

## **BAB I**

### **SEMIKONDUKTOR DAYA**

#### **KOMPETENSI DASAR**

Setelah mengikuti materi ini diharapkan mahasiswa memiliki kompetensi:

- Menguasai karakteristik semikonduktor daya yang dioperasikan sebagai pensakelaran, pengubah, dan pengatur.
- Menguasai dasar prinsip kerja rangkaian elektronika daya, antara lain: penyearah, konverter, AC regulator, chopper, dan inverter.

#### **STANDAR KOMPETENSI**

Mampu menerapkan prinsip dasar pensakelar elektronis dari komponen semikonduktor daya dalam rangkaian elektronika daya.

---

#### **A. Pendahuluan**

Rangkaian elektronika daya merupakan suatu rangkaian listrik yang dapat mengubah sumber daya listrik dari bentuk gelombang tertentu (seperti bentuk gelombang sinusoida) menjadi sumber daya listrik dengan bentuk gelombang lain (seperti gelombang nonsinusoida) dengan menggunakan piranti semikonduktor daya. Semikonduktor daya memiliki peran penting dalam rangkaian elektronika daya. Semikonduktor daya dalam rangkaian elektronika daya umumnya dioperasikan sebagai pensakelar (*switching*), pengubah (*converting*), dan pengatur (*controlling*) sesuai dengan unjuk kerja rangkaian elektronika daya yang diinginkan.

Penggunaan semikonduktor yang dioperasikan sebagai sakelar dalam suatu rangkaian elektronika memiliki keuntungan dapat

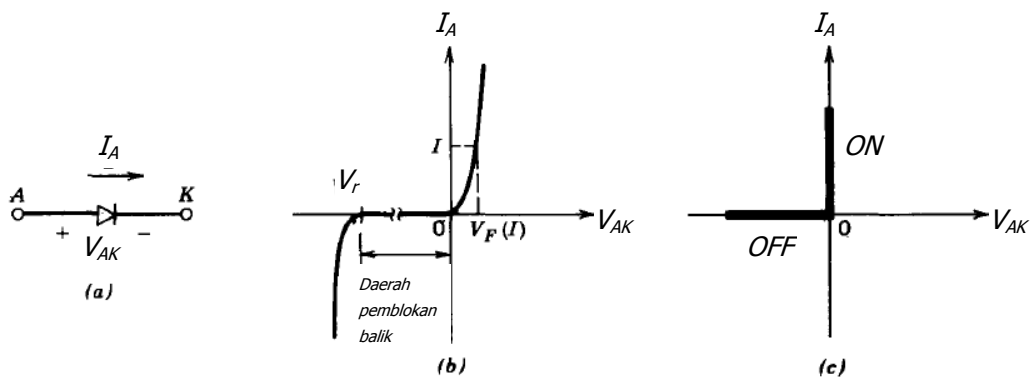
menaikkan efisiensi dan performansi rangkaian karena rugi daya yang terjadi relatif kecil. Seperti karakteristik sakelar pada umumnya, karakteristik semikonduktor daya yang dioperasikan sebagai sakelar memiliki dua keadaan, yaitu: kondisi 'ON' dan kondisi 'OFF'. Hal ini berarti, rangkaian dalam keadaan 'tertutup' atau 'terbuka'. Dalam kondisi ideal, semikonduktor daya yang dioperasikan sebagai sakelar hanya menyerap daya yang relatif kecil baik saat kondisi 'ON' maupun 'OFF' atau bahkan dalam kondisi tertentu daya yang diserap dapat diabaikan (nol). Keuntungan lain dari proses pensakelaran ini dapat dilakukan sekaligus proses pengubahan atau proses pengaturan. Karena keistimewaan inilah semikonduktor daya banyak digunakan dalam pengaturan daya listrik.

Aplikasi rangkaian elektronika biasanya digunakan pada peralatan konversi daya listrik yang besar; seperti : transmisi daya listrik, pengaturan motor listrik secara elektronis di industri; hingga peralatan listrik keperluan sehari-hari dengan daya yang rendah. Pengaturan lampu (*dimmer*) dan *Uninterruptable Power Supply* (UPS) merupakan contoh aplikasi rangkaian elektronika daya yang sering dijumpai dalam pemakaian sehari-hari. Di samping itu, rangkaian elektronika daya dapat mengubah beberapa bentuk rangkaian listrik pengubah, antara lain: rangkaian listrik yang mengubah sumber listrik arus bolak-balik (*alternating current – AC*) menjadi sumber listrik arus searah (*direct current – DC*), mengubah sumber listrik arus searah (*direct current – DC*) menjadi sumber listrik arus bolak-balik (*alternating current – AC*), mengubah tegangan DC tetap menjadi tegangan DC yang dapat diatur, dan mengubah sumber AC dengan frekuensi tertentu menjadi sumber AC dengan frekuensi baru. Uraian tentang rangkaian listrik pengubah ini akan dijelaskan secara lengkap dalam bab selanjutnya.

## B. KARAKTERISTIK SEMIKONDUKTOR DAYA

### 1. Dioda

Dioda merupakan semikonduktor (komponen) elektronika daya yang memiliki dua terminal, yaitu: anoda dan katoda. Dalam rangkaian elektronika daya, dioda difungsikan sebagai sakelar. Gambar 1.1 (a), (b), dan (c) masing-masing ditunjukkan simbol dioda, karakteristik diode, karakteristik ideal dioda jika dioperasikan sebagai sakelar. Sebagai sakelar, sebagaimana Gambar 1 (c), dioda akan konduksi (*ON*) jika potensial pada anode lebih positif daripada potensial pada katoda, dan dioda akan memblok (*OFF*) jika potensial pada anoda lebih negatif daripada potensial pada katoda.



Gambar 1.1 Diode: (a) simbol diode, (b) karakteristik diode, (c) karakteristik ideal diode sebagai sakelar

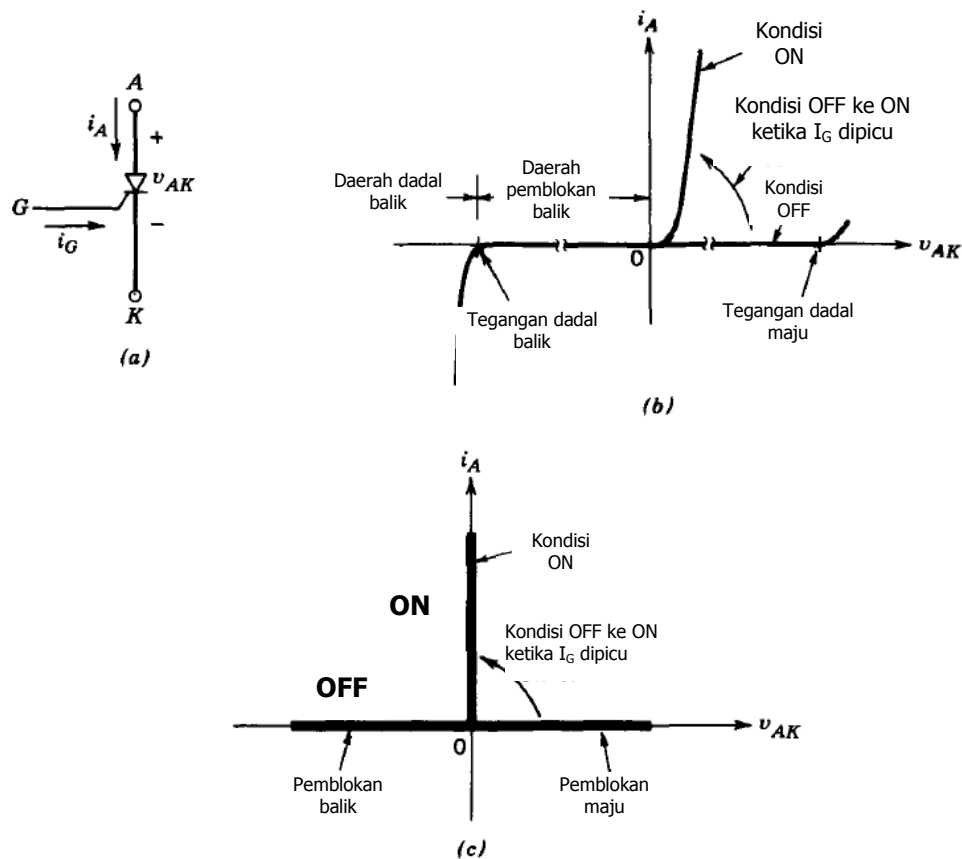
Jika diode dalam kondisi ideal, ketika dioda dalam kondisi ON memiliki karakteristik tegangan pada dioda sama dengan nol dan arus yang mengalir pada diode sama dengan arus bebannya. Sebaliknya, dioda dalam kondisi OFF memiliki karakteristik tegangan pada dioda sama dengan tegangan sumbernya dan arus yang mengalir sama dengan nol. Dalam kondisi dioda ON dan OFF ini dapat dinyatakan tidak terjadi kerugian daya pada dioda.

## 2. Thyristor

Semikonduktor daya yang termasuk dalam keluarga thyristor ini, antara lain : SCR (*silicon-controlled rectifier*), GTO (*gate turn-off thyristor*), dan TRIAC. SCR banyak digunakan dalam rangkaian elektronika daya. SCR memiliki tiga terminal, yaitu anoda, katoda, dan *gate*. SCR dapat digunakan dengan sumber masukan dalam bentuk tegangan bolak-balik (AC) maupun tegangan searah (DC). SCR dalam rangkaian elektronika daya dioperasikan sebagai sakelar. Gambar 1.2 (a), (b), dan (c) masing-masing ditunjukkan simbol SCR, karakteristik SCR, karakteristik ideal SCR jika dioperasikan sebagai sakelar.

Jika sumber tegangan masukan yang digunakan tegangan searah, SCR akan konduksi (ON) jika potensial pada anoda lebih positif daripada potensial pada katoda dan pada terminal *gate* dialirkan arus pulsa positif. Kondisi ON SCR ini ditentukan oleh besar arus pulsa positif pada *gate*. Tetapi, SCR akan terus ON meskipun arus pulsa pada *gate* diputus. SCR akan putus (OFF) dengan cara membuat potensial pada anoda sama dengan katoda. Proses pengaliran arus listrik pada terminal *gate* ini disebut penyulutan/ pemicu (*triggering*), sedangkan proses pemutusan (OFF) dari kondisi ON ini disebut komutasi (*commutation*).

Selanjutnya, jika sumber tegangan masukan yang digunakan tegangan bolak-balik, SCR akan ON ketika tegangan bolak-balik pada polaritas positif dan akan OFF pada polaritas negatif, tetapi pada terminal *gate* harus selalu dialirkan arus pulsa positif. Berbeda dengan karakteristik sebelumnya, SCR akan OFF ketika arus pulsa pada *gate* diputus. Hal ini berarti, arus pulsa pada *gate* harus selalu dihubungkan dengan terminal *gate* agar rangkaian dapat bekerja sebagaimana yang diharapkan.



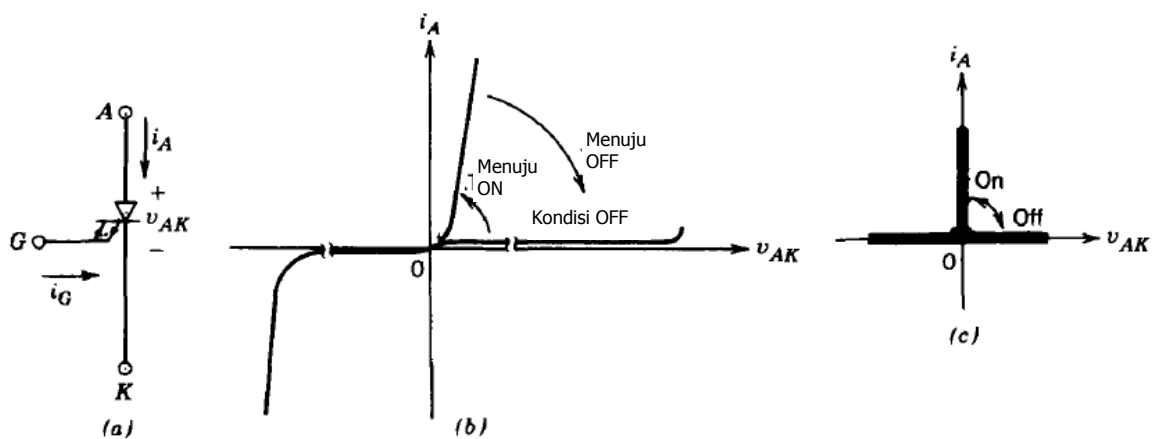
Gambar 1.2 SCR: (a) simbol SCR, (b) karakteristik SCR, (c) karakteristik ideal SCR sebagai sakelar

Jika SCR dalam kondisi ideal, ketika SCR dalam kondisi ON memiliki karakteristik tegangan pada SCR sama dengan nol dan arus yang mengalir sama dengan arus bebannya. Sebaliknya, SCR dalam kondisi OFF memiliki karakteristik tegangan pada SCR sama dengan tegangan sumbernya dan arus yang mengalir sama dengan nol. Dalam kondisi SCR ON dan OFF ini dapat dinyatakan tidak terjadi kerugian daya pada SCR.

### 3. Gate Turn-off (GTO) Thyristor

GTO merupakan komponen elektronika daya yang memiliki tiga terminal, yaitu: anoda, katoda, dan gerbang (*gate*). Semikonduktor daya ini termasuk dalam keluarga thyristor. Dalam rangkaian

elektronika daya, GTO dioperasikan sebagai sakelar. Gambar 1.3 (a), (b), dan (c) masing-masing ditunjukkan simbol GTO, karakteristik GTO, karakteristik ideal GTO jika dioperasikan sebagai sakelar. Seperti SCR, GTO akan konduksi (ON) jika potensial pada anoda lebih positif daripada potensial pada katoda dan pada terminal gerbang dialirkan pulsa arus positif dan akan terus ON. GTO akan OFF jika terminal gerbang dan katoda diberi tegangan yang lebih negatif atau dialiri pulsa arus negatif.

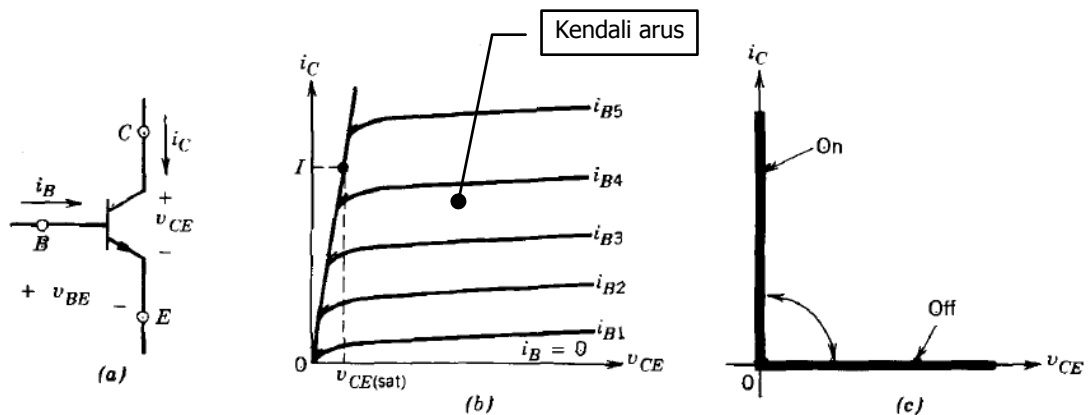


Gambar 1.3 GTO: (a) simbol GTO, (b) karakteristik GTO, (c) karakteristik ideal SCR sebagai sakelar

#### 4. Transistor

Transistor merupakan komponen elektronika daya yang memiliki tiga terminal, yaitu: basis, emitor, dan kolektor. Dalam rangkaian elektronika daya, transistor umumnya dioperasikan sebagai sakelar dengan konfigurasi emitor-bersama. Transistor bekerja atas dasar prinsip kendali-arus (*current driven*). Gambar 1.4 (a), (b), dan (c) masing-masing ditunjukkan simbol transistor, karakteristik transistor, dan karakteristik ideal transistor sebagai sakelar. Transistor dengan jenis NPN akan ON jika pada terminal kolektor-emitor diberi panjar

(*bias*) dan pada basis memiliki potensial lebih positif daripada emitor dan memiliki arus basis yang mampu mengendalikan transistor pada daerah jenuh. Sebaliknya, transistor akan OFF jika arus basis dikurangi hingga pada kolektor tidak dapat mengalirkan arus listrik.



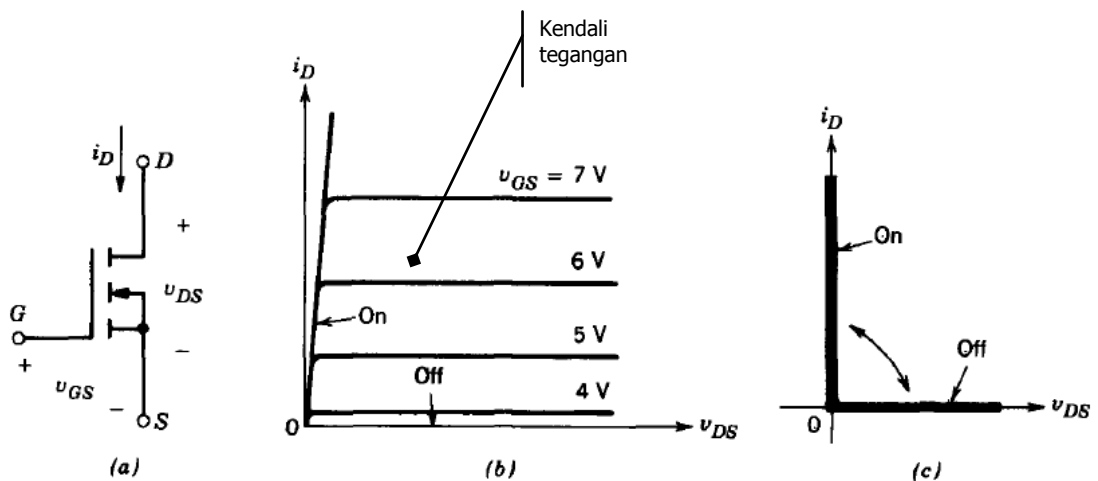
Gambar 1.4 Transistor: (a) simbol transistor, (b) karakteristik transistor, (c) karakteristik ideal transistor sebagai sakelar

Jika transistor dalam kondisi ideal, ketika transistor dalam kondisi ON memiliki karakteristik tegangan pada terminal emitor dan kolektor ( $V_{CE}$ ) sama dengan nol dan arus yang mengalir sama dengan arus bebannya. Sebaliknya, ketika transistor dalam kondisi OFF memiliki karakteristik tegangan pada transistor sama dengan tegangan sumbernya ( $V_{CC}$ ) dan arus yang mengalir sama dengan nol. Dalam kondisi transistor ON dan OFF ini dapat dinyatakan tidak terjadi kerugian daya pada transistor sebagai sakelar.

## 5. MOSFET

MOSFET merupakan komponen semikonduktor daya yang memiliki tiga terminal, yaitu: gerbang, sumber (*source*), dan pengalir (*drain*). MOSFET bekerja atas dasar prinsip kendali-tegangan (*voltage-driven*). Gambar 1.5 (a), (b), dan (c) masing-masing ditunjukkan simbol

MOSFET, karakteristik MOSFET, dan karakteristik ideal MOSFET sebagai sakelar. Rangkaian pengaturan ON dan OFF dengan piranti MOSFET lebih mudah dibandingkan piranti transistor. Jika pada terminal gerbang-sumber dicatu tegangan yang cukup besar maka piranti akan ON, sehingga menghasilkan tegangan yang kecil antara terminal pengalir-sumber. Dalam kondisi ON, perubahan tegangan pada terminal pengalir-sumber berbanding lurus dengan arus pada terminal pengalirnya. Jadi, terminal pengalir-sumber memiliki resistansi sangat kecil pada saat kondisi ON.



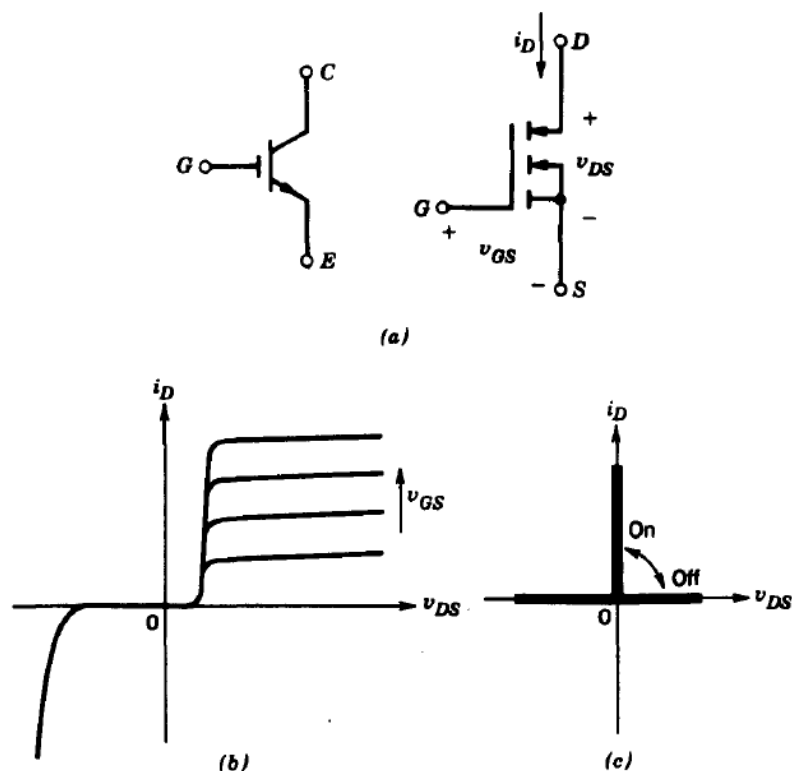
Gambar 1.5 MOSFET: (a) simbol MOSFET, (b) karakteristik MOSFET, (c) karakteristik ideal MOSFET sebagai sakelar

Jika MOSFET dalam kondisi ideal, ketika MOSFET dalam kondisi ON memiliki karakteristik tegangan pada terminal pengalir dan sumber ( $V_{DS}$ ) sama dengan nol dan arus yang mengalir sama dengan arus bebannya. Sebaliknya, ketika MOSFET dalam kondisi OFF memiliki karakteristik tegangan pada MOSFET sama dengan tegangan sumbernya ( $V_{DD}$ ) dan arus yang mengalir sama dengan nol. Dalam kondisi MOSFET ON dan OFF ini dapat dinyatakan tidak terjadi kerugian daya pada MOSFET sebagai sakelar.



## 6. Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)

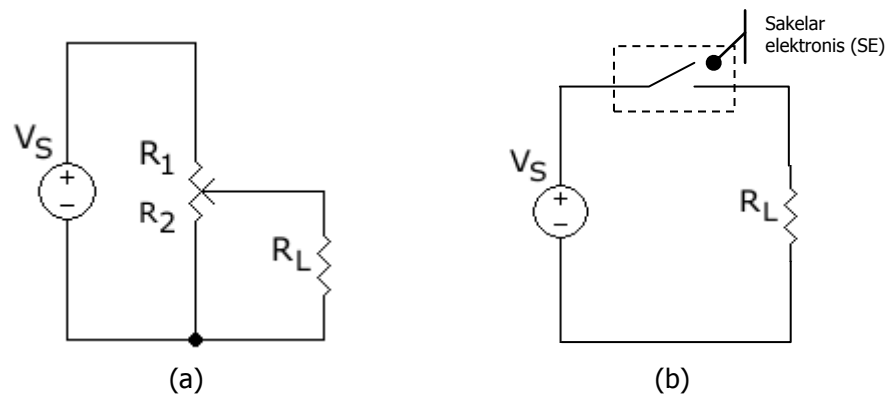
IGBT merupakan komponen elektronika daya yang memiliki karakteristik gabungan antara MOSFET, transistor, dan GTO. Seperti MOSFET, IGBT memiliki impedansi gerbang yang tinggi sehingga hanya memerlukan arus yang kecil untuk mengaktifkannya. Serupa dengan transistor, IGBT memiliki tegangan kondisi-ON yang kecil meskipun komponen ini mempunyai rating tegangan yang besar dan mampu memblok tegangan negatif seperti halnya GTO. Gambar 1.6 (a), (b), dan (c) masing-masing ditunjukkan simbol IGBT, karakteristik IGBT, dan karakteristik ideal IGBT sebagai sakelar. Seperti halnya semikonduktor daya di muka, IGBT dalam kondisi ON dan OFF tidak terjadi kerugian daya pada IGBT sebagai sakelar.



Gambar 1.6 IGBT: (a) simbol IGBT, (b) karakteristik IGBT, (c) karakteristik ideal IGBT sebagai sakelar

### C. PRINSIP DASAR RANGKAIAN ELEKTRONIKA DAYA

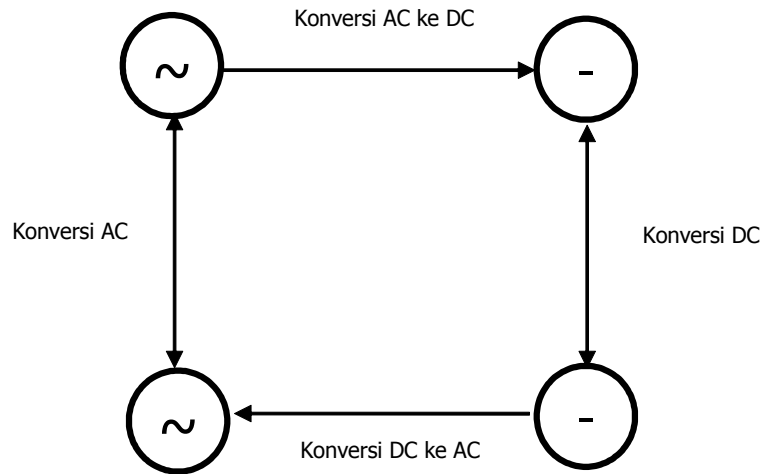
Pengaturan daya listrik dapat dilakukan dengan cara melakukan konversi bentuk gelombang besaran tertentu menjadi bentuk lain dengan menggunakan suatu rangkaian elektronika dengan prinsip kerja yang memanfaatkan karakteristik pensakelaran dari piranti semikonduktor daya sebagai diuraikan di muka. Esensi dasar rangkaian elektronika daya dapat dijelaskan melalui Gambar 1.7 (a) dan (b). Gambar 1.7 (a) merupakan pengaturan sumber tegangan  $V_S$  menjadi sumber tegangan luaran ( $V_{RL}$ ) pada beban  $R_L$  yang nilainya ditentukan oleh pengaturan potensiometer, dimana nilai tegangan  $V_{RL}$  akan selalu lebih kecil atau maksimum sama dengan tegangan  $V_S$ . Pengaturan tegangan dengan menggunakan potensiometer ini, terdapat rugi daya pada potensiometer sebesar  $I^2 (R_1 + R_2)$ . Dalam konsep rangkaian elektronika daya, rugi daya tersebut harus ditiadakan atau dirancang tidak ada rugi daya dalam rangkaian. Untuk keperluan tersebut, potensiometer diganti dengan prinsip pensakelaran elektronis (*electronic switching*). Prinsip pensakelaran elektronis merupakan dasar dari operasi suatu rangkaian elektronika daya seperti ditunjukkan pada Gambar 1.7 (b). Komponen semikonduktor daya sebagaimana dijelaskan di muka umumnya digunakan sebagai sakelar elektronis ini. Dari Gambar 1.7 (b) dapat dijelaskan bahwa saat sakelar elektronis (SE) kondisi ON dan OFF tidak terjadi rugi daya pada SE, karena saat ON tegangan pada SE sama dengan nol dan arus yang mengalir pada SE sama dengan arus pada beban  $R_L$ . Sebaliknya, saat OFF tegangan pada SE sama dengan sumber  $V_S$  tetapi arus yang mengalir pada SE sama dengan nol sehingga rugi daya sama dengan nol.



Gambar 1.7 Prinsip Dasar Rangkaian Elektronika Daya

Berbagai konversi daya dapat dilakukan dengan rangkaian elektronika daya. Fungsi dasar dari konversi daya listrik dengan piranti semikonduktor daya dapat ditunjukkan dengan Gambar 1.8. Dengan acuan konversi daya tersebut, rangkaian elektronika daya dapat diklasifikasikan dalam lima jenis, yaitu :

1. Penyearah tak-terkendali, yakni suatu rangkaian yang mengubah tegangan arus bolak-balik (AC) menjadi tegangan arus searah (DC) tetap/ diatur.
2. Penyearah terkendali (konverter AC-DC), yakni suatu rangkaian yang mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC yang dapat dikendalikan/ diatur.
3. Pengatur tegangan arus bolak-balik (konverter AC-AC), yakni suatu rangkaian yang dapat mengubah tegangan AC tetap menjadi tegangan AC yang dapat dikendalikan/ diatur.
4. Pemangkas arus searah (chopper DC), yakni suatu rangkaian yang digunakan untuk mengubah sumber tegangan DC tetap menjadi sumber tegangan DC yang dapat dikendalikan/diatur.
5. Inverter (konverter DC-AC), yakni suatu rangkaian yang digunakan untuk mengubah sumber tegangan DC tetap menjadi sumber tegangan AC yang dapat dikendalikan/diatur.



Gambar 1.8 Bentuk Konversi Daya Listrik dengan Piranti Semikonduktor Daya

#### D. PERTANYAAN

1. Apakah elektronika daya itu ?
2. Jelaskan prinsip kerja dioda, SCR, transistor, MOSFET sebagai sakelar !
3. Jelaskan perbedaan karakteristik penyulutan pada SCR dan transistor !
4. Jelaskan perbedaan karakteristik penyulutan pada transistor dan MOSFET !
5. Jelaskan prinsip kerja rangkaian pemangkas arus searah !

## **BAB II**

### **PENYEARAH DAYA**

#### **KOMPETENSI DASAR**

Setelah mengikuti materi ini diharapkan mahasiswa memiliki kompetensi:

- Menguasai karakteristik penyearah setengah-gelombang dan gelombang-penuh satu fasa dan tiga fasa
- Menguasai dasar prinsip kerja penyearah setengah-gelombang dan gelombang-penuh satu fasa dan tiga fasa

#### **STANDAR KOMPETENSI**

Mampu menganalisis rangkaian penyearah setengah-gelombang dan gelombang-penuh satu fasa dan tiga fasa

---

#### **A. PENDAHULUAN**

Penyearah daya merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah tegangan sumber masukan arus bolak-balik dalam bentuk sinusoida menjadi tegangan luaran dalam bentuk tegangan searah yang tetap. Jenis sumber tegangan masukan untuk mencatu rangkaian penyearah daya dapat digunakan tegangan bolak-balik satu fasa dan tiga fasa. Penyearah satu fasa merupakan rangkaian penyearah daya dengan sumber masukan tegangan bolak-balik satu fasa, sedangkan penyearah tiga fasa rangkaian penyearah daya dengan sumber masukan tegangan bolak-balik tiga fasa. Rangkaian penyearahan dapat dilakukan dalam bentuk penyearah setengah gelombang (*halfwave*) dan penyearah gelombang-penuh (*fullwave*). Pembebanan pada rangkaian penyearah daya umumnya dipasang beban resistif atau beban resistif-induktif. Efek dari pembebanan ini

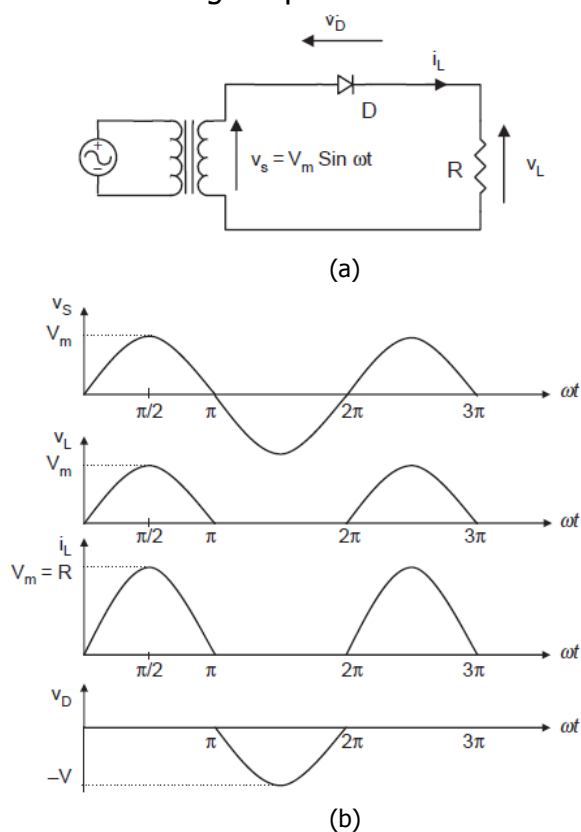
akan mempengaruhi kualitas tegangan luaran yang dihasilkan dari rangkaian penyearah.

## A. PENYEARAH SATU-FASA

### 1. PENYEARAH SETENGAH-GELOMBANG SATU-FASA

#### a. Beban Resistif (R)

Gambar 2.1 (a) merupakan rangkaian penyearah setengah-gelombang satu-fasa dengan beban resistif, sedangkan Gambar 2.1 (b) menunjukkan bentuk gelombang hasil penyearahan. Proses penyearahan dapat dijelaskan melalui Gambar 2.1 (a) dan (b), pada setengah siklus pertama dengan polaritas positif, dioda pada rangkaian penyearah akan ON karena polaritas tegangan pada anoda lebih positif dibandingkan pada katoda.



Pada proses ini menghasilkan tegangan luaran ( $V_L$ ) sebesar tegangan setengah perioda pertama ( $V_m$ ). Selanjutnya, pada setengah siklus kedua dengan polaritas negatif, dioda pada rangkaian penyearah akan OFF karena polaritas tegangan pada anoda lebih negatif dibandingkan pada katoda. Pada proses ini menghasilkan tegangan luaran sama dengan nol. Proses ON dan OFF dioda ini berlangsung secara cepat berdasarkan frekuensi tegangan sumber masukan.

Gambar 2.1 Penyearah Setengah-Gelombang Satu-fasa Beban R

Di sini, dioda berfungsi sebagai sakelar sekaligus melakukan pengubahan (*converting*) dari sumber bolak-balik menjadi tegangan searah. Ditinjau dari tegangan luaran ( $V_L$ ) yang dihasilkan, terdapat dua jenis komponen tegangan, yaitu : (1) tegangan searah rerata ( $V_{dc}$ ) dan tegangan searah efektif (*root mean square-rms*),  $V_L$ . Nilai tegangan luaran masing-masing adalah :

Tegangan masukan (*input*),  $V_s$ .  $V_s = V_m \sin \omega t = V_{MAX} \sin \omega t$

Tegangan luaran (*output*) rerata,  $V_{dc}$  dan arus luaran rerata,  $I_{dc}$  :

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} = 0.318 V_m \qquad I_{dc} = \frac{0.318 V_m}{R}$$

Tegangan luaran (*output*) efektif,  $V_L$  dan Arus luaran efektif,  $I_L$  :

$$V_L = \frac{V_m}{2} = 0.5 V_m \qquad I_L = \frac{0.5 V_m}{R}$$

Dengan demikian, daya luaran rerata ( $P_{dc}$ ) dan daya luaran efektif ( $P_L$ ) adalah:

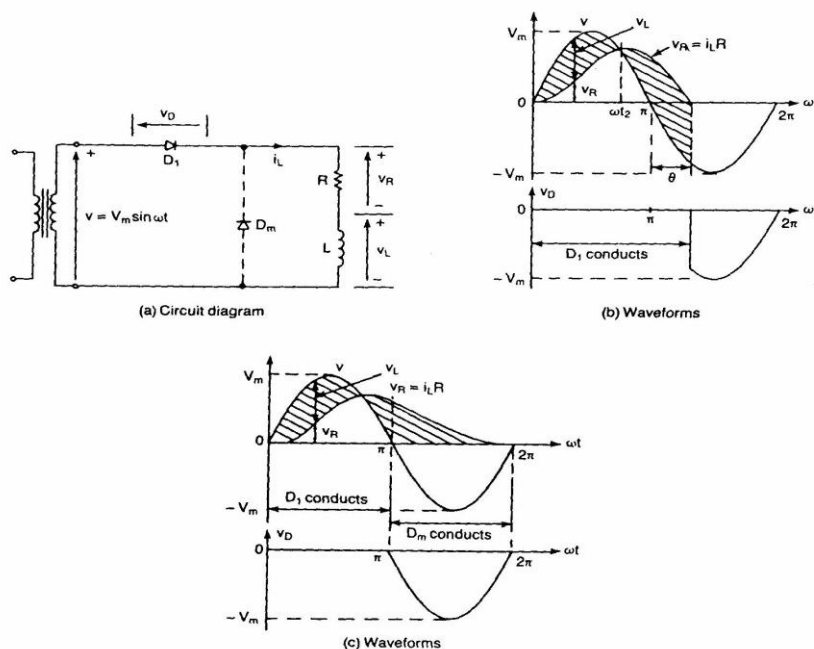
$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc} \qquad P_L = V_L I_L$$

Jika arus efektif sumber masukan ( $I_s$ ) sama dengan arus efektif luaran ( $I_L$ ), maka faktor daya penyearahan yang diakibatkan proses penyearah ini sebesar :

$$\cos \varphi = \frac{V_L I_L}{V_s I_L}$$

## b. Beban Resistif-Induktif (RL)

Gambar 2.2 (a) merupakan rangkaian penyearah setengah-gelombang satu-fasa dengan beban resistif-induktif (RL), sedangkan Gambar 2.2 (b) dan (c) menunjukkan bentuk gelombang hasil penyearahan. Proses penyearahan dapat dijelaskan melalui Gambar 2.2 (a), (b) dan (c), pada setengah siklus pertama dengan polaritas positif, dioda pada rangkaian penyearah akan ON karena polaritas tegangan pada anoda lebih positif dibandingkan pada katoda. Tetapi, karena pengaruh tegangan yang tersimpan pada induktor (L) maka dioda terus ON sampai waktu tertentu ( $\beta$ ). Akibatnya, waktu konduksi dioda menjadi lebih lama ( $\pi + \theta$ ). Selanjutnya, pada setengah siklus kedua dengan polaritas negatif yang dimulai dari  $\beta$ , dioda pada rangkaian penyearah akan OFF karena polaritas tegangan pada anoda lebih negatif dibandingkan pada katoda. Pada proses ini menghasilkan tegangan luaran sama dengan nol.



Gambar 2.2 Penyearah Setengah-Gelombang Satu Fasa dengan Beban RL



Nilai komponen tegangan luaran ( $V_{dc}$ ) dan arus searah (dc) ditentukan sebagai berikut :

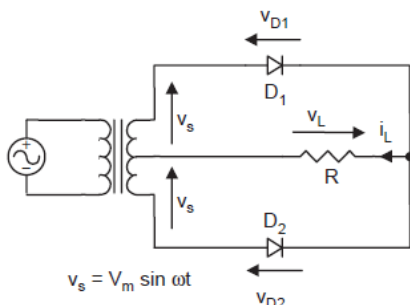
$$V_{dc} = \frac{V_m}{2\pi} [1 - \cos(\pi + \theta)] = \frac{V_m}{2\pi} (1 - \cos \beta)$$

dimana :  $\theta = (\beta - \pi)$ , dan  $\theta \approx \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$

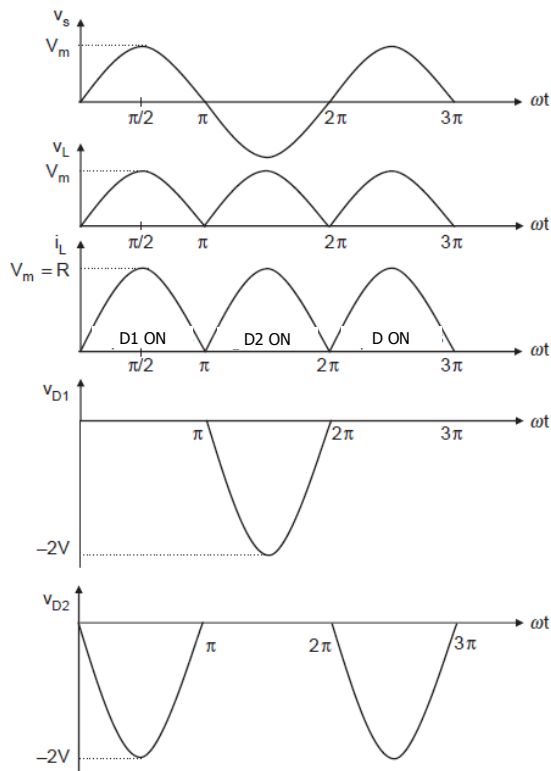
Dari persamaan di atas dapat diketahui bahwa sudut konduksi diode ( $\delta$ ) melebihi  $\pi$  sampai titik pemadaman ( $\beta$ ). Tegangan luaran,  $V_o$ , dapat mencapai maksimum jika  $\theta = 0$ . Keadaan ini dapat dilakukan dengan cara menambah diode komutasi (*freewheeling diode*) yang dipasang paralel dengan beban RL, sehingga nilai tegangan luaran seperti penyearah setengah-gelombang satu fasa beban R.

## 2. PENYEARAH GELOMBANG-PENUH SATU-FASA

Ada 2 (dua) jenis rangkaian penyearah gelombang penuh satu-fasa, yaitu: penyearah titik tengah (*center tap* - CT) dan penyearah jembatan. Gambar 2.3 (a) merupakan rangkaian penyearah CT dan Gambar 2.4 (b) rangkaian penyearah jembatan.



Gambar 2.3 (a) merupakan rangkaian penyearah gelombang-penuh satu fasa CT dengan beban R. Pada sisi sekunder trafo, polaritas positif terjadi pada setengah periode pertama dan kedua, sehingga dioda  $D_1$  akan ON saat setengah periode pertama sedangkan dioda  $D_2$  akan OFF. Sebaliknya, pada setengah periode kedua dioda  $D_2$  akan ON sedangkan

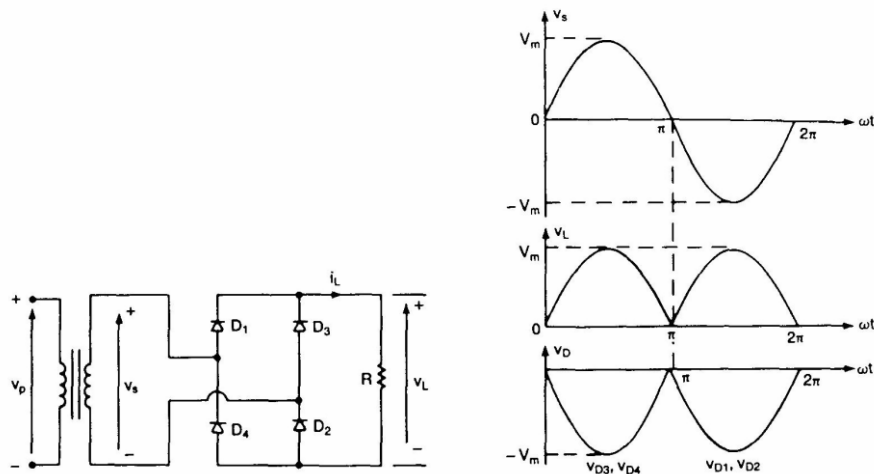


Gambar 2.3 (a)  
Penyearah Gelombang-penuh  
Satu Fasa dengan CT

dioda  $D_1$  akan OFF. Tegangan luaran searah dihasilkan ketika dioda  $D_1$  dan  $D_2$  ON yang memiliki nilai tegangan searah rerata ( $V_{dc}$ ) dan tegangan efektif ( $V_L$ ). Tetapi, ketika dioda  $D_1$  dan  $D_2$  OFF, nilai tegangan pada dioda  $D_1$  dan  $D_2$  sebesar  $-2 V_m$ .

Gambar 2.3 (b) merupakan rangkaian penyearah gelombang-penuh satu fasa jembatan dengan beban  $R$ . Jumlah dioda dalam rangkaian penyearah ini sebanyak empat buah, yaitu:  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ , dan  $D_4$ . Pada setengah siklus pertama dengan polaritas positif, dioda  $D_1$  dan  $D_2$  pada rangkaian penyearah akan ON sedangkan dioda  $D_3$  dan  $D_4$  dalam kondisi OFF.

Selanjutnya, pada setengah siklus kedua dengan polaritas negatif, dioda  $D_3$  dan  $D_4$  pada rangkaian penyearah akan ON sedangkan  $D_1$  dan  $D_2$  dalam kondisi OFF. Tegangan luaran searah dihasilkan ketika dioda  $D_1$  dan  $D_2$ , serta  $D_3$  dan  $D_4$  dalam kondisi ON yang memiliki nilai tegangan searah rerata dan efektif. Tetapi, ketika dioda  $D_1$  dan  $D_2$ , serta  $D_3$  dan  $D_4$  dalam kondisi OFF, nilai tegangan pada dioda  $D_1$  dan  $D_2$  sebesar  $-V_m$ . Jadi, perbedaan mencolok dari kedua jenis penyearah ini adalah nilai tegangan pada diode ( $V_d$ ) saat kondisi "OFF", yaitu : sebesar  $-2V_m$  untuk penyearah CT dan sebesar  $-V_m$  untuk penyearah jembatan.



Gambar 2.3 (b) Penyearah Gelombang-penuh Satu Fasa Jembatan

Dengan bentuk gelombang hasil penyearahan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3 (a) dan (b) dapat ditentukan nilai tegangan luaran rerata ( $V_{dc}$ ) dan arus rerata ( $I_{dc}$ ) yang mengalir sebagai berikut:

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} = 0,637V_m$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R}$$

Selanjutnya, nilai tegangan luaran efektif ( $V_L$ ) dan arus efektif ( $I_L$ ) yang mengalir adalah:

$$V_L = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0,707V_m$$

$$I_L = \frac{V_L}{R}$$

Jadi, daya luaran rerata ( $P_{dc}$ ) dan daya luaran efektif ( $P_L$ ) adalah:

$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc}$$

$$P_L = V_L I_L$$

Faktor daya penyearahan ( $\cos \varphi$ ) rangkaian ditentukan dengan persamaan:

$$\cos \varphi = \frac{P_L}{S} = \frac{P_L}{V_s I_L}$$

Jika rangkaian pada Gambar 2.3 (a) dan (b) dihubungkan dengan beban resistif-induktif (RL), maka nilai tegangan luaran ( $V_L$ ) ditentukan berdasarkan deret Fourier yang terdiri dari komponen tegangan searah (dc) dan tegangan harmonik genap, yaitu :

$$V_L = Ri_o + L \frac{di_o}{dt}$$

$$V_L(t) = V_{o,DC} + \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

dimana :  $V_{o,DC} = \frac{2V_m}{\pi}$

$$a_n = 0$$

$$b_n = V_n = \frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,\dots}^{\infty} \frac{-1}{(n-1)(n+1)} \quad ; n \text{ adalah harmonik genap ke-}n$$

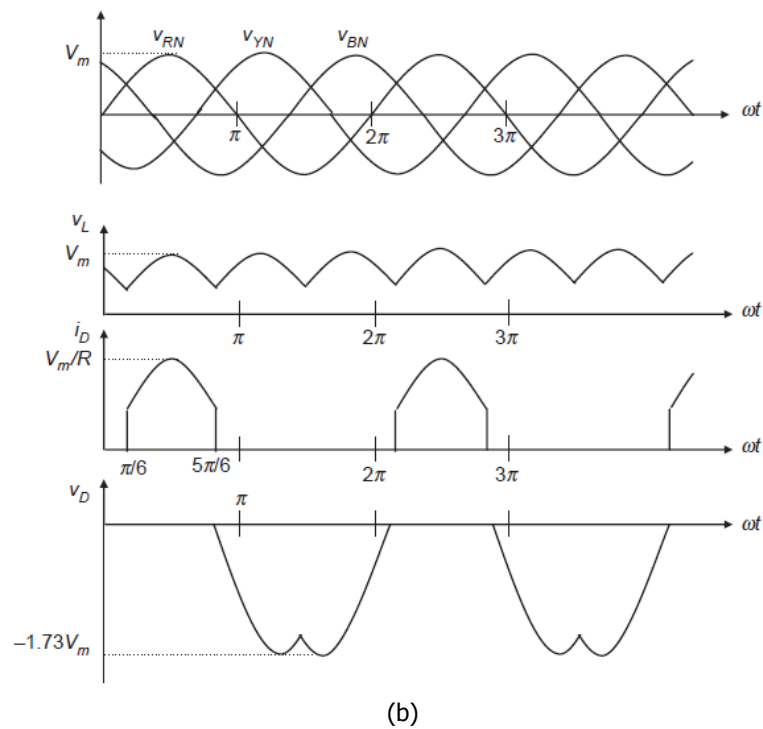
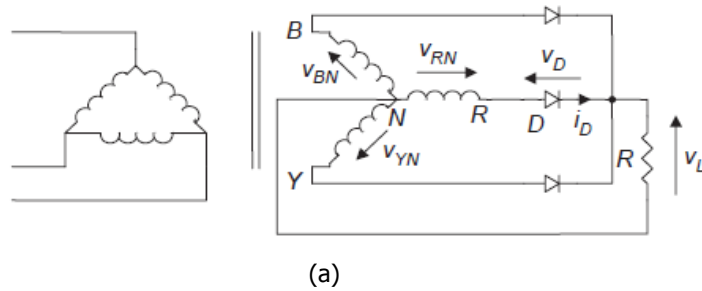
## B. PENYEARAH TIGA-FASA

### 1. PENYEARAH SETENGAH-GELOMBANG TIGA-FASA

Gambar 2.4 (a) merupakan rangkaian penyearah setengah-gelombang tiga-fasa hubungan bintang dengan beban resistif (R), sedangkan Gambar 2.4 (b) merupakan bentuk gelombang hasil penyearahan. Gambar 2.4 (b) dapat dilihat perbedaan antar fasa  $V_R$ ,  $V_Y$  dan  $V_B$  masing-masing sebesar  $2\pi/3$  (atau  $120^\circ$ ). Diode pada setiap fasa akan konduksi (ON) selama periode tegangan pada fasa tersebut lebih tinggi daripada dua fasa yang lainnya.

Proses penyearahan dari rangkaian penyearah setengah-gelombang tiga-fasa ini dapat ditinjau dari salah satu fasa dari Gambar 2.4 (b), yaitu: fasa R selama periode  $0 - \pi$ . Selama periode  $0 - \pi$  ini, dioda D pada fasa B lebih dahulu ON pada periode  $0 - \pi/6$ , kemudian dioda D pada fasa R menjadi ON pada periode  $\pi/6 - 5\pi/6$ , dilanjutkan

dioda D pada fasa Y menjadi ON pada periode  $5\pi/6 - \pi$ , dan terulang kembali dioda pada fasa R menjadi ON dan seterusnya.



Gambar 2.4 Penyearah Setengah-gelombang Tiga-fasa

Dengan bentuk gelombang hasil penyearahan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4 (b) dapat ditentukan nilai tegangan luaran rerata ( $V_{dc}$ ), tegangan efektif ( $V_L$ ), dan arus efektif ( $I_s$ ) per fasa yang mengalir sebagai berikut:

$$V_{dc} = V_m \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{1}{2} = 0.827 V_m \quad V_L = V_m \sqrt{\frac{3}{2\pi} \left( \frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{4} \right)} = 0.84 V_m$$

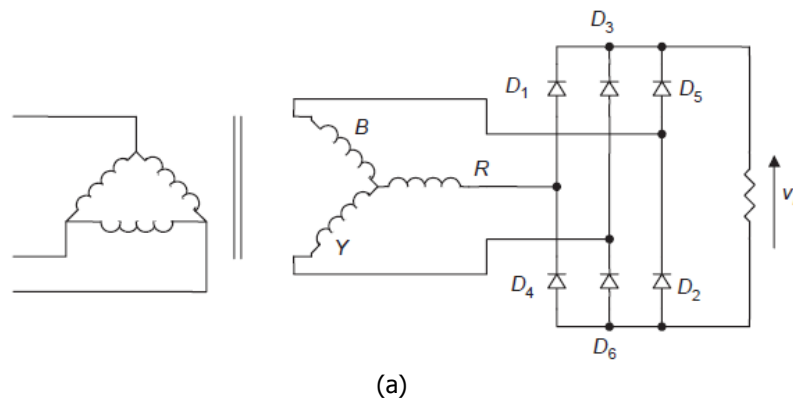
$$I_s = I_m \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left( \frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{4} \right)} = 0.485 I_m \quad \text{dimana: } I_m = V_m/R$$

Jika beban R pada rangkaian Gambar 2.4 (a) diganti beban RL, maka seperti halnya pada penyearah satu fasa beban RL, harmonik genap juga terjadi pada penyearah tiga fasa beban RL, dimana nilai tegangan harmonik genap ke-n dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

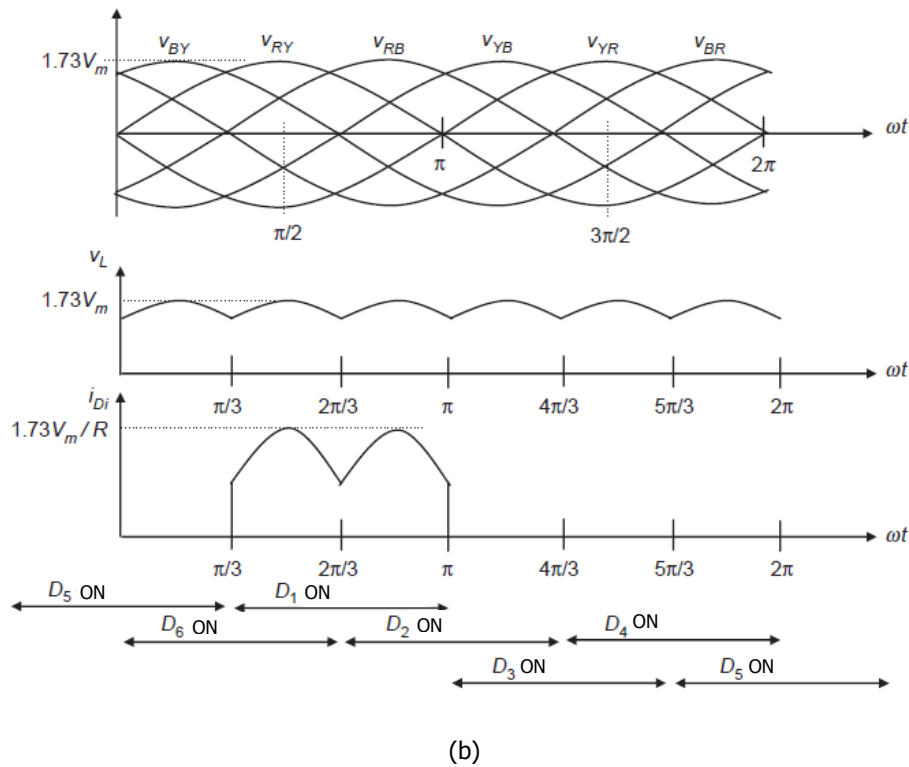
$$V_n = \frac{6V_m}{\pi(n^2 - 1)} \quad ; \quad \text{dimana } n \text{ adalah harmonik ke } 6, 12, 18, \text{ dan seterusnya.}$$

## 2. PENYEARAH GELOMBANG-PENUH TIGA-FASA

Gambar 2.5 (a) merupakan rangkaian penyearah gelombang-penuh tiga-fasa hubungan jembatan dengan beban resistif (R), sedangkan Gambar 2.5 (b) merupakan bentuk gelombang hasil penyearahan. Untuk memudahkan penjelasan proses penyearahan, dioda pada setiap fasa diberi nomor sebagai berikut: fasa R terdiri dari dioda D<sub>1</sub> dan D<sub>4</sub>, fasa Y terdiri dari dioda D<sub>3</sub> dan D<sub>6</sub>, dan fasa B terdiri dari dioda D<sub>5</sub> dan D<sub>2</sub>. Sudut konduksi setiap dioda sebesar  $2\pi/3$ , sehingga urutan kerja dioda adalah 12, 23, 34, 45, 56, dan 61.



Gambar 2.5 (a)



Gambar 2.5 Penyearah Gelombang-penuh Tiga-fasa  
Hubungan Jembatan

Dengan bentuk gelombang hasil penyearahan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5 (b) dapat ditentukan nilai tegangan luaran rerata ( $V_{dc}$ ), tegangan efektif ( $V_L$ ), dan arus efektif ( $I_s$ ) per fasa yang mengalir sebagai berikut:

$$V_{dc} = V_m \frac{3\sqrt{3}}{\pi} = 1.654 V_m \quad V_L = V_m \sqrt{\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi}} = 1.655 V_m$$

$$I_s = I_m \sqrt{\frac{2}{\pi} \left( \frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \right)} = 0.78 I_m \quad I_D = I_m \sqrt{\frac{1}{\pi} \left( \frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \right)} = 0.552 I_m$$

dimana :  $I_m = 1,73V_m/R$

Jika beban R pada rangkaian Gambar 2.5 (a) diganti beban RL, maka seperti halnya pada penyearah setengah-gelombang tiga-fasa

beban RL, harmonik genap juga terjadi pada penyearah tiga fasa beban RL, dimana nilai tegangan harmonik genap ke-n dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$V_n = \frac{6V_{m, \text{line}}}{\pi(n^2 - 1)} ; \text{ dimana } n \text{ adalah harmonik ke } 6, 12, 18, \text{ dan seterusnya.}$$

#### **D. PERTANYAAN**

##### **1. Penyearah Satu-fasa**

- a. Jelaskan proses penyearahan pada rangkaian penyearah setengah-gelombang satu fasa !
- b. Gambarkan bentuk gelombang tegangan masukan dan tegangan pada dioda saat OFF pada rangkaian penyearah setengah-gelombang satu fasa !
- c. Jelaskan proses penyearahan pada rangkaian penyearah gelombang-penuh jembatan (*bridge*) satu fasa !
- d. Jelaskan proses penyearahan pada rangkaian penyearah gelombang-penuh CT satu fasa !
- e. Gambarkan bentuk gelombang tegangan masukan dan tegangan pada dioda saat OFF pada rangkaian penyearah gelombang-penuh CT satu fasa !
- f. Berapakah nilai tegangan pada salah satu diode dari suatu rangkaian penyearah gelombang-penuh CT satu fasa ketika diode OFF ?

##### **2. Penyearah Tiga-fasa**

- a. Jelaskan proses penyearahan pada rangkaian penyearah setengah-gelombang tiga fasa !



- b. Gambarkan bentuk gelombang tegangan masukan dan tegangan pada salah satu dioda saat OFF pada rangkaian penyearah setengah-gelombang tiga fasa !
- c. Jelaskan proses penyearahan pada rangkaian penyearah gelombang-penuh tiga fasa !
- d. Gambarkan bentuk gelombang tegangan masukan dan tegangan pada dioda saat OFF pada rangkaian penyearah gelombang-penuh tiga fasa !

### 3. Soal Essay

- a. Sebuah rangkaian penyearah setengah-gelombang satu fasa dihubungkan dengan tegangan efektif sebesar 120 volt, 50 Hz. Jika rangkaian penyearah ini dihubungkan dengan resistor sebesar 5  $\Omega$ , hitunglah arus beban rerata ( $I_{dc}$ ) dan daya efektif ( $P_L$ ) yang diserap resistor, serta faktor daya rangkaian penyearah ini. *(Kunci jawaban:  $I_{dc}=10,8\text{ A}$ ,  $P_L=1440\text{ W}$ ,  $\cos \varphi=0,707$ ).*

- b. Sebuah rangkaian penyearah gelombang-penuh satu fasa dihubungkan dengan beban RL. Jika rangkaian dalam penyearah ini terjadi harmonik kedua, berapakah nilai tegangan luarannya ( $V_o$ ) ?

*(Kunci jawaban:* 
$$V_o = \frac{2V_m}{\pi} - \frac{4V_m}{3\pi}$$

- c. Sebuah rangkaian penyearah setengah-gelombang tiga fasa dihubungkan dengan tegangan sebesar 150 volt/fasa. Tentukan: (1) tegangan luaran dari penyearah ini jika tiap dioda terjadi penurunan tegangan sebesar 0,7 volt, dan (2) rating arus ( $I_L$ ) dari dioda jika diketahui arus bebannya 25 A. *(Kunci jawaban:  $V_{o,DC}=174,7\text{ V}$ ,  $I_{rms}=14,4\text{ A}$ )*

- d. Sebuah rangkaian penyearah gelombang-penuh tiga fasa dihubungkan dengan sumber tegangan sebesar 480 volt/line dan dihubungkan dengan beban resistif  $25\ \Omega$ . Tentukan besar tegangan dan arus beban dari penyearah ini. *(Kunci jawaban:  $V_{o,DC}=648\ V$ ,  $I_{o,DC}=25,9\ A$ )*

### **BAB III**

## **RANGKAIAN PEMICU DAN KOMUTASI**

### **KOMPETENSI DASAR**

Setelah mengikuti materi ini diharapkan mahasiswa memiliki kompetensi:

- Menguasai prinsip kerja rangkaian pemicu dan rangkaian komutasi.
- Menguasai dasar analisis rangkaian pemicu dan rangkaian komutasi.

### **STANDAR KOMPETENSI**

Mampu merancang rangkaian pemicu dan rangkaian komutasi untuk komponen SCR.

---

#### **A. PENDAHULUAN**

Sebagaimana dijelaskan pada Bab I bahwa komponen semikonduktor daya, seperti: dioda, SCR, transistor, dan MOSFET, yang digunakan dalam rangkaian elektronika daya dioperasikan sebagai sakelar elektronis (*electronic switching*). Sakelar elektronis memiliki sifat tidak akan dapat ON/OFF tanpa ada rangkaian luar yang dapat membangkitkan signal/ pulsa sebagai pemicu/ penyulut. Rangkaian luar yang dimaksud adalah rangkaian pemicu atau rangkaian penyulut (*triggering circuits*). Dengan demikian, rangkaian pemicu/ penyulut merupakan rangkaian yang digunakan untuk meng-ON-kan SCR, transistor, atau MOSFET.

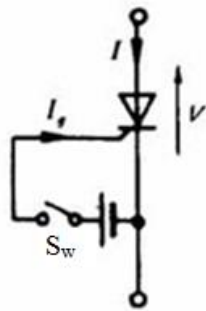
Sesuai dengan sifat semikonduktor, transistor dan MOSFET dapat digunakan sebagai sakelar elektronis untuk sumber masukan tegangan searah (DC) saja, sedangkan SCR dapat digunakan sebagai sakelar elektronis untuk sumber masukan tegangan bolak-balik (AC) maupun DC. Karena SCR memiliki sifat yang dapat dipakai untuk sumber

masuk AC maupun DC inilah, komponen SCR banyak digunakan dalam rangkaian elektronika daya. Jika komponen SCR digunakan dalam rangkaian elektronika daya dengan sumber masukan searah DC, ketika SCR sudah dipicu maka rangkaian akan terus ON dan akan OFF jika rangkaian diputus dari sumber masukannya. Agar SCR dapat OFF tanpa memutus sumber masukan diperlukan rangkaian yang disebut rangkaian komutasi (*dc line commutation*), yakni rangkaian yang digunakan untuk meng-OFF-kan SCR dalam suatu rangkaian tertutup.

## **B. Rangkaian Pemicu**

Transistor dan MOSFET merupakan komponen yang hanya dapat dioperasikan sebagai *switching* dan *controlling* saja, sedangkan operasi *converting* tidak bisa dilakukan. Hal ini berarti, transistor dan MOSFET hanya bisa untuk pengaturan sumber DC menjadi DC saja, sehingga untuk pengaturan sumber AC menjadi DC atau sebaliknya tidak bisa dilakukan. Sebagaimana telah dijelaskan dalam Bab I, jika transistor dan MOSFET dioperasikan sebagai *switching*, konfigurasi yang digunakan umumnya kolektor-emitor bersama (*common-CE*) dan drain-source bersama (*common-DS*), dimana dengan pengendalian arus basis pada transistor dan pengendalian tegangan pada MOSFET akan dapat meng-ON dan OFF-kan rangkaian.

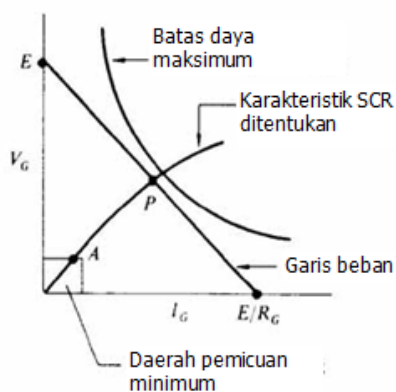
Berbeda dengan transistor dan MOSFET, SCR merupakan komponen yang dapat dioperasikan serbaguna, baik sebagai *switching*, *controlling*, maupun *converting*. Hal ini berarti, SCR bisa digunakan untuk pengaturan sumber DC menjadi DC, AC menjadi AC, maupun untuk pengaturan sumber AC menjadi DC atau sebaliknya. SCR dioperasikan sebagai *switching*, dengan cara memberi signal arus pada gate.



Gambar 3.1 Rangkaian Pemicu Dasar

Gambar 3.1 merupakan rangkaian pemicu dasar yang digunakan untuk menyulut signal arus pada terminal gate pada SCR, dengan cara meng-ON-kan sakelar manual ( $S_w$ ). Uraian selanjutnya akan difokuskan pada rangkaian pemicu untuk SCR.

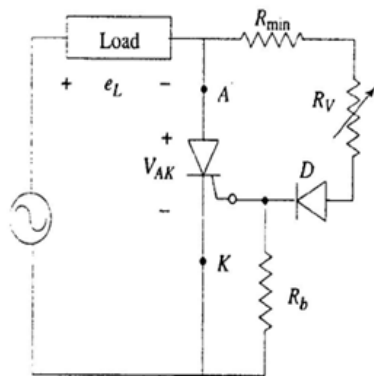
Untuk menentukan rangkaian pemicu yang tepat perlu memperhatikan karakteristik  $V_g$ - $I_g$  dari SCR seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Karakteristik  $V_g$ - $I_g$  SCR

Besaran yang perlu dipertimbangkan adalah tegangan rating, arus rating, dan daya maksimum dari SCR, kemudian ditentukan titik kerja pemicuan yang diharapkan. Gambar 3.2 ditunjukkan titik kerja pemicuan minimum SCR pada titik A dan titik kerja pemicuan yang ditentukan pada titik P.

Rangkaian pemicu ditinjau dari proses pembentukan tegangan pemicu yang dihasilkan dapat dilakukan melalui beberapa proses, antara lain: proses sifat komponen pasif (resistor, kapasitor), proses elektromagnetis (dengan trafo pulsa), proses modulasi lebar pulsa, dan proses optokopler. Rangkaian pemicu berikut merupakan beberapa contoh rangkaian pemicu yang umum digunakan. Gambar 3.3 merupakan salah satu contoh rangkaian pemicu SCR dengan resistor. Sudut pemicuan ditentukan dengan cara mengatur  $R_v$ .



Gambar 3.3 Rangkaian Pemicu Resistor

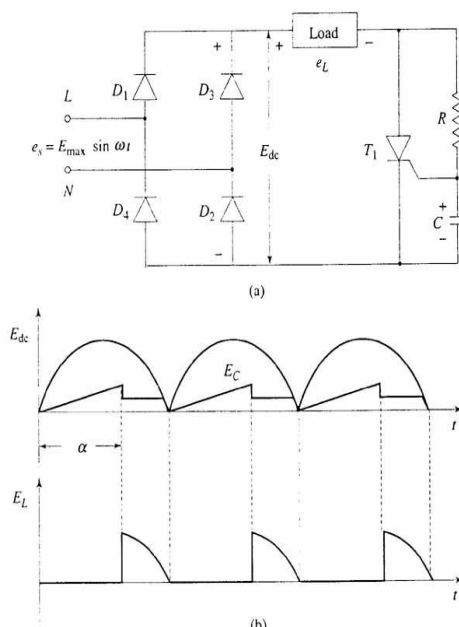
Dioda D berfungsi sebagai penyearahan agar diperoleh tegangan pada gate berpolaritas positif.  $R_{\min}$  berfungsi pembatas arus gate, dan  $R_b$  berfungsi stabilisator tegangan gate agar tidak melebihi  $V_g(\text{maks})$ .

Nilai  $R_{\min}$  dan  $R_b$  dapat ditentukan dengan pendekatan sebagai berikut:

$$R_{\min} \geq \frac{E_{\max}}{I_{g(\max)}}$$

$$R_b \leq \frac{(R_v + R_{\min})V_{g(\max)}}{(E_{\max} - V_{g(\max)})}$$

$$e_s = I_{g(\min)}(R_v + R_{\min}) + V_d + V_{g(\min)}$$



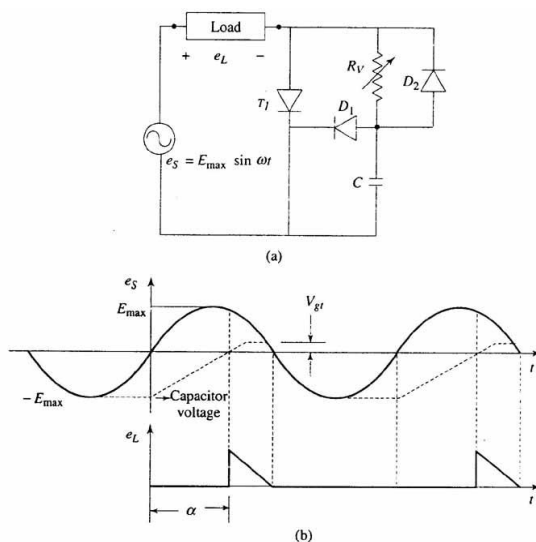
Gambar 3.4 Rangkaian Pemicu RC dengan Tegangan Masukan DC

Gambar 3.4 (a) merupakan salah satu contoh rangkaian pemicu SCR dengan menggunakan resistor-kapasitor (RC) dengan sumber masukan tegangan searah (DC), sedangkan Gambar 3.4 (b) merupakan bentuk tegangan kapasitor ( $E_c$ ) yang dibangkitkan dari proses RC serta bentuk tegangan luarannya. Sudut pemicuan dapat dilakukan dengan cara mengatur  $R_v$  yang besarnya  $0^\circ - 180^\circ$ . Nilai  $R_v$  dan  $C$  dapat ditentukan dengan pendekatan sebagai berikut:

$$R_v C \geq 50 \frac{T}{2} = \frac{157}{\omega} ; \text{dimana nilai } T = 1/f \text{ dari sumber masukan AC}$$

$$V_{gt} = V_{g(\min)} + V_{D1} \quad R_v \leq \frac{e_s - V_{gt}}{I_{g(\min)}}$$

Selanjutnya, Gambar 3.5 (a) merupakan salah satu contoh rangkaian pemicu SCR dengan menggunakan resistor-kapasitor (RC) dengan sumber masukan tegangan bolak-balik (AC), sedangkan Gambar 3.5 (b) merupakan bentuk tegangan kapasitor ( $E_c$ ) yang dibangkitkan dari proses RC serta bentuk tegangan luarannya.



Sudut pemicuan dapat dilakukan dengan cara mengatur  $R_v$  yang besarnya  $0^\circ - 180^\circ$ . Dioda  $D1$  berfungsi agar tegangan pada terminal gate selalu membangkitkan polaritas positif, sedangkan dioda  $D2$  berfungsi untuk pengisian  $C$  saat polaritas - agar tetap nol.

Nilai  $R_v$  dan  $C$  dapat ditentukan dengan pendekatan sebagai berikut:

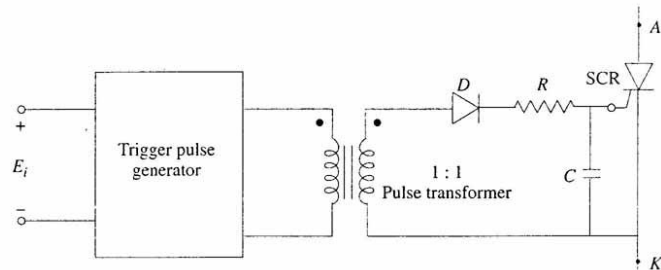
Gambar 3.5 Rangkaian Pemicu RC dengan Tegangan Masukan AC

$$R_v C \geq \frac{1,3T}{2} = \frac{4}{\omega} ; \text{dimana } T = 1/f$$

$$R_v \leq \frac{e_s - V_{g(\min)} - V_{D1}}{I_{g(\min)}}$$

Contoh rangkaian pemicu yang menggunakan trafo pulsa ditunjukkan pada Gambar 3.6. Rangkaian pemicu ini memerlukan generator pembangkit pulsa yang umumnya dibangkitkan dari rangkaian dengan prinsip operasi modulasi lebar pulsa (*pulse width modulation-PWM*). Perbandingan transformasi dari trafo pulsa

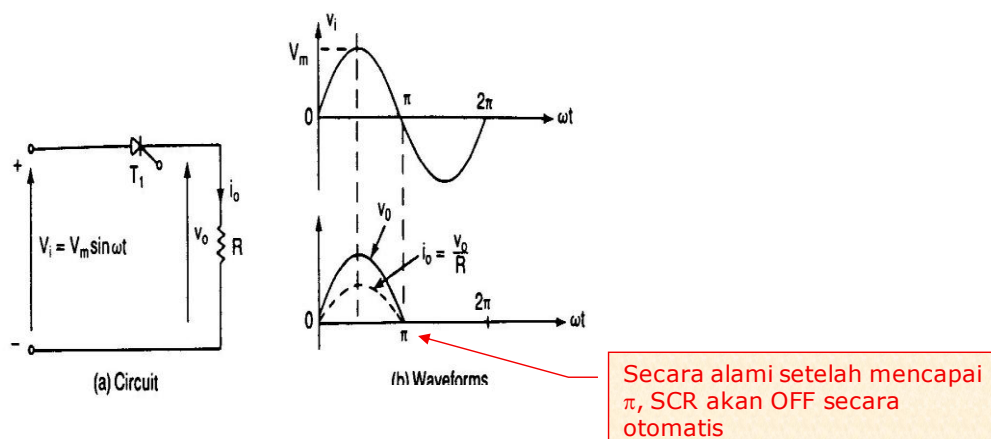
umumnya sebesar 1:1. Tegangan pulsa pemicu dibangkitkan dengan prinsip RC set



Gambar 3.6 Rangkaian Pemicu Dasar dengan Trafo Pulsa

### C. RANGKAIAN KOMUTASI

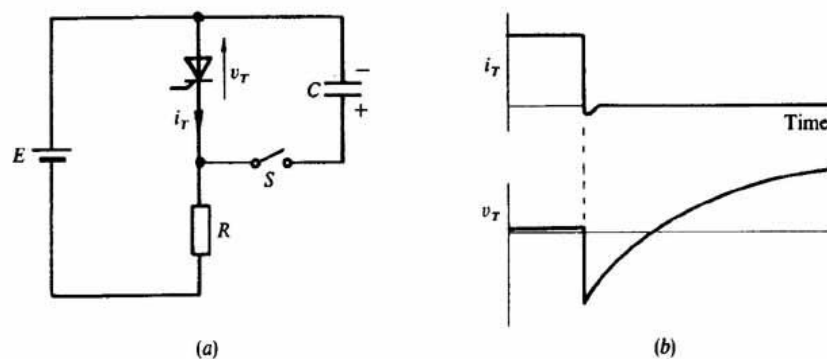
Ditinjau dari sumber masukannya, terdapat 2 (dua) rangkaian komutasi, yaitu: komutasi alami (*natural commutation*) dan komutasi paksa (*forced commutation*). Jika SCR digunakan dalam sebuah rangkain tertutup dengan sumber masukan berupa tegangan AC, maka SCR akan OFF secara otomatis ketika mencapai titik lintas nol (*zero crossing*) yang disebabkan sifat alami dari sumber AC tersebut. Gambar 3.7 ditunjukkan rangkaian komutasi alami.



Gambar 3.7 Rangkaian Komutasi Alami



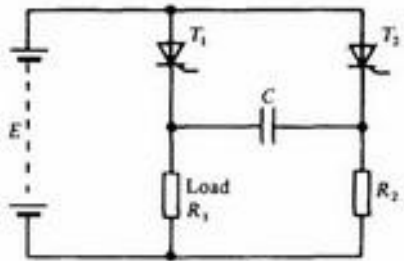
Jika SCR digunakan dalam sebuah rangkain tertutup dengan sumber masukan berupa tegangan DC, maka SCR akan OFF jika arus beban dilawan (dipaksa sama dengan) dengan arus komutasi yang dibangkitkan dari rangkaian komutasi. Proses inilah yang disebut komutasi paksa. Ilustrasi prinsip dasar dari komutasi paksa ini dapat dijelaskan melalui Gambar 3.8 (a) dan (b). Ketika SCR OFF dan S di-ON terjadi proses pengisian C. Ketika S dalam kondisi OFF dan SCR di-ON-kan, maka mengalir arus beban  $I_L = I_T = E/R$ . Ketika S di-ON kembali, maka SCR akan OFF karena arus  $I_C$  melawan  $I_T$  ( $I_C = I_T$ ).



Gambar 3.8 Rangkaian Komutasi Paksa Dasar

Kapasitor merupakan komponen utama yang digunakan dalam rangkaian komutasi. Metode rangkaian komutasi paksa dapat dibedakan dalam enam jenis, yaitu: komutasi sendiri dgn resonansi beban, komutasi sendiri dgn rangkaian LC, komutasi komplemen, komutasi bantu, komutasi pulsa luar, dan komutasi jaringan ac. Sebagai contoh, Gambar 3.9 merupakan rangkaian komutasi paksa dengan metode komplemen.  $T_1$  merupakan SCR utama yang dihubungkan seri dengan beban ( $R_1$ ), sedangkan  $T_2$  merupakan SCR bantu yang dihubungkan paralel dg  $T_1$ . Prinsip kerja rangkaian komutasi paksa

dengan metode komplemen dapat dijelaskan dengan empat tahapan kondisi sebagai berikut:



Gambar 3.9 Rangkaian Komutasi dengan Metode Komplemen

Kondisi awal,  $T_1$  dan  $T_2$  masih dalam keadaan OFF dan tegangan pada C ( $E_c$ ) sama dengan nol. Kondisi kedua, ketika  $T_1$  di-ON-kan dan  $T_2$  masih OFF, di sini akan terjadi dua aliran arus, yakni arus beban ( $I_L$ ) dan arus pengisian kapasitor C ( $I_C$ ) melalui resistor  $R_2$ , sehingga tegangan pada kapasitor sama dengan tegangan sumbernya ( $E_c = E_{dc}$ ).

Kondisi ketiga, ketika  $T_2$  di-ON-kan, maka  $T_1$  akan OFF karena  $E_c$  ( $I_C$  melawan  $I_L$ ), dan terjadi pengisian C melalui beban sehingga  $E_c = -E_{dc}$ . Kondisi keempat, ketika  $T_1$  di-ON-kan maka  $T_2$  akan OFF sebagai akibat pelepasan muatan C, proses selanjutnya akan kembali seperti kondisi kedua. Nilai waktu off ( $t_{off}$ ) dapat ditentukan, yaitu sebesar:

$$t_{off} = 0,6931R_1C$$

#### D. PERTANYAAN

1. Apakah yang dimaksud dengan rangkaian pemicu?
2. Apakah yang dimaksud dengan rangkaian komutasi?
3. Jelaskan dasar prinsip kerja rangkaian pemicu?
4. Jelaskan dasar prinsip kerja rangkaian komutasi alami?
5. Jelaskan dasar prinsip kerja rangkaian komutasi paksa?
6. Jelaskan fungsi kapasitor pada rangkaian komutasi paksa?
7. Jelaskan dasar prinsip kerja rangkaian komutasi paksa dengan metode komplemen?

8. Selesaikan soal berikut ini:

Sebuah rangkaian pemicu jenis resistansi digunakan untuk SCR yang memiliki  $I_{g(\min)}=0,1$  mA dan  $V_{g(\min)}=0,5$  V. Jika tegangan masukan  $E_{\max}=24$  V dan diode yang digunakan jenis silikon, tentukan sudut pemicuan ( $\alpha$ ) untuk  $R_v = 100$  k $\Omega$  dan  $R_{\min} = 10$  k $\Omega$ .  
(Kunci jawaban:  $\alpha = 30,6^\circ$ )

## **BAB IV**

### **PENYEARAH TERKENDALI (KONVERTER)**

#### **KOMPETENSI DASAR**

Setelah mengikuti materi ini diharapkan mahasiswa memiliki kompetensi:

- Menguasai karakteristik konverter setengah-gelombang, gelombang-penuh, dan semikonverter satu fasa dan tiga fasa
- Menguasai dasar prinsip kerja konverter setengah-gelombang, gelombang-penuh, dan semikonverter satu fasa dan tiga fasa

#### **STANDAR KOMPETENSI**

Mampu menganalisis rangkaian konverter setengah-gelombang, gelombang-penuh, dan semikonverter satu fasa dan tiga fasa

---

#### **A. PENDAHULUAN**

Penyearah terkendali (*controlled rectifier*) atau sering juga disebut dengan konverter merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah tegangan sumber masukan arus bolak-balik dalam bentuk sinusoida menjadi tegangan luaran dalam bentuk tegangan searah yang dapat diatur/ dikendalikan. Komponen semikonduktor daya yang digunakan umumnya berupa SCR yang beroperasi sebagai sakelar, pengubah, dan pengatur.

Jenis sumber tegangan masukan untuk mencatu rangkaian konverter dapat digunakan tegangan bolak-balik satu fasa maupun tiga fasa. Konverter satu fasa merupakan rangkaian penyearah daya dengan sumber masukan tegangan bolak-balik satu fasa, sedangkan konverter tiga fasa rangkaian penyearah daya dengan sumber masukan tegangan bolak-balik tiga fasa. Berbeda dengan penyearah daya, dalam

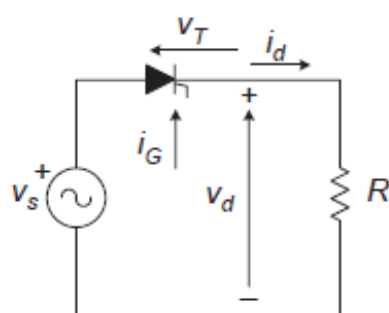
rangkaian konverter dapat dilakukan dalam bentuk penyearahan terkendali setengah gelombang (*halfwave*), penyearah gelombang-penuh (*fullwave*), dan semikonverter. Pembebanan pada rangkaian penyearah terkendali juga dipasang beban resistif atau beban resistif-induktif.

## A. KONVERTER SATU-FASA

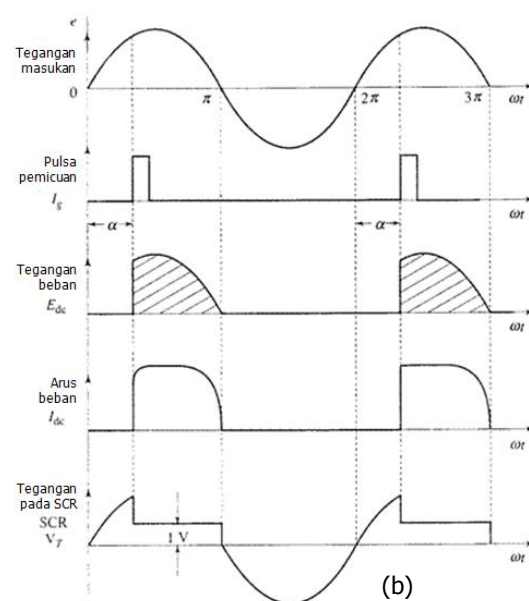
### 1. KONVERTER SETENGAH-GELOMBANG SATU-FASA

#### a. Beban Resistif (R)

Gambar 4.1 (a) merupakan rangkaian konverter setengah-gelombang satu-fasa dengan beban resistif, sedangkan Gambar 4.1 (b) menunjukkan bentuk gelombang hasil penyearahan. Proses penyearahan dapat dijelaskan melalui Gambar 4.1 (a) dan (b), ketika setengah periode pertama (polaritas +),  $T_1$  dipicu sebesar  $\alpha$ , maka  $T_1$  menjadi ON dari  $\alpha - \pi$ , sehingga terjadi tegangan luaran  $E_{dc}$ . Selanjutnya, saat setengah periode kedua (polaritas -),  $T_1$  menjadi OFF pada titik  $\pi$  karena komutasi alami, sehingga tegangan luaran  $E_{dc} = V_o = 0$  sampai dengan  $(2\pi + \alpha)$ , dan seterusnya.



Gambar 4.1  
Rangkaian Konverter Setengah-gelombang Satu Fasa Beban R



Di sini, SCR berfungsi sebagai sakelar sekaligus melakukan pengubahan (*converting*) dan pengaturan (*controlling*) dari sumber bolak-balik menjadi tegangan searah. Ditinjau dari tegangan luaran ( $V_L$ ) yang dihasilkan, terdapat dua jenis komponen tegangan, yaitu : (1) tegangan searah rerata ( $V_{dc}$ ) dan tegangan searah efektif (*root mean square-rms*),  $V_L$ . Nilai tegangan luaran masing-masing adalah :

$$V_{dc} = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha) \qquad V_L = V_m \left[ \frac{\pi - \alpha}{4\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{8\pi} \right]^{1/2}$$

Dengan demikian, daya luaran rerata ( $P_{dc}$ ) dan daya luaran efektif ( $P_L$ ) adalah:

$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc}$$

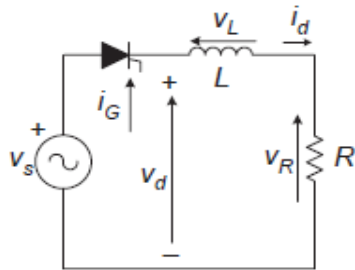
$$P_L = V_L I_L$$

## b. Beban Resistif-Induktif (RL)

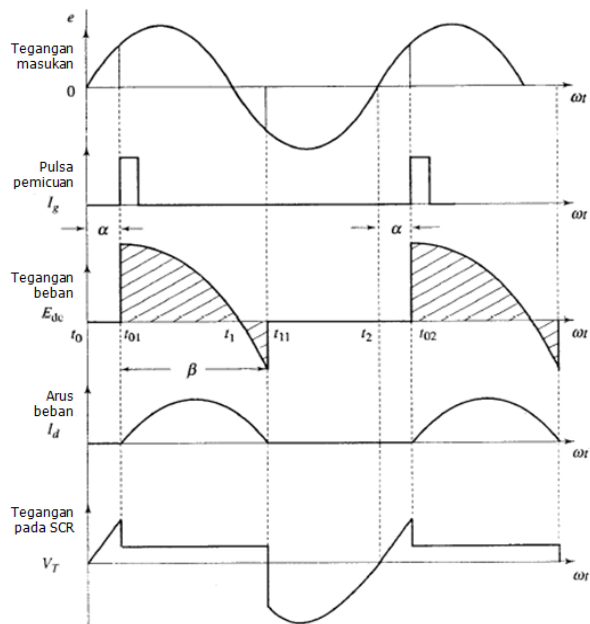
Gambar 4.2 (a) merupakan rangkaian konverter setengah-gelombang satu-fasa dengan beban resistif-induktif (RL), sedangkan Gambar 2.2 (b) menunjukkan bentuk gelombang hasil penyearahan. Proses penyearahan dapat dijelaskan melalui Gambar 4.2 (a) dan (b), setengah periode pertama (polaritas +), SCR  $T_1$  dipicu sebesar  $\alpha$  maka SCR  $T_1$  akan ON dari  $\alpha$  sampai dengan  $\beta$ , hal ini disebabkan sifat induktor (L). Hal ini berarti sudut konduksi SCR  $T_1$  sebesar  $(\beta - \alpha)$ . Selanjutnya, mulai dari titik  $\beta$  sampai dengan  $(2\pi + \alpha)$  SCR  $T_1$  menjadi OFF.

Nilai komponen tegangan luaran ( $V_{dc}$ ) dari rangkaian Gambar 4.2 (b) sebesar  $V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} \cos \alpha$ . Dari persamaan ini dapat dijelaskan bahwa ketika sudut pemicuan sebesar  $0^\circ < \alpha \leq 90^\circ$  akan terjadi proses penyearahan (*rectifying*), sedangkan pada sudut pemicuan  $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$  akan terjadi proses pembalikan (*inverting*). Untuk mengatasi

proses pembalikan ini biasanya dipasang diode komutasi yang dihubungkan parallel terbalik dengan beban RL. Ketika dipasang diode komutasi, maka  $\beta = \pi$ , sehingga seperti konverter setengah-gelombang beban R.



Gambar 4.2  
Rangkaian Konverter Setengah-gelombang Satu Fasa Beban RL

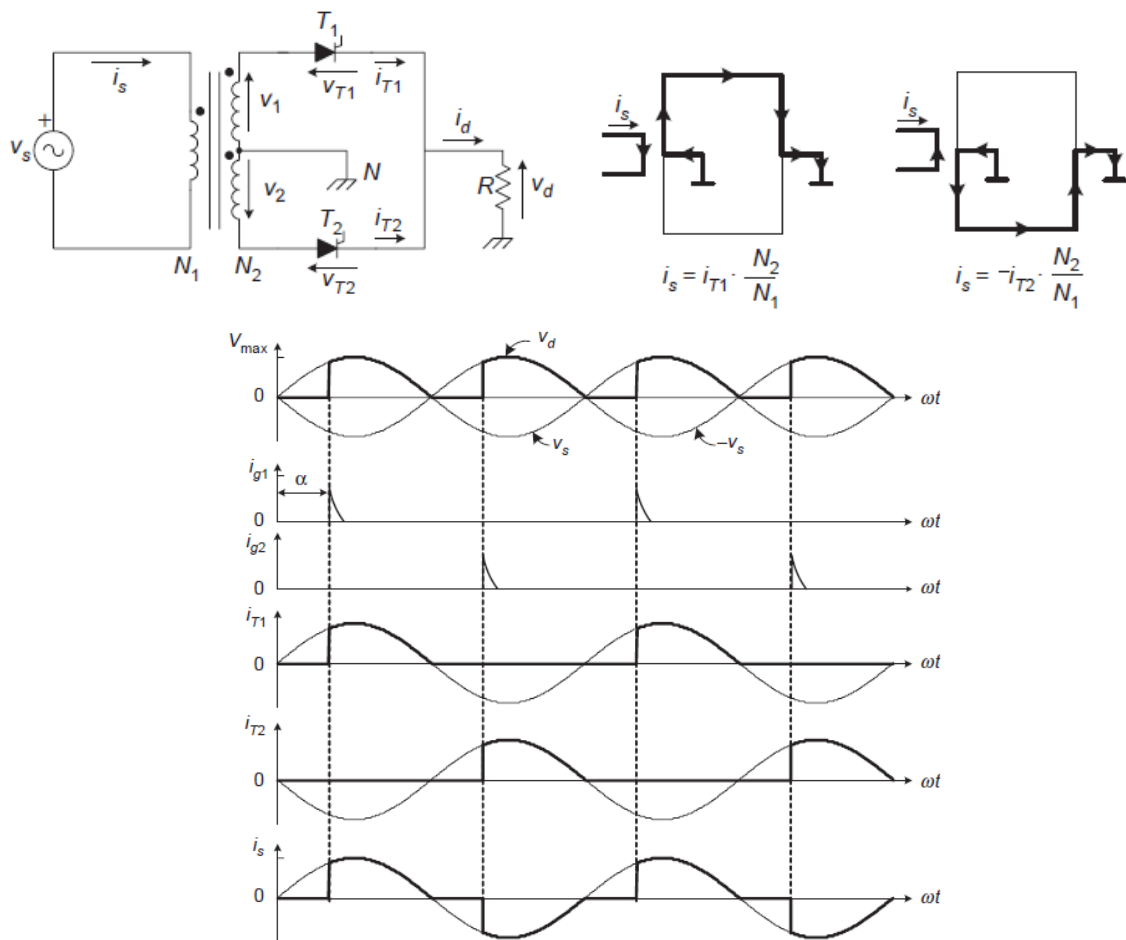


## 2. KONVERTER GELOMBANG-PENUH SATU-FASA

Pada bagian ini akan dijelaskan tiga jenis rangkaian konverter gelombang penuh satu-fasa, yaitu: konverter titik tengah (*center tap - CT*), konverter jembatan, dan semikonverter.

### a. Konverter Gelombang-penuh Satu-fasa dengan CT

Gambar 4.3 merupakan rangkaian konverter gelombang-penuh satu fasa CT dengan beban R. Transformator dengan CT dipilih untuk memperoleh dua tegangan  $V_1$  dan  $V_2$  yang masing-masing memiliki beda fasa sebesar  $180^\circ$  terhadap CT atau netral (N). Proses pemicuan pada SCR  $T_1$  dan  $T_2$  dilakukan secara serempak. Komponen SCR  $T_1$  bekerja pada setengah periode pertama ( $0$  sampai dengan  $\pi$ ), dan Komponen SCR  $T_2$  bekerja pada setengah periode kedua ( $\pi$  sampai dengan  $2\pi$ ).



Gambar 4.3 Rangkaian Konverter Gelombang-penuh dengan CT Satu Fasa Beban R

Jika SCR  $T_1$  dan  $T_2$  dipicu sebesar  $\alpha$ , maka nilai tegangan searah rerata ( $V_{dc}$ ) dan nilai tegangan searah efektif (*root mean square-rms*),  $V_L$  dapat ditentukan sebagai berikut :

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad V_L = V_m \left[ \frac{\pi - \alpha}{2\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{4\pi} \right]^{1/2}$$

Dengan demikian, daya luaran rerata ( $P_{dc}$ ) dan daya luaran efektif ( $P_L$ ) adalah:

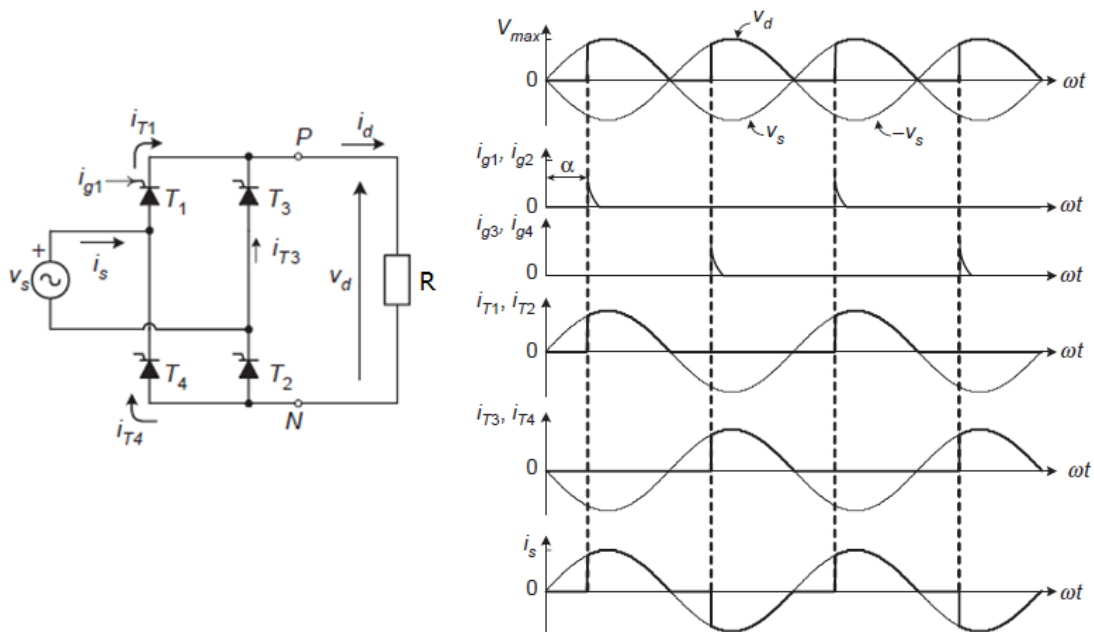
$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc} \quad P_L = V_L I_L$$



## b. Konverter Gelombang-penuh Satu-fasa Hubungan Jembatan

Gambar 4.4 merupakan rangkaian konverter gelombang-penuh satu fasa hubungan jembatan dengan beban R. Proses pemicuan pada rangkaian ini, SCR  $T_1$  dan  $T_2$  serta SCR  $T_3$  dan  $T_4$  masing-masing dioperasikan secara serempak. Komponen SCR  $T_1$  dan  $T_2$  bekerja pada setengah perioda pertama ( $0$  sampai dengan  $\pi$ ), dan Komponen SCR  $T_3$  dan  $T_4$  bekerja pada setengah perioda kedua ( $\pi$  sampai dengan  $2\pi$ ).

Jika SCR  $T_1$  dan  $T_2$  serta SCR  $T_3$  dan  $T_4$  masing-masing dipicu sebesar  $\alpha$ , maka nilai tegangan searah rerata ( $V_{dc}$ ) dan nilai tegangan searah efektif (*root mean square-rms*),  $V_L$  seperti rangkaian konverter gelombang-penuh satu fasa CT dengan beban R di atas.



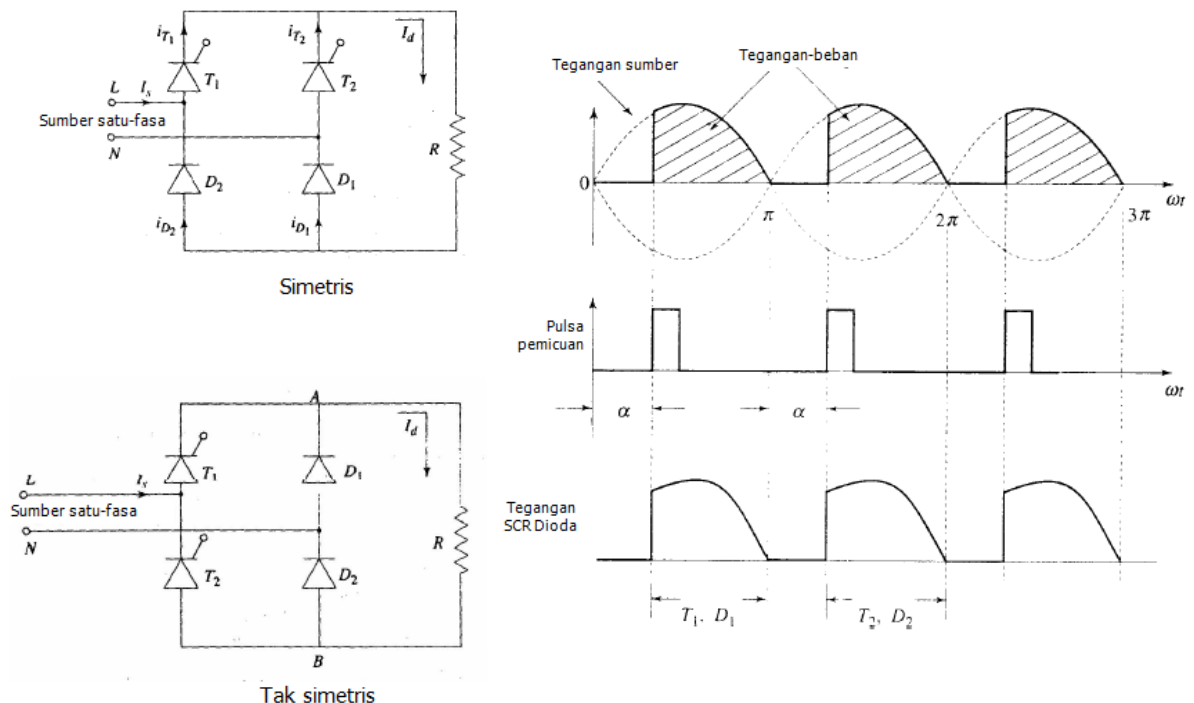
Gambar 4.4 Rangkaian Konverter Gelombang-penuh Hubungan Jembatan Satu Fasa Beban R

Jika rangkaian pada Gambar 4.3 dan 4.4 dihubungkan dengan beban resistif-induktif (RL), seperti halnya pada konverter setengah-gelombang satu fasa di atas, nilai komponen tegangan luaran ( $V_{dc}$ ) dari rangkaian menjadi sebesar  $V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha$ . Hal ini berarti, ketika sudut

pemicuan sebesar  $0^\circ < \alpha \leq 90^\circ$  akan terjadi proses penyearahan (*rectifying*), sedangkan pada sudut pemicuan  $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$  akan terjadi proses pembalikan (*inverting*).

## b. Semikonverter Satu-fasa

Gambar 4.5 merupakan rangkaian semikonverter satu fasa dengan beban R. Terdapat dua jenis rangkaian semikonverter satu fasa yang masing-masing memiliki fungsi sama, yaitu: semikonverter satu fasa simetris dan semikonverter satu fasa tak simetris. Proses pemicuan pada rangkaian ini terjadi ketika SCR  $T_1$  dan dioda  $D_1$  serta SCR  $T_2$  dan dioda  $D_2$  masing-masing dioperasikan secara serempak. Komponen SCR  $T_1$  dan dioda  $D_1$  bekerja pada setengah periode pertama (0 sampai dengan  $\pi$ ), dan Komponen SCR  $T_2$  dan dioda  $D_2$  bekerja pada setengah periode kedua ( $\pi$  sampai dengan  $2\pi$ ).



Gambar 4.5 Rangkaian Semikonverter Satu Fasa Beban R

Jika SCR  $T_1$  dan  $T_2$  masing-masing dipicu sebesar  $\alpha$ , maka nilai tegangan searah rerata ( $V_{dc}$ ) dan nilai tegangan searah efektif (*root mean square-rms*),  $V_L$  seperti rangkaian konverter gelombang-penuh satu fasa CT dengan beban R di atas.

## B. KONVERTER TIGA-FASA

### 1. KONVERTER SETENGAH-GELOMBANG TIGA-FASA

Gambar 4.6 merupakan rangkaian konverter setengah-gelombang tiga-fasa dengan beban resistif dan bentuk gelombang hasil penyearahan. Terdapat dua proses pengaturan sudut picuan ( $\alpha$ ), yaitu: (a) operasi konduksi kontinyu ketika  $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$  atau  $0 \leq \alpha \leq \pi/6$ , dan (b) operasi konduksi diskontinyu ketika  $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$  atau  $\pi/6 \leq \alpha \leq 5\pi/6$ . Proses pemicuan pada SCR  $T_1$ ,  $T_2$ , dan  $T_3$  dilakukan secara serempak pada masing-masing fasa.

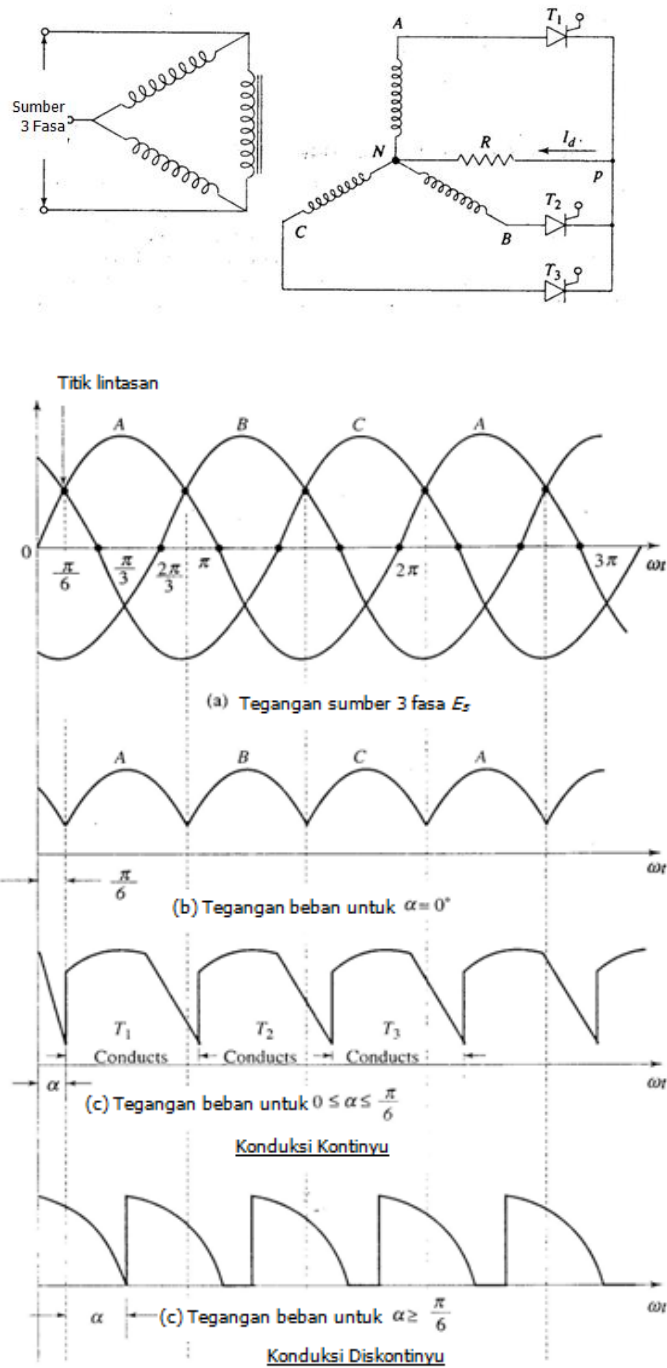
Nilai tegangan searah rerata ( $V_{dc}$ ) dan nilai tegangan searah efektif (*root mean square-rms*),  $V_L$  pada operasi konduksi kontinyu dan operasi konduksi diskontinyu dapat ditentukan sebagai berikut :

(a) Operasi konduksi kontinyu:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos \alpha \quad V_L = V_m \left[ \frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\alpha \right]^{1/2}$$

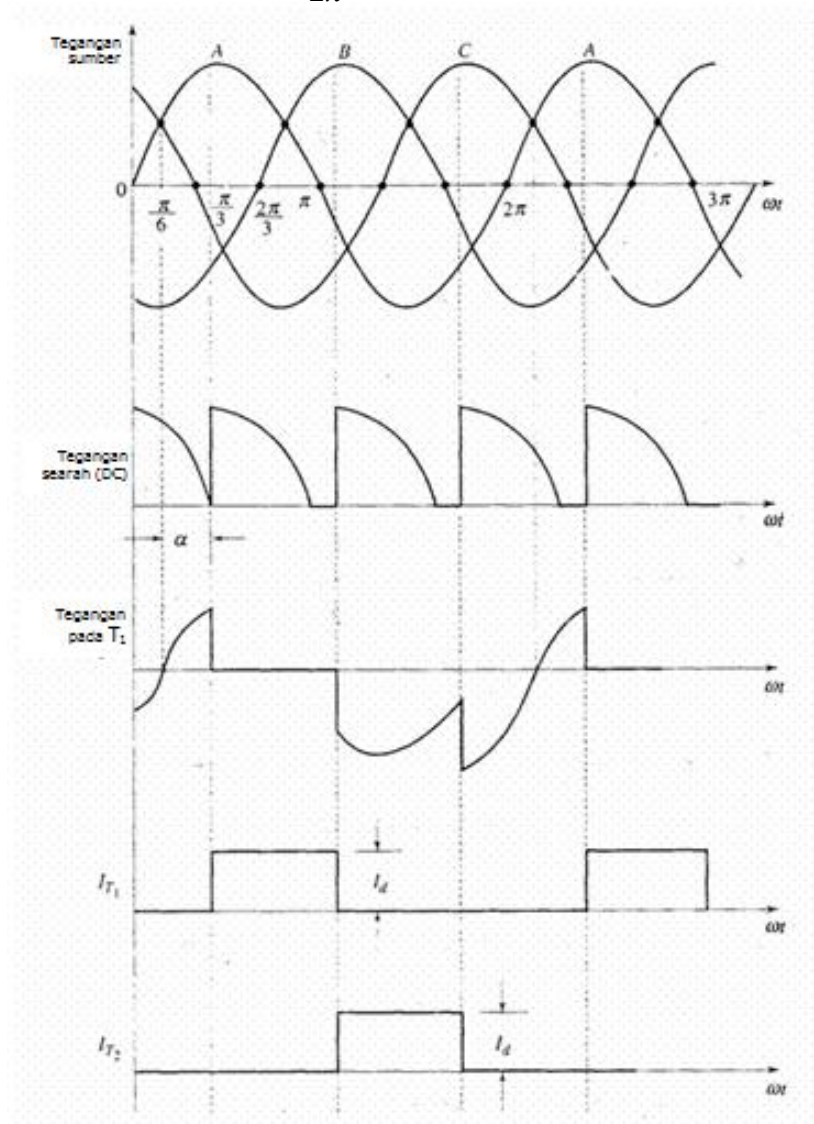
(b) Operasi konduksi diskontinyu:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos(\alpha + 30^\circ) \quad V_L = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} V_m \left[ \frac{5\pi - 3\alpha}{3\pi} + \frac{\sin(2\alpha + \pi/3)}{\pi} \right]^{1/2}$$



Gambar 4.6 Rangkaian Konverter Setengah-gelombang Tiga Fasa Beban R

Jika beban R pada rangkaian Gambar 4.6 diganti beban RL, maka bentuk gelombang yang dihasilkan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7. Nilai tegangan searah ( $V_{dc}$ ) dapat ditentukan dengan persamaan berikut:  $V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos \alpha$



Gambar 4.7 Bentuk Gelombang Konverter Setengah-gelombang Tiga Fasa Beban RL

## 2. KONVERTER GELOMBANG-PENUH TIGA-FASA

Gambar 4.8 merupakan rangkaian konverter setengah-gelombang tiga-fasa dengan beban resistif dan bentuk gelombang hasil penyearahan. Dalam rangkaian ini terdapat dua grup/ kelompok SCR, yaitu: grup positif dan grup negatif. SCR  $T_1$ ,  $T_2$ , dan  $T_3$  merupakan grup positif, sedangkan SCR  $T_4$ ,  $T_5$ , dan  $T_6$  merupakan grup negatif. Grup SCR positif akan ON ketika tegangan sumber berpolaritas positif dan Grup SCR negatif akan ON ketika tegangan sumber berpolaritas negatif.

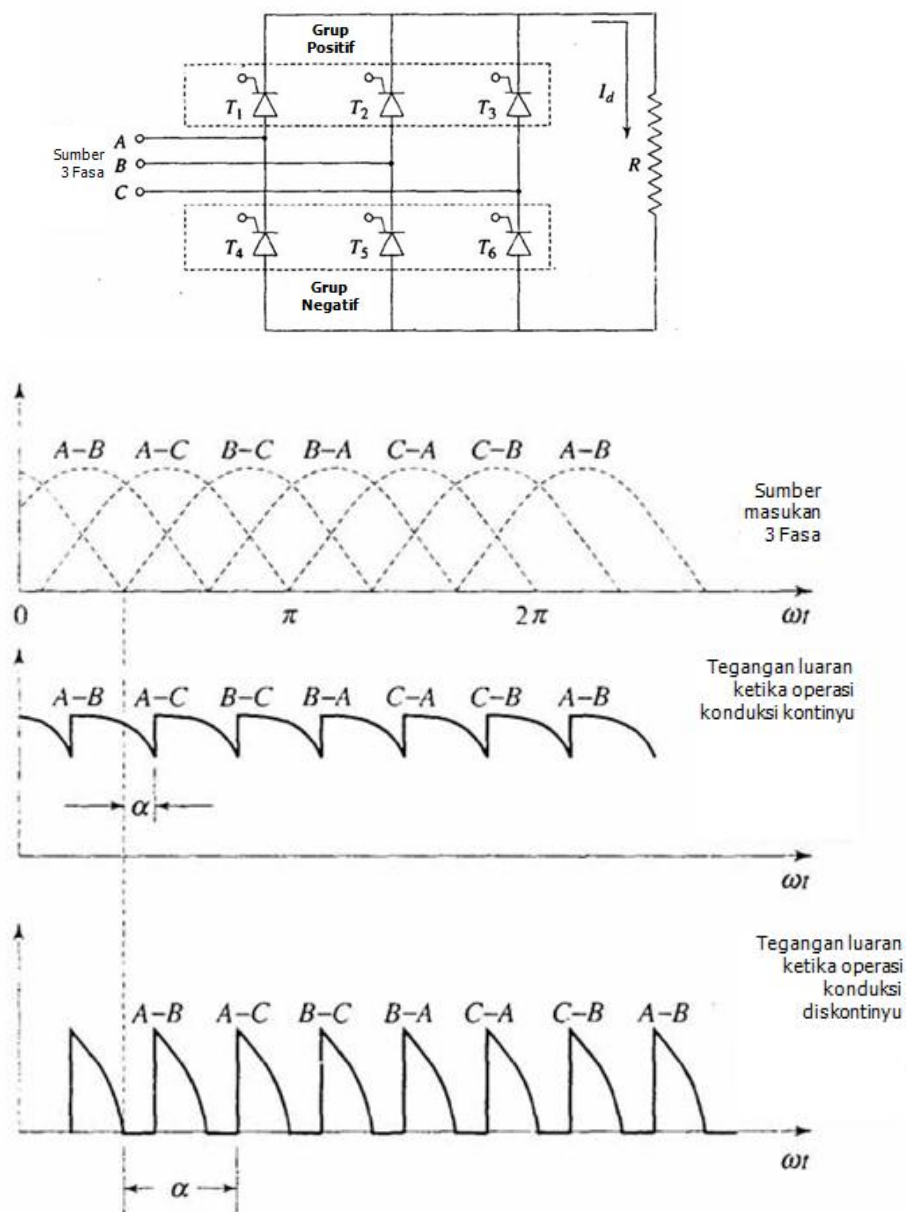
Proses pemicuan pada rangkaian ini dilakukan secara serempak masing-masing  $T_1$  dan  $T_5$ ,  $T_2$  dan  $T_6$ , serta  $T_3$  dan  $T_4$ . Terdapat dua proses pengaturan sudut pician ( $\alpha$ ), yaitu: (a) operasi konduksi kontinyu ketika  $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$  atau  $0 \leq \alpha \leq \pi/3$ , dan (b) operasi konduksi diskontinyu ketika  $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$  atau  $\pi/3 \leq \alpha \leq 2\pi/3$ . Proses pemicuan pada SCR  $T_1$ ,  $T_2$ , dan  $T_3$  dilakukan secara serempak pada masing-masing fasa.

Nilai tegangan searah rerata ( $V_{dc}$ ) pada operasi konduksi kontinyu dapat ditentukan sebagai berikut:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos \alpha$$

dan operasi konduksi diskontinyu:

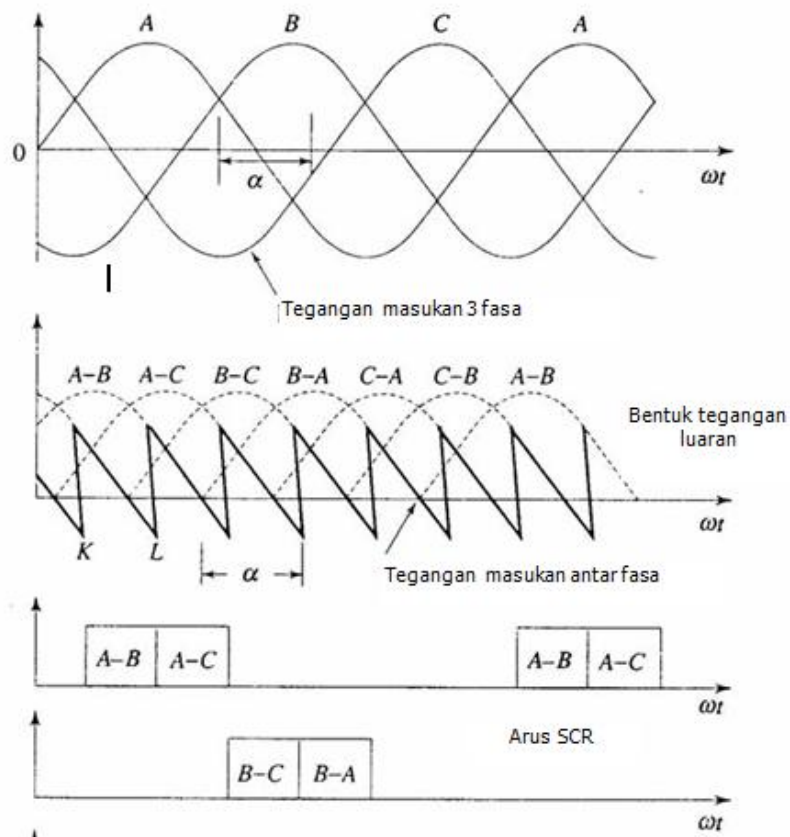
$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{m, fasa} \cos \left[ 1 + \left( \alpha + 60^\circ \right) \right]$$



Gambar 4.8 Rangkaian Konverter Gelombang-penuh Tiga Fasa Beban R

Jika beban R pada rangkaian Gambar 4.8 diganti beban RL, maka bentuk gelombang yang dihasilkan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.9. Nilai tegangan searah ( $V_{dc}$ ) dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{m,ph} \cos \alpha$$



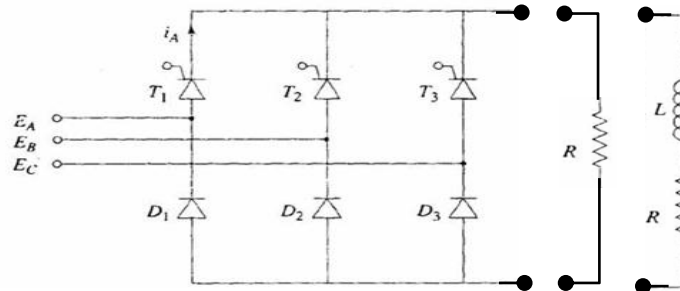
Gambar 4.9 Bentuk Gelombang Konverter Gelombang-penuh Tiga Fasa Beban RL

### b. Semikonverter Tiga-fasa

Gambar 4.10 merupakan rangkaian semikonverter tiga fasa. Proses pemicuan pada rangkaian ini terjadi ketika SCR  $T_1$  dan dioda  $D_2$ ,  $T_2$  dan dioda  $D_3$ , serta SCR  $T_3$  dan dioda  $D_1$  masing-masing dioperasikan secara serempak. Jika rangkaian semikonverter tiga fasa dihubungkan dengan R, maka persamaan untuk tegangan searah rerata ( $V_{dc}$ ) pada operasi konduksi kontinyu dan operasi konduksi diskontinyu seperti pada rangkaian konverter gelombang-penuh tiga fasa di atas. Selanjutnya, Jika rangkaian semikonverter tiga fasa dihubungkan dengan R, maka persamaan untuk tegangan searah rerata ( $V_{dc}$ ) sebesar:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_{m,ph} (1 + \cos \alpha)$$





Gambar 4.10 Rangkaian Semikonverter Tiga Fasa

#### D. PERTANYAAN

##### 1. Konverter Satu-fasa

- Jelaskan proses penyearahan pada rangkaian konverter setengah-gelombang satu fasa !
- Gambarkan bentuk gelombang tegangan masukan dan tegangan pada SCR saat OFF pada rangkaian konverter setengah-gelombang satu fasa !
- Jelaskan fungsi diode komutasi pada rangkaian konverter setengah-gelombang satu fasa beban RL !
- Jelaskan proses penyearahan pada rangkaian konverter mid-point (CT) satu fasa !
- Gambarkan bentuk gelombang tegangan masukan dan tegangan pada salah satu SCR saat OFF pada rangkaian konverter mid-point (CT) satu fasa !
- Kapankah operasi *rectifying* dan *inverting* terjadi konverter gelombang-penuh satu fasa ?
- Jelaskan proses penyearahan pada rangkaian semikonverter simetris satu fasa !

## 2. Konverter Tiga-fasa

- a. Jelaskan proses penyearahan pada rangkaian konverter setengah-gelombang tiga fasa !
- b. Gambarkan bentuk gelombang tegangan masukan dan tegangan pada salah satu SCR saat OFF pada rangkaian konverter setengah-gelombang tiga fasa !
- c. Apakah yang dimaksud operasi kontinyu dan diskontinyu pada konverter setengah-gelombang tiga fasa !
- d. Jelaskan proses penyearahan pada rangkaian konverter gelombang-penuh tiga fasa !
- e. Gambarkan bentuk gelombang tegangan masukan dan tegangan pada salah satu SCR saat OFF pada rangkaian konverter gelombang-penuh tiga fasa !
- f. Apakah yang dimaksud operasi kontinyu dan diskontinyu pada konverter gelombang-penuh tiga fasa !
- g. Jelaskan proses penyearahan pada rangkaian semikonverter tiga fasa !

## 3. Soal Essay

- a. Sebuah transformator satu fasa pada sisi primer dihubungkan dengan tegangan 120 V, 50 Hz, dan sisi sekunder dihubungkan dengan rangkaian konverter gelombang-penuh satu fasa. Jika rangkaian ini dihubungkan dengan resistor  $20 \, \Omega$ , dan dikehendaki arus beban rerata (DC) dapat diatur dari 4,5 A – 8,0 A, rencanakan jenis transformator yang digunakan (step-up atau step-down) dan sudut pemicuannya ( $\alpha$ ) ! (*Kinci jawaban: step-up,  $0^\circ < \alpha < 82,8^\circ$* )
- b. Suatu rangkaian konverter setengah-gelombang 3 fasa hubungan bintang dihubungkan dengan beban resistif  $2,5 \, \Omega$  dengan tegangan antar line 208 V, 60 Hz. Jika daya luaran yang diinginkan  $P_o = 12 \, \text{kW}$ , hitunglah (1) sudut pemicuan ( $\alpha$ ), dan (2) tegangan luaran per fasa efektif ( $V_L$ ).

## **BAB V**

### **PENGATUR TEGANGAN BOLAK-BALIK**

#### **(AC REGULATOR)**

#### **KOMPETENSI DASAR**

Setelah mengikuti materi ini diharapkan mahasiswa memiliki kompetensi:

- Menguasai karakteristik ac regulator *unidirectional* dan *bidirectional* satu fasa dan tiga fasa
- Menguasai dasar prinsip kerja ac regulator *unidirectional* dan *bidirectional* satu fasa dan tiga fasa.
- Menguasai dasar prinsip kerja rangkaian *cycloconverter* satu fasa dan tiga fasa.

#### **STANDAR KOMPETENSI**

Mampu menganalisis rangkaian ac regulator *unidirectional* dan *bidirectional* satu fasa dan tiga fasa, serta rangkaian *cycloconverter* satu fasa dan tiga fasa.

---

#### **A. PENDAHULUAN**

Ada dua jenis rangkaian pengaturan tegangan tegangan bolak-balik jika ditinjau dari frekuensi luaran yang dihasilkan, yaitu: (a) rangkaian pengaturan tegangan bolak-balik dengan hasil luran frekuensi yang tetap seperti sumbernya, dan (b) rangkaian pengaturan tegangan bolak-balik dengan hasil luran frekuensi yang dapat diatur. Rangkaian pertama disebut pengatur tegangan bolak-balik (*ac regulators*), yakni suatu rangkaian elektronika daya yang dapat mengubah sumber tegangan bolak-balik (AC) menjadi sumber tegangan AC yang dapat diatur luarnya dengan frekuensi tetap.

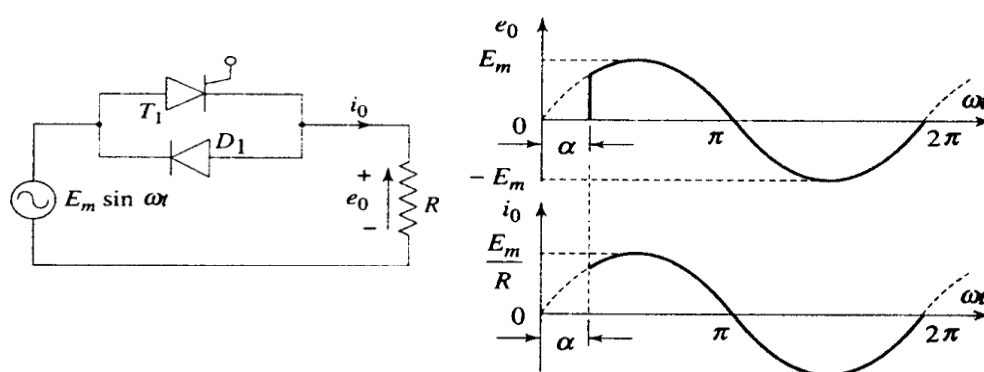
Rangkaian kedua disebut *cycloconverter*, yakni suatu rangkaian elektronika daya yang dapat mengubah sumber tegangan bolak-balik (AC) menjadi sumber tegangan AC dengan frekuensi yang dapat diatur luarnya. Komponen semikonduktor daya yang digunakan umumnya berupa SCR yang beroperasi sebagai sakelar dan pengatur.

Jenis sumber tegangan masukan untuk mencatu rangkaian, baik *ac regulator* maupun *cycloconverter*, dapat digunakan tegangan bolak-balik satu fasa maupun tiga fasa. Rangkaian *ac regulator* dapat dilakukan dalam bentuk *ac regulator* setengah gelombang (*unidirectional*) dan *ac regulator* gelombang-penuh (*bidirectional*). Pembebanan pada rangkaian penyearah terkendali juga dipasang beban resistif atau beban resistif-induktif.

## B. AC REGULATOR SATU-FASA

### 1. AC Regulator Unidirectional Satu-fasa

Gambar 5.1 merupakan rangkaian *ac regulator unidirectional* satu-fasa dengan beban resistif dan bentuk gelombang hasil pengaturan. Proses pengaturan tegangan dapat dijelaskan melalui Gambar 5.1, ketika setengah periode pertama,  $T_1$  dipicu sebesar  $\alpha$ , maka  $T_1$  menjadi ON dari  $\alpha - \pi$ . Selanjutnya, saat setengah periode kedua,  $D_1$  selalu ON dari  $\pi - 2\pi$ .



Gambar 5.1 Rangkaian AC Regulator Unidirectional Satu Fasa Beban R

Ditinjau dari tegangan luaran yang dihasilkan, terdapat dua jenis komponen tegangan, yaitu : (1) tegangan bolak-balik rerata ( $V_{ac}$ ) dan tegangan bolak-balik efektif (*root mean square-rms*),  $V_L$ . Nilai tegangan luaran masing-masing adalah :

$$e_s = E_m \sin \omega t = E_s \sqrt{2} \sin \omega t$$

$$V_{ac} = \frac{E_m}{2\pi} (\cos \alpha - 1) \quad V_L = E_s \left[ \frac{1}{2\pi} (2\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}) \right]^{1/2}$$

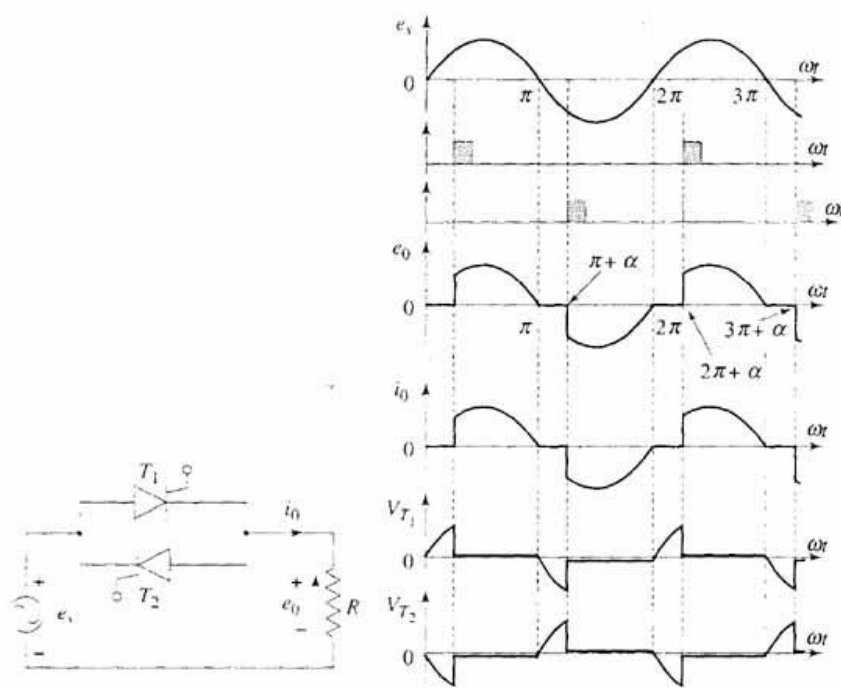
Dari persamaan di atas dapat dinyatakan bahwa jika  $\alpha$  diatur dari 0 sampai dengan  $\pi$  maka diperoleh hasil pengaturan  $V_L$  dari  $E_s$  sampai dengan  $E_s/\sqrt{2}$  dan hasil pengaturan  $V_{ac}$  dari 0 sampai dengan  $-E_m/\pi$ .

## 2. AC Regulator Bidirectional Satu-fasa

Gambar 5.2 merupakan rangkaian *ac regulator bidirectional* satu-fasa dengan beban resistif dan bentuk gelombang hasil pengaturan. Komponen SCR  $T_1$  bekerja pada setengah periode pertama (0 sampai dengan  $\pi$ ), dan komponen SCR  $T_2$  bekerja pada setengah periode kedua ( $\pi$  sampai dengan  $2\pi$ ). Jika SCR  $T_1$  dan  $T_2$  masing-masing dipicu sebesar  $\alpha$ , maka nilai tegangan bolak-balik efektif (*root mean square-rms*),  $V_L$  dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$V_L = E_s \left[ \frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}) \right]^{1/2}$$

Dari persamaan di atas dapat dinyatakan bahwa jika  $\alpha$  diatur dari 0 sampai dengan  $\pi$  maka diperoleh hasil pengaturan  $V_L$  dari  $E_s$  sampai dengan nol.



Gambar 5.2 Rangkaian AC Regulator bidirectional Satu Fasa Beban R

## C. AC REGULATOR TIGA-FASA

### 1. AC Regulator Unidirectional Tiga-fasa

Gambar 5.3 merupakan rangkaian *ac regulator unidirectional* tiga-fasa dengan beban resistif sambungan bintang (Y) dan bentuk gelombang hasil pengaturan. Proses pemicuan pada rangkaian ini terjadi ketika SCR  $T_1$  dan dioda  $D_4$ ,  $T_3$  dan dioda  $D_6$ , serta SCR  $T_5$  dan dioda  $D_2$  masing-masing fasa dioperasikan secara serempak. Arus beban masing-masing fasa ditentukan oleh pengaturan picuan pada SCR  $T_1$ ,  $T_3$ , dan  $T_5$ , sedangkan dioda  $D_2$ ,  $D_4$ , dan  $D_6$  digunakan untuk aliran balik arus.

Jika  $V_s$  merupakan tegangan efektif dari sumber tegangan fasa masukan, maka tegangan fasa masukan sesaat dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$V_{AN} = V_s \sqrt{2} \sin \omega t \quad V_{BN} = V_s \sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad V_{CN} = V_s \sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$

maka:

$$V_{AB} = V_s \sqrt{6} \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \quad V_{BC} = V_s \sqrt{6} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad V_{CA} = V_s \sqrt{6} \sin(\omega t - \frac{7\pi}{6})$$

Tegangan efektif luaran ( $V_L$ ) yang dihasilkan diperoleh dari tiga pengaturan sudut picuan ( $\alpha$ ) berikut:

(a) Untuk:  $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ , maka:

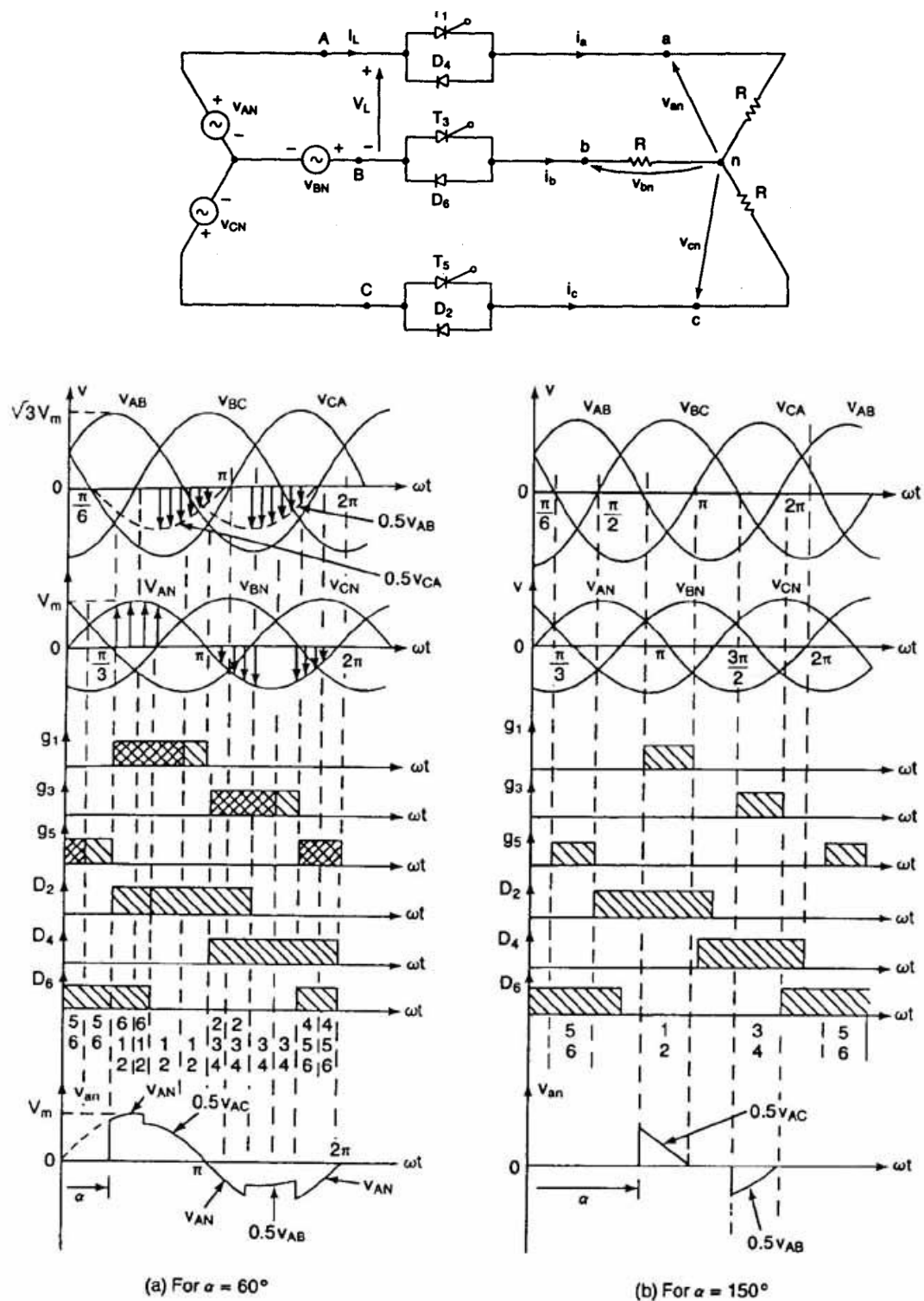
$$V_L = \sqrt{3}V_s \left[ \frac{1}{\pi} \left( \frac{\pi}{3} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8} \right) \right]^{1/2}$$

(b) Untuk :  $90^\circ \leq \alpha < 120^\circ$ , maka:

$$V_L = \sqrt{3}V_s \left[ \frac{1}{\pi} \left( \frac{11\pi}{24} - \frac{\alpha}{2} \right) \right]^{1/2}$$

(c) Untuk :  $120^\circ \leq \alpha < 210^\circ$ , maka:

$$V_L = \sqrt{3}V_s \left[ \frac{1}{\pi} \left( \frac{7\pi}{24} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{16} - \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right]^{1/2}$$



Gambar 5.3 Rangkaian AC Regulator Unidirectional Tiga Fasa Beban R



## 2. AC Regulator Bidirectional Tiga-fasa

Gambar 5.4 merupakan rangkaian *ac regulator bidirectional* tiga-fasa dengan beban resistif sambungan bintang (Y) dan bentuk gelombang hasil pengaturan. Proses pemicuan pada rangkaian ini sama seperti pada pengaturan unidirectional tiga-fasa, bedanya terletak pada  $T_2$ ,  $T_4$ , dan  $T_6$  yang difungsikan seperti dioda  $D_2$ ,  $D_4$ , dan  $D_6$  untuk aliran balik arus pada pengaturan unidirectional tiga-fasa. Dengan demikian, pemicuan dilakukan pada SCR  $T_1$  dan dioda  $T_4$ ,  $T_3$  dan dioda  $T_6$ , serta SCR  $T_5$  dan dioda  $T_2$  masing-masing fasa dioperasikan secara serempak.

Jika  $V_s$  merupakan tegangan fasa masukan sesaat seperti pada rangkaian unidirectional tiga-fasa sambungan bintang, maka tegangan efektif luaran ( $V_L$ ) yang dihasilkan diperoleh dari tiga pengaturan sudut pician ( $\alpha$ ) berikut:

(a) Untuk:  $0^\circ \leq \alpha < 60^\circ$

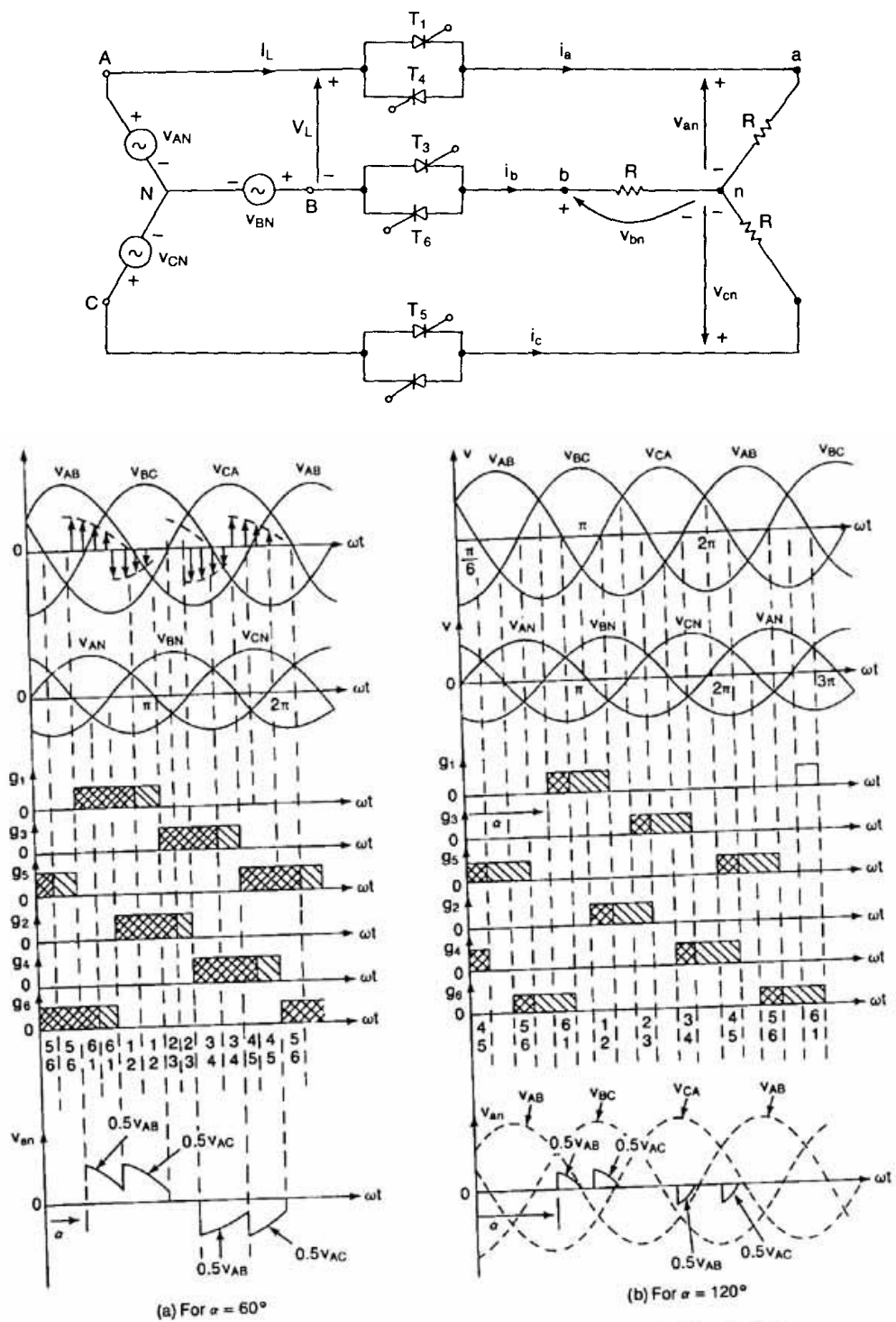
$$V_L = \sqrt{6}V_s \left[ \frac{1}{\pi} \left( \frac{\pi}{6} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8} \right) \right]^{1/2}$$

(b) Untuk:  $60^\circ \leq \alpha < 90^\circ$

$$V_L = \sqrt{6}V_s \left[ \frac{1}{\pi} \left( \frac{\pi}{12} + \frac{3 \sin 2\alpha}{16} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right]^{1/2}$$

(c) Untuk:  $90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$

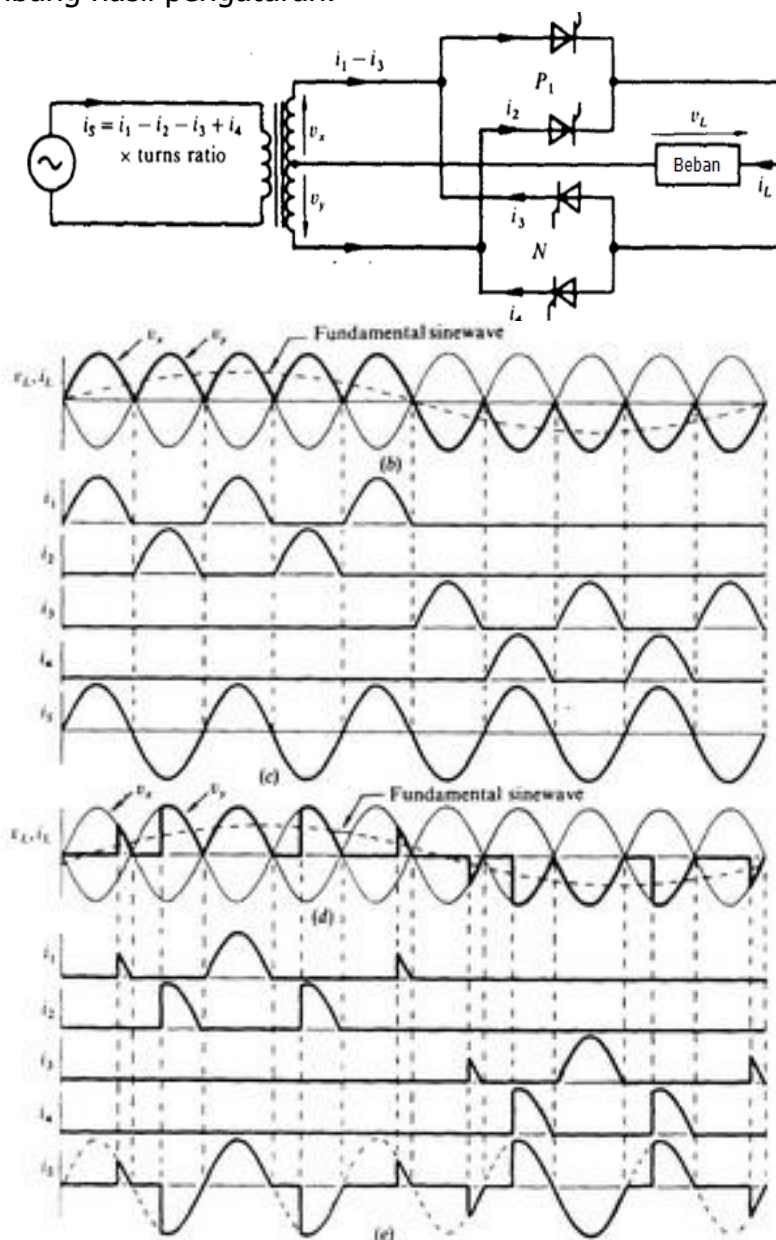
$$V_L = \sqrt{6}V_s \left[ \frac{1}{\pi} \left( \frac{5\pi}{24} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{16} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right]^{1/2}$$



Gambar 5.4 Rangkaian AC Regulator Unidirectional Tiga Fasa Sambungan Bintang Beban R

#### D. CYCLOCONVERTER SATU FASA

*Cycloconverter* satu fasa merupakan suatu rangkaian yang mengubah sumber tegangan masukan satu fasa dengan frekuensi tertentu menjadi tegangan luaran satu fasa dengan frekuensi lebih kecil dari frekuensi sumber masukan. Gambar 5.5 merupakan rangkaian dasar *cycloconverter* satu fasa dengan beban resistif dan bentuk gelombang hasil pengaturan.



Gambar 5.5 Cycloconverter Satu Fasa

Untuk menghasilkan pengaturan frekuensi, dalam Gambar 5.5, terdapat dua grup konverter, yaitu: grup konverter P dan grup konverter N. Grup konverter P digunakan untuk menghasilkan setengah periode atau siklus pertama yang selalu positif, sedangkan grup konverter N digunakan untuk menghasilkan setengah periode atau siklus berikutnya yang selalu negatif. Pada Gambar 5.5 digunakan transformator dengan CT yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan  $V_x$  dan  $V_y$  seperti ditunjukkan pada Gambar 5.5 (b) di atas.

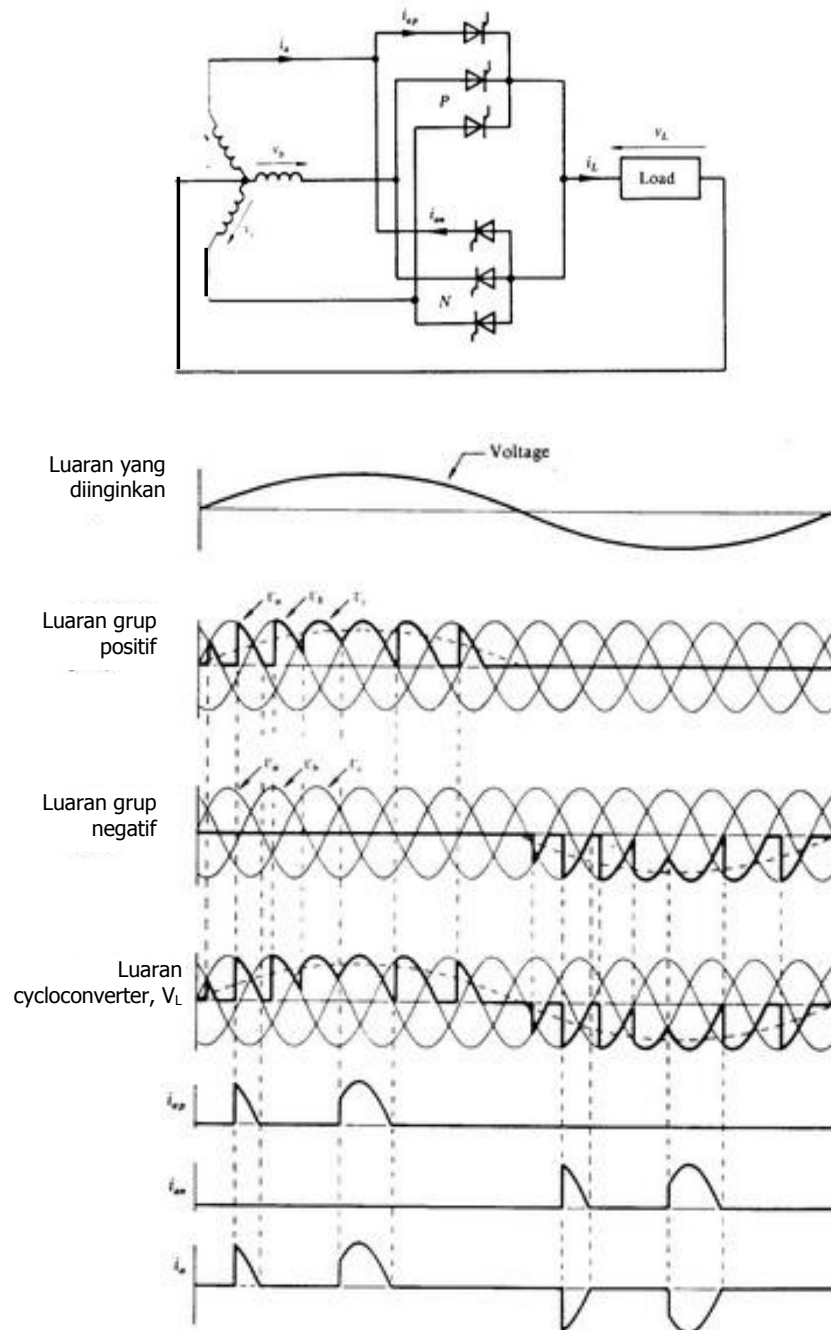
Jika Gambar 5.5 digunakan untuk menghasilkan frekuensi luaran seperlima dari frekuensi sumber, seperti Gambar 5.5 (b), maka grup konverter P harus dikonduksikan untuk lima setengah siklus untuk menghasilkan setengah siklus positif, dan grup konverter N dikonduksikan untuk lima setengah siklus berikutnya untuk menghasilkan setengah siklus negatif. Dengan demikian, urutan konduksi SCR pada grup konverter P untuk menghasilkan setengah siklus positif adalah  $T_1, T_2, T_1, T_2, T_1$  yang dipicu tanpa waktu tunda (*delay*), kemudian dilanjutkan urutan konduksi SCR pada grup konverter N untuk menghasilkan setengah siklus negatif, yaitu  $T_3, T_4, T_3, T_4, T_3$  dipicu tanpa waktu tunda (*delay*).

Selanjutnya, jika masing-masing lima setengah siklus pada grup konverter P dan N dipicu dengan sudut picuan tertentu seperti pada Gambar 5.5 (d), maka dengan urutan proses kerja SCR seperti di atas akan dihasilkan tegangan dengan frekuensi seperlima lebih kecil dari sumbernya (ditunjukkan dengan garis putus-putus) seperti ditunjukkan pada Gambar 5.5 (c).

## **E. CYCLOCONVERTER TIGA FASA MENJADI SATU FASA**

Gambar 5.6 merupakan rangkaian *cycloconverter* yang mengubah sumber tegangan masukan tiga fasa dengan frekuensi

tertentu menjadi tegangan luaran satu fasa dengan frekuensi lebih kecil dari frekuensi sumber masukan. Gambar 5.6 merupakan rangkaian dasar *cycloconverter* tiga fasa menjadi satu fasa dengan beban resistif dan bentuk gelombang hasil pengaturan.



Gambar 5.6 Cycloconverter Tiga Fasa menjadi Satu Fasa

Seperti halnya pada cycloconverter satu fasa di atas, dalam Gambar 5.6, terdapat dua grup konverter, yaitu: grup konverter P dan grup konverter N. Grup konverter P digunakan untuk menghasilkan setengah periode atau siklus pertama yang selalu positif, sedangkan grup konverter N digunakan untuk menghasilkan setengah periode atau siklus berikutnya yang selalu negatif. Pada Gambar 5.6, tegangan fasa pada masing-masing, yaitu:  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$ , digunakan sebagai dasar pembentukan setengah siklus positif dan negatif dari tegangan luaran yang diinginkan.

Jika tegangan luaran yang diinginkan seperti pada Gambar 5.6, maka grup konverter P harus dikonduksikan untuk enam setengah siklus ( $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  dan  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  positif) untuk menghasilkan setengah siklus positif, dan grup konverter N dikonduksikan untuk enam setengah siklus berikutnya ( $V_c$ ,  $V_b$ ,  $V_a$  dan  $V_c$ ,  $V_b$ ,  $V_a$  negatif) untuk menghasilkan setengah siklus negatif.

## F. PERTANYAAN

### 1. AC Regulator Satu-fasa

- Jelaskan proses pengaturan tegangan AC pada rangkaian AC regulator *unidirectional* satu fasa !
- Gambarkan bentuk gelombang tegangan masukan dan tegangan pada SCR pada rangkaian AC regulator *unidirectional* satu fasa !
- Gambarkan bentuk gelombang tegangan masukan dan tegangan pada dioda pada rangkaian AC regulator *unidirectional* satu fasa !
- Jelaskan proses pengaturan tegangan AC pada rangkaian AC regulator *bidirectional* satu fasa !
- Gambarkan bentuk gelombang tegangan masukan dan tegangan pada salah satu SCR pada rangkaian AC regulator *bidirectional* satu fasa !

## 2. AC Regulator Tiga-fasa

- a. Jelaskan proses pengaturan tegangan AC pada rangkaian AC regulator *unidirectional* tiga fasa sambungan bintang!
- b. Gambarkan bentuk gelombang tegangan masukan dan tegangan pada SCR pada rangkaian AC regulator *unidirectional* tiga fasa sambungan bintang!
- c. Jelaskan proses pengaturan tegangan AC pada rangkaian AC regulator *bidirectional* tiga fasa sambungan bintang!
- d. Gambarkan bentuk gelombang tegangan masukan dan tegangan pada salah satu SCR pada rangkaian AC regulator *bidirectional* tiga fasa sambungan bintang!

## 3. Cycloconverter

- a. Gambarkan rangkaian dasar cycloconverter satu fasa ? Jelaskan fungsi kelompok konverter positif dan negatif !
- b. Jika sumber tegangan masukan dengan frekuensi 50 Hz pada cycloconverter satu fasa, jelaskan urutan kerja SCR agar menghasilkan frekuensi 12,5 Hz dan gambarkan bentuk tegangan masukan dan tegangan luarannya !

## 4. Soal Essay

- a. Suatu rangkaian ac regulator unidirectional dengan sumber masukan 230 V, 50 Hz dihubungkan dengan beban resistif 6  $\Omega$ . Jika sudut pemicuan pada SCR sebesar  $90^\circ$ , hitunglah tegangan luaran efektif, faktor daya, dan arus rerata masukan. (*Kunci jawaban: 199,19V; 0,866 lag; -8,62A*)
- b. Suatu rangkaian ac regulator bidirectional dengan sumber masukan 120 V, 60 Hz dihubungkan dengan beban resistif 10  $\Omega$ . Jika sudut pemicuan pada SCR<sub>1</sub> dan SCR<sub>2</sub> sebesar  $90^\circ$ , hitunglah tegangan

luar efektif, faktor daya, dan arus rerata dan efektif pada SCR.  
(Kunci jawaban: 84,85V; 0,707 lag; 2,7A dan 6A).

- c. Sebuah rangkaian AC regulator unidirectional 3 fasa dihubungkan dengan resistif sebesar 10 ohm yang dihubungkan bintang. Jika tegangan masukan antar line sebesar 208 V, 50 Hz dan diatur dengan sudut pemicuan  $60^\circ$ , tentukan: (1) tegangan luaran per fasa, dan (2) faktor daya. (Kunci jawaban: 110,86V; 0,924 lag)



## **BAB VI**

### **PEMANGKAS (CHOPPER)**

#### **KOMPETENSI DASAR**

Setelah mengikuti materi ini diharapkan mahasiswa memiliki kompetensi: Menguasai dasar prinsip kerja *chopper* penaik tegangan (*step-up*), penurun tegangan (*step-down*), dan penaik-penurun tegangan (*step-up/down*) dari tegangan searah (DC).

#### **STANDAR KOMPETENSI**

Mampu menganalisis rangkaian *chopper* penaik tegangan (*step-up*), penurun tegangan (*step-down*), dan penaik-penurun tegangan (*step-up/down*).

---

#### **A. PENDAHULUAN**

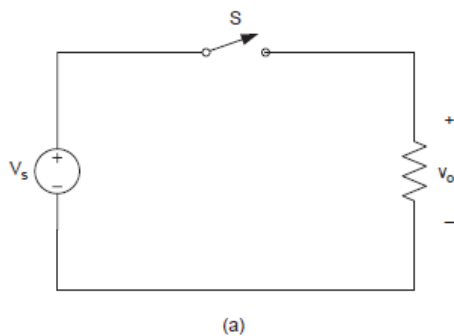
Chopper (pemangkas) merupakan suatu rangkaian yang digunakan untuk mengubah sumber masukan tegangan DC tetap menjadi sumber luaran tegangan DC yang dapat dikendalikan/diatur. Komponen semikonduktor daya yang digunakan dapat berupa SCR, transistor, dan MOSFET yang beroperasi sebagai sakelar dan pengatur.

Ditinjau dari proses pengaturan, chopper dapat dibedakan dalam tiga jenis, yaitu : chopper penurun tegangan (*step-down*), chopper penaik tegangan (*step-up*), dan chopper penaik-penurun tegangan (*step up-down*).

#### **B. CHOPPER PENURUN (STEP-DOWN) TEGANGAN**

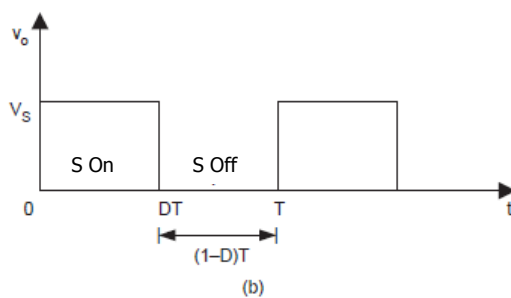
Gambar 6.1 merupakan prinsip dasar kerja chopper penurun tegangan. Jika sakelar S di-ON-kan sampai dengan DT, maka tegangan

masukannya  $V_s$  akan dipindahkan ke beban menjadi  $V_o$ , selanjutnya jika sakelar  $S$  di-off-kan sampai dengan  $T$ , tegangan pada beban menjadi nol. Hal ini menunjukkan bahwa nilai tegangan luaran ditentukan oleh proses ON dan OFF sakelar  $S$ . Ratio antara waktu sakelar OFF terhadap jumlah waktu sakelar ON dan OFF disebut siklus kerja (*duty cycle*).



Nilai siklus kerja ( $\alpha$  atau  $D$ ) ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\alpha = D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} = f \cdot t_{on}$$

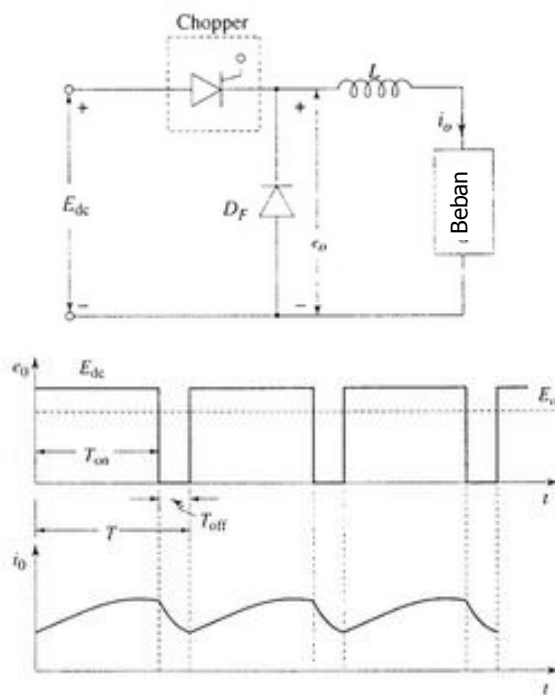


Gambar 6.1 Rangkaian Prinsip Kerja Dasar Chopper

Persamaan di atas dapat dijelaskan bahwa pengaturan siklus kerja dapat dilakukan melalui dua operasi, yaitu: (a) operasi frekuensi konstan, dan (b) operasi frekuensi variabel. Operasi frekuensi konstant dilakukan dengan cara menjaga frekuensi selalu konstan dan  $t_{on}$  diatur.

Pengaturan  $t_{on}$  ini lazim disebut pengaturan lebar pulsa atau modulasi lebar pulsa (*pulse width modulation*). Operasi frekuensi variabel dilakukan dengan mengatur waktu  $t_{on}$  dan menjaga frekuensi selalu konstan. Pengaturan ini biasanya disebut modulasi frekuensi (*frequency modulation*).

Gambar 6.2 mengilustrasikan prinsip kerja chopper penurun tegangan yang ditunjukkan dengan SCR di dalam kotak. Selama periode  $T_{on}$ , ketika chopper ON, tegangan sumber akan terhubung dengan terminal beban.



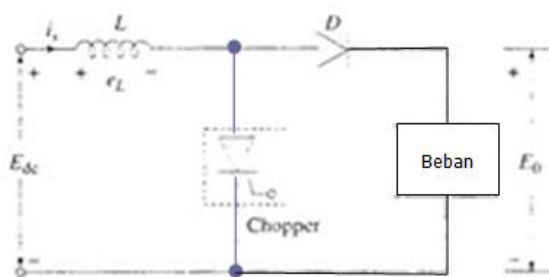
Gambar 6.2 Rangkaian Chopper Penurun Tegangan

Selanjutnya, selama perida  $T_{off}$ , ketika chopper OFF, arus beban akan mengalir pada dioda komutasi ( $D_f$ ), sehingga terminal beban terhubung singkat dengan  $D_f$  dan tegangan beban menjadi nol selama  $T_{off}$ . Dengan demikian, tegangan searah (DC) pada beban dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$e_o = E_{dc} \alpha$$

### C. CHOPPER PENAİK (STEP-UP) TEGANGAN

Gambar 6.3 merupakan rangkaian chopper penaik tegangan. Jika chopper di-ON-kan, induktor ( $L$ ) akan terhubung dengan tegangan sumber dan induktor akan menyimpan energi selama perioda  $T_{on}$ .



Gambar 6.3 Rangkaian Chopper Penaik Tegangan

Selanjutnya, jika chopper di-OFF-kan, induktor akan mengalirkan arus ke dioda ( $D$ ) dan ke beban, serta terjadi tegangan emf pada induktor sehingga tegangan pada beban sebesar:

$$E_o = E_{dc} + L \frac{di_s}{dt}$$

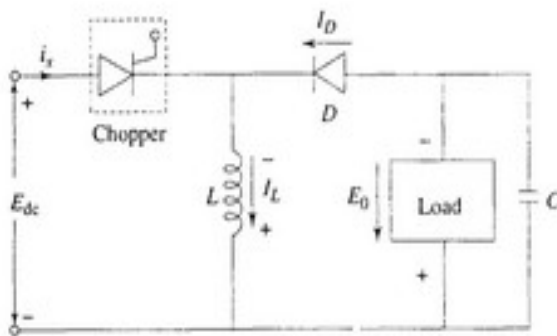
Jika energi yang disimpan saat  $T_{on}$ ,  $W_i$ , sama dengan energi yang dilepaskan saat  $T_{off}$ ,  $W_o$ , maka tegangan luaran pada beban ( $E_o$ ) dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$E_o = \frac{1}{1-\alpha} E_{dc}$$

#### D. CHOPPER PENAIK-PENURUN (STEP-UP/DOWN) TEGANGAN

Gambar 6.4 merupakan rangkaian chopper penaik-penurun tegangan. Jika chopper di-ON-kan, induktor ( $L$ ) akan terhubung dengan tegangan sumber dan induktor akan menyimpan energi selama periode  $T_{on}$ . Selanjutnya, jika chopper di-OFF-kan, induktor melepaskan energi ke dioda ( $D$ ) dan ke beban. Jika energi yang disimpan saat  $T_{on}$ ,  $W_i$ , sama dengan energi yang dilepaskan saat  $T_{off}$ ,  $W_o$ , maka tegangan luaran pada beban ( $E_o$ ) dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$E_o = \frac{\alpha}{1-\alpha} E_{dc}$$



Gambar 6.4 Rangkaian Chopper Penaik/ Penurun Tegangan

Persamaan di atas dapat dinyatakan bahwa jika siklus kerja chopper ( $\alpha$ ) lebih besar atau sama dengan 0,5 akan dihasilkan chopper penaik tegangan, dan jika siklus kerja chopper ( $\alpha$ ) lebih kecil atau sama dengan 0,5 akan dihasilkan chopper penurun tegangan.

**E. PERTANYAAN****1. Chopper**

- a. Apakah yang dimaksud dengan siklus kerja? Jelaskan dengan disertai gambar!
- b. Berapakah nilai minimum dan maksimum dari siklus kerja?
- c. Jelaskan pengaruh frekuensi pensakelaran terhadap tegangan output chopper !
- d. Jelaskan prinsip kerja rangkaian chopper penurun tegangan!
- e. Jelaskan fungsi induktor dan prinsip kerja rangkaian chopper penaik tegangan!
- f. Jelaskan fungsi dioda komutasi pada rangkaian rangkaian chopper penaik tegangan!
- g. Jelaskan prinsip kerja rangkaian chopper penaik-penurun tegangan!

**2. Soal Essay**

- a. Berapakah nilai  $t_{on}$  dan tegangan luaran chopper jika frekuensinya 200 Hz, siklus kerja 0,25, dan tegangan inputnya 12 volt ?
- b. Suatu rangkaian chopper dihubungkan sumber input sebesar 12 volt dengan frekuensi pensakelaran 200 Hz. Jika siklus kerja chopper 0,25, hitunglah nilai  $t_{on}$  dan tegangan output chopper dari rangkaian chopper tersebut !

## **BAB VII**

### **INVERTER**

#### **KOMPETENSI DASAR**

Setelah mengikuti materi ini diharapkan mahasiswa memiliki kompetensi:

- Menguasai karakteristik inverter satu fasa dan tiga fasa
- Menguasai dasar prinsip kerja inverter satu fasa dan tiga fasa

#### **STANDAR KOMPETENSI**

Mampu menganalisis rangkaian inverter satu fasa dan tiga fasa

---

#### **A. PENDAHULUAN**

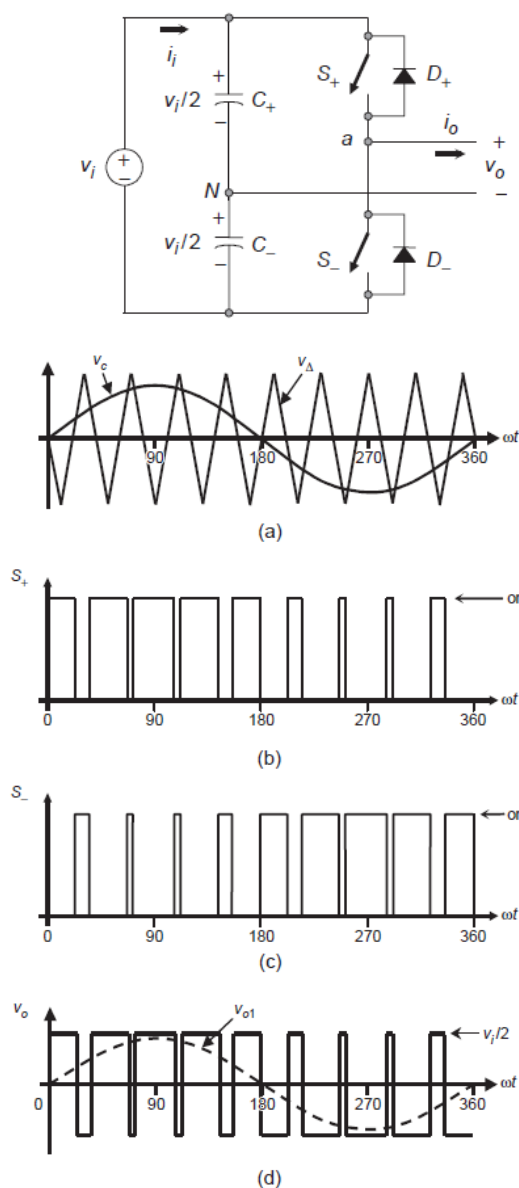
Inverter merupakan suatu rangkaian yang digunakan untuk mengubah sumber tegangan DC tetap menjadi sumber tegangan AC dengan frekuensi tertentu. Komponen semikonduktor daya yang digunakan dapat berupa SCR, transistor, dan MOSFET yang beroperasi sebagai sakelar dan pengubah. Inverter dapat diklasifikasikan dalam dua jenis, yaitu: inverter satu fasa dan inverter tiga fasa. Setiap jenis inverter tersebut dapat dikelompokkan dalam empat kategori ditinjau dari jenis rangkaian komutasi pada SCR, yaitu: (1) modulasi lebar pulsa, (2) inverter resonansi, (3) inverter komutasi bantu, dan (4) inverter komutasi komplemen.

Inverter disebut sebagai inverter catu-tegangan (*voltage-fed inverter-VFI*) apabila tegangan masukan selalu dijaga konstan, disebut inverter catu-arus (*current-fed inverter-CFI*) apabila arus masukan selalu dipelihara konstan, dan disebut inverter variabel (*variable dc linked inverter*) apabila tegangan masukan dapat diatur. Selanjutnya, jika ditinjau dari proses konversi, inverter dapat dibedakan dalam tiga

jenis, yaitu inverter : seri, paralel, dan jembatan. Inverter jembatan dapat dibedakan menjadi inverter setengah-jembatan (*half-bridge*) dan jembatan (*bridge*). Dalam Bab ini akan difokuskan pada pembahasan inverter jembatan baik untuk inverter satu fasa maupun tiga fasa.

## B. INVERTER SATU-FASA

### 1. INVERTER SETENGAH-JEMBATAN SATU-FASA



Gambar 7.1  
Rangkaian Inverter Setengah-jembatan Satu Fasa

Gambar 7.1 merupakan rangkaian dasar inverter setengah-jembatan satu-fasa dengan beban resistif dan bentuk gelombangnya. Dalam rangkaian Gambar 7.1 diperlukan dua buah kapasitor untuk menghasilkan titik N agar tegangan pada setiap kapasitor  $V_i/2$  dapat dijaga konstan. Sakelar  $S_+$  dan  $S_-$  merepresentasikan sakelar elektronis yang mencerminkan komponen semikonduktor daya sebagaimana diuraikan di muka. Sakelar  $S_+$  dan  $S_-$  tidak boleh bekerja secara serempak/ simultan, karena akan terjadi hubung singkat rangkaian.

Kondisi ON dan OFF dari sakelar  $S_+$  dan  $S_-$  ditentukan dengan teknik modulasi, dalam hal ini menggunakan prinsip PWM. Prinsip PWM dalam rangkaian ini membandingkan antara sinyal modulasi  $V_c$  (dalam hal ini tegangan bolak-balik luaran yang diharapkan) dengan sinyal pembawa dengan bentuk gelombang gigi-gergaji ( $V_\Delta$ ). Secara praktis, jika  $V_c > V_\Delta$  maka sakelar  $S_+$  akan ON dan sakelar  $S_-$  akan OFF, dan jika  $V_c < V_\Delta$  maka sakelar  $S_+$  akan OFF dan sakelar  $S_-$  akan ON.

Untuk menghasilkan tegangan luaran ( $V_o$ ) satu fasa, terdapat tiga kondisi jika Sakelar  $S_+$  dan  $S_-$  dioperasikan sebagaimana ditunjukkan pada tabel berikut:

Kondisi Ke-	Kondisi	$V_o$	Komponen yang Aktif
1	$S_+$ On dan $S_-$ Off	$V_i/2$	$S_+$ jika $i_o > 0$ $D_+$ jika $i_o < 0$
2	$S_+$ Off dan $S_-$ On	$-V_i/2$	$D_-$ jika $i_o > 0$ $S_-$ jika $i_o < 0$
3	$S_+$ dan $S_-$ Off	$-V_i/2$ $V_i/2$	$D_-$ jika $i_o > 0$ $D_+$ jika $i_o < 0$

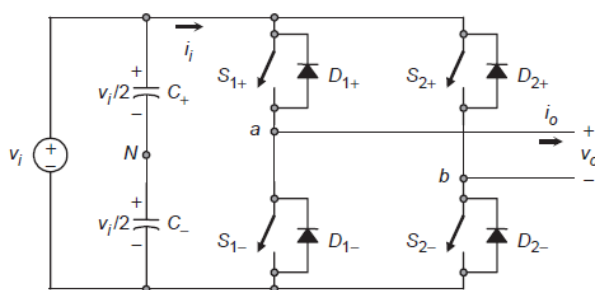
## 2. INVERTER JEMBATAN SATU-FASA

Gambar 7.2 merupakan rangkaian dasar inverter jembatan satu-fasa dengan beban resistif dan bentuk gelombangnya. Seperti halnya pada rangkaian inverter setengah-jembatan di atas, dalam rangkaian ini diperlukan dua buah kapasitor untuk menghasilkan titik N agar tegangan pada setiap kapasitor  $V_i/2$  dapat dijaga konstan. Terdapat dua sisi sakelar, yaitu: sakelar  $S_{1+}$  dan  $S_{1-}$  serta  $S_{2+}$  dan  $S_{2-}$ . Masing-masing sisi sakelar ini, sakelar  $S_{1+}$  dan  $S_{1-}$  dan atau  $S_{2+}$  dan  $S_{2-}$ , tidak boleh bekerja secara serempak/ simultan, karena akan terjadi hubung singkat rangkaian. Kondisi ON dan OFF dari kedua sisi sakelar ditentukan dengan teknik modulasi, dalam hal ini menggunakan prinsip PWM, seperti jelaskan pada inverter setengah-jembatan satu fasa di atas.

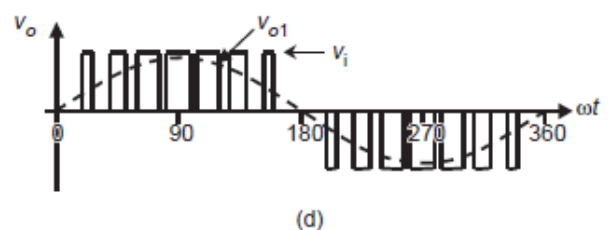
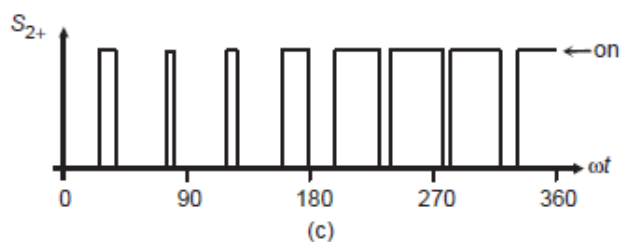
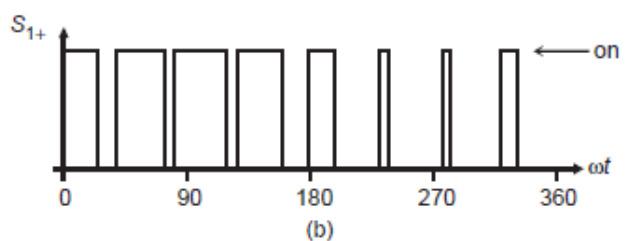
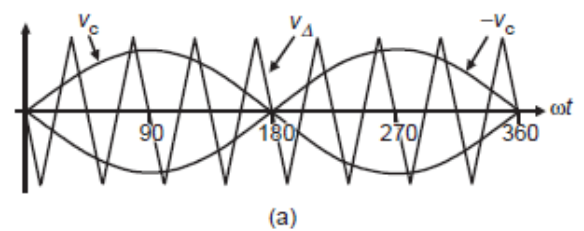


Untuk menghasilkan tegangan luaran ( $V_o$ ) satu fasa, terdapat lima kondisi jika sakelar  $S_{1+}$ ,  $S_{1-}$ ,  $S_{2+}$ , dan  $S_{2-}$  dioperasikan sebagaimana ditunjukkan pada tabel berikut:

Kondisi Ke-	Kondisi	$V_{aN}$	$V_{bN}$	$V_o$	Komponen yang Aktif
1	$S_{1+}$ & $S_{2-}$ On dan $S_{1-}$ & $S_{2+}$ Off	$V_i/2$	$-V_i/2$	$V_i$	$S_{1+}$ & $S_{2-}$ jika $i_o > 0$ $D_{1+}$ & $D_{2-}$ jika $i_o < 0$
2	$S_{1-}$ & $S_{2+}$ On dan $S_{1+}$ & $S_{2-}$ Off	$-V_i/2$	$V_i/2$	$-V_i$	$D_{1-}$ & $D_{2+}$ jika $i_o > 0$ $S_{1-}$ & $S_{2+}$ jika $i_o < 0$
3	$S_{1+}$ & $S_{2+}$ On dan $S_{1-}$ & $S_{2-}$ Off	$V_i/2$	$V_i/2$	0	$S_{1+}$ & $D_{2+}$ jika $i_o > 0$ $D_{1+}$ & $S_{2+}$ jika $i_o < 0$
4	$S_{1-}$ & $S_{2-}$ On dan $S_{1+}$ & $S_{2+}$ Off	$-V_i/2$	$-V_i/2$	0	$D_{1-}$ & $S_{2-}$ jika $i_o > 0$ $S_{1-}$ & $D_{2-}$ jika $i_o < 0$
5	$S_{1-}$ - $S_{2-}$ - $S_{1+}$ - $S_{2+}$ Off	$-V_i/2$ $V_i/2$	$V_i/2$ $-V_i/2$	$-V_i$ $V_i$	$D_{1-}$ & $D_{2+}$ jika $i_o > 0$ $D_{1+}$ & $D_{2-}$ jika $i_o < 0$

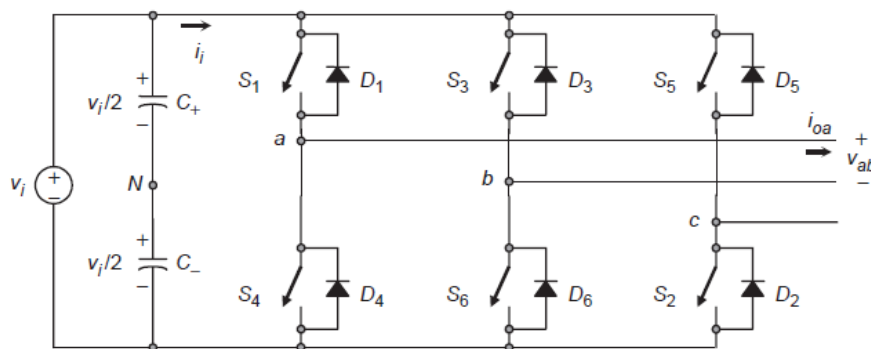


Gambar 7.2  
Rangkaian Inverter Jembatan  
Satu Fasa



### C. INVERTER JEMBATAN TIGA-FASA

Gambar 7.3 merupakan rangkaian dasar inverter jembatan tiga-fasa dengan beban resistif dan bentuk gelombangnya. Seperti halnya pada rangkaian inverter setengah-jembatan di atas, dalam rangkaian ini diperlukan dua buah kapasitor untuk menghasilkan titik N agar tegangan pada setiap kapasitor  $V_i/2$  dapat dijaga konstan. Terdapat tiga sisi sakelar, yaitu: sakelar  $S_{1+}$  dan  $S_{1-}$  serta  $S_{2+}$  dan  $S_{2-}$ . Kedua sisi sakelar ini, sakelar  $S_1$  dan  $S_4$ ,  $S_3$  dan  $S_6$ , serta  $S_5$  dan  $S_2$ . Masing-masing sakelar,  $S_1$  dan  $S_4$ , atau  $S_3$  dan  $S_6$ , atau  $S_5$  dan  $S_2$ , tidak boleh bekerja secara serempak/ simultan, karena akan terjadi hubung singkat rangkaian. Kondisi ON dan OFF dari kedua sisi sakelar ditentukan dengan teknik modulasi, dalam hal ini menggunakan prinsip PWM, seperti jelaskan pada inverter setengah-jembatan satu fasa di atas.



Gambar 7.3 Rangkaian Inverter Jembatan Tiga Fasa

Untuk menghasilkan tegangan luaran ( $V_o$ ) tiga fasa, terdapat delapan kondisi jika sakelar  $S_1$ ,  $S_4$ ,  $S_3$ ,  $S_6$ ,  $S_5$  dan  $S_2$  dioperasikan sebagaimana ditunjukkan pada tabel berikut:

Kondisi Ke-	Kondisi	$V_{ab}$	$V_{bc}$	$V_{ca}$	Vector
1	$S_1$ - $S_2$ - $S_6$ On & $S_4$ - $S_5$ - $S_3$ Off	$V_i$	0	$V_i$	$v_1 = 1 + j0,577$
2	$S_2$ - $S_3$ - $S_1$ On & $S_5$ - $S_6$ - $S_4$ Off	0	$V_i$	$-V_i$	$v_2 = j1,155$
3	$S_3$ - $S_4$ - $S_2$ On & $S_6$ - $S_1$ - $S_5$ Off	$-V_i$	$V_i$	0	$v_3 = -1 + j0,577$
4	$S_4$ - $S_5$ - $S_3$ On & $S_1$ - $S_2$ - $S_6$ Off	$-V_i$	0	$V_i$	$v_4 = -1 - j0,577$
5	$S_5$ - $S_6$ - $S_4$ On & $S_2$ - $S_3$ - $S_1$ Off	0	$-V_i$	$V_i$	$v_5 = -j1,155$
6	$S_6$ - $S_1$ - $S_5$ On & $S_3$ - $S_4$ - $S_2$ Off	$V_i$	$-V_i$	0	$v_6 = 1 - j0,577$
7	$S_1$ - $S_3$ - $S_5$ On & $S_4$ - $S_6$ - $S_2$ Off	0	0	0	$v_7 = 0$
8	$S_4$ - $S_6$ - $S_2$ On & $S_1$ - $S_3$ - $S_5$ Off	0	0	0	$v_8 = 0$

#### D. PERTANYAAN

1. Jelaskan prinsip kerja rangkaian inverter setengah-jembatan satu fasa!
2. Jelaskan fungsi kapasitor pada rangkaian inverter setengah-jembatan satu fasa!
3. Jelaskan prinsip kerja rangkaian inverter jembatan satu fasa!
4. Jelaskan prinsip kerja rangkaian inverter jembatan tiga fasa!

### DAFTAR PUSTAKA

- Hart, D.W. (1997). ***Introduction to Power Electronics***. Indiana: Prentice-Hall International, Inc.
- Mussener, Ch. (1991). ***Power Electronics and Drive Technology 1***. Germany: Leybold Didactic.
- Mohan, et.al. (1995). ***Power Electronics: Converter, Application and Design***. Singapore: John Wiley & Sons
- Rashid, M.H. (1988). ***Power Electronics: Circuits, devices and applications***. New Jersey : Prentice-Hall, Inc.
- Rashid, M.H., *et.al* (2007). ***Power Electronics Handbook***. California: Elsevier, Inc.
- Singh, MD. (1998). ***Power Electronics***. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.