



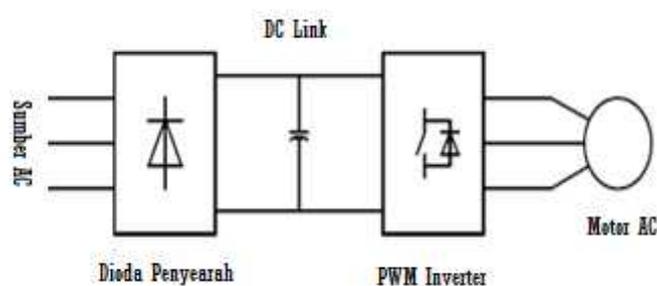
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Inverter

Inverter merupakan alat untuk mengatur kecepatan putaran motor dengan cara mengubah frekuensi listrik sesuai dengan kecepatan motor yang diinginkan. Secara sederhana prinsip dasar dari Inverter (Variabel Frequency Drive) adalah mengubah input motor (Listrik AC) menjadi DC dan kemudian dijadikan AC lagi dengan frekuensi yang dikehendaki sehingga motor dapat dikontrol sesuai dengan kecepatan yang diinginkan.

Variable speed drive atau *variable frequency drive* atau singkatnya disebut dengan *inverter* adalah solusi aplikasi yang membutuhkan kemampuan pengaturan motor lebih lanjut, misal: pengaturan putaran motor sesuai bebannya atau sesuai nilai yang kita inginkan. Penggunaan inverter bisa untuk aplikasi motor AC maupun DC. Istilah *inverter* sering digunakan untuk aplikasi AC.

Ketika kontrol motor tidak lagi sekedar ON/OFF saja maka sudah saatnya menggunakan *variable speed drive*. Sebuah alat yang mampu untuk menawarkan fungsi pengontrolan motor yang lebih lanjut.



Gambar 2.1 Bagian Utama Dari Inverter ^[1]

Inverter ini sendiri terdiri dari beberapa sirkuit penting yaitu sirkuit converter (yang berfungsi untuk mengubahnya daya komersial menjadi DC serta menghilangkan ripple atau kerut yang terjadi pada arus ini) serta sirkuit inverter



frekuensi yang dapat diatur-atur). Inverter juga memiliki sebuah sirkuit pengontrol.

Salah satu keuntungan jika menggunakan inverter adalah, putaran motor atau mesin dapat dikembalikan sesuai dengan kebutuhan dan keinginan kita, sehingga dapat mencapai kapasitas produksi yang maksimal dan mempunyai jangkauan kecepatan yang lebih besar, mempunyai pola untuk hubungan tangan dan frekuensi, mempunyai fasilitas penunjukan meter, serta lebih aman dan meminimalisir konsumsi energi dan untuk mengurangi arus starting.

Mesin-mesin sentrifugal modern telah memanfaatkan Variabel Speed Drive (VSD) sebagai alat pengatur kecepatan. Pegatur kecepatan atau VSD, baik itu frequency Inverter maupun DC-Converter, dapat memberikan pengaturan percepatan dan perlambatan yang lembut pada mesin sentrifugal dan pada saat yang sama dapat memberikan torsi keluaran sampai 100%.^[2]

Aplikasi inverter speed drive banyak diperlukan dalam industri. Jika slip/pengereman maka saat ini banyak menggunakan semikonduktor. Tidak seperti softater yang mengelola level tegangan, inverter menggunakan frekuensi tegangan masuk untuk mengatur speed motor. Seperti diketahui, pada kondisi ideal (tanpa slip).

$$N_s = \frac{120 \times f}{P} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana:

n : Speed Motor (RPM)

f : Frekuensi (Hz)

P : Kutub Motor (pole)

Jadi dengan memainkan perubahan frekuensi tegangan yang masuk pada motor, speed akan berubah. Karena itu inverter disebut juga Variabel frekuensi drive.

Untuk bagian inverter, rangkaian PWM diatas menggunakan divais elektronika daya “Insulated Gate Bipolar Transistor”(IGBT), IGBT memiliki kemampuan pemyaklaran yang sangat tinggi hingga ribuan kali per detik dimana dapat aktif kurang dari 400 nano detik dan mati dalam waktu 500 nano detik.



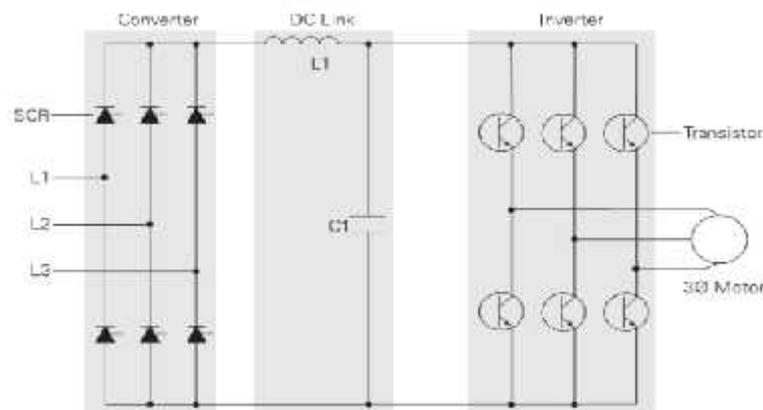
IGBT dibangun oleh sebuah gate, kolektor, dan emitor. Saat gate diberikan tegangan positive (biasanya + 15 VDC), arus akan mengalir melalui kolektor dan emitor. IGBT akan mati saat tegangan dihilangkan dari gate.

Selama kondisi mati. Tegangan gate IGBT akan ditahan pada nilai tegangan negative kondisi mati, tegangan gate IGBT akan ditahankan pada nilai tegangan yang kecil sekitar -15 VDC untuk mencegah agar tidak hidup dengan sendirinya.

2.2 Jenis - Jenis Inverter

2.2.1 Variable voltage inverter (VVI)

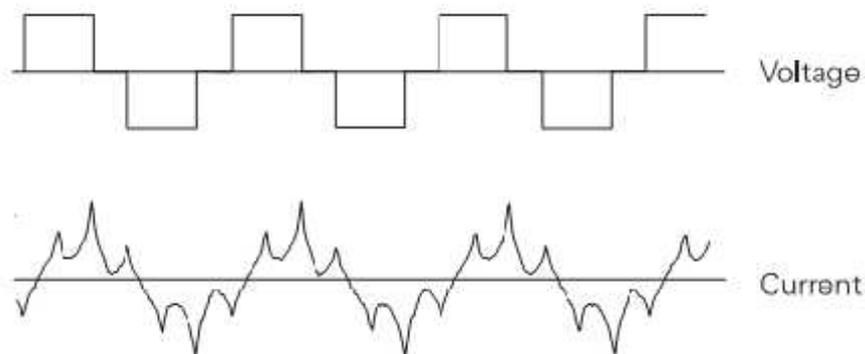
Jenis inverter ini menggunakan konverter jembatan SCR untuk mengubah tegangan input AC ke DC. SCR adalah komponen elektronika daya yang memiliki kemampuan untuk mengatur nilai tegangan DC mulai dari 0 hingga mendekati 600 VDC. Induktor L1 sebagai *choke* dengan kapasitor C1 membentuk bagian dengan istilah DC-link yang membantu memperhalus kualitas tegangan DC hasil konversi. Bagian inverter sendiri terdiri dari kumpulan divais penyaklaran seperti: thyristor, transistor bipolar, MOSFET, atau IGBT. Gambaran berikut menunjukkan inverter yang menggunakan transistor bipolar. Pengatur logika, biasanya dalam bentuk kartu elektronik, yang memiliki komponen utama sebuah mikroprosesor akan mengatur kapan waktu transistor-transistor inverter hidup atau mati untuk menghasilkan tegangan dan frekuensi yang bervariasi untuk dilanjutkan ke motor sesuai bebannya. [3]



Gambar 2.2 Tegangan Variabel Inverter Sirkuit



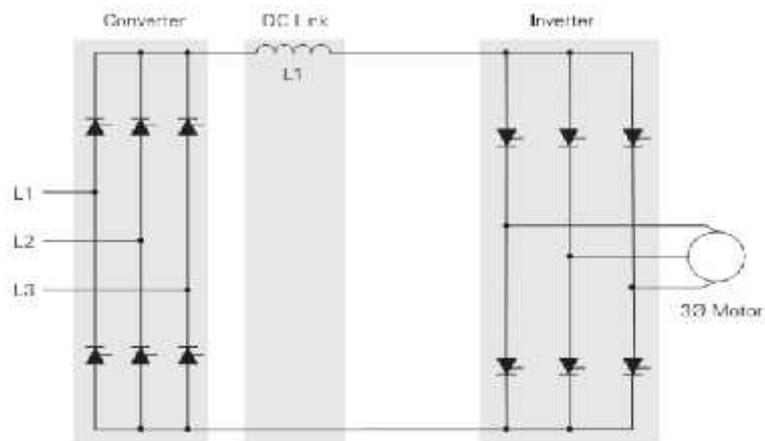
Tipe inverter ini menggunakan enam langkah untuk menyelesaikan satu putaran 360° (6 langkah masing-masing 60°). Oleh karena hanya enam langkah, inverter jenis ini memiliki kekurangan yaitu torsi yang pulsatif (peningkatan/penurunan nilai yang mendadak) setiap penyaklaran terjadi. Dan ini dapat ditemui pada operasi kecepatan rendah seiring variasi putaran motor. Istilah teknis dari putaran yang bervariasi ini adalah *cogging*. Selain itu, bentuk gelombang sinyal keluaran yang tidak sinusoidal sempurna mengakibatkan pemanasan berlebih di motor yang mengakibatkan motor mesti dijalankan di bawah nilai *rating*-nya.



Gambar 2.3 Gelombang Output Inverter Tegangan

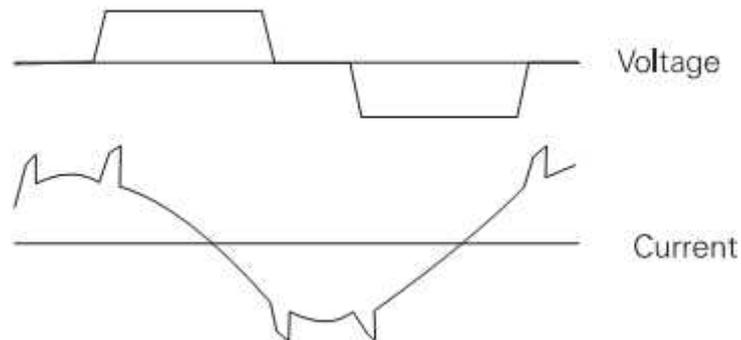
2.2.2 Current source inverter (CSI)

Jenis inverter satu ini menggunakan SCR untuk menghasilkan tegangan DC-link yang bervariasi untuk suplai ke bagian inverter yang juga terdiri dari SCR untuk menyaklarkan keluaran ke motor. Beda dengan VVI yang mengontrol tegangan, CSI justru mengontrol arus yang akan disuplai ke motor. Karena inilah pemilihan motor haruslah hati-hati agar cocok dengan drive. Berikut gambaran sederhana inverter sumber arus.



Gambar 2.4 Sumber Arus Inverter

Percikan arus akibat proses penyaklaran dapat dilihat pada keluaran jika kita mengukurnya menggunakan *oscilloscope*. Pada kecepatan rendah sifat arus yang pulsatif dapat mengakibatkan motor tersendat ‘*cog*’.^[3]



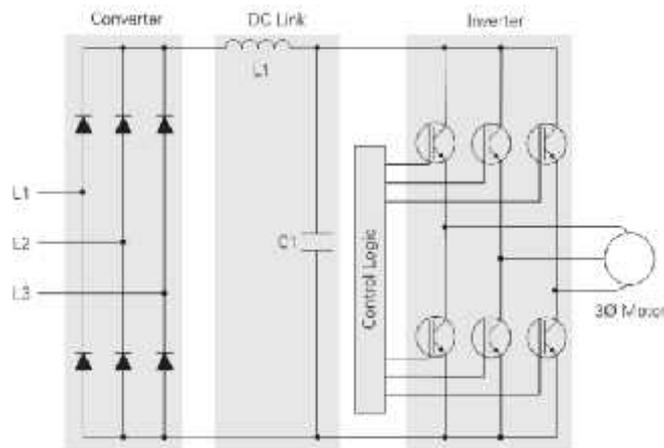
Gambar 2.5 Gelombang Output Inverter Sumber Arus

2.2.3 Pulse width modulation (PWM)

Teknik penyaklaran satu ini memberikan output yang lebih sinusoidal dibandingkan dua jenis inverter sebelumnya. Drive yang menggunakan PWM terbukti lebih efisien dan memberikan tingkat performa yang lebih tinggi. Sama seperti VVI, sebuah PWM juga terdiri atas rangkaian konverter, DC link, *control logic*, dan sebuah inverter. Biasanya konverter yang digunakan adalah tipe tidak

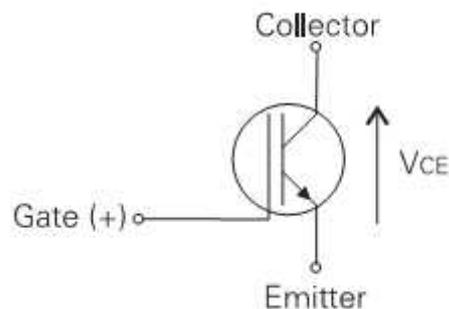


terkontrol (dioda biasa) namun juga ada yang menggunakan setengah terkontrol atau kontrol penuh. Perhatikan gambar sebuah PWM berikut ini.



Gambar 2.6 Skema Dasar PWM

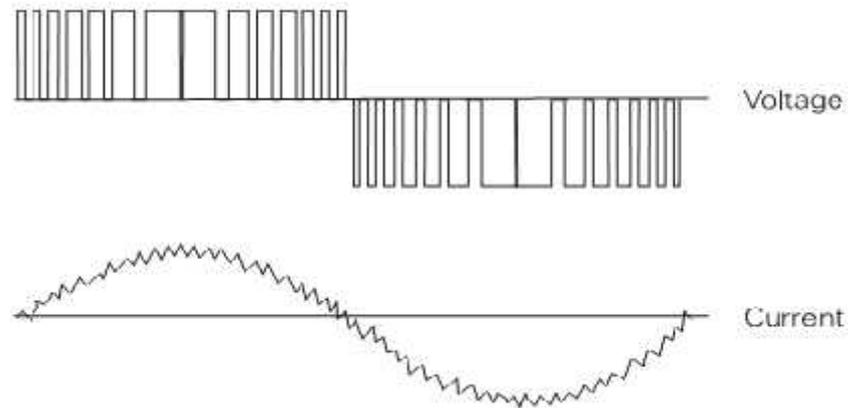
Untuk bagian inverter, rangkaian PWM di atas menggunakan divais elektronika daya “Insulated Gate Bipolar Transistor” (IGBT). IGBT memiliki kemampuan penyaklaran yang sangat tinggi hingga ribuan kali per detik dimana dapat aktif kurang dari 400 nano detik dan mati dalam waktu 500 nano detik. IGBT dibangun oleh sebuah *gate*, kolektor, dan emiter. Saat *gate* diberikan tegangan positif (biasanya +15VDC), arus akan mengalir melalui kolektor dan emiter. IGBT akan mati saat tegangan positif dihilangkan dari *gate*. Selama kondisi mati, tegangan *gate* IGBT akan ditahan pada nilai tegangan negatif yang kecil sekitar -15V VDC untuk mencegah agar tidak hidup dengan sendirinya.



Gambar 2.7 Gerbang Transistor Bipolar

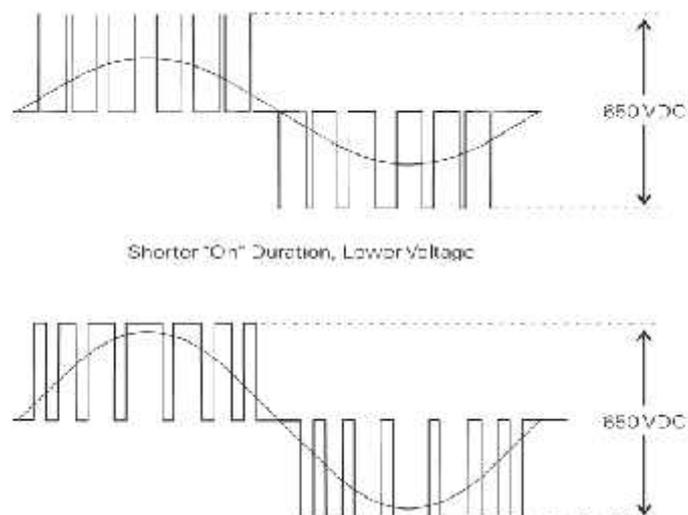


Berikut gambaran gelombang keluaran inverter PWM.:



Gambar 2.8 Gelombang PWM

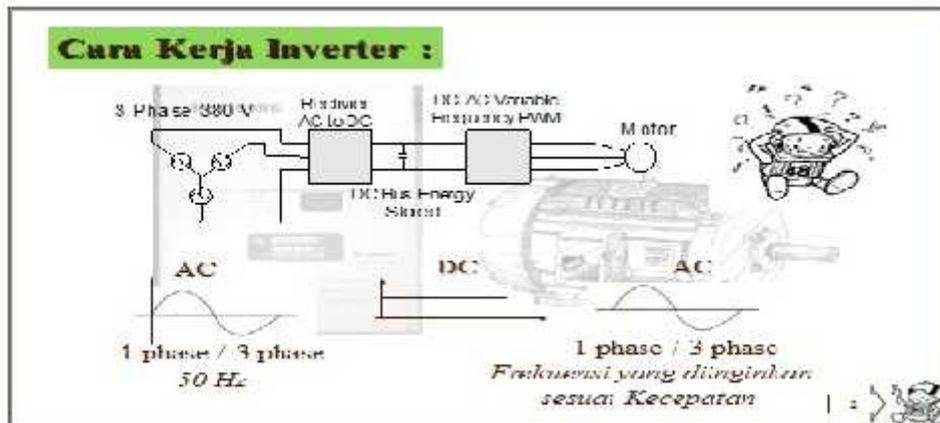
Sebagai catatan, amplituda tegangan dapat kita mainkan dengan mengatur durasi hidupnya. Untuk frekuensi rendah yang membutuhkan tegangan rendah, durasi ini akan diperpendek hingga pembentukan arus dan tegangan motor akan lambat. Dengan memperpanjang durasi penyaklaran, pembentukan arus dan tegangan akan cukup lama hingga mencapai nilai yang maksimal dibandingkan waktu yang lebih pendek. ^[3]



Gambar 2.9 Gelombang Untuk Mengendalikan Amplitudo Tegangan PWM



2.3 Prinsip Kerja Inverter

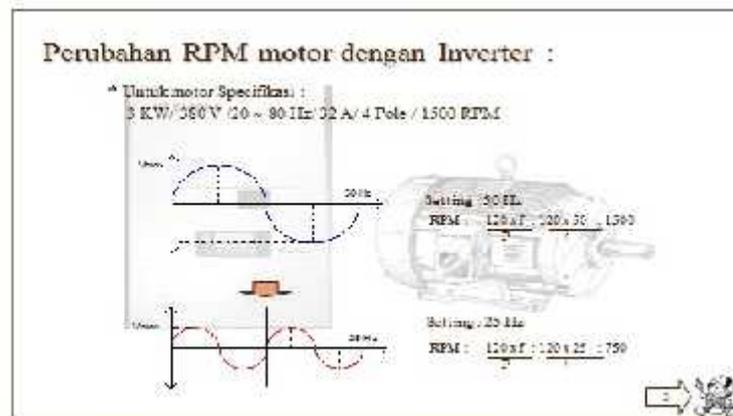


Gambar 2.10 Prinsip Kerja Sederhana Inverter^[4]

Dari gambar di atas terdapat Rectifier yang berfungsi sebagai penyerah untuk menghilangkan ripple current (arus riak) akibat proses penyerahan yang masih terdapat arus AC digunakan Filter. Filter ini mampu membentuk gelombang tegangan keluarannya bisa menjadi rata.

Prinsip kerja inverter dari gambar di atas adalah sebagai berikut :

1. Tegangan yang masuk dari jala-jala 50 Hz dialirkan ke board Rectifier/penyearah DC, dan ditampung ke bank capacitor. Jadi dari AC ke di jadikan DC.
2. Tegangan DC kemudian diumpamakan ke board inverter untuk dijadikan AC kembali dengan frekuensi sesuai kebutuhan. Jadi dari DC ke AC yang komponen utamanya adalah Semikonduktor aktif seperti IGBT. Dengan menggunakan frekuensi carrier (bisa sampai 20 kHz), tegangan DC dicacah dan dimodulasi sehingga keluar tegangan dan frekuensi yang diinginkan.



Gambar 2.11 Perubahan RPM Motor dengan Menggunakan Inverter

Gambar diatas merupakan perubahan motor dengan inverter yaitu adanya perubahan frekuensi yang berfungsi sebagai pengatur kecepatan pada motor. Untuk pemasangan inverte sebaiknya juga dipasang unit pengaman hubung singkat seperti seonduktor fuse atau bisa juga breaker. Ini seperti pada pemasangan softstater saja tanpa contractor bypass

Pengontrolan start, stop, jogging dll bisa dilakukan dengan dua cara yaitu via local dan remote. Local maksudnya adalah dengan menekan tombol pada keypad di inverternya. Sedangkan remote dengan menghubungkan terminal di board control dengan tombol external seperti push button atau switch. Masing masing option tersebut mempunyai kelemahan dan keunggulan sendiri sendiri.

Frekuensi dikontrol dengan berbagai macam cara yaitu : melalui keypad (local), dengan external potensiometer, Input 0 ~ 10 VDC , 4 ~ 20 mA atau dengan preset memori. Semua itu bisa dilakukan dengan mengisi parameter program yang sesuai.

Beberapa parameter yang umum dipergunakan/ minimal adalah sebagai berikut (*istilah/nama parameter bisa berbeda untuk tiap merk*) :

- Display : Untuk mengatur parameter yang ditampilkan pada keypad display.
- Control : Untuk menentukan jenis control local/ remote.
- Speed Control : Untuk menentukan jenis control frekuensi reference



- d. Voltage : Tegangan Suply Inverter.
- e. Base Freq. : Frekuensi tegangan supply.
- f. Lower Freq. : Frekuensi operasi terendah.
- g. Upper Freq. : Frekuensi operasi tertinggi.
- h. Stop mode : Stop bisa dengan braking, penurunan frekuensi dan di lepas seperti starter DOL/ Y-D.
- i. Acceleration : Setting waktu Percepatan.
- j. Deceleration : Setting waktu Perlambatan.
- k. Overload : Setting pembatasan arus.
- l. Lock : Penguncian setting program.

Jika beban motor memiliki inerti yang tinggi maka perlu diperhatikan beberapa hal dalam acceleration dan deceleration. Untuk acceleration/ percepatan akan memerlukan torsi yang lebih, terutama pada saat start dari kondisi diam.

Pada saat deceleration/ perlambatan, energi inerti beban harus dibuang. Untuk perlambatan (pengereman) maka energi akan dikembalikan ke sumbernya. Jadi energi yang kembali akan masuk ke dalam DC Bus Inverter dan terakumulasi karena terhalang oleh rectifier. Sebagai pengamanan, inverter akan trip jika level tegangan DC Bus melebihi batas yang ditoleransi. Untuk mengatasi tripnya inverter dalam kondisi ini diperlukan resistor brake. Resistor brake akan membuang tegangan yang lebih dalam bentuk panas. Besar kecilnya resistor brake ini sangat tergantung dengan beban dan siklus kerja inverter.

Pada penggunaan soft starter hanya untuk soft starting alias mengurangi lonjakan arus awal pada motor-motor besar tapi soft starter tidak bisa mengendalikan kecepatan motor seperti yang dilakukan inverter. Signal-signal dari inverter yang ditarik secara Hardwired ke PLC untuk signal digital seperti Start (Forward, Reverse), Stop, Ready, Run, Overload/Fault, dan untuk signal analog seperti set point RPM dan ampere motor. Tapi kebanyakan inverter sudah support untuk hubungan komunikasi modbus, sehingga lebih memudahkan kita dalam pengontrolan dan memonitoringnya.^[4]



2.4 Pengertian Motor Listrik

Motor Listrik adalah Mesin yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Prinsip kerjanya berdasarkan hukum gaya lorenz dan kaidah tangan kiri fleming, yang menyatakan bahwa: Apabila sebatang konduktor yang dialiri arus listrik ditempatkan didalam medan magnet maka konduktor tersebut akan mengalami gaya. Motor yang paling banyak digunakan dalam industri adalah jenis motor induksi.

Komponen dalam motor listrik sangatlah banyak, akan tetapi komponen-komponen tersebut dapat dikelompokkan menjadi dua bagian, yaitu bagian komponen utama dan bagian komponen pelengkap.

Komponen utama terdiri dari stator dan rotor, sedangkan komponen pelengkap terdiri dari celah udara, terminal, bearing, badan motor, slip ring, kipas atau baling-baling, dan tutup motor atau cover motor.

1. Komponen utama motor listrik

a. Stator

Stator adalah bagian yang tidak bergerak. Bagian stator terdiri dari saluran-saluran atau slot-slot yang terbuat dari pelat-pelat yang dipejalkan. Sebelum kawat dililitkan pada slot-slot tersebut menggunakan kertas normet, setelah itu dililitkanlah kawat-kawat tersebut atau penghantar yang merupakan gulungan statornya. Bentuk gulungan pada dasarnya cukup banyak, namun yang umum digunakan ada 3 macam, yaitu block biasa, block diamond, dan block smith. Penempatan sistem gulungan-gulungan yang ada disesuaikan dengan slot yang ada dalam motor tersebut dan biasanya untuk slot dalam motor yang besar memakai sistem block smith dan untuk ruangan didalam motor yang kecil memakai block diamond atau block biasa.

Didalam stator terdapat kumparan-kumparan yang dapat dihubungkan bintang/star dan atau segitiga/delta. Kumparan-kumparan ini dihubungkan dengan sumber daya 3 fasa, sehingga didapatkan sebuah medan magnet putar. Kecepatan medan magnet putar tergantung pada jumlah kutub stator



dan frekuensi sumber dayanya. Kecepatan ini disebut kecepatan sinkron, yang ditentukan dengan rumus :

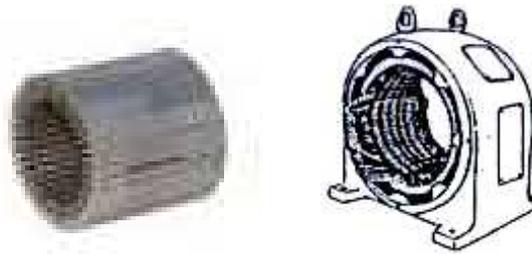
$$N_s = \frac{120 \times f}{P} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana :

N_s = Kecepatan medan putar stator (rpm).

f = Frekuensi sumber daya (Hz).

P = Jumlah kutub stator.



Gambar 2.12 Kumbaran Stator

Sumber (Motor Induksi, Geyosoft. 2013)

b. Rotor

Rotor dari motor induksi ada dua macam, yaitu rotor sangkar tupai (*squirrel cage rotor*) dan rotor lilit (*wound rotor*). Rotor motor induksi tidak berputar pada kecepatan sinkron tetapi sedikit ketinggalan atau terjadi selisih jumlah putaran antara putaran stator dan putaran rotor. Ketinggalan atau selisih tersebut biasanya dinyatakan sebagai persentase kecepatan sinkron yang disebut slip, dan dirumuskan dengan :

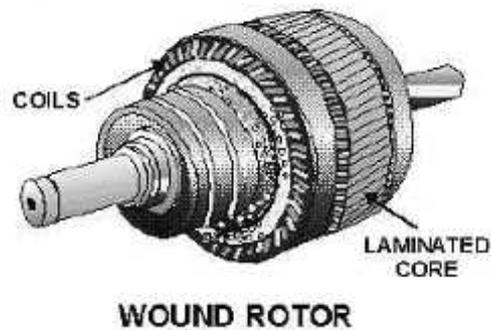
$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100 \% \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

S = Slip atau selisih putaran rotor da stator pada motor induksi

N_s = Kecepatan medan Putar stator (rpm)

N_r = Kecepatan medan putar rotor (rpm)



Gambar 2.13 Kumbaran Rotor

2.5 Jenis - Jenis Motor Listrik

Menurut Kadir (2000 : 192) terdapat berbagai jenis motor listrik, yang dapat digolongkan menjadi dua kelompok, yaitu mesin arus searah dan mesin arus bolak-balik. Motor arus bolak-balik, terutama motor induksi terbanyak dipakai dalam industri, sedangkan motor arus searah dipergunakan untuk tujuan-tujuan khusus. (*Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*)

2.5.1 Motor listrik arus searah (motor DC)

Menurut Kadir (2000 : 192) Motor arus searah merupakan salah satu mesin listrik yang mengubah energy listrik searah menjadi energy gerak.



Gambar 2.14 Motor Arus Searah (DC)

Sumber (file Direct Industry, 2005)



Rumus-rumus umum yang menguasai motor listrik adalah :

$$V = E + I_j R_j = c.n.\phi + I_j R_j$$

Karena dari sebuah motor yang dianggap penting adalah putaran dan torsi T, dari rumus umum di atas dapat diperoleh :

$$n = \frac{V - I_j R_j}{c.\phi} \dots \dots \dots (2.4)$$

dan :

$$T = c1 I_j \phi$$

dimana :

V = tegangan ampitan

E = gaya gerak listrik yang diinduksikan

I_j = arus jangkar

R_j = resistansi jangkar

c = konstanta

N = putaran motor

φ = fluks

T = torsi

c1 = konstanta

jenis- jenis motor arus searah (motor DC) terdiri atas :

1. Motor shunt
2. Motor seri
3. Motor kompon

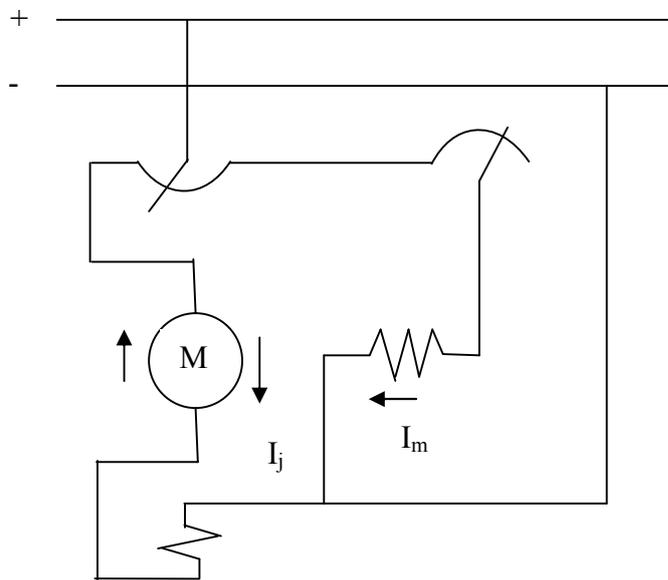
1. Motor shunt

Menurut Kadir (2000 : 193) motor shunt dan motor dengan pengisian luar dikelompokkan satu karena memiliki sifat-sifat yang sama. Gambar 2.15 (a) memperlihatkan skema motor shunt. Arus I_j merupakan arus jangkar, dan dengan sendirinya mengalir melalui sangkar, sedangkan I_m merupakan arus magnetisasi yang melewati kumparan magnetisasi. Pada

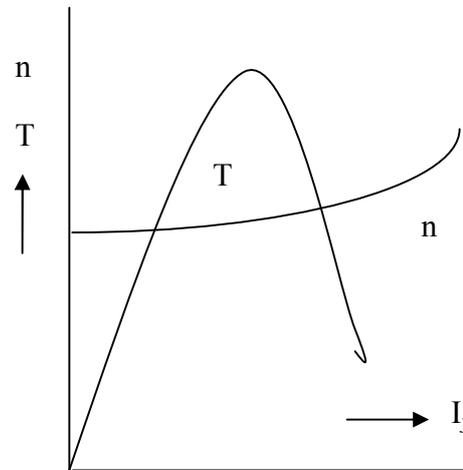


motor dengan pengisian luar maka kumparan magnetisasi disambung langsung dari jaringan luar. Dapat dilihat bahwa arus magnetisasi dapat diatur melalui rheostat. Rheostat yang berada dalam seri dengan jangkar mengatur besar arus jangkar.

Pada gambar 2.15 (b) terlihat besar torsi T dan putaran n sebagai fungsi arus jangkar I_j . Lengkung torsi memperlihatkan suatu nilai beban puncak, sedangkan lengkung putaran n berbentuk agak mendatar. Karenanya motor shunt banyak dipakai untuk aplikasi yang memerlukan kecepatan yang konstan seperti mesin-mesin untuk mengerjakan kayu, konvaier (conveyer), dan lain sebagainya, yang pada umumnya juga memerlukan beban yang agak tetap. Untuk memperlambat putran, dan akhirnya menghentikan mesin, besar arus I_j dikurangi dengan menggerakkan rheostat. (*Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*)



(a) Skema



(b) Karakteristik Putaran dan Torsi

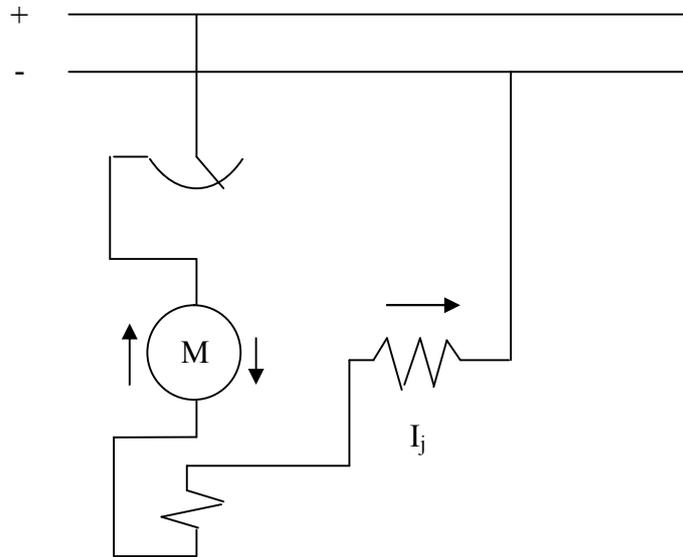
Gambar 2.15 Skema dan Karakteristik Putaran dan Torsi Motor Shunt
 Sumber (*Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*, hal : 193)

2. Motor seri

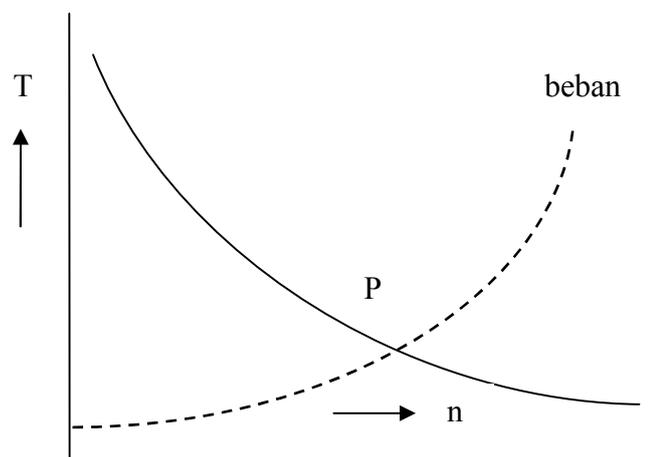
Menurut Kadir (2000:194) pada motor seri maka kumparan magnetisasi terpasang seri dengan jangkar. Dengan demikian maka arus magnetisasi adalah sama dengan arus jangkar I_j . Hal ini terlihat pada gambar 2.16 (a) yang merupakan skema motor seri arus searah. Sebagaimana halnya dengan semua motor, lengkung torsi dan putaran adalah penting. Pada gambar 2.16 (b) terlihat lengkap putaran torsi tersebut. Bentuk lengkung ini sangat menarik perhatian, karena dua hal. Pertama, torsi awal yaitu pada putaran n yang kecil, adalah besar. Kedua, pada harga n yang lebih besar, bentuk torsi T menjadi landai. Karenanya, motor seri sangat cocok untuk keperluan traksi, yaitu sebagai motor pada kereta rel listrik. Sebab, start kereta rel adalah berat sekali. Namun setelah mencapai sedikit kecepatan, beban menjadi berkurang, dan tidak diperlukan lagi torsi yang tinggi. Pada gambar 2.16 (b) juga terlihat grafik beban, yang bertemu dengan lengkung putaran torsi pada titik P. Mengatur kecepatan dilakukan dengan reostat yang berada



dalam hubungan seri dengan jangkar.(*Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*)



(a) Skema



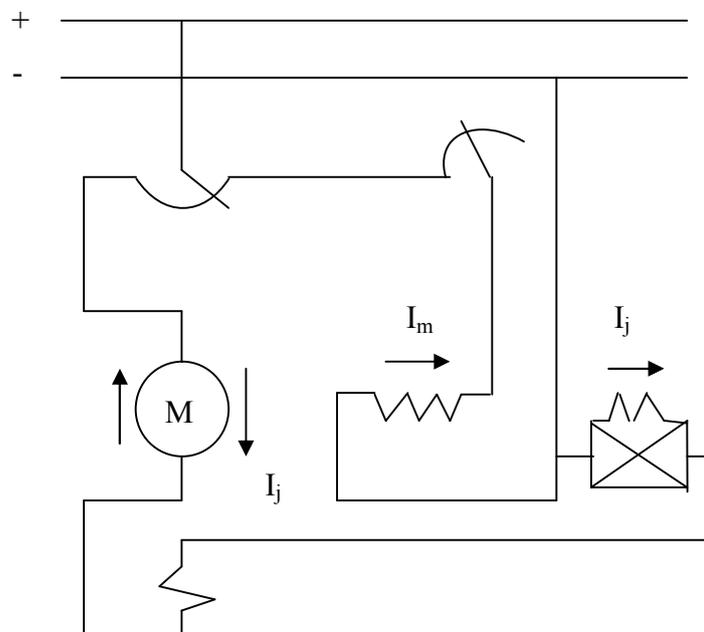
(b) Karakteristik Putaran – Torsi dengan Beban

Gambar 2.16 Skema dan Karakteristik Putaran – Torsi dengan Beban Motor Seri
Sumber (*Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*, hal : 195)

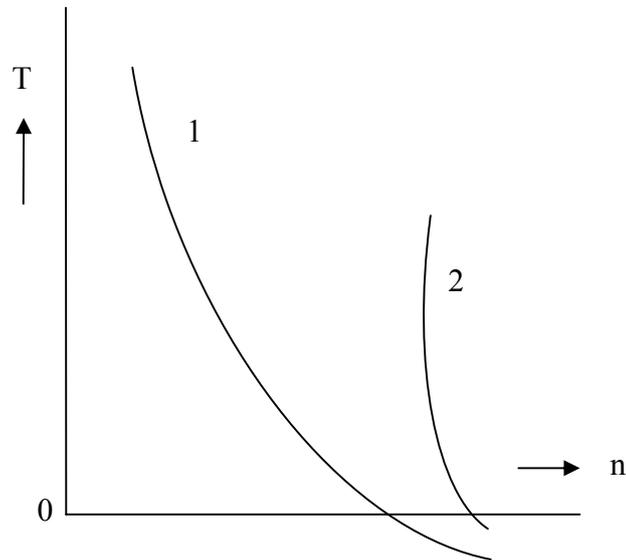


3. Motor kompon

Menurut Kadir (2000 : 195) motor kompon pada dasarnya merupakan motor shunt, namun memiliki tambahan suatu medan magnetisasi, dengan demikian terdapat dua kumparan magnetisasi, sebagaimana terlihat pada gambar 2.17 (a) satu dialiri arus I_m dan yang satunya dialiri arus jangkar I_j . Arus I_j ini dapat searah dengan I_m dan mesin disebut motor kompon ikut. Bila arah arus I_j berlawanan dengan arah arus magnetisasi I_m dan mesin dinamakan motor motor lawan. Pada gambar 2.17 (b) terlihat karakteristik putaran torsi. Terdapat dua lengkung, yaitu lengkung 1 yang berasal dari motor kompon ikut, dan lengkung 2 yang berasal dari motor kompon lawan. Sebagaimana terlihat pada karakteristik putaran torsi, besaran torsi awal adalah tinggi. Karenanya banyak dipakai untuk menggerakkan, antara lain, kompresor, gergaji putar dan konvaier yang memerlukan torsi awal yang tinggi. (*Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*)



(a) Skema



(b) Karakteristik Putaran – Torsi Motor Kompon

Gambar 2.17 Skema dan Karakteristik Putaran Torsi Motor Kompon

Sumber (*Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*, hal : 196)

2.5.2 Motor listrik arus bolak – balik (motor AC)

Menurut Sumanto (1993 : 1) motor arus bolak balik (motor AC) ialah suatu mesin yang berfungsi untuk mengubah tenaga listrik arus bolak balik (listrik AC) menjadi tenaga gerak atau tenaga mekanik, dimana tenaga gerak itu berupa putaran dari pada rotor. (*Motor Listrik Arus Bolak Balik*)

2.5.2.1 Ditinjau dari hubungan putaran dan frekuensi fluks magnet stator

Menurut Sumanto (1993:1) bila ditinjau dari hubungan putaran dan frekuensi/putaran fluks magnet stator, maka motor AC dapat dibedakan atas :

- a. motor sinkron (motor serempak)

Disebut motor sinkron karena putaran motor sama dengan putaran fluks magnet stator, sesuai dengan persamaan :

$$n = \frac{120f}{p} \dots \dots \dots (2.5)$$

Di mana :

n = jumlah putaran tiap menit (r.p.m)



f = frekuensi jala-jala

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 penggerak permulaan. Sebagai penggerak permulaan umumnya dikerjakan oleh mesin lain. Motor ini memerlukan arus searah (DC) untuk pembangkitan daya dan memiliki torque awal yang rendah, dan oleh karena itu motor sinkron cocok untuk penggunaan awal dengan beban rendah, seperti kompresor udara, perubahan frekuensi dan generator motor.

b. motor asinkron

Disebut motor asinkron karena putaran motor tidak sama dengan putaran fluks magnet stator. Dengan perkataan lain, bahwa antara pada rotor dan fluks magnet stator terdapat selisih perputaran yang disebut dengan slip. Jadi pada motor asinkron jumlah putaran motor dapat ditulis dengan persamaan :

$$n < \frac{120f}{P} \dots \dots \dots (2.6)$$

(Motor Listrik Arus Bolak Balik).

2.5.2.2 Cara penerimaan tegangan atau arus

Menurut Sumanto (1993 : 2) ditinjau dari segi cara rotor menerima tegangan atau arus, dapat dikenal 2 jenis motor yaitu :

a. motor AC yang rotornya menerima tegangan secara langsung

Motor jenis ini biasanya dijumpai pada motor universal, motor DC. Pada motor jenis ini, tegangan listrik diberikan secara langsung dari sumber tegangan melalui suatu sambungan listrik secara langsung (bukan berdasarkan prinsip induksi).

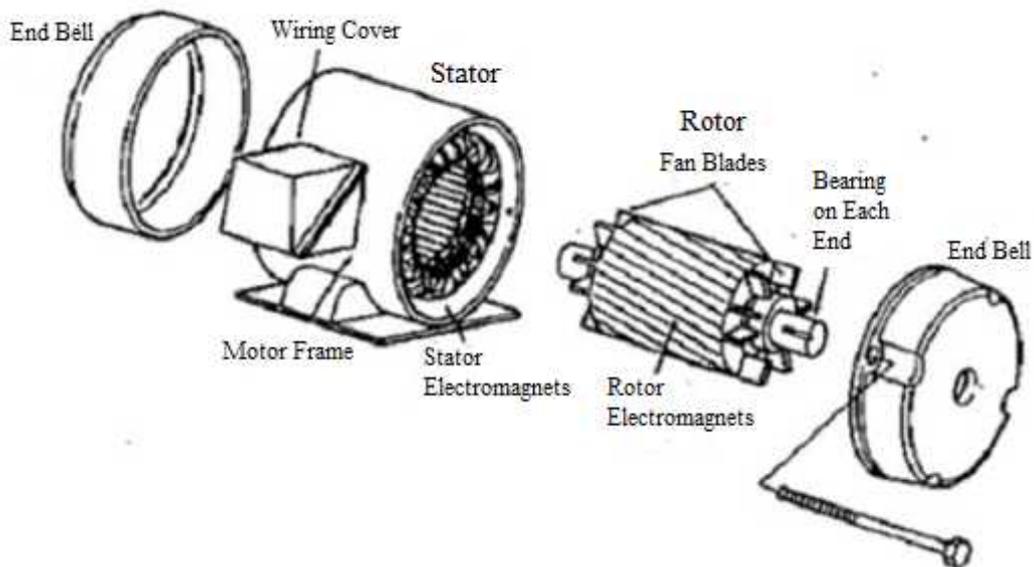
b. Motor Induksi.

(Motor Listrik Arus Bolak Balik)



2.6 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.



Gambar 2.18 Motor Induksi

Sumber (Automated Buildings, 2006)

2.6.1 Jumlah fase tegangan yang digunakan

Menurut Sumanto (1993 : 3) ditinjau dari jumlah fase tegangan yang digunakan dapat dikenal 2 jenis motor, yaitu :

a. Motor satu fasa

Disebut motor satu fasa karena untuk menghasilkan tenaga mekanik, pada motor tersebut dimasukkan tegangan satu fasa. Motor satu fasa lilitan statornya terdiri dari 2 jenis lilitan, yaitu lilitan pokok dan lilitan bantu. Atau dengan kata lain, bahwa arus yang mengalir pada lilitan pokok dan lilitan bantu tidak sefasa. Motor satu fasa seperti itu disebut motor fasa belah. Motor satu fasa dikenal bermacam-macam, yaitu :



- a) Motor kapasitor
- b) Motor kutub bayangan
- c) Motor repulse
- d) Motor seri

(Motor Listrik Arus Bolak Balik)

b. Motor tiga fasa

Menurut Kadir (2000 : 202) 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

Setiap motor listrik sudah mempunyai klasifikasi tertentu sesuai dengan maksud penggunaannya sebagai alat penggerak yang diperlukan menurut kebutuhan yang diinginkan. Klasifikasi tiap motor listrik bisa dibaca pada name plate yang dipasang padanya sehingga untuk berbagai keperluan penggerakan bisa dipilih motor yang sesuai.

$$n_s = \frac{f}{P} \text{ atau } N_s = \frac{60 f}{P} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana :

n_s = diukur dalam satuan putaran per detik (revolutions per second, rps)

N_s = diukur dalam satuan putaran per menit (revolutions per minute, rpm)

f = frekuensi suplai dalam Hertz (Hz)

P = jumlah pasangan kutub

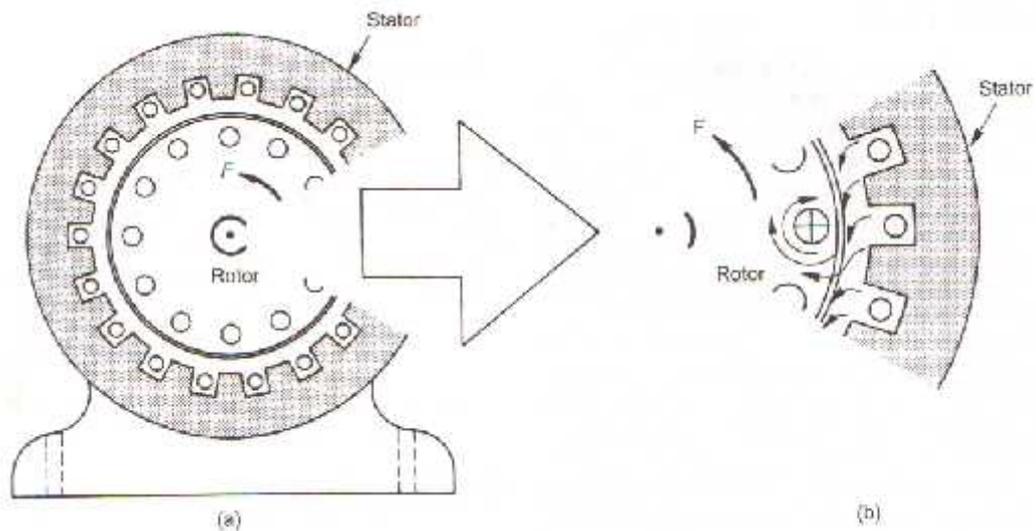
Motor yang paling banyak dipakai di industri adalah jenis motor induksi. Motor Induksi terdiri dari stator dengan tiga kumparan yang ditempatkan secara simetris pada alur-alurnya. Disebut motor induksi karena arus yang mengalir pada rotor adalah arus induksi sebagai akibat dari timbulnya GGL



induksi pada konduktor-konduktor pada rotor yang disebabkan medan putar stator. (*Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*)

2.6.2 Motor induksi tiga fasa

Menurut Linsley (2004 : 146) jika suatu suplai tiga fasa diberikan pada belitan stator suatu motor induksi seperti tampak pada Gambar 2.19 (a), akan dibangkitkan suatu fluks magnetik putar. Fluks magnetik putar ini akan memotong kawat-kawat penghantar dari belitan rotor sehingga sesuai dengan hukum Faraday akan dibangkitkan ggl induksi pada kawat-kawat penghantar belitan rotor ini. Ggl induksi ini akan mengakibatkan terjadinya aliran arus pada kawat-kawat penghantar dari belitan rotor yang selanjutnya akan membangkitkan fluks magnetik yang berinteraksi dengan fluks stator. Interaksi kedua fluks magnetik ini mengakibatkan terjadinya gaya pada kawat-kawat penghantar rotor seperti dilihatkan oleh Gambar 2.19 (b) dibawah.



Gambar 2.19 Bagian yang Diambil Dari Sebuah Motor Induksi Untuk Menunjukkan Gaya yang Mengakibatkan Putaran Rotor :

(a) Konstruksi Motor Induksi; (b) Pembangkitan Torsi oleh Fluks-fluks Medan Magnetic

Sumber (*Instalasi Listrik Tingkat Lanjut*, hal : 147)



Gaya terjadinya putaran, dikenal juga sebagai torsi, yang dialami oleh rotor dibangkitkan dengan menginduksikan ggl pada kawat-kawat penghantar belitan rotor sebagai akibat dari adanya pergerakan relative antara kawat-kawat penghantar ini dan fluks magnetik putar. Torsi ini akan menghasilkan putaran rotor dengan arah yang sama arah putaran fluks magnetik. Pada saat motor dijalankan, kecepatan putaran rotor akan terus meningkat sampai mendekati kecepatan putaran fluks magnetic atau kecepatan sinkronnya. Semakin cepat putaran rotor maka akan semakin kecil selisih kecepatan di antara rotor dan fluks magnetik putar. Sesuai hukum Faraday, kondisi ini akan mengakibatkan ggl induksi yang lebih kecil, arus rotor yang lebih kecil dan torsi yang lebih kecil pula. Rotor tidak akan pernah berputar pada kecepatan sinkron karena jika hal ini terjadi, maka tidak akan terjadi pembangkitan ggl induksi, arus, dan torsi. Motor induksi oleh karena itu dikenal pula sebagai motor asinkron. Dalam kenyataan sehari-hari, rotor motor induksi akan berputar kurang lebih antara 2% sampai dengan 5% di bawah putaran sinkronnya sehingga tetap akan dibangkitkan torsi untuk mengatasi rugi-rugi rotor dan beban motor. Selisih antar kecepatan putaran rotor dan kecepatan sinkron dikenal sebagai slip per unit motor, disimbolkan dengan huruf s , yang dirumuskan oleh persamaan berikut :

$$s = \frac{(n_s - n)}{n_s} = \frac{(N_s - N)}{N_s} \dots \dots \dots (2.8)$$

Dimana :

n_s = kecepatan sinkron dalam satuan per detik

N_s = kecepatan sinkron dalam satuan putaran per menit

N = kecepatan rotor dalam satuan putaran per menit.

Umumnya slip motor ini dinyatakan dalam persen yang diperoleh dengan mengalihkan rumus untuk penghitungan per unit slip di atas dengan 100.

(Instalasi Listrik Tingkat lanjut)

2.6.3 Prinsip kerja motor induksi 3 fasa

Prinsip kerja motor induksi atau terjadinya putaran pada motor, bisa dijelaskan sebagai berikut :



- a. Bila kumparan stator diberi suplai tegangan tiga fasa, maka akan terjadi medan putar dengan kecepatan.
- b. Medan putar stator tersebut akan mengimbas penghantar yang ada pada rotor, sehingga pada rotor timbul tegangan induksi.
- c. Tegangan yang terjadi pada rotor menyebabkan timbulnya arus pada penghantar rotor.
- d. Bila kopel mula yang dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor cukup besar untuk menanggung kopel beban, maka rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.
- e. Supaya timbul tegangan induksi pada rotor, maka harus ada perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator (N_s) dengan kecepatan putar rotor (N_r). Perbedaan kecepatan antara N_r dengan N_s disebut Slip (S),
- f. Bila $N_r = N_s$ tegangan tidak akan terinduksi dan arus tidak mengalir pada kumparan jangkar rotor, sehingga tidak dihasilkan kopel. Kopel pada motor akan terjadi bila N_r lebih kecil dari N_s .

2.6.4 Pengasutan motor induksi

Pengasut motor induksi adalah cara menjalankan pertama kali motor beroperasi, yang bertujuan agar starting kecil dan drop tegangan masih dalam batas toleransi, ada beberapa cara pengasut, diantaranya :

- a. Hubungan langsung (Direct On Line / DOL)
 - b. Tahanan depan stator (Primary Resistor)
 - c. Segitiga Bintang (Star – Delta)
 - d. Soft starting
 - e. Autotransformator
- a. Pengasutan motor secara langsung (Direct On Line)

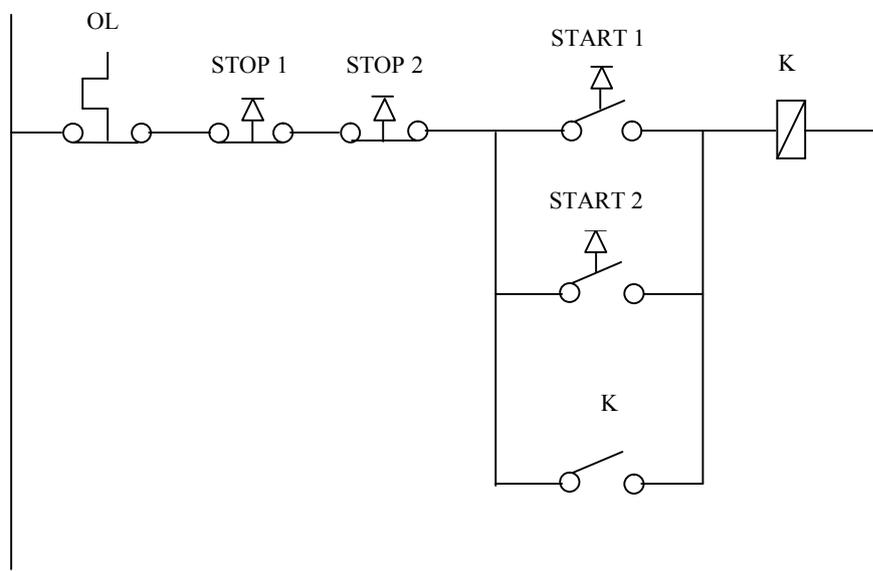
Menurut Modul Yani (2004:21) motor dibolehkan operasi secara langsung bila daya motor tidak terlalu besar / kurang dari 5 HP. Menjalankan



motor secara langsung artinya motor dihubungkan langsung ke jala-jala dan hanya dilengkapi pengaman beban lebih atau sekerig.

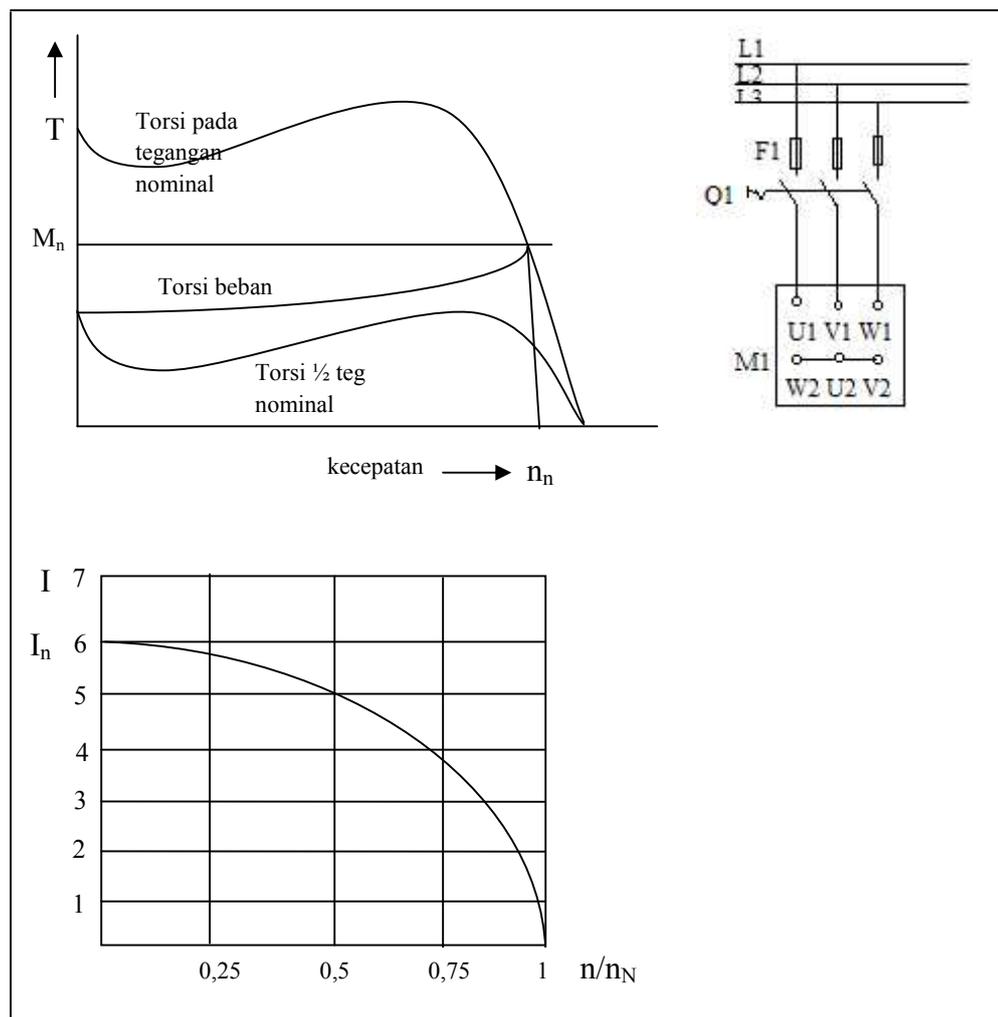
Pengontrol secara manual dapat dilakukan dengan menggunakan saklar sebagai fungsi ON dan OFF, misalnya saklar tekan udara untuk kompresor, saklar pengapung pada control mesin pompa, thermostat pada mesin pendingin dan banyak lagi yang dapat kita temukan diindustri.

Pengontrolan secara otomatis dapat dilakukan dengan alat-alat control relay magnet, seperti kontaktor. Saat pemutus/kontaktor di ON kan motor induksi akan menarik arus starting antara 5 sampai 6 kali arus nominal motor. Untuk motor induksi dengan daya 5 KW, hubungan langsung (DOL) bisa dipakai. Arus starting yang besar akan menyebabkan drop tegangan disisi supply. Karena untuk motor daya besar akan menyebabkan pengaruh drop tegangan yang besar.



Gambar 2.20 Diagram Kontrol Sambungan Motor Secara Langsung

Sumber (*Perancangan Instalasi Listrik 3*, hal : 22)



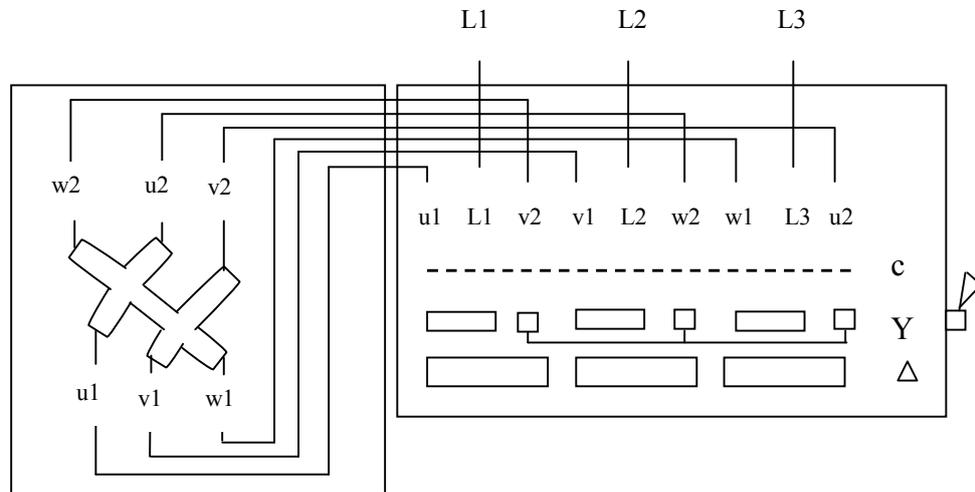
Gambar 2.21 Karakteristik Arus Fungsi Putaran Pengasutan DOL

Sumber (Blog Anton : kumpulan artikel, 2013)

b. Pengasutan motor hubungan bintang/segitiga

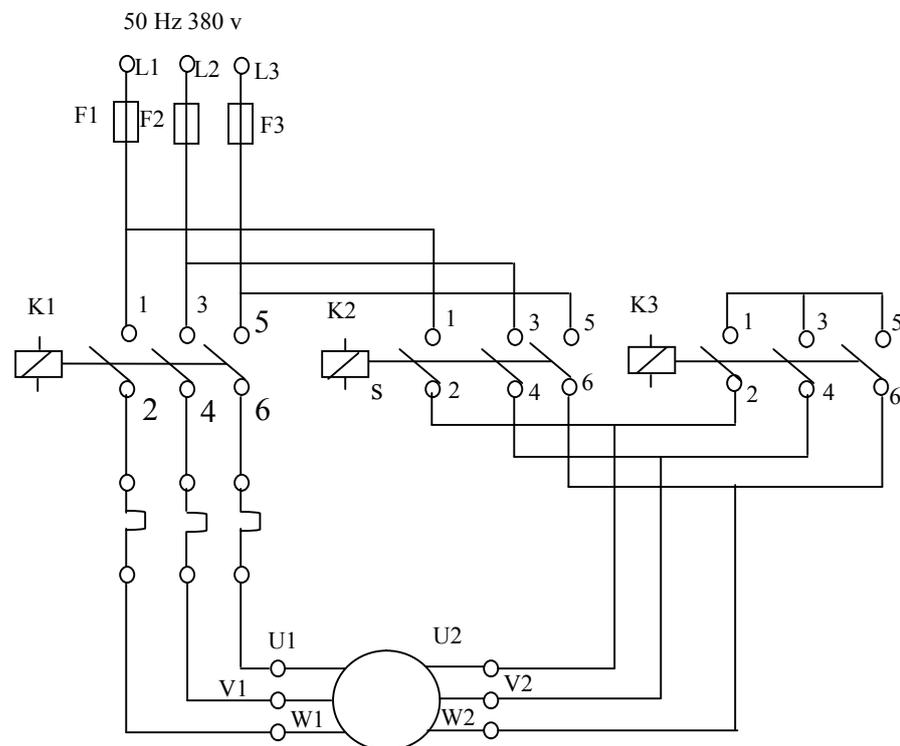
Menurut Modul Yani (2004 : 23) kapasitas motor yang menggunakan hubungan bintang segitiga kira-kira 15kVa, hal ini bertujuan untuk mengurangi arus mula jalan.

Secara teoristis dengan dihubungkan bintang, kemampuan kumparan motor $\sqrt{3}$ dari tegangan jala-jala dan arus startnya adalah sepertiga kali arus start bila motor tersebut dihubungkan langsung (Direct On Line). Hubungan bintang segitiga dapat dilakukan secara manual dan secara otomatis.



Gambar 2.22 Sambungan Saklar Tangan Y/Δ

Sumber (Perancangan Instalasi Listrik 3, hal : 23)



Gambar 2.23 Diagram Daya Hubungan Y/Δ Motor 3 Fasa

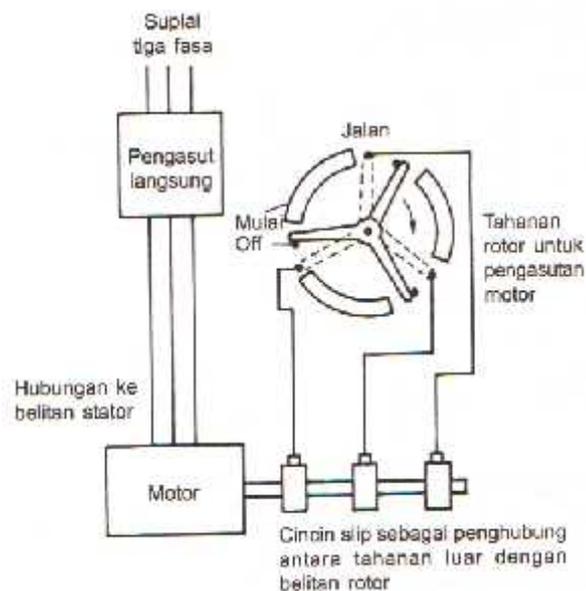
Sumber (Perancangan Instalasi Listrik 3, hal : 24)



c. Pengasutan motor tahanan rotor

Menurut Linsley (2004 : 152) untuk melakukan pengasutan motor dalam kondisi berbeban, umumnya digunakan motor induksi dengan jenis rotor belitan, karena memberikan kemungkinan untuk melakukan peyambungan rangkaian rotor dengan tahanan luar melalui cincin slip dan sikat untuk meningkatkan torsi asut motor seperti diperlihatkan oleh kurva (c) Gambar.

Pada saat awal pengasutan motor, resistansi rotor luar adalah bernilai maksimum. Kemudian seiring dengan meningkatnya putaran motr, resistansi rotor luar ini dikurangi secara bertahap hingga pada ssat kecepatan penuh motor tercapai niali resistansinya adalah 0 dan motor bekerja normal seperti halnya motor rotor sangkar. Rangkaian pengasut motor ini dilengkapi juga dengan peralatan proteksi beban lebih, proteksi terhadap terjadinya kehilangan tegangan serta sistem interlocking untuk mencegah terjadinya pengasutan motor dalam kondisi resitansi rotor tak terhubung. Rangkaian pengasut motor ini diperlihatkan oleh gambar. Namun pada gambar ini rangkaian peralatan proteksinya tidak ditunjukkan.



Gambar 2.24 Pengasutan Motor dengan Tahanan Rotor

Sumber (*Instalasi Listrik Tingkat Lanjut*, hal : 153)



d. Pengasutan motor soft starting

Kontrol pengasut motor jenis digunakan untuk memperlembut *start* dan *stop* dari pengoperasian motor. Disamping kelembutannya, *soft starter* juga memungkinkan arus *starting* yang lebih kecil daripada DOL.

Tegangan ke motor akan diturunkan oleh thyristor agar arus dan torsi *starting* menjadi lebih kecil daripada saat diberikan tegangan nominalnya. Hal ini bisa dijelaskan berdasarkan hubungan fluks, tegangan, dan torsi yang proporsional sebagaimana formula berikut ini.

$$\text{Fluks} = \text{Tegangan} / \text{Frekuensi}$$

$$\text{Torsi} = \text{Konstanta} * \text{Fluks} * \text{Ampere Kerja}$$

Saat pengasutan awal ini torsi motor cukup rendah sehingga hanya sanggup melakukan sedikit gaya terhadap bebannya (tidak sekuat dan sekasar *starting* DOL).

Pada keadaan normal tegangan dan torsi secara bertahap akan ditingkatkan ke nilai nominalnya sehingga mesin akan mendapatkan akselerasi hingga beroperasi normal.

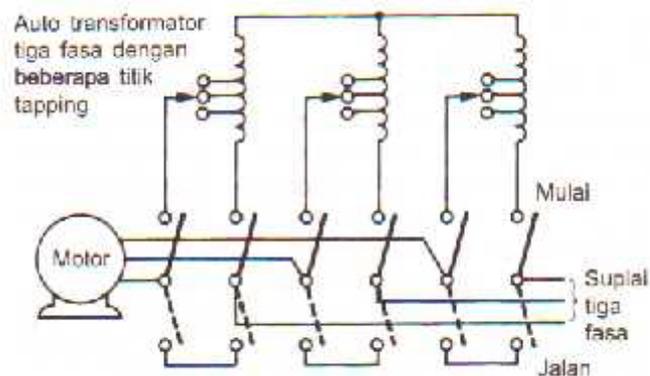
e. Pengasutan dengan autotransformator

Menurut Linsley (2004 : 152) sebuah pengasut motor dengan autotransformator merupakan salah satu metode lain yang dapat digunakan untuk mengurangi besarnya arus pengasutan motor dengan jalan mengurangi besarnya tegangan selama proses-proses awal pengasutan. Karena pengurangan tegangan akan berakibat pada berkurangnya torsi asut, maka tegangan akan direduksi secukupnya saja untuk mengurangi arus pengasut, dengan cara memilih tingkat tegangan tertentu, dikenal sebagai tapping tegangan. Rangkaian pengasutan dengan autotransformator ini ditunjukkan oleh gambar. Dengan memposisikan saklar pada posisi ‘mulai’ (start), maka akan diperoleh hubungan seri antara belitan-belitan autotransformator dengan belitan pengasut motor yang terhubung delta. Ketika kecepatan putaran motor telah cukup tinggi, maka saklar dipindahkan keposisi ‘jalan’ (run) yang akan



menghubungkan belitan belitan motor secara langsung kesuplai tegangan 3fasa.

Keuntungan dari metode pengasutan ini ialah hanya memerlukan 3 buah kawat penghantar penghubung antara rangkaian pengasut motor dan rangkaian motor. Walaupun tidak terlihat di dalam gambar, pengasut motor ini dilengkapi juga dengan peralatan proteksi beban lebih serta proteksi terhadap terjadinya kehilangan tegangan.



Gambar 2.25 Pengasutan dengan Autotransformator

Sumber (*Instalasi Listrik Tingkat Lanjut*, hal : 152)