

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Motor induksi merupakan motor arus bolak-balik yang paling luas diaplikasikan dalam dunia industri dan juga dalam rumah tangga. Motor ini mempunyai banyak keuntungan yaitu konstruksi yang kuat, sederhana serta membutuhkan perawatan yang tidak banyak.

Pada saat ini banyak digunakan motor induksi baik motor induksi satu fasa atau tiga fasa dalam kehidupan industri. Oleh sebab itu perlu untuk diketahui bagaimana pengaruh perubahan beban terhadap putaran dan daya masuk dari motor tersebut, terutama pada motor induksi tiga fasa. Dengan mengetahui putaran dari motor tersebut, maka industri dan masyarakat dapat mempertimbangkan akan menggunakan motor induksi yang akan digunakan dalam kehidupan sehari – hari dan hubungannya dengan perubahan berbagai beban.

Pada Tugas Akhir ini, penulis hanya akan menggambarkan bagaimana suatu motor induksi yang terdapat pada laboratorium konversi energi listrik UHN sebagai contoh dasar yang digunakan sebelum masyarakat dan industry memilih motor – motor induksi yang diperdagangkan di pasaran.

1.2. Tujuan Penulisan

Adapun tujuan penulisan tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh perubahan beban terhadap putaran dan daya masuk motor induksi 3 fasa.
2. Untuk mengetahui seberapa besar putaran dan daya masuk pada motor induksi akibat perubahan beban.
3. Mengetahui bagaimana pengaruh perubahan beban terhadap putaran dan daya masuk motor induksi 3 fasa.

1.3. Manfaat Penulisan Tugas Akhir

Adapun manfaat penulisan tugas akhir ini adalah :

1. Memberikan informasi tentang proses penghitungan putaran dan daya masuk dengan adanya perubahan beban motor induksi 3 fasa pada laboratorium konversi energi listrik UHN.
2. Mengetahui bagaimana pengaruh perubahan beban terhadap putaran dan daya masuk pada motor induksi 3 fasa.

1.4. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang menguraikan hal-hal dalam Tugas Akhir ini sebagai berikut :

1. Motor induksi arus bolak-balik dianggap dalam keadaan steady state (mantap).
2. Tidak membahas tentang harmonisa tegangan yang mungkin terjadi.

1.5. Metodologi Penulisan

Metode penulisan yang digunakan dalam penulisan tugas akhir ini adalah:

1. Studi literatur, beberapa studi keputusan dengan mempelajari buku-buku (teks book) yang terkait, baik yang bersumber dari media cetak, elektronik maupun internet.
2. Studi diskusi interaktif, Melakukan diskusi dalam bentuk tanya jawab dengan kepala laboratorium konversi energi listrik terkait hal-hal yang berkaitan dengan pengaruh perubahan beban terhadap putaran dan daya masuk motor induksi tiga fasa.
3. Studi lapangan : Mengambil data dan informasi dari Laboratorium Konversi Energi Listrik Fakultas Teknik Universitas HKBP Nommensen.

1.6. Sistematika Penulisan

Penulisan Tugas Akhir ini disajikan dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini merupakan pendahuluan yang berisikan tentang latar belakang masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, metode penulisan, dan sistematika penulisan.

BAB II INDUKSI ELEKTROMAKNETIK

Bab ini membahas tentang induksi elektromagnetik dan pembagiannya.

BAB III MOTOR INDUKSI (MOTOR ASINKRON)

Bab ini membahas tentang cara menjalankan, prinsip kerja, karakteristik, dan kinerja dari motor induksi (asinkron).

BAB IV PENGARUH PERUBAHAN BEBAN TERHADAP
PUTARAN DAN DAYA MASUK MOTOR INDUKSI 3 FASA (MOTOR
SANGKAR).

Bab ini menerangkan tentang perhitungan putaran dan daya masuk yang diperoleh dari motor induksi 3 fasa dengan perubahan beban yang terjadi.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi kesimpulan dan saran dari hasil studi dengan data - data yang telah diperoleh.

BAB II

INDUKSI ELEKTROMAKNETIK

2.1. Umum

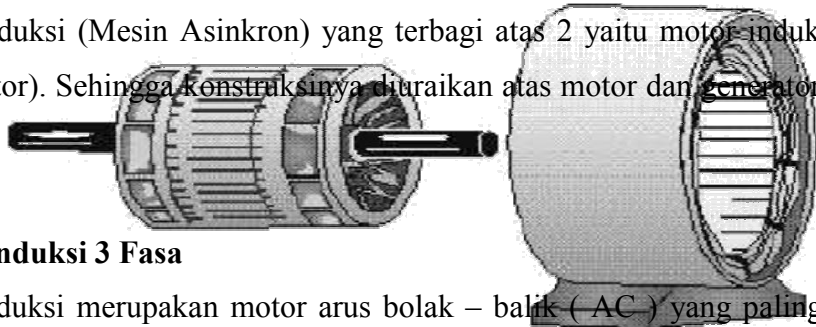
Mesin Induksi 3 fasa atau mesin tak serempak dibagi atas dua jenis yaitu :

1. Motor Induksi 3 fasa
2. Generator Induksi 3 fasa, yang pada umumnya disebut alternator.

Pada umumnya dari kedua jenis yang di atas, yang paling sering digunakan adalah motor induksi 3 fasa. Generator induksi 3 fasa (Alternator) jarang digunakan dalam kehidupan masyarakat. Pada umumnya yang namanya generator, identik dengan penghasil daya/tegangan. Tetapi dalam masyarakat luas lebih sering digunakan generator sinkron atau serempak.

2.1.1. Konstruksi Mesin Induksi (Mesin Asinkron) Tiga Fasa

Mesin Induksi (Mesin Asinkron) yang terbagi atas 2 yaitu motor induksi dan generator induksi (Alternator). Sehingga konstruksinya diuraikan atas motor dan generator yang dijelaskan di bawah ini :



2.1.1.1. Motor Induksi 3 Fasa

Motor induksi merupakan motor arus bolak – balik (AC) yang paling luas digunakan dan dapat dijumpai dalam setiap aplikasi industri maupun rumah tangga. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan arus stator.

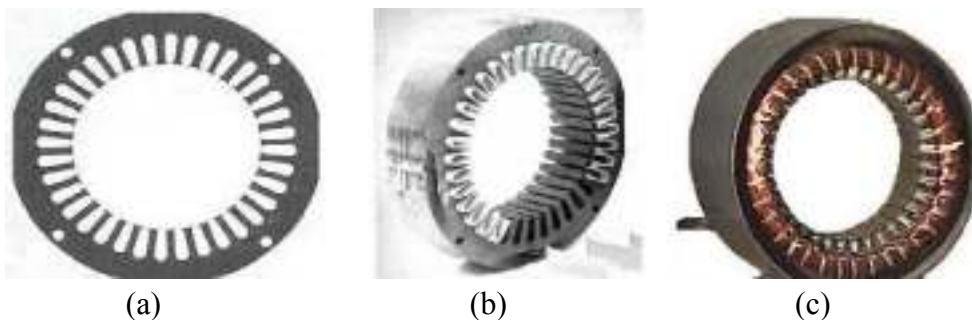
Motor ini memiliki konstruksi yang kuat, sederhana, handal, serta berbiaya murah. Di samping itu motor ini juga memiliki efisiensi yang tinggi saat berbeban penuh dan tidak membutuhkan perawatan yang banyak. Akan tetapi jika dibandingkan dengan motor DC, motor induksi masih memiliki kelemahan dalam hal pengaturan kecepatan. Dimana pada motor induksi pengaturan kecepatan sangat sukar untuk dilakukan, sementara pada motor DC hal yang sama tidak dijumpai.

2.1.1.1.1. Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa

Secara umum motor induksi terdiri dari rotor dan stator. Rotor merupakan bagian yang bergerak, sedangkan stator bagian yang diam. Diantara stator dengan rotor ada celah udara yang jaraknya sangat kecil. Konstruksi motor induksi dapat dilihat pada gambar 2.1.

Gambar 2.1. Penampang rotor dan stator motor induksi

Komponen stator adalah bagian terluar dari motor yang merupakan bagian yang diam dan mengalirkan arus fase. Stator terdiri atas tumpukan laminasi inti yang memiliki alur yang menjadi tempat kumparan dililitkan yang berbentuk silindris. Alur pada tumpukan laminasi inti diisolasi dengan kertas (Gambar 2.2.(b)). Tiap elemen laminasi inti dibentuk dari lembaran besi (Gambar 2.2 (a)). Tiap lembaran besi tersebut memiliki beberapa alur dan beberapa lubang pengikat untuk menyatukan inti. Tiap kumparan tersebar dalam alur yang disebut belitan fase dimana untuk motor tiga fase, belitan tersebut terpisah secara listrik sebesar 120° . Kawat kumparan yang digunakan terbuat dari tembaga yang dilapis dengan isolasi tipis. Kemudian tumpukan inti dan belitan stator diletakkan dalam cangkang silindris (Gambar 2.2.(c)). Berikut ini contoh lempengan laminasi inti, lempengan inti yang telah disatukan, belitan stator yang telah dilekatkan pada cangkang luar untuk motor induksi tiga fase.



Gambar 2.2. Menggambarkan komponen stator motor induksi tiga fase

(a) Lempengan inti

(b) Tumpukan inti dengan kertas isolasi pada beberapa alurnya

(c) Tumpukan inti dan kumparan dalam cangkang stator

Rotor motor induksi tiga fasa dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu rotor sangkar (*squirrel cage rotor*) dan rotor belitan (*wound rotor*). Rotor sangkar terdiri dari susunan batang konduktor yang dibentangkan ke dalam slot – slot yang terdapat pada permukaan rotor dan tiap – tiap ujungnya dihubung singkat dengan menggunakan *shorting rings*.



Gambar 2.3. Rotor sangkar

2.1.1.2. Generator Induksi 3 Fasa

Mesin induksi dapat dioperasikan sebagai motor maupun sebagai generator. Bila dioperasikan sebagai motor, mesin induksi harus dihubungkan dengan sumber tegangan (jala – jala) yang akan memberikan energi mekanis pada mesin tersebut dengan mengambil arus eksitasi dari jala – jala dan mesin bekerja dengan slip lebih besar dari nol sampai satu ($0 \leq s \leq 1$).

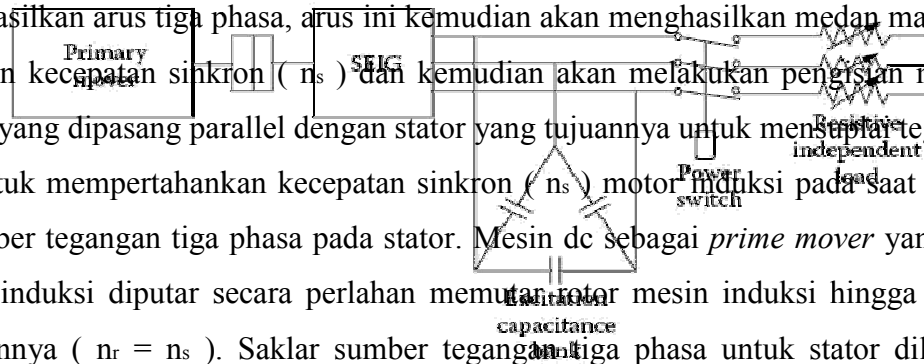
Jika mesin dioperasikan sebagai generator, maka diperlukan daya mekanis untuk memutar rotornya searah dengan arah medan putar melebihi kecepatan sinkronnya dan sumber daya reaktif untuk memenuhi kebutuhan arus eksitasinya. Kebutuhan daya reaktif dapat

diperoleh dari jala – jala atau dari suatu kapasitor. Tanpa adanya daya reaktif, mesin induksi yang dioperasikan sebagai generator tidak menghasilkan tegangan. Jika generator induksi terhubung dengan jala – jala, maka kebutuhan daya reaktif diambil dari jala – jala. Namun, bila generator induksi tidak terhubung dengan jala – jala, maka kebutuhan daya reaktif dapat disediakan dari suatu unit kapasitor. Kapasitor tersebut dihubungkan paralel dengan terminal keluaran generator. Kapasitor yang terpasang harus mampu memberikan daya reaktif yang dibutuhkan untuk menghasilkan fluksi di celah udara. Karena generator dapat melakukan eksitasi sendiri maka generator tersebut dinamakan generator induksi penguatan sendiri. Mesin induksi yang beroperasi sebagai generator ini bekerja dengan slip yang lebih kecil dari nol ($s < 0$).

2.1.1.2.1. Prinsip Kerja Generator Induksi

Gambar 2.4. Prinsip kerja generator induksi penguatan sendiri

Pada mesin induksi tidak terdapat hubungan listrik antara stator dengan rotor, karena arus pada rotor merupakan arus induksi. Jika belitan stator diberi tegangan tiga fasa, maka pada stator akan dihasilkan arus tiga fasa, arus ini kemudian akan menghasilkan medan magnet yang berputar dengan kecepatan sinkron (n_s) dan kemudian akan melakukan pengisian muatan ke kapasitor (C) yang dipasang paralel dengan stator yang tujuannya untuk mensuplai tegangan ke stator nanti untuk mempertahankan kecepatan sinkron (n_s) motor induksi pada saat dilakukan pelepasan sumber tegangan tiga fasa pada stator. Mesin dc sebagai *prime mover* yang dikopel dengan mesin induksi diputar secara perlahan memutar rotor mesin induksi hingga mencapai putaran sinkronnya ($n_r = n_s$). Saklar sumber tegangan tiga fasa untuk stator dilepas, dan



kapasitor yang sudah discharge akan bekerja dan akan mempertahankan besar n_s . Motor dc diputar hingga melewati kecepatan putaran sinkronnya mesin induksi ($n_r > n_s$), sehingga slip yang timbul antara putaran rotor dan putaran medan magnet menghasilkan slip negatif ($s < 0$) dan akan menghasilkan tegangan sehingga motor induksi akan berubah fungsi menjadi generator induksi.

Dari kurva karakteristik antara kecepatan dan kopel motor induksi di bawah ini dapat dilihat, jika sebuah motor induksi dikendalikan agar kecepatannya lebih besar daripada kecepatan sinkron oleh penggerak mula, maka arah kopel yang terinduksi akan terbalik dan akan beroperasi sebagai generator. Semakin besar kopel pada penggerak mula, maka akan memperbesar pula daya listrik yang dihasilkan. Pada gambar karakteristik diatas generator mulai menghasilkan tegangan pada saat putaran rotor (n_r) sedikit lebih cepat dari putaran sinkron (n_s) mesin induksi tersebut.

Pada motor induksi yang dioperasikan sebagai generator tidak terdapat pengatur tegangan seperti governor pada generator sinkron. Oleh karena itu tegangan keluaran sangat dipengaruhi oleh beban dan nilai kapasitor.

BAB III

MOTOR INDUKSI TIGA FASA

3.1. Umum

Motor induksi adalah motor listrik arus bolak-balik (*ac*) yang putaran rotornya tidak sama dengan putaran medan stator, dengan kata lain putaran rotor dengan putaran medan pada stator terdapat selisih putaran yang disebut slip.

Motor induksi, merupakan motor yang memiliki konstruksi yang baik, harganya lebih murah dan mudah dalam pengaturan kecepatannya, stabil ketika berbeban dan mempunyai efisiensi tinggi. Mesin induksi adalah mesin *ac* yang paling banyak digunakan dalam industri dengan skala besar maupun kecil, dan dalam rumah tangga. Alasannya adalah bahwa karakteristiknya hampir sesuai dengan kebutuhan dunia industri, pada umumnya dalam

kaitannya dengan harga, kesempurnaan, pemeliharaan, dan kestabilan kecepatan. Mesin induksi (asinkron) ini pada umumnya hanya memiliki satu suplai tenaga yang mengeksitasi belitan stator. Belitan rotornya tidak terhubung langsung dengan sumber tenaga listrik, melainkan belitan ini dieksitasi oleh induksi dari perubahan medan magnetik yang disebabkan oleh arus pada belitan stator.

Hampir semua motor ac yang digunakan adalah motor induksi, terutama motor induksi tiga fasa yang paling banyak dipakai di perindustrian. Motor induksi tiga fasa sangat banyak dipakai sebagai penggerak di perindustrian karena banyak memiliki keuntungan, tetapi ada juga kelemahannya.

Keuntungan motor induksi tiga fasa adalah:

1. motor induksi tiga fasa sangat sederhana dan kuat terutama bila motor dengan rotor sangkar.
2. biayanya murah dan keandalannya tinggi.
3. motor induksi tiga fasa memiliki efisiensi yang tinggi pada kondisi kerja normal.
4. perawatannya mudah.

Dan kerugiannya adalah:

1. kecepatannya tidak bisa bervariasi tanpa merubah efisiensi.
2. kecepatannya tergantung beban.
3. pada torsi start memiliki kekurangan.

3.2. Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi adalah motor ac yang paling banyak dipergunakan, karena konstruksinya yang kuat dan karakteristik kerjanya yang baik. Secara umum motor induksi terdiri dari rotor dan stator. Rotor merupakan bagian yang bergerak, sedangkan stator bagian yang diam. Diantara stator dengan rotor ada celah udara yang jaraknya sangat kecil. Konstruksi motor induksi dapat diperlihatkan pada gambar 2.1.

Komponen stator adalah bagian terluar dari motor yang merupakan bagian yang diam dan mengalirkan arus fasa. Stator terdiri atas tumpukan laminasi inti yang memiliki alur yang menjadi tempat kumparan dililitkan yang berbentuk silindris. Alur pada tumpukan laminasi inti diisolasi dengan kertas (Gambar 2.2.(b)). tiap elemen laminasi inti dibentuk dari lembaran besi (Gambar 2.2 (a)). Tiap lembaran besi tersebut memiliki beberapa alur dan beberapa lubang

pengikat untuk menyatukan inti. Tiap kumparan tersebar dalam alur yang disebut belitan fasa dimana untuk motor tiga fasa, belitan tersebut terpisah secara listrik sebesar 120° . Kawat kumparan yang digunakan terbuat dari tembaga yang dilapis dengan isolasi tipis. Kemudian tumpukan inti dan belitan stator diletakkan dalam cangkang silindris (Gambar 2.2.(c)). Berikut ini contoh lempengan laminasi inti, lempengan inti yang telah disatukan, belitan stator yang telah dilekatkan pada cangkang luar untuk motor induksi tiga fasa. Hal ini dapat kita lihat pada gambar 2.2

Untuk rotor akan dibahas pada bagian berikutnya, yaitu jenis – jenis motor induksi tiga fasa berdasarkan jenis rotornya.

3.3. Jenis Motor Induksi Tiga Fasa

Ada dua jenis motor induksi tiga fasa berdasarkan rotornya yaitu:

1. motor induksi tiga fasa sangkar tupai (squirrel-cage motor)
2. motor induksi tiga fasa rotor belitan (wound-rotor motor)

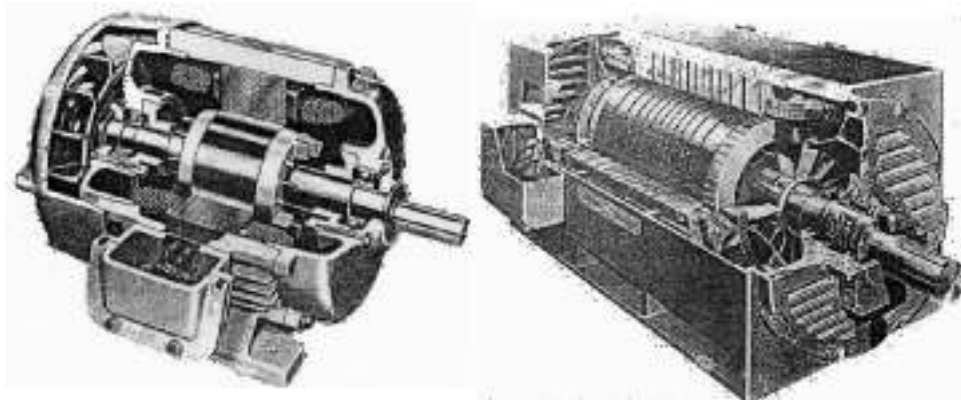
Kedua motor ini bekerja pada prinsip yang sama dan mempunyai konstruksi stator yang sama tetapi berbeda dalam konstruksi rotor.

3.3.1 Motor Induksi Tiga Fasa Sangkar Tupai (Squirrel-cage Motor)

Penampang motor sangkar tupai memiliki konstruksi yang sederhana. Inti stator pada motor sangkar tupai tiga fasa terbuat dari lapisan – lapisan pelat baja beralur yang didukung dalam rangka stator yang terbuat dari besi tuang atau pelat baja yang dipabrikasi. Lilitan – lilitan kumparan stator diletakkan dalam alur stator yang terpisah 120 derajat listrik. Lilitan fasa ini dapat tersambung dalam hubungan delta (Δ) ataupun bintang (Y).

Batang rotor dan cincin ujung motor sangkar tupai yang lebih kecil adalah coran tembaga atau aluminium dalam satu lempeng pada inti rotor. Dalam motor yang lebih besar, batang rotor tidak dicor melainkan dibenamkan ke dalam alur rotor dan kemudian dilas dengan kuat ke cincin ujung. Batang rotor motor sangkar tupai tidak selalu ditempatkan paralel terhadap poros motor tetapi kerap kali dimiringkan. Hal ini akan menghasilkan torsi yang lebih seragam dan juga mengurangi derau dengung magnetik sewaktu motor sedang berputar.

Pada ujung cincin penutup dilekatkan sirip yang berfungsi sebagai pendingin. Rotor jenis rotor sangkar standar tidak terisolasi, karena batangan membawa arus yang besar pada tegangan rendah. Motor induksi dengan rotor sangkar ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. (a) Konstruksi Motor Induksi Rotor Sangkar Ukuran Kecil
(b) Konstruksi Motor Induksi Rotor Sangkar Ukuran Besar

3.3.2 Motor Induksi Tiga Fasa Rotor Belitan (wound-rotor motor)

Motor rotor belitan (motor cincin slip) berbeda dengan motor sangkar tupai dalam hal konstruksi rotornya. Seperti namanya, rotor dililit dengan lilitan terisolasi serupa dengan lilitan stator. Lilitan fasa rotor dihubungkan secara Y dan masing – masing fasa ujung terbuka yang dikeluarkan ke cincin slip yang terpasang pada poros rotor. Secara skematik dapat dilihat pada gambar-3.7. Dari gambar ini dapat dilihat bahwa cincin slip dan sikat semata – mata merupakan penghubung tahanan kendali variabel luar ke dalam rangkaian rotor.

Pada motor ini, cincin slip yang terhubung ke sebuah tahanan variabel eksternal yang berfungsi membatasi arus pengasutan dan yang bertanggung jawab terhadap pemanasan rotor. Selama pengasutan, penambahan tahanan eksternal pada rangkaian rotor belitan menghasilkan torsi pengasutan yang lebih besar dengan arus pengasutan yang lebih kecil dibanding dengan rotor sangkar.

3.4. Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa

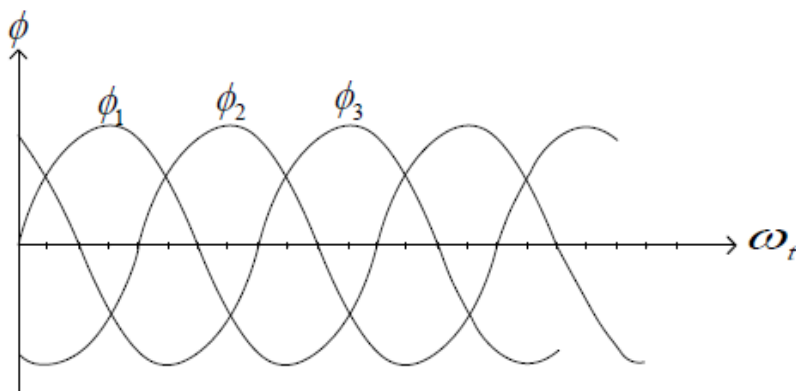
Bila sumber tegangan listrik tiga fasa yang seimbang, dihubungkan ke terminal belitan stator dari suatu motor induksi tiga fasa maka pada masing-masing belitan akan mengalir arus listrik yang sinusoidal yang besarnya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$I = I_m \cdot \sin \omega t \dots\dots\dots(3.1)$$

Arus pada masing-masing belitan stator akan menghasilkan fluksi (medan magnet) yang juga berbentuk sinusoidal sehingga dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\varphi = \varphi_m \cdot \sin \omega t \dots\dots\dots(3.2)$$

Dimana bentuk gelombang fluksi tiga fasa yang sama dan seimbang tersebut dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 3.2. Fluksi 3 fasa

Dimana bentuk gelombang fluksi tiga fasa yang sama dan seimbang tersebut dapat digambarkan sebagai berikut :

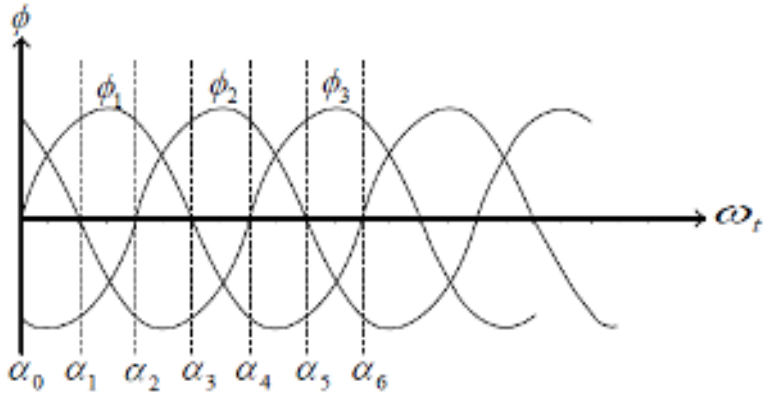
Untuk sistem tiga fasa yang seimbang, maka persamaan masing-masing fluksi adalah:

$$\varphi_1 = \varphi_m \cdot \sin \omega t \dots\dots\dots(3.3)$$

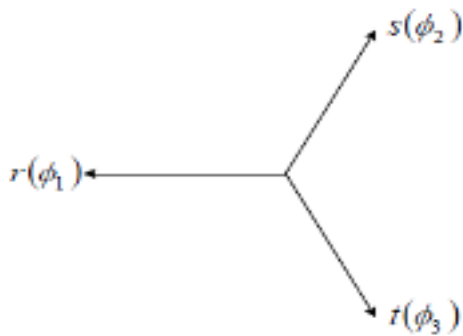
$$\varphi_2 = \varphi_m \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \dots\dots\dots(3.4)$$

$$\varphi_3 = \varphi_m \cdot \sin(\omega t - 240^\circ) \dots\dots\dots(3.5)$$

Besarnya resultan fluksi yang konstan pada motor induksi tiga fasa dikenal sebagai medan putar. Hal ini dapat kita lihat pada hal selanjutnya. Adapun analisis menentukan besar resultan fluksi pada motor induksi tiga fasa dapat dijelaskan pada gambar di bawah ini :

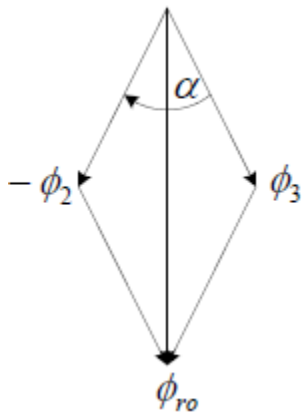


Gambar 3.3. Analisis Resultan Fluks



Gambar 3.4. Sudut Vektoris Tiga Fasa

- Untuk keadaan $\alpha_0 = 0^\circ$, maka:

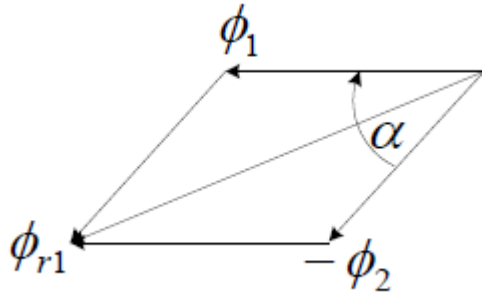


$$\varphi_1 = \varphi_m \sin 0^\circ = 0$$

$$\varphi_2 = \varphi_m \sin(-120^\circ) = -\frac{1}{2}\sqrt{3} \varphi_m$$

$$\varphi_3 = \varphi_m \sin(-240^\circ) = \frac{1}{2}\sqrt{3} \varphi_m$$

$$\varphi_{ro} = \sqrt{\varphi_2^2 + \varphi_3^2 + 2|\varphi_2|\varphi_3 \cos \alpha}$$



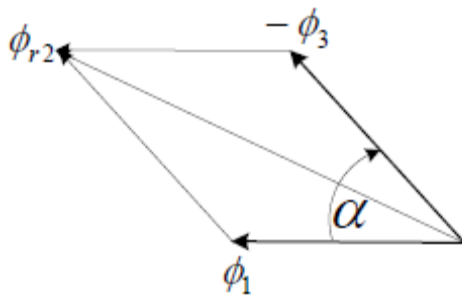
$$\varphi_1 = \varphi_m \sin 60^\circ = \frac{1}{2} \sqrt{3} \varphi_m$$

$$\varphi_2 = \varphi_m \sin(-60^\circ) = -\frac{1}{2} \sqrt{3} \varphi_m$$

$$\varphi_3 = \varphi_m \sin(-180^\circ) = 0$$

$$\begin{aligned} \varphi_{ro} &= \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + 2|\varphi_1|\varphi_2 \cos \alpha} \\ &= 1,5 \varphi_m \end{aligned}$$

- Untuk keadaan $\alpha_0 = 120^\circ$, maka:



$$\varphi_1 = \varphi_m \sin 120^\circ = \frac{1}{2} \sqrt{3} \varphi_m$$

$$\varphi_{12} = \varphi_m \sin 0^\circ = 0$$

$$\varphi_3 = \varphi_m \sin(180^\circ) = -\frac{1}{2} \sqrt{3} \varphi_m$$

$$\varphi_{ro} = \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_3^2 + 2|\varphi_1|\varphi_3 \cos \alpha}$$

$$= 1,5 \varphi_m$$

Untuk semua keadaan α , besar fluks resultan adalah konstan dengan nilai $1,5 \varphi_m$ dan berputar searah arah jarum jam pada setiap pertambahan sudut sebesar 60° atau 180° dari keadaan awal.

Bila motor induksi tersebut menggunakan rotor berjenis rotor belitan, maka besarnya arus rotor pada motor induksi tergantung pada tahanan luar (rheostat) motor dan tahanan rotor itu sendiri. Arus listrik yang mengalir pada kumparan-kumparan rotor motor induksi tiga fasa ini akan menimbulkan gaya listrik. Adapun besarnya gaya listrik ini adalah :

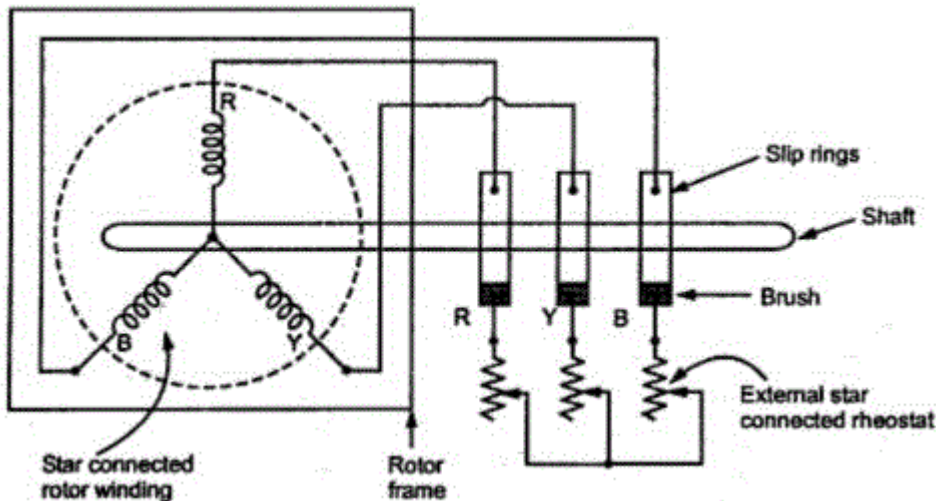
$$F = B \cdot I_r \cdot L \dots \dots \dots (3.6)$$

Di mana : F = Gaya listrik (Newton)

B = Kerapatan fluks (Weber/m²)

I_r = Arus rotor (ampere)

L = Panjang belitan rotor (meter)



Gambar 3.5. Rangkaian stator dan rotor motor sangkar

Bila jari-jari kumparan rotor adalah r , maka besarnya momen putar adalah :

$$T_r = F \cdot r \dots \dots \dots (3.7)$$

Di mana : T_r = Momen Putar (N.m)

r = Jari-jari kumparan rotor (meter)

Momen putar rotor ini akan bergerak searah dengan medan putar stator. Namun bergerak atau tidaknya rotor berputar tergantung dari besarnya beban yang dipikul oleh motor induksi. Bila besar beban yang dipikul oleh motor induksi melebihi momen putar rotor maka rotor tidak akan berputar. Di dalam hal ini jelas adanya perbedaan kecepatan dari medan putar stator (n_s) dengan kecepatan momen putar rotor (n_r). Perbedaan kecepatan ini biasanya disebut dengan slip. Adapun besarnya slip motor induksi adalah :

$$\text{Slip (S)} = \frac{n_r + n_s}{n_s} \times 100\% \dots \dots \dots (3.8)$$

Dimana : n_r = kecepatan rotor

persamaan (3.8) di atas memberikan informasi yaitu:

1. saat $s = 1$ dimana $n_r = 0$, ini berarti rotor masih dalam keadaan diam atau akan berputar
2. $s = 0$ menyatakan bahwa $n_s = n_r$, ini berarti rotor berputar sampai kecepatan sinkron. Hal ini dapat terjadi jika ada arus dc yang diinjeksikan ke belitan rotor, atau rotor digerakkan secara mekanik.
3. $0 < s < 1$, ini berarti kecepatan rotor diantara keadaan diam dengan kecepatan sinkron. Kecepatan rotor dalam keadaan inilah dikatakan kecepatan tidak sinkron. Biasanya slip untuk mendapatkan efisiensi yang tinggi pada saat beban penuh adalah 0,04.

Oleh karena perbedaan kecepatan medan putar stator (n_s) dengan kecepatan momen putar rotor (n_r) merupakan syarat agar rotor dapat berputar maka slip ini akan mempengaruhi frekuensi rotor dan tegangan induksi pada kumparan rotor. Adapun besar frekuensi rotor adalah :

$$f_r = \frac{P \cdot (n_s - n_r)}{n_s} = \frac{P \cdot n_s \cdot (n_s - n_r)}{120 \cdot n_s}$$
$$f_r = f_s \cdot s \text{ (Hz)} \dots \dots \dots (3.9)$$

Adapun besarnya tegangan induksi pada saat kumparan rotor sedang berputar adalah:

$$E_{rs} = 4,44 \cdot f_r \cdot N_r \cdot \phi_m$$

$$= 4,44 \cdot f_s \cdot s \cdot N_r \cdot \varphi_m$$

$$E_{rs} = E_r \cdot s \text{ (Volt)} \dots \dots \dots (3.10)$$

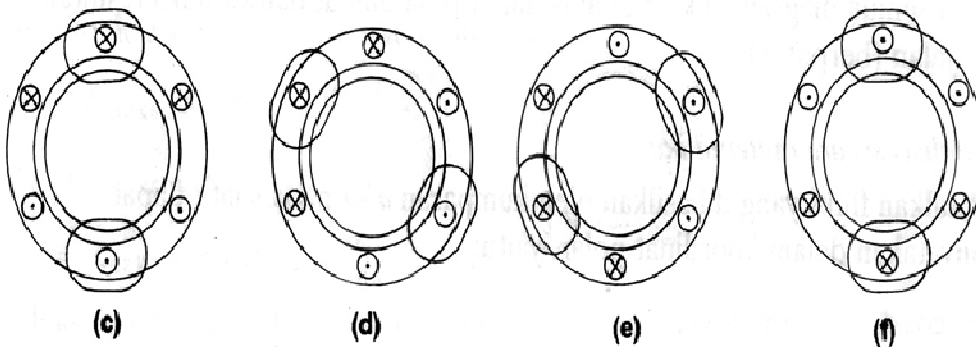
Adapun besar reaktansi rotor pada saat start adalah :

$$X_{rs} = 2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot L_r$$

$$X_{rs} = 2 \cdot X_r \cdot s \text{ (} \Omega \text{)} \dots \dots \dots (3.11)$$

3.5. Medan Putar

Ada beberapa metode yang dapat dilakukan untuk menganalisa medan putar. Pada kesempatan ini akan dibahas analisa medan putar secara vektor dan secara perhitungan.



Gambar 3.6. Medan Putar Pada Motor 3 Fasa

Dari gambar *c, d, e,* dan *f* tersebut terlihat fluks resultan ini akan berputar satu kali. Oleh karena itu untuk mesin dengan jumlah kutub lebih dari dua, kecepatan sinkron dapat diturunkan sebagai berikut :

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

f = frekuensi (Hz)

p = jumlah kutub

3.5.1 Analisa Medan Putar secara Vektor dan Perhitungan

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

pada stator dapat berupa hubungan Y atau .

untuk mempermudah memahami medan putar , maka dapat dilihat gambar (3.7) berikut yang menggambarkan keadaan pada kumparan yang dialiri oleh arus dari sumber tiga fasa. Misalkan arus yang mengalir pada ketiga kumparan tersebut sebesar:

$$i_{aa'}(t) = I_M \sin \omega t \text{ Ampere} \dots \dots \dots (3.12.a)$$

$$i_{bb'}(t) = I_M \sin(\omega t - 120^\circ) \text{ Ampere} \dots \dots \dots (3.12.b)$$

$$i_{cc'}(t) = I_M \sin(\omega t - 240^\circ) \text{ Ampere} \dots \dots \dots (3.12.c)$$

Arus yang ada pada kumparan aa' mengalir dari a dan keluar menuju ke a' . Karena arus yang mengalir pada kumparan aa' ini, maka dihasilkan kerapatan medan magnet (H) pada kumparan aa' sebesar

$$H_{aa'}(t) = H_M \sin \omega t \angle 0^\circ \text{ Amp turns/m} \dots \dots \dots (3.13.a)$$

Dan kerapatan medan magnet pada kumparan bb' dan cc' sebesar:

$$H_{bb'}(t) = H_M \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \text{ Amp.turns/m} \dots \dots \dots (3.13.b)$$

$$H_{cc'}(t) = H_M \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \text{ Amp.turns/m} \dots \dots \dots (3.13.c)$$

Telah diketahui bahwa kerapatan fluks (B) dapat dihitung dari intensitas medan magnet (H), yaitu

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \text{ Tesla} \dots \dots \dots (3.14)$$

Maka didapat kerapatan fluks pada masing – masing kumparan, yaitu

$$B_{aa'}(t) = B_M \sin \omega t \angle 0^\circ \text{ Tesla} \dots \dots \dots (3.15.a)$$

$$B_{bb'}(t) = B_M \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \text{ Tesla} \dots \dots \dots (3.15.b)$$

$$B_{cc'}(t) = B_M \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \text{ Tesla} \dots \dots \dots (3.15.c)$$

Pada persamaan kerapatan fluks diatas , dimana $B_M = \mu H_M$. kerapatan fluks dapat dihitung resultannya dengan menentukan nilai dari waktu (t), sehingga resultan kerapatan fluks ada nilainya, misalnya pada saat $\omega t = 0$, maka kerapatan fluks pada masing – masing kumparan stator sebesar:

$$B_{aa'} = 0$$

$$B_{bb'} = B_M \sin(-120^\circ) \angle 120^\circ$$

$$B_{cc'} = B_M \sin(-240) \angle 240^\circ$$

Resultan kerapatan fluks pada stator sebesar

$$\begin{aligned} B_{net} &= B_{aa'} + B_{bb'} + B_{cc'} \\ &= 0 + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}B_M\right) \angle 120^\circ + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}B_M\right) \angle 240^\circ \\ &= 1,5B_M \angle -90^\circ \text{ Tesla} \end{aligned}$$

Jika $\omega t = 90^\circ$, maka:

$$\begin{aligned} B_{aa'} &= B_M \angle 0^\circ \\ B_{bb'} &= -0,5B_M \angle 120^\circ \\ B_{cc'} &= -0,5B_M \angle 240^\circ \\ B_{net} &= B_{aa'} + B_{bb'} + B_{cc'} \\ B_{net} &= B_M \angle 0^\circ + (-0,5B_M) \angle 120^\circ + (-0,5B_M) \angle 240^\circ \\ &= 1,5 B_M \angle 0^\circ \text{ Tesla} \end{aligned}$$

Dari perhitungan saat $\omega t = 0$ dan saat $\omega t = 90^\circ$ dihasilkan resultan medan magnet yang sama besar amplitudonya, hanya berbeda sudutnya. Seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.8 dan gambar 3.9, terlihat jelas bahwa medan magnet yang dihasilkan ini berputar tergantung terhadap waktu (t).

Pada analisa medan putar secara vektoris, diketahui bahwa pada harga waktu(t) berapapun nilainya maka didapat magnitudo dari resultan medan magnet sebesar $1,5 B_M$. Dan ini akan terus konstan dan berputar dengan kecepatan sudut ω .

Dalam sistem koordinat, dimana garis horizontal positif disimbolkan dengan x dan garis vertikal keatas disimbolkan dengan y . \bar{a}_x disimbolkan sebagai vektorsatuan dari garis horizontal dan \bar{a}_y sebagai vektor satuan dari garis vertikal. Untuk mendapatkan persamaan umum dari resultan fluks magnetik (B_{net}) maka dijumlahkan kerapatan fluks magnetik yang dihasilkan pada masing – masing kumparan stator secara vektoris.

Resultan fluks magnet pada stator dinyatakan dengan persamaan:

$$\begin{aligned} \bar{B}_{net}(t) &= \bar{B}_{aa'}(t) + \bar{B}_{bb'}(t) + \bar{B}_{cc'}(t) \quad (\text{Tesla}) \\ &= B_M \sin \omega t \angle 0^\circ + B_M \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ + B_M \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \\ &= B_M \sin \omega t (\cos 0 + j \sin 0) + B_M \sin(\omega t - 120) (\cos 120 + j \sin 120) + B_M \sin(\omega t - 240) (\cos 240 + j \sin 240) \\ &= B_M \sin \omega t (1) + B_M \sin(\omega t - 120) \left(-0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) + B_M \sin(\omega t - 240) \left(-0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \end{aligned}$$

Dengan menganggap komponen ril berada pada sumbu x dan komponen khayal pada sumbu y, maka Persamaan diatas dapat dinyatakan dalam komponen $\bar{a}x$ dan $\bar{a}y$.

$$\begin{aligned} \bar{B}_{net}(t) = & B_M \sin \omega t \bar{a}x - [0,5B_M \sin(\omega t - 120^\circ)]\bar{a}x + [\frac{\sqrt{3}}{2}B_M \sin(\omega t - 120^\circ)]\bar{a}y - \\ & [0,5B_M \sin(\omega t - 240^\circ)]\bar{a}x - [\frac{\sqrt{3}}{2}B_M \sin(\omega t - 240^\circ)]\bar{a}y \quad (\text{Tesla}) \end{aligned}$$

Komponen-komponen vektor x dan y dapat disatukan menjadi sebagai berikut ini:

$$\begin{aligned} \bar{B}_{net} = & [B_M \sin \omega t - 0,5B_M \sin(\omega t - 120^\circ) - 0,5B_M \sin(\omega t - 240^\circ)]\bar{a}x \\ & + [\frac{\sqrt{3}}{2}B_M \sin(\omega t - 120^\circ) - \frac{\sqrt{3}}{2}B_M \sin(\omega t - 240^\circ)]\bar{a}y \end{aligned}$$

Karena, $\sin(\omega t - 120^\circ) = -0,5 \sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t$

$$\sin(\omega t - 240^\circ) = -0,5 \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t$$

Maka didapat :

$$\bar{B}_{net} = [B_M \sin \omega t - 0,5B_M (0,5 \sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t) 0,5B_M (-0,5 \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t)]\bar{a}x$$

$$[\frac{\sqrt{3}}{2}B_M (-0,5 \sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t) - \frac{\sqrt{3}}{2}B_M (-0,5 \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t)]\bar{a}y$$

$$\bar{B}_{net} = [B_M \sin \omega t - \frac{1}{4}B_M \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{4}B_M \cos \omega t + \frac{1}{4}B_M \sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{4}B_M \cos \omega t]\bar{a}x$$

$$[-\frac{\sqrt{3}}{4}B_M \sin \omega t - \frac{3}{4}B_M \cos \omega t + \frac{\sqrt{3}}{4}B_M \sin \omega t - \frac{3}{4}B_M \cos \omega t]\bar{a}y$$

$$\bar{B}_{net} = (1,5 B_M \sin \omega t)\bar{a}x - (1,5 B_M \cos \omega t)\bar{a}y \quad (\text{Tesla}) \dots \dots \dots (3.16)$$

Dari persamaan (3.16) diatas, jika dimasukkan nilai $\omega t=0^\circ$ maka dihasilkan fluks medan magnet sebesar $1,5B_M \angle 90^\circ$ dan jika $\omega t=90^\circ$ didapat fluks medan magnet sebesar $1,5B_M \angle 0^\circ$. Hasil perhitungan ini menyatakan bahwa fluks medan magnet yang dihasilkan pada kumparan stator motor induksi tiga fasa berputar terhadap waktu (t).

3.6. Rangkaian Ekvivalen Motor Induksi

Pada prinsipnya proses “induksi” yang terjadi pada motor induksi hampir sama seperti pada transformator yang berbeban resistif, sehingga penggambaran rangkaian ekivalen motor induksi berdasarkan rangkaian ekivalen transformator, dimana stator identik dengan sisi primer transformator dan rotor identik dengan sisi sekunder transformator. Perbedaannya, pada

kumparan rotor (sekunder) motor induksi terhubung singkat dan berputar. Disamping itu perbedaan yang mendasar antara keduanya adalah transformator merupakan mesin listrik statis, sedangkan motor induksi adalah mesin listrik dinamis.

Rangkaian ekivalen motor induksi untuk masing-masing sisi dapat diperlihatkan seperti berikut ini :

3.6.1 Ditinjau Dari Sisi Rotor

Pada saat motor induksi bergerak $n_r > 0$ dan $n_r < n_s$, maka berdasarkan persamaan (3.14) akan terjadi slip (s).

Jika kumparan rotor dihubungkan dengan suatu beban, maka pada kumparan rotor akan mengalir arus I_r yang sumbernya E_r .

$$E_r = I_r \cdot (R_r + X_r) \dots \dots \dots (3.17)$$

Apabila harga-harga ggl induksi dilihat dari rotor, maka :

$$E_r = \frac{E_s}{a} \dots \dots \dots (3.18)$$

Dimana :

$$a = \frac{E_r}{E_s} = \frac{I_r}{I_s} \dots \dots \dots (3.19)$$

a : adalah konstanta perbandingan.

Berdasarkan persamaan (3.17) didapat ggl induksi pada bagian rotor yaitu:

$$\begin{aligned} E_r &= I_r \cdot R_r + I_r \cdot X_r \\ s \cdot E_r &= s \cdot I_r \cdot R_r + s \cdot I_r \cdot X_r \\ E_{rs} &= s \cdot I_r \cdot R_r + s \cdot I_r \cdot X_r \dots \dots \dots (3.20) \end{aligned}$$

Karena frekuensi rotor maupun frekuensi stator tidak mempengaruhi resistansi rotor, sehingga persamaan (3.20) menjadi :

$$E_{rs} = I_r \cdot R_r + s \cdot I_r \cdot X_r \dots \dots \dots (3.21)$$

Rangkaian ekivalen pada persamaan (3.21) ditunjukkan pada gambar (3.12) berikut ini :



Gambar 3.7. Rangkaian Ekivalen Pendekatan Motor Induksi

Bila persamaan (3.19) disubsitusikan ke persamaan (3.20) maka diperoleh :

$$E_{rs} = \frac{s.R_s}{a^2} \cdot I_r + \frac{sX_s}{a^2} \cdot I_r \dots \dots \dots (3.22)$$

Mengingat bahwa frekuensi rotor maupun frekuensi stator tidak mempengaruhi resistansi stator ($f_r = f_s \cdot s$), maka persamaan (3.23) menjadi :

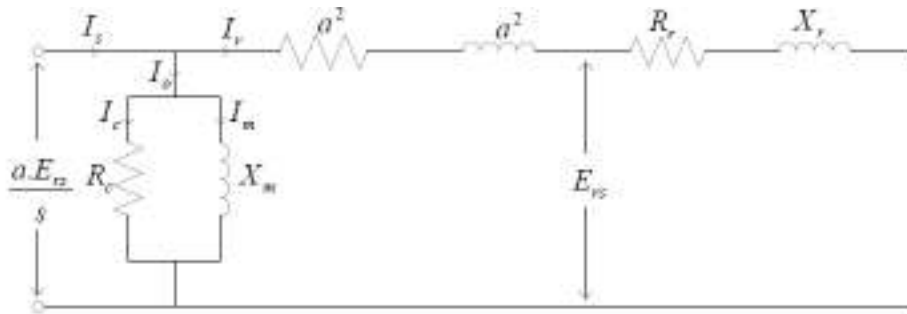
$$E_{rs} = \frac{R_s}{a^2} \cdot I_r + \frac{sX_s}{a^2} \cdot I_r \dots \dots \dots (3.23)$$

Dari persamaan (3.24) didapat :

$$I_r = \frac{a^2 \cdot E_{rs}}{(R_s + j_s \cdot X_s)} \dots \dots \dots (3.24)$$

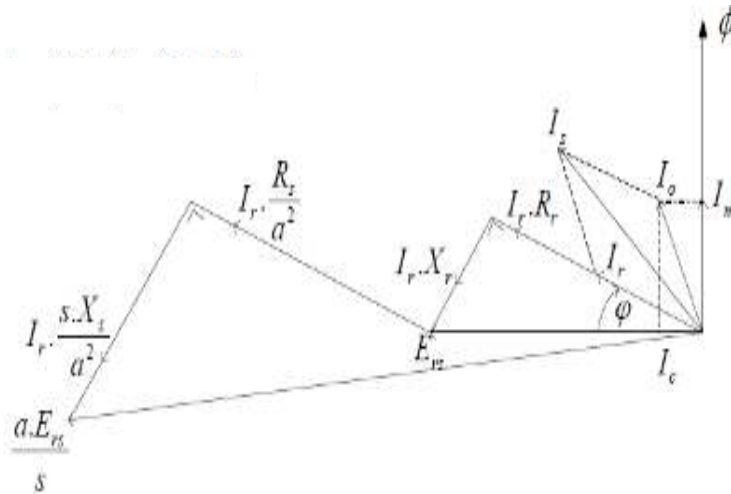
$$\cos \varphi = \frac{R_r}{X_r} \dots \dots \dots (3.25)$$

Dari persamaan (3.23) rangkaian ekivalen motor ditunjukkan pada gambar (3.8.) berikut ini :



Gambar 3-8. Rangkaian Ekivalen Pada Saat Motor Bergerak Dilihat dari rotor

Diagram vektor dari motor induksi tiga fasa pada gambar (3.10) ditunjukkan pada gambar (3.11) berikut ini :



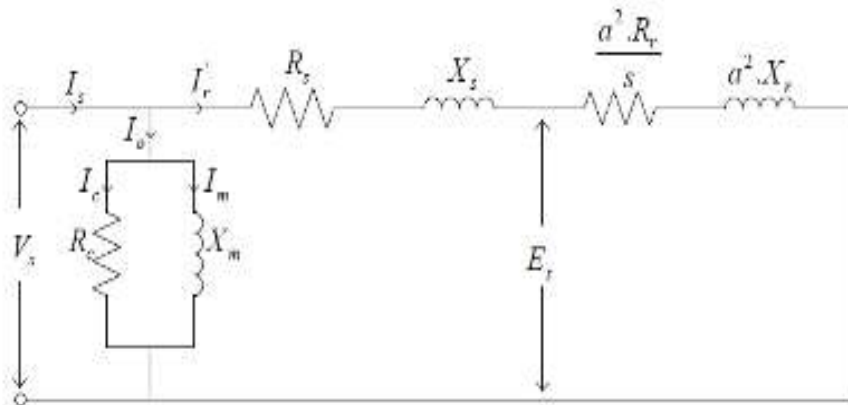
Gambar 3.9. Diagram Vektor Pada Saat Motor Berputar Dilihat dari Rotor

3.6.2 Ditinjau Dari Sisi Stator

Dengan mensubstitusikan persamaan (3.20) pada persamaan (3.21) maka didapat :

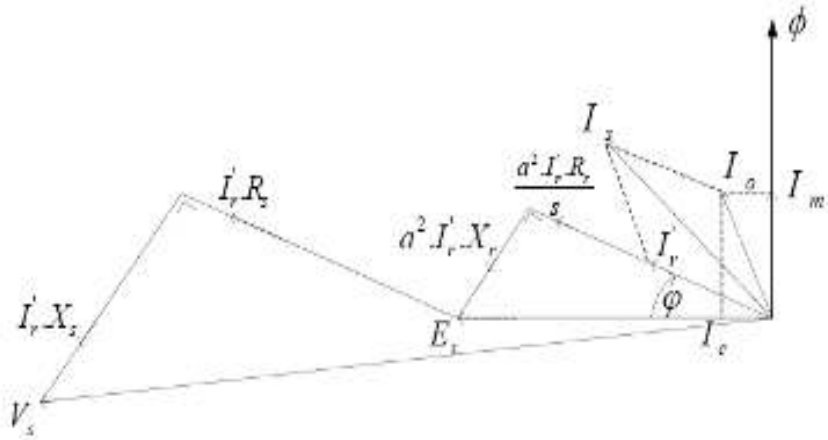
$$E_s = a^2 \cdot \frac{I_r \cdot R_r}{s} + a^2 \cdot I_r \cdot X_r \dots \dots \dots (3.26)$$

Dari persamaan (3.26) rangkaian ekivalen motor ditunjukkan pada gambar pada gambar (3.10) berikut ini :



Gambar 3.10. Rangkaian Ekivalen Pada Saat Motor Bergerak Dilihat Dari Stator

Diagram vektor dari motor induksi tiga fasa pada gambar (3.12) ditunjukkan pada gambar (3.13) berikut ini :



Gambar 3.11. Diagram vektor Pada Saat Motor Berputar Dilihat Dari Stator

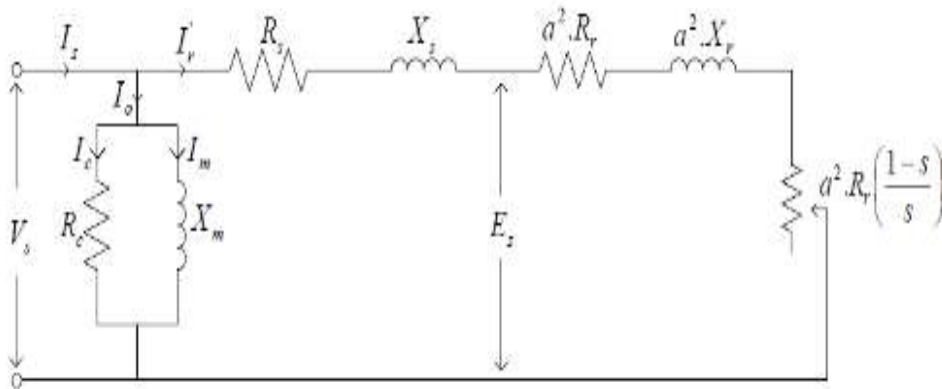
Nilai $\frac{R_r}{s}$ dapat dijabarkan menjadi :

$$\frac{R_r}{s} = \frac{R_r}{s} + R_r - R_r$$

$$\frac{R_r}{s} = R_r + \frac{R_r}{s} - R_r$$

$$\frac{R_r}{s} = R_r + R_r \left(\frac{1-s}{s} \right) \dots \dots \dots (3.27)$$

Bila persamaan (3.27) disubsitusikan ke persamaan (3.26), maka didapat rangkaian ekuivalen motor induksi menjadi :



Gambar 3.12. Rangkaian Pengganti Pada Saat Motor Berputar Dilihat Dari Stator

Dari persamaan 3.26 didapat nilai :

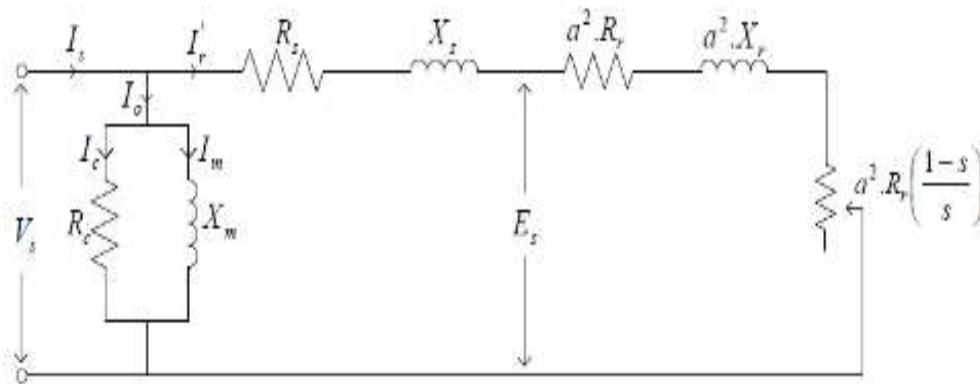
$$I'_r = \frac{E_s}{a^2 \cdot \left(\frac{R_r}{s} + jX_r \right)} \dots \dots \dots (3.28)$$

$$\cos \varphi = \frac{\frac{R_r}{s}}{\frac{R_r}{s} + jX_r} \dots\dots\dots(3.29)$$

3.7. Aliran Daya dan Arus Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi tidak dapat berputar pada kecepatan sinkron. Seandainya hal ini terjadi, maka rotor akan tetap diam relatif terhadap fluksi yang berputar. Maka tidak akan ada ggl yang diinduksikan dalam rotor, tidak ada arus yang mengalir pada rotor, dan karenanya tidak akan menghasilkan kopel. Kecepatan rotor sekalipun tanpa beban, harus lebih kecil sedikit dari kecepatan sinkron agar adanya tegangan induksi pada rotor, dan akan menghasilkan arus di rotor, arus induksi ini akan berinteraksi dengan fluks listrik sehingga menghasilkan kopel. Selisih antara kecepatan rotor dengan kecepatan sinkron disebut *slip* (*s*). Slip dapat dinyatakan dalam putaran setiap menit, tetapi lebih umum dinyatakan sebagai persen dari kecepatan sinkron.

Telah kita ketahui bersama, bahwa arus start motor induksi 3 fasa lebih besar 5 sampai 7 kali arus nominalnya. Untuk membuktikan arus start tersebut, dapat kita lihat pada rangkaian ekivalen berikut :



Gambar 3.13. Rangkaian Ekivalen Motor Induksi 3 Fasa

Dengan memperhatikan model rangkaian diketahui bahwa daya masuk stator untuk motor induksi tiga fasa adalah :

$$P_s = 3.V_s .I_s \cos \varphi \dots\dots\dots (3.30)$$

Dimana : V_s = tegangan sumber (*volt*)

I_s = arus masukan (ampere)

φ = perbedaan sudut fasa antara arus masukan dan tegangan sumber

Daya masuk rotor (terdapat pada celah udara) :

$$P_r = 3 \cdot E_s \cdot I'_r \cdot \cos \varphi \dots \dots \dots (3.31)$$

Bila persamaan (3.29) dan persamaan (3.30) disubsitusikan ke persamaan (3.32), maka besar daya input rotor pada motor induksi tiga fasa adalah :

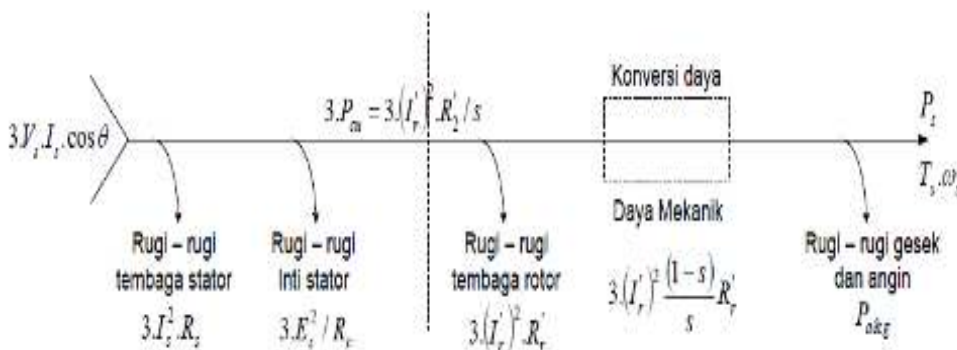
$$P_{r(in)} = \frac{3R_s^2 \cdot a^2 R_r \cdot s}{(a^2 \cdot R_r)^2 + (a^2 \cdot X_r \cdot s)^2} \dots \dots \dots (3.32)$$

Sebelum daya ditransfer melewati celah udara, motor induksi mengalami rugi-rugi berupa rugi-rugi tembaga stator ($P_{ts} = 3I_s^2 \cdot R_s$) dan rugi-rugi inti stator ($P_{is} = 3E_s^2/R_c$). Daya yang ditransfer melalui celah udara ($3 \cdot P_{cu}$) sama dengan penjumlahan rugi-rugi tembaga rotor ($3 \cdot P_{tr}$) dan daya mekanik ($3 \cdot P_d$). Daya yang ditransfer melalui celah udara ini sering disebut dengan daya input rotor.

$$3 \cdot P_{cu} = 3 \cdot P_{tr} + 3 \cdot P_d$$

$$3 \cdot P_{cu} = 3(I'_r)^2 \cdot R_r + 3(I'_r) \cdot \left(\frac{1-s}{s}\right) R_r = 3 \cdot (I'_r)^2 \frac{R_r}{s} \dots \dots \dots (3.33)$$

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar (3.14) yang menggambarkan diagram aliran daya motor induksi tiga fasa.



Gambar 3.14. Diagram Aliran Daya Pada Motor Induksi Tiga Fasa

Hubungan antara rugi-rugi tembaga rotor dan daya mekanik dengan daya masukan rotor, masing-masing dalam besaran dapat ditulis sebagai berikut :

$$P_{tr} = 3 \cdot (I'_r)^2 \cdot R_r = s \cdot P_{cu} \dots\dots\dots(3.34)$$

$$P_d = (I'_r)^2 \cdot R_r \left(\frac{1-s}{s} \right) = (1-s) \cdot P_{cu} \dots\dots\dots(3.35)$$

Dari gambar (3.16) dapat dilihat bahwa motor induksi juga mengalami rugi-rugi gesek dan angin ($P_{a\&g}$) sehingga daya output mekanik yang merupakan daya penggerak poros (n) sama dengan daya mekanik total ($3P_d$) dikurangi rugi-rugi gesek dan angin ($P_{a\&g}$).

$$P_0 = 3 \cdot P_d - P_{a\&g} = T_s \omega_m \dots\dots\dots(3.36)$$

Dengan : T_s = Torsi penggerak poros (N.m)

ω_m = Kecepatan sudut poros (rad/s)

Effisiensi suatu motor induksi dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\eta = \left(\frac{P_0}{P_i} \right) \times 100\% = \frac{P_i - \Sigma P_{rugi}}{P_i} \times 100\% \dots\dots\dots(3.37)$$

$$\Sigma P_{rugi} = P_{ts} + P_{is} + P_{tr} + P_{a\&g} + P_b \dots\dots\dots(3.38)$$

$$P_i = \sqrt{3} \cdot V_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots(3.39)$$

Dimana : η = effisiensi

P_0 = daya keluaran (watt)

P_i = daya masukan (watt)

ΣP_{rugi} = rugi-rugi total motor (watt)

P_{ts} = rugi tembaga stator (watt)

P_{is} = rugi inti stator (watt)

P_{tr} = rugi tembaga rotor (watt)

$P_{a\&g}$ = rugi gesek dan angin (watt)

P_b = rugi buta/lain-lain (watt)

3.8. Frekuensi Rotor

Ketika rotor masih dalam keadaan diam, dimana frekuensi arus pada rotor sama seperti frekuensi masukan (sumber). Tetapi ketika rotor akan berputar, maka frekuensi rotor akan bergantung kepada kecepatan relatif atau bergantung terhadap besarnya slip. Untuk besar slip tertentu, maka frekuensi rotor sebesar f' yaitu,

$$n_s - n_r = \frac{120f'}{p}, \text{ diketahui bahwa } n_s = \frac{120f}{p}$$

Dengan membagikan dengan salah satu, maka didapatkan :

$$\frac{f'}{f} = \frac{n_s - n_r}{n_s} = s$$

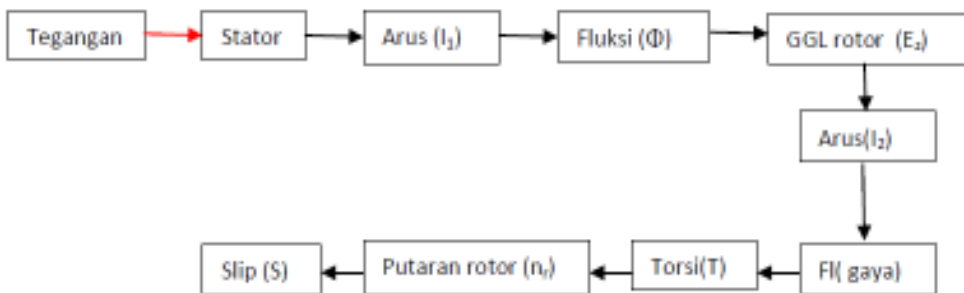
Maka $f' = sf$ (Hz)(3.40)

Telah diketahui bahwa arus rotor bergantung terhadap frekuensi rotor $f' = sf$ dan ketika arus ini mengalir pada masing – masing phasa di belitan rotor, akan memberikan reaksi medan magnet. Biasanya medan magnet pada rotor akan menghasilkan medan magnet yang berputar yang besarnya bergantung atau relatif terhadap putaran rotor sebesar sn_s .



Pada keadaan tertentu, arus rotor dan arus stator menghasilkan distribusi medan magnet yang sinusoidal dimana medan magnet ini memiliki magnetudo yang konstan dan kecepatan medan putar n_s yang konstan. Kedua Hal ini merupakan medan magnetik yang berputar secara sinkron. kenyataannya tidak seperti ini karena pada stator akan ada arus magnetisasi pada kumparannya.

3.9. Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Putaran dan Daya Masuk motor induksi tiga fasa

Dari pembahasan di atas dapat kita lihat bagaimana hubungan perubahan beban terhadap motor induksi tiga fasa. Dapat kita lihat pada rangkaian ekivalen motor induksi sebelumnya (gambar 3.13) maka kita dapat mengambil hubungan antara perubahan beban terhadap putaran. Hal itu terlihat dari prinsip kerja motor induksi tersebut,yang diuraikan sebagai berikut :



Keterangan :

-  : Diberikan kepada
-  : Menghasilkan

Apabila sumber tegangan tiga fasa di berikan kepada kumparan stator akan timbul medan putar dengan kecepatan $n_s = 120 \text{ f/p}$, medan putar stator tersebut akan memotong batang konduktor pada rotor. Sebagai akibatnya pada kumparan jangkar timbul tegangan asinkron (GGL), karena kumparan jangkar merupakan rangkaian tertutup maka ggl akan menghasilkan arus I, adanya arus I di dalam medan magnet akan menghasilkan gaya F pada rotor, jika kopel mula yang dihasilkan oleh gaya F pada rotor cukup besar untuk memikul kopel beban maka rotor akan berputar searah dengan medan putar stator. Kecepatan putar rotor tidak akan mencapai pada putaran sinkronnya, disebabkan jika rotor berputar sama dengan kecepatan sinkronnya maka batang konduktor pada rotor tidak akan terpotong oleh medan magnet sehingga tidak terjadi induksi pada rotor. Perbedaan kecepatan antara n_r dan n_s disebut *slip* (s).

Dari uraian di atas dapat kita lihat bahwa tegangan tersebut mempengaruhi bagaimana proses pembentukan slip.

Dan jika terjadi perubahan tegangan pada sumber maka akan terjadi perubahan di semua tahap (alur) proses prinsip kerja tersebut. Dan kepada efisiensi motor, hal ini mempengaruhi pada rugi – rugi yang dialami oleh motor tersebut, seperti rugi – rugi pada stator :

- Rugi tembaga stator ($I_1^2 \times R_1$) dan rugi inti stator
- Rugi – rugi lainnya.

Dan rugi – rugi pada rotor yaitu :

- Rugi tembaga rotor ($I_2^2 \times R_2$) dan rugi inti rotor
- Rugi gesek dan angin
- Dan rugi – rugi lainnya.

Berdasarkan persamaan – persamaan dalam mencari efisiensi di atas, dapat kita lihat dari persamaan 3.37 sampai persamaan 3.39 terlihat bahwa perubahan tegangan dari sumber sangat mempengaruhi besar daya keluaran motor yang berupa putaran (n_r) dan juga dipengaruhi besar

torsi beban. Dan perubahan tegangan ini juga berpengaruh terhadap arus dalam motor. Sehingga perubahan tegangan ini sangat menentukan dalam daya keluaran motor yang berupa putaran dan rugi – rugi.

Semua besarnya rugi – rugi ini juga sangat dipengaruhi besarnya tegangan yang masuk di stator. Jika motor dalam keadaan yang baik, maka efisiensi motor akan berubah sesuai dengan perubahan tegangan tersebut. Tetapi perubahan tegangan tersebut mempunyai batas – batas tertentu untuk masing – masing motor induksi. Hal ini disebabkan kenaikan tegangan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan arus yang besar, sehingga menimbulkan panas yang terlalu tinggi yang dapat menyebabkan kerusakan bahan isolasi motor induksi. Hal ini yang menyebabkan suatu motor induksi itu dibatasi perubahan tegangan yang masih dapat ditanggung / dipikulnya. Dan juga agar motor induksi ini jangan mengalami kerusakan, kemungkinan selain karena usia motor induksi ini sudah mulai tua.