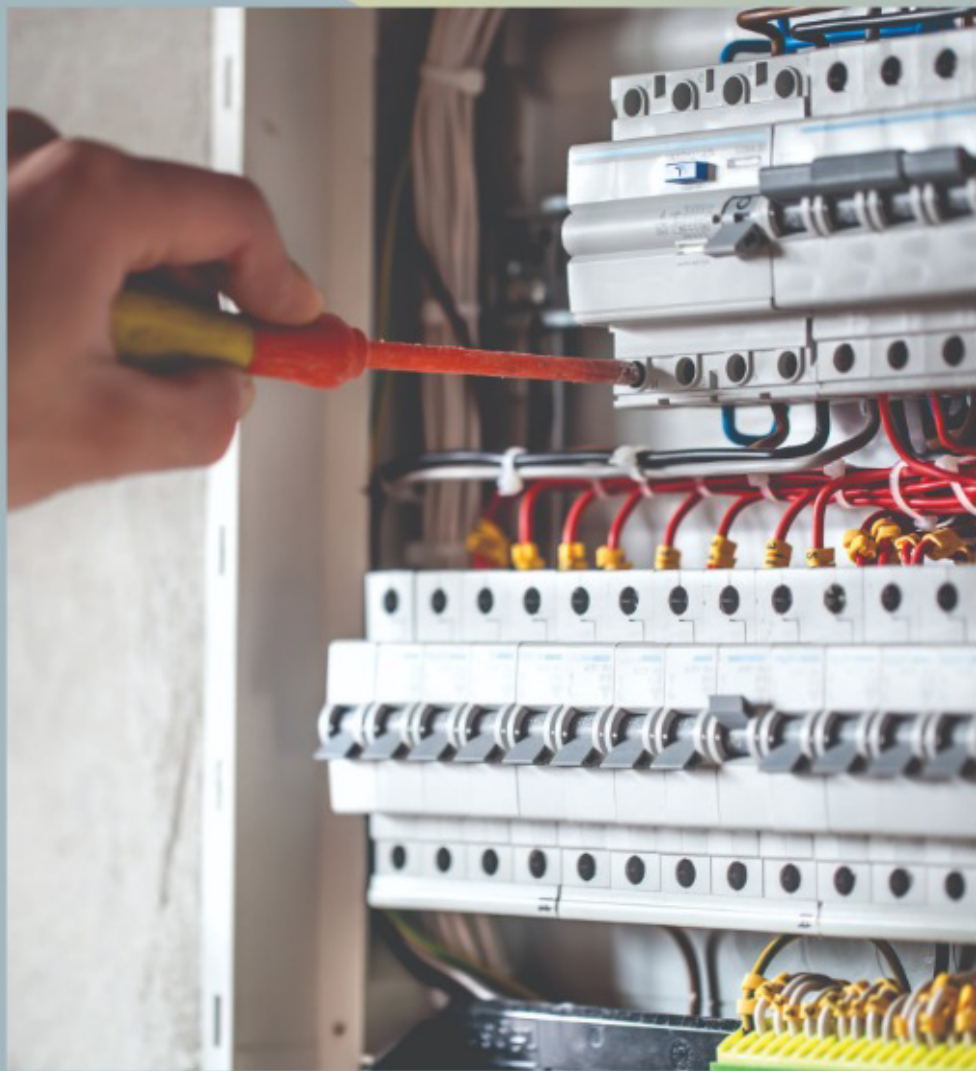


MESIN LISTRIK ARUS BOLAK BALIK (Motor Induksi)



**Syamsudin Noor
Saifullah
Edi Yohanes
Setia Graha
Puhrani**

**Palling
Sunu Hasta Wibowo
Bambang Suriansyah
Muhammad Ali Watoni
Feriyadi**

**MESIN LISTRIK ARUS BOLAK BALIK
(Motor Induksi)**

Undang-Undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Perlindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap :

- i. penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
3. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
4. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

MESIN LISTRIK ARUS BOLAK BALIK (Motor Induksi)

Syamsudin Noor
Saifullah
Edi Yohanes
Setia Graha
Puhrani
Paliling
Sunu Hasta Wibowo
Bambang Suriansyah
Muhammad Ali Watoni
Feriyadi



Poliban Press

**MESIN LISTRIK ARUS BOLAK BALIK
(Motor Induksi)**

Penulis:

Syamsudin Noor; Saifullah; Edi Yohanes; Setia Graha; Puhrani; Paliling;
Sunu Hasta Wibowo; Bambang Suriansyah; Muhammad Ali Watoni;
Feriyadi

ISBN:

978-623-5259-04-8

Editor dan Penyunting:

Adi Pratomo

Desain Sampul dan Tata letak:

Rahma Indera; Eko Sabar Prihatin

Penerbit:

POLIBAN PRESS

Anggota APPTI (Asosiasi Penerbit Perguruan Tinggi Indonesia)

no.004.098.1.06.2019

Cetakan Pertama, 2022

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
dan dengan cara apapun tanpa ijin tertulis dari penerbit

Redaksi:

Politeknik Negeri Banjarmasin, Jl. Brigjen H. Hasan Basry,
Pangeran, Komp. Kampus ULM, Banjarmasin Utara

Telp: (0511)3305052

Email: press@poliban.ac.id

Diterbitkan pertama kali oleh:

Poliban Press, Banjarmasin, Pebruari 2022

KATA PENGANTAR

Syukur alhamdulillah penulis ucapkan kehadiran Allah SWT, karena hanya dengan rahmat, taufiq dan hidayah-Nya jualah Buku Ajar Mesin Arus Bolak-Balik ini dapat diselesaikan penulisannya. Dengan hadirnya buku ini diharapkan dapat membantu dosen maupun mahasiswa Jurusan Teknik Elektro khususnya proses belajar mengajar dalam mata kuliah Mesin Listrik Arus Bolak dengan topik bahasan motor induksi tiga-fasa dan satu-fasa.

Buku Ajar Mesin Listrik Arus Bolak ini memuat tentang : konsep dasar struktur dan cara kerja motor induksi 3-fasa, analisis karakteristik motor induksi3-fasa, pengendalian motor induksi3-fasa, dan sruktur serta cara kerja motor induksi satu-fasa, dan penggunaannya.

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu terwujudnya buku ini.

Akhirnya menyadari keterbatasan penulis, masih terdapat berbagai kekurangan dan kekeliruan pada buku ini, penulis mohon saran dan kritik demi perbaikan buku ini dimasa yang akan datang. Semoga buku kecil ini bermanfaat bagi pembaca. Aamiin.

Banjarmasin,

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
BAB 1 STRUKTUR DAN PRINSIP KERJA MOTOR	
INDUKSI 3-FASA	1
1.1. Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa	2
1.2. Medan Magnet Putar.....	5
1.3. Prinsip Kerja	7
1.4. Operasi dalam Keadaan Diam	8
1.5. Operasi dalam Keadaan Berputar	9
Pertanyaan dan Soal Latihan.....	13
BAB 2 RANGKAIAN EKIVALEN DAN UNJUK	
KERJA MOTOR INDUKSI	15
2.1. Model Rangkaian Ekuivalen.....	15
2.2. Rangkaian Stator	16
2.3. Rangkaian Rotor	17
2.4. Rangkaian Ekuivalen Lengkap.....	19
2.5. Macam-macam Konfigurasi Rangkaian Ekuivalen.....	21
2.6. Analisa Unjuk Kerja Motor Induksi	23
2.6.1. Arus Stator.....	24
2.6.2. Efisiensi	27
Soal-soal.....	41
BAB 3 KARAKTERISTI TORSI-KECEPATAN	46
3.1. Torsi Start	47
3.2. Karakteristi Torsi - Kecepatan.....	50
3.3. Pengaruh Tahanan Rotor	58
3.3.1. Motor Rotor Lilitan	60
3.3.2. Motor Sangkar-Tupai Ganda.....	62
Pertanyaan dan Soal Latihan.....	64
BAB 4 MENJALANKAN MOTOR INDUKSI	69
4.1. Start dengan Hubungan Langsung.....	73
4.2. Start dengan Tahanan Primer.....	76
4.3. Start dengan Autotransformator.....	78
4.4. Start dengan Metode Bintang-Delta	80

4.5. Start dengan Pengendali Tegangan Zat-padat.....	83
4.6. Start dengan Tahanan Eksternal.....	84
Pertanyaan dan Soal Latihan.....	85
BAB 5 PENGATURAN KECEPATAN MOTOR	
INDUKSI	86
5.1. Pengaturan Jumlah Kutub.....	88
5.2. Pengaturan Tegangan Jaringan.....	89
5.3. Pengaturan Frekuensi Tegangan Jaringan.....	90
5.4. Pengaturan Tahanan Rotor.....	92
Pertanyaan-pertanyaan.....	93
BAB 6 MOTOR INDUKSI SATU FASA	94
6.1. Konstruksi Motor Induksi 1-fasa.....	95
6.2. Medan Arah Maju dan Arah Mundur.....	96
6.3. Teor Medan Putar Ganda.....	98
6.4. Menjalankan Motor Induksi Satu fasa.....	101
6.3. Klasifikasi Motor Induksi Satu fasa.....	102
6.3.1. Motor Start dengan Pemisahan-Fasa.....	102
6.3.2. Motor yang Start dengan Kapasitor.....	103
6.3.3. Motor dengan Kapasitor Jalan.....	105
6.3.4. Motor dengan Kapasitor-Start dan Kapasitor-Jalan.....	106
6.3.5. Motor dengan Kutup Terlindung.....	108
Pertanyaan-pertanyaan.....	111
DAFTAR PUSTAKA	113

BAB I

STRUKTUR DAN PRINSIP KERJA MOTOR INDUKSI TIGA FASA

Tujuan

Setelah menyelesaikan bagian ini anda mampu:

1. Menjelaskan konstruksi dasar dan jenis motor induksi tiga-fasa.
2. Menjelaskan prinsip pembentukan medan putar.
3. Menjelaskan prinsip kerja motor induksi.
4. Mendefinisikan dan menghitung slip.
5. Menjelaskan mengapa kecepatan motor induksi selalu lebih rendah dari kecepatan medan putar.

Karena konstruksinya kuat, sederhana dan karakteristiknya baik maka motor induksi merupakan mesin ac yang paling luas penggunaannya di industri. Mesin ini terdiri dua bagian: stator atau bagian yang diam, dan rotor bagian yang berputar. Dalam motor dc, arus ditarik dari sumber daya listrik secara langsung dan diteruskan ke konduktor jangkar (rotor) melalui sikat dan komutator. Tetapi dalam motor induksi, tidak ada hubungan listrik dari stator ke rotor. Arus ac diberikan ke kumparan stator

secara langsung dan ke kumparan rotor secara induksi – oleh karena itulah motor ini diberi nama motor induksi.

Motor induksi tersedia dalam berbagai ukuran. Motor induksi satu fasa dengan daya kecil (biasanya dibawah 1 hp) digunakan pada peralatan rumah tangga seperti blander, mesin cuci, mixer, kulkas, kipas angin, dan lain lain.

Motor induksi tiga fasa dengan daya besar (puluhan atau ratusan hp) umumnya digunakan di industri untuk pompa, kipas, kompresor, paberik kertas, paberik tekstil, dan lain lain. Dengan kata lain, motor induksi tiga fasa merupakan peralatan sangat penting dan sangat banyak digunakan di industri.

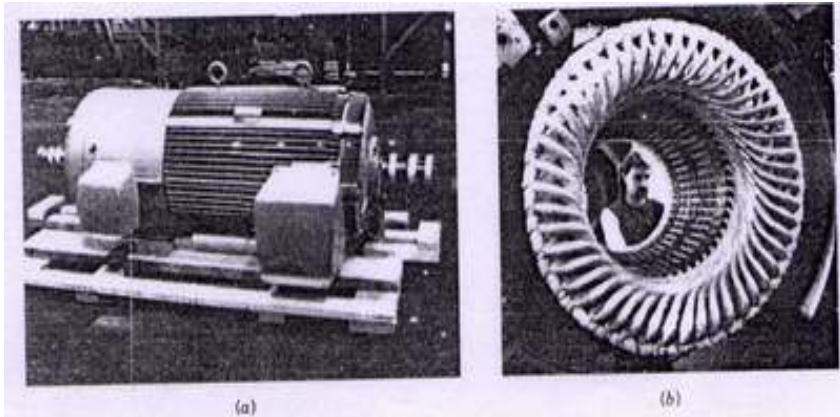
1.1 Konstruksi Motor Induksi Tiga fasa

Konstruksi motor induksi (gambar 1.1a) terdiri atas dua bagian utama, yaitu:

- a) Stator (bagian yang diam)
- b) Rotor (bagian yang berputar)

- **Stator**

Inti stator terbuat dari lapisan-lapisan pelat baja beralur yang didukung dalam rangka stator yang terbuat dari besi tuang atau pelat baja yang dipabrikasi. Lilitan-lilitan – sama halnya dengan lilitan dari generator sinkron – diletakkan dalam alur-alur stator yang terpisah 120 derajat listrik (gambar 1.1b).



Gambar 1.1. Motor induksi dan statornya
(Sumber, Sen, 2007)

- **Rotor**

Ada dua jenis konstruksi rotor dalam motor induksi, yaitu:

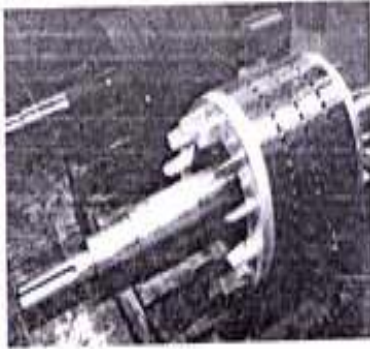
- Rotor sangkar-tupai (*squirrel-cage rotor*)
- Rotor lilitan (*wound rotor*)

Rotor sangkar tupai adalah konstruksi dari inti berlapis dengan konduktor dipasang paralel dengan poros dan mengelilingi permukaan inti. Konduktornya tidak terisolasi dengan inti, karena arus rotor secara alamiah akan mengalir melalui tahanan yang paling kecil, yaitu konduktor rotor. Pada setiap ujung rotor, konduktor rotor semuanya dihubungkan dengan cincin-ujung. Konduktor rotor dan cincin-ujung menyerupai sangkar tupai yang berputar sehingga diberi nama demikian. Dengan demikian, motor induksi yang dibangun dengan rotor tipe sangkar tupai disebut motor induksi rotor

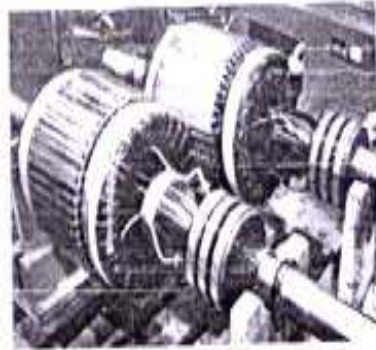
sangkar-tupai, atau secara singkat motor induksi rotor sangkar. Gambar 1.2a memperlihatkan rotor sangkar.

Rotor lilitan sesuai dengan namanya, rotor dililit dengan lilitan (kumparan) tiga fasa terisolasi serupa dengan lilitan stator. Satu ujung lilitan fasa rotor dihubungkan secara bintang (Y), sedangkan ujung-ujung yang lain terbuka dikeluarkan atau dihubungkan ke cincin-slip (slip rings) yang terpasang pada poros rotor. Gambar 1.2b memperlihatkan penampang rotor lilitan. Ketiga cincin-slip dan sikat-sikat dapat dilihat berada di sebelah kanan kumparan rotor. Dengan mempergunakan sikat-sikat yang lekatkan diam diatas pada permukaan cincin-slip, terminal kumparan rotor dapat dihubungkan ke rangkaian luar. Misalnya, dihubungkan dengan tahanan variabel luar untuk keperluan pengaturan kecepatan atau mengurangi arus *start*. Dengan demikian, motor induksi yang dibangun dengan rotor lilitan disebut motor induksi rotor lilitan atau motor induksi slip-ring.

Dari uraian di atas, jelaslah bahwa motor induksi rotor sangkar adalah sederhana, lebih kuat, dan lebih ekonomis dibandingkan dengan motor induksi rotor lilitan. Oleh karena itu, motor rotor lilitan kurang banyak digunakan dibandingkan dengan motor sangkar tupai karena harganya mahal dan biaya pemeliharaannya lebih besar.



(a)



(b)

Gambar 1.2 Rotor motor induksi a) Rotor sangkar b) Rotor lilitan (Sumber, Sen, 2007)

PERTANYAAN

1. Sebutkan dan jelaskan dua komponen utama struktur dasar motor induksi.
 2. Berdasarkan konstruksi rotornya sebutkan dua jenis motor induksi.
-
-

1.2 Medan Magnet Putar

Bekerjanya motor induksi bergantung pada medan magnet putar yang ditimbulkan dalam celah udara motor oleh arus

stator. Seperti dikemukakan di atas, kumparan stator diletakkan berjarak 120 derajat listrik satu sama lain.

Penempatan kumparan stator yang disederhanakan dari motor hubungan Y dua-kutub ditunjuk pada gambar 1.3a. Jika kumparan dihubungkan dengan sumber tiga fasa, maka arus fasa berubah dalam waktu fasanya seperti terlihat dalam gambar 1.3b, medan magnet yang berdenyut dibangun oleh masing-masing kumparannya. Tetapi karena adanya jarak dari setiap kumparan (lilitan) dan beda fasa dari arus dalam kumparan, maka medan magnet yang dihasilkan oleh setia fasa bergabung membentuk medan magnet yang bergerak mengelilingi (berputar) pada permukaan bagian dalam stator. Kecepatan gerakan medan ini konstan dan tergantung atas jumlah kutub stator dan frekuensi sumber daya.

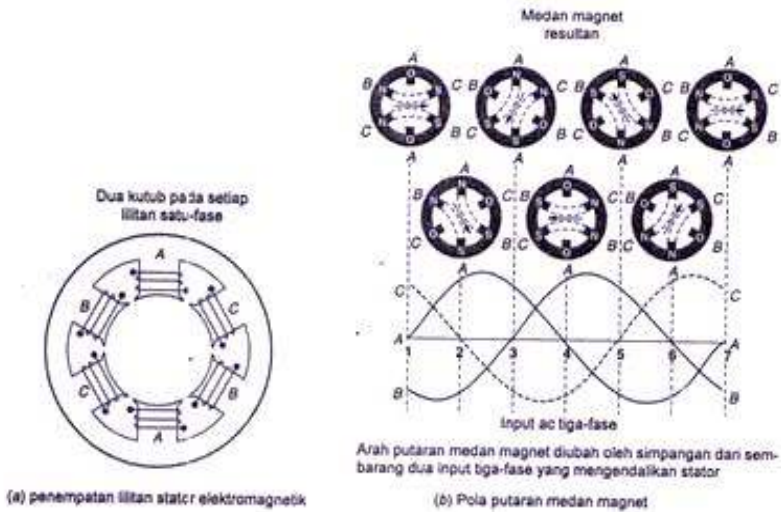
Kecepatan medan putar ini disebut *kecepatan sinkron*, yang dinyatakan dengan rumus:

$$n = \frac{120 f}{p} \quad (1.1)$$

dimana n = kecepatan sinkron (rpm)

f = frekuensi sumber daya (Hz)

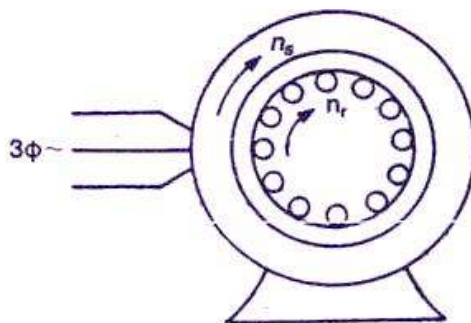
p = jumlah kutub



Gambar 1.3. Pembangkitan medan magnet putar.
(Sumber: Petruzella, 2001)

1.3 Prinsip Kerja

Prinsip kerja motor induksi dapat diringkas sebagai berikut (perhatikan juga gambar 1.4):



Gambar 1.4. Sebuah motor induksi dihubungkan ke sumber 3 Φ
(Sumber: Zuhail, 1992)

- 1) Apabila sumber tegangan tiga fasa dipasang pada kumparan stator akan timbul medan putar (gambar 1.4).
- 2) Medan putar stator tersebut akan memotong batang konduktor rotor, akibatnya pada kumparan rotor diinduksikan tegangan.
- 3) Karena rangkaian rotor merupakan rangkaian tertutup , maka tegangan induksi rotor menghasilkan arus (I).
- 4) Adanya arus (I) di dalam medan magnet menimbulkan gaya (F) pada rotor.
- 5) Bila torsi mula yang dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor cukup besar untuk menggerakkan beban, rotor akan berputar searah dengan putaran medan putar stator.
- 6) Dari uraian nomor 2), tegangan induksi timbul karena terpotongnya batang konduktor rotor oleh medan putar. Ini berarti agar tegangan terinduksi diperlukan adanya perbedaan relatif antara kecepatan medan putar dan kecepatan rotor.

1.4 Operasi Dalam Keadaan Diam

Sekarang marilah kita memperhatikan sebuah motor induksi rotor lilitan dengan rangkaian rotor dibiarkan terbuka. Jika kumparan tiga fasa stator dihubungkan ke sumber tiga fasa, medan magnet putar akan dihasilkan

dalam celah udara. Medan putar ini menginduksikan tegangan pada kumparan stator dan rotor pada frekuensi yang sama. Besar dari kedua tegangan ini adalah:

$$E_1 = 4,44 f_1 N_1 \Phi_p K_{w1} \quad (1.2)$$

$$E_2 = 4,44 f_1 N_2 \Phi_p K_{w2} \quad (1.3)$$

Sehingga,

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 K_{w1}}{N_2 K_{w2}} \quad (1.4)$$

Faktor lilitan K_{w1} dan K_{w2} untuk rotor dan stator biasanya sama. Maka,

$$\frac{E_1}{E_2} \approx \frac{N_1}{N_2} = \text{turn ratio} \quad (1.5)$$

1.5 Operasi Dalam Keadaan Berputar

Seperti telah dijelaskan, apabila sumber tegangan 3 fasa dikenakan ke stator, arus mengalir dalam kumparan stator. Arus ini akan menghasilkan medan putar yang menginduksikan tegangan dalam penghantar rotor. Tegangan induksi ini menyebabkan arus mengalir dalam rangkaian rotor. Arus ini menghasilkan medan magnet yang akan berinteraksi dengan medan putar stator, akibatnya rotor berputar.

Dalam motor induksi kecepatan putaran rotor n_r lebih kecil sedikit dari pada kecepatan sinkron n_s . Jika n_r sama dengan n_s tidak ada perubahan fluksi yang dilingkupi rotor, atau tidak ada pemotongan medan magnet oleh penghantar rotor; akibatnya tidak ada tegangan induksi di rotor dan torsi juga nol. Oleh karena itu, n_r harus lebih kecil dari n_s ; perbedaan antara kecepatan sinkron dan kecepatan rotor disebut *slip* yang dirumuskan sebagai

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (1.6)$$

dimana s = slip

n_r = kecepatan rotor (rpm)

n_s = kecepatan medan putar (kecepatan sinkron)
(rpm)

Dalam rangkaian rotor mengalir arus bolak balik dimana frekuensinya diberikan oleh

$$f_r = s f \quad (1.7)$$

dimana f_r = frekuensi arus rotor (Hz)

f = frekuensi tegangan stator (Hz)

s = slip

Untuk operasi normal, slip mempunyai nilai antara 1% sampai dengan 5%.

Tegangan yang diinduksikan dalam rangkaian rotor pada slip s adalah

$$E_{2s} = s E_2 \quad (1.8)$$

dimana E_2 adalah tegangan induksi di dalam rangkaian rotor pada keadaan diam, yaitu pada frekuensi stator f_1 .

Contoh 1.1

Motor induksi 3 fasa, 10 hp, 208 V, 60 Hz, empat kutub, hubungan bintang bekerja pada beban penuh dengan slip 5%. Tentukan

- a. Kecepatan sinkron
- b. Kecepatan rotor pada beban penuh
- c. Frekuensi arus rotor pada kondisi beban penuh.
- d. Kecepatan medan magnet putar stator.

Penyelesaian

- a. Kecepatan sinkron motor ini

$$n_s = \frac{120f}{p} = \frac{(120)(60)}{4} = 1800 \quad \text{revolutions/minute}$$

(rpm)

- b. Pada beban penuh, slip $s = 5\% = 0,05$ dari persamaan (1.6) kecepatan rotor adalah

$$n = (1 - s)n_s = (1 - 0,05) 1800 =$$

1710 rpm

- c. Frekuensi arus rotor

$$f_r = sf = 0,05 (60) = \mathbf{3 \text{ Hz}}$$

- d. kecepatan medan magnet putar stator sama dengan kecepatan sinkron $n_s = 1800$ rpm.

Contoh 1.2

Sebuah motor induksi 3-fasa, 460 V, 100 hp, 60 Hz, empat kutub, bekerja pada beban penuh dengan slip 0,05. Tentukan

- a) Kecepatan sinkron dan kecepatan motor.
- b) Kecepatan medan putar di celah udara.
- c) Frekuensi rangkaian rotor.
- d) Slip rpm.
- e) Kecepatan relatif medan terhadap
 - i. Struktur rotor
 - ii. Struktur stator
 - iii. Medan putar stator
- f) Tegangan induksi rotor pada kecepatan kerja, jika belitan stator – rotor rasio adalah 1:0,5.

Penyelesaian

- a) Kecepatan sinkron dan motor

$$n_s = \frac{120f}{p} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

$$n = (1 - s)n_s = (1 - 0.05)1800 = 1710 \text{ rpm}$$

- b) Kecepatan medan putar

1800 rpm (same as synchronous speed)

- c) Frekuensi rotor

$$f_2 = sf_1 = 0.05 \times 60 = 3 \text{ Hz}$$

d) Slip rpm

$$\text{slip rpm} = sn_s = 0.05 \times 1800 = 90 \text{ rpm}$$

e) Kecepatan relatif medan terhadap

(i) 90 rpm

(ii) 1800 rpm

(iii) 0 rpm

f) Tegangan induksi rotor

$$\begin{aligned} E_{2s} &= sE_2 \\ &= s \frac{N_2}{N_1} E_1 \\ &= 0.05 \times 0.5 \times \frac{460 \text{ V}}{\sqrt{3}} \\ &= 6.64 \text{ V/phase} \end{aligned}$$

PERTANYAAN-PERTANYAAN

1. Apa itu slip?
2. Berapakan nilai slip ketika motor diam dan berputar?
3. Mengapa tidak memungkinkan bagi kecepatan rotor untuk menyamai kecepatan medan putar? Jelaskan mengapa demikian.
4. Berapakah tegangan yang dibangkitkan rotor jika secara teori ia berputar pada kecepatan sinkron.

SOAL – SOAL

1. Sebuah motor induksi 6 kutub berjalan dengan kecepatan 1158 rpm ketika dihubungkan ke sumber listrik 60 Hz. Carilah kecepatan sinkron dan slip.

 2. Motor induksi 3 fasa, 60 Hz berputar pada 1192 rpm pada beban nol dan 1120 rpm pada beban penuh. Tentukan (a) jumlah kutub (b) slip beban penuh

 3. Motor induksi 3 fasa, 60 Hz, 12 kutub, hubungan bintang mempunyai slip beban penuh 5 %. Tentukanlah
 - (a) Kecepatan beban penuh
 - (b) Kecepatan sinkron
 - (c) Slip rpm
-
-

BAB 2

RANGKAIAN EKIVALEN DAN UNJUK KERJA MOTOR INDUKSI TIGA FASA

Tujuan

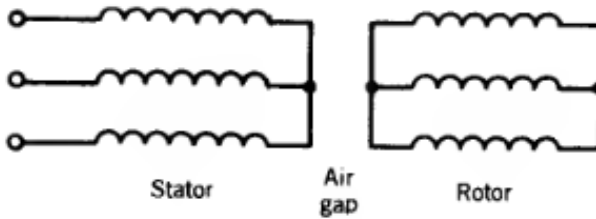
Setelah menyelesaikan bagian ini anda mampu:

1. Mengembangkan model rangkaian ekivalen motor induksi tiga-fasa.
 2. Mengembangkan persamaan-persamaan: arus, faktor daya, torsi, daya motor.
 3. Menghitung: arus, faktor daya, torsi pada start dan jalan.
 4. Menjelaskan rugi-rugi daya motor induksi.
 5. Menghitung efisiensi motor induksi tiga-fasa.
-

2.1 Model Rangkaian Ekivalen

Dalam uraian terdahulu kita telah mengenal bentuk fisik motor. Sekarang kita akan mengembangkan suatu model rangkaian ekivalen motor yang digunakan untuk meramalkan dan mempelajari unjuk kerja motor induksi.

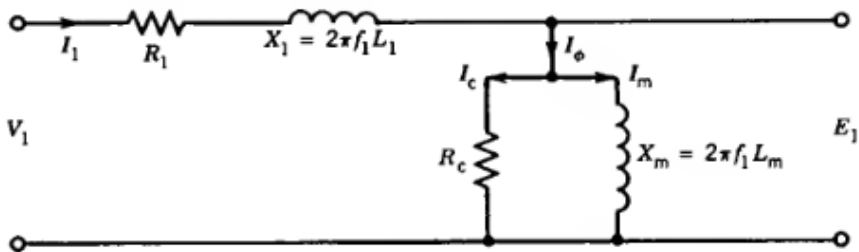
Untuk mudahnya, pandanglah mesin induksi tiga-fasa rotor lilitan berikut. Dalam hal motor rotor sangkar, rangkaian rotor dinyatakan oleh lilitan tiga fasa ekivalen, seperti ditunjukkan dalam gambar 2.1.



Gambar 2.1 Motor induksi 3 ϕ rotor lilitan
(Sumber: Sen, 1997)

2.2 Rangkaian Stator

Rangkaian lilitan stator per-fasa dapat dinyatakan seperti gambar 2.2 berikut,



Gambar 2.2 Rangkaian stator per-fasa
(Sumber: Sen, 1997)

Dimana: V_1 = tegangan stator per-fasa

R_1 = tahanan lilitan stator per-fasa

L_1 = induktansi bocor stator per-fasa

E_1 = tegangan induksi dalam lilitan stator per-fasa

L_m = induktansi magnetisasi stator per-fasa

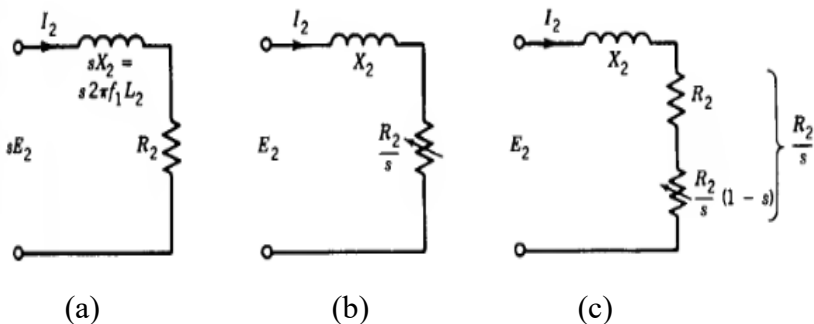
R_c = tahanan rugi stator per-fasa

I_o = arus penguatan (untuk menghasilkan medan magnet putar, besarnya 30 – 50 % dari arus nominal, tergantung besar motor). Dalam hal transformator 1–5 % arus nominal.

Dengan memperhatikan gambar 2.2, terlihat tidak ada perbedaan dalam bentuk antara rangkaian ekivalen ini dan rangkaian primer transformator. Perbedaannya hanya terletak pada besaran parameternya saja. Misalnya besar arus penguatan I_o .

2.3 Rangkaian Rotor

Rangkaian ekivalen rotor pada slip s diperlihatkan dalam gambar 2.3a berikut,



Gambar 2.3 Rangkaian ekivalen rotor

(Sumber: Sen, 1997)

dimana,

E_2 = tegangan induksi per fasa dalam rangkaian rotor dalam keadaan diam (yaitu pada frekuensi f_1)

R_2 = tahanan rangkaian rotor per fasa

L_2 = induktansi bocor rotor per fasa

Dalam rangkaian diatas pada frekuensi f_2 . Arus rotor I_2 adalah

$$I_2 = \frac{sE_2}{R_2 + jsX_2} \quad (2.1)$$

Dalam persamaan diatas nilai sX_2 berubah terhadap kecepatan sedangkan R_2 tetap.

Daya yang diliputi rangkaian rotor,

$$P_2 = I_2^2 R_2 \quad (2.2)$$

yang menyatakan rugi tembaga rotor per fasa.

Persamaan (2.1) dapat ditulis kembali sebagai,

$$I_2 = \frac{E_2}{(R_2/s) + jX_2} \quad (2.3)$$

dalam perasamaan ini R_2/s berubah terhadap kecepatan sedangkan X_2 tetap. Persamaan (2.3) menjadikan rangkaian ekivalen rotor menjadi seperti gambar

2.3b. Berdasarkan rangkaian ini daya per fasa rotor adalah,

$$P = I_2^2 R_2/s = P_2/s \quad (2.4)$$

Daya dalam persamaan (2.4) menyatakan daya yang melintasi celah udara (P_{ag}) dan karenanya termasuk rugi tembaga rotor serta daya mekanik yang dikembangkan dalam rotor. Persamaan (2.4) dapat ditulis kembali sebagai,

$$P = P_{ag} = I_2^2 \left\{ R_2 + \frac{R_2}{s} (1 - s) \right\} \quad (2.5)$$

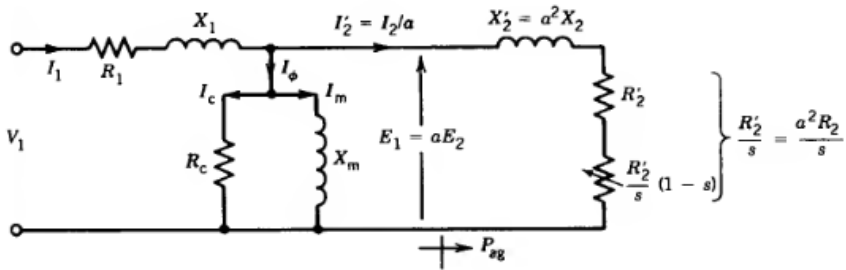
$$= I_2^2 R_2/s \quad (2.5a)$$

dimana $R_2/s = R_2 + \frac{R_2}{s} (1 - s)$ (2.6)

Komponen pertama dalam persamaan (2.6), mewakili rugi tembaga rotor dan komponen kedua mewakili daya yang dikembangkan motor. Rangkaian yang sesuai dengan persamaan (2.6) diperlihatkan dalam gambar 2.3c.

2.4 Rangkaian Ekuivalen Lengkap

Rangkain ekuivalen stator, gambar 2.2, dan rangkain rotor ekuivalen dalam gambar 2.3b atau 2.3c adalah sama-sama pada frekuensi sumber f_1 dan karenanya dapat dihubungkan bersama-sama. Tetapi, E_1 dan E_2 dapat berbeda jika jumlah lilitan stator dan rotor tidak sama. Jika Rasio lilitan ($a = N_1/N_2$) diperhitungkan, maka rangkaian ekuivalen lengkap motor induksi ditunjukkan dalam gambar 1.8.



Gambar 2.4. Rangkaian ekivalen lengkap

(Sumber: Sen, 1997)

Dimana R_2' = tahanan penghantar rotor per-fasa yang direferensikan ke stator (ohm)

X_2' = reaktansi rotor per-fasa yang direferensikan ke stator (ohm)

I_2' = arus rotor yang direferensikan ke stator (ohm)

I_1 = arus stator (A)

R_1 = tahanan lilitan stator

X_1 = reaktansi bocor stator

R_2 = tahanan penghantar rotor

X_2 = reaktansi bocor rotor

Contoh 2.1

Sebuah motor induksi 3-fasa, 15 hp, 460 V, empat-kutub, 60 Hz, 1728 rpm bekerja pada beban penuh. Rugi angin dan gesekan 750 W. Tentukan

- a) Daya mekanik yang dikembangkan.
- b) Daya celah udara
- c) Rugi tembaga rotor

Penyelesaian

a) Daya mekanik poros = $15 \times 746 = 11,190 \text{ W}$

Daya mekanik yang dikembangkan

$$= \text{daya poros} + \text{rugi angin dan gesekan}$$

$$= 11,190 + 750$$

$$= 11,940 \text{ W}$$

- b) Kecepatan sinkron, slip dan daya celah udara

$$n_s = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

$$s = \frac{1800 - 1728}{1800} = 0.04$$

$$P_{ag} = \frac{11,940}{1 - 0.04} = 12,437.5 \text{ W}$$

- c) Rugi tembaga

$$P_2 = 0.04 \times 12,437.5$$

$$= 497.5 \text{ W}$$

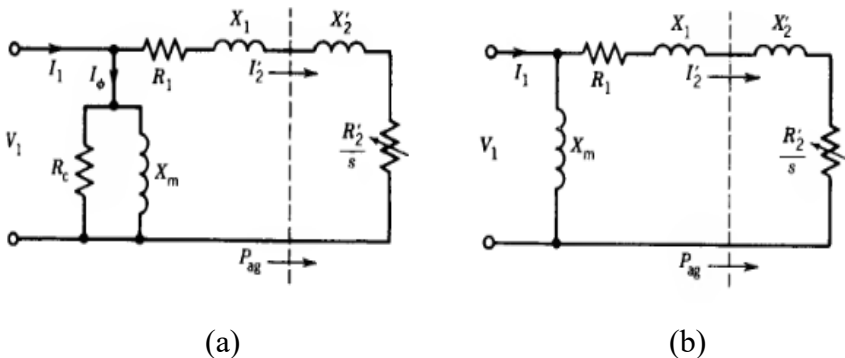
2.5 Macam-macam Konfigurasi Rangkaian Ekuivalen

Rangkaian ekuivalen yang ditunjukkan pada gambar 1.8 tidak menyenangkan untuk digunakan meramalkan unjuk kerja motor induksi, karena kesulitan untuk memperlakukan cabang paralel R_c dan X_m . Untuk

memudahkan analisis dalam meramalkan unjuk kerja motor, dilakukan suatu pendekatan terhadap rangkaian ekivalen tersebut.

a. Rangkaian Ekivalen Pendekatan

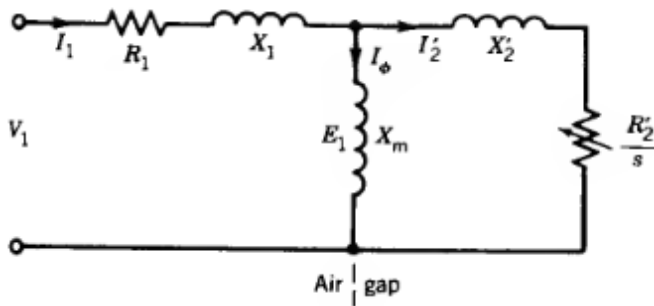
Jika tegangan jatuh pada R_1 dan X_1 kecil dan tegangan terminal V_1 tidak begitu jauh berbeda dari tegangan induksi E_1 , maka cabang magnetisasi (yaitu, R_c dan X_m) dapat dipindahkan ke terminal mesin, seperti diperlihatkan dalam gambar 1.9a. Pendekatan dari rangkaian ekivalen ini akan menyederhanakan perhitungan, sebab arus penguatan I_o dan komponen beban (I_2') dapat langsung dihitung dari tegangan terminal V_1 dibagi dengan impedansi yang bersesuaian. Jika rugi inti dikumpulkan dengan rugi angin dan gesekan, maka R_c dapat dihilangkan dari rangkaian ekivalen, sebagaimana ditunjukkan dalam gambar 1.9b.



(a) (b)
Gambar 2.5 Rangkaian ekivalen pendekatan
(Sumber: Sen, 1997)

b. Rangkaian Ekivalen yang Direkomendasikan IEEE

Dalam mesin induksi, oleh karena celah udara mesin, arus penguatan I_0 adalah tinggi, 30 sampai 50 % dari arus beban penuh. Reaktansi bocor X_1 juga tinggi. Sehingga disarankan reaktansi pemagnetan X_m tidak dipindahkan ke terminal mesin (seperti ditunjukkan dalam gambar 1.9b), tetapi dibiarkan tetap di tempat semula. Tahanan R_c dapat diabaikan, dan rugi inti besi dikumpulkan dengan rugi gesekan dan rugi angin. Sehingga rangkaian yang direkomendasikan IEEE adalah seperti gambar 1.10 berikut.



Gambar 2.6 Rangkaian ekivalen versi IEEE
(Sumber: Sen, 1997)

2.6 Analisa Unjuk Kerja Motor Induksi

Rangkaian ekivalen yang telah diperoleh pada pembahasan terdahulu dapat digunakan untuk meramalkan karakteristik unjuk kerja motor induksi. Karakteristik

penting dalam keadaan mantap diantaranya adalah : efisiensi, faktor daya, arus, torsi start (starting torque), torsi maksimum.

Ketika motor induksi berjalan kondisi tanpa beban, slip mendekati nol. Akibatnya, tahanan ekivalen rotor R_2'/s adalah sangat besar. Nilai tahanan yang besar ini menyebabkan arus rotor I_2' sangat kecil (gambar 2.5 dan 2.6). Maka torsi elektromagnetik motor juga cukup kecil, sekedar untuk mengatasi rugi-rugi: gesekan, angin, dan inti.

Tetapi, ketika beban mekanis dihubungkan ke poros motor, reaksi awal dari motor adalah penurunan kecepatannya. Ini, menambah nilai slip s , sehingga tahanan ekivalen rotor R_2'/s adalah berkurang, dan ini menyebabkan arus rotor I_2' bertambah besar. Oleh karena itu, torsi elektromagnetik yang dikembangkan motor juga bertambah besar dan, ketika torsi ini menjadi sama dengan jumlah dari: torsi beban dan rugi-rugi putaran, motor terus mengalami percepatan sampai mencapai kecepatan mantap, yaitu sedikit lebih kecil dari kecepatan tanpa beban.

2.6.1 Arus Stator

Arus stator yaitu arus yang ditarik motor dari sumber daya listrik, dapat diturunkan dari rangkaian ekivalen yang digunakan, yaitu:

- **Rangkaian ekivalen versi IEEE**

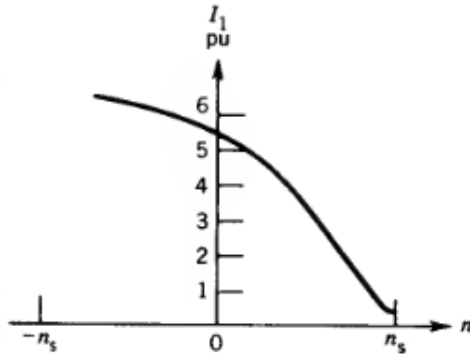
Dari gambar 1.10, impedansi masukan adalah

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= R_1 + jX_1 + X_m // (R_2'/s + jX_2') \\
 &= R_1 + jX_1 + X_m // Z_2' \\
 &= R_1 + jX_1 + \frac{jX_m(R_2'/s + jX_2')}{R_2'/s + j(X_m + X_2')} \quad (2.7) \\
 &= |Z_1| \angle \theta_1
 \end{aligned}$$

Arus yang mengalir ke dalam kumparan stator adalah

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1} = I_o + I_2' \quad (2.8)$$

Pada kecepatan sinkron (yaitu $s = 0$), nilai R_2'/s adalah tak terhingga, dengan demikian $I_2' \approx 0$. Arus stator I_1 hanya arus penguatan I_o . Tetapi sebaliknya, pada nilai slip yang besar (yaitu, pada saat start $s = 1$) nilai Z_2' ($= R_2'/s + jX_2'$) adalah rendah akibatnya arus I_2' (juga I_1) menjadi tinggi dibandingkan dengan arus beban penuh. Dalam praktek, arus starting motor induksi 5 - 8 kali arus nominal. Perubahan khas arus stator terhadap kecepatan diperlihatkan dalam gambar 2.7 berikut.



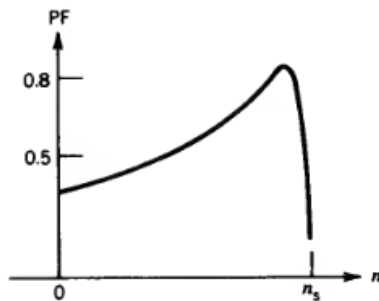
Gambar 2.7 Arus stator sebagai fungsi kecepatan
(Sumber: Sen, 1997)

- **Faktor daya masukan**

Faktor daya masukan diberikan oleh

$$PF = \cos \theta_1 \tag{2.9}$$

dimana θ_1 adalah sudut fasa dari arus stator I_1 . Sudut fasa ini sama dengan sudut impedansi dari rangkaian pada gambar 2.6. Perubahan khas faktor daya terhadap kecepatan diperlihatkan dalam gambar 2.8 berikut.



Gambar2.8 Faktor daya sebagai fungsi kecepatan
(Sumber: Sen, 1997)

- **Rangkaian ekivalen pendekatan**

Dari gambar 1.10b, arus rotor I_2' dapat dihitung dari,

$$I_2' = V_1 / [R_1 + (R_2'/s) + j (X_1 + X_2')] \quad (2.10)$$

Maka, arus stator

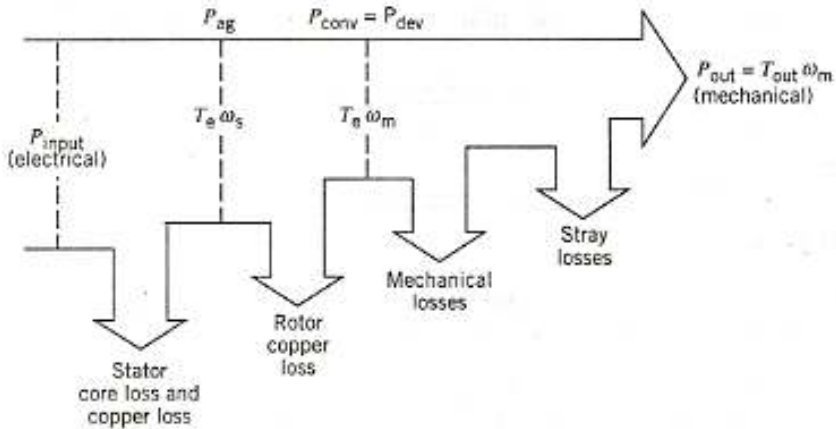
$$I_1 = I_o + I_2' \quad (2.11)$$

2.6.2 Efisiensi

Ketika sebuah motor induksi berputar dalam keadaan tanpa beban, slip hampir nol. Akibatnya, tahanan rotor ekivalen R_2/s menjadi besar tak-terhingga. Tahanan rotor yang besar ini berakibat arus rotor I_2 mengalir sangat kecil. Maka torsi elektromagnetik yang dihasilkan juga kecil, hanya untuk mengatasi kombinasi rugi putaran (gesekan dan angin) dan rugi-rugi inti.

Ketika beban mekanis dihubungkan di poros motor, reaksi pertama motor adalah menurunnya kecepatan. Akibatnya slip s bertambah, tahanan rotor ekivalen berkurang, dan arus rotor I_2 bertambah. Oleh karenanya, torsi elektromagnetik bertambah, ketika ia menjadi sama dengan jumlah: torsi beban dan rugi-rugi putaran, motor akan terus berputar pada suatu kecepatan-mantap (steady-state) yang nilainya sedikit lebih kecil dari kecepatan tanpa beban.

Rangkaian ekivalen dalam gambar 2.8 dan diagram aliran daya gambar 2.9 dapat digunakan untuk menganalisis unjuk kerja keadaan mantap dari motor induksi. Dalam gambar 2.13, $\omega_s = (2/p)\omega$, dimana $\omega = 2\pi f = 120\pi$ rad/s.



Gambar 2.9 Aliran daya dalam motor induksi
(Sumber: Yamayee, 1994)

Daya masukan ke motor induksi dinyatakan oleh persamaan

$$P_{in} = 3V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (2.12)$$

Rugi tembaga stator (SCL) diberikan oleh

$$SCL = P_{cul} = 3 I_1^2 R_1 \quad (2.13)$$

Tahanan ekivalen rotor R_2' /s daya yang ditransfer melewati celah udara dari stator ke rotor. Pernyataan untuk daya celah udara diberikan oleh

$$\begin{aligned}
 P_{ag} &= P_{input} - SCL - P_{core} \\
 &= 3(I_2')^2(R_2/s) \quad (2.14)
 \end{aligned}$$

Daya celah udara ini dapat dipisahkan menjadi dua komponen. Pertama adalah rugi tembaga rotor (RCL), yang dinyatakan oleh

$$RCL = P_{cu2} = 3(I_2')^2(R_2') \quad (2.15)$$

Komponen lain adalah dari daya celah-udara adalah daya yang diubah dari listrik ke mekanik (P_{conv}), disebut juga daya yang dikembangkan motor, dan diberikan oleh persamaan.

$$P_{conv} = P_{dev} = P_{ag} - RCL \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned}
 &= 3(I_2')^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \\
 &= P_{ag} (1-s) \quad (2.17)
 \end{aligned}$$

Daya keluaran yang tersedia pada poros motor diperoleh dengan mengurangi kerugian mekanis dari daya yang dikembangkan motor, yaitu:

$$P_{out} = P_{dev} - P_{mech.} \quad (2.18)$$

Dari beberapa persamaan diatas dapat ditulis hubungan,

$$P_{ag} : RCL : P_{dev} = 1 : s : 1 - s \quad (2.19)$$

Persamaan 2.19 merupakan cara menghitung yang lebih cepat.

Akhirnya efisiensi motor induksi dapat dihitung sebagai

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} 100 \% \quad (2.20)$$

CONTOH 2.2

Sebuah motor induksi 3-fasa, 25 hp, 440 V, 60 Hz, empat-kutub mempunyai impedansi per-fasa yang direferensikan ke stator sebagai berikut.

$$\begin{aligned} R_1 &= 0,5 \text{ ohms} & R_2' &= 0,35 \text{ ohms} \\ X_1 &= X_2' = 1,20 \text{ ohms} & X_m &= 25 \text{ ohms} \end{aligned}$$

Gabungan rugi putaran (rugi mekanis dan rugi inti) berjumlah 1250 W, dan mereka dianggap konstan. Untuk slip rotor 2,5 % pada tegangan nominal dan frekuensi nominal, carilah

- a. Kecepatan motor
- b. Arus stator
- c. Faktor daya
- d. Efisiensi motor

Penyelesaian

Karena rugi inti digabungkan dengan rugi putaran, maka tahanan R_c diabaikan. Maka rangkaian ekivalen motor seperti ditunjukkan dalam gambar 2.10.

a. Kecepatan sinkron adalah

$$n_s = 120 f / P = (120) 60 / 4 = 1800 \text{ rpm}$$

$$\omega_s = 2 \pi n_s / 60 = 2 \pi (1800) / 60 = 188,5 \text{ rad/s}$$

Kecepatan motor untuk slip yang diberikan

$$n = (1 - s)n_s = (1 - 0,025)1800 = \mathbf{1755 \text{ rpm}}$$

atau

$$\omega = 2 \pi n / 60 = 2 \pi (1755) / 60 = \mathbf{183,8 \text{ rad/s}}$$

b. Impedansi rotor yang direferensikan ke stator pada

$$s = 2,5 \%$$

$$Z_2' = R_2/s + j X_2 = 0,35/0,025 + j 1,20$$

$$= 14,0 + j 1,20 \ \Omega$$

Impedansi masukan,

$$Z_{in} = R_1 + jX_1 + X_m // Z_2'$$

$$\begin{aligned}
&= R_1 + jX_1 + \frac{(Z_2)(jX_m)}{Z_2 + jX_m} \\
&= 0,50 + j 1,20 + (14,0 + j 1,20)(j 25) / [14,0 + j (1,20 + 25)] \\
&= 10,42 + j 7,64 = 12,92 \angle 36,3^\circ \Omega
\end{aligned}$$

Tegangan terminal per-fasa ditetapkan sebagai referensi, maka (anggap kumparan stator hubung bintang),

$$\begin{aligned}
V_1 &= (440 / \sqrt{3}) \angle 0^\circ = 254,0 \angle 0^\circ \text{ V} \\
&\text{(line-to-neutral)}
\end{aligned}$$

Arus stator didapat sebagai

$$\begin{aligned}
I_1 &= V_1 / Z_{in} = (254,0 \angle 0^\circ \text{ V}) / (12,92 \angle 36,3^\circ) \\
&= \mathbf{19,66} \angle -36,3^\circ \text{ A}
\end{aligned}$$

- c. Faktor daya, $PF = \cos \theta_1 = \cos 36,3^\circ = \mathbf{0,806}$ lagging
- d. Daya masukan motor diberikan

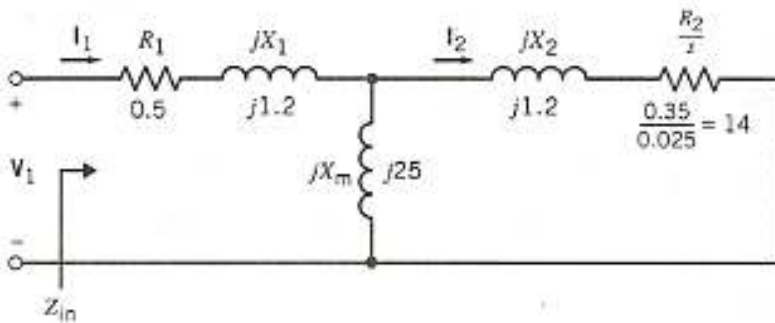
$$\begin{aligned}
P_{in} &= 3V_1I_1 \cos \theta_1 = 3(254,0)(19,66)(0,806) \\
&= 12,075 \text{ W}
\end{aligned}$$

Rugi tembaga stator (SCL) diberikan,

$$SCL = 3 I_1^2 R_1 = 3(19,66)^2(0,50) = 580 \text{ W}$$

Arus rotor dihitung dengan menggunakan konsep pembangian arus dari cabang X_m dan impedansi rotor, sehingga arus rotor

$$\begin{aligned} I_2' &= \{ j 25 / [14,0 + j (25 + 1,2)] \} I_1 \\ &= \{ j 25 / [14,0 + j (25 + 1,2)] \} [19,66 \angle -36,3^0] \\ &= 16,54 \angle -8,2^0 \text{ A} \end{aligned}$$



Gambar 2.10 Rangkaian ekivalen motor untuk contoh 2.2
(Sumber: Yamayee, 1994)

Rugi tembaga rotor,

$$RCL = 3(I_2')^2(R_2') = 3(16,54)^2(0,35) = 287 \text{ W}$$

Daya keluaran diperoleh sebagai,

$$\begin{aligned} P_{out} &= P_{int} - SCL - RCL - \text{rugi putaran} \\ &= 12.075 - 580 - 287 - 1250 = 9958 \text{ W} \end{aligned}$$

Oleh karena itu, efisiensi adalah

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} 100 \% = \frac{9958}{12.075} 100 \% = \mathbf{82,5 \%}$$

PERTANYAAN

1. Gambarkan rangkaian ekeivalen motor induksi berdasarkan (a) Pendekatan, dan (b) Rekomendasi IEEE.
2. Dengan menggambarkan aliran dayanya, jelaskan rugi-rugi daya dalam motor induksi.

SOAL-SOAL

1. Sebuah motor induksi 3-fasa, 440 V, 60 Hz, empat-kutub, hubungan bintang mempunyai impedansi per-fasa yang direferensikan ke stator sebagai berikut:

$$R_1 = 0,10 \text{ ohms}$$

$$R_2' = 0,15 \text{ ohms}$$

$$X_1 = 0,4 \text{ ohm}$$

$$X_2' = 0,4 \text{ ohms}$$

$$X_m = 12 \text{ ohms}$$

Rugi inti motor 2000 W, rugi gesekan dan angin 1500 W.

Untuk slip 2,5 %, carilah

- a. Arus masukan dan faktor daya
- b. Daya masukan
- c. Daya keluaran
- d. Efisiensi motor

CONTOH 2.3

Sebuah motor induksi 3 \emptyset , 15 HP, 460 V, empat kutub, 60 Hz, 1728 rpm mengirim daya keluaran penuh ke sebuah beban yang terhubung dengan poros motor tersebut. Rugi

angin dan gesekan (rugi putaran) motor adalah 750 W.

Tentukan

- Daya mekanik yang dikembangkan
- Daya pada celah udara
- Rugi tembaga rotor

Penyelesaian

- Daya beban penuh pada poros = $15 \times 746 = 11,190 \text{ W}$

Daya mekanik yang dikembangkan = daya poros + rugi angin dan gesekan

$$= 11.190 + 750 = \mathbf{11.940 \text{ W}}$$

- Kecepatan sinkron

$$n_s = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

Slip

$$s = \frac{1800 - 1728}{1800} = 0,04$$

Daya pada celah udara

$$P_{ag} = \frac{P_{dev}}{1 - s} = \frac{11.940}{1 - 0,04} = \mathbf{12.437,5 \text{ W}}$$

- Rugi tembaga rotor

$$RCL = s P_{ag} = 0,04 \times 12.437,5 = \mathbf{497,5 \text{ W}}$$

CONTOH 2.4

Sebuah motor induksi tiga-fasa, 25 hp, 230 V, 60 Hz menarik arus 60 A dari sumber pada faktor daya 0,866 arus tertinggal (lagging). Rugi-rugi motor sebagai berikut:

$$\text{Rugi tembaga stator } SCL = 850 \text{ W}$$

$$\text{Rugi inti magnetik } P_{\text{core}} = 450 \text{ W}$$

$$\text{Rugi tembaga rotor } RCL = 1050 \text{ W}$$

$$\text{Rugi putaran/mekanis } P_m = 500 \text{ W}$$

Carilah yang berikut:

- a. Daya-celah udara P_{ag}
- b. Slip s
- c. Daya mekanik yang dikembangkan motor P_{dev}
- d. Daya keluaran pada poros
- e. Efisiensi motor

Penyelesaian

- a. Anggap motor dihubung Y, tetapkan tegangan terminal per-fasa sebagai referensi, maka,

$$V_1 = 230 / \sqrt{3} \angle 0^\circ = 132,8 \angle 0^\circ \text{ V (line-to-neutral)}$$

Daya masukan motor

$$P_{\text{in}} = 3V_1 I_1 \cos \theta = 3(132,8)(60)(0,866) = 20.700 \text{ W}$$

Sehingga, daya yang ditransfer lewat celah udara dari stator ke rotor,

$$\begin{aligned} P_{\text{ag}} &= P_{\text{in}} - P_{\text{core}} - SCL = 20.700 - 450 - 850 \\ &= \mathbf{19.400 \text{ W}} \end{aligned}$$

- b. P_{ag} dapat juga dinyatakan dalam pernyataan yang mengandung RCL, (persamaan 1.22),

$$P_{ag} = RCL / s$$

Maka slip,

$$s = RCL / P_{ag} = 1050 / 19.400 = \mathbf{0,054 (5,4 \%)}$$

- c. Daya yang dikembangkan motor adalah,

$$P_{dev} = P_{ag} - RCL = 19.400 - 1050 = \mathbf{18.350 W}$$

- d. Daya keluaran motor,

$$P_{out} = P_{dev} - P_m = 18.350 - 500 = \mathbf{17.850 W}$$

- e. Akhirnya, efisiensi motor dapat dihitung sebagai,

$$\begin{aligned} \eta &= (P_{out} / P_{in}) 100\% = (17.850 / 20.700) 100 \% \\ &= \mathbf{86,2 \%} \end{aligned}$$

CONTOH 2.5

Sebuah motor induksi 3-fasa, 50 hp, 480 V, 60 Hz, empat-kutub mempunyai impedansi per-fasa yang direferensikan ke stator sebagai berikut.

$$R_1 = 0,100 \text{ ohms}$$

$$R_2' = 0,125 \text{ ohms}$$

$$X_1 = 0,35 \text{ ohm}$$

$$X_2' = 0,40 \text{ ohms}$$

Rugi inti (P_{core}) dan rugi mekanis (gesekan dan angin) masing-masing 1200 W dan 900 W. Pada operasi tanpa beban, motor menarik arus 21 A pada faktor daya 0,0. Ketika motor beroperasi pada slip 2,5 %, carilah yang berikut:

- a. Arus stator (arus *line*)
- b. Torsi elektromagnetik
- c. Daya keluaran (P_{out})
- d. Efisiensi motor

Penyelesaian

Rangkaian ekivalen pendekatan per-fasa ditunjukkan dalam gambar 2.5b Tegangan terminal per-fasa ditetapkan sebagai referensi, maka

$$V_1 = 480 / \sqrt{3} \angle 0^\circ = 277,1 \angle 0^\circ \text{ V (line-to-neutral)}$$

Dalam operasi tanpa beban, arus rotor mendekati nol; $I_2' \approx 0$, Oleh karena itu, arus magnetisasi I_o sama dengan arus stator tanpa beban $I_{1,\text{nl}}$, sehingga

$$I_o = I_{1,\text{nl}} = 21 \angle -\cos^{-1} 0,0 = 21 \angle -90^\circ \text{ A}$$

Pada slip $s = 0,025$, arus rotor dapat dihitung sebagai

$$\begin{aligned}
I_2' &= V_1 / Z_2' \\
&= V_1 / [(R_1 + (R_2/s) + j(X_1 + X_2)] \\
&= (277,1 \angle 0^0) / [(0,100 + (0,125/0,025) + j(0,35 + 0,40)] \\
&= 53,8 \angle -8,4^0 \text{ A}
\end{aligned}$$

Dari rangkaian ekivalen gambar 1.15, arus stator dapat dihitung,

$$\begin{aligned}
I_1 &= I_2' + I_o = 53,8 \angle -8,4^0 + 21 \angle -90^0 \\
&= 60,5 \angle -28,5^0 \text{ A}
\end{aligned}$$

Maka, faktor daya,

$$PF = \cos 28,5^0 = \mathbf{0,88 \text{ lagging}}$$

a. Kecepatan sinkron

$$n_s = 120 f / p = 120(60) / 4 = 1800 \text{ rpm}$$

$$\text{atau } \omega_s = 2 \pi n_s / 60 = 188,5 \text{ rad / s}$$

Daya yang lewat celah udara,

$$\begin{aligned}
P_{ag} &= 3(I_2')^2 R_2/s = 3(53,8)^2(0,125)/0,025 \\
&= 43.417 \text{ W}
\end{aligned}$$

Torsi elektromagnetik yang dikembangkan motor, dapat dicari melalui daya celah udara; yaitu:

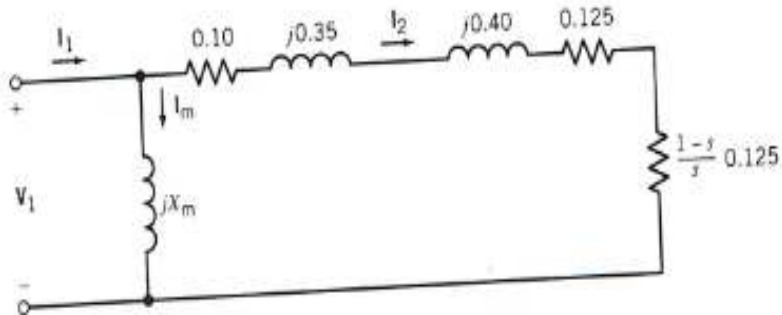
$$T_e = P_{ag} / \omega_s = 43,417 / 188,5 = \mathbf{230 \text{ N}\cdot\text{m}}$$

b. Daya yang dikembangkan motor diberikan (persamaan 2.29) oleh,

$$P_{dev} = (1 - s) P_{ag} = (1 - 0,025) 43.417 = 42.332 \text{ W}$$

Daya keluaran,

$$P_{out} = P_{dev} - P_{mech} = 42.332 - 900 = \mathbf{41.432 \text{ W}}$$



Gambar 2.11 Rangkaian ekivalen motor untuk contoh 2.5
(Sumber: Yamayee, 1994)

Daya masukan motor dihitung sebagai, (perhatikan aliran daya motor):

$$\begin{aligned} P_{in} &= P_{ag} + SCL + P_{core} = P_{ag} + 3(I_1)^2 R_1 + P_{core} \\ &= 43.417 + 3(60,5)^2 (0,10) + 1200 \\ &= \mathbf{45.715 \text{ W}} \end{aligned}$$

Akhirnya, efisiensi motor dapat dihitung,

$$\eta = P_{out} / P_{in} = (41.432 / 45.715) 100 \% = \mathbf{90,6 \%}$$

SOAL-SOAL

1. Sebuah motor induksi tiga-fasa, enam-kutub, 60 Hz beroperasi pada kecepatan 1152 rpm. Daya masuk ke motor adalah 44 kW, rugi-rugi putaran 500 W, dan rugi tembaga stator 1600 W. Carilah yang berikut:
 - a. Slip
 - b. Daya-celah udara
 - c. Rugi tembaga rotor
 - d. Torsi yang dikembangkan
 - e. Torsi keluaran dan daya keluaran (dalam hp).

2. Sebuah motor induksi rotor lilitan 3-fasa, 60 Hz, empat-kutub, hubungan bintang, daya nominal 15 hp pada tegangan 208 V. Parameter rangkaian ekuivalen motor adalah

$$R_1 = 0,25 \text{ ohms} \qquad R_2' = 0,15 \text{ ohms}$$

$$X_1 = 0,50 \text{ ohm} \quad X_2' = 0,50 \text{ ohms} \quad X_m = 18 \text{ ohm}$$

Gabungan rugi-rugi putaran yang terdiri dari rugi gesekan dan rugi angin ditambah rugi inti (P_{core}) berjumlah 300 W. Ketika motor beroperasi pada slip 4 %, carilah yang berikut:

- a. Arus *line*
- b. Daya celah-udara
- c. Daya yang diubah dari bentuk listrik ke bentuk mekanik
- d. Efisiensi motor

CONTOH 2.6

Sebuah motor induksi tiga fasa rotor lilitan, 460 V, 1740 rpm, 60 Hz, empat kutub mempunyai parameter rangkaian per fasa sebagai berikut:

$$R_1 = 0,25 \text{ ohms} \quad R_2' = 0,2 \text{ ohms}$$

$$X_1 = X_2' = 0,5 \text{ ohms} \quad X_m = 30 \text{ ohms}$$

Rugi rugi putaran adalah 1700 W. Apabila terminal rangkaian rotor dihubung singkat, carilah

- a. Arus *start* (*starting current*) dan faktor daya ketika motor di-*start* langsung ke jala jala secara penuh.
- b. (i) Slip beban penuh
(ii) Arus stator pada beban penuh
(iv) Perbandingan arus asut dan arus beban penuh
(v) Faktor daya beban penuh

Penyelesaian

- a) Rangkaian ekivalen per-fasa motor ini ditunjukkan dalam gambar 2.12.

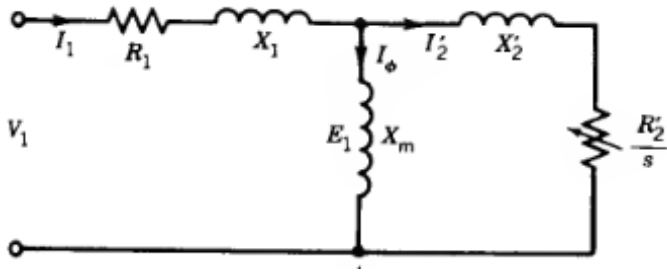
Tegangan masukan ke stator per-fasa ditetapkan sebagai referensi, maka

$$V_1 = 460/\sqrt{3} = 265,6 \angle 0^\circ \text{ V}$$

Saat start $s = 1$. Maka impedansi masukan

$$Z_{in} = 0,25 + j0,5 + \frac{j30(0,2 + j0,5)}{0,2 + j0,5 + j30}$$

$$= 1,08 \angle 66^0 \Omega$$



Gambar 2.12 Rangkaian ekivalen motor untuk contoh 2.6
(Sumber: Yamayee, 1994)

Arus stator saat start (mula jalan)

$$I_{1st} = \frac{V_1}{Z_1} = \frac{265,6}{1,08 \angle 66^0} = 245,9 \angle -66^0 \text{ Amp.}$$

b) (i) Kecepatan sinkron

$$n_s = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

Slip beban penuh

$$s = \frac{1800 - 1740}{1800} = 0,0333 \text{ (3,3 \%)}$$

(ii) Impedansi masukan (pada slip beban penuh),

$$Z_{in} = R_1 + jX_1 + \frac{jX_m(R_2'/s + jX_2')}{R_2'/s + j(X_m + X_2')}$$

$$R_2'/s = 0,2 / 0,0333 = 6,01 \Omega$$

$$\begin{aligned} Z_{in} &= 0,25 + j0,5 + \frac{(j30)(6,01 + j0,5)}{6,01 + j(30 + 0,5)} \\ &= 0,25 + j0,5 + 5,598 + j1,596 \\ &= 6,2123 \angle 19,7^0 \Omega \end{aligned}$$

Arus beban penuh (arus yang ditarik motor dari jala-jala listrik)

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1} = \frac{265,6 \angle 0^0}{6,2123 \angle 19,7^0} = 42,754 \angle -19,7^0 \text{ Amp.}$$

(iii) Perbandingan arus start dan beban penuh,

$$\frac{I_{st}}{I_{FL}} = \frac{245,9}{42,754} = 5,75 \text{ atau } 575\% \rightarrow I_{st} = 5,75 \times I_{FL}$$

(Ini artinya bahwa, arus start besarnya adalah 5,75 kali arus beban penuh, yaitu arus saat motor berjalan normal memikul beban penuh). Oleh karena itu dalam prakteknya untuk menghindari (atau mengurangi) arus yang berlebihan selama periode *start*, diperlukan peralatan *starting*, misalnya saklar Y- Δ . Sebab arus *start* yang terlalu besar dapat merusak motor atau

mengganggu beban lain yang juga terhubung ke jaringan dimana motor tersebut dihubungkan.

(iv) Faktor daya beban penuh

$$PF = \cos (19,7^0) = \mathbf{0,94 \text{ (lagging)}}$$

SOAL-SOAL

1. Sebuah motor induksi tiga fasa, 280 V, 60 Hz, 20 hP, empat kutub, mempunyai nilai parameter rangkaian ekivalen sebagai berikut:

$$R_1 = 0,12 \text{ ohms} \qquad R_2' = 0,1 \text{ ohms}$$

$$X_1 = X_2' = 0,25 \text{ ohms} \qquad X_m = 10,0 \text{ ohms}$$

Rugi rugi gesekan dan angin adalah 400 W. Untuk slip 5 % tentukanlah:

- Kecepatan motor dalam rpm
- Arus start
- Arus beban penuh
- Perbandingan antara arus start dan arus beban penuh
- Daya yang dipindahkan pada celah udara
- Faktor daya (untuk kondisi b dan c).

Anggap kumparan stator motor dihubungkan bintang dan diberi tegangan dari sumber tiga fasa 280 V, 60 Hz.

(Gunakan rangkaian ekivalen yang disarankan IEEE)

BAB 3

KARAKTERISTIK TORSI - KECEPATAN

Tujuan

Setelah menyelesaikan bagian ini anda mampu:

1. Menganalisis karakteristik motor induksi dalam kondisi start dan jalan.
2. Menghitung torsi start motor.
3. Menjelaskan arti dari karakteristik torsi-kecepatan.
4. Menghitung torsi maksimum motor.
5. Menjelaskan pengaruh tahanan rotor terhadap torsi start motor.
6. Menjelaskan pengaruh tahanan rotor terhadap arus start motor.
7. Menjelaskan pengaruh tahanan rotor terhadap kecepatan motor.

Torsi atau *kopel* (torque) didefinisikan sebagai aksi suatu gaya pada benda yang cenderung menyebabkan benda itu berputar. Jadi ukuran kecenderungan dari rotor motor untuk berputar disebut torsi dari motor. Karakteristik torsi-kecepatan dari motor induksi tiga-fasa dapat dianalisis melalui rangkaian ekuivalen pendekatan gambar 2.8 dan diagram aliran daya dalam gambar 2.9.

3.1 Torsi asut atau start (*starting torque*)

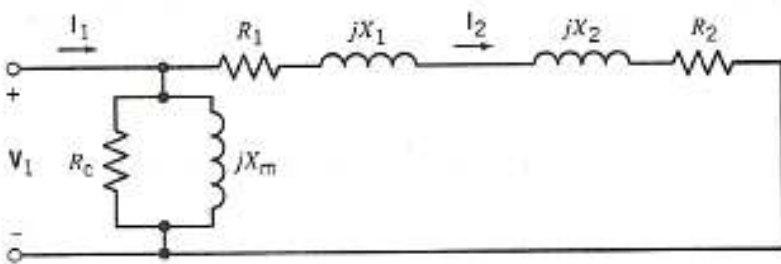
Torsi start adalah torsi yang dikembangkan motor pada kondisi start (mula jalan). Pada saat start ($n_r = 0$), slip adalah satu [$s = (n_s - n_r) / n_s = n_s / n_r = 1$]. Rangkaian ekivalen dari gambar 2.10a dalam kondisi start ditunjukkan kembali seperti gambar 3.1.

Torsi elektromagnetik saat start diberikan oleh,

$$T_{e, \text{start}} = P_{\text{ag, start}} / \omega_s \quad (3.1)$$

Daya yang dipindahkan melintasi celah udara pada saat start adalah

$$P_{\text{ag, start}} = 3 (I_{2, \text{start}})^2 R_2 / s = 3 (I_{2, \text{start}})^2 R_2 \quad (3.2)$$



Gambar 3.1 Rangkaian ekivalen untuk kondisi start
(Sumber: Yamayee, 1994)

dimana arus rotor, dalam kondisi start

$$I_{2, \text{start}} = \frac{V_1}{R_1 + R_2 + j(X_1 + X_2)}$$

Ambil besar dari $I_{2, \text{start}}$ dan substitusikan ke dalam persamaan 3.1 dan 3.2, maka torsi start didapatkan,

$$T_{e, \text{start}} = \frac{1}{\omega} \frac{3V_1^2 R_2}{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2} \quad (3.3)$$

Dari persamaan (3.3), terlihat bahwa torsi yang dikembangkan motor dalam kondisi start berbanding lurus dengan tegangan terminal kuadrat. Dengan kata lain, besar torsi sangat dipengaruhi oleh tegangan yang dikenakan ke motor.

CONTOH 3.1

Motor induksi tiga-fasa, 25 hp, 440 V seperti dalam contoh 2.2 mempunyai impedansi per-fasa yang direferensikan ke stator sebagai berikut.

$$\begin{aligned} R_1 &= 0,5 \text{ ohms} & R_2' &= 0,35 \text{ ohms} \\ X_1 = X_2' &= 1,20 \text{ ohms} & X_m &= 25 \text{ ohms} \end{aligned}$$

Motor dioperasikan pada tegangan dan frekuensi nominal.

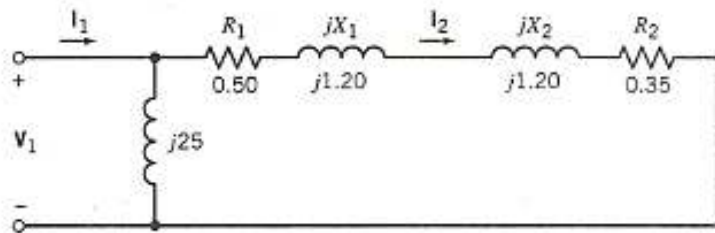
- a. Berapakah torsi *start*?
- b. Bila tahanan rotor dilipat-duakan, berapakah torsi start yang baru?

Penyelesaian

Rangkaian ekivalen pendekatan motor pada saat start, seperti dalam gambar 3.2.

- a. Tegangan terminal per-fasa ditetapkan sebagai fasor referensi, maka,

$$V_1 = (440 / \sqrt{3}) \angle 0^0 = 254,0 \angle 0^0 \text{ V (line-to- neutral)}$$



Gambar 3.2 Rangkaian ekivalen motor untuk contoh 1.7

(Sumber: Yamayee, 1994)

Dari contoh 2.2 telah didapat, $\omega_s = 188,5$ rad/s. Dengan menggunakan persamaan 3.3 torsi start dapat dihitung sebagai berikut,

$$\begin{aligned} T_{e, \text{ start}} &= \frac{1}{\omega} \frac{3V_1^2 R_2}{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2} \\ &= \frac{3(254)^2 (0,35)}{188,5 [(0,5 + 0,35)^2 + (1,2 + 1,2)^2]} = 55,4 \text{ N - m} \end{aligned}$$

- b. Ketika tahanan rotor dilipat-duakan, $R_2' = 2(0,35) = 0,7 \Omega$, maka nilai torsi start yang baru adalah sebagai berikut:

$$T_{e, \text{ start}} = \frac{3(254)^2(0,7)}{188,5[(0,5 + 0,7)^2 + (1,2 + 1,2)^2]} = 99,8 \text{ N - m}$$

3.2 Karakteristik Torsi – Kecepatan

Karakteristik torsi-kecepatan dari motor induksi dapat dipelajari melalui hubungan antara torsi-slip. Slip dan kecepatan dihubungkan melalui persamaan 3.3.

Dari rangkaian ekuivalen dalam gambar 2.9a, pernyataan untuk torsi elektromagnetik T_e didapat sebagai

$$T_e = \frac{P_{ag}}{\omega_s} \quad (3.4)$$

dimana

$$P_{ag} = 3(I_2')^2 R_2'/s \quad (3.5)$$

$$I_2' = \frac{V_1}{\left| R_1 + R_2' / s + j(X_1 + X_2) \right|}$$

$$= \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (3.6)$$

Substitusikan persamaan 3.6 dan 3.5 ke dalam persamaan 3.4, maka pernyataan untuk torsi diperoleh, sebagai

$$T_e = \frac{3V_1^2(R_2'/s)}{\omega_s [(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2]} \quad (3.7)$$

Persamaan 3.7 selanjutnya dapat disederhanakan menjadi sebagai berikut,

$$T_e = \frac{3V_1^2 R_2' s}{\omega_s [(R_1 s + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2 s^2]} \quad (3.8)$$

Untuk memplot persamaan 3.8, torsi maksimum $T_{e, \text{maks}}$ dan slip untuk mendapatkan torsi maksimum tersebut ($s_{T_{\text{maks}}}$) perlu ditentukan. Untuk mendapatkan $s_{T_{\text{maks}}}$, turunkan $dT_e/ds = 0$, kemudian selesaikan untuk s , maka diperoleh,

$$s_{T_{\text{maks}}} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (3.9)$$

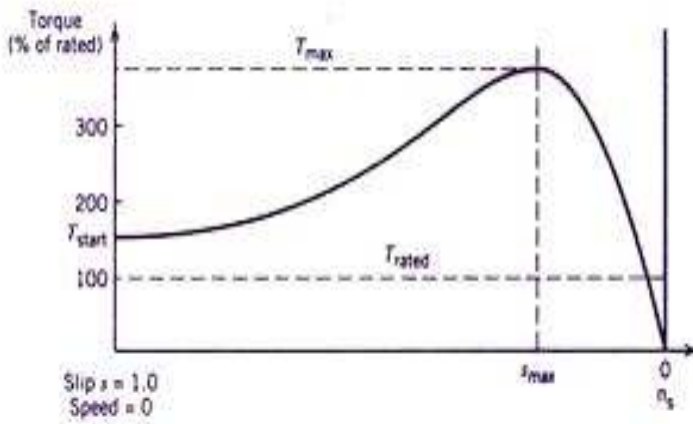
Dapat juga ditunjukkan bahwa turunan kedua dari T_e terhadap s adalah negatif. Oleh karena itu, T_e adalah bernilai maksimum pada $s_{T_{\text{maks}}}$. Substitusikan nilai s_{maks} yang diberikan persamaan 3.9 ke persamaan 3.8, diperoleh torsi maksimum $T_{e, \text{maks}}$ sebagai berikut,

$$T_{e,\text{maks}} = \frac{3V_1^2}{2\omega_s \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]} \quad (3.10)$$

Kecepatan sinkron diberikan oleh

$$\omega_s = \frac{4\pi f}{p} \quad (3.11)$$

Dengan telah diketahuinya, torsi start $T_{e, \text{start}}$, torsi maksimum $T_{e,\text{maks}}$, dan s_{maks} , maka kurva torsi-kecepatan dapat digambarkan, sebagaimana diperlihatkan oleh gambar 3.3.



Gambar 3.3 Kurva torsi-kecepatan motor induksi
(Sumber: Yamayee, 1994)

CONTOH 3.2

Motor induksi tiga-fasa dalam contoh 2.5 dihubungkan ke sumber tiga-fasa 480 V. Tentukan yang berikut:

- a. Slip dan kecepatan motor ketika terjadi torsi maksimum
- b. Arus rotor pada slip ini
- c. Torsi maksimum

Penyelesaian

Dari contoh 3.2, konstanta mesin adalah sebagai berikut:

$$R_1 = 0,100 \text{ ohms} \quad R_2' = 0,125 \text{ ohms}$$

$$X_1 = 0,35 \text{ ohm} \quad X_2' = 0,40 \text{ ohms}$$

Tegangan terminal per-fasa ditetapkan sebagai fasor referensi, maka

$$V_1 = 480 / \sqrt{3} \angle 0^\circ = 277,1 \angle 0^\circ \text{ V (line-to-neutral)}$$

Kecepatan sinkron adalah

$$n_s = 120 f / p = (120) 60 / 4 = 1800 \text{ rpm}$$

- a. Dengan menggunakan persamaan 1.37, slip pada torsi maksimum diperoleh sebagai

$$s_{\text{maks}} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

$$= \frac{0,125}{\sqrt{(0,10)^2 + (0,35 + 0,40)^2}} = 0,165$$

Kecepatan pada saat terjadi torsi maksimum,

$$n_{\text{maks}} = (1 - s_{\text{maks}})n_s = (1 - 0,165)1800 = \mathbf{1503 \text{ rpm}}$$

b. Arus rotor pada s_{maks} diberikan

$$\begin{aligned} I_{2'}^{\text{maks}} &= \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2' / s_{\text{maks}})^2 + (X_1 + X_2')^2}} \\ &= \frac{277,1}{\sqrt{(0,10 + 0,125 / 0,165)^2 + (0,35 + 0,40)^2}} \\ &= \mathbf{243,2 \text{ A}} \end{aligned}$$

c. Torsi maksimum diperoleh dengan menggunakan persamaan 1.39. Maka,

$$\begin{aligned} T_{e,\text{maks}} &= \frac{3V_1^2}{2\omega_s \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]} \\ &= \frac{3(277,1)^2}{2(188,5) \left[0,10 + \sqrt{(0,10)^2 + (0,35 + 0,40)^2} \right]} \\ &= \mathbf{713 \text{ N-m}} \end{aligned}$$

CONTOH 3.3

Motor induksi tiga-fasa, 25 hp, 440 V seperti dalam contoh 2.5 dioperasikan pada tegangan dan frekuensi nominal. Tentukan yang berikut:

- Slip pada torsi maksimum
- Torsi maksimum
- Nilai slip bila tahanan rotor digandakan
- Nilai torsi maksimum bila tahanan rotor digandakan

Penyelesaian

- Rangkaian ekuivalen pendekatan per-fasa diperlihatkan dalam gambar 3.4.

Tegangan terminal per-fasa

$$V_1 = 440 / \sqrt{3} = 254,0 \text{ V (line-to-neutral)}$$

Slip pada torsi maksimum,

$$\begin{aligned} s_{\text{maks}} &= \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} \\ &= \frac{0,35}{\sqrt{(0,50)^2 + (1,20 + 1,20)^2}} = 0,143 \end{aligned}$$

- Arus rotor pada saat s_{maks} dihitung sebagai,

$$I_2'_{\text{maks}} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2' / s_{\text{maks}})^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

$$= \frac{254,0}{\sqrt{(0,50 + 0,35 / 0,143)^2 + (1,20 + 1,20)^2}} = 66,8 \text{ A}$$

Sehingga, torsi maksimum adalah,

$$\begin{aligned} T_{e \text{ maks}} &= \frac{3(I_2' \text{ maks})^2 (R_2' / s_{\text{maks}})}{\omega_s} \\ &= \frac{3(66,8)^2 (0,35 / 0,143)}{188,5} \\ &= \mathbf{174 \text{ N-m}} \end{aligned}$$

- c. Apabila tahanan rotor digandakan, nilai slip yang baru pada torsi maksimum,

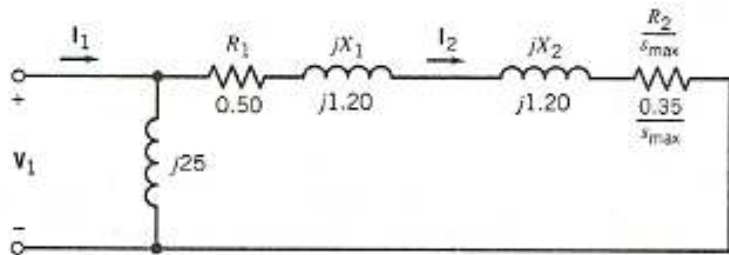
$$\begin{aligned} s_{\text{maks}} &= \frac{2R_2'}{\sqrt{R_1'^2 + (X_1' + X_2')^2}} \\ &= \frac{2(0,35)}{\sqrt{(0,50)^2 + (1,20 + 1,20)^2}} = 0,286 \end{aligned}$$

- d. Apabila tahanan rotor digandakan, nilai arus rotor yang baru diperoleh dengan menggunakan nilai s_{maks} yang dihitung pada bagian (c). Maka,

$$\begin{aligned} I_2' \text{ maks} &= \frac{254,0}{\sqrt{(0,50 + 0,70 / 0,286)^2 + (1,20 + 1,20)^2}} \\ &= 66,8 \text{ A} \end{aligned}$$

Maka, nilai torsi maksimum yang baru adalah,

$$\begin{aligned}
 T_{e \text{ maks}} &= \frac{3(I_2' \text{ maks})^2 (R_2' / s_{\text{maks}})}{\omega_s} \\
 &= \frac{3(66,8)^2 2(0,35/0,286)}{188,5} \\
 &= \mathbf{174 \text{ N-m}}
 \end{aligned}$$



Gambar 3.4 Rangkaian ekuivalen motor untuk contoh 3.3

(Sumber: Yamayee, 1994)

Soal Latihan

1. Sebuah motor induksi tiga-fasa, 10 hp, 230 V, empat-kutub, 60 Hz, hubungan bintang. Motor mengembangkan torsi beban penuh pada slip 4,5 % ketika beroperasi pada tegangan 230 V dan 60 Hz. Impedansi rangkaian ekuivalen per-fasa motor adalah

$$R_1 = 0,35 \text{ ohms}$$

$$X_m = 15,0 \text{ ohm}$$

$$X_1 = 0,50 \text{ ohm}$$

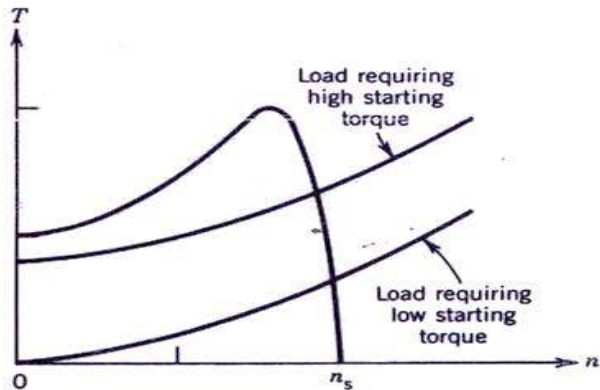
$$X_2' = 0,50 \text{ ohms}$$

Rugi-rugi mekanis dan inti diabaikan. Tentukan yang berikut:

- a. Tahanan rotor R_2'
 - b. Slip pada torsi maksimum
 - c. Torsi maksimum
 - d. Kecepatan rotor pada torsi maksimum
 - e. Torsi *start* motor
-

3.3 Pengaruh Tahanan Rotor

Pada beban penuh dalam sebuah motor induksi konvensional, slip dan arus adalah rendah tetapi faktor daya dan efisiensi tinggi. Sebaliknya, pada saat *start* (mula jalan), torsi dan faktor daya rendah tetapi arusnya tinggi. Jika beban yang digerakkan motor memerlukan torsi *start* yang tinggi (gambar 3.5), motor akan mengalami percepatan yang lambat atau dengan kata lain kecepatan motor lambat, sehingga memerlukan waktu relatif lama dalam mencapai kecepatan nominalnya. Hal ini akan berakibat arus yang besar mengalir untuk waktu yang lama di dalam kumparan stator motor, karenanya menimbulkan masalah pemanasan pada mesin.

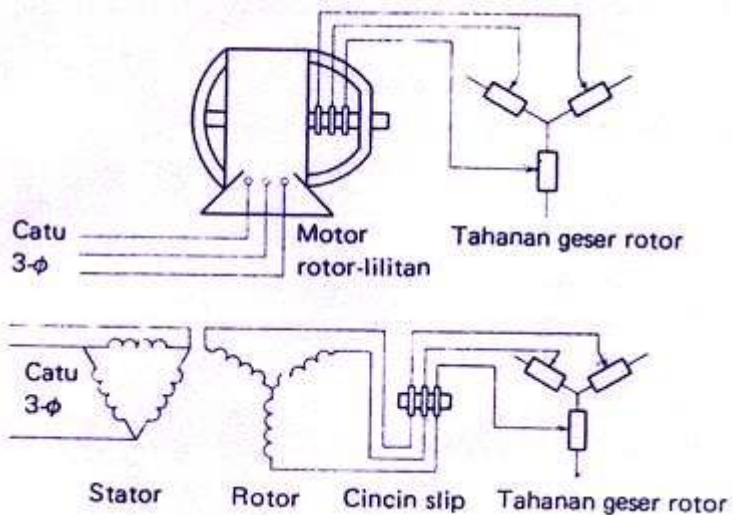


Gambar 3.5 Beban-beban dengan kebutuhan torsi yang berbeda
(Sumber: Sen, 1997)

Tahanan pada rangkaian rotor besar sekali pengaruhnya terhadap unjuk kerja dari sebuah motor induksi. Tahanan rotor yang rendah diperlukan pada operasi normal, yaitu ketika berjalan (*running*), sehingga slip rendah dan efisiensi tinggi. Tetapi, tahanan rotor yang lebih tinggi diperlukan untuk *start* sehingga torsi *start* dan faktor daya tinggi dan arus *start*-nya rendah. Sebuah motor induksi dengan tahanan rangkaian rotor yang rendah, karenanya, memerlukan kompromi rancangan rotor untuk kondisi *start* dan kondisi jalan. Berbagai macam tipe motor induksi yang ada menyediakan fasilitas untuk mengubah tahanan rotor atau dapat mengubah kecepatan dalam penggunaan tertentu.

3.3.1 Motor Rotor-Lilitan (*Wound-Rotor Motor*)

Dalam motor induksi rotor- lilitan tahanan luar dapat dihubungkan ke kumparan rangkaian rotor melalui *slip ring*, (seperti gambar 3.6). Persamaan 3.9 memperlihatkan bahwa slip pada torsi maksimum berbanding lurus dengan tahanan rotor.



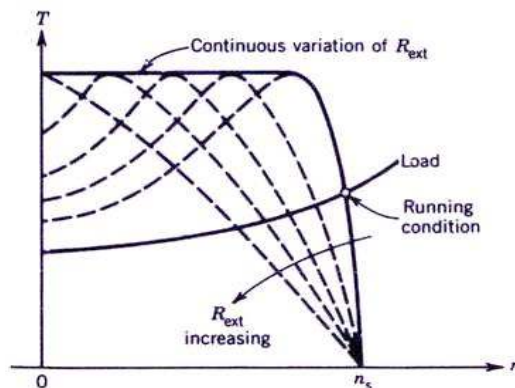
Gambar 3.6 Tahanan luar dihubungkan ke slip ring motor.

(Sumber: Lister)

Tahanan luar dapat dipilih untuk mendapatkan torsi maksimum terjadi pada saat start ($s_{T_{maks}} = 1$) jika torsi start yang tinggi diperlukan. Tahanan luar ini, dapat dikurangi seiring dengan meningkatnya kecepatan

motor, membuat torsi maksimum yang tersedia melebihi seluruh range percepatan, sebagaimana terlihat dalam gambar 3.7. Persamaan 3.10 mengindikasikan bahwa, torsi maksimum tetap sama, karena ia tidak tergantung atas tahanan rangkaian rotor.

Perlu dicatat bahwa sebagian rugi tembaga rotor dilepaskan di tahanan luar. Sehingga pemansan rotor lebih lambat selama periode *start* dan akselerasi dari pada jika tahanan digabungkan di dalam lilitan rotor. Tahanan luar tersebut, secara perlahan-lahan dikurangi seiring meningkatnya kecepatan motor, dan akhirnya dilepaskan sehingga dalam kondisi *running* tahanan rotor hanya berupa tahanan lilitan rotor, yang dirancang rendah untuk membuat motor beroperasi pada efisiensi tinggi dan slip beban penuh yang rendah.



Gambar 3.7 Torsi maksimum diperoleh dengan mengubah tahanan rotor untuk seluruh jangkauan kecepatan.

Terlepas dari untuk keperluan torsi *start* yang tinggi, tahanan luar dapat juga digunakan untuk mengubah kecepatan kondisi *running*.

Sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa, dengan menambah tahanan rotor:

- a) Torsi start (T_{st}) lebih besar;
- b) Arus start (I_{st}) dapat dikurangi;
- c) Kecepatan beban penuh menurun, dengan kata lain kecepatan motor dapat diubah dengan variasi nilai tahanan luar.

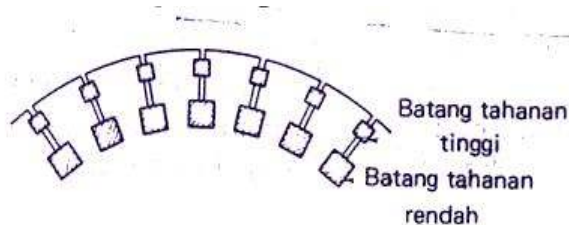
Jadi dengan demikian, walaupun motor induksi rotor-lilitan harganya lebih mahal daripada motor rotor-sangkar, tetapi ia memiliki beberapa kelebihan seperti uraian pada kesimpulan di atas.

3.3.2 Motor Sangkar-Tupai Ganda (*Double Squirrel Cage Motor*)

Motor sangkar-tupai juga dapat dirancang agar memberikan torsi start yang tinggi pada arus start yang rendah dengan membangun rotor-sangkar ganda. Rotor dirancang sedemikian sehingga motor bekerja dengan memanfaatkan rangkaian rotor bertahanan tinggi selama start, dan rangkaian rotor bertahanan rendah pada kondisi jalan (*running*).

Dalam konstruksi rotor ini, terdapat dua lilitan rotor yakni satu didalam yang lain (dua lapis), seperti diperlihatkan dalam gambar 3.8. Lilitan sangkar terluar mempunyai tahanan tinggi lebih tinggi dari pada lilitan sangkar dalam. Sangkar dalam adalah lilitan bertahanan rendah dan mempunyai induktansi yang tinggi.

Selama periode start dengan frekuensi rotor tinggi, impedansi lilitan terluar lebih rendah daripada yang di lilitan dalam, sehingga sebagian besar arus rotor mengalir dalam bagian terluar lilitan bertahanan tinggi. Hal ini memberikan karakteristik yang baik pada lilitan sangkar bertahanan tinggi. Jika rotor melakukan percepatan, frekuensi rotor berkurang, sehingga menurunkan reaktansi lilitan sebelah dalam, dan memungkinkannya mengalirkan sebagian besar arus rotor total. Pada kecepatan normal, frekuensi rotor sangat rendah sehingga hampir semua arus rotor mengalir dalam sangkar-dalam yang bertahanan rendah. Sehingga menghasilkan efisiensi yang tinggi.



Gambar 3.8 Penampang rotor dari motor sangkar-ganda

(Sumber: Lister)

Jadi lilitan terluar menghasilkan torsi start dan torsi percepatan yang tinggi, sedangkan lilitan dalam memberikan torsi jalan (running) dengan efisiensi yang baik.

PERTANYAAN

1. Gambarkan karakteristik torsi-kecepatan sebuah motor induksi. Kemudian jelaskan apa maknanya.
2. Apa pengaruh penambahan nilai tahanan rotor terhadap:
 - a) arus start pada saat torsi maksimum?
 - b) torsi maksimum motor?
3. Apa yang terjadi pada karakteristik torsi-kecepatan motor induksi jika tahanan rotor ditambah?
4. Bagaimanakah penambahan tahanan rotor berpengaruh terhadap:
 - a) slip pada torsi maksimum?
 - b) torsi start? Dan
 - c) torsi maksimum?

SOAL-SOAL

1. Motor induksi tiga-fasa, 100 hp beroperasi pada beban nominal pada kecepatan 855 rpm ketika dihubungkan ke sumber 440 V, 60 Hz. Slip pada beban ini 0,05. Tentukan
 - a. Kecepatan sinkron
 - b. Jumlah kutub stator
 - c. Frekuensi rotor

2. Motor induksi tiga-fasa, 60 Hz, enam-kutub, hubungan bintang mempunyai kecepatan beban penuh 1140 rpm. Hitunglah (a) Slip beban penuh, dan (b) Slip rpm.

3. Motor induksi tiga-fasa dihubungkan ke sumber 60 Hz. Motor berputar pada hampir 1200 rpm dalam tanpa beban dan 1140 rpm pada beban penuh. Tentukan yang berikut:
 - a. Jumlah kutub
 - b. Slip pada beban penuh
 - c. Frekuensi tegangan rotor

4. Sebuah motor induksi tiga-fasa, 220 V, empat-kutub, 60 Hz, hubungan bintang mempunyai parameter yang direferensikan ke stator.

$$R_1 = 0,3 \text{ ohms}$$

$$R_2' = 0,2 \text{ ohms}$$

$$X_1 = 0,5 \text{ ohm}$$

$$X_2' = 0,5 \text{ ohms}$$

$$X_m = 15 \text{ ohm}$$

Total rugi-rugi putaran 500 W. Untuk slip 5 %, hitunglah:

- a. Kecepatan motor.
- b. Arus masukan
- c. Faktor daya masukan
- d. Torsi poros
- e. Efisiensi motor

5. Sebuah motor induksi tiga-fasa 100 hp, 440 V, enam-kutub, 60 Hz, hubungan bintang. Parameter rangkaian ekuivalen yang direferensikan ke stator adalah

$$\begin{aligned} R_1 &= 0,12 \text{ ohms} & R_2' &= 0,1 \text{ ohms} \\ X_1 &= 0,25 \text{ ohm} & X_2' &= 0,20 \text{ ohms} & X_m &= 15 \text{ ohm} \end{aligned}$$

Rugi-rugi gesekan dan angin dan inti masing-masing 1,4 kW dan 1,2 kW. Untuk slip 3,5 % tentukan yang berikut:

- a. Arus *line* dan faktor daya faktor daya masukan
 - b. Daya celah udara
 - c. Daya yang diubah dari bentuk listrik ke bentuk mekanik
6. Sebuah motor induksi tiga-fasa 10 hp, 208 V, empat-kutub, 60 Hz, 1755 rpm. Parameter rangkaian ekuivalen motor adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} R_1 &= 0,15 \text{ ohms} & R_2' &= 0,15 \text{ ohms} \\ X_1 &= 0,40 \text{ ohm} & X_2' &= 0,25 \text{ ohms} & X_m &= 30 \text{ ohm} \end{aligned}$$

Gabungan rugi-rugi putaran (gesekan, angin, hysteresis, dan arus pusar) berjumlah 500 W. Motor beroperasi pada kecepatan nominal ketika dihubungkan ke sumber 208 V dan 60 Hz. Hitunglah

- a. Arus *line* dan faktor daya

- b. Torsi keluaran
- c. Efisiensi motor
- d. Arus start dan torsi start

7. Sebuah motor induksi tiga-fasa rotor lilitan, 20 hp, 480 V, 60 Hz, enam-kutub, beroperasi pada kondisi nominal dan motor berputar pada 1164 rpm dengan tahanan luardihubung-singkat. Parameter rangkaian ekivalen motor adalah

$$R_1 = 0,30 \text{ ohms} \quad R_2' = 0,4 \text{ ohms}$$

$$X_1 = 1,5 \text{ ohm} \quad X_2' = 2,0 \text{ ohms} \quad X_m = 300 \text{ ohm}$$

Tentukan yang berikut:

- a. Slip ketika torsi maksimum terjadi
- b. Torsi maksimum
- c. Tahanan luar yang harus dihubungkan ke rangkaian rotor untuk menjalankan motor pada torsi nominal dan kecepatan 1074 rpm.

8. Sebuah motor induksi tiga-fasa rotor lilitan, 25 hp, 440 V, 60 Hz, 1750 mempunyai parameter rangkaian ekivalen sebagai berikut:

$$R_1 = 0,20 \text{ ohms} \quad R_2' = 0,15 \text{ ohms}$$

$$X_1 = 1,0 \text{ ohm} \quad X_2' = 0,8 \text{ ohms} \quad X_m = 30 \text{ ohm}$$

Motor dihubungkan ke sumber tiga-fasa, 440 V, 60 Hz.

- a. Hitunglah torsi start
- b. Tentukan tahanan luar yang harus dihubungkan ke rangkaian rotor sehingga torsi maksimum terjadi pada saat start.

BAB 4

MENJALANKAN MOTOR INDUKSI **(Starting of Induction Motor)**

Tujuan

Setelah menyelesaikan bagian ini anda mampu:

1. Menjelaskan mengapa arus start motor tinggi?
 2. Menjelaskan mengapa arus start yang tinggi tidak dapat diterima?
 3. Menjelaskan bagaimana menurunkan arus motor.
 4. Menjelaskan cara start dengan hubungan langsung
(*Direct On Line starter*)
 5. Menjelaskan cara start dengan Tahanan Primer
(*Primary Resistance starter*)
 6. Menjelaskan cara start dengan Auto transformator
(*Auto-transformer starter*)
 7. Menjelaskan cara start dengan Saklar Bintang-Delta
(*Y- Δ*)
 8. Menjelaskan cara start dengan Pengendali Tegangan Zat-padat
 9. Menjelaskan cara start dengan Tahanan External
-

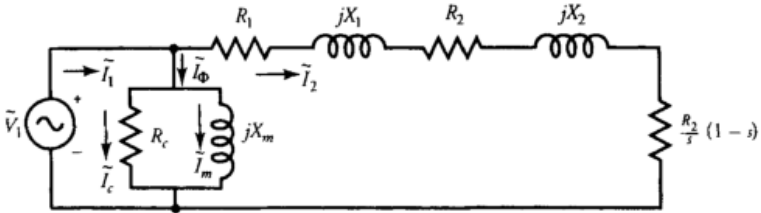
Starting motor (mula jalan) adalah sebuah proses menggerakkan rotor motor dari keadaan diam ke kecepatan nominalnya (misal tertera di name plate 1445 rpm). Motor induksi rotor sangkar sering di-*start* dengan menghubungkannya secara langsung ke jaringan. Arus start yang besar mengalir dalam salura. Jika arus start ini cukup besar, maka jatuh-tegangan di dalam saluran dapat mempengaruhi alat lain yang juga terhubung pada saluran itu. Juga, jika arus yang besar mengalir untuk waktu lama motor mungkin mengalami panas berlebihan dan dapat merusak isoalasi lilitan. Dalam hal ini, arus start harus dikurangi dengan menurunkan tegangan selama periode start.

Pada saat start (mula jalan), kecepatan rotor adalah nol dan slip-per unit sama dengan satu. Karena itu, arus start, berdasarkan rangkaian pendekatan (gambar 4.1) berikut adalah

$$\tilde{I}_{2s} = \frac{V_1}{R_e + jX_e}$$

dimana $R_e = R_1 + R_2$ dn $X_e = X_1 + X_2$. Torsi start yang bersesuaian juga adalah

$$T_{ds} = \frac{3V_1^2 R_2}{\omega_s [R_e^2 + X_e^2]}$$

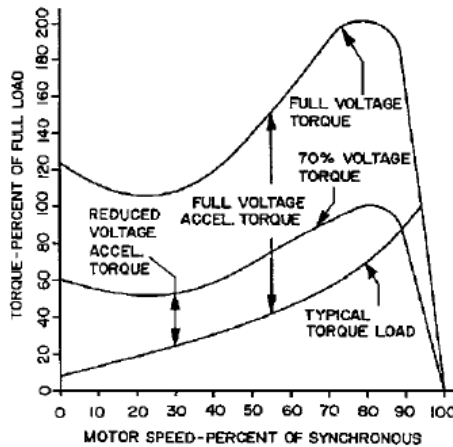


Gambar 4.1 Rangkaian pengganti pendekatan
(Sumber: Sen, 1997)

Karena tahanan efektif rotor R_2 sangat kecil pada saat start dibandingkan dengan nilainya saat pada slip nominal (R_2/s), arus start menjadi sangat tinggi, sekitar 400 % sampai 800 % dari arus beban penuh. Di sisi lain, torsi start hanya sekitar 200 % sampai 350 % dari torsi beban penuh. Arus start yang sangat tinggi tentu tidak dapat diterima sebab berakibat drop tegangan yang juga tinggi, yang pada gilirannya dapat mengganggu mesin-mesin lain yang terhubung pada jaringan yang sama.

Karena arus start berbanding lurus dengan tegangan yang dikenakan ke motor, maka arus start dapat dikurangi dengan menurunkan nilai tegangan sepanjang motor pada saat start. Tetapi penurunan tegangan berakibat menurunnya torsi start (gambar 4.2). Jika tegangan dikurangi 50 %, maka torsi start akan hanya sekitar 25 % dari torsi normal pada tegangan

penuh. Gambar 4.2 memberi ilustrasi karakteristi $T-n$ start dengan tegangan penuh dan pada 70 % saat start.



Gambar 4.2 Karakteristik T-n motor beban pada saat start

Oleh karena itu, penurunan tegangan saat start hanya untuk penggunaan pada beban-beban yang tidak membutuhkan torsi start yang cukup tinggi. Sebagai contoh, sebuah beban kipas hampir tidak memerlukan torsi start kecuali untuk mengatasi rugi-rugi gesekan. Motor induksi yang menggerakkan beban pompa dapat di-start pada tegangan rendah.

Arus start juga dapat dikurangi dengan menaikkan tahanan rotor. Disamping itu, peningkatan tahanan rotor juga berakibat naiknya torsi start, yang tentu saja, diperlukan bagi beban-beban yang perlu torsi start yang tinggi. Tetapi, tahanan rotor tinggi (a) torsi yang dikembangkan pada beban

penuh, (b) membuat rugi tembaga rotor tinggi, dan (c) menyebabkan penurunan efisiensi motor pada beban penuh. Kelemahan-kelemahan ini tidak berlaku bagi motor dengan rotor belitan (*wound-rotor motor*). Karena untuk motor ini, kita dengan mudah dapat menghubungkan tahanan luar yang tinggi seri dengan belitan rotor pada saat start dan melepaskannya manakala motor beroperasi pada beban penuh.

Ada beberapa metode start yang digunakan sesuai dengan spesifikasi motor dan beban. Metode-metode start tersebut antara lain

- a) Start dengan hubungan langsung (*Direct On Line starter*)
- b) Start dengan Tahanan Primer (*Primary Resistance starter*)
- c) Start dengan Auto transformator (*Auto transformer starter*)
- d) Start dengan Saklar Bintang-Delta (*Y- Δ*)
- e) Start dengan Pengendali Tegangan Zat-padat
- f) Start dengan Tahanan External

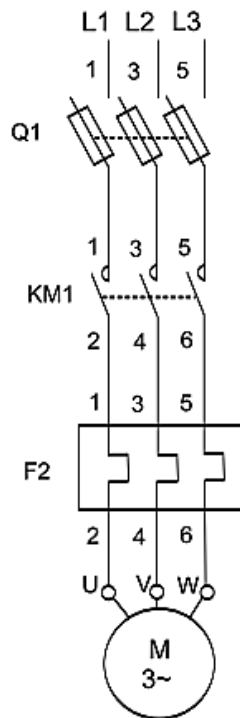
4.1 Start dengan Hubungan Langsung (*Direct On Line Starter*)

Bentuk paling sederhana dari starter motor induksi adalah start hubungan langsung (DOL). Dimana motor dihubungkan langsung ke jaringan listrik. Starter DOL terdiri dari sebuah saklar (switch) dan sebuah rele proteksi beban lebih (*overload protection relay*), seperti

diperlihatkan dalam gambar 4.3. Dalam metode ini motor mendapat tegangan secara langsung dari sumber tegangan.

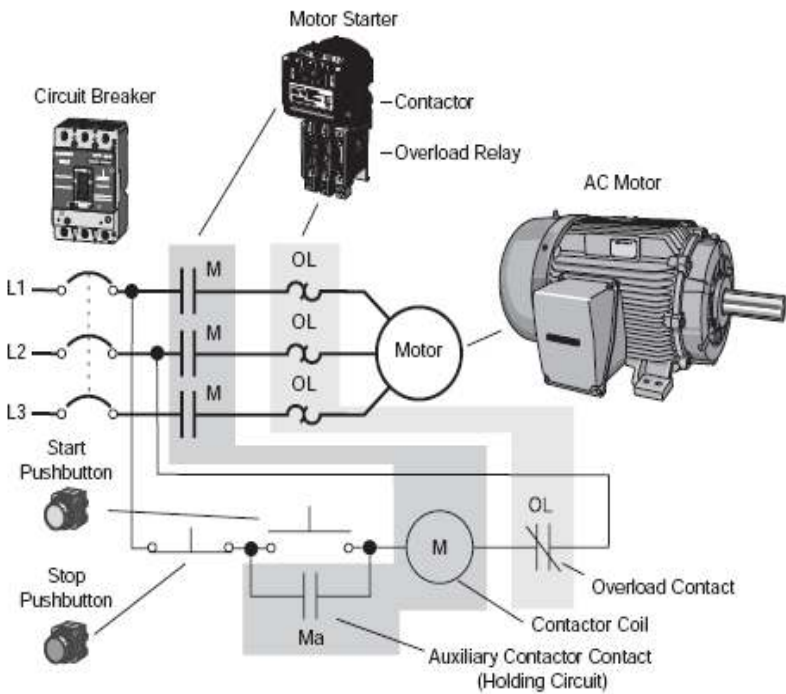
Saklar dapat dioperasikan secara manual yang dikerjakan oleh load brake switch, tetapi umumnya ia berupa sebuah kontaktor elektromagnetik yang dapat dibuka oleh rele proteksi beban lebih.

Untuk menjalankan, kontaktor ditutup, tegangan saluran secara penuh dikenakan ke kumparan motor. Motor akan menarik arus yang besar selama periode start.

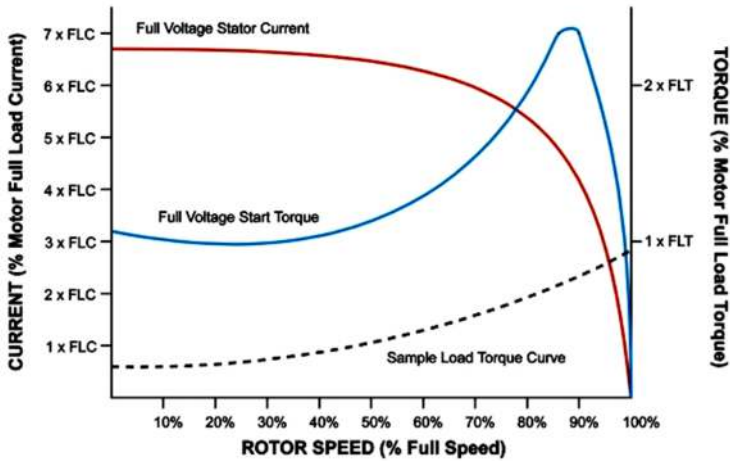


Gambar 4.3 Rangkaian start Direct On Line starter

Gambar 4.4 berikut memperlihatkan foto dari komponen-komponen yang digunakan dalam start dengan metode DOL. Sedangkan karakteristik T-n dan arus motor saat di-start dengan metode DOL ditunjukkan dalam gambar 4.5.



Gambar 4.4 Foto komponen-komponen dalam start DOL



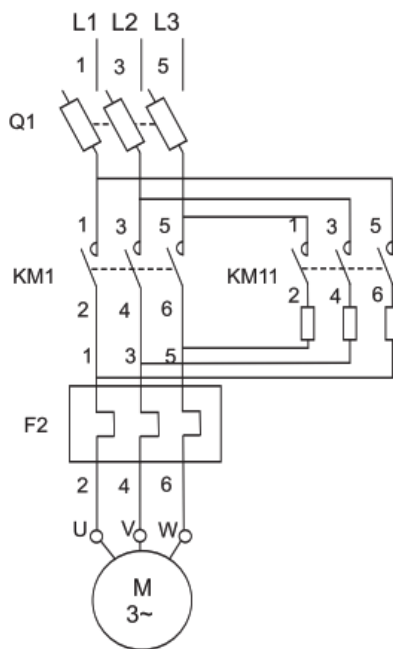
Gambar 4.5 Karakteristik T-n dan arus motor saat di-start dengan metode DOL

Dari gambar 4.5 terlihat arus start sangat tinggi, yaitu sekitar 6.7 kali arus beban penuh motor. Oleh karena itu, untuk menghindari jatuh tegangan (voltage drop) yang berlebihan pada jaringan listrik disebabkan arus start yang tinggi, start dengan metode DOL umumnya hanya digunakan untuk motor dengan daya yang tidak terlalu besar (dibawah 5 kW).

4.2 Start dengan Tahanan Primer (Primary Resistance starter)

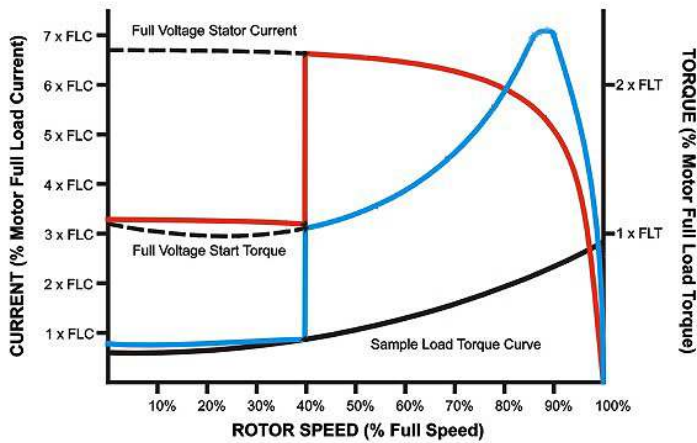
Starter tahanan primer memiliki satu atau lebih unit resistor, yang selama periode start dihubungkan secara

seri dengan sumber ke motor (gambar 4.6). Deretan resistor mengurangi arus start yang ditarik motor (karena adanya tegangan jatuh sepanjang resistor selama start akibatnya tegangan motor turun), dan juga mengurangi torsi start motor. Setelah motor mencapai kecepatan penuh resistor ditutup dengan sebuah kontaktor, sehingga tegangan secara penuh dikenakan ke motor.



Gambar 4.6 Rangkaian starter tahanan primer

Karakteristik T-n dan arus motor saat di-start dengan metode tahanan primer ditunjukkan dalam gambar 4.7. Dari gambar 4.7 terlihat bahwa arus start sekitar 3.25 kali arus beban penuh.



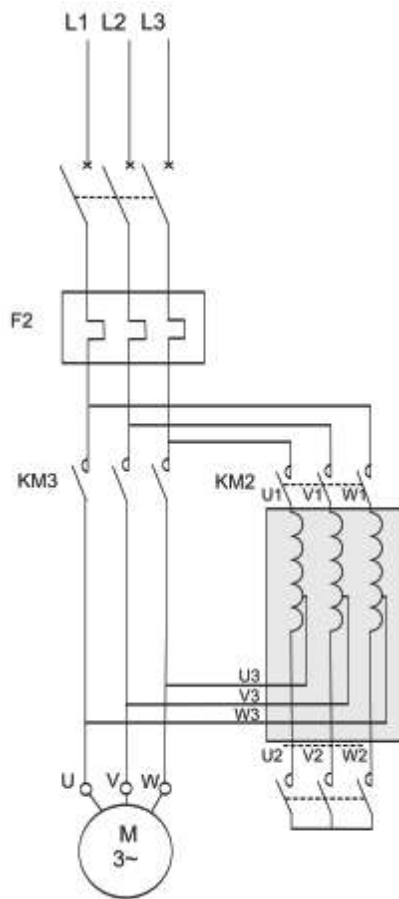
Gambar 4.7 Karakteristik T-n dan arus motor saat di-start dengan metode tahanan primer

4.3 Start dengan Auto-Transformer (Auto-Transformer Starter)

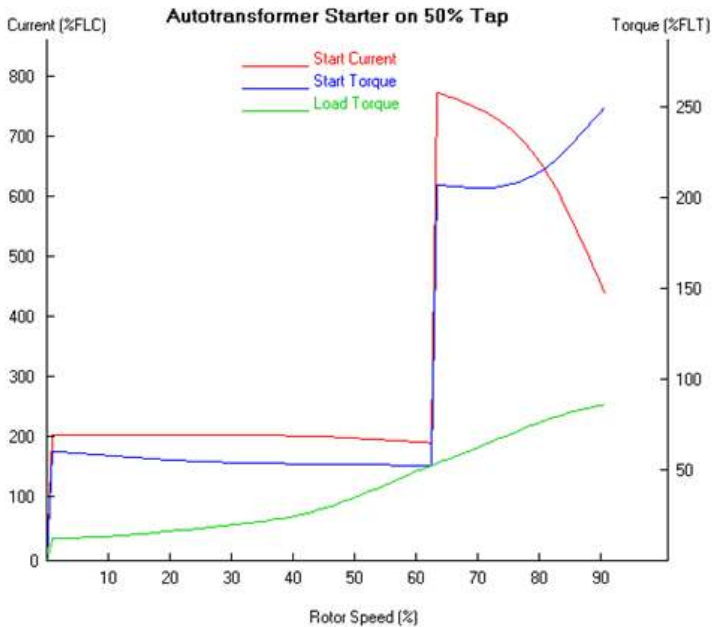
Starter dengan autotransformator menggunakan sebuah auto transformator untuk mengurangi tegangan yang dikenakan ke motor selama start (gambar 4.8). Autotransformator dipasang antara motor dan tegangan suplai untuk mengurangi tegangan saat start. Tersedia *tap* untuk start motor misalnya pada 50%, 65% atau 80% dari tegangan suplai. Trafo menurunkan arus seperti halnya tegangan sehingga arus motor akan turun menjadi 50%, 65% atau 80% dari arus start normal. Setelah

motor mendekati kecepatan penuhnya, autotransformator dilepaskan dari rangkaian.

Karakteristik T-n dan arus motor saat di-start dengan autotransformator ditunjukkan dalam gambar 4.9. Dari gambar 4.9 terlihat bahwa arus start sekitar dua kali arus beban penuh.



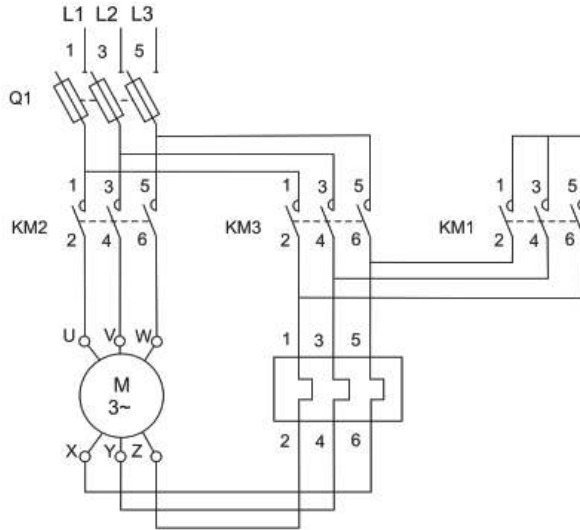
Gambar 4.8 Rangkaian start dengan autotransformator.



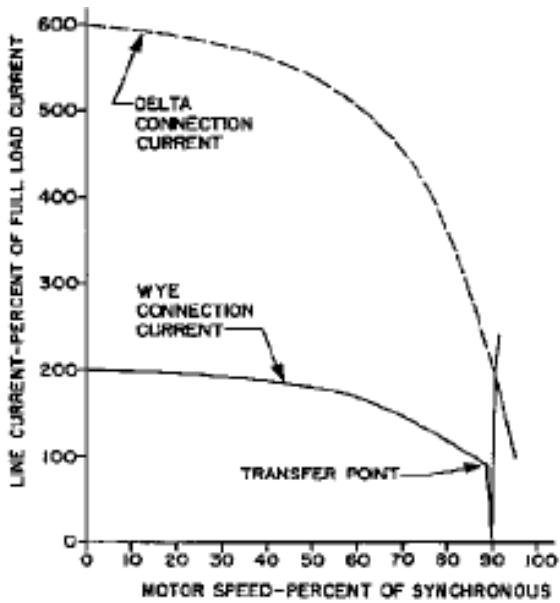
Gambar 4.9 Karakteristik T-n dan arus motor saat di-start dengan autotransformator

4.4 Start Dengan Metode Bintang-Delta (Y- Δ)

Starter motor bintang-segi tiga (Y- Δ or Y-D) adalah sebuah starter motor yang dirancang untuk menjalankan motor dimana kumparan stator dihubungkan bintang selama start kemudian kumparan stator dipindah ke hubungan segi tiga ketika motor sudah berjalan pada kecepatan nominal. Sehingga motor berjalan dengan kumparan stator dihubung segi tiga. Skema kumparan motor yang dihubung segi tiga dan bintang dapat dilihat pada gambar 4.10.



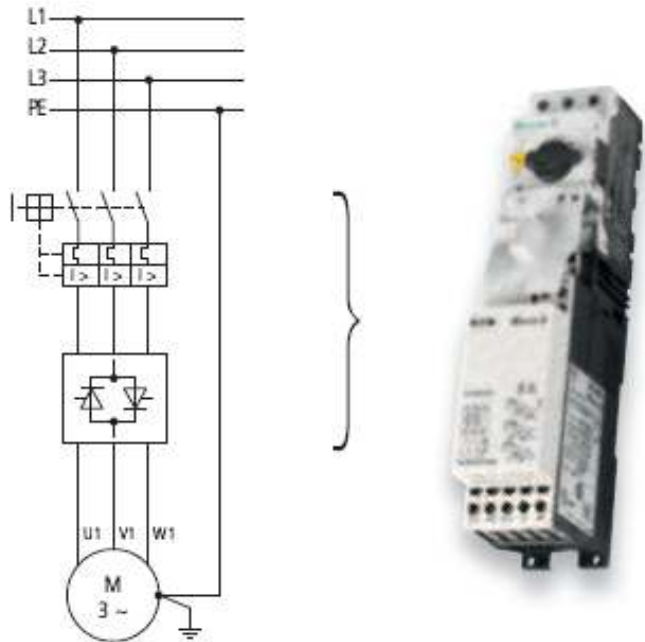
Gambar 4.11 Rangkaian start saklar Y-delta



Gambar 4.12 Karakteristik $T-n$ dan arus motor saat di-start dengan saklar Y-delta

4.5 Start dengan Pengendali Tegangan Zat-padat

Pengendali tegangan zat padat (*solid-state voltage controller*), sebagaimana diperlihatkan oleh gambar 4.13, dapat juga digunakan sebagai starter dengan tegangan-dikurangi. Pengendali tegangan ini dapat menyediakan start yang lembut. Perlu diketahui bahwa, walaupun start dengan tegangan-dikurangi dapat menurunkan arus-start, hal ini juga menghasilkan suatu penurunan dalam torsi-start. Sebab, torsi yang dikembangkan motor sebanding dengan tegangan terminal kuadrat.

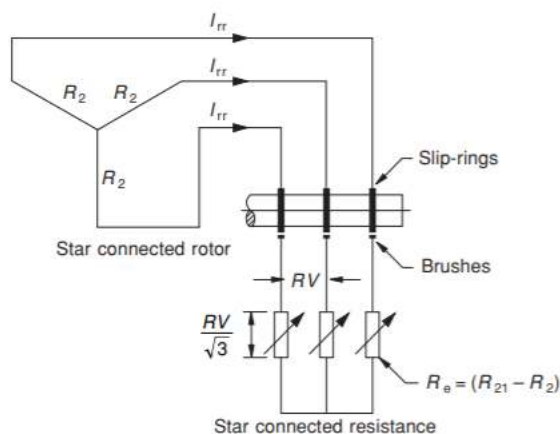


Gambar 4.13 Rangkaian start dengan pengendali tegangan zat-padat.

4.6 Start dengan Tahanan Eksternal

Start dengan tahanan luar yang dihubungkan seri dengan rotor (tahanan eksternal) hanya dapat digunakan pada motor induksi rotor belitan atau slip-ring motor. Slip-ring motor dirancang start dengan tegangan penuh, karena tahanan luar dapat dengan mudah dihubungkan ke rangkaian rotor dengan bantuan slip-ring. Sebuah tahanan hubungan bintang dihubungkan seri dengan rotor melalui slip-ring ditunjukkan dalam gambar 4.14. Dengan masuknya tahanan dalam rangkaian rotor maka arus rotor (dengan demikian arus stator juga) akan berkurang selama start.

Tahanan luar di rotor juga dapat menaikkan torsi start. Tahanan luar hanya digunakan untuk start motor saja, dan secara perlahan-lahan dilepaskan bila motor sudah berjalan mendekati kecepatan nominalnya.



Gambar 4.14 Tahanan luar di rotor

PERTANYAAN DAN SOAL-SOAL

1. Apakah selalu memungkinkan men-*start* sebuah motor induksi pada tegangan nominalnya?
2. Jelaskan apakah tujuan men-*start* motor induksi rotor sangkar pada tegangan yang dikurangi?
3. Sebutkan empat cara men-*start* motor induksi rotor sangkar.
4. Jelaskan metode men-*start* motor induksi rotor belitan.
5. Sebuah motor induksi 3-fasa, 3 HP, 220 V. Tegangan jaringan 220 V (*line-line*). Bila motor di-*start* dengan saklar Y- Δ , berapakah tegangan yang dikenakan ke belitan stator per fasa selama *start*?
6. Motor induksi 3-fasa, dengan tegangan 380/220 V, apabila tegangan jala-jala 380 V (*line-line*) dapatkah digunakan sakelar Y- Δ ? Jelaskan dan buktikan bahwa sakelar Y- Δ dapat menurunkan besarnya arus mula (arus *start*).
7. Apa pengaruh penambahan tahanan rotor terhadap arus *start* dan torsi maksimum?

BAB 5

PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA

Tujuan

Setelah menyelesaikan bagian ini anda mampu:

1. Menjelaskan konsep pengaturan kecepatan motor induksi.
2. Menjelaskan cara pengaturan kecepatan dengan mengubah jumlah kutub.
3. Menjelaskan cara pengaturan kecepatan dengan mengubah tegangan.
4. Menjelaskan cara pengaturan kecepatan dengan mengubah frekuensi.
5. Menjelaskan cara pengaturan kecepatan dengan mengubah tahanan rotor.

Sebuah motor induksi pada dasarnya motor kecepatan konstan bilamana dihubungkan ke sumber tegangan-konstan dan frekuensi-konstan. Kecepatan operasi sangat dekat dengan kecepatan sinkron. Jika beban bertambah, kecepatan turun sedikit saja. Oleh karena itu, motor induksi cocok digunakan

pada sistem penggerak kecepatan-konstan. Tetapi dalam beberapa penggunaan industri, memerlukan beberapa kecepatan, atau pengaturan kecepatan secara kontinu. Biasanya motor dc sudah digunakan pada sistem-penggerak demikian. Namun, motor dc mahal, perlu sering perawatan terhadap komutator dan sikat. Motor induksi rotor-sangkar, di sisi lain, murah, kuat, tanpa komutator, dan cocok untuk penggunaan kecepatan tinggi. Tersedianya kendali zat padat, walaupun lebih rumit dari pada menggunakan motor dc, telah membuat kemungkinan penggunaan motor induksi untuk sistem penggerak-kecepatan variabel.

Seperti diketahui bahwa kecepatan medan putar sebanding dengan frekuensi dan berbanding terbalik dengan jumlah kutub, sebagaimana dalam persamaan berikut.

$$N_m = \frac{120f}{P} (1 - s)$$

Dari persamaan ini kecepatan motor induksi dapat dikendalikan dengan mengubah frekuensi dari tegangan sumber yang dikenakan ke motor dan/atau jumlah kutub mesin. Kecepatan dapat juga dikendalikan dengan mengubah tegangan, atau menambahkan tahanan eksternal ke dalam rangkaian rotor. Beberapa metode pengaturan kecepatan akan didiskusikan dibawah ini.

Pada bagian ini akan dibahas beberapa metoda pengaturan kecepatan motor induksi, yaitu:

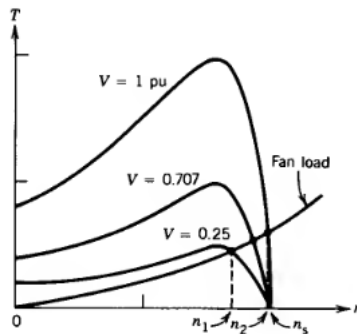
- a) Pengaturan jumlah kutup.
- b) Pengaturan tegangan jaringan.
- c) Pengaturan frekuensi tegangan saluran.
- d) Pengaturan tahanan rotor.

5.1 Pengaturan Jumlah Kutup

Cara atau metode ini cocok untuk sebuah motor induksi dengan rotor sangkar. Dalam hal ini, belitan stator dibuat dalam dua atau lebih secara terpisah. Setiap belitan berkaitan dengan jumlah kutub yang berbeda dan karena itu kecepatan juga berbeda. Pada suatu waktu, hanya satu belitan yang dioperasikan. Seluruh belitan yang lain diputuskan. Sebagai contoh, sebuah belitan motor induksi untuk 4 dan 6 kutub pada frekuensi 60 Hz dapat beroperasi pada 1800 rpm (operasi 4-kutub) atau pada 1200 rpm (operasi 6-kutub). Metode ini walaupun terbatas, sangat sederhana, menyediakan regulasi kecepatan yang baik, dan efisiensi yang tinggi pada setiap *setting* kecepatan. Cara ini digunakan pada motor traksi, motor elevator, dan motor kecil penggerak mesin perkakas.

5.2 Pengaturan Tegangan Jaringan

Sudah dijelaskan sebelumnya torsi yang dikembangkan sebuah motor induksi sebanding dengan kuadrat dari tegangan terminal. Sekelompok kurva karakteristik $T-n$ untuk berbagai macam tegangan terminal ditunjukkan dalam gambar 5.1. Jika rotor menggerakkan sebuah beban kipas maka kecepatan dapat diubah-ubah sepanjang n_1 ke n_2 dengan mengubah tegangan saluran.

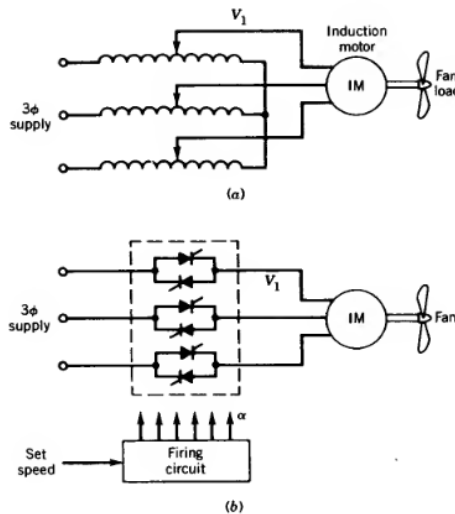


Gambar 5.1 Karakteristik $T-n$ bermacam tegangan terminal

(Sumber: Sen, 1997)

Tegangan terminal V_1 dapat divariasikan dengan menggunakan sebuah autotransformator atau sebuah kendali tegangan zat-padat seperti ditunjukkan pada gambar 5.2. Autotransformator menyediakan tegangan berbentuk sinusoidal sedangkan kendali tegangan zat-padat non-sinusoidal. Kendali kecepatan dengan kendali tegangan zat-padat umumnya

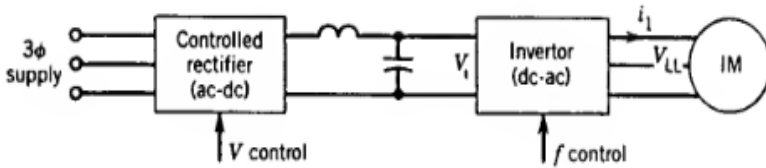
digunakan pada motor rotor sangkar kecil yang sedang menggerakkan beban pompa. Dalam penggunaan daya besar, sebuah filter pada masukan dibutuhkan; jika tidak, arus harmonis yang besar akan mengalir di jaringan listrik.



Gambar 5.2 Kendali kecepatan. (a) Pengendali tegangan auto-trafo; (b) Kendali tegangan zat-padat.
(Sumber: Sen, 1997)

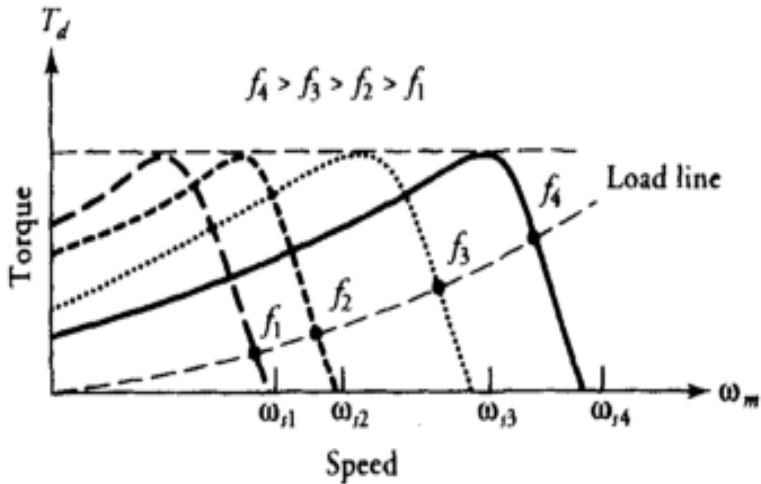
5.3 Pengaturan Frekuensi Tegangan Saluran

Kecepatan sinkron dan karenanya kecepatan motor dapat divariasikan dengan perubahan frekuensi tegangan sumber. Penggunaan metode pengaturan kecepatan ini, memerlukan sebuah pengubah frekuensi. Gambar 5.3 memperlihatkan diagram blok sistem kontrol kecepatan lup-terbuka (open loop) dengan frekuensi motor induksi dapat diubah.



Gambar 5.3 Kendali kecepatan lup-terbuka motor induksi dengan kendali tegangan dan frekuensi sumber.
(Sumber: Sen, 1997)

Gambar 5.4 berikut memperlihatkan karakteristik T-n motor beban untuk empat frekuensi yang berbeda. Juga terlihat dalam gambar itu kurva beban khas. Pada setiap frekuensi motor beroperasi pada kecepatan dimana kurva beban memotong karakteristi T-n untuk frekuensi tersebut.

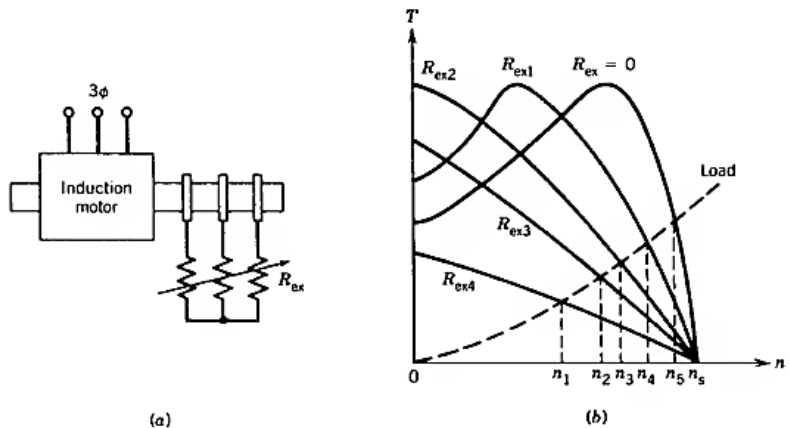


Gambar 5.4 Karakteristik T-n motor beban untuk empat frekuensi.
(Sumber: Guru, 2001)

5.4 Pengaturan Tahanan Rotor

Kecepatan motor induksi rotor-belitan dapat diatur dengan menghubungkan tahanan luar ke dalam kumparan rotor melalui beberapa slip-ring (gambar 5.4a). karakteristik torsi-kecepatan untuk empat tahanan luar diperlihatkan dalam gambar 5.4b. Karakteristik T-n beban juga diperlihatkan dengan garis putus-putus. Dengan variasi tahanan luar $0 < R_{ex} < R_{ext4}$, kecepatan beban dapat diatur dalam jangkauan $n_1 < n < n_5$. Perhatikanlah bahwa pengaturan tahanan luar, $R_{ex} = R_{ex2}$, torsi start maksimum dapat diperoleh untuk beban.

Skema dalam gambar 5.4a memerlukan bangkru tahanan tiga-fasa, dan untuk operasi keseimbangan seluruh tahanan tiga-fasa harus ditetapkan pada nilai yang sama.



Gambar 5.4 Kendali kecepatan dengan kontrol tahanan rotor.

(Sumber: Sen, 1997)

Kecepatan operasi dari motor dapat dikurangi dengan menambah tahanan eksternal ke dalam rangkaian rotor. Namun, penambahan tahanan rotor menyebabkan:

- a) bertambahnya rugi tembaga rotor,
- b) peningkatan temperatur operasi motor, dan
- c) pengurangan efisiensi motor.

Disebabkan kerugian-kerugian tersebut, metode pengaturan kecepatan ini hanya digunakan untuk waktu singkat saja.

PERTANYAAN

1. Mengapa motor induksi tidak dapat berputar pada kecepatan sinkron?
2. Tunjukkan atau buktikan bahwa kecepatan motor induksi tiga-fasa dapat diatur dengan pengubahan frekuensi dan jumlah kutub motor.
3. Jelaskan bahwa kecepatan motor induksi dapat diatur dengan mengubah tagangan yang dikenakan ke motor tersebut.
4. Jelaskan bagaimana metode pengaturan kecepatan pada motor-rotor-belitan.

BAB 6

MOTOR INDUKSI SATU FASA

Tujuan

Setelah menyelesaikan bagian ini anda mampu:

1. Menjelaskan konstruksi dan jenis motor induksi tiga-fasa
 2. Menjelaskan prinsip kerja operasi motor induksi satu fasa
 3. Menjelaskan metode menjalankan motor induksi satu fasa
 4. Menjelaskan karakteristik operasi motor induksi satu fasa
 5. Menjelaskan penggunaan motor induksi satu fasa
-

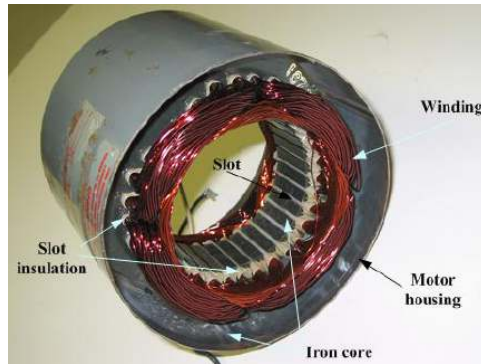
Oleh karena bentuknya yang sederhana dan harganya yang relatif murah, motor induksi satu fasa banyak dipakai untuk keperluan motor kecil di dalam rumah tangga seperti kipas angin, pompa, mesin pendingin, perkakas tangan, blender, dan lain-lain. Gambar 6.1 memperlihatkan contoh foto sebuah motor induksi satu-fasa.



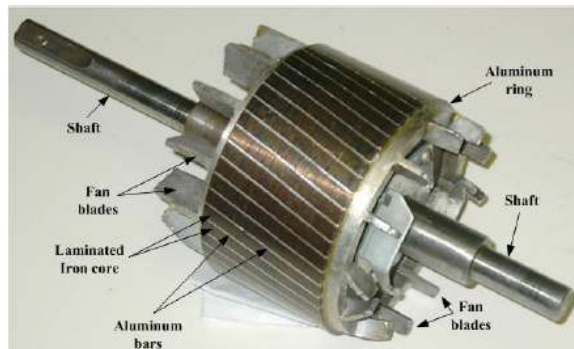
Gambar 6.1 Motor induksi satu fasa.

6.1 Konstruksi Motor Induksi Satu-Fasa

Konstruksi motor induksi satu-fasa terdiri atas stator dan rotor. Stator terdiri atas inti stator terbuat dari besi berlapis dengan bagian dalam terdapat alur-alur untuk menempatkan kumparan satu fasa. Sedangkan rotor biasanya berupa rotor sangkar dimana konduktor ditenamkan dalam inti besi. Gambar 6.2 memperlihatkan stator dan rotor motor induksi satu-fasa.



(a)



(b)

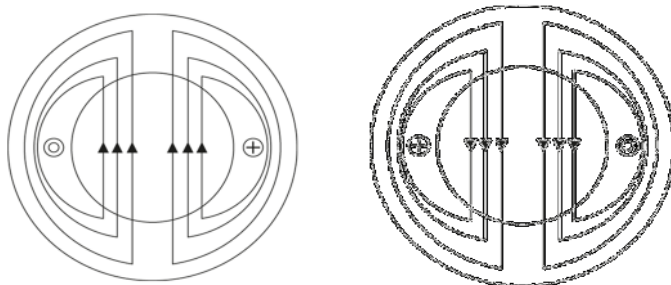
Gambar 6.2 Konstruksi motor induksi satu fasa, (a) Stator;
(b) Rotor

6.2 Medan Arah Maju dan Arah Mundur

Seperti telah diketahui, bila kumparan stator motor induksi tiga fasa dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik akan menghasilkan suatu medan magnet yang berputar terhadap ruang. Medan putar inilah yang menjadi prinsip

motor induksi tiga fasa. Motor induksi satu fasa tidak menghasilkan medan putar.

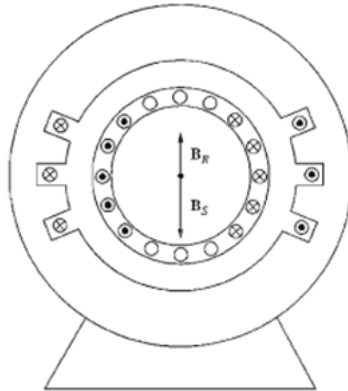
Jika tegangan satu fasa dikenakan pada belitan stator motor induksi satu fasa, arus ac mengalir dalam belitan tersebut. Arus stator ini membangkitkan medan yang berdenyut (bertambah dan berkurang), walaupun medan berubah tapi selalu sepanjang garis lurus tertentu, namun, medan ini tidak berputar (gambar 6.3). Karena medan stator tidak berputar, sehingga tidak ada beda gerak relatif antara medan stator dan batang-batang konduktor rotor.



Gambar 6.3 Arus dan medan stator motor induksi satu fasa

Akibatnya, tidak ada induksi tegangan di rotor, tidak ada arus di rotor, dan tentu tidak ada torsi yang terinduksi di rotor (rotor tetap diam). Sebenarnya, ada tegangan induksi di rotor karena aksi trafo ($d\Phi/dt$), dan karena batang-batang konduktor rotor terhubung singkat, arus mengalir di rotor. Sehingga rotor juga menginduksi medan magnet (fluksi).

Namun medan rotor ini terletak dalam satu garis lurus dengan medan stator (gambar 6.4), sehingga tidak dihasilkan torsi bersih (*net torque*) di rotor akibatnya rotor tetap diam. Oleh sebab itu, motor induksi satu-fasa tidak dapat start-sendiri (*self-starting*).



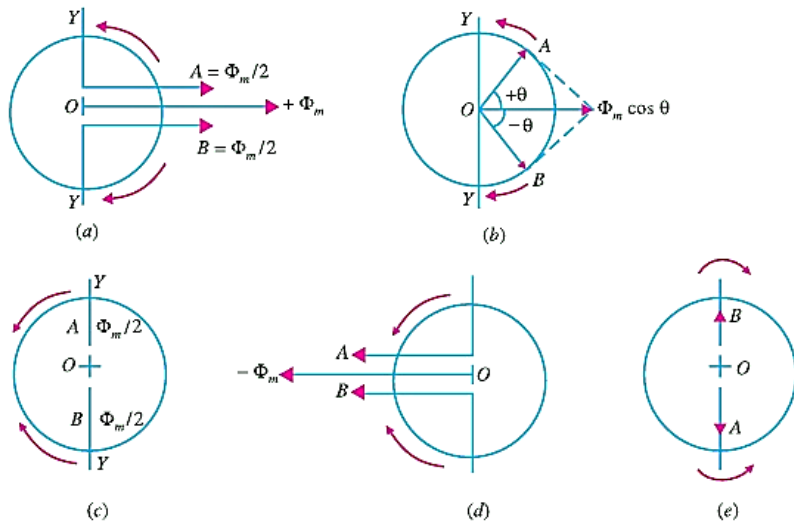
Gambar 6.4 Motor induksi pada saat start

6.3 Teori Medan Putar-Ganda

Gejala motor induksi satu-fasa tidak dapat start- sendiri dapat diselidiki melalui teori medan putar ganda (*double-field Revolving*). Menurut teori ini, medan berdenyut di suatu garis lurus dapat dipecah menjadi dua medan berputar, masing-masing besarnya setengah medan maksimum dan masing-masing berputar pada $N_s = 120 f / p$ dalam arah berlawanan.

Misalkan, medan berdenyut mempunyai nilai maksimum Φ_m . Komponen-komponennya medan A dan

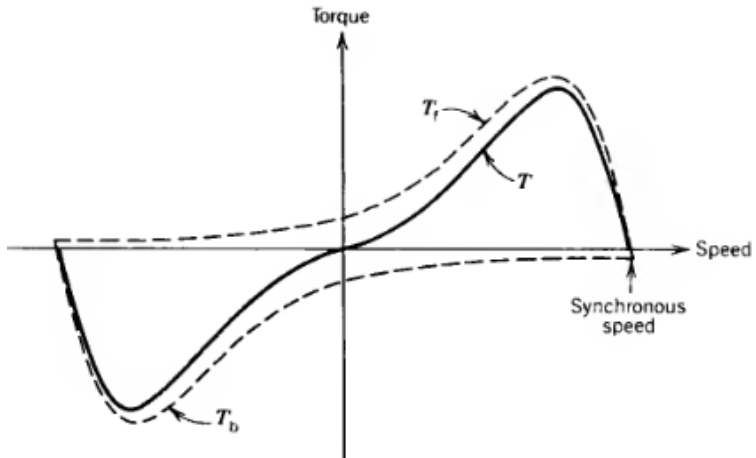
B yang besarnya masing-masing $\Phi_m / 2$ berputar berlawanan arah putaran jarum jam dan searah putaran jarum jam seperti terlihat dalam gambar 6.5 berikut.



Gambar 6.5 Teori medan putar ganda

Ketika A dan B berputar sejauh $+\theta$ dan $-\theta$ (gambar 6.5b) medan resultan = $\Phi_m \cos \theta$. Setelah berputar seperempat putaran, A dan B dalam keadaan berlawanan arah (gambar 6.5c) sehingga medan resultan sama dengan nol, dan hal terus berlangsung. Sementara kedua medan, A dan B berputar di dalam rongga stator, mereka memotong penghantar rotor, menginduksikan tegangan, mengalirkan arus rotor, dan masing-masing menghasilkan torsi. Kedua torsi ini

(disebut torsi maju, T_f dan torsi mundur, T_b) mempunyai arah yang berlawanan (gambar 6.6). Sehingga torsi resultan sama dengan selisih kedua torsi tersebut.



Gambar 6.6 Ilustrasi T_f dan T_b dan torsi resultan, T .
(Sumber: Sen, 1997)

Dengan mengamati gambar 6.6, pada saat rotor diam (start), $s = 1$. Oleh sebab, T_f dan T_b besarnya sama tapi berlawanan arah, maka tidak ada torsi resultan yang dihasilkan, sehingga rotor tetap saja diam.

Torsi resultan yang dihasilkan oleh kedua torsi tersebut (T_f dan T_b) pada dasarnya mempunyai kemampuan untuk menggerakkan rotor dengan arah maju atau arah mundur.

Tetapi pada saat start, kemampuan rotor untuk bergerak maju sama besar dengan kemampuan gerak mundurnya, oleh sebab itu rotor tetap saja diam. Apabila dengan suatu alat bantu kita dapat memberikan sedikit torsi maju, rotor akan berputar mengikuti torsi resultan maju, dan demikian pula sebaliknya. Persoalannya sekarang adalah bagaimana cara memberikan torsi start (mula) pada motor induksi satu fasa, sehingga motor dapat bejalan.

6.4 Menjalankan Motor Induksi Satu-Fasa

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, bahwa motor induksi satu-fasa dengan satu belitan startor tidak menghasilkan suatu torsi start (mula jalan). Agar motor mulai berputar, suatu penataan dibutuhkan sehingga motor menghasilkan torsi start. Pada kondisi jalan (running), tentu saja, motor akan menghasilkan torsi dengan hanya satu belitan pada stator.

Cara sederhana untuk menjalankan motor induksi satu-fasa adalah dengan menyediakan belitan bantu (*auxiliary winding*) di stator sebagai tambahan bagi belitan utama (*main winding*) dan menjalankan motor sebagai mesin dua-fasa. Kedua fasa tersebut ditempatkan di stator dengan perbedaan sudut 90° listrik. Impedansi kedua belitan dibuat sedemikian sehingga arus dalam belitan utama dan belitan bantu terdapat beda fasa.

Motor ekivalen dengan motor dua-fasa tidak seimbang. Tetapi, menghasilkan medan putar di stator yang dapat memproduksi torsi start, sehingga rotor mulai berputar. Setelah kecepatan rotor mendekati kecepatan nominalnya ($\approx 75\%$ kecepatan sinkron), rangkaian kumparan bantu dilepaskan.

6.3. Klasifikasi Motor Induksi Satu-Fasa

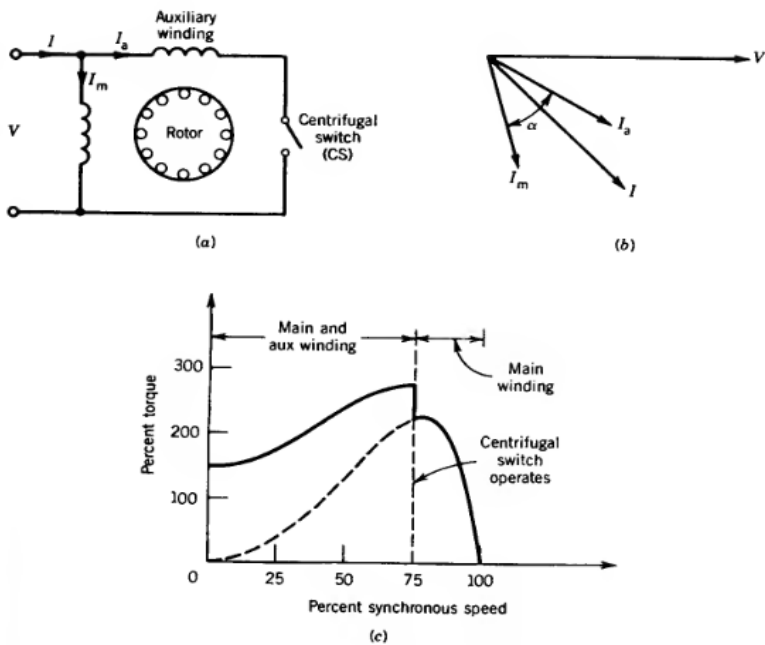
Motor induksi satu fasa diklasifikasikan berdasarkan metode yang digunakan untuk menghasilkan torsi-start-nya. Yaitu dengan membuat adanya beda-fasa arus yang mengalir di kumparan utama dan kumparan bantu. Beberapa tipe yang umumnya digunakan dalam motor induksi satu fasa diuraikan berikut ini.

6.3.1. Motor Start dengan Pemisahan-Fasa (Split-phase motor)

Diagram skematik motor fasa-termisah diperlihatkan dalam gambar 6.7a. Kumparan bantu mempunyai rasio R/X lebih tinggi daripada kumparan utama, sehingga kedua arus berbeda fasa (gambar 6.7b). Rasio R/X yang tinggi biasanya diperoleh dengan menggunakan kawat yang lebih kecil untuk kumparan bantu. Hal ini dimungkinkan karena kumparan bantu dipakai di rangkaian hanya selama periode start. Saklar

sentrifugal memutuskannya, ketika kecepatan motor mencapai sekitar 75 % dari kecepatan sinkron.

Karakteristik torsi-kecepatan khas motor tipe ini diperlihatkan dalam gambar 6.7c. Motor ini mempunyai torsi start yang rendah. Torsi start dapat diperbesar dengan menghubungkan sebuah tahanan seri dengan kumparan bantu.



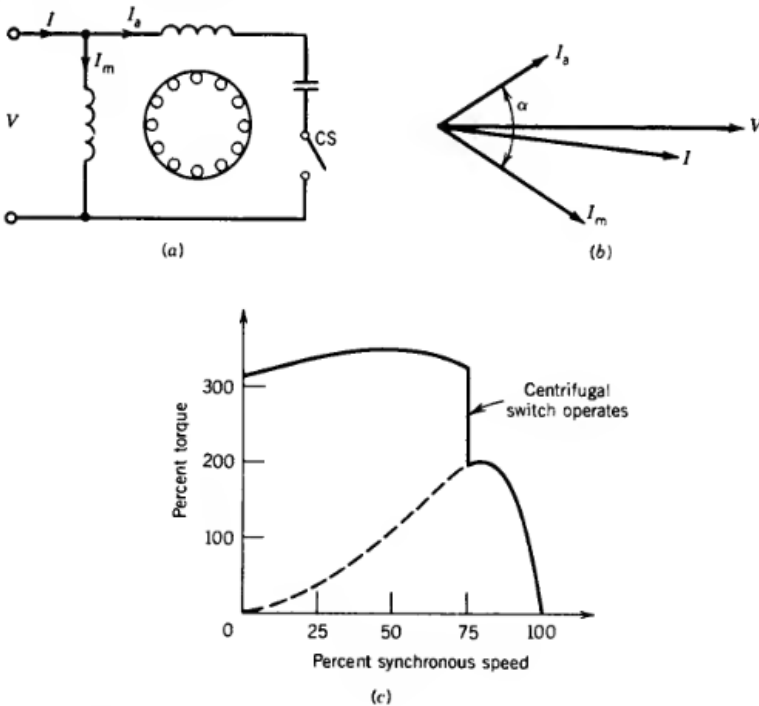
Gambar 6.76 Motor pemisahan-fasa
(Sumber: Sen, 1997)

6.3.2. Motor yang Start dengan Kapasitor (Capacitor-start motor)

Torsi start yang lebih tinggi dapat diperoleh dengan menghubungkan sebuah kapasitor dalam seri dengan

kumparan utama, seperti terlihat pada gambar 6.8a. Hal ini akan memperbesar sudut fasa arus-arus di kedua kumparan tersebut (gambar 6.8b). Karakteristik torsi-kecepatan motor ini diperlihatkan dalam gambar 6.8c. Nilai kapasitor khas untuk motor 0,5 hp adalah $300 \mu\text{F}$. Kapasitor dipakai hanya selama start. Torsi start yang tinggi adalah keistimewaan yang menonjol motor tipe ini.

Gambar 6.8d memperlihatkan contoh foto sebuah motor yang start dengan kapasitor.





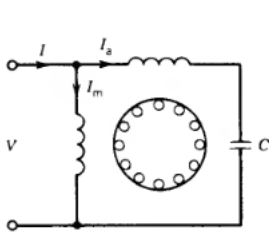
(d)

Gambar 6.8. Motor start dengan kapasitor
(Sumber: Sen, 1997)

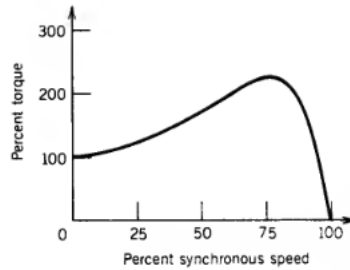
6.3.3. Motor dengan Kapasitor Jalan (Capacitor-Run Motor)

Pada motor ini, sebagaimana terlihat dalam gambar 6.9a, kapasitor yang dihubungkan seri dengan belitan bantu tidak diputuskan setelah start dan dibiarkan dalam rangkaian selamanya. Hal ini menyederhanakan konstruksi dan menurunkan biaya sebab saklar sentrifugal tidak dibutuhkan. Faktor daya, torsi pulsasi (denyut), dan efisiensi motor bertambah baik karena motor berjalan sebagai motor dua-fasa. Motor berjalan dengan suara lebih halus.

Karakteristik torsi-kecepatan motor dengan kapasitor-jalan diperlihatkan dalam gambar 6.9b. Sedangkan gambar 6.9c memperlihatkan contoh foto sebuah motor dengan kapasitor jalan.



(a)



(b)



(c)

Gambar 6.9 Motor dengan kapasitor jalan

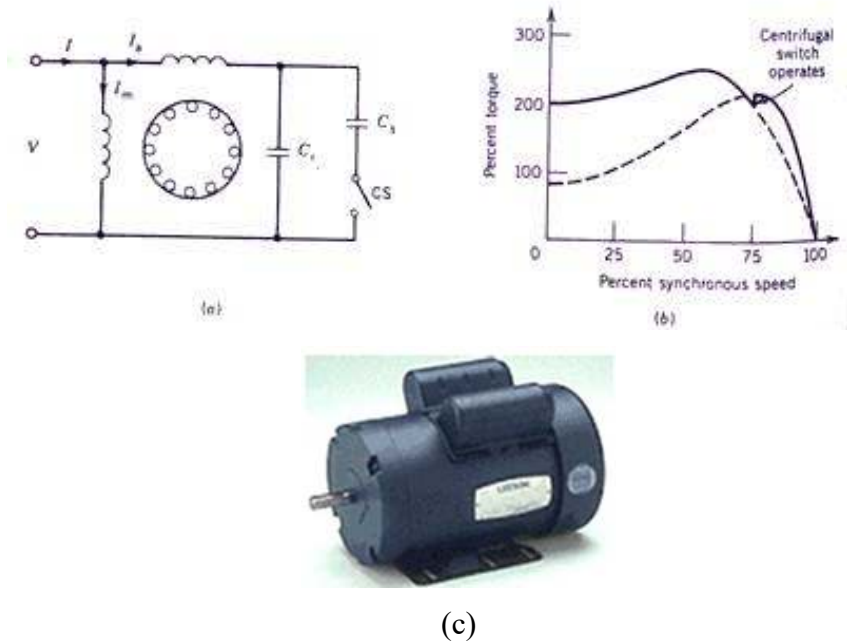
6.3.4. Motor dengan Kapasitor-Start dan Kapasitor-Jalan (Capacitor-start Capacitor-run Motor)

Motor tipe ini disebut juga sebagai motor kapasitor dengan dua nilai. Disini, ada dua kapasitor, satu untuk start dan satu untuk jalan (running) digunakan sebagaimana ditunjukkan dalam gambar 6.10a. Kapasitor start C_s nilainya lebih besar. Kapasitor jalan dihubungkan secara permanen seri dengan kumparan

start. Nilai khas kapasitor untuk motor 0,5 hp adalah $C_s = 300 \mu\text{F}$ dan $C_r = 40 \mu\text{F}$.

Karakteristik torsi-kecepatan khas motor ini diperlihatkan dalam gambar 6.10b. Motor ini tentu mahal dibanding motor jenis lain, tetapi ia menghasilkan torsi start yang sangat baik dan prestasi jalan yang baik.

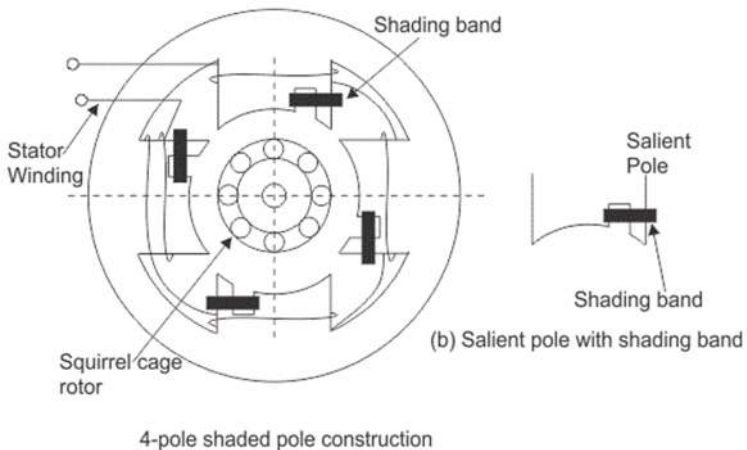
Gambar 6.10c memperlihatkan contoh foto sebuah motor dengan kapasitor start dan kapasitor jalan.



Gambar 6.10 Motor dengan Kapasitor-Start dan Kapasitor-Jalan

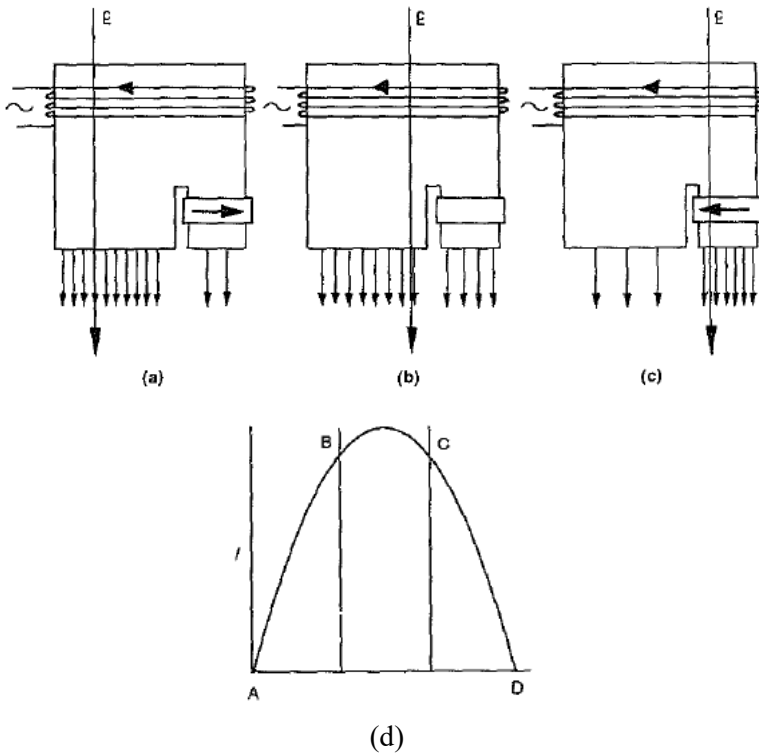
6.3.5 Motor dengan Kutub Terlindung (*the shaded-pole motor*)

Motor dengan kutub terlindung adalah motor satu-fasa dengan hanya belitan utama di stator. Sebagian dari permukaan kutub dililitkan suatu belitan kawat tembaga yang dihubung-singkatkan, belitan ini disebut belitan pelindung (*shading coil*). Gambar 6.11 memperlihatkan struktur motor empat kutub dengan kutub terlindung.



Gambar 6.11 Struktur motor kutub terlindung (4 kutup)

Prinsip kerja motor dengan kutub terlindung: Prinsip kerja motor dengan kutub terlindung dapat dijelaskan sebagai berikut. Perhitkanlah struktur kutub mesin dalam gambar 6.12 berikut.



Gambar 6.12 Struktur kutub dan belitan motor kutub terlindung

Jika arus ac berubah naik dari A menuju B fluksi mulai bertambah (gambar 6.12d), arus diinduksikan di kumparan pelindung. Hasilnya, fluksi di belitan pelindung lemah sedangkan fluksi di luar belitan pelindung lebih kuat (gambar 6.12a).

Saat arus ac di bagian B - C, nilainya hampir maksimum dan tidak berubah, akibatnya distribusi fluksi di sepanjang kutub seragam karena tidak ada arus mengalir di belitan pelindung (gambar 6.12b). Pusat medan berada di tengah permukaan kutub, diperlihatkan oleh garis E.

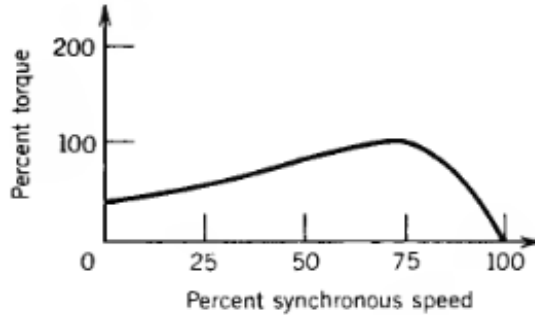
Ketika arus ac berkurang dari C ke D, arus diinduksikan di belitan pelindung, sehingga ada perlawanan terhadap pengurangan arus. Akibatnya, fluksi di belitan pelindung menguat, sedangkan fluksi di luar belitan pelindung melemah (gambar 6.12c). Pusat medan berada di permukaan kutub terlindung (garis E dalam gambar 6.12c).

Dari uraian di atas, pengaruh dari belitan pelindung adalah menyebabkan fluksi medan bergeser melalui permukaan kutub dari bagian yang tak terlindung ke bagian yang dilindungi. Pergeseran fluksi ini, agak mirip dengan medan magnet berputar.

Rotor berupa jenis sangkar dan di bawah pengaruh medan berputar ini. Akibatnya, torsi start kecil dibangkitkan di rotor sehingga rotor berputar ke arah belitan-terlindung menuju putaran sedikit di bawah kecepatan sinkron.

Metode start motor ini digunakan hanya pada motor yang sangat kecil yaitu sampai sekitar $\frac{1}{4}$ hp, seperti digunakan untuk menggerakkan kipas angin kecil, pengering rambut atau blower kecil.

Karakteristik T-n motor kutub terlindung diperlihatkan dalam gambar 6.13. Terlihat dalam karakteristi tersebut bahwa torsi start-nya sangat kecil.



Gambar 6.13 Karakteristik T-n motor kutub terlindung
(Sumber: Sen, 1997)

PERTANYAAN

1. Sebutkan empat tipe motor induksi satu fasa?
2. Apakah perbedaan konstruksi antara motor tiga fasa dan satu fasa dari motor induksi?
3. Apakah motor satu fasa dengan hanya satu kumparan di stator menghasilkan torsi resultan pada saat rotornya diam? Mengapa?
4. Apakah motor kapasitor permanen itu?
5. Manakah yang mempunyai karakteristik start yang lebih baik, motor induksi pemisah-fasa ataukah motor yang di start dengan kapasitor?
6. Apakah motor kapasitor dengan dua nilai itu?
7. Jelaskan prinsip kerja dari: split-phase motor, capacitor motor, dan shaded-pole motor.

8. Mengapa perlu melepaskan belitan bantu (*start*) dari rangkaian motor ketika split-phase motor sudah beroperasi pada beban penuh? Apa yang terjadi jika saklar sentrifugal gagal bekerja?
9. Dengan bantuan diagram (gambar), jelaskan bagaimana belitan pelindung menyebabkan terbentuknya torsi-start pada shaded-pole motor?

DAFTAR PUSTAKA

1. Zuhail.(1992). *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta : Gramedia Pustaka Utama.
2. Lister, Eugene, C. (1988). *Mesin dan Rangkaian Listrik*. Jakarta: Erlangga.
3. Sen, P.C. (1997). *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. Toronto : John Wiley & Sons.
4. Zia A. Yamayee, Juan L. Bala, Jr. (1994). *Electromechanical Energy Devices and Power Systems*. Toronto : John Wiley & Sons, Inc.
5. Frank D., Fetruzella, (2001). *Elektronik Industri*. Yogyakarta: Penerbit Andi

MESIN LISTRIK ARUS BOLAK BALIK (Motor Induksi)

Syukur alhamdulillah penulis ucapkan kehadlirat Allah SWT, karena hanya dengan rahmat, taufiq dan hidayah-Nya jualah Buku Ajar Mesin Arus Bolak-Balik ini dapat diselesaikan penulisannya. Dengan hadirnya buku ini diharapkan dapat membantu dosen maupun mahasiswa Jurusan Teknik Elektro khususnya proses belajar mengajar dalam mata kuliah Mesin Listrik Arus Bolak dengan topik bahasan motor induksi tiga-fasa dan satu-fasa.

Buku Ajar Mesin Listrik Arus Bolak ini memuat tentang : konsep dasar struktur dan cara kerja motor induksi 3-fasa, analisis karakteristik motor induksi3-fasa, pengendalian motor induksi3-fasa, dan srstruktur serta cara kerja motor induksi satu-fasa, dan penggunaannya.

Syamsudin Noor

Saifullah

Edi Yohanes

Setia Graha

Puhrani

Paliling

Sunu Hasta Wibowo

Bambang Suriansyah

Muhammad Ali Watoni

Feriyadi

ISBN 978-623-5259-04-8



Penerbit Poliban Press

Redaksi :

Politeknik Negeri Banjarmasin, Jl. Brigjen H. Hasan Basry,

Pangeran, Komp. Kampus ULM, Banjarmasin Utara

Telp : (0511)3305052

Email : press@poliban.ac.id