



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Motor arus searah (motor DC) adalah mesin yang mengubah energi listrik arus searah menjadi energi mekanis.¹ Sebuah motor listrik berfungsi untuk mengubah daya listrik menjadi daya mekanik. Pada prinsip pengoperasiannya, motor arus searah sangat identik dengan generator arus searah. Kenyataannya mesin yang bekerja sebagai generator arus searah akan dapat bekerja sebagai motor arus searah. Oleh sebab itu, sebuah mesin arus searah dapat digunakan baik sebagai motor arus searah maupun generator arus searah.

Berdasarkan fisiknya motor arus searah secara umum terdiri atas bagian yang diam dan bagian yang berputar. Pada bagian yang diam (stator) merupakan tempat diletakkannya kumparan medan yang berfungsi untuk menghasilkan fluksi magnet sedangkan pada bagian yang berputar (rotor) ditempati oleh rangkaian jangkar seperti kumparan jangkar, komutator dan sikat.

Motor arus searah bekerja berdasarkan prinsip interaksi antara dua fluksi magnetik. Dimana kumparan medan akan menghasilkan fluksi magnet yang arahnya dari kutub utara menuju kutub selatan dan kumparan jangkar akan menghasilkan fluksi magnet yang melingkar. Interaksi antara kedua fluksi magnet ini menimbulkan suatu gaya sehingga akan menimbulkan momen puntir atau torsi.

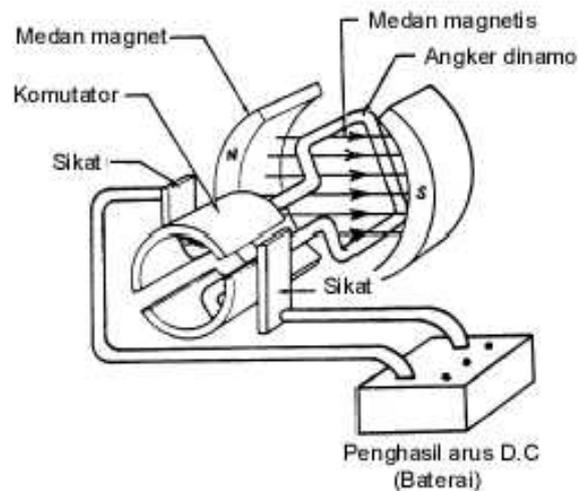
²Motor listrik merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Energi mekanik ini digunakan untuk, misalnya, memutar *impeller* pompa, fan atau blower, menggerakkan kompresor. Motor listrik digunakan juga dirumah (mixer, bor listrik, fan angin) dan di industri. Motor listrik kadangkala disebut “Kuda kerja” nya industri sebab diperkirakan bahwa motor-motor menggunakan sekitar 70% beban listrik total di industri.

¹ Yon Rijono, Dasar Tenaga Listrik, (Yogyakarta ; 1997) hlm :163

² Drs Daryanto, konsep Dasar Teknik Elektronika Kelistrikan Edisi Kesatu (Bandung : Alfabeta, 2014), hlm. 91

Motor DC terdapat dalam berbagai ukuran dan kekuatan, masing- masing didisain untuk keperluan yang berbeda-beda namun secara umum memiliki berfungsi dasar yang sama yaitu mengubah energi elektrik menjadi energi mekanik. Sebuah motor DC sederhana dibangun dengan menempatkan kawat yang dialiri arus di dalam medan magnet kawat yang membentuk loop ditempatkan sedemikian rupa diantara dua buah magnet permanen. Bila arus mengalir pada kawat, arus akan menghasilkan medan magnet sendiri yang arahnya berubah-ubah terhadap arah medan magnet permanen sehingga menimbulkan putaran.

³Keuntungan pemakaian motor DC terletak didalam berbagai karakteristik penampilan yang diberikan oleh banyaknya kemungkinan dari peneralan shunt, seri dan Kompon. Masih banyak lagi kemungkinan yang ada jika ditambahkan lagi seperangkat sikat sehingga diperoleh tegangan lain dari komutator. Jadi keluasan dari pemakaian dari system mesin DC dan mudahnya dipasangkan sistem pengaturannya, baik secara manual maupun otomatis.

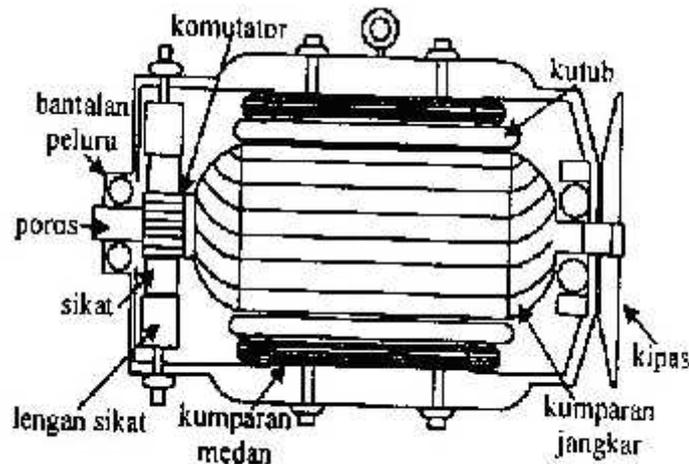


Gambar 2.1 Motor Arus Searah Sederhana

³ Fitzgerald, A.E. and Team, "Mesin-mesin listrik"., (Jakarta, Erlangga, 1997) hlm : 221

2.2 Konstruksi Motor Arus Searah

Gambar di bawah ini merupakan konstruksi motor arus searah.



Gambar 2.2 Konstruksi motor arus searah

Keterangan dari gambar diatas adalah :

2.2.1 Badan motor (rangka)

Rangka (frame atau yoke) mesin arus searah seperti juga mesin-mesin listrik lainnya secara umum memiliki dua fungsi, yaitu :

- Merupakan sarana pendukung mekanik untuk mesin secara keseluruhan;
- Untuk membawa fluks magnetik yang dihasilkan oleh kutub-kutub magnet.

Untuk mesin kecil, pertimbangan harga lebih dominan dari pada beratnya, biasanya rangkanya terbuat dari besi tuang (*cast iron*), tetapi untuk mesin-mesin besar umumnya terbuat dari baja tuang (*cast steel*) atau lembaran baja (*rolled steel*). Rangka ini pada bagian dalam dilaminasi untuk mengurangi rugi-rugi inti, selain itu rangka ini juga harus memiliki permeabilitas yang tinggi, disamping kuat secara mekanik. Biasanya pada motor terdapat papan nama (*name plate*) yang bertuliskan spesifikasi umum atau data-data teknik dari mesin, juga terdapat kotak ujung yang merupakan tempat-tempat ujung-ujung belitan penguat medan dan lilitan jangkar.



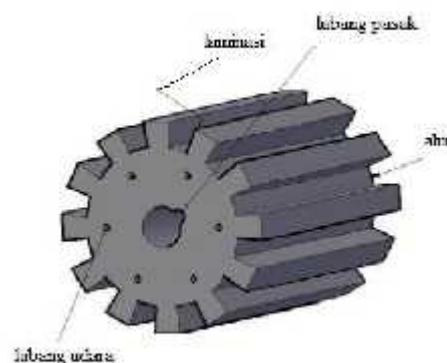
2.2.2 Kutub

Kutub medan terdiri atas inti kutub dan sepatu kutub. Sepatu kutub yang berdekatan dengan celah udara dibuat lebih besar dari badan inti. Adapun fungsi dari sepatu kutub adalah :

- Sebagai pendukung secara mekanis untuk kumparan medan;
- Menghasilkan distribusi fluksi yang lebih baik yang tersebar diseluruh jangkar dengan menggunakan permukaan yang melengkung.

2.2.3 Inti jangkar

Inti jangkar umum digunakan dalam motor arus searah adalah berbentuk silinder yang diberi alur-alur pada permukaannya untuk tempat melilitkan kumparan-kumparan tempat terbentuknya GGL induksi. Inti jangkar yang terbuat dari bahan *ferromagnetik*, dengan maksud agar komponen-komponen (lilitan jangkar) terletak dalam daerah yang induksi magnetnya besar, supaya ggl induksi dapat bertambah besar. Seperti halnya inti kutub magnet maka jangkar dibuat dari bahan berlapis- lapis tipis untuk mengurangi panas yang terbentuk karena adanya arus linier ditunjukkan pada gambar 2.3



Gambar 2.3 Inti jangkar yang berlapis-lapis

Bahan yang digunakan untuk jangkar ini sejenis campuran baja silikon. Pada umumnya alur tidak hanya diisi satu kumparan yang tersusun secara berlapis.



2.2.4 Kumparan Jangkar

Kumparan jangkar pada motor arus searah merupakan tempat dibangkitkannya ggl induksi. Pada motor DC penguatan kompon panjang kumparan medannya diserikan terhadap kumparan jangkar, sedangkan pada motor DC penguatan kompon pendek kumparan medan serinya dipararel terhadap kumparan jangkar.

2.2.5 Kumparan medan

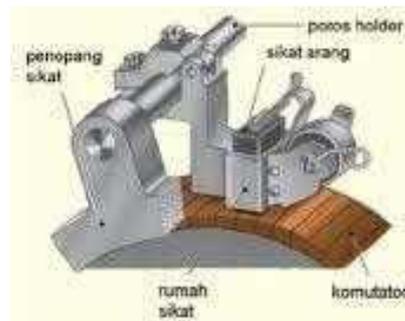
Kumparan medan adalah susunan konduktor yang dibelitkan pada inti kutub. Rangkaian medan yang berfungsi untuk menghasilkan fluksi utama dibentuk dari kumparan pada setiap kutub. Pada aplikasinya rangkaian medan dapat dihubungkan dengan kumparan jangkar baik seri maupun paralel dan juga dihubungkan tersendiri langsung kepada sumber tegangan sesuai dengan jenis penguatan pada motor.

2.2.6 Komutator

Untuk memperoleh tegangan searah diperlukan alat penyearah yang disebut komutator dan sikat. Komutator terdiri dari sejumlah segmen tembaga yang berbentuk lempengan-lempengan yang dirakit ke dalam silinder yang terpasang pada poros. Dimana tiap-tiap lempengan atau segmen-segmen komutator terisolasi dengan baik antara satu sama lainnya.

2.2.7 Sikat-Sikat

Sikat-sikat ini (gambar 2.4) berfungsi sebagai jembatan bagi aliran arus ke kumparan jangkar. Dimana permukaan sikat ditekan ke permukaan segmen komutator untuk menyalurkan arus listrik. Besarnya tekanan pegas dapat diatur sesuai dengan keinginan.



Gambar 2.4 Sikat-Sikat

Disamping itu sikat memegang peranan penting untuk terjadinya komutasi. Karbon yang ada diusahakan memiliki konduktivitas yang tinggi untuk mengurangi rugi-rugi listrik. Agar gesekan antar komutator-komutator dan sikat tidak mengakibatkan ausnya komutator. Maka sikat harus lebih lunak dari pada komutator.

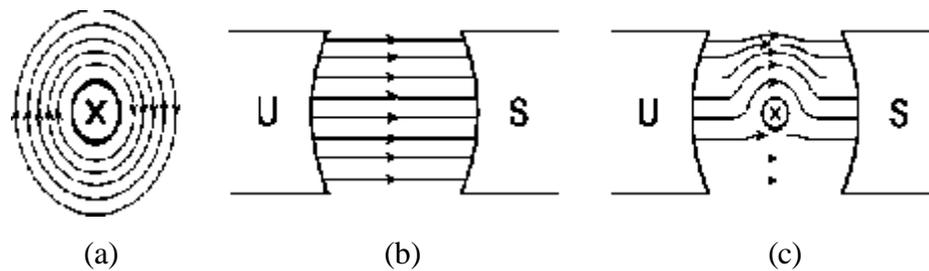
2.2.8 Celah udara

Celah udara merupakan ruang atau celah antara permukaan jangkar dengan permukaan sepatu kutub yang menyebabkan jangkar tidak bergesekan dengan sepatu kutub. Fungsi dari celah udara adalah sebagai tempat mengalirnya fluksi yang dihasilkan oleh kutub-kutub medan.

2.3 Prinsip Kerja Motor Arus Searah⁴

Sebuah konduktor yang dialiri arus mempunyai medan magnet disekelilingnya. Pada saat konduktor yang dialiri arus listrik yang ditempatkan pada suatu medan magnet maka konduktor akan mengalami gaya mekanik, seperti diperlihatkan pada gambar:

⁴ Yon rijono, op.cit, hlm : 162



Gambar 2.5 pengaruh penempatan konduktor berarus dalam medan magnet

Gambar 2.5 (a) menggambarkan sebuah konduktor yang dialiri arus listrik menghasilkan medan magnet disekelilingnya. Arah medan magnet yang dihasilkan oleh konduktor dapat diperoleh dengan menggunakan kaidah tangan kanan. Kuat medan tergantung pada besarnya arus yang mengalir pada konduktor.

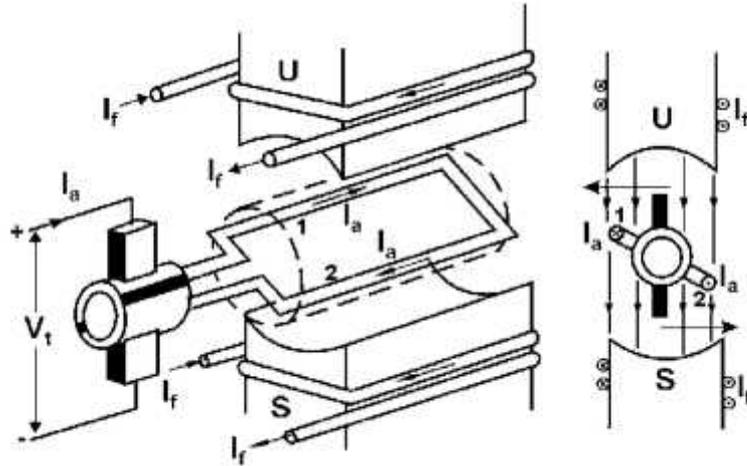
Sedangkan gambar 2.5 (b) menunjukkan sebuah medan magnet yang arah medan magnetnya adalah dari kutub utara menuju kutub selatan. Pada saat konduktor dengan arah arus menjauhi pembaca ditempatkan didalam medan searagam maka medan gabungannya akan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5 (c) daerah di atas konduktor, medan yang ditimbulkan konduktor, medan yang ditimbulkan konduktor adalah dari kiri ke kanan, atau pada arah yang sama dengan medan utama. Hasilnya adalah memperkuat medan atau menambah kerapatan fluksi di atas konduktor dan melemahkan medan atau mengurangi kerapatan fluksi di bawah konduktor.

Dalam keadaan ini, fluksi di daerah di atas konduktor yang kerapatannya bertambah akan mengusahakan gaya ke bawah kepada konduktor, untuk mengurangi kerapatannya. Hal ini menyebabkan konduktor mengalami gaya berupa dorongan ke arah bawah. Begitu juga halnya jika arah arus dalam konduktor dibalik. Kerapatan fluksi yang berada di bawah konduktor akan bertambah sedangkan kerapatan fluksi di atas konduktor berkurang. Sehingga konduktor akan mendapatkan gaya tolak ke arah atas.

Konduktor yang mengalirkan arus dalam medan magnet cenderung bergerak tegak lurus terhadap medan.



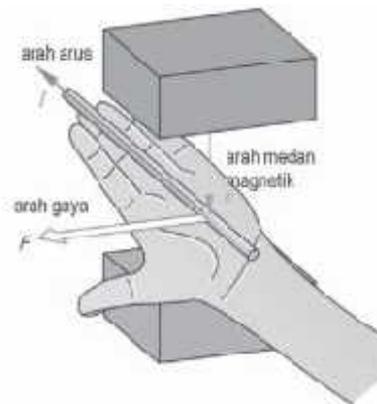
Prinsip kerja sebuah motor arus searah dapat dijelaskan dengan gambar berikut ini.



Gambar 2.6 Prinsip perputaran motor DC

Pada saat kumparan medan dihubungkan dengan sumber tegangan, mengalir arus medan I_f pada kumparan medan karena rangkaian tertutup sehingga menghasilkan fluksi magnet yang arahnya dari kutub utara menuju kutub selatan. Selanjutnya ketika kumparan jangkar dihubungkan kesumber tegangan, pada kumparan jangkar mengalir arus jangkar I_a . Arus yang mengalir pada konduktor-konduktor kumparan jangkar menimbulkan fluksi magnet yang melingkar. Fluksi jangkar ini memotong fluksi dari kutub medan, sehingga menyebabkan perubahan kerapatan fluksi dari medan utama. Hal ini menyebabkan jangkar mengalami gaya sehingga menimbulkan torsi.

Gaya yang dihasilkan pada setiap konduktor dari sebuah jangkar, merupakan akibat aksi gabungan medan utama dan medan disekeliling konduktor. Gaya yang dihasilkan berbanding lurus dengan besar fluksi medan utama dan kuat medan di sekeliling konduktor. Medan di sekeliling masing-masing konduktor jangkar tergantung pada besarnya arus jangkar yang mengalir pada konduktor tersebut. Arah gaya ini dapat ditentukan dengan kaidah tangan kiri.



Gambar 2.7 Aturan Tangan Kiri Penentuan Arah Gerak Kawat Berarus⁵

Besarnya gaya $F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha$, karena arus jangkar (I) tegak lurus dengan arah induksi magnetik (B) maka besar gaya yang dihasilkan oleh arus yang mengalir pada konduktor jangkar yang ditempatkan dalam suatu medan adalah :

$$F = B \cdot I \cdot l \text{ Newton} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

- F = Gaya lorenz (Newton)
- I = Arus yang mengalir pada konduktor jangkar (Ampere)
- B = Kerapatan fluksi (Weber/m^2)
- L = Panjang konduktor jangkar (m)

Sedangkan torsi yang dihasilkan motor dapat ditentukan dengan:

$$T = F \cdot r \dots\dots\dots (2.2)$$

Bila torsi yang dihasilkan motor lebih besar dari pada torsi beban maka motor akan berputar. Besarnya torsi beban dapat dituliskan dengan:

$$T = K \cdot \Phi \cdot I_a \dots\dots\dots (2.3)$$

$$K = \frac{P \cdot Z}{2 \pi} \dots\dots\dots (2.4)$$

⁵ Yon rijono, op.cit, hlm :163



Hubungan antara kecepatan fluks medan dan tegangan motor DC ditunjukkan dalam persamaan berikut :

Gaya Elektromagnetik

$$E_a = k \cdot n \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana :

E_a = gaya elektromagnetik yang dikembangkan pada terminal motor DC (volt)

n = kecepatan motor DC

T = torsi (N-m)

K = konstanta (bergantung pada ukuran fisik motor)

Φ = fluksi setiap kutub

I_a = arus jangkar (A)

P = jumlah kutub

z = jumlah konduktor a = cabang paralel

2.4 GGL Lawan Pada Motor Arus Searah

Ketika jangkar motor berputar konduktornya juga berputar dan memotong fluksi utama. Sesuai dengan hukum faraday, akibat gerakan konduktor di dalam suatu medan magnetik maka pada konduktor tersebut akan timbul GGL induksi yang diinduksikan pada konduktor tersebut dimana arahnya berlawanan dengan tegangan yang diberikan pada motor. Karena arahnya melawan, maka hal tersebut disebut GGL lawan.

Besarnya tegangan yang diinduksikan tersebut sesuai dengan persamaan berikut :

$$E_b = \frac{P \cdot Z}{a \cdot 60} n \cdot \Phi \dots\dots\dots (2.6)$$

Persamaan tegangan secara umum dapat ditulis sebagai berikut :

$$E_b = K \cdot n \cdot \Phi \dots\dots\dots (2.7)$$

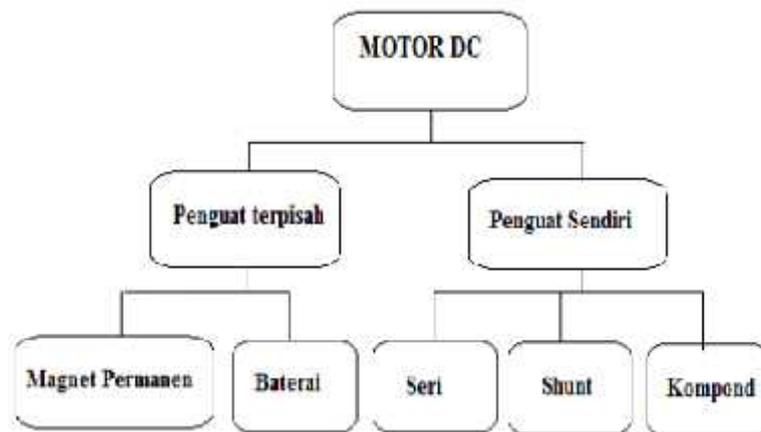
Dimana :

$$K = \text{konstanta} = \frac{P \cdot Z}{a \cdot 60} \dots\dots\dots (2.8)$$



2.5 Macam-Macam Motor Arus Searah⁶

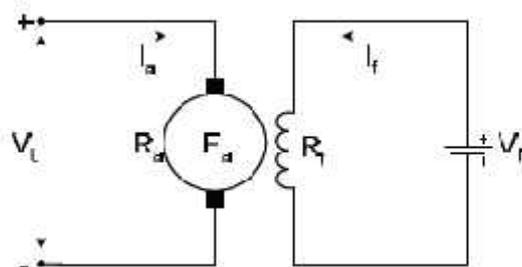
Jenis-jenis motor arus searah dapat dibedakan berdasarkan jenis penguatannya, yaitu hubungan rangkaian kumparan medan dengan kumparan jangkar. Sehingga motor arus searah dibedakan menjadi :



Gambar 2.8 Jenis Motor Arus Searah

2.5.1 Motor Arus Searah Penguatan Terpisah

Motor arus searah penguatan terpisah adalah motor arus searah yang sumber tegangan penguatannya berasal dari luar motor. Di mana kumparan medan disuplai dari sumber tegangan DC tersendiri. Rangkaian ekivalen motor arus searah penguatan bebas dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 2.9 Rangkaian Ekivalen Motor Arus Searah Penguatan Bebas

⁶ Berahim, Hamzah, "Pengantar Teknik Tenaga Listrik".(Yogyakarta, Andi Offset,1991) hlm :47



$$V_t = E_a + I_a R_a \dots\dots\dots (2.8)^7$$

$$V_f = I_f + R_f \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana :

V_t = tegangan terminal jangkar motor arus searah (volt)

I_a = arus jangkar (Amp)

R_a = tahanan jangkar (ohm)

I_f = arus medan penguatan bebas (amp)

R_f = tahanan medan penguatan bebas (ohm)

V_f = tegangan terminal medan penguatan bebas (volt)

E_a = gaya gerak listrik motor arus searah (volt)

Umumnya jatuh tegangan pada sikat relatif kecil sehingga besarnya dapat diabaikan. Untuk rumus selanjutnya V_{sikat} ini diabaikan.

2.5.2 Motor Arus Searah Penguatan Sendiri

Motor arus searah penguatan sendiri adalah Motor arus searah jika arus penguat magnet diperoleh dari motor itu sendiri. Berdasarkan hubungan lilitan penguat magnet terhadap lilitan jangkar motor DC dengan penguat sendiri dapat dibagi atas tiga yaitu:

2.5.2.1 Motor Arus Searah Penguatan Shunt⁸

Pada motor yang dipteral shunt dan motor yang dipteral secara terpisah fluks medan hamper tetap besarnya. Akibatnya, penambahan momen kaku harus disertai dengan penambahan arus armature yang sangat hamper sebanding besarnya dan karenanya dengan sedikit penurunan pada tgl lawan agar penambahan arus tersebut dapat melalui tahanan armature yang kecil. Seperti motor induksi sangkar tupai, motor shunt sesungguhnya merupakan suatu motor berkecepatan tetap yang mempunyai sekitar 5 persen penurunan kecepatan dari

⁷ Berahim, Hamzah, op.cit.halaman :48

⁸ Fitzgerald, A.E. and Team , op.cit., halaman : 220

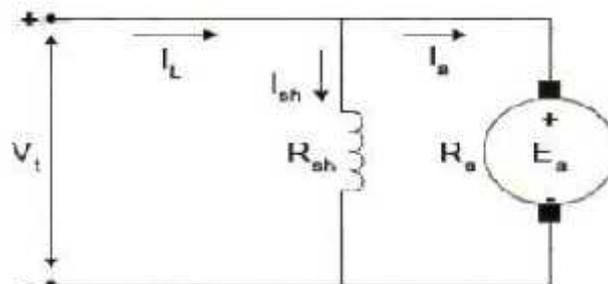


keadaan tanpa beban ke beban penuh. Suatu contoh karakteristik kecepatan beban ditunjukkan berupa kurva garis penuh. Momen-kakas saat dihidupkan dan momen-kakas maksimum dibatasi oleh arus armature yang dapat berkomutasi dengan baik.

Keuntungan yang menonjol dari motor shunt adalah kemudahannya dalam mengatur kecepatannya. Dengan sebuah *rheostat* pada rangkaian medanshunnya, arus medan dan fluks tiap kutub dapat diubah-ubah menurut kemauan kita, dan perubahan fluks menyebabkan perubahan sebaliknya dari kecepatan untuk menjaga tgl lawan kira-kira sama dengan tegangan ujung yang diberikan. Suatu rentang kecepatan maksimum sekitar 4 sampai dengan 5 terhadap 1 dapat diperoleh dengan cara tersebut, dengan pembatasan juga pada keadaan komutasinya. Dengan mengubah-ubah tegangan armature yang diberikan, dapat diperoleh rentang kecepatan yang sangat lebar.

Motor dc jenis shunt pada motor shunt, kumparan medan shunt dibuat dengan banyak lilitan kawat kecil sehingga mempunyai tahanan yang tinggi. Motor shunt mempunyai rangkaian jangkar dan medan yang dihubungkan parallel yang memberikan kekuatan medan dan kecepatan motor yang sangat konstan. Kecepatan motor dapat dikontrol di atas kecepatan dasar. Kecepatan motor akan menjadi berbanding terbalik dengan arus medan. Ini berarti motor shunt berputar cepat dengan arus medan rendah dan berputar lambat pada saat arus medan ditambah. Motor shunt dapat melaju pada kecepatan tinggi jika arus kumparan medan hilang.

Rangkaian ekuivalen motor arus searah penguatan shunt



Gambar 2.10 Motor Arus Searah Penguatan Shunt



Persamaan umum motor arus searah penguatan shunt

$$V_t = E_a + I_a R_a \dots\dots\dots(2.10)$$

$$V_{sh} = V_t = I_{sh} \cdot R_{sh} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$I_L = I_a + I_{sh} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana :

I_{sh} = arus kumparan medan shunt (ohm)

V_{sh} = tegangan terminal medan motor arus searah (volt)

R_{sh} = tahanan medan shunt (ohm)

I_L = arus beban (ampere)

2.5.2.2 Motor Arus Searah Penguatan Seri⁹

Pada motor DC, penambahan beban akan disertai dengan penambahan arus armature dan fluks medan stator (asal besinya tidak jenuh sama sekali). Karena fluks bertambah besar menurut beban, maka kecepatannya harus berkurang untuk menjaga kesetimbangan antara tegangan yang diberikan dan tegangan lawan; selanjutnya, penambahan arus armature yang disebabkan oleh penambahan momen- kakas lebih kecil dari pada yang terdapat pada motor shunt karena penambahan fluks. Karenanya motor seri merupakan suatu motor dengan kecepatan berubah-ubah yang ditandai dengan suatu karakteristik kecepatan beban yang melengkung ke bawah seperti tampak pada gambar 2.10. Pada pemakaian yang memerlukan beban lewat momen-kakas yang berat, karakteristik tersebut sungguh menguntungkan karena beban lewat daya yang bersangkutan dijaga pada harga yang lebih sesuai oleh penurunan kecepatan yang bersangkutan. Karakteristik awal kerja yang baik juga diperoleh dari penambahan fluks menurut penambahan arus armature.

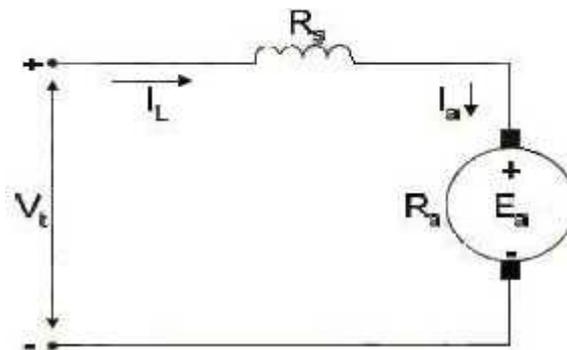
Motor dc jenis seri terdiri dari medan seri dibuat dari sedikit lilitan kawat besar yang dihubungkan seri dengan jangkar. Jenis motor dc ini mempunyai karakteristik torsi start dan kecepatan variable yang tinggi. Ini berarti bahwa motor dapat start atau menggerakkan beban yang sangat berat, tetapi

⁹ Fitzgerald, A.E.and Team, op.cit, halaman :220



kecepatan akan bertambah kalau beban turun. Motor dc seri dapat membangkitkan torsi starting yang besar karena arus yang sama yang melewati jangkar juga melewati medan. Jadi, jika jangkar memerlukan arus lebih banyak, arus ini juga melewati medan, menambah kekuatan medan. Oleh karena itu, motor seri berputar cepat dengan beban ringan dan berputar lambat saat beban ditambahkan.

Rangkaian ekivalen motor arus searah penguatan seri



Gambar 2.11 Motor Arus Searah Penguatan Seri

$$V_a = E_a + I_a (R_a + R_s) \dots \dots \dots (2.13)$$

$$I_a = \left[\frac{V - E}{R + R} \right] \dots \dots \dots (2.14)$$

$$I_a = I_L = I_F \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana :

I_a = arus kumparan medan seri (ampere)

I_L = arus medan seri (ampere)

2.5.2.3 Motor Arus Searah Penguatan Kompon

Motor DC Jenis *Compound* ini menggunakan lilitan seri dan lilitan shunt, yang umumnya digabung sehingga medan-medannya bertambah secara komulatif. Hubungan dua lilitan ini menghasilkan karakteristik pada motor medan shunt dan motor medan seri. Kecepatan motor tersebut bervariasi lebih sedikit dibandingkan motor shunt, tetapi tidak sebanyak motor seri. Motor dc jenis compound juga



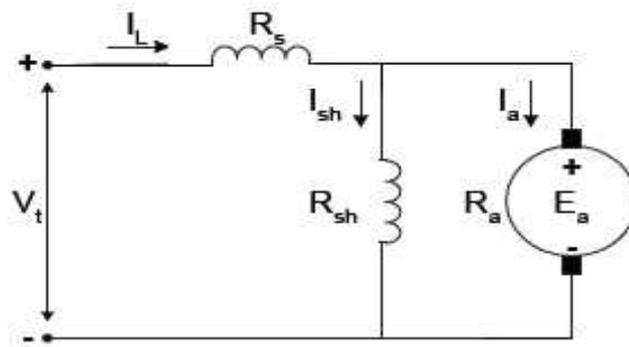
mempunyai torsi starting yang agak besar – jauh lebih besar daripada motor jenis shunt, tapi lebih kecil dibandingkan jenis seri. Keistimewaan gabungan ini membuat motor compound memberikan variasi penggunaan yang luas.

¹⁰Pada motor majemuk (compound) medan seri dapat dihubungkan baik secara *kumulatif*, sehingga agm-nya ditambahkan pada agm yang berasal dari medan shunt-nya, atau secara *diferensial*, sehingga berlawanan. Hubungan diferensial sangat jarang digunakan. Seperti diperlihatkan oleh kurva bergaris putus-putus pada gambar 2. 10, suatu motor majemuk yang dihubungkan secara komulatif mempunyai karakteristik kecepatan beban yang terletak di tenggah-tengah antara motor shunt dan motor seri, dan turunya kecepatan menurut beban tergantung pada jumlah relative dari amper-belitan pada medan shunt dan medan seri. Motor tersebut tidak mempunyai kerugian berupa kecepatan beban ringan yang sangat tinggi yang terdapat pada motor seri, tetapi sampai pada tingkatan tertentu masih mempunyai keuntungan peneralan seri.

Motor arus searah penguatan kompon terbagi atas dua, yaitu:

2.5.2.3.1 Motor Arus Searah Penguatan Kompon Pendek

Rangkaian ekuivalen motor arus searah penguatan Kompon pendek



Gambar 2.12 Motor Arus Searah Penguatan Kompon Pendek

¹⁰ Berahim, Hamzah, op.cit. halaman :53



Persamaan umum motor arus searah penguatan kompon pendek :

$$I_L = I_a + I_{sh} \dots \dots \dots (2.16)$$

$$V_t = E_a + I_a \cdot R_a + I_L \cdot R_s \dots \dots \dots (2.17)$$

$$P_{in} = V_t \cdot I_L \dots \dots \dots (2.18)$$

Dimana :

$I_L \cdot R_s$ = tegangan jatuh pada kumparan seri

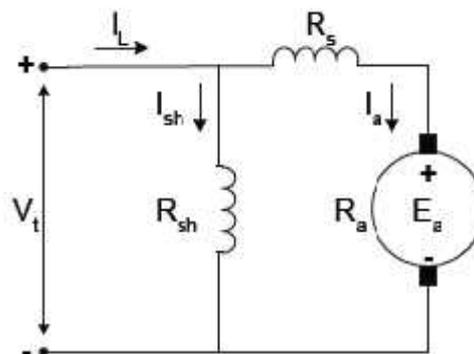
$(I_L)^2 \cdot R_s$ = rugi daya pada kumparan seri

$I_a \cdot R_a$ = tegangan jatuh pada kumparan armatur

$(I_a)^2 \cdot R_a$ = rugi daya armature

2.5.2.3.2 Motor Arus Searah Penguatan Kompon Panjang

Rangkaian ekuivalen motor arus searah penguatan Kompon panjang



Gambar 2.13 Motor Arus Searah Penguatan Terpisah

Persamaan umum motor arus searah penguatan Kompon panjang:

$$I_L = I_a + I_{sh} \dots \dots \dots (2.19)$$

$$V_t = E_a + I_a \cdot (R_a + R_s) \dots \dots \dots (2.20)$$

$$P_{in} = V_t \cdot I_L \dots \dots \dots (2.21)$$

$$V_t = V_{sh} \dots \dots \dots (2.22)$$



Dimana :

$I_L \cdot R_{sr}$ = tegangan jatuh pada kumparan seri

$(I_a)^2 \cdot R_{sr}$ = rugi daya pada kumparan seri

$(I_a)^2 \cdot R_{sh}$ = rugi daya pada kumparan shunt

$(I_a)^2 \cdot R_a$ = rugi daya armature

2.6 Aplikasi Motor DC

Motor listrik ditemukan dalam aplikasi yang beragam seperti industri, blower kipas dan pompa, peralatan mesin, peralatan rumah tangga, alat-alat listrik, dan disk drive. Mereka mungkin didukung oleh (misalnya, perangkat portabel bertenaga baterai atau kendaraan bermotor) langsung saat ini, atau dengan arus bolak-balik dari kotak distribusi sentral listrik. Motor terkecil dapat ditemukan pada jam tangan listrik. Menengah dimensi motor sangat standar dan karakteristik menyediakan tenaga mesin nyaman untuk kegunaan industri. Motor listrik sangat terbesar digunakan untuk penggerak kapal, kompresor pipa, dan pompa air dengan peringkat dalam jutaan watt. Motor listrik dapat diklasifikasikan oleh sumber tenaga listrik, dengan konstruksi internal, dengan aplikasi, atau dengan jenis gerakan yang diberikan.

Untuk motor DC sendiri sudah banyak digunakan dalam berbagai bidang teknologi, antara lain :

- Aplikasi motor DC sebagai penggerak pintu geser pada otomatisasi system monitoring ruangan penyimpanan database menggunakan PLC omron CPM1A I/O 30. Penggerak pintu pada sistem penggerak pintu geser pada otomatisasi sistem monitoring penyimpanan database menggunakan PLC omron CPM1A I/O 20 yang digunakan adalah motor DC. Untuk menggerakkan motor DC diperlukan driver motor DC yaitu driver H-Bridge yang digunakan untuk mengatur motor agar dapat berputar dalam dua arah yaitu forward (searah jarum jam) dan Reverse (berlawanan arah jarum jam). Berputarnya motor DC juga dipengaruhi oleh terhalang tidaknya sensor IR pada pintu. Ketika sensor IR terhalangi maka motor akan membalik putarannya sehingga akan membuka pintu. Jika pintu



dibuka secara paksa maka alarm akan menyala dikarenakan sensor IR terhalangi oleh benda.

- Aplikasi motor DC menggunakan paralel port dalam rangkaian robot sederhana. Motor DC dapat dikendalikan komputer (PC) melalui paralel port. Untuk dapat mengendalikannya, motor DC perlu dihubungkan sedemikian rupa dengan relay, transistor, dan resistor. Pengembangan dari rangkaian pengendali motor DC ini dapat berupa sebuah robot berjalan. Pada robot ini digunakan dua buah motor DC dan empat buah roda, dua roda untuk sisi, dimana tiap motor DC dihubungkan dengan roda depan. Sehingga roda penggeraknya berada di roda depan.

- Aplikasi penyearah Thyristor gelombang penuh satu fasa pada pengendalian arah putaran motor DC untuk membalik arah putaran kekanan dan putaran ke kiri adalah sebagai berikut, terdapat dua kelompok penyearah Thyristor yaitu penyearah 1 dan penyearah 2. Penyearah 1 jika dijalankan, maka motor DC akan berputar kekanan. dan ketika penyearah 2 dijalankan, maka motor DC akan berputar ke kiri. Sedangkan untuk mengatur kecepatan motor DC tersebut, dapat dilakukan dengan mengatur besarnya tegangan yang masuk ke terminal motor DC.

2.7 Pengaturan Kecepatan Putaran Motor Arus Searah

Kecepatan putar motor arus searah dapat diatur dengan :

- Mengatur arus medannya.
- Mengatur tegangan angkernya.
- Mengatur kedua-duanya

Dengan mengatur arus medannya, kecepatan putar motornya hanya dapat dibuat lebih tinggi daripada kecepatan normalnya, seperti dapat dilihat dari rumus

$$E_{t=c} \dots\dots\dots(2.23)$$

Kalau kuat medannya dikurangi, kopelnya akan menjadi lebih kecil. Akan tetapi motornya akan tetap memberi daya maksimumnya, karena kecepatan putarnya meningkat.



Jika kecepatan putar motor arus searah dapat diatur sampai di bawah kecepatan putar normalnya, harus digunakan sebuah tahanan yang dihubungkan seri dengan angker. Karena arus medannya sekarang tetap, motor ini dapat memberi kopel maksimumnya. Akan tetapi daya yang diberikan oleh motor sekarang lebih rendah. Sebagian dari energi yang diberikan kepada motor akan hilang dalam tahanan pengatur yang dihubungkan seri dengan angker.

Biasanya tahanan seri untuk mengatur kecepatan putar ini juga dapat digunakan sebagai tahanan asut. Tetapi sebaliknya tahanan asut tidak dapat digunakan sebagai pengatur kecepatan putar, karena tahanan asut tidak dapat menyalurkannya panas yang timbul didalamnya.

2.8 Thyristor¹¹

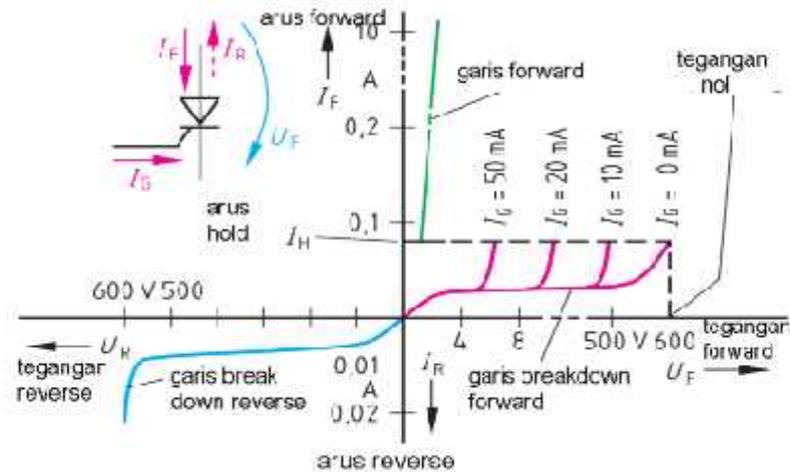
Thyristor berasal dari bahasa Romawi dan memiliki arti “pintu” karena sifat dari komponen ini yang mirip dengan pintu yang dapat dibuka dan ditutup untuk melewatkan arus listrik. *Thyristor* dikembangkan oleh *Belt Laboratories* tahun 1950-an dan mulai dan mulai digunakan secara komersial oleh General Electric tahun 1960-an. *Thyristor* atau SCR (*Silicon Controlled Rectifier*) termasuk dalam komponen elektronik yang banyak dipakai dalam aplikasi listrik industri, salah satu alasannya adalah memiliki kemampuan untuk bekerja dalam tegangan dan arus yang besar. *Thyristor* memiliki tiga kaki, yaitu Anoda, Katoda, dan Gate. Juga dikenal ada dua jenis *Thyristor* dengan P-gate dan N-gate gambar Fungsi Gate pada Thyristor menyerupai basis pada transistor, dengan mengatur arus gate I_a yang besarnya antara 1 mA sampai terbesar 100 mA, maka tegangan keluaran dari anoda bisa diatur, tegangan yang mampu diatur mulai dari 50 Volt sampai 5.000 Volt dan mampu mengatur arus 0,4 A sampai dengan 1500.

Karakteristik *thyristor* memperlihatkan dua variable, yaitu tegangan forward U_f dan tegangan *reverse* U_R dan variable arus forward I_f dan arus *reverse* I_R gambar. Pada tegangan forward U_f , jika arus gate diatur dari 0 mA sampai diatas 50 mA, maka tegangan *reverse* untuk *thyristor* U_R sekitar 600 Volt. Agar *thyristor*

¹¹ Siwoyo, “Teknik Listrik Industri Jilid 3”, (Jakarta, Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jendral Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008) halaman :14



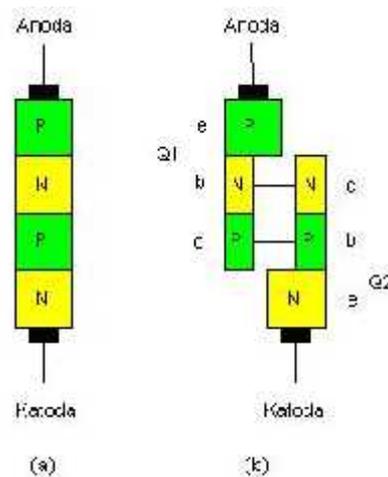
tetap ON, maka ada arus yang tetap dipertahankan disebut arus holding I_H sebesar 5 mA.



Gambar 2.14 Karakteristik Thyristor

2.8.1 konstruksi Thyristor

Pada thyristor konstruksi P-N junction yang dimilikinya lebih kompleks dibanding transistor bipolar atau MOS. Komponen thyristor lebih digunakan sebagai saklar (*switch*) ketimbang sebagai penguat arus tegangan seperti halnya transistor.

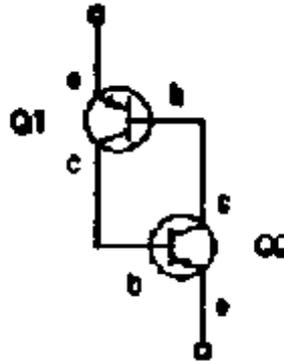


Gambar 2.15 Konstruksi Thyristor

Konstruksi dasar thyristor adalah konstruksi 4 layer PNPN seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. Jika dipilih, konstruksi ini dapat dilihat sebagai dua



buah konstruksi junction PNP dan NPN yang tersambung ditengah seperti pada gambar. Ini tidak lain adalah dua buah transistor PNP dan NPN yang tersambung pada masing-masing kolektor dan base. Jika divisualisasikan sebagai transistor Q1 dan Q2, maka konstruksi thyristor ini dapat diperlihatkan seperti pada gambar berikut.

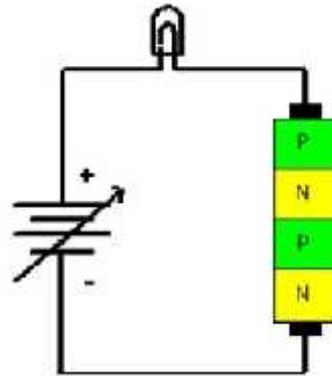


Gambar 2.16 Visualisasi Thyristor Dengan Transistor

Terlihat di sini kolektor transistor Q1 tersambung pada base transistor Q2 dan sebaliknya kolektor transistor Q2 tersambung pada base transistor Q1. Rangkaian transistor yang demikian menunjukkan adanya loop penguatan arus di bagian tengah. Dimana diketahui bahwa $I_c = I_b$, yaitu arus kolektor adalah penguatan dari arus base.

Jika misalnya ada arus sebesar I_b yang mengalir pada base transistor Q2, maka akan ada arus I_c yang mengalir pada kolektor Q2. Arus kolektor ini merupakan arus base I_b pada transistor Q1, sehingga akan muncul penguatan pada pada arus kolektor transistor Q1. Arus kolektor transistor Q1 tidak lain adalah arus base bagi transistor Q2. Demikian seterusnya sehingga makin lama sambungan PN dari thyristor ini di bagian tengah akan mengecil dan hilang. Tertinggal hanyalah lapisan P dan N dibagian luar.

Jika keadaan ini tercapai, maka konstruksi yang demikian tidak lain adalah konstruksi dioda PN (anoda-katoda) yang sudah dikenal. Pada saat yang demikian, disebut bahwa thyristor dalam keadaan ON dan dapat mengalirkan arus dari anoda menuju katoda seperti layaknya sebuah dioda.



Gambar 2.17 Thyristor Diberi Tegangan

Bagaimana kalau pada thyristor ini diberi tegangan beban lampu DC dan diberi suplai tegangan dari nol sampai tegangan 15 Volt seperti gambar 2.11. Apa yang terjadi pada lampu ketika tegangan dinaikkan dari nol. Lampu akan tetap padam karena lapisan N-P yang ada ditengah akan mendapatkan *reverse-bias*. Pada saat ini disebut thyristor dalam keadaan OFF karena tidak ada arus yang bisa mengalir atau sangat kecil sekali. Arus tidak dapat mengalir sampai pada saat suatu *reverse-bias* tertentu yang menyebabkan sambungan NP ini jenuh dan hilang. Tegangan ini disebut tegangan *breakdown* dan pada saat itu arus mulai dapat mengalir melewati thyristor sebagaimana dioda umumnya. Pada thyristor tegangan ini disebut tegangan breakover V_D thyristor.

2.9 Penyearah Terkendali

Penyearah thyristor fasa terkendali merupakan penyearah yang sederhana dan lebih murah dan penyearah ini secara umum berada diatas 95 %. Karena penyearah-penyearah ini mengkonversi dari tegangan AC ke DC, penyearah ini dikenal sebagai konverter AC-DC dan digunakan secara intensif pada aplikasi-aplikasi industri.

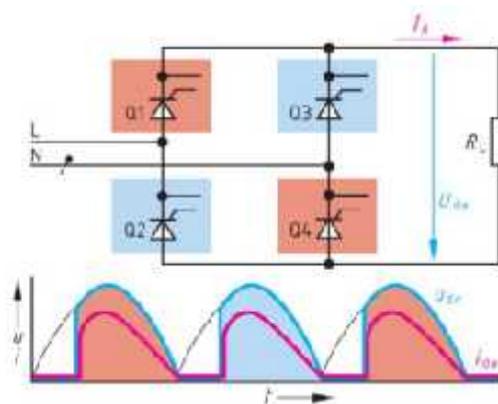
Konverter dengan fasa terkendali dapat diklasifikasikan pada dua tipe, tergantung pada suplai masukan :

1. Konverter satu fasa
2. Konverter tiga fasa



2.9.1 Penyearah Terkendali Gelombang Penuh Satu Fasa¹²

Penyearah terkendali penuh satu fasa dengan empat buah *thyristor* Q1, Q2, Q3 dan Q4 dalam hubungan jembatan gambar 3.4. Pasangan *thyristor* adalah Q1-Q4 dan Q2-Q3, masing-masing diberikan pulsa penyulut pada sudut α untuk siklus positif dan siklus negative tegangan sumber. Dengan beban resistif R_L pada sudut penyalan α maka *thyristor* Q1 dan Q4 akan konduksi bersamaan dan pada tahap berikutnya menyusul *Thyristor* Q2 dan Q3 konduksi. Pada beban resistif R_L bentuk tegangan searah antara tegangan dan arus se-fasa.



Gambar 2.18 Rangkaian Penyearah Terkendali Gelombang Penuh Satu Fasa

¹² Siwoyo, "Teknik Listrik Industri Jilid 3"., (Jakarta, Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jendral Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008) hlm :26