

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor Induksi Tiga Phasa

Motor induksi tiga phasa ibaratkan kuda dalam dunia industry, karena membutuhkan energi listrik yang tidak telalu tinggi, sehingga dapat merubah energi listrik menjadi energi mekanik dengan efisien. Komponen utama dalam motor induksi tiga phasa adalah stator, rotor, dan endshield.[1]

Isolasi elektrik motor berfungsi untuk mencegah short antar konduktor, dan mencegah arus bocor ke ground. Isolasi elektrik motor juga memiliki batas umur, bergantung pada suhu saat motor beroperasi. Kelas isolasi A dapat mencapai suhu 105°C, kelas isolasi B dapat mencapai suhu 130 °C, kelas isolasi F dapat mencapai suhu 155 °C, kelas isolasi H dapat mencapai suhu 180 °C dan kelas isolasi N dapat mencapai suhu 200 °C. [1]

Kegagalan atau kerusakan motor disebabkan oleh kegagalan beberapa faktor. Kerusakan bearing motor mencapai hingga 41%, kerusakan stator mencapai 37%, kerusakan rotor mencapai angka 12%, dan kerusakan akibat alligment 10%. [1]

2.2 Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa

Jenis motor ini memiliki 2 bagian utama, yaitu:

2.2.1 Stator

Kumparan stator berfungsi untuk menghasilkan medan putar yang digunakan untuk perputaran motor sehingga pada motor induksi kumparan stator disebut juga dengan kumparan medan. Stator mempunyai tiga buah kumparan, ujung-ujung belitan kumparan dihubungkan melalui terminal untuk memudahkan penyambungan dengan sumber tegangan. Masing-masing kumparan stator mempunyai beberapa buah kutub, jumlah kutub ini menentukan kecepatan motor tersebut. Semakin banyak jumlah kutubnya maka putaran yang terjadi semakin rendah. [2]

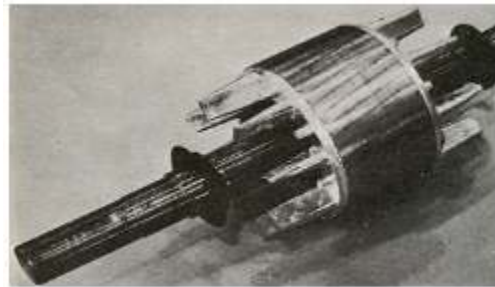
2.2.2 Rotor

Kumparan rotor merupakan bagian yang bergerak akibat adanya induksi magnet dari kumparan stator yang diinduksikan kepada kumparan rotor. Diantara stator dan rotor terdapat celah udara yang merupakan ruangan antara stator dan rotor. Fluksi induksi stator melewati celah udara yang kemudian memotong kumparan rotor sehingga menyebabkan rotor berputar. [2]

Terdapat 2 jenis rotor pada motor induksi, yaitu:

1. Rotor sangkar tupai (*squirrel cage rotor*).

Rotor jenis ini memiliki merupakan rotor dengan kumparan yang terdiri dari beberapa batang konduktor yang disusun sedemikian rupasehingga menyerupai sangkar tupai. Konstruksi rotor seperti ini sangat sederhana bila dibandingkan dengan rotor mesin listrik lainnya. Oleh sebab itu harganya pun murah. konstruksi rotor sangkar dapat dilihat pada Gambar 2.1 dibawah ini. [2]



Gambar 2.1 Konstruksi Rotor Sangkar Tupai

2. Rotor *slip ring* (*wound rotor*)

Rotor jenis ini merupakan rotor dengan belitan kumparan tiga fasa sama seperti kumparan stator. Kumparan stator dan rotor juga mempunyai jumlah kutub yang sama. Karena konstruksinya demikian,

maka dimungkin rotor ini diberikan pengaturan tahanan luar. konstruksi rotor slip ring dapat dilihat pada Gambar 2.2 dibawah ini. [2]



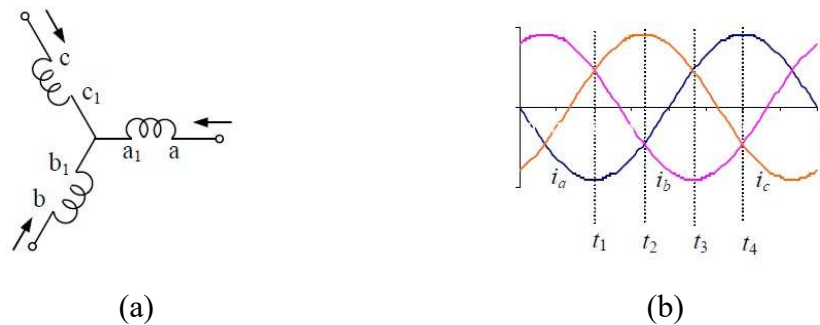
Gambar 2.2 Konstruksi Rotor Slip Ring

2.3 Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi tiga fasa bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik. Pada belitan stator, kita gambarkan sebagai 3 belitan yang terhubung Y dengan beda mekanis 120° antar belitannya seperti terlihat pada gambar 2.3 (a). Kemudian masing-masing belitan dialiri arus I_a, I_b dan I_c dengan beda sudut elektrik 120° seperti terlihat pada gambar 2.3 (b). Masing-masing belitan akan menghasilkan fluksi yang berubah-ubah berdasarkan waktu sesuai arus yang mengalir pada belitan tersebut. [3]

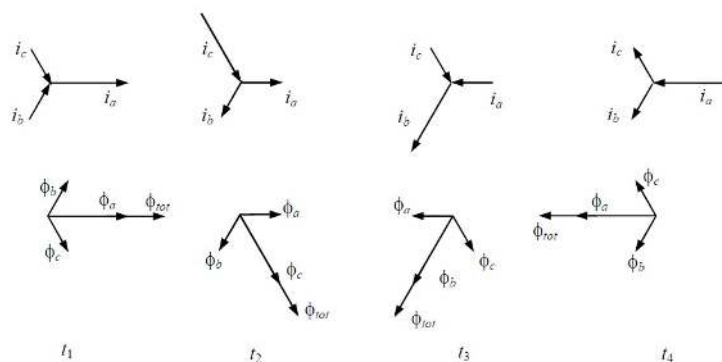
Kalau kita perhatikan Gambar 2.4, pada saat t_1 arus I_a bernilai maksimum negatif dan arus $I_b=I_c$ bernilai positif. Ketiga arus ini membangkitkan fluksi ϕ_a ,

ϕ_b dan ϕ_c yang memberikan fluksi total Φ_{total} . Proses ini berubah pada kondisi t_2 , t_3 , t_4 dan seterusnya. Proses ini menghasilkan fluksi total yang berputar seiring dengan perubahan arus di belitan tiga fasa. Peristiwa ini dikenal sebagai medan putar pada motor induksi. Seperti Gambar 2.3 dan 2.4 dibawah ini.



Gambar 2.3 (a) Belitan stator dengan beda posisi 120° mekanis

(b) Arus i_a , i_b dan i_c dengan beda fasa 120° elektrik



Gambar 2.4 Terbentuknya Fluksi Magnetik yang Berputar

Kecepatan putaran dari medan putar merupakan hubungan antara jumlah kutub, frekuensi tegangan, dan kecepatan putaran sinkron seperti yang sudah diketahui pada mesin sinkron, yaitu:

$$n_s = \frac{120 f_1}{p} \text{ rpm} \quad (2.1)$$

Dimana :

n_s = Kecepatan Sinkron (rpm)

f_1 = Frekuensi Stator (Hz)

P = Jumlah Kutub

Kemudian, medan magnet putar ini akan memotong batang konduktor pada rotor. Akibatnya pada kumparan rotor timbul tegangan induksi dan kumparan rotor sendiri merupakan rangkaian yang tertutup sehingga akan menghasilkan arus. Adanya arus di dalam medan magnet menimbulkan gaya. Melalui gaya ini timbul torsi yang membuat rotor berputar dengan kecepatan tertentu. Agar arus pada rotor tetap ada maka tegangan terinduksi harus dijaga. Oleh sebab itu diperlukan perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator dengan

kecepatan berputar rotor (n_r). Perbedaan kecepatan inilah yang disebut dengan slip (s). [3]

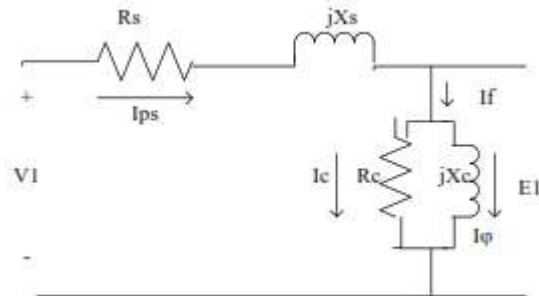
$$S = \frac{n_s - n_r}{n_r} \times 100\% \quad (2.2)$$

2.4 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Tiga Fasa

Rangkaian ekuivalen motor induksi tiga fasa dinyatakan dalam rangkaian satu fasa, terdiri dari:

2.4.1 Rangkaian Ekuivalen Stator.

Jika resistansi belitan stator perfasanya adalah R_s , dan reaktansinya adalah X_s , sedangkan rugi-rugi inti dinyatakan paralel suatu resistansi R_c dan reaktansi X_c , maka rangkaian ekuivalen stator dapat digambarkan pada Gambar 2.5 dibawah ini. [4]



Gambar 2.5 Rangkaian Ekivalen Stator

Tegangan imbas pada stator adalah:

$$E_1 = 4.4fN_1K_{w1}\Phi_m \quad (2.3)$$

Dimana:

K_{w1} = Faktor Belitan Stator

F = Frekuensi Tegangan Stator

Φ_m = Fluksi Maksimum di Celah Stator

N_1 = Jumlah lilitan Belitan Stator

Pada Gambar 2.5, V_1 merupakan tegangan *supply* per fasa pada stator motor induksi dan E_1 merupakan tegangan imbas pada stator maka:

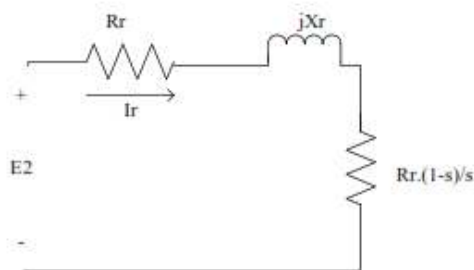
$$V_1 = I_{ps}(R_s + jX_s) + E_1 \quad (2.4)$$

2.4.2 Rangkaian Ekivalen Rotor

Pada kondisi rotor terbuka dan tidak berputar, maka tegangan imbas pada belitan rotor adalah:

$$E_2 = 4.4fN_2 K_{a2} \Phi_m \quad (2.5)$$

Sedangkan pada kondisi rotor berputar pada putaran tertentu, maka terdapat *slip* s , frekuensi tegangan imbas rotor menjadi $f_2 = sf_1$ Hz dan tegangan imbas rotor menjadi $E_2 = sE_2$. Seperti pada Gambar 2.6 dibawah ini. [4]



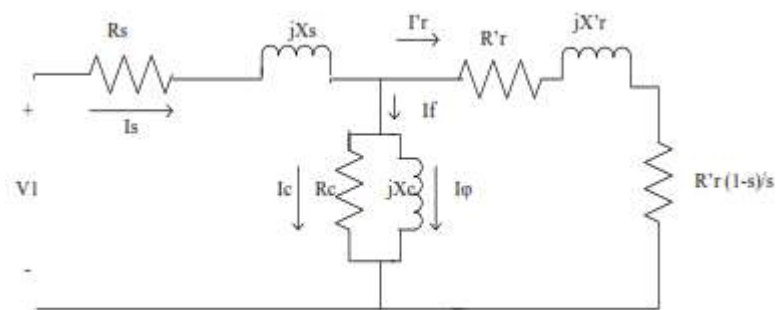
Gambar 2.6 Rangkaian Ekivalen Rotor

Dari rangkaian ekivalen rotor, dapat ditentukan arus rotor I_r dengan persamaan:

$$I_r = \frac{sE_2}{R_r + jX_r} \quad (2.6)$$

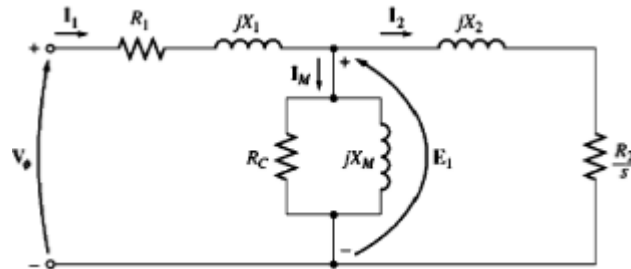
2.4.3 Rangkaian Ekivalen Lengkap

Rangkaian ekivalen lengkap terdiri dari rangkaian ekivalen stator dan rotor. Untuk menghubungkan rangkaian ekivalen stator dan rotor, harus melihat tegangan rotor E_2 dari sisi stator dengan persamaan $E_1 = E_2$. Untuk semua parameter rotor harus dilihat dari sisi stator menjadi $I'r$, $R'r$, $X'r$. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.7 dibawah ini. [4]



Gambar 2.7 Rangkaian Ekivalen Lengkap

Rangkaian ekivalen lengkap motor induksi dapat disederhanakan sebagai berikut pada Gambar 2.8 dibawah ini.



Gambar 2.8 Rangkaian Sederehana Ekivalen Lengkap

Dimana:

$R_2 = R_r$ = resistansi rotor

$X_2 = X_r$ = reaktansi rotor

X_m = reaktansi magnetisasi

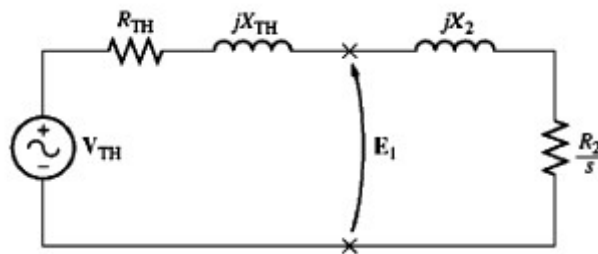
$R_1 = R_s$ = resistansi stator

$X_1 = X_s$ = reaktansi stator

V_ϕ = tegangan per-fasa

2.5 Torsi Elektromagnetik Motor Induksi Tiga Fasa

Salah satu cara mudah untuk menentukan torsi elektromagnetik motor induksi yaitu dengan rangkaian thevenin dari rangkaian ekivalen per fasa motor induksi. Rangkaian thevenin dari motor induksi dapat dilihat pada Gambar 2.9 dibawah ini. [4]

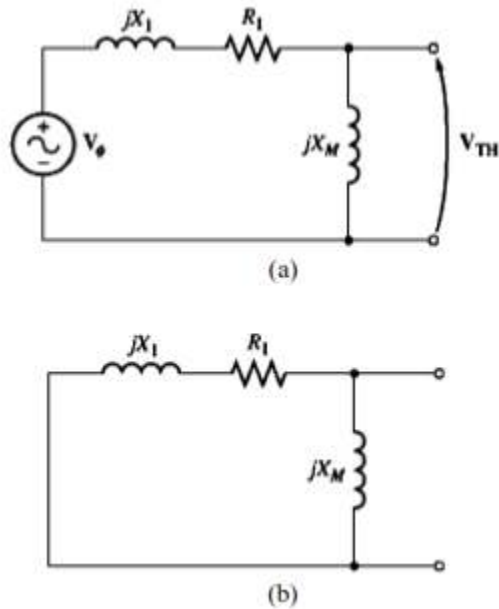


Gambar 2.9 Rangkaian Thevenin Motor Induksi

Dengan R_{TH} adalah resistansi thevenin, jX_{TH} adalah reaktansi thevenin, jX_2 adalah reaktansi rotor, R_2 adalah resistansi rotor, V_{TH} adalah tegangan thevenin, dan s adalah *slip*.

Pada rangkaian thevenin di atas dapat dilihat komponen tegangan thevenin yang disusun seri dengan impedansi thevenin. Penentuan tegangan dan impedansi thevenin dapat dilakukan dengan cara *open-circuit* untuk menghitung tegangan thevenin dan *short-circuit* untuk menghitung impedansi

thevenin pada rangkaian sisi input atau sisi stator motor induksi. Seperti pada Gambar 2.10 dibawah ini [4]



Gambar 2.10 (a) Rangkaian Ekivalen Tegangan Thevenin

(b) Rangkaian Ekivalen Impedansi Thevenin

Dengan jX_1 adalah reaktansi stator, R_1 adalah resitansi rotor, jX_M adalah reaktansi magnetisasi, dan V_ϕ adalah tegangan satu fasa. dari rangkaian ekivalen tegangan thevenin, dapat ditentukan tegangan thevenin dengan persamaan dibawah ini:

$$V_{TH} = \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + jX_M} V_\phi \quad (2.7)$$

$$V_{TH} = \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} V_\phi \quad (2.8)$$

Karena nilai $X_M \gg X_1$ dan $X_M \gg R_1$, maka persamaan di atas menjadi:

$$V_{TH} \approx V_\phi \frac{X_M}{X_1 + X_M} \quad (2.9)$$

Sedangkan dari rangkaian impedansi thevenin, dapat ditentukan impedansi thevenin dengan persamaan:

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + jX_1 + jX_M} \quad (2.10)$$

Karena nilai $X_M \gg X_1$ dan $X_M + X_1 \gg R_1$, maka:

$$R_{TH} \approx R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 \quad (2.11)$$

$$X_{TH} \approx X_1 \quad (2.12)$$

Persamaan torsi elektromagnetik dari motor induksi adalah:

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{\omega_{sync} [(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]} \quad (2.13)$$

Persamaan torsi elektromagnetik saat start dapat diperoleh dengan memasukkan nilai $S=1$ pada persamaan (2.13), maka:

$$\tau_{\text{start}} = \frac{3V_{\text{TH}}^2 R_2}{\omega_{\text{sync}}[(R_{\text{TH}}+R_2)^2+(X_{\text{TH}}+X_2)^2]} \quad (2.14)$$

Sedangkan untuk mengetahui besar nilai torsi beban dari nilai rating daya motor dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\tau_{\text{load}} = \frac{P_{\text{out}}}{\omega_m} \quad (2.15)$$

Dimana:

τ_{load} = Torsi Beban (Kgm²)

P_{out} = Daya Output Motor (Watt)

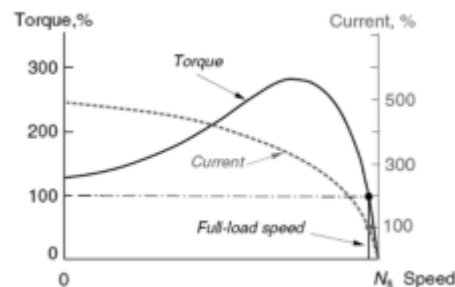
ω_m = Kecepatan Mekanik Beban

2.6 *Starting* Motor Induksi Tiga Fasa

Proses *starting* merupakan proses pencatuan motor induksi baik secara langsung maupun tidak langsung dengan sumber tegangan sehingga berimbas pada variasi kecepatan, arus, dan torsi yang dihasilkan. [5]

2.6.1 Metode DOL

Arus yang besar pada saat proses *starting* merupakan kelemahan motor induksi karena menyebabkan turunnya tegangan seketika yang tidak diharapkan pada sistem tegangan. Arus yang besar pada saat proses pengasutan juga tidak diimbangi dengan torsi awal yang besar. Kurva arus dan torsi sebagai fungsi dari *slip* untuk pengasutan langsung pada motor induksi secara umum ditunjukkan pada Gambar 2.11 di bawah ini. [5]

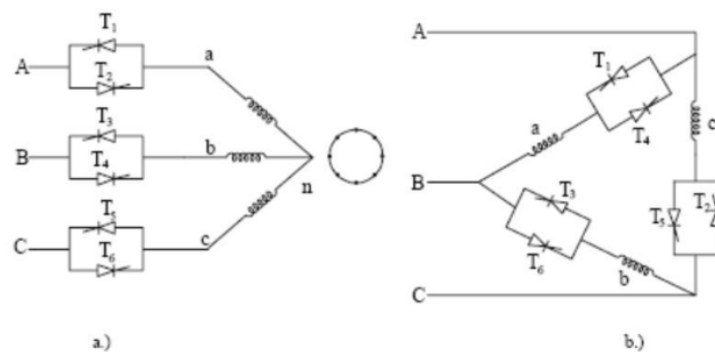


Gambar 2.11 Kurva Torsi Kecepatan dan Arus Saat Beban Penuh

Dapat dilihat dari gambar di atas kekurangan dari metode starting langsung ialah arus yang mengalir ketika proses akselerasi sangat besar bisa mencapai enam sampai tujuh kali arus nominal dari motor. [5]

2.6.2 Metode *Soft Starting*

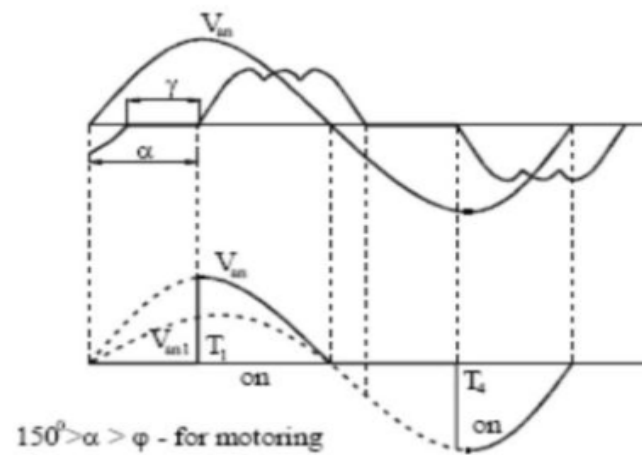
Metode sederhana dalam pengontrolan starting pada motor induksi dengan menurunkan tegangan AC melalui Kontroler, dengan mengontrol tegangan dengan tujuan membatasi arus pada saat pengasutan. Pada konfigurasi tersebut *Thyristor* dipasang antiparalel satu sama lain, dan terpasang seri dengan sumber listrik tiga fasa dan kumparan stator. Setiap *Thyristor* dipicu setiap setengah siklus dan disinkronkan dengan sumber tegangan AC. Dengan demikian sudut pemicuan merupakan nilai variabel sehingga setiap pasang *Thyristor* yang terpasang antiparalel akan konduksi sesuai dengan proporsi sudut penyalannya. Seperti Gambar 2.12 berikut ini. [5]



Gambar 2.12 a) Rangkaian Bintang

b) Rangkaian Segitiga

Sudut pemecuan dihitung terhadap titik persinggungan titik nol, jika motor memiliki sudut faktor daya dengan notasi ϕ_1 dan bentuk gelombang masukan dan luaran dapat dilihat melalui Gambar 2.13 dibawah ini. [5]



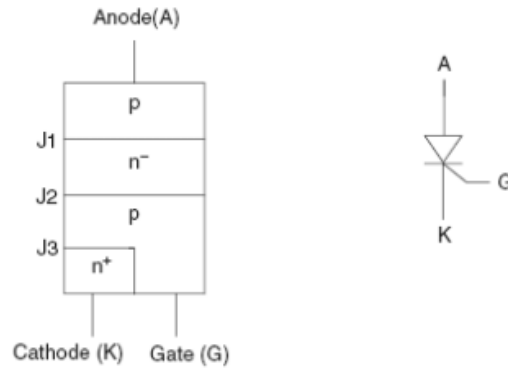
Gambar 2.13 Kurva Tegangan dan Arus pada *Soft Starter*

Bentuk gelombang arus tidak murni sinusoidal, menunjukkan arus yang terdistorsi oleh harmonisa namun motor mampu menerima hal tersebut. Arus stator akan kontinyu jika sudut pemacu lebih kecil dari sudut faktor daya motor dan sebaliknya arus stator akan diskontinyu jika sudut pemacu lebih besar dari sudut faktor daya motor.

2.6.3 Metode Pengaturan Tegangan dan Frekuensi

Thyristor merupakan salah satu tipe semikonduktor daya yang paling penting dan telah digunakan secara ekstensif pada rangkaian elektronika daya. *Thyristor* biasanya digunakan sebagai saklar, beroperasi antara keadaan non konduksi ke konduksi. Pada banyak aplikasi, *Thyristor* dapat diasumsikan sebagai saklar ideal akan tetapi dalam prakteknya *Thyristor* memiliki batasan dan karakteristik tertentu. [5]

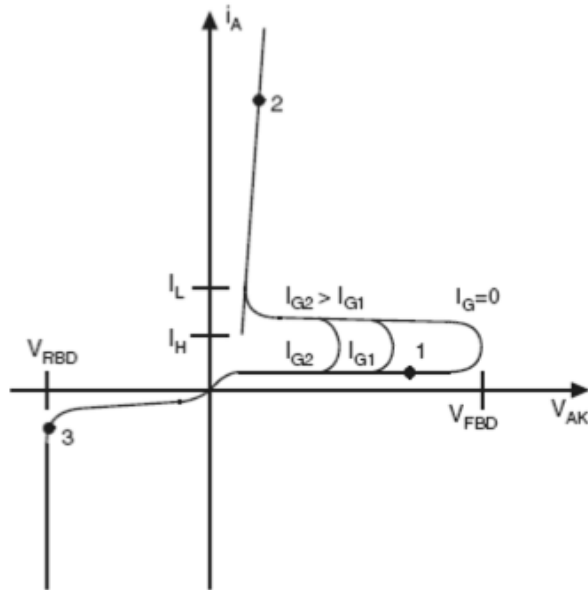
Thyristor merupakan semikonduktor 4 lapisan berstruktur *pnpn* dengan tiga *pn-junction*. *Thyristor* memiliki tiga terminal: anode, katode, dan gerbang. simbol *Thyristor* dan bagan dari tiga *pn-junction* dapat dilihat pada Gambar 2.14 dibawah ini. [5]



Gambar 2.14 Susunan Semikonduktor dan Simbol *Thyristor*

Prinsip kerja dari *Thyristor* sendiri saat tegangan anode dibuat lebih positif dibandingkan dengan tegangan katode, sambungan J1 dan J3 berada pada kondisi *forward bias*. Sambungan J2 berada pada kondisi *reverse bias*, dan akan mengalir arus bocor yang kecil antara anode dan katode. Pada kondisi ini *Thyristor* dikatakan pada kondisi *forward blocking* atau kondisi *off-state*. Jika tegangan anode ke katode ditingkatkan hingga suatu tegangan tertentu, sambungan J2 akan bocor. Karena J1 dan J3 sudah berada pada kondisi *forward bias* maka akan terdapat lintasan pembawa muatan bebas melewati ketiga sambungan yang akan menghasilkan arus anode yang besar. *Thyristor* dalam kondisi ini disebut berada pada keadaan konduksi atau keadaan hidup

Ketika berada pada kondisi *on*, *Thyristor* akan bertindak seperti diode yang tidak dapat dikontrol, akan terus berada pada kondisi *on* karena tidak adanya lapisan deplesi pada sambungan J2 karena pembawa-pembawa muatan yang bergerak bebas. Daerah deplesi ini akan terbentuk jika arus maju anode berada di bawah suatu tingkatan yang disebut *holding current*. *Holding current* adalah arus anode minimum untuk mempertahankan *Thyristor* pada kondisi *on*. *Thyristor* dapat dihidupkan dengan meningkatkan tegangan maju di atas VBO, akan tetapi kondisi ini bersifat merusak. Dalam prakteknya, tegangan maju harus dipertahankan di bawah VBO dan *Thyristor* dihidupkan dengan memberikan tegangan positif antara gerbang terhadap katode. Karakteristik *v-i* suatu *Thyristor* pada umumnya ditunjukkan pada Gambar 2.15 di bawah ini [5]



Gambar 2.15 Karakteristik *Thyristor*

Suatu *Thyristor* dihidupkan dengan cara meningkatkan arus anode.

Hal ini dapat dicapai dengan salah satu cara berikut:

2.6.3.1 Tegangan Tinggi

Jika tegangan forward anode ke katode lebih besar dari tegangan maju breakdown V_{BO} , arus bocor yang dihasilkan cukup untuk membuat *Thyristor* on. Cara ini merusak dan harus dihindari.[5]

2.6.3.2 Efek dv/dt

Thyristor dapat terkonduksi walaupun tidak diberi sinyal *gate* apabila terjadi kenaikan tegangan maju yang sangat cepat. Gejala kenaikan tegangan maju yang sangat cepat yang menyebabkan *Thyristor* terkonduksi dinamakan efek dv/dt . Peningkatan yang sangat cepat dari tegangan anoda akan mengakibatkan arus transien pada *gate* yang cukup untuk membuat *Thyristor* menghantar. Efek ini tidak dipergunakan dalam pengendalian *Thyristor*, oleh sebab itu dalam suatu rangkaian yang menggunakan *Thyristor* perlu dipasang pengamanan terhadap efek $dv/d.t$ [5]

2.6.3.3 Arus pada *Gate*

Jika *Thyristor* diberi tegangan *bias forward*, injeksi arus gerbang dengan menerapkan tegangan gerbang positif antara terminal gerbang dan katode akan dapat membuat *Thyristor on*. Ketika arus gerbang ditingkatkan, tegangan *forward blocking* akan menurun. [5]

2.6.3.4 Panas

Jika suhu suatu Thyristor cukup tinggi, maka akan terjadi peningkatan jumlah pasangan *elektron-hole* sehingga arus bocor akan meningkat. Cara ini dapat menyebabkan *thermal runaway* dan biasanya dihindari. [5]