

PERILAKU TEGANGAN SISTEM EKSTIASI GENERATOR DENGAN METODA PENEMPATAN KUTUB DALAM DOMAIN WAKTU

Heru Dibyo Laksono¹, Noris Fredi Yulianto²
Jurusan Teknik Elektro, Universitas Andalas
Email : heru_dl@ft.unand.ac.id

ABSTRAK

Dalam sistem tenaga listrik, perilaku tegangan sistem eksitasi merupakan hal yang sangat penting untuk diperhatikan karena dapat mempengaruhi kestabilan tegangan sistem tenaga listrik. Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator yang kurang memuaskan pada titik operasinya. Berdasarkan kondisi tersebut, dilakukan suatu studi dinamik mengenai perilaku tegangan pada sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Bass-Gura*, algoritma *Ackerman*, algoritma *Robust Pole Placement* dan *stabilizer* sebagai pembandingan nantinya. Dengan menggunakan perangkat lunak Matlab diperoleh bahwa dengan menggunakan metoda penempatan kutub, perilaku tegangan sistem eksitasi generator menunjukkan performansi yang lebih baik dibandingkan performansi perilaku tegangan sistem eksitasi tanpa metoda penempatan kutub dan dengan *stabilizer*.

Kata Kunci : sistem eksitasi generator, metoda penempatan kutub, *bass-gura*, *ackerman*, *robust pole placement*, *stabilizer*

I. PENDAHULUAN

Sistem eksitasi adalah suatu peralatan yang bertugas menjaga perilaku 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, perilaku 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 perilaku kestabilan tegangan antara lain kenaikan pembebanan saluran transmisi, gangguan pengaturan daya reaktif, dinamika OLTC (*on load tap changer*) trafo dan karakteristik beban. Perilaku kestabilan tegangan sistem tenaga listrik ditentukan oleh perilaku kestabilan sistem regulasi 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 perilaku tegangan sistem eksitasi ini diantara perilaku 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 perilaku tegangan sistem eksitasi dititik operasinya kurang begitu memuaskan.

Berdasarkan informasi yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya maka dilakukan analisa perilaku

tegangan menggunakan metoda penempatan kutub pada titik operasinya. Dengan menggunakan metoda penempatan kutub ini, perilaku tegangan dipastikan akan bersifat stabil karena lokasi akar-akar persamaan karakteristik diletakkan pada posisi yang stabil. Dengan demikian nantinya akan diperoleh informasi perilaku tegangan pada sistem eksitasi generator dengan menggunakan metoda penempatan kutub 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 tanpa *stabilizer*, diagram blok sistem eksitasi dengan *stabilizer* dan metoda penempatan kutub berikut. Untuk model sistem eksitasi generator tanpa stabilizer diperlihatkan pada Gambar 1 dan Gambar 2. Adapun elemen-elemen sistem eksitasi generator tanpa stabilizer dan dengan stabilizer dijelaskan pada^[5]. Selanjutnya berdasarkan Gambar 1. diperoleh fungsi alih lingkaran terbuka dan fungsi alih lingkaran tertutup sistem eksitasi generator tanpa stabilizer dan dengan stabilizer dengan $V_i(s)$ sebagai keluaran yang merepresentasikan tegangan keluaran dan $V_{ref}(s)$ sebagai masukan yang merepresentasikan tegangan referensi. Untuk model sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub diperlihatkan pada Gambar 3. 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

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

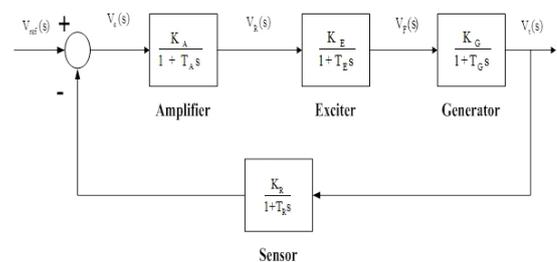
Dengan K adalah vektor penguatan konstan. Hukum kendali ini mengijinkan seluruh kutub sistem lingkaran tertutup untuk ditempatkan pada sembarang posisi yang dikehendaki. Aturan ini dinyatakan dengan persamaan (5) berikut

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

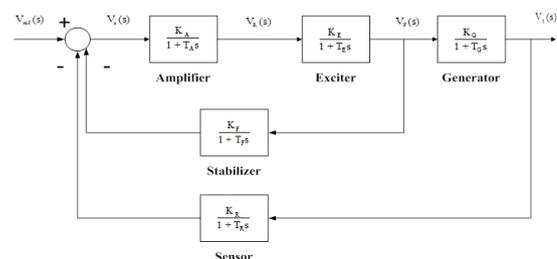
Berdasarkan persamaan (5) terlihat bahwa sinyal yang diumpanbalik pada masukan kendalian merupakan suatu penjumlahan terbatas dari seluruh keadaan sistem tersebut. Selain itu dengan mensubstitusi persamaan (4) ke persamaan (1) diperoleh persamaan (6) berikut

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

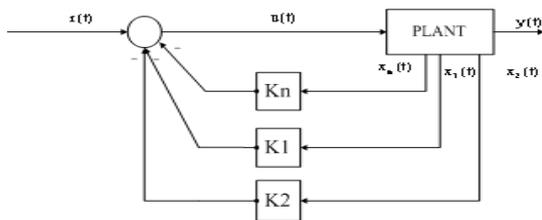
Adapun vektor penguatan konstan (K) ditentukan dengan menggunakan algoritma *Bass – Gura* [6], algoritma *Ackerman* [6] dan algoritman *Robust Pole Placement*[7].



Gambar 1. Model Sistem Eksitasi Generator Tanpa Stabilizer^[5]



Gambar 2. Model Sistem Eksitasi Generator Dengan Stabilizer^[5]



Gambar 3. Model Sistem Eksitasi Generator Dengan Metoda Penempatan Kutub^[5]

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

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

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{0.1000s + 10.0000}{0.00002s^5 + 0.0027s^4 + 0.0732s^3 + 1.1310s^2 + 12.0600s + 11.0000} \quad (9)$$

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{0.0050s^2 + 0.6000s + 10.0000}{0.00002s^5 + 0.0027s^4 + 0.0732s^3 + 1.1310s^2 + 12.1600s + 21.0000} \quad (10)$$

III. METODE PENELITIAN

Pada bagian ini terdiri dari metodologi penelitian, data parameter sistem eksitasi generator, fungsi alih sistem eksitasi generator tanpa stabilizer, fungsi alih sistem eksitasi generator dengan *stabilizer* 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, pemodelan *stabilizer* 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.

- Selain itu juga dibentuk fungsi alih lingkaran terbuka dan fungsi alih lingkaran tertutup dengan menggunakan *stabilizer* pada sistem eksitasi generator sebagai representasi sistem kendali konvensional. Adapun parameter – parameter yang diperlukan untuk membentuk fungsi alih lingkaran terbuka dan fungsi alih lingkaran tertutup dari sistem eksitasi generator tanpa dan dengan menggunakan stabilizer 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), konstanta waktu sensor (τ_R), konstanta penguat *stabilizer* (K_F) dan konstanta waktu *stabilizer* (τ_F).
- Mensubstitusi 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 perilaku tegangan sistem eksitasi generator tanpa metoda penempatan kutub yang meliputi analisa performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka, analisa performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup dan analisa perilaku kestabilan tegangan sistem eksitasi generator.
- Untuk analisa performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka ditunjukkan dengan besarnya kesalahan keadaan mantap dari perilaku tegangan keadaan mantap terhadap masukan undak satuan.
- Untuk analisa performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup ditunjukkan dengan waktu keadaan mantap, lewatan maksimum dan nilai puncak yang diperoleh dari perilaku tegangan peralihan.

- Untuk analisa perilaku kestabilan tegangan sistem eksitasi generator dilakukan dengan analisa akar – akar persamaan karakteristik. Hal ini dilakukan untuk melihat perilaku kestabilan dari tegangan eksitasi generator.
- Setelah dilakukan analisa performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator tanpa metoda penempatan kutub maka dilakukan analisa performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub dengan algoritma *Bass-Gura* dengan terlebih dahulu menentukan kriteria perancangan perilaku tegangan yang diinginkan.
- Setelah kriteria perancangan ditentukan, maka dilakukan penentuan lokasi kutub dari persamaan karakteristik perilaku 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 perilaku tegangan dari sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Bass-Gura*. Langkah-langkah yang dilakukan dalam analisa performansi perilaku tegangan sebagai keluaran dari sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub sama dengan analisa performansi perilaku tegangan sebagai keluaran dari sistem eksitasi generator tanpa metoda penempatan kutub.
- Kemudian langkah-langkah analisa performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator yang sama dengan

algoritma *Bass – Gura* dilakukan untuk metoda penempatan kutub dengan algoritma *Ackerman* dan algoritma *robust pole placement*.

- Setelah analisa performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub telah dilakukan maka dilanjutkan dengan analisa performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator dengan menggunakan *stabilizer*. Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam analisa performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator dengan menggunakan *stabilizer* sama dengan analisa performansi perilaku tegangan dari sistem eksitasi generator tanpa metoda penempatan kutub.
- Setelah analisa performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator dengan menggunakan *stabilizer* telah selesai, maka hasil analisa dari algoritma *Bass-Gura*, *Ackerman*, *robust pole placement* dan *stabilizer* dibandingkan satu sama lain untuk memperoleh hasil terbaik.

b. Data-Data Parameter Sistem Eksitasi Generator

Adapun parameter-parameter sistem eksitasi 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	$K_R = 1.0000$	$\tau_R = 0.0500$
Stabilizer	$K_F = 1.0000$	$\tau_F = 0.0100$

c. Fungsi Alih Sistem Eksitasi Generator

Dengan memasukkan nilai-nilai parameter pada Tabel 1 ke diagram blok pada Gambar 1 dan Gambar 2. diperoleh fungsi alih lingkaran terbuka sistem eksitasi generator yang diperlihatkan pada persamaan (7), fungsi alih lingkaran tertutup sistem eksitasi generator diperlihatkan pada persamaan (8), fungsi alih lingkaran terbuka sistem eksitasi generator dengan

stabilizer diperlihatkan pada persamaan (9) dan fungsi alih lingkaran terbuka sistem eksitasi generator dengan *stabilizer* diperlihatkan pada persamaan (10). Untuk persamaan keadaan sistem eksitasi generator tanpa dan dengan *stabilizer* diperoleh dari persamaan (7), (8), (9) dan (10) dengan bantuan perangkat lunak Matlab.

d. Kriteria Perancangan

Agar perilaku tegangan sistem eksitasi generator dengan menggunakan metoda penempatan kutub menghasilkan performansi yang baik perlu ditentukan kriteria perilaku tegangan sistem eksitasi generator. Untuk domain waktu, perilaku 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.

IV. HASIL PEMBAHASAN

Analisa performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator ini dilakukan untuk sistem tanpa metoda penempatan kutub, dengan metoda penempatan kutub dan dengan metoda konvensional dalam hal ini *stabilizer*. Untuk performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator tanpa metoda penempatan kutub dalam domain waktu terdiri dari performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka dan performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup. Untuk performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka ditunjukkan dengan besarnya kesalahan keadaan mantap dan untuk performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup ditunjukkan dengan lewatan maksimum, waktu keadaan mantap dan nilai puncak. Adapun performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka dan lingkaran tertutup tanpa metoda penempatan kutub diperlihatkan pada Tabel 2.

Pada Tabel 2. terlihat bahwa performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator

lingkaran terbuka dan lingkaran tertutup belum memenuhi kriteria perilaku 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. Perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup tanpa metoda penempatan kutub dalam keadaan peralihan diperlihatkan pada Gambar 4. Untuk akar-akar persamaan karakteristik dari perilaku tegangan sistem eksitasi generator tanpa metoda penempatan kutub diperlihatkan pada Tabel 3. berikut

Untuk analisa performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub dilakukan dengan menggunakan algoritma *Bass – Gura*, algoritma *Ackerman* dan algoritma *Robust Pole Placement*. Sebelum analisa dilakukan, terlebih dahulu ditentukan lokasi kutub yang diinginkan agar memenuhi kriteria perilaku tegangan yang diinginkan. Penentuan lokasi kutub ini dilakukan secara coba-coba dan untuk algoritma *Bass – Gura*, dengan menggunakan lokasi kutub pada persamaan (11) berikut

$$P = [-16.0000 \quad -15.0000 \quad -10.0000 \quad -2.0000] \quad (11)$$

diperoleh nilai penguatan umpan balik yang dinyatakan oleh persamaan (12) berikut

$$K = [2.3750 \quad 5.0703 \quad 5.3223 \quad 4.1992] \quad (12)$$

Untuk algoritma *Ackerman*, dengan menggunakan lokasi kutub pada persamaan (13) berikut

$$P = [-16.0000 \quad -15.0000 \quad -10.0000 + j1.0000 \quad -2.0000 - j1.0000] \quad (13)$$

diperoleh nilai penguatan umpan balik yang dinyatakan oleh persamaan (14) berikut

$$K = [2.3750 \quad 5.0859 \quad 5.3828 \quad 4.4336] \quad (14)$$

Untuk algoritma *Robust Pole Placement*, dengan menggunakan lokasi kutub pada persamaan (15) berikut

$$P = [-16.0000 \quad -15.0000 \quad -10.0000 \quad -2.0000] \quad (15)$$

diperoleh nilai penguatan umpan balik yang dinyatakan oleh persamaan (16) berikut

$$K = [2.3750 \quad 5.0703 \quad 5.3223 \quad 4.1992] \quad (16)$$

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 perilaku tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Bass-Gura*, algoritma *Ackerman* dan algoritma *Robust Pole Placement* dilakukan untuk analisa performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka dan performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup.

Untuk performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka ditunjukkan dengan besarnya kesalahan keadaan mantap terhadap masukan undak satuan dan untuk performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup ditunjukkan dengan lewatan maksimum, waktu keadaan mantap dan nilai puncak.

Adapun performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka dan lingkaran tertutup dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Bass-Gura* diperlihatkan pada Tabel 4. Untuk performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka dan lingkaran tertutup dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Ackerman* diperlihatkan pada Tabel 5.

Untuk performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka dan lingkaran tertutup dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Robust Pole Placement* diperlihatkan pada Tabel 6. Pada Tabel 4, Tabel 5 dan Tabel 6 terlihat bahwa performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka dan lingkaran tertutup sudah memenuhi kriteria perilaku 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.

Perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Bass-Gura* dalam keadaan peralihan diperlihatkan pada Gambar 5. Untuk algoritma *Ackerman*, perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup dengan metoda

penempatan kutub dalam keadaan peralihan diperlihatkan pada Gambar 6.

Untuk algoritma *Robust Pole Placement*, perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup dengan metoda penempatan kutub dalam keadaan peralihan diperlihatkan pada Gambar 7.

Untuk akar-akar persamaan karakteristik dari perilaku tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Bass-Gura* diperlihatkan pada Tabel 7. Untuk akar-akar persamaan karakteristik dari perilaku tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Ackerman* diperlihatkan pada Tabel 8. Untuk akar-akar persamaan karakteristik dari perilaku tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Robust Pole Placement* diperlihatkan pada Tabel 9. Pada Tabel 7, Tabel 8 dan Tabel 9 terlihat bahwa akar-akar persamaan karakteristik perilaku tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Bass-Gura*, algoritma *Ackerman* dan algoritma *Robust Pole Placement* semuanya bernilai real dan redamannya bernilai satu.

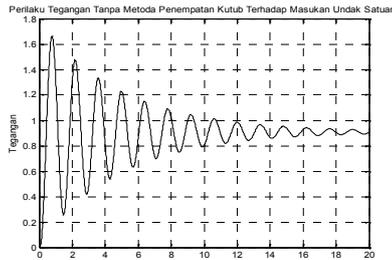
Pada bagian ini akan diperlihatkan perilaku tegangan sistem eksitasi generator dengan menggunakan metoda konvensional dalam hal ini menggunakan *stabilizer*. Adapun performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka dan lingkaran tertutup dengan *stabilizer* diperlihatkan pada Tabel 10.

Pada Tabel 10. terlihat bahwa performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka dan lingkaran tertutup tidak memenuhi kriteria perilaku yang diinginkan terutama kesalahan keadaan mantap untuk masukan undak satuan dimana besarnya lebih dari 0.0500,

Perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup dengan *stabilizer* dalam keadaan peralihan diperlihatkan pada Gambar 8. Pada Gambar 8. terlihat perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup dengan *stabilizer* tidak berosilasi lagi tetapi nilai keluaran tegangannya belum mencapai nilai yang diinginkan. Untuk akar-akar persamaan karakteristik dari perilaku tegangan sistem eksitasi generator dengan *stabilizer* diperlihatkan pada Tabel 11.

Tabel 2. Performansi Perilaku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Lingkaran Terbuka dan Lingkaran Tertutup Tanpa Metoda Penempatan Kutub

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



Gambar 4. Perilaku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Dalam Keadaan Peralihan Tanpa Metoda Penempatan Kutub Terhadap Masukan Undak Satuan

Tabel 3. Akar – Akar Persamaan Karakteristik Perilaku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Tanpa Metoda Penempatan Kutub

Nilai Eigen	Redaman	Frekuensi (rad/det)
$-16.5000 + j0.4680$	1.0000	16.6000
$-16.5000 - j0.4680$	1.0000	16.6000
$-0.2020 + j4.4800$	0.0451	4.4800
$-0.2020 - j4.4800$	0.0451	4.4800

Tabel 4. Performansi Perilaku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Lingkaran Terbuka dan Lingkaran Tertutup Dengan Metoda Penempatan Kutub Menggunakan Algoritma *Bass Gura*

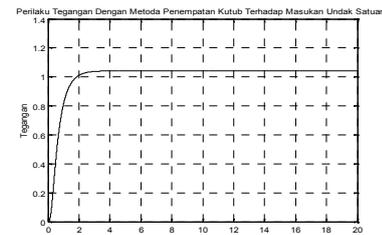
Kriteria	Nilai
Kesalahan Keadaan Mantap	0.0417
Lewatan Maksimum	0.0000 %
Waktu Keadaan Mantap	2.2059 detik
Nilai puncak	1.0411

Tabel 5. Performansi Perilaku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Lingkaran Terbuka dan Lingkaran Tertutup Dengan Metoda Penempatan Kutub Menggunakan Algoritma *Ackerman*

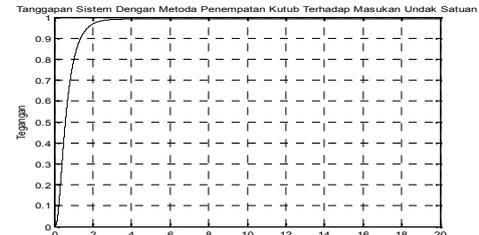
Kriteria	Nilai
Kesalahan Keadaan Mantap	0.0079
Lewatan Maksimum	0.0000 %
Waktu Keadaan Mantap	2.0922 detik
Nilai puncak	0.9905

Tabel 6. Performansi Perilaku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Lingkaran Terbuka dan Lingkaran Tertutup Dengan Metoda Penempatan Kutub Menggunakan Algoritma *Robust Pole Placement*

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



Gambar 5. Perilaku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Dalam Keadaan Peralihan Dengan Metoda Penempatan Kutub Menggunakan Algoritma *Bass-Gura* Terhadap Masukan Undak Satuan



Gambar 6. Perilaku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Dalam Keadaan Peralihan Dengan Metoda Penempatan Kutub Menggunakan Algoritma *Ackerman* Terhadap Masukan Undak Satuan



Gambar 7. Perilaku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Dalam Keadaan Peralihan Dengan Metoda Penempatan Kutub Menggunakan Algoritma *Robust Pole Placement* Terhadap Masukan Undak Satuan

Tabel 7. Akar – Akar Persamaan Karakteristik Perilaku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Dengan Metoda Penempatan Kutub Menggunakan Algoritma *Bass – Gura*

Nilai Eigen	Redaman	Frekuensi (rad/det)
-16.0000	1.0000	16.0000
-15.0000	1.0000	15.0000
-10.0000	1.0000	1.0000
-2.0000	1.0000	2.0000

Tabel 8. Akar – Akar Persamaan Karakteristik Perilaku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Dengan Metoda Penempatan Kutub Menggunakan Algoritma *Ackerman*

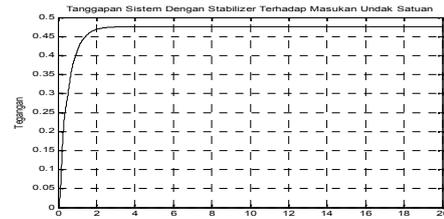
Nilai Eigen	Redaman	Frekuensi (rad/det)
-16.0000	1.0000	16.0000
-15.0000	1.0000	15.0000
-9.8700	1.0000	9.8700
-2.1300	1.0000	2.1300

Tabel 9. Akar – Akar Persamaan Karakteristik Perilaku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Dengan Metoda Penempatan Kutub Menggunakan Algoritma *Robust Pole Placement*

Nilai Eigen	Redaman	Frekuensi (rad/det)
-16.0000	1.0000	16.0000
-15.0000	1.0000	15.0000
-10.0000	1.0000	1.0000
-2.0000	1.0000	2.0000

Tabel 10. Performansi Perilaku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Lingkaran Terbuka dan Lingkaran Tertutup Dengan *Stabilizer*

Kriteria	Nilai
Kesalahan Keadaan Mantap	0.5238
Lewatan Maksimum	0.0000 %
Waktu Keadaan Mantap	1.9127 detik
Nilai puncak	0.4761



Gambar 8. Perilaku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Dalam Keadaan Peralihan Dengan *Stabilizer* Terhadap Masukan Undak Satuan

Tabel 11. Akar–Akar Persamaan Karakteristik Perilaku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Dengan *Stabilizer*

Nilai Eigen	Redaman	Frekuensi (rad/det)
-2.0800	1.0000	2.0800
-4.6500 + j15.2000	0.2920	15.9000
-4.6500 + j15.2000	0.2920	15.9000
-19.4000	1.0000	19.4000
-103.0000	1.0000	103.0000

V. KESIMPULAN

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah

- o Performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma *Bass – Gura*, algoritma *Ackerman* dan algoritma *Robust Pole Placement* telah memenuhi kriteria perilaku yang diinginkan.
- o Perilaku tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub bersifat stabil. Hal ini dibuktikan dengan nilai bagian real dari akar – akar persamaan karakteristik sistem eksitasi generator bernilai negatif.
- o Dibandingkan dengan perilaku tegangan sistem eksitasi generator dengan *stabilizer*, performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub lebih baik terutama untuk perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran terbuka dan performansi perilaku tegangan sistem eksitasi generator lingkaran tertutup.

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)

Universitas Andalas tahun 2013 dengan bidang keahlian kendali sistem tenaga listrik.

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 Teknik Kendali dan Sistem diselesaikan di Institute Teknologi Bandung (ITB) tahun 2004. Masuk sebagai dosen Teknik Elektro Universitas Andalas sejak tahun 2005. Bidang peminatan kendali dan kestabilan sistem tenaga listrik serta sistem kendali cerdas

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