

MENCARI STABILITAS MOTOR INDUKSI MENGGUNAKAN KONVERTER-INVERTER DENGAN TORKA KUADRATIS

Ali Kasim

Dosen Fakultas Teknik Program Studi Teknik Elektro Universitas Palembang

ABSTRAK

Kestabilan motor induksi rotor belitan dengan pemulih energi slip sebagai penggerak beban torka kuadratis dapat dianalisis dari persamaan nonlinear kerangka referensi yang dilinierisasikan dengan menggunakan pergeseran kecil disekitar titik operasi keadaan mantap.

Linierisasi yang dikembangkan dengan penggunaan deret Taylor disekitar titik operasi. Hasil linierisasi dari persamaan diferensial ini menggambarkan perilaku dinamis sistem dari pergeseran kecil pada sekitar titik operasi. Motor induksi rotor belitan dengan sistem pemulih energi slip digunakan sebagai penggerak beban torka kuadratis (pompa, fan) dapat dianggap sebagai sistem linier berkenaan dengan gangguan kecil, kemudian dari teori
Melihat kestabilan sistem

Kata kunci : konverter – inverter, slip pemulih energi, torka

A. Judul Penulisan

Mencari Stabilitas Motor Induksi Menggunakan Inverter-Konverter Dengan Torka Kuadratis

B. Latar Belakang Penulisan

Motor induksi sebagai pengendali kecepatan dengan putarannya dapat diatur adalah motor induksi rotor belitan (MIRB), dengan tahanan luar dihubung seri pada rotornya. Besarnya tahanan luar makin besar menghasilkan energi slip yang terbuang pada tahanan rotor. Untuk mengurangi keborosan ini, dipakai MIRB dengan pengendalian kecepatan menggunakan komponen elektronika daya. MIRB yang menggunakan komponen ini dikenal MIRB Konverter – inverter (Slip Pemulih energi)

Konverter-inverter penghemat motor induksi. Penggerak ini terdiri dari motor induksi rotor belitan (MIRB), penyearah jembatan tiga fasa yang tidak dikontrol, inverter komutasi jala-jala tiga fasa, penapis, dan trafo pemulih. Dalam operasi rangkaian daya mengembalikan sebagian energi yang terbuang pada rotor dikembalikan ke jala-jala. Penyearah jembatan 3 fasa yang masukannya berasal dari rotor merubah tegangan rotor pada saat frekuensi slip menjadi tegangan searah, dan inverter komutasi jala-jala merubah tegangan searah menjadi tegangan bolak-balik yang sama dengan frekuensi sumber. Penapis menyerap perbedaan tegangan sesaat antara penyearah dan inverter, dan juga membatasi riak pada arus searah. Transformator pemulih diperlukan untuk menyesuaikan tegangan.

C. Permasalahan

Permasalahan yang terjadi pada motor induksi rotor belitan dengan Konverter-inverter dengan beban kuadratis stabilan sistem (penggerak secara keseluruhan)

D. Tujuan Penulisan

Mencari Nilai kestabilan Motor Induksi Rotor Belitan Konverter – Inverter penggerak beban kuadratis cara menentukan Nilai Eigen.

E. Manfaat Penulisan

Dengan hasil perolehan nilai Eigen kita dapat melihat secara matematis pergeseran nilai-nilai parameter-parameter motor induksi MIRB dengan menggunakan Konverter-Inverter Beban Kuadratis

F. Tinjauan Pustaka

Kerangka Referensi

Pemodelan mesin listrik diperlukan guna menganalisa perilaku kondisi mesin. Dengan pemodelan tersebut dapat dibuat hubungan matematis dari bentuk fisik mesin. Sehingga dari hubungan matematis ini dapat diturunkan menjadi persamaan simulasi.

Dalam pembuatan model disesuaikan dengan kondisi permasalahan yang akan disajikan. Untuk itu dalam pemodelan motor induksi motor belitan (MIRB) dengan sistem *pemulih energi slip* ini digunakan kerangka referensi.

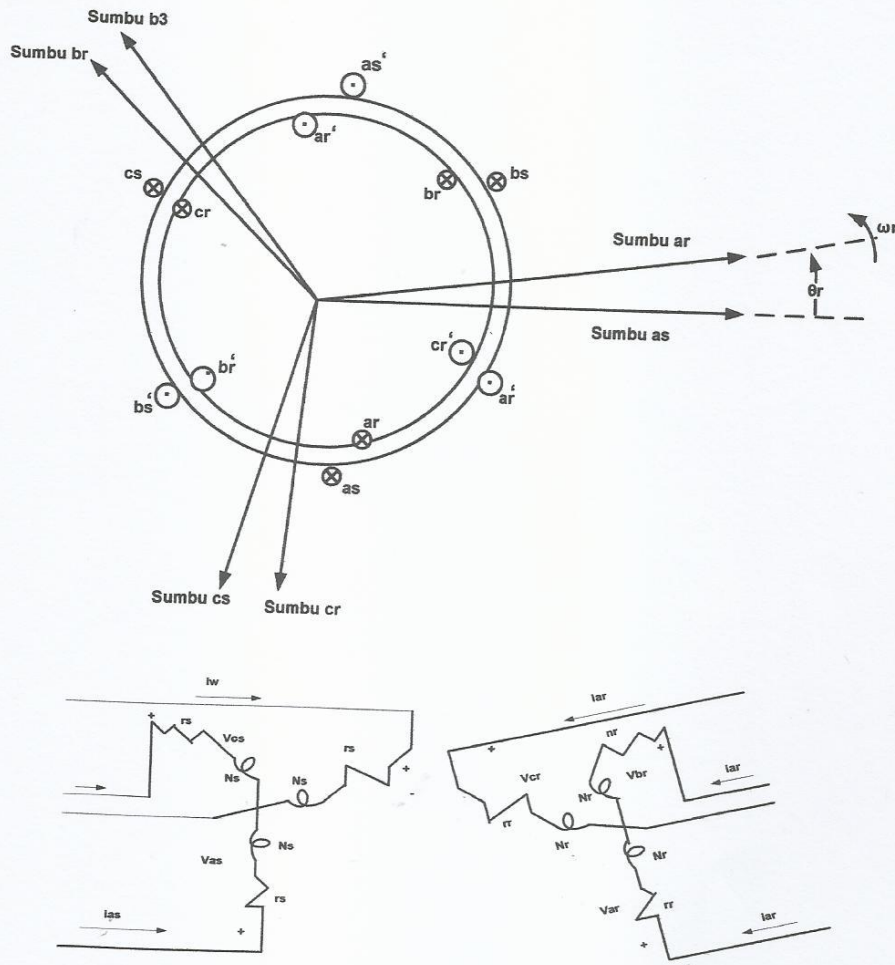
Kerangka referensi adalah suatu pemodelan matematis yang menggunakan transformasi umum yang mengeleminir induktansi yang berubah terhadap waktu dengan menyatakan variable-variabel stator dan rotor yang mungkin berputar pada kecepatan sudut tertentu atau dalam keadaan diam. Kecepatan sudut dari transformasi tidak spesifik dan dipilih sembarang untuk menyelesaikan solusi persamaan sistem, dan transformasi ini dikenal dengan kerangka referensi sembarang. Transformasi referensi kerangka sembarang untuk merubah variable-variabel digunakan dengan hubungan persamaan trigonometri sebagai konstanta perubah.

Model Motor Induksi MIRB Menggunakan Konverter - Inverter

Motor induksi belitan rotor (MIRB) tiga fasa simetris, dengan rotor yang berputar. Rangkaian stator digambarkan sepanjang sumbu-sumbu a_r , b_r , dan c_r , seperti terlihat pada gambar 3.1. Besar tegangan, arus dan fluksi dapat dinyatakan dalam skala sumbu yang bersangkutan.

Pemodelan dalam motor tersebut diperlukan batasan dengan asumsi-asumsi sebagai berikut:

1. Setiap belitan stator terdistribusi menghasilkan gaya gerak listri (GGL) yang sinusoidal didalam ruang, dan terdiri dari tiga buah belitan yang identik.
2. Belitan-belitan pada rangkaian rotor terdiri 3 buah belitan yang identik satu sama lain.
3. Masing-masing belitan pada stator maupun rotor terpisah dengan sudut sebesar 120° .
4. Celah udara stator dan rotor sama.
5. rangkaian magnetik merupakan rangkaian linear.



Gambar 3.1 model mesin induksi 3 fasa simetris

Dengan :

a_s, b_s, c_s : sumbu-sumbu stator yang dinyatakan dalam koordinat a,b,c

a_r, b_r, c_r : sumbu-sumbu rotor dalam koordinat a,b,c

i_{as}, i_{bs}, i_{cs} : arus stator

i_{ar}, i_{br}, i_{cr} : arus rotor

V_{as}, V_{bs}, V_{cs} : tegangan stator

V_{ar}, V_{br}, V_{cr} : tegangan rotor

N_s dan r_s : belitan dan tahanan ekivalen stator

N_r dan r_r : belitan dan tahanan ekivalen rotor

Persamaan tegangan dalam koordinat a-b-c

Dari pemodelan gambar 3.1, persamaan tegangan rangkaian stator dan rotor dapat diturunkan yaitu:

$$V_{abcs} = r_s i_{abcs} + P \lambda_{abcs} \quad (3.1)$$

$$V_{abcr} = r_r i_{abcs} + P \lambda_{abcr} \quad (3.2)$$

Dengan :

$$[V_{abcs}]^T = [V_{as} \quad V_{bs} \quad V_{cs}] \quad (3.3)$$

$$[V_{abcr}]^T = [V_{ar} \quad V_{br} \quad V_{cr}] \quad (3.4)$$

Pada persamaan diatas subscript s menyatakan variable dan parameter yang berhubungan dengan rangkaian stator, dan subscript r berhubungan dengan rotor. r_s dan r_r adalah matriks diagonal yang sama dengan elemen-elemen yang bukan nol.

Untuk sitem linear yang bersifat megnetik, fluksi lingkup (lampiran C) dapat dinyatakan dalam persamaan matrik yaitu:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Dengan :

L_s : induktansi belitan stator

L_{sr} : induktansi belitan stator dan rotor

L_r : induktansi belitan rotor

i_{abcs} : arus stator

i_{abcr} : arus rotor

λ_{abcs} : Fluksi lingkup stator

λ_{abcr} : fluksi lingkup rotor

fluksi lingkup yang dilihat dari sisi stator:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L'_{sr} \\ (L'_{sr})^T & \lambda'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

L'_{sr} : induktansi bersama dilihat dari sisi stator

L'_r : induktansi rotor yang dilihat dari sisi stator

i'_{abc} : arus rotor yang dilihat sisi stator

λ'_{abcr} : fluksi lingkup rotor yang dilihat dari sisi stator

Demikian juga persamaan tegangan yang dilihat dari sisi stator ditulis:

$$\begin{bmatrix} V_{abcs} \\ V'_{zbcrr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_s & pL'_{sr} \\ (L'_{sr})^T & r'_r + pL'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Dengan :

r'_r : tahanan rotor yang dilihat dari sisi stator

V'_{abcr} : tegangan rotor yang dilihat dari sisi stator

Persamaan Tegangan Dalam koordinat d-q

Dengan menggunakan transformasi kerangka referensi diperoleh persamaan tegangan motor induksi dari sumbu 3 fasa (a,b,c) ke kerangka 2 fasa sumbu berputar (d, q, o).

Persamaan tegangan motor induksi dapat ditulis sebagai untuk stator dan rotor diperoleh :

$$V_{qdos} = r_s i_{qdos} + \omega \lambda_{dqs} + p \lambda_{qdos} \quad (3.8)$$

$$V_{qdor} = r_r i_{qdor} + (\omega - \omega_r) \lambda_{dqr} + p \lambda_{qdor} \quad (3.9)$$

Dengan :

$$(\lambda_{dqs})^T = [\lambda_{ds} \quad -\lambda_{qs} \quad 0] \quad (3.10)$$

$$(\lambda'_{dqr})^T = [\lambda_{dr} \quad -\lambda_{qr} \quad 0] \quad (3.11)$$

Jika persamaan transformasi disubstitusikan kepersamaan fluksi lingkup dalam variable d-q (lampiran B) ditulis sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qdos} \\ \lambda'_{qdor} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s L_s (K_s)^{-1} & K_s L'_{sr} (K_r)^{-1} \\ K_r (L'_{sr})^T (K_s)^{-1} & K_s L'_{sr} (K_r)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qdos} \\ i'_{qdor} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Dari persamaan (3.8) dan (3.9) persamaan tegangan untuk motor induksi dapat ditulis:

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \quad (3.13)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \quad (3.14)$$

$$V_{os} = r_s i_{os} + p \lambda_{os} \quad (3.15)$$

$$V'_{qr} = r_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + p \lambda'_{qr} \quad (3.16)$$

$$V'_{dr} = r_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + p \lambda'_{dr} \quad (3.17)$$

$$V'_{or} = r_r i'_{or} + p \lambda'_{or} \quad (3.18)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan variable-variabel dalam persamaan (3.12), diperoleh:

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + M(i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.19)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + M(i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.20)$$

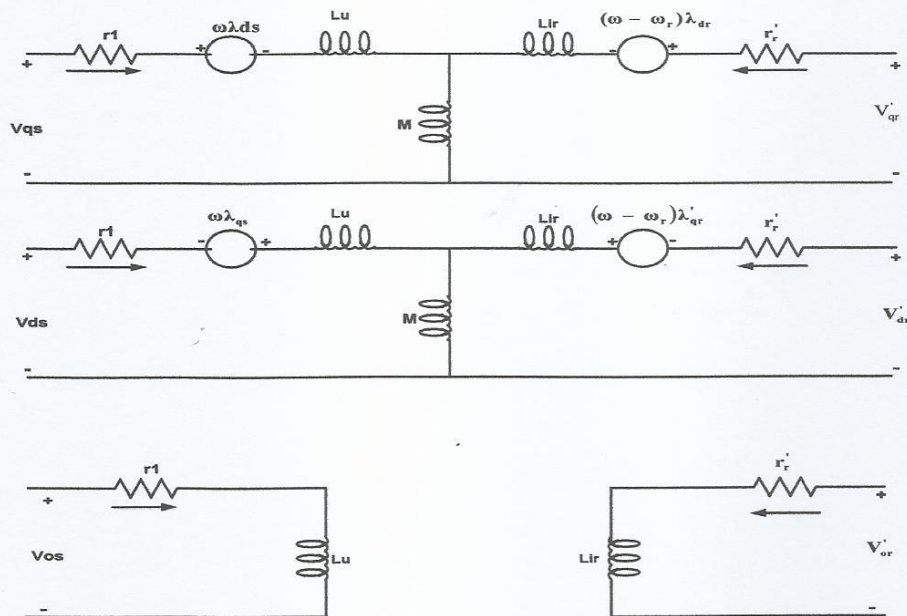
$$\lambda_{os} = L_{ls} i_{os} \quad (3.21)$$

$$\lambda'_{qr} = L'_{lr} i_{qr} + M(i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.22)$$

$$\lambda'_{dr} = L'_{lr} i'_{dr} + M(i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.23)$$

$$\lambda'_{or} = L'_{lr} i'_{or} \quad (3.24)$$

Dari persamaan (3.13) sampai persamaan (3.24) dapat digambarkan rangkaian ekivalen motor induksi dibawah ini:



Gambar 3.2 Rangkaian ekivalen motor induksi 3 fasa simetris dalam kerangka referensi sembarang

Karena biasanya parameter mesin selalu dinyatakan dalam ohm atau per-unit dari suatu impedansi dasar, maka persamaan (3.13) – (3.18) dinyatakan dalam persamaan tegangan dan fluks lingkup dalam bentuk reaktansi ditulis:

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs} \quad (3.25)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds} \quad (3.26)$$

$$V_{os} = r_s i_{os} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{os} \quad (3.27)$$

$$V'_{qr} = r'_r i'_{qr} + \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \psi'_{dr} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} \quad (3.28)$$

$$V'_{dr} = r'_r i'_{dr} + \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \psi'_{qr} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{dr} \quad (3.29)$$

$$V'_{or} = r'_r i'_{or} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{or} \quad (3.30)$$

Dengan ω_b kecepatan sudut dasar listrik yang digunakan untuk menghitung reaktansi induktif. Fluks lingkup persamaan (3.19) – (3.24) sekarang menjadi fluks lingkup dasar per detik dengan satuan volt ditulis:

$$\psi_{qs} = x_{ls} i_{qs} + x_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.31)$$

$$\psi_{ds} = x_{ls} i_{ds} + x_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.32)$$

$$\psi_{os} = x_{ls} i_{os} \quad (3.33)$$

$$\psi_{qr} = x'_{lr} i'_{qr} + x_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.34)$$

$$\Psi'_{dr} = x'_{lr} i'_{dr} + x_M (i_{ds} + i_{dr}) \quad (3.35)$$

$$\Psi'_{or} = x'_{lr} i'_{or} \quad (3.36)$$

Persamaan reaktansi induktif diatas diperoleh dengan mengalikan ω_b kali induktansi. Bila persamaan tersebut disubsitusikan kedalam persamaan tegangan (3.25)-(3.30) diperoleh persamaan tegangan dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{os} \\ V'_{qr} \\ V'_{dr} \\ V'_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{p}{\omega_b} x_{ss} & \frac{\omega}{\omega_b} x_{ss} & 0 & \frac{p}{\omega_b} x_M & \frac{\omega}{\omega_b} x_M & 0 \\ \frac{\omega}{\omega_b} x_{ss} & r_s + \frac{p}{\omega_b} x_{ss} & 0 & \frac{\omega}{\omega_b} x_M & \frac{p}{\omega_b} x_M & 0 \\ 0 & 0 & r_s + \frac{p}{\omega_b} x_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{p}{\omega_b} x_M & -\left(\frac{\omega - \omega r}{\omega_b}\right) x_M & 0 & r'_r + \frac{p}{\omega_b} x'_{rr} & \left(\frac{\omega - \omega}{\omega_b}\right) x'_{rr} & 0 \\ -\left(\frac{\omega - \omega_b}{\omega_b}\right) x_M & \frac{p}{\omega_b} x_M & 0 & -\left(\frac{\omega - \omega r}{\omega_b}\right) x'_{rr} & r'_r + \frac{p}{\omega_b} x'_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r'_r + \frac{p}{\omega_b} x'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{or} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Dengan:

$$x_{ss} = x_{ls} + x_M \quad (3.38)$$

$$x'_{rr} = x'_{lr} + x_M \quad (3.39)$$

$$s = \frac{\omega - \omega r}{\omega_b} \quad (3.40)$$

Persamaan (3.37) merupakan persamaan tegangan dengan arus sebagai variable keadaan. Untuk menyatakan persamaan (3.37) kedalam kerangka referensi perputaran sinkron dengan membuat $\omega = \omega_e$ dan $\omega_e = \omega_b$, maka persamaan tegangan ditulis:

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^{\theta} \\ V_{ds}^{\theta} \\ V_{qr}^{\theta} \\ V_{dr}^{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_e + \frac{x_{ss}}{\omega_b} & x_{ss} & \frac{x_M}{\omega_b} p & x_M \\ x_{ss} & r_s + \frac{x_{ss}}{\omega_b} p & 0 & \frac{x_M}{\omega_b} p \\ \frac{x_M}{\omega_b} p & s x_M & r_r' + \frac{x_{rr}'}{\omega_b} p & s x_{rr}' \\ -s x_M & \frac{x_M}{\omega_b} p & -s x_{rr}' & r_r' + \frac{x_{rr}'}{\omega_b} p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^{\theta} \\ i_{ds}^{\theta} \\ i_{qr}^{\theta} \\ i_{dr}^{\theta} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Dimana besaran sumbu o dihilangkan karena hanya kondisi seimbang yang dibahas.

Persamaan torka

Torka suatu motor yang sedang berputar besarnya tergantung pada parameter motor tersebut. Dan berputarnya melawan momen inersianya sendiri serta gesekan antara poros rotor dengan bantalannya. Torka beban adalah torka untuk beban yang dikopel.

Persamaan torka dalam variable mesin untuk sistem 3 fasa simetris sebagai berikut:

$$T_e = \left[\frac{p}{2} \right] [i_{abcs}]^T \frac{\delta}{\delta \theta_r} [L'_{sr} i'_{abcr}] \quad (3.42)$$

Dengan menggunakan factor transformasi, persamaan torka elektromagnetik ditulis :

$$T_e = \left[\frac{p}{2} \right] [(k_s)^{-1} i_{qdos}]^T \frac{\delta}{\delta \theta_r} [L'_{sr}] (K_r)^{-1} i'_{qdor} \quad (3.43)$$

Dengan mensubstitusi matriks-matriks transformasi maka diperoleh hasil sebagai berikut:

$$T_e = \left(\frac{p}{2}\right) \left(\frac{3}{2}\right) M (i_{qs}^\theta i_{dr}^\theta - i_{ds}^\theta i_{qr}^\theta) \quad (3.44)$$

Karena arus dipilih sebagai variable keadaan, persamaan torka elektromagnetik dinyatakan:

$$T_e = \times M (i_{qs}^\theta i_{dr}^\theta - i_{ds}^\theta i_{qr}^\theta) \quad (3.45)$$

Hubungan torka dan kecepatan rotor dinyatakan

$$T_e = T_L + J \left(\frac{2}{p}\right) p \omega_r \quad (3.46)$$

Dalam bentuk per-unit hubungan torka dan kecepatan ditulis:

$$T_e = T_L + 2Hp \frac{\omega_r}{\omega_b} \quad (3.47)$$

Dengan:

$$H = (1/2) (2/P) \frac{J \omega_b}{T_b}$$

H = konstanta kelembaman (detik)

J = momen kelembaman (kg.m²)

P = jumlah dari kutub

p = operator d/dt

T_L = Torka beban (N-m)

T_e = Torka elektromagnetik (N-m)

Motor Induksi Menggunakan Konverter-Inverter (Penapis)

Persamaan tegangan untuk penapis ditulis:

$$V_r' = r_f i_{dc} + \frac{x_f}{\omega_b} p i_{dc} - V_i' \quad (3.48)$$

Dengan:

V_r' = Tegangan penyearah (volt)

V_i' = Tegangan inverter (volt)

i_{dc} = Arus melewati penapis (A)

r_f = Resistance penapis (ohm)

X_f = Reaktansi penapis (ohm)

Persamaan Tegangan Dengan Penapis

Dengan mengabaikan komutasi induktansi, keluaran tegangan rata-rata penyearah adalah:

$$V_r = \frac{3V_3}{\pi} V_{mr} \quad (3.49)$$

Tegangan pada sisi arus searah inverter

$$V_i = \frac{3V_3}{\pi} V_{ms} \cos\alpha \quad (3.50)$$

Dengan :

V_{mr} = harga puncak tegangan fasa rotor.

V_{ms} = harga puncak tegangan fasa stator.

Persamaan Tegangan Seluruh Sistem

Dengan mengabaikan harmonisa rotor, maka tegangan rotor dianggap sinusoidal dan mengasumsikan sumbu q ditempatkan hanya berimpit dengan sumbu magnetik ar' rotor sehingga diperoleh :

$$V_{qr}^{\theta} = V_{mr}' \quad (3.51)$$

$$V_{dr}^{\theta} = 0 \quad (3.52)$$

Dengan:

V_{mr}' = harga puncak tegangan fasa rotor yang dilihat dari sisi stator.

komutasi penyearah diabaikan dan $\alpha = 0$, tegangan penyearah dari persamaan (3.50) dapat ditulis:

$$V_r' = \frac{3V_3}{\pi} V_{mr}' \quad (3.53)$$

Substitusikan persamaan (3.51) kepersamaan (3.53) sehingga diperoleh:

$$V_r' = \frac{3V_3}{\pi} V_{qr}^{\theta} \quad (3.54)$$

Dengan :

V_r' = tegangan penyearah yang dilihat dari sisi stator

Pengabaian komutasi pada penyearah, arus yang lewat penyearah dianggap se fasa dengan tegangan masuk. Arus i_{dr}^{θ} sama dengan nol, karena sumbu q berimpit dengan harga puncak V_{cr}^{θ}

Dengan mengabaikan rugi-rugi pada penyearah, maka daya pada sisi masuk penyearah sama dengan daya pada sisi keluaran penyearah, sehingga dalam per-unit ditulis:

$$3/2 V_{qr}^{\theta} i_{qr}^{\theta} = - V_r' i_{dc}' \quad (3.55)$$

Karena semua besaran dilihat dari sisi stator, dari persamaan (3.54) dan persamaan (3.55)

$$i_{dc}' = - \frac{\pi}{2V_3} i_{qr}^{\theta} \quad (3.56)$$

Substitusikan persamaan (3.54) dan (3.56) kepersamaan (3.38) sehingga diperoleh:

$$V_{qr}^{\theta} = - \frac{\pi^2}{18} r_f' i_{qr}^{\theta} - \frac{\pi^2}{18} \frac{f'}{\omega_b} p i_{qr}^{\theta} - \frac{\pi}{3V_3} V_i' \quad (3.57)$$

HASIL ANALISIS MENGGUNAKAN BEBAN TORKA KUADRATIS

Pemodelan suatu sistem dalam kondisi peralihan merupakan langkah pertama untuk menyelidiki kesetabilan. Untuk pemodelan kondisi peralihan ini digunakan persamaan (3.60) sehingga ditulis kembali sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^{\theta} \\ V_{ds}^{\theta} \\ -V_{ms} \cos \alpha \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{x_{ss}}{\omega_b} p & x_{ss} & \frac{x_{ss}}{\omega_b} \\ -x_{ss} & r_s + \frac{x_{ss}}{\omega_b} & -x_m \\ \frac{x_m}{\omega_b} p & s x_m & r_r' + R_r' + \frac{(x_{rr}' + x_f')}{\omega_b} p \\ -s x_m & \frac{x_m}{\omega_b} & -s x_{rr}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^{\theta} \\ i_{ds}^{\theta} \\ i_{qr}^{\theta} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Persamaan torka dalam pemodelan ini dari persamaan (3.61), untuk $i_{dr}^{\theta} = 0$ ditulis kembali:

$$T_e = -x_m i_{ds}^{\theta} i_{qr}^{\theta} \quad (4.2)$$

Persamaan keseimbangan torka dari persamaan (3.46) ditulis kembali:

$$T_e = T_L + 2HP \frac{\omega_r}{\omega_b} \quad (4.3)$$

Hubungan nilai V_{qs}^{θ} dan V_{ds}^{θ} sama dengan nilai V_{ms} dari persamaan (3.62) dapat ditulis:

$$(V_{ms})^2 = (V_{qs}^{\theta})^2 + (V_{ds}^{\theta})^2 \quad (4.4)$$

Analisa model peralihan motor induksi dengan pemulih energi slip dilakukan secara bersamaan oleh persamaan-persamaan (4.1) – (4.4), tetapi kombinasi persamaan ini bukan merupakan dalam bentuk standard ruang keadaan.

Untuk memperoleh dalam bentuk standard dilakukan dengan memanipulasi persamaan (4.1) dan (4.4), sehingga dari baris keempat persamaan (4.1) diperoleh :

$$pi_{ds}^{\theta} = \frac{(s \times_m i_{qs}^{\theta} + s \times_{rr}' i_{qr}^{\theta})}{(\times_m / \omega_b)} \quad (4.5)$$

Persamaan (4.5) disubsitusikan kebaris kedua persamaan (4.1) untuk mengeliminasi pi_{ds}^{θ} dalam persamaan V_{ds}^{θ} , sehingga dapat ditulis:

$$V_{ds}^{\theta} = -\times_{ss} i_{qs}^{\theta} + r_s i_{ds}^{\theta} - \times_M i_{qr}^{\theta} + \frac{\times_{ss}}{\omega_b} \left[\frac{s \times_M i_{qs}^{\theta} + s \times_{rr}' i_{qr}^{\theta}}{(\times_M / \omega_b)} \right] \quad (4.6)$$

Substitusikan persamaan (4.6) kepersamaan (4.4) untuk memperoleh dalam bentuk V_{qs}^{θ} ditulis :

$$V_{qs}^{\theta} = \left[(V_{ms})^2 - \left\{ -\times_{ss} i_{qs}^{\theta} + r_s i_{ds}^{\theta} - \times_M i_{qr}^{\theta} + \frac{\times_{ss}}{\omega_b} \left(\frac{s \times_M i_{qs}^{\theta} + s \times_{rr}' i_{qr}^{\theta}}{(\times_M / \omega_b)} \right) \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.7)$$

Dari hasil manipulasi diatas, persamaan (4.1) menjadi persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^{\theta} \\ -V_{MS} \cos \alpha \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{\times_{ss}}{\omega_b} p & \times_{ss} & \frac{\times_M}{\omega_b} p \\ \frac{\times_M}{\omega_b} p & s \times_M & r_r' + R_f' + \frac{\times_{rr}' + \times_f'}{\omega_b} p \\ -s \times_M & \frac{\times_M}{\omega_b} & -s \times_{rr}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^{\theta} \\ i_{ds}^{\theta} \\ i_{qr}^{\theta} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Persamaan (4.8) mempunyai matriks impedansi 3x3 yang dapat dibalik untuk memperoleh variabel-variabel sehingga terbentuk suatu variabel keadaan $(i_{qs}^{\theta}, i_{ds}^{\theta}, i_{qr}^{\theta})$ serta variabel masukan $(V_{ms}$ dan $\cos \alpha)$.

Bentuk Persamaan Keadaan

Bentuk persamaan (4.8) dapat dirubah dalam bentuk persamaan ruang keadaan sistem:

$$\begin{bmatrix} \dot{p}i_{qs}^\theta \\ \dot{p}i_{ds}^\theta \\ \dot{p}i_{qr}^\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_{ss}}{\omega_b} & 0 & \frac{x_M}{\omega_b} \\ \frac{x_M}{\omega_b} & 0 & \frac{x_{rr} + x_f'}{\omega_b} \\ 0 & \frac{x_M}{\omega_b} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} r_s & x_{ss} & 0 \\ 0 & s x_M & (r_f' + R_f') \\ -s x_M & 0 & -s x_{rr}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^\theta \\ i_{ds}^\theta \\ i_{qr}^\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{x_{ss}}{\omega_b} & 0 & \frac{x_M}{\omega_b} \\ \frac{x_M}{\omega_b} & 0 & \frac{x_{rr} + x_f'}{\omega_b} \\ 0 & \frac{x_M}{\omega_b} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{qs}^\theta \\ -V_{ms} \cos \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Atau dapat juga ditulis:

$$\begin{bmatrix} p i_{qs}^{\theta} \\ p i_{ds}^{\theta} \\ p i_{qr}^{\theta} \end{bmatrix} = \omega_b \begin{bmatrix} \frac{(\dot{x}'_{rr} + \dot{x}'_f) r_s}{A} & \frac{(\dot{x}'_{rr} + \dot{x}'_f) \dot{x}_{ss} - \dot{x}_M^2 s}{A} & \frac{-(r'_r + R'_f) \dot{x}_M}{A} \\ s & 0 & \frac{s \dot{x}'_{rr}}{\dot{x}_M} \\ \frac{-\dot{x}_{Mrs}}{A} & \frac{\dot{x}_{ss} \dot{x}_M (s-1)}{A} & \frac{(r'_f + R'_f) \dot{x}_{ss}}{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^{\theta} \\ i_{ds}^{\theta} \\ i_{qr}^{\theta} \end{bmatrix} \\
 + \omega_b \begin{bmatrix} \frac{-(\dot{x}'_{rr} + \dot{x}'_f)}{A} & \frac{\dot{x}_M}{A} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{\dot{x}_M}{A} & \frac{-\dot{x}_{ss}}{A} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qs}^{\theta} \\ -V_{ms} \cos \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$\text{Dengan : } A = \dot{x}_M^2 - \dot{x}_{ss}(\dot{x}'_{rr} + \dot{x}'_f) \quad (4.11)$$

Persamaan (4.11) dapat juga ditulis:

$$\begin{bmatrix} p i_{qs}^{\theta} \\ p i_{ds}^{\theta} \\ p i_{qr}^{\theta} \end{bmatrix} = \omega_b \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{23} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^{\theta} \\ i_{ds}^{\theta} \\ i_{qr}^{\theta} \end{bmatrix} + \omega_b \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & I_{13} \\ I_{21} & I_{22} & I_{23} \\ I_{31} & I_{32} & I_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qs}^{\theta} \\ -V_{ms} \cos \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Persamaan (4.12) merupakan elemen-elemen matriks yang diperoleh dengan cara membandingkan persamaan (4.12) dengan (4.10)

Persamaan keseimbangan torka untuk gerak mekanik (4.3) dirubah menjadi persamaan diferensial kecepatan ditulis:

$$p\omega_r = \frac{(T_\theta - T_L) \omega_b}{2H} \quad (4.13)$$

Dengan:

$$\omega_r = (1-s) \omega_s \quad (4.14)$$

Persamaan (4.15) dapat ditulis dengan mensubsitusikan persamaan (4.14) kedalam persamaan (4.13) diperoleh :

$$ps = \frac{\omega_b (T_L - T_e)}{2\omega_s H} \quad (4.15)$$

Karena dalam penambahan ini menggunakan torka beban kwadratis, maka T_L dapat ditulis:

$$T_L = C \omega_r^2 = C (1-s)^2 \omega_s^2 \quad (4.16)$$

Dengan : $C = \text{konstanta}$.

Persamaan (4.2) dan persamaan (4.16) disubsitusikan kepersamaan (4.15) sehingga diperoleh:

$$ps = \frac{\omega_b (\sum_M i_{ds}^\theta + T_L)}{2\omega_s H} \quad (4.17)$$

Persamaan (4.12) dan (4.17) adalah merupakan model peralihan MIRB dengan pemulih energi slip. Dengan menggabungkan kedua persamaan diperoleh persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} pi_{qs}^\theta \\ pi_{ds}^\theta \\ pi_{qr}^\theta \\ ps \end{bmatrix} = \omega_b \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs}^\theta \\ I_{ds}^\theta \\ I_{qr}^\theta \\ S \end{bmatrix} + \omega_b \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & I_{13} & I_{14} \\ I_{21} & I_{22} & I_{23} & I_{24} \\ I_{31} & I_{32} & I_{33} & I_{34} \\ I_{41} & I_{42} & I_{43} & I_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qs}^\theta \\ -V_{ms} \cos\alpha \\ 0 \\ T_L \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Linerisasi Persamaan Keadaan

Persamaan keadaan (4.18) dengan koefisien k_{ij} dan I_{ij} adalah konstanta. Dalam bentuk matriks-vektor dapat ditulis:

$$\dot{\bar{x}} = K \bar{x} + L u \quad (4.19)$$

Dengan :

X = matriks vector keadaan $n \times 1$.

U = matriks vector masukan $m \times 1$.

K = matriks sistem $n \times n$.

L = matriks masukan $n \times m$.

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & I_{13} & I_{14} \\ I_{21} & I_{22} & I_{23} & I_{24} \\ I_{31} & I_{32} & I_{33} & I_{34} \\ I_{41} & I_{42} & I_{43} & I_{44} \end{bmatrix}$$

Persamaan keadaan $\dot{\bar{x}} = f(\bar{x}, u)$ persamaan umum sistem linear yang dapat dilinearisasi untuk pergeseran kecil disekitar titik operasi mantap (x_0, u_0) . Dengan asumsi bahwa sistem dalam keadaan seimbang pada kondisi x_0 dan u_0 , sehingga ditulis:

$$\dot{\bar{x}} = f(\bar{x}_0, u_0) = 0$$

Karena turunan-turunan semua variabel-variabel dalam keadaan seimbang adalah nol, maka sistem terus terletak pada titik keseimbangan kecuali kalau ada gangguan lain.

Persamaan keadaan dapat dilinearkan disekitar titik operasi mantap (x_0, u_0) dengan ekspansi kedalam deret Taylor, dengan suku kedua dan selanjutnya diabaikan sehingga persamaan keadaan ke I ditulis sebagai berikut:

$$\bar{x}_i = f_i(x_0, u_0) + \sum_{k=1}^n \frac{f_i(x, u)}{x_j} \bigg|_{\substack{x=x_0 \\ u=u_0}} (x_j - x_{j0}) + \sum_{k=1}^m \frac{f_i(x, u)}{u_k} \bigg|_{\substack{x=x_0 \\ u=u_0}} (u_k - u_{k0}) \quad (4.20)$$

Dengan turunan operasi titik mantap, $f_i(x_0, u_0) = 0$ dan definisi pergeseran kecil disekitar operasi mantap adalah:

$$\delta x_j = x_j - x_{j0} \quad \therefore \delta x_j = \bar{x}_j$$

$$\delta u_k = u_k - u_{k0}$$

Persamaan keadaan linearisasi ke I dapat ditulis :

$$\delta \bar{x}_i = \sum_{j=1}^n \frac{f_i(x, u)}{x_j} \bigg|_{\substack{x=x_0 \\ u=u_0}} \delta x_j + \sum_{k=1}^m \frac{f_i(x, u)}{u_k} \bigg|_{\substack{x=x_0 \\ u=u_0}} \delta u_k \quad (4.21)$$

Hasil lenearisasi diatas dapat ditulis sebagai berikut:

$$\delta \bar{x} = M \delta x + n \delta u \quad (4.22)$$

Dengan:

$$M = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \dots \dots \dots \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} \dots \dots \dots \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \frac{\partial f_n}{\partial u_2} \dots \dots \dots \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} = \frac{\partial f}{\partial u} \Big|_{x_0, u_0} \quad (4.23)$$

= turunan parisisi dari matriks K

$$N = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} \dots \dots \dots \frac{\partial f_1}{\partial x_r} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} \dots \dots \dots \frac{\partial f_2}{\partial x_r} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_r}{\partial u_1} & \frac{\partial f_r}{\partial u_2} \dots \dots \dots \frac{\partial f_r}{\partial u_r} \end{bmatrix} = \frac{\partial f}{\partial u} \Big|_{x_0, u_0} \quad (4.24)$$

= turunan parsial matrik

∂x = vektor ruang keadaan pergeseran kecil

∂u = vector masukkan

Koefisiensi matriks untuk MIRB dengan pemulih energi slip (lampiran D)

Stabilitas

Model peralihan MIRB dengan pemulih energi slip memiliki dua masukan yang dapat dipisah. Satu tegangan masukan dan yang lain sudut penyalaan inverter. Bila tegangan masuk dianggap konstan, maka hanya sudut penyalaan inverter yang dirubah. Variabel-variabel keluran adalah arus dan kecepatan rotor (slip) yang dikontrol oleh PI (prortional and integral) kontroler selama gangguan jika torca beban digunakan.

Persamaan pergeseran kecil hasil linerisasi dalam bentuk ruang keadaan diperoleh dengan menganggap terjadi pergeseran kecil disekitar titikoperasi keadaan mantap dalam arus, kecepatan rotor (slip), torca beban, sudut penyalaan. Karena torca beban kuadratis adalah fungsi kecepatan rotor (slip), maka yang bergeser kecil hanya kecepatan rotor (slip). Pergeseran kecil MIRB dengan sistem pemulih energi slip

$$\dot{i}_{qs}^{\theta} = I_{qs}^{\theta} + \partial i_{qs}^{\theta}$$

$$\dot{i}_{ds}^{\theta} = I_{ds}^{\theta} + \partial i_{ds}^{\theta}$$

(4.25)

$$\dot{i}_{qr}^{\theta'} = I_{qr}^{\theta'} + \partial i_{qr}^{\theta'}$$

$$s = S + \partial_s$$

Hasil linearisasi merupakan suatu himpunan persamaan pergeseran kecil yang menggambarkan sifat dinamik pergeseran kecil sistem dari titik operasi mantap. Dengan linearisasi, sistem dapat dinyatakan sebagai suatu sistem linier. Dengan menggunakan teknik linearisasi sistem dapat ditentukan stabilitas dinamik (stabilitas pergeseran kecil) dengan menggunakan metoda perhitungan nilai eigen.

Jika stabilitas sistem dianalisis, sistem dapat dengan atau tanpa eksitasi (masukan), jika sistem stabil, suatu eksitasi terbatas akan memberikan keluaran terbatas. Tanpa eksitasi atau eksitasi konstan, ∂u sama dengan nol. Persamaan (4.22) menjadi persamaan diferensial homogen dengan bentuk penyelesaian:

$$\partial x = x_0 e^{Mt} \quad (4.26)$$

Dengan

x_0 = vector kondisi awal.

e^{Mt} = matriks transisi keadaan.

Matriks transisi dihitung dengan menggunakan hubungan sebagai berikut:

$$e^{Mt} = L^{-1} (sI - M)^{-1} \quad (4.27)$$

Matriks transisi terbentuk suatu matriks eksponensial dengan elemen-elemen terbentuk secara eksponensial. Stabilitas pergeseran kecil diperoleh jika seluruh elemen matriks transisi mendekati nol secara asimtotis apabila waktu membesar. Jika matriks M dibuat terbentuk diagonal, maka matriks transisi akan berbentuk diagonal:

$$\begin{bmatrix} e^{\lambda_1 t} & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & e^{\lambda_2 t} & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & e^{\lambda_n t} \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Dengan:

L^{-1} = transformasi Laplace balik.

s = operator laplace

I = matriks identitas.

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ = nilai – nilai eigen matriks M .

sifat stabil asimtotis terjadi bila seluruh nilai-nilai eigen matriks M mempunyai bagian nyata (real) negatif. nilai eigen dihitung dari persamaan:

$$\text{determinan } (M - \lambda I) = 0 \quad (4.29)$$

untuk menghitung operasi sistem ini, arus searah dari persamaan (2.25) diketahui sebanding dengan torka beban, bila beban naik, arus juga naik. Dari persamaan (3.55) arus sebanding dengan arus sumbu q kerangka referensi perputaran sinkron. Dengan diketahui variabel tersebut. Untuk operasi dalam keadaan mantap dan seimbang, maka $p = 0$ sehingga dari persamaan (4.8) diperoleh:

$$V_{qs}^0 = r_s I_{qs}^0 + x_{ss} I_{ds}^0 \quad (4.30)$$

$$-V \cos \alpha = s x_M I_{ds}^0 + (r_f' + R_f') I_{qr}' \quad (4.31)$$

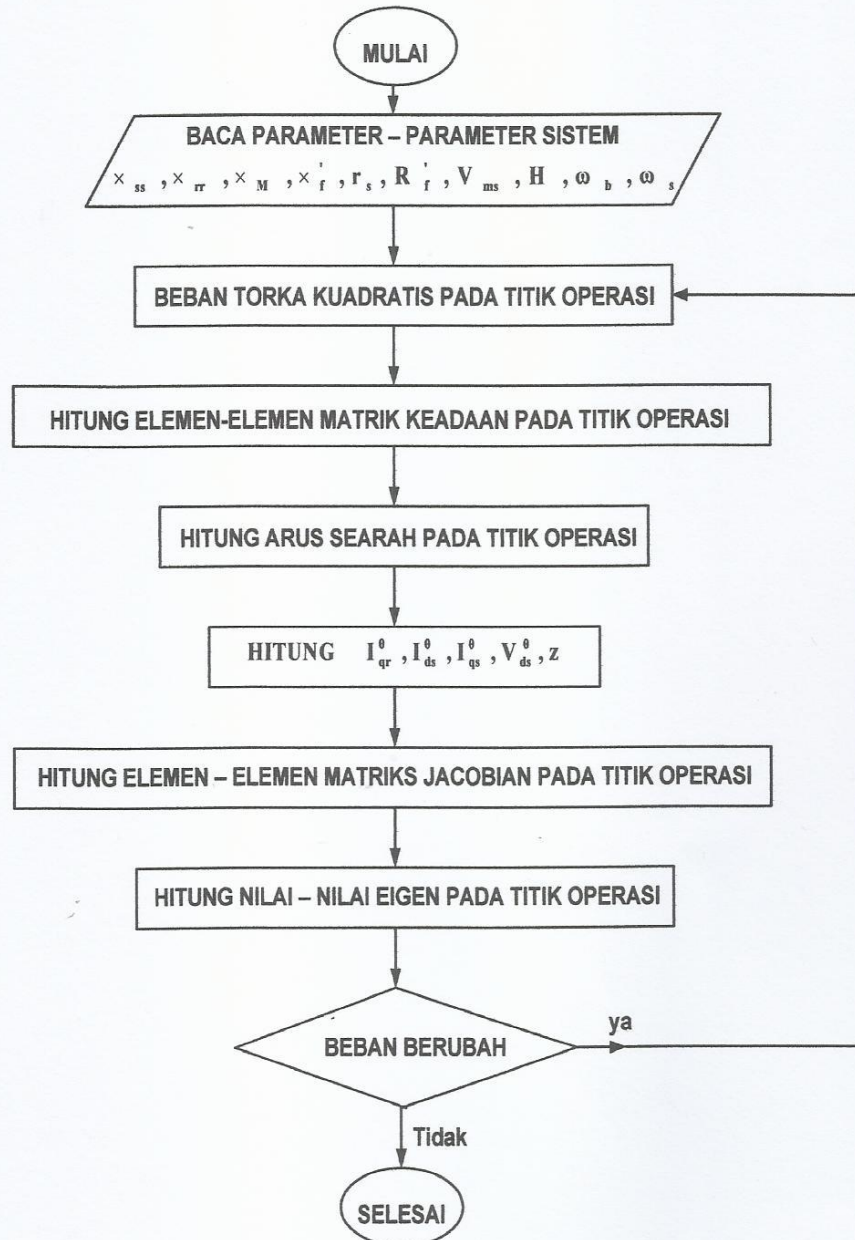
$$0 = -s x_M I_{qs}^0 - s x_{rr} I_{qr}' \quad (4.32)$$

Dari persamaan – persamaan diatas diperoleh harga arus $I_{qs}^0, I_{ds}^0, I_{qr}'$ dalam operasi mantap. Dengan diketahui parameter-parameter dan harga arus diatas matriks keadaan sistem dapat dihitung.

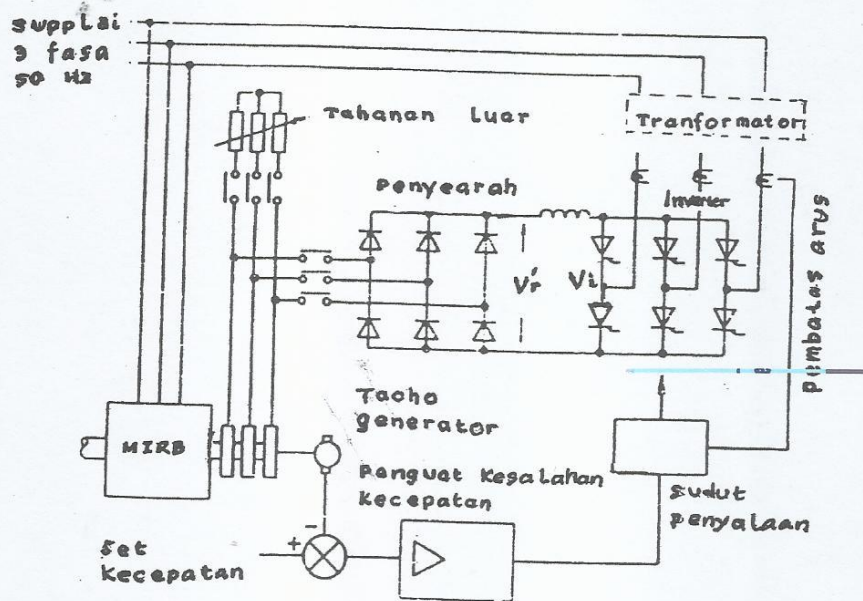
Langkah-Langkah MIRB Konverter-Inverter Penggerak Beban Torka Kuadratis

Menghitung stabilitas MIRB konverter- Inverter penggerak beban torka kuadratis dilaksanakan dengan bantuan program komputer.

Urutan kerja MIRB Konverter- Inverter penggerak beban torka kuadratis, digambarkan pada diagram aliar gambar 4..1.



Gambar 4.1. diagram alir menghitung stabilitas MIRB Konverter - Inverter penggerak beban torka kuadratis.



Gambar 4.2 Skema rangkaian kontrol tertutup MIRB dengan pemulih energi slip sebagai pengatur kecepatan.

Motor MIRB dengan Konverter- Inverter sudut penyalaan sebagai pengatur kecepatan. Masalah kestabilan diselidiki dengan teknik linierisasi disekitar titik operasi, dengan arus dan kecepatan merupakan gangguan keadaan, maka diperoleh matriks keadaan sistem Jacobian. Dari matriks keadaan sistem ini dengan menggunakan komputer dapat dihitung nilai eigen, yang merupakan karakteristik yang menentukan kestabilannya.

Data MIRB Konverter-Inverter Beban Kuadratis

Motor induksi rotor belitan konverter- inverter penggerak beban torka kuadratis, dengan data berikut: 3 fasa, 440V, 8.4Kw, 13.3A, 50 Hz, 4 kutub dengan parameter mesin dalam per-unit

$$r_s = 0.33, \quad r_r' = 0.046, \quad x_{ss} = 0.814$$

$$x_{rr}' = 0.814, \quad x_M = 0.738, \quad r_r' = 0.342$$

$$x_f' = 2.89,$$

dan perbandingan belitan efektif rotor terhadap stator adalah 0.9 dan perbandingan belitan inverter dan transformator 0.4.

menggerakkan beban yang torkanya sebanding dengan kuadratis kecepatan. Adapun karakteristik torka-kecepatan adalah sebagai berikut:

kecepatan (rpm)	1500	1425	1350	1200	1050	900
Torka (N-m)	0	42	60	70	68	60

Torka beban nominal 42 N-m mempunyai kecepatan nominal 1425 rpm dan konstanta kelembaman 0,115 detik.

Dari data diatas diperoleh torka beban dan sudut penyalaan sebagai berikut:

Kecepatan N rpm	Sudut penyalaan $\omega_m = \omega_s (1 + \frac{a_2}{a_1} \cos \alpha)$	Torka – motor T N-m	Torka beban $T_L = T_{Lnominal} \times (\frac{N}{N_{nominal}})^2$
1425	$96^{\circ}46'$	42	42
1350	103°	60	37.7
1200	$116^{\circ}75'$	70	29.8
1050	$132^{\circ}46'$	68	22.8
900	$154^{\circ}17'$	60	16.7

Harga dasar dari tegangan stator, arus stator, dan daya dipilih sebagai berikut:

$$V_{\text{dasar}} = 440\text{V} \quad I_{\text{dasar}} = 13.3\text{A} \quad \omega_{\text{dasar}} = 314 \text{ rad/det.}$$

G. Hasil Yang Diperoleh

Daya yang dipindahkan melalui penyearah-inverter adalah sama dengan slip kali daya stator, maka pengontrolan hanya dibutuhkan 70% dari kecepatan serempak atau sudut penyalaan bekerja dari 90° sampai 150° . dengan program Turbo Basic diperoleh hasil perhitungan sebagai berikut

$$\text{Beban } T_L = 42 \text{ N-m, } s = 0,05 \quad \text{Alpha} = 96.46$$

Matrik keadaan

438,4696	-691.9304	589.9300	575.5306
15.7000	0.0000	34.5400	0.0000
-135.0200	208.1820	-212.1070	-634.7824
0.0000	-4.6400	30.3773	-768.8773

Nilai eigen :

248.292358

-79.234657

-739.830139

28.257908

Beban $T_L = 37.7$ N-m $s = 0.1$ Alpha = 103

diperoleh:

Matrik keadaan :

137.7832	-565.5768	316.7004	269.3492
31.4000	0.0000	34.5400	0.0000
-42.4842	164.4104	-128.0178	-297.0440
0.0000	-4.1655	14.2081	-728.4100

Nilai eigen

31.689865 + 100.424477 I

31.689865 - 100.424471 I

-60.237766

-721.786499

Beban $T_L = 29.8$ N-m $s = 0,2$ Alpha = 116.75

diperoleh:

Matrik Keadaan :

-90.9030	-455.3000	106.7600	118.3780
62.8000	0.0000	69.0800	0.00000
27.8822	120.7644	-65.0294	-130.5612
0.0000	-3.2927	6.2447	-647.4750

Nilai eigen

-43.942154 + 123.420815 I

-43.942154 - 123.420815 I

-69.529991

-645.993103

Beban $T_L = 22.8$ N-m $s = 0.3$ Alpha = 132.46

diperoleh:

Matrik keadaan:

-137.6262	-422.1416	70.6500	70.0220
94.2000	0.0000	103.6200	0.0000
42.2644	96.4608	-52.2810	-77.2440
0.0000	-2.5188	3.6951	-566.5400

Nilai eigen

-57.290970 + 148.502426

-57.290970 - 148.502426

-75.934631

-565.930603

Beban $T_L = 16,7 \text{ N-m}$ $s = 0,4$ $\text{Alpha} = 154.17$

diperoleh:

Matrik keadaan:

-155.1160	-400.8524	55.2640	47.3512
125.6000	0.0000	138.1600	0.0000
47.6338	85.0438	-47.5346	-52.2300
0.0000	-1.8450	2.5000	-485.6000

Nilai eigen

-62.409233 + 172.402481 I

-62.409233 - 172.402481 I

-78.167114

-485.265045

H. ANALISIS HASIL

Stabilitas dari motor induksi rotor belitan konverter- inverter penggerak beban torka kuadratis dapat dilihat dengan menyatakan nilai-nilai eigen yang diperoleh dari hasil perhitungan. Hasil perhitungan yang diperoleh merupakan gambaran perilaku operasi sistem dalam setiap titik operasi keadaan mantap.

Stabilitas sistem yang dianalisis ini, mengabaikan eksitasi (masukan), karena eksitasi dalam sistem kontan. Persamaan sistem merupakan persamaan diferensial homogen. Hasil perhitungan memperlihatkan setiap kondisi pembebanan adalah perilaku sistem dalam setiap titik operasi.

Pada beban $T_L = 42 \text{ N-m}$, nilai eigen yang diperoleh tidak semuanya menunjukkan bagian realnya negatif. Hal ini untuk mengatasi beban yang besar untuk mencapai keseimbangan antara torka beban dan torka motor diperlukan arus yang besar dan putaran yang tinggi, jadi menyebabkan semua nilai eigen yang diperoleh tidak semuanya negatif berarti sistem tidak stabil.

Pada beban $T_L = 37,7 \text{ N-m}$, nilai eigen yang diperoleh terjadi kompleks, tapi bagian realnya tidak negatif, berarti dalam perilaku titik operasi ini kondisi belum menunjukkan stabil, karena masih

diperlukan arus yang besar dan putaran yang tinggi untuk mencapai kesetimbangan sistem.

Pada beban $T_L = 29,8$ N-m, nilai eigen yang diperoleh bagian realnya semuanya negatif. Hal ini menunjukkan perilaku sistem pada titik operasi sudah mencapai stabil. Berarti sudah tercapai kesetimbangan antara torka motor dan torka beban.

Pada $T_L = 22,8$ N-m, hasil nilai eigen yang diperoleh bagian realnya negatif. Sistem dikatakan stabil bila dalam titik operasi ini yang menyebabkan terjadi keseimbangan sistem.

Pada $T_L = 16,7$ N-m, nilai eigen yang diperoleh, nilai realnya negatif. Berarti sistem stabil dalam titik operasi ini.

Dari hasil yang diperoleh setiap titik operasi sistem, nilai eigen memperkirakan perilaku sistem (MIRB dengan sistem pemulih energi slip pada beban torka kuadratis). Pada operasi keseimbangan nilai eigen yang diperoleh ada yang real dan ada yang kompleks. Bila nilai eigen yang diperoleh kompleks berarti sistem terjadi osilasi, dan jika nilai kompleks negatif menunjukkan osilasinya turun secara eksponensial, demikian juga sebaliknya bila nilainya positif menyatakan kondisi tidak stabil.

H. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

- motor induksi rotor belitan (MIRB) konverter- inverter sebagai penggerak beban torka kuadratis dioperasikan untuk daerah kecepatan terbatas dari kecepatan 1500 rpm sampai dengan kecepatan 900 rpm, dan dengan sudut penyalanya dari 90° sampai 150° .
- Dari karakteristik –karakteristik sistem yang dinyatakan dengan nilai eigen, sistem tidak stabil untuk titik operasi mantap pada slip 0,05 dengan beban $T_L = 42$ N-m serta sudut penyalanya $96^{\circ}.46$, dan pada slip 0,1 dengan beban $T_L = 37,7$ N-m serta sudut penyalan 103° .

Saran

Motor induksi rotor belitan konverter- inverter sebagai pengendali kecepatan; menggunakan beban torka kuadratis dengan gangguan kecil. Kestabilan sistemnya dengan cara melinearisasikan persamaan keadaan untuk gangguan kecil pada titik operasi mantap. Hasil yang diperoleh dengan menggunakan cara linearisasi kerangka referensi menyarankan untuk menyelidiki kestabilan sistem ini digunakan Metoda Liapunov.

DAFTAR PUSTAKA

1. AKPINAR,E.DKK,"Modeling And Analysis of Close-Loop Slip Energy Recovery Induction Motor Drive Using A Linearization Technique,"IEEE Transaction on Energy Conversion,Vol.8,No.4,December 1993.
2. DEWAN,S.B,DKK,"Power Semiconductor Drives," Jhon Wiley & Son, Inc 1984.
3. Dubey, Gopal K, "*Power Semiconductor Controlled Drives*", Prentice Hall, 1989
4. HAROEN, YANUARSYAH,"Analisa Transient Pada Mesin Listrik,"Jurusan Teknik Elektro – FTI Institut Teknologi Bandung 1991.
5. HOSTETTER, GENE H ,DKK ,"Analytical, Numerical, And Computational Method For Science And Engineering,"Prentice-Hall International,Inc 1991.
6. KOSOW,IRVING.L,"Electric Machinery And Tranformer,"Prentice Hall 1972
7. KRAUSE ,P.C,"Analysis of Electric Machinery," McGraw-Hill Book Company, 1986.
8. KRAUSE ,P.C,DKK,"Reference Frame Analysis of a Slip Energy Recovery System,"IEEE Transaction on Energy Conversion,Vol.3,No.2,June 1988
9. KRAUSE ,P.C,DKK,"Simulation of Symmetrical Induction Machinery,"IEEE Transaction on Power Apparatus And System,Vol.PAS-84,No.11,November 1965