

BUKU AJAR
ELEKTRONIKA DAYA
(Edisi 2)



POLITEKNIK NEGERI BALI

OLEH:
Dr. Anak Agung Ngurah Gde Sapteka

POLITEKNIK NEGERI BALI
2023

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	I
DAFTAR GAMBAR.....	III
PRAKATA	IV
BAB I PENGANTAR ELEKTRONIKA DAYA.....	1
1.1 Definisi Elektronika Daya	1
1.2 Penerapan Elektronika Daya	2
BAB II DIVAIS ELEKTRONIKA DAYA.....	4
2.1 Dioda	4
2.2. SCR	4
2.2 TRIAC.....	9
2.3 DIAC	10
BAB III KONVERTER DC KE DC	11
3.1 Definisi Konverter DC ke DC	11
3.2 Konverter Buck	11
3.3 Konverter Boost	13
3.4 Konverter Buck-Boost.....	18
BAB IV INVERTER DC KE AC	21
4.1 Definisi Inverter DC ke AC	21
4.2 Half-Bridge Inverter.....	21
4.3 Full-Bridge Inverter.....	22
4.4 Single Pulse Width Modulation (Single PWM)	23
4.5 Multiple Pulse Width Modulation (Multiple PWM)	24
4.6 Bipolar Sinusoidal Pulse Width Modulation	25
4.7 Unipolar Sinusoidal Pulse Width Modulation	26

BAB V KONVERTER AC KE AC	29
5.1 Definisi Konverter AC ke AC.....	29
5.2 Perhitungan RMS	29
5.3 Perhitungan Daya AC.....	30
5.4 Single-Phase AC to AC Converter	31

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 <i>Charger</i> untuk <i>laptop</i>	1
Gambar 1.2 Elektronika daya pada sistem panel surya	2
Gambar 1.3 Turbin angin di Baron Technopark	2
Gambar 2.1 Simbol dioda dan material pembentuknya	4
Gambar 2.2 Karakteristik arus – tegangan dioda	5
Gambar 2.3 1N4148 <i>fast recovery diode</i>	5
Gambar 2.4 Dioda Schottky	6
Gambar 2.5 Simbol dan empat <i>layer</i> SCR	6
Gambar 2.6. Karakteristik arus-tegangan SCR	

PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadapan Tuhan Yang Maha Esa atas diterbitkannya buku ajar ini yang ditulis berdasarkan kajian dari beberapa buku dan jurnal yang membahas mengenai elektronika daya.

Buku yang berjudul Elektronika Daya ini merupakan edisi kedua yang terdiri dari 5 (lima) bab mencakup rangkaian elektronika daya yang digunakan untuk mengatur aliran energi listrik dari sumber menuju ke beban. Bab 1 berisikan pendahuluan yang menjabarkan definisi elektronika daya, jenis-jenis konverter daya dan penerapan rangkaian elektronika pada berbagai bidang. Bab 2 menjabarkan tentang komponen-komponen elektronika daya yang mencakup Dioda, SCR (*Silicon Controlled Rectifier*), DIAC, dan TRIAC. Bab 3 menjelaskan tentang konverter DC ke DC yang mencakup Konverter *Buck*, Konverter *Boost*, dan Konverter *Buck-Boost*.. Bab 4 menjabarkan tentang Inverter DC ke AC terdiri dari *half-bridge inverter*, *full-bridge inverter*, *single pulse width modulation*, *multiple pulse width modulation*, *bipolar sinusoidal pulse width modulation*, dan *unipolar sinusoidal pulse width modulation*. Bab 5 menguraikan tentang Konverter AC ke AC yang mencakup perhitungan RMS dan daya AC dan *single-phase converter*.

Penulis mengharapkan masukan dan saran yang membangun dari berbagai kalangan sehingga buku *Elektronika Daya* ini di kemudian hari dapat disusun secara lebih sempurna dan lengkap untuk menambah khazanah ilmu pengetahuan di bidang elektronika pada umumnya dan elektronika daya pada khususnya.

Denpasar, 20 Juni 2023

Anak Agung Ngurah Gde Saptaka

BAB I

PENGANTAR ELEKRONIKA DAYA

1.1 Definisi Elektronika Daya

Elektronika daya merupakan rangkaian elektronika yang mengambil daya dari sumber dan menyalurkan daya ke beban. Elektronika daya secara luas merupakan penerapan rangkaian elektronika yang mengendalikan konversi daya listrik dari suatu bentuk ke bentuk yang lainnya. Elektronika daya mencakup rangkaian catu daya, rangkaian kontrol, dan rangkaian proteksi [1-4].

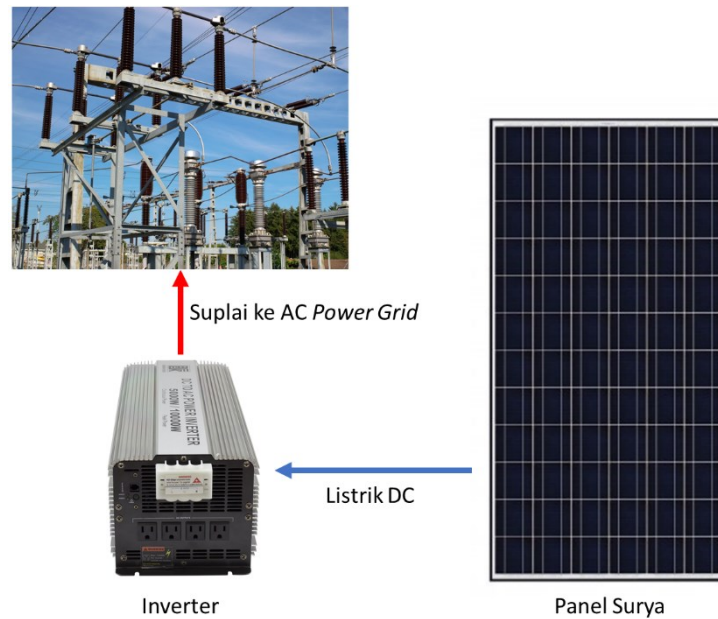
Contoh peralatan elektronika daya adalah *charger* sebuah *laptop*. *Charger* ini memanfaatkan sumber daya listrik bolak-balik (AC) untuk memberi daya kepada suatu beban yakni *battery pack* sebuah *laptop*.



Gambar 1.1. *Charger* untuk *laptop*

Contoh lain dari peralatan elektronika daya adalah inverter pada panel surya. Pada sistem ini, panel surya berfungsi sebagai penghasil energi listrik sedangkan peralatan elektronika daya berupa rangkaian inverter merupakan rangkaian elektronika daya yang mampu mengubah sinyal DC menjadi AC. Inverter ini diperlukan untuk menyalurkan daya dari panel surya ke beban AC pada grid. Contoh elektronika daya pada sistem panel surya ditunjukkan pada Gambar 1.2.

Selain pada panel surya, pada berbagai sistem sumber energi terbarukan lainnya, misalnya sistem turbin angin juga menggunakan peralatan elektronika daya untuk mengubah sumber energi angin melalui suatu motor menjadi energi listrik. Dengan rangkaian elektronika daya, saat motor berputar dihasilkan energi listrik dan dapat disalurkan ke beban pada grid. Elektronika daya terletak pada turbin dan mengalirkan energi dari turbin angin ke sistem AC grid. Dokumentasi sistem energi ternarukan dalam bentuk turbin angin di Baron Technopark ditunjukkan pada Gambar 1.3.



Gambar 1.2. Elektronika daya pada sistem panel surya



Gambar 1.3. Turbin angin di Baron Technopark

1.2 Penerapan Elektronika Daya

Elektronika daya digunakan pada berbagai bidang, seperti industri, komersial, residensial, transportasi, telekomunikasi, serta energi terbarukan. Di industri, peralatan elektronika daya digunakan pada pompa, kompresor, *blower*, *fan*, robot, pengelasan, pencahayaan, *arc furnace*, *induction furnace*, pemanasan dengan induksi, serta *industrial laser*. Penggunaan elektronika daya pada bidang komersial mencakup *heating*, *ventilating air conditioning*, *lighting*, peralatan komputer dan kantor, *uninterruptable power supply* (UPS) serta elevator. Untuk residensial, elektronika daya banyak digunakan pada *air conditioning*, *cooking*, *lighting*, kulkas dan *freezer*, serta berbagai peralatan elektronik rumah tangga. Di

bidang transportasi, peralatan elektronika daya digunakan pada lokomotif kereta listrik, mobil listrik sepeda motor listrik, battery charger dan berbagai peralatan automotive electronics untuk pengendalian mesin. Pada bidang telekomunikasi, UPS dan battery charger merupakan contoh penerapannya. Untuk penggunaan pada bidang energi terbarukan, peralatan elektronika daya digunakan pada sistem panel surya, wind turbine maupun hybrid power plant.

Keuntungan penggunaan elektronika yakni: Efisiensi tinggi karena rendahnya losses dalam perangkat elektronika daya; Keandalan sistem elektronik yang tinggi; Umur panjang dan tidak banyak memerlukan perawatan karena tidak adanya bagian yang bergerak; Respon dinamis yang cepat dibandingkan dengan sistem elektromekanik; Ukuran kecil dan ringan yang menyebabkan biaya instalasi menjadi lebih rendah; Produksi massal perangkat semikonduktor daya yang dapat menghasilkan harga peralatan yang lebih rendah.

Daftar Pustaka

- [1] M. Rashid, "Power Electronics Handbook", Second Edition, United Kingdom: Academic Press, 2006.
- [2] R. W. Erickson dan D. Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics", Second Edition, United States of America: Springer, 2001.
- [3] P. T. Krein, "Elements of Power Electronics", New York: Oxford University Press, 2015.
- [4] N. Mohan, "Power Electronics: A First Course", United States of America: John Wiley and Sons, 2012.

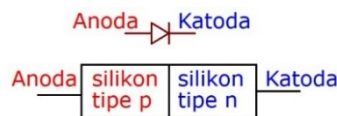
BAB II

DIVAIS ELEKTRONIKA DAYA

Bab ini akan menjelaskan beberapa divais elektronika daya mencakup Dioda, SCR, TRIAC, DIAC dan UJT. Pada masing-masing sub bab akan disampaikan penjelasan singkat mengenai cara kerja, simbol, karakteristik dan pemberian prategangan untuk karakterisasi.

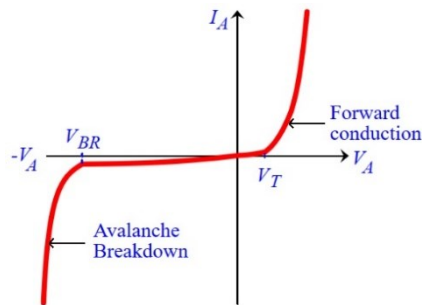
2.1 Dioda

Dioda merupakan komponen elektronika yang paling mendasar. Ada beberapa jenis dioda dengan karakteristik dan aplikasi berbeda seperti dioda zener, dioda pemancar cahaya, dioda schottky dan lain-lain. Dioda adalah komponen dengan dua elektroda (anoda dan katoda) yang bertindak sebagai konduktor dalam satu arah. Material dasar pembentuk dioda adalah silikon tipe p dan tipe n. Simbol dioda ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Simbol dioda dan material pembentuknya

Gambar 2.2 menunjukkan kurva arus-tegangan (I-V) dioda pada kondisi prategangan maju dan balik. Ketika prategangan maju meningkat, sejumlah elektron mengalir dari tipe n ke wilayah tipe p, sehingga meningkatkan nilai arus. Ketika tegangan (V_A) meningkat di atas ambang tegangan (sekitar 0,7 Volt untuk dioda silikon, V_T), ada kenaikan mendadak dalam besarnya arus (I_A). Prategangan maju merupakan keadaan dimana terminal positif dari *battery* terhubung ke material tipe *p*, sedangkan terminal negatif terhubung ke material tipe *n*. Prategangan maju dapat menghasilkan arus besar (*forward conduction*) karena terminal negatif *battery* menolak elektron bebas di daerah anoda menuju katoda. Sedangkan prategangan balik merupakan keadaan dimana daerah tipe *p* dihubungkan ke terminal negatif dari *battery* dan daerah tipe *n* dihubungkan ke terminal positif. Jika dioda mengalami prategangan balik, maka tegangan pada katoda relatif lebih tinggi daripada anoda ($-V_A$). Oleh karena itu, arus yang sangat sedikit akan mengalir sampai dioda rusak (*avalanche breakdown*) pada tegangan V_{BR} .



Gambar 2.2. Karakteristik arus – tegangan dioda

Selain tegangan ambang dan tegangan *breakdown*, perlu juga diperhatikan parameter *recovery time*, yakni waktu yang diperlukan untuk berpindah dari arus nol menuju mode konduksi pada kondisi prategangan maju. Berdasarkan *recovery time*, dioda daya (power diode) dikelompokkan sebagai berikut: General Purpose Diode, Fast Recovery Diode dan Schottky Diode.

General Purpose Diode memiliki waktu *recovery time* yang tinggi di kisaran 25 μ s. Nilai arus dioda dari 1 A hingga beberapa ribu Ampere. Level tegangannya dari 50 V hingga 5 kV. Beberapa aplikasi dari General Purpose Diode adalah sirkuit pengisian battery, *uninterruptable power supply* (UPS), traksi listrik, dan lainnya.

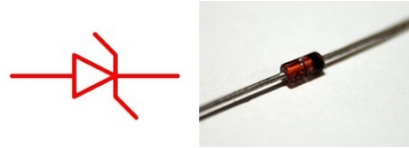
Fast Recovery Diode, sesuai dengan namanya, memiliki waktu pemulihan terbalik yang sangat rendah, kurang dari 5 μ s. Dioda ini terutama digunakan dalam rangkaian *switching* seperti rangkaian chopper, *switching power supply mode*, dan lainnya. Nilai arus yang mampu dilalui oleh dioda ini dari 1A ke beberapa ribu Ampere. Level tegangannya tegangan dari 50 V hingga 3 kV. Salah satu Fast Recovery Diode adalah diode 1N4148 seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. 1N4148 *fast recovery diode*

Schottky Diode digunakan dalam rangkaian *switching* frekuensi tinggi seperti *Switching Mode Power Supply* (SMPS). Pada persambungan p-n dioda ini digunakan bahan logam (bukan bahan semikonduktor). Dioda Schottky memiliki *recovery time* yang sangat cepat dan penurunan tegangan maju yang rendah. Kelemahan dari dioda Schottky adalah dioda ini memiliki level tegangan rendah

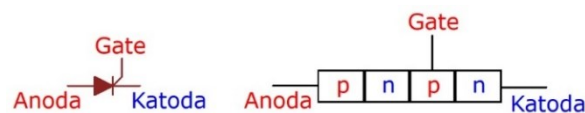
(sekitar 100 V) dan peringkat arus (hingga 300 A). Simbol dan fisik Dioda Schottky ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Dioda Schottky

2.2 SCR

SCR adalah perangkat semikonduktor 4 (empat) layer, yaitu *layer* p-n-p-n seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5 dan memiliki 3 (tiga) terminal. Terminal pertama terhubung ke lapisan p yang disebut anoda. Terminal kedua terhubung ke lapisan n yang disebut katoda. Terminal ketiga terhubung ke lapisan p yang disebut *gate*. SCR juga merupakan penyearah seperti dioda dengan tiga mode kerja, yaitu mode *reverse blocking*, mode *forward blocking* dan mode *forward conduction*.



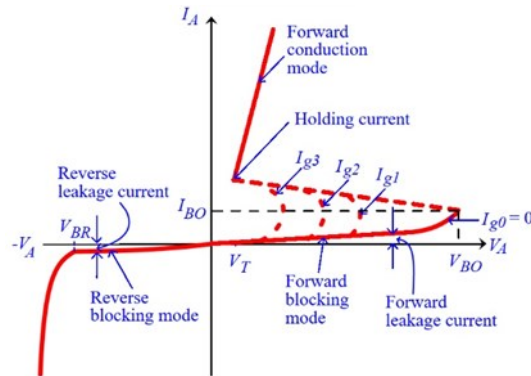
Gambar 2.5. Simbol dan empat *layer* SCR

Pada mode *reverse blocking*, prategangan balik diberikan dengan menghubungkan anoda ke terminal negatif dan katoda ke terminal positif dari sumber tegangan. Hal ini membuat persambungan p-n kesatu dan ketiga dalam kondisi prategangan balik, sedangkan persambungan p-n kedua dalam kondisi prategangan maju. Karakteristik arus-tegangan (I-V) dari mode reverse blocking ditampilkan pada Gambar 2.5. Meningkatkan tegangan akan menghasilkan arus kecil tetapi setelah tegangan balik lebih besar dari tegangan tembus (VBR), arus akan merusak perangkat.

Pada mode *forward blocking*, prategangan maju diberikan dengan menghubungkan anoda ke terminal positif dan katoda ke terminal pasokan negatif dari suplai tegangan. Hal ini membuat persambungan p-n kesatu dan ketiga dalam kondisi prategangan maju, sementara persambungan p-n kedua dalam kondisi prategangan terbalik. Karakteristik arus-tegangan dari mode forward blocking ini ditampilkan pada Gambar 2.6 yang menunjukkan peningkatan tegangan akan menghasilkan arus kecil.

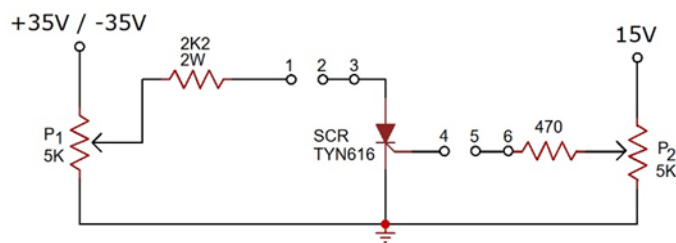
Pada mode *forward conduction*, prategangan maju disediakan dengan cara yang sama seperti mode *forward blocking* tetapi *gate* terhubung ke terminal positif untuk membuat persambungan p-n kedua dalam kondisi prategangan maju. Karakteristik arus-tegangan (I-V) dari mode *forward conduction* ditunjukkan pada Gambar 2.6. Peningkatan kecil pada tegangan akan menghasilkan peningkatan arus

yang besar. Arus gate (I_g) mempengaruhi karakteristik I-V. Pada Gambar 2.6 ditunjukkan kondisi pada $I_{g3} > I_{g2} > I_{g1} > I_{g0}$.



Gambar 2.6. Karakteristik arus-tegangan SCR

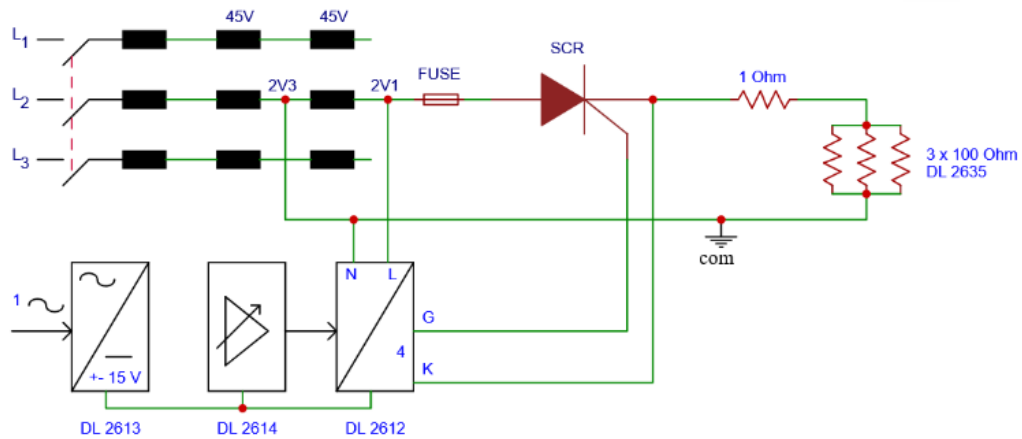
Rangkaian pada Gambar 2.7 digunakan untuk melakukan karakterisasi SCR. Salah satu SCR yang dapat digunakan adalah SCR TYN616. Pada titik 3 dan *ground* dipasang voltmeter untuk mengukur V_{AK} . Pada titik 6 and *ground* juga dipasang voltmeter untuk mengukur tegangan gate V_G . Titik 1 dan titik 2 dipasang ammeter untuk mengukur I_{AK} . Untuk mengukur I_G , hubungkan titik 4 dan 5 dengan ammeter. Putar penuh kedua potensiometer P1 dan P2 ke arah berlawanan dengan jarum jam. Hidupkan sumber tegangan, lalu gunakan potensiometer P2 untuk mengatur I_G untuk mengecilkan arus yang mengalir. Selanjutnya gunakan potensiometer untuk menaikkan V_{AK} secara bertahap. Ulangi prosedur di atas dengan nilai I_G yang lebih besar hingga dapat SCR dapat dipicu. Hasil karakterisasi ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.7. Rangkaian karakterisasi SCR

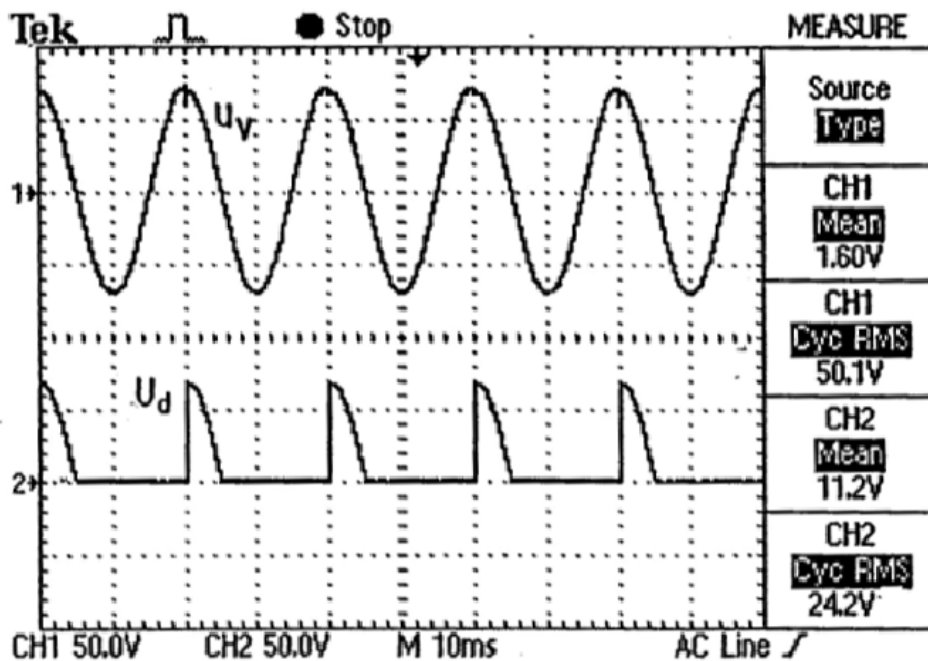
Pada Gambar 2.8 ditunjukkan rangkaian SCR konverter single-pulse dengan beban resistif. Rangkaian ini dapat disusun dengan Modul De Lorenzo dengan peralatan berupa DL 2604 SCR, DL 2613 DC Power Supply, DL 2614 Voltage reference unit, DL 2616 Two pulse control unit, DL 2626 Mains transformer, DL

2628 Super-fast fuses (3×6.3 A), DL 2635 Universal load, dan DL 2643 Socket with shunt 1Ω.



Gambar 2.8 Konverter Single-Pulse Dengan Beban Resistif

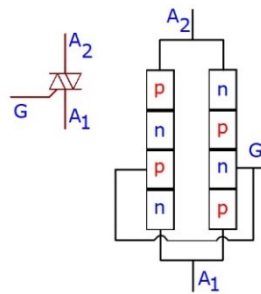
Pada saat setengah gelombang positif, arus dapat mengalir setelah SCR memperoleh pulsa dari DL 2612. Arus ini mengalir menuju R 1Ω dan lanjut ke DL 2635 Universal load. Sedangkan saat setengah gelombang negatif, arus tidak dapat mengalir ke beban. Waktu pemberian pulsa dapat diatur melalui DL 2614 Voltage reference unit. Dengan demikian arus dapat mengalir mulai dari 0° hingga 180°. Adapun bentuk sinyal dari konverter konverter single-pulse dengan beban resistif ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Sinyal pada CH1 dan CH2

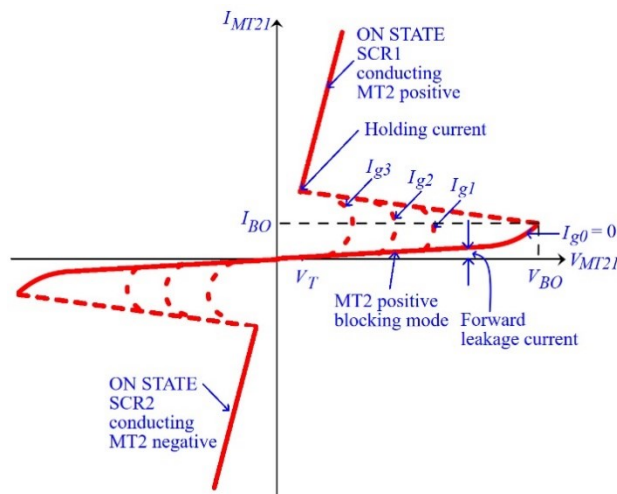
2.3 TRIAC

TRIAC, singkatan dari triode for alternating current, untuk komponen elektronik tiga terminal yang menyalurkan arus di kedua arah saat dipicu. Nama resminya adalah bidirectional triode thyristor atau triode thyristor bilateral. TRIAC merupakan suatu thyristor analog dengan relai dalam tegangan dan arus kecil yang dapat mengontrol tegangan dan arus yang jauh lebih besar. Gambar 2.10 menunjukkan simbol sirkuit untuk TRIAC dengan A1 adalah Anoda 1, A2 adalah Anoda 2, dan G adalah Gate. Anoda 1 dan Anode 2 biasanya disebut *Main Terminal 1* (MT1) dan *Main Terminal 2* (MT2).



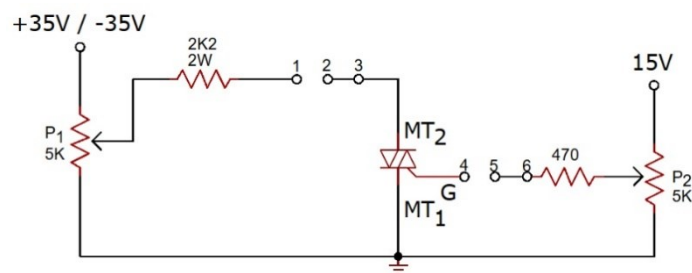
Gambar 2.10. Simbol TRIAC

TRIAC adalah bagian dari thyristor dan terkait dengan SCR, namun dengan perbedaan yang memungkinkan aliran arus di kedua arah, sedangkan SCR hanya dapat melakukan arus dalam satu arah. Kebanyakan TRIAC dapat dipicu dengan menerapkan tegangan positif atau negatif ke gerbang (SCR hanya membutuhkan tegangan positif). Setelah dipicu, SCR dan TRIAC terus menghantarkan arus, bahkan jika arus *gate* berhenti, sampai arus utama turun di bawah tingkat tertentu yang disebut *holding current*. Karakteristik TRIAC ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Karakteristik TRIAC

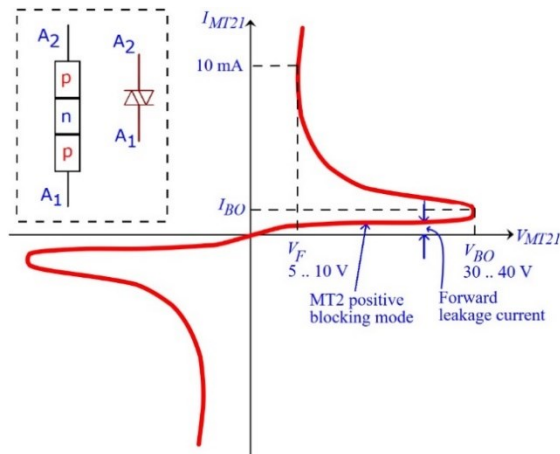
BT136 merupakan komponen TRIAC yang umum digunakan untuk switching dua arah dan kontrol fasa. Untuk memperoleh karakteristik arus dan tegangan dari BT136 diperlukan rangkaian sesuai dengan Gambar 2.10. Pada titik 3 dan ground dipasang voltmeter untuk mengukur tegangan VMT2. Pada titik 6 dan ground juga dipasang voltmeter untuk mengukur tegangan VG. Pada titik 1 dan 2 dipasang ammeter untuk mengukur arus IMT2, sedangkan pada titik 4 dan 5 juga dipasang ammeter untuk mengukur arus IG. Putar penuh kedua potensiometer P1 dan P2 ke arah berlawanan dengan jarum jam. Hidupkan sumber tegangan lalu atur potensiometer P2 agar IG mencapai nilai terendah. Selanjutnya tegangan VMT2 dinaikkan secara gradual dengan mengatur potensiometer P1. Ulangi prosedur ini untuk rangkaian pada Gambar 2.10 dengan arus gate yang lebih tinggi untuk memicu TRIAC hingga diperoleh karakteristik arus-tegangan TRIAC seperti pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12. Rangkaian karakterisasi TRIAC

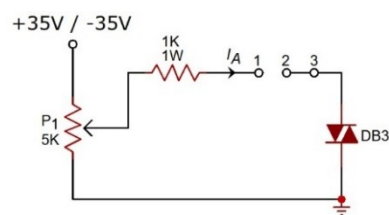
2.4 DIAC

DIAC merupakan akronim dari dioda untuk arus bolak-balik. Karena DIAC adalah perangkat dua arah, terminalnya tidak diberi label sebagai anoda dan katoda tetapi sebagai A1 dan A2 atau terminal utama MT1 dan MT2. DIAC umumnya dibuat dengan struktur 3 (tiga) *layer*, yakni *layer p-n-p* atau *layer n-p-n*. Untuk DIAC dengan *layer p-n-p*, saat MT2 lebih positif daripada MT1, maka persambungan *p-n* memperoleh prategangan maju, sedangkan persambungan *n-p* memperoleh prategangan balik. Sesaat setelah diberi suplai tegangan pada terminalnya, dioda menyalurkan arus kecil. Saat persambungan *n-p* mencapai V_{BO} , maka seluruh struktur DIAC akan memasuki mode konduksi dengan mengalurkan arus dan MT1 ke MT2. Setelah suplai tegangan mencapai V_{BO} , sekitar 30 V hingga 40 V, maka DIAC dapat menghantar arus dan mengalami *negative resistance*, yakni, suatu keadaan dimana arus bertambah besar dengan berkurangnya tegangan. Kemudian DIAC akan menghantar arus yang bertambah dengan cepat setelah mencapai V_F . DIAC juga disebut "dioda pemacu simetris" karena memiliki kurva karakteristik yang simetris dan tidak memiliki elektroda *gate* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13. Simbol, struktur dan karakteristik arus-tegangan DIAC

DB3 merupakan DIAC yang tersedia di pasaran. Untuk mempelajari karakteristik DB3 DIAC, perlu disusun rangkaian sesuai dengan Gambar 2.12. Pada titik 3 dan ground dihubungkan dengan voltmeter, sedangkan pada titik 1 dan titik 2 dipasang ammeter. Selanjutnya putar penuh potensiometer P1 ke arah berlawanan jarum jam. Hubungkan rangkaian ke sumber tegangan +35 Volt. Atur potensiometer P1 untuk menaikkan tegangan DIAC V_A dan ukur arus I_A . Tegangan V_A dan arus I_A selanjutnya dicatat dan diperoleh grafik seperti pada Gambar 2.12. Selanjutnya putar potentiometer P1 searah jarum jam. Matikan sumber tegangan dan atur ke tegangan -35 Volt. Hidupkan sumber tegangan -35 Volt, lalu atur potensiometer P1 untuk menaikkan tegangan DIAC V_A and ukur arus I_A sehingga diperoleh hasil karakteristik seperti pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Rangkaian karakterisasi DIAC

Daftar Pustaka

- [1] M. Rashid, "Power Electronics Handbook", Second Edition, United Kingdom: Academic Press, 2006.
- [2] R. W. Erickson dan D. Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics", Second Edition, United States of America: Springer, 2001.
- [3] P. T. Krein, "Elements of Power Electronics", New York: Oxford University Press, 2015.
- [4] N. Mohan, "Power Electronics: A First Course", United States of America: John Wiley and Sons, 2012.

BAB III

KONVERTER DC KE DC

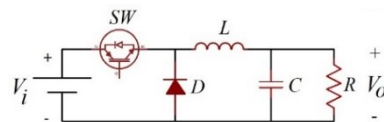
3.1 Definisi Konverter DC ke DC

Konverter DC ke DC adalah rangkaian elektronik atau perangkat elektromekanik yang mengubah sumber arus searah (DC) dari satu tingkat tegangan ke tingkat tegangan lainnya. Ini adalah jenis konverter daya listrik. Tingkat daya berkisar dari sangat rendah (baterai kecil) hingga sangat tinggi (transmisi daya tegangan tinggi). Konverter DC ke DC digunakan dalam perangkat elektronik portabel seperti telepon seluler dan komputer laptop, yang dipasok dengan daya dari *battery*. Perangkat elektronik semacam ini mengandung beberapa sub-sirkuit, masing-masing dengan tingkat tegangannya sendiri, berbeda dari yang disediakan oleh *battery* atau suplai eksternal (tegangan beban lebih tinggi atau lebih rendah dari tegangan suplai). Beberapa konverter DC ke DC seperti: Konverter Buck, Konverter Boost, dan Konverter Buck-Boost.

3.2 Konverter Buck

Konverter *Buck* (*step-down converter*) adalah konverter daya DC ke DC yang menurunkan tegangan (sambil meningkatkan arus) dari input (sumber) ke output (beban). Konverter ini merupakan *switching-mode power supply* (SMPS) yang biasanya mengandung setidaknya dua semikonduktor (dioda dan transistor, meskipun konverter *Buck* modern sering mengganti dioda dengan transistor kedua yang digunakan untuk penyearahan sinkron) dan setidaknya satu elemen penyimpanan energi, sebuah kapasitor, induktor, atau kombinasi keduanya. Untuk mengurangi riak tegangan, filter yang terbuat dari kapasitor (atau kombinasi dengan induktor) biasanya ditambahkan ke output konverter (filter sisi beban) dan input (filter sisi sumber).

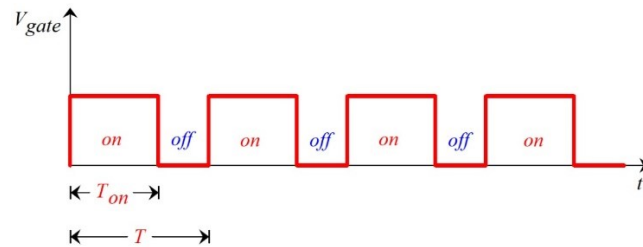
Sirkuit Konverter *Buck* memiliki tegangan input V_i DC dan memiliki tegangan output V_o DC ditunjukkan pada Gambar 3.1. Jadi fungsi dari Konverter *Buck* pada dasarnya adalah untuk menghasilkan tegangan output yang lebih rendah daripada tegangan input.



Gambar 3.1. Konverter *Buck*

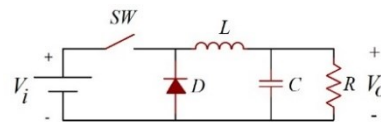
Sirkuit ini memiliki beberapa komponen. Komponen pertama adalah transistor sakelar menggunakan IGBT (*insulated-gate bipolar transistor*). Pemicu IGBT berada dihasilkan oleh rangkaian pemicu yang dihubungkan ke *gate*. Komponen kedua dari rangkaian adalah induktor. Penggunaan induktor ditujukan untuk menghaluskan arus. Selanjutnya pada beban rangkaian konverter, terdapat

kapasitor dan resistor yang menarik arus dari rangkaian. Dioda digunakan untuk menjamin arus dapat mengalir secara kontinu dengan mengendalikan siklus sakelar transistor IGBT. Ketika tegangan *gate* mencapai, misalnya 10 Volt, kemudian transistor sakelar menjadi tertutup dan jika mencapai 0 Volt, transistor sakelar menjadi terbuka. Hal ini dilakukan dengan mengirimkan tegangan persegi ke *gate* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2.



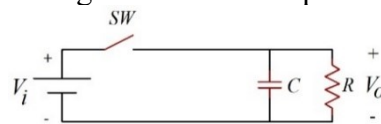
Gambar 3.2. Tegangan *gate* pada transistor IGBT

Duty Cycle (D) pada dasarnya adalah rasio waktu *on* selama waktu total sakelar. Jadi waktu *on* (T_{on}) adalah D dikali periode waktu sakelar (T). Untuk menyederhanakan penjelasannya, transistor IGBT diganti menggunakan sakelar (SW) seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3.



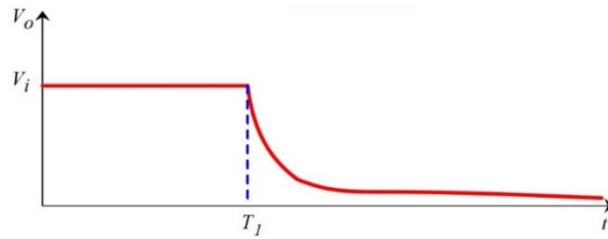
Gambar 3.3. Penyederhanaan rangkaian konverter *Buck*

Untuk menganalisis beban yang terdiri dari rangkaian RC , induktor dan dioda dihilangkan. Jadi rangkaian beban tampak seperti Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Rangkaian beban RC

Ketika sakelar (SW) tertutup, arus akan mengalir ke beban, maka V_o akan sama dengan V_i . Ketika SW terbuka, kapasitor akan mulai mengeluarkan arus dan memasok resistor. Kemudian tegangan kapasitor akan meluruh secara eksponensial seperti ditunjukkan pada Gambar 3.5.

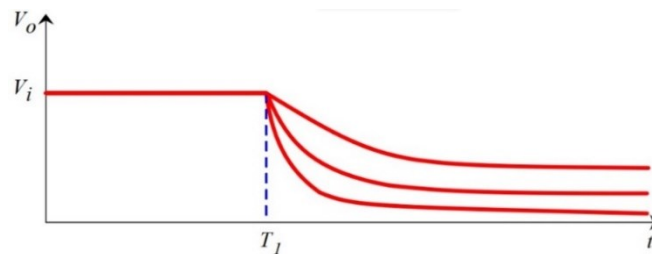


Gambar 3.5. Peluruhan eksponensial tegangan kapasitor

Adapun Persamaan (3.1) berikut merupakan persamaan tegangan output (V_o)

$$V_o = V_i e^{-\frac{t-T_1}{RC}} \quad (3.1)$$

Peningkatan nilai kapasitor (C) akan meningkatkan konstanta waktu rangkaian RC . Jadi peluruhan tegangan kapasitor akan membutuhkan waktu yang lebih lama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6.



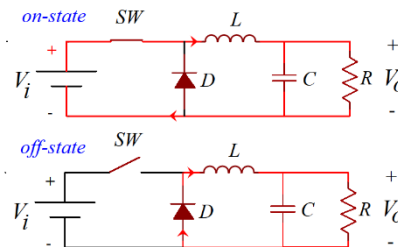
Gambar 3.6. Efek konstanta waktu rangkaian RC

Keuntungan menggunakan frekuensi yang sangat tinggi untuk memicu sakelar transistor menjadi *on* dan *off* adalah tidak diperlukan kapasitor yang besar. Tegangan tidak akan turun secara dramatis dengan kapasitor kecil. Ketika *gate* beralih dalam frekuensi yang sangat tinggi, akan menghasilkan tegangan output dengan riak kecil karena pengosongan maupun pengisian kapasitor.

Ketika transistor sakelar menutup, arus akan melonjak untuk mengisi kapasitor lagi. Lonjakan akan terjadi setiap kali transistor sakelar ditutup. Oleh karena itu, rangkaian ini memiliki beberapa kelemahan. Ini tidak dapat mengontrol tegangan output di sekitar tegangan input karena riak dan juga memiliki arus lonjakan. Salah satu cara umum untuk mengatasi masalah ini adalah dengan menambahkan induktor antara transistor sakelar dan beban RC . Induktor akan menghaluskan arus karena induktor akan bertindak sebagai penyimpan energi. ketika transistor sakelar menutup, induktor akan menyerap energi dari suplai, tetapi ketika transistor sakelar terbuka, induktor akan memasok kapasitor yang menyimpan energi. Jadi induktor akan bertindak sebagai *buffer* yang akan menyerap perbedaan tegangan antara V_i dan V_o . Hal ini akan menghasilkan arus yang *smooth*.

Induktor harus memiliki jalur arus yang mengalir melaluinya. Jadi ketika transistor sakelar terbuka, induktor harus memiliki jalur. Satu-satunya cara untuk melakukannya adalah dengan menggunakan dioda. Ini akan menjamin arus akan mengalir melalui induktor ketika transistor sakelar terbuka.

Konverter *Buck* beroperasi dalam mode *continues* jika arus melalui induktor tidak pernah jatuh ke nol selama siklus kerja. Prinsip operasi dalam mode ini dijelaskan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7. *On-state*, saat sakelar tertutup, dan *Off-state*, saat sakelar terbuka

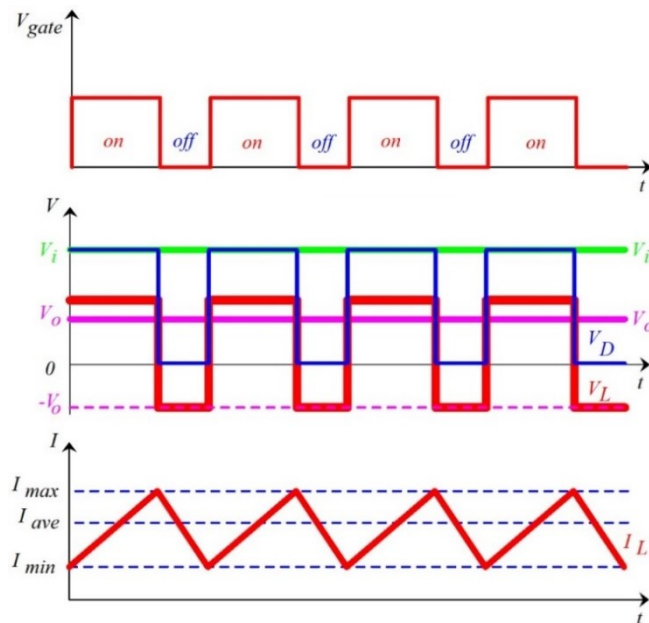
Ketika sakelar tertutup, tegangan di induktor adalah $V_L = V_i - V_o$. Arus yang melalui induktor naik secara linier (dengan asumsi, jatuh tegangan hampir konstan).

Ketika dioda mengalami prategangan balik oleh sumber tegangan V_i , tidak ada arus yang mengalir melewatinya. Ketika sakelar dibuka (Gambar *off-state*), dioda mengalami prategangan maju. Tegangan di induktor adalah $V_L = -V_o$. (mengabaikan penurunan dioda) dan arus induktor menurun.

Tegangan output konverter bervariasi secara linier dengan *Duty Cycle* (D) untuk tegangan input yang diberikan. Karena D sama dengan rasio antara T_{on} dan periode T , maka nilai D tidak boleh lebih dari 1. Persamaan *Duty Cycle* ditunjukkan pada Persamaan (3.2). Oleh karena itu, $V_o \leq V_i$.

$$D = \frac{V_o}{V_i} \quad (3.2)$$

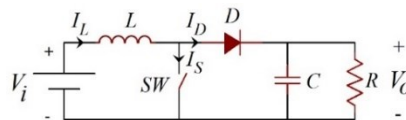
Sebagai contoh, untuk menurunkan tegangan dari 12 Volt ke 3 Volt (tegangan output sama dengan seperempat dari tegangan input) akan membutuhkan siklus 25%, dalam rangkaian ideal teoritis. Evolusi tegangan dan arus dengan waktu dalam konverter *Buck* ideal ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8. Perubahan tegangan dan arus pada mode *continues* suatu konverter *Buck*

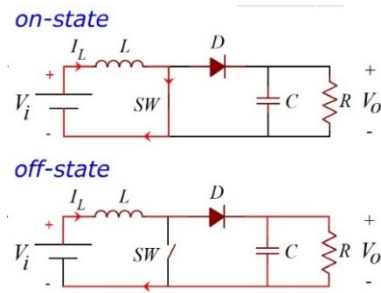
3.3 Konverter Boost

Konverter *Boost* (*step-up converter*) adalah konverter daya DC ke DC yang meningkatkan tegangan (dengan menurunkan arus) dari input (suplei) ke output (beban). Konverter ini adalah termasuk *switched-mode power supply* (SMPS) terdiri dari minimal dua semikonduktor (dioda dan transistor) dan minimal satu elemen penyimpanan energi: kapasitor, induktor, atau dalam kombinasi keduanya. Untuk mengurangi riak tegangan, *filter* yang terbuat dari kapasitor (dalam kombinasi dengan induktor) biasanya ditambahkan ke output konverter (filter sisi beban) dan input (filter sisi suplai). Rangkaian konverter *Boost* dipaparkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9. Rangkaian Konverter *Boost*

Prinsip utama konverter *Boost* adalah kecenderungan induktor untuk menahan perubahan arus dengan menciptakan dan menghancurkan medan magnet. Pada konverter *Boost*, tegangan output selalu lebih tinggi daripada tegangan input. Prinsip kerja konverter *Boost* ditunjukkan pada Gambar 3.10.

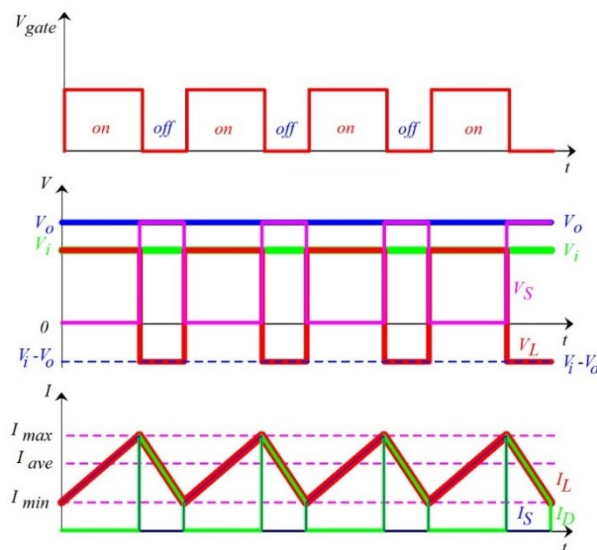


Gambar 3.10. Jalur arus konverter *Boost* pada saat *on-state* dan *off-state*

Ketika sakelar ditutup, arus mengalir melalui induktor searah jarum jam dan induktor menyimpan sejumlah energi dengan menghasilkan medan magnet. Polaritas sisi kiri induktor bernilai positif. Ketika saklar dibuka, arus akan berkurang karena impedansi lebih tinggi. Medan magnet yang dibuat sebelumnya akan dihancurkan untuk mempertahankan arus ke arah beban. Dengan demikian polaritas akan terbalik (kiri induktor akan bernilai negatif). Akibatnya, dua sumber akan menjadi seri menyebabkan tegangan yang lebih tinggi untuk mengisi kapasitor melalui dioda. Untuk mode *continues*, persamaan *Duty Cycle* (D) ditunjukkan pada Persamaan (3.3).

$$D = 1 - \frac{V_o}{V_i} \quad (3.3)$$

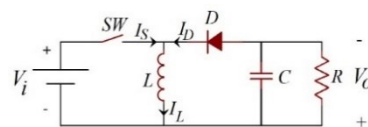
Ketika konverter *Boost* beroperasi dalam mode *continues*, arus yang melalui induktor (I_L) tidak pernah jatuh ke nol. Bentuk gelombang arus dan tegangan dalam konverter yang beroperasi dalam mode ini ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11. Bentuk gelombang arus dan tegangan konverter *Boost* dalam mode *continues*

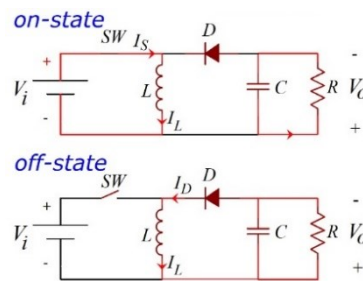
3.4 Konverter Buck-Boost

Konverter *Buck-Boost* memiliki tiga komponen terdiri dari sakelar aktif menggunakan IGBT, dioda sebagai sakelar pasif dan induktor. Konverter *Buck-Boost* dapat menurunkan tegangan dan juga meningkatkan tegangan, relatif terhadap tegangan input. Struktur dasar konverter *Buck-Boost* ditunjukkan pada Gambar 3.12. Pada rangkaian ini, dioda diposisikan dalam arah yang berlawanan dan ini berarti bahwa tegangan output akan memiliki polaritas terbalik dari polaritas tegangan input.



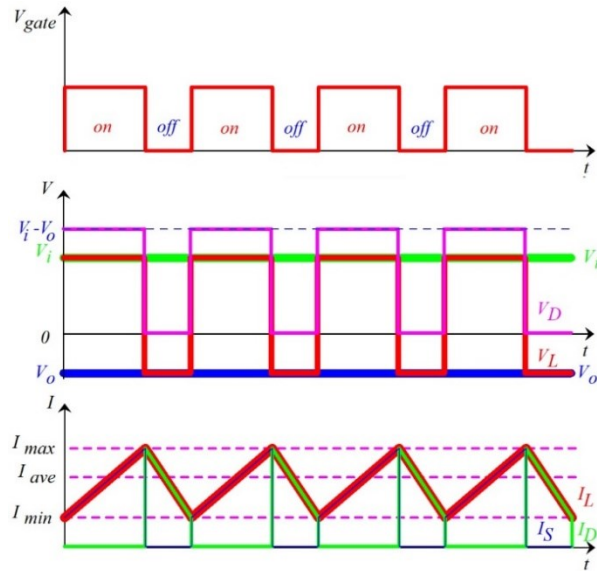
Gambar 3.12. Rangkaian konverter *Buck-Boost*

Karena transistor sakelar bekerja dalam kondisi *on* dan *off* secara terus-menerus, rangkaian akan beralih pada kondisi *on-state* dan *off-state* secara terus-menerus seperti ditunjukkan pada Gambar 4.13. Ketika transistor sakelar berada pada kondisi menutup, arus akan mengalir ke induktor karena dioda mengalami prategangan balik. Arus akan mengalir keluar dari kapasitor ke resistor. Dalam keadaan stabil, tegangan kapasitor rata-rata akan menjadi konstan. Jadi, polaritas pada resistor di sisi atas akan negatif dan di sisi bawah akan positif. Kondisi ini akan membuat dioda memiliki polaritas negatif pada katoda dan polaritas positif pada anoda. Ketika transistor sakelar berada pada kondisi membuka, arus tidak akan mengalir dari suplai, tetapi arus akan mengalir dari induktor melalui kapasitor dan resistor, serta akan mengalir melalui dioda. Kondisi ini membuat resistor di sisi atas akan negatif dan di sisi bawah akan positif.



Gambar 3.13. Jalur arus konverter *Buck-Boost* saat *on-state* dan *off-state*

Bentuk gelombang arus dan tegangan dalam konverter *Buck-Boost* yang beroperasi dalam mode *continues* ditunjukkan pada Gambar 3.14.



Gambar 3.14. Bentuk gelombang arus dan tegangan pada konverter *Buck-Boost* dalam mode *continues*

Ketika transistor sakelar pada kondisi tertutup di antara nol dan T_{on} , arus induktor meningkat dengan laju V_i / L . Ketika transistor saklar terbuka, arus induktor menurun dengan laju $-V_o/L$. Persamaan (3.4) hingga (3.7) digunakan untuk menghitung nilai arus dan tegangan pada konverter ini.

$$\Delta i_L = 0 = \frac{V_i}{L} DT + \frac{-V_o}{L} (1 - D)T \quad (3.4)$$

$$V_o(1 - D) = V_i - D \quad (3.5)$$

$$V_i = V_o \frac{1 - D}{D} \quad (3.6)$$

$$V_o = V_i \frac{D}{1 - D} \quad (3.7)$$

Daftar Pustaka

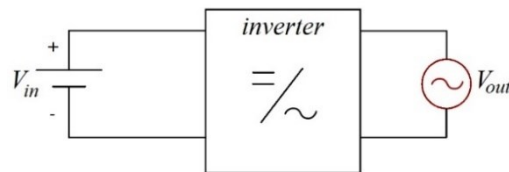
- [1] M. Rashid, "Power Electronics Handbook", Second Edition, United Kingdom: Academic Press, 2006.
- [2] R. W. Erickson dan D. Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics", Second Edition, United States of America : Springer, 2001.
- [3] P. T. Krein, "Elements of Power Electronics", New York: Oxford University Press, 2015.

- [4] N. Mohan, "Power Electronics: A First Course", United States of America: John Wiley and Sons, 2012.
- [5] R. D. Middlebrook dan S. Čuk, "A General Unified Approach to Modelling Switching Converter Power Stages", Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialist Conference , 1976.

BAB IV INVERTER DC KE AC

4.1 Definisi Inverter DC ke AC

Inverter merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah sinyal DC pada sisi sumber menjadi sinyal AC pada sisi beban. Sumber energi DC disini dapat berupa *battery* atau panel surya atau bentuk sumber energi lainnya. Sedangkan beban AC dapat berupa motor sinkron, lampu AC dan lainnya. *Battery* pada sisi sumber memiliki polaritas positif dan negatif yang perlu diubah menjadi polaritas bolak-balik pada sisi beban. Dengan demikian diperlukan rangkaian *switching* yang mampu mengubah kondisi polaritas berupa rangkaian inverter. Konsep inverter ini ditunjukkan pada Gambar 4.1.

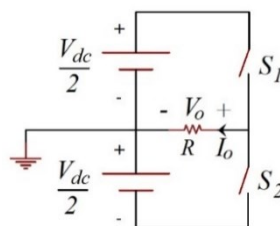


Gambar 4.1. Inverter DC ke AC

Pengubahan tegangan ini dapat dikendalikan secara eksternal maupun internal. Pengendalian secara eksternal dilakukan dengan menggunakan rangkaian penyearah AC ke DC (yakni dengan melakukan pengendalian terhadap pemicuan SCR) atau menggunakan konverter Buck (yakni dengan mengatur *duty cycle*). Pengendalian secara internal dilakukan dengan menggunakan rangkaian pulse width modulasi.

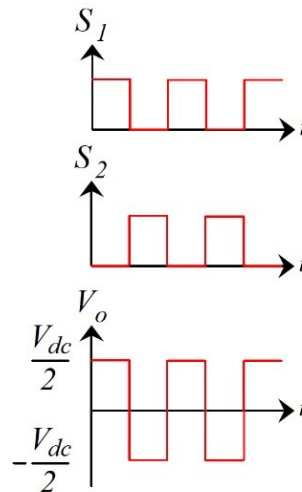
4.2 Half-Bridge Inverter

Rangkaian *half-bridge inverter* adalah sirkuit yang mengubah sumber DC menjadi AC. Rangkaian *half-bridge inverter* terdiri dari 2 (dua) sumber tegangan searah dengan besaran setengah dari V_{DC} . Posisi *ground* terletak ditengah kedua sumber tegangan searah. Posisi ini juga menyebabkan beban relatif terhadap *ground* dan bisa merasakan polaritas positif dan negatif. Rangkaian ini memerlukan 2 (dua) sakelar dengan menggunakan transistor. Rangkaian *half-bridge inverter* ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Rangkaian *half-bridge inverter*

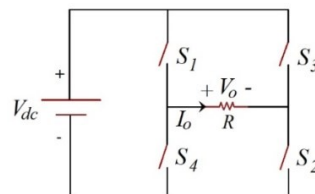
Saat S_1 dalam kondisi terbuka dan S_2 dalam kondisi tertutup, maka tegangan keluaran V_o akan sama dengan minus separuh V_{dc} . Namun saat S_1 dalam kondisi tertutup dan S_2 dalam kondisi terbuka, maka tegangan keluaran V_o akan sama dengan separuh V_{dc} . Dari kedua kondisi ini dapat digambarkan grafik tegangan keluaran sesuai dengan Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Tegangan keluaran rangkaian *half-bridge inverter*

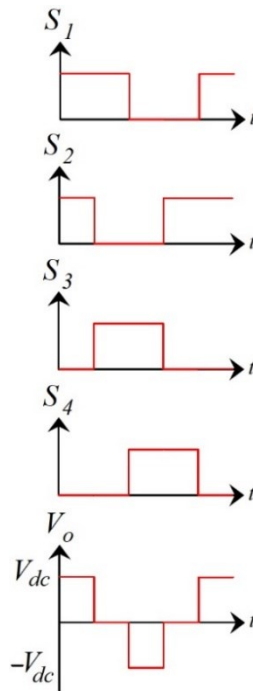
4.3 Full-Bridge Inverter

Rangkaian *full-bridge inverter* dibentuk dengan menggunakan 4 (empat) transistor sakelar untuk mengubah tegangan DC menjadi AC. Rangkaian ini memberikan tegangan penuh pada keluaran saat polaritas positif maupun negatif. Rangkaian *full-bridge inverter* ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Rangkaian *full-bridge inverter*

Pengaturan kondisi sakelar S_1 hingga S_4 untuk menghasilkan sinyal AC ditunjukkan pada Gambar 4.5.

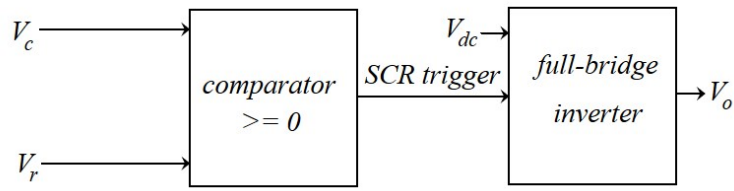


Gambar 4.5. Kondisi sakelar dan tegangan keluaran *full-bridge inverter*

Saat S_1 dan S_2 dalam kondisi tertutup serta S_3 dan S_4 dalam kondisi terbuka, maka arus mengalir melalui S_1 menuju beban dan selanjutnya kembali ke sumber DC melalui S_2 . Hal ini menyebabkan beban memperoleh tegangan penuh sebesar V_{DC} . Saat S_1 dan S_3 dalam kondisi tertutup serta S_2 dan S_4 dalam kondisi terbuka, maka tidak ada arus mengalir ke beban, sehingga tegangan keluaran sama dengan nol. Saat S_3 dan S_4 dalam kondisi tertutup serta S_1 dan S_2 dalam kondisi terbuka, maka arus mengalir melalui S_3 menuju beban dan selanjutnya kembali ke sumber DC melalui S_4 . Hal ini menyebabkan beban memperoleh tegangan penuh sebesar minus V_{DC} . Saat S_2 dan S_4 dalam kondisi tertutup serta S_3 dan S_1 dalam kondisi terbuka, maka tidak ada arus mengalir ke beban, sehingga tegangan keluaran sama dengan nol. Demikian seterusnya hingga diperoleh sinyal AC pada sisi beban.

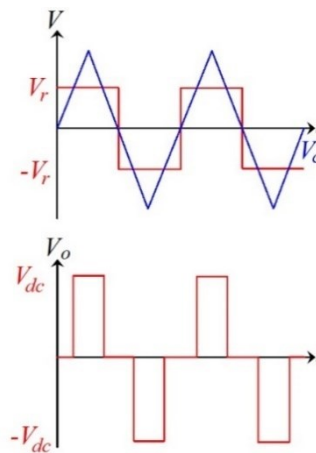
4.4 Single Pulse Width Modulation (Single PWM)

Single PWM merupakan rangkaian yang mampu mengubah sinyal masukan DC menjadi AC dengan memodulasi lebar pulsa tunggal yang dihasilkan oleh *comparator* terhadap sinyal *carrier*, V_c , dan sinyal *reference*, V_r . Sinyal V_r diberikan dalam bentuk *square wave*, sedangkan sinyal V_c diberikan dalam bentuk *saw-tooth wave*. Hasil modulasi lebar pulsa ini digunakan untuk memicu empat transistor sakelar pada rangkaian *full-bridge inverter*. Diagram balok *Single PWM* ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6. Diagram balok *single* PWM

Fungsi rangkaian *comparator* disini adalah untuk membandingkan V_c dengan V_r . Jika V_c lebih besar daripada V_r , maka *comparator* memberikan pemicuan kepada S_1 dan S_2 pada rangkaian *full-bridge inverter* untuk menghasilkan tegangan AC positif. Hal ini menyebabkan tegangan keluaran sama dengan tegangan input pada rangkaian *full-bridge inverter*. Sebaliknya, jika $-V_c$ lebih besar daripada $-V_r$, maka *comparator* memberikan pemicuan kepada S_3 dan S_4 pada rangkaian *full-bridge inverter* untuk menghasilkan tegangan AC negatif. Hal ini menyebabkan tegangan keluaran sama dengan tegangan input negatif pada rangkaian *full-bridge inverter*. Sinyal *carrier*, *reference* dan keluaran *single* PWM ditunjukkan pada Gambar 4.7.

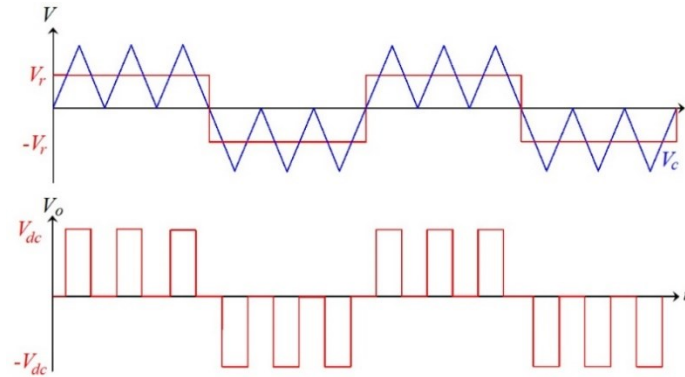


Gambar 4.7. Sinyal *single* PWM

4.5 Multiple Pulse Width Modulation (Multiple PWM)

Rangkaian *multiple* PWM pada dasarnya serupa dengan *single* PWM, yakni serupa dengan diagram balok pada Gambar 5.6, namun pada *multiple* PWM digunakan sinyal *carrier* dengan beberapa puncak gelombang pada saat pembentukan gelombang positif maupun gelombang negatif. Serupa dengan *single* PWM, fungsi rangkaian *comparator* pada rangkaian *multiple* PWM adalah untuk membandingkan sinyal *carrier*, V_c , dengan sinyal *reference*, V_r . Jika V_c lebih besar daripada V_r , maka *comparator* memberikan pemicuan kepada S_1 dan S_2 pada rangkaian *full-bridge inverter* untuk menghasilkan tegangan AC positif. Hal ini menyebabkan tegangan keluaran sama dengan tegangan input pada rangkaian *full-bridge inverter*. Sebaliknya, jika $-V_c$ lebih besar daripada $-V_r$, maka *comparator*

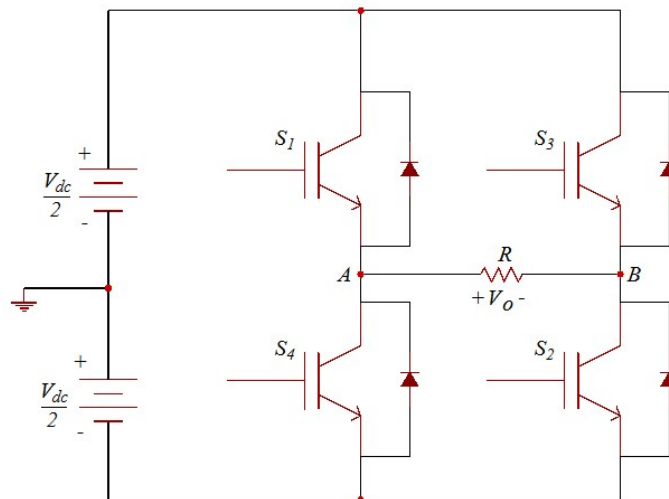
memberikan pemicuan kepada S_3 dan S_4 pada rangkaian *full-bridge inverter* untuk menghasilkan tegangan AC negatif. Hal ini menyebabkan tegangan keluaran sama dengan tegangan input negatif pada rangkaian *full-bridge inverter*. Sinyal *carrier*, *reference* dan keluaran *multiple PWM* ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8. Sinyal *multiple PWM*

4.6 Bipolar Sinusoidal Pulse Width Modulation (Bipolar Sinusoidal PWM)

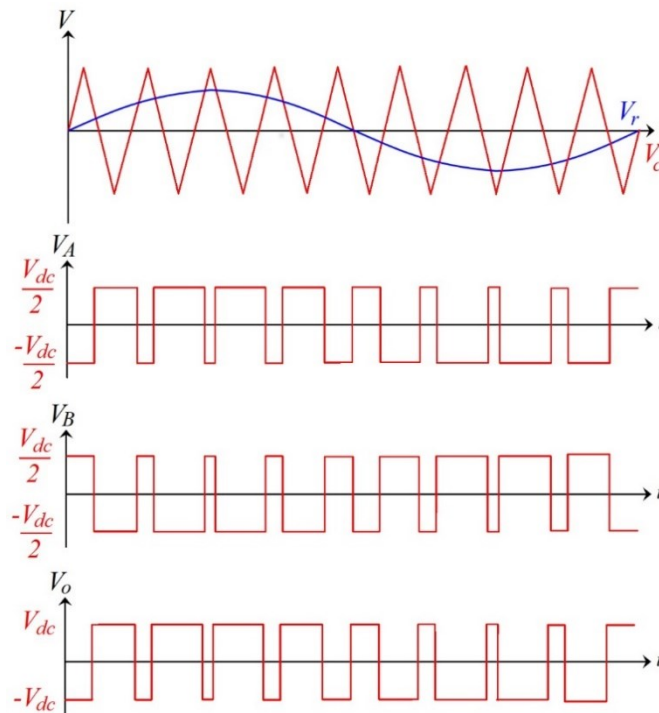
Bipolar sinusoidal PWM merupakan rangkaian yang mampu mengubah sinyal masukan DC menjadi AC dengan menggunakan *comparator* seperti pada Gambar 5.6 dan rangkaian *full-bridge* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9. Rangkaian *full-bridge* pada *bipolar sinusoidal PWM*

Rangkaian *comparator* membandingkan sinyal *carrier*, V_c , dan sinyal *reference*, V_r . Sinyal V_r diberikan dalam bentuk *sinusoidal wave*, sedangkan sinyal V_c diberikan dalam bentuk *saw-tooth wave*. Hasil perbandingan ini digunakan

untuk memicu empat transistor sakelar pada rangkaian *full-bridge inverter*. Sinyal pada rangkaian *bipolar sinusoidal PWM* ditunjukkan pada Gambar 4.10.

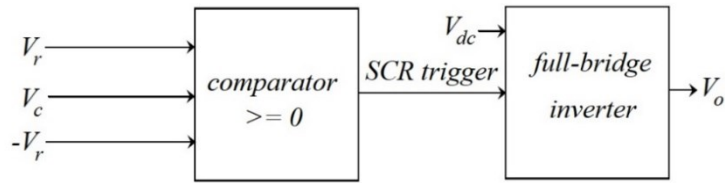


Gambar 4.10 Sinyal *bipolar sinusoidal PWM*

Comparator akan memicu S_1 dan S_2 pada saat V_r lebih besar daripada V_c . Sebaliknya, *comparator* akan memicu S_3 dan S_4 pada saat V_r lebih kecil daripada V_c . Tegangan keluaran V_o merupakan hasil pengurangan tegangan pada titik A , yakni V_A , terhadap tegangan pada titik B , yakni V_B . Dengan mengatur pemicuan pada ke empat transistor sakelar, maka diperoleh hasil sinyal *carrier, reference* dan keluaran *multiple PWM* seperti pada Gambar 4.10.

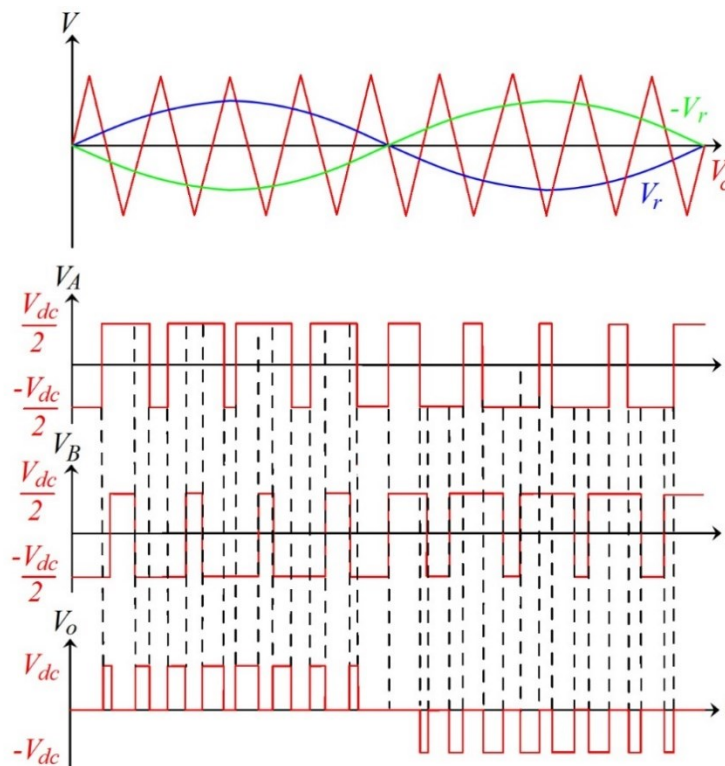
4.7 Unipolar Sinusoidal Pulse Width Modulation

Rangkaian *unipolar sinusoidal PWM* terdiri dari *comparator* dan rangkaian *full-bridge* serupa dengan rangkaian pada Gambar 4.9. Namun rangkaian *unipolar sinusoidal PWM* menggunakan 1 (satu) tegangan *carrier, Vc*, dan 2 (dua) tegangan *reference sinusoidal* yakni V_r dan $-V_r$. Diagram balok *unipolar sinusoidal PWM* ditunjukkan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11. Diagram balok *unipolar sinusoidal* PWM

Tegangan V_c , V_r dan $-V_r$ selanjutnya dibandingkan oleh *comparator* dengan skema sebagai berikut. Jika V_r lebih besar daripada V_c , maka hanya S_1 yang menghantar arus, sehingga V_A bernilai setengah dari V_{dc} . Jika V_r lebih kecil daripada V_c , maka hanya S_4 yang menghantar arus, sehingga V_A bernilai setengah dari $-V_{dc}$. Jika $-V_r$ lebih besar daripada V_c , maka hanya S_3 yang menghantar arus, sehingga V_B bernilai setengah dari V_{dc} . Jika $-V_r$ lebih kecil daripada V_c , maka hanya S_2 yang menghantar arus, sehingga V_B bernilai setengah dari $-V_{dc}$. Sinyal pada rangkaian *unipolar sinusoidal* PWM ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Sinyal *unipolar sinusoidal* PWM

Daftar Pustaka

- [1] M. Rashid, "Power Electronics Handbook", Second Edition, United Kingdom: Academic Press, 2006.
- [2] R. W. Erickson dan D. Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics", Second Edition, United States of America: Springer, 2001.
- [3] P. T. Krein, "Elements of Power Electronics", New York: Oxford University Press, 2015.
- [4] N. Mohan, "Power Electronics: A First Course", United States of America: John Wiley and Sons, 2012.

BAB V

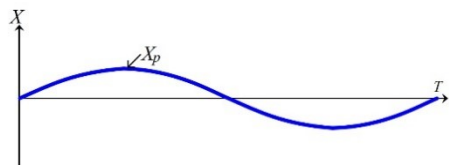
KONVERTER AC KE AC

5.1 Definisi Konverter AC ke AC

Konverter AC ke AC adalah rangkaian elektronik atau perangkat elektromekanik yang mengubah sumber arus bolak-balik (AC) dari satu tingkat tegangan ke tingkat tegangan lainnya. Pada rangkaian ini dilakukan pengaturan tegangan dan frekuensi kerja. Mengingat bahwa sinyal AC banyak digunakan sebagai sumber energi listrik, maka perlu dilakukan perhitungan *root-mean-square* (RMS) dan perhitungan daya AC [1-5].

5.2 Perhitungan RMS

Mengingat bahwa sinyal AC banyak digunakan sebagai sumber energi listrik, maka perlu dilakukan perhitungan *root-mean-square* (RMS) dengan menggunakan Persamaan (6.1). Bentuk sinyal AC sinusoidal ditunjukkan pada Gambar 5.1 dengan X_p menunjukkan puncak gelombang dan T menunjukkan periode. Untuk menghitung nilai RMS, terlebih dahulu dilakukan pengkuadratan terhadap sinyal, lalu diikuti dengan perhitungan nilai rata-rata, dan terakhir dihitung nilai akar kuadratnya sesuai dengan Persamaan (5.1).



Gambar 5.1. Sinyal sinusoidal

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X(t)^2 dt} \quad (5.1)$$

Untuk suatu sinyal sinusoidal, nilai besaran sinyal X memenuhi Persamaan (5.2) dengan X_p merupakan nilai maksimumnya.

$$X(t) = X_p \sin\left(t \frac{2\pi}{T}\right) \quad (5.2)$$

Dengan demikian, nilai RMS dari sinyal X dapat diperoleh melalui Persamaan (5.3)-(5.8).

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X_p^2 \sin^2\left(t \frac{2\pi}{T}\right) dt} \quad (5.3)$$

Dengan menggunakan identitas trigonometri,

$$\sin^2 u = \frac{1}{\cos 2u} \quad (5.4)$$

Maka perhitungan RMS menjadi

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{X_p^2}{T} \int_0^T \frac{1}{2} (1 - \cos(2 \cdot \frac{2\pi}{T} t)) dt} \quad (5.5)$$

Selanjutnya dengan menghitung nilai integral, maka diperoleh Persamaan (5.6) dan (5.7).

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{X_p^2}{2T} \left[t \Big|_0^T - \sin\left(\frac{4\pi}{T} t\right) \cdot \frac{T}{4\pi} \Big|_0^T \right]} \quad (5.6)$$

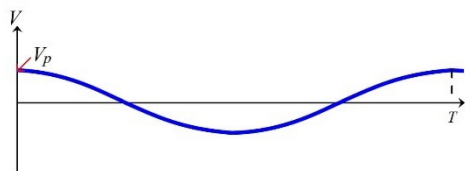
$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{X_p^2}{2T} \left[T - \frac{T}{4\pi} (\sin(4\pi) - \sin(0)) \right]} \quad (5.7)$$

Sehingga diperoleh

$$X_{RMS} = \frac{X_p}{\sqrt{2}} \quad (5.8)$$

5.3 Perhitungan Daya AC

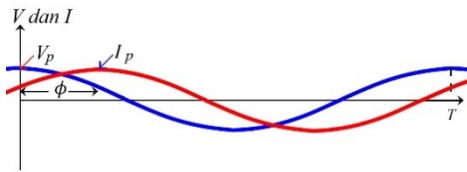
Untuk menghitung daya AC diperlukan nilai tegangan dan arus yang dihitung menggunakan Persamaan (5.9) hingga (5.12). Tegangan AC pada contoh berikut ditentukan dalam gelombang cosinus seperti ditunjukkan pada Gambar 5.2.



Gambar 5.2. Sinyal tegangan cosinus

$$V(t) = \sqrt{2} V \cos(\omega t) \quad (5.9)$$

Arus pada rangkaian elektronika daya umumnya memiliki beda fasa dengan tegangan. Perbedaan fasa yang ditunjukkan pada Gambar 5.3 dan Persamaan (5.10) yang menyebabkan perhitungan daya AC memerlukan penyederhaan berdasarkan identitas trigonometri pada Persamaan (5.14). Selanjutnya diperoleh persamaan perhitungan daya AC sesuai dengan Persamaan (5.16).



Gambar 6.3. Beda fasa tegangan cosinus dan arus

$$\phi = \phi_v - \phi_i \quad (5.10)$$

$$i(t) = \sqrt{2} I \cos(\omega t - \phi) \quad (5.11)$$

$$P(t) = V(t) i(t) \quad (5.12)$$

$$P(t) = \sqrt{2} V \cos(\omega t) \sqrt{2} I \cos(\omega t - \phi) \quad (5.13)$$

$$\cos a \cos b = \frac{1}{2} [\cos(a - b) + \cos(a + b)] \quad (5.14)$$

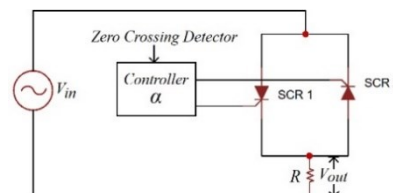
$$P(t) = 2 VI \frac{1}{2} [\cos(\omega t - \omega t + \phi) + \cos(\omega t + \omega t - \phi)] \quad (5.15)$$

$$P(t) = VI [\cos(\phi) + \cos(2\omega t - \phi)] \quad (5.16)$$

Persamaan (5.16) memiliki komponen DC, yakni $VI \cos(\phi)$, dan komponen osilasi, yakni $VI \cos(2\omega t - \phi)$. Daya rata-rata dihitung dengan hasil perkalian arus dan tegangan dengan cosinus dari pergeseran fasa (ϕ).

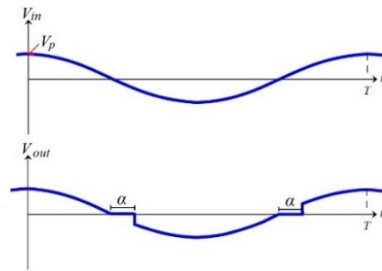
5.4 Single-Phase AC to AC Converter

Rangkaian *single-phase AC to AC converter* memerlukan 2 (dua) unit SCR yang dipasang anti paralel. Kedua SCR dikendalikan oleh pengendali α yang mengendalikan sudut pemucuan kedua *gate* pada SCR. Rangkaian *single-phase AC to AC converter* ditunjukkan pada Gambar 5.4.



Gambar 5.4. Rangkaian *single-phase AC to AC converter*

Dengan menggunakan rangkaian *zero crossing detector*, maka sudut α dapat diatur sedemikian rupa sehingga dapat mengatur tegangan keluaran seperti ditunjukkan pada Gambar 5.5. Pada setengah gelombang positif, *controller alpha* memicu SCR 1, sedangkan pada setengah gelombang negatif, *controller alpha* memicu SCR 2.



Gambar 5.5. Tegangan pada *single-phase AC to AC converter*

Daftar Pustaka

- [1] M. Rashid, "Power Electronics Handbook", Second Edition, United Kingdom: Academic Press, 2006.
- [2] R. W. Erickson dan D. Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics", Second Edition, United States of America : Springer, 2001.
- [3] P. T. Krein, "Elements of Power Electronics", New York: Oxford University Press, 2015.
- [4] N. Mohan, "Power Electronics: A First Course", United States of America: John Wiley and Sons, 2012.
- [5] A. A. Khan, H. Cha dan H. F. Ahmed, "High Efficiency Single-Phase AC-AC Converters Without Commutation Problem", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 31, No. 8, 2016.

