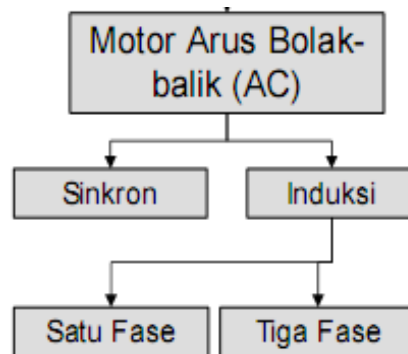




## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Motor Arus Bolak Balik<sup>[4]</sup>



Gambar 2.1 Klasifikasi Motor Arus Bolak – Balik<sup>[8]</sup>

Motor arus bolak balik (motor AC) ialah suatu mesin yang berfungsi untuk mengubah tenaga listrik arus bolak balik (AC) menjadi tenaga gerak atau tenaga mekanik, di mana tenaga gerak itu berupa putaran dari pada rotor. Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak balik (AC) yang paling luas digunakan. Motor induksi memiliki dua komponen dasar yaitu stator dan rotor bagian rotor dipisahkan dengan bagian stator-nya oleh celah udara yang sempit dengan jarak antara 0,4 mm sampai 4 mm tergantung pada kekuatan pada motor. Tipe dari motor induksi berdasarkan lilitan pada rotornya dibagi menjadi dua macam yaitu *squirrel-cage* rotor dan *wound* rotor. Motor AC dibedakan atas beberapa jenis :

##### 2.1.1 Berdasarkan Hubungan Putaran Motor dengan Frekuensi

###### 1. Motor Sinkron (Motor Serempak)

Disebut motor sinkron karena putaran motor sama dengan putaran fluks magnet stator. Kecepatan motor induksi dipengaruhi oleh banyaknya kutub pada statornya dan frekuensi sumber tegangan yang dirumuskan sebagai berikut :

$$n_s = \frac{120 \times f}{p} \dots\dots\dots (2.1)$$



Dimana :

$n_s$  = kecepatan sinkron

$f$  = Frekuensi

$p$  = Jumlah kutub

Pada motor sinkron, motor tidak dapat berputar sendiri walaupun lilitan – lilitan stator telah dihubungkan dengan tegangan luar (dialiri arus). Agar motor sinkron dapat berputar, diperlukan pengerak permulaan. Sebagai pengerak permulaan umumnya dikerjakan oleh mesin lain.

## **2. Motor Asinkron (Motor Induksi)**

Disebut Motor asinkron karena putaran motor tidak sama dengan putaran fluks magnet stator. Dengan kata lain, bahwa antara pada rotor dan fluks magnet stator terdapat selisih perputaran yang disebut dengan slip ( $s$ ).

Slip dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$S = \frac{n_s \times n}{n_s} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

$S$  = slip

$n_s$  = kecepatan sinkron ( putaran/menit )

$n$  = kecepatan rotor

### **2.1.2 Cara Penerima Tegangan atau Arus**

Ditinjau dari segi cara rotor menerima tegangan atau arus, dapat dikenal 2 jenis motor, yaitu:

#### **1. Motor yang rotornya menerima tegangan secara langsung**

Motor jenis ini biasanya dijumpai pada motor universal, jenis motor DC (motor arus searah).



## **2. Motor induksi**

Disebut motor induksi karena dalam hal penerimaan tegangan dan arus pada rotor dilakukan dengan jalan induksi. Jadi pada rotor induksi, rotor tidak langsung menerima tegangan atau arus dari luar.

### **2.1.3 Jumlah Fasa Tegangan yang Digunakan**

Ditinjau dari jumlah fasa yang digunakan dapat dikenal 2 jenis motor, yaitu:

#### **1. Motor Satu Fasa**

Disebut motor satu fasa karena untuk menghasilkan tenaga mekanik, pada motor tersebut dimasukkan tegangan satu fasa. Di dalam aplikasinya, yang sering digunakan adalah motor satu fasa dengan lilitan dua fasa. Dikatakan demikian, karena di dalam motor 1 fasa lilitan statornya terdiri dari dua jenis lilitan, yaitu lilitan primer dan lilitan sekunder. Pada kedua jenis lilitan tersebut walaupun arus yang mengalir pada motor adalah arus atau tegangan 1 fasa akan tetapi mengakibatkan arus yang mengalir pada masing – masing lilitan mempunyai perbedaan fasa. Atau dengan kata lain, bahwa arus yang mengalir pada lilitan primer dan lilitan sekunder tidak sefasa. Motor satu fasa seperti ini disebut fasa belah.

Motor satu fasa dikenal beberapa macam, yaitu:

- a. Motor kapasitor,
- b. Motor kutub bayangan,
- c. Motor repulse
- d. Motor seri.

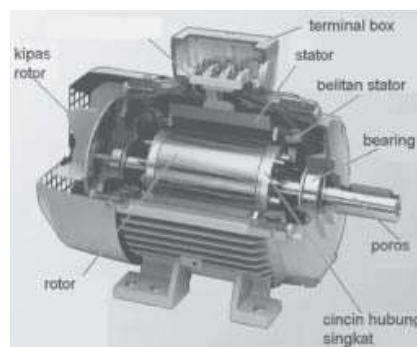
#### **2. Motor 3 Fasa**

Disebut motor 3 fasa karena untuk menghasilkan tenaga mekanik tegangan yang dimasukkan pada rotor tersebut adalah tegangan 3 fasa. Ditinjau dari jenis rotor yang digunakan, dikenal 3 jenis motor, yaitu:

- a. Motor dengan rotor lilit,
- b. Motor dengan rotor sangkar tupai,
- c. Motor kolektor.

## 2.2 Motor Induksi

Motor induksi satu fasa merupakan motor arus bolak-balik (AC) yang berfungsi sebagai penggerak. Secara struktural jenis yang paling umum dari motor induksi satu fasa adalah motor sangkar tupai. Motor induksi satu fasa sebenarnya tidak mempunyai torsi awal saat dihidupkan, tetapi bila lilitan stator satu fasa dieksitasi dan rotor diputar dengan alat pembantu, konduktor rotor akan memotong medan stator dan menyebabkan dibangkitkannya ggl dalam rotor tersebut. Alat pembantu yang digunakan untuk memutar rotor motor induksi satu fasa disesuaikan dengan torsi pada saat dihidupkan dan torsi pada saat bekerja yang diperlukan oleh beban.



Gambar 2.2 Bentuk Fisik dari Motor Induksi<sup>[8]</sup>

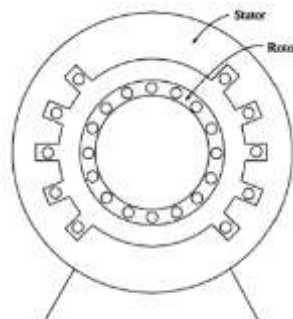
Sebagai alat penggerak, motor – motor listrik lebih unggul dibanding alat – alat penggerak jenis lain karena motor – motor listrik dapat dikonstruksi sesuai dengan kebutuhan dan karakteristik penggerak, antara lain:

- a. Bisa dibuat dalam berbagai ukuran tegangan,
- b. Mempunyai batas – batas kecepatan (*speed range*) yang luas,
- c. Pelayanan operasi mudah, dan pemeliharaannya sederhana,

- d. Bisa dikendalikan secara manual, atau secara otomatis dan bahkan kalau diinginkan bisa dilayani dari jarak jauh (*remote control*).

Motor induksi pada dasarnya mempunyai 3 bagian penting sebagai berikut:

1. Stator : Merupakan bagian yang diam dan mempunyai kumparan yang dapat menginduksikan medan elektromagnetik kepada kumparan rotornya.
2. Celah : Merupakan celah udara: Tempat berpindahnya energi dari stator ke rotor.
3. Rotor : Merupakan bagian yang bergerak akibat adanya induksi magnet dari kumparan stator yang diinduksikan kepada kumparan rotor.



Gambar 2.3 Konfigurasi Dasar Motor Induksi<sup>[11]</sup>

#### a. Bagian Stator

Pada bagian stator terdapat beberapa slot yang merupakan tempat kawat (konduktor) dari tiga kumparan tiga fasa yang disebut kumparan stator, yang masing – masing kumparan mendapat suplai arus tiga fasa. Jika kumparan stator mendapatkan suplai arus tiga fasa, maka pada kumparan tersebut akan timbul fluks magnet putar. Karena adanya fluks magnet putar pada kumparan stator, mengakibatkan rotor berputar karena adanya induksi magnet dengan kecepatan putar rotor sinkron dengan kecepatan putar stator.

$$N_s = \frac{120 \times f}{P} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana :

$N_s$  = Jumlah lilitan stator

$f$  = Frekuensi (Hz)

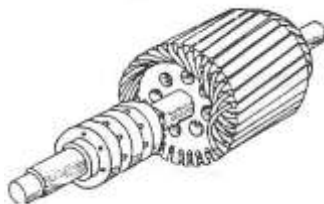
$P$  = Daya (watt)

Rangkaian stator motor induksi didesain dengan baik dengan empat tujuan yaitu:

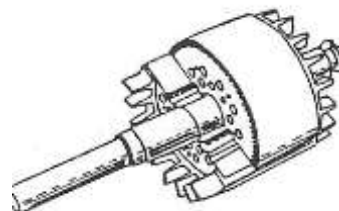
1. Menutupi inti dan kumparannya.
2. Melindungi bagian-bagian mesin yang bergerak dari kontak langsung dengan manusia dan dari goresan yang disebabkan oleh gangguan objek atau gangguan udara terbuka (cuaca luar).
3. Menyalurkan torsi ke bagian peralatan pendukung mesin dan oleh karena itu stator didesain untuk tahan terhadap gaya putar dan guncangan.
4. Berguna sebagai sarana rumah ventilasi udara sehingga pendinginan lebih efektif.

#### b. Bagian Rotor

Bagian rotor yang merupakan tempat kumparan rotor adalah bagian yang bergerak atau berputar. Ada dua jenis kumparan rotor yaitu *squirrel – cage* rotor dan *fasa wound* rotor. Hampir 90 % kumparan rotor dari motor induksi menggunakan jenis *squirrel – cage* rotor. Ini karena bentuk kumparannya sederhana dan tahan terhadap guncangan. Ciri khusus dari *squirrel – cage* rotor adalah ujung – ujung kumparan rotor terhubung singkat secara permanen. Lain halnya pada jenis *fasa wound* rotor yang ujung – ujung kumparan rotor akan terhubung langsung bila kecepatan putar rotor telah mencapai kecepatan putar normalnya secara otomatis melalui slip ring yang terpasang pada bagian rotor.



Gambar 2.4 Rotor Sangkar<sup>[6]</sup>



Gambar 2.5 Rotor Lilit



Berdasarkan bentuk konstruksi rotornya, maka motor induksi dapat dibagi menjadi dua jenis .

1. Motor induksi dengan rotor sangkar (*squirrel cage*).

2. Motor induksi dengan rotor belitan (*wound rotor*)

- a) Rangka Stator
- b) Rotor Belitan
- c) Rotor Sangkar

Diantara stator dan rotor terdapat celah udara yang merupakan ruangan antara stator dan rotor. Pada celah udara ini lewat fluks induksi stator yang memotong kumparan rotor sehingga menyebabkan rotor berputar. Celah udara yang terdapat antara stator dan rotor diatur sedemikian rupa sehingga didapatkan hasil kerja motor yang optimum. Bila celah udara antara stator dan rotor terlalu besar akan mengakibatkan efisiensi motor induksi rendah, sebaliknya bila jarak antara celah terlalu kecil/sempit akan menimbulkan kesukaran mekanis pada mesin.

Motor induksi terdiri atas dua bagian utama yaitu rotor dan stator. Ada dua jenis rotor yaitu rotor sangkar dan rotor belitan. Stator dibuat dari sejumlah stampings dengan slots untuk membawa gulungan tiga fasa. Gulungan ini dilingkarkan untuk sejumlah kutub yang tertentu. Stator merupakan bagian yang diam dari motor induksi tiga fasa, pada bagian stator terdapat beberapa slot yang merupakan tempat kawat (konduktor) dari tiga kumparan tiga fasa yang disebut kumparan stator, yang masing-masing kumparan mendapatkan suplai arus tiga fasa, maka pada kumparan tersebut akan timbul medan putar. Dengan adanya medan magnet putar pada kumparan stator akan mengakibatkan rotor berputar, hal ini terjadi karena adanya induksi magnet dengan kecepatan putar rotor sinkron dan kecepatan putar stator.



Ada dua macam jenis rotor pada motor induksi yaitu rotor sangkar dan rotor belitan. Rotor sangkar (*squirrel cage rotor*), kawat rotor terdiri dari batang-batang tembaga yang berat, aluminium atau *alloy* yang dimasukkan ke dalam inti rotor. Masing-masing ujung kawat dihubungkan singkat dengan 'end-ring'. Motor induksi dengan rotor belitan mempunyai rotor dengan belitan kumparan tiga fasa sama seperti kumparan stator. Kumparan stator dan rotor juga mempunyai jumlah kutub yang sama. Penambahan tahanan luar sampai harga tertentu, dapat membuat kopel mula mencapai harga kopel maksimumnya. Kopel mula yang besar memang diperlukan pada saat start. Motor induksi jenis ini memungkinkan penambahan (pengaturan) tahanan luar. Tahanan luar yang dapat diatur ini dihubungkan ke rotor melalui cincin. Selain untuk menghasilkan kopel mula yang besar, tahanan luar dapat diperlukan untuk membatasi arus mula yang besar pada saat start. Disamping itu dengan mengubah – ubah tahanan luar, kecepatan motor dapat diatur.

Macam corak klasifikasi suatu motor didasarkan atas:

- a. Bentuk konstruksi motor,
- b. Jenis kerangka penutupan,
- c. Bentuk rotor,
- d. Jenis (kelas) isolasi jangkar motor,
- e. Cara pendinginan motor,
- f. Tipe kerja motor,
- g. Karakteristik momen terhadap kecepatan motor,
- h. Ukuran kecepatan motor.

Akan Tetapi di dalam pemakaian sederhana, klasifikasi motor hanya dikenal menurut:

- a. Tenaga output motor (HP).
- b. Sistem tegangan (searah, bolak – balik, ukurannya, fasanya).



- c. Kecepatan motor (rendah, sedang, tinggi). Pemakaian yang sederhana ini belum dicapai hal – hal yang sangat penting dalam memilih motor yang sesuai untuk keperluan penggerakan dengan memuaskan.

Jadi dapat disimpulkan, bahwa klasifikasi motor ini sangatlah luas, mencakup hal – hal yang dibutuhkan oleh mesin – mesin yang digerakkan, dan sesuai dengan:

- a. Tenaga dan momen yang dibutuhkan,
- b. Karakteristik beban dan macam – macam kerja yang diperlukan,
- c. Konstruksi mesin – mesin yang digerakkan.

### 2.3 Motor Induksi 3 Fasa<sup>[4]</sup>

Motor induksi tiga fasa merupakan motor elektrik yang paling banyak digunakan dalam dunia industri. Hal ini dikarenakan motor induksi mempunyai konstruksi yang sederhana, kokoh, harganya relatif murah, serta perawatannya yang mudah, sehingga motor induksi mulai menggeser penggunaan motor DC pada industri. Motor induksi memiliki beberapa parameter yang bersifat non-linier, terutama resistansi rotor, yang memiliki nilai bervariasi untuk kondisi operasi yang berbeda. Hal ini yang menyebabkan pengaturan pada motor induksi lebih rumit dibandingkan dengan motor DC.

Salah satu kelemahan dari motor induksi adalah tidak mampu mempertahankan kecepatannya dengan konstan bila terjadi perubahan beban. Apabila terjadi perubahan beban maka kecepatan motor induksi akan menurun. Untuk mendapatkan kecepatan konstan serta memperbaiki kinerja motor induksi terhadap perubahan beban, maka dibutuhkan suatu pengontrol. Penggunaan motor induksi tiga fasa di beberapa industri membutuhkan performa yang tinggi dari motor induksi untuk dapat mempertahankan kecepatannya walaupun terjadi perubahan beban.



## 2.4 Prinsip Kerja Motor Induksi 3 Fasa<sup>[1]</sup>

Motor induksi bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik dari kumparan stator ke kumparan rotor. Garis – garis gaya fluks yang diinduksikan dari kumparan stator akan memotong kumparan rotornya sehingga timbul ggl (gaya gerak listrik/tegangan induksi) dan karena penghantar rotor merupakan rangkaian yang tertutup, maka akan mengalir arus pada kumparan rotor. Penghantar (kumparan) rotor yang dialiri arus ini berada dalam garis gaya fluks yang berasal dari kumparan stator sehingga kumparan rotor akan mengalami gaya Lorentz yang menimbulkan torsi yang cenderung menggerakkan rotor sesuai arah medan induksi stator. Pada rangka stator terdapat kumparan stator yang ditempatkan pada slot – slotnya yang di lilitkan pada sejumlah kutub tertentu. Jumlah kutub ini menentukan kecepatan berputarnya medan stator yang terjadi yang di induksikan pada rotornya. Makin besar jumlah kutub akan mengakibatkan makin kecil kecepatan putar medan stator dan sebaliknya. Kecepatan putar medan putar ini disebut kecepatan sinkron.

Perputaran motor pada mesin arus bolak – balik ditimbulkan oleh adanya medan putar (fluks yang berputar) yang dihasilkan dalam kumparan statornya. Medan putar ini terjadi apabila kumparan stator dihubungkan dalam fasa banyak umumnya 3 fasa.

Ada beberapa prinsip kerja motor induksi:

1. Apabila sumber tegangan 3 fasa dipasang pada kumparan medan (stator), timbullah medan putar dengan kecepatan yang telah ditentukan dengan  $f_s =$  frekuensi stator (*Stator line frequency*) atau frekuensi jala-jala dan  $p =$  jumlah kutub pada motor.
2. Medan stator tersebut akan memotong batang konduktor pada rotor.
3. Akibatnya pada kumparan jangkar (rotor) timbul tegangan induksi (ggl).
4. Karena kumparan jangkar merupakan kumparan tertutup, ggl (E) akan menghasilkan arus (I).
5. Adanya arus (I) didalam medan magnet menimbulkan gaya (F) pada rotor

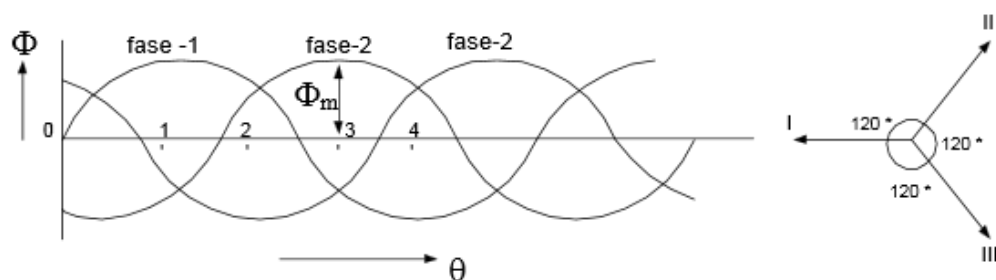
6. Bila kopel mula yang dihasilkan oleh gaya ( $F$ ) pada rotor cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.
7. Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa ggl induksi timbul karena terpotongnya batang konduktor (rotor) oleh medan putar stator. Artinya agar ggl induksi tersebut timbul, diperlukan adanya perbedaan relatif antara kecepatan medan stator ( $n_s$ ) dengan kecepatan berputar rotor ( $n_r$ ).
8. Perbedaan kecepatan antara  $n_r$  dan  $n_s$  disebut slip ( $s$ ).
9. Bila  $n_r = n_s$ , ggl induksi tidak akan timbul dan arus tidak mengalir pada batang konduktor (rotor), dengan demikian tidak dihasilkan kopel.
10. Dilihat dari cara kerjanya, motor induksi disebut juga sebagai motor tak serempak atau asinkron.

#### 2.4.1 Fluks Magnet Stator<sup>[4]</sup>

Pada motor 3 fasa, lilitan statornya tidak berbeda dengan lilitan stator pada generator arus bolak – balik 3 fasa. Karena pada lilitan stator dimasukkan arus listrik bolak – balik, maka disekitar stator juga terjadi fluks magnet yang berubah – ubah pula.

Jadi pada motor arus bolak – balik ini kutub magnet (fluks magnet) berputar. Untuk jelasnya, prinsip terbentuknya medan magnet yang berputar pada motor 3 fasa, perhatikan gambar 2.6.

Gambar 2.6. menunjukkan keadaan arus 3 fasa yang dimasukkan pada lilitan stator pada suatu saat tertentu.

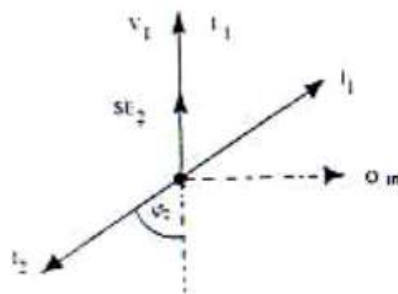


Gambar 2.6 Arus yang Dimasukkan Pada Lilitan Stator Motor 3 Fasa<sup>[6]</sup>

### 2.4.2 Arus Rotor<sup>[6]</sup>

Lilitan rotor dihubung singkat dan tidak mempunyai hubungan langsung dengan sumber, arusnya diinduksikan oleh fluks magnet bersama ( $\phi$ ), melewati celah udara, akibatnya, statorlah yang bertanggung jawab kalau terjadi perubahan – perubahan pada rotor.

Apabila tegangan sumber  $V_1$  dikenakan pada stator, pada stator timbul tegangan  $E_1$  yang diinduksikan fluks – fluks tersebut yang juga menimbulkan tegangan  $E_2$  pada rotor, ( $E_2 = E_1$  pada saat rotor ditahan dan  $s E_2 = s E_1$  pada waktu motor berputar dengan slip  $s$ ). Pada setiap arus rotor  $I_2$  harus diimbangi arus yang sama tapi berlawanan arah pada statornya ( $I_2 = -I_1$ ) agar fluks magnet bersama ( $\phi_m$ ) tetap konstan.



Gambar 2.7 Diagram Vektor Motor Induksi dengan Tinjauan Sederhana

### 2.5 Pengaturan Putaran<sup>[5]</sup>

Motor Induksi tiga fasa biasanya berputar dengan kecepatan yang relatif konstan. Akan tetapi dalam penggunaan tertentu kadang – kadang dikehendaki adanya pengaturan putaran untuk memperoleh jumlah putaran yang sesuai.

Berdasarkan pada (persamaan 2.3) , maka jumlah putaran motor induksi dapat diubah dengan :

- Mengubah jumlah kutub, dengan frekuensi sumber tetap.
- Mengubah frekuensi sumber, dengan jumlah kutub tetap.

Untuk pengaturan putaran dengan cara yang pertama dapat dilakukan dengan merencanakan kumparan stator sedemikian rupa sehingga dapat menerima

tegangan sumber dengan sambungan fasa yang berbeda – beda. Dari masing - masing sambungan fasa tersebut dapat diperoleh jumlah kutub yang berbeda – beda pula sehingga jumlah putaran motor berubah. Cara ini dapat dilakukan pada motor induksi dengan motor sangkar (karena jumlah kutub pada rotor sangkar akan menyesuaikan jumlah kutub dari statornya).

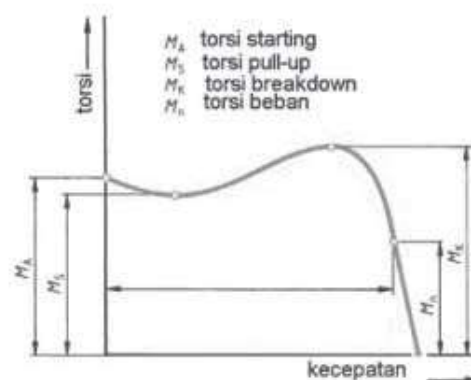
Biasanya diperoleh dua macam perubahan jumlah putaran, misalnya :

- 1500 rpm – 3000 rpm
- 750 rpm – 1500 rpm

## 2.6 Karakteristik Torsi Motor Induksi<sup>[7]</sup>

Karakteristik torsi motor induksi (Gambar 2.8), disebut torsi fungsi dari slip ( $T = f(\text{slip})$ ). Garis vertikal merupakan parameter torsi (0–100%) dan garis horizontal parameter slip (1,0–0,0). Dikenal ada empat jenis torsi, yaitu:

1. MA, momen torsi awal,
2. MS, momen torsi pull-up,
3. MK, momen torsi maksimum,
4. MB, momen torsi kerja.

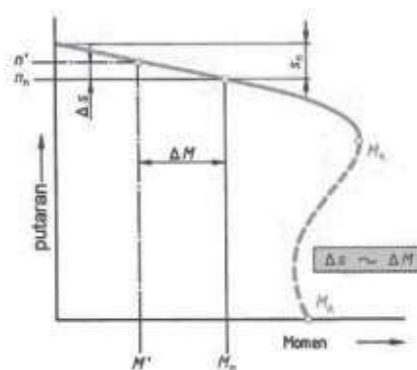


Gambar 2.8 Karakteristik Torsi Motor Induksi

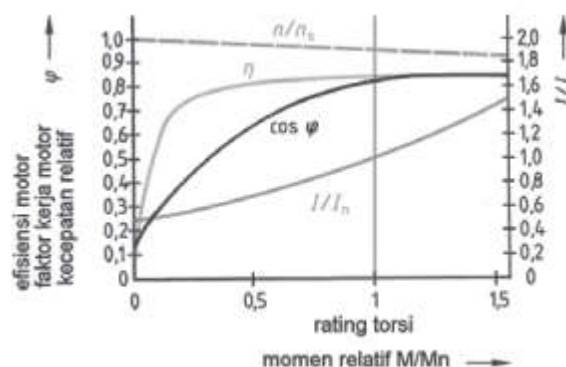
Torsi awal terjadi saat motor pertama dijalankan (slip 1,0), torsi pull-up terjadi saat slip 0,7, torsi maksimum terjadi slip 0,2 dan torsi kerja berada ketika slip 0,05. Torsi beban harus lebih kecil dari torsi motor. Bila torsi beban lebih

besar dari torsi motor, akibatnya motor dalam kondisi kelebihan beban dan berakibat belitan stator terbakar. Untuk mengatasi kondisi beban lebih dalam rangkaian kontrol dilengkapi dengan pengaman beban lebih disebut thermal overload, yang dipasang dengan kontaktor.

Karakteristik torsi juga bisa disajikan dalam bentuk lain, kita kenal karakteristik putaran = fungsi torsi,  $n = f(\text{torsi})$  lihat (Gambar 2.9). Garis vertikal menunjukkan parameter putaran, garis horizontal menunjukkan parameter torsi. Ketika motor berputar pada garis  $n'$  didapatkan torsi di titik  $M'$ . Ketika putaran berada di  $n_n$  didapatkan torsi motor di  $M_n$ . Daerah kerja putaran motor induksi berada pada area  $n'$  dan  $n_n$  sehingga torsi kerja motor induksi juga berada pada area  $M'$  dan  $M_n$ . Berdasarkan grafik  $n = \text{fungsi}(\text{torsi})$  dapat juga disimpulkan ketika putaran rotor turun dari  $n'$  ke  $n_n$  pada torsi justru terjadi peningkatan dari  $M'$  ke  $M_n$ .



Gambar 2.9 Karakteristik Putaran Fungsi Torsi



Gambar 2.10 Karakteristik Parameter Efisiensi, Putaran, Faktor Kerja, dan Arus



Karakteristik motor induksi lainnya lihat (Gambar 2.10) mencakup parameter efisiensi, faktor kerja, ratio arus, dan ratio putaran. Dengan membaca karakteristik motor induksi dapat diketahui setiap parameter yang dibutuhkan. Saat torsi mencapai 100% dapat dibaca ratio arus  $I/I_o = 1$ ; faktor kerja  $\cos \phi$ : 0,8; efisiensi motor 0,85; dan ratio putaran  $n/n_s$ : 0,92.

## 2.7 Pengasutan Motor Induksi<sup>[12]</sup>

Motor induksi saat dihubungkan dengan tegangan sumber secara langsung akan menarik arus 500% sampai 800% dari arus beban penuh. Arus mula yang besar dapat mengakibatkan pengurangan tegangan pada saluran sehingga akan mengganggu peralatan lain yang dihubungkan pada saluran yang sama. Untuk motor yang berdaya besar tentu arus pengasutan juga akan semakin besar, apabila arus yang besar tersebut mengalir dalam waktu yang lama dapat mengakibatkan motor dan saluran penghantar menjadi panas dan merusakkan isolasi. Sehingga untuk motor yang berdaya diatas 10HP tidak dianjurkan menghidupkan motor dengan pengasutan secara langsung.

Untuk mengurangi besarnya arus pengasutan pada motor, ada beberapa metoda pengasutan motor induksi yang biasa digunakan, yaitu :

- Pengasutan dengan metode Direct On Line (DOL)
- Pengasutan star - delta (Y -  $\Delta$ )
- Pengasutan dengan soft starting

### 2.7.1 Pengasutan Motor Induksi Metode Direct On Line (DOL)

Apabila motor induksi dihidupkan dengan menghubungkan tegangan normal dari jala-jala secara langsung, arus pengasutan sama dengan arus hubung singkat.

Maka :

$$\frac{T_{st}}{T_f} = \left[ \frac{I_{st}}{I_f} \right]^2 S_f \dots \dots \dots (2.12)$$

Dimana :

$T_{st}$  ,  $I_{st}$  = torsi dengan arus pengasutan

$T_f$  ,  $I_f$  = torsi dengan arus beban penuh

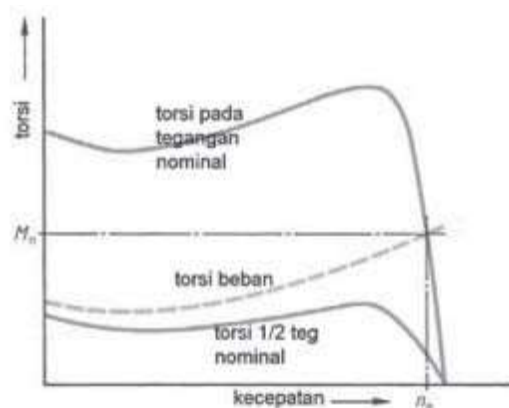
$S_f$  = slip beban penuh

Arus pengasutan biasanya 5-7 kali, misalkan arus pengasutan adalah 7 kali arus normal, dan slip saat beban penuh adalah sebesar 0,04 maka persamaan diatas diperoleh :

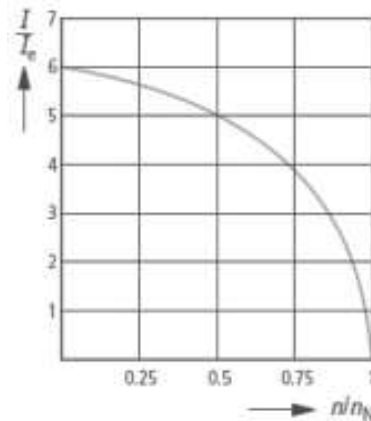
$$\frac{T_{st}}{T_f} = \left[ \frac{I_{st}}{I_f} \right]^2 0.04 = 1,96 \dots \dots \dots (2.13)$$

dari perhitungan diatas dapat diketahui bahwa dengan arus pengasutan dengan nilai sebesar 7 kali arus beban penuh motor hanya menghasilkan torsi pengasutan sebesar 1,96 kali torsi saat beban penuh.

Besarnya torsi starting = 1,96 kali torsi nominalnya. Kesimpulannya, saat arus starting 5 s/d 6 kali arus nominal hanya menghasilkan  $1,96 \times$  torsi nominalnya.

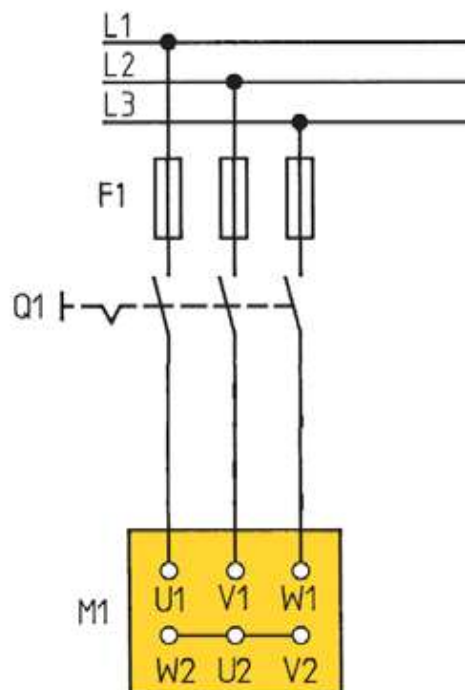


Gambar 2.11 Karakteristik Torsi Pengasutan DOL



Gambar 2.12 Karakteristik Arus Fungsi Putaran Pengasutan DOL

Karakteristik pengasutan langsung hanya sesuai untuk motor induksi berdaya kecil, karena untuk motor daya besar akan menyebabkan pengaruh drop tegangan yang besar. Ketika starting dimulai motor induksi akan menarik arus yang besarnya sampai 6 kali arus nominalnya. Secara berangsur-angsur ketika kecepatan motor mendekati nominalnya maka arus motor akan berada pada kondisi nominalnya.



Gambar 2.13 Pengawatan Motor Induksi Pengasutan Langsung



### 2.7.2 Pengasutan Motor Induksi Tiga Fasa Metode Bintang–Segitiga (Y-Δ)

Secara umum, pengasutan motor induksi dapat dilakukan baik dengan cara menghubungkan rotor secara langsung ke rangkaian pencatu atau dengan menggunakan tegangan yang telah dikurangi ke motor selama periode pengasutan. Pengendalian yang digunakan untuk pengasutan motor pada kedua metode tersebut dapat dioperasikan secara manual atau secara magnetik.

Sistem pengasutan bintang segitiga adalah metode pengasutan dengan pengurangan tegangan. Sebuah motor induksi dengan hubungan bintang - segitiga memiliki enam buah terminal sehingga dapat diswitch, baik untuk hubungan bintang atau segitiga. Motor dihubungkan bintang (Y) pada waktu pertama kali di-start, dan ketika motor telah mendekati kecepatan normal, hubungan diubah menjadi hubungan segitiga (Δ).

Saat terhubung bintang, tegangan masing-masing fasa dikurangi sebesar  $1/\sqrt{3}$  (57,7 % tegangan saluran) karena itu torsi yang timbul menjadi  $1/3$  dari apabila motor langsung terhubung delta. Arus saluran dikurangi sebesar  $1/3$ .

$$I_{st} \text{ per fasa} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{sc} \text{ per fasa} \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana :

$I_{sc}$  = arus start bila motor terhubung Δ

$I_{st}$  = arus start bila motor terhubung Y

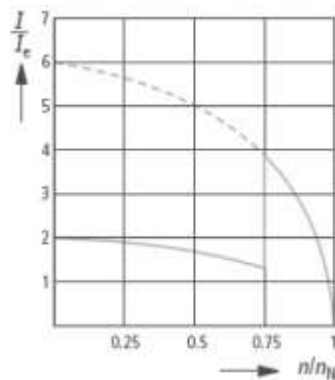
Pada pengasutan ini selama periode start lilitan motor akan berada dalam hubungan bintang dan setelah selang waktu tertentu akan berpindah ke hubungan lilitan delta. Dengan cara ini kenaikan arus start dapat dibatasi hingga sepertiga kali saja dibandingkan bila motor langsung terhubung delta.

Ketika sakelar posisi segitiga (tanda Δ), motor induksi bekerja pada tegangan normal, arus nominal dan torsi nominal. Belitan stator mendapatkan tegangan sebesar tegangan fasa ke fasa. Harus diperhatikan *nameplate* motor

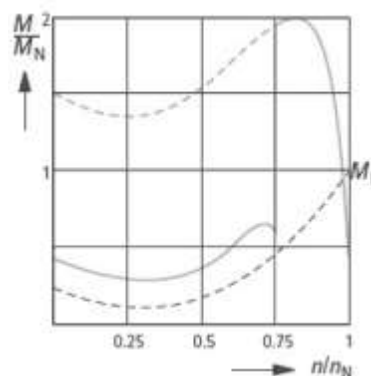
untuk hubungan segitiga bintang harus disesuaikan dengan tegangan kerja yang digunakan, jika salah menggunakan belitan akan terbakar.

Karakteristik arus fungsi putaran  $I = f(n)$  pengasutan bintang-segitiga (Gambar 2.14) ketika motor terhubung bintang, arus starting dua kali arus nominalnya sampai 75% dari putaran nominal. Ketika motor terhubung segitiga arus motor meningkat empat kali arus nominalnya. Secara berangsur-angsur arus motor menuju nominal saat putaran motornominal.

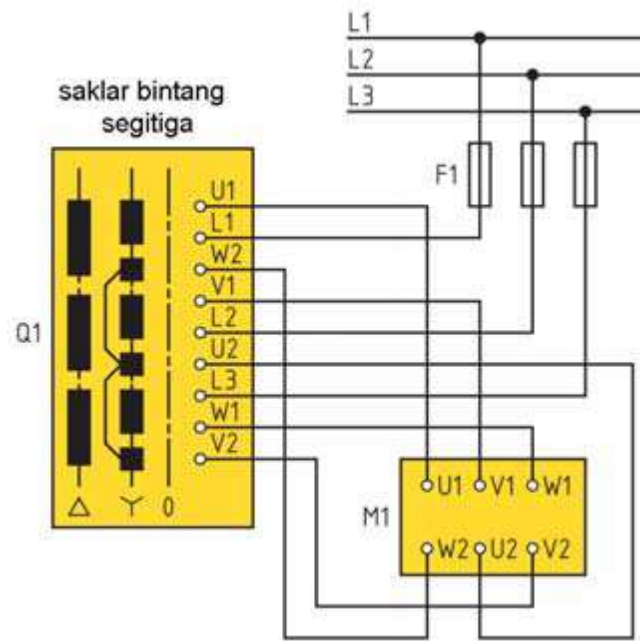
Karakteristik torsi fungsi putaran  $T = f(n)$  pengasutan bintang-segitiga (Gambar 2.15) memperlihatkan ketika motor terhubung bintang, torsi starting sebesar setengah dari torsi nominalnya sampai 75% dari putaran nominal. Ketika motor terhubung segitiga torsi motor meningkat menjadi dua kali lipat torsi nominalnya. Secara berangsur-angsur torsi motor mendekati nominal saat putaran motor nominal.



Gambar 2.14 Karakteristik Arus Pengasutan Star - Delta



Gambar 2.15 Karakteristik Torsi Pengasutan Star - Delta

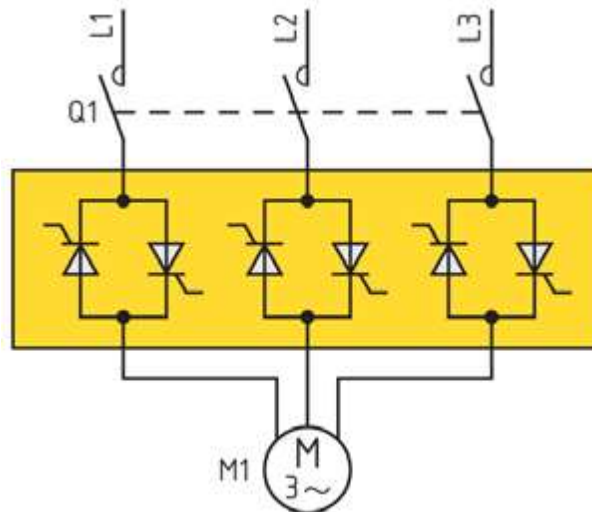


Gambar 2.16 Pengawatan Motor Induksi Pengasutan Bintang - Segitiga

### 2.7.3 Pengasutan Motor Induksi Metode Soft Starting

Soft starting adalah suatu cara lain penurunan tegangan pengasutan dari motor induksi AC. Soft starting merupakan metode pengasutan yang prinsip kerja dari pengasutan yang hampir sama dengan pengasutan motor menggunakan *primary resistance* atau *primary reactance* yang diseri dengan suplai tegangan ke motor.

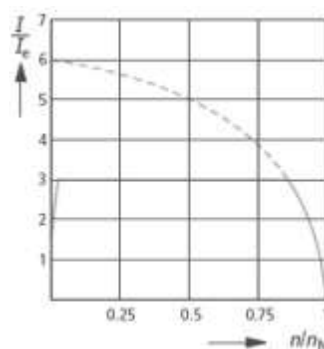
Soft starting terdiri dari komponen solid state thyristor untuk mengontrol tegangan yang masuk ke motor secara bertahap sampai tegangan penuh. Tujuannya untuk mendapatkan pengasutan yang terkendali, sehalus mungkin serta terproteksi dan tercapai kecepatan nominal yang konstan.



Gambar 2.17 Pengawatan Motor Induksi Pengasutan Softstarting

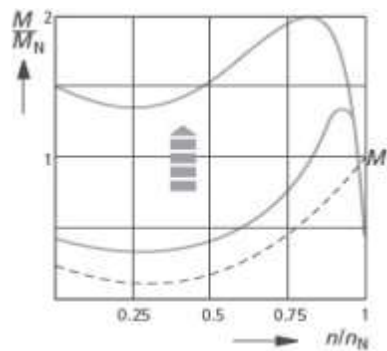
Pengasutan soft starting menggunakan komponen *solid-state*, yaitu enam buah thyristor yang terhubung antiparalel (Gambar 2.17). Saat sakelar Q1 di-ON-kan tegangan akan dipotong gelombang sinusoidanya oleh enam buah Thyristor yang dikendalikan oleh rangkaian triger. Dengan mengatur sudut penyalan triger Thyristor, sama mengatur tegangan ke belitan stator motor. Dengan  $k$  sebagai ratio tegangan asut dengan tegangan nominal besarnya torsi motor starting.

Karakteristik arus fungsi putaran pada pengasutan soft starting, memperlihatkan grafik arus starting besarnya tiga kali arus nominalnya sampai motor mencapai putaran mendekati 85% (Gambar 2.18). Arus motor berangsur-angsur menuju arus nominalnya ketika putaran motor mendekati nominalnya. Pengasutan *solid state* makin diminati karena harganya ekonomis dan handal.



Gambar 2.18 Karakteristik Arus Pengasutan Soft starting

Karakteristik torsi fungsi putaran  $T = f(n)$  pengasutan soft starting, memperlihatkan torsi starting sebesar setengah dari torsi nominalnya, berangsur-angsur torsi meningkat mendekati 140% torsi saat putaran mendekati 90% nominalnya. Secara berangsur-angsur torsi motor mendekati nominal saat putaran motor nominal.



Gambar 2.19 Karakteristik Torsi Pengasutan Soft

#### a. Prinsip Kerja Soft Starting

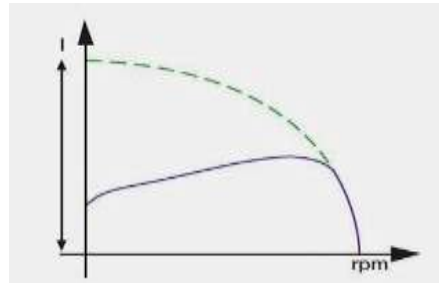
Soft starting dipergunakan untuk mengatur/ memperhalus start dari elektrik motor. Prinsip kerjanya adalah dengan mengatur tegangan yang masuk ke motor. Pertama-tama motor hanya diberikan tegangan yang rendah sehingga arus dan torsi pun juga rendah. Pada level ini motor hanya sekedar bergerak perlahan dan tidak menimbulkan kejutan. Selanjutnya tegangan akan dinaikan secara bertahap sampai ke nominal tegangannya dan motor akan berputar dengan kondisi RPM yang nominal.

Komponen utama soft starting adalah thyristor dan rangkaian yang mengatur trigger thyristor. Seperti diketahui, output thyristor dapat di atur via pin gate nya. Rangkaian tersebut akan mengontrol level tegangan yang akan dikeluarkan oleh thyristor. Thyristor yang terpasang bisa pada 2 fasa atau 3 fasa.

#### b. Karakteristik Soft Starting

Dengan menggunakan softstarting, tegangan motor akan rendah saat start, begitu pula arus start dan torsi start juga rendah. Secara bertahap, tegangan dan

torsi naik sehingga motor dapat mengakselerasi pompa menuju kecepatan nominal tanpa terjadi kenaikan torsi dan arus puncak soft starting dapat dihubungkan secara seri (*In-line*) dengan jalur tegangan ke motor atau dapat pula dihubungkan secara delta pada hubungan delta dari motor, yang akan mengontrol tegangan pada masing-masing belitan.



Gambar 2.20 Kurva Arus Starting Soft Starting<sup>[9]</sup>

## 2.8 Thyristor<sup>[2]</sup>

Thyristor merupakan salah satu tipe devais semikonduktor daya yang paling penting dan telah digunakan secara ekstensif pada rangkaian elektronik daya. Thyristor biasanya digunakan sebagai saklar/bistabil, beroperasi antara keadaan non konduksi ke konduksi. Pada banyak aplikasi, thyristor dapat diasumsikan sebagai saklar ideal akan tetapi dalam pengaplikasiannya thyristor memiliki batasan dan karakteristik tertentu. Thyristor adalah komponen yang prinsip kerjanya mirip dengan dioda namun dilengkapi dengan gate untuk mengatur besarnya fasa yang dilalukan. setelah thyristor tersulut maka thyristor selalu akan dalam kondisi on atau menghantar, dan setelah menerima komutasi (commutation) thyristor akan off atau dalam keadaan tidak menghantar.

### 2.8.1 Karakteristik Anode – Katode

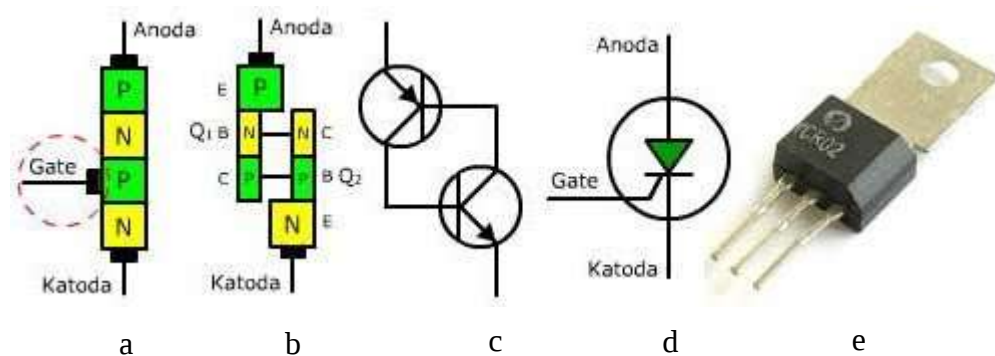
Thyristor merupakan devais semikonduktor 4 lapisan berstruktur npnp dengan tiga pn – junction. Devais ini memiliki tiga terminal : anode, katode, dan gerbang. Thyristor dibuat melalui proses difusi.

Ketika 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* , dan arus bocor dikenal dengan arus *off – state*.

Ketika tegangan katode lebih positif dibanding dengan anode, sambungan j2 ter – forward bias, akan tetapi sambungan J1 dan J3 akan te – reverse bias. Hal ini seperti diode diode yang terhubung secara seri dengan tegangan balik bagi keduanya. Thyristor akan berada pada kondisi *reverse blocking* dan arus bocor dikenal sebagai *reverse current*  $I_R$  akan mengalir melalui devais.

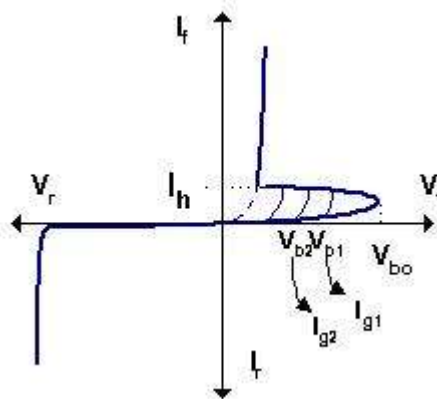
Sebuah Thyristor dibuat dari empat lapisan PNPN dari bahan silicon yang didesain dengan kombinasi switch kontrol pada lapisan P sebagai gate, anode dan katode dibuat dari bahan plate *Molybdenum* seperti pada gambar.

Thyristor mempunyai model rangkaian ekivalen yang terdiri dari dua buah transistor masing – masing type PNP dan NPN yang dirangkai seperti pada gambar 2.21.



Gambar 2.21 Thyristor<sup>[5]</sup>

- Rangkaian thyristor yang disederhanakan
- Rangkaian dua transistor
- Model dua transistor
- Simbol thyristor



Gambar 2.22 Karakteristik Thyristor

Keterangan :

- $V_f$  = tegangan forward, artinya bila anode diberi tegangan positif dan katode negatif.
- $I_f$  = arus forward pada kondisi  $V_f$
- $V_r$  = tegangan reverse, artinya bila anode diberi tegangan negatif dan katode positif.
- $I_r$  = arus reverse pada kondisi  $V_r$ .

## 2.8.2 Pengontrol Gelombang Penuh Tiga Fasa

Pengontrol *unidirectional*, yang mengandung arus masukan dc dan harmonic yang lebih tinggi yang disebabkan bentuk gelombang tegangan keluaran natural yang tidak simetris, tidak biasa digunakan untuk menjalankan motor ac; kontrol dua arah 3 fasa yang lebih sering digunakan. Operasi pengontrol ini sama dengan pengontrol setengah gelombang.

Untuk terhubung star adalah

Tegangan fasa -netral adalah

$$V_{AN} = \sqrt{2} V_s \sin \omega t$$

$$V_{BN} = \sqrt{2} V_s \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \dots\dots\dots (2.4)$$



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

Tegangan jalur masukan instantaneuous adalah

$$V_{AN} = \sqrt{6} V_s \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{6} \right)$$

$$V_{BN} = \sqrt{6} V_s \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \dots\dots\dots (2.5)$$

$$V_{CN} = \sqrt{6} V_s \sin \left( \omega t - \frac{7\pi}{6} \right)$$

Interval untuk sudut tunda adalah

$$0 \leq \alpha \leq 150^\circ \dots\dots\dots (2.6)$$

Mirip dengan pengontrol setengah gelombang, persamaan untuk tegangan fasa keluaran rms untuk beban yang terhubung bintang dapat ditentukan sebagai berikut. Untuk  $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$

$$V_O = \sqrt{6} v_s \left[ \frac{1}{\pi} \left( \frac{\pi}{6} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.7)$$

Untuk  $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$

$$V_O = \sqrt{6} v_s \left[ \frac{1}{\pi} \left( \frac{\pi}{6} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.8)$$

Untuk  $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$

$$V_O = \sqrt{6} v_s \left[ \frac{1}{\pi} \left( \frac{5\pi}{24} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{16} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.9)$$

Untuk Terhubung delta adalah

Tegangan fasa ke fasa adalah

$$V_{AB} = \sqrt{2} V_s \sin \omega t$$

$$V_{BC} = \sqrt{2} V_s \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \dots\dots\dots (2.10)$$



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

Tegangan keluaran rms adalah

$$V_O = V_s \left[ \frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.11)$$

Tegangan keluaran maksimum dapat ditentukan ketika  $\alpha = 0^\circ$ , dan interval kontrol sudut tunda adalah

$$\text{Untuk } 0^\circ \leq \alpha \leq \pi$$