



BUKU AJAR



ELEKTRONIKA DAYA

Mas Ahmad Baihaqi, S.T., M.T

**TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK DAN INFORMATIKA
UNIVERSITAS PANCA MARGA 2023**

ELEKTRONIKA DAYA

Hak Cipta 2023 pada Penulis

Hak penerbitan pada PANCA MARGA PRESS. Bagi mereka yang ingin memperbanyak sebagian isi buku ini dalam bentuk atau cara apapun harus mendapatkan izin tertulis dari penulis dan penerbit PANCA MARGA PRESS.

Penulis:

Mas Ahmad Baihaqi, S.T., M.T.



Penerbit:

PANCA MARGA PRESS

Gedung Rektorat Kampus 1 Universitas Panca Marga

Jl. Yos Sudarso Pabean Dringu, Probolinggo 67271

Telp. (0335)422715

Email : pancamargapress@upm.ac.id

Hak Cipta dilindungi Undang-undang

All Right Reserved

Cetakan 3, September 2023

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah, penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah, serta kemudahan yang telah diberikan sehingga Bahan Ajar Elektronika Daya ini dapat diselesaikan. Buku ini disusun sebagai salah satu upaya untuk menyediakan materi perkuliahan yang komprehensif pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Panca Marga.

Buku ini mencakup tujuh bab yang menguraikan pokok-pokok bahasan penting dalam Elektronika Daya, yaitu: (1) semikonduktor daya, (2) penyearah daya, (3) rangkaian pemacu dan komutasi, (4) penyearah terkendali (konverter), (5) pengatur tegangan arus bolak-balik (AC regulator), (6) pemangkas (chopper), dan (7) inverter. Setiap bab memberikan pemahaman yang mendalam mengenai topik-topik tersebut. Di akhir setiap bab, disertakan beberapa pertanyaan dalam bentuk terbuka dan soal essay sebagai alat evaluasi untuk mengukur tingkat penguasaan materi oleh mahasiswa.

Kami menyadari bahwa perkembangan dalam bidang Elektronika Daya sangat pesat dan menuntut para dosen serta mahasiswa untuk terus mengembangkan wawasan dan keilmuan mereka. Oleh karena itu kami sangat mengharapkan kritik dan saran yang konstruktif dari berbagai pihak, termasuk dosen, mahasiswa, dan pembaca lainnya. Masukan yang berharga tersebut akan menjadi pertimbangan penting dalam penyempurnaan edisi berikutnya. Semoga buku ini dapat bermanfaat dan memberikan kontribusi positif dalam meningkatkan kualitas pendidikan di bidang Elektronika Daya.

Akhir kata, semoga Allah SWT meridhai usaha kita dalam menuntut ilmu dan menjadikannya sebagai amal jariyah yang bermanfaat bagi banyak pihak. Aamiin.

Probolinggo, 3 September 2023

Mas ahmad baihaqi

PRAKATA

Syukur Alhamdulillah, kami panjatkan kehadiran Allah SWT atas selesainya penyusunan Buku Ajar dengan judul "ELEKTRONIKA DAYA". Buku ini disusun berdasarkan pemikiran dan kajian mendalam yang telah dilakukan oleh Penulis. Tujuan dari penulisan buku ini adalah untuk memberikan pemahaman dasar tentang teknologi elektro kepada mahasiswa Teknik Elektro di semester genap. Selain itu, buku ini juga dapat dimanfaatkan oleh mahasiswa dari program studi lain yang membutuhkan pengetahuan bidang elektronika daya.

Proses belajar mengajar di bidang Teknik Elektro menuntut peran aktif para dosen dalam mengembangkan wawasan dan keilmuan mereka, mengingat perkembangan yang sangat pesat dalam disiplin ini. Buku yang membahas keilmuan elektronika daya memerlukan materi yang berkualitas tinggi agar mampu memberikan fondasi yang kuat bagi para mahasiswa.

Kami menyadari bahwa buku ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kami sangat mengharapkan kontribusi dari para pembaca dalam bentuk kritik dan saran yang membangun. Masukan tersebut akan sangat berharga untuk menyempurnakan buku ini di masa mendatang. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat yang besar dan menjadi sumber belajar yang efektif bagi semua yang membutuhkannya.

Akhir kata, semoga Allah SWT meridhoi usaha kita dalam menuntut ilmu dan menjadikannya sebagai amal jariyah yang bermanfaat bagi banyak pihak. Aamiin..

Hormat kami,
Penulis

Mas Ahmad Baihaqi

DAFTAR ISI

| | |
|--|-----------|
| Lembaran Pengesahan Institusi | ii |
| Lembaran Pengesahan Reviewer | iii |
| Kata Pengantar | iv |
| Prakata | v |
| Daftar isi | vii |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Pendahuluan | 1 |
| 1.2 Tujuan Khusus | 1 |
| 1.3 Teori | 1 |
| 1.3.1 Tinjauan Historis | 1 |
| 1.3.2 Parameter Konvensional | 7 |
| 1.3.3 Penerapan Elektronika Daya | 10 |
| 1.3.4 Devais Semikonduktor Daya | 12 |
| 1.3.5 Karakteristik Kendali dari Devais Daya | 13 |
| 1.3.6 Tipe-tipe Rangkaian Elektronika Daya | 13 |
| 1.4 Latihan | 13 |
| 1.5 Rangkuman | 14 |
| 1.6 Review | 14 |
| BAB II SEMIKONDUKTOR DAYA | 15 |
| 2.1 Pendahuluan | 15 |
| 2.2 Tujuan Khusus | 15 |
| 2.3 Teori | 16 |
| 2.3.1 Dioda | 16 |
| 2.3.2 Thyristor | 20 |
| 2.3.3 GTO | 21 |
| 2.3.4 Transistor | 22 |
| 2.3.5 MOSFET | 23 |
| 2.3.6 IGBT | 24 |
| 2.3.7 Prinsip Dasar Rangkaian Elektronika Daya | 25 |
| 2.4 Latihan | 27 |
| 2.5 Rangkuman | 27 |
| 2.6 Review | 28 |
| BAB III PENYEARAH | 29 |
| 3.1 Pendahuluan | 29 |
| 3.2 Tujuan Khusus | 29 |
| 3.3 Teori | 29 |
| 3.3.1 Penyearah Setengah Gelombang Satu Fasa | 29 |
| 3.3.2 Penyearah Gelombang Penuh Satu Fasa | 42 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.3.3 | Penyearah Jembatan | 55 |
| 3.3.4 | Penyearah Setengah Gelombang Tiga Fasa | 64 |
| 3.3.5 | Penyearah Gelombang Penuh Tiga Fasa | 70 |
| 3.4 | Latihan | 75 |
| 3.5 | Rangkuman | 75 |
| 3.6 | Review | 76 |

BAB IV PENYEARAH TERKENDALI..... 77

| | | |
|--------|--|----|
| 4.1. | Pendahuluan | 77 |
| 4.2. | Tujuan Khusus | 77 |
| 4.3. | Teori..... | 77 |
| 4.3.1. | Penyearah Setengah Gelombang Satu Fasa..... | 77 |
| 4.3.2. | Penyearah Gelombang Penuh Satu Fasa | 81 |
| 4.3.3. | Penyearah Setengah Gelombang Tiga Fasa | 85 |
| 4.3.4. | Penyearah Gelombang Penuh Tiga Fasa | 87 |
| 4.4. | Latihan | 90 |
| 4.5. | Rangkuman | 91 |
| 4.6. | Review | 91 |

BAB V PENGATUR TEGANGAN AC 92

| | | |
|--------|---|-----|
| 5.1. | Pendahuluan..... | 92 |
| 5.2. | Tujuan Khusus | 92 |
| 5.3. | Teori..... | 93 |
| 5.3.1. | AC Regulator Satu Fasa | 93 |
| 5.3.2. | AC Regulator Tiga Fasa | 96 |
| 5.3.3. | Cycloconverter Satu Fasa..... | 101 |
| 5.3.4. | Cycloconverter Tiga Fasa Menjadi Satu Fasa..... | 103 |
| 5.4. | Latihan | 104 |
| 5.5. | Rangkuman | 105 |
| 5.6. | Review | 105 |

BAB VI DC CHOPPERS

| | | |
|--------|---|-----|
| 6.1. | Pendahuluan..... | 107 |
| 6.2. | Tujuan Khusus | 107 |
| 6.3. | Teori..... | 107 |
| 6.3.1. | Chopper Penurun Tegangan | 107 |
| 6.3.2. | Chopper Penaik Tegangan..... | 110 |
| 6.3.3. | Chopper Penaik dan Penurun Tegangan | 111 |
| 6.4. | Latihan | 112 |
| 6.5. | Rangkuman | 112 |
| 6.6. | Review | 113 |

| | |
|---|------------|
| BAB VIII INVERTER | 114 |
| 7.1. Pendahuluan | 114 |
| 7.2. Tujuan Khusus | 114 |
| 7.3. Teori..... | 114 |
| 7.3.1. Inverter Satu Phasa | 114 |
| 7.3.2. Inverter Jembatan Tiga Phasa | 118 |
| 7.4. Rangkuman | 119 |
| 7.5. Latihan | 119 |
| 7.6. Review | 120 |
| | |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 121 |
| Takarir | 122 |
| Penjurus | 123 |
| Kunci Jawaban | 124 |

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pendahuluan

Elektronika daya dan teknologi konversi dikhususkan untuk menghasilkan, mengirimkan, pengontrolan dan mengukur daya listrik dan energi. Dan juga untuk menggambarkan karakteristik sistem tenaga, berbagai parameter pengukuran diterapkan. Konsep-konsep penting adalah faktor daya (PF), efisiensi pengiriman daya (η), Faktor riak (RF) dan distorsi harmonik total (THD). Dari hasil studi yang lama dan praktek rekayasa, kita tahu kalau sistem daya tradisional telah berhasil dijelaskan oleh parameter-parameter ini. Konsep-konsep penting akan diperkenalkan pada subbab 1.3.

1.2 Tujuan Khusus

Tujuan dari pembelajaran mata kuliah ini adalah diharapkan mahasiswa semester IV Program Studi Teknik Listrik Politeknik Negeri Lhokseumawe mempunyai kemampuan dalam menjelaskan konsep dasar dan parameter dalam bidang elektronika daya.

1.3 Teori

1.3.1 Tinjauan Historis

1.3.1.1 *Work*, Energi dan *Heat*

Work (W), dan energi (E), yang diukur dengan satuan "joule". Biasanya disebut energy kinetik "*work*", dan energi potensial yang tersimpan atau statis "energi". *Work* dan energi dapat ditransfer ke *heat*, yang diukur dengan "kalori". Berikut adalah hubungannya (Hukum Joule-Lenz):

$$1 \text{ joule} = 0.24 \text{ kalori}$$

atau

$$1 \text{ kalori} = 4.18 \text{ joule}$$

Dalam mekanisme ini, ada hubungan antara daya (P) dan *work* (W), dan/atau energy (E):

$$W = \int P dt \quad E = \int P dt$$

dan

$$P = \frac{d}{dt}W \quad P = \frac{d}{dt}E$$

Daya P diukur dengan unit "watt", dan

1 joule = 1 watt \times 1 detik

atau

1 watt = 1 joule / 1 detik

1.3.1.2 Peralatan DC dan AC

Catu daya terdiri dari dua kelompok utama: DC dan AC. Peralatan yang sesuai dikelompokkan kedalam peralatan DC dan AC juga, misalnya generator DC, generator AC, motor DC, motor AC, dan lain-lain.

DC Power Supply

Sebuah catu daya DC memiliki parameter: tegangan (amplitudo) Vdc dan faktor riak (RF). Sebuah catu daya DC dapat bersumber dari baterai, generator DC atau DC to DC converter.

AC Power Supply

Catu daya AC memiliki parameter: tegangan (amplitudo, nilai root-mean-square (rms atau RMS) dan nilai rata-rata), frekuensi (f atau ω), sudut fase (f atau θ) dan jumlah distorsi harmonik (THD). Catu daya AC bisa bisa bersumber dari generator AC, transformator atau inverter DC/AC. Tegangan AC dapat disajikan sebagai berikut:

$$v(t) = V_p \sin(\omega t - \theta) = \sqrt{2} V_{rms} \sin(\omega t - \theta) \quad (1.1)$$

dimana :

- $v(t)$ = tegangan AC sesaat diukur;
- V_p = Nilai tegangan puncak;
- V_{rms} = nilai rms dari tegangan;
- ω = frekuensi sudut, $\omega = 2\pi f$;
- f = frekuensi sumber, mis $f = 50$ Hz dan
- θ = sudut fase tertunda.

1.3.1.3 Beban

Catu Daya memberikan sumber energi untuk beban. Jika karakteristik beban dapat dijelaskan oleh persamaan diferensial linear, disebut beban linier. Jika tidak, disebut beban non-linear (yaitu dioda, relay dan *hysteresis-elemen* yang tidak dapat dijelaskan oleh persamaan diferensial linear). Beban linier dikelompokkan menjadi dua kategori: beban pasif dan dinamis.

Beban Pasif Linear

Beban pasif Linear adalah resistensi (R), induktansi (L) dan kapasitansi (C). Semua komponen ini memenuhi persamaan diferensial linear. Jika arus sirkuit I, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.1, dari hukum Ohm dapat diketahui:

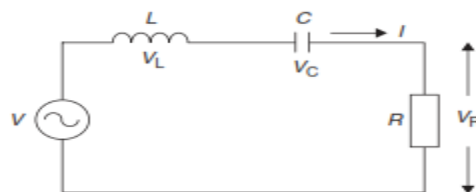
$$V_R = RI \tag{1.2}$$

$$V_L = L \frac{dI}{dt} \tag{1.3}$$

$$V_C = \frac{1}{C} \int I dt \tag{1.4}$$

$$V = V_R + V_L + V_C = RI + L \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} \int I dt \tag{1.5}$$

Persamaan 1.2 sampai persamaan 1.5 adalah persamaan diferensial linier.



Gambar 1.1 Rangkaian R-L-C

Beban Dinamis Linear

Beban dinamis linier adalah gaya elektromagnetik balik (EMF) DC dan AC. Semua komponen ini memenuhi operasi persamaan diferensial.

EMF balik dari motor DC adalah EMF balik DC dengan tegangan DC yang proporsional untuk fluks medan dan kecepatan putaran armature:

$$\text{EMF} = k\Phi\omega \quad (1.6)$$

di mana:

k = konstanta mesin DC;

Φ = fluks medan dan

ω = kecepatan putaran mesin dalam rad/s.

EMF balik dari motor AC adalah EMF balik AC dengan tegangan AC yang proporsional untuk fluks medan dan kecepatan putaran rotor.

1.3.1.4 Impedansi

Jika rangkaian R-L-C dicatu oleh sumber tegangan dengan *mono-frekuensi* ($\omega = 2\pi f$) gelombang sinusoidal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.1, kita dapat menyederhanakan persamaan diferensial (1.5) ke dalam persamaan aljabar dengan menggunakan konsep "impedansi", Z :

$$V = ZI \quad (1.7)$$

Impedansi Z dapat didefinisikan sebagai:

$$Z = R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C} = R + jX = |Z|\angle\theta \quad (1.8)$$

Dimana:

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (1.9)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \right) \quad (1.10)$$

di mana θ adalah sudut fase konjugasi. Bagian nyata dari impedansi Z didefinisikan sebagai resistansi R , dan bagian imajiner dari impedansi Z didefinisikan sebagai reaktansi X . Reaktansi memiliki dua komponen: bagian positif disebut *reaktansi induktif* ($j\omega L$) dan bagian negatif disebut *reaktansi kapasitif* ($-j/\omega C$). Daya yang dikirim dikonsumsi semuanya oleh resistansi. Reaktansi hanya menyimpan energi dan menyebabkan pergeseran sudut fasa. Tidak ada daya yang dikonsumsi pada reaktansi, yang mana menghasilkan daya reaktif dan mengganggu daya yang dikirim. Dari hukum Ohm, kita bisa mendapatkan arus vektor (I) dari tegangan vektor (V) dan impedansi (Z):

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C}} = |I| \angle \theta \quad (1.11)$$

Sebagian besar peralatan yang diaplikasikan di industri adalah beban induktif. Sebagai contoh, sebuah rangkaian R-L dicatu oleh tegangan sinusoidal (V), dan ditunjukkan pada Gambar 1.2. Impedansi Z yang diperoleh adalah:

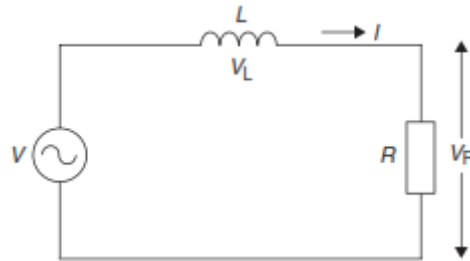
$$Z = R + j\omega L = R + jX = |Z| \angle \theta \quad (1.12)$$

Dengan

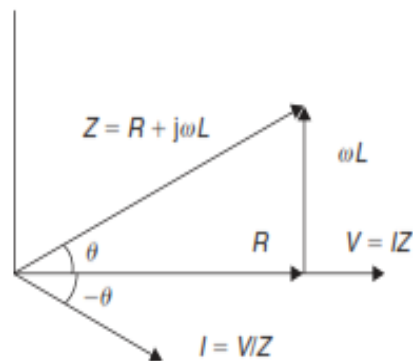
$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad \text{and} \quad \theta = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right)$$

Sudut konjugasi (θ) bernilai positif. Sesuai diagram vector ditunjukkan pada Gambar 1.3. Arus dapat ditulis sebagai berikut:

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{R + j\omega L} = |I| \angle -\theta \quad (1.13)$$

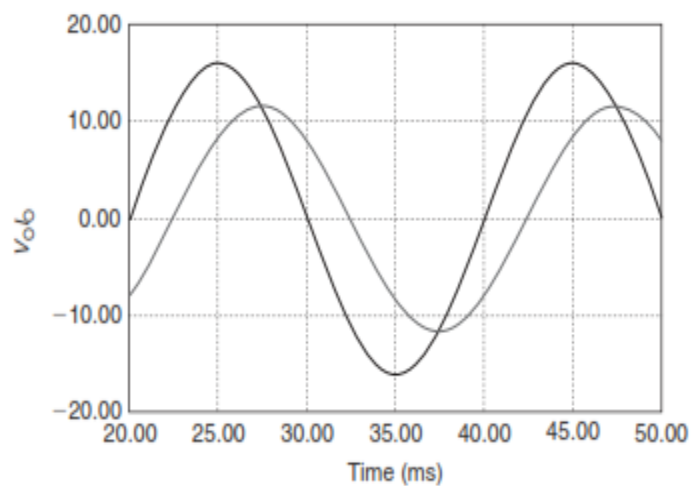


Gambar 1.2 Rangkaian R-L



Gambar 1.3 diagram vector dari rangkaian R-L

Pada Gambar 1.3, tegangan suplai V sebagai vektor referensi dengan sudut fase nol. Arus vektor tertunda dari tegangan oleh sudut konjugasi θ . Gelombang tegangan dan arus ditunjukkan dalam Gambar 1.4.



Gambar 1.4 Hubungan antara gelombang tegangan dan arus

1.3.1.5 Daya

Ada berbagai daya seperti daya semu (atau daya kompleks) (S), daya nyata (P), dan daya reaktif (Q).

Daya semu (S)

Daya semu didefinisikan sebagai berikut:

$$S = VI = P + jQ \quad (1.14)$$

Daya nyata (P)

Daya nyata P adalah bagian nyata dari daya semu S :

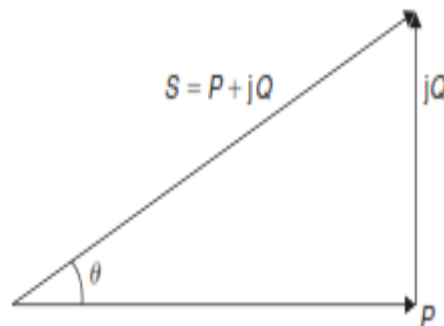
$$P = S \cos \theta = I^2 R \quad (1.15)$$

Daya Reaktif (Q)

Daya reaktif Q adalah bagian imajiner dari daya semu S :

$$Q = S \sin \theta = I^2 X \quad (1.16)$$

Mengacu pada rangkaian R-L dari Gambar 1.2, vektor daya dapat digambarkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.5.



Gambar 1.5 diagram vector daya dari rangkaian R-L

1.3.2 Parameter Konvensional

Parameter konvensional yang digunakan dalam elektronika daya adalah faktor daya (PF), Efisiensi daya kirim (η), total distorsi harmonik (THD) dan faktor riak (RF). Dengan menggunakan parameter ini telah dapat digambarkan karakteristik-

karakteristik system daya (pembangkit, transmisi, distribusi, proteksi dan analisis harmonik) dan system pengendalian (pengendalian motor AC dan DC).

Faktor Daya (PF)

Faktor daya didefinisikan oleh perbandingan daya nyata P atas daya semu S:

$$PF = \frac{P}{S} = \cos \theta = \frac{I^2 R}{VI^*} = \frac{IR}{V} \quad (1.17)$$

Gambar 1.5 digunakan untuk menggambarkan faktor daya (PF).

Efisiensi pengiriman daya (η)

Efisiensi pengiriman daya (η) didefinisikan sebagai perbandingan daya output P_O terhadap daya input P_{IN} :

$$\eta = \frac{P_O}{P_{in}} \quad (1.18)$$

Daya keoutput P_O adalah daya yang diterima oleh beban. Daya input P_{IN} adalah yang dihasilkan oleh sumber catu daya. Kedua daya input P_{IN} dan daya output P_O adalah daya nyata.

Total Harmonic Distortion (THD)

Sebuah bentuk gelombang AC berkala biasanya memiliki berbagai order harmonik. Karena nilai sesaat secara periodik terus berulang dalam frekuensi dasar f (atau $\omega = 2\pi f$), yang spektrumnya sesuai dalam domain frekuensi terdiri dari puncak diskrit pada frekuensi nf (atau $n\omega = 2n\pi f$), di mana $n = 1, 2, 3, \dots \infty$. Komponen order pertama ($n = 1$) sesuai dengan komponen dasar V_1 . Total distorsi harmonik (THD) adalah didefinisikan oleh perbandingan jumlah seluruh harmonik order lebih tinggi terhadap harmonik dasar V_1 :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (1.19)$$

di mana semua V_n ($n = 1, 2, 3, \dots \infty$) adalah nilai-nilai rms yang sesuai.

Ripple Factor (RF)

Sebuah gelombang DC biasanya memiliki komponen DC V_{dc} dan berbagai harmonic order tinggi. Harmonik ini membuat variasi (riak) dari gelombang DC. Karena nilai sesaat secara periodik berulang dalam frekuensi dasar f (atau $\omega = 2\pi f$), spektrum yang sesuai dalam domain frekuensi terdiri dari puncak diskrit pada frekuensi nf (atau $n\omega = 2n\pi f$), di mana $n = 0, 1, 2, 3, \dots \infty$. Komponen order ke nol ($n = 0$) sesuai dengan komponen DC V_{dc} . Faktor riak (RF) didefinisikan dengan rasio jumlah semua harmonik order yang lebih tinggi atas komponen DC V_{dc} :

$$RF = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2}}{V_{dc}} \quad (1.20)$$

di mana semua V_n ($n = 1, 2, 3, \dots 8$) adalah nilai-nilai rms yang sesuai.

Contoh 1.1 Sebuah Rangkaian seperti pada Gambar 1.6, mempunyai input tegangan sumber sinyal sinusoida satu phasa dengan tahanan dalam $R_o = 0,2 \Omega$, mencatu rangkaian R-L dengan $R = 1 \Omega$ dan $L = 3 \text{ mH}$. Tegangan input sebesar 16 V (besaran rms) dengan frekuensi = 50 Hz . Hitung parameter-parameter rangkaian R-L tersebut!

Jawab :

Tegangan sumber :

$$V = 16\sqrt{2} \sin 2 \pi 50t \text{ (V)} \quad (1.21)$$

Impedansi dalam sumber:

$$Z_o = R_o = 0,2 \Omega \quad (1.22)$$

Impedansi beban :

$$Z = 1 + j 100 \pi \times 3\text{m} = 1 + j0,94 = 1,3724 \angle 43,23^\circ \Omega \quad (1.23)$$

Impedansi total:

$$Z + Z_o = 1,2 + j0,94 = 1,524 \angle 38,073^\circ \Omega \quad (1.24)$$

Arus total :

$$I = \frac{V}{Z+Z_o} = \frac{16\sqrt{2} \sin 100\pi t}{1,524 \angle 38,073^\circ} = 10,5\sqrt{2} \sin(100\pi t - 38,073^\circ) \text{ A} \quad (1.25)$$

Tegangan Output pada beban R-L :

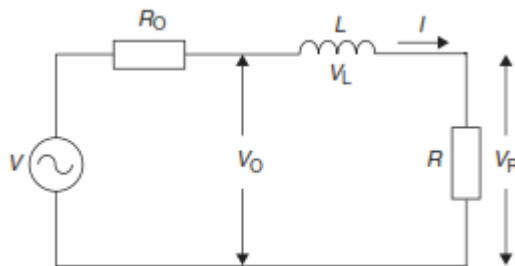
$$V_o = ZI = 14,4\sqrt{2} \sin(100\pi t - 5,16^\circ) \text{ V} \quad (1.26)$$

Daya semu S pada beban :

$$S = VoI^* = 14,4 \times 10,5 = 151,3 \text{ VA} \quad (1.27)$$

Daya nyata P pada beban :

$$P_o = P_R = I^2R = 10,5^2 \times 1 = 110,25 \text{ W} \quad (1.28)$$



Gambar 1.6 Rangkaian R-L

Daya nyata input P_{in} :

$$P_{in} = I^2(R + R_i) = 10,5^2 \times 1,2 = 132,3 \text{ W} \quad (1.29)$$

Faktor Daya Beban:

$$PF = \frac{P_o}{S} = \cos \theta = \cos 43,23 = 0,73 \text{ (lagging)} \quad (1.30)$$

Daya reaktif Q :

$$Q = S \times \sin \theta = 151,3 \times \sin 43,23 = 103,63 \text{ VAR} \quad (1.31)$$

Effisiensi pengiriman daya (η) :

$$\eta = \frac{P_R}{P_{in}} = \frac{110,25}{132,3} = 0,833 \quad (1.32)$$

Cara lain menghitung Effisiensi :

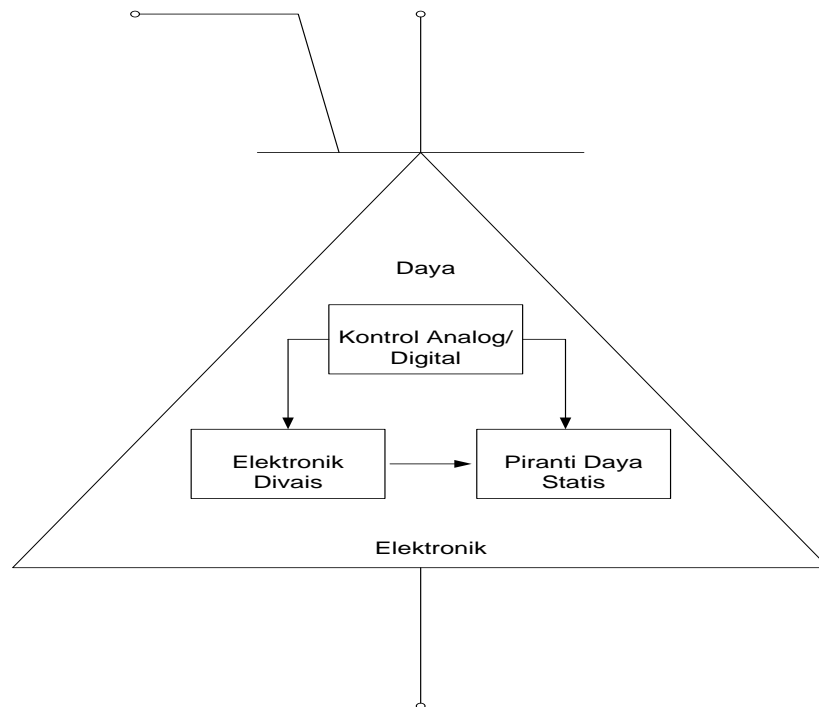
$$\eta = \frac{R}{R + R_o} = \frac{1}{1,2} = 0,833 \quad (1.33)$$

1.3.3 Penerapan Elektronika Daya

Kebutuhan akan pengendalian daya elektrik dari sistem penggerak motor listrik dan sistem kendali industri telah ada sejak lama, dan kebutuhan ini mengarah

pada pengembangan awal dari sistem Ward-Leonard untuk mendapatkan tegangan dc variabel untuk pengendalian penggerak motor dc.

Elektronika daya dapat didefinisikan sebagai penerapan elektronika solid state untuk pengendalian dan konversi tenaga elektrik. Saling keterkaitan antara energi, elektronika, dan pengendalian digambarkan pada Gambar 1.7.



Gambar 1.7 Hubungan elektronika daya terhadap daya, elektronika dan kontrol

Elektronika daya bersandar terutama pada proses pensaklaran pada peralatan-peralatan semikonduktor. Dengan pengembangan teknologi semikonduktor daya, batas daya yang dapat ditangani dan kecepatan pensaklaran dari peralatan daya meningkat sangat pesat.

Elektronika daya dengan mudah dapat dilihat aplikasinya pada tempat-tempat yang cukup penting dari teknologi modern dan sekarang digunakan dalam begitu banyak variasi produk-produk daya tinggi, mencakup pengendalian suhu, pengontrolan pencahayaan, pengendalian motor, sistem-sistem tegangan tinggi arus searah (HVDC).

1.3.4 Devais Semikonduktor Daya

Sejak thyristor pertama SCR dikembangkan pada tahun 1957, telah berkembang cepat banyak devais semikonduktor daya yang lebih canggih. Hingga tahun 1970, thyristor konvensional telah digunakan secara eksklusif sebagai kendali daya pada aplikasi industri. Sejak tahun 1970, banyak tipe devais semikonduktor daya telah dikembangkan dan disediakan secara komersial. Devais-devais ini dapat dibagi menjadi lima kategori:

- a. Dioda daya
- b. Thyristor
- c. Power bipolar junction transistor (BJT)
- d. MOSFET daya
- e. Insulated-gate bipolar transistor (IGBT)

| | JENIS | Rating Voltase/Arus |
|-----------------|------------------|---------------------|
| Diode | Serbaguna | 5000 V/ 5000A |
| | Kecepatan Tinggi | 3000 V/ 1000A |
| | Schottky | 40 V/60A |
| Thyristor mati | Bloking balik | 5000 V/ 5000A |
| | Kecepatan Tinggi | 1200V/ 1500A |
| | Bloking balik | 2500V/ 400A |
| | Konduksi balik | 2500V/ 1000A |
| | GATT | 1200V/ 400A |
| | Cahaya tersulut | 6000V/ 1500A |
| TRIAC | | 1200V/ 300A |
| Thyristors mati | GTO | 4500V/ 3000A |
| Sendiri | SITH | 4000V/ 2200A |
| Transistor daya | Tunggal | 400V/ 250A |
| | | 400V/ 40A |
| | | 630V/ 50A |
| | Darlington | 1200V/ 400A |
| SIT | | 1200V/ 300A |
| MOSFETs daya | Tunggal | 500V/ 8,6A |
| | | 1000V/ 4,7A |
| | | 500V/ 50A |
| IGBT | Tunggal | 1200V/ 400A |
| MCT | Tunggal | 600V/ 60A |

1.3.3 Karakteristik Kendali dari Devais Daya

Devais semikonduktor daya dapat dioperasikan sebagai switch dengan memberikan sinyal kontrol pada terminal gate dari thyristor (atau base pada BJT). Keoutput yang dikehendaki diperoleh dengan mengubah-ubah waktu konduksi dari devais pensaklaran ini. Karakteristik tegangan dan kontrol yang biasa digunakan pada devais pensaklaran daya akan dijelaskan lebih lanjut pada Bab II.

Devais pensaklaran semikonduktor daya dapat diklasifikasikan secara mendasar menjadi :

1. Uncontrolled turn-on and off (contoh : Dioda)
2. Controlled turn-on and uncontrolled turn-off (contoh : SCR)
3. Controlled turn-on and off (contoh : BJT, MOSFET, GTO, SITH, IGBT, SIT, MCT)

1.3.5 Tipe-tipe Rangkaian Elektronika Daya

Untuk pengendalian daya elektrik atau pengkondisian daya, konversi daya elektrik dari satu bentuk ke bentuk yang lain menjadi penting dan karakteristik pensaklaran dari devais-devais daya memungkinkan hal ini. Suatu penyearah dapat dipandang sebagai matriks pensaklaran. Rangkaian elektronika daya dapat dikategorikan menjadi enam tipe:

1. Penyearah dioda
2. Penyearah ac-dc (penyearah terkontrol)
3. Penyearah ac-ac (kontroler tegangan ac)
4. Penyearah dc-dc (dc chopper)
5. Penyearah dc-ac (inverter)
6. Saklar/switch statis

1.4 Latihan

Sebuah Rangkaian seperti pada Gambar 1.6, mempunyai input tegangan sumber sinyal sinusoida satu phasa dengan tahanan dalam $R_o = 0,2 \Omega$, mencatu rangkaian R-L dengan $R = 10 \Omega$ dan $L = 3 \text{ mH}$. Tegangan input sebesar 16 V (besaran rms) dengan frekuensi = 50 Hz. Hitung parameter-parameter rangkaian R-L tersebut!

1.5 Rangkuman

Bersamaan dengan berkembangnya teknologi pada devais semikonduktor daya dan rangkaian terintegrasi, potensi untuk mengaplikasikan elektronika daya menjadi lebih luas. Telah banyak tersedia secara komersial devais semikonduktor daya; akan tetapi pengembangan devais akan tetap berlanjut. Ada enam kategori penyearah daya: (1) Penyearah dioda, (2) Penyearah ac-dc (penyearah terkontrol), (3) Penyearah ac-ac (kontroler tegangan ac), (4) Penyearah dc-dc (dc chopper) (5) Penyearah dc-ac (inverter) dan (6) Saklar/switch statis. Perancangan rangkaian elektronika daya memerlukan perancangan rangkaian daya dan rangkaian kontrol. Harmonik tegangan dan arus yang dibangkitkan oleh penyearah daya dapat diminimalkan dengan pemilihan strategi kendali yang tepat.

1.6 Review

Bagi para pembaca setelah mempelajari uraian dari pada topik diatas dan menjawab soal yang diberikan pada latihan dan mencocokanya dengan jawaban yang telah disediakan, maka pembaca dapat mereview kembali capaian yang diperoleh dengan menjawab soal-soal berikut:

1. Apakah elektronika daya itu?
2. Sebutkan beberapa tipe dari thyristor!

BAB II

SEMIKONDUKTOR DAYA

2.1. Pendahuluan

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

Penggunaan semikonduktor yang dioperasikan sebagai sakelar dalam suatu rangkaian elektronik 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 perubahan atau proses pengaturan. Karena keistimewaan inilah semikonduktor daya banyak digunakan dalam pengaturan daya listrik.

2.2. Tujuan Khusus

Setelah mempelajari materi ini, mahasiswa diharapkan mempunyai kemampuan sebagai berikut:

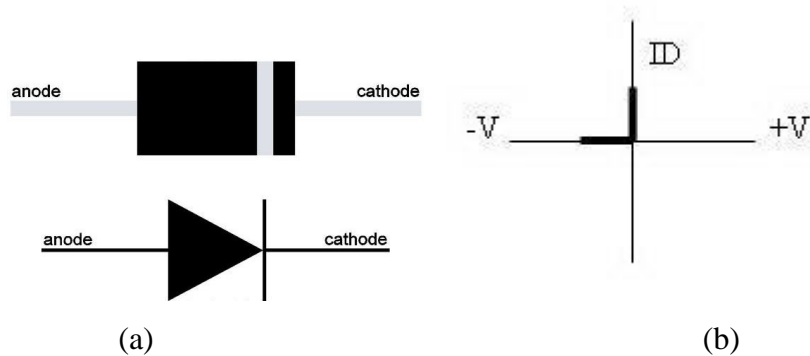
1. Mengetahui komponen semikonduktor daya

2. Mengetahui karakteristik semi konduktor daya
3. Mengetahui jenis-jenis semikonduktor daya

2.3. Teori

2.3.1. Dioda

Dioda merupakan semikonduktor(komponen) elektronika daya yang memiliki dua terminal, yaitu: anoda dan katoda. Dalam rangkaian elektronika daya, dioda difungsikan sebagai sakelar. Gambar 2.1(a) dan (b) masing-masing ditunjukkan simbol diode dan karakteristik ideal dioda jika dioperasikan sebagai sakelar. Sebagai sakelar, sebagaimana Gambar 2.1(b), dioda akan konduksi (ON) jika potensial pada anoda lebih positif daripada potensial pada katoda, dan dioda akan memblok (OFF) jika potensial pada anoda lebih negatif daripada potensial pada katoda.



Gambar 2.1 Diode: (a) simbol diode, (b) 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.

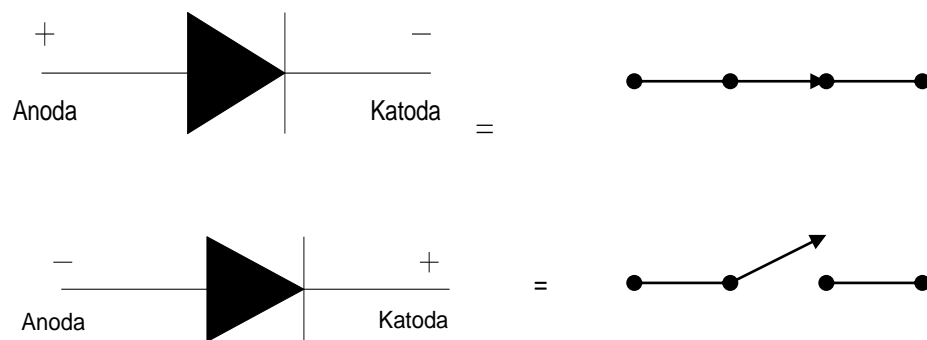
2.3.1.1 Bahan

Bahan yang digunakan dalam pembuatan dioda junction ini adalah dari bahan semikonduktor baik itu germanium maupun silicon. Potensial Barrier masing-masing konduktor ini adalah 0,7 volt untuk silicon dan 0,3 volt untuk germanium.

2.3.1.2 Rangkaian ekuivalen dioda

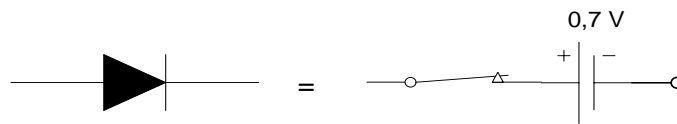
Ada tiga pendekatan dalam menentukan rangkaian ekuivalen dari sebuah dioda. Ketiga pendekatan itu yaitu,

Pendekatan pertama, dioda dianggap sebagai dioda yang ideal, yaitu dioda berlaku seperti konduktor (saklar tertutup) bila dibias maju (forward) dan dioda berlaku sebagai isolator (saklar terbuka) bila dioda di bias mundur (reverse) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Rangkaian ekuivalen dioda pendekatan pertama

Pendekatan kedua, dioda dianggap sebagai sebuah saklar yang seri dengan sebuah baterai 0,7 volt (silicon) dan 0,3 volt (germanium) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3. Saklar tertutup apabila tegangan yang diberikan pada dioda pada saat bias maju (forward) lebih besar dari 0,7 volt (silicon) atau 0,3 volt (germanium). Dan saklar terbuka apabila tegangan yang diberikan pada dioda pada saat bias maju (forward) lebih kecil dari 0,7 volt (silicon) atau 0,3 volt (germanium).

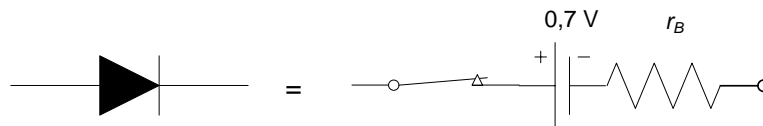


Gambar 2.3. Rangkaian ekivalen dioda pendekatan kedua

Pendekatan ketiga, pada pendekatan ini dioda dianggap sebagai saklar yang seri dengan sumber tegangan dan seri juga dengan resistansi bulk, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. Sehingga tegangan pada dioda adalah

$$V_f = 0,7 + I_{F,FB} \text{ untuk silicon}$$

$$V_f = 0,3 + I_{F,FB} \text{ untuk germanium}$$



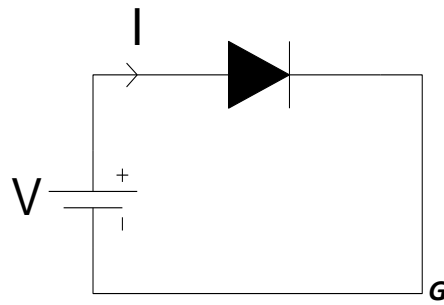
Gambar 2.4. Rangkaian ekivalen dioda pendekatan ketiga

2.3.1.3 Karakteristik dioda

Karakteristik tegangan versus arus pada dioda terdiri dari karakteristik forward (maju) dan karakteristik reverse (mundur). Kedua karakteristik ini dapat dijelaskan sebagai berikut.

Forward karakteristik

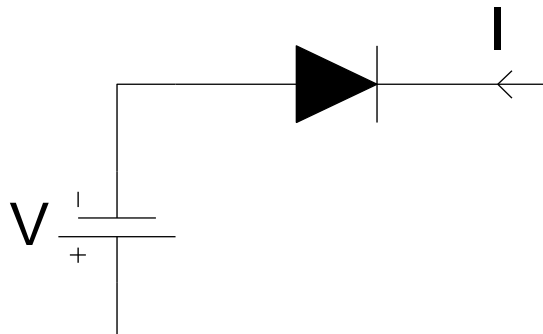
Bila sumber searah dihubungkan dengan sebuah dioda seperti terlihat pada Gambar 2.5. Jika tegangan sumber $V = 0$ maka arus pada dioda $I = 0$, bila tegangan sumber dinaikan, arus mulai mengalir dalam dioda. Arus meningkat secara perlahan, hingga dicapai tegangan barrier (V_B) sebesar 0,7 volt arus meningkat dengan tajam seperti terlihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.5 Forward Bias

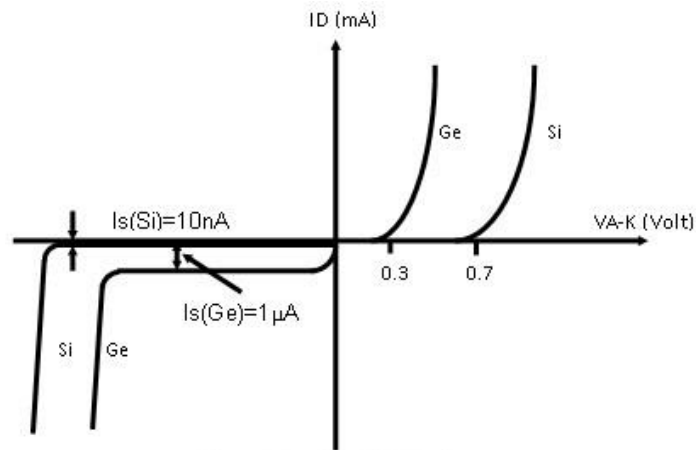
Reverse karakteristik

Gambar 2.6 memperlihatkan sebuah dioda yang diberi sumber tegangan, yang mana anoda dari dioda dihubungkan ke negative sumber tegangan dan katoda dioda dihubungkan dengan positif sumber tegangan. Rangkain ini dinamakan dengan bias mundur (bias reverse). Pada bias ini arus yang mengalir sangat kecil. Bila tegangan sumber ditingkatkan hingga diatas tegangan tertentu yang dinamakan dengan V_{BD} (PIV) pada Gambar 2.7, maka dioda akan breakdown dan arus yang mengalir akan semakin meningkat.



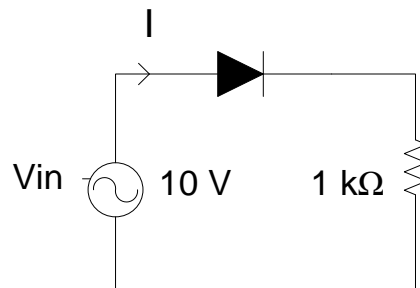
Gambar 2.6. Reverse Bias

Dari forward karakteristik dan reverse karakteristik dapat di gambarkan kurva karakteristik tegangan versus arus pada sebuah dioda seperti pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Karakteristik Tegangan Versus Arus pada Dioda

Contoh Soal : Gunakan pendekatan ketiga pada dioda silicon dengan $r_B = 20 \Omega$ untuk menghitung arus puncak pada gambar dibawah.



Jawab : Arus puncak adalah saat tegangan input mencapai puncak positif 10 V. Oleh sebab itu arus puncaknya sama dengan :

$$I_{puncak} = \frac{10 - 0,7}{1000 + 20} = 9,12 \text{ mA}$$

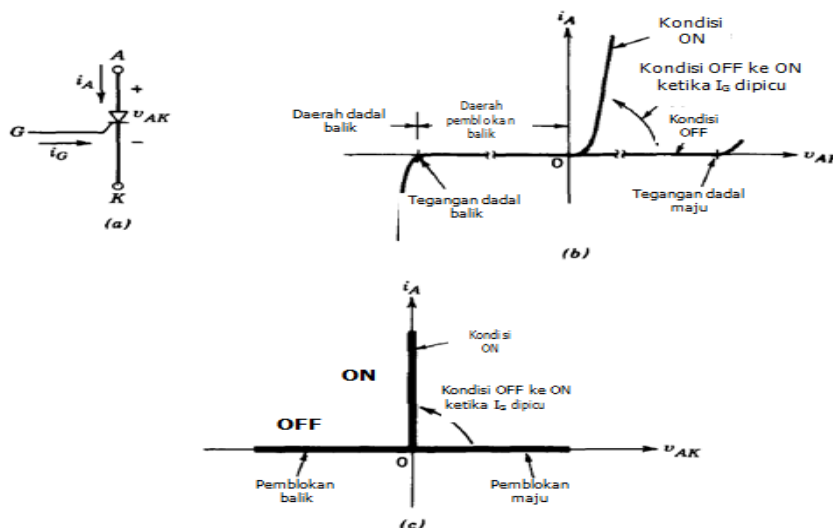
2.3.2 Thyristor

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 masuk dalam bentuk tegangan bolak-

balik(AC)maupun tegangan searah(DC). SCR dalam rangkaian elektronika daya dioperasikan sebagai sakelar. Gambar 2.8 (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 besaran 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 selaludialirkan arus pulsa positif. Berbeda dengan karakteristik sebelumnya, SCR akan OFF ketika arus pulsa pada gate diputus. Hal ini berarti, arus pulsa pada gate harus selaludihubungkan dengan terminal gate agar rangkaian dapat bekerja sebagaimana yang diharapkan.



Gambar 2.8 SCR: (a) simbol SCR, (b) karakteristik SCR,

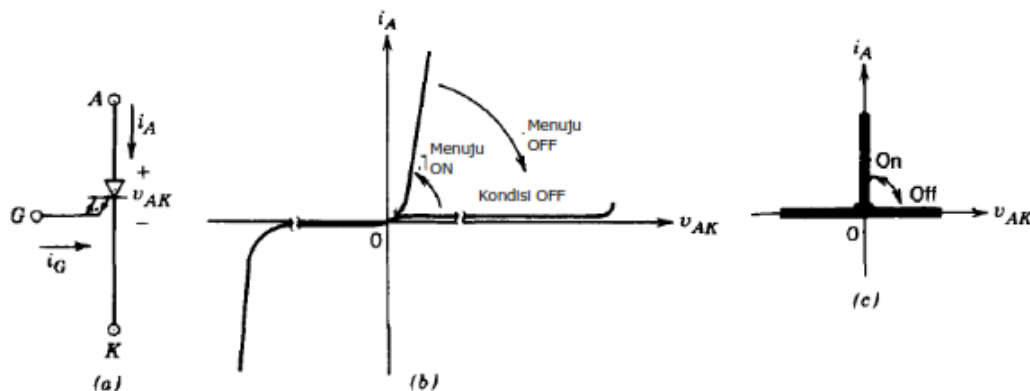
(c) karakteristik ideal SCR sebagai sakelar

Jika SCR dalam kondisi ideal, ketika SCR dalam kondisi ON memiliki karakteristik tegangan pada SCR sama dengan anoda 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.

2.3.3 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.

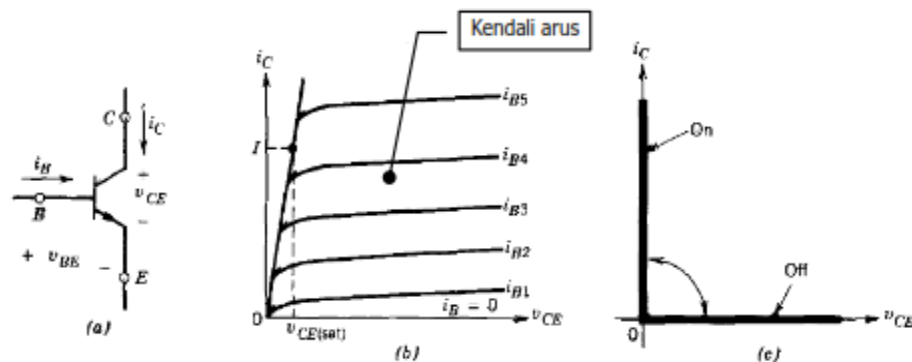
Dalam rangkaian elektronika daya, GTO dioperasikan sebagai sakelar. Gambar 2.9(a), (b), dan (c) masing-masing ditunjukkan simbol GTO, karakteristik GTO, karakteristik ideal GTO jika dioperasikan sebagai sakelar. Seperti SCR, GTO akan konduksi (ON) jika potensial pada anoda lebih positif daripada potensial pada katoda dan pada terminal gerbang dialirkan pulsa arus positif dan akan terus ON. GTO akan OFF jika terminal gerbang dan katoda diberikan tegangan yang lebih negatif atau dialiri pulsa arus negatif.



Gambar 2.9 GTO: (a) simbol GTO, (b) karakteristik GTO, (c) karakteristik ideal SCR sebagai sakelar

2.3.4 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 2.10(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 diberikan bias (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.

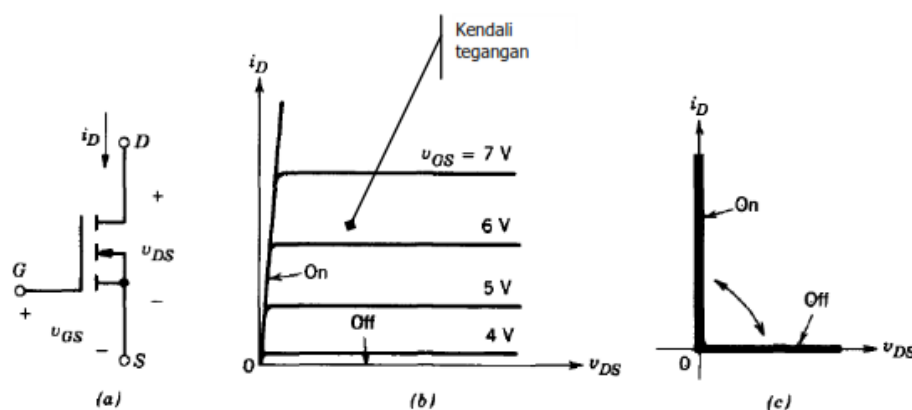


Gambar 2.11 Transistor: (a) simbol transistor, (b) karakteristik transistor, (c) karakteristik ideal transistor sebagai sakelar

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.

2.3.5 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 2.12 (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 dicatutegangan 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.



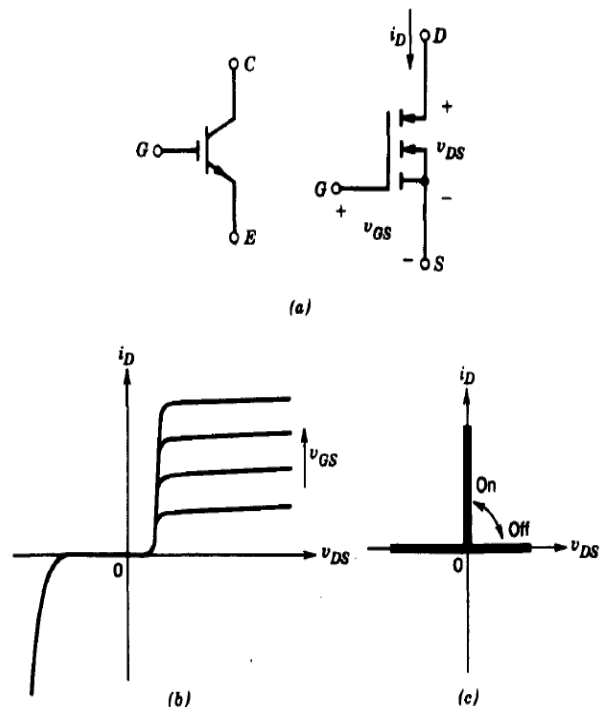
Gambar 2.12 MOSFET: (a) simbol MOSFET, (b) karakteristik MOSFET, (c) karakteristik ideal MOSFET sebagai sakelar

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.

2.3.6 Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)

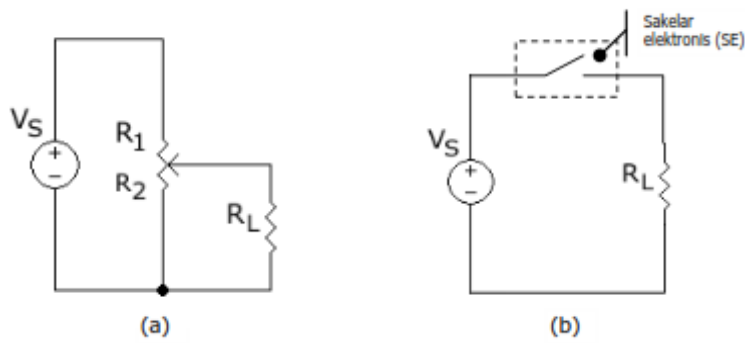
IGBT merupakan komponen elektronik daya yang memiliki karakteristik gabungan antara MOSFET, transistor, dan GTO. Seperti MOSFET, IGBT memiliki impedansi gerbang yang tinggi sehingga hanya memerlukan arus yang kecil untuk mengaktifkannya. Serupa dengan transistor, IGBT memiliki tegangan kondisi-ON yang kecil meskipun komponen ini mempunyai rating tegangan yang besar dan mampu memblokir tegangan negatif seperti halnya GTO. Gambar 2.13(a), (b), dan (c) masing-masing ditunjukkan simbol IGBT, karakteristik IGBT, dan karakteristik ideal IGBT sebagai sakelar. Seperti halnya semikonduktor daya lainnya, IGBT dalam kondisi ON dan OFF tidak terjadi kerugian daya pada IGBT sebagai sakelar.



Gambar 2.13 IGBT: (a) simbol IGBT, (b) karakteristik IGBT, (c) karakteristik ideal IGBT sebagai sakelar

2.3.7 Prinsip Dasar Rangkaian Elektronika Daya

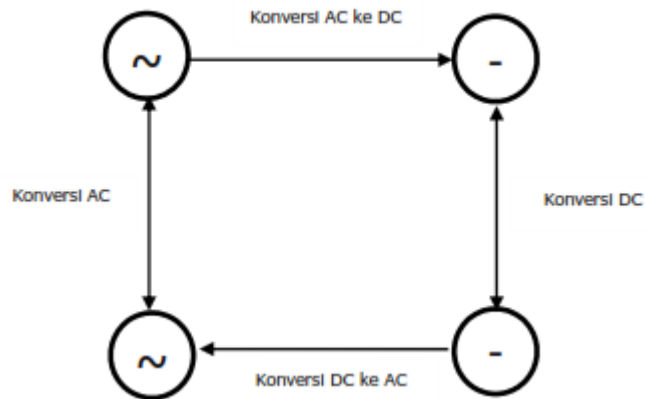
Pengaturandayalistrikdapatdilakukandengancara melakukan konversi bentuk gelombang besaran tertentu menjadi bentuk lain denganmenggunakansuaturangkaianelektronika denganprinsipkerja yangmemanfaatkankarakteristikpensakelaran dari piranti semikonduktor dayasebagaidiuraikandimuka.Esensidasarrangkaianelektronika dayadapatdijelaskanmelaluiGambar2.14(a) dan(b).Gambar2.14(a) merupakanpengaturansumbertegangan V_S menjadi sumbertegangan output (V_{RL}) pada beban R_L yangnilainya ditentukan oleh pengaturan potensiometer, dimanani laitegangan V_{RL} akan selalulebihkecilataumaksimumsamadengantegangan V_S . Pengaturantegangan dengan menggunakan potensiometer ini, terdapat rugi daya pada potensiometer sebesar $I^2 (R_1 + R_2)$. Dalam konsep rangkaian elektronika daya, rugidayatersebut harus ditiadakanatau dirancang tidakada rugidayadalamrangkaiannya. Untuk keperluan tersebut, potensiometer diganti dengan prinsip pensakelaran elektronis (electronicswitching). Prinsip pensakelaran elektronis merupakan dasardarioperasisuaturangkaianelektronikadayaseperti ditunjukkan padaGambar2.14(b). Komponensemikonduktordaya sebagaimana dijelaskandi muka umumnya digunakan sebagai sakelar elektronisini. DariGambar2.14(b)dapat dijelaskan bahwa saatsakelar elektronis(SE) kondisiONdanOFFtidakterjadi rugidayapadaSE, karena saat ON teganganpadaSE sama dengannoldanarusyangmengalirpada SE samadenganaruspadabeban R_L . Sebaliknya, saatOFF teganganpada SE samadengansumber V_S tetapiarusyangmengalirpadaSE sama dengan nol sehingga rugi daya sama dengan nol.



Gambar 2.14 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 2.15. 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 2.15 Bentuk Konversi Daya Listrik dengan Piranti Semikonduktor Daya

2.4 Latihan

1. Apakah elektronika daya itu ?
2. Jelaskan prinsip kerja dioda, SCR, transistor, MOSFET sebagai sakelar !

2.5 Rangkuman

Dioda mempunyai lambang panah yang menunjuk dari anoda ke katoda. Karena arus hanya akan mudah mengalir dari anoda ke katoda. Sebaliknya arus tidak akan mengalir dari katoda ke anoda kecuali tegangan yang diberikan sampai batas tegangan *breakdown* dari dioda.

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.

Seperti karakteristik sekalar pada umumnya, karakteristik semikonduktor daya yang dioperasikan sebagai sakelar memiliki dua keadaan, yaitu: kondisi 'ON' dan kondisi 'OFF'.

2.6 Review

Bagi para pembaca setelah mempelajari uraian di atas dan menjawab soal yang diberikan pada latihan dan mencocokkannya dengan jawaban yang

telah disediakan, maka pembaca dapat mereview kembali capaian yang diperoleh dengan menjawab soal-soal berikut:

1. Jelaskan perbedaan karakteristik penyulutan pada SCR dan transistor!
2. Jelaskan perbedaan karakteristik penyulutan pada transistor dan MOSFET!

BAB III PENYEARAH

3.1 Pendahuluan

Penyearah adalah rangkaian elektronik yang berfungsi menyearahkan gelombang arus listrik. Arus listrik yang semula berupa arus bolak-balik (AC) jika dilewatkan rangkaian penyearah akan berubah menjadi arus searah (DC).

3.2 Tujuan Khusus

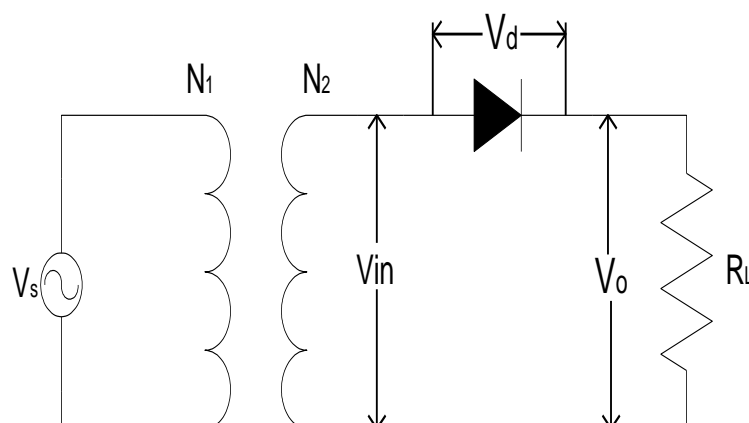
Setelah mempelajari materi ini, mahasiswa diharapkan mampu sebagai berikut:

1. Memahami prinsip rangkaian penyearah tidak terkendali satu fasa dan tiga fasa.
2. Merencanakan rangkaian penyearah setengah gelombang 3 fasa
3. Merencanakan rangkaian penyearah gelombang penuh 3 fasa

3.3 Teori

3.3.1 Penyearah Setengah Gelombang Satu Fasa

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa penyearah berfungsi untuk mengubah tegangan bolak balik menjadi tegangan searah, maka rangkaian penyearah memiliki sumber tegangan bolak balik. Rangkaian penyearah setengah gelombang tersebut seperti rangkaian pada Gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3.1 Penyearah Setengah Gelombang

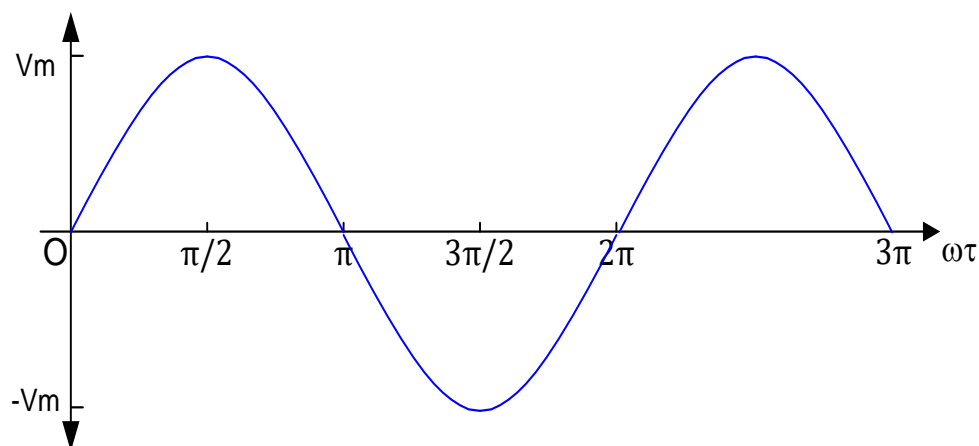
Dari rangkaian penyearah setengah gelombang pada Gambar 3.1, V_d adalah tegangan jatuh pada dioda yang besarnya 0,7 volt untuk dioda silicon dan 0,3 untuk dioda germanium. Parameter dari penyearah tersebut, yaitu;

- a. Tegangan efektif input ($V_{in\ rms}$)
- b. Tegangan efektif output ($V_{o\ rms}$)
- c. Arus efektif output ($I_{o\ rms}$)
- d. Tegangan rata-rata output (V_{dc})
- e. Arus rata-rata output (I_{dc})
- f. Daya ac output (P_{ac})
- g. Daya dc output (P_{dc})
- h. Effisiensi
- i. Form factor
- j. Ripple factor
- k. Tegangan Inverse Puncak (PIV)
- l. Frekuensi input (f_{in}) dan frekuensi output (f_{out})

Parameter tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut;

a. Tegangan efektif input.

Bentuk gelombang V_{in} pada rangkaian penyearah setengah gelombang adalah sinusoidal seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Bentuk Gelombang input

Harga efektif dari bentuk gelombang tersebut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini,

$$Y_{efektif} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y(t)^2 dt} \dots\dots\dots (3.1)$$

dimana:

$Y_{efektif}$: nilai efektif, (dapat berupa tegangan, atau arus).

T : Periode

$y(t)$: persamaan dari bentuk gelombang.(tegangan, arus).

Jadi tegangan efektif untuk bentuk gelombang pada Gambar 3.2 adalah:

$$y_{efektif} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y(t)^2 dt}$$

$$V_{efektif} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (V_m \sin(\omega t))^2 dt}$$

$$V_{efektif} = \sqrt{\frac{V_m^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2(\omega t) dt}$$

$$V_{efektif} = \sqrt{\frac{V_m^2}{T} \int_0^{2\pi} \left(\frac{1}{2}(1 - \cos(2\omega t))\right) dt}$$

$$V_{efektif} = \sqrt{\frac{V_m^2}{T} \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{1}{4\omega} \sin(2\omega t)\right]_0^{2\pi}}$$

$$V_{efektif} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \text{ volt}$$

Jadi Tegangan efektif input adalah

$$V_{in\ rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}, \dots\dots\dots (3.2)$$

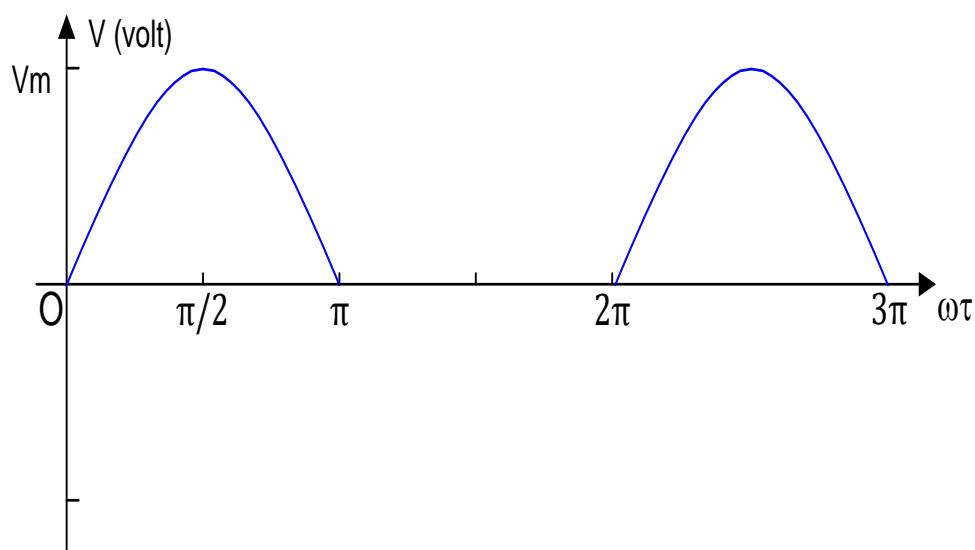
dimana V_m adalah tegangan maksimum atau tegangan Puncak

Hubungan antara tegangan sumber puncak (V_s) dengan V_m pada rangkaian Gambar 1.20 adalah,

$$V_m = \frac{N_2}{N_1} V_{s\text{ rms}} \dots\dots\dots (3.3)$$

b. Tegangan efektif output ($V_{o\text{ rms}}$)

Pada rangkaian penyearah setengah gelombang pada Gambar 1.21, di saat setengah siklus positif tegangan jala-jala, dioda dibias maju (forward), dan di saat setengah siklus negative dioda di bias mundur (reverse). Sehingga bentuk tegangan yang dihasilkan pada beban (R_L) adalah,



Gambar 3.3. Bentuk Gelombang output

Dari bentuk gelombang output pada Gambar 3.3, dapat dihitung tegangan efektif output ($V_{o\text{ rms}}$), yaitu;

Untuk $\pi \leq \omega t \leq 2\pi$, $V(t) = 0.$, jadi:

$$y_{\text{efektif}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} y(t)^2 dt}$$

$$V_{\text{efektif}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (V_m \sin(\omega t))^2 d\omega t}$$

$$V_{\text{efektif}} = \sqrt{\frac{V_m^2}{2\pi} \int_0^{\pi} \sin^2(\omega t) d\omega t}$$

$$V_{\text{efektif}} = \sqrt{\frac{V_m^2}{2\pi} \int_0^{\pi} \left(\frac{1}{2}(1 - \cos(2\omega t))\right) d\omega t}$$

$$V_{\text{efektif}} = \sqrt{\frac{V_m^2}{2\pi} \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{1}{4\omega} \sin(2\omega t)\right]_0^{\pi}}$$

$$V_{\text{efektif}} = \frac{V_m}{2} \text{ volt}$$

Tegangan efektif out put pada rangkaian penyearah setengah gelombang pada Gambar 3.3 adalah

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_m}{2}, \dots\dots\dots (3.4)$$

dimana V_m adalah tegangan maksimum atau tegangan Puncak

c. Arus efektif output (I_{rms})

Arus efektif output adalah arus efektif yang mengalir melalui beban (R_L), dimana besarnya adalah;

$$I_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{rms}}}{R_L}$$

$$I_{\text{rms}} = \frac{V_m}{2R_L} \dots\dots\dots (3.5)$$

d. Tegangan rata-rata output (V_{dc})

Bentuk gelombang tegangan yang dihasilkan oleh penyearah setengah gelombang seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3, dari bentuk gelombang tersebut dapat dihitung tegangan rata-rata atau tegangan dc nya, yaitu;

$$Y_{rata-rata} = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

dimana :

$Y_{rata-rata}$: nilai rata-rata, (dapat berupa tegangan, arus).

T : Periode

y(t) : persamaan dari bentuk gelombang.(tegangan, arus atau daya).

Jadi tegangan rata-rata untuk bentuk gelombang ouput pada Gambar 3.3 adalah:

$$\begin{aligned} V_{rata-rata} &= \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt \\ V_{rata-rata} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_m \sin(\omega t) d\omega t \\ V_{rata-rata} &= \frac{1}{2\pi} V_m [-\cos \omega t]_0^\pi \\ V_{rata-rata} &= \frac{V_m}{\pi} \end{aligned}$$

Tegangan rata-rata output tegangan dc pada rangkaian penyearah setengah gelombang adalah

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi}, \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

dimana V_m adalah tegangan maksimum atau tegangan puncak

e. Arus rata-rata output (I_{dc})

Arus rata-rata output adalah arus rata-rata yang mengalir melalui beban (R_L), dimana besarnya adalah;

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

$$I_{dc} = \frac{V_m}{\pi R_L} \dots\dots\dots (3.8)$$

f. Daya ac output (P_{ac})

Besarnya daya ac output (P_{ac}) pada beban (R_L) adalah

$$P_{ac} = V_{o\,rms} \cdot I_{o\,rms}$$

$$P_{ac} = \frac{V_m}{2} \cdot \frac{V_m}{2R_L}$$

$$P_{ac} = \frac{V_m^2}{4R_L} \dots\dots\dots (3.9)$$

dimana,

V_m = tegangan maksimum atau puncak

R_L = tahanan beban

g. Daya dc output (P_{dc})

Besarnya daya dc output (P_{dc}) pada beban (R_L) adalah

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

$$P_{dc} = \frac{V_m}{\pi} \cdot \frac{V_m}{\pi R_L}$$

$$P_{ac} = \frac{V_m^2}{\pi^2 R_L} \dots\dots\dots (3.10)$$

dimana,

V_m = tegangan maksimum atau puncak

R_L = tahanan beban

h. Efisiensi (η)

Effisiensi dari sebuah penyearah didefinisikan sebagai perbandingan antara daya output dc dengan daya output ac, secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut;

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}}$$

$$\eta = \frac{\frac{V_m^2}{\pi^2 R_L}}{\frac{V_m^2}{4R_L}}$$

$$\eta = \frac{4}{\pi^2} \quad \text{----- (3.11)}$$

i. Form factor (FF)

Form Faktor didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan output efektif dengan tegangan output dc, yang menyatakan sebagai suatu ukuran bentuk tegangan keoutput. Secara matematis form faktor dapat dituliskan sebagai berikut,

$$FF = \frac{V_{o\,rms}}{V_{dc}} \quad \text{..... (3.12)}$$

dimana,

$V_{o\,rms}$ = tegangan output efektif (Volt)

V_{dc} = tegangan output dc (Volt)

j. Ripple Factor (RF)

Ripple factor dari sebuah penyearah didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan output ac dengan tegangan output dc, secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut;

$$RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}}, \text{ dimana } V_{ac} = \sqrt{V_{o\,rms}^2 - V_{dc}^2}$$

$$RF = \frac{\sqrt{V_{o\,rms}^2 - V_{dc}^2}}{V_{dc}}$$

$$RF = \sqrt{\left(\frac{V_{o\,rms}}{V_{dc}}\right)^2 - 1}$$

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} \quad \text{----- (3.13)}$$

k. Tegangan Inverse Puncak (PIV)

Tegangan Inverse Puncak (PIV) adalah tegangan maksimum yang dipikul oleh dioda selama dioda tersebut dibias reverse. Pada penyearah setengah gelombang tegangan inverse puncaknya adalah

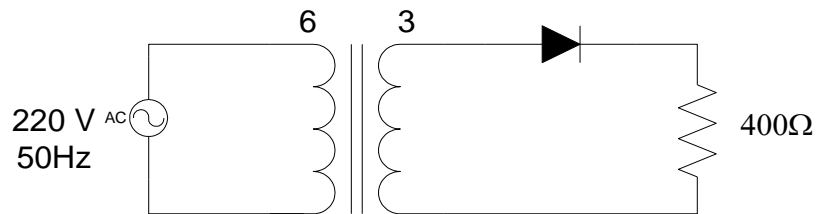
$$\mathbf{PIV = V_m} \dots\dots\dots (3.14)$$

l. Frekuensi input (f_{in}) dan Frekuensi output (f_{out})

Dari bentuk gelombang input pada Gambar 3.2 dan gelombang output pada Gambar 3.3 terlihat bahwa perioda (T) kedua bentuk gelombang tersebut adalah sama. Karena periodanya sama maka frekuensi input sama dengan frekuensi output.

$$\mathbf{f_{out} = f_{in}} \dots\dots\dots (3.15)$$

contoh 1. Hitung parameter pada rangkaian penyearah setengah gelombang pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4

Jawab;

Tegangan efektif input. ($V_{in\ rms}$)

$$V_{in\ rms} = \frac{N_2}{N_1} V_s$$

$$V_{in\ rms} = \frac{3}{6} \cdot 220$$

$$V_{in\ rms} = 110\text{ V}$$

Tegangan efektif output ($V_{o\ rms}$)

$$V_{o\ rms} = \frac{V_m}{2}, \text{ di mana } V_m = \frac{3}{6} \cdot \sqrt{2} \cdot 220 = 155,6\text{V}$$

$$V_{o\ rms} = \frac{155,6}{2}$$

$$V_{o\ rms} = 77,8\text{V}$$

Arus efektif output ($I_{o\ rms}$)

$$I_{o\ rms} = \frac{V_{o\ rms}}{R_L}$$

$$I_{o\ rms} = \frac{77,8}{2 \cdot 400}$$

$$I_{o\ rms} = 0,097\text{A}$$

Tegangan rata-rata output (V_{dc})

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi}$$

$$V_{dc} = \frac{155,6}{3,14}$$

$$V_{dc} = 49,55\text{V}$$

Arus rata-rata out put (I_{dc})

$$I_{dc} = \frac{V_m}{\pi R_L}$$

$$I_{dc} = \frac{155,6}{3,14 \cdot 400}$$

$$I_{dc} = 0,124\text{A}$$

Daya out put ac (P_{ac})

$$P_{ac} = \frac{V_m^2}{4R_L}$$

$$P_{ac} = \frac{155,6^2}{4 \cdot 400}$$

$$P_{ac} = 15,13\text{VA}$$

Daya out put dc (P_{ac})

$$P_{ac} = \frac{V_m^2}{\pi^2 R_L}$$

$$P_{ac} = \frac{155,6^2}{3,14^2 \cdot 400}$$

$$P_{ac} = 6,12A$$

Effisiensi (η)

$$\eta = \frac{4}{\pi^2}$$

$$\eta = \frac{4}{3,14^2}$$

$$\eta = 0,406$$

Form factor (FF)

$$FF = \frac{V_{o\text{rms}}}{V_{dc}}$$

$$FF = \frac{77,8}{49,55} =$$

$$FF = 1,57$$

Ripple Factor (RF)

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1}$$

$$RF = \sqrt{1,57^2 - 1}$$

$$RF = 1,21$$

Tegangan Inverse Puncak (PIV)

$$PIV = V_m$$

$$PIV = 155,6V$$

Frekuensi output (f_{out})

$$f_{out} = f_{in}$$

$$f_{out} = 50 \text{ Hz}$$

contoh 2. Hitung parameter pada rangkaian penyearah setengah gelombang pada Gambar 3.4 bila tegangan jatuh pada dioda (silicon) diperhitungkan.

Jawab;

Tegangan efektif input. ($V_{in\ rms}$)

Tidak ada perubahan, sama seperti contoh satu.

Tegangan efektif output ($V_{o\ rms}$)

$$V_{o\ rms} = \frac{V_m}{2}, \text{ di mana } V_m = \frac{3}{6} \cdot \sqrt{2} \cdot 220 - 0,7 = 154,9\text{V}$$

$$V_{o\ rms} = \frac{154,9}{2}$$

$$V_{o\ rms} = 77,45\text{V}$$

Arus efektif output ($I_{o\ rms}$)

$$I_{o\ rms} = \frac{V_{o\ rms}}{R_L}$$

$$I_{o\ rms} = \frac{77,45}{2 \cdot 400}$$

$$I_{o\ rms} = 0,0968\text{A}$$

Tegangan rata-rata output (V_{dc})

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi}$$

$$V_{dc} = \frac{154,9}{3,14}$$

$$V_{dc} = 49,33\text{V}$$

Arus rata-rata out put (I_{dc})

$$I_{dc} = \frac{V_m}{\pi R_L}$$

$$I_{dc} = \frac{154,9}{3,14 \cdot 400}$$

$$I_{dc} = 0,123\text{A}$$

Daya out put ac (P_{ac})

$$P_{ac} = \frac{V_m^2}{4R_L}$$

$$P_{ac} = \frac{154,9^2}{4 \bullet 400}$$

$$P_{ac} = 14,99VA$$

Daya out put dc (P_{dc})

$$P_{ac} = \frac{V_m^2}{\pi^2 R_L}$$

$$P_{ac} = \frac{154,9^2}{3,14^2 \bullet 400}$$

$$P_{ac} = 6,08A$$

Effesiensi (η)

$$\eta = \frac{4}{\pi^2}$$

$$\eta = \frac{4}{3,14^2}$$

$$\eta = 0,406$$

Form factor (FF)

$$FF = \frac{V_{o\text{rms}}}{V_{dc}}$$

$$FF = \frac{77,45}{49,33} =$$

$$FF = 1,57$$

Ripple Factor (RF)

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1}$$

$$RF = \sqrt{1,57^2 - 1}$$

$$RF = 1,21$$

Tegangan Inverse Puncak (PIV)

$$PIV = V_m$$

$$PIV = 155,6V$$

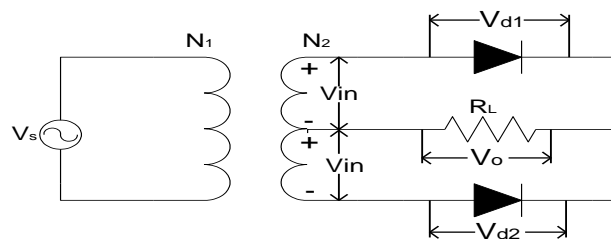
Frekuensi output (f_{out})

$$f_{out} = f_{in}$$

$$f_{out} = 50 \text{ Hz}$$

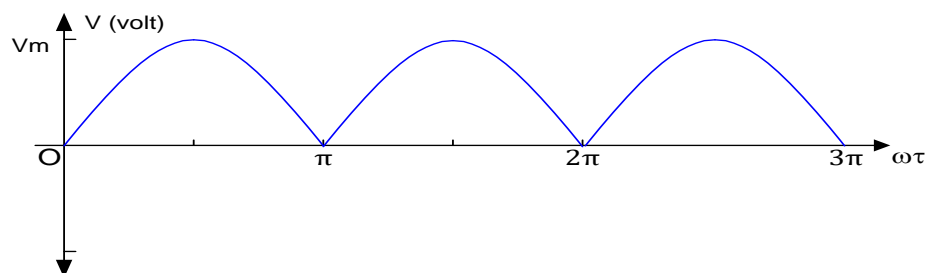
3.3.2 Penyearah Gelombang Penuh Satu Fasa

Pada penyearah gelombang penuh dengan hanya menggunakan dua buah dioda, transformator untuk menurunkan tegangan harus menggunakan transformator center tap (CT). Rangkaian penyearah gelombang penuh tersebut seperti terlihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Penyearah Gelombang Penuh.

Pada rangkaian penyearah gelombang penuh pada Gambar 3.5, di saat setengah siklus positif tegangan jala-jala, dioda satu (D1) dibias maju (forward) dan dioda dua (D2) dibias mundur (reverse), dan di saat setengah siklus negative tegangan jala-jala dioda satu (D1) di bias mundur (reverse) dan dioda dua (D2) dibias maju (forward). Sehingga bentuk tegangan yang dihasilkan pada beban (R_L) adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6. Bentuk Gelombang output

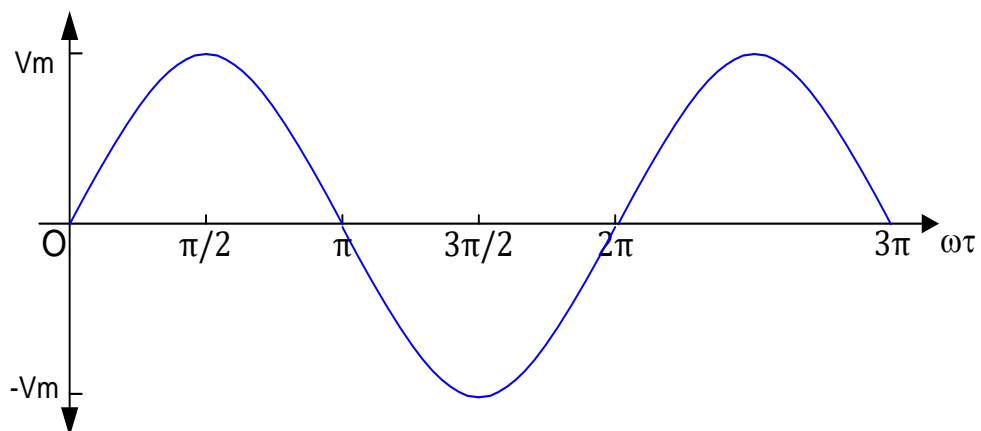
Dari rangkaian penyearah gelombang penuh pada Gambar 3.6, V_d adalah tegangan jatuh pada dioda yang besarnya 0,7 volt untuk dioda silicon dan 0,3 untuk dioda germanium. Parameter dari penyearah tersebut, yaitu;

- b. Tegangan efektif input ($V_{in\ rms}$)
- c. Tegangan efektif output ($V_{o\ rms}$)
- d. Arus efektif output ($I_{o\ rms}$)
- e. Tegangan rata-rata output (V_{dc})
- f. Arus rata-rata output (I_{dc})
- g. Daya ac output (P_{ac})
- h. Daya dc output (P_{dc})
- i. Effesiensi
- j. Form factor
- k. Ripple factor
- l. Tegangan Inverse Puncak (PIV)
- m. Frekuensi input (f_{in}) dan frekuensi output (f_{out})

Parameter tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut;

a. Tegangan efektif input.

Bentuk gelombang V_{in} pada rangkaian penyearah gelombang penuh adalah sinusoidal seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Bentuk Gelombang input

Harga efektif dari bentuk gelombang tersebut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini,

$$Y_{efektif} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y(t)^2 dt} \dots\dots\dots (3.16)$$

dimana:

$Y_{efektif}$: nilai efektif, (dapat berupa tegangan, atau arus).

T : Periode

$y(t)$: persamaan dari bentuk gelombang.(tegangan, arus).

Jadi tegangan efektif untuk bentuk gelombang pada Gambar 3.7 adalah

$$y_{efektif} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y(t)^2 dt}$$

$$V_{efektif} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (V_m \sin(\omega t))^2 d(\omega t)}$$

$$V_{efektif} = \sqrt{\frac{V_m^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2(\omega t) d(\omega t)}$$

$$V_{efektif} = \sqrt{\frac{V_m^2}{T} \int_0^{2\pi} \left(\frac{1}{2}(1 - \cos(2\omega t))\right) d(\omega t)}$$

$$V_{efektif} = \sqrt{\frac{V_m^2}{T} \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{1}{4} \sin(2\omega t)\right]_0^{2\pi}}$$

$$V_{efektif} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \text{ volt}$$

Jadi Tegangan efektif input adalah

$$V_{in\ rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}, \dots\dots\dots (3.17)$$

dimana V_m adalah tegangan maksimum atau tegangan Puncak

Hubungan antara tegangan sumber puncak (V_s) dengan V_m pada rangkaian Gambar 3.5 adalah,

$$V_m = \frac{1}{2} \frac{N_2}{N_1} V_{s\text{ rms}} \dots\dots\dots (3.18)$$

b. Tegangan efektif output ($V_{o\text{ rms}}$)

Dari bentuk tegangan output pada Gambar 1.25, dapat dihitung tegangan efektif output ($V_{o\text{ rms}}$), yaitu;

$$y_{\text{efektif}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y(t)^2 dt}$$

$$V_{\text{efektif}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (V_m \sin(\omega t))^2 d(\omega t)}$$

$$V_{\text{efektif}} = \sqrt{\frac{V_m^2}{\pi} \int_0^{\pi} \sin^2(\omega t) d(\omega t)}$$

$$V_{\text{efektif}} = \sqrt{\frac{V_m^2}{\pi} \int_0^{\pi} \left(\frac{1}{2}(1 - \cos(2\omega t))\right) d(\omega t)}$$

$$V_{\text{efektif}} = \sqrt{\frac{V_m^2}{\pi} \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{1}{4} \sin(2\omega t)\right]_0^{\pi}}$$

$$V_{\text{efektif}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \text{ volt}$$

Tegangan efektif output pada rangkaian penyearah gelombang penuh adalah:

$$V_{o\text{ rms}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}, \dots\dots\dots (3.19)$$

dimana V_m adalah tegangan maksimum atau tegangan Puncak

c. Arus efektif output ($I_{o\ rms}$)

Arus efektif output adalah arus efektif yang mengalir melalui beban (R_L), dimana besarnya adalah;

$$I_{o\ rms} = \frac{V_{o\ rms}}{R_L}$$

$$I_{o\ rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2} R_L} \dots\dots\dots (3.20)$$

d. Tegangan rata-rata output (V_{dc})

Bentuk gelombang tegangan yang dihasilkan oleh penyearah gelombang penuh seperti ditunjukkan pada Gambar 3.6, dari bentuk gelombang tersebut dapat dihitung tegangan rata-rata atau tegangan dc nya, yaitu;

$$Y_{rata-rata} = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt \dots\dots\dots (3.21)$$

dimana :

$Y_{rata-rata}$: nilai rata-rata, (dapat berupa tegangan, arus).

T : Periode

$y(t)$: persamaan dari bentuk gelombang.(tegangan, arus atau daya).

Jadi tegangan rata-rata untuk bentuk gelombang ouput adalah

$$V_{rata-rata} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt$$

$$V_{rata-rata} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin(\omega t) d(\omega t)$$

$$V_{rata-rata} = \frac{1}{\pi} V_m [-\cos(\omega t)]_0^{\pi}$$

$$V_{rata-rata} = \frac{2V_m}{\pi}$$

Tegangan rata-rata output tegangan dc pada rangkaian penyearah setengah gelombang adalah

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi}, \quad \dots\dots\dots (3.22)$$

dimana V_m adalah tegangan maksimum atau tegangan puncak

e. Arus rata-rata output (I_{dc})

Arus rata-rata output adalah arus rata-rata yang mengalir melalui beban (R_L), dimana besarnya adalah;

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

$$I_{dc} = \frac{2V_m}{\pi R_L} \quad \dots\dots\dots (3.23)$$

f. Daya ac output (P_{ac})

Besarnya daya ac output (P_{ac}) pada beban (R_L) adalah

$$P_{ac} = V_{rms} \cdot I_{rms}$$

$$P_{ac} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_m}{\sqrt{2} R_L}$$

$$P_{ac} = \frac{V_m^2}{2R_L} \quad \dots\dots\dots (3.24)$$

dimana,

V_m = tegangan maksimum atau puncak

R_L = tahanan beban

g. Daya dc output (P_{dc})

Besarnya daya dc output (P_{dc}) pada beban (R_L) adalah

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

$$P_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} \cdot \frac{2V_m}{\pi R_L}$$

$$P_{dc} = \frac{4V_m^2}{\pi^2 R_L} \quad \dots\dots\dots (3.25)$$

dimana,

V_m = tegangan maksimum atau puncak

R_L = tahanan beban

h. Effisiensi (η)

Effisiensi dari sebuah penyearah didefinisikan sebagai perbandingan antara daya output dc dengan daya output ac, secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut;

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}}$$
$$\eta = \frac{\frac{4V_m^2}{\pi^2 R_L}}{\frac{V_m^2}{2R_L}}$$
$$\eta = \frac{8}{\pi^2} \quad \text{----- (3.26)}$$

i. Form factor (FF)

Form Faktor didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan output efektif dengan tegangan output dc, yang menyatakan sebagai suatu ukuran bentuk tegangan keoutput. Secara matematis form faktor dapat dituliskan sebagai berikut,

$$FF = \frac{V_{o,rms}}{V_{dc}} \quad \text{..... (3.27)}$$

dimana,

$V_{o,rms}$ = tegangan output efektif (Volt)

V_{dc} = tegangan output dc (Volt)

j. Ripple Factor (RF)

Ripple factor dari sebuah penyearah didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan output ac dengan tegangan output dc, secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut;

$$\begin{aligned} \text{RF} &= \frac{V_{\text{ac}}}{V_{\text{dc}}}, \text{ dimana } V_{\text{ac}} = \sqrt{V_{\text{orms}}^2 - V_{\text{dc}}^2} \\ \text{RF} &= \frac{\sqrt{V_{\text{orms}}^2 - V_{\text{dc}}^2}}{V_{\text{dc}}} \\ \text{RF} &= \sqrt{\left(\frac{V_{\text{orms}}}{V_{\text{dc}}}\right)^2 - 1} \\ \text{RF} &= \sqrt{\text{FF}^2 - 1} \end{aligned} \quad \text{----- (3.28)}$$

k. Tegangan Inverse Puncak (PIV)

Tegangan Inverse Puncak (PIV) adalah tegangan maksimum yang dipikul oleh dioda selama dioda tersebut dibias reverse. Pada penyearah gelombang penuh tegangan inverse puncaknya adalah

$$\text{PIV} = 2V_m \quad \text{----- (3.29)}$$

l. Frekuensi input (f_{in}) dan Frekuensi output (f_{out})

Dari bentuk gelombang input pada Gambar 3.7 dan gelombang output pada Gambar 3.6 terlihat bahwa perioda (T) kedua bentuk gelombang tersebut adalah sama. Karena periodanya sama maka frekuensi input sama dengan frekuensi output.

$$f_{out} = 2f_{in} \quad \text{----- (3.30)}$$

contoh 3. Hitung parameter pada rangkaian penyearah gelombang penuh pada Gambar 3.5. Bila $V_s = 220$ Volt, 50Hz, $N_1 = 6$, $N_2 = 3$ dan $R_L = 400\Omega$.

Jawab;

Tegangan efektif input. ($V_{in\ rms}$)

$$V_{in\ rms} = \frac{1}{2} \frac{N_2}{N_1} V_s$$

$$V_{in\ rms} = \frac{1}{2} \frac{3}{6} \cdot 220$$

$$V_{in\ rms} = 55\text{ V}$$

Tegangan efektif output ($V_{o\ rms}$)

$$V_{o\ rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}, \text{ di mana } V_m = \sqrt{2} V_{in\ rms} = \sqrt{2} \cdot 55 = 77,78\text{ V}$$

$$V_{o\ rms} = \frac{77,78}{\sqrt{2}}$$

$$V_{o\ rms} = 55\text{ V}$$

Arus efektif output ($I_{o\ rms}$)

$$I_{o\ rms} = \frac{V_{o\ rms}}{R_L}$$

$$I_{o\ rms} = \frac{55}{400}$$

$$I_{o\ rms} = 0,1375\text{ A}$$

Tegangan rata-rata output (V_{dc})

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi}$$

$$V_{dc} = \frac{2 \cdot 77,78}{3,14}$$

$$V_{dc} = 49,54\text{ V}$$

Arus rata-rata out put (I_{dc})

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

$$I_{dc} = \frac{49,54}{400}$$

$$I_{dc} = 0,2138\text{ A}$$

Daya out put ac (P_{ac})

$$P_{ac} = \frac{V_m^2}{2R_L}$$

$$P_{ac} = \frac{77,78^2}{2 \bullet 400}$$

$$P_{ac} = 7,562 \text{ VA}$$

Daya out put dc (P_{dc})

$$P_{dc} = \frac{4V_m^2}{\pi^2 R_L}$$

$$P_{dc} = \frac{4 \bullet 77,78^2}{3,14^2 \bullet 400}$$

$$P_{dc} = 6,136 \text{ VA}$$

Effisiensi (η)

$$\eta = \frac{8}{\pi^2}$$

$$\eta = \frac{8}{3,14^2}$$

$$\eta = 0,8119$$

Form factor (FF)

$$FF = \frac{V_{\text{rms}}}{V_{\text{dc}}}$$

$$FF = \frac{55}{49,54} =$$

$$FF = 1,110$$

Ripple Factor (RF)

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1}$$

$$RF = \sqrt{1,11^2 - 1}$$

$$RF = 0,482$$

Tegangan Inverse Puncak (PIV)

$$PIV = 2V_m$$

$$PIV = 2 \cdot (77,78)$$

$$PIV = 155,56$$

Frekuensi output (f_{out})

$$f_{out} = 2f_{in}$$

$$f_{out} = 2(50) \text{ Hz}$$

$$f_{out} = 100 \text{ Hz}$$

contoh 4. Hitung parameter pada rangkaian penyearah gelombang penuh pada contoh soal 3 di atas bila tegangan jatuh pada dioda (silicon) diperhitungkan.

Jawab;

Tegangan efektif input. ($V_{in\ rms}$)

Tidak ada perubahan, sama seperti contoh satu.

Tegangan efektif output ($V_{o\ rms}$)

$$V_{o\ rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}, \text{ di mana } V_m = \sqrt{2} V_{in\ rms} = \sqrt{2} \cdot 55 - 0,7 = 77,08 \text{ V}$$

$$V_{o\ rms} = \frac{77,08}{\sqrt{2}}$$

$$V_{o\ rms} = 54,50 \text{ V}$$

Arus efektif output ($I_{o\ rms}$)

$$I_{o\ rms} = \frac{V_{o\ rms}}{R_L}$$

$$I_{o\ rms} = \frac{54,5}{400}$$

$$I_{o\ rms} = 0,136\text{A}$$

Tegangan rata-rata output (V_{dc})

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi}$$

$$V_{dc} = \frac{2 \cdot 77,08}{3,14}$$

$$V_{dc} = 49,096\text{V}$$

Arus rata-rata out put (I_{dc})

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

$$I_{dc} = \frac{49,096}{400}$$

$$I_{dc} = 0,123\text{A}$$

Daya out put ac (P_{ac})

$$P_{ac} = \frac{V_m^2}{2R_L}$$

$$P_{ac} = \frac{77,08^2}{2 \cdot 400}$$

$$P_{ac} = 7,427\text{VA}$$

Daya out put dc (P_{dc})

$$P_{dc} = \frac{4V_m^2}{\pi^2 R_L}$$

$$P_{dc} = \frac{4 \cdot 77,08^2}{3,14^2 \cdot 400}$$

$$P_{dc} = 6,026\text{ VA}$$

Effisiensi (η)

$$\eta = \frac{8}{\pi^2}$$

$$\eta = \frac{8}{3,14^2}$$

$$\eta = 0,8119$$

Form factor (FF)

$$FF = \frac{V_{\text{rms}}}{V_{\text{dc}}}$$

$$FF = \frac{54,50}{49,096} =$$

$$FF = 1,11007$$

Ripple Factor (RF)

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1}$$

$$RF = \sqrt{1,11007^2 - 1}$$

$$RF = 0,48192$$

Tegangan Inverse Puncak (PIV)

$$PIV = 2V_m$$

$$PIV = 2 \cdot (77,08)$$

$$PIV = 154,16$$

Frekuensi output (f_{out})

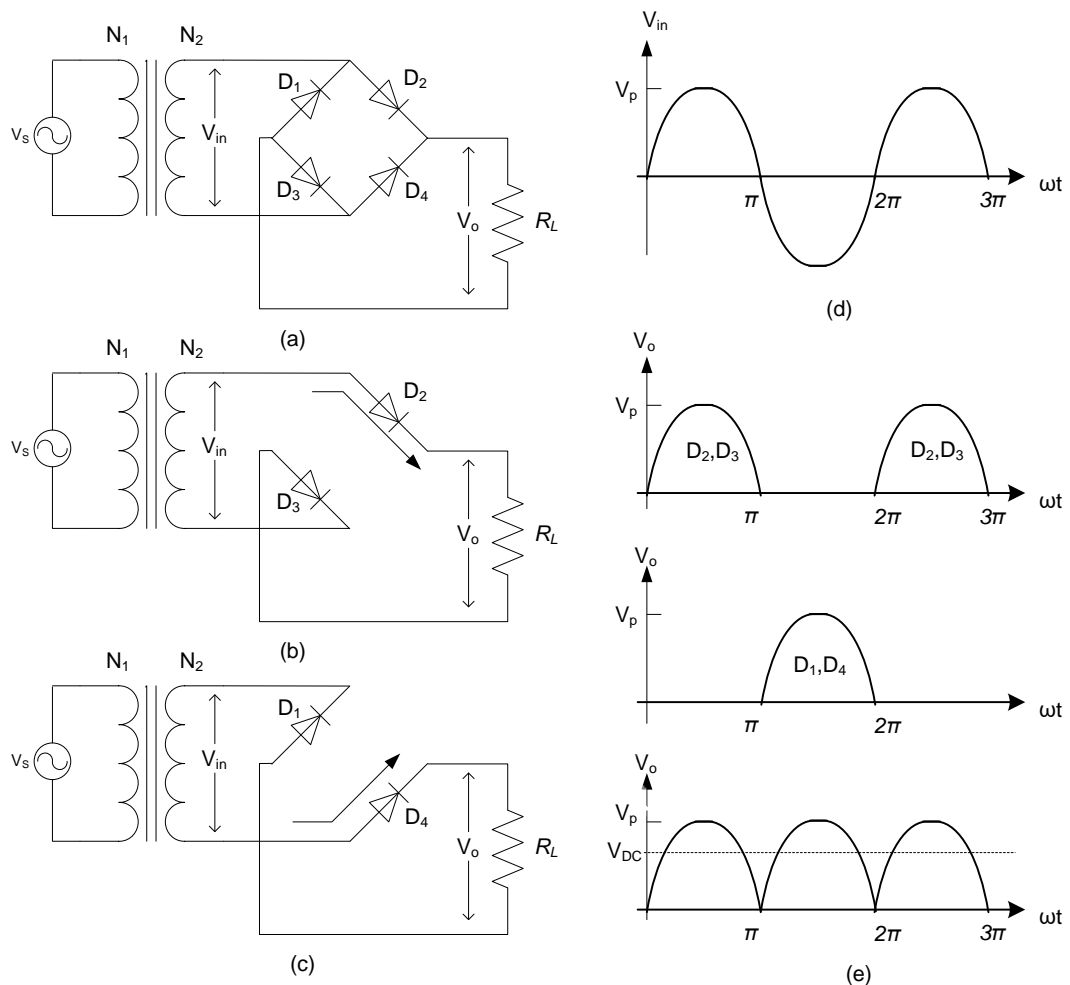
$$f_{\text{out}} = 2f_{\text{in}}$$

$$f_{\text{out}} = 2(50) \text{ Hz}$$

$$f_{\text{out}} = 100 \text{ Hz}$$

3.3.3 Penyearah Gelombang Penuh Sistem Jembatan

Penyearah jembatan pada dasarnya sama sama dengan penyearah gelombang penuh, karena kedua penyearah ini sama-sama menghasilkan gelombang penuh. Hanya saja ada beberapa perbedaan diantaranya pada penyearah jembatan tidak perlu harus ada transformator dan menggunakan 4 (empat) buah dioda. Rangkaian penyearah jembatan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8. Penyearah Jembatan (a. Rangkaian Penyearah, b. Dioda yang Dibias Maju Saat Setengah Gelombang Positif, c. Dioda yang Dibias Maju Saat Setengah Gelombang Negative, d. Bentuk Gelombang Input dan e. Bentuk Gelombang Output

Pada rangkaian penyearah jembatan pada Gambar 3.8.a, di saat setengah siklus positif tegangan jala-jala, dioda satu (D1),dioda tiga (D3) dibias maju

(forward) dan dioda dua (D2), dioda empat (D4) dibias mundur (reverse), dan di saat setengah siklus negative tegangan jala-jala dioda satu (D1), dioda tiga (D3) di bias mundur (reverse) dan dioda dua (D2), dioda empat (D4) dibias maju (forward). Sehingga bentuk tegangan yang dihasilkan pada beban (R_L) adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 3.8.e.

Dari rangkaian penyearah jembatan pada Gambar 3.8.a, V_d adalah tegangan jatuh pada dioda yang besarnya 0,7 volt untuk dioda silicon dan 0,3 untuk dioda germanium. Parameter dari penyearah tersebut, yaitu;

- a. Tegangan efektif input ($V_{in\ rms}$)
- b. Tegangan efektif output ($V_{o\ rms}$)
- c. Arus efektif output ($I_{o\ rms}$)
- d. Tegangan rata-rata output (V_{dc})
- e. Arus rata-rata output (I_{dc})
- f. Daya ac output (P_{ac})
- g. Daya dc output (P_{dc})
- h. Effesiensi
- i. Form factor
- j. Ripple factor
- k. Tegangan Inverse Puncak (PIV)
- l. Frekuensi input (f_{in}) dan frekuensi output (f_{out})

Parameter tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut;

a. *Tegangan efektif input.*

Bentuk gelombang V_{in} pada rangkaian penyearah gelombang penuh adalah sinusoidal seperti ditunjukkan pada Gambar 3.8d. Harga efektif dari bentuk gelombang tersebut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini,

$$Y_{efektif} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y(t)^2 dt} \dots\dots\dots (3.31)$$

dimana:

$Y_{efektif}$: nilai efektif, (dapat berupa tegangan, atau arus).

T : Periode

$y(t)$: persamaan dari bentuk gelombang.(tegangan, arus).

Jadi tegangan efektif untuk bentuk gelombang pada Gambar 3.8d adalah

$$y_{efektif} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y(t)^2 dt}$$

$$V_{efektif} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (V_m \sin(\omega t))^2 d(\omega t)}$$

$$V_{efektif} = \sqrt{\frac{V_m^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2(\omega t) d(\omega t)}$$

$$V_{efektif} = \sqrt{\frac{V_m^2}{T} \int_0^{2\pi} \left(\frac{1}{2}(1 - \cos(2\omega t))\right) d(\omega t)}$$

$$V_{efektif} = \sqrt{\frac{V_m^2}{T} \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{1}{4} \sin(2\omega t)\right]_0^{2\pi}}$$

$$V_{efektif} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \text{ volt}$$

Jadi Tegangan efektif input adalah

$$V_{in\ rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}, \dots\dots\dots(3.32)$$

dimana V_m adalah tegangan maksimum atau tegangan Puncak

Hubungan antara tegangan sumber puncak (V_s) dengan V_m pada rangkaian Gambar 3.8 adalah,

$$V_m = \frac{N_2}{N_1} V_{s\ rms} \dots\dots\dots(3.33)$$

b. Tegangan efektif output ($V_{o\ rms}$)

Dari bentuk tegangan output pada Gambar 3.8e, dapat dihitung tegangan efektif output ($V_{o\ rms}$), yaitu;

$$y_{\text{efektif}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y(t)^2 dt}$$

$$V_{\text{efektif}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (V_m \sin(\omega t))^2 d(\omega t)}$$

$$V_{\text{efektif}} = \sqrt{\frac{V_m^2}{\pi} \int_0^{\pi} \sin^2(\omega t) d(\omega t)}$$

$$V_{\text{efektif}} = \sqrt{\frac{V_m^2}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{1}{2} (1 - \cos(2\omega t)) d(\omega t)}$$

$$V_{\text{efektif}} = \sqrt{\frac{V_m^2}{\pi} \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{1}{4} \sin(2\omega t) \right]_0^{\pi}}$$

$$V_{\text{efektif}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \text{ volt}$$

Tegangan efektif output pada rangkaian penyearah gelombang penuh pada Gambar 3.8e adalah

$$V_{\text{orms}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}, \dots\dots\dots (3.34)$$

dimana V_m adalah tegangan maksimum atau tegangan Puncak

c. Arus efektif output (I_{orms})

Arus efektif output adalah arus efektif yang mengalir melalui beban (R_L), dimana besarnya adalah;

$$I_{\text{orms}} = \frac{V_{\text{orms}}}{R_L}$$

$$I_{\text{orms}} = \frac{V_m}{\sqrt{2} R_L} \dots\dots\dots (3.35)$$

d. Tegangan rata-rata output (V_{dc})

Bentuk gelombang tegangan yang dihasilkan oleh penyearah gelombang penuh seperti ditunjukkan pada Gambar 3.8e, dari bentuk gelombang tersebut dapat dihitung tegangan rata-rata atau tegangan dc nya, yaitu;

$$Y_{rata-rata} = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt \quad \dots\dots\dots (3.36)$$

dimana :

$Y_{rata-rata}$: nilai rata-rata, (dapat berupa tegangan, arus).

T : Periode

$y(t)$: persamaan dari bentuk gelombang.(tegangan, arus atau daya).

Jadi tegangan rata-rata untuk bentuk gelombang ouput pada Gambar 3.8e adalah

$$\begin{aligned} V_{rata-rata} &= \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt \\ V_{rata-rata} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin(\omega t) d(\omega t) \\ V_{rata-rata} &= \frac{1}{\pi} V_m [-\cos(\omega t)]_0^{\pi} \\ V_{rata-rata} &= \frac{2V_m}{\pi} \end{aligned}$$

Tegangan rata-rata output tegangan dc pada rangkaian penyearah setengah gelombang adalah

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi}, \quad \dots\dots\dots (3.37)$$

dimana V_m adalah tegangan maksimum atau tegangan puncak

e. Arus rata-rata output (I_{dc})

Arus rata-rata output adalah arus rata-rata yang mengalir melalui beban (R_L), dimana besarnya adalah;

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

$$I_{dc} = \frac{2V_m}{\pi R_L} \dots\dots\dots (3.38)$$

f. Daya ac out put (P_{ac})

Besarnya daya ac output (P_{ac}) pada beban (R_L) adalah

$$P_{ac} = V_{o,rms} \cdot I_{o,rms}$$

$$P_{ac} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_m}{\sqrt{2} R_L}$$

$$P_{ac} = \frac{V_m^2}{2R_L} \dots\dots\dots (3.39)$$

dimana,

V_m = tegangan maksimum atau puncak

R_L = tahanan beban

g. Daya dc out put (P_{dc})

Besarnya daya dc output (P_{dc}) pada beban (R_L) adalah

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

$$P_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} \cdot \frac{2V_m}{\pi R_L}$$

$$P_{dc} = \frac{4V_m^2}{\pi^2 R_L} \dots\dots\dots (3.40)$$

dimana,

V_m = tegangan maksimum atau puncak

R_L = tahanan beban

h. Effisiensi (η)

Effisiensi dari sebuah penyearah didefinisikan sebagai perbandingan antara daya out put dc dengan daya output ac, secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut;

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}}$$

$$\eta = \frac{\frac{4V_m^2}{\pi^2 R_L}}{\frac{V_m^2}{2R_L}}$$

$$\eta = \frac{8}{\pi^2} \quad \text{-----} \quad (3.41)$$

i. Form factor (FF)

Form Faktor didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan output efektif dengan tegangan output dc, yang menyatakan sebagai suatu ukuran bentuk tegangan keoutput. Secara matematis form faktor dapat dituliskan sebagai berikut,

$$FF = \frac{V_{o\text{rms}}}{V_{dc}} \quad \text{-----} \quad (3.42)$$

dimana,

$V_{o\text{rms}}$ = tegangan output efektif (Volt)

V_{dc} = tegangan output dc (Volt)

j. Ripple Factor (RF)

Ripple factor dari sebuah penyearah didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan output ac dengan tegangan output dc, secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut;

$$RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}}, \text{ dimana } V_{ac} = \sqrt{V_{o\text{rms}}^2 - V_{dc}^2}$$

$$RF = \frac{\sqrt{V_{o\text{rms}}^2 - V_{dc}^2}}{V_{dc}}$$

$$RF = \sqrt{\left(\frac{V_{o\text{rms}}}{V_{dc}}\right)^2 - 1}$$

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} \quad \text{-----} \quad (3.43)$$

k. Tegangan Inverse Puncak (PIV)

Tegangan Inverse Puncak (PIV) adalah tegangan maksimum yang dipikul oleh dioda selama dioda tersebut dibias reverse. Pada penyearah gelombang penuh tegangan inverse puncaknya adalah

$$\text{PIV} = V_m \quad \dots\dots\dots (3.44)$$

l. Frekuensi input (f_{in}) dan Frekuensi output (f_{out})

Dari bentuk gelombang input pada Gambar 3.8d dan gelombang output pada Gambar 3.8e terlihat bahwa perioda (T) kedua bentuk gelombang tersebut adalah sama. Karena periodanya sama maka frekuensi input sama dengan frekuensi output.

$$f_{out} = 2f_{in} \quad \dots\dots\dots (3.45)$$

contoh 5. Hitung parameter pada rangkaian penyearah jembatan penuh Gambar 3.8a. Bila $V_s = 220$ Volt, 50Hz, $N_1 = 6$, $N_2 = 3$ dan $R_L = 400\Omega$.

Jawab;

Tegangan efektif input. ($V_{in\ rms}$)

$$V_{in\ rms} = \frac{N_2}{N_1} V_s$$

$$V_{in\ rms} = \frac{3}{6} \cdot 220$$

$$V_{in\ rms} = 110 \text{ V}$$

Tegangan efektif output ($V_{o\ rms}$)

$$V_{o\ rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}, \text{ di mana } V_m = \sqrt{2} V_{in\ rms} = \sqrt{2} \cdot 110 = 155,56 \text{ V}$$

$$V_{o\ rms} = \frac{155,56}{\sqrt{2}}$$

$$V_{o\ rms} = 110 \text{ V}$$

Arus efektif output ($I_{o\ rms}$)

$$I_{o\text{rms}} = \frac{V_{o\text{rms}}}{R_L}$$

$$I_{o\text{rms}} = \frac{110}{400}$$

$$I_{o\text{rms}} = 0,275\text{A}$$

Tegangan rata-rata output (V_{dc})

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi}$$

$$V_{dc} = \frac{2 \cdot 155,56}{3,14}$$

$$V_{dc} = 99,08\text{V}$$

Arus rata-rata out put (I_{dc})

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

$$I_{dc} = \frac{99,08}{400}$$

$$I_{dc} = 0,2477\text{A}$$

Daya out put ac (P_{ac})

$$P_{ac} = \frac{V_m^2}{2R_L}$$

$$P_{ac} = \frac{155,56^2}{2 \cdot 400}$$

$$P_{ac} = 30,24\text{VA}$$

Daya out put dc (P_{dc})

$$P_{dc} = \frac{4V_m^2}{\pi^2 R_L}$$

$$P_{dc} = \frac{4 \cdot 155,56^2}{3,14^2 \cdot 400}$$

$$P_{dc} = 24,54\text{VA}$$

Effisiensi (η)

$$\eta = \frac{8}{\pi^2}$$

$$\eta = \frac{8}{3,14^2}$$

$$\eta = 0,8119$$

Form factor (FF)

$$FF = \frac{V_{\text{o.rms}}}{V_{\text{dc}}}$$

$$FF = \frac{110}{99,08}$$

$$FF = 1,110$$

Ripple Factor (RF)

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1}$$

$$RF = \sqrt{1,11^2 - 1}$$

$$RF = 0,482$$

Tegangan Inverse Puncak (PIV)

$$PIV = 2V_m$$

$$PIV = 2 \cdot (155,56)$$

$$PIV = 311,12 \text{ V}$$

Frekuensi output (f_{out})

$$f_{out} = 2f_{in}$$

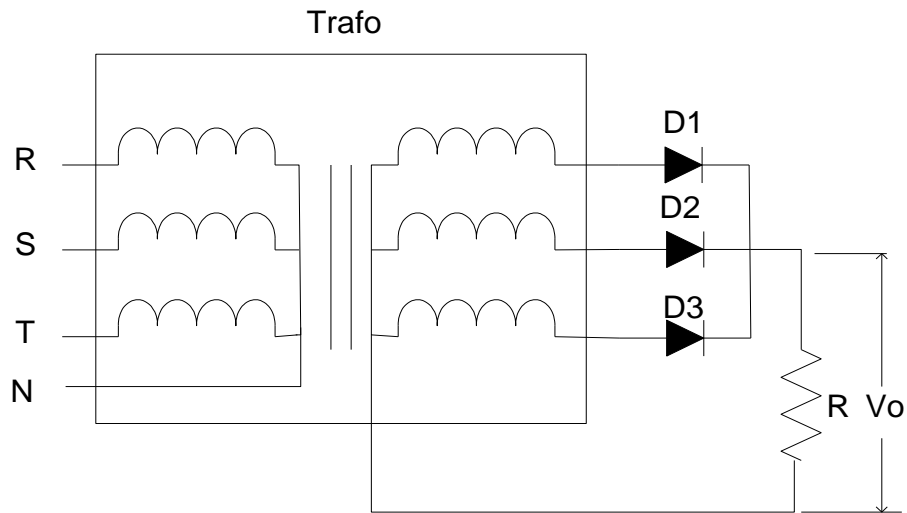
$$f_{out} = 2(50) \text{ Hz}$$

$$f_{out} = 100 \text{ Hz}$$

3.3.4 Penyearah Setengah Gelombang Tiga Fasa

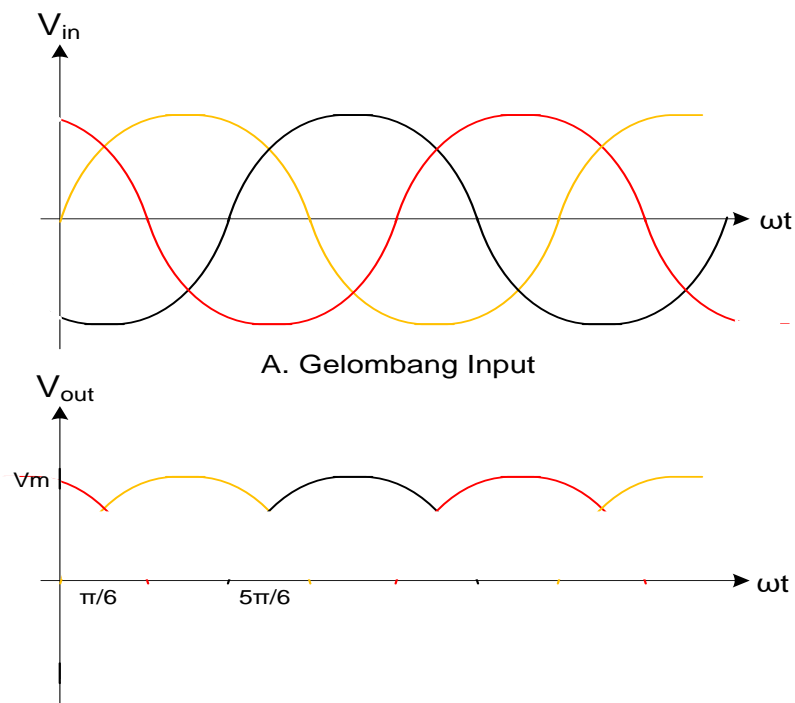
Penyearah tiga fasa pada dasarnya sama dengan penyearah satu fasa yaitu suatu peralatan yang dapat mengubah tegangan bolak balik menjadi tegangan searah. Hanya saja pada penyearah tiga fasa sumber tegangan bolak baliknya adalah

sumber tiga fasa. Rangkaian penyearah tiga fasa setengah gelombang diperlihatkan pada rangkaian Gambar 3.9 berikut ini.



Gambar 3.9. Penyearah tiga fasa setengah gelombang

Bentuk gelombang output dari penyearah setengah jembatan pada penyearah tiga fasa seperti terlihat pada Gambar 3.10



Gambar 3.10 Bentuk Gelombang pada Penyearah Tiga Fasa Setengah Gelombang

Bila fasa R yang paling positif maka D1 yang dibias forward dan melewati arus sedangkan D2 dan D3 dibias reverse dan tidak melewati arus. Bila fasa S yang paling positif maka D2 dibias forward sedangkan D3 dan D1 dibias reverse. Bila fasa T yang paling positif maka D3 yang mengalirkan arus (dibias forward) sedangkan D1 dan D2 tidak mengalirkan arus (dibias reverse). Keadaan ini akan terus berulang sehingga gelombang output terlihat seperti pada gambar 3.10. Masing-masing dioda melewati arus selama $2\pi/3$.

Dari bentuk gelombang pada Gambar 3.10 di atas dapat dihitung V_{DC} dan V_{rms} yaitu sebagai berikut;

a. **Tegangan V_{DC} adalah;**

$$V_{DC} = \frac{2}{2\pi/3} \int_0^{\pi/3} V_m \cos \omega t \, d(\omega t)$$

$$V_{DC} = V_m \frac{3}{\pi} \sin \frac{\pi}{3} \dots\dots\dots (3.46)$$

b. **Tegangan V_{rms} adalah;**

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{2}{2\pi/3} \int_0^{\pi/3} V_m^2 \cos^2 \omega t \, d(\omega t)}$$

$$V_{rms} = V_m \left[\frac{3}{2\pi} \left(\frac{\pi}{3} + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{3} \right) \right]^{1/2} \dots\dots\dots (3.47)$$

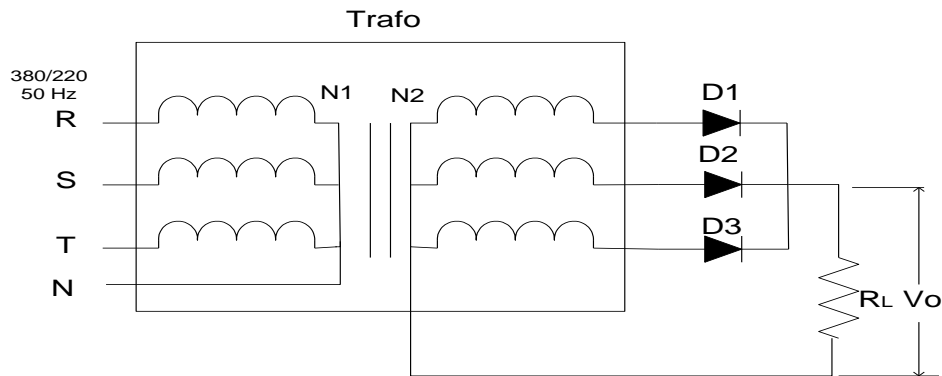
c. **Frekuensi output**

Frekuensi output yang dihasilkan pada penyearah setengah gelombang tiga fasa adalah tiga kali dari frekuensi gelombang inputnya atau secara matematis dapat dituliskan;

$$\text{Frekuensi output} = 3 \times \text{frekuensi input.} \dots\dots\dots (3.48)$$

$$f_{out} = 3f_{in} \dots\dots\dots$$

contoh 1. Hitung parameter pada rangkaian penyearah setengah gelombang tiga fasa
Gambar 3.11. Bila $V_s = 380/220$ Volt, 50Hz, $N_1 = 6$, $N_2 = 3$ dan $R_L = 400\Omega$.



Gambar 3.11

Jawab;

Tegangan efektif input. ($V_{in\ rms}$) pada sisi sekunder trafo

$$V_{in\ rms} = \frac{N_2}{N_1} V_s$$

$$V_{in\ rms} = \frac{3}{6} \cdot 220$$

$$V_{in\ rms} = 110\text{ V}$$

Tegangan efektif output ($V_{o\ rms}$)

$$V_{o\ rms} = V_m \left[\frac{3}{2\pi} \left(\frac{\pi}{3} + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{3} \right) \right]^{1/2}, \text{ di mana } V_m = \sqrt{2} V_{in\ rms} = \sqrt{2} \cdot 110 = 155,56\text{ V}$$

$$V_{o\ rms} = 155,56 \left[\frac{3}{2\pi} \left(\frac{\pi}{3} + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{3} \right) \right]^{1/2}$$

$$V_{o\ rms} = 130,79\text{ Volt}$$

Arus efektif output ($I_{o\ rms}$)

$$I_{o\ rms} = \frac{V_{o\ rms}}{R_L}$$

$$I_{o\ rms} = \frac{130,79}{400}$$

$$I_{o\ rms} = 0,326\text{ A}$$

Tegangan rata-rata output (V_{dc})

$$V_{DC} = V_m \frac{3}{\pi} \sin \frac{\pi}{3}$$

$$V_{DC} = 155,56 \frac{3}{\pi} \sin \frac{\pi}{3}$$

$$V_{DC} = 128,71$$

Arus rata-rata out put (I_{dc})

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

$$I_{dc} = \frac{128,71}{400}$$

$$I_{dc} = 0,322A$$

Daya out put ac (P_{ac})

$$P_{ac} = V_{o\text{rms}} \bullet I_{o\text{rms}}$$

$$P_{ac} = 130,79 \bullet 0,326$$

$$P_{ac} = 42,64 \text{ VA}$$

Daya out put dc (P_{dc})

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

$$P_{dc} = 128,71 \bullet 0,322$$

$$P_{dc} = 41,44 \text{ VA}$$

Effisiensi (η)

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}}$$

$$\eta = \frac{41,44}{42,64}$$

$$\eta = 0,97$$

Form factor (FF)

$$FF = \frac{V_{\text{orms}}}{V_{\text{dc}}}$$

$$FF = \frac{130,79}{128,71}$$

$$FF = 1,02$$

Ripple Factor (RF)

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1}$$

$$RF = \sqrt{1,02^2 - 1}$$

$$RF = 0,2$$

Tegangan Inverse Puncak (PIV)

$$PIV = V_m$$

$$PIV = 155,56 \text{ V}$$

Frekuensi output (f_{out})

$$f_{\text{out}} = 3f_{\text{in}}$$

$$f_{\text{out}} = 3(50) \text{ Hz}$$

$$f_{\text{out}} = 150 \text{ Hz}$$

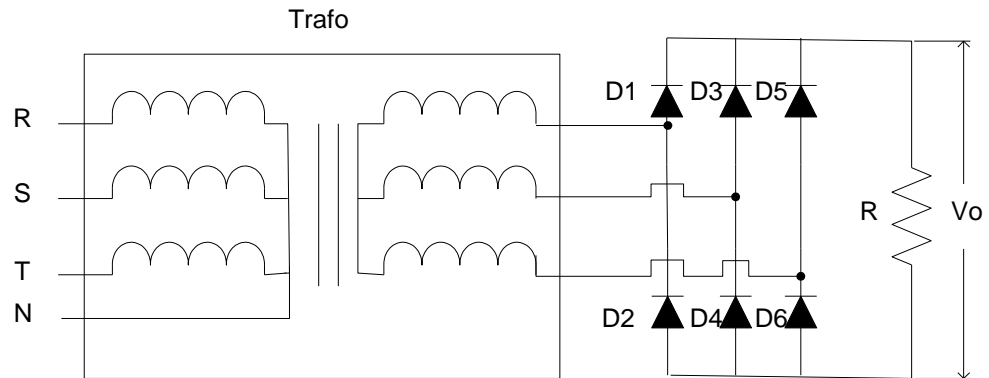
Jika beban R pada rangkaian Gambar 3.11 diganti beban RL, maka seperti halnya pada penyearah satu fasa beban RL, harmonik genap juga terjadi pada penyearah tiga fasa beban RL, dimana nilai tegangan harmonik genap ke-n dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$V_n = \frac{6V_m}{\pi(n^2 - 1)}$$

dimana adalah harmonik ke 6, 12, 18, dan seterusnya.

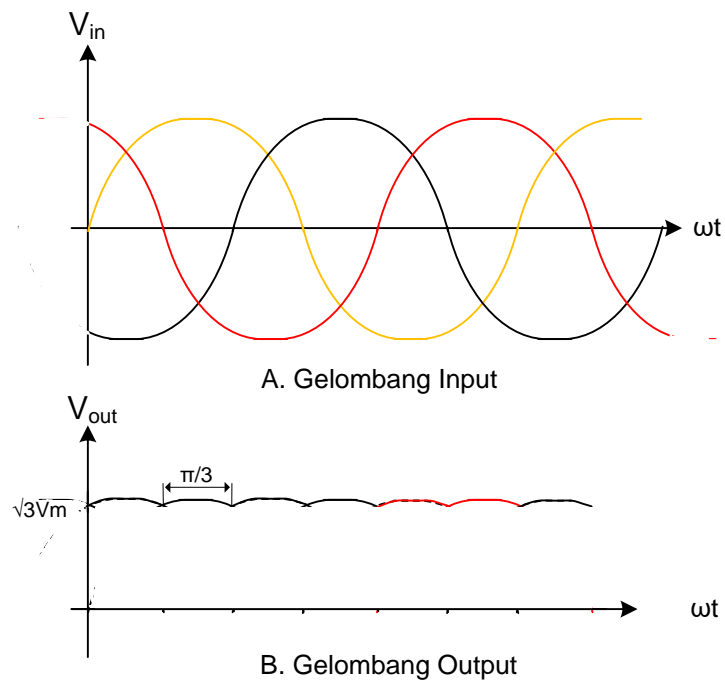
3.3.5 Penyearah Gelombang Penuh Tiga Fase

Rangkaian penyearah jembatan tiga fase seperti terlihat pada Gambar 3.12 berikut ini;



Gambar 3.12. Penyearah jembatan tiga fase

Bentuk gelombang output dari penyearah jembatan pada penyearah tiga fase seperti terlihat pada gambar 3.13.



Gambar 3.13. Bentuk Gelombang pada Penyearah Jembatan Tiga Fase

Pada saat fasa R yang paling positif dan fasa S yang paling negatif, maka dioda D1 dan D4 yang dibias forward (melewatkan arus). Dioda D2, D3, D5 dan D6 tidak melewati arus karena terbias reverse.

Pada saat fasa R masih paling positif dan sekarang fasa T yang paling negatif, maka dioda D1 akan tetap melewati arus dan D6 akan menggantikan D4 sehingga D6 akan melewati arus.

Pada saat Fasa S paling positif dan Fasa T masih paling negatif maka D3 akan melewati arus dan D6 tetap melewati arus seperti sebelumnya. Demikian kejadian ini akan berlangsung terus menerus sehingga bentuk gelombang output akan tampak seperti Gambar 3.13. Setiap saat dua dioda bekerja serentak dengan melewati arus selama $2\pi/6$.

Dari bentuk gelombang tersebut di atas dapat dihitung V_{DC} dan V_{rms} yaitu sebagai berikut;

a. Tegangan V_{DC} adalah;

$$V_{DC} = \frac{2}{2\pi/6} \int_0^{\pi/6} \sqrt{3}V_m \cos \omega t \, d(\omega t)$$

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m$$

$$V_{DC} = 1.654V_m \quad \dots\dots\dots (3.49)$$

b. Tegangan V_{rms} adalah;

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{2}{2\pi/6} \int_0^{\pi/6} 3V_m^2 \cos^2 \omega t \, d(\omega t)}$$

$$V_{rms} = \left(\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi}\right)^{1/2} V_m$$

$$V_{rms} = 1,6554V_m \quad \dots\dots\dots (3.50)$$

c. Frekuensi output

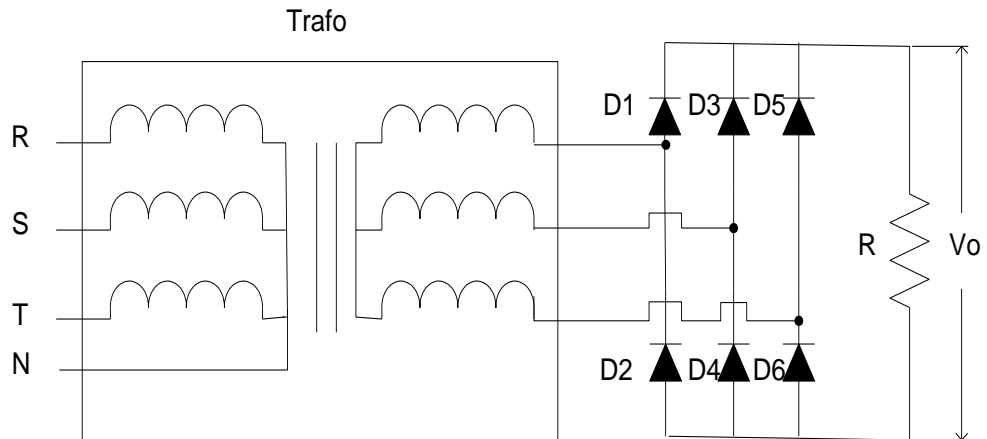
Frekuensi output yang dihasilkan pada penyearah sistem jembatan tiga fasa adalah enam kali dari frekuensi gelombang inputnya atau secara matematis dapat dituliskan;

Frekuensi output = 6 x frekuensi input

$$f_{out} = 6f_{in} \quad \dots\dots\dots (3.51)$$

contoh 2. Hitung parameter pada rangkaian penyearah jembatan penuh Gambar 3.14.

Bila $V_s = 380/220$ Volt, 50Hz, $N_1 = 6$, $N_2 = 3$ dan $R_L = 400\Omega$.



Gambar 3.14

Jawab;

Tegangan efektif input. ($V_{in\ rms}$) pada sisi sekunder trafo

$$V_{in\ rms} = \frac{N_2}{N_1} V_s$$

$$V_{in\ rms} = \frac{3}{6} \cdot 380$$

$$V_{in\ rms} = 190\text{ V}$$

Tegangan efektif output ($V_{o\ rms}$)

$$V_{o\ rms} = 1,6554 V_m, \text{ di mana } \sqrt{3} V_m = \sqrt{2} V_{in\ rms} = \sqrt{2} \cdot 190 = 268,7\text{V}$$

$$V_m = 155,13\text{ V}$$

$$V_{o\ rms} = 1,6554 \cdot 155,13$$

$$V_{o\ rms} = 256,80\text{ Volt}$$

Arus efektif output ($I_{o\ rms}$)

$$I_{o\text{rms}} = \frac{V_{o\text{rms}}}{R_L}$$

$$I_{o\text{rms}} = \frac{256,80}{400}$$

$$I_{o\text{rms}} = 0,642\text{A}$$

Tegangan rata-rata output (V_{dc})

$$V_{DC} = 1.654V_m$$

$$V_{DC} = 1.654 \cdot 155,13$$

$$V_{DC} = 256,58 \text{ Volt}$$

Arus rata-rata out put (I_{dc})

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

$$I_{dc} = \frac{256,58}{400}$$

$$I_{dc} = 0,641\text{A}$$

Daya out put ac (P_{ac})

$$P_{ac} = V_{o\text{rms}} \cdot I_{o\text{rms}}$$

$$P_{ac} = 256,80 \cdot 0,642$$

$$P_{ac} = 164,86 \text{ VA}$$

Daya out put dc (P_{dc})

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

$$P_{dc} = 256,58 \cdot 0,641$$

$$P_{dc} = 164,47 \text{ VA}$$

Effisiensi (η)

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}}$$

$$\eta = \frac{164,47}{164,86}$$

$$\eta = 0,997$$

Form factor (FF)

$$FF = \frac{V_{\text{orms}}}{V_{\text{dc}}}$$

$$FF = \frac{256,8}{256,58}$$

$$FF = 1,0009$$

Ripple Factor (RF)

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1}$$

$$RF = \sqrt{1,0009^2 - 1}$$

$$RF = 0,042$$

Tegangan Inverse Puncak (PIV)

$$PIV = \sqrt{3}V_m$$

$$PIV = \sqrt{3} \cdot 155,13$$

$$PIV = 268,69 \text{ Volt}$$

Frekuensi output (f_{out})

$$f_{\text{out}} = 6f_{\text{in}}$$

$$f_{\text{out}} = 6(50) \text{ Hz}$$

$$f_{\text{out}} = 300 \text{ Hz}$$

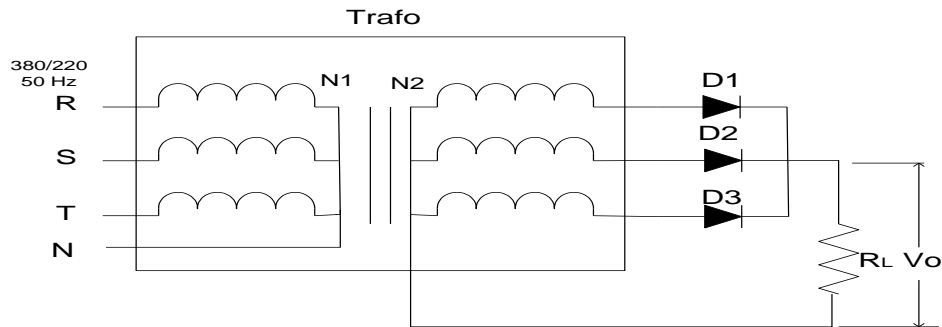
Jika beban R pada rangkaian Gambar 3.14 diganti beban RL, maka seperti halnya pada penyearah setengah-gelombang tiga-fasa beban RL, harmonik genap juga terjadi pada penyearah tiga fasa beban RL, dimana nilai tegangan harmonik genap ke-n dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$V_n = \frac{6V_{m,\text{line}}}{\pi(n^2 - 1)}$$

dimana n adalah harmonik ke 6, 12, 18, dan seterusnya.

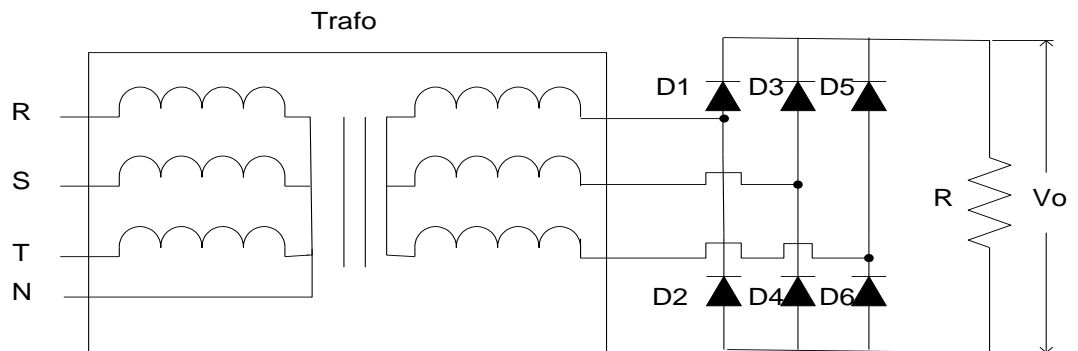
3.4 Latihan

1. Hitung parameter pada rangkaian penyearah jembatan penuh. Bila $V_s = 220$ Volt, 50Hz, $N_1 = 12$, $N_2 = 5$ dan $R_L = 320\Omega$.
2. Hitung parameter pada rangkaian penyearah setengah gelombang tiga fasa Gambar 3.15. Bila $V_s = 380/220$ Volt, 60 Hz, $N_1 = 8$, $N_2 = 5$ dan $R_L = 750 \Omega$.



Gambar 3.15

3. Hitung parameter pada rangkaian penyearah jembatan penuh Gambar 3.16. Bila $V_s = 380/220$ Volt, 50Hz, $N_1 = 21$, $N_2 = 5$ dan $R_L = 200\Omega$.



Gambar 3.16

3.5 Rangkuman

Penyearah adalah rangkaian yang mengubah tegangan bolak balik *ac* menjadi tegangan searah *dc*. Dioda adalah komponen utama dari rangkaian penyearah, karena hanya melewatkan arus satu arah saja sehingga tegangan yang dihasilkan adalah tegangan searah.

Penyearah setengah gelombang mempunyai harga output *dc* sebesar V_m/π . Penyearah gelombang penuh mempunyai harga output *dc* sebesar $2V_m/\pi$.

Penyearah tiga fasa adalah rangkaian yang mengubah tegangan bolak balik menjadi tegangan searah yang mempunyai input tiga fasa. Ada dua jenis penyearah tiga fasa yaitu penyearah setengah gelombang dan penyearah jembatan.

Pada penyearah setengah gelombang, masing-masing dioda melewatkan arus selama $2\pi/3$. Pada penyearah sistem jembatan, setiap saat ada dua dioda bekerja serentak dengan melewatkan arus selama $2\pi/6$.

3.6 Review

Bagi para pembaca setelah mempelajari uraian dari pada topik diatas dan menjawab soal yang diberikan pada latihan dan mencocokanya dengan jawaban yang telah disediakan, maka pembaca dapat mereview kembali capaian yang diperoleh dengan menjawab soal-soal berikut:

1. Sebutkan dan jelaskan komponen utama untuk penyearah!
2. Sebutkan jenis-jenis penyearah!
3. Sebutkan jenis-jenis penyearah tiga fasa!
4. Jelaskan prinsip kerja penyearah-penyearah tiga fasa!

BAB IV

PENYEARAH TERKENDALI

4.1 Pendahuluan

Penyearah terkendali (*controlled rectifier*) merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah tegangan sumber masukan arus bolak-balik dalam bentuk sinusoidal menjadi tegangan output dalam bentuk tegangan searah yang dapat diatur/dikendalikan. Komponen semikonduktor daya yang digunakan umumnya berupa thyristor yang beroperasi sebagai sakelar, pengubah, dan pengatur.

Jenis sumber tegangan masukan untuk mencatu rangkaian penyearah dapat digunakan tegangan bolak-balik satu fasa maupun 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. Berbeda dengan penyearah daya, dalam rangkaian penyearah dapat dilakukan dalam bentuk penyearahan terkendali setengah gelombang, penyearah gelombang penuh, dan semipenyearah. Pembebanan pada rangkaian penyearah terkendali juga dipasang beban resistif atau beban resistif-induktif.

4.2 Tujuan Khusus

Setelah mengikuti materi ini diharapkan mahasiswa memiliki kompetensi:

- a. Menguasai karakteristik penyearah setengah-gelombang, gelombang-penuh, dan semipenyearah satu fasa dan tiga fasa
- b. Menguasai dasar prinsip kerja penyearah setengah-gelombang, gelombang-penuh, dan semipenyearah satu fasa dan tiga fasa

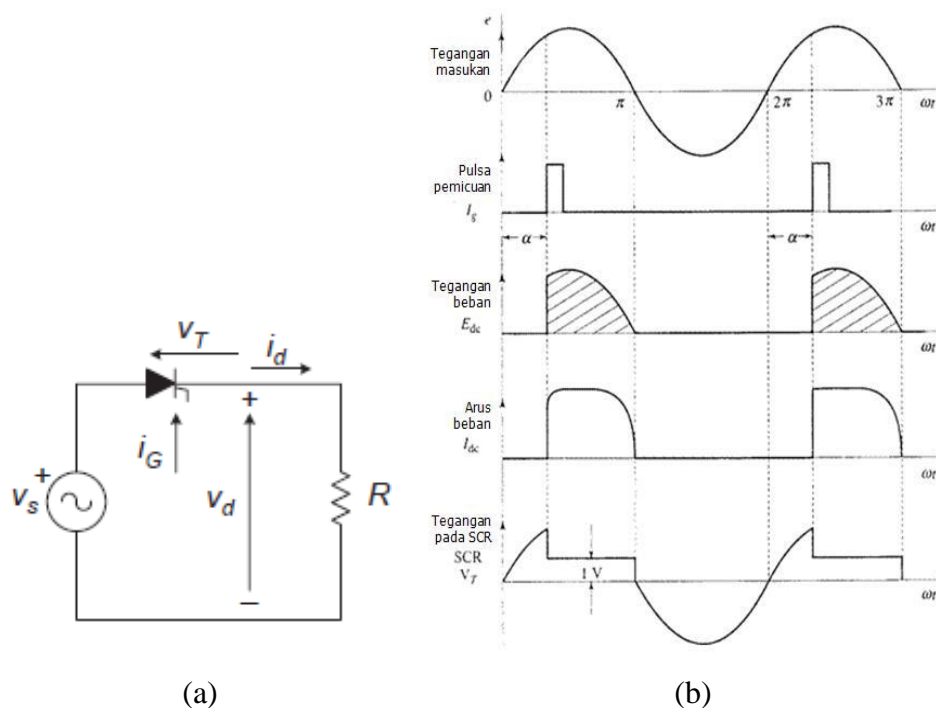
4.3 Teori

4.3.1 Penyearah Setengah-Gelombang Satu-Fasa

a. Beban Resistif (R)

Gambar 4.1(a) merupakan rangkaian penyearah 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 α , maka T_1 menjadi ON dari $\alpha - \pi$, sehingga terjadi tegangan output V_{dc} . Selanjutnya, saat setengah periode kedua (polaritas -), T_1 menjadi OFF pada titik π karena komutasi alami, sehingga tegangan output $V_{dc} = V_o = 0$ sampai dengan $(2\pi + \alpha)$, dan seterusnya.



Gambar 4.1

Rangkaian Penyearah 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 output (V_L) yang dihasilkan, terdapat dua jenis komponen tegangan, yaitu: (1) tegangan searah rata (V_{dc}) dan tegangan searah efektif (root mean square-rms), V_L . Nilai tegangan output 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 output rata-rata (P_{dc}) dan daya output efektif (P_L) adalah:

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

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

Contoh 4.1. Jika penyearah pada gambar 4.1 memiliki beban resistif R dan sudut penyalan $\alpha = \pi/2$. Tentukan (a). efisiensi penyearahan, (b) factor bentuk FF, (c) factor ripple RF, (d) Tegangan puncak invers PIV dari thyristor.

Penyelesaian :

Dari persamaan (4.1),

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

$$V_{dc} = 0,1592 V_m$$

$$I_{dc} = 0,1592 V_m / R$$

Dari persamaan (4.2)

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

$$V_L = 0,3536 V_m$$

$$I_L = 0,3536 V_m / R$$

Dari persamaan (4.3)

$$P_{dc} = (0,1592 V_m)^2 / R$$

Dari Persamaan (4.4)

$$P_L = (0,3536 V_m)^2 / R$$

(a). Efisiensi penyearah

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_L} = \frac{(0,1592 V_m)^2 / R}{(0,3536 V_m)^2 / R} = 20,27 \%$$

(b). Faktor bentuk FF

$$FF = \frac{V_L}{V_{dc}} = \frac{0,3536V_m}{0,1592V_m} = 2,221 \text{ atau } 222,1\%$$

(c). Faktor ripple RF

$$\begin{aligned} RF &= \sqrt{(FF^2 - 1)} \\ &= \sqrt{(2,221^2 - 1)} \\ &= 1,983 \text{ atau } 198,3\% \end{aligned}$$

(d). Tegangan Invers Puncak PIV

$$PIV = V_m$$

b. Beban Resistif-Induktif (RL)

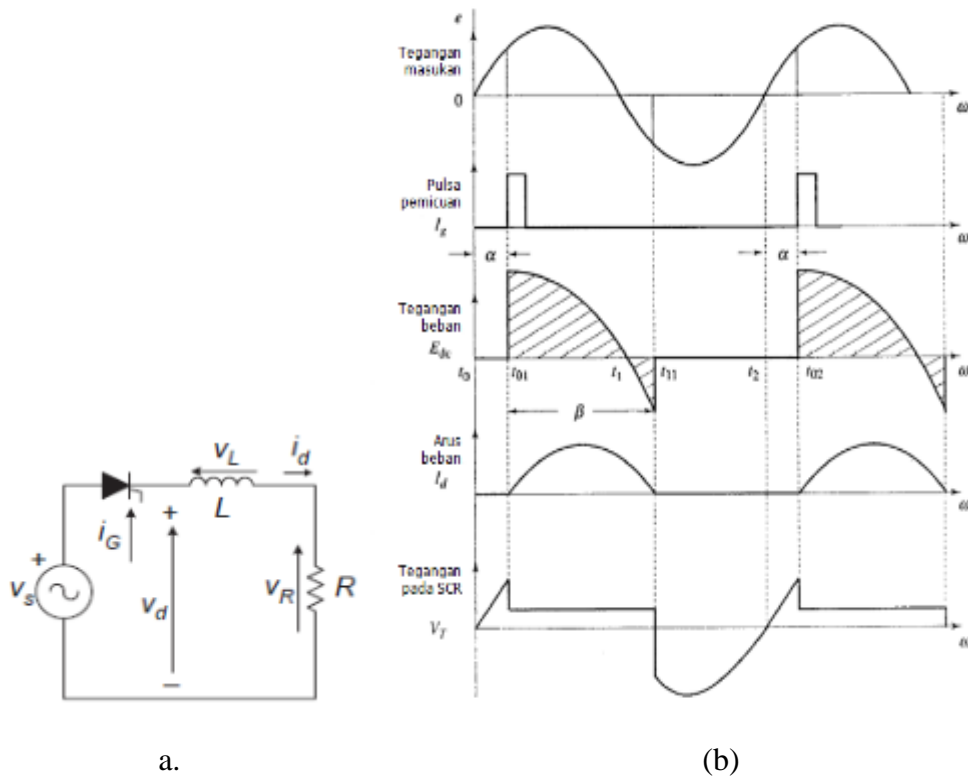
Gambar 4.2(a) merupakan rangkaian penyearah setengah-gelombang satu-fasa dengan beban resistif-induktif (RL), sedangkan Gambar 2.2(b) menunjukkan bentuk gelombang hasil penyearahan. Proses penyearahan dapat dijelaskan melalui Gambar 4.2(a) dan (b), setengah periode pertama (polaritas +), SCRT₁ dipicu sebesar α maka SCRT₁ akan ON dari α sampai dengan β , hal ini disebabkan sifat induktor (L). Hal ini berarti sudut konduksi SCRT₁ sebesar $(\beta - \alpha)$. Selanjutnya, mulai dari titik β sampai dengan $(2\pi + \alpha)$ SCRT₁ menjadi OFF.

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

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

Dari persamaan ini dapat dijelaskan bahwa ketika sudut penyalan sebesar $0^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ akan terjadi proses penyearahan sedangkan pada sudut penyalan sebesar $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ 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 penyearah setengah-gelombang beban R.



Gambar 4.2

Rangkaian Penyearah Setengah-gelombang Satu Fasa Beban RL

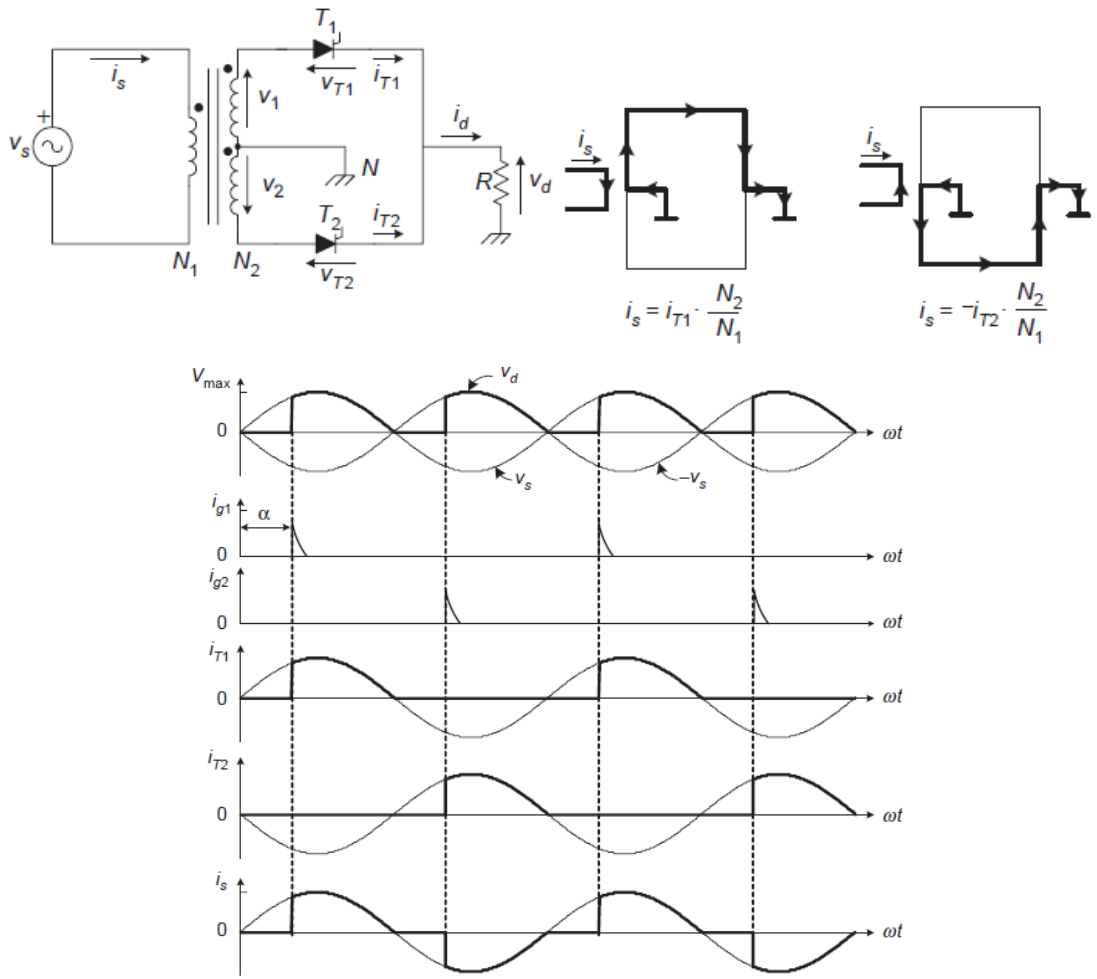
4.3.2 Penyearah Gelombang-Penuh Satu-Phasa

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

a. Penyearah Gelombang-penuh Satu-fasa dengan CT

Gambar 4.3 merupakan rangkaian penyearah 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 T_1 dan T_2 dilakukan secara serempak. Komponen SCR T_1 bekerja

padasetengahperioda pertama(0sampaidengan π),dan KomponenSCRT2
bekerjapadasetengahperiodakedua(0sampai dengan 2π).



Gambar 4.3 Rangkaian Penyearah Gelombang-penuh dengan CTSatu Fasa
Beban R

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

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (4.6)$$

$$V_L = V_m \left[\frac{\pi - \alpha}{2\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{4\pi} \right]^{1/2} \quad (4.7)$$

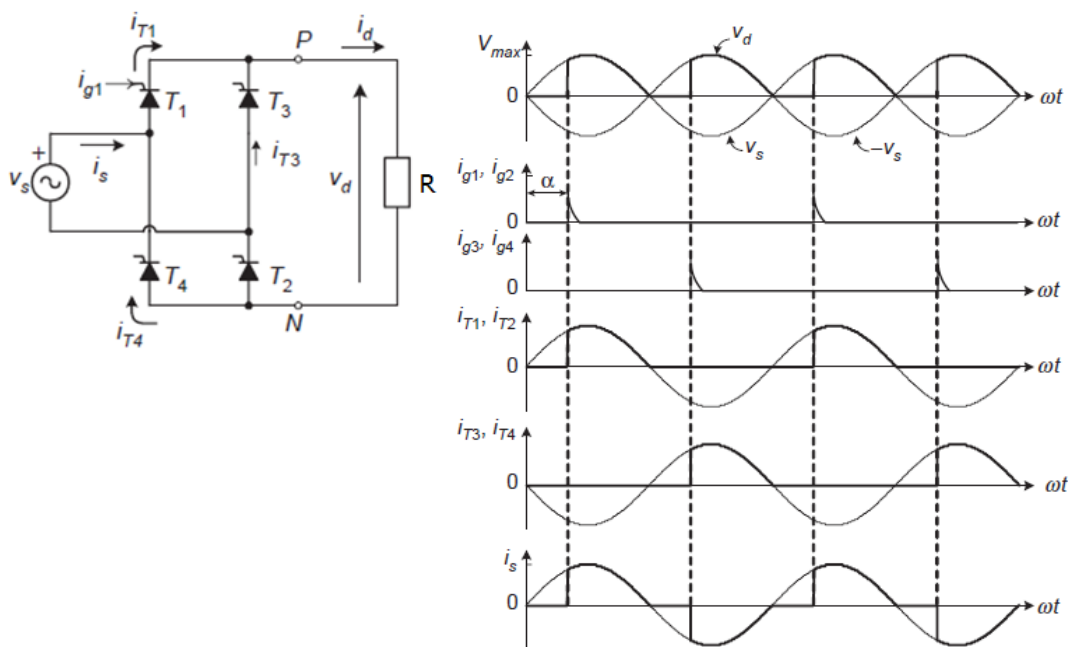
Dengan demikian, daya output rerata (P_{dc}) dan daya output efektif (P_L) adalah:

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

$$P_L = V_L I_L$$

b. Penyearah Gelombang-penuh Satu-fasa Hubungan Jembatan

Gambar 4.4 merupakan rangkaian penyearah gelombang-penuh satu fasa hubungan jembatan dengan beban R. Proses pemicuan pada rangkaian ini, SCRT₁ dan T₂ serta SCRT₃ dan T₄ masing-masing dioperasikan secara serempak. Komponen SCRT₁ dan T₂ bekerja pada setengah periode pertama (0 sampai dengan π), dan komponen SCRT₃ dan T₄ bekerja pada setengah periode kedua (π sampai dengan 2π). Jika SCRT₁ dan T₂ serta SCRT₃ dan T₄ masing-masing dipicu sebesar α , maka nilai tegangan searah rerata (V_{dc}) dan nilai tegangan searah efektif (root means square-rms), V_L seperti rangkaian penyearah gelombang-penuh satu fasa CT dengan beban R diatas.



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

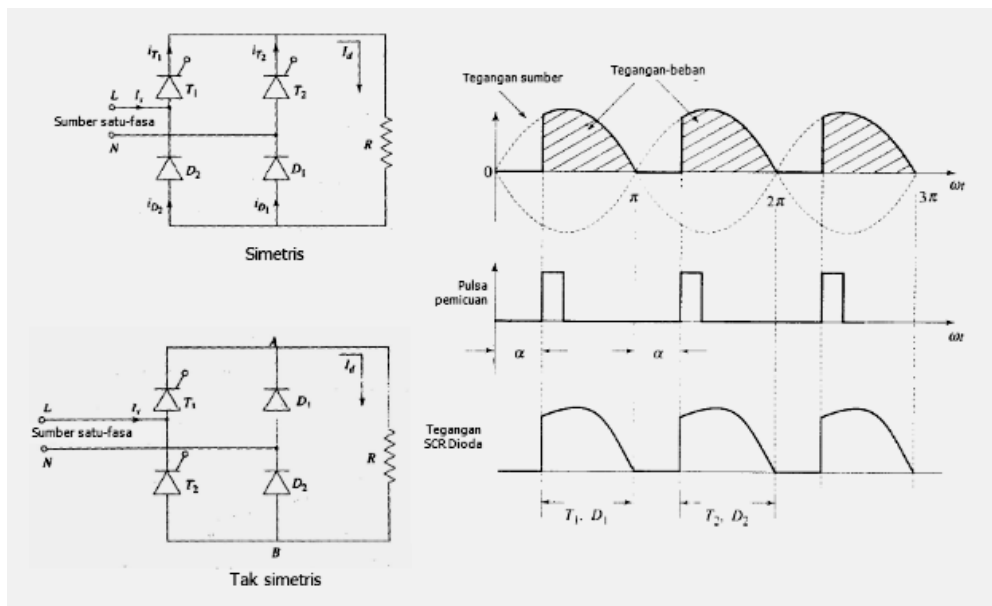
Jika rangkaian pada Gambar 4.3 dan 4.4 dihubungkan dengan beban resistif-induktif (RL), seperti halnya pada penyearah setengah-gelombang satu fasa diatas, nilai komponen tegangan output (V_{dc}) dari rangkaian menjadi sebesar :

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} (\cos \alpha) \quad (4.8)$$

Hal ini berarti, ketika sudut pemuncian sebesar $0^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ akan terjadi proses penyearahan (rectifying), sedangkan pada sudut pemuncian $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ akan terjadi proses pembalikan (inverting).

c. 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 pemuncian 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 π), dan komponen SCR T_2 dan dioda D_2 bekerja pada setengah periode kedua (π sampai dengan 2π).



Gambar 4.5 Rangkaian Semikonverter Satu Fasa Beban R

Jika SCR T_1 dan T_2 masing-masing dipicu sebesar α , maka nilai tegangan searah rata (V_{dc}) dan nilai tegangan searah efektif (root means square-rms), V_L seperti rangkaian penyearah gelombang-penuh satu fasa CT dengan beban R diatas.

4.3.3 Penyearah Setengah-Gelombang Tiga-Phasa

Gambar 4.6 merupakan rangkaian penyearah 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 pemicuannya pada SCR $T_1, T_2,$ dan T_3 dilakukan secara serempak pada masing-masing fasa. Nilai tegangan searah rata (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:

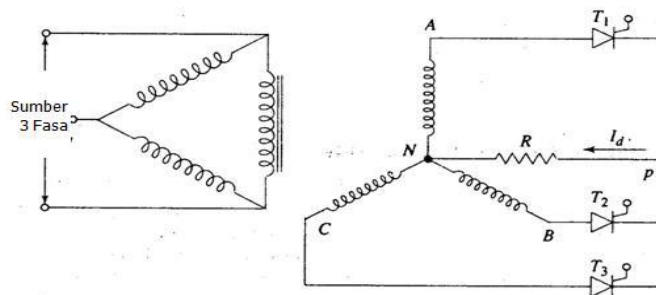
$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos \alpha \quad (4.9)$$

$$V_L = V_m \left[\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\alpha \right]^{1/2} \quad (4.10)$$

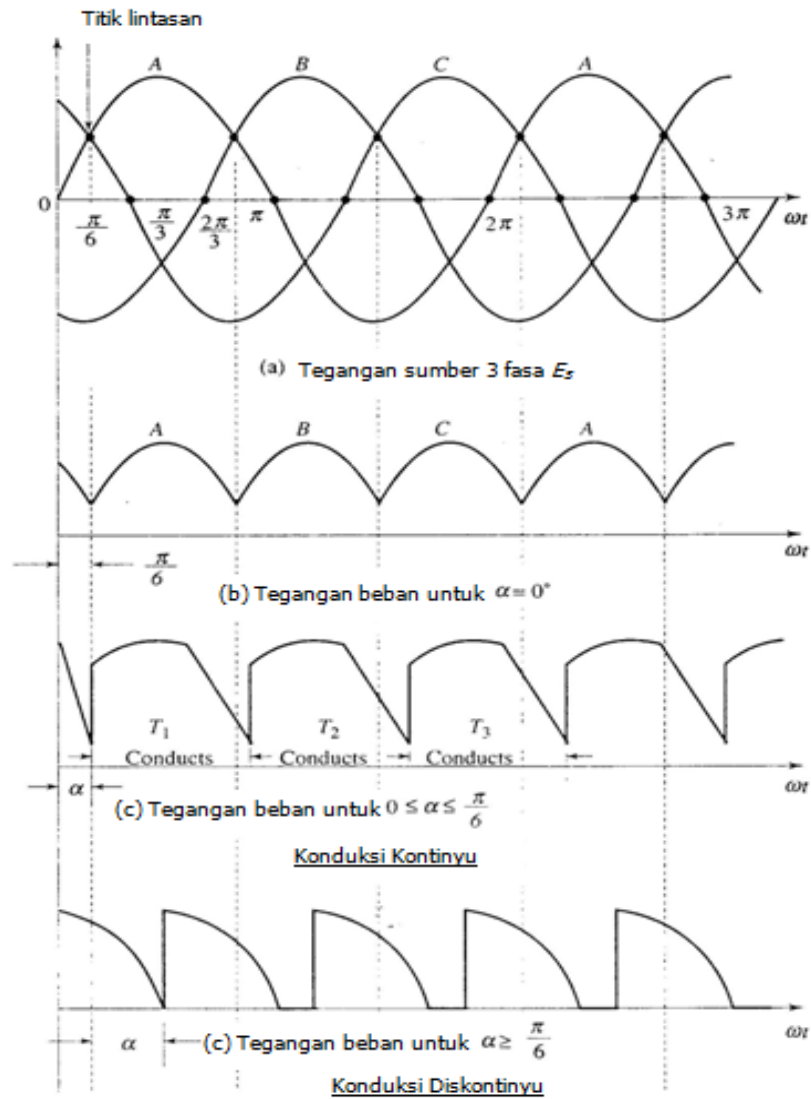
(b) Operasi konduksi diskontinyu:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos(\alpha + 30^\circ) \quad (4.11)$$

$$V_L = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} V_m \left[\frac{5\pi - 3\alpha}{3\pi} + \frac{\sin(2\alpha + \pi/3)}{\pi} \right]^{1/2} \quad (4.12)$$



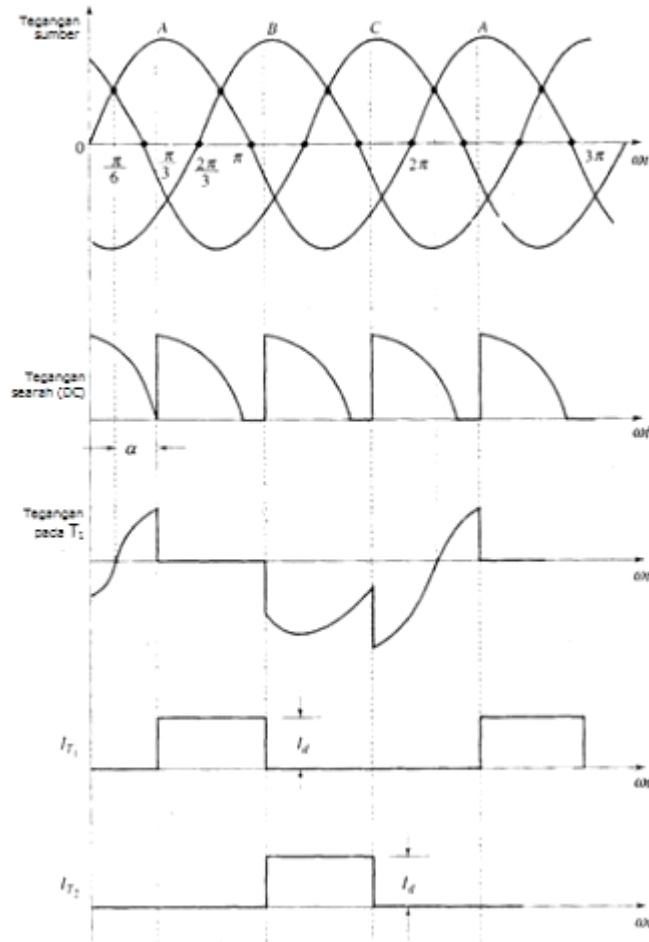
Gambar 4.6.a) Rangkaian Penyearah setengah gelombang tiga fasa
Beban R



Gambar 4.6. b) Bentuk Gelombang Penyearah Setengah-gelombang Tiga Fasa Beban R

Jika beban R pada rangkaian Gambar 4.6 digantikan beban RL, maka bentuk gelombang yang dihasilkan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7. Nilai tegangan searah (V_{dc}) dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos \alpha \quad (4.13)$$



Gambar 4.7 Bentuk Gelombang Penyearah Setengah-gelombang TigaPhasaBeban RL

4.3.4 Penyearah Gelombang-Penuh Tiga-Phasa

Gambar 4.8 merupakan rangkaian penyearah 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.

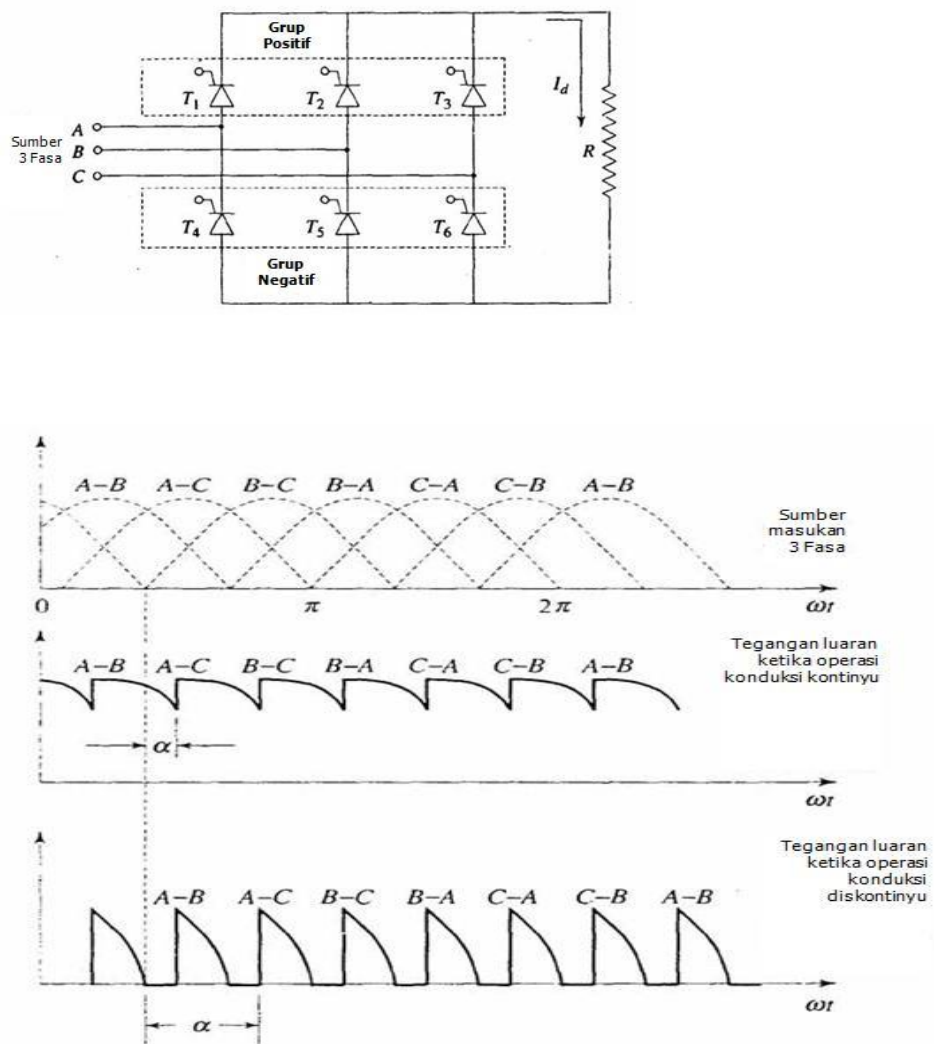
Proses pemicuan pada rangkaian ini dilakukan secara serempak masing-masing T₁ dan T₅, T₂ dan T₆, serta T₃ dan T₄. Terdapat dua proses pengaturan sudut pemicuan (α), yaitu: (a) operasi konduksi kontinyu ketika $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$

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 SCRT₁, T₂, dan T₃ dilakukan secara serempak pada masing-masing fasa. Nilai tegangan searah rerata (V_{dc}) pada operasi konduksi kontinyu dapat ditentukan sebagai berikut:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos \alpha \quad (4.14)$$

dan operasi konduksi diskontinyu:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{m, fasa} \cos [1 + (\alpha + 60^\circ)] \quad (4.15)$$



Gambar 4.8 Rangkaian Penyearah Gelombang-penuh

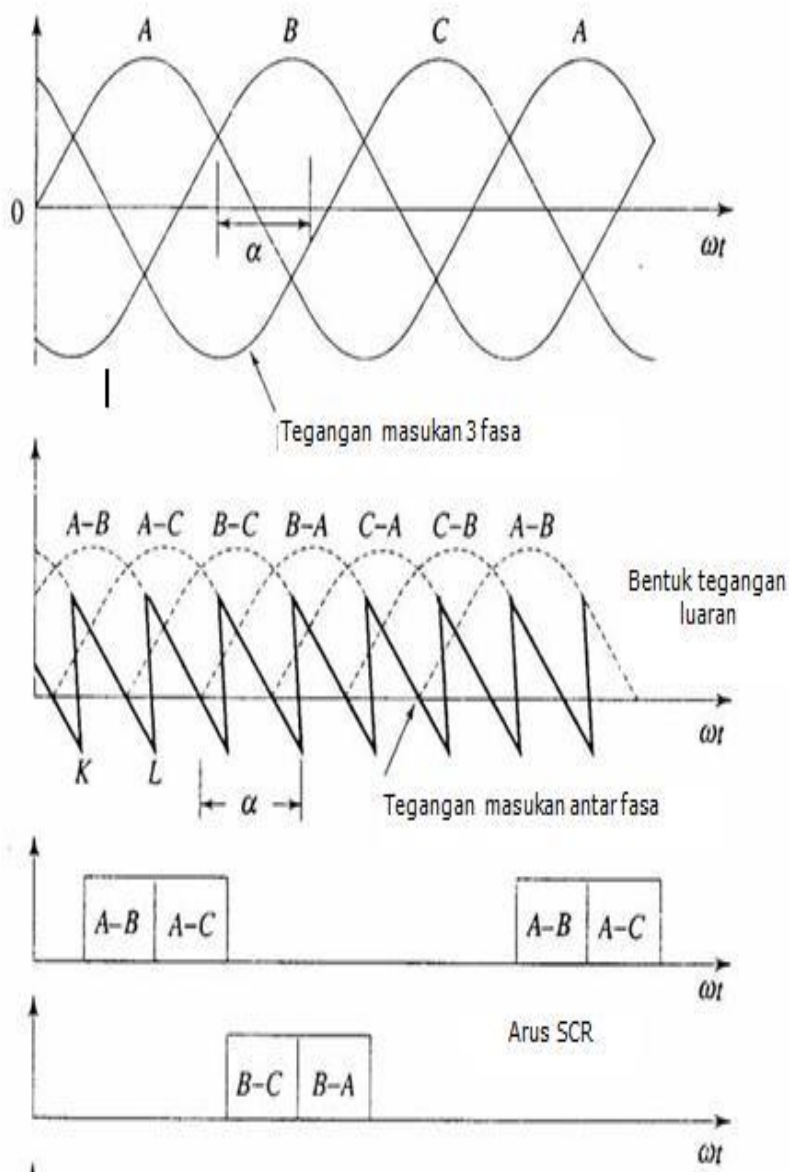
TigaPhasaBeban R

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 :

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{m,ph} \cos \alpha \quad (4.16)$$

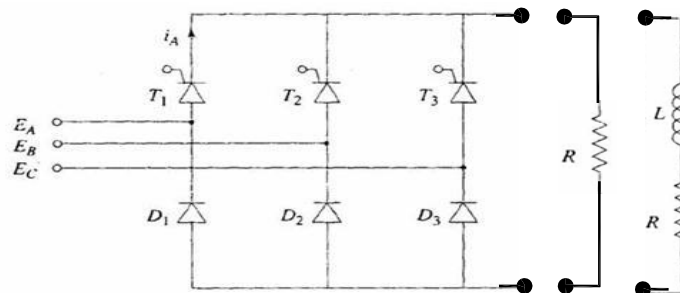


Gambar 4.9 Bentuk Gelombang Penyearah Gelombang-penuh TigaFasaBeban RL

b. SemikonverterTiga-pha

Gambar 4.10 merupakan rangkaian semikonverter tiga pha. Proses pemicuan pada rangkaian ini terjadi ketika SCRT₁ dan dioda D₂, T₂ dan dioda D₃, serta SCRT₃ dan dioda D₁ masing-masing dioperasikan secara serempak. Jika rangkaian semikonverter tiga pha dihubungkan dengan R, maka persamaan untuk tegangan searah rerata (V_{dc}) pada operasi konduksi kontinyu dan operasi konduksi diskontinyu seperti pada rangkaian penyearah gelombang-penuh tiga pha adalah. Selanjutnya, jika rangkaian semikonverter tiga pha dihubungkan dengan R, maka persamaan untuk tegangan searah rerata (V_{dc}) sebesar :

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{m,ph} (1 + \cos \alpha) \tag{4.17}$$



Gambar 4.10 Rangkaian Semikonverter Tiga Pha

4.4 Latihan

Sebuah transformator satu pha pada sisi primer dihubungkan dengan tegangan 120V, 50 Hz, dan sisi sekunder dihubungkan dengan rangkaian penyearah gelombang-penuh satu pha. Jika rangkaian ini dihubungkan dengan resistor 20 Ω, dan dikehendaki arus beban rerata (DC) dapat diatur dari 4,5 A–8,0A, rencanakan jenis transformator yang digunakan (step-up atau step-down) dan sudut pemicuannya (α)!

4.5 Rangkuman

Penyearah terkendali (*controlled rectifier*) merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah tegangan sumber masukan arus bolak-balik dalam bentuk sinusoidal menjadi tegangan output dalam bentuk tegangan searah yang dapat diatur/dikendalikan.

4.6 Review

Bagi para pembaca setelah mempelajari uraian di atas dan menjawab soal yang diberikan pada latihan dan mencocokkannya dengan jawaban yang telah disediakan, maka pembaca dapat mereview kembali capaian yang diperoleh dengan menjawab soal-soal berikut:

- a. Suatu rangkaian penyearah setengah-gelombang 3 fasa hubungan bintang dihubungkan dengan beban resistif $2,5\Omega$ dengan tegangan antarline 208V , 60Hz . Jika daya output yang diinginkan $P_o = 12\text{ kW}$, hitunglah (1) sudut pemisahan (α), dan (2) tegangan output per fasa efektif (V_L).

BAB V

PENGATUR TEGANGAN AC

5.1 Pendahuluan

Ada dua jenis rangkaian pengatur tegangan bolak-balik jika ditinjau dari frekuensi output 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.

5.2 Tujuan Khusus

Setelah mengikuti materi ini diharapkan mahasiswa mampu:

- a. Menguasai karakteristik ac regulator *unidirectional* dan *bidirectional* satu fasa dan tiga fasa
- b. Menguasai dasar prinsip kerja ac regulator *unidirectional* dan *bidirectional* satu fasa dan tiga fasa.
- c. Menguasai dasar prinsip kerja rangkaian *cycloconverters* satu fasa dan tiga fasa.

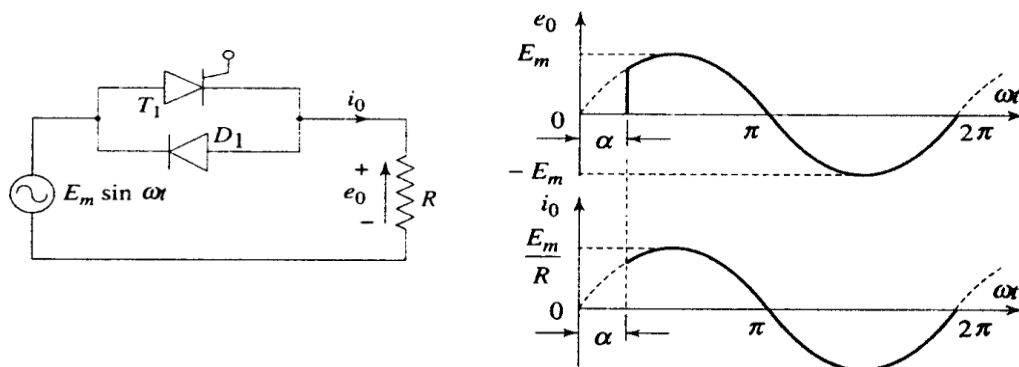
5.3 Teori

5.3.1 AC Regulator Satu-Phasa

a. AC Regulator Unidirectional Satu-Phasa

Gambar 5.1 merupakan rangkaian *acregulatorunidirectionalsatu-phasadengan* beban resistif dan bentuk gelombang hasil pengaturan. Proses pengaturantegandangapatdijelaskankmelalui

Gambar5.1, ketikasatengahperiode pertama, T_1 dipicusebesar α , maka T_1 menjadi ON dari $\alpha - \pi$. Selanjutnya, saatsetengahperiode kedua, D_1 selalu ON dari $\pi - 2\pi$.



Gambar 5.1 Rangkaian AC Regulator Unidirectional Satu Phasa Beban R

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

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

$$V_{ac} = \frac{E_m}{2\pi} (\cos \alpha - 1) \quad (5.1)$$

$$V_L = E_s \left[\frac{1}{2\pi} \left(2\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{1/2} \quad (5.2)$$

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

Contoh 5.1 : Sebuah pengontrol tegangan ac satu phasa seperti pada gambar 5.1 memiliki sebuah beban resistif $R = 10 \Omega$ dan tegangan masukan $E_s = 120 \text{ V}$, 60 Hz. Sudut tunda dari thyristor T_1 adalah $\alpha = \pi/2$. Tentukan (a) nilai rms tegangan keluaran V_L , (b) Masukan factor daya PF, dan (c). arus masukan rata-rata

Penyelesaian :

$$R = 10 \Omega, E_s = 120 \text{ V}, \alpha = \pi/2, \text{ dan } E_m = \sqrt{2} \times 120 = 169,7 \text{ V}$$

(a). Dari persamaan (5.2), nilai rms tegangan keluaran

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

$$V_L = 120 \sqrt{\frac{3}{4}} = 103,92 \text{ V}$$

(b). Arus beban rms

$$I_L = V_L/R = 103,92/10 = 10,392 \text{ A}$$

Daya beban :

$$P_L = I_L^2 R = 10,392^2 \times 10 = 1079,94 \text{ W}$$

Karena arus masukan sama dengan arus beban, maka masukan factor daya PF adalah :

$$\begin{aligned} \text{PF} &= \frac{V_L}{E_s} = \left[\frac{1}{2\pi} \left(2\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{1/2} & (5.3) \\ &= \sqrt{\frac{3}{4}} = 0,866 \text{ (langging)} \end{aligned}$$

(c). Dari persamaan (5.1), Tegangan keluaran rata-rata :

$$V_{ac} = \frac{E_m}{2\pi} (\cos \alpha - 1)$$

$$V_{ac} = \frac{169,7}{2\pi} (\cos \pi/2 - 1)$$

$$V_{ac} = \frac{169,7}{2\pi} (-1) = -27 \text{ V}$$

Dan arus masukan rata-rata :

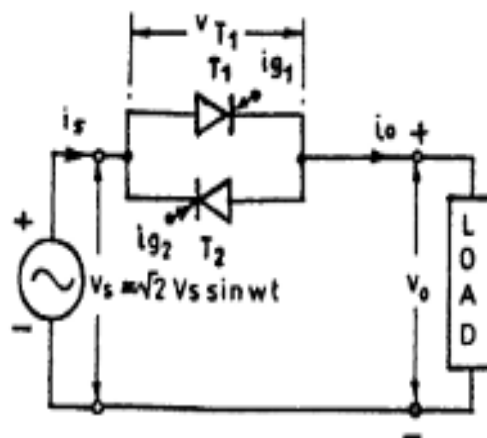
$$I_D = \frac{V_{ac}}{R} = \frac{-27}{10} = -2,7A$$

b. AC Regulator Bidirectional Satu-fasa

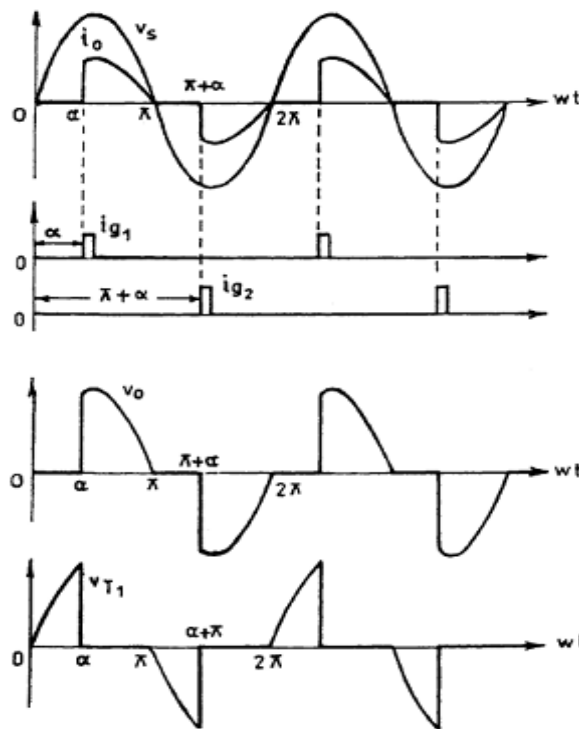
Gambar 5.2 merupakan rangkaian *ac regulator bidirectional satu-fasa* dengan beban resistif dan bentuk gelombang hasil pengaturan. Komponen SCR T₁ bekerja pada setengah periode pertama (0 sampai dengan π), dan komponen SCR T₂ bekerja pada setengah periode kedua (π sampai dengan 2π). Jika SCR T₁ dan T₂ masing-masing dipicu sebesar α, maka nilai tegangan bolak-balik efektif (root mean square-rms), V_L dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$V_L = E_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{1/2} \tag{5.4}$$

Dari persamaan di atas dapat dinyatakan bahwa jika α diatur dari 0 sampai dengan π maka diperoleh hasil pengaturan V_L dari E_s sampai dengan nol.



Gambar 5.2 Rangkaian AC Regulator bidirectional Satu Fasa Beban R



(b)

Gambar 5.3 Bentuk Gelombang AC Regulator bidirectional Satu
Fasa Beban R

5.3.2 AC Regulator Tiga-Fasa

a. AC Regulator Unidirectional Tiga-fasa

Gambar 5.4 merupakan rangkaian ac regulator unidirectional tiga-fasa dengan beban resistif sambungan bintang (Y) dan gambar 5.5 merupakan bentuk gelombang hasil pengaturan. Proses pemecutan pada rangkaian ini terjadi ketika SCRT₁ dan dioda D₄, T₃ dan dioda D₆, serta SCRT₅ dan dioda D₂ masing-masing fasa dioperasikan secara serempak. Arus beban masing-masing fasa ditentukan oleh pengaturan picuan pada SCRT₁, T₃, dan T₅, sedangkan dioda D₂, D₄, dan D₆ 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:

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

maka,

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

Tegangan efektif output (V_L) yang dihasilkan diperoleh dari tiga pengaturan sudut pemicuan (α) berikut:

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

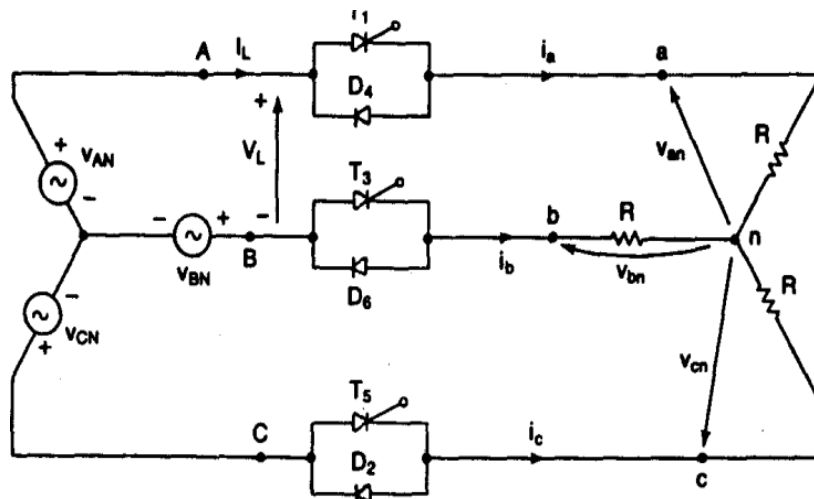
$$V_L = \sqrt{3} V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{3} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8} \right) \right]^{1/2} \quad (5.5)$$

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

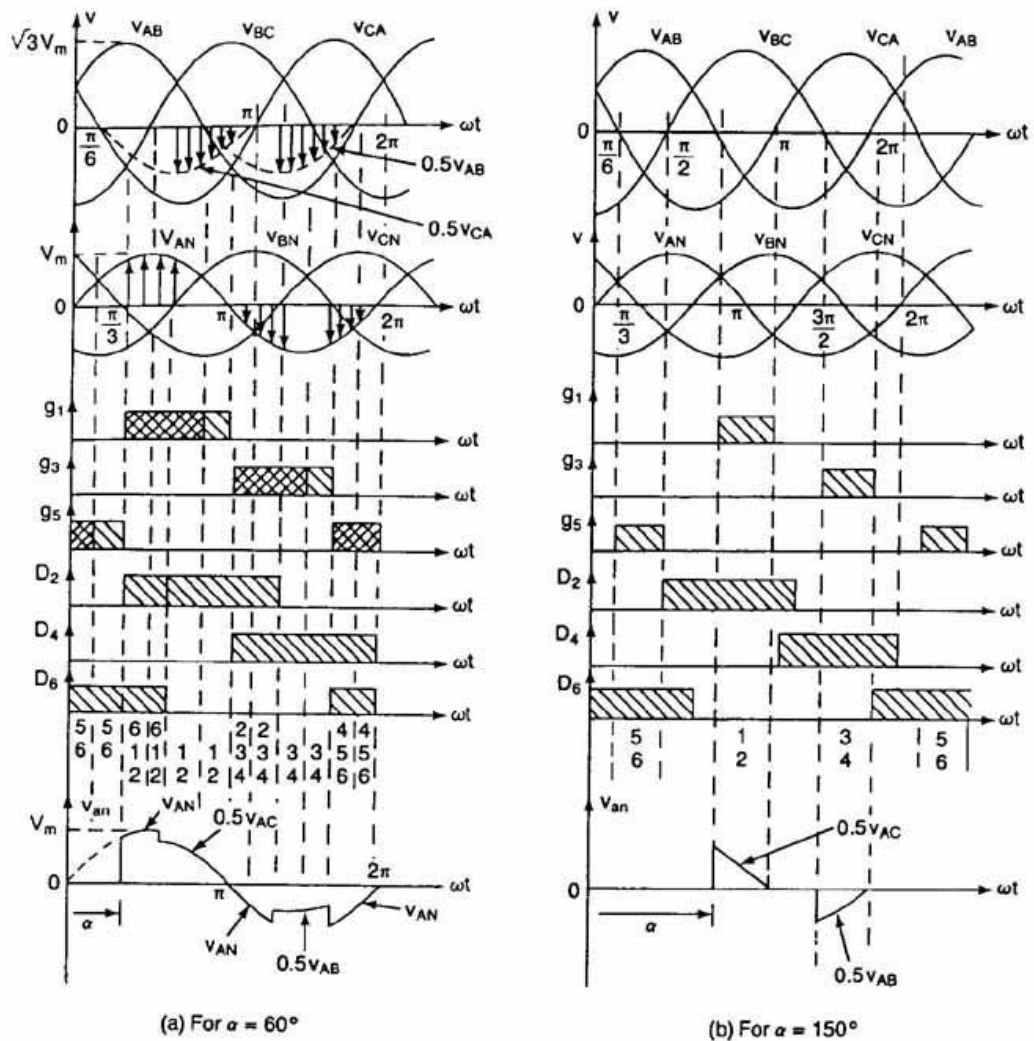
$$V_L = \sqrt{3} V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{11\pi}{24} - \frac{\alpha}{2} \right) \right]^{1/2} \quad (5.6)$$

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

$$V_L = \sqrt{3} V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{7\pi}{24} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{16} - \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right]^{1/2} \quad (5.7)$$



Gambar 5.4 Rangkaian AC Regulator Unidirectional Tiga Fasa Beban R



Gambar 5.5 Bentuk Gelombang AC Regulator Unidirectional Tiga Fasa Beban R

Contoh 5.2. Pengontrol unidirectional tiga fasa seperti pada Gambar 5.3 mencatu beban resistif yang terhubung Y dengan $R = 10 \Omega$ dan tegangan masukan jalur ke jalur adalah 208 V (rms) , 60 Hz . Sudut tunda adalah $\alpha = \pi/3$. Tentukan tegangan fasa keluaran rms V_L .

Penyelesaian :

$$\begin{aligned}
 V_{L-L} &= 208 \text{ V}, \\
 V_S &= V_{L-L}/\sqrt{3} = 120 \text{ V}, \\
 \alpha &= \pi/3 \text{ dan } R = 10 \Omega.
 \end{aligned}$$

Dengan persamaan (5.5) Tegangan fasa keluaran rms adalah :

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

$$V_L = 110,86 \text{ V}$$

b. AC Regulator Bidirectional Tiga-fasa

Gambar 5.6 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 T₂, T₄, dan T₆ yang difungsikan seperti dioda D₂, D₄, dan D₆ untuk aliran balik arus pada pengaturan unidirectional tiga-fasa. Dengan demikian, pemicuan dilakukan pada SCR T₁ dan dioda T₄, T₃ dan dioda T₆, serta SCR T₅ dan dioda T₂ masing-masing fasa dioperasikan secara serempak.

Jika V_s merupakan tegangan fasa masuk sesaat seperti pada rangkaian unidirectional tiga-fasa sambungan bintang, maka tegangan efektif output (V_L) yang dihasilkan diperoleh dari tiga pengaturan sudut pemicuan (α) berikut:

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

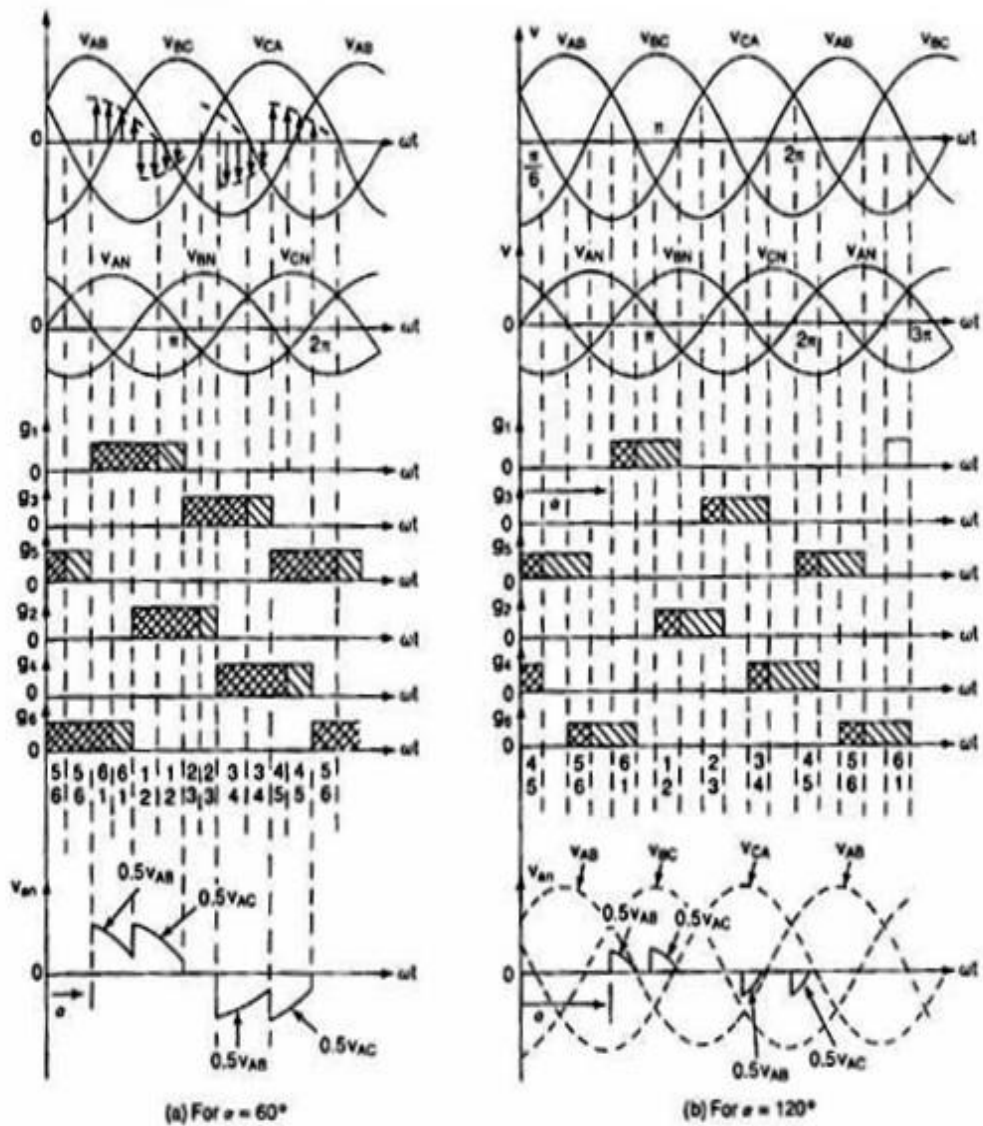
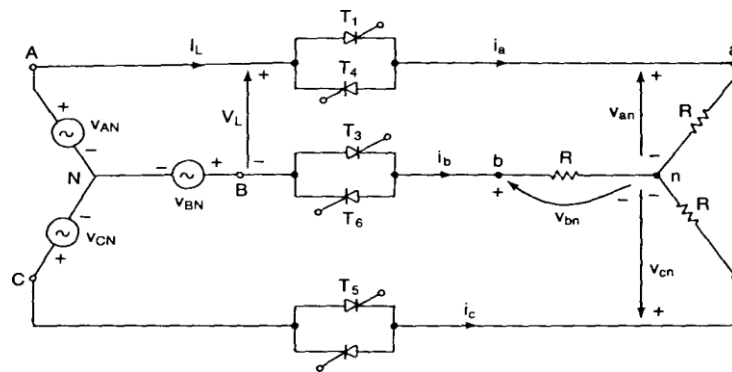
$$V_L = \sqrt{6}V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{6} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8} \right) \right]^{1/2} \quad (5.8)$$

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

$$V_L = \sqrt{6}V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{12} + \frac{3 \sin 2\alpha}{16} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right]^{1/2} \quad (5.9)$$

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

$$V_L = \sqrt{6}V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{5\pi}{24} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{16} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right]^{1/2} \quad (5.10)$$



Gambar 5.6 Rangkaian AC Regulator Unidirectional Tiga Phase Sambungan Bintang Beban R

Contoh 5.3 :Ulangi contoh 5.2 untuk pengontrol bidirectional tiga fase seperti gambar 5.4.

Penyelesaian :

$$V_{L-L} = 208 \text{ V,}$$

$$V_S = V_{L-L}/\sqrt{3} = 120 \text{ V,}$$

$$\alpha = \pi/3 \text{ dan } R = 10 \ \Omega.$$

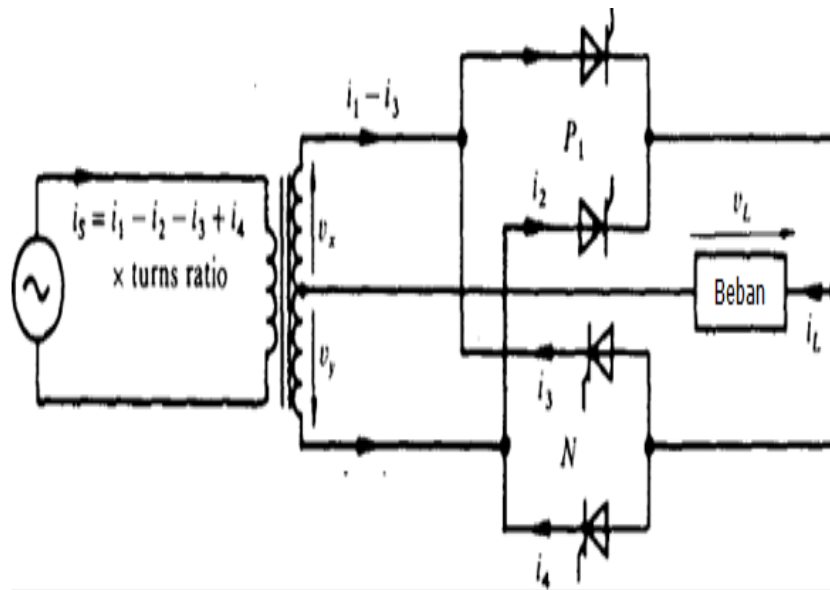
Dengan persamaan (5.8) Tegangan fase keluaran rms adalah :

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

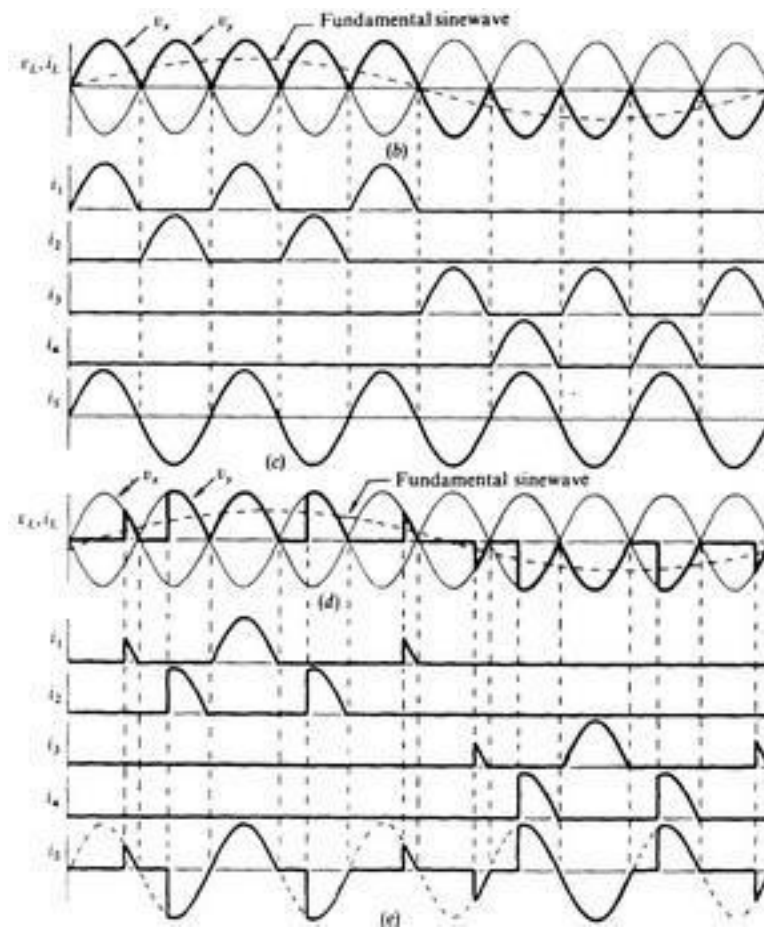
$$V_L = 100,9 \text{ V}$$

5.3.3 Cycloconverter SatuPhasa

Cycloconvertersatu fase merupakan suatu rangkaian yang mengubahsumberteganganmasukansatuphasa denganfrekuensi tertentu menjaditeganganoutputsatuphasadenganfrekuensi lebih kecil dari frekuensi sumber masukan. Gambar 5.7merupakan rangkaian dasar cycloconvertersatu fase dengan beban resistif dan bentuk gelombang hasil pengaturan.



Gambar 5.7 RangkaianCycloconverter Satu Phasa



Gambar 5.8 Bentuk Gelombang Cycloconverter Satu Fasa

Untuk menghasilkan pengaturan frekuensi, dalam Gambar 5.7, 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 5.8..

Jika Gambar 5.7 digunakan untuk menghasilkan frekuensi output seperlima dari frekuensi sumber, seperti Gambar 5.8(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).

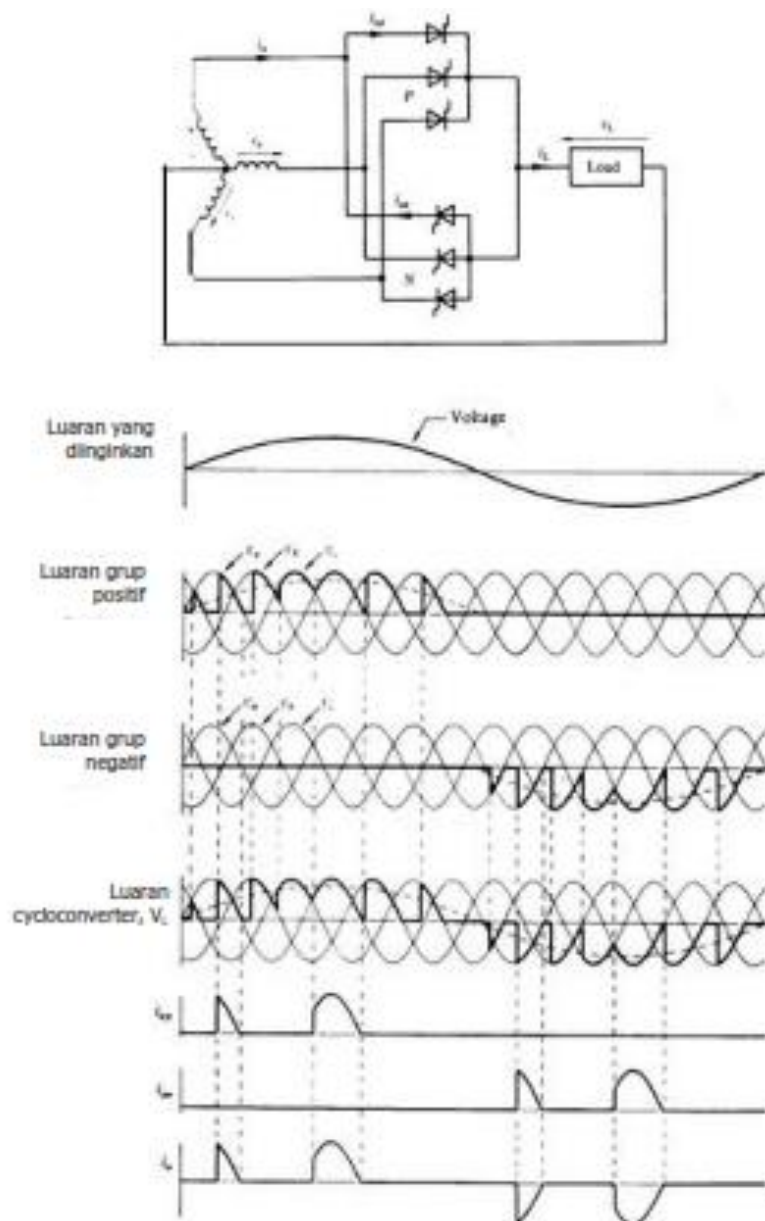
Selanjutnya, jika masing-masing lima setengah siklus pada grup konverter P dan N dipicu dengan sudut picuan tertentu seperti pada Gambar 5.8(d), maka dengan urutan proses kerja SCR seperti di atas akan dihasilkan tegangan dengan frekuensi seperlima lebih kecil dari sumbernya (ditunjukkan dengan garis putus-putus) seperti ditunjukkan pada Gambar 5.8(c).

5.3.4 Cycloconverter TigaFasa Menjadi SatuFasa

Gambar 5.9 merupakan rangkaian cycloconverter yang mengubah sumber tegangan masukan tiga phasa dengan frekuensi tertentu menjadi tegangan output satu phasa dengan frekuensi lebih kecil dari frekuensi sumber masukan. Gambar 5.9 merupakan rangkaian dasar cycloconverter tiga phasa menjadi satu phasa dengan beban resistif dan bentuk gelombang hasil pengaturan.

Seperti halnya pada cycloconverter satu phasa di atas, dalam Gambar 5.9, 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 5.9, tegangan phasa pada masing-masing, yaitu: $V_a, V_b,$ dan V_c , digunakan sebagai dasar pembentukan setengah siklus positif dan negatif dari tegangan output yang diinginkan.

Jika tegangan output yang diinginkan seperti pada Gambar 5.9, 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.



Gambar 5.9 Cycloconverter Tiga Phasa menjadi Satu Phasa

5.4 Latihan

- Suatu rangkaian ac regulator unidirectional dengan sumber masukan 230 V, 50 Hz dihubungkan dengan beban resistif 6Ω . Jika sudut pemicuan pada SCR sebesar 90° , hitunglah tegangan output efektif, faktor daya, dan arus rata-rata masukan.
- Suatu rangkaian ac regulator bidirectional dengan sumber masukan 120 V, 60 Hz dihubungkan dengan beban resistif 10Ω . Jika sudut

pemicuan pada SCR1 dan SCR2 sebesar 90° , hitunglah tegangan luarefektif, faktor daya, dan arus rerata dan efektif pada SCR.

- c. Sebuah rangkaian AC regulator unidirectional 3 phasa dihubungkan dengan resistif sebesar $10\ \Omega$ yang dihubungkan bintang. Jika tegangan masukan antarline sebesar $208\ \text{V}$, $50\ \text{Hz}$ dan diatur dengan sudut pemicuan 60° , tentukan: (1) tegangan output per phasa, dan (2) faktor daya.

5.5 Rangkuman

Ada dua jenis rangkaian pengatur tegangan bolak-balik jika ditinjau dari frekuensi output 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.

5.6 Review

Bagi para pembaca setelah mempelajari uraian di atas dan menjawab soal yang diberikan pada latihan dan mencocokkannya dengan jawaban yang telah disediakan, maka pembaca dapat mereview kembali capaian yang diperoleh dengan menjawab soal-soal berikut:

1. AC Regulator Satu-fasa

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

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 masuk 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 masuk 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 masuk 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 outputnya !

BAB VI ***DC CHOPPERS***

6.1 Pendahuluan

Chopper (pemangkas) merupakan suatu rangkaian yang digunakan untuk mengubah sumber masuk tegangan DC tetap menjadi sumber output 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).

6.2 Tujuan Khusus

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).

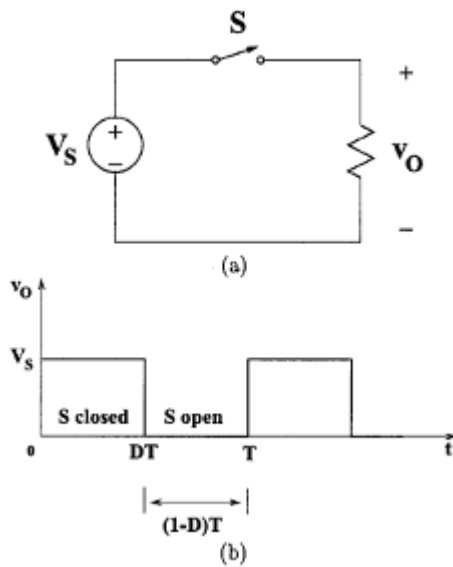
6.3 Teori

6.3.1 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 masukan 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 output 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 (α atau D) ditentukan dengan persamaan berikut:

$$D \equiv \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T}$$



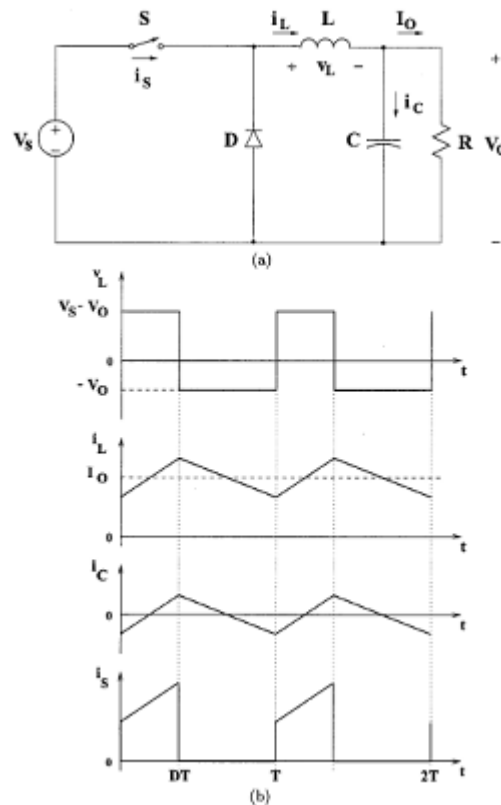
Gambar 6.1 Prinsip Kerja Dasar Chopper

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

$$v_{o, \text{ave.}} = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt = \frac{1}{T} \left(\int_0^{t_{on}} V_{in} dt + \int_{t_{on}}^T 0.0 dt \right) = \frac{t_{on}}{T} V_{in} = d V_{in}$$



Gambar 6.2 Rangkaian Chopper Penurun Tegangan

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

$$v_{o, \text{ave.}} = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt = \frac{1}{T} \left(\int_0^{t_{on}} V_{in} dt + \int_{t_{on}}^T 0.0 dt \right) = \frac{t_{on}}{T} V_{in} = d V_{in}$$

Contoh 6.1 Berapakah nilai t_{on} dan tegangan output chopper step down jika frekuensinya 1000 Hz, siklus kerja 0,5, dan tegangan inputnya 20 volt?

Jawab :

$$D = \frac{t_{on}}{T}$$

$$t_{on} = D \times T$$

$$= 0,5 \times 1/1000$$

$$= 0,5 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$= 0,5 \text{ ms}$$

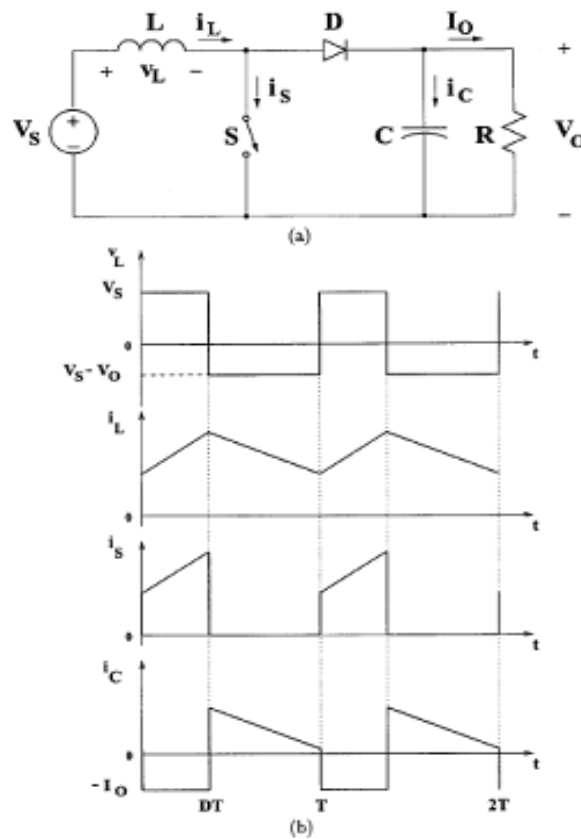
$$V_o = DV_{in}$$

$$= 0,5 \times 20 \text{ V}$$

$$= 10 \text{ Volt}$$

6.3.2 Chopper Penaik (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 periode T_{ON} .



Gambar 6.3 Rangkaian chopper penaik tegangan

Selanjutnya, jika chopper di-OFFkan, induktor akan mengalirkan arus ke dioda (D) dan ke beban, serta terjadi tegangan emf pada induktor. Jika energi yang disimpan saat T_{on}, W_i , sama dengan energi yang dilepaskan saat T_{off}, W_o , maka tegangan output pada beban (V_o) dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$V_o = \frac{1}{1-D} V_{in}$$

Contoh 6.2 Berapakah nilai t_{on} dan tegangan output chopper step up jika frekuensinya 1000Hz, siklus kerja 0,5, dan tegangan inputnya 20volt?

Jawab :

$$D = \frac{t_{on}}{T}$$

$$\begin{aligned} t_{on} &= D \times T \\ &= 0,5 \times 1/1000 \\ &= 0,5 \times 10^{-3} \text{ s} \\ &= 0,5 \text{ ms} \end{aligned}$$

$$V_o = \frac{1}{1-D} V_{in}$$

$$V_o = \frac{1}{1-0,5} 20$$

$$V_o = \frac{20}{0,5}$$

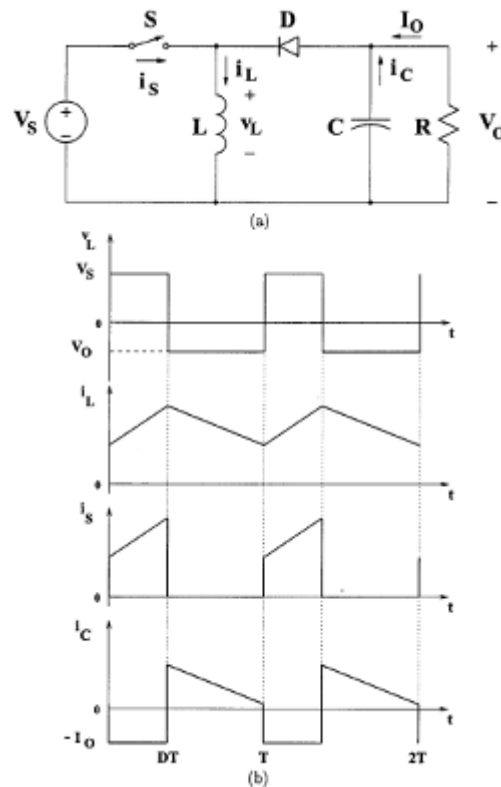
$$V_o = 40 \text{ Volt}$$

6.3.3 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

kedioda(D)dankebeban.Jikaenergiyangdisimpansaat T_{on} , W_i , samadenganenergiyangdilepaskanfaat T_{off} , W_o ,makateganganoutputpada beban (V_o)dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$V_o = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_{dc}$$



Gambar 6.3 Rangkaian chopper penaik-penurun tegangan

6.4 Latihan

- Berapakah nilai t_{on} dan tegangan output chopper step down jika frekuensinya 200Hz, siklus kerja 0,25, dan tegangan inputnya 12 volt?
- Suatu rangkaian chopper step up 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!

6.5 Rangkuman

Chopper (pemangkas) merupakan suatu rangkaian yang digunakan untuk mengubah sumber masuk tegangan DC tetap menjadi sumber output tegangan DC yang dapat dikendalikan/diatur.

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

DC Chopper dapat digunakan sebagai trafo DC untuk menaikkan atau menurunkan tegangan dc yang tetap. Chopper juga dapat digunakan sebagai regulator tegangan dengan mode pensaklaran dan untuk memindahkan energy antara dua buah sumber dc.

6.6 Review

Bagi para pembaca setelah mempelajari uraian di atas dan menjawab soal yang diberikan pada latihan dan mencocokkannya dengan jawaban yang telah disediakan, maka pembaca dapat mereview kembali capaian yang diperoleh dengan menjawab soal-soal berikut:

- a. Apakah yang dimaksud dengan siklus kerja? Jelaskan dengan disertai gambar!
- b. Berapakah nilai minimum dan maksimum dari siklus kerja?
- c. Jelaskan pengaruh frekuensi pensaklaran terhadap tegangan output chopper !
- d. Jelaskan prinsip kerjanya rangkaian chopper penurun tegangan!

BAB VII

INVERTER

7.1 Pendahuluan

Inverter merupakan suatu rangkaian yang digunakan untuk mengubah sumber tegangan DC tetap menjadi sumber tegangan AC dengan frekuensi tertentu. Komponen semi konduktor 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.

7.2 Tujuan Khusus

Setelah mengikuti materi ini diharapkan mahasiswa mampu:

- a. Menguasai karakteristik inverter satu fasa dan tiga fasa
- b. Menguasai dasar prinsip kerja inverter satu fasa dan tiga fasa

7.3 Teori

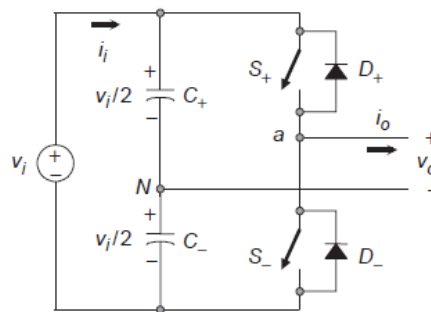
7.3.1 Inverter Satu-Fasa

Inverter adalah sebuah rangkaian yang dapat mengubah tegangan

searah(DC) menjadi tegangan bolak-balik (AC).

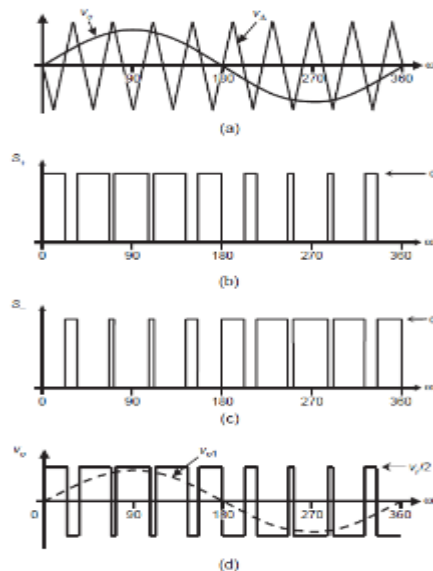
7.3.1.1 Inverter Setengah-Jembatan Satu-Phasa

Gambar 7.1 merupakan rangkaian dasar inverter setengah-jembatan satu-phaa dengan beban resisti f dan bentuk gelombangnya. Dalam rangkaian Gambar 7.1 diperlukan dua buah kapasitor untuk menghasilkan titikN agar tegangan pada setiap kapasitor $V_i/2$ dapat dijaga konstan. Sakela rS_+ dan S_- merepresentasikan sakelar elektroni syang mencerminkan komponen semikonduktor daya sebagaimana diuraikan dimuka. Sakelar S_+ dan S_- tidak boleh bekerja secara serempak/ simultan,karena akan terjadi hubung singkat rangkaian.



Gambar 7.1

Rangkaian Inverter Setengah-jembatan SatuPhasa



Gambar 7.2 Bentuk Gelombang Inverter Setengah Jembatan Satu Phasa (a) Sinyal pembawa dan Modulasi PWM, (b) Gelombang Input S_+ , (c) Gelombang Input S_- ,

dan (d) Gelombang Output

Kondisi ON dan OFF dari sakelar S_+ dan S_- ditentukan dengan teknik modulasi, dalam hal ini menggunakan prinsip PWM seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.2. Prinsip PWM dalam rangkaian ini membandingkan antara sinyal modulasi V_c (dalam hal ini tegangan bolak-balik output yang diharapkan) dengan sinyal pembawa dengan bentuk gelombang gigi-gergaji (V_Δ). 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 output (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 $i_o < 0$ |

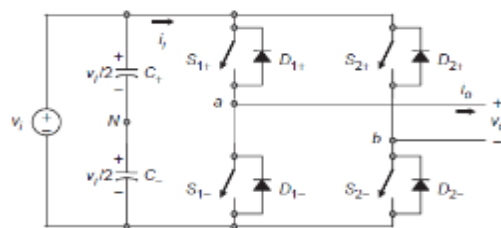
7.3.1.2 Inverter Jembatan Satu-Phasa

Gambar 7.3 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.

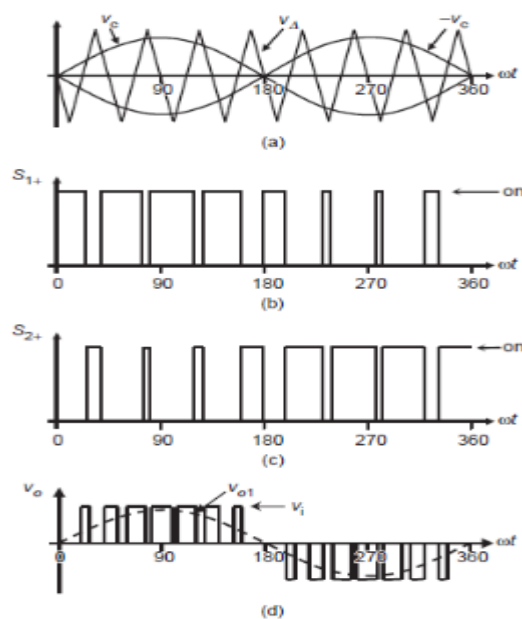
Untuk menghasilkan tegangan output (V_o) satu fasa, terdapat lima kondisi jika

sakelar S_{1+} , S_{1-} , S_{2+} , dan S_{2-} dioperasikan sebagaimana ditunjukkan pada table 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 7.3 Rangkaian Inverter Jembatan Satu-Phasa

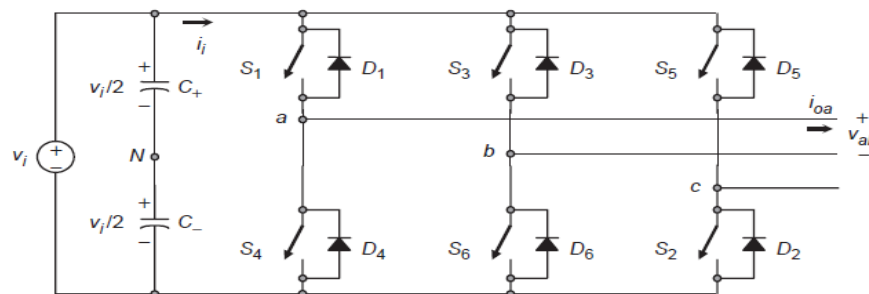


Gambar 7.4 Bentuk Gelombang Inverter Jembatan Satu Phasa (a) Sinyal pembawa

dan modulasi PWM, (b) Gelombang input S_{1+} , (c) Gelombang input S_{2+} dan (d) Bentuk Gelombang Output

7.3.2 Inverter Jembatan Tiga-Phasa

Gambar 7.5 merupakan rangkaian dasar inverter jembatan tiga- phasa dengan beban resistif dan bentuk gelombangnya. Seperti halnya pada rangkaian inverter setengah-jembatan diatas, 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_4 , serta S_5 dan S_2 . Masing- masing sakelar, S_1 dan S_4 , atau S_3 dan S_4 , 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 ditunjukkan pada Gambar 7.6, seperti jelaskan pada inverter setengah-jembatan satu phasa diatas.

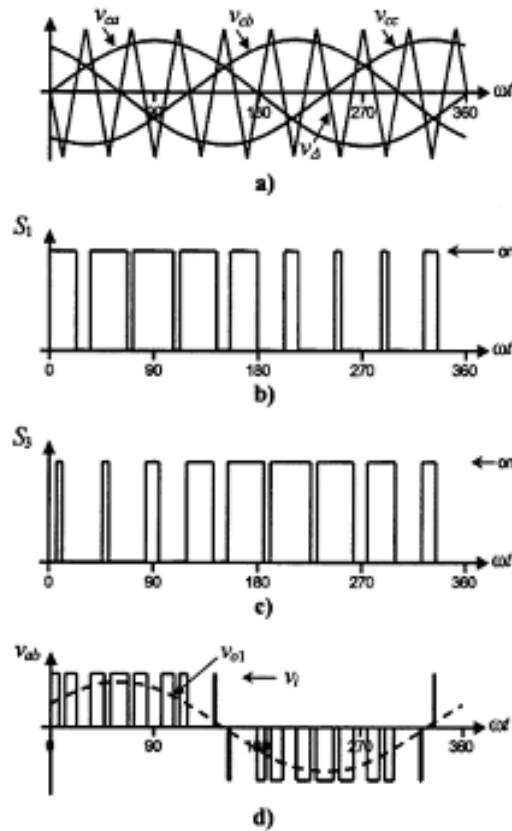


Gambar 7.5 Rangkaian Inverter Jembatan Tiga Phasa

Untuk menghasilkan tegangan output (V_O) tiga phasa, terdapat delapan kondisi jika sakelar S_1, S_4, S_3, S_4, S_5 dan S_2 dan S_4 dioperasikan sebagaimana ditunjukkan pada tabel berikut:

| Kondisi Ke- | Kondisi | V_{ab} | V_{bc} | V_{ca} | Vektor |
|-------------|--------------------------------------|----------|----------|----------|---------------------|
| 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 | $S_6-S_1-S_5\text{On}\&S_3-S_4-S_2\text{Off}$ | V_i | $-V_i$ | 0 | $v_6=1-j0,577$ |
| 7 | $S_1-S_3-S_5\text{On}\&S_4-S_6-S_2\text{Off}$ | 0 | 0 | 0 | $v_7=0$ |
| 8 | $S_4-S_6-S_2\text{On}\&S_1-S_3-S_5\text{Off}$ | 0 | 0 | 0 | $v_8=0$ |



Gambar 7.6 Bentuk Gelombang Inverter Jembatan Tiga Fasa, (a) Gelombang pembawa dan modulasi PWM Tiga Fasa, (b) Gelombang input S_1 , (c) Gelombang Input S_3 dan (d) Gelombang output

7.4 Rangkuman

1. Inverter merupakan suatu rangkaian yang digunakan untuk mengubah sumber tegangan DC tetap menjadi sumber tegangan AC dengan frekuensi tertentu.
2. Inverter dapat diklasifikasikan dalam dua jenis, yaitu: inverter satu fasa dan inverter tiga fasa.
3. Waktu penyalan saklar elektronika daya pada rangkaian inverter harus diatur sedemikian rupa agar tidak terjadi hubung singkat pada rangkaian.

7.5 Latihan

1. Jelaskan prinsip kerjanya rangkaian inverter setengah-jembatan satu fasa!
2. Jelaskan prinsip kerjanya rangkaian inverter jembatan tiga fasa!

7.6 Review

Bagi para pembaca setelah mempelajari uraian di atas dan menjawab soal yang diberikan pada latihan dan mencocokkannya dengan jawaban yang telah disediakan, maka pembaca dapat mereview kembali capaian yang diperoleh dengan menjawab soal-soal berikut:

1. Jelaskan fungsi kapasitor pada rangkaian inverter setengah- jembatan satu phasa!
2. Jelaskan prinsip kerja rangkaian inverter jembatan satu phasa!

DAFTAR PUSTAKA

- Floyd, Thomas L.(1984)*Elektronik Device*.Bell & Howell Company. Columbus.
- Hart, D.W. (1997). **Introduction to Power Electronics**.Indiana: Prentice-Hall International,Inc.
- Mussener,Ch.(1991).**Power Electronics and Drive Technology 1**.Germany: LeyboldDidactic.
- Mohan,et.al.(1995).**Power Electronics: Converter, Application and Design**.Singapore: JohnWiley & 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.
- Rashid H. Muhammad, 1981. *Power Electronic*, Second Edition, Prentice-Hall International,Inc.
- Singh,MD.(1998).**Power Electronics**.New Delhi:TataMcGraw-Hill Publishing Company Limited.
- Theraja, BL, 1980. *Electrical Technology, in SI Units*, 17th edition, Delhi.
- Transmisi Daya Arus Searah*, Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara, Medan 1997
- Timothy J. Maloney (1987), *Industrial Solid State Electronics – Device and system*, Publisher Pernick Printing Corp. Puyat , Manila

TAKARIR

Amplitudo :

Level tegangan

Bipolar Junction Transistor :

Komponen Elektronika Daya yang mempunyai tiga terminal

Chopper :

Konverter DC to DC, untuk mengubah tegangan DC tetap menjadi tegangan DC yang bisa di atur.

Cycloconverter :

Rangkaian converter AC to AC

Dioda :

Komponen aktif yang melewatkan arus hanya kalau dibias maju (arah arus dari anoda ke katoda)

Frekuensi :

Frekuensi adalah banyaknya siklus yang dapat terjadi pada gelombang sinus dalam satu detik

IGBT :

Komponen elektronika daya yang dapat dikendalikan dengan di-turn on atau turn off

Inverter :

Rangkaian converter untuk mengubah tegangan DC menjadi Tegangan AC

Kapasitor :

Komponen pasif yang dapat menyimpan muatan listrik.

Konverter :

Rangkaian elektronika daya untuk mengatur tegangan DC atau AC menjadi besaran tertentu dalam bentuk AC atau DC

Penyearah :

Rangkaian yang dapat mengubah tegangan *ac* menjadi tegangan *dc*

Power Supply :

Sumber tegangan

Transformator :

Komponen untuk menaikkan atau menurunkan tegangan *ac*

Thyristor :

Komponen elektronika daya yang bisa dikendalikan

Volt :

Satuan tegangan

PENJURUS

| | |
|-----------------------------|---|
| Amplitudo | : 2 |
| Bipolar Junction Transistor | : 12, 25 |
| Chopper | : 14, 27, 116, 117 |
| Cycloconverter | : 99, 109, 110, 111, 112, 114 |
| Dioda | : 12, 13, 14-20, 31, 33, 44, 51, 58, 96 |
| Frekuensi | : 2,4,8,31,41,111,118,130 |
| IGBT | : 13, 25, 26 |
| Inverter | : 2, 14, 28, 124, 125, 127 |
| Kapasitor | : 125,127, 128 |
| Konverter | : 27, 28, 89, 90, 96, 97, 111, 112, 113 |
| Penyearah | : 13, 14, 27, 30, 36, 41, 58. 75 |
| Power Supply | : 2 |
| Transformator | : 2, 44, 57, 86, 97, 111 |
| Thyristor | : 12, 13, 14, 20, 22, 84, 101 |

KUNCI JAWABAN

BAB III

1. Jawaban soal nomor 1

Tegangan efektif input. ($V_{in\ rms}$)

$$V_{in\ rms} = 91,67\text{ V}$$

Tegangan efektif output ($V_o\ rms$)

$$V_{o\ rms} = 91,67\text{V}$$

Arus efektif output ($I_o\ rms$)

$$I_{o\ rms} = 0,286\text{A}$$

Tegangan rata-rata output (V_{dc})

$$V_{dc} = 58,39\text{V}$$

Arus rata-rata out put (I_{dc})

$$I_{dc} = 0,1825\text{A}$$

Daya out put ac (P_{ac})

$$P_{ac} = 13,13\text{VA}$$

Daya out put dc (P_{dc})

$$P_{dc} = 10,65\text{ VA}$$

Effisiensi (η)

$$\eta = 0,8119$$

Form factor (FF)

$$\text{FF} = 1,57$$

Ripple Factor (RF)

$$\text{RF} = 1,12$$

Tegangan Inverse Puncak (PIV)

$$\text{PIV} = 256,66\text{ V}$$

Frekuensi output (f_{out})

$$f_{out} = 100\text{ Hz}$$

2. Jawaban soal nomor 2

Tegangan efektif input. ($V_{in\ rms}$) pada sisi sekunder trafo

$$V_{in\ rms} = 137,5\text{ V}$$

Tegangan efektif output ($V_{o\ rms}$)

$$(V_m = 194,45\text{ V})$$

$$V_{o\ rms} = 163,5\text{ Volt}$$

Arus efektif output ($I_{o\ rms}$)

$$I_{o\ rms} = 0,22\text{ A}$$

Tegangan rata-rata output (V_{dc})

$$V_{DC} = 160,89\text{ V}$$

Arus rata-rata out put (I_{dc})

$$I_{dc} = 0,215\text{ A}$$

Daya out put ac (P_{ac})

$$P_{ac} = 35,97\text{ W}$$

Daya out put dc (P_{dc})

$$P_{dc} = 34,59\text{ W}$$

Effisiensi (η)

$$\eta = 0,96$$

Form factor (FF)

$$FF = 1,02$$

Ripple Factor (RF)

$$RF = 0,2$$

Tegangan Inverse Puncak (PIV)

$$PIV = 194,45\text{ V}$$

Frekuensi output (f_{out})

$$f_{out} = 150\text{ Hz}$$

3. Jawaban soal nomor 3

Tegangan efektif input. ($V_{in\ rms}$) pada sisi sekunder trafo

$$V_{in\ rms} = 90,5\text{ V}$$

Tegangan efektif output ($V_{o\ rms}$)

di mana $V_m = 73,41$

$$V_{o\ rms} = 121,52\text{ Volt}$$

Arus efektif output ($I_{o\ rms}$)

$$I_{o\ rms} = 0,61A$$

Tegangan rata-rata output (V_{dc})

$$V_{DC} = 121,42\text{Volt}$$

Arus rata-rata out put (I_{dc})

$$I_{dc} = 0,607A$$

Daya out put ac (P_{ac})

$$P_{ac} = 74,13\text{ W}$$

Daya out put dc (P_{dc})

$$P_{dc} = 73,7W$$

Effisiensi (η)

$$\eta = 0,994$$

Form factor (FF)

$$FF = 1,0008$$

Ripple Factor (RF)

$$RF = 0,042$$

Tegangan Inverse Puncak (PIV)

$$PIV = 127,15\text{ Volt}$$

Frekuensi output (f_{out})

$$f_{out} = 300\text{ Hz}$$

BAB IV

step-up, $0^{\circ} < \alpha < 82,8^{\circ}$

BAB V

- 199,19V;0,866lag;-8,62A
- 84,85V;0,707lag;2,7Adan6A
- 110,86V;0,924lag

BAB VI

1. $D = \frac{t_{on}}{T}$

$$\begin{aligned}t_{\text{on}} &= D \times T \\ &= 0,25 \times 1/200 \\ &= 1,25 \times 10^{-3} \text{ s} \\ &= 1,25 \text{ ms}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_o &= DV_{\text{in}} \\ &= 0,25 \times 12 \text{ V} \\ &= 4 \text{ Volt}\end{aligned}$$