

MERANCANG MOTOR INDUKSI TIGA PHASA SEBAGAI GENERATOR (1/2 HP/380 VOLT/50 HZ/4 POLE)

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Ujian Sarjana

OLEH :

MARHAM SIMBOLON
05 812 0025



PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA

UNIVERSITAS MEDAN AREA

2010

ABSTRAK

Motor induksi merupakan salah satu penggerak yang paling sering dipakai di dalam aplikasi industri. Disamping fungsinya sebagai motor penggerak, motor induksi bisa juga dipakai sebagai generator, baik itu generator berkapasitas daya besar maupun daya kecil. Secara umum konstruksi motor induksi sama dengan generator induksi, hanya saja generator induksi memerlukan adanya prime over, dan harus memiliki slip negatif artinya kecepatan putaran rotor harus lebih besar daripada kecepatan medan putar. Jadi perputaran rotor diputar sedemikian rupa sehingga mendahului perputaran medan magnetnya. Perputaran medan magnet ini timbul karena adanya arus magnetisasi yang diberikan jala-jala kepada kumparan stator. Oleh karena itu maka motor induksi dapat dioperasikan sebagai generator induksi (MISG).

Motor Induksi Sebagai Generator (MISG) banyak diterapkan pada Pembangkit Tenaga Listrik Mikrohidro (PLTMh). Digunakannya generator induksi dikarenakan harga murah dan mudah perawatannya, serta banyak tersedia di pasaran. Salah satu kelemahan utama generator induksi adalah tegangan keluaran yang sangat terpengaruh beban. Oleh karena itu perlu dilakukan pengendalian tegangan agar tetap setimbang pada setiap penambahan beban sesuai dengan tegangan yang diijinkan. Salah satu caranya adalah membuat tahanan penyeimbang. Tahanan penyeimbang ini dapat berupa variabel yang dipasang secara paralel terhadap beban yang dapat distel setiap perubahan beban tersebut.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN

KATA PENGANTAR	i
ABSTRAK	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	viii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	2
1.3. Manfaat Penelitian	3
1.4. Batasan Masalah	3
BAB II MOTOR INDUKSI TIGA PHASA	4
2.1. Umum	4
2.2. Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa	4
2.3. Medan Putar	7
2.4. Rangkaian Ekvivalen Motor Induksi Tiga Fasa	11
2.5. Aliran Daya Pada Motor Induksi Tiga Fasa	17
BAB III MOTOR INDUKSI SEBAGAI GENERATOR	22
3.1. Umum	22
3.2. Pembangkitan Tegangan Induksi pada Motor Induksi sebagai Generator	23

UNIVERSITAS MEDAN AREA

3.3. Daya keluaran Generator Induksi Document Accepted 7/12/25

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

3.4. Penentuan nilai kapasitor 29

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area
Access From (repository.uma.ac.id)7/12/23

BAB IV PERANCANGAN DAN PERCOBAAN PADA MISG	32
4.1. Umum	32
4.2. Data Perancangan	32
4.3. Penentuan Nilai Kapasitor yang Digunakan	33
4.4. Alat-alat yang Digunakan	35
4.5. Rangkaian percobaan	35
4.6. Bentuk Tegangan yang Dihasilkan	35
4.7. Karakteristik Tegangan terhadap Besarnya Kapasitor yang Digunakan.....	37
4.8. Karakteristik Tegangan Terhadap Besarnya rpm/slip	38
4.9. Karakteristik Pembebanan MISG	40
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	43
5.1. Kesimpulan	43
5.2. Saran	43
DAFTAR PUSTAKA	45
LAMPIRAN	46

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Semakin terbatasnya bahan bakar pembangkit listrik konvensional membuat krisis listrik makin larut berkepanjangan pada masa kini. Salah satu cara untuk mengantisipasi hal ini adalah mencari sumber energi listrik alternatif untuk menggantikannya, yaitu dengan cara menggunakan energi yang dapat diperbaharui. Salah satunya adalah dengan menggunakan pembangkit listrik tenaga mikrohidro. Generator yang dipakai adalah Motor Induksi Sebagai Generator (MISG). Motor Induksi tiga fasa dapat dioperasikan sebagai generator satu fasa maupun tiga fasa.

Motor induksi merupakan motor yang banyak digunakan baik di industri rumah tangga maupun industri skala besar. Hal ini dikarenakan konstruksi motor induksi yang kuat, sederhana serta tidak membutuhkan perawatan yang sangat banyak.

Motor induksi tiga fasa dapat dioperasikan sebagai genarator dengan cara memutar rotor pada kecepatan di atas kecepatan putaran sinkronnya atau mesin bekerja pada slip negatif ($s < 0$).

$$n_s = \frac{120f}{p}$$

Dimana :

- n_s : Kecepatan medan putar, rpm
- f : Frekuensi sumber daya, Hz
- p : Jumlah kutub motor induksi

Kecepatan putar rotor tidak sama dengan kecepatan medan putar, putaran motor harus lebih cepat daripada kecepatan medan putarnya sehingga menghasilkan slip negatif.

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s}, \text{ dengan } n_r > n_s$$

Dimana :

- s : slip
- n_s : Kecepatan medan putar, rpm
- n_r : Kecepatan putar motor, rpm

Salah satu kelemahan utama generator induksi adalah tegangan keluaran yang sangat terpengaruh beban, oleh karena itu diperlukan suatu pengaturan tegangan sehingga perubahan tegangan tidak sampai mengganggu kontinuitas penyaluran daya oleh Motor Induksi Sebagai Generator (MISG) tersebut.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian Tugas akhir ini adalah :

1. Mengetahui rancangan motor induksi 3 fasa sebagai generator
2. Merancang system kerja motor induksi 3 fasa sebagai generator
3. Mengambil beberapa karakter MISG

1.3. Manfaat Penelitian

1. Mengetahui besar nilai kapasitor yang akan disuplai pada motor induksi sebagai generator untuk membangkitkan arus eksitasi yang diperlukan
2. Menambah aplikasi–aplikasi pada laboratorium menambah energi listrik.
3. Menambah pengetahuan kepada penulis dan pembaca bagaimana merancang motor induksi tiga fasa sebagai generator.

1.4. Batasan Masalah

Untuk menghindari pembahasan yang meluas maka penulis membatasi pembahasan tugas akhir ini dengan hal – hal sebagai berikut :

1. Tidak membahas tentang sistem proteksi.
2. Tidak membahas hubungan interkoneksi dengan jaringan system.
3. Tidak membahas perubahan tegangan akibat gangguan pada system.
4. Tidak dilakukan percobaan untuk mendapatkan parameter motor induksi dan parameter motor induksi sebagai generator.

BAB II

MOTOR INDUKSI TIGA PHASA

2.1. Umum

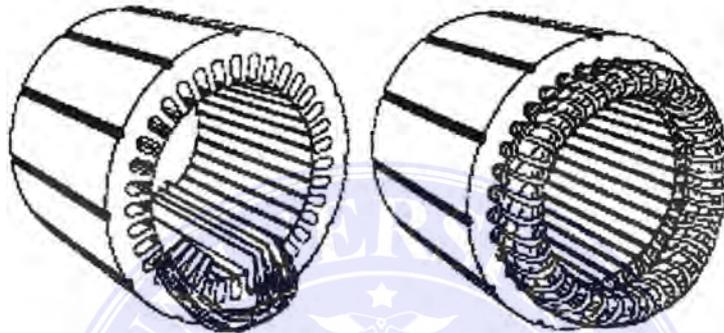
Motor induksi merupakan motor arus bolak-balik (AC) yang paling luas digunakan dan dapat dijumpai dalam setiap aplikasi industri maupun rumah tangga. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa arus motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya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

Motor ini memiliki konstruksi yang kuat, sederhana, handal, serta biaya murah. Di samping itu motor ini juga memiliki efisiensi yang tinggi saat berbeban penuh dan tidak membutuhkan perawatan yang banyak.

2.2. Konstruksi Motor Induksi Tiga Phasa

Motor induksi pada dasarnya memiliki konstruksi stator yang sama dengan stator motor sinkron, dan hanya terdapat perbedaan pada konstruksi rotor. Stator dibentuk dari laminasi-laminasi tipis yang terbuat dari aluminium ataupun besi tuang, dan kemudian dipasak bersama-sama untuk membentuk inti stator dengan slot seperti yang ditunjukkan gambar 2.1. Kumputan (*coil*) dari konduktor-konduktor yang terisolasi ini kemudian disisipkan ke dalam slot-slot tersebut. Sehingga grup dari kumputan ini beserta dengan inti yang mengelilinginya membentuk rangkaian

elektromagnetik. Banyaknya jumlah kutub dari motor induksi tergantung pada hubungan internal dari belitan stator, yang mana bila belitan ini disuplai dengan sumber tegangan tiga fasa maka akan membangkitkan medan putar.

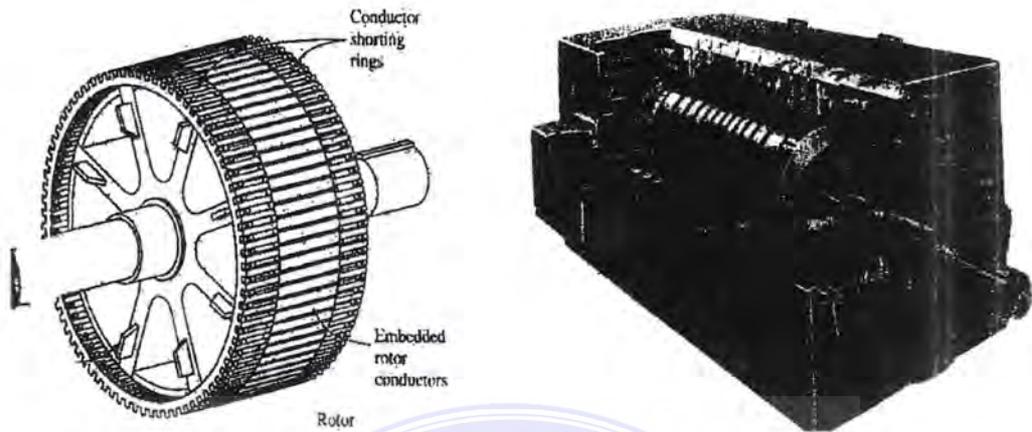


a) penampang inti stator

b) stator motor induksi

Gambar 2.1 Stator Motor Induksi

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 dihubungkan singkat dengan menggunakan *shorting rings*.



a) Rotor Sangkar

b) Motor induksi rotor sangkar

Gambar 2.2. Bentuk Rotor Sangkar

Sementara itu pada rotor belitan, rotornya dibentuk dari satu set belitan tiga fasa yang merupakan bayangan dari belitan statornya. Biasanya belitan tiga fasa dari rotor ini terhubung Y dan kemudian tiap-tiap ujung dari tiga kawat rotor tersebut diikatkan pada slip ring yang berada pada poros rotor. Pada motor induksi rotor belitan, rangkaian rotornya dirancang untuk dapat disisipkan dengan tahanan eksternal, yang mana hal ini akan memberikan keuntungan dalam memodifikasi karakteristik torsi-kecepatan dari motor.



a) Rotor belitan

b) Motor induksi rotor belitan

Gambar 2.3 Motor Induksi Rotor Belitan

2.3 Medan Putar

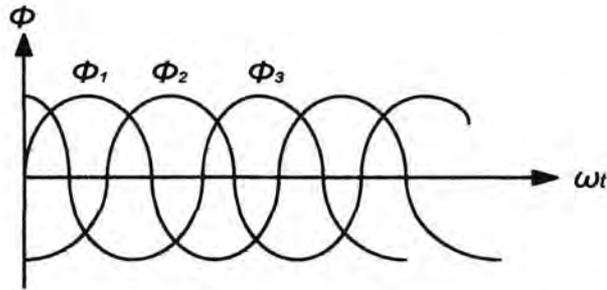
Ketiga belitan tiga fasa dari motor induksi diberi suplai sehingga dihasilkan medan magnet yang berputar. Medan magnet ini dibentuk oleh kutub-kutubnya yang berada pada posisi yang tidak tetap pada stator tetapi berubah-ubah mengelilingi stator.

Untuk melihat bagaimana medan putar dibangkitkan, maka dapat diambil contoh pada motor induksi tiga fasa dengan jumlah kutub dua. Dimana ketiga phasanya R,S,T disuplai dengan sumber tegangan tiga fasa, dan arus pada phasa ini ditunjukkan sebagai I_R , I_S , dan I_T , maka fluks yang dihasilkan oleh arus-arus ini adalah :

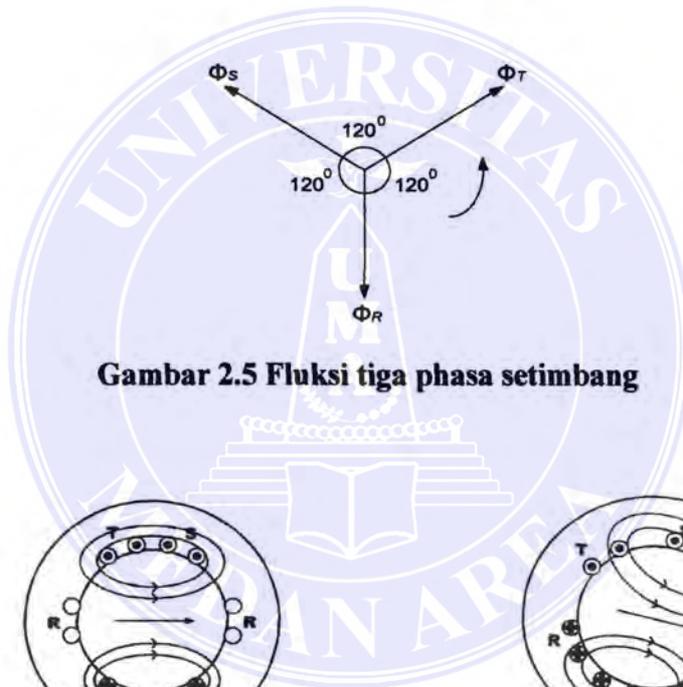
$$\Phi_R = \Phi_m \sin \omega t \dots\dots\dots (2.1a)$$

$$\Phi_S = \Phi_m \sin (\omega t - 120^\circ) \dots\dots\dots (2.1b)$$

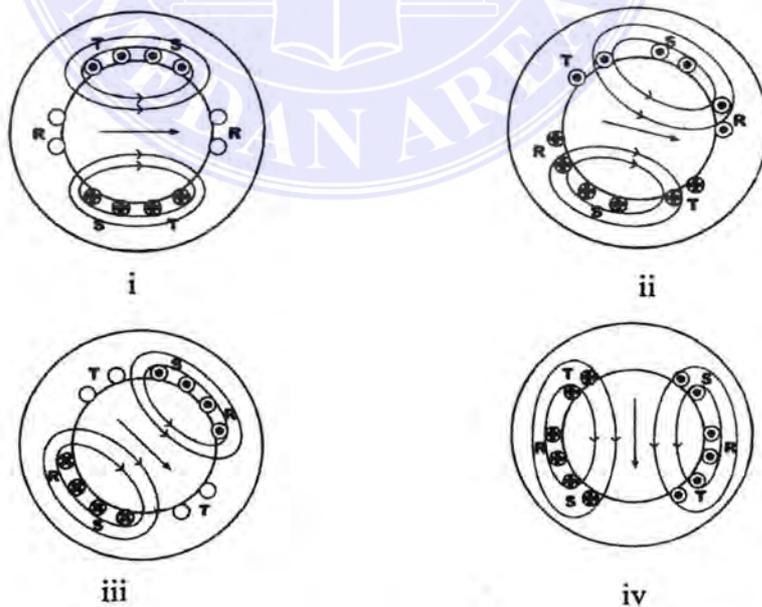
$$\Phi_T = \Phi_m \sin (\omega t - 240^\circ) \dots\dots\dots (2.1c)$$



Gambar 2.4 Diagram phasor fluksi tiga fasa setimbang

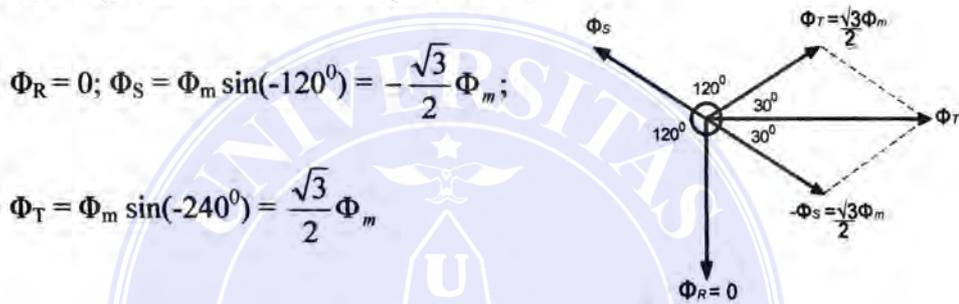


Gambar 2.5 Fluksi tiga fasa setimbang



Gambar 2.6 Medan putar pada motor induksi tiga fasa

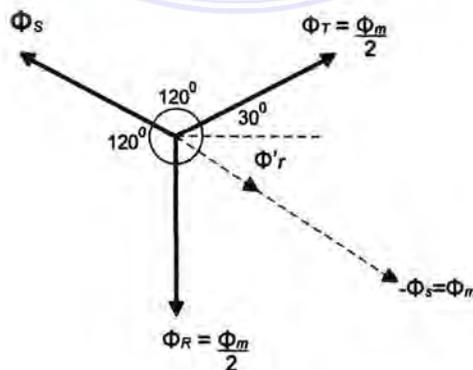
- (i) Pada keadaan 1 (gambar 2.6), $\omega t = 0$; arus dalam fasa R bernilai nol sedangkan besarnya arus pada fasa S dan fasa T memiliki nilai yang sama dan arahnya berlawanan. Dalam keadaan seperti ini arus sedang mengalir ke luar dari konduktor sebelah atas dan memasuki konduktor sebelah bawah. Sementara resultan fluks yang dihasilkan memiliki besar yang konstan yaitu sebesar 1,5 dan dibuktikan sebagai berikut :



Oleh karena itu resultan fluks, Φ_r , adalah jumlah fasor dari Φ_T dan $-\Phi_S$

Sehingga resultan fluks, $\Phi_r = 2 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \Phi_m \cos 30^\circ = 1,5 \Phi_m$

- (ii) Pada keadaan 2, arus bernilai maksimum negatif pada fasa S, sedangkan pada R dan fasa T bernilai 0,5 maksimum pada fasa R dan fasa T.



Dan pada saat ini $\omega t = 30^\circ$, oleh karena itu fluks yang diberikan oleh masing-

$$\Phi_R = \Phi_m \sin(-120^\circ) = 0,5\Phi_m$$

$$\Phi_S = \Phi_m \sin(-30^\circ) = -0,5\Phi_m$$

$$\Phi_T = \Phi_m \sin(-150^\circ) = -0,5\Phi_m$$

Maka jumlah phasor $-\Phi_T$ dan $-\Phi_S$ adalah $=\Phi_r = 2 \times 0,5 \Phi_m \cos 60 = 0,5 \Phi_m$

Sehingga resultan fluks $\Phi_r = 0,5 \Phi_m + \Phi_m = 1,5 \Phi_m$

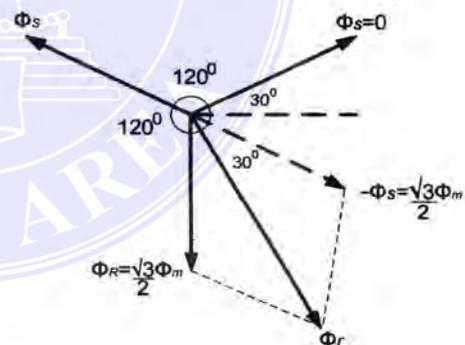
Dari gambar diagram phasor tersebut dapat dilihat bahwa resultan fluks berpindah sejauh 30° dari posisi pertama

- (iii) Pada keadaan ini $\omega t = 60^\circ$, arus pada fasa R dan fasa T memiliki besar yang sama dan arahnya berlawanan ($0,866 \Phi_m$), oleh karena itu fluks yang diberikan oleh masing – masing fasa :

$$\Phi_R = \Phi_m \sin(60^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{2} \phi_m$$

$$\Phi_T = \Phi_m \sin(60^\circ) = -\frac{\sqrt{3}}{2} \phi_m$$

$$\Phi_S = \Phi_m \sin(-180^\circ) = 0$$



Maka magnitud dari fluks resultan $\Phi_r = 2 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \Phi_m \cos 30^\circ = 1,5 \Phi_m$

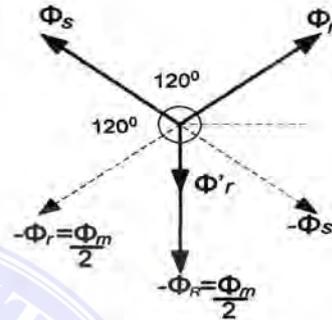
Dari gambar diagram phasor tersebut dapat dilihat bahwa resultan fluks berpindah sejauh 60° dari posisi pertama.

(iv) Pada keadaan ini $\omega t = 90^\circ$, arus pada fasa R maksimum (positif), dan arus pada fasa S dan fasa T = $0,5 \Phi_m$, oleh karena itu fluks yang diberikan oleh masing – masing fasa.

$$\Phi_R = \Phi_m \sin(90^\circ) = \phi_m$$

$$\Phi_S = \Phi_m \sin(-30^\circ) = -0,5\Phi_m$$

$$\Phi_T = \Phi_m \sin(-150^\circ) = -0,5\Phi_m$$



Maka jumlah phasor $-\Phi_r$ dan $-\Phi_s$ adalah $= \Phi_r = 2 \times 0,5\Phi_m \cos 60 = 0,5 \Phi_m$

Sehingga resultan fluks $\Phi_r = 0,5\Phi_m + \Phi_m = 1,5\Phi_m$

Dari gambar diagram phasor tersebut dapat dilihat bahwa resultan fluks berpindah sejauh 90° dari posisi pertama.

2.4. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Tiga Fasa

Operasi dari motor induksi tergantung pada induksi arus dan tegangan di dalam rangkaian rotor yang berasal dari rangkaian stator karena adanya aksi transformator. Karena induksi arus dan tegangan pada motor induksi pada dasarnya sama dengan operasi transformator, maka rangkaian ekuivalen motor induksi akan sangat menyerupai rangkaian ekuivalen dari transformator. Motor induksi disebut juga sebagai *singly excited machine*, sebab daya hanya disuplai dari rangkaian stator. Karena motor induksi tidak memiliki rangkaian medan, maka pada modelnya tidak akan terdapat sumber tegangan internal E_A sebagaimana dijumpai pada mesin sinkron.

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

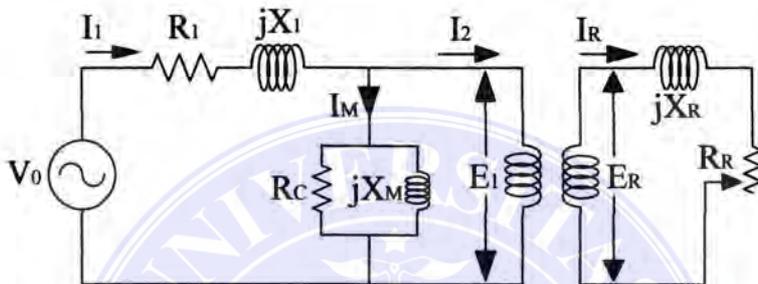
Document Accepted 7/12/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area (repository.uma.ac.id)7/12/23

Rangkaian ekuivalen per fasa dari transformator dapat menggantikan operasi dari motor induksi. Sebagaimana halnya pada transformator, maka akan terdapat tahanan (R_1) dan induktansi sendiri (X_1) pada belitan stator yang direpresentasikan dalam rangkaian ekuivalen mesin.



Gambar 2.7. Rangkaian ekuivalen motor induksi sebagai model transformator

Tegangan stator E_1 dikopel terhadap sisi sekunder E_R sebagaimana halnya transformator ideal dengan rasio belitan efektif a_{eff} . Rasio belitan ini dengan mudah dapat ditentukan pada motor induksi rotor belitan, yang mana pada dasarnya rasio ini merupakan banyaknya konduktor per fasa pada stator terhadap jumlah konduktor per fasa pada rotor. Akan tetapi tidak demikian halnya pada motor induksi sangkar tupai, karena tidak terdapatnya belita pada rotor motor tersebut.

Tegangan E_R pada rotor akan menghasilkan arus, karena rangkaian rotornya terhubung singkat. Impedansi rangkaian primer dan arus magnetisasi dari motor induksi sama halnya dengan komponen-komponen yang dijumpai pada transformator. Hal yang membedakan rangkaian ekuivalen tersebut pada motor induksi dikarenakan terdapatnya variasi frekuensi pada tegangan rotor (E_R), impedansi rotor R_R dan jX_R .

Ketiga tegangan diberikan pada belitan stator, maka tegangan akan diinduksikan pada belitan rotornya. Pada umumnya, gerak relatif yang lebih besar di antara rotor dan medan putar stator, akan menghasilkan tegangan dan frekuensi rotor yang lebih besar juga. Gerak relatif yang terbesar terjadi saat rotor dalam keadaan diam atau disebut juga dalam keadaan blocked rotor. Sebaliknya, frekuensi dan tegangan terendah timbul saat rotor berputar pada kecepatan yang sama dengan kedapatan sinkron sehingga tidak dapat terdapat pergerakan relatif. Magnitud dan frekuensi tegangan induksi rotor pada saat berputar sebanding dengan slip dari rotornya. Sehingga, besarnya tegangan induksi rotor dalam kondisi rotor terkunci disebut E_{RO} , sedangkan untuk slip pada suatu putaran tertentu dirumuskan dengan :

$$E_R = S e_{RO} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dan frekuensi tegangan induksi pada slip tertentu ;

$$f_r = s f_e \dots\dots\dots (2.9)$$

Tahanan dari rotor R_R bernilai konstan/ tidak tergantung pada slip, sementara itu pada reaktansi rotor besarnya akan dipengaruhi oleh slip.

Reaktansi dari rotor tergantung pada induktansi rotor, frekuensi tegangan rotor dan arus pada rotor. Bila induktansi rotor L_R , maka reaktansi rotor adalah :

$$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_r L_R : f_r = s f_e$$

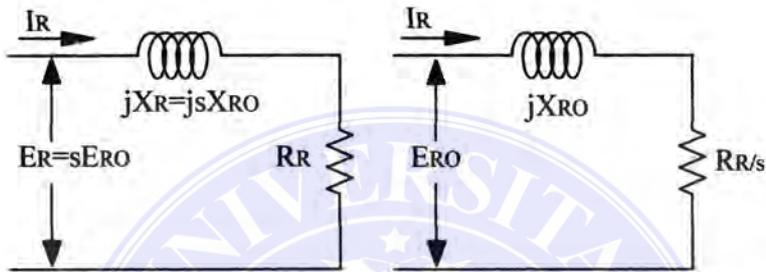
Sehingga :

$$\begin{aligned} X_g &= 2\pi s f_e L_R \\ &= s(2\pi f_e L_R) \\ &= s X_{RO} \dots\dots\dots (2.10) \end{aligned}$$

dimana :

L_R = induktansi rotor
 X_{RO} = reaktansi blok rotor

Rangkaian ekivalen rotor dapat dilihat pada gambar 2.8 :



Gambar 2.8 Model rangkaian rotor motor induksi

Dari gambar 2.8 arus pada motor dapat ditentukan sebagai :

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R} \dots\dots\dots (2.11)$$

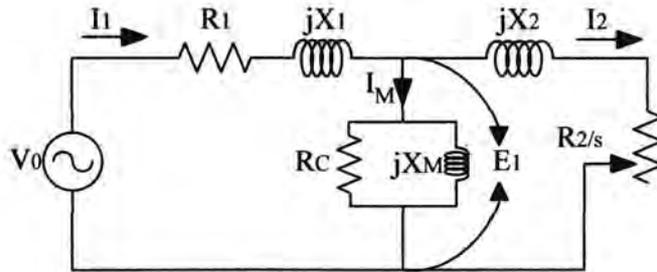
$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_{RO}} \dots\dots\dots (2.12)$$

$$I_R = \frac{E_{RO}}{R_R / S + jX_{RO}} \dots\dots\dots (2.13)$$

dimana :

I_R = arus rotor (A)
 E_R = tegangan induksi pada rotor (V)
 R_R = tahanan rotor
 X_R = reaktansi rotor

Untuk mempermudah penganalisaan, maka rangkaian ekivalen motor induksi pada gambar 2.8. dapat dilihat dari sisi stator, seperti gambar 2.9. :



Gambar 2.9. Rangkaian ekivalen per fasa motor induksi

Seperti halnya pada transformator, tegangan arus, dan impedansi sisi sekunder dapat digantikan ke sisi primer sesuai dengan rasio belitannya, sehingga hal yang sama juga berlaku untuk motor induksi.

$$V_p = V_s = a V_s \dots\dots\dots (2.14)$$

$$I_p = I'_s = I_s / a \dots\dots\dots (2.15)$$

$$Z'_s = a^2 Z_s \dots\dots\dots (2.16)$$

Secara eksak urutan transformasi yang sama dapat dilakukan untuk rangkaian rotor motor induksi. Jika rasio belitan efektif dari motor induksi adalah a_{eff} , kemudian tegangan rotor ditransformasikan menjadi:

$$E_1 = E'_R = a_{eff} E_{RO} \dots\dots\dots (2.18)$$

Arus rotor menjadi :

$$I_2 = I_R / a_{eff} \dots\dots\dots (2.19)$$

dan impedansi rotor menjadi

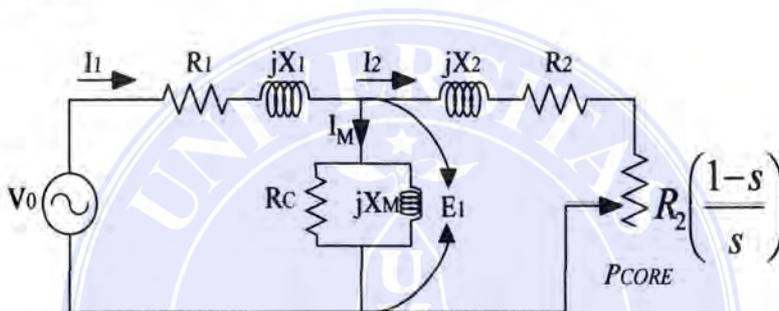
$$Z_2 = a^2_{eff} (R_R / S + jX_{RO}) \dots\dots\dots (2.20)$$

atau dapat juga didefinisikan dengan :

$$R_2 = a^2_{\text{eff}} R_R \dots\dots\dots (2.21)$$

$$X_2 = a^2_{\text{eff}} X_{RO} \dots\dots\dots (2.22)$$

Apabila rugi-rugi tembaga dipisahkan dengan besarnya daya yang dikonversikan menjadi daya mekanik, maka rangkaian ekivalennya adalah seperti pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Rangkaian ekivalen motor induksi dengan adanya pemisahan rugi-rugi rotor.

Dalam teori transformator, analisa rangkaian ekivalen sering disederhanakan dengan mengabaikan seluruh cabang magnetisasi atau dengan memindahkan langsung ke terminal primer. Pendekatan demikian tidak dibenarkan dalam motor induksi yang bekerja dalam keadaan normal, karena adanya celah udara yang menjadikan perlunya suatu arus magnetisasi yang sangat besar (30% sampai 40% dari arus beban penuh). Untuk itu dalam rangkaian ekivalen R_C dapat diabaikan.

2.5. Aliran Daya Pada Motor Induksi Tiga Fasa

Daya listrik disuplai ke stator motor induksi diubah menjadi daya mekanik pada poros motor. Berbagai rugi-rugi yang timbul selama proses konversi energi listrik antara lain :

1. Rugi – rugi tetap (*fixed losses*), terdiri dari :

a. Rugi-rugi inti stator (P_{CORE})

$$P_{CORE} = 3 E I^2 G_c \dots\dots\dots (2.23)$$

b. Rugi – rugi gesek dan angin.

2. Rugi – rugi variable, terdiri dari :

a. Rugi – rugi tembaga stator (P_{SCL})

$$P_{SCL} = 3 I_1^2 R_1 \dots\dots\dots (2.24)$$

b. Rugi – rugi tembaga rotor (P_{RCL})

$$P_{RCL} = 3 I_2^2 R_2 \dots\dots\dots (2.25)$$

Daya pada celah udara (P_{AG}) dapat dirumuskan dengan :

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} - P_{CORE} \dots\dots\dots (2.26)$$

Jika dilihat pada rangkaian rotor, satu-satunya elemen pada rangkaian ekivalen yang mengkonsumsi daya pada celah udara adalah resistor R_2/S . Oleh karena itu daya pada celah udara dapat juga ditulis dengan :

$$P_{AG} = 3 I_2^2 \frac{R_2}{S} \dots\dots\dots (2.27)$$

Apabila rugi –rugi tembaga dan rugi-rugi inti dikurangi dengan daya input motor, maka akan diperoleh besarnya daya listrik yang diubah menjadi daya mekanik.

besarnya daya mekanik yang dibangkitkan motor adalah:

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
 2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
 3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area (repository.uma.ac.id)7/12/23

$$P_{conv} = 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \dots\dots\dots (2.28)$$

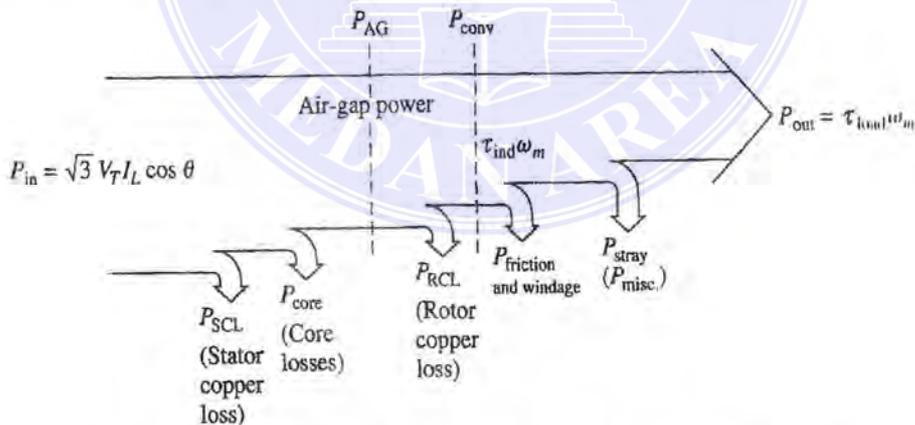
Dari persamaan 2.25 dan 2.27 dapat dinyatakan hubungan rugi-rugi tembaga dengan daya pada celah udara:

$$P_{RCL} = s P_{AG} \dots\dots\dots (2.29)$$

Karena daya mekanik yang dibangkitkan pada motor merupakan selisih dari daya pada celah udara dikurangi dengan rugi-rugi tembaga rotor, maka daya mekanik dapat juga ditulis dengan:

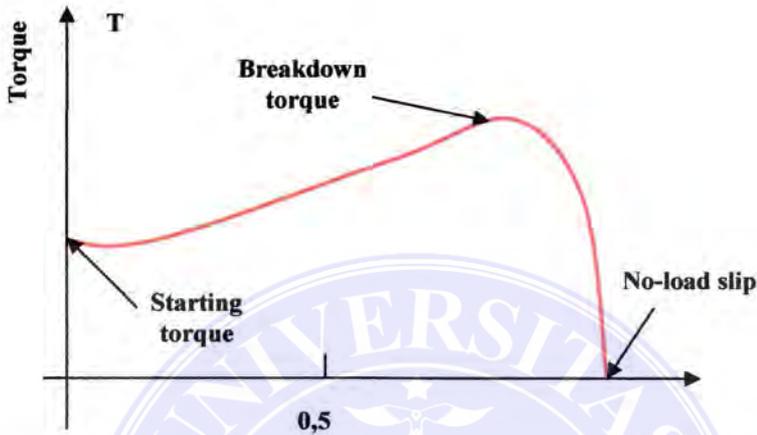
$$P_{conv} = (1-s) P_{AG} \dots\dots\dots (2.30)$$

Daya output akan diperoleh apabila daya yang dikonversikan dalam bentuk daya mekanik dikurangi dengan rugi-rugi gesek dan angin. Gambar 2.12 menunjukkan aliran daya pada motor induksi tiga fasa:



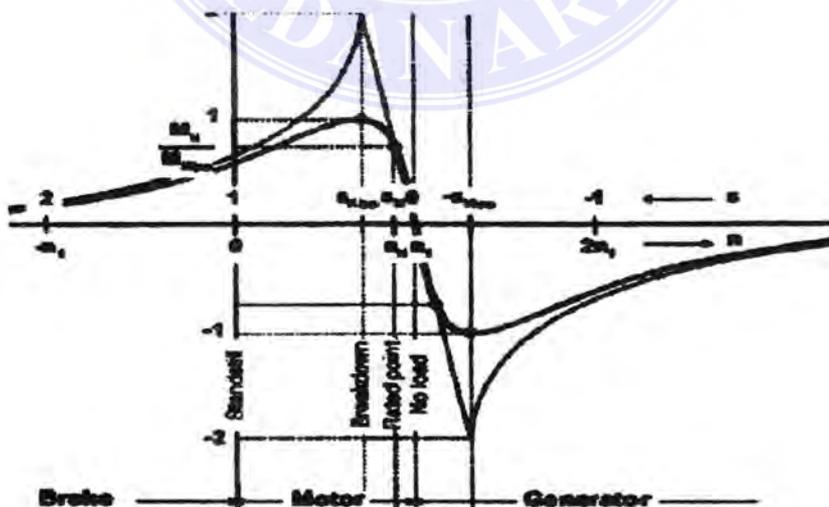
Gambar 2.11 Diagram aliran daya pada motor induksi

Gambar kurva torsi kecepatan (slip) pada motor induksi ditunjukkan pada gambar 2.16.



Gambar 2.12 Karakteristik torsi-slip pada motor induksi

Sedangkan kurva torsi-kecepatan motor induksi yang menunjukkan kecepatan diluar daerah operasi normal ditunjukkan pada gambar 2.17



Gambar 2.13 Karakteristik torsi-putaran pada motor induksi pada berbagai daerah operasi

Dari kedua kurva karakteristik torsi motor induksi di atas dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Torsi motor induksi akan bernilai nol pada saat kecepatan sinkron
2. Kurva torsi-kecepatan mendekati linear di antara beban nol dan beban penuh. Dalam daerah ini, tahanan rotor jauh lebih besar dari reaktansi rotor, oleh karena itu arus rotor, medan magnet rotor, dan torsi induksi meningkat secara linear dengan peningkatan slip.
3. Akan terdapat torsi maksimum yang tak mungkin akan dapat dilampaui. Torsi ini disebut juga dengan pull-out torque atau break down torque, yang besarnya 2–3 kali torsi beban penuh dari motor.
4. Torsi start pada motor sedikit lebih besar dari pada torsi beban penuhnya, oleh karena itu motor ini akan start dengan suatu beban tertentu yang dapat disuplai pada daya penuh.
5. Torsi pada motor akan memberikan harga slip yang bervariasi sebagai harga kuadrat dari tegangan yang diberikan. Hal ini sangat penting dalam membentuk pengaturan kecepatan dari motor.
6. Jika rotor motor induksi digerakkan lebih cepat dari kecepatan sinkron, kemudian arah dari torsi induksi di dalam mesin menjadi terbalik dan mesin akan bekerja sebagai generator, yang mengkonversikan daya mekanik menjadi daya elektrik.
7. Jika motor induksi bergerak mundur relatif arah dari medan magnet, torsi induksi mesin akan menghentikan mesin dengan sangat cepat dan akan

UNIVERSITAS MEDAN AREA berputar pada arah yang lain. Karena pembalikan arah medan

putar merupakan suatu aksi penyaklaran dua buah fasa stator, maka cara seperti ini dapat digunakan sebagai suatu cara yang sangat cepat untuk menghentikan motor induksi. Cara menghentikan motor seperti ini disebut juga dengan plugging.



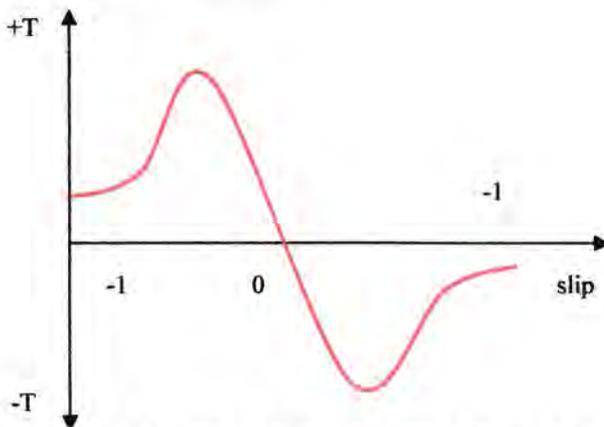
BAB III

MOTOR INDUKSI SEBAGAI GENERATOR

3.1 Umum

Mesin induksi merupakan mesin listrik yang beroperasi dengan menghubungkan belitan stator dengan sumber arus bolak-balik. Ini berarti bahagian rotor secara elektrik hanya menerima akibat dari kondisi yang terjadi pada belitan stator dan biasanya hal-hal yang bersifat mekanis (menimbulkan enersi mekanis).

Bila mesin induksi dioperasikan sebagai generator secara paralel dengan sistem pembangkit lainnya atau alternator, maka mesin induksi terlebih dahulu harus bekerja sebagai motor induksi dengan memberikan enersi listrik, sehingga aliran daya masuk menuju mesin tersebut. Setelah beroperasi sebagai motor, maka dengan penggerak mula (*prime mover*) mesin induksi tersebut diputar searah dengan putarannya dengan putaran yang melebihi putran sinkronnya. Hal ini berarti mesin induksi mendapat tambahan torsi dari luar, yang secara kuantitatif bernilai negatif, seperti terlihat pada gambar 3.1



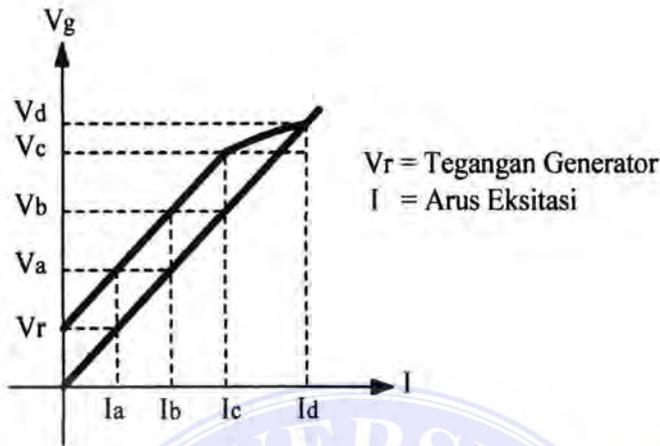
Gambar 3.1 Kurva hubungan torsi dengan putaran mesin induksi

Dengan demikian tegangan induksi yang ada pada rotor akibat fluksi celah udara sebelumnya, akan relatif lebih besar akibat penambahan kecepatan putarannya, yang seterusnya arah aliran akan berbalik, keluar dari mesin menuju sumber (*line*). Pada kondisi ini mesin induksi beroperasi sebagai generator dimana putarannya dipertahankan lebih besar dari putaran sinkronnya (slip negatif). Karena mesin induksi tidak memiliki sistem penguat (eksitasi) untuk menghasilkan daya reaktif, maka arus penguat bisa diperoleh dari alternator yang berpenguatan lebih (*over excitation*) atau dari kapasitor-kapasitor yang akan menghasilkan arus magnetisasi.

Bila motor induksi bekerja sebagai generator secara terpisah dari sistem pembangkit lainnya, maka akan timbul permasalahan untuk menghasilkan daya reaktif, disebabkan tidak ada arus penguat pada motor induksi. Sedangkan untuk menghasilkan tegangan awal pada operasinya adalah dengan memanfaatkan tegangan remanensi pada saat rotor diputar. Penambahan kapasitor akan lebih membantu untuk mendapatkan arus magnetisasi pada celah udara.

3.2 Pembangkitan tegangan induksi pada motor induksi sebagai generator

Pada operasi MISG yang terpisah dari sistem pembangkit lainnya (menggunakan penggerak mula sendiri), telah dijelaskan pembangkitan tegangan induksi disebabkan magnet remanensi (magnet sisa) pada rotor yang menghasilkan fluksi (sesuai dengan hukum Faraday). Bila dianggap generator induksi berhubungan dengan kapasitor, maka proses pembangkitan tegangan dapat dilihat seperti pada gambar 3.2 sebagai berikut:



Gambar 3.2 Proses pembangkitan tegangan induksi

Pada saat rotor diputar, akibat adanya fluksi remanensi pada rotor, timbul tegangan induksi pada stator sebesar V_r . Dengan adanya tegangan stator V_r , arus penguatan I_a . Arus penguatan yang berasal dari kapasitor akan menambah fluksi, sehingga tegangan di stator akan naik menjadi V_a . Tegangan V_a akan menghasilkan arus penguat sebesar I_b dan akan menambah besar fluksi celah udara, sehingga membangkitkan tegangan induksi stator V_b . Proses ini akan berlangsung terus sampai tegangan terminal generator sama dengan tegangan pada kapasitor. Frekuensi kerja pada kondisi ini adalah :

$$f = \frac{p}{2} \frac{n}{(1-s) \times 60} \dots\dots\dots (3.1)$$

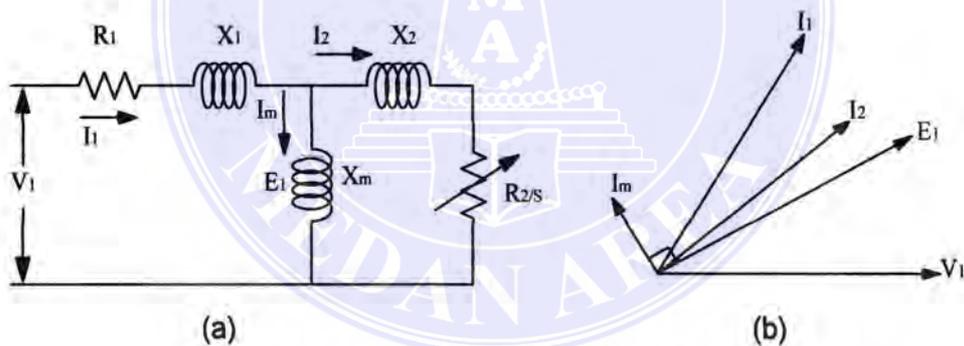
Dimana :

- f : Frekuensi (Hz)
- p : jumlah kutub
- n : putaran
- s : slip

Secara praktis diambil pendekatan, bahwa frekuensi kerja generator induksi sedikit lebih besar dari frekuensi yang berhubungan dengan putaran nominal motor induksi. Atau dengan kata lain putaran MISG sedikit lebih besar dari putaran bila mesin bekerja sebagai motor induksi ($\pm 5\%$).

3.3 Daya keluaran generator induksi

Daya keluaran MISG dengan penguatan sendiri dapat dianalisa dengan menggunakan rangkaian ekivalen seperti pada gambar 3.3. Pada gambar 3.3 (a), rugi inti diabaikan dan rangkaian ekivalen tersebut terdiri dari 2 variabel, yaitu slip sebagai fungsi kecepatan dan rektansi sebagai fungsi dari frekuensi celah udara.



Gambar 3.3 Rangkaian ekivalen generator induksi dan phasor diagramnya

Pada gambar 3.3 (a) dapat disederhanakan menjadi suatu impedansi Z:

$$Z = R_1 + jX_1 + \frac{\left(\frac{R_2}{s} + jX_2\right) \times (jX_m)}{\left(\frac{R_2}{s} + jX_2\right) + jX_m} = R_1 + jX_1 + \frac{\left(\frac{R_2}{s} + jX_2\right) \times (jX_m)}{\frac{R_2}{s} + j(X_2 + X_m)} \dots (3.2)$$

Arus statornya adalah:

$$I_1 = \frac{V_1}{Z} \dots\dots\dots (3.3)$$

Tegangan statornya adalah :

$$E_1 = V_1 + I_1(R_1 + jX_1) \dots\dots\dots (3.4)$$

Seperti dilihat pada gambar 3.3 (b), arus stator MISG terdahulu (*leading*) terhadap tegangan sebesar θ . Komponen arus reaktif ini adalah yang mendahului daya reaktif (VAR) yang dibutuhkan oleh MISG dan ini dapat berasal dari generator berpenguatan lebih ataupun dari kapasitor. Persamaan (3.3) menyatakan bahwa nilai Z dipengaruhi oleh slip. Hal ini juga berarti akan mempengaruhi nilai I_1 , sebagai keluaran generator.

$$P + jQ = \frac{V_1^2}{-Z^*} \dots\dots\dots (3.5)$$

Dimana bila:

$$-Z = R + jX \dots\dots\dots (3.6)$$

Maka :

$$-Z^* = R - jX \dots\dots\dots (3.7)$$

$$R + jX = -R_1 - jX_1 - \frac{\left(\frac{R_2}{s} + jX_2\right) \times (jX_m)}{\frac{R_2}{s} + j(X_2 + X_m)} \dots\dots\dots (3.8)$$

Kemudian :

$$P + jQ = \frac{V_1^2}{R - jX} \dots\dots\dots (3.9)$$

Dengan menambahkan dan mengurangi faktor: $\frac{(jX_m)^2}{2j(X_2 + X_m)}$ ke sisi kanan persamaan (3.8), maka diperoleh :

$$R + jX = -R_1 - j\left(X_1 + X_m - \frac{X_m^2}{2(X_2 + X_m)}\right) - \left(\frac{j(X_m^2)}{2j(X_2 + X_m)}\right) \dots\dots\dots (3.10)$$

Anggap :

$$X' = X_1 + \frac{X_2 \times X_m}{X_2 + X_m} \dots\dots\dots (3.11)$$

Atau :

$$\frac{X_m^2}{X_2 + X_m} = X_m + X_1 - X' \dots\dots\dots (3.12)$$

Bila persamaan (3.12) dimasukkan ke persamaan (3.10), maka diperoleh :

$$R + jX = -R_L - j\left(\frac{X_2 + X_m - X'}{2}\right) - j(X_m + X_1 - X')\left(\frac{R_2/s - j(X_2 + X_m)}{R_2/s + j(X_2 + X_m)}\right) \dots\dots (3.13)$$

Atau:

$$R + R_1 + j\left(X \frac{X_2 + X_m - X'}{2}\right) = j(X_2 + X_m - X')\left(\frac{R_2/s - j(X_2 + X_m)}{R_2/s + j(X_2 + X_m)}\right) \dots\dots\dots (3.14)$$

Dengan mengambil kedua besaran sisi-sisi persamaan (3.14) dan kombinasinya, menghasilkan:

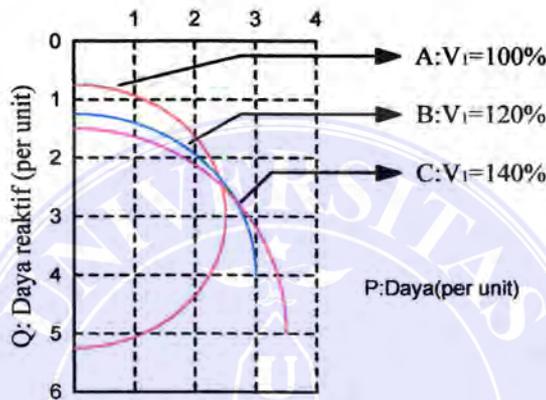
$$(R + R_1)^2 + (X + X_1 + X_m)(X + X') = 0 \dots\dots\dots (3.15)$$

Tempat kedudukan daya nyata dan VAR keluaran dari generator induksi merupakan suatu lingkaran dengan pusat :

$$P = -V^2 \frac{R_1}{R_1^2 + (X_1 + X_m)(X')} \dots\dots\dots (3.16)$$

$$Q = -V^2 \frac{(X_1 + X_m)(X')}{2(R_1^2 + (X_1 + X_m)(X'))} \dots\dots\dots (3.17)$$

Kurva yang menyatakan hubungan antara P dan Q pada tegangan terminal tertentu dapat dilihat seperti pada gambar 3.4



Gambar 3.4 : Kurva hubungan P dan Q untuk tegangan terminal generator tertentu

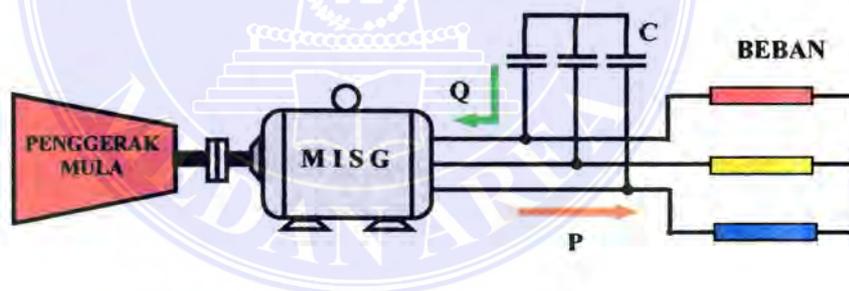
Dari gambar 3.4 terlihat bahwa ada batas tertentu keluaran generator induksi. Batas ini disebut dengan daya batas generator induksi yang dinyatakan dengan persamaan:

$$P_L = \frac{V_1^2}{2 \left[\frac{(X_m + X_1)(X_m + X_2)}{X_m^2} \left(X_1 + \frac{X_m^2}{X_2 + X_m} \right) \right]} \dots\dots\dots (3.18)$$

Persamaan (3.18) adalah persamaan daya batas dengan mengabaikan tahanan stator.

3.4 Penentuan nilai kapasitor

Motor induksi tiga fasa rotor sangkar (*squirrel cage*) dapat dijadikan generator dengan cara memutar rotor dengan penggerak mula seperti tubin air, motor bakar dan sebagainya. Pada saat rotor berputar melebihi putaran sinkronnya (n_s), motor induksi bekerja sebagai generator (MISG) yang dapat memberikan daya aktif (P) ke sistem jaringan. Untuk menghasilkan medan magnet (fluksi magnet), motor induksi harus menyerap daya reaktif (Q). Daya reaktif (Q) ini hanya berasal dari jaringan arus bolak-balik dimana daya reaktif ini mengalir berlawanan arah dengan daya aktif (P). Daya aktif yang dihasilkan sebanding dengan slip (s) di atas kecepatan sinkron (n_s), sehingga makin besar kecepatan rotor, semakin besar tegangan yang dihasilkan.



Gambar 3.5 Kapasitor memberikan daya reaktif ke motor

Daya reaktif yang dibutuhkan oleh MISG berasal dari sejumlah kapasitor yang dihubungkan secara delta ataupun wye yang kemudian dihubungkan ke terminal motor induksi 3 fasa. Tegangan yang dihasilkan oleh MISG juga tergantung pada kapasitas kapasitor yang digunakan dan dibatasi oleh kejenuhan (saturasi) dari rotor (tergantung pada jenis bahan rotor). Bila kapasitas kapasitor yang

digunakan tidak mencukupi, motor induksi tidak akan menghasilkan tegangan. Kapasitor yang digunakan pada MISG minimal dapat menyediakan daya reaktif sebesar daya reaktif yang diserap apabila mesin bekerja sebagai motor.

Motor induksi tiga fasa maka daya:

$$S = \sqrt{3} V_L I_L \quad \dots\dots\dots (3.19)$$

Daya aktif motor induksi tiga fasa:

$$P = V_L I_L \cos \phi = S \cos \phi \quad \dots\dots\dots (3.20)$$

Daya reaktif motor induksi tiga fasa

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad \dots\dots\dots (3.21)$$

Daya reaktif motor induksi per fasa:

$$Q_{1\phi} = \frac{1}{3} Q \quad (3.22) \quad \dots\dots\dots (3.22)$$

Daya reaktif yang dibutuhkan pada MISG minimal dengan daya reaktif yang diserap oleh motor induksi, sehingga kapasitas kapasitor yang digunakan pada MISG dapat ditentukan sebagai berikut;

a. Bila kapasitor terhubung secara delta, maka:

$$C_{\Delta} = \frac{Q_{1\phi} \times 10^6}{2\pi f V_L^2} \mu F \quad \dots\dots\dots (3.23)$$

b. Bila kapasitor terhubung secara wye, maka:

$$C_Y = \frac{3 \times Q_{1\phi} \times 10^6}{2\pi f V_L^2} \mu F \quad \dots\dots\dots (3.24)$$

Dimana :

- V_L = Tegangan line (Volt)
- I_L = Arus line (Ampere)
- $\cos \phi$ = Faktor daya
- S = Daya semu motor (Daya VA)
- P = Daya aktif motor (Daya watt)
- Q = Daya reaktif motor (Daya VAR)
- f = Frekuensi jaringan (Hz)
- C = Kapasitas kapasitor (μF)

Tegangan yang dihasilkan oleh MISG berada pada slip negatif yang cukup rendah yaitu lebih kecil dari 3% (*Theodore Wildi, hal. 307*). Motor induksi dengan putaran 1500 rpm dengan slip 2% pada beban penuhnya, maka bila motor induksi tersebut menjadi MISG, putarannya adalah: $1500 + (2\% \text{ dari } 1500) \text{ rpm}$

BAB V

PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

1. Pengaturan tegangan MISG dapat dilakukan dengan mengatur frekuensi, atau pengaturan besar kapasitor.
2. Dilihat dari karakteristik, bahwa apabila tanpa pengendali tegangan setiap perubahan beban pada motor induksi tiga fasa sebagai generator akan sangat berpengaruh pada tegangan, tetapi dengan menggunakan pengendali tegangan yaitu dengan menggunakan beban penyeimbang, perubahan tegangan sangat kecil apabila ada perubahan beban pada sisi konsumen sehingga kontinuitas penyaluran daya oleh generator tidak terganggu.
3. Dapat digunakan sebagai alternatif pembangkit energi listrik terutama di daerah terpencil (pedesaan) karena untuk penggerak mula digantikan oleh tenaga angin atau air sungai yang berpotensi untuk membangkitkan tenaga listrik seperti pada PLT Angin dan PLTMh.

5.2 SARAN

1. Pengendali tegangan pada motor induksi dapat dilakukan pada motor induksi satu fasa sebagai generator untuk analisa selanjutnya.
2. Untuk pengaturan tegangan, sebaiknya dilakukan pengaturan tegangan pada MISG melalui pengaturan kapasitor.

3. Dengan menggunakan teknologi IGC (Induction Generator Controller) yang dapat menyensor tegangan pada sisi konsumen, pengaturan beban penyeimbangan dapat dilakukan di sisi produsen listrik.



DAFTAR PUSTAKA

- Chapman Stephen J., **Electric Machines Fundamentals**, McGraw Hill International Edition, 1991.
- Hughes, E., **Electrical Technology**, The English Language book Society and Longman Group Limited, 1977.
- Nagrath, IJ. Dan DP Kothari, **Electric Machines**, Tata McGraw Hill Publishing Company Limited New Delhi, 1989.
- Peebles, Peyton Z dan Tayeb A. Guma. **Electrical Engineering**, McGraw Hill International Edition, 1991.
- Sen, SK., **Principles of Electric Machinery**, Khanna Publishers New Delhi, 1976.
- Theraja, BL., **A Text Book of Electrical Technology**, S. Chand & Company (Pvt) LTD Ram Nagar, New Delhi-55, 1973.
- Wildi, Theodore, **Electrical Machines Drives and Power System**, Prentice Hall International Edition, 1997.
- Zuhail, **Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya**, Penerbit PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1993.