



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Motor listrik menyumbang banyak pada perkembangan industri, dan dengan demikian memperbaiki kebudayaan bangsa. Motor-motor listrik membawa pembaharuan di segala bidang, dan revolusi industri tanpa energi listrik melalui motor listrik tidak mungkin berkembang secepat seperti apa yang disaksikan sekarang ini.

Selanjutnya pembahasan dibatasi khusus pada motor induksi 3 fasa dengan tipe rotor sangkar tunggal. Yang pokok permasalahannya melakukan starting motor induksi dengan menggunakan inverter.

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 AC berdasarkan bermacam-macam tinjauan dapat dibedakan atas beberapa jenis.

2.1 Motor induksi

Motor induksi merupakan motor arus bolak-balik yang paling luas digunakan. Penamaan berasal dari kenyataan bahwa arus rotor 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 stator.

Belitan stator yang dihubungkan dengan suatu sumber tegangan tiga fasa akan menghasilkan medan magnet yang berputar dengan kecepatan sinkron (n_s):

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

Dimana :

f = Frekuensi (Hz)

P = Jumlah kutub

Medan putar pada stator tersebut akan memotong konduktor-konduktor pada rotor, sehingga terinduksi tegangan. Karena rotor merupakan rangkaian tertutup, maka akan mengalir arus. Dan sesuai dengan hukum Lenz rotorpun akan berputar mengikuti medan putar stator. Perbedaan putaran relatif antara stator dan rotor disebut slip. Bertambahnya beban akan memperbesar slip sehingga kenaikan tegangan induksi pada rotor akan menaikkan slip sehingga kenaikan tegangan induksi pada rotor akan menaikkan arus rotor dan akibatnya akan memperbesar kopel. Bila tegangan induksi pada rangkaian rotor (E_2) maka:

$$E_2 = 4,44 \cdot f_2 N_2 \emptyset \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

Dan frekwensi tegangan rotor (f_2).

$$f_2 = f_1 \cdot S \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

maka :

$$E_2 = 4,44 \cdot f_1 \cdot S N_2 \emptyset \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

E_2 = Tegangan rangkaian rotor (V)

f_2 = Frekwensi rotor (Hz)

N_2 = Jumlah lilitan rotor

\emptyset = fluksi (Wb)

S = Slip



Gambar 2.1 kumparan Stator dan rotor sangkar



¹Prinsip kerja motor induksi :

1. Apabila sumber tegangan 3 fasa diberikan pada belitan stator, maka akan timbul medan putar dengan kecepatan $n_s = 120. f/P$
2. Medan putar stator tersebut akan memotong batang konduktor pada rotor.
3. Akibatnya pada belitan rotor timbul tegangan induksi (ggl) sebesar :
$$E_{2s} = 4,44 f_2 N_2 \phi_m$$
 (untuk satu fasa).
 E_{2s} adalah tegangan induksi pada saat rotor berputar.
4. Karena belitan rotor merupakan rangkaian tertutup, maka ggl (E) akan menghasilkan arus (I).
5. Adanya arus (I) di dalam 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 yang dijelaskan pada tegangan induksi timbul karena terpotongnya batang konduktor (rotor) oleh medan stator. Artinya agar tegangan terinduksi diperlukan adanya perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator (n_s) dengan kecepatan berputar rotor (n_r).
8. Perbedaan kecepatan antara n_r dan n_s disebut slip (S) dinyatakan dengan:

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

9. Bila $n_r = n_s$, tegangan tidak akan terinduksi dan arus terinduksi dan arus tidak akan mengalir pada belitan jangkar rotor , dengan demikian tidak dihasilkan kopel . kopel motor akan timbul bila n_r lebih kecil dari n_s .
10. Dilihat dari cara kerjanya , motor induksi disebut juga motor tak serempak atau motor asinkron.

¹ Effendi, 1994; hal 2-7



Slip : Berubah-ubahnya kecepatan motor induksi (n_r) mengakibatkan berubahnya harga slip dari 100 % pada saat start sampai 0 % pada saat motor diam ($n_r = n_s$).

2.2 Hubungan Putaran Motor dengan Frekuensi

Bila ditinjau dari hubungan putaran dan frekuensi/putaran fluks magnet stator, maka motor AC dapat dibedakan atas:

2.2.1 Motor sinkron (Motor serempak)

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

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

ket : n = rpm pada motor

f = frekuensi 50 hz

P = jumlah kutub pada motor

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.

2.2.2 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:



$$n \leq \frac{120 \cdot f}{P} \dots\dots\dots(2.7)$$

2.2.3 Cara Penerimaan Tegangan atau Arus

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

Motor yang rotornya menerima tegangan secara langsung
Motor jenis ini biasanya dijumpai pada motor universal, motor DC.
jenis motor DC (motor arus searah) tidak dibahas dalam buku ini.

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.

2.2.4 Jumlah Fase Tegangan yang Digunakan

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

1. Motor satu fase

Disebut motor satu fasa karena untuk menghasilkan tenaga mekanik, pada motor tersebut dimasukkan tegangan satu fase. Di dalam praktek, yang sering digunakan adalah motor satu fase dengan lilitan dua fase. Dikatakan demikian, karena di dalam motor 1 fase lilitan statornya terdiri dari dua jenis lilitan, yaitu lilitan pokok dan lilitan bantu. Kedua jenis lilitan tersebut dibuat sedemikian rupa sehingga walaupun arus yang mengalir pada motor adalah arus/tegangan 1 fasa tetapi akan mengakibatkan arus yang mengalir Pada masing-masing lilitan mempunyai perbedaan fase' Atau dengan kata lain, bahwa arus yang mengalir



pada lilitan pokok dan lilitan bantu tidak sefase. Motor satu fase seperti tersebut disebut *motor fase belah*.

Motor satu fasa dikenal bermacam-macam, yaitu :

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

2. Motor 3 fase

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

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

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 penggerakan, antara lain:

1. Bisa dibuat dalam berbagai ukuran tenaga,
2. Mempunyai batas-batas kecepatan (speed range) yang luas,
3. Pelayanan operasi mudah, dan pemeliharaannya sederhana,
4. Bisa dikendalikan secara manual, atau secara otomatis dan bahkan kalau diinginkan bisa dilayani dari jarak jauh (remote control)' Pemakaian motor listrik sebagai alat penggerak (misalnya untuk keperluan industri) bisa dimungkinkan dengan otomatisasi di dalam proses produksi sehingga biaya operasi bisa ditekan. Hal ini bisa menekan biaya produksi karena sarana otomatisasi mampu menggantikan banyak peran manusia.



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.

Macam corak klasifikasi suatu motor didasarkan atas:

1. Bentuk konstruksi motor,
2. Jenis kerangka penutupan,
3. Bentuk rotor,
4. Jenis (kelas) isolasi jangkar motor,
5. Cara pendinginan motor,
6. Tipe kerja motor,
7. Karakteristik momen terhadap kecepatan motor,
8. Ukuran kecepatan motor.

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

1. Tenaga output motor (HP).
2. Sistem tegangan (searah, bolak-balik, ukurannya, fasenya).
3. Kecepatan motor (rendah, sedang, tinggi). Pemakaian yang sederhana ini belum dicapai hal-hal lain 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 (driven machines), dan sesuai dengan:

- tenaga dan momen yang dibutuhkan,
- karakteristik beban dan macam-macam kerja yang diperlukan,
- konstruksi mesin-mesin yang digerakkan,

sehingga hal-hal yang demikian memberikan pula macam-macam variasi bentuk dari motor, termasuk alat-alat perlengkapannya (alat-alat pengasutan dan pengaturan).

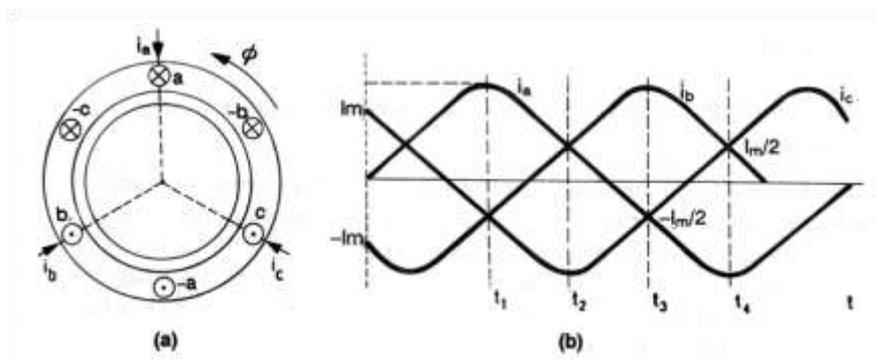
2.3 PRINSIP MOTOR INDUKSI

Fluks magnet stator

a. Motor 3 Fase

Pada motor 3 fase, lilitan statornya tidak berbeda dengan lilitan stator pada generator arus bolak-balik 1 fase. Karena pada lilitan stator dimasukkan arus listrik bolak-balik, maka disekitar stator juga terjadi fluks magnet yang berubah-ubah pula.

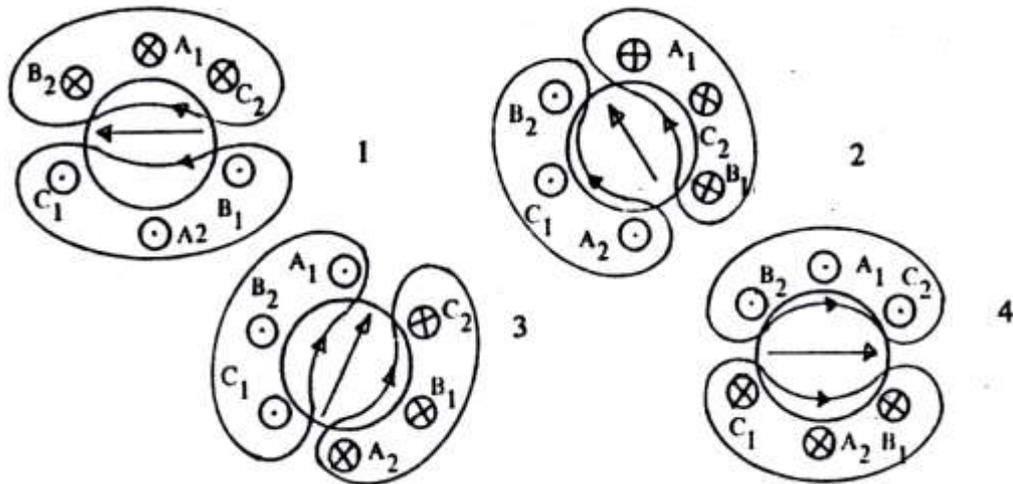
Jadi pada motor arus bolak-balik ini kutub magnet (fluks magnet) berputar. Untuk jelasnya, prinsip terbentuknya medan magnet yang berputar pada motor 3 fase, perhatikan (Gambar a).



Gambar 2.2 : Arus yang dimasukkan pada lilitan stator motor 3 fase'

(Gambar a) menunjukkan keadaan arus 3 fase yang dimasukkan pada lilitan stator pada suatu saat tertentu.

(Gambar b) menunjukkan arah-arah fluks magnet pada beberapa keadaan.



Gambar 2.3 : Fluks magnet stator 3 fase bertub 2.

A1 – A2 : lilitan fase I

B1 – B2 : lilitan fase II

C1 – C2 : lilitan fase III

Pada kedudukan 1. (Lihat gambar 2.4)

Harga IA positif, IB negatif, IC negatif.

Arah arus pada sisi kumparan A1 menjauhi kita.

Arah arus pada sisi kumparan A2 mendekati kita.

Arah arus pada sisi kumparan B1 mendekati kita.

Arah arus pada sisi kumparan B2 menjauhi kita.

Arah arus pada sisi kumparan C1 mendekati kita.

Arah arus pada sisi kumparan C2 menjauhi kita.



Arah arus pada sisi kumparan B2, A1, C2 menjauhi kita, sehingga terbentuk medan-medan magnet yang searah dengan arah putaran jarum jam. Sebaliknya arah arus pada sisi kumparan C1, A2, B1 mendekati kita, sehingga terbentuk medan-medan magnet yang berlawanan dengan arah putaran jarum jam. Oleh karena itu secara keseluruhan arah fluks magnetnya adalah seperti ditunjukkan pada gambar 2a.

Pada kedudukan 2.

Harga Ia positif, Ib positif, Ic negatif.

Pada kedudukan 3.

Harga Ia negatif, Ib Positif, Ic negatif.

Pada kedudukan 4.

Harga Ia negatif, Ib positif, Ic positif.

perhatikan arah-arah arus, arah fluks magnetnya pada kedudukan 1,2,3 dan 4. Dengan memperhatikan Gambar 2.5 di atas, ternyata kutub-kutub magnet selalu berpindah atau dengan perkataan lain, fluks magnet stator berputar.

b. Motor 1 fase

Pada motor 3 fase dapat dilihat, bahwa fluks magnet yang terbentuk di sekitar stator merupakan medan magnet yang berputar karena listrik yang dimasukkan pada lilitan stator sudah merupakan arus listrik yang berputar.

Tetapi lain halnya dengan medan magnet yang terbentuk di sekitar stator pada motor 1 fase. Pada motor satu fase fluks magnet hanya bergantian arah saja, sehingga menyukarkan bagi motor pada saat start.



Untuk itu maka diperlukan bantuan yang prinsipnya membentuk medan magnet baru yang tidak sefase dengan medan magnet lilitan utama (harus terdapat aliran listrik baru yang tidak sefase dengan arus listrik yang mengalir pada lilitan utama), yang berarti harus terdapat lilitan, kedua yang terpisah dari lilitan utama.

Jadi pada motor tersebut meskipun menggunakan listrik satu fase, tetapi di dalam lilitan stator terdapat arus listrik dua fase dengan lilitan stator dua fase pula. Lilitan ini disebut lilitan utama (main winding) dan lilitan bantu (auxiliary winding). Apabila motor telah berjalan normal, maka lilitan bantu dapat dilepas (tidak digunakan lagi).

Untuk membentuk adanya dua arus listrik yang berbeda fase, digunakan penggeser fase yaitu induktor atau kapasitor. Pada motor shaded pole (Kutub bayangan) motor repulsi, motor seri prinsip kerjanya kerjanya dengan motor fase belah.

c. Prinsip kerja motor induksi:

- a. Apabila sumber tegangan 3 fase dipasang pada kumparan stator, akan timbul medan putar dengan kecepatan $n_s = 120 f/P$.
- b. Medan putar stator tersebut akan memotong batang konduktor pada rotor.
- c. Akibatnya pada batang konduktor dari rotor akan timbul GGL induksi.
- d. Karena batang konduktor merupakan rangkaian yang tertutup maka GGL akan menghasilkan arus (I).
- e. Adanya arus (I) di dalam medan magnet akan menimbulkan gaya (F) pada rotor.
- f. Bila kopel mula yang dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.



- g. Seperti telah dijelaskan GGL induksi timbul karena terpotongnya batang konduktor (rotor) oleh medan putar stator. Artinya agar GCL induksi tersebut timbul, diperlukan adanya perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator (n_s) dengan kecepatan berputar rotor (n_r).
- h. Tanpa perbedaan kecepatan antara n_r dan n_s berarti rotor diam:

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = 1 \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

- i. Bila $n_r = n_s$, GGL induksi tidak akan timbul dan arus tidak mengalir pada batang konduktor (rotor), dengan demikian tidak dihasilkan kopel.
- j. Dilihat dari cara kerjanya, motor induksi disebut juga sebagai motor tak serempak atau asinkron.

2.4 Motor Induksi Tiga Fase

²Motor induksi mengalami berbagai Penyempurnaan sejak jenis motor tersebut diperkenalkan pada akhir Abad 19. Rotor sangkar mulai diperkenalkan pada masa itu.

Sampai sekarang terus terjadi penyempurnaan-penyempurnaan; misalnya dengan mengoperasikannya sebagai mesin sinkron-asinkron, perubahan jumlah kutub pada lilitan stator, Penggunaan rotor sangkar rangkap (*double squirrel cage rotor*), pengontrolan dengan sistem elektronik, dan sebagainya.

2.4.1 Slip

Apabila rotor dari motor induksi berputar dengan kecepatan n_r , dan kecepatan medan putar stator adalah n_s maka slip (s) adalah

²Sumanto, 1986; Hal 1-8



$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dalam hal ini kecepatan relatif rotor terhadap kecepatan medan putar stator adalah nrel, di mana nrel = $n_s - n_r$.

Frekuensi yang dibangkitkan pada belitan rotor adalah f_2 , di mana

$$f_2 = \frac{(n_s - n_r)P}{120} \dots\dots\dots(2.10)$$

sedangkan frekuensi medan putar stator adalah f_1 , di mana

$$f_1 = \frac{n_s P}{120} \dots\dots\dots(2.11)$$

Dari persamaan-persamaan diatas diperoleh

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{n_s - n_r}{n_s} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$f_2 = s f_1 \dots\dots\dots(2.13)$$

Apabila, slip = 6 (ns - nr) maka f2 = 0. Apabila rotor ditahan slip = 1 (nr = 0) maka $f_2 = f_1$.

Dari persamaan $f_2 = s f_1$, diketahui bahwa frekuensi rotor dipengaruhi oleh slip. Oleh karena GGL induksi dan reaktansi pada rotor merupakan fungsi frekuensi maka besarnya juga turut dipengaruhi oleh slip.

$$\begin{aligned} E_{2s} &= 4,44 f_2 N_2 \phi m \\ &= 4,44 s f_1 N_2 \phi m \\ &= s E_2 \dots\dots\dots(2.14) \end{aligned}$$

E_2 : GGL Pada saat rotor diam ($n_r = n_s$)

E_{2s} : GGL pada saat rotor berputar.



$$\begin{aligned}
X_{2s} &= 2\pi f_2 L_2 \\
&= 2\pi s f_2 L_2 \\
&= s X_2 \qquad \dots\dots\dots(2.15)
\end{aligned}$$

X_{2s} : reaktansi pada saat rotor berputar.

X_2 : reaktansi pada saat rotor diam . ($n_r = n_s$).

a. TINJAUAN SEDERHANA

Untuk menyederhanakan pengertian, kita menganggap:

- Lilitan stator dan rotor sama di dalam distribusi dan jumlah lilitan per fasenya.
- Tegangan dan frekuensi sumber konstan.
- Fluks magnet (ϕ_m) konstan dan beryerak dengan keopatan yang konstan pula (n_s).
- Kerugian pada rotor hanyalah pada tahanan.
- Kerugian pada stator diabaikan (Z_t dianggap nol).

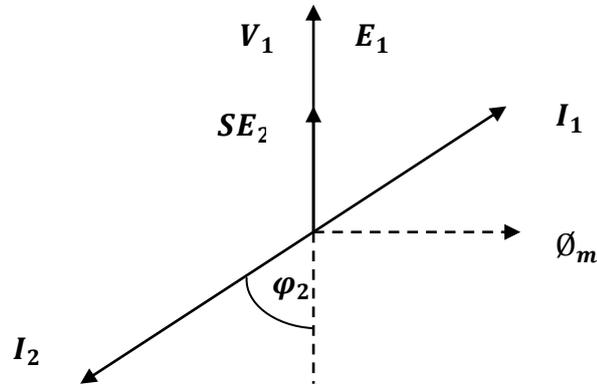
Dengan anggapan-anggapan tersebut kita bisa membahas perhitungan arus rotor, daya dan torsi dengan lebih sederhana dan lebih mudah.

Lilitan rotor dihubung singkat dan tidak mempunyai hubungan langsung dengan sumber, arusnya diinduksikan oleh fluks magnet bersama (ϕ), 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 oleh 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 12 harus diimbangi

arus yang sama tapi berlawanan, arah pada statornya ($I_2 = -I_1$) agar fluks magnet bersama (ϕ_m) tetap konstan.

³Lihat Gambar 2.4.



Gambar 2.4 : Diagram vektor motor induksi ideal (motor induksi dengan tinjauan sederhana).

2.4.2 Motor Sangkar Tupai Dan Motor Lilit

Jika di dibandingkan antara rotor sangkar tupai dan rotor lilit maka ada perbedaan-perbedaan sebagai berikut:

- karakteristik motor induksi rotor sangkar tupai sudah fixed, sedang pada motor induksi dengan rotor lilit masih dimungkinkan adanya variasi karakteristik dengan cara menambahkan rangkaian Iuar melalui slip ring / singkatnya.
- jumlah kutub pada motor sangkar tupai nrrerlyesuaikan terhadap jumlah kutub parla lilitan statornya, sedangkan jumlah kutub pada rotor lilit sudah tertentu.

ibid

³ Sumanto, 1986; Hal 43-45

LAPORAN AKHIR



Keuntungan dari motor induksi dengan rotor lilit ialah bahwa motor ini dapat ditambah dengan tahanan luar. Hal ini sangat menguntungkan untuk starting motor pada beban yang berat dan sekaligus sebagai pengatur putaran motor. Rangkaian motor induksi dengan rotor lilit yang dilengkapi dengan tahanan luar .

Rotor sangkar tupai lebih banyak dipakai sebab harganya lebih murah. Kelemahan pada starting torque diatasi dengan konstruksi *double squirrel cage* dan *deep bar cage*

2.5 Menjalankan, Mengatur Putaran Motor Induksi

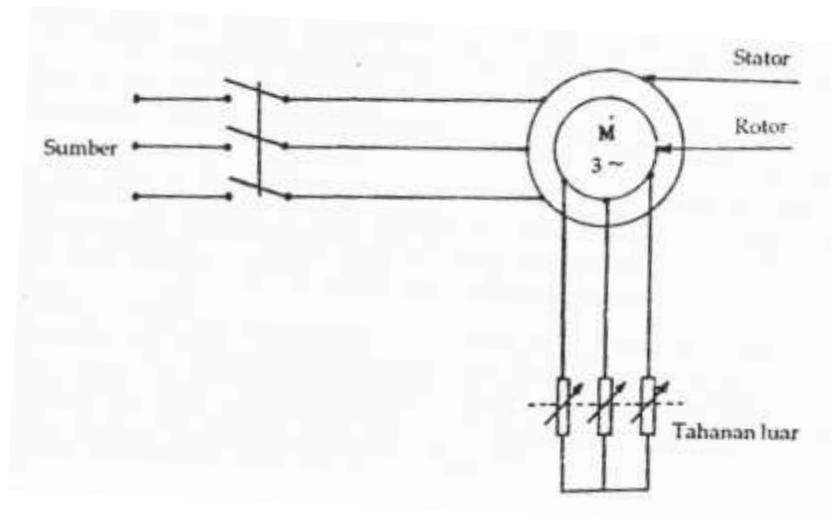
Seperti telah diketahui bahwa pada saat start arus listrik yang ditarik dari jala-jala oleh motor relatif besar. Oleh karena itu masalah ini menjadi persoalan bagi kita waktu memasang dan juga masalah bagi para perencana waktu merencanakannya. Dalam hal ini dikehendaki agar pada waktu start diperoleh torsi yang besar, tetapi arus yang ditarik pada waktu itu relatif kecil.

2.5.1 STARTING MOTOR ROTOR LILIT

Untuk starting motor rotor lilit (motor slip ring) digunakan tahanan luar yang dapat diatur (R_r). Tahanan luar tersebut dihubungkan ke rotor melalui cincin seret (slip ring) dan sikat-sikat.

Perhitungan Torsi dapat dicari dengan menggunakan rumus :

$$T = \frac{P \times 33.000}{2 \pi n} \dots\dots\dots(2.16)$$



Gambar 2.5 : Tahanan luar (R) pada motor rotor lilit

Motor rotor lilit mempunyai lilitan stator dan lilitan rotor. Lilitan rotor (jangkar) dan lilitan stator mempunyai jumlah kutub sama. Lilitan stator sama seperti pada lilitan stator motor rotor sangkar. Lilitan rotor dapat disambung bintang maupun segitiga, tetapi biasanya dalam hubungan bintang.

Sebelum motor distart, semua tahanan dalam posisi maksimum selama menjalankan hingga terjadi putaran yang dikehendaki. Tahanan RL sedikit demi sedikit dikurangi dan akhirnya pengaturan sampai pada sikap akhir. Pada sikap ini rotor telah dihubung singkat. Tahanan-tahanan itu sendiri kernudian tidak lagi mempunyai peranan oleh karena itu setelah pengatur berada pada sikap akhir, supaya cincin-cincin dan sikat-sikat tidak cepat aus, sikat-sikat itu diangkat setelah rotor dihubung singkat.

Dan sekarang motor bekerja seperti motor rotor sangkar (rotor hubung singkat). Seperti telah kita bicarakan pada Gambar 33, bahwa pada motor rotor lilit, penambahan tahanan luar (RL) sampai harga tertentu membuat kopel mula mencapai harga kopel maksimumnya.

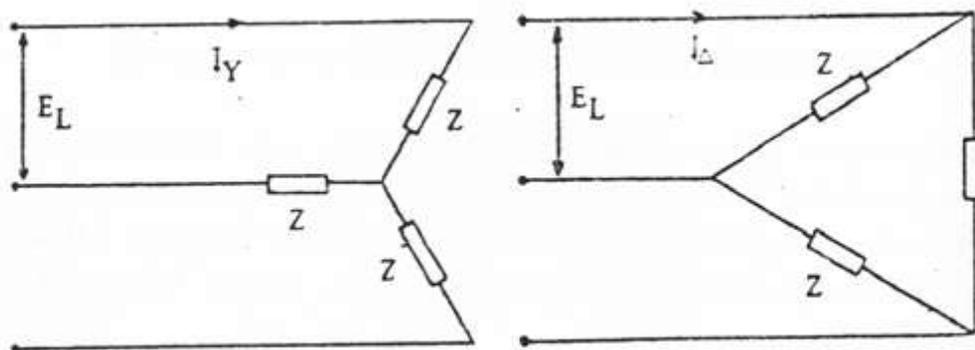
Jadi selain untuk menghasilkan kopel mula yang besar, tahanan luar (RL) yang dapat diatur tersebut diperlukan untuk membatasi arus mula yang besar pada saat start. Di samping itu dengan mengubah-ubah tahanan luar maka kecepatan motor dapat diatur.

motor rotor lilit sering disebut sebagai motor slip ring (slip ring motor) atau motor dengan rotor lilit (wound rotor motor).

2.5.2 STARTING MOTOR ROTOR SANGKAR TUPAI

Cara yang paling sederhana untuk menjalankan motor rotor sangkar tupai ini ialah dengan menghubungkan langsung dengan sumber yang menggunakan saklar tiga fase. Cara ini hanya diizinkan pada motor sangkar tupai dengan daya di bawah 3 HP (sekitar 2 KW).

Motor dengan daya lebih besar dari 3 HP tidak boleh langsung dihubungkan dengan sumber. Untuk motor dengan daya 2 sampai 4 KW (3 sampai 5,5 HP) dipakai saklar bintang segitiga. Untuk itu kumparan stator mula-mula dihubungkan bintang dan sesudah itu dihubungkan segitiga.



Gambar 2.6.



a). Misalkan kumparan fase direncanakan untuk tegangan EL. Kumparan stator dihubungkan segitiga dan diberi tegangan sumber sebesar EL. Kalau arus pada tiap fase besarnya If maka arus line $I_L = I_f \sqrt{3}$

b). Kalau kumparan stator dihubungkan bintang dan tetap diberi tegangan sumber sebesar EL, maka tegangan tiap fase menjadi:

$\frac{E_L}{\sqrt{3}}$ sehingga arus tiap fase diperkecil menjadi $\frac{I_f}{\sqrt{3}}$

$$I_L = \frac{I_f}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(2.17)$$

Karena $I_L = I_f$ maka $I_L = \frac{I_f}{\sqrt{3}}$

Kalau a dan b kita bandingkan antara IL yang mempunyai hubungan segitiga dengan IL yang mempunyai hubungan bintang maka perbandingannya adalah. 3: 1

⁴Pengasutan dengan cara hubungan bintang-segitiga hanya dilakukan untuk motor induksi 3.fase yang mempunyai hubungan kumparan segitiga pada kondisi operasi normalnya.

Tegangan dan arus rotor motor induksi didapat dari industri. Kawat-kawat yang besar itu mempunyai tahanan murni yang kecil sekali sehingga yang berpengaruh hanyalah reaktansi induktif (XL) saja. Oleh karena itu arus induksi itu mempunyai pergeseran fase yang besar terhadap tegangannya. Hal ini akan *memperkecil torsi pada waktu start*, meskipun kalau motor sudah berputar normal tidak demikian. Kalau motor sudah berputar dengan kecepatan normal maka frekuensi dari arus berubah menjadi lebih kecil sehingga reaktansi induktif (XL) tidak begitu berpengaruh.

⁴ibid
Sumanto, 1986; Hal 81-85



Agar pada waktu start tahanan murni juga besar maka diperlukan batang-batang penghantar yang kecil dan reaktansi induktif yang kecil. Hal ini dapat diperoleh dengan *maletakkan sangkar dengan kawat kecil pada alur-alur yang dangkal* (bagian tepi luar). Oleh karena tahanan murninya besar dan XL-nya kecil maka pergeseran fasenya dapat dibatasi sehingga torsi pada waktu start menjadi lebih besar. Akan tetapi kalau sudah bekerja (berputar normal), *arus pada rotor terlalu kecil*. Untuk mengatasi hal itu dipasang sangkar kedua yang terletak pada alur-alur yang lebih dalam dibandingkan sangkar pertama. Diameter dari penghantar sangkar kedua lebih besar dibandingkan diameter penghantar luar sangkar pertama (Lihat gambar 70,77) dan disebut rotor sangkar rangkap.

Keuntungan dari rotor sangkar rangkap ini adalah arus start lebih kecil pada torsi start yang lebih besar, dan torsi waktu bekerja cukup besar. Motor-motor sangkar rangkap boleh dijalankan dengan saklar bintang segitiga hingga ukuran maksimum 6 HP.

Cara lain untuk itu ialah dengan deep bar rotor (*rotor yang diperdalam*).

Untuk rotor sangkar rangkap, seperti penjelasan di atas, mempunyai rotor luar dan rotor dalam.

Rotor luar dibuat dari bahan yang mempunyai tahanan besar, induktansi kecil (contoh aluminium, kuningan, perunggu).

Rotor dalam dibuat dari bahan yang mempunyai tahanan kecil, induktansi besar (contoh tembaga).

Cara lain untuk mendapat tahanan yang berbeda ialah dengan membuat diameter yang berbeda. Rotor luar dengan kawat- berdiameter kecil sedang rotor dalam dibuat dengan kawat berdiameter besar.

Pada waktu start, frekuensi rotor besar ($f_r = f_s$). Pada rotor dalam, karena L-nya besar, maka reaktansi induktif (XL) juga besar sehingga torsi yang



dihasilkannya kecil. Sedangkan pada rotor luar pada waktu start akan menghasilkan torsi yang besar karena R-nya besar dan X-nya kecil.

Kecepatan rotor akan meningkat sampai pada kecepatan normalnya. Pada waktu itu frekuensi rotor turun sehingga pada rotor dalam XL juga turun, arusnya naik dan torsinya bertambah. sebaliknya rotor luar pada waktu berjalan torsinya kecil.

Jadi pada rotor sangkar rangkap (double squirrel cage rotor) Pada waktu *start rotor luar yang memegang Peranan. Setelah motor berputar normal rotor dalam mengambil alih peranan tersebut. Lihat grafik torsi fungsi kecepatan untuk motor rotor sangkar rangkap.*

Pada jenis ini batang-batang konduktor merupakan batang-batang yang berpenampang empat persegi panjang (sempit dan tinggi).

Menurut teori efek kulit (skin effect), arus listrik di sini cenderung untuk berada pada bagian kulit (tepi luar), sehingga fluks bocor pada bagian dalam lebih padat dibandingkan fluks bocor pada bagian luar. Hal ini mengakibatkan pada waktu start reaktansi induktif pada bagian dalam meningkat dan menyebabkan pemindahan arus rotor pada bagian luar. Pada kecepatan normal reaktansi induktif menjadi lebih kecil dan sekarang arus terbagi rata (homogen) pada bagian dalam dan bagian luar.

Karakteristik pergesutan dari motor rotor sangkar, berdasarkan macam bentuk-bentuk alur di atas adalah sebagai berikut:

- Untuk rotor dengan *ukuran alur normal*

$$\frac{I_s}{I_n} = 4 - 7 \text{ dan}$$

$$\frac{T_s}{T_n} = 0,8 - 1,2$$

- Untuk rotor dengan *ukuran alur yang diperdalam*

$$\frac{I_s}{I_n} = 4 - 4,8 \text{ dan}$$

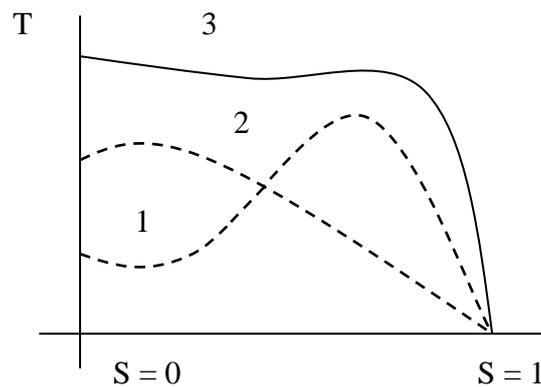
$$\frac{T_s}{T_n} = 1,2 - 1,5$$

- Untuk rotor dengan *sangkar ganda*

$$\frac{I_s}{I_n} = 3,3 - 5,5 \text{ dan}$$

$$\frac{T_s}{T_n} = 1 - 2$$

di mana :
Is = arus pengasutan
In = arus nominal
Ts = nomor Pengasutan
Tn = momen nominal



Gambar 2.7: *Lengkung torsi fungsi kecepatan motor sangkar rangkap*

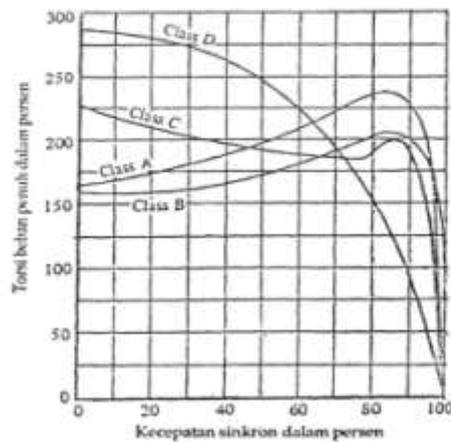


1. Torsi rotor luar
 2. Torsi rotor dalam
 3. Torsi rotor total
- a. Macam-macam Rotor Sangkar

Celah udara (air gap) pada motor induksi selalu lebih sempit. Apabila celah udara lebih lebar maka arus kemagnitan akan bertambah besar sehingga $\cos\phi$ dari motor akan turun. Oleh karena itu celah udara dibuat sesempit mungkin agar diperoleh $\cos\phi$ yang cukup besar. Untuk maksud tersebut diperlukan bantalan yang baik. Biasanya digunakan bantalan peluru (bola).

Macam-macam konstruksi motor induksi diklasifikasi untuk memudahkan memilih motor yang sesuai. Klasifikasi itu ialah:

- Motor rotor sangkar kelas A, torsi start sekitar 125 sampai 175 % torsi nominal dengan arus start 5 sampai dengan 7 kali arus nominal. Motor ini umumnya dijalankan (distart) dengan tegangan tidak penuh.
- Motor rotor sangkar kelas B, biasanya distart langsung dengan tegangan penuh. Reaktansinya relatif tinggi. Arus start sekitar 4,5 sampai dengan 5 kali. Arus normal dengan torsi 125 sampai dengan 175 persen.
Cos ϕ motor klas B lebih rendah dibanding cos ϕ . motor klas A
- Motor rotor sangkar kelas C, menggunakan rotor sangkar rangkap (double squirrel lage), biasanya distart dengan tegangan penuh. Arus startnya 4/2 sampai dengan 5 kali arus nominal dengan torsi start sekitar 2 kali torsi nominal.
- Motor rotor sangkar kelas D, reaktansinya relatif tinggi, digunakan untuk pelayanan yang startingnya sangat berat. Efisiensi motor ini selalu lebih rendah dibandingkan efisiensi motor kelas A, B dan C. Motor distart dengan tegangan penuh dengan arus start 4 sampai dengan 5 kali arus nominal. Sedangkan torsi awalnya sekitar 2 sampai 3 kali torsi nominal. Digunakan misal pada bulldozers.



Gambar 2.8: Karakteristik torsi – kecepatan dari motor induksi kelas A, B, C, dan D.

Catatan:

Kelas A : torsi awal normal, arus start normal.

Kelas B : torsi awal normal, arus start rendah.

Kelas C : torsi start tinggi, arus start rendah.

Kelas D : torsi start tinggi, slip tinggi.

b. Pengaturan Putaran

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 rumus $n_s = \frac{120 f}{P}$, 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 fase yang berbeda-beda. Dari masing-masing sambungan fase tersebut dapat diperoleh jumlah kutub yang berbeda-beda pula sehingga jumlah putaran motor berubah. Cara ini dapat dilakukan pada motor induksi dengan rotor sangkar (karena jumlah kutub pada rotor sangkar akan menyesuaikan jumlah kutub dari statornya).

Biasanya diperoleh dua macam perubahan jumlah putaran, misal:

- 1500 rpm - 3000 rpm.
- 750 rpm- 1500 rpm.⁵

2.6 Inverter

Inverter merupakan suatu alat yang dipergunakan untuk mengubah tegangan searah menjadi tegangan bolak-balik dan frekuensinya dapat diatur. Inverter ini sendiri terdiri dari beberapa sirkuit penting yaitu sirkuit converter (yang berfungsi untuk mengubah daya komersial menjadi dc serta menghilangkan ripple atau kerut yang terjadi pada arus ini) serta sirkuit inverter (yang berfungsi untuk mengubah arus searah menjadi bolak-balik dengan frekuensi yang dapat diatur-atur). Inverter juga memiliki sebuah sirkuit pengontrol.

Inverter dipakai untuk mengubah daya arus searah menjadi daya arus bolak balik yang tegangan dan frekuensinya dapat diatur. Tegangan bolak balik yang dihasilkan berbentuk gelombang persegi dan pada pemakaian tertentu diperlukan filter untuk menghasilkan bentuk gelombang sinus.

⁵Ibid
Sumanto, 1986; Hal 91-95



Umumnya suatu inverter terdiri dari rangkaian jembatan thyristor dan rangkaian pengaturan penyalan. Rangkaian pengaturan penyalan digunakan untuk mengatur tegangan dan frekuensi yang dihasilkan inverter. Periode pulsa yang memacu thyristor akan menentukan frekuensi yang dihasilkan, sedangkan tegangan efektifnya ditentukan oleh lebar pulsa tersebut.

Prinsip kerja inverter dapat dijelaskan sebagai berikut. Bila kedudukan S1 dan S2 pada A (gambar 8.15a), beban mendapatkan tegangan positif, sedangkan tegangan negatif diperoleh ketika S1 dan S2 pada kedudukan B.

Dengan demikian pemindahan saklar (S1 dan S2) secara berganti ganti dan menghasilkan tegangan bolak balik yang berbentuk persegi yang besarnya ditentukan oleh sumber, dan frekuensinya ditentukan oleh kecepatan perpindahan saklar

Inverter sederhana yang menggunakan saklar mekanik seperti diatas mengandung banyak kekurangan dan kesukaran, karenanya perlu dikembangkan.

Thyristor dan kapasitor dapat digunakan sebagai pengganti saklar mekanik pada saat Tr1 menyala dan Tr2 padam, sumber tegangan V_0 dihantarkan ke kumparan transformator dan membentuk setengah gelombang pertama.

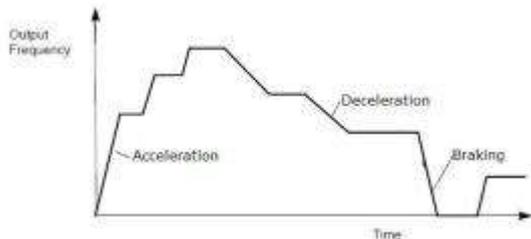
Lalu ketika Tr2 menyala, kapasitor C akan memaksa Tr1 melakukan penahanan dan sumber tegangan V_0 melalui Tr2 membentuk setengah gelombang lainnya.

Penyalan dan pemadaman secara berganti ganti pada Tr1 dan Tr2 akan menghasilkan suatu keluaran (output) tegangan bolak balik. Frekuensi tegangan bolak balik ditentukan oleh periode pulsa yang memacu thyristor Tr1 dan Tr2

Pulsa yang memacu perlu diatur sedemikian rupa agar tidak menyalakan kedua thyristor pada saat yang bersamaan. Penyalan kedua thyristor pada saat yang sama akan menyebabkan terjadinya hubungan singkat pada tegangan sumber.

Gelombang yang terjadi berbentuk gelombang persegi dan bila diperlukan dapat dibuat gelombang berbentuk sinus melalui filter.⁶

2.6.1 Variable Speed Drive (VSD)



Gambar 2.9 : grafik perubahan frekuensi

Aplikasi variable speed banyak diperlukan dalam industri. Jika sebelumnya banyak dipergunakan system mekanik, kemudian beralih ke motor slip/ pengereman maka saat ini banyak menggunakan semikonduktor. Tidak seperti softstarter yang mengolah level tegangan, inverter menggunakan frekuensi tegangan masuk untuk mengatur speed motor. Seperti diketahui, pada kondisi ideal (tanpa slip)

$$\text{RPM} = \frac{120 \cdot f}{P}$$

P

Dimana:

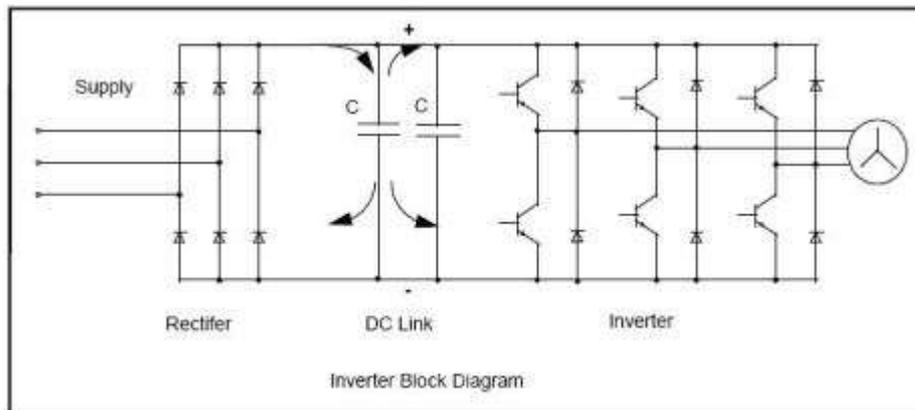
RPM : Speed Motor (RPM)

F : Frekuensi (Hz)

P : Kutup motor (pole)

⁶ Zuhail, 1991; hal 177-178

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



Gambar 2.10 : Diagram blok Inverter

Prinsip kerja inverter yang sederhana adalah :

- Tegangan yang masuk dari jala jala 50 Hz dialirkan ke board Rectifier/ penyearah DC, dan ditampung ke bank capacitor. Jadi dari AC di jadikan DC.
- 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.

Untuk pemasangan inverter sebaiknya juga dipasang unit pengaman hubung singkat seperti Seconductor Fuse atau bisa juga Breaker. Ini seperti pada pemasangan softstarter hanya saja tanpa contactor 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
- Voltage : Tegangan Suply Inverter.
- Base Freq. : Frekuensi tegangan supply.
- Lower Freq. : Frekuensi operasi terendah.
- Upper Freq. : Frekuensi operasi tertinggi.
- Stop mode : Stop bisa dengan braking, penurunan frekuensi dan di lepas seperti starter DOL/ Y-D.
- Acceleration : Setting waktu Percepatan.
- Deceleration : Setting waktu Perlambatan.



- Overload : Setting pembatasan arus.
- Lock : Penguncian setting program.

Jika beban motor memiliki inertiya 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 inertiya beban harus didisipasi/ 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 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.⁷

2.6.2 Variabel Frekuensi drive (VFD)

Sebuah Variabel Frekuensi drive (VFD) adalah jenis motor controller yang mendorong motor listrik dengan memvariasikan frekuensi dan tegangan yang diberikan ke motor listrik. Nama lain untuk VFD adalah kecepatan berkendara

⁷ <http://bayupancoro.wordpress.com/2008/07/02/variable-speed-drive-vsd-aka-inverter/>



variabel, speed drive disesuaikan, frequency drive disesuaikan, AC drive, microdrive, dan inverter.

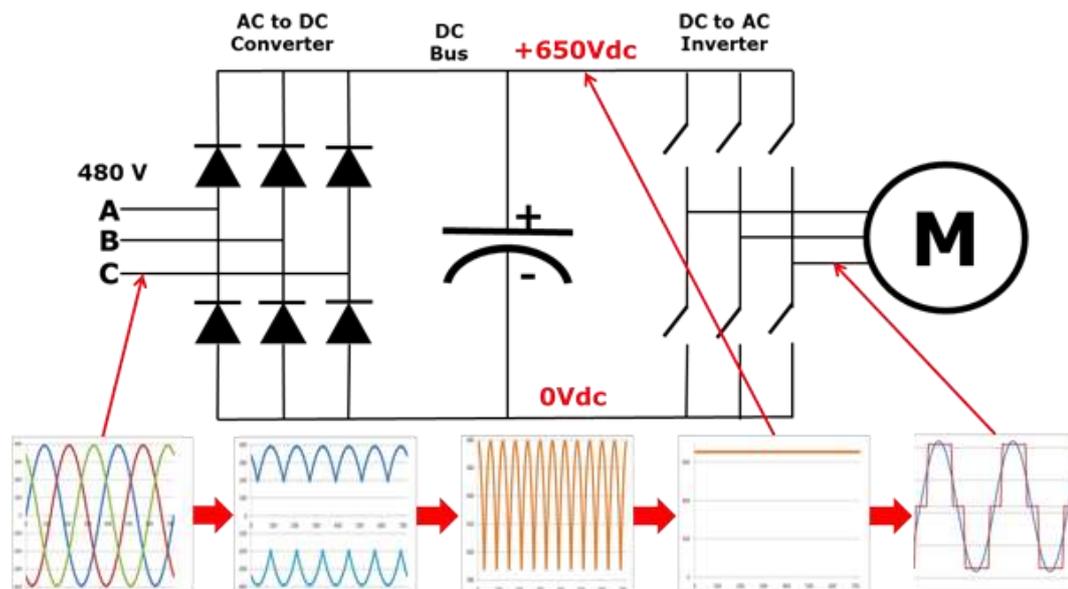
Frekuensi (atau hertz) secara langsung berkaitan dengan kecepatan motor (RPM). Dengan kata lain, semakin cepat frekuensi, semakin cepat RPM pergi. Jika aplikasi tidak memerlukan motor listrik untuk berjalan pada kecepatan penuh, VFD dapat digunakan untuk meningkatkan bawah frekuensi dan tegangan untuk memenuhi persyaratan beban motor listrik itu. Sebagai aplikasi persyaratan kecepatan motor perubahan, VFD hanya dapat muncul atau bawah kecepatan motor untuk memenuhi kebutuhan kecepatan.

a. Bagaimana cara kerja Variable Frequency Drive?

Tahap pertama dari Variabel Frekuensi AC Drive, atau VFD, adalah Converter. Converter ini terdiri dari enam dioda, yang mirip dengan memeriksa katup yang digunakan dalam sistem pipa. Mereka memungkinkan arus mengalir hanya satu arah; arah yang ditunjukkan oleh anak panah dalam simbol dioda. Misalnya, setiap kali A-fase tegangan (tegangan sama dengan tekanan dalam sistem pipa) lebih positif dari B atau C tegangan fase, maka dioda yang akan membuka dan memungkinkan arus mengalir. Ketika B-fase menjadi lebih positif dari A-fase, maka dioda B-fase akan terbuka dan dioda A-fase akan menutup. Hal yang sama berlaku untuk 3 dioda di sisi negatif dari bus. Dengan demikian, kita mendapatkan enam "pulsa" saat ini sebagai setiap dioda membuka dan menutup. Ini disebut "enam-pulsa VFD ", yang merupakan konfigurasi standar untuk saat Variable Frequency Drives.

Mari kita berasumsi bahwa drive beroperasi pada sistem tenaga 480V. Rating 480V adalah "rms" atau akar-rata kuadrat. Puncak pada sistem 480V adalah 679V. Seperti yang Anda lihat, bus PKS dc memiliki tegangan dc dengan riak AC. Tegangan berjalan antara sekitar 580V dan 680V.

Kita bisa menyingkirkan riak AC di bus DC dengan menambahkan sebuah kapasitor. Sebuah kapasitor beroperasi dengan cara yang sama dengan reservoir atau akumulator dalam sistem pipa. Kapasitor ini menyerap riak ac dan memberikan tegangan dc halus. AC riak di bus DC biasanya kurang dari 3 Volt. Dengan demikian, tegangan pada bus DC menjadi "kira-kira" 650VDC. Tegangan sebenarnya akan tergantung pada tingkat tegangan dari garis AC makan drive, tingkat ketidakseimbangan tegangan pada sistem tenaga, beban motor, impedansi dari sistem kekuasaan, dan setiap reaktor atau filter harmonik pada drive. Konverter jembatan dioda yang mengubah AC-DC, kadang-kadang hanya disebut sebagai konverter. Konverter yang mengubah dc kembali ke ac juga konverter, tetapi untuk membedakannya dari converter dioda, biasanya disebut sebagai "inverter". Hal ini telah menjadi umum di industri untuk mengacu pada setiap konverter DC-to-AC sebagai inverter.

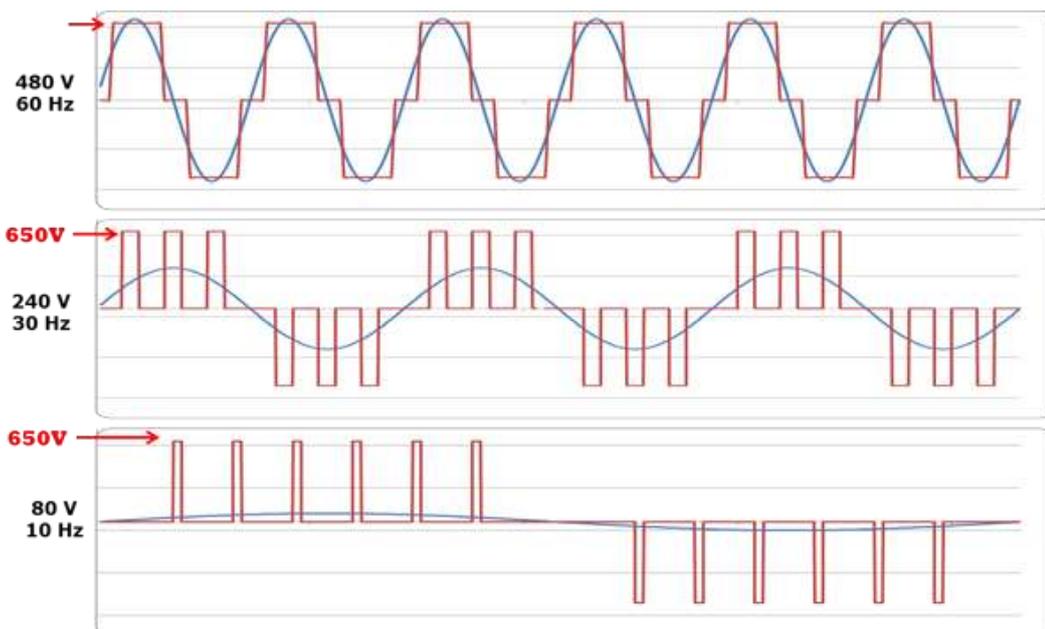


Gambar 2.11: rangkaian dan proses perubahan gelombang pada VFD

Perhatikan bahwa dalam VFD nyata, switch ditampilkan benar-benar akan menjadi transistor.

Ketika kita menutup salah satu switch top di inverter, fase motor terhubung ke dc

positif bus dan tegangan pada fase yang menjadi positif. Ketika kita menutup salah satu switch bawah dalam konverter, tahap yaitu terhubung ke negatif dc bus dan menjadi negatif. Dengan demikian, kita dapat membuat setiap tahap pada motor menjadi positif atau negatif di akan dan dengan demikian dapat menghasilkan frekuensi yang yang kita inginkan. Jadi, kita dapat membuat setiap fase positif, negatif, atau nol.



Gambar 2.12: Gelombang Variabel Frekuensi Drive

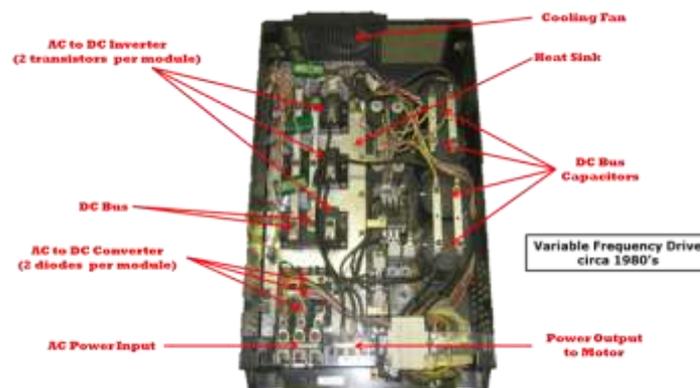
Biru gelombang sinus ditampilkan untuk tujuan perbandingan saja. Drive tidak menghasilkan gelombang sinus ini.

Perhatikan bahwa output dari VFD adalah "persegi panjang" bentuk gelombang. VFD tidak menghasilkan output sinusoidal. Gelombang persegi panjang ini tidak akan menjadi pilihan yang baik untuk sistem distribusi tujuan umum, tetapi sempurna memadai untuk motor.

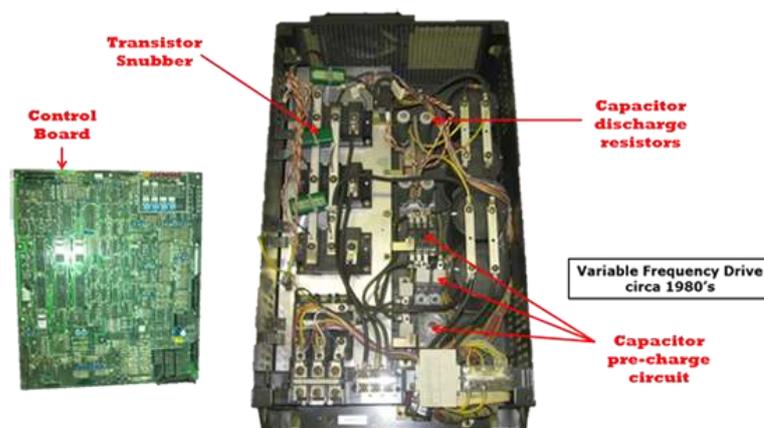
Jika kita ingin mengurangi frekuensi motor untuk 30 Hz, maka kita hanya beralih transistor output inverter lebih lambat. Tapi, jika kita mengurangi frekuensi 30Hz

ke, maka kita harus juga mengurangi tegangan sampai 240V untuk mempertahankan rasio V / Hz (lihat presentasi VFD motor Teori untuk lebih lanjut tentang ini). Bagaimana kita akan mengurangi tegangan jika satu-satunya tegangan yang kita miliki adalah 650V DC?

Ini disebut Pulse Width Modulation atau PWM. Bayangkan bahwa kita bisa mengendalikan tekanan dalam garis air dengan memutar katup dan mematikan pada tingkat tinggi kecepatan. Meskipun hal ini tidak akan praktis untuk sistem pipa, bekerja sangat baik untuk VFD. Perhatikan bahwa selama setengah siklus pertama, tegangan ON setengah waktu dan OFF separuh waktu. Dengan demikian, tegangan rata-rata setengah dari 480V atau 240V. Dengan berdenyut output, kita dapat mencapai tegangan rata-rata pada output dari VFD.



Gambar 2.13: bagian-bagian inverter



Gambar 2.14: bagian kontrol inverter



b. Kelebihan Variable Frequency Drives (VFD)

- **Mengurangi Biaya Konsumsi Energi**

Jika Anda memiliki aplikasi yang tidak perlu dijalankan pada kecepatan penuh, maka Anda dapat mengurangi biaya energi dengan mengendalikan motor dengan drive frekuensi variabel, yang merupakan salah satu manfaat dari Variable Frequency Drives. VFD memungkinkan Anda untuk menyesuaikan kecepatan peralatan bermotor dengan kebutuhan beban. Tidak ada metode lain dari AC kontrol motor listrik yang memungkinkan Anda untuk mencapai hal ini. Sistem motor listrik bertanggung jawab untuk lebih dari 65% dari konsumsi listrik di industri saat ini. Mengoptimalkan sistem kontrol motor dengan menginstal atau upgrade ke VFDs dapat mengurangi konsumsi energi di fasilitas Anda sebanyak 70%. Selain itu, pemanfaatan VFD meningkatkan kualitas produk, dan mengurangi biaya produksi. Menggabungkan insentif pajak efisiensi energi, dan rabat utilitas, pengembalian investasi untuk instalasi VFD dapat sesedikit 6 bulan.

- **Meningkatkan Produksi Melalui ketat Process Control**

Dengan operasi motor Anda pada kecepatan yang paling efisien untuk aplikasi Anda, lebih sedikit kesalahan akan terjadi, dan dengan demikian, tingkat produksi akan meningkat, yang menghasilkan perusahaan Anda pendapatan yang lebih tinggi. Pada konveyor dan sabuk Anda menghilangkan tersentak pada start-up yang memungkinkan tinggi melalui put.

- **Memperpanjang Alat Hidup dan Mengurangi Pemeliharaan**

Peralatan Anda akan bertahan lebih lama dan akan memiliki downtime kurang karena perawatan ketika itu dikendalikan oleh VFDs memastikan kecepatan aplikasi motor optimal. Karena kontrol optimal VFD frekuensi motor dan

tegangan, VFD akan menawarkan perlindungan yang lebih baik untuk motor Anda dari isu-isu seperti elektro overloads termal, perlindungan fase, di bawah tegangan, tegangan lebih, dll .. Ketika Anda mulai beban dengan VFD yang Anda tidak akan tunduk motor atau didorong beban ke "shock instan" dari seluruh garis start, tetapi bisa mulai lancar, sehingga menghilangkan belt, gigi dan pakaian bantalan. Ini juga merupakan cara terbaik untuk mengurangi dan / atau menghilangkan water hammer karena kita dapat memiliki percepatan dan perlambatan halus siklus.⁸

2.6.3 User Manual PowerFlex 700

PowerFlex 700 menawarkan kinerja yang luar biasa dalam perjalanan yang mudah digunakan yang mencakup berbagai peringkat tenaga kuda. Drive ini dirancang untuk mengendalikan tiga fase motor induksi dalam aplikasi dengan persyaratan mulai dari kontrol kecepatan paling sederhana untuk kontrol torsi paling menuntut. PowerFlex 700 menawarkan fitur khusus aplikasi dan parameter untuk mengangkat, sumur minyak, dan kecepatan dan posisi aplikasi..(Bradley Allen, 2013)



Gambar 2.15 : Inverter PowerFlex 700

⁸ <http://www.vfds.com/blog/what-is-a-vfd>

**a. Pengenalan**

Tabel 2.1 : Pengenalan

<i>Introduction</i>	
<i>Ratings</i>	<p>200...240V: 0.37...66 kW / 0.5...100 Hp / 2.2...260 A</p> <p>380...480V: 0.37...500 kW / 0.5...700 Hp / 1.1...875 A</p> <p>500...600V: 1...150 Hp / 1.7...144 A</p> <p>690V: 45...132 kW / 52...142 A</p>
<i>Motor Control</i>	<ul style="list-style-type: none"> • V/Hz control • Sensorless Vector Control • Vector Control with FORCE Technology (with and without encoder)
<i>Enclosures</i>	<ul style="list-style-type: none"> • IP00, NEMA/UL Type Open • IP20, NEMA/UL Type 1 • IP54, NEMA Type 12 • Flange Mount
<i>Additional Features</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Speed and torque control with and without encoder feedback • Position indexing and speed profiling • Parameter linking functionality • TorqProve for lifting applications • Adjustable voltage for non-motor loads • Position regulator and 16 step indexing table (with encoder feedback) • Custom Firmware including Pump Off for oil well applications and Cascade fan/pump ‡
<i>Certifications</i>	<ul style="list-style-type: none"> • ABS (Frames 0...6) • ATEX Certified • C-Tick • c-UL-us • CE * • IEC (Designed to Meet) • Lloyd's Register (Frames 0...6) • EPRI/SEMI F47 (Frames 0...6) ⁹

Tabel 2.1 : Pengenalan

⁹ <http://www.ab.com/en/epub/catalogs/36265/1323285/9505626/Introduction.html>



b. Sertifikasi

Tabel 2.2 : Sertifikasi

Certification		Frames			
		0...4 (240...480V)	0...4 (600V)	5...6	7...10
c-UL	Listed to UL508C and CAN/CSA-C22.2 No. 14-05	✓	✓	✓	✓
TÜV ATEX	EC-Type-Examination Certificate TUV 05 ATEX 7153 for directive 94/9/EC: Safe turn off of certified ATEX motors used in Group II Category (2) GD potentially explosive atmospheres	✓	✓	✓	✓
EPRI/SEMIF47	EPRI Quality Star Certificates SEMIF47.115 and SEMIF47.127 for SEMI F47 compliance, 480V units tested	✓		✓	
ABS	American Bureau of Shipping MA Certificate 08-HS303172B/1-PDA for auxiliary services on AB Classed vessels and offshore platforms	✓		✓	
Lloyd's Register	Lloyd's Register Type Approval Certificate 08 / 60015 (marine certification)	✓		✓	
RINA	RINA Type Approval Certificate ELE283205CS (Registo Italiano Navale - marine certification)	✓	✓	✓	
Trentec	Tested by Trentec to be compliant with AC156 Acceptance Criteria for Seismic Qualification Testing of Nonstructural Components and 2003 International Building Code for worst-case seismic level for USA excluding site class	✓	✓	✓	
CE	Certified by Rockwell Automation to be in conformity with the essential requirements of the applicable European Directives and the standards referenced below have been applied:				
	Low Voltage Directive: 2006/95/EC EN 50178 Electronic Equipment for use in Power Installations	✓	✓	✓	✓
	EMC Directive: 2004/108/EC EN 61800-3 Adjustable Speed electrical power drive systems - Part 3: EMC requirements and specific test methods	✓		✓	✓
C-Tick	Certified by Rockwell Automation to be in conformity with the requirements of the applicable Australian legislation and the standards referenced below: IEC 61800-3	✓		✓	✓
The drive is designed to meet the following applicable requirements:	CMAA Specification #70 (Crane Manufacturers of America Association)	✓	✓	✓	✓
	NFPA 70 - US National Electrical Code	✓	✓	✓	✓
	NEMA ICS 7.1 - Safety Standards for Construction and Guide for Selection, Installation, and Operation of Adjustable Speed Drive Systems	✓	✓	✓	✓
	IEC 61800-2 Adjustable speed electrical power drive systems - Part 2: General requirements - Rating specifications for low voltage adjustable frequency AC power drive systems	✓	✓	✓	✓

**c. Environmental Specifications**

Tabel 2.3 : Environmental Specifications

Category	Specification
Altitude:	1000 m (3300 ft) maximum without derating
Maximum Surrounding Air Temperature without Derating IP20, NEMA/UL Type Open Frames 0...6: Frames 7...10:	0...50 °C (32...122 °F) typical 0...40 °C (32...104 °F) for chassis (heatsink) 0...65 °C (32...149 °F) for control (front of backplane)
Storage Temperature (All Const.):	-40...70 °C (-40...158 °F)
Atmosphere:	Important: Drive must not be installed in an area where the ambient atmosphere contains volatile or corrosive gas, vapors or dust. If the drive is not going to be installed for a period of time, it must be stored in an area where it will not be exposed to a corrosive atmosphere.
Relative Humidity:	5 to 95% non-condensing
Shock:	15 g peak for 11 ms duration (± 1.0 ms)
Vibration:	1 g peak, 0.152 mm (0.006 in.) displacement
Sound:	Fan Speed/Sound Level
Frame 0	30 CFM/58 dB
Frame 1	30 CFM/59 dB
Frame 2	50 CFM/57 dB
Frame 3	120 CFM/61 dB
Frame 4	190 CFM/59 dB
Frame 5	200 CFM/71 dB
Frame 6	300 CFM/72 dB
Frame 7	756 CFM/74 dB
Frame 8	1200 CFM/78 dB
Frame 9	2800 CFM/82 dB
Frame 10 Inverter	1850 CFM/78 dB
Frame 10 Converter	1200 CFM/78 dB



d. Technical Specifications

Tabel 2.4 : Technical Specifications

Category	Specification	
Protection	AC Input Overvoltage Trip	
	200...208V:	285V AC
	240V:	285V AC
	380...400V:	570V AC
	480V:	570V AC
	600V (Frames 0...4):	716V AC
	600V (Frames 5...6):	818V AC
	AC Input Undervoltage Trip	
	200...208V:	120V AC
	240V:	138V AC
	380...400V:	233V AC
	480V:	280V AC
	600V (Frames 0...4):	345V AC
	600V (Frames 5...6):	345V AC
Bus Overvoltage Trip		
200...208V:	405V DC	
240V:	405V DC	
380...400V:	810V DC	
480V:	810V DC	
600V (Frames 0...4):	1013V DC	
600V (Frames 5...6):	1162V DC	
Bus Undervoltage Shutoff/Fault		
200...208V:	153V DC	
240V:	153V DC	
380...400V:	305V DC	
480V:	305V DC	
600V (Frames 0...4):	381V DC	
600V (Frames 5...6):	437V DC	
Nominal Bus Voltage		
200...208V:	281V DC	
240V:	324V DC	
380...400V:	540V DC	
480V:	648V DC	
600V (Frames 0...4):	810V DC	
600V (Frames 5...6):	932V DC	
Heat Sink Thermistor:	<i>Monitored by microprocessor overtemp trip</i>	
Drive Overcurrent Trip		
Software Current Limit:	200% of rated current (typical)	
Hardware Current Limit:	220...300% of rated current (dependent on drive rating)	
Line transients:	<i>up to 6000 volts peak per IEEE C62.41-1991</i>	
Control Logic Noise Immunity:	<i>Showering arc transients up to 1500V peak</i>	
Power Ride-Thru:	<i>15 milliseconds at full load</i>	
Logic Control Ride-Thru:	<i>0.5 seconds minimum, 2 seconds typical</i>	
Ground Fault Trip:	<i>Phase-to-ground on drive output</i>	
Short Circuit Trip:	<i>Phase-to-phase on drive output</i>	
Electrical	Efficiency:	<i>97.5% at rated amps, nominal line voltage</i>
	Input Frequency Tolerance:	<i>47...63 Hz</i>
	Input Phases:	<i>Three-phase input provides full rating for all drives. Single-phase operation provides 50% of rated current. Frames 0...7: The drive can be supplied as 6 pulse or 18 pulse in an engineered package.</i>
	Displacement Power Factor:	<i>0.98 across entire speed range</i>
	Maximum Short Circuit Rating:	<i>200,000 Amps Symmetrical</i>



	<i>Actual Short Circuit Rating:</i>	<i>Determined by AIC rating of installed fuse/circuit breaker.</i>	
Control	<i>Method:</i>	<i>Sine coded PWM with programmable carrier frequency. Ratings apply to all drives.</i>	
	<i>Carrier Frequency:</i>	<i>2, 4, 8 & 10 kHz. Drive rating based on 4 kHz.</i>	
	<i>Output Voltage:</i>	<i>0 to rated motor voltage</i>	
	<i>Output Frequency:</i>	<i>0...420 Hz</i>	
	<i>Frequency Accuracy</i>		
	<i>Digital Input:</i>	<i>Within $\pm 0.01\%$ of set output frequency.</i>	
	<i>Analog Input:</i>	<i>Within $\pm 0.4\%$ of maximum output frequency.</i>	
	<i>Frequency Control:</i>	<i>Speed Regulation with Slip Compensation (V/Hz Mode)</i>	<i>0.5% of base speed across 40:1 speed range, 40:1 operating range, 10 rad/sec bandwidth</i>
		<i>Speed Regulation with Slip Compensation (Sensorless Vector Mode)</i>	<i>0.5% of base speed across 80:1 speed range, 80:1 operating range, 20 rad/sec bandwidth</i>
		<i>Speed Regulation with feedback (Sensorless Vector Mode)</i>	<i>0.1% of base speed across 80:1 speed range, 80:1 operating range, 20 rad/sec bandwidth</i>
	<i>Speed Control:</i>	<i>Speed Regulation without feedback (Vector Control Mode)</i>	<i>0.1% of base speed across 120:1 speed range, 120:1 operating range, 50 rad/sec bandwidth</i>
		<i>Speed Regulation with feedback (Vector Control Mode)</i>	<i>0.001% of base speed across 120:1 speed range, 1000:1 operating range, 250 rad/sec bandwidth</i>
	<i>Torque Regulation:</i>		<i>without feedback $\pm 5\%$, 600 rad/sec bandwidth</i>
			<i>with feedback $\pm 2\%$, 2500 rad/sec bandwidth</i>
<i>Selectable Motor Control:</i>		<i>Sensorless Vector with full tuning. Standard V/Hz with full custom capability and vector control.</i>	
<i>Stop Modes:</i>		<i>Multiple programmable stop modes including - Ramp, Coast, DC-Brake, Fast Brake, Ramp-to-Hold and S-curve.</i>	
<i>Accel/Decel:</i>		<i>Two independently programmable accel and decel times. Each time may be programmed from 0...3600 seconds in 0.1 second increments.</i>	
<i>Intermittent Overload:</i>		<i>110% Overload capability for up to 1 minute 150% Overload capability for up to 3 seconds</i>	
<i>Current Limit Capability:</i>		<i>Proactive Current Limit programmable from 20 to 160% of rated output current. Independently programmable proportional and integral gain.</i>	
	<i>Electronic Motor Overload Protection:</i>		



	<i>Frames 0...6 Standard Control:</i>	<i>PowerFlex 700 drives with standard control, identified by an N, A, or B in position 15 of the catalog number, only provide Class 10 motor overload protection according to NEC article 430. They do not provide speed sensitive overload protection, thermal memory retention and motor over-temperature sensing according to NEC article 430.126 (A) (2). If such protection is needed in the end-use product, it must be provided by additional means.</i>
	<i>Frames¹⁰ 0...6 Vector Control:</i>	<i>PowerFlex 700 drives with vector control, identified by a C or D in position 15 of the catalog number, provide class 10 motor overload protection according to NEC article 430 and motor over-temperature protection according to NEC article 430.126 (A) (2). UL 508C File E59272.</i>
	<i>Frames 7...10 Vector Control:</i>	<i>Class 10 motor overload protection according to NEC article 430 and motor over-temperature protection according to NEC article 430.126 (A)(2). UL 508C File E59272.</i>
Encoder	<i>Type:</i>	<i>Incremental, dual channel</i>
	<i>Supply:</i>	<i>12V, 250 mA. 12V, 10 mA minimum inputs isolated with differential transmitter, 250 kHz maximum.</i>
	<i>Quadrature:</i>	<i>90°, ±27 degrees at 25 degrees C.</i>
	<i>Duty Cycle:</i>	<i>50% +10%</i>
	<i>Requirements:</i>	<i>Encoders must be line driver type, quadrature (dual channel) or pulse (single channel), 8...15V DC output (4...6V DC when jumpers are in 5V position), single-ended or differential and capable of supplying a minimum of 10 mA per channel. Maximum input frequency is 250 kHz. The Encoder Interface Board accepts 12V DC square-wave with a minimum high state voltage of 7.0V DC. With the jumpers in the 5V position, the encoder will accept a 5V DC square-wave with a minimum high state voltage of 3.0V DC. In either jumper position, the maximum low state voltage is 0.4V DC.</i>

¹⁰ <http://www.ab.com/en/epub/catalogs/36265/1323285/9505626/Specifications.html>