

ANALISA SISTEM KENDALI FREKUENSI TENAGA LISTRIK DENGAN METODA H~ DENGAN PENDEKATAN *MIXED SENSITIVITY*

Heru Dibyo Laksono¹, Rahmayane²

^(1,2)Laboratorium Kontrol Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas
Kampus Limau Manis Padang Sumatera Barat
email : heru_dl@ft.unand.ac.id

ABSTRAK

Jurnal ini membahas tentang analisa sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan metoda H~ dengan pendekatan *mixed sensitivity*. Sistem kendali frekuensi tenaga listrik ini merupakan subsistem tenaga listrik yang paling berpengaruh terhadap sistem tenaga listrik baik dalam kondisi normal maupun dalam kondisi gangguan. Salah satu gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik adalah perubahan beban secara mendadak. Perubahan beban secara mendadak menyebabkan terjadinya penurunan maupun peningkatan nilai frekuensi disekitar titik operasinya. Dengan menggunakan metoda H~ pendekatan *mixed sensitivity* dilakukan analisa tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali tenaga listrik. Analisa yang dilakukan meliputi analisa performansi dalam domain waktu, analisa performansi dalam domain frekuensi, analisa kestabilan dan analisa kekokohan berdasarkan kriteria perancangan yang telah ditetapkan. Untuk analisa performansi dalam domain waktu meliputi analisa kesalahan dan analisa peralihan. Untuk analisa kesalahan diperoleh nilai sebesar 0.0478. Untuk analisa peralihan diperoleh waktu naik sebesar 0.0978 detik, waktu keadaan mantap sebesar 1.9500 detik, waktu puncak sebesar 0.1985 detik dan lewatan maksimum sebesar 3.7220 %. Untuk analisa performansi dalam domain frekuensi terdiri dari performansi lingkaran terbuka dan performansi lingkaran tertutup. Untuk performansi lingkaran terbuka ditunjukkan dengan nilai margin penguatan sebesar 13.3149 (22.4868 dB) dan untuk performansi lingkaran tertutup ditunjukkan oleh lebar pita dengan nilai 20.6000 rad/detik. Untuk analisa kestabilan dilakukan dengan menggunakan persamaan karakteristik dan tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali tenaga listrik bersifat stabil. Untuk analisa kekokohan dilakukan dengan kriteria puncak maksimum yang terdiri dari nilai puncak maksimum sensitivitas dengan nilai sebesar 1.0042 dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer dengan nilai sebesar 0.0526.

Kata kunci : kendali frekuensi, metoda H~, performansi, kestabilan, kekokohan

ABSTRACT

This journal discusses the analysis of the electric power system frequency control with H~ method to mixed sensitivity approach. Power systems frequency control is the most influence electrical power subsystem on the power system both in normal condition and underfault condition. One of the most common disturbance of the power system is a sudden change in load. Sudden load change causes drop or enhancement in frequency value around the center of operation. By using H~ method to mixed sensitivity approach was conducted the deviation response of power system frequency control analysis. Analysis was conducted on the performance analysis in the time and frequency domain, the stability and robustness analysis based on predetermined design criteria. For performance analysis in time domain which includes error and transition analysis. For error analysis was obtained value of 0.0478. For transition analysis was obtained 0.0978 seconds in rise time, 1.9500 seconds in settling time, 0.1985 seconds in peak time and 3.7220% in maximum overshoot. For performance analysis in the frequency domain consists of open and closed loop performance. For open-loop performance was indicated 13.3149 (22.4868 dB) in gain margin and closed-loop performance indicated 20.6000 rad/sec in bandwidth. For the stability analysis performed was using characteristic equation then the deviation response of power system frequency control is stable. For the robustness analysis was done by the maximum peak criterion consisting of 1.0042 in sensitivity maximum peak value and 0.0526 in maximum peak value of complementary sensitivity.

Key Words: load frequency control, H~ Methods, performance, robustness, stability

PENDAHULUAN

Indikator deviasi frekuensi sistem tenaga listrik dalam kondisi normal maupun gangguan ditunjukkan oleh performansi tanggapan deviasi frekuensi dalam domain waktu dan frekuensi, kestabilan dan kekokohan. Salah satu gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik adalah perubahan beban secara mendadak. Perubahan beban secara mendadak menyebabkan terjadinya penurunan maupun peningkatan nilai frekuensi disekitar titik operasinya. Penurunan maupun peningkatan nilai frekuensi ini menyebabkan timbulnya tanggapan deviasi frekuensi yang berubah - ubah pada sistem tenaga listrik tersebut. Usaha untuk memperbaiki tanggapan deviasi frekuensi pada sistem tenaga listrik akibat perubahan beban sudah dilakukan dengan berbagai metoda diantaranya metoda logika fuzzy dan kendali konvensional dengan pengendali Integral (Shah, Chafekar, Mehta, & Suthar, 2012). Penelitian ini membahas tentang performansi tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali tenaga listrik dalam domain waktu. Metoda Linear Quadratic Regulator (LQR) (Parmar, S. , & D.P, 2012). Penelitian ini membahas tentang performansi tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali tenaga listrik dalam domain waktu saja. Dengan pengendali Integral (I), pengendali Proporsional Integral (PI) dan pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) (Ikhe & Anant, 2013). Jurnal ini membahas tentang performansi tanggapan deviasi frekuensi sistem tenaga listrik dalam domain waktu.

Berdasarkan kajian – kajian yang sudah dilakukan sebelumnya terlihat bahwa pembahasan tanggapan deviasi frekuensi pada umumnya difokuskan pada performansi dalam domain waktu yang meliputi analisa kesalahan dan analisa peralihan. Untuk itu dalam penelitian ini dilakukan analisa tanggapan deviasi frekuensi dalam domain waktu dan domain frekuensi, analisa kestabilan dan analisa kekokohan dengan menggunakan metoda H_{∞} dengan pendekatan *Mixed Sensitivity*. Alasan menggunakan metoda H_{∞} ini bahwasanya metoda H_{∞} mampu membuat sistem yang akan dikendalikan bersifat kokoh terhadap gangguan,

mampu meredam derau pada frekuensi tinggi dan mempunyai tanggapan yang cepat terhadap masukan tertentu.

Selain itu dengan penelitian ini diharapkan nantinya diperoleh informasi performansi dalam domain waktu dan domain frekuensi, kestabilan dan kekokohan dari tanggapan deviasi dari sistem kendali frekuensi tenaga listrik. Agar tercapai hasil penelitian yang diinginkan maka penelitian ini dibatasi sebagai berikut

1. Model sistem kendali frekuensi tenaga listrik
2. bersifat linier, tak berubah terhadap waktu dan kontinu.
3. Sistem kendali frekuensi tenaga listrik bersifat satu masukan dan satu keluaran
4. Analisa dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Matlab

BAHAN DAN METODE

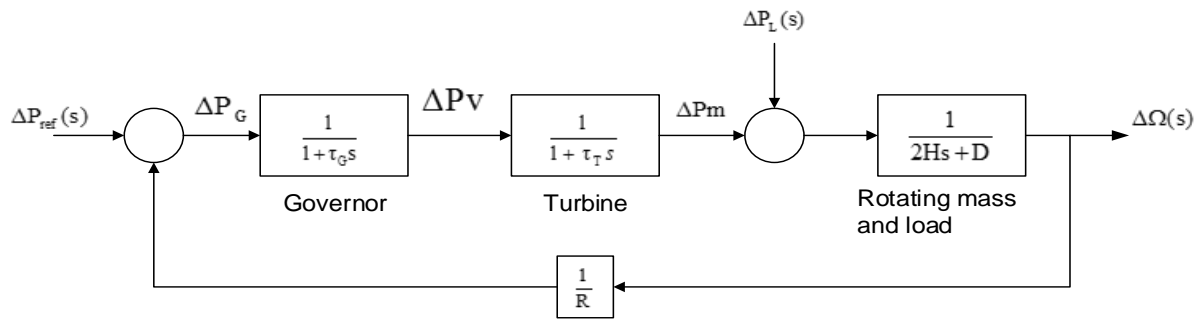
Pada bagian ini dijelaskan tentang diagram blok dari sistem kendali deviasi

frekuensi tenaga listrik, data – data parameter dari sistem kendali deviasi frekuensi tenaga listrik, fungsi alih lingkaran terbuka sistem kendali deviasi frekuensi tenaga listrik, fungsi alih lingkaran tertutup sistem kendali deviasi frekuensi tenaga listrik, metoda H_{∞} , fungsi bobot W_1 , fungsi bobot W_2 , fungsi bobot W_3 , kriteria perancangan dan langkah – langkah penelitian.

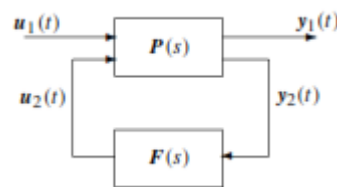
Untuk diagram blok dari sistem kendali deviasi frekuensi tenaga listrik diperlihatkan pada Gambar 1. Untuk data – data parameter dari sistem kendali deviasi frekuensi tenaga listrik diperlihatkan pada Tabel 1. berikut (Saadat, 1999).

Tabel 1. Data – Data Parameter Sistem Kendali Deviasi Frekuensi Tenaga Listrik

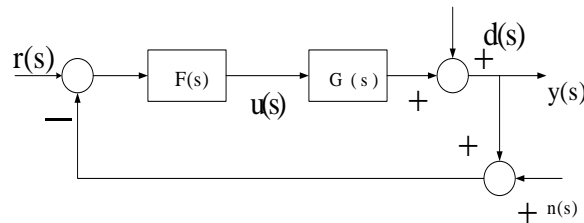
Parameter	Nilai
H	5.0000
τ_T	0.5000
τ_G	0.2000
R	0.0500
D	0.8000
f	60.0000



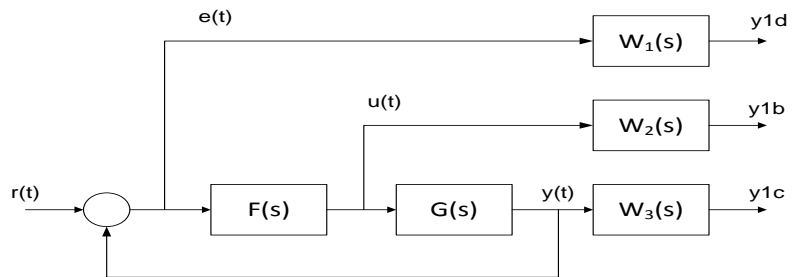
Gambar 1. Diagram Blok Sistem Kendali Deviasi Frekuensi Sistem Tenaga Listrik (Saadat, 1999)



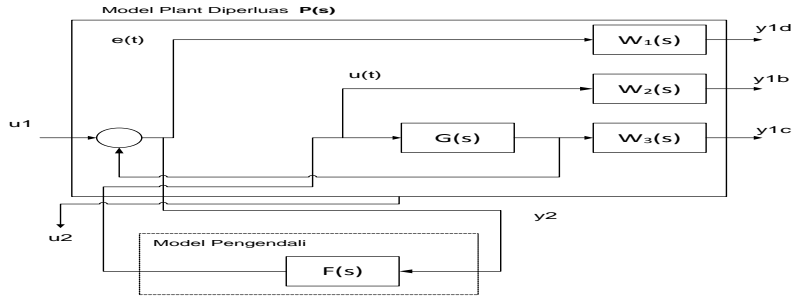
Gambar 2. Struktur Sistem Kendali Kokoh (Xue, Chen, & Atherton, 2007)



Gambar 3. Diagram Blok Standard Sistem Kendali (Skogestad & Postlethwaite, 1996)



Gambar 4. Diagram Blok Loop Shaping (Xue, Chen, & Atherton, 2007)



Gambar 5. Diagram Blok 2 Gerbang Dengan Fungsi Bobot (Xue, Chen , & Atherton , 2007)

Untuk penjelasan masing – masing blok pada Gambar 1. bisa dilihat pada (Saadat, 1999). Untuk fungsi alih lingkaran terbuka dari sistem kendali deviasifrekuensi tenaga listrik diperlihatkan pada persamaan 1. berikut

$$G(s)H(s) = \frac{1}{R} \frac{1}{(2Hs + D)(1 + \tau_g s)(1 + \tau_T s)} \quad (1)$$

Untuk fungsi alih lingkaran terbuka dari sistem kendali deviasi frekuensi tenaga listrik diperlihatkan pada persamaan 2. berikut

$$\frac{\Delta\Omega(s)}{-\Delta P_L(s)} = \frac{(1 + \tau_g s)(1 + \tau_T s)}{(2Hs + D)(1 + \tau_g s)(1 + \tau_T s) + \frac{1}{R}} \quad (2)$$

Dengan mensubstitusi nilai – nilai pada Tabel 1. ke persamaan (1) dan (2) diperoleh persamaan (3) dan persamaan (4) berikut

$$G(s)H(s) = \frac{1}{0.0500s^3 + 0.3540s^2 + 0.5280s + 0.0400} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta\Omega(s)}{-\Delta P_L(s)} = \frac{0.0050s^2 + 0.0350s + 0.0500}{0.0500s^3 + 0.3540s^2 + 0.5280s + 1.0400} \quad (4)$$

Metoda H~ merupakan bagian dari sistem kendali kokoh. Sistem kendali kokoh inidideskripsikan pada Gambar 2. Dimana P(s) adalah model *plant* yang diperluas dan F(s) adalah model pengendali. Fungsi alih yang merepresentasikan keluaran $y_1(t)$ dan masukan $u_1(t)$ dinotasikan dengan $T_{y_1u_1}(s)$. Untuk P(s) pada Gambar 2. dinyatakan dengan persamaan (5) berikut

$$P = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Berdasarkan persamaan (5) diperoleh persamaan keadaan yang diperluas yang dinyatakan oleh persamaan (6) dan (7) berikut

$$\dot{x} = Ax + [B_1 \ B_2] \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Berdasarkan persamaan (5), (6) dan (7) serta berbagai manipulasi matematis diperoleh persamaan (8) berikut

$$T_{y_1u_1}(s) = P_{11}(s) + P_{12}(s)[I - F(s)P_{22}(s)]^{-1}F(s)P_{21}(s) \quad (8)$$

Bentuk persamaan (8) dikenal sebagai bentuk *Linear Fractional Transformation* (LFT). Adapun tujuan dari sistem kendali kokoh adalah untuk memperoleh pengendali F(s) sehingga diperoleh persamaan (9) berikut

$$\|T_{y_1u_1}(s)\|_{\infty} < 1 \quad (9)$$

Metoda kendali H_{∞} adalah metoda perancangan pengendali yang berbasis optimasi dan 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 H~ mengizinkan perancang untuk mengkombinasikan pencapaian level tertentu dari sensitivitas S(s) dan sensitivitas komplementer T(s). Sensitivitas S(s) dan sensitivitas komplementer T(s) merupakan

parameter yang menunjukkan kinerja suatu sistem dan memegang peranan penting dalam menentukan karakteristik tanggapan kendali. Sensitivitas suatu sistem menunjukkan karakteristik tanggapan terhadap peredaman gangguan yang ada di dalam sistem tersebut sedangkan sensitivitas komplementer menunjukkan kecepatan tanggapan terhadap sinyal kendali, sifat peredaman noise sistem dan kualitas stabilitas sistem terhadap ketidakpastian. Jika sistem dinamik dinyatakan sebagai $G(s)$ dan sistem kendali dinyatakan sebagai $F(s)$ maka sistem lingkaran tertutup dapat dinyatakan dalam bentuk diagram blok pada Gambar 3. Berdasarkan Gambar 3, dapat diturunkan fungsi alih sensitivitas $S(s)$ dan fungsi alih sensitivitas komplementer $T(s)$ yang dinyatakan dalam bentuk persamaan (10) dan (11) berikut

$$S(s) = \frac{1}{1 + G(s)F(s)} \quad (11)$$

$$T(s) = \frac{G(s)F(s)}{1 + G(s)F(s)} \quad (12)$$

Hubungan antara sensitivitas (*sensitivity*) $S(s)$ dan sensitivitas komplementer (*complementary sensitivity*) $T(s)$ dinyatakan dengan persamaan (13) berikut

$$S(s) + T(s) = 1 \quad (13)$$

Selain itu perancangan pengendali dengan metoda H_∞ dilakukan dengan pendekatan *Mixed - Sensitivity* (Skogestad & Postlethwaite, 1996). Dalam perancangan pengendali dengan pendekatan *Mixed - Sensitivity* karakteristik sistem dapat ditentukan dengan menentukan batas spesifikasi antara fungsi sensitivitas $S(s)$ dan fungsi sensitivitas komplementer $T(s)$. Hal ini dapat dilakukan dengan menambah kompensator dalam sistem untuk membentuk fungsi $S(s)$ dan $T(s)$. Dalam Gambar 4, terlihat bahwa blok $W_1(s)$ diletakkan di keluaran sistem yang berkaitan dengan masukan $e(s)$ yang merupakan representasi fungsi sensitivitas

$S(s)$. Blok $W_2(s)$ diletakkan pada keluaran sistem yang berkaitan dengan masukan $u(s)$ dan Blok $W_3(s)$ diletakkan pada keluaran $y(t)$ yang merupakan representasi fungsi sensitivitas komplementer $T(s)$. Dalam perancangan pengendali dengan metoda H_∞ dengan pendekatan *General Mixed Sensitivity*, fungsi bobot $W_1(s)$ dan $W_3(s)$ digunakan untuk membatasi fungsi sensitivitas $S(s)$ dan sensitivitas komplementer $T(s)$. Selain itu diagram blok pada Gambar 4, diubah menjadi bentuk diagram blok pada Gambar 5, serta diperoleh persamaan (14) untuk model *plant* yang diperluas sebagai berikut

$$P(s) = \begin{bmatrix} W_1 & -W_1G \\ 0 & W_2 \\ 0 & W_3G \\ I & -G \end{bmatrix} \quad (14)$$

dan diperoleh persamaan (15) untuk metoda H_∞ berikut

$$T_{y,u_i} = \begin{bmatrix} W_1S \\ W_2FS \\ W_3T \end{bmatrix} \quad (15)$$

Untuk fungsi bobot $W_1(s)$ dinyatakan dengan persamaan (16) berikut

$$W_1 = \frac{0.1000s + 0.1380}{2.0000s + 0.10000} \quad (16)$$

Untuk fungsi bobot $W_2(s)$ dinyatakan dengan persamaan (17) berikut

$$W_2 = \frac{0.0010(0.0100s + 0.9000)}{0.1000s + 0.10000} \quad (17)$$

Untuk fungsi bobot $W_3(s)$ dinyatakan dengan persamaan (18) berikut

$$W_3 = \frac{0.0010(0.0100s + 0.9000)}{0.1000s + 0.10000} \quad (18)$$

Untuk kriteria perancangan sistem kendali deviasi frekuensi sistem tenaga listrik terdiri dari kriteria perancangan dalam domain waktu dan kriteria perancangan dalam domain frekuensi. Untuk kriteria perancangan dalam domain waktu sebagai berikut

1. Kesalahan keadaan mantap kurang dari 5 %.

2. Waktu naik kurang dari 0.1000 detik
3. Waktu keadaan mantap kurang dari 2.000 detik
4. Lewatan maksimum kurang dari 10.0000 %
5. Waktu puncak kurang dari 0.5000 detik

Untuk kriteria perancangan dalam domain frekuensi sebagai berikut

1. Margin penguatan besar dari 6 dB
2. Lebar pita yang lebih besar.
3. Sistem kendali deviasi frekuensi tenaga listrik bersifat stabil dan kokoh terhadap gangguan, mampu meredam derau pada frekuensi dan mempunyai tanggapan yang cepat terhadap masukan

Adapun prosedur penerapan metoda H~ untuk analisa tanggapan deviasi frekuensi sistem tenaga listrik sebagai berikut

Tentukan fungsi alih objek kendali nominal dari sistem kendali deviasi frekuensi tenaga listrik. Adapun fungsi alih objek kendali ini terdiri dari fungsi alih lingkaran terbuka dan fungsi alih lingkaran tertutup dari sistem kendali deviasi frekuensi sistem tenaga listrik. Untuk fungsi alih lingkaran terbuka dinyatakan dalam bentuk persamaan (1) dan fungsi alih lingkaran tertutup dinyatakan dalam bentuk persamaan (2). Selain itu dengan menggunakan data – data parameter pada Tabel 1. disubstitusikan ke persamaan (1) dan (2) diperoleh fungsi alih lingkaran terbuka dan fungsi alih lingkaran tertutup dalam bentuk persamaan (3) dan (4). Setelah fungsi alih objek kendali nominal dari sistem kendali deviasi frekuensi tenaga listrik ditentukan maka dilakukan analisa performansi dalam domain waktu, analisa performansi dalam domain frekuensi, analisa kestabilan dan analisa kekokohan dari sistem kendali deviasi frekuensi tenaga listrik.

Untuk analisa performansi dalam domain waktu terdiri dari analisa kesalahan dan analisa peralihan. Untuk analisa kesalahan ditunjukkan oleh besarnya kesalahan keadaan mantap dari tanggapan deviasi frekuensi tenaga listrik dalam keadaan mantap dan analisa peralihan ditunjukkan oleh waktu naik, waktu keadaan mantap, waktu puncak, nilai puncak dan lewatan maksimum dari tanggapan deviasi frekuensi tenaga listrik dalam keadaan peralihan. Untuk analisa performansi dalam

domain frekuensi terdiri dari analisa performansi lingkaran terbuka dan analisa performansi lingkaran tertutup. Untuk analisa performansi lingkaran terbuka ditunjukkan oleh margin penguatan, frekuensi margin penguatan, margin fasa dan frekuensi margin fasa. Untuk performansi lingkaran tertutup ditunjukkan oleh lebar pita, nilai puncak resonansi dan frekuensi puncak resonansi. Untuk analisa kestabilan sistem kendali deviasi frekuensi tenaga listrik dilakukan dengan menggunakan akar – akar persamaan karakteristik. Untuk analisa kekokohan dilakukan dengan menggunakan kriteria puncak maksimum. Kriteria puncak maksimum ini terbagi atas 2 bahagian yaitu nilai puncak maksimum sensitivitas dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer. Untuk sistem yang bersifat stabil nilai kriteria puncak sensitivitas bernilai kurang dari 2 dan nilai kriteria puncak sensitivitas komplementer kurang dari 1.25.

Penentuan fungsi bobot W_1 , W_2 dan W_3 .

Penentuan fungsi bobot dilakukan secara coba – coba dan diperlihatkan pada persamaan (16), (17) dan (18). Pembentukan matrik fungsi alih objek kendali yang diperluas yang terdiri atas objek kendali $G(s)$ dan pembatas perancangan yang diekspresikan dalam bentuk fungsi bobot W_1 , W_2 dan W_3 . Matrik fungsi alih objek kendali yang diperluas ini dinyatakan dalam bentuk persamaan (14). Tentukan pengendali 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. Penentuan pengendali ini berdasarkan kriteria perancangan yang telah ditetapkan pada bagian sebelumnya. Setelah itu dibentuk fungsi alih lingkaran terbuka dengan pengendali dan fungsi alih lingkaran tertutup dengan pengendali dan dilanjutkan dengan analisa sistem kendali deviasi frekuensi tenaga listrik. Analisa yang dilakukan sama dengan analisa tanpa pengendali.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan diperlihatkan hasil simulasi tanggapan deviasi frekuensi tanpa dan dengan metoda H ∞ . Untuk hasil simulasi tanggapan deviasi frekuensi tanpa metoda H ∞ terdiri dari analisa kesalahan, analisa peralihan, analisa performansi dalam domain frekuensi, analisa kestabilan dan analisa kekokohan. Untuk analisa kesalahan dalam keadaan mantap diperlihatkan pada Tabel 2. berikut

Tabel 2. Informasi Analisa Kesalahan

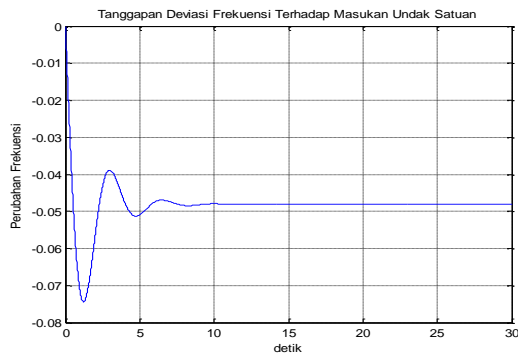
Kriteria	Nilai
Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Undak Satuan	0.0481

Untuk analisa peralihan diperlihatkan pada Tabel 3. berikut

Tabel 3. Informasi Analisa Peralihan

Kriteria	Nilai
Waktu Naik (detik)	0.4135
Waktu Keadaan Mantap (detik)	6.8143
Lewatan Maksimum (Persen)	54.7868
Nilai Puncak	0.0744
Waktu Puncak (detik)	1.2345

Tanggapan deviasi frekuensi tanpa metoda H ∞ terhadap masukan undak satuan diperlihatkan pada Gambar 6 berikut



Gambar 6. Tanggapan Deviasi Frekuensi

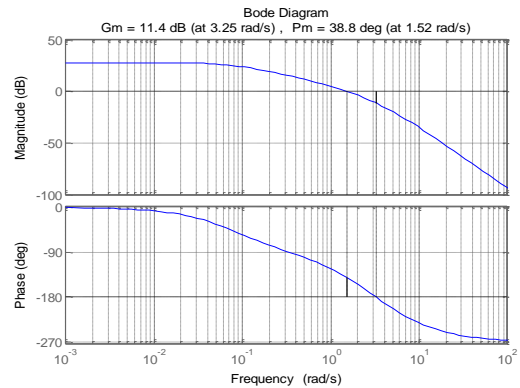
Untuk hasil simulasi dalam domain frekuensi terdiri dari performansi lingkaran terbuka dan performansi lingkaran tertutup. Untuk performansi lingkaran terbuka diperlihatkan pada Tabel 4. berikut

Tabel 4. Performansi Lingkaran Terbuka Dalam Domain Frekuensi

Kriteria	Nilai
----------	-------

Margin Penguatan	3.6986
Frekuensi Margin Penguatan (rad/detik)	3.2498
Margin Fasa (derjat)	38.8412
Frekuensi Margin Fasa (rad/detik)	1.5209

Diagram Bode deviasi frekuensi tanpa metoda H ∞ diperlihatkan pada Gambar 7. berikut



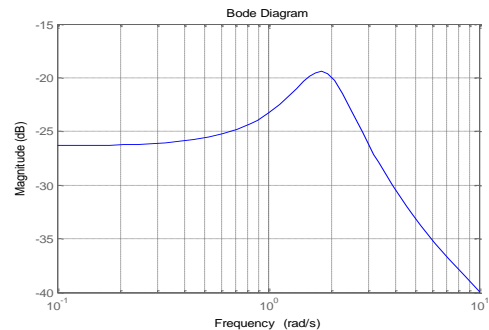
Gambar 7. Diagram Bode Deviasi Frekuensi

Untuk performansi lingkaran tertutup diperlihatkan pada Tabel 5. Berikut

Tabel 5. Performansi Lingkaran Tertutup Dalam Domain Frekuensi

Kriteria	Nilai
Lebar Pita (rad/detik)	3.6900
Nilai Puncak Resonansi	0.1070
Frekuensi Puncak Resonansi (rad/detik)	1.7500

Diagram Magnitude Bode deviasi frekuensi tanpa metoda H ∞ diperlihatkan pada Gambar 8. berikut



Gambar 8. Diagram Magnitude Bode Deviasi Frekuensi

Untuk analisa kestabilan dilakukan dengan menggunakan akar - akar persamaan

karakteristik. Adapun akar – akar persamaan karakteristik dari sistem kendali deviasi frekuensi tenaga listrik tanpa metoda H~ diperlihatkan pada Tabel 6. berikut

Tabel 6. Akar – Akar Persamaan Karakteristik

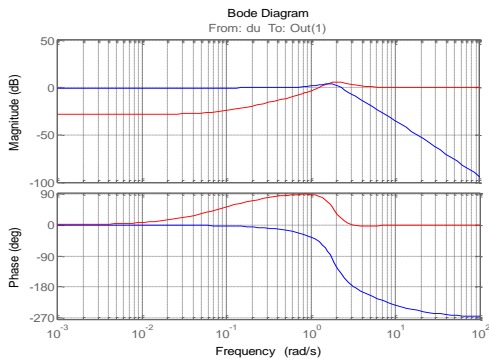
Akar – Akar	Redaman	Frekuensi (rad/detik)
$-0.5970 + j1.7800$	0.3180	1.8800
$-0.5970 - j1.7800$	0.3180	1.8800
-5.8900	1.0000	5.8900

Untuk analisa kekokohan dilakukan dengan menggunakan kriteria puncak maksimum. Kriteria puncak maksimum ini terbagi atas 2 bahagian yaitu nilai puncak maksimum sensitivitas dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer. Adapun nilai puncak maksimum diperlihatkan pada Tabel 7. Berikut

Tabel 7. Nilai Puncak Maksimum

Kriteria	Nilai
Nilai Puncak Maksimum Sensitivitas	1.0010
Nilai Puncak Maksimum Sensitivitas Komplementer	0.1072

Adapun grafik tanggapan sensitivitas dan tanggapan sensitivitas komplementer dari deviasi frekuensi tenaga listrik tanpa metoda H~ diperlihatkan pada Gambar 9. berikut



Gambar 9. Diagram Sensitivitas dan Sensitivitas Komplementer

Untuk hasil simulasi tanggapan deviasi frekuensi dengan metoda H~ terdiri dari analisa kesalahan, analisa peralihan, analisa performansi dalam domain frekuensi, analisa kestabilan dan analisa kekokohan. Untuk analisa kesalahan dalam keadaan mantap diperlihatkan pada Tabel 8. berikut.

Tabel 8. Informasi Analisa Kesalahan

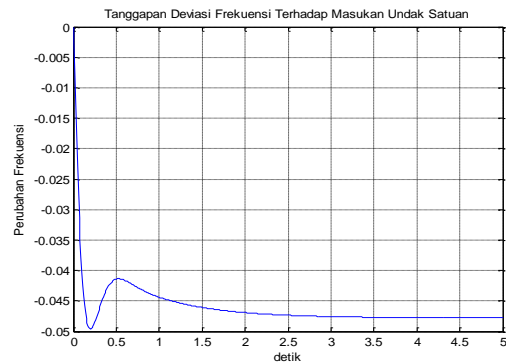
Kriteria	Nilai
Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Undak Satuan	0.0478

Untuk analisa peralihan diperlihatkan pada Tabel 9. berikut

Tabel 9. Informasi Analisa Peralihan

Kriteria	Nilai
Waktu Naik (detik)	0.0978
Waktu Keadaan Mantap (detik)	1.9500
Lewatan Maksimum (persen)	3.7220
Nilai Puncak	0.0496
Waktu Puncak (detik)	0.1985

Tanggapan deviasi frekuensi dengan metoda H~ terhadap masukan undak satuan diperlihatkan pada Gambar 10. berikut



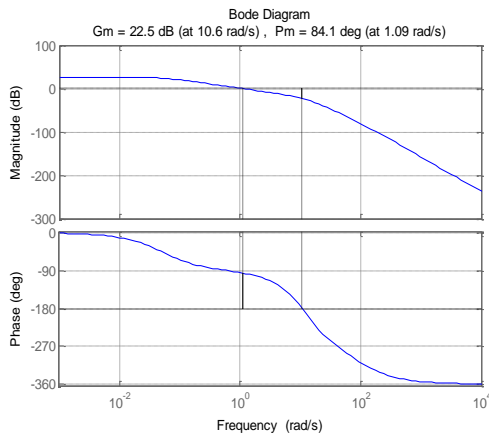
Gambar 10. Tanggapan Deviasi Frekuensi

Untuk hasil simulasi dalam domain frekuensi terdiri dari performansi lingkaran terbuka dan performansi lingkaran tertutup. Untuk performansi lingkaran terbuka diperlihatkan pada Tabel 10. berikut

Tabel 10. Performansi Lingkaran Terbuka Dalam Domain Frekuensi

Kriteria	Nilai
Margin Penguatan	13.3149
Frekuensi Margin Penguatan (rad/detik)	10.6418
Margin Fasa (derjat)	84.0727
Frekuensi Margin Fasa (rad/detik)	1.0927

Selain itu performansi lingkaran terbuka deviasi frekuensi dengan metoda H~ juga diperlihatkan dengan diagram Bode yang diperlihatkan pada Gambar 11. berikut



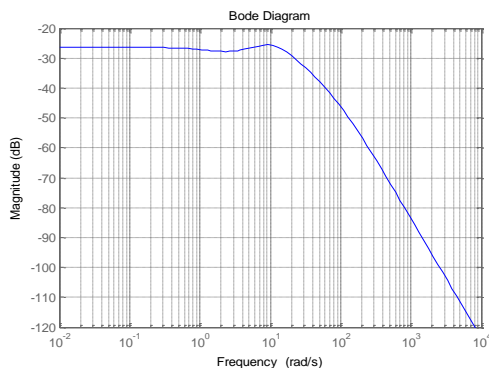
Gambar 11. Diagram Bode Deviasi Frekuensi

Untuk performansi lingkaran tertutup diperlihatkan pada Tabel 11. Berikut

Tabel 11. Performansi Lingkaran Tertutup Dalam Domain Frekuensi

Kriteria	Nilai
Lebar Pita (rad/detik)	20.6000
Nilai Puncak Resonansi	0.0526
Frekuensi Puncak Resonansi (rad/detik)	9.1300

Selain itu performansi lingkaran tertutup deviasi frekuensi dengan metoda H_{∞} juga diperlihatkan dengan diagram Magnitude Bode yang diperlihatkan pada Gambar 12. berikut



Gambar 12. Diagram Magnitude Bode Deviasi Frekuensi

Untuk analisa kestabilan dilakukan dengan menggunakan akar – akar persamaan karakteristik. Adapun akar – akar persamaan karakteristik dari sistem kendali deviasi frekuensi tenaga listrik dengan metoda H_{∞} diperlihatkan pada Tabel 12. berikut

Tabel 12. Akar – Akar Persamaan Karakteristik

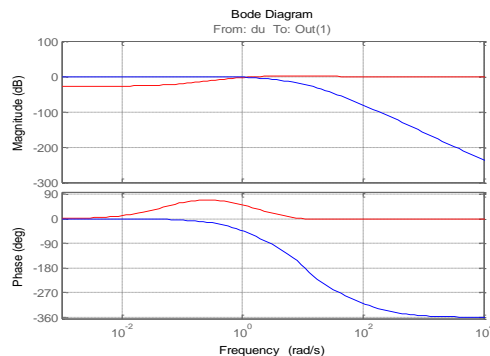
Akar – Akar	Redaman	Frekuensi (rad/detik)
-0.0800	1.0000	0.0800
-0.9860	1.0000	0.9860
-1.0000	1.0000	1.0000
-1.4000	1.0000	1.4000
-2.0000	1.0000	2.0000
-5.0000	1.0000	5.0000
$-7.8600 + j7.0400$	0.7450	10.6000
$-7.8600 - j7.0400$	0.7450	10.6000
-90.0000	1.0000	90.0000

Untuk analisa kekokohan dilakukan dengan menggunakan kriteria puncak maksimum. Kriteria puncak maksimum ini terbagi atas 2 bahagian yaitu nilai puncak maksimum sensitivitas dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer. Adapun nilai puncak maksimum diperlihatkan pada Tabel 13. Berikut

Tabel 13. Nilai Puncak Maksimum

Kriteria	Nilai
Nilai Puncak Maksimum Sensitivitas	1.0042
Nilai Puncak Maksimum Sensitivitas Komplementer	0.0526

Adapun grafik tanggapan sensitivitas dan tanggapan sensitivitas komplementer dari deviasi frekuensi tenaga listrik dengan metoda H_{∞} diperlihatkan pada Gambar 13. berikut



Gambar 13. Diagram Sensitivitas dan Sensitivitas Komplementer

Pada bagian ini dilakukan analisa tanggapan deviasi frekuensi tanpa dan dengan metoda H_{∞} . Analisa tanggapan deviasi yang dilakukan meliputi analisa kesalahan, analisa peralihan,

analisa performansi lingkaran terbuka dalam domain frekuensi, analisa performansi lingkaran tertutup dalam domain frekuensi, analisa kestabilan dan analisa kekokohan. Untuk analisa kesalahan tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali tenaga listrik sudah memenuhi kriteria perancangan dimana nilai kesalahan keadaan mantap dengan metoda $H\sim$ bernilai 0.0478 sedangkan kriteria perancangan yang diinginkan kurang dari 0.0500. Menurut (Nise, 2004), tanggapan sistem kendali yang baik jika mempunyai nilai kesalahan keadaan mantap yang kecil. Hasil analisa untuk tanggapan deviasi frekuensi tenaga listrik mempunyai tanggapan yang baik dengan nilai kesalahan keadaan mantap yang kecil.

Untuk analisa peralihan tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali tenaga listrik dengan metoda $H\sim$ sudah memenuhi kriteria perancangan dimana untuk waktu naik berubah dari 0.4135 detik menjadi 0.0978 detik sedangkan menurut kriteria perancangan, waktu naik yang diinginkan kurang dari 0.1000 detik. Untuk waktu keadaan mantap berubah dari 6.8143 detik menjadi 1.9500 detik dan menurut kriteria perancangan, waktu keadaan mantap yang diinginkan kurang dari 2.0000 detik. Untuk waktu puncak berubah dari 1.2345 detik menjadi 0.1985 detik dimana menurut kriteria perancangan, waktu puncak yang diinginkan kurang dari 0.5000 detik. Selain itu menurut kriteria perancangan, lewatan maksimum yang diinginkan kurang dari 10.0000 % dan lewatan maksimum yang diperoleh berubah dari 54.7868 % menjadi 3.7220 %. Selain itu menurut (Skogestad & Postlethwaite, 1996), tanggapan sistem kendali mempunyai kecepatan dan kualitas tanggapan yang baik jika waktu naik, waktu keadaan mantap dan waktu puncak mempunyai nilai yang kecil untuk kecepatan tanggapan dan lewatan maksimum kurang dari 20.0000 % untuk kualitas tanggapan. Berdasarkan informasi yang diperoleh maka tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali tenaga listrik mempunyai kecepatan dan kualitas tanggapan yang baik.

Untuk analisa performansi dalam domain frekuensi terdiri atas performansi lingkaran terbuka dan performansi lingkaran tertutup.

Analisa performansi dalam domain frekuensi tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali tenaga listrik sudah menunjukkan performansi lingkaran terbuka dan lingkaran tertutup yang sesuai dengan kriteria perancangan dimana nilai margin penguatan mengalami peningkatan nilai dari 3.6986 (11.3607 dB) menjadi 13.3149 (22.4868 dB) dan lebar pita mengalami perubahan nilai dari 3.6900 rad/detik menjadi 20.6000 rad/detik. Menurut (Ogata, 1996), bahwa tanggapan sistem kendali dalam domain frekuensi akan memiliki performansi lingkaran terbuka yang baik jika margin penguatan besar dari 6 dB dan menurut (Kuo, 1983), tanggapan sistem kendali memiliki performansi lingkaran tertutup yang baik jika memiliki nilai lebar pita yang lebih besar.

Untuk analisa kestabilan, tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali tenaga listrik bersifat stabil tanpa dan dengan metoda $H\sim$ dimana akar – akar dari persamaan karakteristik tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali tenaga listrik mempunyai bagian nyata yang bernilai negatif. Menurut (Ajit K Mandal, 2006) Dengan metoda Lyapunov pertama dapat ditentukan kestabilan sistem kendali dengan cara melihat apakah bagian nyata dari akar-akar persamaan karakteristik bernilai negatif, kalau bagian nyata dari akar-akar persamaan karakteristik bernilai negatif maka sistem bersifat stabil begitu pula sebaliknya.

Untuk analisa kekokohan, tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali tenaga listrik tanpa dan dengan metoda $H\sim$ bersifat kokoh terhadap gangguan, mampu meredam derau pada frekuensi tinggi dan mempunyai tanggapan yang cepat terhadap masukan tertentu. Untuk tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali tenaga listrik tanpa metoda $H\sim$ diperoleh nilai puncak maksimum sensitivitas sebesar 1.0010 dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer sebesar 0.1072 sedangkan untuk tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali tenaga listrik dengan metoda $H\sim$ diperoleh nilai puncak maksimum sensitivitas sebesar 1.0042 dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer sebesar 0.0526. Menurut (Skogestad & Postlethwaite, 1996), tanggapan sistem kendali akan bersifat kokoh

terhadap gangguan, mampu meredam derau pada frekuensi dan mempunyai tanggapan yang cepat terhadap masukan tertentu jika nilai maksimum sensitivitas kurang dari 2.00 dan nilai maksimum sensitivitas komplementer kurang dari 1.25.

KESIMPULAN

Adapun kesimpulan dari pembahasan diatas adalah Perancangan pengendali untuk sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan metoda H \sim sudah memenuhi kriteria perancangan yang telah ditetapkan baik untuk domain waktu maupun untuk domain frekuensi.

Sebagai tindak lanjut dalam penelitian diantaranya pertama, pengaruh ketidakpastian sebaiknya dimasukkan dalam analisa sistem kendali frekuensi tenaga listrik. Kedua, Penerapan metoda H \sim ini sebaiknya diterapkan juga pada sistem yang bersifat banyak masukan banyak keluaran.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Andalas yang telah memfasilitasi penelitian sehingga dihasilkan jurnal ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajit K Mandal . (2006). *Introduction To Control Engineering* . India : New Age International.
- Ikhe, A., & Anand, K. (2013). "Load Frequency Control For Interconnected Power System Using Different Controllers" , *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*,1(4), 85 - 89.
- Kuo, B. C. (1983). *Automatic Control Systems* . New Delhi : Prentice Hall.
- Nise, N. S. (2004). *Control System Engineering* . Ottawa: John Wiley and Sons.
- Ogata, K. (1996). *Teknik Kontrol Automatik* . Jakarta : Penerbit Erlangga .

- Parmar, K. Singh., S. Majhi., & D. Kothari. (2012). "Improvement of Dynamic Performance of LFC of The Two Area Power System : An Analysis Using Matlab" *International Journal of Computer Applications*, 40(10), 28 - 32.

- Saadat, H. (1999). *Power System Analysis*. New York: McGraw Hill.

- Shah, N. N., Chafekar, A. D., Mehta, D. N., & Suthar , A. R. (2012). "Automatic Load Frequency Control of Two Area Power System With Conventional dan Fuzzy Logic Control " . *IJRET*, 1(3), 343 - 347.

- Skogestad, S., & Postlethwaite, I. (1996). *Multivariable Feedback Control Analysis and Design* . New York : McGraw Hill.

- Xue, D., Chen , Y. Q., & Atherton , D. P. (2007). *Linear Feedback Control : Analysis and Design With Matlab* . Philadelphia : SIAM.