

EVALUASI POLA TINGKAH LAKU TEGANGAN SISTEM EKSTIASI GENERATOR DENGAN METODA PENEMPATAN KUTUB MENGGUNAKAN ALGORITMA BASS - GURA

Heru Dibyo Laksono, Noris Fredi Yulianto

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Andalas

Email : heru_dl@ft.unand.ac.id

Abstract - In power systems, the behavior patterns of excitation system voltage is very important to note because it can affect the voltage stability of the power system. Several previous studies showed performance behavior pattern generator excitation system voltage is less than satisfactory at the point of operation. Under these conditions, conducted a study of the patterns of behavior of dynamic voltage generator excitation system with pole placement method using the Bass-Gura algorithm. With the help of information obtained by Matlab software, that behavior pattern generator excitation system voltage indicates better performance compared to the performance of the behavior patterns of excitation system voltage without the pole placement method.

Abstrak - Dalam sistem tenaga listrik, pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi merupakan hal yang sangat penting untuk diperhatikan karena dapat mempengaruhi kestabilan tegangan sistem tenaga listrik. Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator yang kurang memuaskan pada titik operasinya. Berdasarkan kondisi tersebut, dilakukan suatu studi dinamik mengenai pola tingkah laku tegangan pada sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma Bass-Gura. Dengan bantuan perangkat lunak Matlab diperoleh informasi, bahwa pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator menunjukkan performansi yang lebih baik dibandingkan performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi tanpa metoda penempatan kutub.

Keywords: generator excitation systems, pole placement method, bass-Gura, performance

I. PENDAHULUAN

Sistem eksitasi adalah suatu peralatan yang bertugas menjaga pola tingkah laku tegangan dan daya reaktif generator agar tetap stabil pada nilai kerja yang diinginkan. Suatu kenaikan daya reaktif pada sisi beban akan mengakibatkan penurunan magnitude tegangan terminal. Penurunan magnitude tegangan terminal ini kemudian akan disensor oleh suatu potensial transformator. Selanjutnya tegangan terminal akan disearahkan dan dibandingkan dengan suatu titik nilai acuan. Pengatur sinyal kesalahan penguat akan mengatur tegangan eksitasi sehingga tegangan eksitasi generator akan meningkat. Jika tegangan eksitasi meningkat maka daya tegangan yang dibangkitkan oleh generator akan meningkat pula. Dalam sistem tenaga listrik, pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi merupakan hal yang sangat penting untuk diperhatikan karena dapat mempengaruhi kestabilan tegangan sistem tenaga listrik. Ketidakstabilan tegangan akan menyebabkan ketidakstabilan sistem tenaga

secara keseluruhan, terutama kualitas dan kemampuan pemindahan daya dari pembangkit ke konsumen, kondisi terparah terjadinya mekanisme *load shedding*. Dalam sistem interkoneksi skala besar, alat penstabil tegangan manual tidak pernah dipakai dan sebagai gantinya dipasang sebuah peralatan penstabil tegangan otomatis yang dinamakan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) disetiap generator. Faktor-faktor yang mempengaruhi pola tingkah laku tegangan antara lain kenaikan pembebanan saluran transmisi, gangguan pengaturan daya reaktif, dinamika OLTC (*on load tap changer*) trafo dan karakteristik beban. Pola tingkah laku tegangan sistem tenaga listrik ditentukan oleh pola tingkah laku tegangan yang dilakukan oleh sistem eksitasi yang terdapat dalam generator dan beberapa rangkaian pengendali lain yang terintegrasi satu sama lain. Beberapa penelitian yang sudah dilakukan yang berkaitan dengan pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi ini diantaranya pola tingkah laku tegangan sistem

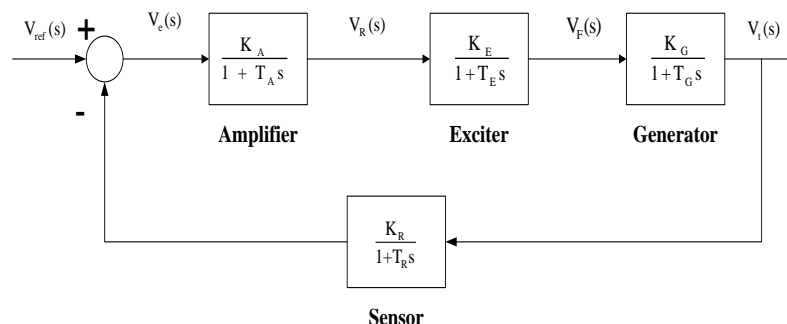
eksitasi dengan metoda Proporsional Integral Diferensial (PID)^{[1][2]}, metoda Fuzzy Logic^[1], metoda Algoritma genetika^[3] dan metoda H~^[4]. Pada beberapa penelitian yang sudah dilakukan tersebut, diperoleh informasi bahwa performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi dititik operasinya kurang begitu memuaskan.

Berdasarkan informasi yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya maka dilakukan analisa pola tingkah laku tegangan dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Bass-Gura* pada titik operasinya. Dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Bass-Gura* ini, pola tingkah laku tegangan dipastikan akan bersifat stabil karena lokasi akar-akar persamaan karakteristik diletakkan pada posisi yang stabil. Dengan demikian nantinya akan diperoleh informasi performansi, kestabilan dan kekokohan pola tingkah laku tegangan pada sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Bass-Gura* ini. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah

1. Sistem eksitasi generator yang akan dikendalikan adalah sistem yang bersifat linier, tak berubah waktu dan kontinu.
2. Sistem eksitasi generator bersifat satu masukan dan satu keluaran.
3. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat Matlab 7.1

II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai diagram blok sistem eksitasi generator dan metoda penempatan kutub berikut. Untuk model sistem eksitasi generator diperlihatkan pada Gambar 1. Adapun elemen-elemen sistem eksitasi generator dijelaskan pada [5].



Gambar 1. Model Sistem Eksitasi Generator^[5]

Selanjutnya berdasarkan Gambar 1. diperoleh fungsi alih lingkaran terbuka dan fungsi alih lingkaran tertutup sistem eksitasi generator. Untuk model sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub diperlihatkan pada Gambar 2. Penerapan metoda penempatan kutub didasarkan pada model keadaan sistem yang dinyatakan oleh persamaan (1) dan (2) berikut

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \tag{1}$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \tag{2}$$

masukan kendalian $u(t)$ adalah suatu fungsi keadaan dengan bentuk persamaan (3) berikut

$$u(t) = f[x(t)] \tag{3}$$

Persamaan (2) disebut hukum kendali. Dalam penerapan metoda penempatan kutub, hukum kendali dinyatakan oleh persamaan (4) berikut

$$u(t) = -Kx(t) \tag{4}$$

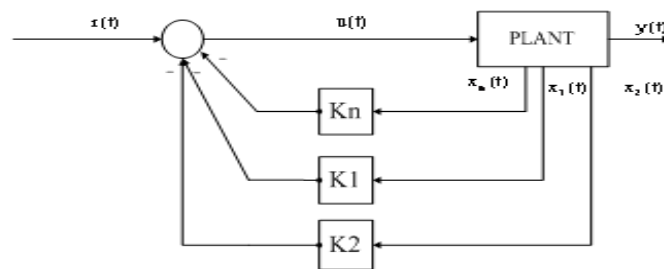
Dengan K adalah vektor penguatan konstan. Hukum kendali ini mengijinkan seluruh kutub sistem lingkaran tertutup untuk ditempatkan pada sembarang posisi yang dikehendaki. Aturan ini dinyatakan dengan persamaan (5) berikut

$$u(t) = -K_1x_1(t) - K_2x_2(t) - K_3x_3(t) \dots K_nx_n(t) \tag{5}$$

Berdasarkan persamaan (5) terlihat bahwa sinyal yang diumpanbalik pada masukan kendalian merupakan suatu penjumlahan terbatas dari seluruh keadaan sistem tersebut. Selain itu dengan mensubstitusi persamaan (4) ke persamaan (1) diperoleh persamaan (6) berikut

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) = A_r x(t) \tag{6}$$

Adapun vektor penguatan konstan (K) ditentukan dengan menggunakan algoritma *Bass - Gura*^[6].



Gambar 2. Model Sistem Eksitasi Generator Dengan Metoda Penempatan Kutub^[5]

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{10.0000}{0.0020s^4 + 0.067s^3 + 0.6150s^2 + 1.5500s + 1.0000} \quad (7)$$

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{0.5000s + 10.0000}{0.0020s^4 + 0.067s^3 + 0.6150s^2 + 1.5500s + 11.0000} \quad (8)$$

dimana

$V_t(s)$ adalah tegangan terminal generator yang berperan sebagai keluaran

$V_{ref}(s)$ adalah tegangan referensi yang berperan sebagai masukan

III. METODOLOGI

Pada bagian ini terdiri dari metodologi penelitian, data parameter sistem eksitasi generator, fungsi alih sistem eksitasi generator dan kriteria perancangan dengan penjelasan sebagai berikut

a. Metodologi Penelitian

Adapun langkah – langkah dalam penelitian ini adalah

- Penelitian ini dimulai dengan pemodelan matematis sistem eksitasi generator. Pemodelan matematis untuk sistem eksitasi generator ini terdiri dari beberapa komponen diantaranya pemodelan *amplifier*, pemodelan *eksiter*, pemodelan generator, dan pemodelan sensor dengan menggunakan persamaan linear diferensial dan transformasi Laplace.
- Hasil pemodelan masing – masing komponen ini berupa fungsi alih orde satu. Fungsi alih dari masing-masing komponen ini kemudian digabungkan dan diperoleh fungsi alih lingkaran terbuka dan fungsi alih lingkaran tertutup sistem eksitasi generator. Fungsi alih lingkaran terbuka dan fungsi alih lingkaran tertutup ini merepresentasikan tegangan sebagai keluaran dan tegangan referensi sebagai masukan.
- Adapun parameter – parameter yang diperlukan untuk membentuk fungsi alih

lingkar terbuka dan fungsi alih lingkaran tertutup dari sistem eksitasi generator adalah konstanta penguat *amplifier* (K_A), konstanta waktu *amplifier* (τ_A), konstanta penguat *eksiter* (K_E), konstanta waktu *eksiter* (τ_E), konstanta penguat generator (K_G), konstanta waktu generator (τ_G), konstanta penguat sensor (K_R) dan konstanta waktu sensor (τ_R)

- Mensubstitusikan parameter-parameter tersebut agar diperoleh fungsi alih lingkaran terbuka dan fungsi alih lingkaran tertutup dari sistem eksitasi generator, kemudian kedua fungsi alih tersebut diubah menjadi persamaan keadaan sistem lingkaran terbuka dan persamaan keadaan sistem lingkaran tertutup. Perubahan fungsi alih menjadi persamaan keadaan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Matlab.
- Setelah dilakukan pemodelan matematis sistem eksitasi generator maka dilakukan analisa performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator tanpa metoda penempatan kutub yang meliputi analisa performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka, analisa performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup, analisa kestabilan pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator dan analisa kekokohan pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator. Analisa performansi pola tingkah

- laku tegangan ini dilakukan dalam domain waktu dan domain frekuensi.
- Dalam domain waktu, analisa performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka ditunjukkan dengan besarnya kesalahan keadaan mantap dari pola tingkah laku tegangan keadaan mantap terhadap masukan undak satuan dan untuk analisa performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup ditunjukkan dengan waktu keadaan mantap, lewatan maksimum dan nilai puncak yang diperoleh dari pola tingkah laku tegangan peralihan.
 - Dalam domain waktu, analisa kestabilan pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator dilakukan dengan kriteria Routh.
 - Dalam domain frekuensi, analisa performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka ditunjukkan dengan margin penguatan, frekuensi margin penguatan, margin fasa dan frekuensi margin fasa dan untuk analisa performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup ditunjukkan dengan lebar pita, nilai puncak maksimum dan frekuensi puncak maksimum.
 - Dalam domain frekuensi, analisa kestabilan pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator dilakukan dengan kriteria Nyquist.
 - Untuk analisa kekokohan pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator dilakukan dengan menggunakan nilai puncak maksimum.
 - Setelah dilakukan analisa performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator tanpa metoda penempatan kutub dengan metoda algoritma *Bass - Gura* maka dilakukan analisa performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Bass - Gura* dengan terlebih dahulu menentukan kriteria perancangan pola tingkah laku tegangan yang diinginkan.
 - Setelah kriteria perancangan ditentukan, maka dilakukan penentuan lokasi kutub dari persamaan karakteristik pola tingkah laku tegangan dari sistem eksitasi generator agar memenuhi kriteria perancangan yang telah ditentukan.
 - Adapun persamaan karakteristik ini diperoleh dari denumerator fungsi alih lingkaran tertutup sistem eksitasi generator dan penentuan lokasi kutub dilakukan secara coba – coba.
 - Setelah itu ditentukan konstanta penguatan dengan menggunakan algoritma *Bass - Gura*. Untuk menentukan konstanta penguatan dengan algoritma *Bass - Gura* ini dilakukan dengan menggunakan persamaan keadaan lingkaran terbuka eksitasi generator dan lokasi kutub yang dinyatakan dalam bentuk vektor.
 - Setelah konstanta penguatan diperoleh, kemudian disubstitusikan ke persamaan keadaan sistem eksitasi generator sehingga terbentuk persamaan keadaan untuk sistem eksitasi generator yang baru.
 - Dengan menggunakan persamaan keadaan eksitasi generator yang telah disubstitusi konstanta penguatan maka dilakukan analisa performansi pola tingkah laku tegangan dari sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Bass - Gura*. Langkah – langkah yang dilakukan dalam analisa performansi pola tingkah laku tegangan sebagai keluaran dari sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Bass - Gura* sama dengan analisa performansi pola tingkah laku tegangan sebagai keluaran dari sistem eksitasi generator tanpa metoda penempatan kutub. Analisa juga dilakukan dalam domain waktu dan domain frekuensi.

b. Data–Data Parameter Sistem Eksitasi Generator

Adapun parameter-parameter sistem ekstasi generator yang digunakan dalam penelitian ini diperlihatkan pada Tabel 1. berikut ^[1]

Tabel 1. Nilai Parameter Sistem Eksitasi Generator

Elemen	Penguatan	Konstanta Waktu
Amplifier	$K_A = 10.0000$	$\tau_A = 0.1000$
Exciter	$K_E = 1.0000$	$\tau_E = 0.4000$
Generator	$K_G = 1.0000$	$\tau_G = 1.0000$
Sensor	$K_R = 1.0000$	$\tau_R = 0.0500$

c. Fungsi Alih Sistem Eksitasi Generator

Dengan memasukkan nilai – nilai parameter pada Tabel 1 ke diagram blok pada Gambar 1. diperoleh fungsi alih lingkaran terbuka sistem eksitasi generator yang diperlihatkan pada persamaan (7) dan fungsi alih lingkaran tertutup sistem eksitasi generator diperlihatkan pada persamaan (8). Untuk persamaan keadaan sistem eksitasi generator diperoleh dari persamaan (7) dan (8) dengan bantuan perangkat lunak Matlab.

d. Kriteria Perancangan

Agar pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Bass - Gura* menghasilkan performansi yang baik perlu ditentukan kriteria pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator. Kriteria pola tingkah laku tegangan ini ditentukan dalam domain waktu dan domain frekuensi. Untuk domain waktu, pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator yang diinginkan adalah

- Nilai kesalahan keadaan mantap untuk masukan undak satuan kurang dari 0.0500
- Lewatan maksimum kurang dari 5.0000 %
- Waktu keadaan mantap kurang dari 2.5000 detik
- Nilai puncak yang dihasilkan mendekati nilai masukan yang diberikan.

Untuk domain frekuensi, pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator yang diinginkan adalah

- Sistem bersifat kokoh terhadap gangguan yang ditunjukkan dengan besarnya nilai puncak maksimum sensitivitas kecil dari 2.
- Sistem mempunyai kemampuan untuk meredam derau pada frekuensi tinggi dan mempunyai tanggapan yang cepat terhadap masukan yang ditunjukkan dengan besarnya nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer kecil dari 1.25.
- Sistem lingkaran tertutup mempunyai lebar pita kurang dari 15 rad/detik.
- Margin penguatan besar dari 6 dB.

IV. HASIL PEMBAHASAN

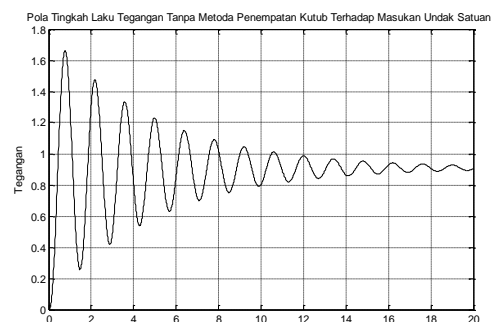
Pada bagian ini dilakukan analisa performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator tanpa metoda penempatan kutub dan dengan metoda penempatan kutub Analisa

dilakukan dalam domain waktu dan domain frekuensi. Untuk performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator tanpa metoda penempatan kutub dalam domain waktu terdiri dari performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka dan performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup. Untuk performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka ditunjukkan dengan besarnya kesalahan keadaan mantap dan untuk performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup ditunjukkan dengan lewatan maksimum, waktu keadaan mantap dan nilai puncak. Adapun performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka dan lingkaran tertutup tanpa metoda penempatan kutub diperlihatkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Performansi Pola Tingkah Laku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Dalam Domain Waktu

Kriteria	Nilai
Kesalahan Keadaan Mantap	0.0909
Lewatan Maksimum	82.7892 %
Waktu Keadaan Mantap	19.0812 detik
Nilai puncak	1.6617

Pada Tabel 2. terlihat bahwa performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka dan lingkaran tertutup belum memenuhi kriteria pola tingkah laku yang diinginkan dimana kesalahan keadaan mantap masih besar, persentase lewatan maksimum masih tinggi, waktu keadaan mantap masih terlalu lama dan nilai puncak masih terlalu tinggi. Pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup tanpa metoda penempatan kutub dalam keadaan peralihan terhadap masukan undak satuan diperlihatkan pada Gambar 3. berikut



Gambar 3. Pola Tingkah Laku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Tanpa Metoda Penempatan Kutub

Untuk analisa kestabilan pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator dilakukan dengan kriteria Routh dan diperoleh hasil pada persamaan (9) berikut ini

$$\begin{array}{r}
 s^4 \quad 0.0020 \quad 0.6150 \quad 11.0000 \\
 s^3 \quad 0.0670 \quad 1.5500 \quad 0.0000 \\
 s^2 \quad 0.5687 \quad 11.0000 \quad 0.0000 \\
 s^1 \quad 0.2541 \quad 0.0000 \quad 0.0000 \\
 s^0 \quad 11.0000 \quad 0.0000 \quad 0.0000
 \end{array} \quad (9)$$

Berdasarkan persamaan (9) terlihat bahwa pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator bersifat stabil. Hal ini dibuktikan dengan tidak adanya perubahan tanda pada kolom pertama dari persamaan (9).

Untuk performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator tanpa metoda penempatan kutub dalam domain frekuensi terdiri dari performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka dan performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup. Untuk performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka ditunjukkan dengan besarnya margin penguatan, frekuensi margin penguatan, margin fasa dan frekuensi margin fasa dan untuk performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup ditunjukkan dengan lebar pita, nilai puncak maksimum dan frekuensi puncak maksimum. Adapun performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka dalam domain frekuensi tanpa metoda penempatan kutub diperlihatkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Performansi Pola Tingkah Laku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Lingkaran Terbuka Dalam Domain Frekuensi

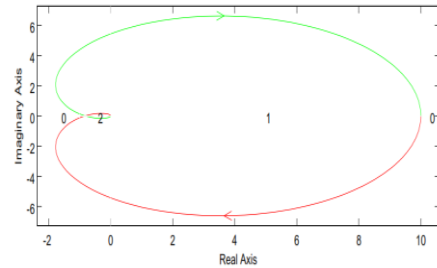
	Nilai
Margin Penguatan	1.2157
Frekuensi Margin Penguatan	4.8098 rad/detik
Margin Fasa	7.0418 derajat
Frekuensi Margin Fasa	4.3507 rad/detik

Performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup dalam domain frekuensi tanpa metoda penempatan kutub diperlihatkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Performansi Pola Tingkah Laku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Lingkaran Tertutup Dalam Domain Frekuensi

Kriteria	Nilai
Lebar Pita	0.8500 rad/detik
Nilai Puncak Maksimum	Tidak Terdefinisi
Frekuensi Puncak Maksimum	Tidak Terdefinisi

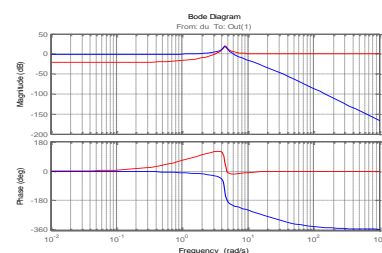
Untuk analisa kestabilan pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator dalam domain frekuensi dilakukan dengan kriteria kestabilan Nyquist dan diperlihatkan pada Gambar 4. berikut



Gambar 4. Diagram Nyquist Pola Tingkah Laku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Tanpa Metoda Penempatan Kutub

Berdasarkan Gambar 4. terlihat bahwa pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator bersifat stabil dengan batas penguatan minimum sebesar 0.100 dan batas penguatan maksimum sebesar 1.2157.

Untuk analisa kekokohan pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator ditunjukkan dengan nilai puncak maksimum fungsi sensitivitas dan nilai puncak maksimum fungsi sensitivitas komplementer. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai puncak maksimum fungsi sensitivitas tanpa metoda penempatan kutub sebesar 9.9795 dan nilai puncak maksimum fungsi sensitivitas komplementer tanpa metoda penempatan kutub sebesar 9.6316. Adapun fungsi sensitivitas dan fungsi sensitivitas komplementer pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator tanpa metoda penempatan kutub diperlihatkan pada Gambar 5. berikut



Gambar 5. Grafik Fungsi Sensitivitas dan Fungsi Sensitivitas Komplementer Pola Tingkah Laku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Tanpa Metoda Penempatan Kutub

Berdasarkan Gambar 5. Terlihat bahwa pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator tidak bersifat kokoh terhadap gangguan dan mampu meredam derau pada frekuensi tinggi. Hal ini dikarenakan nilai puncak maksimum fungsi sensitivitas dan nilai puncak maksimum fungsi sensitivitas komplementer tanpa metoda penempatan kutub masih tinggi. Agar pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator bersifat kokoh dan mampu meredam derau pada frekuensi tinggi maka nilai puncak maksimum sensitivitas kurang dari 2 (6 dB) dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer kurang dari 1.25 (2 dB)^[8].

Untuk analisa performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub dilakukan dengan menggunakan algoritma *Bass – Gura*. Sebelum analisa dilakukan, terlebih dahulu ditentukan lokasi kutub yang diinginkan agar memenuhi kriteria pola tingkah laku tegangan yang diinginkan. Penentuan lokasi kutub ini dilakukan secara coba – coba dan untuk algoritma *Bass – Gura*, dengan menggunakan lokasi kutub pada persamaan (10) berikut

$$P = [-16.0000 \quad -15.0000 \quad -10.0000 \quad -2.0000] \quad (10)$$

diperoleh nilai penguatan umpan balik yang dinyatakan oleh persamaan (11) berikut

$$K = [2.3750 \quad 5.0703 \quad 5.3223 \quad 4.1992] \quad (11)$$

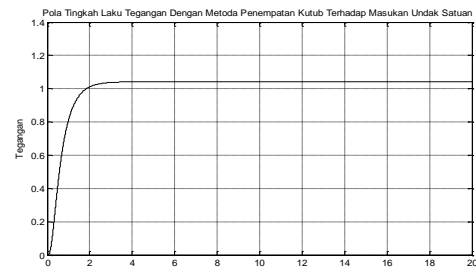
Setelah konstanta penguatan diperoleh, kemudian disubstitusikan ke persamaan keadaan sistem eksitasi generator sehingga terbentuk persamaan keadaan untuk sistem eksitasi generator yang baru.

Untuk analisa performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Bass – Gura* dilakukan untuk analisa performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka dan performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup. Adapun performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka dan lingkaran tertutup dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Bass–Gura* diperlihatkan pada Tabel 5. berikut

Tabel 5. Performansi Pola Tingkah Laku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Dalam Domain Waktu

Kriteria	Nilai
Kesalahan Keadaan Mantap	0.0417
Lewatan Maksimum	0.0000 %
Waktu Keadaan Mantap	2.2059 detik
Nilai puncak	1.0411

Pada Tabel 5. terlihat bahwa performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka dan lingkaran tertutup sudah memenuhi kriteria pola tingkah laku yang diinginkan dimana kesalahan keadaan mantap untuk masukan undak satuan kurang dari 0.0500, persentase lewatan maksimum kurang dari 5 % dan waktu keadaan mantap kurang dari 2.5000 detik serta nilai puncak tegangan sistem eksitasi generator sudah mendekati nilai masukan satuan. Pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Bass – Gura* dalam keadaan peralihan diperlihatkan pada Gambar 6. berikut



Gambar 6. Pola Tingkah Laku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Dengan Metoda Penempatan Kutub

Untuk analisa kestabilan pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi dengan metoda penempatan kutub dilakukan dengan kriteria Routh dan diperoleh hasil pada persamaan (12) berikut

$$\begin{array}{rcccc}
 s^4 & 1.00 & 632.00 & 4800.00 & \\
 s^3 & 43.00 & 3500.00 & 0.00 & \\
 s^2 & 550.60 & 4800.00 & 0.00 & (12) \\
 s^1 & 3125.14 & 0.00 & 0.00 & \\
 s^0 & 4800.00 & 0.00 & 0.00 &
 \end{array}$$

Berdasarkan persamaan (12) terlihat bahwa pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator bersifat stabil. Hal ini dibuktikan dengan tidak adanya perubahan tanda pada kolom pertama dari persamaan (12).

Adapun performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka dalam domain frekuensi dengan metoda penempatan kutub diperlihatkan pada Tabel 6. berikut

Tabel 6. Performansi Pola Tingkah Laku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Lingkaran Terbuka Dalam Domain Frekuensi

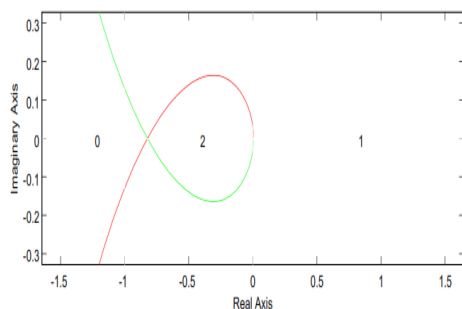
Kriteria	Nilai
Margin Penguatan	8.0033
Frekuensi Margin Penguatan	9.0219 rad/detik
Margin Fasa	156.9534 derajat
Frekuensi Margin Fasa	0.5614 rad/detik

Performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup dalam domain frekuensi dengan metoda penempatan kutub diperlihatkan pada Tabel 7. berikut

Tabel 7. Performansi Pola Tingkah Laku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Lingkaran Tertutup Dalam Domain Frekuensi

Kriteria	Nilai
Lebar Pita	1.8500 rad/detik
Nilai Puncak Maksimum	Tidak Terdefinisi
Frekuensi Puncak Maksimum	Tidak Terdefinisi

Untuk analisa kestabilan pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator dalam domain frekuensi dilakukan dengan kriteria kestabilan Nyquist dan diperlihatkan pada Gambar 7. berikut

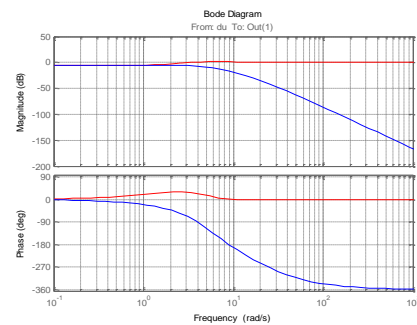


Gambar 7. Diagram Nyquist Pola Tingkah Laku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Dengan Metoda Penempatan Kutub

Berdasarkan Gambar 7. terlihat bahwa pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator bersifat stabil dengan batas penguatan minimum sebesar -0.9600 dan batas penguatan maksimum sebesar 8.0033.

Untuk analisa kekokohan pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator ditunjukkan dengan nilai puncak maksimum

fungsi sensitivitas dan nilai puncak maksimum fungsi sensitivitas komplementer. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai puncak maksimum fungsi sensitivitas dengan metoda penempatan kutub sebesar 1.2292 dan nilai puncak maksimum fungsi sensitivitas komplementer dengan metoda penempatan kutub sebesar 1.0417. Adapun fungsi sensitivitas dan fungsi sensitivitas komplementer pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub diperlihatkan pada Gambar 8. berikut



Gambar 8. Grafik Fungsi Sensitivitas dan Fungsi Sensitivitas Komplementer Pola Tingkah Laku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Dengan Metoda Penempatan Kutub

Berdasarkan Gambar 8. Terlihat bahwa pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator bersifat kokoh terhadap gangguan dan peredaman derau pada frekuensi tinggi. Hal ini dikarenakan nilai puncak maksimum sensitivitas kurang dari 2 (6 dB) dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer kurang dari 1.25 (2 dB).

V. KESIMPULAN

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah

1. Performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Bass – Gura* telah memenuhi kriteria pola tingkah laku yang diinginkan baik performansi lingkaran terbuka maupun performansi lingkaran tertutup.
2. Kestabilan pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Bass – Gura* bersifat stabil baik dalam domain waktu maupun domain frekuensi.
3. Pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub

menggunakan algoritma *Bass – Gura* juga bersifat kokoh terhadap gangguan dan mampu meredam derau pada frekuensi tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Karnoto, M. Facta, Aris T, *Perbandingan Pengaruh Sistem Eksitasi Konvensional dan Non Konvensional Terhadap Kestabilan Generator Untuk Meningkatkan Keandalan Sistem Kelistrikan*", Proceedings, Seminar Sistem Tenaga Elektrik I, Insitute Teknologi Bandung, (2000).
- [2] Amin Setiadji, *Implementasi Implementasi Kontroler PID Pada AVR (Automatic Voltage Regulator) untuk Pengaturan Tegangan Eksitasi Generator Sinkron 3 Fasa*, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya - Institute Teknologi Sepuluh November, Surabaya (2000)
- [3] Endriyanto NW, *Perencanaan Optimal Sistem Kontrol AVR (Automatic Voltage Regulator) Untuk Memperbaiki Kestabilan Tegangan Dengan Menggunakan Algoritma Genetik*, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang (2001)
- [4] Heru Dibyo Laksono dan Shilvia Ona Rezki, *Penerapan Sistem Kendali Kokoh Dengan Metoda H~ Pada Sistem Eksitasi Generator*, Amplifier Volume 02 No. 02 November (2012)
- [5] Hadi Saadat, *Power System Analysis*, McGraw Hill, New York (1999)
- [6] Xue, Dingyu, Chen and D.P Atherton, *Linear Feedback Control : Analysis and Design With Matlab*, SIAM, Philadelphia (2007)
- [7] Kautsky, J., N.K. Nichols, and P. Van Dooren, *Robust Pole Assignment in Linear State Feedback*, International Journal of Control, 41 (1985)
- [8] S. Skogestad and I. Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control Analysis and Design*, John Wiley & Sons, New York (1996)

Biodata Penulis

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 Kendali dan Sistem diselesaikan di Institute Teknologi Bandung (ITB) tahun 2004. Masuk sebagai dosen Teknik Elektro Universitas Andalas sejak tahun 2005.

Noris Fredi Yulinato ST, lahir di Manna Bengkulu Selatan, 07 Juli 1989, terdaftar pada bulan Agustus 2007 dan menyelesaikan program sarjana di Jurusan Teknik Elektro Universitas Andalas tahun 2013 dengan bidang keahlian kendali sistem tenaga listrik.