga terjadi efek regenerasi atau balikan positif. Jika $(\alpha_1 + \alpha_2)$ cenderung akan menuju harga satu, penyelesaian Persamaan (4-5) akan cenderung mendekati nol, yang menghasilkan nilai besar arus anode I_A , dan thyristor akan dihidupkan dengan arus gerbang kecil.

Pada kondisi transien, kapasitansi dari sambungan *pn*, seperti pada Gambar 4-5, akan mempengaruhi karakteristik thyristor. Jika suatu thyristor berada pada keadaan blocking, peningkatan dengan cepat tegangan yang diberikan ke panjang devais akan mengakibatkan aliran arus yang besar ke sambungan kapasitor. Arus melalui kapasitor C_{j2} dapat dinyatakan sebagai

$$i_{j2} = \frac{d(q_{j2})}{dt} = \frac{d}{dt}(C_{j2} V_{j2}) = V_{j2} \frac{dC_{j2}}{dt} + C_{j2} \frac{dV_{j2}}{dt} \quad (4-6)$$

dengan C_{j2} dan V_{j2} adalah kapasitansi dan tegangan dari sambungan J_2 . q_{j2} adalah muatan pada sambungan tersebut. Jika kecepatan peningkatan tegangan dv/dt cukup besar, maka i_{j2} akan besar dan menghasilkan peningkatan arus bocor I_{CBO1} dan I_{CBO2} . Menurut Persamaan (4-5), nilai I_{CBO1} dan I_{CBO2} yang cukup besar dapat membuat $(\alpha_1 + \alpha_2)$ mendekati ke nilai satu dan mengakibatkan thyristor on. Namun, arus besar yang melewati kapasitor sambungan akan merusak devais.



Gambar 4-8 Rangkaian chopper dengan induktor pembatas di/dt

PROTEKSI di/dt

Suatu thyristor memerlukan waktu minimum untuk menyebarkan kondisi tersambung ke semua sambungannya secara merata. Jika peningkatan arus anode lebih cepat dibandingkan kecepatan penyebaran dari proses turn-on, titik-titik pemanasan akan terjadi pada devais karena adanya daerah-daerah dengan kepadatan arus yang tinggi dan devais akan rusak sebagai hasil dari suhu yang berlebihan.

Pada prakteknya, devais harus diproteksi terhadap di/dt yang tinggi. Sebagai contoh kita perhatikan Gambar 4-8. Pada keadaan tunak, D_m tersambung ketika thyristor T_1 off. Jika T_1 dihidupkan (fired) ketika D_m masih tersambung di/dt akan sangat tinggi dan terbatas hanya oleh induktansi stray dari rangkaian.

Dalam prakteknya, di/dt dibatasi dengan menambahkan suatu induktor seri L_s , seperti pada Gambar 4-8. di/dt forward akan

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_s}{L_s} \quad (4-7)$$

dengan L_s adalah induktansi seri yang mencakup sembarang induktansi stray.

PROTEKSI dv/dt

Jika saklar S_1 pada Gambar 4-9a tertutup pada $t = 0$, suatu tegangan step akan diberikan sepanjang thyristor T_1 dan dv/dt akan cukup tinggi untuk membuat devais on. dv/dt dapat dibatasi dengan menambahkan kapasitor C_s , seperti pada Gambar 4-9a. Ketika thyristor T_1 dihidupkan, arus pembuangan dari kapasitor dibatasi oleh resistor R_s seperti pada Gambar 4-9b.

Dengan rangkaian RC yang dikenal sebagai rangkaian snubber, tegangan pada thyristor akan meningkat secara eksponensial seperti pada Gambar 4-9c dan rangkaian dv/dt dapat diberikan secara pendekatan sebagai

$$\frac{dv}{dt} = \frac{0.632V_s}{\tau} = \frac{0.632V_s}{R_s C_s} \quad (4-8)$$

Nilai konstanta waktu rangkaian snubber $\tau = R_s C_s$ dapat ditentukan dari Persamaan (4-8) untuk nilai dv/dt yang diketahui. Nilai R_s diperoleh dari nilai arus pengosongan I_{TD}

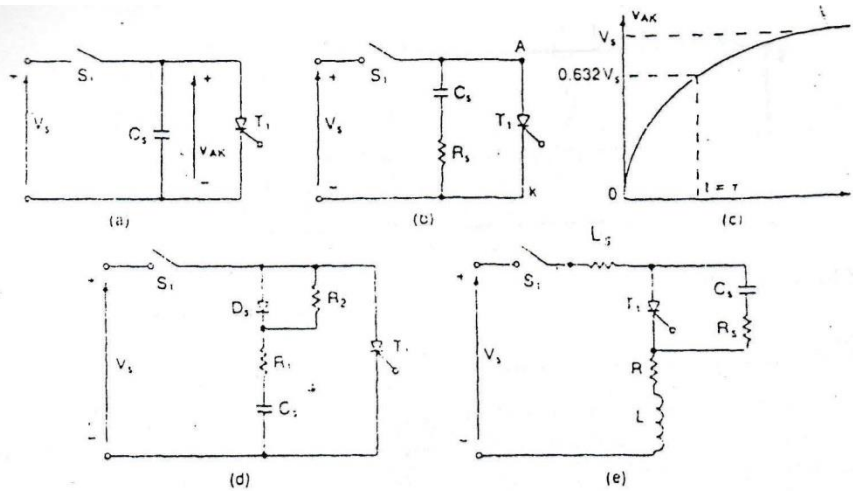
$$R_s = \frac{V_s}{I_{TD}} \quad (4-9)$$

Mungkin kita menggunakan lebih dari satu resistor untuk dv/dt dan pengosongan, seperti terlihat pada Gambar 4-9. Nilai dv/dt dibatasi oleh R_1 dan C_s . $(R_1 + R_2)$ membatasi arus pengosongan sehingga

$$I_{TD} = \frac{V_s}{R_1 + R_2} \quad (4-10)$$

Beban dapat membentuk rangkaian seri dengan rangkaian snubber seperti pada Gambar 4-9e. Dari Persamaan (3-2) dan (3-24), rasio redaman δ dari persamaan orde dua adalah

$$\delta = \frac{\alpha}{\omega_0} = \frac{R_s + R}{2} \sqrt{\frac{C_s}{L_s + L}} \quad (4-11)$$



Gambar 4-9 Rangkaian proteksi dv/dt .

dengan L_s adalah induktansi stray, L dan R adalah induktansi dan resistansi beban.

Untuk membatasi tegangan puncak overshoot yang terjadi sepanjang thyristor, rasio damping yang digunakan harus berada pada daerah 0,5 sampai dengan 1,0. Jika induktansi beban tinggi, R_s dapat dibuat tinggi dan C_s dapat dibuat kecil untuk membuat rasio damping berada pada daerah yang diinginkan. Nilai R_s yang tinggi akan mengurangi arus pengosongan, dan nilai C_s yang rendah akan mengurangi daya hilang pada rangkaian snubber. Rangkaian pada Gambar 4-9 harus secara keseluruhan dianalisis untuk menentukan nilai rasio damping yang dikehendaki untuk, membatasi dv/dt ke nilai yang diinginkan. Begitu rasio damping diketahui, R_s dan C_s dapat ditentukan. Rangkaian snubber RC yang sama biasanya digunakan baik untuk proteksi dv/dt maupun untuk menekan tegangan transien karena waktu pemulihan balik. Peredaman tegangan transien akan dianalisis pada Bagian 15.4.

Contoh 4-2

Tegangan masukan dari Gambar 4-9 adalah $V_s = 200$ V dengan resistansi beban $R = 5 \Omega$. Induktansi stray dan induktansi beban diabaikan dan thyristor beroperasi pada frekuensi $f_s = 2$ KHz. Jika diperlukan $dv/dt = 100$ V/ μ s dan arus pengosongan dibatasi hingga 100 A, tentukan (a) nilai R_s dan C_s , (b) daya hilang di rangkaian snubber, (c) rating daya dari resistor snubber.

Solusi $dv/dt = 100$ V/ μ s, $I_{T1} = 100$ A, $R = 5 \Omega$, $L = L_s = 0$, dan $V_s = 200$ V

(a). Dari Gambar 4-9e arus pengisian dari kapasitor snubber dapat diberikan sebagai

$$V_s = (R_s + R)i + \frac{1}{C_s} \int i dt + v_c(t=0)$$

Dengan kondisi awal $v_c(t=0) = 0$, arus pengisian dinyatakan dengan

$$i(t) = \frac{V_s}{R_s + R} e^{-t/\tau} \quad (4-12)$$

dengan $\tau = (R_s + R)C_s$. Tegangan forward sepanjang thyristor adalah

$$v_T(t) = V_s - \frac{RV_s}{R_s + R} e^{-t/\tau} \quad (4-13)$$

Pada $t = 0$, $v_T(0) = V_s - RV_s/(R_s + R)$ dan pada $t = \tau$, $v_T(\tau) = V_s - 0,368RV_s/(R_s + R)$:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{v_T(\tau) - v_T(0)}{\tau} = \frac{0,632RV}{C_s(R_s + R)^2} \quad (4-14)$$

Dari Persamaan (4-9), $R_s = V_s / I_{T(D)} = 200/100 = 2 \Omega$. Persamaan (4-14) memberikan

$$C_s = \frac{0,632 \times 5 \times 200 \times 10^{-6}}{(2 + 5)^2 \times 100} = 0,129 \mu\text{F}$$

(b) Daya hilang pada rangkaian snubber

$$P_s = 0,5 C_s V_s^2 f_s \\ = 0,5 \times 0,129 \times 10^{-6} \times 200^2 \times 2000 = 5,2 \text{ W} \quad (4-15)$$

(c) Dengan mengasumsikan semua energi yang tersimpan di C_s didisipasikan di R_s , rating daya resistor snubber adalah 5,2 W.

MEMBUAT THYRISTOR OFF

Thyristor yang berada dalam keadaan on dapat dimatikan dengan mengurangi arus maju ke tingkat di bawah arus holding I_H . Ada beberapa variasi teknik untuk membuat thyristor off, yang akan dibahas pada Bab 7. Pada semua teknik komutasi, arus anode dipertahankan di bawah arus holding cukup lama, sehingga semua kelebihan pembawa muatan pada keempat layer dapat dikeluarkan.

Akibat dua sambungan p_n , J_1 dan J_3 , karakteristik turn-off akan mirip dengan pada diode, berkaitan dengan waktu pemulihan reverse t_{rr} dan arus pemulihan reverse puncak I_{RR} . I_{RR} dapat lebih besar daripada arus bloking baik nominal, I_R . Pada rangkaian konverter line-commutated yang tegangan masukannya bersifat bolak-balik seperti pada Gambar 4-10a, tegangan balik muncul pada thyristor seketika setelah arus maju menuju ke nol. Tegangan balik ini akan mengakselerasi proses turn-off, dengan membuang semua kelebihan muatan dari sambungan p_n J_1 dan J_3 . Persamaan (2-6) dan (2-7) dapat diaplikasikan untuk menghitung t_{rr} dan I_{RR} .

Sambungan p_n dalam J_2 akan memerlukan waktu yang dikenal sebagai *recombination time* t_r , untuk merekombinasi kelebihan pembawa muatan, tegangan balik negatif akan dapat mengurangi waktu rekombinasi ini. t_r bergantung pada magnituda dari tegangan balik. Karakteristik turn-off diperlihatkan pada Gambar 4-10a dan b untuk rangkaian line-commutated dan forced-commutated.

Waktu turn-off t_q adalah jumlah dari reverse recovery time t_{rr} dan recombination time t_r . Pada akhir masa turn-off, lapisan depleksi terbentuk sepanjang sambungan J_2 dan thyristor memperoleh kembali kemampuan untuk tahan terhadap tegangan forward. Dalam semua teknik komutasi pada Bab 7, tegangan balik diterapkan pada thyristor selama proses turn-off.

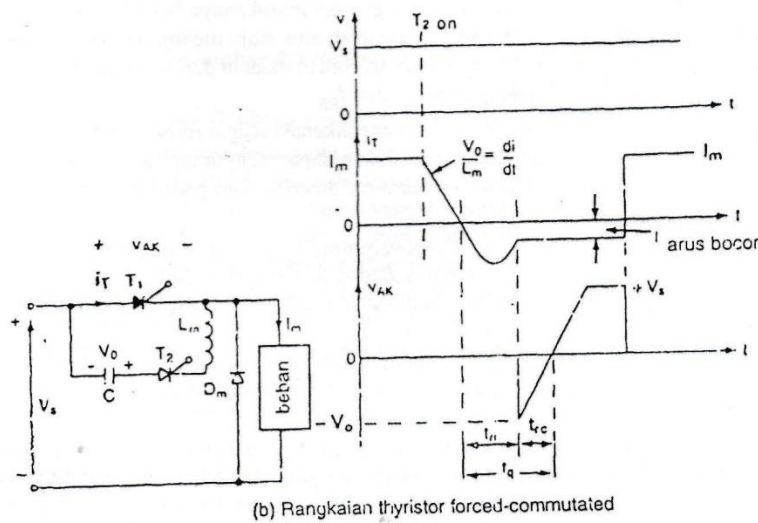
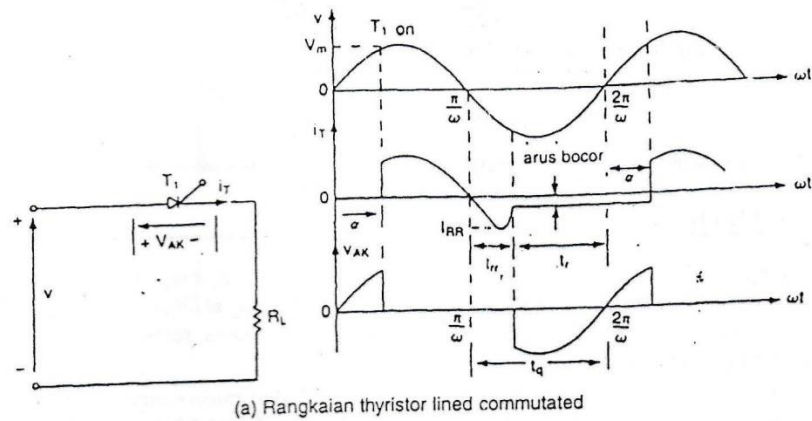
Waktu turn-off t_q merupakan interval waktu minimum ketika arus keadaan on berkurang menjadi nol dan ketika thyristor dapat menahan tegangan forward tanpa menjadi on. t_q bergantung pada nilai puncak dari arus keadaan on dan tegangan keadaan on sesaat.

Reverse recovered charge Q_{RR} adalah besar muatan yang harus dicukupi lagi selama proses turn-off. Nilainya ditentukan dari daerah yang dicakup oleh aliran arus pengisian balik. Nilai Q_{RR} bergantung pada kecepatan turun arus keadaan on dan nilai puncak arus keadaan on sebelum turn-off. Q_{RR} merupakan sebab dari kehilangan energi dalam devais.

IPE-TIPE THYRISTOR

Thyristor dibuat hampir seluruhnya dengan proses difusi. Arus anode memerlukan waktu tertentu untuk menyebar ke seluruh daerah dari sambungan tertentu, dari suatu titik dekat gerbang ketika sinyal gerbang yang diberikan untuk membuat thyristor on. Pabrik pembuat thyristor menggunakan banyak struktur gerbang untuk mengendalikan di/dt , waktu turn-on dan waktu turn-off. Tergantung pada konstruksi fisiknya, dan perilaku turn-on dan turn-off, thyristor dapat secara umum diklasifikasikan menjadi sembilan kategori:

1. Phase-control thyristor (SCR)
2. Fast-switching thyristor (SCR)
3. Gate-turn-off thyristor (GTO)
4. Bidirectional triode thyristor (TRIAC)
5. Reverse-conducting thyristor (RCT)
6. Static induction thyristor (SITH)
7. Light-activated silicon-controlled rectifier (LASCR)
8. FET-controlled thyristor (FET-CTH)
9. MOS-controlled thyristor (MCT)

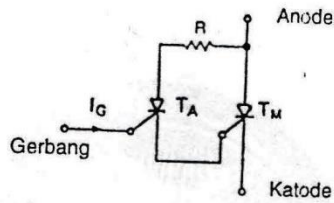


Gambar 4-10 Karakteristik turn-off

4-8.1 Phase-Control Thyristor (Thyristor kontrol fase).

Tipe thyristor ini secara umum beroperasi pada line-frequency dan dimatikan dengan komutasi natural. Turn off time t_{qf} berada dalam orde 50 sampai 100 μs . Devais ini sangat cocok untuk aplikasi pensaklaran kecepatan rendah dan biasa dikenal sebagai *thyristor konverter*. Karena thyristor sebenarnya devais yang dikontrol yang dibuat dari silikon akibatnya thyristor jenis ini dikenal sebagai *silicon-controlled rectifier (SCR)*.

Tegangan keadaan on, V_T , bervariasi di sekitar 1,15 V untuk devais 600 V hingga 2,5 V untuk device 4000 V; untuk thyristor 5500 A, 1200 V, sekitar 1,25 V. Thyristor modern biasanya menggunakan penguat gerbang, dengan thyristor auxiliary T_A memiliki gerbang yang merupakan gerbang thyristor keseluruhan dan keluaran T_A yang sudah diatikan itu diberikan sebagai sinyal gerbang untuk thyristor utama T_M . Hal ini terlihat seperti pada Gambar 4-10. Penguat gerbang menghasilkan karakteristik dinamik yang umum dv/dt sebesar 1000 V/ μs dan di/dt sebesar 500 A/ μs dan menyederhanakan perancangan rangkaian dengan mengurangi atau meminimisasi induktor pembatas di/dt rangkaian proteksi dv/dt .



Gambar 4-11 Thyristor penguat gerbang

4-8.2 Fast-Switching Thyristor

Biasanya thyristor ini digunakan pada penerapan teknologi pensaklaran kecepatan tinggi dengan forced-commutation (misalnya, chopper pada Bab 9 dan inverter pada Bab 10). Thyristor jenis ini memiliki waktu turn off yang cepat, umumnya dalam daerah 5 sampai 50 μs bergantung pada daerah tegangannya. Tegangan jatuh forward pada keadaan on bervariasi kira-kira seperti fungsi invers dari turn-off time t_q . Tipe thyristor ini juga dikenal sebagai *thyristor inversi*.

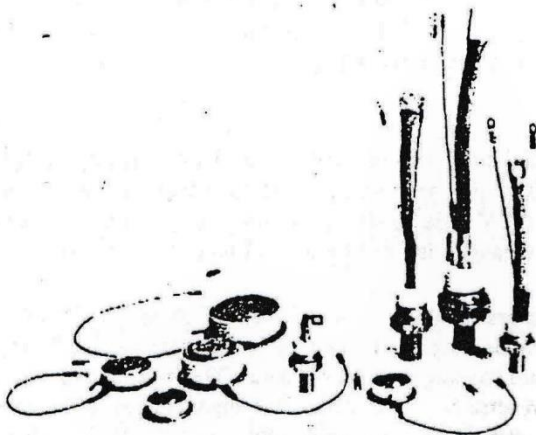
Thyristor ini memiliki dv/dt yang tinggi biasanya 1000 V/ μs dan di/dt sebesar 1000 A/ μs . Turn-off yang cepat dan di/dt yang tinggi akan sangat penting untuk mengurangi ukuran dan berat dari komponen rangkaian reaktif dan/atau commutating. Tegangan keadaan on dari thyristor 2200 A, 1800 V biasanya sekitar 1,7 V. Thyristor inverter dengan kemampuan reverse blocking sangat terbatas, kira-kira 10 V, dan waktu turn-off sangat cepat, sekitar 3 sampai 5 μs , biasa dikenal sebagai *asymmetrical thyristor* (ASCR). Fast-switching thyristor dalam berbagai ukuran diperlihatkan pada Gambar 4-12.

4-8.3 Gerbang-Turn-Off Thyristor

Gerbang-Turn-Off Thyristor (GTO) seperti SCR dapat dihidupkan dengan memberikan sinyal gerbang positif. Akan tetapi GTO dapat dimatikan dengan memberikan sinyal gerbang negatif. GTO juga merupakan devais latching dan dapat dibangun dengan rating arus dan tegangan yang mirip dengan SCR. GTO dihidupkan dengan memberikan sinyal pulsa pendek positif pada gerbang dan dimatikan dengan memberikan sinyal pulsa pendek negatif di gerbang. GTO memiliki beberapa keuntungan dibandingkan SCR: (1) eliminasi komponen commutating pada forced-commutation yang menghasilkan pengurangan biaya, berat dan volume; (2) pengurangan usikan akustik dan elektromagnetik karena hilangnya commutation chokes; (3) turn-off yang cepat, memungkinkan frekuensi pensaklaran yang tinggi; dan (4) meningkatkan efisiensi konverter.

Pada aplikasi daya rendah, GTO memiliki keuntungan-keuntungan dibandingkan bipolar transistor: (1) kemampuan blocking tegangan yang lebih tinggi; (2) rasio arus puncak yang dapat dikontrol dengan arus rata-rata yang tinggi; (3) rasio arus surge puncak terhadap arus rata-rata tinggi, umumnya 10 : 1; (4) penguatan keadaan on tinggi (arus anode/arus gerbang), umumnya 600; dan (5) durasi sinyal gerbang pulsa pendek. Pada kondisi surge, GTO cenderung akan masuk ke saturasi lebih dalam karena adanya aksi regeneratif. Sedangkan, bipolar transistor cenderung akan keluar dari keadaan saturasi.

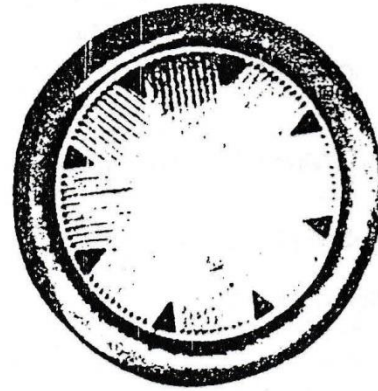
GTO memiliki penguatan rendah selama turn-off umumnya 6; dan memerlukan pulsa arus negatif yang relatif besar untuk turn-off. Tegangan jatuh saat or juga relatif lebih besar dibanding SCR. Tegangan keadaan on untuk rata-rata GTO 550 A, 1200 V besarnya 3,4 V. GTO tipe 160 PTF untuk 160 A, 200 V yang diberikan pada Gambar 4-13 dan sambungar dari GTO ini diberikan pada Gambar 4-14.



Gambar 4-12 Thyristor Fast-switching (atas izin dari Powerex, Inc.)



Gambar 4-13 GTO 160 A, 200 V (atas kebaikannya International Rectifier)



Gambar 4-14 Junction dari GTO 160 A pada Gambar 4-13 (atas kebaikannya International Rectifier)

Controllable peak on-state current I_{TGO} adalah nilai puncak dari arus keadaan on yang dapat dimatikan oleh kontrol gerbang, tegangan off-state diberikan seketika setelah turn-off dan dv/dt hanya akan dibatasi oleh kapasitansi snubber. Begitu GTO dimatikan, arus beban I_L , yang dialirkan melalui dan mengisi kapasitor snubber, menentukan dv/dt yang terjadi

$$\frac{dv}{dt} = \frac{I_L}{C_S}$$

dengan C_S adalah kapasitansi snubber.

4-8.4 Bidirectional Triode Thyristor

TRIAC dapat bersifat konduktif dalam dua arah dan biasanya digunakan untuk pengendalian fasa ac (contohnya: kontroler tegangan ac pada Bab 6). Hal tersebut dapat dianggap sebagai dua buah SCR tersambung secara antiparalel dengan koneksi gerbang seperti pada Gambar 4-15a. Karakteristik $v-i$ dari TRIAC diberikan pada Gambar 4-15c.

Karena TRIAC merupakan devais bidirectional, terminalnya tidak dapat ditentukan sebagai anode/katode. Jika terminal MT_2 positif terhadap terminal MT_1 , TRIAC dapat dimatikan dengan memberikan sinyal gerbang positif antara gerbang G dan MT_1 . Jika terminal MT_2 negatif terhadap MT_1 , maka TRIAC akan dapat dihidupkan dengan memberikan sinyal pulsa negatif antara gerbang G dan terminal MT_1 . Tidak perlu untuk memiliki kedua sinyal gerbang positif dan negatif dan TRIAC dapat dihidupkan baik oleh sinyal gerbang positif maupun negatif. Dalam prakteknya, sensitivitas bervariasi antara satu kuadran dengan kuadran lain, dan TRIAC biasanya beroperasi di kuadran I^+ (tegangan dan arus gerbang positif) atau kuadran III^- (tegangan dan arus gerbang negatif).

4-8.5 Reverse-Conducting Thyristor (RCT)

Pada banyak rangkaian chopper atau inverter, diode antiparalel dihubungkan sepanjang SCR untuk memperbolehkan aliran arus reverse karena beban induktif dan untuk meningkatkan kinerja saat turn-off dari rangkaian commutation. Diode memotong tegangan balik blocking dari SCR ke-1 atau 2 V pada kondisi tunak. Akan tetapi, pada kondisi transien, tegangan balik dapat meningkat hingga 30 V karena tegangan induksi pada rangkaian karena induktansi stray dalam devais.

Suatu RCT dapat dipandang sebagai suatu kompromi antara karakteristik devais dan kebutuhan dari rangkaian; RCT dapat dianggap sebagai suatu thyristor dengan built-in diode antiparalel seperti pada Gambar 4-16. RCT juga dikenal sebagai asymmetrical thyristor (ASCR). Tegangan forward blocking bervariasi antara 400 sampai dengan, 2000 V dan rating arus bergerak hingga 500 A. Tegangan blocking reverse biasanya sekitar 30 sampai dengan, 40 V. Karena rasio arus maju yang melalui thyristor terhadap arus reverse dari diode tetap untuk suatu devais, aplikasinya dibatasi oleh perancangan rangkaian tertentu.