

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.

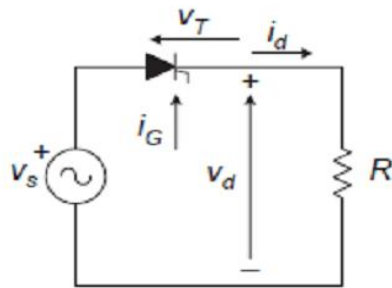
B. KONVERTER SATU-FASA

1. KONVERTER SETENGAH-GELOMBANG SATU-FASA

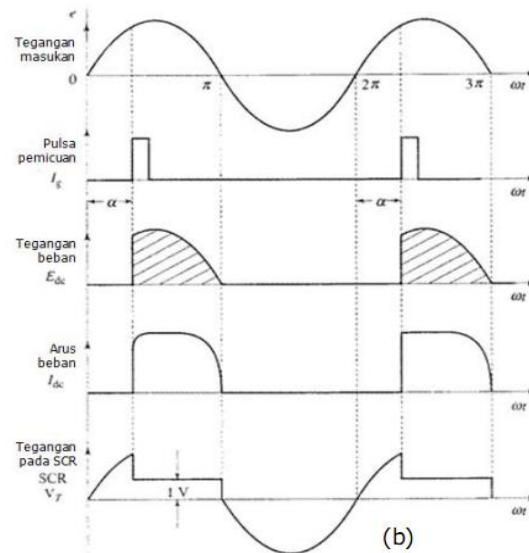
a. Beban Resistif (R)

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 +), T1 dipicu sebesar α , maka T1 menjadi ON dari $\alpha - \pi$, sehingga terjadi tegangan luaran E_{dc} . Selanjutnya, saat setengah periode kedua (polaritas -), T1 menjadi OFF pada titik π 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 perubahan (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:

$$V_{dc} = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (4.1)$$

$$V_L = V_m \left[\frac{\pi - \alpha}{4\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{8\pi} \right]^{1/2} \quad (4.2)$$

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

$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc} \quad (4.3)$$

$$P_L = V_L I_L \quad (4.4)$$

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 T1 dipicu sebesar α maka SCR T1 akan ON dari α sampai dengan β , hal ini disebabkan sifat induktor (L). Hal ini berarti sudut konduksi SCR T1 sebesar $(\beta - \alpha)$. Selanjutnya, mulai dari titik β sampai dengan $(2\pi + \alpha)$ SCR T1 menjadi OFF.

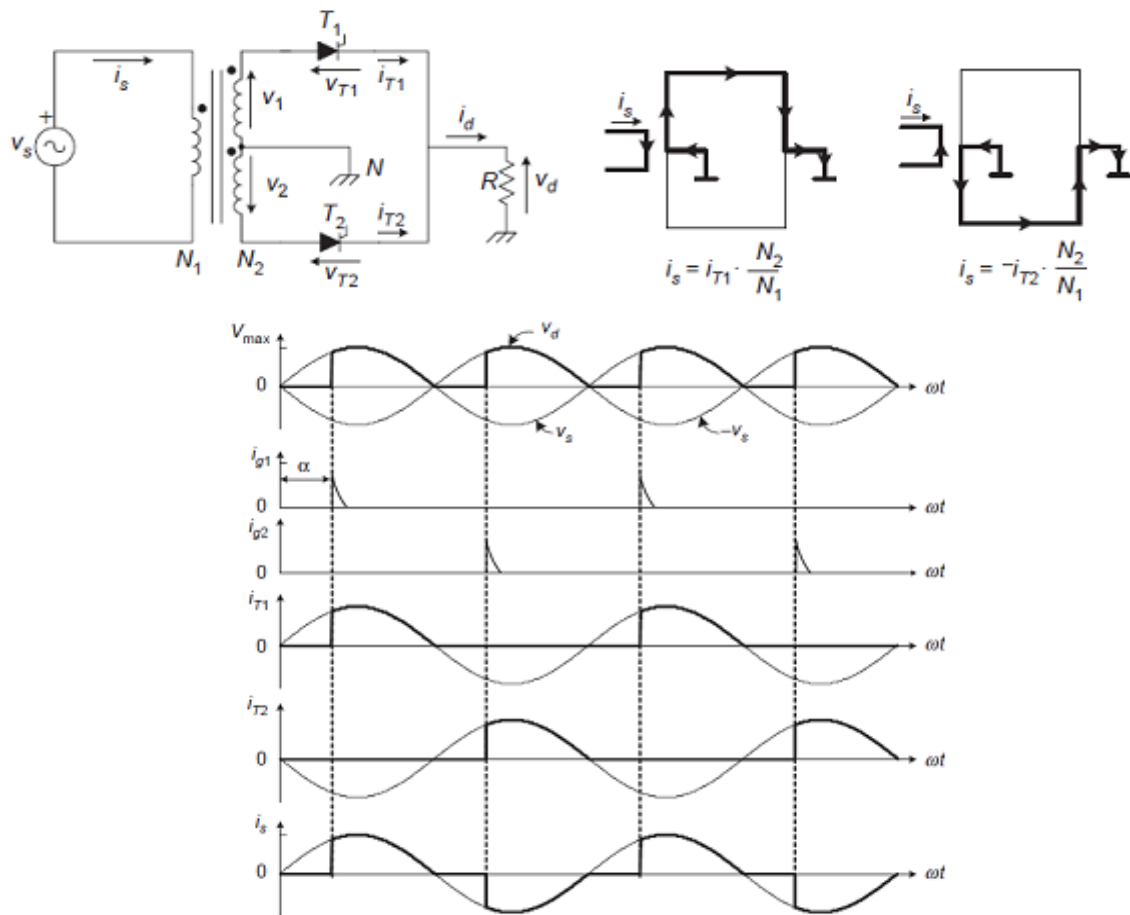
Nilai komponen tegangan luaran (V_{dc}) dari rangkaian Gambar 4.2 (b) sebesar:

Dari persamaan ini dapat dijelaskan bahwa ketika sudut pemicuan sebesar 0° $V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} \cos \alpha$ $< \alpha \leq 90^\circ$ 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.

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° terhadap CT atau netral (N). Proses pemicuan pada SCR T1 dan T2 dilakukan secara serempak. Komponen SCR T1 bekerja pada setengah periode pertama (0 sampai dengan π), dan Komponen SCR T2 bekerja pada setengah periode kedua (π sampai dengan 2π).



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

Jika SCR T1 dan T2 dipicu sebesar α , maka nilai tegangan searah rerata (V_{dc}) dan nilai tegangan searah efektif (root mean square-rms), V_L dapat ditentukan sebagai berikut :

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

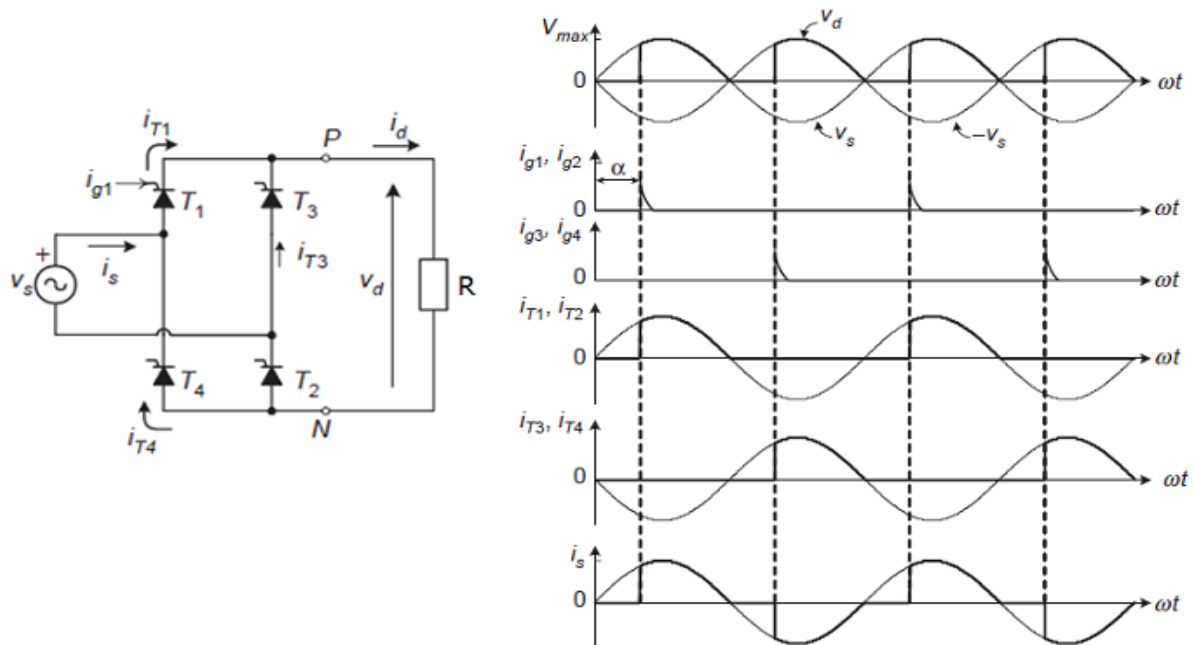
Dengan demikian, daya luaran rerata (P_{dc}) dan daya luaran efektif (P_L) adalah:

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

$$P_L = V_L I_L$$

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 T1 dan T2 serta SCR T3 dan T4 masing-masing dioperasikan secara serempak. Komponen SCR T1 dan T2 bekerja pada setengah periode pertama (0 sampai dengan π), dan Komponen SCR T3 dan T4 bekerja pada setengah periode kedua (π sampai dengan 2π). Jika SCR T1 dan T2 serta SCR T3 dan T4 masing-masing dipicu sebesar π , 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

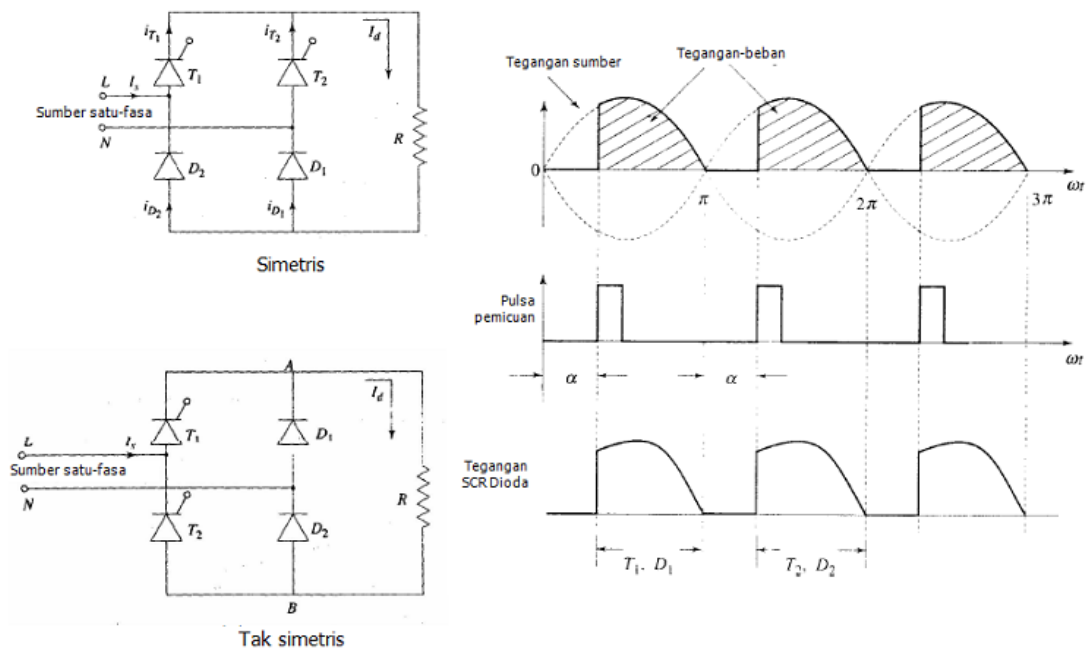
Jika rangkaian pada Gambar 4.3 dan 4.4 dihubungkan dengan beban resistif-induktif (RL), seperti halnya pada konverter setengah-gelombang satu fasa di atas, nilai komponen tegangan luaran (V_{dc}) dari rangkaian menjadi sebesar;

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha.$$

Hal ini berarti, ketika sudut pemecuan sebesar $0^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ akan terjadi proses penyearahan (rectifying), sedangkan pada sudut pemecuan $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ 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 pemecuan pada rangkaian ini terjadi ketika SCR T1 dan dioda D1 serta SCR T2 dan dioda D2 masing-masing dioperasikan secara serempak. Komponen SCR T1 dan dioda D1 bekerja pada setengah periode pertama (0 sampai dengan π), dan Komponen SCR T2 dan dioda D2 bekerja pada setengah periode kedua (π sampai dengan 2π).



Gambar 4.5 Rangkaian Semikonverter Satu Fasa Beban R

Jika SCR T1 dan T2 masing-masing dipicu sebesar α , 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.

C. 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 (α), 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 T1, T2, dan T3 dilakukan secara serempak pada masing-masing fasa.

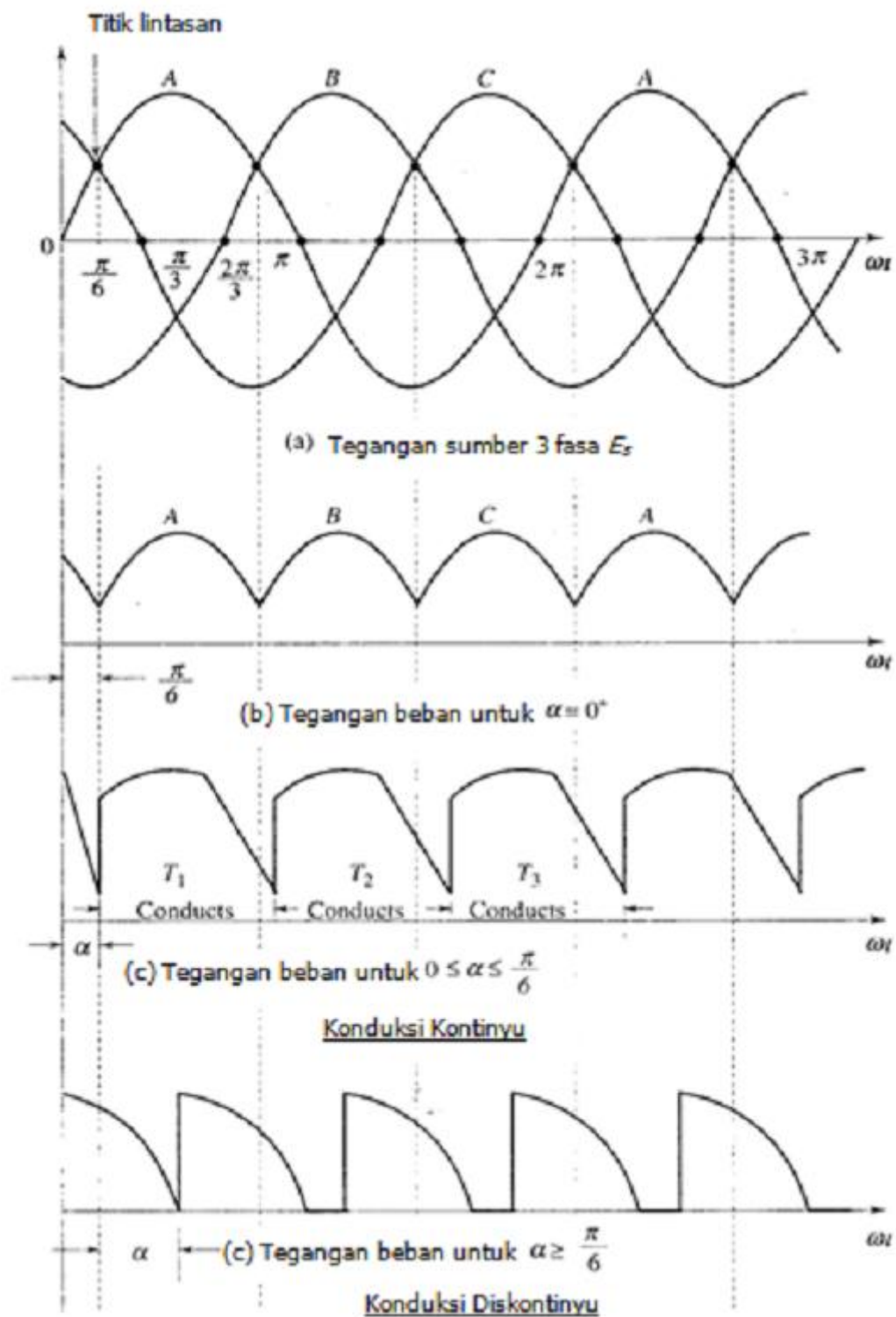
Nilai tegangan searah rerata (V_{dc}) dan nilai tegangan searah efektif (root mean square-rms), V_L pada operasi konduksi kontinyu dan operasi konduksi diskontinyu dapat ditentukan sebagai berikut: (a) Operasi konduksi kontinyu:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos \alpha \quad (4.5)$$

$$V_L = V_m \left[\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\alpha \right]^{1/2} \quad (4.6)$$

(b) Operasi konduksi kontinyu:

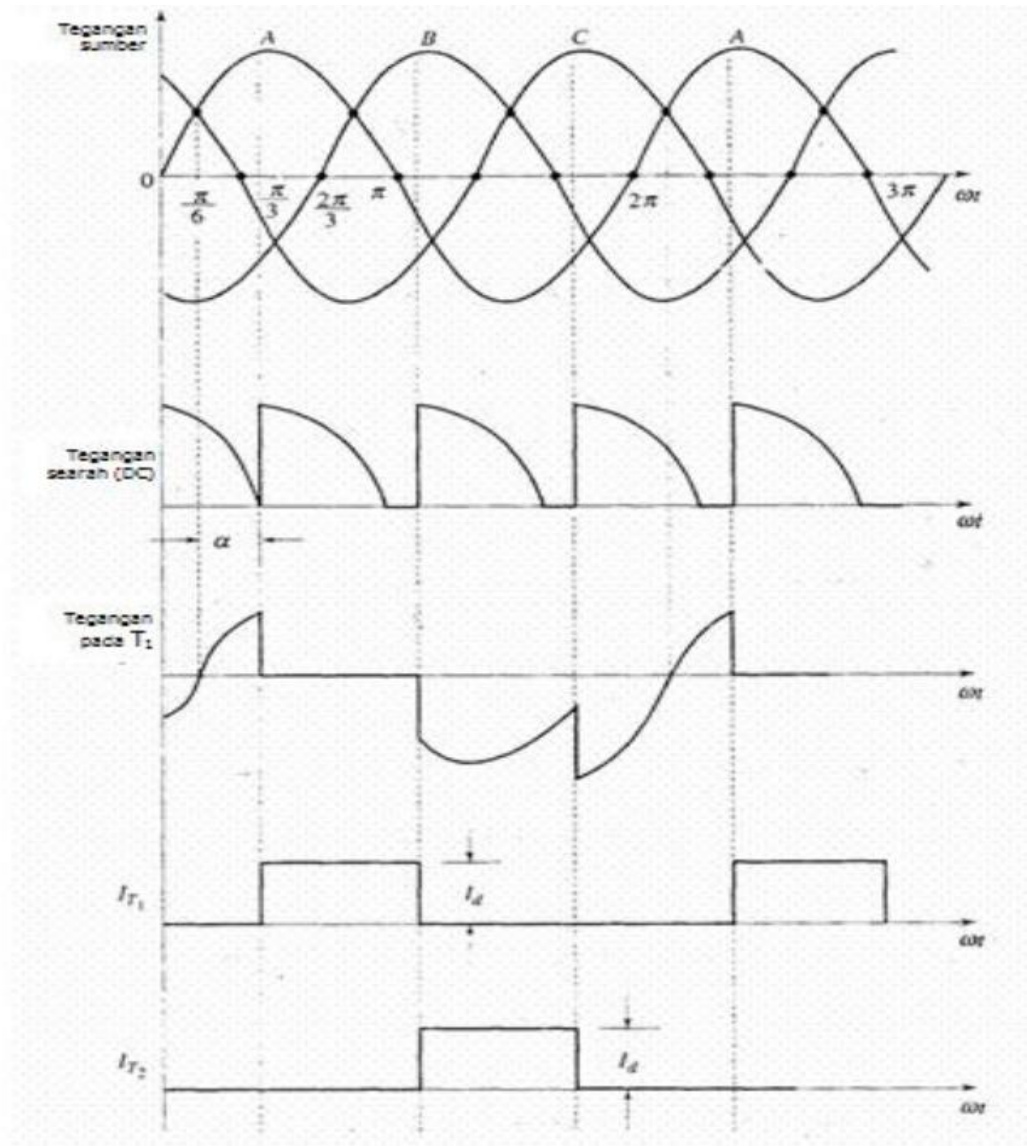
$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos(\alpha + 30^\circ) \quad V_L = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} V_m \left[\frac{5\pi - 3\alpha}{3\pi} + \frac{\sin(2\alpha + \pi/3)}{\pi} \right]^{1/2} \quad (4.7)$$



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:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos \alpha \quad (4.7a)$$



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

2. KONVERTER GELOMBANG-PENUH TIGA-FASA

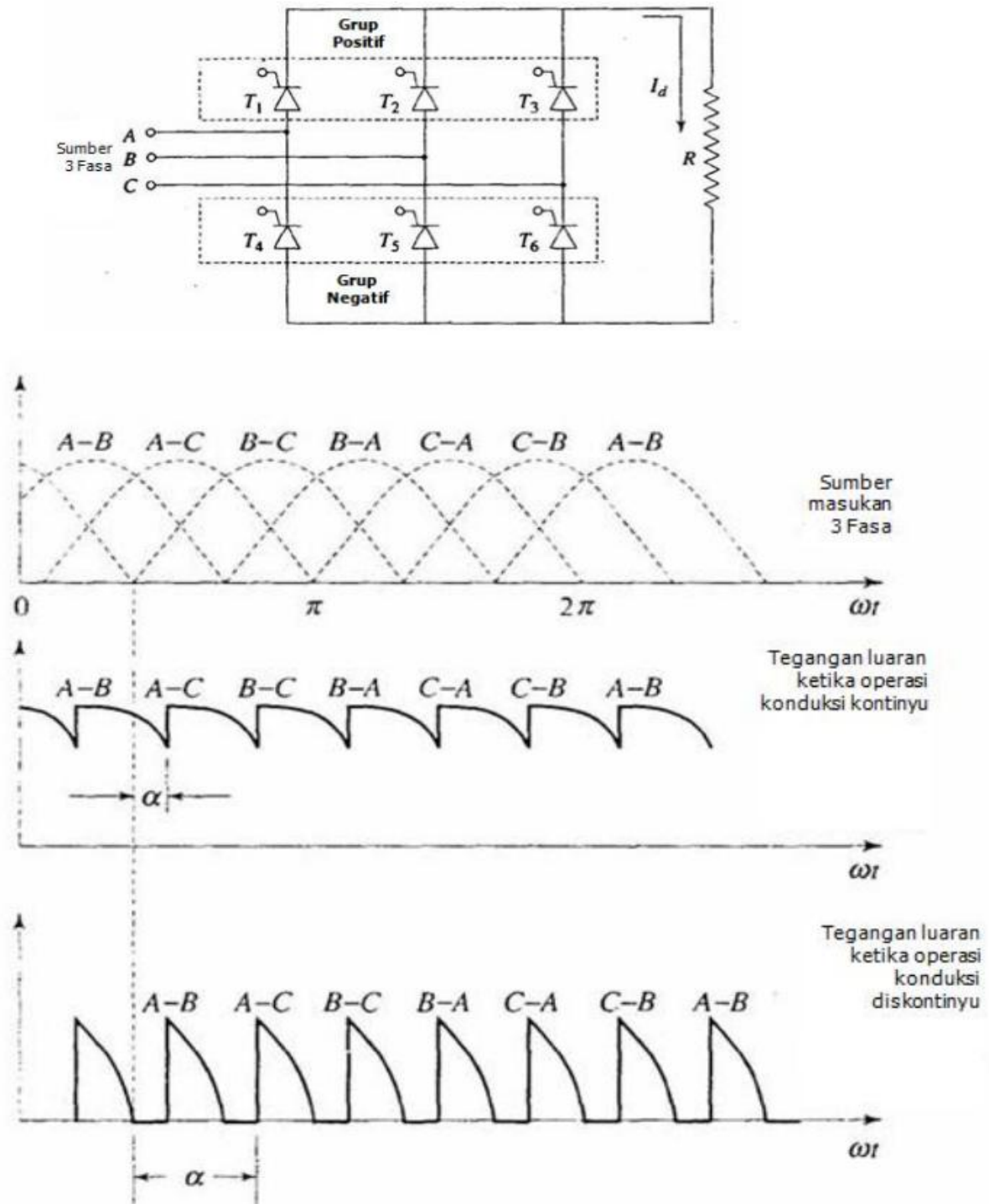
Gambar 4.8 merupakan rangkaian konverter setengah-gelombang tiga-fasa dengan beban resistif dan bentuk gelombang hasil penyearahan. Dalam rangkaian ini terdapat dua grup/ kelompok SCR, yaitu: grup positif dan grup negatif. SCR T1, T2, dan T3 merupakan grup positif, sedangkan SCR T4, T5, dan T6 merupakan 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 T1 dan T5, T2 dan T6, serta T3 dan T4. Terdapat dua proses pengaturan sudut pemicuan (α), 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 T1, T2, dan T3 dilakukan secara serempak pada masing-masing fasa.

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

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos \alpha \quad (4.8)$$

dan operasi konduksi diskontinyu:

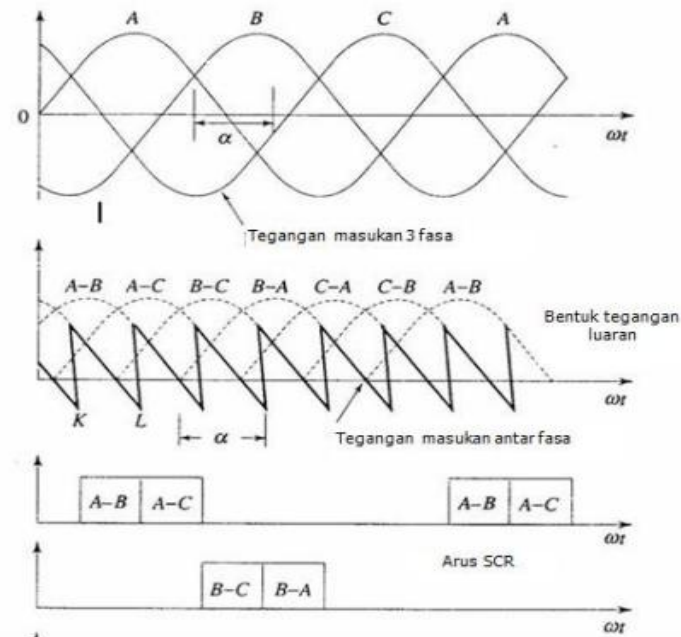
$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{m, fasa} \cos \left[1 + \left(\alpha + 60^\circ \right) \right] \quad (4.9)$$



**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:

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

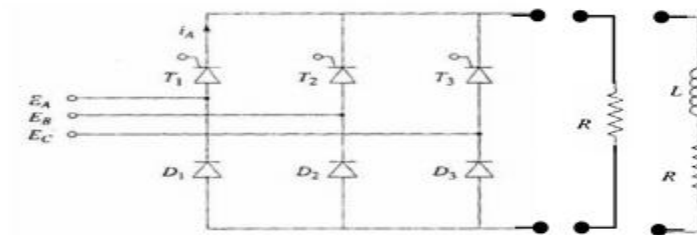


Gambar 4.9 Bentuk Gelombang Konverter Gelombang-penuh Tiga Fasa Beban RL

b. Semikonverter Tiga-fasa

Gambar 4.10 merupakan rangkaian semikonverter tiga fasa. Proses pemicuan pada rangkaian ini terjadi ketika SCR T1 dan dioda D2, T2 dan dioda D3, serta SCR T3 dan dioda D1 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:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_{m,ph} (1 + \cos \alpha) \quad (4.10)$$



Gambar 4.10 Rangkaian Semikonverter Tiga Fasa

D. PERTANYAAN**1. Konverter Satu-fasa**

- a. Jelaskan proses penyearahan pada rangkaian konverter setengah-gelombang satu fasa!
- b. Gambarkan bentuk gelombang tegangan masukan dan tegangan pada SCR saat OFF pada rangkaian konverter setengah-gelombang satu fasa!
- c. Jelaskan fungsi diode komutasi pada rangkaian konverter setengah-gelombang satu fasa beban RL !
- d. Jelaskan proses penyearahan pada rangkaian konverter mid-point (CT) satu fasa!
- e. Gambarkan bentuk gelombang tegangan masukan dan tegangan pada salah satu SCR saat OFF pada rangkaian konverter mid-point (CT) satu fasa!
- f. Kapanakah operasi rectifying dan inverting terjadi konverter gelombang-penuh satu fasa ?
- g. 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 dihubungkan dengan resistor 20 Ω 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 (α)! (Kunci 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 (α), dan (2) tegangan luaran per fasa efektif (VL).