

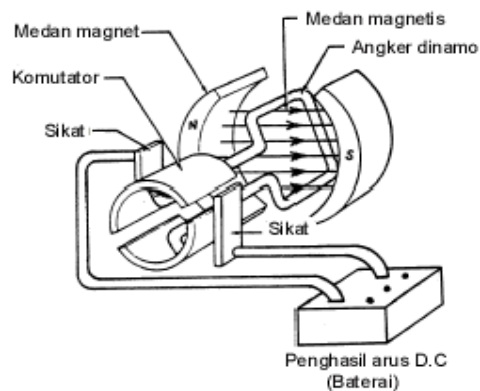
BAB II

Landasan Teori

2.1. Pengertian Umum Motor DC

Motor listrik merupakan perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Energi mekanik ini digunakan untuk, misalnya memutar impeller pompa, fan atau blower, menggerakkan kompresor, mengangkat bahan, dll. Motor listrik digunakan juga di rumah (mixer, bor listrik, fan angin) dan di industri. Motor listrik kadangkala disebut “kuda kerja” nya industri sebab diperkirakan bahwa motormotor menggunakan sekitar 70% beban listrik total di industri.

Motor DC memerlukan suplai tegangan yang searah pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi mekanik. Kumparan medan pada motor dc disebut stator (bagian yang tidak berputar) dan kumparan jangkar disebut rotor (bagian yang berputar). Jika terjadi putaran pada kumparan jangkar dalam pada medan magnet, maka akan timbul tegangan (GGL) yang berubah-ubah arah pada setiap setengah putaran, sehingga merupakan tegangan bolak-balik. Prinsip kerja dari arus searah adalah membalik fasa tegangan dari gelombang yang mempunyai nilai positif dengan menggunakan komutator, dengan demikian arus yang berbalik arah dengan kumparan jangkar yang berputar dalam medan magnet. Bentuk motor paling sederhana memiliki kumparan satu lilitan yang bias berputar bebas di antara kutub-kutub magnet permanen, seperti terlihat pada gambar 2.1 dibawah ini.



Gambar 2.1. Motor DC Sederhana

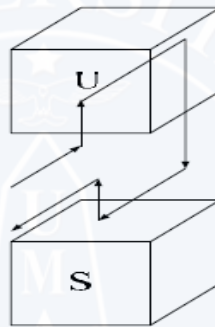
Catu tegangan dc dari baterai menuju ke lilitan melalui sikat yang menyentuh komutator, dua segmen yang terhubung dengan dua ujung lilitan. Kumparan satu lilitan pada gambar di atas disebut angker dinamo. Angker dinamo adalah sebutan untuk komponen yang berputar di antara medan magnet.

Berdasarkan karakteristiknya, maka motor arus searah ini mempunyai daerah pengaturan putaran yang luas dibandingkan dengan motor arus bolak-balik, sehingga sampai sekarang masih banyak dipergunakan pada pabrik dan industri seperti pabrik kertas, tekstil, dan pabrik-pabrik yang produksinya memerlukan pengaturan putaran yang luas. Konstruksi motor arus searah sama dengan konstruksi generator arus searah, hanya perbedaannya pada prinsip kerjanya, sehingga satu perangkat mesin arus searah dapat berfungsi sebagai generator maupun sebagai motor.

2.1.1. Prinsip kerja Motor Listrik DC

Daerah kumparan medan yang dialiri arus listrik akan menghasilkan medan magnet yang melingkupi kumparan jangkar dengan arah tertentu.

Konversi dari energi listrik menjadi energi mekanik (motor) maupun sebaliknya berlangsung melalui medan magnet, dengan demikian medan magnet disini selain berfungsi sebagai tempat untuk menyimpan energi, sekaligus berfungsi sebagai tempat berlangsungnya proses perubahan energi dan daerah tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.2 dibawah ini :



Gambar 2.2 Prinsip kerja Motor DC

Dengan mengacu pada hukum kekekalan energi :

Proses energi listrik = energi mekanik + energi panas + energi didalam medan magnet

Maka dalam medan magnet akan dihasilkan kumparan medan dengan kerapatan fluks sebesar B dengan arus adalah I serta panjang konduktor sama dengan L maka diperoleh gaya sebesar F , dengan persamaan sebagai berikut :

$$F = B I L \dots\dots\dots 2.1$$

Arah dari gaya ini ditentukan oleh aturan kaidah tangan kiri, adapun kaidah tangan kiri tersebut adalah sebagai berikut :

Ibu jari sebagai arah gaya (F), telunjuk jari sebagai fluks (B), dan jari tengah sebagai arus (I). Bila motor dc mempunyai jari-jari dengan panjang sebesar (r), maka hubungan persamaan dapat diperoleh :

$$F_r = B I L r \dots\dots\dots 2.2$$

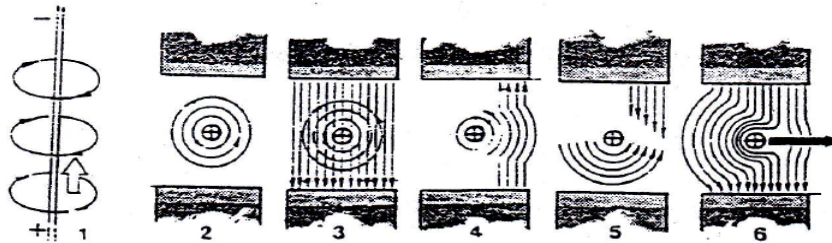
Saat gaya (F) tersebut dibandingkan, konduktor akan bergerak didalam kumparan medan magnet dan menimbulkan gaya gerak listrik yang merupakan reaksi lawan terhadap tegangan sumber.

Agar proses perubahan energi mekanik tersebut dapat berlangsung secara sempurna, maka tegangan sumber harus lebih besar dari pada tegangan gerak yang disebabkan reaksi lawan. Dengan memberi arus pada kumparan jangkar yang dilindungi oleh medan maka menimbulkan perputaran pada motor.

Untuk memahami prinsip kerja motor listrik DC ini sebaiknya kita lihat kembali tentang pengaruh penghantar yang dilalui arus listrik. Sebuah penghantar yang dilalui arus listrik, dan ditempatkan dalam medan magnet akan mendapatkan gaya yang dikeluarkan oleh medan magnet tersebut dengan arah tegak lurus pada garis medan dan penghantar yang dialiri arus tadi.

Penghantar yang dialiri arus listrik akan menghasilkan garis-garis gaya yang mengelilingi penghantar. Jika penghantar itu diletakkan diantara kutub-kutub magnet, maka akan terlihat bahwa garis-garis gaya dari penghantar maupun dari magnet mempunyai arah yang sama pada salah satu sisi (kanan). Oleh karena itu mereka saling memperkuat, namun disebelah sisinya lagi (kiri) garis-garis pada penghantar itu saling berlawanan dengan garis-garis gaya magnet. Akibatnya medan magnet yang lebih kuat akan mendorong penghantar kesebelah kiri pada daerah ini terjadi gaya tolak menolak.

Untuk memahami pernyataan ini perhatikanlah uraian gambar 2.3 berikut :



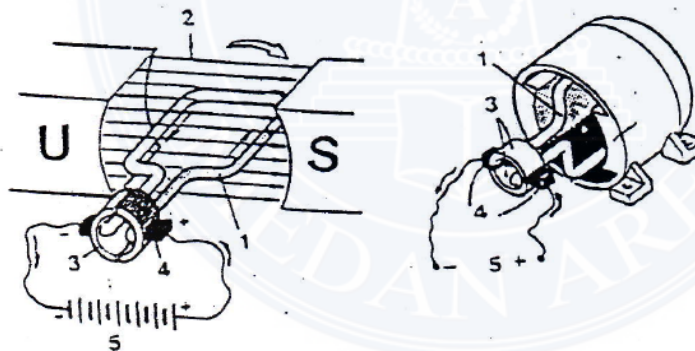
Gambar2.3 Gerak Penghantar diantara medan magnet

- (1) Medan disekelilingi penghantar berarus; (2) Penghantar diantara kutub-kutub magnet; (3) Kedua medan bergabung; (4) Saling memperkuat; (5) Saling berlawanan; (6) Penghantar bergerak kesamping.

Jika penghantar lurus ini diganti dengan lingkaran kawat (angker), maka lingkaran kawat ini akan berputar diantara kutub-kutub magnet.

Pada motor listrik DC, ujung dari lingkaran kawat ini disambungkan pada segmen komutator yang berhubungan dengan sikat (borstel).

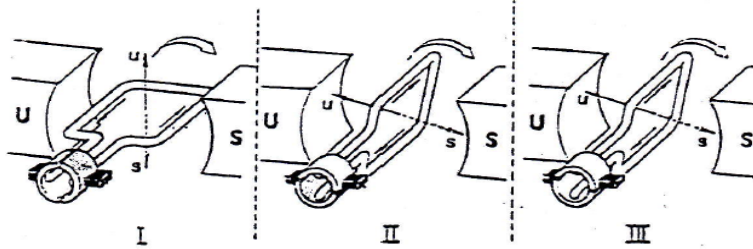
Berikut ini gambar 2.4 rangkaian sederhana sebuah motor listrik DC.



Gambar2.4 Konstruksi sederhana sebuah Motor DC

- (1) Lingkaran kawat (angker); (2) Medan magnet dari medan magnet tetap; (3) Komutator; (4) Sikat (borstel); (5) Sumber tegangan.

Untuk memahami gerak satu putar dari lingkaran kawat pada motor listrik DC, perhatikan uraian gambar 2.5 berikut ini :



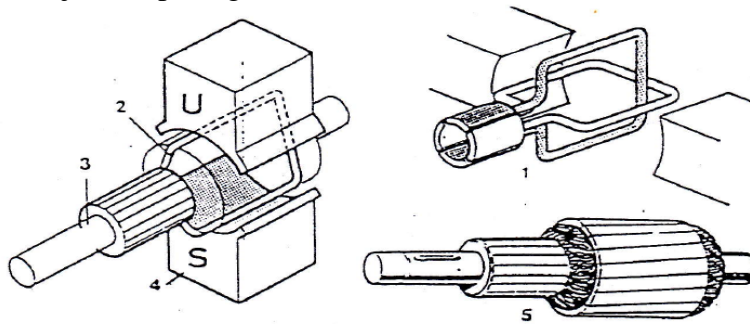
Gambar2.5 Gerak satu putar lingkaran kawat pada motor DC

- (1) Kedudukan I memperlihatkan kutub-kutub utara dan selatan;
- (2) Kedudukan II arah arus dibalik;
- (3) Kedudukan III kutub sejenis saling menolak.

Pada saat kedudukan lingkaran kawat seperti kedudukan I, maka arus akan membentuk kutub utara disebelah atas dan sebelah bawah kutub selatan. Kutub-kutub ini kelak akan ditarik oleh kutub-kutub yang tidak sejenis dari magnet, akibatnya lingkaran berputar kekanan. Jika lingkaran mencapai kedudukan seperti pada kedudukan II, arah arus akan berbalik dan letak kutub-kutub bertukar, akibatnya pada kutub-kutub yang sejenis akan saling tolak menolak. Dengan demikian lingkaran akan berputar terus sampai mencapai kedudukan III dimana arah arus dibalikkan sekali lagi dan lingkaran berputar terus.

Untuk menghasilkan putaran motor yang cepat dan stabil, diperlukan banyak lingkaran kawat. Satu lingkaran kawat ini disebut juga lilitan. Lilitan ini kemudian disatukan sehingga membentuk sebuah angker.

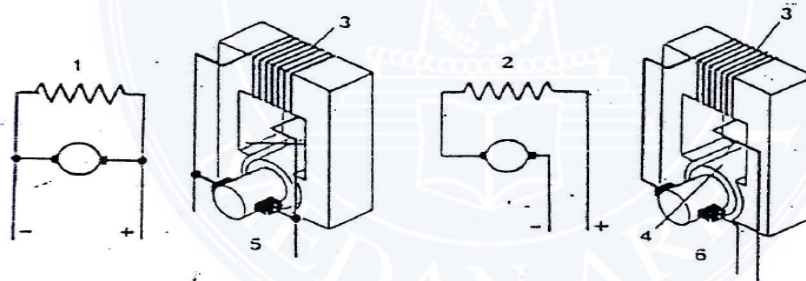
Ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar2.6 Bentuk Angker motor listrik

- (1) Angker dengan dua kumparan; (2) Kumparan; (3) Kedudukan angker;
 (4) Kutub-kutub magnet; (5) Angker sebuah motor listrik.

Pada motor-motor listrik arus searah yang menghasilkan tenaga putar yang besar kadang-kadang magnetnya dihasilkan berupa elektromagnetik. Sedangkan lilitannya disebut kumparan-kumparan medan. Kumparan-kumparan medan ini dapat dihubung secara parallel dengan angker atau secara seri dengan angker, terlihat pada gambar 2.7 dibawah.



Gambar2.7 Motor arus searah dengan kumparan medan

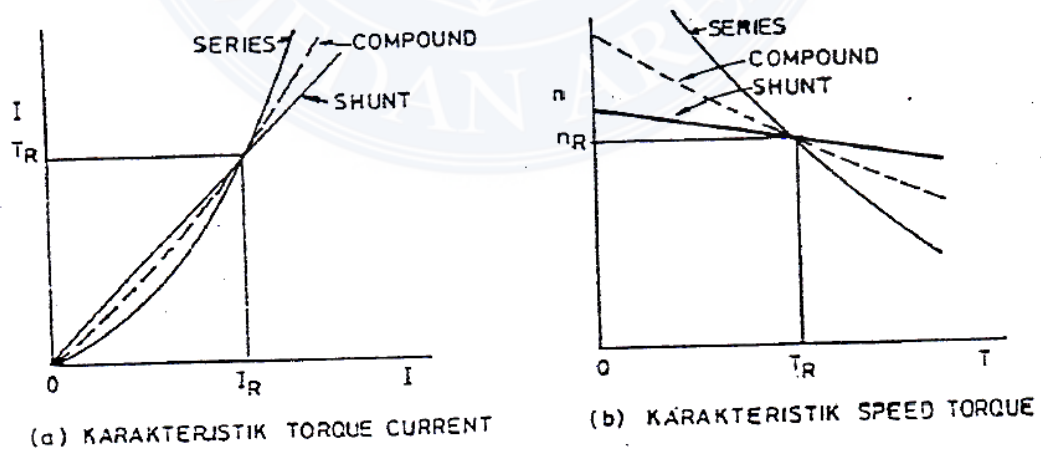
- (1) Hubungan parallel; (2) Hubungan seri; (3) Kumparan medan; (4) Angker; (5) Motor shunt; (6) Motor seri.

Motor-motor yang kumparan-kumparan medannya dihubungkan secara parallel dengan angker disebut motor shunt dan kumparan-kumparan yang dihubungkan seri dengan angker disebut motor seri.

2.1.2. Start

Pada saat putaran sama dengan nol, GGL sebuah mesin DC adalah nol dan tegangan jala-jala yang dihubungkan ke motor akan jatuh keseluruhannya pada tahanan jangkar. Untuk menghindari arus jangkar yang berlebihan, tegangan start harus dikurangi. Bila tahanan jangkar dapat diatur, motor dipercepat dengan menambah tegangan dari nol. Kontrol otomatis sering digunakan untuk membatasi arus start sampai dengan 1.5 hingga dua kali harga nominalnya. Bila daya diberikan pada tegangan constant, tahanan start dihubungkan seri dengan jangkar. Tahanan tersebut dihubungsingkatkan dalam beberapa step sementara kecepatan naik terus. Untuk torsi atart tinggi, tegangan penuh harus dipasang pada kumparan medan sebuah motor shunt.

Pada motor seri, arus medan sama dengan arus jangkar. Oleh karena torsi berubah dengan kwadrat arus, arus start yang lebih tinggi dari harga nominalnya, torsi start sebuah motor seri lebih besar dari sebuah motor shunt. Dengan merubah sala satu hubungan jangkar atau medan, akan merubah putaran.



Gambar2.8 Karakteristik kerja motor DC

Bila dibandingkan motor DC dengan motor AC, motor DC pada umumnya jauh lebih sesuai untuk keperluan yang kecepatannya dapat diatur dalam suatu rentang kecepatan yang lebar, disamping banyaknya metoda yang dapat digunakan bila dibandingkan dengan motor AC.

Rumus untuk motor DC dapat dituliskan sebagai berikut :

$$E_a = C n \Phi \dots\dots\dots (2.3)$$

$$E_a = V_t - I_a.R_a \dots\dots\dots (2.4)$$

$$n = \frac{V_t - I_a.R_a}{C\Phi} \dots\dots\dots (2.5)$$

E_a = Tegangan armatur (Volt)

n = Putaran Motor (rpm)

I_a = Arus armatur (ampere)

R_a = Tahanan armatur (ohm)

V_t = Tegangan sumber (volt)

Φ = fluks (weber)

C = Konstanta $(p/a)(Z/60)$

Z = Impedansi total

p = jumlah kutub

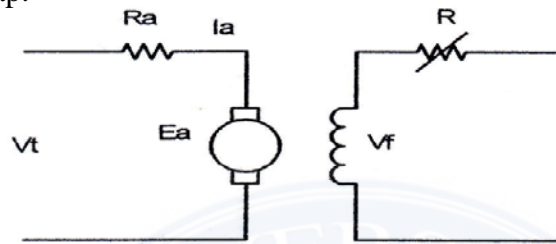
2.2. Jenis Pengaturan kecepatan motor DC

Dari rumus tadi maka pengaturan kecepatan motor DC ada tiga macam metoda yang paling banyak digunakan dalam pengaturan kecepatan motor DC.

a. Pengaturan arus medan

Pengaturan arus medan dapat dengan menserikan tahanan variabel pada medannya, dimana dengan berubahnya arus medan maka fluks juga berbeda

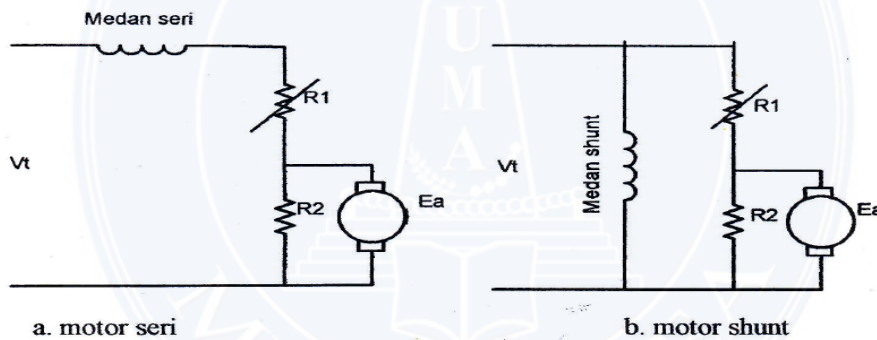
sehingga kecepatan dari motor jadi berubah, ini dilakukan dengan tahanan rangkaian dari medan. Kecepatan terendah yang dicapai adalah dengan arus medan terbesar, sedangkan kecepatan tertinggi dibatasi oleh efek dari reaksi kumparan yang disebabkan adanya medan yang lemah sehingga motor menjadi tidak mantap.



Gambar2.9 Pengaturan arus medan

b. Pengaturan tahanan armatur

Pengaturan tahanan armatur ini dengan cara menyisipkan tahanan seri



Gambar2.10 Pengaturan kecepatan dengan mengatur tahanan armatur

terhadap tahanan tangkar, sehingga tahanan tersebut dapat diatur sehingga kecepatan motor DC pun dapat diatur atau dikontrol. Cara ini dapat diterapkan pada motor-motor seri, shunt dan majemuk. Gambar rangkaianannya dapat digambarkan pada motor DC shunt dan seri.

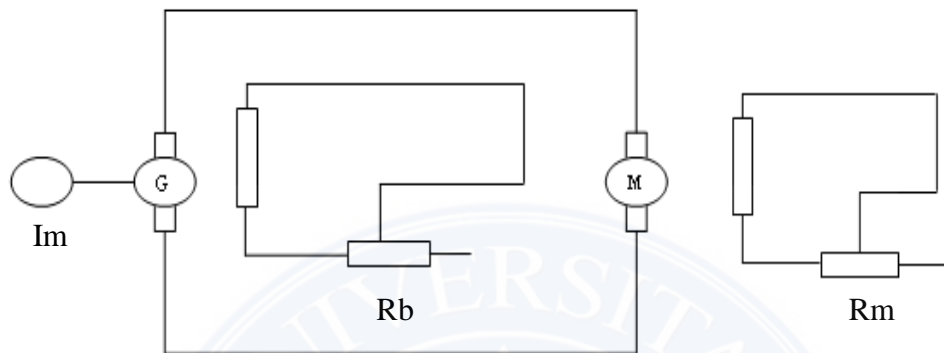
Gambar pengaturan kecepatan dengan mengatur tahanan armatur

Bila melihat contoh motor seri

$$E_a = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_t \dots\dots\dots (2.6)$$

Pengaturan dengan mengatur tahanan armatur ini tidak ada lagi dipakai karena pengaturan dengan cara ini akan mengakibatkan rugi-rugi panas yang cukup besar.

c. Pengaturan Tegangan



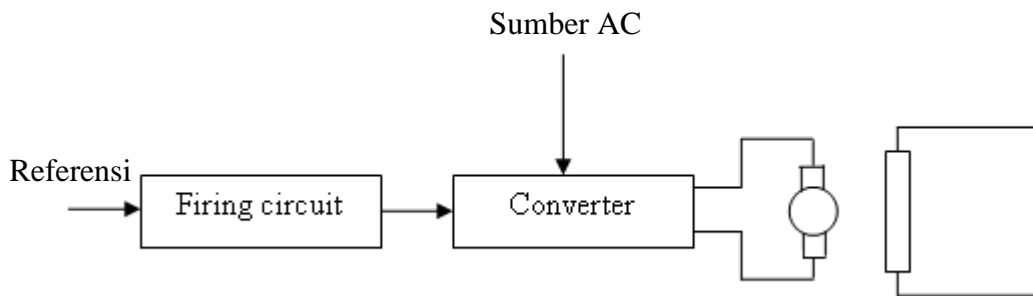
Gambar2.11 Pengaturan kecepatan dengan mengatur tegangan motor

Cara ini dikenal sebagai sistem Ward Leonard, motor yang dipakai adalah motor berpenguatan bebas (terpisah).

Prinsipnya sebagai berikut : Penggerak mula untuk menggerakkan generator G pada suatu kecepatan constant. Perubahan tahanan medan R_g akan mengubah tegangan V_t yang diberikan pada motor, perubahan ini mempunyai batas yang cukup lebar. Kadang-kadang pengaturan V_t ini juga dibarengi dengan pengaturan fluks medan putar yaitu dengan mengatur tahanan medan R_m , cara ini menghasilkan suatu pengaturan kecepatan yang sangat halus dan banyak dipakai untuk lift, mesin bubut dan lain-lain. Sering kali pengaturan tegangan generator digabung dengan pengaturan medan motor agar sedapat mungkin tercapai rentang kecepatan selebar-lebarnya.

Pengaturan tegangan motor dapat juga dilakukan menggunakan rangkaian elektromik.

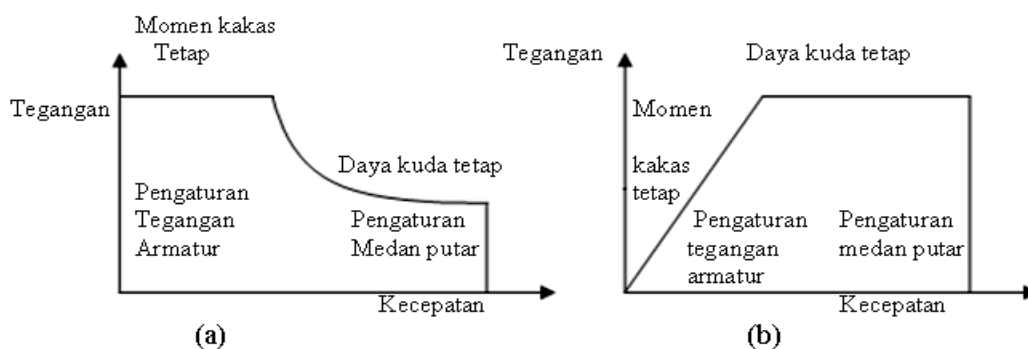
1. Rangkaian converter sebagai penyearah



Gambar2.12 Pengaturan tegangan motor dengan converter

Pada gambar diatas dapat dilihat bahwa tegangan motor diatur dengan mengatur besarnya sudut penyalan yang diberikan pada converter. Semakin besar sudut penyalan maka tegangan motor semakin kecil, dan dengan turunnya tegangan motor maka kecepatan akan turun.

Pengaturan kecepatan motor diatas dapat diperoleh dengan mengatur arus medan, tahanan armatur, tegangan armatur dan tegangan motor. Pengaturan arus medan mempunyai rentang kecepatan dasar yang berasal dari penggerak daya kuda. Dan rentang kecepatan dibawah kecepatan dasar yang berasal dari momen kakas tetap seperti pada pengaturan tahanan armatur dan arus armatur. Karakteristik dari penggerak daya kuda tetap dan momen kakas tetap yang diijinkan dan dapat digambarkan.



Gambar2.13 Karakteristik kecepatan motor DC

Pada gambar (a) merupakan karakteristik dengan momen kakas maksimum (torsi maksimum) terhadap perubahan kecepatan.

Torsi maksimum adalah :

$$\Gamma_{maks} = K.I_{maks}\phi \dots\dots\dots (2.7)$$

Saat motor start sampai didapat putaran nominalnya dapat diatur dengan mengatur armatur. Pada keadaan ini torsi maksimum constant pada pengaturan arus maksimum sudah maksimum. Sehingga untuk mendapatkan putaran nominalnya motor dapat diatur dengan mengatur tegangan motor atau tahanan armatur.

Dan untuk mengatur kecepatan motor dari putaran nominalnya sampai didapat putaran motor maksimum dapat diatur dengan mengatur medan motor. Untuk itu arus medan harus diatur sampai maksimum, sehingga dengan bertambahnya arus medan maka fluks akan turun sehingga torsi motor juga turun.

Dan pada gambar (b) merupakan karakteristik momen kuda (daya motor maksimum).

Rumus untuk daya maksimum adalah :

$$P_{maks} = \Gamma_{maks}\omega \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana : ω = Kecepatan sudut putaran belitan motor (rad/det)

Dari rumus diatas dengan mengatur naiknya tegangan armatur maka kecepatan sudut putaran belitan motor naik dengan naiknya kecepatan motor. Dengan mengatur kecepatan putaran sudut motor sampai maksimum akan didapat daya maksimum motor. Kecepatan putaran sudut motor dibatasi oleh efek dari reaksi kumparan (belitan). Jadi setelah didapat daya maksimum maka biarpun kecepatan motor naik namun daya akan tetap demikian (konstant).

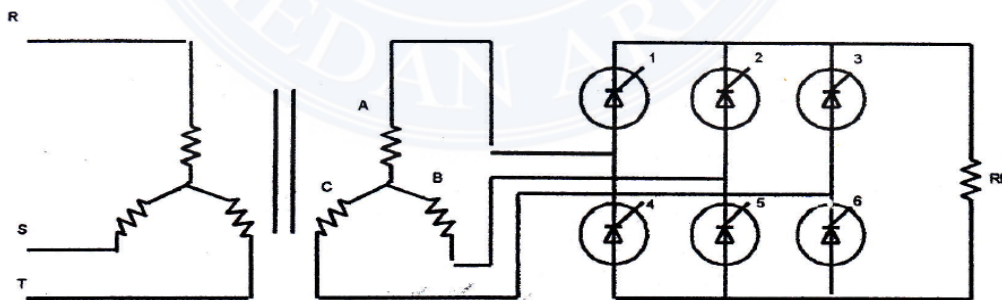
Karakteristik momen kakas tetap sangat sesuai bagi pemakaian dalam industri, dimana sebagian besar beban dipergunakan untuk mengatasi gesekan-gesekan dari bagian yang bergerak, oleh karena itu memerlukan suatu momen kakas yang tetap. Pada karakteristik momen kakas tetap, pada saat motor dari kecepatan tanpa beban ke beban penuh penurunan kecepatan landai.

2.3. Penyearah terkontrol tiga fasa

Untuk menghasilkan tegangan motor DC ada beberapa cara untuk menghasilkan tegangan DC. Dalam jembatan converter maupun dengan generator DC. Dalam jembatan converter digunakan penyearah terkontrol, sehingga tegangan DC yang disearahkan dapat bervariasi dimana tegangan DC ini diatur dengan memberi penyulut pada SCR, sehingga dengan sudut penyalaan yang berbeda akan menghasilkan tegangan outputnya bervariasi.

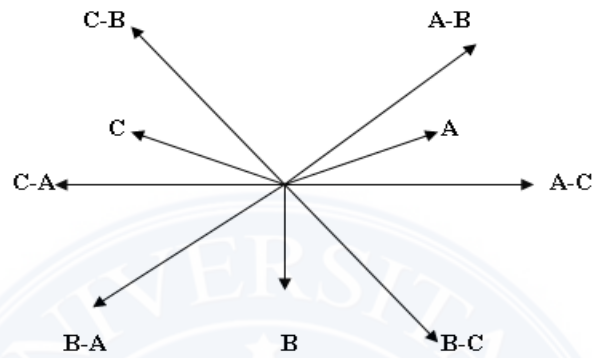
Rangkaian penyearah terkontrol ada dua bagian yaitu rangkaian penyearah terkontrol penuh dan setengah terkontrol.

a. Rangkaian penyearah gelombang penuh



Gambar2.14 Penyearah gelombang penuh

Pada penyearah terkontrol panuh ini ada 6 SCR yang harus disulut. Oleh karena itu ada 2 SCR yang harus konduksi pada saat yang sama, satu SCR pada lengan atas dan satu SCR pada lengan bawah, cara kerja rangkaian ini dijelaskan dengan diagram vektor.



Gambar2.15 Vektor tegangan sekunder Trafo

Pada saat tegangan sekunder trafo seperti ditunjukkan pada diagram vektor. Jika tegangan A dan C sama positif terhadap titik netral, ini berarti tegangan C-A atau A-C sama dengan nol. Setelah itu fasa A menjadi lebih positif maka SCR 1 ditrigger atau SCR 1 akan konduksi apabila ada jalan kembali arus, jalan kembali arus bisa dari fasa B atau fasa C. Dan karena fasa B yang paling negatif atau vektor A-B yang terbesar, maka jalan kembali arus melalui fasa B yang berarti SCR 5 harus ditrigger bersama-sama dengan SCR 1. Sama dengan itu saat fasa B yang terbesar, SCR 2 dan SCR 6 harus ditrigger. Demikian juga saat fasa C yang terbesar maka SCR 3 dan SCR 4 yang harus ditrigger secara serentak. Pentriggeran ini dilakukan oleh 6 rangkaian trigger yang berbeda yang saling terhubung pada sekunder trafo fulsa.

Dan urutan penyalan SCR ditunjukkan pada table 2.1 berikut.

R		Y		B		R	
SCR1		SCR2		SCR3		SCR1	
SCR5	SCR6		SCR4	SCR5		SCR6	

Dalam hal ini rangkaian dianggap merupakan beban induktif sehingga arus kontinyu.

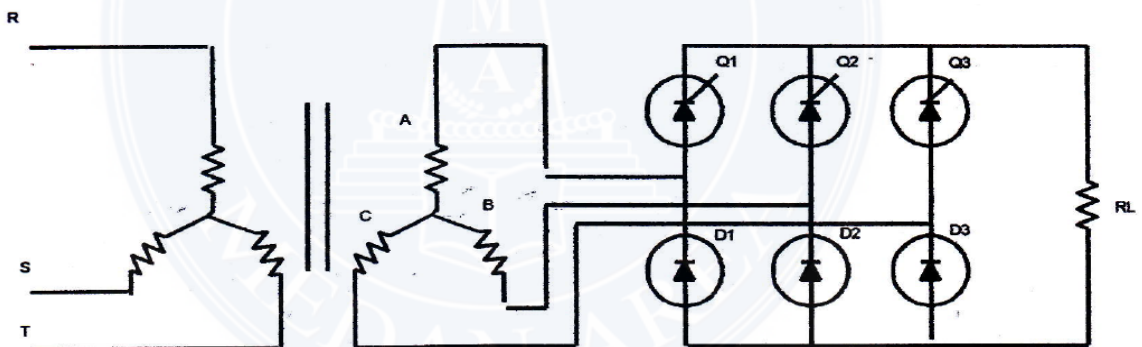
$$V_{mean} = \frac{3\sqrt{3} V_{maks}}{2\pi} \cos\alpha \dots\dots\dots (2.9)$$

V maks = Tegangan line

V mean = Tegangan rata-rata output SCR

α = Besar sudut penyalan

b. Penyearah setengah gelombang



Gambar2.16 Penyearah setengah gelombang

Transformator disini digunakan untuk mengisolasi keluaran penyearah dengan sumber tegangan dan untuk menaikkan dan menurunkan tegangan sumber maka transformator digunakan. Sesuai dengan vector tegangan sekunder pada gambar 2.15 dimana pada saat trafo dibebani maka tegangan fasa A dan C sama pada ujungnya terhadap netral. Tegangan fasa A menjadi paling positif maka jika SCR 1 ditrigger akan konduksi dimana sudut penyalan minimum untuk setiap SCR $\pi/6$. Pada saat SCR 1 konduksi arus mengalir dari fasa A melalui SCR 1,

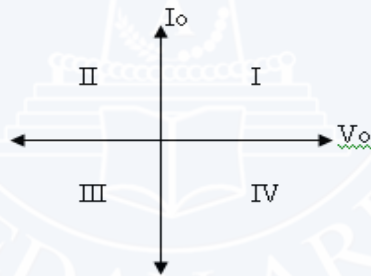
beban, dioda D2 kemudian ke fasa B. Setelah 60^0 vektor A-C menjadi paling positif sehingga kembalinya arus beralih dari fasaB ke fasa C dimana SCR 1 tetap konduksi.

Dan rumus untuk penyearah setengah gelombang terkontrol adalah :

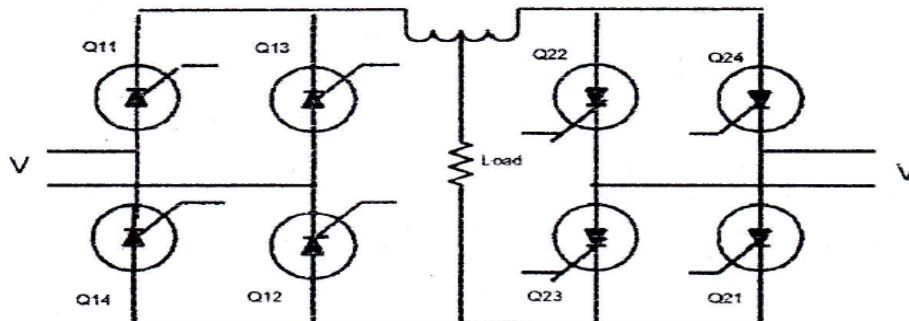
$$V_{mean} = \frac{3V_{maks}}{\pi} (1 + \cos \alpha) \dots\dots\dots (2.10)$$

2.4. Konverter ganda

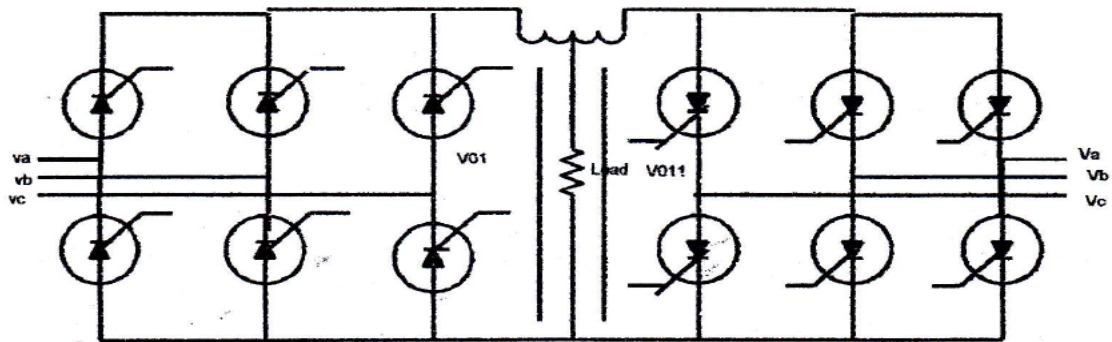
Konverter ganda adalah dua konverter yang dihibingkan secara anti parallel. Dimana dengan menghubungkan sedemikian rupa akan didapatkan operasi empat kuadran dari dua konverter tanpa menggunakan saklar. Dalam rangkaian ini salah satu polaritasnya tegangan dan arus didapat dengan sebuah konverter ganda.



Gambar2.17 Operasi empat kuadran



Gambar2.18 Jembatan konverter satu fasa



Gambar2.19 Jembatan konverter tiga fasa

Gambar 2.17 menunjukkan operasi empat kuadran dari sebuah konverter ganda dalam daerah $10-V_o$. Gambar 2.18 dan 2.19 menunjukkan rangkaian dual konverter satu fasa dan tiga fasa dengan menggunakan type rangkaian jembatan konverter. Terminal keluaran tiap konverter mempunyai potensial yang sama terhubung bersama melalui sebuah reaktor. Jika kita memperkirakan/menganggap konverter yang idela adalah dengan ripple yang diabaikan pada tegangan keluaran, maka tegangan keluaran dari tiap konverter harus sama dengan beban.

Pada gambar 2.19, tegangan keluarannya adalah :

$$V_{O1} = V_o \text{ maks.} \cos \alpha_1 \dots\dots\dots (2.11)$$

$$V_{O11} = V_o \text{ maks.} \cos \alpha_{11} \dots\dots\dots (2.12)$$

$$\alpha_1 + \alpha_{11} = 180^\circ \dots\dots\dots (2.13)$$

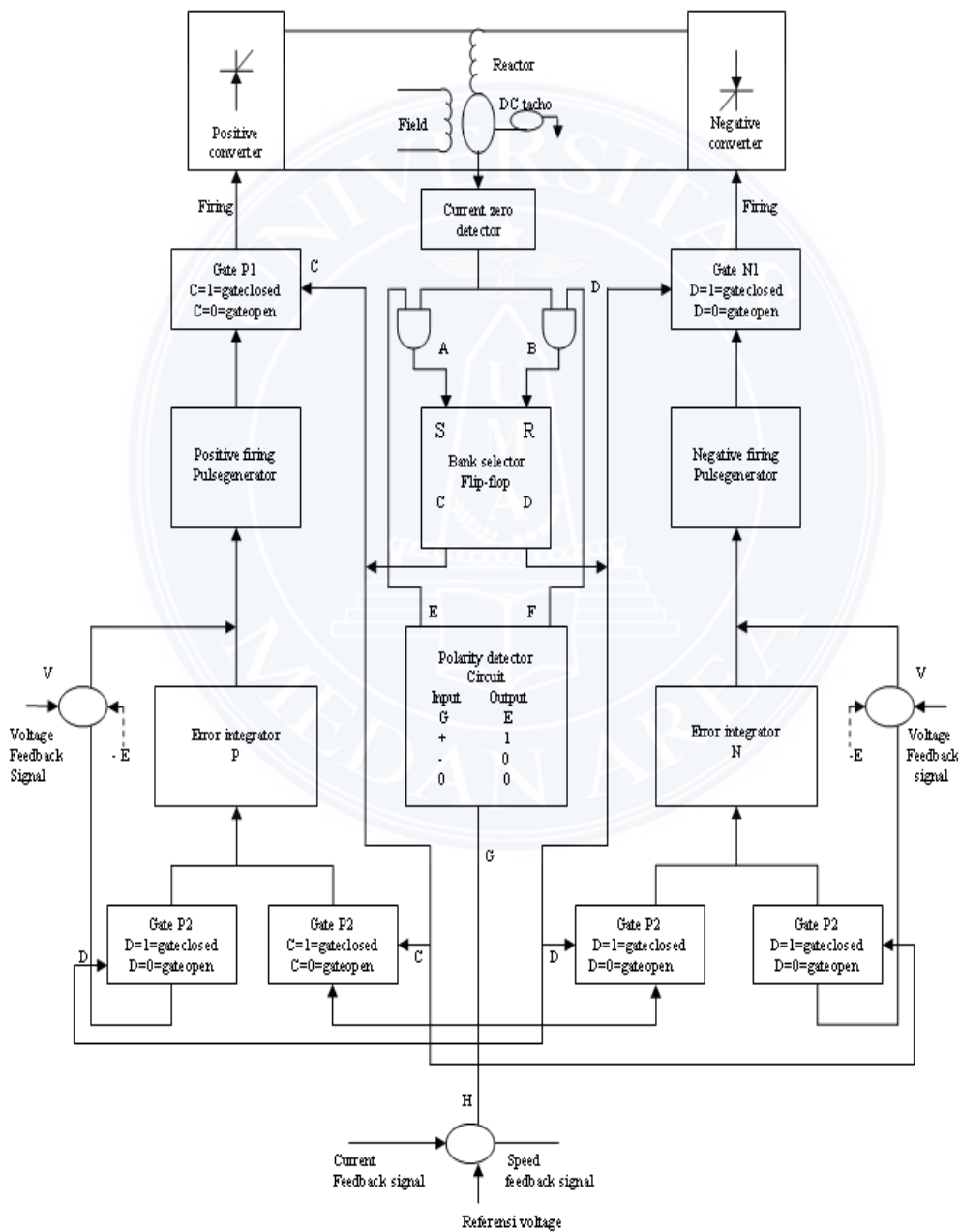
Walaupun tegangan rata-rata dari konverter-konverter tersebut diatas adalah sama, namun tegangan sesaat dari V_{O1} dan V_{O11} tidaklah sama.

Adapun dua operasi yang sangat umum digunakan dalam sebuah dual konverter yaitu :

- a. Mode operasi tanpa arus sirkulasi
- b. Mode operasi dengan arus sirkulasi

2.4.1 Mode operasi tanpa arus sirkulasi

Dalam sebuah dual konverter dengan operasi tanpa arus sirkulasi hanya satu konverter yang beroperasi pada suatu saat dan membawa arus beban. Konverter yang lain untuk memblokir dengan cara tidak memberikannya pulsa penyalan pada thyristor. Karena hanya sebuah konverter yang beroperasi pada saat itu, tidak ada reaktor diperlukan diantara konverter. Anggaphlah



Gambar2.20 Mode operasi tanpa arus sirkulasi dengan loop tertutup

konverter 1 pada gambar 2.20 adalah supply arus beban. Jika arus beban dibalik, pulsa penyalaan ke konverter I dapat segera diblok. Arus beban akan mencapai nol sesudah pulsa penyalaan ke konverter II digunakan. Arus akan naik sekarang melalui beban pada arah terbalik. Selama arus adalah negatif, supply pada konverter II dan konverter I tidak aktif selama pulsa penyalaan mundur darinya. Perubahan dari satu konverter ke konverter lain berlangsung setelah arus beban mencapai nol itu menyebabkan supply konverter akan beroperasi setelah konverter lain berhenti konduksi secara menyeluruh. Biasanya setelah arus pada satu konverter mendekati nol sesudah penundaan waktu dari 10ms sampai arus beban dibawa kondisi steady state, boleh kontiniu dan tidak kontiniu. Kontrol sirkulasi dari dual konverter ini menjadi modul yang bagus pada operasi arus beban yang kontiniu maupun yang tidak kontiniu. Switch mengganti dari satu konverter ke konverter lain harus perintah dari luar. Pada transfer karakteristik antara tegangan keluaran dan sudut penyalaan adalah linear selama arus kontiniu. Jadi dengan arus beban tidak kontiniu, transfer karakteristik jadi tidak linear. Kontrol rangkaian menjadi kompleks dan respon lambat. Sistem kontrol dari mode operasi tanpa arus sirkulasi dengan loop tertutup terdapat pada gambar 2.20.

Pada rangkaian dual konverter sangat diperlukan saat-saat yang tepat pemberian pulsa penyulut pada converter. Rangkaian itu merupakan loop tertutup, jadi apabila perbandingan tegangan referensi dengan tegangan umpan balik menghasilkan sinyal positif maka konverter akan menyet konverter I agar konduksi apabila perbandingan tegangan referensi dengan tegangan umpan balik menghasilkan sinyal negatif maka flip-flop akan menyet konverter II untuk konduksi dan mereset konverter I untuk tidak konduksi.

Fungsi dari “current zero detector” adalah untuk mendeteksi arus beban. Jika arus beban nol maka keluaran O menghasilkan logic “1” dan apabila arus beban lebih besar dari nol maka keluaran 1 akan menghasilkan logic “0”. Pada “polarity detector circuit” akan menghasilkan keluaran E dan F. jika sinyal perbandingan tegangan referensi dengan tegangan umpan balik adalah negatif maka keluaran E berlogic “0” dan F berlogic “1” dan jika perbandingan referensi dengan tegangan umpan balik adalah positif maka keluaran E berlogic “1” dan F berlogic “0”. Rangkaian ini akan mengontrol arus beban yang di deteksi oleh current zero detector yang merupakan ke bank selector flip-flop.

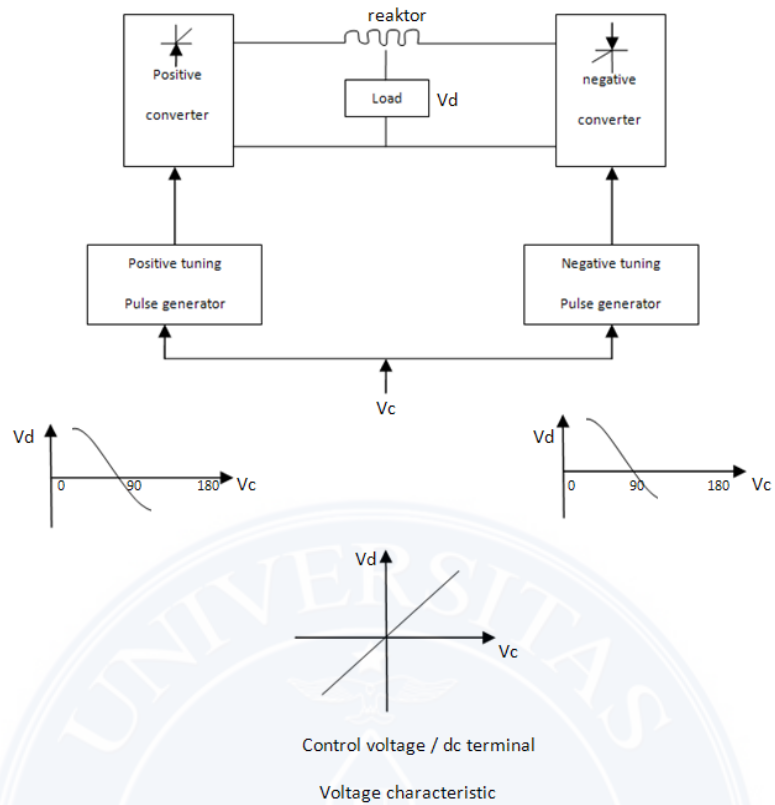
“Bank selector flip-flop” merupakan sebuah saklar yang memindahkan fulsa penyalan dari satu konverter ke konverter yang lain. Jadi apabila E berlogic 1 maka flip-flop akan menghasilkan logic C sama dengan 1 dan D berlogic 0 sehingga konverter I konduksi. Dan apabila F berlogic 1 maka flip-flop akan menghasilkan logic D sama dengan 1 dan C berlogic 0 sehingga konverter II konduksi dan konverter I tidak konduksi.

Fungsi “error integrator P dan N” adalah untuk mengontrol besarnya sudut penyalan yang diberikan pada fulsa penyalan positif dan negatif. Dan fungsi gate P2,P3,N2 dan N3 adalah sebagai saklar error integrator. Seperti contohnya apabila logic C “1” maka gate P2 dan N3 menutup sehingga saat itu konverter I akan konduksi demikian juga apabila D sama dengan “1” maka gate P3 dan N2 menutup sehingga saat itu konverter II yang konduksi dan menset konverter I off.

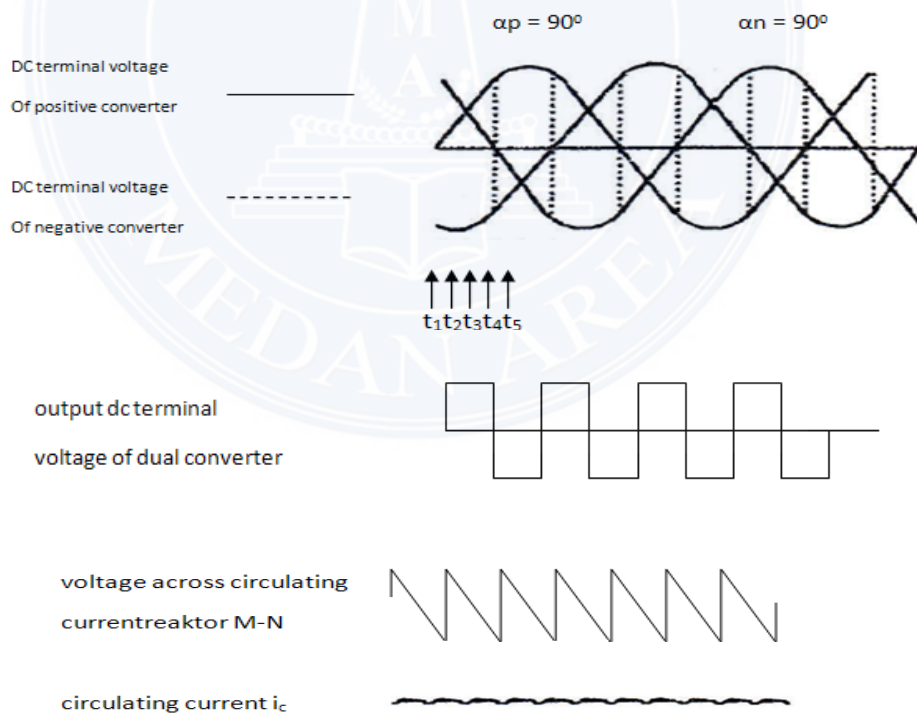
2.4.2. Mode operasi dengan arus sirkulasi

Dalam operasi sejumlah pengaturan arus sirkulasi antara konverter I dan konverter II dapat dihubungkan satu reaktor antara kedua terminal dari dua konverter. Arus sirkulasi antara dua konverter dalam keadaan terus menerus. Karakteristik transfer antara tegangan keluaran dan sudut penyalaan adalah linear sehingga respon/reaksi sangat cepat, rangkaian kontrol ini menjadi relatif sederhana. Arus bolak-balik dari arus beban adalah secara alami dan prosesnya lambat, satu konverter berfungsi sebagai rectifier dan konverter lain berfungsi sebagai inverter, jumlah dari sudut penyalaan dua konverter dijaga 180^0 sebagai halnya konverter ideal. Jika arus beban dibalik arah maka dual konverter akan saling bertukar. Sebagai konverter yang akan beroperasi sebagai rectifier jadi bekerja sebagai inverter, bila konverter yang beroperasi sebagai inverter dirubah jadi beroperasi sebagai rectifier. Periode tunda normal 10 ms sampai 20 ms, dan dalam hal ini arus sirkulasi beban dihilangkan. Dual konverter dengan arus sirkulasi disediakan dengan respon yang cepat. Uraian utama dari hal ini adalah :

- a. Suatu reaktor dibutuhkan untuk membatasi arus sirkulasi yang mengalir diantara dua konverter, ukuran reaktor ini penting untuk daya yang tinggi.
- b. Karena rugi-rugi arus reaktor sirkulasi, efisiensi dan factor daya rendah.
- c. Konverter dapat mengalirkan arus yang lebih dari arus beban tergantung sirkulasi arus (normalnya 10% sampai 20% arus beban penuh) mengalir diantara dua konverter. Jika arus dibalikkan dengan cepat dan reaksi cepat menjadi pertimbangan utama, konverter ganda dengan skema arus sirkulasi ini jelas jadi pilihan di empat kuadran pada konverter ganda.



Gambar2.21 Kontrol dual konverter mode operasi arus sirkulasi



Gambar2.22 Bentuk gelombang arus sirkulasi

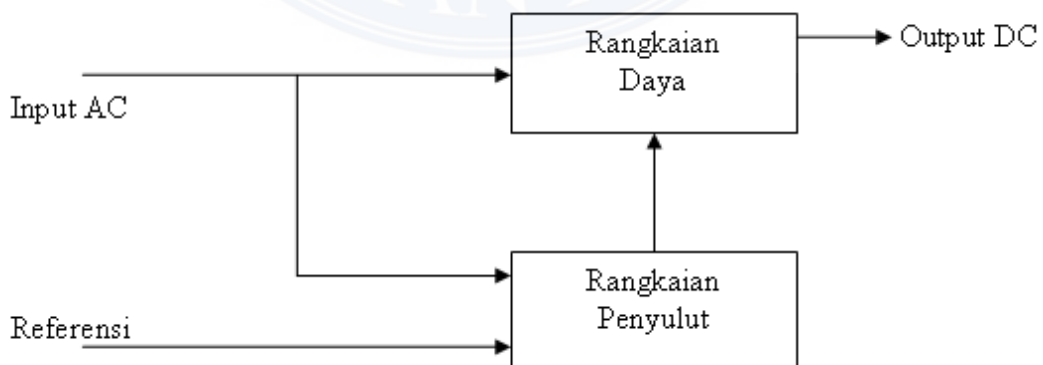
Pada bentuk gelombang arus sirkulasi diatas kedua converter disudut 90^0 . pada saat t_1-t_2 tegangan dikedua konverter sama positif dan saat itu konverter I lebih positif dibandingkan dengan konverter II. Karena itu tegangan pada reaktor pada arah positif dan menyebabkan arus sirkulasi naik pada saat t_2-t_3 tegangan dikedua konverter masih positif namun tegangan konverter II lebih besar dari converter I maka tegangan pada reaktor arah negatif dan arus sirkulasi akan berkurang hingga menuju nol.

Pada saat t_3-t_4 tegangan kedua konverter adalah negatif terhadap netral tetapi konverter II lebih negatif dibandingkan dengan konverter I dengan demikian tegangan pada arah positif dan arus sirkulasi mulai bertambah.

Pada t_5 arus sirkulasi nol seperti pada saat t_3 kedua konverter ini dijaga untuk tetap konduksi walaupun tidak ada arus beban dari luar dan arus sirkulasi mengalir satu arah saja.

2.5. Rangkaian Penyulut

Untuk mengatur tegangan keluar penyearah terkontrol maka SCR harus disulut pada saat yang sesuai.

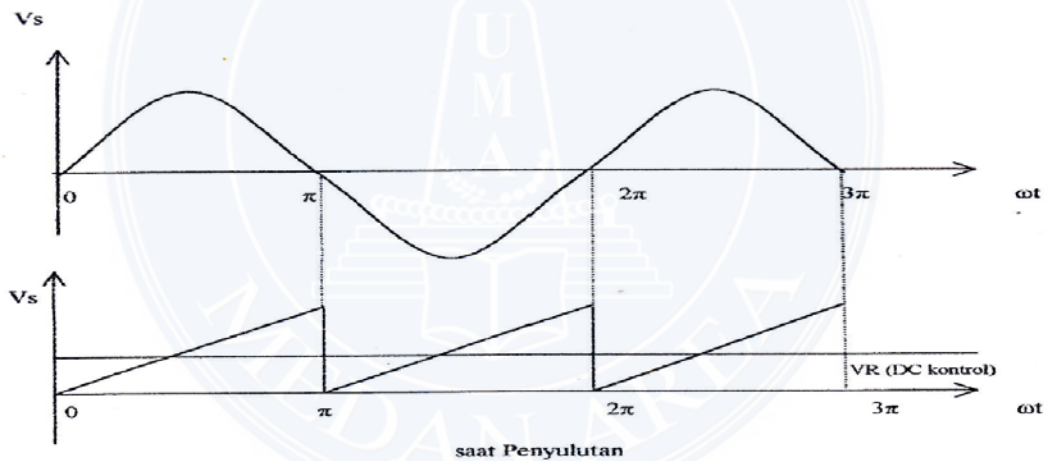


Gambar2.23 Hubungan SCR dengan rangkaian penyulut

Apabila sinyal kontrol (referensi) 0 sampai 10 volt, ini berarti jika 0 maka keluaran tegangan 0 volt dan jika 10 volt maka tegangan keluaran maksimum. Dan diketahui apabila sudut penyalan makin kecil akan menghasilkan tegangan keluaran yang semakin besar, demikian juga sebaliknya jika sudut penyalan semakin besar maka tegangan keluaran semakin kecil.

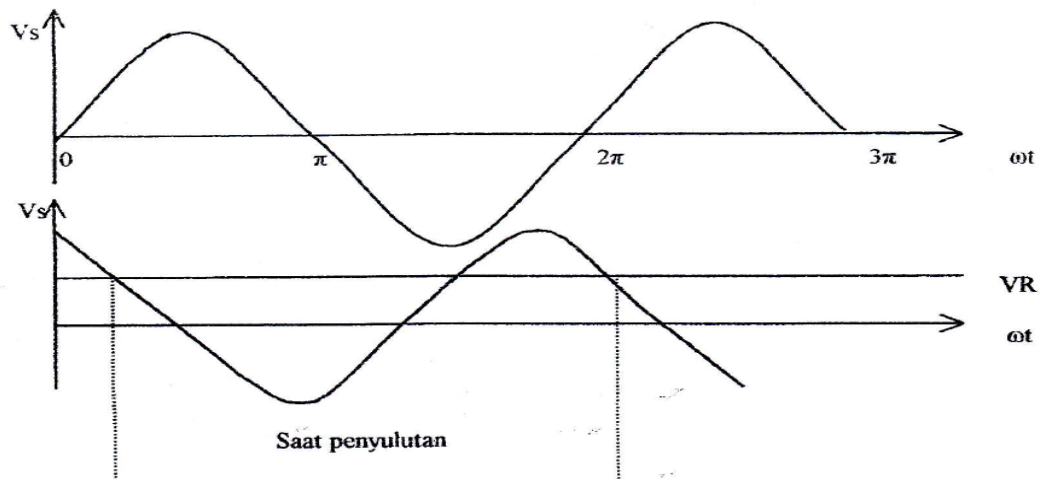
Rangkaian dengan penyulut AC harus ada sinkronisasi sehingga tegangan output sesuai dengan yang diinginkan dan konsep dari membangun rangkaian penyulut adalah :

- a. Membangkitkan gelombang gergaji, kemudian membangkitkannya dengan tegangan DC dan hasil bandingan itu menentukan saat pemberian pulsa penyulut.



Gambar2.24 Konsep membangun rangkaian penyulut dengan gigi gergaji

- b. Menggeser tegangan masukan ke penyearah sedemikian dan kemudian membandingkan dengan tegangan DC constant yang merupakan tegangan control/referensi



Gambar2.25 Konsep membangun rangkaian dengan menggeser tegangan

Dan dari gambar dapat dilihat bahwa titik potong akan berpindah jika VR dirubah amplitudonya. Jika VR sama dengan nilai puncak maka sudut penyalan $\alpha = 0$, dan jika VR negatif sama dengan nilai puncak maka sudut penyalan $\alpha = 180^0$. Jadi pulsa-pulsa penyulut diberikan pada thyristor.

Jika :

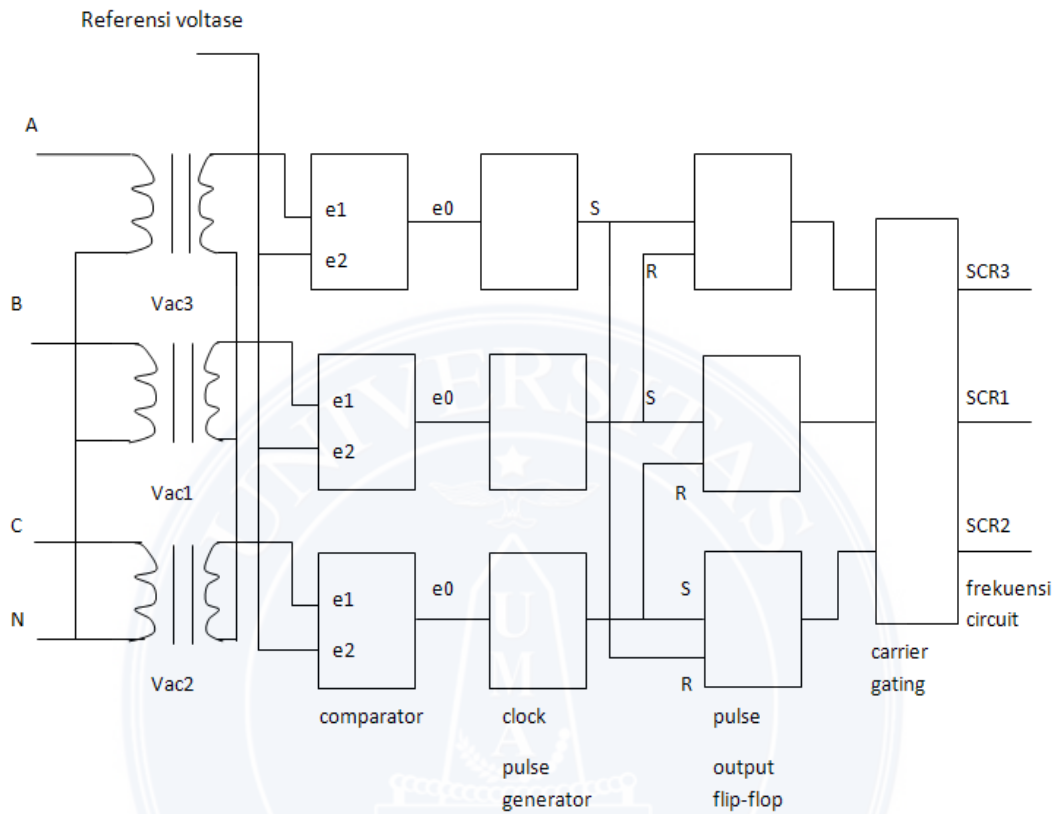
$$V_{maks} \emptyset = V_R \dots\dots\dots (2.14)$$

V_{maks} = Nilai puncak gelombang waktu cosinus

V_R = Tegangan referensi

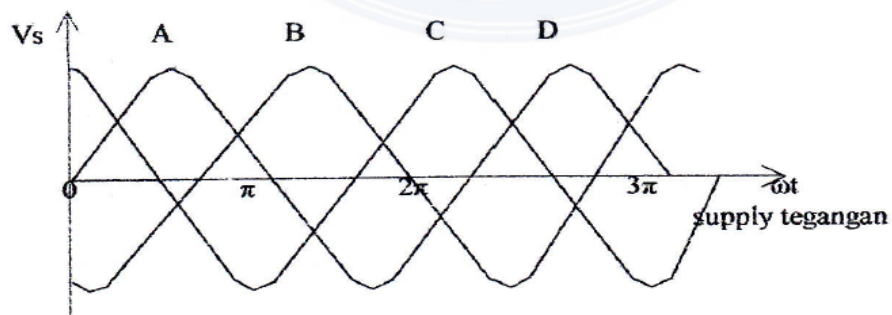
$$\emptyset = \alpha \text{ (sudut penyalan)} \dots\dots\dots (2.15)$$

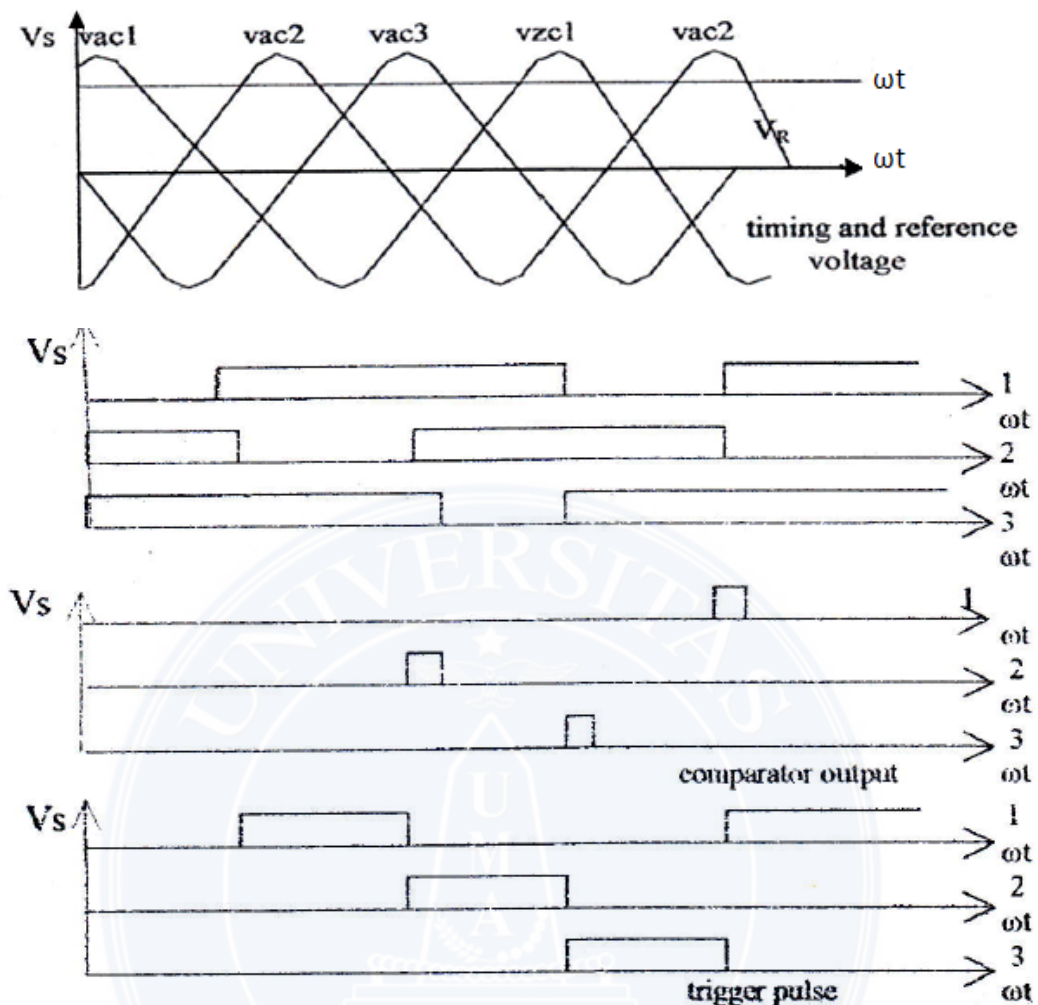
Untuk memperjelas prinsip diatas dapat digambarkan skema rangkaian penyulut SCR pada penyearah setengah terkendali tiga fasa terlihat pada gambar 2.26 dibawah.



Gambar2.26 Skema rangkaian penyulut

Bentuk gelombang saat-saat penyulutan dari gambar diatas dapat digambarkan pada gambar 2.27 dibawah ini.





Gambar2.27 Time chart sinyal skema penyulut

Dengan menghubungkan sekunder trafo dengan komparator seperti pada gambar penyulut maka tegangan pewartu cosinus yang masuk ke komparator 1 terdahulu 60^0 dari tegangan fasa A yang masuk ke penyearah. Demikian juga tegangan waktu cosinus yang masuk ke komparator II dan III masing-masing terdahului 60^0 dari tegangan fasa B dan C.

Tegangan yang masuk ke komparator adalah tegangan referensi dan tegangan pewartu cosinus. Keluaran komparator adalah berubah jika tegangan pewartu cosinus mulai lebih kecil, dan saat tersebut adalah pemberian pulsa penyulut ke SCR yang terhubung ke fasa A. Generator fulsa jam menghasilkan

pulsa pendek saat keluaran komparator yang menjadi masukannya berubah dari rendah ke tinggi. Keluarannya digunakan untuk menset agar keluaran flip-flop tinggi dan menreset flip-flop yang sebelumnya keluarannya tinggi. Dengan cara ini tidak akan terjadi penyulutan dua SCR atau lebih secara bersamaan. Pada skema ini diinginkan pemberian pulsa penyulut panjang (diberikan selama SCR konduksi) sehingga memperkecil ukuran transformator yang memisahkan rangkaian penyulut dengan rangkaian SCR. Jadi apabila melihat skema diatas maka untuk mengubah sudut penyalan digunakan dengan cara merubah tegangan referensi.

2.5.1. Catu Daya

Catu daya digunakan untuk mencatu masukan-masukan tegangan kerja semua op-amp (penguat) pada rangkaian. Pada penguat daya yang diberikan pada beban lebih besar dari pada yang diperoleh dari sumber sinyal, dan asal sumber daya tambahan ini adalah penguat membutuhkan catu daya untuk operasi.

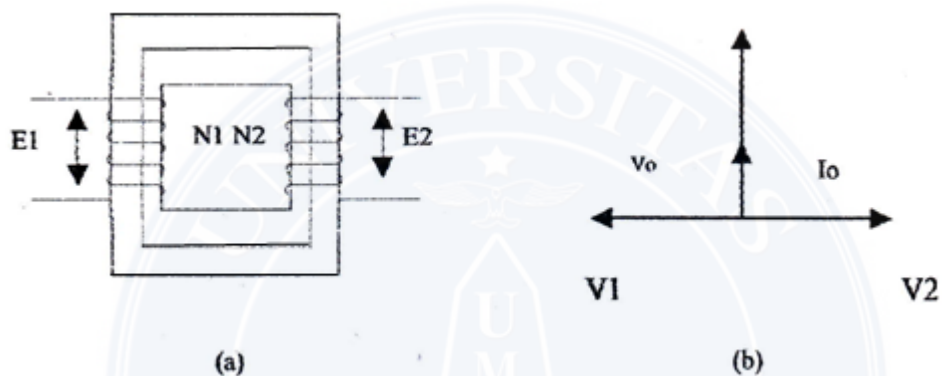
Catu daya adalah tegangan DC yang sudah disearahkan pada dioda dan juga denyut DC yang diratakan kapasitor sebagai filter. Catu daya yang digunakan biasanya adalah catu daya tegangan simetris dengan penstabil tegangan. Tegangan simetris ini disearahkan pada dioda jembatan.

2.5.1.1. Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari suatu rangkaian ke rangkaian listrik lainnya, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan secara luas, baik dalam bidang tenaga

listrik maupun elektronik. Dalam bidang elektronika, transformator digunakan antara lain sebagai gandengan impedansi atau sumber dan beban, untuk memisahkan satu rangkaian dengan rangkaian yang lain, dan untuk menghambat arus searah sambil tetap melakukan atau mengalirkan arus bolak-balik antar rangkaian. Kerja transformator berdasarkan induksi elektromagnetik, dimana menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan sekunder.

Gandengan ini merupakan inti besi tempat melakukan fluks bersama.



Gambar2.28 Transformator tanpa beban

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoid, akan mengalirkan arus primer I_0 yang juga sinusoid dan dengan menganggap N_1 relatif murni. I_0 akan tertinggal 90° dari V_1 (gambar b) arus primer I_0 menimbulkan fluks (Φ) yang sefasa juga berbentuk sinusoid.

$$\Phi = \Phi_{maks} \sin \omega t \dots\dots\dots (2.16)$$

Fluks yang akan menghasilkan tegangan induksi e,

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots (2.17)$$

$$\text{Harga efektif, } E_1 = 4,44 N_1 f \Phi_{maks} \dots\dots\dots (2.18)$$

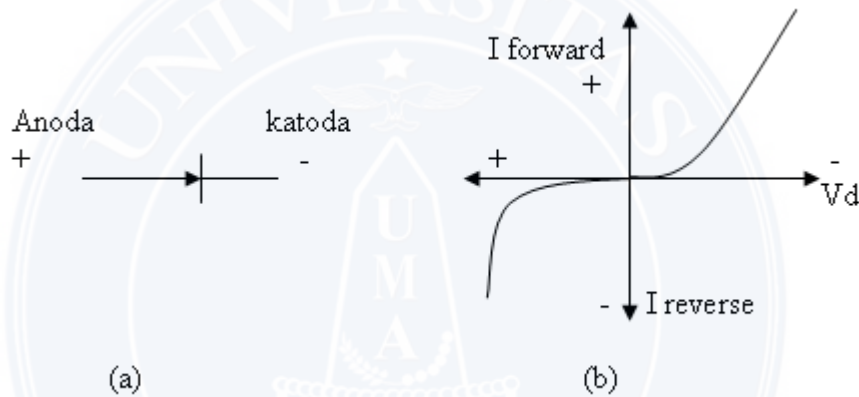
Pada rangkaian sekunder, fluks bersama tadi menimbulkan

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots (2.19)$$

$$E_2 = 4,44 N_2 f \Phi_{maks} \dots\dots\dots (2.20)$$

2.5.1.2. Dioda

Dioda adalah suatu bahan semi konduktor (silicon) yang didesain sedemikian rupa sehingga mampu menghasilkan arus pada satu arah saja.



Gambar2.29 Simbol dan karakteristik dioda

Apabila dioda dibebani tegangan maju, maka dengan tegangan kecil saja (umumnya kira-kira 0,6 volt), akan mengalirkan arus maju. Dengan kenaikan tegangan yang sedikit saja sudah didapat arah maju yang besar. Sebaliknya apabila diberi tegangan balik, maka untuk tegangan yang masih dibawah V_R (pada gambar karakteristik) arus tidak akan mengalir, tetapi untuk tegangan diatas V_R akan mengalir arus balik yang besar. Pada umumnya dioda tidak mampu menahan disipasi daya yang sangat besar ini (karena V_R besar dan arus baliknya juga besar). Tegangan ini tegangan tembus atau break down.

2.5.1.3. Kapasitor

Kapasitor merupakan salah satu komponen yang sangat penting dalam elektronika karena kapasitor mempunyai sifat seperti :

- Dapat menyimpan muatan listrik
- Dapat melewatkan arus bolak-balik
- Dapat menahan arus searah



Gambar2.30 Simbol kapasitor

Kapasitor terdiri dari dua buah plat dari bahan tertentu yang sejajar dan dipisahkan oleh suatu bahan penyekat (dielektrika). Muatan didalam kedua plat ini didistribusikan secara merata keseluruh permukaan plat. Besar kapasitor dalam farad dan tegangan kerja dari kapasitor ditentukan oleh jarak kedua plat, luas penampang plat dan bahan penyekat (dielektrika) antara kedua plat tersebut.

Berdasarkan jenis kapasitor dibedakan atas elektriika yang digunakan demikian juga fungsi yang beraneka ragam diantaranya sebagai perata atau filter, penghubung (coupling), by pass, mencegah lonjatan tegangan, dan lain-lain.

Rumus suatu kapasitor adalah :

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d} \dots\dots\dots (2.21)$$

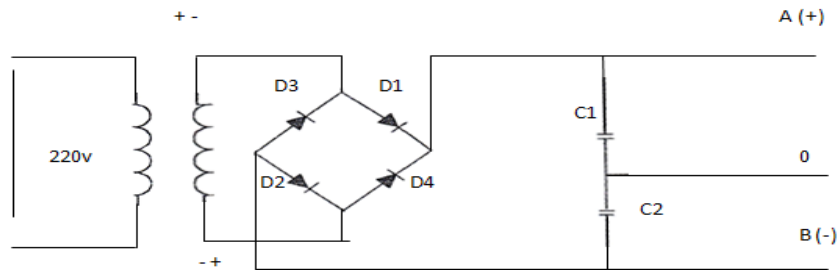
C = Kapasitor (farad)

A = Luas medium

D = Jarak plat

ϵ = Faktor dielektrika

Diantara fungsi kapasitor diatas dimana kapasitor berfungsi untuk meratakan tegangan DC atau menghilangkan ripple. Dan keluaran tegangan DC yang menjadi catu daya untuk rangkaian kontrol.



Gambar2.31 Kapasitor sebagai filter

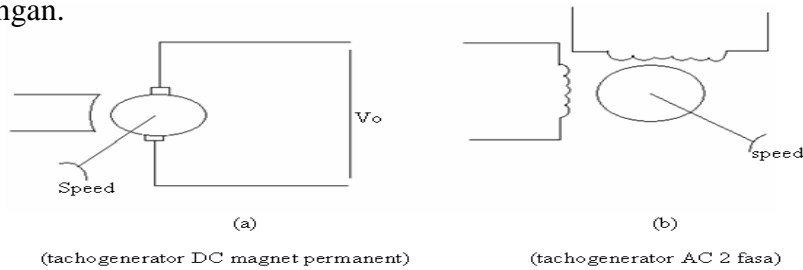
Pada rangkaian kapasitor sebagai filter seperti pada gambar 2.5.1.3b, kapasitor C1 dan C2 sama kapasitasnya jadi tegangan pada saat pengisian kapasitor adalah sama sebesar V_P . Pada saat tegangan kapasitor mencapai V_P maka dioda tidak konduksi, dan tegangan dititik A lebih positif dari titik O dan titik O lebih positif dari titik B sehingga tegangan di A bernilai positif dan titik B bernilai negatif, sedangkan dititik O tegangan sama dengan nol.

2.6. Tacho Generator

Umpan balik adalah suatu gerakan umpan balik derivative murni dimana keluaran dari suatu elemen sebanding dengan laju perubahan (derivative waktu) dari sinyal masukannya. Jika dipakai sebagai suatu peralatan umpan balik hal ini akan membuat perubahan dari keluaran untuk dapat dibandingkan, dihubungkan penambah (summing junction) dengan masukan referensi sistem.

Peralatan umpan balik yang paling umum dari jenis ini adalah tacho generator. Diagram skematik sederhana dari jenis tacho generator diilustrasikan pada gambar berikut. Tacho generator ini karap kali dihubungkan langsung

keporos motor (kopel langsung) dan mengubah kecepatan keluaran menjadi tegangan.



Gambar2.32 Tacho generator

Diagram blok dari gerakan ini ditunjukkan pada gambar berikut ini, dimana K_T adalah konstanta penguatan tacho generator yang diukur dalam volt-detik per radian, walaupun pembuatannya biasanya memberikan spesifikasi dalam volt per 100 rpm. Hubungan antara input dan tacho generator ini dapat dilihat pada blok gambar.



Gambar2.33 Blok diagram presentase pengaruh kecepatan menjadi tegangan dari tacho generator

Sehingga : $(d\theta/dt).K_T = E_o$

Dengan transformasi laplace : $K_T s.\theta(s) = E_o (s)$

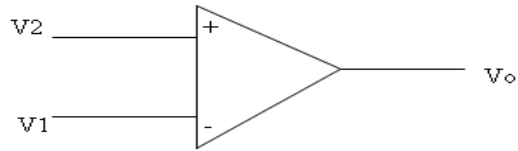
K_T = Konstanta penguat umpan balik

Menghasilkan fungsi transfer = $\frac{E_{o(s)}}{\theta_{(s)}} K_T s$ (2.22)

2.7. Penguat Operasional

Pada dasarnya sebuah Op-amp merupakan kopling langsung dengan tegangan yang tinggi dan dapat menguatkan sinyal-sinyal dalam batas frekwensi yang lebar termasuk sinyal DC. Op-amp bukan hanya digunakan debagai penguat

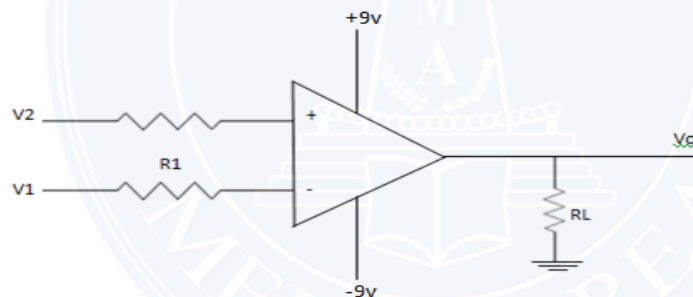
umpan balik negatif, tetapi juga untuk pembentukan gelombang, penyaringan dan operasi matematis.



Gambar2.34 Simbol Op-amp

Bila melihat gambar diatas, kita misalkan jika V_1 lebih besar dari V_2 , tegangan kesalahan adalah positif dan tegangan outputnya menjadi keharga positif maksimumnya dan secara tipikal 1 sampai 2 volt kurang dari tegangan catu. Jika V_1 kurang dari V_2 maka tegangan outputnya berayun ke harga negatif maksimum.

a. Op-amp sebagai pembanding tegangan



Gambar2.35 Op-amp sebagai pembanding

Pada gambar dibalik menunjukkan pembanding tegangan sederhana. Dalam konfigurasi yang paling sederhana, modus loop terbuka. Diantara kedua masukan terjadi perbedaan tegangan maka op-amp akan berayun kedalam saturasi. Arah saturasi keluaran ditentukan oleh polaritas sinyal masukan. Bila tegangan masukan V_1 lebih positif dibandingkan tegangan masukan V_2 maka keluaran berayun menuju saturasi negatif. Sebaliknya jika V_2 lebih besar dari V_1 maka keluaran akan berayun ke saturasi positif.

Rangkaian diatas dapat dirumuskan :

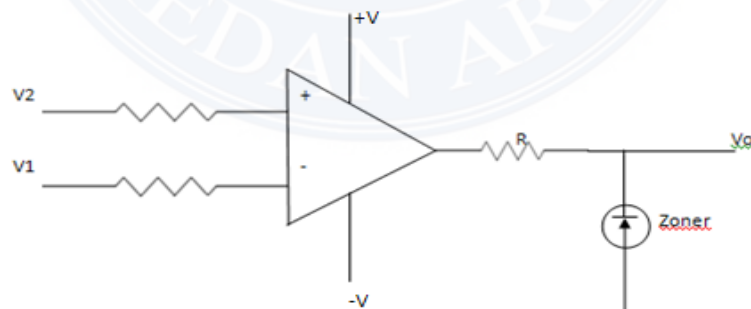
$$V_{Out} = V_{Sat} \times \text{Signal}(V_2 - V_1) \dots\dots\dots (2.23)$$

Dalam hal ini pembanding pada sistem kontrol digunakan untuk membandingkan tegangan referensi dengan tegangan umpan balik. Dalam hal ini tegangan referensi dimisalkan V_1 dan V_2 merupakan tegangan umpan balik, maka tegangan kesalahannya adalah :

$$V_s = V_1 - V_2 \dots\dots\dots (2.24)$$

Maka akan di dapat tegangan kesalahan, dan tegangan kesalahan ini akan diperbaiki oleh kontroller sehingga tegangan kesalahan tidak ada lagi atau sama dengan nol.

Op-amp sebagai pembanding pada rangkaian penyulut, maka op-amp digunakan sebagai komparator. Komparator adalah suatu rangkaian yang membandingkan suatu tegangan masukan dengan tegangan referensi. Keluaran komparator menunjukkan apakah sinyal masukan diatas atau dibawah tegangan referensi. Jika tegangan keluaran komparator lebih besar dari yang diperlukan, maka dibatasi dengan menggunakan diode zener yang sesuai.

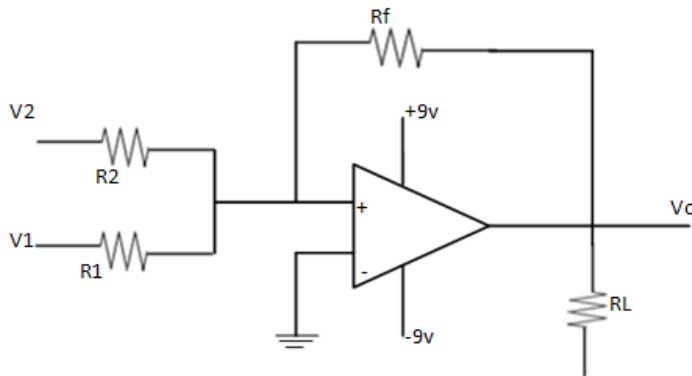


Gambar2.36 Pembatas keluaran komparator dengan dioda zener

$$\text{Jika } V_{in} > V_{ref} \text{ maka } V_o = +V_s \dots\dots\dots (2.25)$$

$$\text{Jika } V_{in} < V_{ref} \text{ maka } V_o = -V_s \dots\dots\dots (2.26)$$

b. Op-amp sebagai penjumlah tegangan



Gambar2.37 Op-amp sebagai penjumlah tegangan

Gambar diatas menunjukkan penjumlahan tegangan untuk dua masukan atau lebih, juga tegangan keluar dapat dirumuskan dimana tegangan keluar sama dengan hasil resistor masukan dengan hasil resistor umpan balik yang bersesuaian.

Dari rangkaian itu dapat dirumuskan beberapa tegangan outputnya :

$$V_{out} = -(R_f/R_1) V_1 + (R_f/R_2) + \dots + (R_f/R_n) V_n$$

Jika $R_f = R_1 = R_2 = \dots = R_n$

$$V_{out} = -(V_1 + V_2 + \dots + V_n) \dots \dots \dots (2.27)$$

Penggunaan Op-amp sebagai penjumlahan dalam suatu sistem kontrol ini adalah menjumlahkan keluaran controller, keluaran atau hasil penjumlahan ini menjadi masukan ke rangkaian penyulut untuk menyulut SCR pada konverter.