

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Motor Listrik

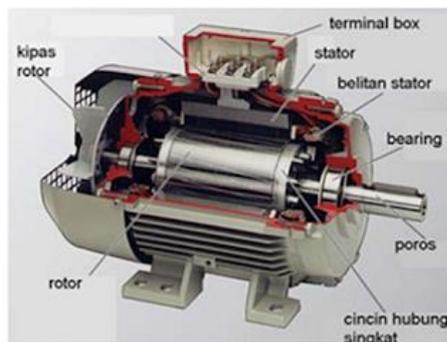
Motor listrik adalah mesin yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Prinsip kerjanya berdasarkan hukum gaya Lorentz, yang menyatakan bahwa: Apabila sebatang konduktor yang dialiri arus listrik ditempatkan didalam medan magnet maka konduktor tersebut akan mengalami gaya.

Komponen dalam motor listrik dikelompokkan menjadi dua bagian, yaitu komponen utama yang terdiri dari stator dan rotor, serta komponen pelengkap yang terdiri dari celah udara, terminal, bearing, badan motor, slip ring, kipas atau baling-baling, dan tutup motor atau cover motor.

2.2 Komponen Utama Motor Listrik

Motor listrik pada dasarnya mempunyai bagian utama sebagai berikut:

- a. Stator, merupakan bagian yang diam dan mempunyai kumparan yang dapat menginduksikan medan elektromagnetik kepada kumparan rotornya.
- b. Rotor, merupakan bagian yang bergerak akibat adanya induksi magnet dari kumparan stator yang diinduksikan kepada kumparan rotor.

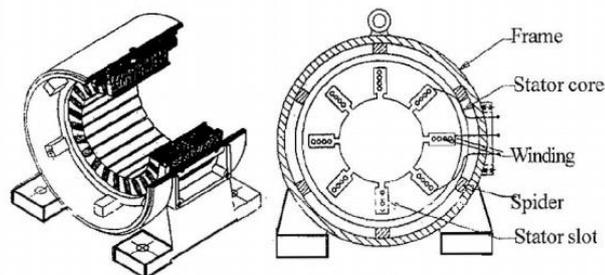


Gambar 2.1 Konstruksi Motor 3 Fasa

(Sumber: <http://elektro-unimal.blogspot.com/2013/05/konstruksi-motor-listrik-3-fasa.html?m=1>)

2.2.1 Stator

Stator adalah bagian dari mesin yang tidak berputar dan terletak pada bagian luar dan merupakan tempat mengalirnya arus beban. Dibuat dari besi bundar dan mempunyai alur-alur sebagai tempat meletakkan kumparan.



Gambar 2.2 Konstruksi Stator

(Sumber: https://www.brainkart.com/article/Types-and-Construction-of-Three-Phase-Induction-Motor_12225/)

Stator terdiri dari plat-plat besi yang disusun sama besar dengan rotor dan pada bagian dalam mempunyai banyak alur yang diberi kumparan kawat tembaga yang berisolasi. Jika kumparan stator mendapat supply arus tiga fasa maka pada kumparan tersebut akan timbul flux magnet putar. Dan mengakibatkan rotor berputar.

2.2.2 Rotor

Rotor adalah bagian dari mesin yang berputar dan letaknya pada bagian dalam. Pada motor induksi terdapat dua tipe rotor yang berbeda yaitu rotor sangkar tupai dan rotor belitan. Kedua tipe rotor ini menggunakan laminasi melingkar yang terikat erat pada poros.

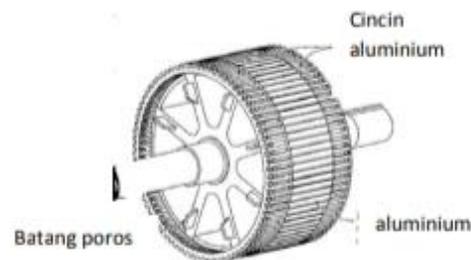
Menurut jenisnya rotor pada motor induksi dibagi menjadi 2, yaitu:

1. Rotor sangkar tupai

Penampang rotor sangkar tupai memiliki konstruksi yang sederhana. Batang rotor dan cincin ujung sangkar tupai yang kecil merupakan coran tembaga atau aluminium dalam satu lempeng pada inti rotor. Pada motor yang lebih besar, batang rotor dibenamkan dalam alur rotor dan kemudian di las dengan kuat ke cincin ujung. Apabila dilihat tanpa inti rotor, maka batang

rotor ini kelihatan seperti kandang tupai. Oleh karena itu motor induksi dengan rotor sangkar tupai dinamakan motor induksi sangkar tupai.

Pada ujung cincin penutup dilekatkan kipas yang berfungsi sebagai pendingin. Rotor jenis ini tidak terisolasi, karena batangan dialiri arus yang besar pada tegangan rendah. Motor dengan rotor sangkar tupai ditunjukkan pada gambar 2.3.



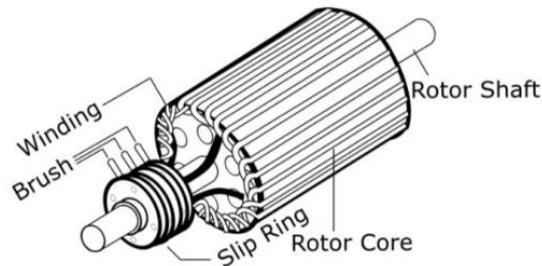
Gambar 2.3 Motor Induksi Rotor Sangkar

(Sumber: <https://dunia-electrical.blogspot.com/2019/03/proteksi-motor-induksi.html?m=1>)

2. Rotor belitan

Pada tipe rotor belitan, slot motor menampung belitan terisolasi yang mirip dengan belitan pada stator. Belitan rotor terdistribusi merata, biasanya terhubung bintang dan masing-masing ujung fasa terbuka yang terhubung pada cincin slip yang terpasang pada rotor. Ketiga cincin slip yang terpasang pada cincin slip dan sikat-sikat dapat dilihat berada disebelah kiri lilitan rotor. Lilitan rotor tidak dihubungkan ke pencatu.

Rotor ini terbuat dari laminasi-laminasi besi dengan alur-alur sebagai tempat meletakkan belitan (kumparan) dengan ujung-ujung belitan yang juga terhubung singkat. Konstruksi motor induksi tiga fasa rotor belitan ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Motor Induksi Rotor Belitan

(Sumber: https://www.brainkart.com/article/Types-and-Construction-of-Three-Phase-Induction-Motor_12225/)

Motor rotor belitan biasanya digunakan saat pengasutan atau pengaturan kecepatan dimana diinginkan torsi asut yang tinggi. Pada rotor belitan, sikat karbon menekan cincin slip, oleh karena itu tahanan eksternal dapat dihubungkan seri dengan belitan rotor untuk mengontrol torsi start dan kecepatan selama pengasutan. Penambahan tahanan eksternal pada rangkaian rotor belitan menghasilkan torsi yang lebih besar dengan arus pengasutan yang lebih kecil dibanding rotor sangkar. Motor dengan rotor belitan kurang banyak digunakan dibandingkan dengan motor rotor sangkar tupai karena harganya mahal dan biaya pemeliharaannya yang besar.

2.3 Jenis-Jenis Motor Listrik

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 diakui dalam industri, sedangkan motor arus searah dipergunakan untuk tujuan-tujuan khusus⁴.

2.3.1 Motor Listrik Arus Searah (Motor DC)

Motor arus searah merupakan salah satu mesin listrik yang mengubah energi listrik searah menjadi energi gerak.

Jenis-jenis motor arus searah terdiri atas:

⁴ Abdul Kadir. 2000. *Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*, Jakarta: UIP Press

1. Motor DC sumber terpisah

Motor jenis ini, sumber arus listrik untuk kumparan medan terpisah dengan sumber arus listrik untuk kumparan angker (*armature coil*).

2. Motor DC sumber sendiri

- a. Motor shunt

Kumparan medan motor shunt dihubungkan secara paralel dengan kumparan angker (*armature coil*). Motor shunt memiliki kecepatan yang hampir konstan meskipun terjadi perubahan beban. Karena kumparan medan dan kumparan angker dihubungkan secara paralel, maka total arus listrik merupakan medan dan arus yang melalui kumparan angker.

- b. Motor seri

Pada motor DC seri, kumparan medan dihubungkan secara seri dengan kumparan angker. Dengan hubungan seri tersebut, arus listrik pada kumparan medan adalah sama dengan arus listrik pada kumparan angker. Kecepatan pada motor tipe ini akan berkurang seiring dengan penambahan beban yang diberikan pada motor DC tersebut.

- c. Motor kompon

Motor jenis ini merupakan gabungan dari motor shunt dan motor seri. Pada motor tipe ini, terdapat dua kumparan medan yang masing-masing dihubungkan secara paralel dan seri dengan kumparan angker. Oleh karena itu motor jenis ini mempunyai karakteristik seperti motor seri yang memiliki torsi awal yang tinggi dan karakteristik motor shunt yang berkecepatan hampir konstan.

2.3.2 Motor Listrik Arus Bolak-Balik (AC)

Motor arus bolak-balik (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 rotor⁶.

Motor AC dapat dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu:

⁶ Sumanto. 1993. *Motor Listrik Arus Bolak Balik*, Yogyakarta: Andi Offset

1. Motor sinkron (motor serempak)

Disebut motor sinkron karena putaran motor sama dengan putaran fluks magnet stator. 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 yang umumnya dikerjakan oleh mesin lain. Motor ini memerlukan arus searah (DC) untuk pembangkitan daya dan memiliki torsi awal yang rendah.

2. Motor asinkron

Disebut motor asinkron karena putaran motor tidak sama dengan putaran fluks magnet stator. Dengan kata lain, pada rotor dan fluks magnet stator terdapat selisih perputaran yang disebut dengan slip. Pada motor AC, kumparan rotor tidak menerima energi listrik langsung, tetapi secara induksi seperti yang terjadi pada energi kumparan sekunder transformator. Oleh karena itu, motor AC asinkron dikenal dengan motor induksi.

Motor induksi ini juga terbagi menjadi 2 jenis, yaitu:

a. Motor induksi 1 fasa

Disebut motor satu fasa karena untuk menghasilkan tenaga mekanik, pada motor ini dimasukkan tegangan satu fasa. Motor satu fasa lilitan statornya terdiri dari 2 jenis lilitan, yaitu lilitan pokok dan lilitan bantu. Dengan kata lain arus yang mengalir pada lilitan pokok dan lilitan bantu tidak sefasa.

b. Motor induksi 3 fasa

Disebut motor 3 fasa karena untuk menghasilkan tenaga mekanik tegangan yang dimasukkan pada rotor tersebut adalah tegangan 3 fasa.

2.4 Motor Induksi 3 Fasa

Motor induksi 3 fasa adalah suatu mesin listrik yang mengubah energi listrik menjadi energi gerak dengan menggunakan gandengan medan listrik dan mempunyai slip antara medan stator dengan medan rotor. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu,

tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator⁹.

Dilihat dari konstruksinya yang sederhana dan kuat, harganya yang relatif murah, maka motor induksi 3 fasa sangatlah cocok dan paling banyak digunakan didalam bidang industri. Motor induksi 3 fasa banyak digunakan dikalangan industri hal ini berkaitan dengan beberapa keuntungan dan kerugian dari motor induksi itu sendiri⁸.

Keuntungan motor induksi:

- a. Bentuknya sederhana dan konstruksinya sangat kuat serta hampir tidak pernah mengalami kerusakan yang berarti.
- b. Harganya relatif lebih murah dan perawatannya mudah.
- c. Mempunyai efisiensi yang tinggi.
- d. Tidak memerlukan starting tambahan dan tidak harus sinkron.

Kekurangan motor induksi:

- a. Pengaturan kecepatan dari motor induksi sangat mempengaruhi efisiensinya.
- b. Kecepatan akan menurun seiring dengan bertambahnya beban.
- c. Kopel awal mutunya rendah jika dibandingkan dengan motor DC.

2.5 Prinsip Kerja Motor Induksi 3 Fasa

Ada beberapa prinsip kerja motor induksi sebagai berikut⁹:

1. Apabila sumber tegangan 3 fasa dihubungkan pada kumparan stator, akan timbul medan putar dengan kecepatan:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P} \dots\dots\dots (2.1)$$

- n_s = kecepatan stator
 f = frekuensi jala-jala
 P = jumlah kutub

⁹ Zuhail. 2000. *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, Bandung: PT Gramedia Pustaka Utama. Hlm. 101

⁸ Mochtar Wijaya. 2001. *Dasar-Dasar Mesin Listrik*, Jakarta: Djambatan

⁹ Zuhail, Op. Cit., 105

2. Medan putar stator tersebut akan memotong batang konduktor pada rotor.
3. Akibatnya pada kumparan rotor akan timbul tegangan induksi (ggl) sebesar:

$$E_2S = 4,44 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot \Phi \dots\dots\dots (2.2)$$

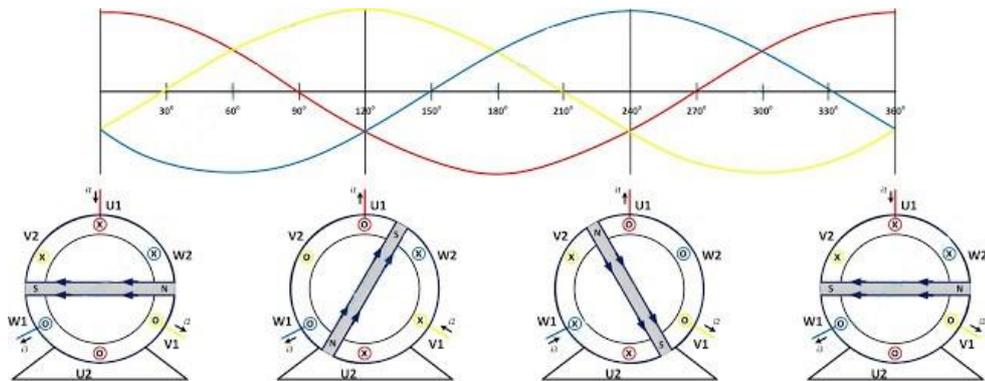
- E_2S = tegangan induksi
 f_2 = frekuensi jala-jala
 N_2 = banyaknya lilitan
 Φ = fluks magnet

4. Karena kumparan rotor merupakan rangkaian tertutup maka E_2S akan menghasilkan arus (I).
5. Adanya arus (I) dalam medan magnet akan menimbulkan gaya (F) pada rotor.
6. Bila kopel awal yang dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor sudah cukup besar untuk menggerakkan beban, maka rotor akan berputar searah dengan putar stator.
7. Tegangan induksi terjadi karena terpotongnya konduktor rotor oleh medan putar, artinya agar terjadi tegangan induksi maka diperlukan adanya perbedaan kecepatan antara kecepatan medan putar stator (n_s) dengan kecepatan medan putar rotor (n_r).
8. Perbedaan kecepatan antara n_s dengan n_r disebut Slip (S):

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \dots\dots\dots (2.3)$$

9. Bila $n_r = n_s$ maka tegangan tidak akan terinduksi dan arus tidak akan mengalir, dengan demikian kopel tidak akan ada dan motor tidak berputar, kopel motor akan ditimbulkan apabila ada perbedaan antara n_r dengan n_s ($n_r < n_s$).
10. Kesimpulannya yaitu jenis motor ini termasuk jenis motor asinkron (tak serempak).

Prinsip kerja motor induksi juga dapat dijelaskan dengan gelombang sinusoida dengan perbedaan fasa sebesar 60° dan perbedaan sudut belitan masing-masing 120° , yang diperlihatkan pada gambar berikut:



Gambar 2.5 Bentuk Gelombang Sinusoida dan Timbulnya Medan Putar pada Stator Motor Induksi

(Sumber: <https://www.tptumetro.com/2020/09/prinsip-kerja-motor-induksi-tiga-fasa.html?m=1>)

Kondisi 1

Pada saat sudut 0° , arus listrik I_1 bernilai positif sedangkan arus listrik pada I_2 dan I_3 bernilai negatif. Dalam hal ini gulungan V_2 , U_1 , dan W_2 mempunyai tanda silang yang berarti arah arus meninggalkan pembaca. Sedangkan gulungan pada V_1 , V_2 , dan W_1 mempunyai tanda titik/bulat yang berarti arah arus menuju pembaca. Pada keadaan seperti ini, terbentuklah fluks magnet pada garis horizontal sudut 0° . Stator kutub S akan berada diantara W_1 dan V_2 , sedangkan stator kutub N akan berada diantara V_1 dan W_2 .

Kondisi 2

Pada saat sudut 120° , arus listrik I_2 bernilai positif sedangkan arus listrik pada I_1 dan I_3 bernilai negatif. dalam hal ini gulungan W_2 , V_1 , dan U_2 mempunyai tanda silang yang berarti arah arus meninggalkan pembaca. Sedangkan gulungan pada W_1 , V_2 , dan U_1 mempunyai tanda titik/bulat yang berarti arah arus menuju pembaca. Pada keadaan seperti ini, terbentuklah fluks magnet pada garis yang bergeser sudut 120° ke kanan dari sebelumnya. Stator kutub S akan berada diantara U_1 dan W_2 , sedangkan stator kutub N akan berada diantara W_1 dan U_2 .

Kondisi 3

Pada saat sudut 240° , arus listrik I_3 bernilai positif sedangkan arus listrik pada I_1 dan I_2 bernilai negatif. dalam hal ini gulungan U_2 , W_1 , dan V_2 mempunyai tanda

silang yang berarti arah arus meninggalkan pembaca. Sedangkan gulungan pada U_1 , W_2 , dan V_1 mempunyai tanda titik/bulat yang berarti arah arus menuju pembaca. Pada keadaan seperti ini, terbentuklah fluks magnet pada garis yang bergeser 120° ke kanan dari sebelumnya atau 240° dari kondisi 1. Stator kutub S akan berada diantara V_1 dan U_2 , sedangkan stator kutub N akan berada diantara U_1 dan V_2 .

Kondisi 4

Pada saat sudut 360° , posisi stator kutub N dan kutub S akan berada pada keadaan awal (kondisi 1).

Dari keempat kondisi yang dijelaskan di atas, dapat dijelaskan terbentuknya medan putar pada stator. Kejadian tersebut akan berulang secara terus menerus sehingga rotor juga akan terus berputar. Medan putar pada stator akan memotong bagian rotor. Kecepatan medan putar stator inilah yang disebut dengan kecepatan sinkron yaitu kecepatan yang tidak dapat diamati dengan alat ukur, tetapi dapat dihitung secara teoritis dengan menggunakan rumus 2.1.

2.6 Daya Listrik

Daya memiliki arti sebagai energi per satuan waktu. Daya merupakan jumlah energi listrik yang digunakan untuk melakukan usaha di dalam sistem tenaga listrik. Satuan untuk daya listrik umumnya adalah watt atau Joule per detik dalam SI. Daya listrik menjadi pembeda antara beban dengan pembangkit listrik, dimana beban listrik bersifat menyerap daya sedangkan pembangkit listrik bersifat mengeluarkan daya.

Daya pada suatu sistem tegangan bolak-balik (AC) dikenal dengan tiga macam, yaitu daya aktif (nyata) dengan simbol P satuannya adalah Watt (W), daya reaktif dengan simbol Q satuannya adalah Volt Ampere Reactive (VAR) dan daya semu dengan simbol S satuannya adalah Volt Ampere (VA).

1. Daya Aktif (Nyata) (P)

Secara sederhana, daya nyata adalah daya yang dibutuhkan oleh beban resistif. Daya nyata merupakan daya listrik yang digunakan untuk keperluan menggerakkan mesin-mesin listrik atau peralatan lainnya.

Daya listrik pada arus listrik AC 1 fasa dirumuskan sebagai berikut:

$$P = V \times I \times \cos \varphi \dots\dots\dots (2.4)$$

Untuk arus listrik AC 3 fasa perhitungan daya menjadi sedikit berbeda, menjadi:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi \dots\dots\dots (2.5)$$

2. Daya Reaktif (Q)

Daya reaktif merupakan daya yang timbul karena adanya pembentukan medan magnet pada beban-beban induktif.

Daya listrik pada arus listrik AC 1 fasa dirumuskan sebagai berikut:

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \dots\dots\dots (2.6)$$

Untuk arus listrik AC 3 fasa perhitungan daya menjadi sedikit berbeda, menjadi:

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \varphi \dots\dots\dots (2.7)$$

3. Daya Semu

Daya semu merupakan resultan antara daya nyata dan daya reaktif.

Daya listrik pada arus listrik AC 1 fasa dirumuskan sebagai berikut:

$$S = V \times I \dots\dots\dots (2.8)$$

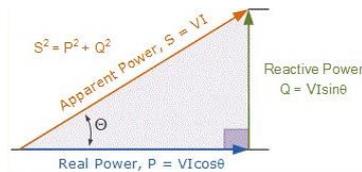
Atau

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots\dots\dots (2.9)$$

Untuk arus listrik AC 3 fasa perhitungan daya menjadi sedikit berbeda, menjadi:

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \dots\dots\dots (2.10)$$

Berdasarkan penjelasan diatas, bahwa daya semu merupakan resultan dari dua komponen, yaitu daya nyata (P) dan komponen daya reaktif (Q). Hubungan ini disebut dengan segitiga daya dan dalam bentuk vektor dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.6 Segitiga Daya dalam Rangkaian AC

(Sumber: <http://www.info-elektro.com/2017/06/teori-segitiga-daya-listrik-tenaga.html?m=1>)

Dimana:

- P adalah I^2R atau daya nyata/real yang melakukan pekerjaan yang diukur dalam watt (W)
- Q adalah I^2X atau daya reaktif yang diukur dalam volt-ampere reaktif (VAr)
- S adalah I^2Z atau daya apparent/semu yang diukur dalam volt ampere (VA)
- θ adalah sudut fasa dalam derajat. Semakin besar sudut fasa, semakin besar daya reaktif.
- $\text{Cos } \theta = P/S = W/VA$

Cosphi atau faktor daya adalah perbandingan cosinus sudut antara daya aktif dan daya semu. Daya reaktif yang tinggi akan mengakibatkan sudut cosphi semakin besar, dan akibatnya faktor daya akan menjadi rendah. Faktor daya selalu lebih kecil atau sama dengan 1. Secara perhitungan, jika nilai cosphi adalah 1, maka besar nilai daya aktif akan sama dengan nilai daya semu.

2.7 Pengaturan Putaran Motor Induksi 3 Fasa

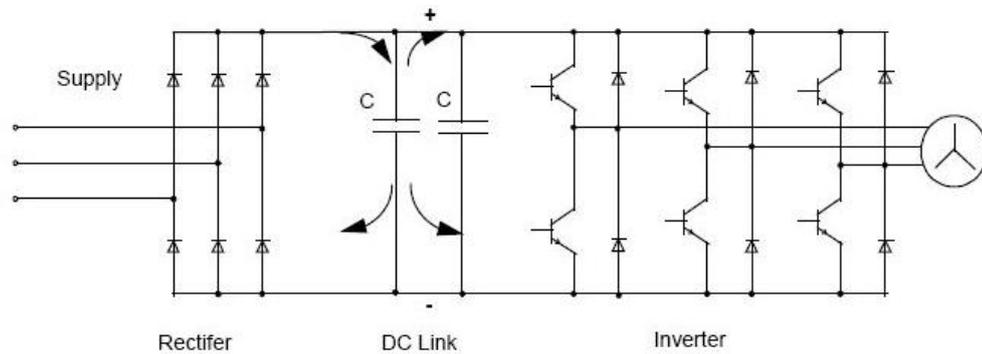
Motor induksi pada umumnya berputar dengan konstan mendekati kecepatan sinkronnya. Pada penggunaan tertentu dikehendaki juga adanya pengaturan putaran. Kecepatan motor induksi dapat diubah dengan beberapa cara, yaitu merubah banyaknya kutub, mengubah frekuensi jala-jala, mengubah tegangan jala-jala, mengubah tahanan luar².

Berdasarkan persamaan (2.1), dapat dilihat bahwa putaran sinkron berbanding lurus dengan frekuensi stator. Hal ini berarti bila jumlah kutub tetap, maka putaran sinkron dapat diubah dengan mengubah frekuensi stator. Kebanyakan yang dimaksud dengan pengaturan kecepatan dari sebuah motor

² Isdiyanto. 2010. *Dampak Perubahan Putaran Terhadap Unjuk Kerja Motor Induksi 3 Fasa Jenis Rotor Sangkar*. Jurnal Kompetensi Teknik, Vol.1 No. 2. Hlm. 57

induksi jenis sangkar yang di catu dari inverter frekuensi yang diubah-ubah, digambarkan pada gambar (2.7), sedangkan kapasitor berguna sebagai filter untuk memperbaiki bentuk DC yang lebih baik.

Inverter merupakan alat pengatur kecepatan motor dengan mengubah nilai frekuensi dan tegangan yang masuk ke motor. Pengaturan nilai frekuensi dan tegangan dimaksudkan untuk mendapatkan kecepatan putaran dan torsi motor yang diinginkan atau sesuai dengan kebutuhan.



Gambar 2.7 Rangkaian Pengendali Kecepatan Motor AC

(Sumber: Jurnal Sistem Informasi ISSN P: 2598-599X; E: 2599-0330, Vol 2. No.1, April 2018)

Ketika inverter digunakan untuk mencatu daya motor induksi dengan merubah-ubah frekuensi, tegangan keluaran inverter juga akan berubah/bervariasi secara linear dengan frekuensi agar perbandingan Volt/Hz dari motor tetap konstan sehingga kerapatan fluksi magnetik pada motor dapat dipertahankan⁵.

2.8 Torsi

Torsi adalah gaya yang digunakan untuk menggerakkan sesuatu dengan jarak dan arah tertentu, sehingga torsi dapat terdiri dari gaya dan jarak (lb-ft). Torsi juga merupakan kekuatan yang menghasilkan suatu rotasi (putaran). Untuk menghitung torsi, dapat diterapkan rumus sebagai berikut:

$$\tau = F \times S \dots\dots\dots (2.11)$$

⁵ Nasution, dkk. 2018. *Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Dengan Merubah Frekuensi Menggunakan Inverter ALTIVAR AR 12P*. Jurnal Sistem Informasi ISSN P: 2598-599X; E: 2599-0330 Vol.2, No.1

Dimana:

τ = torsi (lb-ft)

F = gaya (lb)

S = jarak (kaki/ft)

Jika torsi yang akan dihitung merupakan torsi pada motor saat beban penuh, maka rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$HP = \frac{\tau \times n}{5250} \dots\dots\dots (2.12)$$

Atau dapat juga menggunakan rumus berikut:

$$\tau = \frac{P_{out}}{\omega} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$\omega = \frac{2\pi \times n_r}{60} \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana:

τ = torsi

HP = daya kuda

5252 = konstanta

n_r = kecepatan motor induksi

P_{out} = daya output motor induksi

ω = kecepatan sudut putar

2.9 Efisiensi Motor Induksi 3 Phasa

Efisiensi motor induksi adalah ukuran keefektifan motor induksi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik yang dinyatakan sebagai perbandingan antara daya keluaran dan daya masukan, yang dapat dirumuskan seperti berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loses}}{P_{in}} = 1 - \frac{P_{loses}}{P_{in}} \dots\dots\dots (2.15)$$

Bila dinyatakan dalam persen, maka:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} 100\% \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana:

P_{out} = daya output motor induksi

P_{in} = daya input motor induksi

$$P_{rugi-rugi} = P_{in} - P_{out} \dots\dots\dots (2.17)$$

$$P_{in} = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi \dots\dots\dots (2.18)$$

$$P_{out} = \frac{\tau \cdot n}{9,55} \dots\dots\dots (2.19)$$

Dimana:

V = tegangan

I = arus

$\cos \varphi$ = faktor daya

P_{out} = daya output motor induksi

$P_{rugi-rugi}$ = rugi-rugi daya pada motor induksi

τ = torsi motor

n = kecepatan motor induksi

9,55 = konstanta

Dari persamaan terlihat bahwa efisiensi motor bergantung pada besar rugi-ruginya. Rugi-rugi pada persamaan tersebut adalah penjumlahan keseluruhan komponen rugi-rugi, yaitu rugi tembaga stator, rugi tembaga rotor, rugi inti stator, dan rugi gesek dan angin.

2.10 Variable Speed Drive (VSD)

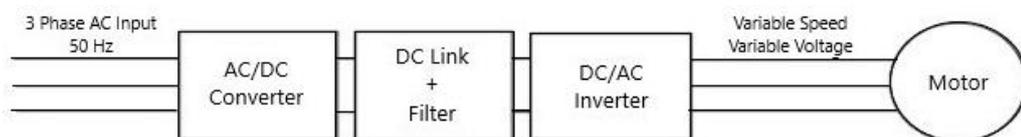
Pada umumnya *Variable Speed Drive* atau biasa disebut dengan inverter adalah peralatan yang digunakan untuk mengatur kecepatan putaran motor. Inverter menggunakan frekuensi tegangan masuk untuk mengatur kecepatan

putaran motor. Jadi dengan mengatur perubahan frekuensi tegangan yang masuk ke motor, maka kecepatan putaran motor akan berubah. Karena itu inverter disebut juga *Variable Speed Drive*⁷.

Untuk mengubah tegangan AC menjadi DC dibutuhkan penyearah (converter AC-DC) dan biasanya menggunakan penyearah tidak terkendali (rectifier dioda) namun juga ada yang menggunakan penyearah terkendali (thyristor rectifier). Setelah tegangan sudah diubah menjadi DC maka diperlukan perbaikan kualitas tegangan DC dengan menggunakan tandon kapasitor sebagai perata tegangan. Kemudian tegangan DC diubah menjadi tegangan AC kembali oleh inverter dengan teknik PWM (*Pulse Widht Modulation*). Dengan teknik PWM ini bisa didapatkan amplitudo dan frekuensi keluaran yang diinginkan. Selain itu teknik PWM juga menghasilkan harmonisa yang jauh lebih kecil dari pada teknik yang lain serta menghasilkan gelombang sinusoidal, dimana harmonisa sendiri akan menimbulkan rugi-rugi pada motor yaitu motor menjadi cepat panas. Oleh karena itu, teknik PWM inilah yang biasanya digunakan dalam mengubah tegangan DC menjadi AC (inverter). Pada umumnya VSD digunakan untuk melakukan hal dibawah ini:

- a. Menyesuaikan kecepatan pengendali dengan keperluan kecepatan proses.
- b. Menyesuaikan torsi (kopel) pengendali dengan keperluan kopel proses.
- c. Menghemat energi dan meningkatkan efisiensi.

2.11 Prinsip Kerja *Variable Speed Drive* (VSD)



Gambar 2.8 Prinsip Kerja VSD

(Sumber: <http://pabriksetrum.blogspot.com/2014/10/variable-frequency-drive-vfd.html?m=1>)

⁷ M. Suyanto, dkk. 2019. *Kendali Putaran Motor Asinkron 3 Fasa Dengan VSD Tipe ATV312HU15N4*. Jurnal Seminar Nasional TEKNOKA ke-4

Prinsip kerja dari VSD yang sederhana adalah sebagai berikut:

1. Tegangan yang masuk dari jala-jala 220/380 Volt dan frekuensi 50 Hz merupakan tegangan arus bolak balik (AC) dengan nilai tegangan dan frekuensi yang konstan. Kemudian tegangan dan frekuensi yang masuk dialirkan ke board rectifier/penyearah DC, dan ditampung ke kapasitor bank. Jadi dari AC diubah ke DC.
2. Untuk meratakan tegangan DC, maka tegangan dimasukkan ke DC link. Komponen yang terdapat pada DC link berupa kapasitor atau induktor.
3. Tegangan DC kemudian diumpankan 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.

Pengontrolan start, stop, jogging, dll dapat 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.

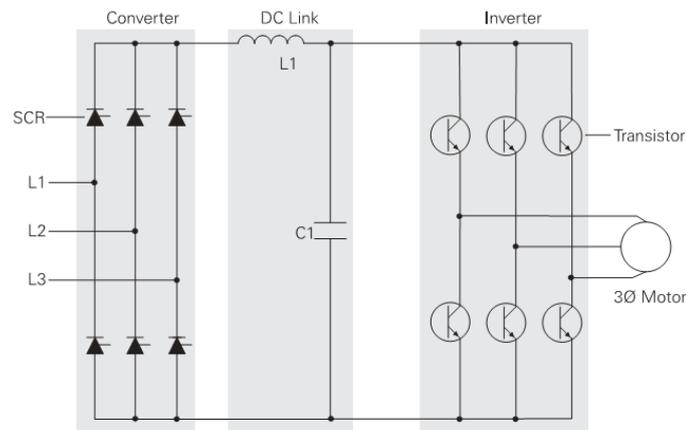
2.12 Jenis-Jenis *Variable Speed Drive* (VSD)

2.12.1 *Variable Voltage Inverter* (VVI)

Jenis konverter ini menggunakan konverter jenis 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 L_1 sebagai sebagai *choke* dengan kapasitor C_1 membentuk bagian dengan istilah DC-link yang membantu memperhalus kualitas tegangan DC hasil konversi. Bagian inverter sendiri terdiri dari kumpulan pensaklaran seperti thyristor, transistor bipolar, MOSFET, atau IGBT.

Gambar 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.



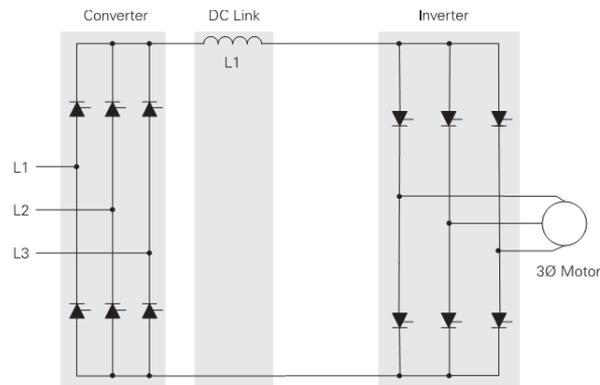
Gambar 2.9 Variable Voltage Inverter Circuit

(Sumber: <http://mekatronika08.blogspot.com/2012/09/variable-speed-drive.html?m=1>)

Tipe inverter ini memiliki kekurangan yaitu torsi yang pulsatif (peningkatan/penurunan nilai yang mendadak) setiap penyaklaran yang terjadi. Selain itu, bentuk gelombang sinyal keluaran yang tidak sinusoidal sempurna mengakibatkan pemanasan berlebih di motor yang mengakibatkan motor harus dijalankan di bawah nilai ratingnya.

2.12.2 Current Source Inverter (CSI)

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



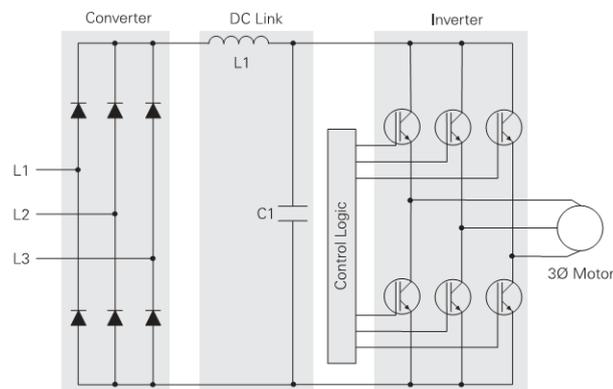
Gambar 2.10 Current Source Inverter Schematic

(Sumber: <http://mekatronika08.blogspot.com/2012/09/variable-speed-drive.html?m=1>)

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.

2.12.3 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.



Gambar 2.11 PWM Drive Basic Schematic

(Sumber: <http://mekatronika08.blogspot.com/2012/09/variable-speed-drive.html?m=1>)

Konverter akan mengubah tegangan AC 3 fasa menjadi tegangan DC dan dihaluskan oleh rangkaian induktor L_1 dan kapasitor C_1 . Nilai tegangan DC yang dihasilkan adalah 1,35 kali tegangan inputnya.

Untuk bagian inverter, rangkaian PWM diatas menggunakan perangkat elektronika daya “Insulated Gate Bipolar Transistor” (IGBT). IGBT memiliki kemampuan penyaklaran yang sangat tinggi hingga ribuan kali perdetik 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 +15 VDC), 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 -15 VDC untuk mencegah agar tidak hidup dengan sendirinya.

Dengan banyaknya inverter akan menghasilkan step yang lebih halus sehingga fungsi filter dapat diminimalisasikan. Penggunaan inverter dengan tipe ini jarang dipakai untuk aplikasi komputer tetapi biasanya digunakan untuk aplikasi 3 fasa dengan kapasitas daya yang besar. Walaupun demikian, kelemahan sistem inverter ini adalah dengan banyaknya inverter yang digunakan akan menghasilkan sinyal sinus yang baik namun biaya yang dibutuhkan untuk membuat inverter ini menjadi berlipat-lipat tergantung dari jumlah inverter yang digunakan.

Yang menjadi titik berat pada tipe inverter ini adalah pada bagian osilator dan kontrolnya karena pada bagian ini akan menghasilkan trigger-trigger bagi SCR yang berfungsi sebagai inverter tersebut dengan perioda yang disesuaikan antara yang satu dengan yang lainnya sehingga dapat membentuk sinyal stair case up/down dengan frekuensi yang sesuai dengan frekuensi yang diinginkan.

2.13 Pengaturan Frekuensi pada *Variable Speed Drive* (VSD)

Frekuensi dikontrol dengan berbagai macam cara yaitu melalui keypad (local), dengan eksternal potensiometer, input 0-10 VDC, 4-20 mA atau dengan preset memori. Semua itu dapat dilakukan dengan mengisi parameter program yang sesuai.

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

- a. *Display* : untuk mengatur parameter yang ditampilkan pada keypad display.
- b. *Control* : untuk menentukan jenis control local/remote.
- c. *Speed Control* : untuk menentukan jenis control frekuensi reference.
- d. *Voltage* : tegangan supply 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 inersia 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.

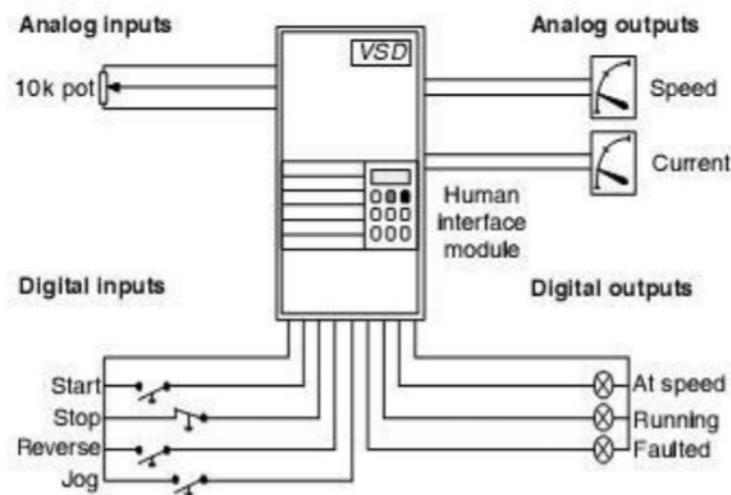
Pada saat *deceleration*/perlambatan, energi inersia beban harus dibuang. Untuk perlambatan dalam waktu singkat atau pengereman, maka energi akan dikembalikan ke sumbernya. Motor dengan beban yang berat pada saat dilakukan pengereman akan berubah sifat menjadi “generator”. Jadi energi yang kembali ini akan masuk ke dalam DC bus inverter dan terakumulasi di sana karena terhalang oleh rectifier sebagai pengamanan, inverter akan trip jika level tegangan DC bus melebihi batas toleransi. 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.

2.14 Pengontrolan *Variable Speed Drive* (VSD)

Kontrol *start/stop* pada pengendalian VSD dapat direalisasikan dalam beberapa cara yaitu:

- Pengontrolan dengan sistem manual
- Pengontrolan dengan sistem otomatis

Pengontrolan VSD manual dapat dilakukan dengan tombol tekan start dan stop yang dihubungkan dengan cara pengawatan langsung pada terminal control inverter VSD seperti yang ditunjukkan pada gambar (2.10).

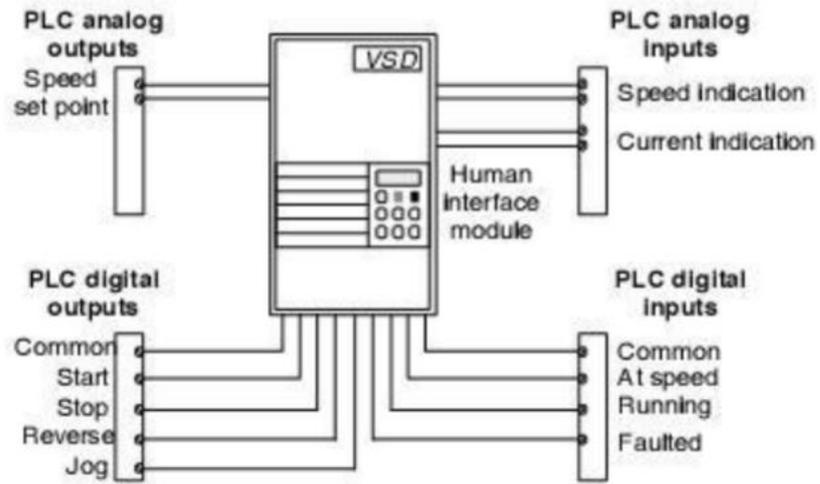


Gambar 2.12 Pengawatan Sistem Kontrol Manual

(Sumber: Kelas XII SMK Instalasi Motor Listrik Semester 6)

Alternatif lain jika pengontrolan dari peralatan yang terpisah atau dari jarak jauh dapat dilakukan dengan menggunakan PLC, ini dapat dilakukan pengawatan secara langsung dari PLC ke terminal inverter VSD seperti yang ditunjukkan pada gambar (2.11)³.

³ Juhari. 2013. *Instalasi Motor Listrik Semester 6*. Kelas XII SMK Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia



Gambar 2.13 Pengawatan Sistem Kontrol Otomatis

(Sumber: Kelas XII SMK Instalasi Motor Listrik Semester 6)