

ANALISIS KESTABILAN DINAMIK GENERATOR SINKRON ROTOR KUTUB MENONJOL DENGAN MENGGUNAKAN METODE NILAI EIGEN

Surya Darma

*Dosen Tetap Yayasan Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Palembang
Email : suryadarma.stmt @ gmail.com*

Abstract

To operate properly, a generator must work in sync and meet the power required by the load in all conditions. Thus, to maintain stability of output parameters such as speed of the generator rotor and generator terminal voltage so that the amount is always constant, then the input parameters such as changes in mechanical torque from the turbine and the changes in field voltage amplifier from the Exciter noteworthy. One study of stability that can be done is to study the dynamic stability of synchronous generators in the face of small changes that occur by using eigen value approach, which is the roots of the characteristic equation of the system state space equation. Eigen value can indicate the stability of information systems and related to response time to changes within the system.

Keywords - Sync Generator Rotor Pole Stand, entanglement damping, Infinite Bus, state space equation, characteristic equation, Eigen Value Method and the damping ratio.

Abstrak

Untuk dapat beroperasi secara baik, suatu generator harus bekerja dalam keadaan sinkron dan memenuhi daya yang dibutuhkan oleh beban pada semua kondisi. Dengan demikian, untuk menjaga kestabilan parameter-parameter keluaran generator seperti kecepatan rotor dan tegangan terminal generator agar besarnya selalu konstan, maka parameter-parameter masukan seperti perubahan torsi mekanik dari turbin dan perubahan tegangan medan penguat dari exciter perlu diperhatikan. Salah satu studi kestabilan yang dapat dilakukan adalah studi kestabilan dinamik generator sinkron saat menghadapi perubahan kecil yang terjadi dengan menggunakan pendekatan nilai eigen yang merupakan akar-akar persamaan karakteristik dari persamaan ruang keadaan

sistem. Nilai eigen tersebut dapat menunjukkan informasi kestabilan sistem dan berhubungan dengan respon waktu terhadap perubahan didalam sistem.

Kata Kunci – Generator Sinkron Rotor Kutub Menonjol, Belitan Redaman, Infinite Bus, Persamaan Ruang Keadaan, Persamaan Karakteristik, Metode Nilai Eigen dan Rasio Redaman.

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Untuk dapat beroperasi secara baik dan terus menerus, suatu generator harus dapat bekerja dalam keadaan sinkron dan memenuhi daya yang dibutuhkan oleh beban pada semua kondisi. Dengan demikian, untuk menjaga kestabilan parameter-parameter keluaran generator seperti frekuensi dan tegangan terminal yang diharapkan besarnya selalu konstan, maka parameter-parameter masukan seperti perubahan torsi mekanik dari turbin dan perubahan tegangan medan penguat dari exciter perlu diperhatikan.

Salah satu studi kestabilan yang dapat dilakukan adalah studi kestabilan dinamik untuk mengetahui perilaku dinamik dari generator sinkron yang selalu berosilasi disekitar titik kerjanya saat menghadapi perubahan kecil yang mungkin terjadi dengan menggunakan pendekatan nilai eigen yang merupakan akar-akar atau kutub-kutub dari persamaan karakteristik fungsi transfer yang membentuk persamaan ruang keadaan sistem dan dapat menunjukkan indikator kestabilan suatu sistem. Kutub-kutub persamaan karakteristik fungsi transfer tersebut berhubungan dengan respon waktu terhadap perubahan didalam sistem.

1.2. Perumusan Masalah

Pada penulisan ini untuk mendapatkan bentuk persamaan ruang keadaan sistem digunakan beberapa masukan dengan beberapa keluaran sistem sehingga didapatkan persamaan karakteristik dan

akar-akar persamaan karakteristik (nilai eigen) yang menggambarkan kestabilan generator tersebut.

1.3. Ruang Lingkup Permasalahan

Masalah yang akan dibahas hanya dibatasi pada hal-hal sebagai berikut :

1. Generator yang digunakan adalah sebuah generator sinkron rotor kutub menonjol tiga fasa yang memiliki satu belitan redaman pada sumbu direct dan dua belitan redaman pada sumbu quadratur terhubung bus tak hingga (*infinite bus*).
2. Analisis kestabilan yang digunakan untuk mengetahui kestabilan dinamik suatu generator adalah analisis pendekatan nilai eigen dari persamaan ruang keadaan sistem yang multi input multi output dimana perubahan torsi mekanik (ΔT_m) dan perubahan tegangan exciter (ΔE_{fd}) sebagai variabel masukan sedangkan perubahan kecepatan rotor generator ($\Delta \omega_r$) dan perubahan tegangan terminal generator (ΔV_t) sebagai variabel keluaran.

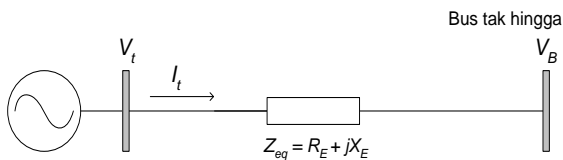
1.4. Tujuan Penulisan

Adapun tujuan yang ingin dicapai pada penulisan ini adalah mengetahui kestabilan suatu generator dengan menggunakan pendekatan nilai eigen yang merupakan akar-akar karakteristik dari persamaan ruang keadaan generator tersebut.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Generator Sinkron Rotor Kutub Menonjol Terhubung Bus Tak Hingga (Infinite Bus)

Definisi dari generator terhubung bus tak hingga adalah generator tersebut dihubungkan dengan sebuah bus yang memiliki tegangan sumber yang tetap dimana besaran, frekuensi dan fasa tegangannya tidak dipengaruhi oleh perubahan beban (keluaran generator). Model sederhana dari sistem tenaga listrik generator sinkron rotor kutub menonjol terhubung dengan bus tak-hingga dapat digambarkan seperti pada gambar (2.1) berikut ini:

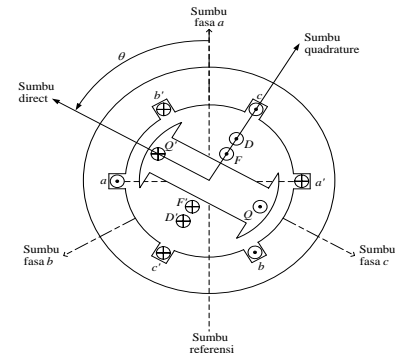


Gambar 2.1. Diagram garis sistem satu mesin dengan bus tak hingga

dimana :

- V_t = tegangan terminal generator.
- V_B = tegangan pada bus tak hingga.
- $I_t = (i_d + ji_q)$ = arus yang melalui terminal generator.
- R_E dan X_E = resistansi dan reaktansi generator.

Suatu generator sinkron rotor kutub menonjol terdiri dari dua bagian utama yaitu belitan jangkar (*armature winding*) atau stator yang terhubung ke terminal generator dan belitan medan (*field winding*) yang tersusun pada rotor. Rotor tersebut digerakkan pada kecepatan konstan dan dicatu oleh arus searah yang menghasilkan suatu medan magnetik yang menginduksikan tegangan bolak balik pada belitan jangkar. Daya dc yang dibutuhkan untuk penguatan dicatu melalui cincin slip (*slip ring*) dan sikat dari sumber ac yang dilengkapi penyearah (*rectifier*) yang disebut penguat (*exciter*) yang dikopel ke generator. Gambar berikut menunjukkan model dari generator sinkron tiga fasa, dengan rotor mempunyai kutub yang menonjol.

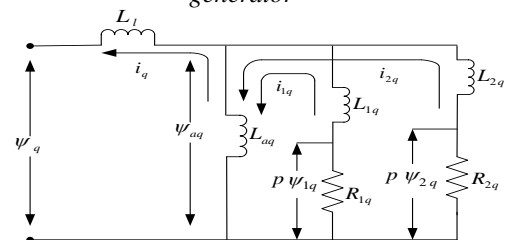


Gambar 2.2. Model generator sinkron rotor kutub menonjol 3 fasa

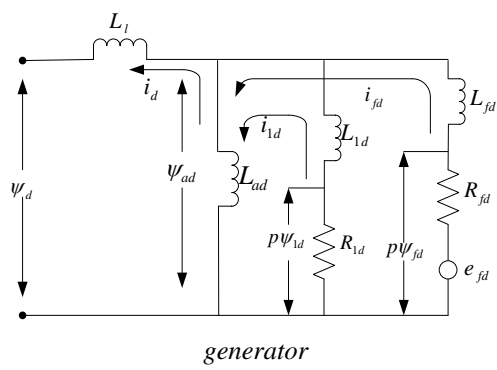
2.2. Persamaan Umum Generator Sinkron Rotor Kutub Menonjol Terhubung Bus Tak Hingga (Infinite Bus)

Untuk menganalisa unjuk kerja dinamik dari generator, dalam tugas akhir ini belitan redaman dari generator diperhitungkan dengan asumsi bahwa model memiliki satu belitan redaman pada sumbu direct (d-axis) dan dua belitan redaman pada sumbu quadratur (q-axis) yang dapat dilihat pada gambar berikut ini:

Gambar 2.3. Rangkaian ekivalen sumbu direct generator



Gambar 2.4. Rangkaian ekivalen sumbu quadratur



2.2.1. Persamaan Gerak

Pada umumnya persamaan yang dapat dipakai untuk mengatur gerak atau dinamika rotor mesin-sinkron adalah persamaan ayunan (swing). Persamaan ini didasarkan pada prinsip dinamika yang menyatakan bahwa momen putar percepatan adalah hasil kali dari momen kelembaman (momen inersia) rotor dengan percepatan sudutnya atau dapat dituliskan dalam persamaan matematis sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \Delta \omega_r &= \frac{1}{2H} (T_m - T_e - K_D \Delta \omega_r) \\ \Delta \delta &= \omega_0 \Delta \omega_r \end{aligned} \quad (2.1)$$

dimana :

- ω_0 = kecepatan base sudut rotor (radian listrik/detik)
- ω_r = kecepatan sudut rotor (radian listrik/detik)
- T_e = torsi listrik (N.m)
- δ = pergeseran sudut rotor (radian listrik)
- K_D = faktor damping (torsi per unit / kecepatan deviasi per unit)
- T_m = torsi mekanik atau poros yang diberikan penggerak mula dikurangi momen putar perlambatan (*retarding*) yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran (N.m).

2.2.2. Persamaan Fluks

Dari gambar 2.3 dan 2.4 didapatkan persamaan fluks lingkup rangkaian stator dalam satuan per unit tersebut adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \psi_d &= -(L_{ad} + L_l) i_d + L_{ad} i_{fd} + L_{ad} i_{1d} \\ \psi_q &= -(L_{aq} + L_l) i_q + L_{aq} i_{1q} + L_{aq} i_{2q} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Sedangkan persamaan fluks lingkup rangkaian rotor dalam satuan per unit tersebut adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} p\psi_{fd} &= \omega_0 (e_{fd} - R_{fd} i_{fd}) = \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{ad}} E_{fd} - \omega_0 R_{fd} i_{fd} \\ p\psi_{1d} &= -\omega_0 R_{1d} i_{1d} \\ p\psi_{1q} &= -\omega_0 R_{1q} i_{1q} \\ p\psi_{2q} &= -\omega_0 R_{2q} i_{2q} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Berdasarkan gambar 2.3 dan 2.4 maka fluks lingkup bersama sumbu d dan q dengan celah udara dapat ditulis sebagai berikut :

$$\psi_{ad} = -L_{ad} i_d + L_{ad} i_{fd} + L_{ad} i_{1d}$$

$$= L_{ad}'' \left(-i_d + \frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right) \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \psi_{aq} &= -L_{aq} i_q + L_{1q} i_{1q} + L_{2q} i_{2q} \\ &= L_{aq}'' \left(-i_q + \frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right) \end{aligned} \quad (2.5)$$

dimana :

$$L_{ad}'' = \frac{1}{\frac{1}{L_{ad}} + \frac{1}{L_{fd}} + \frac{1}{L_{1d}}}$$

$$L_{aq}'' = \frac{1}{\frac{1}{L_{aq}} + \frac{1}{L_{1q}} + \frac{1}{L_{2q}}}$$

keterangan :

i_d, i_q = arus yang melalui belitan

i_{fd} = arus pada exciter/rotor

i_{1d} = arus pada sumbu direct 1

i_{1q} = arus pada sumbu quadratur 1

i_{2q} = arus pada sumbu quadratur 2

ψ_{fd} = fluks lingkup keluaran exciter

ψ_{1d} = fluks lingkup sumbu direct 1

ψ_{1q} = fluks lingkup sumbu quadratur 1

ψ_{2q} = fluks lingkup sumbu quadratur 2

ψ_{ad} = fluks lingkup bersama sumbu direct dengan celah udara

ψ_{aq} = fluks lingkup bersama sumbu quadratur dengan celah udara

L_{ad} = induktansi bersama sumbu direct dengan celah udara

L_{aq} = induktansi bersama sumbu quadratur dengan celah udara

L_{1d}, L_{1q}, L_{2q} = induktansi masing-masing belitan redaman.

2.2.3. Persamaan Torsi Listrik

Dengan mengabaikan resistansi pada stator, besaran torsi listrik $T_e = P_e$ dapat dirumuskan :

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d = \psi_{ad} i_q - \psi_{aq} i_d \quad (2.6)$$

2.2.4. Persamaan Tegangan

• Persamaan tegangan pada stator dan rotor :

Secara keseluruhan persamaan tegangan yang berlaku pada belitan stator adalah :

$$v_d = -\psi_q \omega_r - R_a i_d \quad v_q = \psi_d \omega_r - R_a i_q \quad (2.7)$$

Apabila diasumsikan bahwa perubahan kecepatan ω sangat kecil sehingga tidak ada pengaruh yang signifikan terhadap tegangan, maka dapat dianggap bahwa $\omega = 1$. Sehingga persamaan tegangan stator (2.7) dapat dituliskan sebagai berikut :

$$v_d = -R_a i_d - \psi_q \quad (2.8)$$

$$v_q = -R_a i_q + \psi_d \quad (2.9)$$

dan belitan rotor adalah :

$$e_{fd} = p\psi_{fd} + R_{fd} i_{fd} \quad (2.10)$$

$$0 = p\psi_{1d} + R_{1d} i_{1d} \quad (2.11)$$

$$0 = p\psi_{1q} + R_{1q} i_{1q} \quad (2.12)$$

$$0 = p\psi_{2q} + R_{2q} i_{2q} \quad (2.13)$$

dimana $p = \frac{d}{dt}$

• Persamaan tegangan sistem :
Berdasarkan gambar (2.1), persamaan tegangan sistem dapat dituliskan sebagai berikut:

$$V_t = V_B + (R_E + jX_E) \bar{I}_t \quad (2.14)$$

Jika tegangan terminal generator dan bus tak hingga dituliskan :

$$V_t = v_d + jv_q \quad (2.15)$$

$$V_B = V_{Bd} + jV_{Bq} \quad (2.16)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.15) dan (2.16) ke persamaan (2.14) maka persamaan sistem menjadi :

$$(v_d + jv_q) = (V_{Bd} + jV_{Bq}) + (R_E + jX_E)(i_d + ji_q) \quad (2.17)$$

2.2.5. Persamaan Arus Generator

Dengan menggunakan persamaan (2.8) dan (2.9) untuk menggantikan nilai v_d dan v_q pada persamaan (2.17) maka persamaan menjadi :

$$v_d = -R_a i_d - \psi_q = R_E i_d - X_E i_q + V_{Bd} \sin \delta \quad (2.18)$$

$$v_q = -R_a i_q + \psi_d = R_E i_q + X_E i_d + V_{Bd} \cos \delta \quad (2.19)$$

Jika persamaan-persamaan (2.2),(2.4) dan (2.5) disubstitusikan ke persamaan (2.18) dan (2.19), maka kedua persamaan akan menjadi :

$$v_d = -R_a i_d + L_1 i_q + L_{aq} i_q - L_{aq} \left(\frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right) = R_E i_d - X_E i_q + V_B \sin \delta$$

$$v_d = (L_1 + L_{aq}) i_q = (R_a + R_E) i_d - X_E i_q + V_B \sin \delta + L_{aq} \left(\frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right)$$

$$v_d = (X_q'' + X_E) i_q = R_T i_d + V_d'' + V_B \sin \delta$$

$$v_d = X_{Tq} i_q = R_T i_d + V_{dN} \quad (2.20)$$

$$i_q = \frac{R_T i_d + V_{dN}}{X_{Tq}} \quad (2.21)$$

dan :

$$v_q = -R_a i_q - L_1 i_d - L_{ad} i_d - L_{ad} \left(\frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right) = R_E i_q + X_E i_d + V_B \cos \delta$$

$$v_q = -i_d (L_1 + L_{ad}) = (R_a + R_E) i_q + X_E i_q + V_B \cos \delta - L_{ad} \left(\frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right)$$

$$v_q = -i_d (X_d'' + X_E) = R_T i_q - V_q'' + V_B \cos \delta$$

$$v_q = X_{Td} i_d = -R_T i_q + V_{qN}$$

(2.22)

$$i_d = \frac{V_{qN} - R_T i_q}{X_{Td}}$$

(2.23)

dimana :

$$V_{dN} = V_d'' + V_B \sin \delta \quad V_{qN} = V_q'' - V_B \cos \delta$$

$$V_d'' = L_{aq} \left(\frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{aq}}{L_{2q}} \right) \quad V_q'' = L_{ad} \left(\frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right)$$

$$X_{Td} = X_E + (L_{ad}'' + L_1) \quad X_{Tq} = X_E + (L_{aq}'' + L_1) \\ = X_E + X_d'' \quad = X_E + X_q''$$

$$R_T = R_a + R_E$$

Dari persamaan (2.20) sampai persamaan (2.23) didapatkan persamaan arus stator i_d dan i_q sebagai berikut :

$$i_d = \frac{X_{Tq} V_{qN} - R_T V_{dN}}{R_T^2 + X_{Td} X_{Tq}} = \frac{X_{Tq} V_{qN} - R_T V_{dN}}{D}$$

$$i_q = \frac{R_T V_{qN} + V_{dN} X_{Td}}{R_T^2 + X_{Td} X_{Tq}} = \frac{R_T V_{qN} + X_{Td} V_{dN}}{(2.22)}$$

dimana :

$$D = R_T^2 + X_{Td} X_{Tq}$$

Dengan demikian persamaan arus stator pada sumbu direct dan quadratur dapat ditulis sebagai berikut:

$$i_d = \frac{X_{Tq} \left[L_{ad}'' \left(\frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right) - V_B \cos \delta \right] - R_T \left[L_{aq}'' \left(\frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right) + V_B \sin \delta \right]}{D} \quad (2.24)$$

dan

$$i_q = \frac{R_T \left[L_{ad}'' \left(\frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right) - V_B \cos \delta \right] + X_{Td} \left[L_{aq}'' \left(\frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right) + V_B \sin \delta \right]}{D} \quad (2.25)$$

Sedangkan persamaan arus rotor pada rangkaian :

$$i_{fd} = \frac{1}{L_{fd}} (\psi_{fd} - \psi_{ad}) \quad (2.26)$$

$$i_{1d} = \frac{1}{L_{1d}} (\psi_{1d} - \psi_{ad}) \quad (2.27)$$

$$i_{1q} = \frac{1}{L_{1q}} (\psi_{1q} - \psi_{aq}) \quad (2.28)$$

$$i_{2q} = \frac{1}{L_{2q}} (\psi_{2q} - \psi_{aq}) \quad (2.29)$$

Dengan menggunakan Deret Taylor, maka persamaan umum generator sinkron tersebut dilinearisasikan sebagai berikut :

$$\psi_{ad} = L_{ad}'' \left(-i_d + \frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right)$$

$$\Delta\psi_{ad} = (-m_1 L_{ad}'') \Delta\delta + L_{ad}'' \left(\frac{1}{L_{fd}} - m_2 \right) \Delta\psi_{fd} + L_{ad}'' \left(\frac{1}{L_{1d}} - m_3 \right) \Delta\psi_{1d} + (-m_4 L_{ad}'') \Delta\psi_{1q}$$

$$+ (-m_5 L_{ad}'') \Delta\psi_{2q} \quad (2.30)$$

$$\psi_{aq} = L_{aq}'' \left(-i_q + \frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right)$$

$$\Delta\psi_{aq} = (-n_1 L_{aq}'') \Delta\delta + (-n_2 L_{aq}'') \Delta\psi_{fd} + (-n_3 L_{aq}'') \Delta\psi_{1d} + L_{aq}'' \left(\frac{1}{L_{1q}} - n_4 \right) \Delta\psi_{1q}$$

$$+ L_{aq}'' \left(\frac{1}{L_{2q}} - n_5 \right) \Delta\psi_{2q} \quad (2.31)$$

dimana :

$$m_1 = \frac{V_B}{D} (X_{Tq} \sin \delta_0 - R_T \cos \delta_0); \quad m_2 = \frac{X_{Tq} L_{ad}''}{DL_{fd}};$$

$$m_3 = \frac{X_{Tq} L_{ad}''}{DL_{1d}}; \quad m_4 = -\frac{R_T L_{aq}''}{DL_{1q}}; \quad m_5 = -\frac{R_T L_{aq}''}{DL_{2q}};$$

$$n_1 = \frac{V_B}{D} (R_T \sin \delta_0 - X_{Td} \cos \delta_0); \quad n_2 = \frac{R_T L_{ad}''}{DL_{fd}};$$

$$n_3 = \frac{R_T L_{ad}''}{DL_{1d}}; \quad n_4 = \frac{X_{Td} L_{aq}''}{DL_{1q}}; \quad n_5 = \frac{X_{Td} L_{aq}''}{DL_{2q}};$$

$$T_e = \psi_{ad} i_q - \psi_{aq} i_d$$

$$\Delta T_e = \psi_{ad} \Delta i_q + i_{q0} \Delta \psi_{ad} - \psi_{aq0} \Delta i_d - i_{d0} \Delta \psi_{aq}$$

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta \psi_{fd} + K_{21} \Delta \psi_{1d} + K_{22} \Delta \psi_{1q} + K_{23} \Delta \psi_{2q} \quad (2.32)$$

dimana :

$$K_1 = n_1 (\psi_{ad0} + L_{aq}'' i_{d0}) - m_1 (\psi_{aq} + L_{ad}'' i_{q0})$$

$$K_2 = n_2 (\psi_{ad0} + L_{aq}'' i_{d0}) - m_2 (\psi_{aq} + L_{ad}'' i_{q0}) + \frac{L_{ad}''}{L_{fd}} i_{q0}$$

$$K_{21} = n_3 (\psi_{ad0} + L_{aq}'' i_{d0}) - m_3 (\psi_{aq} + L_{ad}'' i_{q0}) + \frac{L_{ad}''}{L_{1d}} i_{q0}$$

$$K_{22} = n_4 (\psi_{ad0} + L_{aq}'' i_{d0}) - m_4 (\psi_{aq} + L_{ad}'' i_{q0}) - \frac{L_{aq}''}{L_{1q}} i_{d0}$$

$$K_{23} = n_5 (\psi_{ad0} + L_{aq}'' i_{d0}) - m_5 (\psi_{aq} + L_{ad}'' i_{q0}) - \frac{L_{aq}''}{L_{2q}} i_{d0}$$

$$\Delta i_d = m_1 \Delta \delta + m_2 \Delta \psi_{fd} + m_3 \Delta \psi_{1d} + m_4 \Delta \psi_{1q} + m_5 \Delta \psi_{2q}$$

(2.33)

$$\Delta i_q = n_1 \Delta \delta + n_2 \Delta \psi_{fd} + n_3 \Delta \psi_{1d} + n_4 \Delta \psi_{1q} + n_5 \Delta \psi_{2q}$$

(2.34)

$$i_{fd} = \frac{1}{L_{fd}} (\psi_{fd} - \psi_{ad})$$

$$\Delta i_{fd} = \frac{\Delta \psi_{fd} - \Delta \psi_{ad}}{L_{fd}}$$

$$\Delta i_{fd} = \frac{1}{L_{fd}} \left[m_1 L_{ad}'' \Delta \delta + \left(1 - \frac{L_{ad}''}{L_{fd}} + m_2 L_{ad}'' \right) \Delta \psi_{fd} + \left(-\frac{L_{ad}''}{L_{1d}} + m_3 L_{ad}'' \right) \Delta \psi_{1d} \right]$$

$$+ \frac{1}{L_{fd}} (m_4 L_{ad}'' \Delta \psi_{1q} + m_5 L_{ad}'' \Delta \psi_{2q})$$

(2.35)

$$i_{1d} = \frac{1}{L_{1d}} (\psi_{1d} - \psi_{ad})$$

$$\Delta i_{1d} = \frac{\Delta \psi_{1d} - \Delta \psi_{ad}}{L_{1d}}$$

$$\Delta i_{1d} = \frac{1}{L_{1d}} \left[m_1 L_{ad}'' \Delta \delta + \left(-\frac{L_{ad}''}{L_{fd}} + m_2 L_{ad}'' \right) \Delta \psi_{fd} + \left(1 - \frac{L_{ad}''}{L_{1d}} + m_3 L_{ad}'' \right) \Delta \psi_{1d} \right]$$

$$+ \frac{1}{L_{1d}} (m_4 L_{ad}'' \Delta \psi_{1q} + m_5 L_{ad}'' \Delta \psi_{2q})$$

(2.36)

$$i_{1q} = \frac{1}{L_{1q}} (\psi_{1q} - \psi_{aq})$$

$$\Delta i_{1q} = \frac{\Delta \psi_{1q} - \Delta \psi_{aq}}{L_{1q}}$$

$$\Delta i_{1q} = \frac{1}{L_{1q}} (n_1 L_{aq}'' \Delta \delta + n_2 L_{aq}'' \Delta \psi_{fd} + n_3 L_{aq}'' \Delta \psi_{1d}) +$$

$$\frac{1}{L_{1q}} \left[\left(1 - \frac{L_{aq}''}{L_{1q}} + n_4 L_{ad}'' \right) \Delta \psi_{1q} + \left(-\frac{L_{aq}''}{L_{2q}} + n_5 L_{aq}'' \right) \Delta \psi_{2q} \right]$$

(2.37)

$$i_{2q} = \frac{1}{L_{2q}} (\psi_{2q} - \psi_{aq})$$

$$\Delta i_{2q} = \frac{1}{L_{2q}} (n_1 L_{aq}'' \Delta \delta + n_2 L_{aq}'' \Delta \psi_{fd} + n_3 L_{aq}'' \Delta \psi_{1d}) +$$

$$\frac{1}{L_{2q}} \left[\left(-\frac{L_{aq}''}{L_{1q}} + n_4 L_{ad}'' \right) \Delta \psi_{1q} + \left(1 - \frac{L_{aq}''}{L_{2q}} + n_5 L_{aq}'' \right) \Delta \psi_{2q} \right] \quad (2.38)$$

2.3. Pembentukan Persamaan Keadaan Sistem

Persamaan keadaan generator sinkron rotor kutub menonjol hubungan bus tak hingga dengan memperhitungkan satu belitan peredam pada sumbu direct dan dua belitan peredam pada sumbu quadratur dengan dua masukan yaitu perubahan torsi mekanik ΔT_m dan perubahan tegangan medan exciter ΔE_{fd} dinyatakan sebagai berikut:

➤ Persamaan Perubahan Kecepatan Rotor :

$$\Delta \omega_r = \frac{1}{2H} [\Delta T_m - \Delta T_e - K_D \Delta \omega_r]$$

$$\Delta \omega_r = \frac{1}{2H} [\Delta T_m - K_1 \Delta \delta - K_2 \Delta \psi_{fd} - K_{21} \Delta \psi_{1d} - K_{22} \Delta \psi_{1q} - K_{23} \Delta \psi_{2q} - K_D \Delta \omega_r]$$

$$\Delta \omega_r = a_{11} \Delta \omega_r + a_{12} \Delta \delta + a_{13} \Delta \psi_{fd} + a_{14} \Delta \psi_{1d} + a_{15} \Delta \psi_{1q} + a_{16} \Delta \psi_{2q} + b_{11} \Delta T_m \quad (2.39)$$

dimana :

➤ Persamaan Perubahan Sudut Rotor :

$$\Delta \delta = a_{21} \Delta \omega_r \quad (2.40)$$

➤ Persamaan Perubahan Fluks pada Exciter :

$$\Delta \psi_{fd} = a_{31} \Delta \omega_r + a_{32} \Delta \delta + a_{33} \Delta \psi_{fd} + a_{34} \Delta \psi_{1d} + a_{35} \Delta \psi_{1q} + a_{36} \Delta \psi_{2q} + b_{32} \Delta E_{fd} \quad (2.41)$$

➤ Persamaan Perubahan Fluks Belitan Redaman pada Sumbu Direct :

$$\Delta \psi_{1d} = a_{41} \Delta \omega_r + a_{42} \Delta \delta + a_{43} \Delta \psi_{fd} + a_{44} \Delta \psi_{1d} + a_{45} \Delta \psi_{1q} + a_{46} \Delta \psi_{2q} \quad (2.42)$$

➤ Persamaan Perubahan Fluks Belitan Redaman pada Sumbu Quadratur 1 :

$$\Delta \psi_{1q} = a_{51} \Delta \omega_r + a_{52} \Delta \delta + a_{53} \Delta \psi_{fd} + a_{54} \Delta \psi_{1d} + a_{55} \Delta \psi_{1q} + a_{56} \Delta \psi_{2q} \quad (2.43)$$

➤ Persamaan Perubahan Fluks Belitan Redaman pada Sumbu Quadratur 2 :

$$\Delta \psi_{2q} = a_{61} \Delta \omega_r + a_{62} \Delta \delta + a_{63} \Delta \psi_{fd} + a_{64} \Delta \psi_{1d} + a_{65} \Delta \psi_{1q} + a_{66} \Delta \psi_{2q}$$

(2.44)

atau ditulis dalam bentuk matriks berikut ini :

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_r \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\psi}_{fd} \\ \Delta \dot{\psi}_{1d} \\ \Delta \dot{\psi}_{1q} \\ \Delta \dot{\psi}_{2q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ 0 & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ 0 & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_r \\ \Delta \delta \\ \Delta \psi_{fd} \\ \Delta \psi_{1d} \\ \Delta \psi_{1q} \\ \Delta \psi_{2q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{32} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Sedangkan persamaan keluaran sistem yang akan dianalisis berupa perubahan frekuensi yang dinyatakan dengan perubahan kecepatan rotor generator $\Delta \omega_r$ dan perubahan tegangan terminal ΔV_t . Persamaan- persamaan tersebut dapat ditulis sebagai berikut :

Persamaan perubahan kecepatan rotor $\Delta \omega_r$:

$$\Delta \omega_r = a_{11} \Delta \omega_r + a_{12} \Delta \delta + a_{13} \Delta \psi_{fd} + a_{14} \Delta \psi_{1d} + a_{15} \Delta \psi_{1q} + a_{16} \Delta \psi_{2q} + b_{11} \Delta T_m$$

$$y_1(t) = \Delta \omega_r$$

(2.46)

Persamaan perubahan tegangan terminal ΔV_t :

$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta \psi_{fd} + K_{61} \Delta \psi_{1d} + K_{62} \Delta \psi_{1q} + K_{63} \Delta \psi_{2q}$$

$$y_2(t) = \Delta V_t$$

(2.47)

dimana :

$$a_{11} = -\frac{K_D}{2H}; a_{12} = -\frac{K_1}{2H}; a_{13} = -\frac{K_2}{2H};$$

$$a_{14} = -\frac{K_{21}}{2H}; a_{15} = -\frac{K_{22}}{2H}; a_{16} = -\frac{K_{23}}{2H};$$

$$b_{11} = \frac{1}{2H}; a_{21} = \omega_0 = 2\pi \cdot f_0; a_{31} = 0;$$

$$a_{32} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_1 L_{ad}''; a_{33} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \left(1 - \frac{L_{ad}''}{L_{fd}} + m_2 L_{ad}'' \right)$$

$$a_{34} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \left(m_3 L_{ad}'' - \frac{L_{ad}''}{L_{fd}} \right);$$

$$a_{35} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_4 L_{ad}'';$$

$$\begin{aligned}
a_{36} &= -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_5 L_{ad}'' ; b_{32} = \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{ad}} ; a_{41} = 0 ; \\
a_{42} &= -\frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} m_1 L_{ad}'' ; a_{43} = -\frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} \left(m_2 L_{ad}'' - \frac{L_{ad}''}{L_{fd}} \right) ; \\
a_{44} &= -\frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} \left(1 - \frac{L_{ad}''}{L_{1d}} + m_3 L_{ad}'' \right) ; a_{45} = -\frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} m_4 L_{ad}'' ; \\
a_{46} &= -\frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} m_5 L_{ad}'' ; a_{51} = 0 ; a_{52} = -\frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} n_1 L_{aq}'' ; \\
a_{53} &= -\frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} n_2 L_{aq}'' ; a_{54} = -\frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} n_3 L_{aq}'' ; \\
a_{55} &= -\frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} \left(1 - \frac{L_{aq}''}{L_{1q}} + n_4 L_{aq}'' \right) ; a_{56} = -\frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} \left(n_5 L_{aq}'' - \frac{L_{aq}''}{L_{2q}} \right) ; \\
a_{61} &= 0 ; a_{62} = -\frac{\omega_0 R_{2q}}{L_{2q}} n_1 L_{aq}'' ; a_{63} = -\frac{\omega_0 R_{2q}}{L_{2q}} n_2 L_{aq}'' ; \\
a_{64} &= -\frac{\omega_0 R_{2q}}{L_{2q}} n_3 L_{aq}'' ; a_{65} = -\frac{\omega_0 R_{2q}}{L_{2q}} \left(n_4 L_{aq}'' - \frac{L_{aq}''}{L_{1q}} \right) ; \\
a_{66} &= -\frac{\omega_0 R_{2q}}{L_{2q}} \left(1 - \frac{L_{aq}''}{L_{2q}} + n_5 L_{aq}'' \right) ;
\end{aligned}$$

$$K_5 = \frac{v_{d0}}{V_{i0}} \left[-R_a m_1 + L_l n_1 + L_{aq}'' n_1 \right] + \frac{v_{q0}}{V_{i0}} \left[-R_a n_1 - L_l m_1 - L_{ad}'' m_1 \right]$$

$$K_6 = \frac{v_{d0}}{V_{i0}} \left[-R_a m_2 + L_l n_2 + L_{aq}'' n_2 \right] + \frac{v_{q0}}{V_{i0}} \left[-R_a n_2 - L_l m_2 + L_{ad}'' \left(\frac{1}{L_{fd}} - m_2 \right) \right]$$

$$K_{61} = \frac{v_{d0}}{V_{i0}} \left[-R_a m_3 + L_l n_3 + L_{aq}'' n_3 \right] + \frac{v_{q0}}{V_{i0}} \left[-R_a n_3 - L_l m_3 + L_{ad}'' \left(\frac{1}{L_{1d}} - m_3 \right) \right]$$

$$K_{62} = \frac{v_{d0}}{V_{i0}} \left[-R_a m_4 + L_l n_4 - L_{aq}'' \left(\frac{1}{L_{1q}} - n_4 \right) \right] + \frac{v_{q0}}{V_{i0}} \left[-R_a n_4 - L_l m_4 - L_{ad}'' m_4 \right]$$

$$K_{63} = \frac{v_{d0}}{V_{i0}} \left[-R_a m_5 + L_l n_5 - L_{aq}'' \left(\frac{1}{L_{2q}} - n_5 \right) \right] + \frac{v_{q0}}{V_{i0}} \left[-R_a n_5 - L_l m_5 - L_{ad}'' m_5 \right]$$

2.4. Metode Nilai Eigen

Nilai eigen adalah suatu akar-akar persamaan karakteristik atau nilai sebenarnya yang berbentuk skalar dari suatu persamaan sistem linear dimana nilai eigen tersebut biasanya dipasangkan dengan suatu vektor eigen yang bersesuaian dengan nilai eigen tersebut. Jika A adalah matriks bujur sangkar berukuran n x n, kita akan mencari bilangan λ dan vektor tak nol \bar{x} didalam R^n sehingga :

$$A\bar{x} = \lambda\bar{x} \quad (3.1)$$

dimana λ disebut sebagai nilai eigen dari matriks A yang bersesuaian dengan vektor tak nol \bar{x} yang memenuhi persamaan (3.9) disebut dengan vektor eigen.

Berdasarkan definisi, vektor tak nol \bar{x} merupakan vektor eigen jika:

$$A\bar{x} = \lambda\bar{x} = \lambda I\bar{x} \quad \text{atau} \quad (A - \lambda I)\bar{x} = 0 \quad (3.2)$$

Dengan kata lain, sistem persamaan linear homogen ini mempunyai jawab tak trivial karena matriks $A - \lambda I$ adalah matriks singular. Dalam bahasa determinan, ini terjadi jika :

$$\det(A - \lambda I) = |A - \lambda I| = 0 \quad (3.3)$$

Persamaan $\det(A - \lambda I)$ dikenal sebagai persamaan karakteristik matriks A.

Persamaan karakteristik suatu sistem linear dapat ditentukan berdasarkan persamaan keadaan sistem tersebut. Suatu persamaan keadaan dan keluaran dari suatu sistem linear parameter konstan yang diberikan oleh persamaan (3.4) dan (3.5) adalah :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.4)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (3.5)$$

dengan melakukan transformasi Laplace dan substitusi pada kedua sisi persamaan (3.4) dan (3.5) kita dapatkan:

$$\begin{aligned}
Y(s) &= C[sI - A]^{-1} x(0+) + [sI - A]^{-1} BU(s) + DU(s) \\
Y(s) &= C[sI - A]^{-1} x(0+) + C[sI - A]^{-1} BU(s) + DU(s)
\end{aligned} \quad (3.6)$$

Dengan mensyaratkan bahwa kondisi awal harus dibuat nol dimana $x(0+) = 0$ dan membuat penyebut matriks fungsi alih $G(s)$ ke nol, kita mendapatkan persamaan karakteristik sebagai :

$$|sI - A| = 0 \quad (3.7)$$

Berdasarkan persamaan karakteristik dapat ditentukan akar-akar karakteristiknya. Akar-akar persamaan karakteristik tersebut sering disebut juga sebagai nilai eigen suatu matriks A atau persamaan karakteristik dari matriks A.

Akar-akar persamaan karakteristik atau nilai eigen dapat ditulis sebagai berikut :

$$s_{12} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

$$s_{12} = -\sigma \pm j\omega_d \quad (3.8)$$

dimana : σ sebagai konstanta redaman atau faktor redaman.

Dari persamaan (3.8) didapatkan klasifikasi sistem dinamik berdasarkan nilai $|\zeta|$ sebagai berikut :

$0 < \zeta < 1$, nilai eigen $s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$ (*redaman kurang*)

$\zeta > 1$, nilai eigen $s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2-1}$ (*redaman lebih*)

$\zeta = 1$, nilai eigen $s_{1,2} = -\omega_n$ (*redaman kritis*)

$\zeta < 0$, nilai eigen $s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$ (*redaman negatif*)

$\zeta = 0$, nilai eigen $s_{1,2} = \pm j\omega_n$ (*tidak ada redaman*)

dimana rasio damping (ζ) yang menyatakan penurunan besar amplitudo osilasi.

Dari nilai eigen tersebut dapat diketahui respon waktu suatu sistem yang mungkin berbentuk monoton atau osilasi tergantung pada bagian real dan bagian kompleks dari nilai eigen. Semakin ke sebelah kiri nilai eigen sistem maka respon waktu sistem akan semakin cepat diredam sehingga sistem akan semakin stabil.

III. PEMBAHASAN

3.1. Parameter dan Perhitungan Generator

Parameter-parameter yang digunakan pada analisis kestabilan generator tersebut ditetapkan sebagai berikut (dari literatur) :

➤ Generator yang digunakan adalah generator sinkron dengan jumlah kutub dua buah dengan:

$S_{base}=555\text{MVA}, V_{base}=13,856\text{ kV}, f = 60\text{ Hz}, \omega_{base} = 377\text{ rad/s}$

➤ Parameter generator lainnya (dalam per unit):
 $R_a=0,003; R_{fd}=0,0006; R_{1d}=0,0284; R_{1q}=0,0061; R_{2q}=0,0227; L_{1q}=0,16; L_{1d}=1,81; L_{2q}=1,76; L_{fd}=0,153; L_{1d}=0,1400; L_{1q}=0,7063; L_{2q}=0,1102; v_{d0}=0,6836; v_{q0}=0,7298; i_{d0}=0,8342; i_{q0}=0,4518; \Psi_{ad0}=-1,45; \Psi_{aq0}=-0,7229; \delta_0=79,13; E_{fd0}=2,395; R_e=0,05; X_e=0,95; k_{sd}=0,8491;$

➤ Tegangan terminal generator dan tegangan bus tak hingga (dalam per unit) :

$V_t=1,0$ dan $V_B = 0,995$

Dengan menggunakan simulasi program MATLAB versi 6.5 didapatkan matriks persamaan keadaan sebagai berikut :

Matrik keadaan A :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -0,1119 & -0,0062 & -0,0068 & 0,0071 & 0,0456 \\ 377 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0435 & -0,8420 & 0,6955 & 0,0005 & 0,0032 \\ 0 & 2,3420 & 32,9198 & -40,5005 & 0,0255 & 0,1633 \\ 0 & 0,2075 & -0,0050 & -0,0055 & -2,8723 & 2,4593 \\ 0 & 4,9482 & -0,1194 & -0,1305 & 9,1517 & -19,0024 \end{bmatrix}$$

Matrik masukan pertama ΔT_m dan masukan kedua ΔE_{fd} masing-masing sebagai berikut :

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0,1667 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,1164 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Matrik keluaran pertama dengan masukan ΔT_m :

$$C_1 = [0 \quad -0,1119 \quad -0,0062 \quad -0,0068 \quad 0,0071 \quad 0,0456]$$

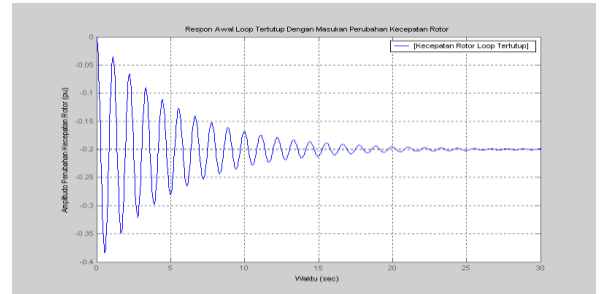
Matrik keluaran kedua dengan masukan ΔE_{fd} :

$$C_2 = [0 \quad -0,0451 \quad 0,2710 \quad 0,2962 \quad -0,0684 \quad -0,4384]$$

3.2. Respon Awal Generator Sinkron Rotor Kutub Menonjol

3.2.1. Respon Awal Generator Dengan Keluaran Perubahan Kecepatan Rotor

Dengan menggunakan persamaan (2.45) yang disimulasikan dengan bantuan program MATLAB didapatkan kurva respon awal loop tertutup keluaran perubahan kecepatan rotor generator ($\Delta\omega_r$) dengan masukan sistem berupa perubahan torsi mekanik (ΔT_m) sebagai berikut :



Gambar 4.1. Kurva respon awal dengan keluaran perubahan kecepatan rotor

Dengan menggunakan persamaan (3.7) yang disimulasikan kedalam program matlab (lampiran), dari matriks A pada persamaan (2.45) untuk masukan berupa perubahan torsi mekanik (ΔT_m) terhadap keluaran berupa perubahan kecepatan rotor ($\Delta\omega_r$) didapatkan persamaan karakteristik sebagai berikut:

$$|sI - A| =$$

$$s^6 + 63,22s^5 + 989,8s^4 + 4159s^3 + 36640s^2 + 52710s + 12210$$

dan akar-akar persamaan karakteristiknya (nilai eigen) adalah:

$$\lambda_1 = -0,2003 + j6,2122$$

$$\lambda_2 = -0,2003 - j6,2122$$

$$\lambda_3 = -41,0718$$

$$\lambda_4 = -20,1266$$

$$\lambda_{,5} = -1,3310$$

$$\lambda_{,6} = -0,2872$$

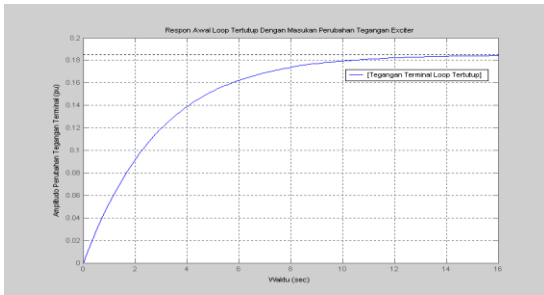
Dari nilai-nilai eigen diatas didapatkan :

1. Waktu naik (t_r) = 0,183 detik
2. Waktu puncak (t_p) = 0,565 detik
3. Lewatan maksimum (M_p) = 90,371 %
4. Waktu penetapan (t_s) = 20,6 detik

dengan nilai rasio redaman (ζ) sebesar 0,0322.

3.2.2. Respon Awal Generator Dengan Keluaran Perubahan Tegangan Terminal

Dengan menggunakan persamaan (4.2) yang disimulasikan dengan bantuan program MATLAB didapatkan kurva respon awal loop tertutup keluaran perubahan tegangan terminal (ΔV_t) dengan masukan sistem berupa perubahan tegangan medan exciter (ΔE_{fd}) sebagai berikut :



Gambar 4.2. Kurva respon awal dengan keluaran perubahan tegangan terminal

Dengan menggunakan persamaan (3.7) yang disimulasikan kedalam program matlab (lampiran), dari matriks A pada persamaan (2.45) untuk masukan berupa perubahan tegangan medan exciter (ΔE_{fd}) terhadap keluaran berupa perubahan tegangan terminal generator (ΔV_t) didapatkan persamaan karakteristik sebagai berikut:

$$|sI - A| =$$

$s^6 + 63,22s^5 + 989,8s^4 + 4159s^3 + 36640s^2 + 52710s + 12210$
dan akar-akar persamaan karakteristiknya (nilai eigen) adalah:

$$\lambda_{,1} = -0,2003 + j6,2122$$

$$\lambda_{,2} = -0,2003 - j6,2122$$

$$\lambda_{,3} = -41,0718$$

$$\lambda_{,4} = -20,1266$$

$$\lambda_{,5} = -1,3310$$

$$\lambda_{,6} = -0,2872$$

Dari nilai-nilai eigen diatas didapatkan :

1. Waktu naik (t_r) = 6,25 detik
2. Waktu puncak (t_p) = 16 detik

3. Lewatan maksimum (M_p) = 0 %
 4. Waktu penetapan (t_s) = 11,1 detik
- dengan nilai rasio redaman (ζ) sebesar 6,6.

3.3. Analisa

Berdasarkan nilai eigen dari respon awal generator sinkron dengan masukan berupa perubahan torsi mekanik (ΔT_m) terhadap keluaran berupa perubahan kecepatan rotor ($\Delta \omega_r$) didapatkan generator dengan waktu naik sebesar 0,183 detik dan waktu penetapan sebesar 20,6 detik. Lewatan maksimum (M_p) yang terjadi pada generator untuk sistem loop tertutup adalah sebesar 90,371 %. Dari kurva tersebut dapat dikatakan bahwa sistem stabil dan mengalami redaman kurang (*underdamped*) dengan nilai rasio redaman (ζ) sebesar 0,0322.

Sedangkan untuk nilai eigen dari respon awal generator sinkron dengan masukan berupa perubahan tegangan exciter (ΔE_{fd}) terhadap keluaran berupa perubahan tegangan terminal generator (ΔV_t) didapatkan generator dengan waktu naik sebesar 6,25 detik dan waktu penetapan sebesar 11,1 detik. Lewatan maksimum (M_p) yang terjadi pada generator untuk sistem loop tertutup adalah sebesar 0% atau tidak terjadi lewatan maksimum dengan nilai rasio redaman (ζ) bernilai 6,6 dan dapat dikatakan bahwa sistem stabil dan mengalami redaman lebih (*overdamped*).

IV. KESIMPULAN

Dari pembahasan mengenai analisis kestabilan dinamik generator sinkron rotor kutub menonjol yang terhubung dengan bus tak hingga dengan menggunakan metode nilai eigen, ada beberapa hal yang dapat disimpulkan:

1. Dari data generator yang disimulasikan, dapat dikatakan bahwa generator sinkron yang terhubung bus tak hingga tersebut stabil. Hal ini dikarenakan bagian real dari nilai-nilai eigen yang didapatkan dari persamaan karakteristik sistem tersebut berharga negatif dan terletak di sebelah kiri sumbu khayal. Nilai-nilai eigen dari generator tersebut yaitu:

$$\lambda_{,1} = -0,2003 + j6,2122$$

$$\lambda_{,2} = -0,2003 - j6,2122$$

$$\lambda_{,3} = -41,0718$$

$$\lambda_{.4} = -20,1266$$

$$\lambda_{.5} = -1,3310$$

$$\lambda_{.6} = -0,2872$$

2. Berdasarkan nilai eigen dari respon awal generator sinkron dengan masukan berupa perubahan torsi mekanik (ΔT_m) terhadap keluaran berupa perubahan kecepatan rotor generator ($\Delta \omega_r$) dapat dikatakan bahwa sistem stabil dan mengalami redaman kurang dengan nilai rasio redaman (ζ) sebesar 0,0322 (*underdamped*) dimana lewatan maksimum (M_p) yang terjadi pada generator untuk sistem loop tertutup adalah sebesar 90,371 % dengan waktu naik (t_r) sebesar 0,183 detik dan waktu penetapan (t_s) sebesar 20,6 detik. Sedangkan nilai eigen dari respon awal generator sinkron dengan masukan berupa perubahan tegangan medan exciter (ΔE_{fd}) terhadap keluaran berupa perubahan tegangan terminal generator (ΔV_t) sistem stabil dan mengalami redaman lebih (*overdamped*) dengan nilai rasio redaman (ζ) sebesar 6,6. Dengan demikian, sistem tidak mengalami lewatan maksimum ($M_p = 0$) dengan waktu naik (t_r) sebesar 6,25 detik dan waktu penetapan (t_s) sebesar 11,1 detik.

SARAN

Kami menyarankan agar dinamik generator sinkron rotor kutub stabil dengan menggunakan metode nilai eigen yang sangat tepat dan lebih efisien.

V. DAFTAR PUSTAKA

- Brogan, William. L. 1991. *Modern Control Theory*. New Jersey : Prentice-Hall International, Inc.
- Budhi, Wono Setya. 1995. *Aljabar Linear*. Jakarta : Gramedia Pustaka Utama.
- D'Azzo Jhon J. & Constantine H. Houppis. 1988. *Linear Control System Analysis and Design*. 3th Edition. New York : Mc Graw-Hill Book Companies, Inc.
- Dorf, Richard C. And Robert H. Bishop. 2001. *Modern Control System 9th Edition*, New Jersey : Prentice-Hall International Inc.
- Fitzgerald, A.E. Charles Kingsley, Jr. 1992. *Mesin-Mesin Listrik(Terjemahan)*. Jakarta : Erlangga.
- Grantham, Walter. J dan Thomas L. Vincent. 1993. *Modern Control Systems Analysis and Design*, New York : Jhon Wiley and Sons, Inc.
- Krause, Paul C & Pleg Wasynczuk. 1986. "Electromechanical Motion Devices". New York : McGraw-Hill Book Companies, Inc.
- Kundur, Prabha. 1994. *Power System Stability and Control*. New Delhi : Mc Graw-Hill Book Companies, Inc.
- Kuo, Benjamin.C. 1975. *Automatic Control System*. New Jersey : Prentice-Hall International, Inc
- Ogata, Katsuhiko. 1995. *Teknik Kontrol Automatik (Terjemahan)*. Jilid I. Jakarta : Erlangga.
- Ogata, Katsuhiko. 1995. *Teknik Kontrol Automatik (Terjemahan)*. Jilid II. Jakarta : Erlangga.
- Padiyar, K.R. 1996. *Power System Dynamics Stability and Control*. New York : Jhon Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd.
- Saadat, Hadi. 1999. *Power System Analysis*. Singapore : McGraw-Hill Book Companies, Inc.
- Wijaya, Mochtar. 2001. *Dasar-dasar Mesin Listrik*. Jakarta : Djambatan.