

**SIMULASI
POLA TINGKAH LAKU TEGANGAN SISTEM TENAGA LISTRIK DI
TITIK OPERASI MEMPERGUNAKAN METODA OPTIMISASI
 H_∞ DENGAN PENDEKATAN MIXED SENSITIVITY
(MODEL IEEE 14 BUS 5 MESIN)**

Heru Dibyo Laksono¹⁾, Fitrilina²⁾

^{1,2)}Jurusan Teknik Elektro - Universitas Andalas, Padang, Sumatera Barat

Email : heru_dl@ft.unand.ac.id

Abstrak

Dalam sistem tenaga listrik, model sistem bersifat nonlinier. Untuk menganalisa pola tingkah laku tegangan sistem tenaga listrik disekitar titik operasi, salah satu model sistem adalah dengan dilinierisasi di titik operasi. Dari model sistem yang dilinierisasi tersebut diperoleh persamaan keadaan untuk sistem tenaga listrik IEEE 14 Bus 5 Mesin dan dapat digunakan metoda H_∞ dengan pendekatan mixed sensitivity, serta diupayakan suatu simulasi dengan variasi fungsi bobot dan beban. Dari hasil simulasi didapatkan daerah stabil untuk bahan design controller H_∞ yang mengendalikan perubahan tegangan generator dalam sistem tenaga listrik IEEE 14 Bus 5 Mesin.

Keyword : sistem tenaga listrik, IEEE 14 Bus 5 Mesin, metoda H_∞

1. PENDAHULUAN

Operasi sistem tenaga listrik interkoneksi, kestabilan tegangan merupakan hal yang penting, dan merupakan salah satu ukuran dari kualitas sistem tenaga listrik. Dengan adanya perubahan beban setiap waktu akan berakibat terjadinya perubahan tegangan, sehingga kestabilan sistem akan terganggu dan berakibat sistem tidak mampu lagi bekerja secara normal setelah mengalami gangguan. Untuk menjaga supaya tegangan tetap bekerja pada daerah titik operasinya, dilakukan pengendalian, baik pengendalian kecepatan turbin maupun pengendalian sistem eksitasi.

Dalam sistem tenaga listrik, gangguan ada yang bersifat peralihan (putusnya salah satu jaringan atau terjadinya hubung singkat) dan gangguan yang bersifat kecil, sehingga perlu studi kestabilan dinamik disekitar titik operasinya dan mencoba menganalisa tingkah laku kestabilan sistem tenaga listrik untuk model IEEE 14 Bus 5 Mesin menggunakan pendekatan metoda H_∞ . Hasil studi dapat menjadi bahan-bahan design controller untuk sistem tenaga listrik. Terdapat banyak metoda yang dapat digunakan untuk merancang controller diantaranya metoda Linear Quadratic Regulator (LQR), metoda Linear Quadratic Gaussian (LQG), metoda Linear Quadratic Gaussian/Loop Transfer Recovery (LQG/LTR), metoda H_2 dan metoda H_∞ .

Dalam penelitian ini akan dibahas simulasi yang berkaitan dengan perancangan tahap mula sistem kendali linier untuk mengendalikan sistem tenaga listrik menggunakan metoda H_∞ dengan pendekatan mixed sensitivity. Syarat menggunakan metoda diatas adalah model sistem tenaga listrik IEEE 14 Bus 5 Mesin harus bersifat linier. Untuk mendapatkan model linier tersebut, model sistem dilinierisasi di titik operasi tertentu.

Penelitian ini bertujuan melakukan simulasi untuk memperoleh bahan informasi mendisain controller H_∞ yang mengendalikan sistem tenaga listrik menggunakan metoda H_∞ dengan pendekatan mixed-sensitivity pada model IEEE 14 Bus 5 Mesin

Hasil penelitian ini dapat dijadikan bahan informasi disain controller H_∞ yang mengendalikan sistem tenaga listrik menggunakan metoda H_∞ dengan pendekatan mixed-sensitivity pada model IEEE 14 Bus 5 Mesin

Dalam penelitian ini dilakukan pembatasan sebagai berikut .

1. Model mesin yang akan digunakan bersifat tipikal dan setiap mesin mempunyai pemodelan yang sama.
2. Jaringan dimodelkan dengan mengabaikan jaringan dinamik dan sistem interkoneksi dimodelkan sebagai jaringan pasif dan bersifat linier.
3. Fungsi bobot dan beban ditentukan secara coba-coba

2. MODEL DINAMIK SISTEM TENAGA LISTRIK

Dalam suatu sistem tenaga listrik yang terinterkoneksi dan terdiri dari beberapa pembangkit (multimesin) dengan kapasitas unit-unit pembangkit yang relatif besar dan terletak cukup berjauhan satu dengan yang lainnya, akan sangat mudah terjadi ayunan (osilasi) variabel keadaan sistem disekitar titik kerjanya. Ayunan ini dapat terjadi terus menerus dan dapat saling mempengaruhi antara mesin yang satu dengan mesin yang lain, disebabkan oleh perubahan-perubahan yang terjadi dalam sistem seperti perubahan beban yang terjadi setiap saat, perubahan yang terjadi pada sisi pembangkit maupun saat penyaluran tenaga. Hal ini akan menyebabkan sistem menjadi tidak stabil, oleh sebab itu untuk menjaga kestabilan sistem tenaga diperlukan suatu sistem pengendali untuk mengendalikan ayunan yang terjadi, sehingga sistem tetap dalam kondisi stabil. Pada penelitian ini membahas pengendalian dengan batas dalam pengendalian kestabilan dinamik.

Perubahan yang terjadi di sistem tenaga listrik seperti perubahan kecil beban, akan menyebabkan perubahan kecepatan sudut rotor dan tegangan generator. Perubahan tersebut akan mengakibatkan kinerja dinamik sistem (frekuensi) menjadi tidak baik, bahkan dapat membawa sistem menuju ke daerah yang tidak stabil. Untuk mengatasi hal tersebut perlu pengendalian penggerak mula dan pengendalian eksitasi.

2.1 Model Dinamika Mesin Sinkron

Mesin serempak yang berfungsi sebagai suatu generator sinkron digerakkan oleh sebuah penggerak mula (*prime mover*) adalah suatu devais yang mengubah energi mekanis menjadi energi listrik dan mempunyai dua komponen utama yaitu bagian yang diam (stator) dan bagian yang bergerak (rotor). Besar tegangan induksi yang dibangkitkan sebanding dengan kecepatan putar rotor dan besarnya nilai fluksi, yaitu

$$e = cn_s \phi \tag{2.1}$$

Persamaan generator sinkron :

$$T_m - T_e = M \frac{\partial \omega}{\partial t} + D\omega \tag{2.2}$$

dan

$$\frac{\partial \Delta \delta}{\partial t} = 2\pi f \Delta \omega \tag{2.3}$$

dengan

- T_m : Torsi Mekanik
- T_e : Torsi Elektrik
- M : Momen Inersia

- ω : Kecepatan Sudut
- n_s : Kecepatan Sinkron
- c : Konstanta
- ϕ : Flux Perkutub
- e : Gaya Gerak Listrik
- D : Redaman Mesin

Adapun bentuk linier persamaan (2.2) adalah

$$\Delta T_m - \Delta T_e = M \frac{\partial \Delta \omega}{\partial t} + D \Delta \omega \tag{2.4}$$

Jika beban berubah, akan terjadi perubahan sudut daya rotor ($\Delta \delta$) dan perubahan kecepatan sudut rotor ($\Delta \omega$). Perubahan sudut daya rotor ($\Delta \delta$) akan menimbulkan torsi sinkronisasi (ΔT_s), yang besarnya sebanding dengan perubahan torsi elektrik (ΔT_e) yaitu

$$\Delta T_e = \Delta T_s = K_1 \Delta \delta \tag{2.5}$$

dimana

K_1 : Koefesien Torsi Sinkronisasi

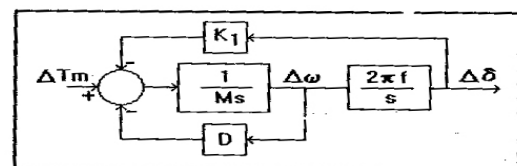
Dengan mensubstitusi persamaan (2.5) ke persamaan (2.4) akan diperoleh

$$\Delta T_m - K_1 \Delta \delta = M \frac{\partial \Delta \omega}{\partial t} + D \Delta \omega \tag{2.6}$$

$$\Delta T_m - K_1 \Delta \delta = M s \Delta \omega + D \Delta \omega \tag{2.7}$$

$$\Delta T_m - K_1 \Delta \delta = (M s + D) \Delta \omega \tag{2.8}$$

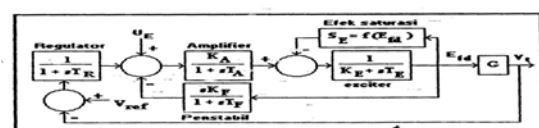
dari persamaan (2.3) dan persamaan (2.8) dapat diagram blok Gambar-2.1



Gambar -2.1 Dinamika Generator Sinkron

2.2 Pengaturan Sistem Eksitasi

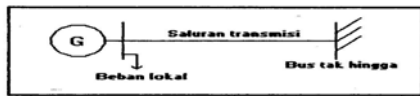
Model sistem eksitasi yang dipakai adalah sistem eksitasi tipe DC1-DC commutator exciter dengan tegangan medan eksitasi berasal dari jangkar generator arus searah dengan komutator berfungsi sebagai penyearah. Dalam bentuk diagram blok, tipe sistem eksitasi ini dapat dilihat Gambar-2.2 berikut :



Gambar-2.2 Sistem eksitasi generator sinkron tipe DC1-DC commutator

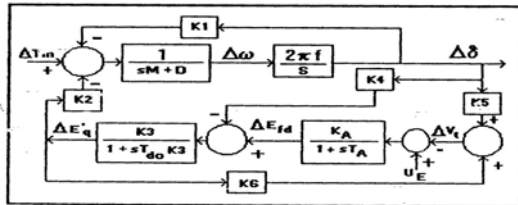
2.3 Model Dinamik Sebuah Mesin Terhubung Bus Tak Hingga

Model satu mesin sinkron terhubung bus tak hingga telah dikembangkan oleh De Mello dan Corcodia.



Gambar-2.3 Satu Mesin Sinkron Terhubung Bus Tak Hingga

Serta diagram bloknya dapat dilihat pada Gambar 2.4



Gambar-2.4 Blok Diagram Dinamika Satu Mesin Sinkron Terhubung Bus Tak Hingga

2.4 Pemodelan Dinamik Sistem Tenaga Listrik Multi Mesin

Sistem tenaga listrik multi mesin, perubahan satu mesin akan mempengaruhi mesin yang lain. Hal ini terjadi karena antara mesin yang satu dengan mesin yang lain terhubung secara listrik melalui suatu jaringan.

Untuk memodelkan sistem tenaga listrik multi mesin, pertama kali persamaan arus, daya listrik dan tegangan pada terminal bus perlu diturunkan. Untuk mempelajari interaksi dinamika suatu sistem tenaga listrik multi mesin, dapat dipelajari dari adanya interaksi antara mesin-mesin sinkron dalam sistem tersebut.

2.5 Persamaan Torsi Mesin i

Persamaan torsi mesin i dalam bentuk linier dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\Delta T_{mi} - \Delta T_{ei} = M_i \frac{\partial \Delta \omega_i}{\partial t} + D_i \Delta \omega_i \quad (2.9)$$

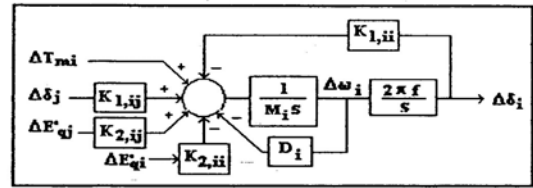
dirubah menjadi

$$\frac{\partial}{\partial t} \Delta \omega_i = \frac{1}{M_i} (\Delta T_{mi} - \Delta T_{ei} - D_i \Delta \omega_i) \quad (2.10)$$

Didapat persamaan sebagai berikut

$$\frac{\partial}{\partial t} \Delta \omega_i = \frac{1}{M_i} \Delta T_{mi} - \frac{1}{M_i} (K_{1,ii} \Delta \delta_i - \sum_{j \neq i} K_{1,ij} \Delta \delta_j + K_{2,ii} \Delta E'_{qi} - \sum_{j \neq i} K_{2,ij} \Delta E'_{qj}) - \frac{D_i}{M_i} \Delta \omega_i \quad (2.11)$$

pada diagram blok dapat dilihat pada Gambar-2.5 berikut ini :



Gambar-2.5 Blok Diagram Mekanik Mesin-I Dalam Sistem Multi Mesin

2.6 Persamaan Medan Mesin i

Persamaan medan mesin i dalam bentuk linier dapat dituliskan sebagai berikut :

$$T'_{doi} \Delta \dot{E}'_{qi} = \Delta E_{fdi} - \Delta E'_{qi} - (x_{di} - x'_{di}) \Delta i_{di} \quad (2.18)$$

$$T'_{doi} \Delta \dot{E}'_{qi} = \Delta E_{fdi} - C_{3,ii} \Delta E'_{qi} + \sum_{j \neq i} C_{3,ij} \Delta E'_{qj} + K_{4,ii} \Delta \delta_i - \sum_{j \neq i} K_{4,ij} \Delta \delta_j \quad (2.12)$$

Dengan :

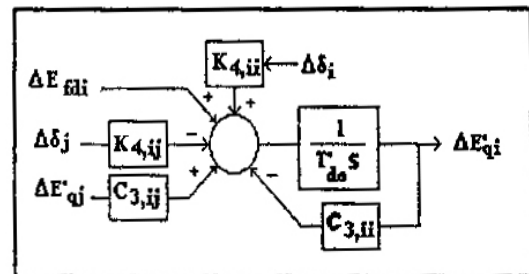
$$C_{3,ii} = 1 - (x_{di} - x'_{di}) B_{ii} \quad (2.13)$$

$$C_{3,ij} = 1 - (x_{di} - x'_{di}) y_{ij} S_{ij} \quad (2.14)$$

$$K_{4,ii} = \sum_{j \neq i} K_{4,ij} \quad (2.15)$$

$$K_{4,ij} = (x_{di} - x'_{di}) E'_{qi} y_{ij} C_{ij} \quad (2.16)$$

Blok diagram dinamik mesin i elemen persamaan medan dapat dilihat pada Gambar-2.6

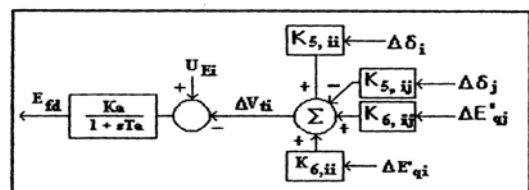


Gambar-2.6 Blok diagram interaksi mesin i elemen persamaan medan

2.7 Persamaan Pengatur Tegangan

Diagram bloknya dapat dilihat dalam Gambar-

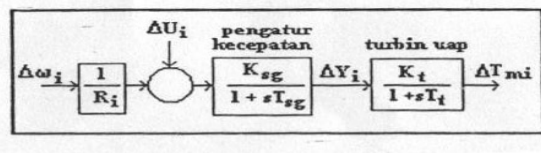
2.7 :



Gambar-2.7 Blok Sistem pengaturan tegangan

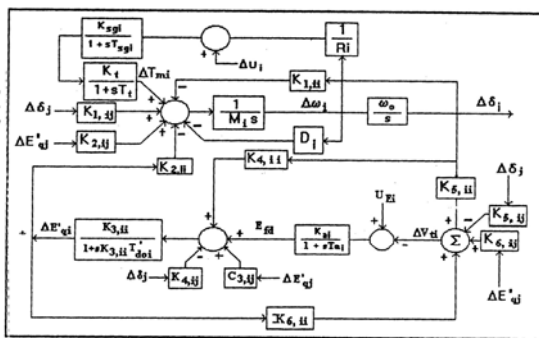
2.8 Pengaturan Kecepatan Turbin Uap

Model turbin dan sistem pengaturan yang digunakan mengacu model IEEE. Diagram blok Turbin Uap dan pengaturannya



Gambar-2.8 Blok Turbin Uap dan Pengaturannya

Dari blok-blok diagram yang terbentuk diatas, diagram blok generator i dalam sistem tenaga listrik multi mesin secara keseluruhan dapat dilihat dalam Gambar-2.9



Gambar -2.9 Blok diagram lengkap interaksi dinamik mesin i dengan adanya pengaruh mesin j

2.9 Pembentukan Persamaan Keadaan Sistem

Sistem jaringan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sistem tenaga listrik empatbelas bus dan lima unit pembangkit. Dari persamaan-persamaan diatas dapat dibentuk persamaan keadaan sistem sistem tenaga listrik multi mesin :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \tag{2.17}$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \tag{2.18}$$

Dengan variabel keadaanya adalah perubahan sudut rotor ($\Delta\delta$), perubahan kecepatan sudut ($\Delta\omega$), perubahan tegangan generator ($\Delta E'_q$), perubahan tegangan medan (ΔE_{fd}), perubahan torsi mekanik (ΔT_m) dan perubahan level katup (ΔY) sehingga terbentuk matrik keadaan (Matrik A) terdiri dari submatrik A_{ii} dan A_{ij} :

$$A_{ii} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-K_{1,ii}}{M_i} & \frac{-D_i}{M_i} & \frac{-K_{2,ii}}{M_i} & 0 & \frac{1}{M_i} & 0 \\ \frac{K_{4,ii}}{T_{doi}} & 0 & \frac{-K_{3,ii}}{T_{doi}} & \frac{1}{T_{doi}} & 0 & 0 \\ \frac{K_{Ai}K_{5,ii}}{T_{Ai}} & 0 & \frac{-K_{Ai}K_{6,ii}}{T_{Ai}} & \frac{-1}{T_{Ai}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{ti}} & \frac{1}{T_{ti}} \\ 0 & \frac{-K_{sg_i}}{T_{sg}R_i} & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{sg_i}} \end{bmatrix} \tag{2.19}$$

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\sum K_{1,ij}}{M_i} & 0 & \frac{\sum K_{2,ij}}{M_i} & 0 \\ \frac{\sum K_{4,ij}}{T_{doi}} & 0 & \frac{-\sum K_{3,ij}}{T_{doi}} & 0 \\ \frac{\sum K_{Ai}K_{5,ij}}{T_{Ai}} & 0 & \frac{-\sum K_{Ai}K_{6,ij}}{T_{Ai}} & 0 \end{bmatrix} \tag{2.20}$$

Untuk matriks masukan B sebagai berikut

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{Ai}} \end{bmatrix} \tag{2.21}$$

3. METODA OPTIMISASI H_∞

Dalam perkembangan teknik kendali, salah satu yang cukup mendapat perhatian adalah masalah ketidakpastian (*uncertainty*) dalam sistem dinamik. Munculnya ketidakpastian dapat menimbulkan perubahan terhadap sistem dinamik sehingga kondisi sistem tersebut akan berbeda dengan kondisi saat dimodelkan. Masalah lainnya adalah kekokohan (*robustness*) sistem kendali dalam mengantisipasi gangguan. Masalah diatas sangat mempengaruhi keandalan sistem kendali dalam proses pengendalirnya.

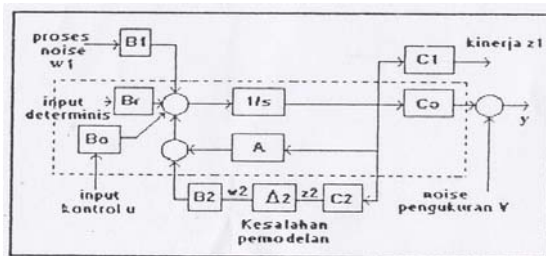
Teori kendali kokoh merupakan sistem kendali yang memasukkan unsur ketidakpastian dalam tahapan perancangan controller dan menggunakan karakteristik kekokohan sebagai parameter spesifikasi. Dengan demikian strategi kendali yang diperoleh diharapkan dapat mengantisipasi ketidakpastian dan gangguan yang muncul selama proses pengendalian dalam batas toleransi yang ditentukan.

3.1 Pemodelan Kendali Kokoh Dengan Metoda Optimisasi H_∞

Telah disadari bahwa tidak mungkin mendapatkan sifat kokoh dan kinerja yang sama-sama ideal kalau secara fisis tidak mungkin, dengan metoda optimisasi H_∞ dengan mudah melakukan tawar menawar (trade off) diantara keduanya. Metoda optimisasi H_∞ mengizinkan perancang untuk mengkombinasikan pencapaian level tertentu dari sensitivitas (kinerja) dengan level tertentu dari sifat kokoh.

3.2 Formulasi Matematis Dalam Ruang H_∞

Perhatikan model sistem lingkaran terbuka dalam Gambar-3.1 dengan A , B_1 , B_2 , B_r , C_0 dan C_1 merupakan matriks-matriks dengan dimensi yang tepat. Sistem merupakan subyek dari ketidakpastian



Gambar-3.1 Model Sistem Lingkaran Terbuka

Dalam Gambar-3.1, sistem dapat mengandung ketidakpastian sebagai berikut :

1. Kesalahan pemodelan. Matriks nominal A dapat bervariasi pada $A + B_2 \Delta_2 C_2$. Δ_2 akan merepresentasikan ukuran variasi parameter dari A . Sedangkan B_2 dan C_2 akan merepresentasikan struktur dari gangguan.
2. Gangguan proses.
3. Masukan deterministik. Masukkan ini dapat dipandang sebagai sinyal komando atau sinyal pelengkap
4. Kesalahan pengukuran

Ketidakpastian-ketidakpastian diatas dapat dipandang sebagai :

1. Langkah untuk memperhitungkan kekurangan informasi dinamika tetap sistem (kesalahan pemodelan)
2. Upaya menerapkan informasi bahwa dinamika sistem berubah saat kondisi operasi yang berbeda Berdasarkan tingkah laku sistem, ketidakpastian dapat dibedakan atas ketidakpastian terstruktur dan ketidakpastian tidak terstruktur .

3.3 Ketidakpastian Tidak Terstruktur

Ketidakpastian disebut tidak terstruktur apabila informasi yang dimiliki hanya besaran (*magnituda*) dari ketidakpastian tanpa mengetahui secara jelas

sumber ketidakpastian itu. Umumnya merepresentasikan elemen yang bergantung frekuensi seperti saturasi aktuator, mode struktur yang tidak termodelkan di daerah frekuensi tinggi atau gangguan obyek kendali di daerah frekuensi rendah.

Karakteristik ketidakpastian jenis ini diberikan oleh dua besaran. Pertama, besaran yang merepresentasikan ukuran ketidakpastian itu dalam $\|\Delta\|_\infty$, yang kedua besaran optional yang menggambarkan sifat ketergantungannya terhadap frekuensi yaitu matriks bobot W , berupa fungsi alih fasa minimum.

3.4 Ketidakpastian Terstruktur

Rancangan kompensator untuk model dengan ketidakpastian tak terstruktur lebih bersifat konservatif, karena kinerja sistem umpan balik dipersiapkan untuk mengatasi variasi maksimum dari usikan gangguan. Dengan mengidentifikasi sumber ketidakpastian sistem secara akurat, berarti menyatakan ketidakpastian terstruktur. Kemudian seluruh informasi dihimpun dalam satu blok matriks gangguan Δ

$$\Delta(s) = \text{diag}\{\Delta_1(s), \dots, \Delta_m(s)\} \quad (3.1)$$

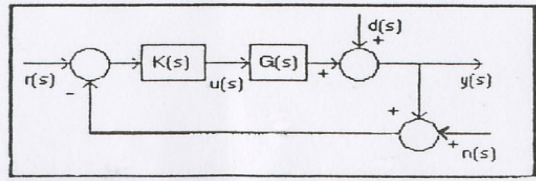
dengan $\Delta_i(s)$ adalah gangguan dengan struktur yang spesifik, skalar atau matriks dan memiliki nilai singular maksimum ternormalisasi oleh fungsi bobot sehingga menjadi $\bar{\sigma}(\Delta_i(j\omega)) \leq 1, \forall \omega$

3.5 Metoda Optimisasi H_∞

Metoda kendali H_∞ adalah metoda perancangan kendali yang berbasis optimasi dan metoda ini menjamin sifat kokoh dari sistem. Telah disadari bahwa tidak mungkin mendapatkan sifat kokoh dan kinerja yang sama-sama ideal jika secara fisis tidak mungkin dan metoda ini dengan mudah melakukan tawar menawar diantara keduanya. Metoda perancangan H_∞ mengizinkan perancang untuk mengkombinasikan pencapaian level tertentu dari sensitivitas (kinerja) dengan level tertentu dari sifat kokoh.

Sensitivitas $S(s)$ dan Sensivitas komplementer $T(s)$ merupakan parameter yang menunjukkan kinerja suatu sistem dan memegang peranan penting dalam menentukan karakteristik respon kendali kokoh. Sensitivitas suatu sistem menunjukkan karakteristik respon terhadap peredaman gangguan yang ada di dalam sistem tersebut (*disturbance rejection*) sedangkan sensitivitas komplementer menunjukkan kualitas respon terhadap sinyal kendali (*command response*), sifat peredaman noise (*noise suppression*) sistem dan kualitas stabilitas sistem terhadap ketidakpastian. Jika sistem dinamik

dinyatakan sebagai $G(s)$ dan sistem kendali dinyatakan sebagai $K(s)$ maka suatu sistem sistem lingkaran tertutup dapat dinyatakan dalam bentuk diagram blok Gambar-3.2



Gambar-3.2 Diagram Blok Standard Sistem Kendali

Dari Gambar-3.2. dapat diturunkan persamaan yang menunjukkan keluaran total sistem lingkaran tertutup sebagai berikut :

$$y(s) = \frac{G(s)K(s)}{1+G(s)K(s)}r(s) + \frac{1}{1+G(s)K(s)}d(s) - \frac{G(s)K(s)}{1+G(s)K(s)}n(s) \quad (3.2)$$

jika didefinisikan fungsi sensitivitas $S(s)$ dan sensitivitas komplementer $T(s)$ sebagai

$$S(s) = \frac{1}{1+G(s)K(s)} \quad (3.3)$$

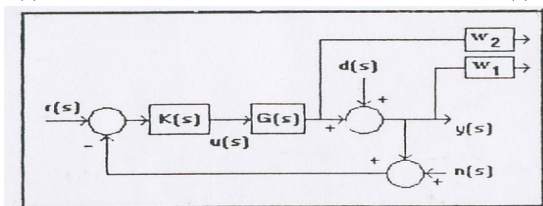
$$T(s) = \frac{G(s)K(s)}{1+G(s)K(s)} \quad (3.4)$$

Hubungan antara $S(s)$ dan $T(s)$ adalah terbatas yaitu

$$S(s) + T(s) = 1 \quad (3.5)$$

3.6 Pendekatan Mixed-Sensitivity

Dalam perancangan dengan pendekatan mixed-sensitivity, karakteristik sistem dapat ditentukan dengan menentukan batas spesifikasi antara sensitivitas $S(s)$ dan sensitivitas komplementer $T(s)$. Hal ini dapat dilakukan dengan menambah kompensator dalam sistem untuk membentuk (*shaping*) fungsi $S(s)$ dan $T(s)$. Prosedur ini disebut dengan loop shaping. Dalam Gambar-3.3 terlihat bahwa blok W_1 diletakkan di keluaran sistem yang berkaitan dengan masukan gangguan $d(s)$ dengan $n(s)=0$ yang merupakan representasi fungsi $S(s)$. Blok W_2 diletakkan di keluaran sistem yang berkaitan dengan masukan $n(s)$ atau $r(s)$, dengan $d(s)=0$ yang merupakan representasi fungsi $T(s)$



Gambar-3.3 Diagram Blok Loop Shaping

Fungsi bobot W_1 dan W_2 digunakan untuk membatasi fungsi $S(s)$ dan $T(s)$.

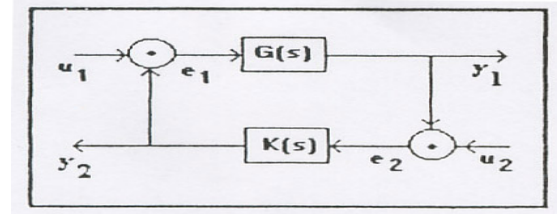
3.7 Analisis Kestabilan dan Kekokohan

Dalam metoda kendali kokoh khususnya metoda H_∞ dikenal empat macam kriteria untuk menjamin kestabilan dan kekokohan yang harus dipenuhi oleh sistem kendali umpan balik yaitu.

- a. Stabilitas nominal (*nominal stability*)
- b. Kinerja nominal (*nominal performance*)
- c. Stabilitas kokoh (*robust stability*)
- d. Kinerja kokoh (*robust performance*)

a. Stabilitas Nominal

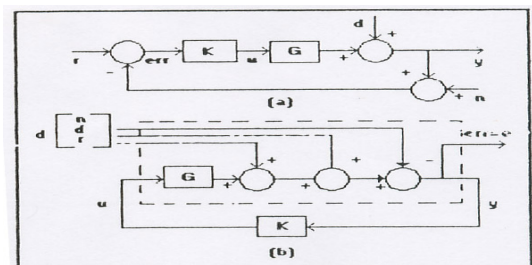
Stabilitas nominal merupakan syarat bagi suatu sistem lingkaran tertutup agar dapat digunakan dalam kondisi nyata. Metoda yang menjadi salah satu dasar analisis sistem kendali kokoh yaitu Teorema penguatan kecil (*small gain theorem*).



Gambar -3.4 Sistem Umpan Balik Merepresentasikan Teorema Penguatan Kecil

b. Kinerja Nominal

Suatu sistem lingkaran tertutup dikatakan memiliki kinerja nominal, apabila kriteria kinerja untuk model sistem nominal telah tercapai. Kriteria kinerja secara umum adalah menjaga selisih antara keluaran sistem dan sinyal referensi sekecil mungkin, mengurangi sensitivitas sistem terhadap gangguan (*disturbance rejection*), dan meredam derau frekuensi tinggi (*noise suppression*). Dalam Gambar-3.6. dapat ditunjukkan bagaimana blok diagram umum sistem kendali ditransformasikan ke dalam bentuk standard sintesis kendali kokoh, dan mentransformasikan



Gambar-3.5 Transformasi Sistem (a) Bentuk Standard (b) Sintesis Kendali Kokoh

spesifikasi yang telah ditentukan ke dalam formulasi standard agar dapat dilakukan sintesis dengan metoda kendali kokoh. Dalam Gambar-3.5b didefinisikan :

$$d = \begin{bmatrix} n^T & v^T & r^T \end{bmatrix}^T \quad (3.6)$$

$$e = \text{err}^T \quad (3.7)$$

Dibuat $M = F_1(P, K)$ kemudian dipartisi menjadi M_{11} , M_{12} , M_{21} dan M_{22} sesuai dengan arah vektor masukan dan keluaran sehingga diperoleh :

$$F_1(P, K) = M_{11} + M_{12}K(I - M_{22}K)^{-1}M_{21} \quad (3.8)$$

sistem memiliki kinerja nominal apabila

$$\|M_{22}\| = \sup_{\omega} \bar{\sigma}(M_{22}(j\omega)) \leq 1 \quad (3.9)$$

c. Stabilitas Kokoh

Dalam penelitian ini yang menjadi perhatian adalah pengaruh ketidakpastian multiplikatif terhadap kestabilan sistem tenaga listrik. Harga ketidakpastian multiplikatif Δ_m yang dapat menyebabkan sistem menjadi tidak stabil disebut batas stabilitas multiplikatif (MSM). Karakteristik sistem terhadap Δ_m dapat dievaluasi dengan memperhatikan fungsi $T(s)$ sebagai fungsi alih yang berhubungan dengan Δ_m stabilitas kokoh akan dijamin jika kondisi berikut ini dipenuhi :

$$\begin{aligned} |\Delta_m| \|T(s)\| < 1 \\ \sup(\sigma_{\max}(\Delta_m)T(s)) < 1 \end{aligned} \quad (3.10)$$

dengan

σ_{\max} : Nilai singular maksimum

sup : Supremum atau batas atas terkecil

Untuk menjamin kestabilan sistem terhadap ketidakpastian multiplikatif MSM harus bernilai besar, yang berarti harga fungsi $T(s)$ harus sekecil mungkin di daerah frekuensi Δ_m

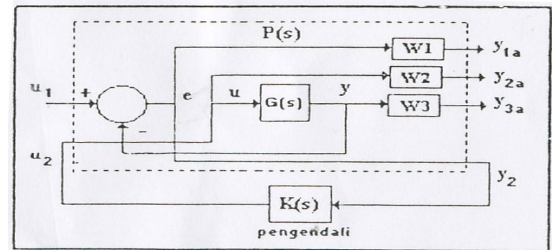
d. Kinerja Kokoh

Suatu sistem dikatakan memiliki kinerja yang kokoh jika kinerja nominal sistem memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan dan sekaligus merupakan syarat yang harus dipenuhi oleh sistem nominal, dalam pendekatan mixed -sensitivity kinerja kokoh dapat dicapai apabila spesifikasi kinerja diminimasi telah tercapai,

$$\min \left\| \begin{bmatrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)T(s) \end{bmatrix} \right\|_{\infty} = \min \left\| \begin{bmatrix} W_1(s)[I + G_o(s)K(s)]^{-1} \\ W_2(s)G_o(s)K(s)[I + G_o(s)K(s)]^{-1} \end{bmatrix} \right\|_{\infty} \quad (3.11)$$

3.8 Pembentukan Objek Kendali Yang Diperluas

Dalam masalah kendali kokoh, objek kendali dimodelkan dalam bentuk diagram blok yang terdiri dari objek kendali nominal dan fungsi pembobotan. Sistem kombinasi ini disebut sebagai objek kendali yang diperluas dan dinyatakan dalam Gambar-3.6



Gambar-3.6 Objek Kendali Yang Diperluas P(s)

Fungsi alih yang menghubungkan masukan u_1 dan keluaran y_1 dinyatakan sebagai

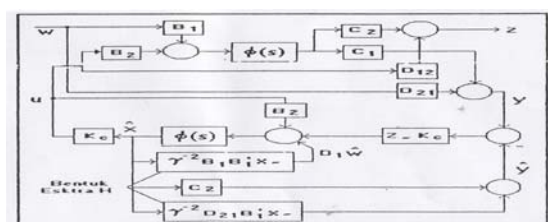
$$T_{y_1u_1} = P_{11}(s) + P_{12}(s)[I - K(s)P_{22}(s)]^{-1}K(s)P_{21}(s) \quad (3.12)$$

3.9 Hukum Kendali K(s)

Perancangan controller dengan metoda kendali kokoh dasarnya menyangkut pembentukan gain controller dan estimator dengan menggunakan persamaan Riccati dan norm- ∞ , sehingga kendali kokoh sering juga disebut kendali H_{∞} . Masalah kendali H_{∞} adalah untuk mencari kendali penstabil $K(s)$ sehingga sistem lup tertutup $G(s)K(s)$ stabil internal dan norm- ∞ dari fungsi alih $T_{y_1u_1}$ diminimasi dan lebih kecil dari γ , dengan γ adalah suatu nilai tertentu kecil atau sama dengan satu, masalah ini disebut masalah kendali H_{∞} standard atau

$$\min_{K(s) \text{ stabilizing}} \|T_{y_1u_1}\|_{\infty} \leq \gamma \quad (3.13)$$

dan dapat diselesaikan dengan algoritma H_{∞} yang telah ada. Adapun diagram blok sistem kendali H_{∞} .



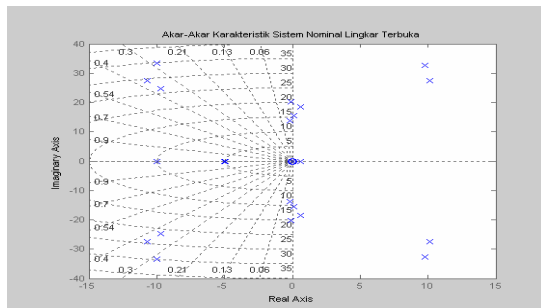
Gambar-3.7 Diagram Blok Sistem Kendali H_{∞}

4. SIMULASI PERANCANGAN KONTROLLER UNTUK PERUBAHAN FREKUENSI

Kontroller H_∞ ini dirancang untuk mencapai dua tujuan yaitu kualitas sistem dan kekokohan sistem. Obyektif perancangan ini dapat dicapai sekaligus dengan metoda kendali kokoh, dalam hal ini dengan menggunakan metoda optimisasi H_∞ dengan pendekatan mixed sensitivity. Untuk melakukan perancangan kontroller menggunakan metoda optimisasi H_∞ untuk sistem tenaga listrik IEEE 14 bus 5 mesin ini dilakukan pertama-tama adalah mendapatkan kondisi awal perhitungan yaitu perhitungan aliran daya. Selanjutnya menghitung konstanta-konstanta interaksi antar mesin ($K_{1,ii}$ s/d $K_{6,ii}$ dan $K_{1,ij}$ s/d $K_{6,ij}$) untuk semua mesin. Kemudian baru dihitung matriks keadaan yang dipergunakan dalam perancangan kontroller.

4.1 Karakteristik Sistem Lingkaran Terbuka Untuk Sistem Tenaga Listrik IEEE 14 Bus 5 Mesin

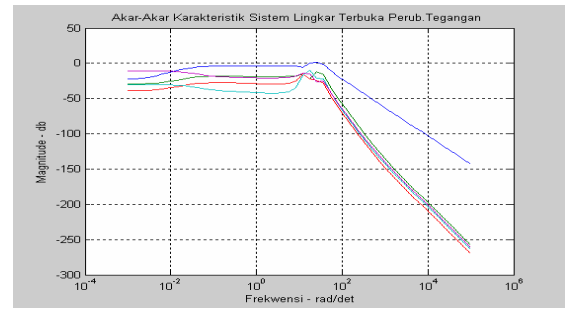
Untuk melihat karakteristik sistem nominal lingkaran terbuka pada sistem tenaga listrik IEEE 14 Bus 5 Mesin dapat dilihat dari letak akar-akar karakteristik sistem lingkaran terbuka dalam Gambar-4.1 berikut ini



Gambar-4.1 Letak Akar-Akar Karakteristik Sistem Lingkaran Terbuka Untuk Sistem Tenaga Listrik IEEE 14 Bus 5 Mesin

Gambar-4.1 menunjukkan letak akar-akar karakteristik sistem lingkaran terbuka, terlihat bahwa sistem lingkaran terbuka tersebut masih memiliki akar-akar karakteristik disebelah kanan sumbu khayal sehingga dapat dipastikan sistem lingkaran terbuka sistem tenaga listrik tersebut tidak stabil.

Untuk melihat kinerja nominal sistem lingkaran terbuka yang akan dikendalikan dilakukan simulasi terhadap objek kendali dalam kondisi operasi nominal. Plot nilai singular sistem lingkaran terbuka untuk perubahan frekuensi dapat dilihat Gambar-4.2



Gambar-4.2 Nilai Singular Sistem Lingkaran Terbuka Untuk Perubahan Frekuensi Generator

Dari Gambar-4.2 terlihat plot penguatan matriks fungsi alih sistem lingkaran terbuka untuk perubahan tegangan generator. Terlihat bahwa nilai singular maksimum model nominal sistem lingkaran terbuka kurang dari satu berarti kriteria kinerja nominal sudah terpenuhi tetapi lebar pita dari model nominal sistem lingkaran terbuka untuk perubahan tegangan generator cukup besar dan belum memenuhi spesifikasi yang diinginkan.

4.2 Spesifikasi Perancangan Kontroller

Sistem kendali yang akan dirancang ini memiliki spesifikasi sebagai berikut .

1. Sistem lingkaran tertutup memiliki lebar pita < 25 rad/det
2. Lewatan maksimum < 20 %
3. Waktu keadaan mantap 4-8 detik

Untuk mencapai spesifikasi diatas ditentukan fungsi bobot $W_1(s)$ untuk mengeliminasi kesalahan (*error*) keadaan tunak dari sistem lingkaran tertutup atau agar sensitivitas sistem terhadap gangguan sekecil mungkin, dapat dinyatakan dalam bentuk,

$$W_1(s) = \frac{K_1(s+a_1)}{s+b_1} \tag{4.1}$$

Fungsi bobot untuk $W_3(s)$ dinyatakan dalam bentuk,

$$W_3(s) = \frac{K_3(s+a_3)}{s+b_3} \tag{4.2}$$

4.3 Prosedur Simulasi Perancangan Kontroller

Prosedur perancangan kontroller sebagai berikut.

- (1) Masukkan nilai matriks nominal objek kendali A_0, B_0, C_0 dan D_0
- (2) Periksa apakah sistem nominal terkendali dan teramat apabila tidak maka simulasi tidak bisa dilanjutkan
- (3) Memilih matrik bobot $W_1(s)$ dan $W_3(s)$. Hal ini berhubungan respon frekuensi sistem nominal, batasan perancangan dalam bentuk batas stabilitas, sinyal kendali dan lebar pita sistem lingkaran tertutup

- (4) Pembentukan matrik fungsi alih objek kendali yang diperluas (augmented) yang terdiri atas objek kendali $G(s)$ dan pembatas perancangan yang diekspresikan dalam bentuk matriks bobot $W_1(s)$ dan $W_3(s)$
- (5) Tentukan kontroler $K(s)$ sehingga matrik fungsi alih sistem lingkaran tertutup T_{y1u1} adalah stabil dan norm fungsi alih tersebut diminimasi. Prosesnya memerlukan penyelesaian persamaan dua Riccati dengan pendekatan secara iterasi
- (6) Jika untuk $P(s)$ yang tertentu, tidak ada solusi untuk masalah kendali H_∞ , maka pembatasan perancangan didefinisikan kembali dan proses 3 sampai 6 diulangi kembali
- (7) Kinerja dari kontroler yang dirancang harus diuji dalam berbagai kondisi baik dalam kawasan frekuensi maupun dalam kawasan waktu, kalau perlu bentuk akhir pembobotan diatur kembali untuk respon waktu sistem dan perancangan dimulai dari 1

5. HASIL SIMULASI

Pada bagian ini dilakukan simulasi perancangan kontroler tegangan generator menggunakan metoda H_∞ dengan pendekatan mixed-sensitivity. Serta dilakukan analisis hasil perancangan dengan tujuan untuk melihat apakah kontroler yang dirancang dapat memenuhi spesifikasi yang diinginkan baik dalam kawasan frekuensi maupun kawasan waktu dan bagaimana kinerja yang dihasilkan apakah lebih baik atau tidak.

5.1 Perubahan Frekuensi Generator

Pada bagian ini disimulasikan perubahan frekuensi generator jika terjadi perubahan beban dan perubahan fungsi bobot

5.2 Perubahan Tegangan Generator Terhadap Variasi Beban Dan Fungsi Bobot Kondisi 1

Fungsi Bobot W_1

$$W_{11}(s) = \frac{5.00e - 05(0.008s + 0.048)}{(0.002s + 0.00025)} \tag{5.1}$$

$$W_{12}(s) = \frac{2.50e - 05(6e - 08s + 0.002)}{(3.125e - 07s + 6.25e - 05)} \tag{5.2}$$

$$W_{13}(s) = \frac{5.00e - 06(0.004s + 0.008)}{(0.256s + 0.00025)} \tag{5.3}$$

$$W_{14}(s) = \frac{4.25e - 04(6.25e - 05s + 0.256)}{(0.06s + 0.004)} \tag{5.4}$$

$$W_{15}(s) = \frac{4.75e - 04(0.00025s + 0.256)}{(0.016s + 0.00025)} \tag{5.5}$$

Fungsi Bobot W_3

$$W_{31}(s) = \frac{2.50e - 05(0.004s + 0.015)}{(0.00025s + 0.0015)} \tag{5.6}$$

$$W_{32}(s) = \frac{4.50e - 04(0.05s + 0.00125)}{(0.002s + 0.002)} \tag{5.7}$$

$$W_{33}(s) = \frac{2.25e - 04(0.128s + 0.0007)}{(0.004s + 0.000125)} \tag{5.8}$$

$$W_{34}(s) = \frac{2.25e - 04(0.512s + 0.15)}{(0.032s + 0.072)} \tag{5.9}$$

$$W_{35}(s) = \frac{7.5e - 05(0.002s + 0.0001)}{(0.0015s + 0.00125)} \tag{5.10}$$

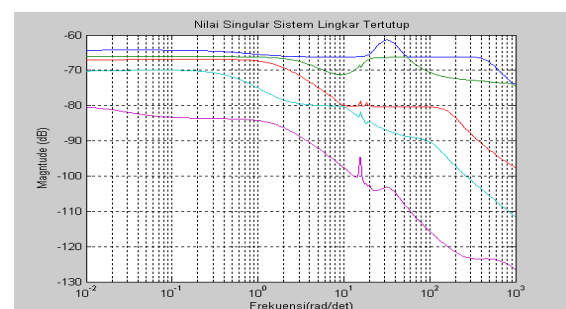
5.2.1 Kawasan Frekuensi

Tabel-5.1 Nilai γ_{opt} dan Lebar Pita (Bandwidth) Untuk Variasi Beban dan Fungsi Bobot Kondisi 1 Pada Perubahan Tegangan Generator

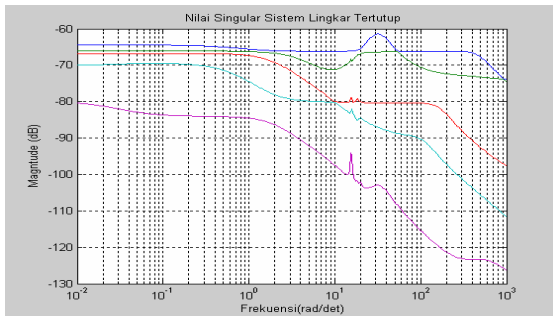
BEBAN	NILAI γ_{opt}	LEBAR PITA (BANDWIDTH)
0.975 x Beban Dasar	0.0080	MS
0.995 x Beban Dasar	0.0080	MS
1.005 x Beban Dasar	0.0080	MS
1.010 x Beban Dasar	0.0080	MS
1.015x Beban Dasar	0.0080	MS
1.050 x Beban Dasar	0.0080	MS
1.100 x Beban Dasar	0.0080	MS

Hasil simulasi dalam kawasan frekuensi untuk variasi beban dan fungsi bobot kondisi 1 memiliki nilai $\gamma_{opt} = 0.0080$. Hasil simulasi menunjukkan bahwa fungsi bobot kondisi 1 dan variasi beban terhadap sistem nominal dengan Kontroler H_∞ mampu mempertahankan kinerja sistem. Pernyataan di atas dapat dibuktikan dengan melihat Tabel-5.1 diatas.

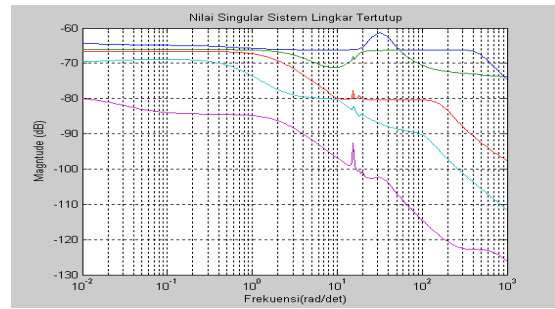
Plot nilai singular sistem lingkaran tertutup untuk fungsi bobot kondisi 1 dan variasi beban dapat dilihat pada gambar berikut :



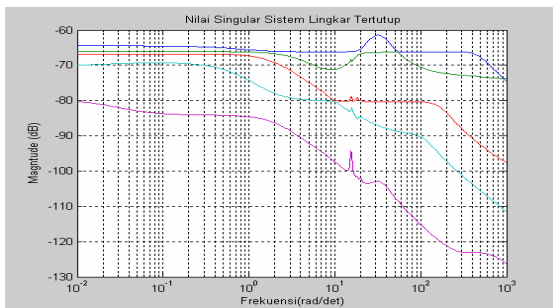
Gambar-5.1 Plot Nilai Singular Sistem Lingkaran Tertutup Untuk Beban 0.975 Kali Beban Dasar dan Fungsi Bobot Kondisi 1 Pada Perubahan Tegangan Generator



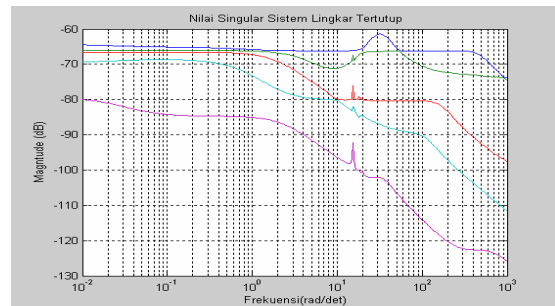
Gambar-5.2 Plot Nilai Singular Sistem Lingkaran Tertutup Untuk Beban 0.995 Kali Beban Dasar dan Fungsi Bobot Kondisi 1 Pada Perubahan Tegangan Generator



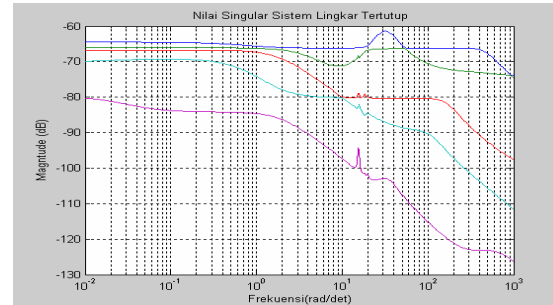
Gambar-5.6 Plot Nilai Singular Sistem Lingkaran Tertutup Untuk Beban 1.05 Kali Beban Dasar dan Fungsi Bobot Kondisi 1 Pada Perubahan Tegangan Generator



Gambar-5.3 Plot Nilai Singular Sistem Lingkaran Tertutup Untuk Beban 1.005 Kali Beban Dasar dan Fungsi Bobot Kondisi 1 Pada Perubahan Tegangan Generator



Gambar-5.7 Plot Nilai Singular Sistem Lingkaran Tertutup Untuk Beban 1.10 Kali Beban Dasar dan Fungsi Bobot Kondisi 1 Pada Perubahan Tegangan Generator



Gambar-5.4 Plot Nilai Singular Sistem Lingkaran Tertutup Untuk Beban 1.010 Kali Beban Dasar dan Fungsi Bobot Kondisi 1 Pada Perubahan Tegangan Generator

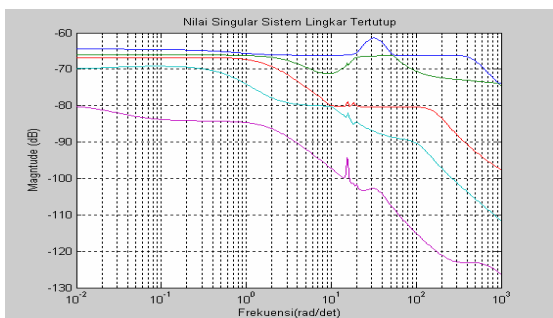
Pada Gambar-5.1 s/d Gambar-5.7 terlihat nilai singular yang kecil di daerah frekuensi rendah menyatakan bahwa sistem memiliki sensitivitas rendah terhadap gangguan yang masuk ke sistem. Respon frekuensi seperti ini, memungkinkan sistem lingkaran tertutup untuk perubahan tegangan generator menjejak sinyal referensi, berarti memperbaiki ketelitian keadaan tunak dan meredam gangguan frekuensi sistem rendah dengan baik. Sementara itu nilai singular yang rendah di daerah frekuensi tinggi menyatakan bahwa penguatan sistem di daerah ini rendah sehingga gangguan dari derau pengukuran di daerah frekuensi tinggi diredam dengan baik

5.2.2 Kawasan Waktu

Tabel-5.2 Hasil Simulasi Respon Sistem Lingkaran Tertutup Untuk Variasi Beban dan Fungsi Bobot Kondisi 1 Pada Perubahan Tegangan Generator

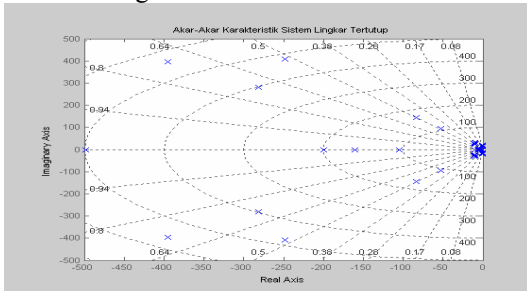
BEBAN	G1	G2	G3	G4	G5
0.975 x BD	MS	TMS	TMS	TMS	MS
0.995 x BD	MS	TMS	TMS	TMS	MS
1.005 x BD	MS	TMS	TMS	TMS	MS
1.010 x BD	MS	TMS	TMS	TMS	MS
1.015 x BD	MS	TMS	TMS	TMS	MS
1.050 x BD	MS	TMS	TMS	TMS	MS
1.100 x BD	MS	TMS	TMS	TMS	MS

Ket :
 MS : Memenuhi Spesifikasi
 TMS : Tidak Memenuhi Spesifikasi
 G1 s/d G5 : Generator 1 s/d Generator 5
 BD : Beban Dasar

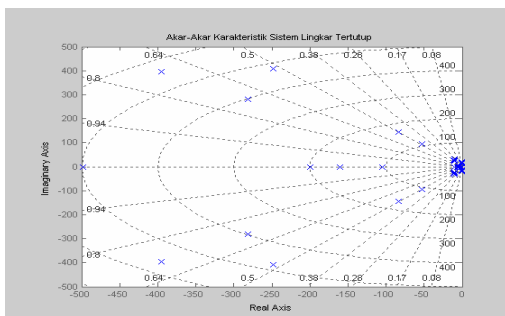


Gambar-5.5 Plot Nilai Singular Sistem Lingkaran Tertutup Untuk Beban 1.015 Kali Beban Dasar dan Fungsi Bobot Kondisi 1 Pada Perubahan Tegangan Generator

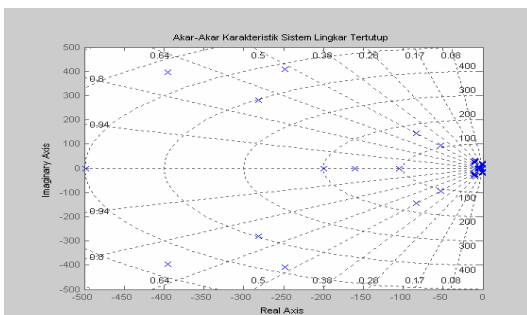
Berikut ini akan diperlihatkan akar-akar karakteristik sistem lingkaran tertutup untuk variasi beban dan fungsi bobot kondisi 1.



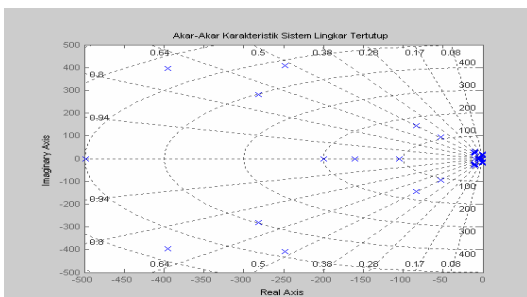
Gambar-5.8 Letak Akar-Akar Karakteristik Sistem Lingkaran Tertutup Untuk Beban 0.975 Kali Beban Dasar dan Fungsi Bobot Kondisi 1 Pada Perubahan Tegangan Generator



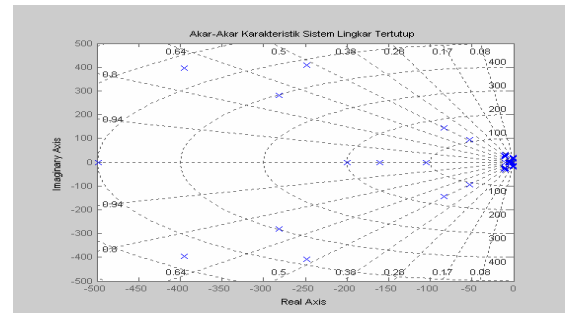
Gambar-5.9 Letak Akar-Akar Karakteristik Sistem Lingkaran Tertutup Untuk Beban 0.995 Kali Beban Dasar dan Fungsi Bobot Kondisi 1 Pada Perubahan Tegangan Generator



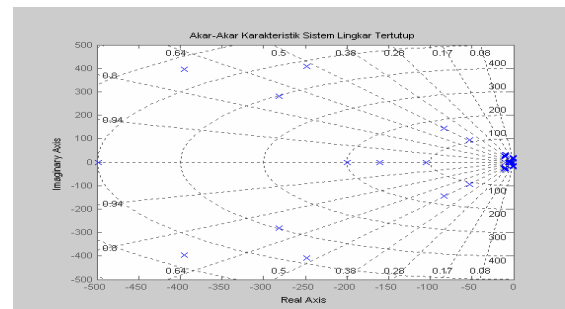
Gambar-5.10 Letak Akar-Akar Karakteristik Sistem Lingkaran Tertutup Untuk Beban 1.005 Kali Beban Dasar dan Fungsi Bobot Kondisi 1 Pada Perubahan Tegangan Generator



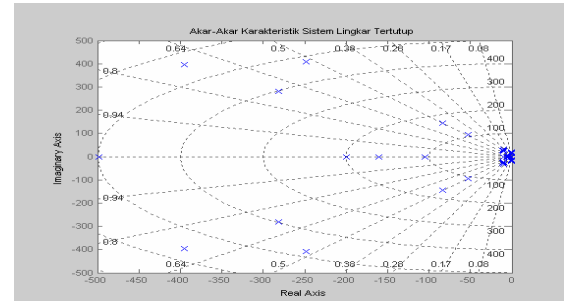
Gambar-5.11 Letak Akar-Akar Karakteristik Sistem Lingkaran Tertutup Untuk Beban 1.010 Kali Beban Dasar dan Fungsi Bobot Kondisi 1 Pada Perubahan Tegangan Generator



Gambar-5.12 Letak Akar-Akar Karakteristik Sistem Lingkaran Tertutup Untuk Beban 1.015 Kali Beban Dasar dan Fungsi Bobot Kondisi 1 Pada Perubahan Tegangan Generator



Gambar-5.13 Letak Akar-Akar Karakteristik Sistem Lingkaran Tertutup Untuk Beban 1.05 Kali Beban Dasar dan Fungsi Bobot Kondisi 1 Pada Perubahan Tegangan Generator



Gambar-5.14 Letak Akar-Akar Karakteristik Sistem Lingkaran Tertutup Untuk Beban 1.10 Kali Beban Dasar dan Fungsi Bobot Kondisi 1 Pada Perubahan Tegangan Generator

Akar-akar karakteristik sistem lingkaran tertutup untuk variasi beban dan fungsi bobot kondisi 1 semuanya disebelah kiri sumbu khayal. Hal ini dapat dilihat pada Gambar-5.8 s/d Gambar-5.14, sehingga dapat disimpulkan bahwa kestabilan nominal sistem lingkaran tertutup untuk variasi beban dan fungsi bobot kondisi 1 pada perubahan tegangan generator bersifat stabil.

Akar-akar karakteristik sistem lingkaran tertutup untuk variasi beban dan fungsi bobot kondisi 1 semuanya disebelah kiri sumbu khayal. Hal ini dapat dilihat pada Gambar-5.8 s/d Gambar-5.14 sehingga dapat di simpulkan bahwa kestabilan nominal sistem lingkaran tertutup untuk variasi beban dan fungsi bobot kondisi 1 pada perubahan frekuensi generator bersifat stabil. Simulasi ini

dilakukan untuk 7 kondisi yang berbeda-beda didapatkan hasil sebagai berikut :

5.3 Hasil Simulasi Perubahan Frekuensi Generator Terhadap Variasi Beban dan Fungsi Bobot

Simulasi dilakukan untuk 7 kondisi yang berbeda-beda dengan hasil simulasi untuk kawasan frekuensi dan kawasan waktu untuk diperoleh hasil sebagai berikut

Tabel -5.3 Hasil Simulasi Kawasan Frekuensi Untuk Variasi Beban dan Fungsi Bobot Pada Perubahan Tegangan Generator

BEBAN	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
0.975 x BD	MS	MS	MS	MS	MS	MS	TMS
0.995 x BD	MS	MS	MS	MS	MS	MS	TMS
1.005 x BD	MS	MS	MS	MS	MS	MS	TMS
1.010 x BD	MS	MS	MS	MS	MS	MS	TMS
1.015 x BD	MS	MS	MS	MS	MS	MS	TMS
1.050 x BD	MS	MS	MS	MS	MS	MS	TMS
1.100 x BD	MS	MS	MS	MS	MS	MS	TMS

Tabel -5.4 Hasil Simulasi Kawasan Waktu Untuk Variasi Beban dan Fungsi Bobot Pada Perubahan Tegangan Generator

BEBAN	K 1	K 2	K 3	K 4	K 5	K 6	K 7
0.975 x BD	T M S	T M S	T M S	T M S	T M S	T M S	T M S
0.995 x BD	T M S	M S	M S	M S	M S	M S	M S
1.005 x BD	T M S	M S	M S	M S	M S	M S	M S
1.010 x BD	T M S	M S	M S	M S	M S	M S	M S
1.015 x BD	T M S	M S	M S	M S	M S	M S	M S
1.050 x BD	T M S	M S	M S	M S	M S	M S	M S
1.100 x BD	T M S	T M S	T M S	T M S	T M S	T M S	T M S

Ket :
 MS : Memenuhi Spesifikasi
 TMS : Tidak Memenuhi Spesifikasi
 K1 s/d K5 : Fungsi Bobot Kondisi 1 s/d 7
 BD : Beban Dasar

Dari hasil simulasi dalam Tabel-5.3 dan Tabel-5.4 untuk beberapa kondisi fungsi bobot dan variasi beban pada perubahan tegangan terlihat bahwa fungsi bobot yang memenuhi spesifikasi yang diinginkan adalah fungsi bobot kondisi 2 sampai dengan fungsi bobot kondisi 6 dengan variasi beban antara 0.995 kali beban dasar sampai dengan 1.050 kali beban dasar, sedangkan untuk fungsi bobot kondisi 1 dan 7 ada beberapa variasi

beban yang tidak memenuhi spesifikasi yang diinginkan

6. KESIMPULAN

Dalam sistem tenaga listrik, model sistem bersifat nonlinier. Untuk menganalisa pola tingkah laku sistem tenaga listrik disekitar titik operasi, salah satu model sistem adalah dengan dilinierisasi dititik operasi. Dari model sistem yang dilinierisasi tersebut diperoleh persamaan keadaan untuk sistem tenaga listrik IEEE 14 Bus 5 mesin, dan dapat digunakan metoda H_{∞} dengan pendekatan mixed sensitivity, serta diupayakan suatu simulasi dengan variasi fungsi bobot dan beban. Dari hasil simulasi diperoleh hasil tabel berikut

Tabel 6.1 Hasil Simulasi Perubahan Tegangan Generator Dengan Variasi Beban dan Fungsi Bobot

BEBAN	K 1	K 2	K 3	K 4	K 5	K 6	K 7
0.975 x BD	M S	M S	M S	M S	M S	M S	T M S
0.995 x BD	M S	M S	M S	M S	M S	M S	T M S
1.005 x BD	M S	M S	M S	M S	M S	M S	T M S
1.010 x BD	M S	M S	M S	M S	M S	M S	T M S
1.015 x BD	M S	M S	M S	M S	M S	M S	T M S
1.050 x BD	M S	M S	M S	M S	M S	M S	T M S
1.100 x BD	M S	M S	M S	M S	M S	M S	T M S

Ket :
 MS : Memenuhi Spesifikasi
 TMS : Tidak Memenuhi Spesifikasi
 K1 s/d K7 : Fungsi Bobot Kondisi 1 s/d 7
 BD : Beban Dasar

Dari hasil simulasi dalam Tabel 6.1 didapatkan daerah stabil untuk bahan design controller H_{∞} yang mengendalikan perubahan tegangan generator yaitu fungsi bobot kondisi 2 sampai dengan fungsi bobot kondisi 6 dengan variasi beban antara 0.995 kali beban dasar sampai dengan 1.050 kali beban dasar.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anderson, P.M. dan A.A Fouad, “ *Power System Control and Stability* ”, Iowa State University Press, 1977.
2. Kundur, Prabha, “ *Power System Stability and Control* “, Mc. Graw Hill. Inc., New York, 1994
3. Saadat, Hadi, “ *Power System Analysis* ”,Mc. Graw Hill. Inc, New York, 1999
4. Rogers, Graham, “ *Power System Oscillations* ”, Kluwer Academic Publisher, 2000
5. Padiyar, K.R. “ *Power System Dynamics Stability and Control* “, Indian Institute of Science, Bangalore, Jhon Wiley & Sons (Asia) Pte.Ltd, 1996
6. Maciejowski J.M, “ *Multivariable Feedback Design* “ , Addison-Wesley Publishing Company. Inc, 1999
7. Chiang R.Y., Safonov, M.G, “ *Robust Control Toolbox User’s Guide* “ , Mathworks 1992
8. Shahian, B., Hassul, M., “ *Control System Design Using Matlab*”, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993
9. Skogestad, S., Postlethwaite, I., “ *Multivariable Feedback Control Analysis And Design* “, John Wiley & Sons, New York, January 2000
10. Doyle, J. C., Francis, A.B., Tannebaum, A.R , “ *Feedback Control Theory* “, Macmillan Publishing Company, New York, 1992
11. Isnuwardianto, “ *Introduction to Power System Dynamics* “, Seminar and Workshop on Power System Dynamics and Control, Institute Teknologi Bandung, 1995
12. Zhou, Kemin and Doyle, J.C, “ *Essentials of Robust Control* “,Prentice-Hall International Inc, New Jersey, 1998.
13. Glauco, N.T, Joe, H.C, “ *Robust Redesign Of Power System Damping Controller*” IEEE Transaction on Control System Technology, Vol 3, September, 1995
14. IEEE Committee Report, “ *Excitation System Model For Power System Stability Studies* “ IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol PAS-100, February, 1981.
15. Zhao, Q., Jiang J., “ *Robust Controller Design For Generator Excitation*”, IEEE Transaction on energi Conversion, Vol 10, June, 1995
16. Yao Nan Yu & Hamdy AM. Mousa, “ *Dynamics Interaction of Multi Machine Power System dan Excitation Control* “, IEEE Transaction Vol PAS-93, July 1974

BIODATA

Heru Dibyo Laksono ST, MT, Lahir di Sawah Lunto, 7 Januari 1977, Menamatkan S1 di Jurusan Teknik Elektro Universitas Andalas (Unand) Padang tahun 2000 bidang Teknik Tenaga Listrik. Pendidikan S2 bidang Teknik Kendali dan Sistem diselesaikan di Institute Teknologi Bandung (ITB) tahun 2004. Masuk sebagai dosen Teknik Elektro Universitas Andalas sejak tahun 2005.

Fitrilina ST, Lahir di Padang, 25 Agustus 1981, Menamatkan S1 di Jurusan Teknik Elektro Universitas Andalas (Unand) Padang tahun 2005 bidang Teknik Telekomunikasi.. Masuk sebagai dosen Teknik Elektro Universitas Andalas sejak tahun 2006.