



TUGAS AKHIR - TE 141599

**PENALAAAN *POWER SYSTEM STABILIZER* (PSS) UNTUK
PERBAIKAN STABILITAS DINAMIK PADA SISTEM TENAGA
LISTRIK MENGGUNAKAN *BAT ALGORITHM* (BA)**

Suharto
NRP 2210 100 105

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT
Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TE 1399

**TUNING OF POWER SYSTEM STABILIZER (PSS) FOR
DYNAMIC STABILITY IMPROVEMENT POWER SYSTEM USING
BAT ALGORITHM (BA)**

**Suharto
NRP 2210 100 105**

**Supervisor
Prof.Dr. Ir. Imam Robandi, MT
Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng**

**ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015**

**PENALAAAN POWER SYSTEM STABILIZER (PSS) UNTUK
PERBAIKAN STABILITAS DINAMIK PADA SISTEM TENAGA
LISTRIK MENGGUNAKAN BAT ALGORITHM (BA)**

TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.
NIP. 1963 08 17 1990 03 1001

Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
NIP. 1973 09 27 1998 03 1004



**SURABAYA
JANUARI, 2015**

Penalaan *Power System Stabilizer* (PSS) untuk Perbaikan Stabilitas Dinamik pada Sistem Tenaga Listrik Menggunakan *Bat Algorithm* (BA)

Suharto
2210 100 105

Dosen Pembimbing I : Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.
Dosen Pembimbing II : Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

Abstrak:

Gangguan dinamik pada sistem tenaga listrik terjadi karena adanya perubahan beban secara tiba-tiba dan periodik. Gangguan dinamik pada sistem tenaga listrik tidak dapat direspon dengan baik oleh generator sehingga dapat mempengaruhi kestabilan dinamik sistem. Hal ini menyebabkan timbulnya osilasi frekuensi pada generator. Respon yang kurang baik dapat menimbulkan osilasi frekuensi dalam periode yang lama. Hal itu akan mengakibatkan generator lepas sinkron. Untuk mengatasi hal tersebut, generator memerlukan kontroler tambahan yaitu *Power System Stabilizer* (PSS). Untuk mendapatkan koordinasi PSS yang tepat, Parameter pada PSS dioptimisasi menggunakan *Bat Algorithm* (BA). Hasil simulasi menunjukkan bahwa penalaan parameter PSS menggunakan BA untuk perbaikan stabilitas dinamik berfungsi untuk mempercepat *settling time* dan meredam *overshoot* respon perubahan frekuensi dan respon perubahan sudut rotor pada sistem tenaga listrik *Single Machine Infinite Bus* (SMIB)

Kata kunci: kestabilan dinamik, SMIB, PSS, BA.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

Tuning of Power System Stabilizer (PSS) for Dynamic Stability Improvement in Power System Using Bat Algorithm (BA)

Suharto
2210 100 105

Supervisor I : Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.
Supervisor : Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

Abstract:

Dynamic disturbances of the power system occurs due to load changes suddenly and periodic. Dynamic disturbances on the electric power system can not be responded well by the generator so as to affect the dynamic stability of the system. This leads to oscillation frequency of the generator. Poor response may cause oscillation frequency over a long period. It will lead to loose synchronous generator. To overcome this, the generator requires an additional controller which is Power System Stabilizer (PSS). To get the proper coordination of PSS, PSS parameters on optimized using Bat Algorithm (BA). The simulation results show that the tuning of PSS parameters using BA for dynamic stability improvement works to accelerate the settling time and reduce overshoot response frequency changes and the response of the rotor angle change of the power system Single Machine Infinite Bus (SMIB)

Keywords: *dynamic stability, SMIB, PSS, BA.*

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Segala puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah *subhanahu wata'ala*, karena hanya pertolongan dan rahmat Allah semata penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul:

Penalaan *Power System Stabilizer* (PSS) untuk Perbaikan Stabilitas Dinamik pada Sistem Tenaga Listrik Menggunakan *Bat Algorithm* (BA).

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) pada bidang studi teknik sistem tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis mengucapkan terimakasih kepada berbagai pihak yang telah memberi bantuan dan dukungan dalam penyelesaian Tugas Akhir, terutama kepada :

1. Kedua orang tua penulis, Bapak Sadeni dan Ibu Jemi yang telah memberikan doa, motivasi, bimbingan, dan nasehat dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT. selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, kritik, saran dan motivasi kepada penulis saat menjadi anggota laboratorium PSOC maupun selama menyelesaikan tugas akhir.
3. Bapak Dr. Ardyono Priyadi, ST. M.Eng. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, pengarahan dan koreksi kepada penulis mulai dari analisa data, penyusunan proposal sampai *finishing* dari Tugas Akhir ini.
4. Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT. selaku Kajar Teknik Elektro ITS dan seluruh dosen Jurusan Teknik Elektro ITS, yang telah memberikan bimbingan dan ilmu pengetahuan selama perkuliahan.
5. Seluruh staff dan karyawan Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah memberikan bantuan administrasi.
6. Kakak saya Anik Irawati, Rusmin dan Adik Saya Sri Rahayu Lestari yang telah banyak memberikan inspirasi, motivasi dan kasih sayang dalam pengerjaan tugas akhir ini.
7. Sahabat dan rekan saya Rian Wahyu, Abi, Dwi Didit, Febrila L, Mas Tufiq Ramadhan, Mas Mahfud, Mas Herlambang Setiadi, Mas Fani, Mas Candra P, Mas Afif, Mas Dani, Mas Wandu, Ibu

Hidayatul Nurrohmah, Bapak Ootong, Bapak Aji, Bapak Andi Imran, teman-teman e50 dan teman-teman laboratorium PSOC yang bersedia berdiskusi dan memberikan saran maupun kritik dalam Tugas Akhir ini.

8. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir yang tidak dapat penulis sebutkan.

Penulis berharap semoga apa yang ada di dalam Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat kepada pembaca terutama mahasiswa Teknik Elektro..

Surabaya, 24 Januari 2015

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	2
1.2. Tujuan Penelitian	3
1.3. Perumusan Masalah	3
1.4. Batas Masalah	3
1.5. Metode Penelitian	3
1.6. Sistematika Penulisan	4
1.7. Relevansi	4
BAB 2 PEMODELAN SISTEM TENAGA LISTRIK	7
2.1. Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	7
2.1.1. Kestabilan Steady State	7
2.1.2. Kestabilan Transient	8
2.1.3. Kestabilan Dinamik	8
2.2. Pemodelan Sistem Tenaga Listrik	8
2.2.1. Pemodelan Linear Mesin Sinkron	8
2.2.2. Pemodelan Governor	16
2.2.3. Pemodelan Sistem Eksitasi	18
2.2.4. Pemodelan Turbin dan Sistem Pengendalinya	19
2.2.5. Pemodelan Sistem Tenaga Listrik Mesin Tunggal	21
2.3. Power System Stabilizer	21
2.3.1. Blok Gain	23
2.3.2. Blok Washout	23
2.3.3. Blok Lead - Lag	23
2.3.4. Limiter	23

2.4. Bats Algorithm	24
2.4.1. Prilaku Kelelawar	24
2.4.2. Gerakan Kelelawar	25
2.4.3. Kebisingan dan pulsa yang dipancarkan	26
2.4.4. Pseudo Code dari BA	27
BAB 3 OPTIMISASI PSS MENGGUNAKAN BA	31
3.1. Algoritma penyelesaian	31
3.1.1. Data sistem <i>single machine infinite bus</i> (SMIB)	32
3.1.2. Pemodelan Sistem	33
3.2. State Space	33
3.3. Stabilitas	33
3.4. Penambahan PSS pada SMIB	34
3.5. Penalaan parameter PSS menggunakan BA	36
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS	39
4.1. Respon Perubahan Frekuensi	39
4.1.1. Respon frekuensi akibat perubahan beban 0,01 p.u	39
4.2. Respon Perubahan Sudut Rotor	40
4.2.1. Respon sudut rotor akibat perubahan beban 0,01 p.u	40
4.3. Respon Perubahan Frekuensi	42
4.3.1. Respon frekuensi akibat perubahan beban 0,05 p.u	42
4.4. Respon Perubahan Sudut Rotor	43
4.4.1. Respon sudut rotor akibat perubahan beban 0,05 p.u	43
BAB 5 Kesimpulan dan Saran	45
5.1. Kesimpulan	45
5.2. Saran	46
DAFTAR PUSTAKA	xix
INDEKS	xxi
RIWAYAT HIDUP	xxii

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Data Pembangkit	32
Tabel 3.2 Parameter Dinamik Sistem	32
Tabel 3.3 Data Saluran	32
Tabel 3.4 Governor dan Sistem eksitasi	33
Tabel 3.5 Data Beban	33
Tabel 3.7 Data Parameter PSS	35
Tabel 3.7 Data Parameter BA	36
Tabel 3.8 Hasil optimisasi PSS menggunakan BA	37
Tabel 4.1 Data respon frekuensi akibat perubahan beban 0,01 p.u	40
Tabel 4.2 Data respon sudut rotor akibat perubahan beban 0,01 p.u	41
Tabel 4.3 Data respon frekuensi akibat perubahan beban 0,05 p.u	43
Tabel 4.4 Data respon sudut rotor akibat perubahan beban 0,05 p.u	44

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR GAMBAR

	Halaman	
Gambar 2.1	Sistem pembangkit listrik secara umum	9
Gambar 2.2	Dinamika dasar generator sinkron	10
Gambar 2.3	Diagram blok model dinamika sebuah generator sinkron	13
Gambar 2.4	Dinamika model reaksi jangkar terhadap perubahan sudut δ	14
Gambar 2.5	Diagram mode tegangan	15
Gambar 2.6	Model linear sebuah generator sinkron	16
Gambar 2.7	Diagram blok Governor	16
Gambar 2.8	Diagram blok Sistem Eksitasi	18
Gambar 2.9	Diagram blok turbin uap dan sistem pengendaliannya	20
Gambar 2.10	Model linear single machine infinite bus	21
Gambar 2.11	Komponen PSS	22
Gambar 2.12	Blok diagram PSS	23
Gambar 2.13	Flow Chart Bat Algorithm	29
Gambar 3.1	Flowchart Pengerjaan Tugas Akhir	29
Gambar 3.2	Sistem SMIB dengan PSS	35
Gambar 3.3	Grafik Konvergensi BA	37
Gambar 4.1	Respon perubahan frekuensi akibat perubahan beban 0,01 p.u	40
Gambar 4.2	Respon perubahan sudut rotor akibat perubahan beban 0,01 p.u	41
Gambar 4.3	Respon perubahan frekuensi akibat perubahan beban 0,05 p.u	42
Gambar 4.4	Respon perubahan sudut rotor akibat perubahan beban 0,05 p.u	44

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

AVR	=	Automatic Voltage Regulator
BA	=	Bat Algorithm
CDI	=	Comperhensive Damping Index
PSS	=	Power System Stabilizer
SMIB	=	Single Machine Infinite Bus
T_m	=	Torka mekanik turbin (N.m)
T_e	=	Torka elektrik rotor (N.m)
T_a	=	Percepatan torka (N.m)
T	=	Waktu (detik)
δ_m	=	Sudut mekanis rotor (rad-mekanik)
J	=	Total momen inersia mesin sinkron (kg.m^2)
ω_s	=	Kecepatan sudut sinkron (rad/s)
δ	=	Sudut elektrik rotor (rad)
p	=	Jumlah kutub
K_g	=	Konstanta gain = $1/R_G$
T_g	=	Governor time konstan
ΔGSC	=	Perubahan acuan kecepatan (Governor Speed Changer)
K_A	=	Konstanta penguatan amplifier
c	=	Konstanta penguatan filter
T_A	=	Waktu tanggap amplifier
T_E	=	Waktu tanggap exciter
T_F	=	Waktu tanggap filter
ΔU_2	=	Perubahan sinyal kontrol mesin
ΔY	=	Perubahan tinggi katup
T_w	=	Waktu tanggap turbin uap
T_{ga}	=	Waktu tanggap pengaturan turbin
K_{ga}	=	Pengutan pengaturan turbin
R	=	Kostanta pengaturan turbin uap
ΔU_1	=	Perubahan sinyal kontrol umpan balik

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam operasi sistem tenaga listrik salah satu permasalahan yang sangat penting adalah kestabilan. Ketidakseimbangan antara daya input mekanis dengan daya beban listrik pada sistem menyebabkan kecepatan rotor generator (frekuensi sistem) dan tegangan akan menyimpang dari kondisi normal sehingga akan menyebabkan kestabilan dari sistem terganggu. Ketidakstabilan sistem diakibatkan karena adanya gangguan baik itu gangguan besar maupun gangguan kecil. Gangguan kecil dapat berupa perubahan beban secara tiba-tiba dan periodik sedangkan untuk gangguan besar disebabkan kesalahan pada sistem seperti gangguan hubung singkat, putus jaringan, dan pemindahan beban. Apabila hal tersebut tidak segera diatasi dengan cepat baik berupa besar gangguan, maupun waktu terjadinya gangguan maka sistem akan bekerja menyimpang dari kondisi normal. Oleh sebab itu diperlukan peralatan kontrol pada sistem tenaga listrik yang mampu bereaksi secara otomatis terhadap penyimpangan. Peralatan kontrol governor, AVR (*Automatic Voltage Regulator*), dan sistem eksitasi menjadi peralatan kontrol yang harus dimiliki oleh sistem tenaga listrik sehingga kestabilan sistem tenaga listrik dapat dijaga [1].

Secara garis besar terdapat dua macam kestabilan sistem yaitu kestabilan *steady state* dan kestabilan *transient*. Kestabilan *steady state* adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi mesin setelah mengalami gangguan kecil. Analisa kestabilan *steady state* menggunakan model linear. Kestabilan *transient* adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar. Analisa kestabilan *transient* menggunakan pendekatan non linear [2,3].

Selain dua kategori tersebut, Prof William D. Stevenson menambahkan kestabilan dinamik. Secara konsep, kestabilan *steady state* dan kestabilan dinamik adalah sama. Perbedaan hanya terletak pada masalah pemodelan. Pada kestabilan dinamik, sistem eksitasi turbin dan generator dimodelkan dengan menyediakan variasi fluks pada *air gap* mesin. Sementara pada kestabilan *steady state* digunakan model generator yang sederhana, yaitu sebagai generator yang direpresentasikan sebagai sumber tegangan konstant [3].

Dalam studi kestabilan dinamik diasumsikan bahwa perubahan torsi akibat respon governor diabaikan karena respon governor sangat lambat dibandingkan dengan respon sistem eksitasi, sehingga pengendali yang berpengaruh adalah sistem eksitasi. Penambahan penguatan rangkaian eksitasi kurang dapat menstabilkan sistem terutama untuk osilasi frekuensi rendah. Osilasi Frekuensi rendah berada antara 0,2 Hz sampai dengan 2,0 Hz. Frekuensi yang lebih rendah dapat semakin meluas menjadi osilasi inter area sehingga diperlukan alat kontrol tambahan berupa *Power System Stabilizer (PSS)*. PSS merupakan alat kontrol tambahan yang berfungsi untuk meredam osilasi ferkuensi dan tegangan secara lokal atau global pada generator, sebagai respon dari penyimpangan yang terjadi pada nilai variable yang telah diset. Untuk memperoleh hasil yang maksimal penalaan parameter yang tepat dan optimal pada PSS sangat diperlukan untuk meredam osilasi dan menstabilkan sistem sebagai respon kestabilkan sistem. Penalaan parameter ini dapat menggunakan kecerdasan buatan.

Beberapa metode penalaan pada PSS telah diusulkan untuk menentukan nilai parameter yang optimal, salah satunya adalah *Bat Algorithm (BA)*. BA merupakan algoritma yang terinspirasi dari perilaku kelelawar (*Bat Behaviour*). Algoritma ini diperkenalkan oleh Xin-She Yang pada tahun 2010 [4].

Pada tugas akhir ini BA digunakan untuk menala parameter PSS yang optimal. Penalaan parameter yang optimal sangat berpengaruh dalam menstabilkan sistem. Namun *range* parameter peralatan sangat beragam dan luas, maka untuk memperoleh nilai parameter secara cepat digunakanlah metode optimisasi menggunakan *BA*. Nilai respon diketahui dengan menganalisis nilai *overshoot* dan *settling time*, sedangkan untuk *objective function* menggunakan *Comperhensive Damping Index (CDI)* [5]. Kemudian menganalisa hasil simulasi dengan cara membandingkan hasil simulasi sistem tanpa PSS, sistem menggunakan PSS, dan sistem menggunakan PSS yang ditala dengan *Bat Algorithm*.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir adalah sebagai berikut :

1. Mensimulasikan desain PSS dan menerapkannya pada *Single Machine Infinite Bus (SMIB)*.

2. Menentukan parameter yang optimal untuk penalaan PSS menggunakan BA.
3. Mendapatkan perbandingan respon kestabilan dinamik sistem, antara sistem tanpa PSS, sistem dengan PSS dan sistem dengan PSS yang di *tuning* dengan BA.

1.3. Perumusan Masalah

Permasalahan yang diselesaikan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana cara memodelkan *Power System Stabilizer* (PSS) yang optimal dan menerapkannya pada sistem *Single Machine Infinite Bus* (SMIB).
2. Bagaimana cara menentukan koordinasi parameter PSS yang optimal dengan menggunakan *Bat Algorithm* (BA).
3. Bagaimana cara mendapatkan respon kestabilan dinamik sistem, antara sistem tanpa PSS, sistem dengan PSS dan sistem dengan PSS yang *dituning* dengan BA.

1.4. Batasan Masalah

Penyelesaian permasalahan ini terdapat beberapa batasan masalah. Batasan masalah tersebut adalah sebagai berikut,

1. Metode yang dipakai untuk menyelesaikan permasalahan adalah metode BA.
2. Faktor ekonomis tidak diperhitungkan
3. Simulasi dilakukan dengan menggunakan MATLAB
4. Analisis dilakukan pada sistem *Single Machine Infinite Bus* (SMIB).
5. Gangguan pada sistem bersifat dinamik.
6. Beban pada sistem dianggap statik.
7. Faktor harmonisa diabaikan.
8. Kontroler yang digunakan adalah PSS.

1.5. Metode Penelitian

Pada Tugas Akhir ini, dilakukan penalaan parameter PSS yang dipasang pada sistem tenaga listrik mesin tunggal. Penalaan ini dilakukan menggunakan BA. Data parameter yang diperlukan dalam Tugas Akhir meliputi data saluran, beban, pembangkitan dan parameter mesin sistem. Sistem tenaga listrik *Single Machine Infinite Bus* (SMIB)

dan desain PSS disimulasikan dalam program matlab *simulink*, sedangkan program dari BA disimulasikan dalam program *m-file*. Tahapan yang pertama dalam mengerjakan tugas akhir ini adalah memodelkan sistem tenaga listrik SMIB kedalam simulink dengan parameter yang sudah didapatkan dari literatur. Performansi kestabilan sistem diuji terlebih dahulu, setelah sistem stabil, baru dilakukan pemodelan kontrol PSS. Setelah itu parameter PSS di *tunning* dengan BA untuk mendapatkan respon *overshoot* dan *settling time* yang baik. Untuk analisa respon frekuensi dan sudut rotor akan menggunakan fungsi objektif *Comperhensive Damping Index (CDI)*. Simulasi dilakukan pada sistem yang tidak menggunakan PSS, sistem yang menggunakan PSS dan sistem menggunakan PSS yang di *tunning* dengan BA. Hasil simulasi dilakukan dengan menganalisa data dengan membandingkan hasil simulasi sistem. Penulisan laporan dilakukan sebagai penggambaran dan pendiskripsian kesimpulan dari tugas akhir ini. Kesimpulan kemudian akan disajikan dalam bentuk hasil analisis dan perbandingan. Selain itu saran untuk keberlanjutan penelitian akan diberikan.

1.6. Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir ini disusun dalam sistematika sebagai berikut:

- Bab 1 : Pendahuluan yang membahas mengenai latar belakang, tujuan penelitian, permasalahan yang diangkat, batasan masalah, metode penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi dari Tugas Akhir.
- Bab 2 : Dasar teori yang menjelaskan mengenai pemodelan sistem tenaga listrik SMIB, kontroler PSS, dan *Bat Algorithm*.
- Bab 3 : Penjelasan mengenai penerapan PSS yang ditala dengan *Bat Algorithm* pada SMIB.
- Bab 4 : Hasil simulasi PSS pada SMIB dan analisis respon kestabilan saat gangguan dinamik 0,01 pu dan 0,05 pu.
- Bab 5 : Kesimpulan Tugas Akhir yang mengemukakan kesimpulan dari hasil pembahasan dan saran-saran yang berhubungan dengan pokok pembahasan.

1.7. Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi terhadap sistem kelistrikan, khususnya dalam permasalahan yang berkaitan dengan PSS.
2. Meningkatkan penguasaan ilmu pengetahuan dan teknologi berkaitan dengan stabilitas sistem tenaga.
3. Dapat digunakan sebagai referensi mahasiswa lain yang hendak mengambil masalah serupa sebagai Tugas Akhir.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 2

PEMODELAN SISTEM TENAGA LISTRIK

2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Dalam sistem tenaga modern kestabilan sistem menjadi perhatian utama dalam sebuah sistem operasi. Kestabilan sistem tenaga listrik diartikan dengan kemampuan suatu sistem tenaga listrik atau bagian komponennya untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan jika terjadi gangguan. Selain terganggunya sinkronisasi dan keseimbangan, osilasi menunjukkan kondisi yang tidak stabil pada sistem.

Sistem tenaga listrik yang stabil terdapat keseimbangan antara daya input mekanis (*prime mover*) dengan daya output elektrik (beban listrik). Dalam keadaan ini generator berputar pada kecepatan sinkron. Apabila terjadi kenaikan atau penurunan beban harus diikuti dengan perubahan daya input mekanis dari *prime mover*. Apabila daya input mekanik tidak dapat menyesuaikan dengan perubahan daya output elektrik dan rugi-rugi sistem maka akan terjadi ketidakstabilan sistem. Kecepatan rotor generator (frekuensi sistem) dan tegangan akan menyimpang dari kondisi normal. Ketika terjadi gangguan, sesaat akan terjadi peredaman besar antara daya input dari *prime mover* dengan daya output dari generator. Putaran rotor pada generator akan mengalami percepatan atau pelambatan. Jika tidak segera dihilangkan, maka percepatan atau pelambatan rotor generator ini akan menyebabkan hilangnya sinkronisasi sistem.

Berdasarkan sifat dan besar gangguan, kestabilan dalam sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga yaitu kestabilan tunak (*steady-state*), kestabilan transien, dan kestabilan dinamik [8].

2.1.1 Kestabilan Steady State

Kestabilan *steady-state* adalah kemampuan sistem tenaga untuk mencapai kondisi stabil pada kondisi operasi baru yang sama atau identik dengan kondisi sebelum terjadi gangguan setelah sistem mengalami gangguan kecil. Analisis kestabilan *steady-state* menggunakan pendekatan model linear. Kestabilan *steady-state* pada sistem tenaga dapat disebut sebagai kestabilan sinyal kecil (*small signal stability*). Kestabilan *steady-state* merupakan sebuah fungsi dari kondisi operasi [1].

2.1.2 Kestabilan Transien

Kestabilan transien adalah kemampuan sistem tenaga untuk mencapai kondisi stabil operasi baru yang dapat diterima setelah sistem mengalami gangguan besar. Analisa kestabilan transien menggunakan pendekatan model nonlinear. Kestabilan transien pada sistem tenaga adalah respon output yang mencapai kondisi operasi *steady-state* yang diinginkan dan sistem yang dapat kembali ke posisi semula pada saat sistem mengalami gangguan. Kestabilan transien merupakan fungsi dari kondisi operasi dan gangguan [1].

2.1.3 Kestabilan Dinamik

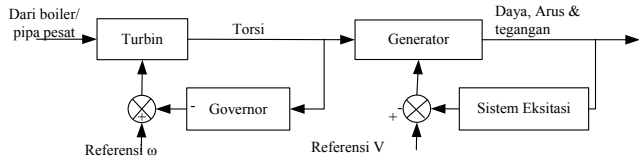
Kestabilan dinamik sistem tenaga listrik adalah kestabilan sistem tenaga listrik akibat adanya perubahan beban yang sangat kecil. [9]. Kestabilan dinamik ini sama dengan kestabilan *steady-state* namun yang membedakan yaitu sistem eksitasi, turbin, dan generator dimodelkan dengan memperhitungkan variasi medan magnet pada *air gap* mesin, sedangkan pada kestabilan *steady state* generator direpresentasikan sebagai sumber tegangan yang konstan atau tidak terjadi variasi medan magnet. Sumber lain menyebutkan bahwa kestabilan ini berarti kemampuan sistem untuk tetap mempertahankan sinkronisasi setelah *initial swing* atau periode *transient* hingga pada kondisi titik keseimbangan *steady state* [6].

2.2 Pemodelan Sistem Tenaga Listrik

Kesahihan analisa studi kestabilan dinamik (kestabilan di daerah sekitar titik kerja) jaringan tenaga listrik yang meliputi respons dinamik sistem tergantung pada kesahihan pemodelan sistem tersebut [1]. Untuk itu perlu memahami model dinamik sistem tenaga listrik yang meliputi generator sinkron, sistem eksitasi dan sistem governor turbin.

2.2.1 Pemodelan Linear Mesin Sinkron

Secara umum sistem pembangkit dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Sistem pembangkit listrik secara umum

Governor merupakan bagian dari unit pembangkit yang berfungsi untuk mengatur pemberian bahan bakar (uap atau air) pada sistem pembangkitan agar didapatkan kecepatan rotor yang stabil. Bila ada perubahan pada terminal keluaran generator akibat perubahan beban, maka akan terjadi fungsi *feedback* yang diatur oleh governor untuk menyesuaikan kembali putaran rotor.

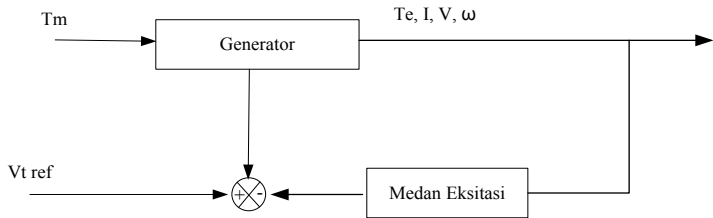
Sistem eksitasi adalah sistem pengendali keluaran generator, seperti tegangan, arus dan faktor daya. Bila ada perubahan pada keluaran generator tersebut, maka sistem eksitasi adalah yang berfungsi untuk mengendalikan generator agar menyesuaikan dan mencari titik keseimbangan baru.

Kedua peralatan sistem kontrol (governor dan sistem eksitasi) mempunyai perbedaan waktu respon. Governor mempunyai respon yang lambat terhadap perubahan beban, sedangkan sistem eksitasi responnya lebih cepat. Namun, karena governor mempunyai waktu respon yang lebih lambat, maka dalam studi kestabilan dinamik, yang diperhatikan adalah sistem eksitasi.

Seperti telah dijelaskan, bahwa dengan adanya perubahan beban atau gangguan kecil, akan berimbas terhadap perubahan kecepatan rotor. Perubahan kecepatan rotor ini secara langsung akan berakibat terhadap perubahan kecepatan sudut rotor sehingga berimbas pada keluaran generator. Jika kecepatan sudut rotor akan beresilasi di sekitar nilai sinkronnya, maka tegangan keluarannya akan beresilasi di sekitar harga nominalnya.

Maka dapat diambil kesimpulan bahwa kestabilan dinamik didapat dari adanya perubahan beban kecil atau gangguan yang mengakibatkan perubahan kecepatan sudut rotor dan tegangan keluaran namun sistem pembangkitannya yaitu governor dan sistem eksitasi mampu menyesuikannya dan menemukan titik keseimbangan baru [3, 10, 11].

Dinamika dasar dari sebuah mesin sinkron diperlihatkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Dinamika dasar generator sinkron

Suatu generator agar menghasilkan energi listrik, membutuhkan dua masukan, yang pertama torsi mekanik turbin (T_m) dan yang kedua fluksi medan magnet (E_{FD}). Torsi mekanik berfungsi sebagai pemutar generator sinkron. Fluksi medan magnet dihasilkan dari rangkaian medan melalui lilitan yang terdapat pada rotor. Dengan adanya torsi mekanik, rotor generator berputar dengan energi kinetik $\frac{1}{2} J\omega^2$ Joule. Momentum sudut

$$M = J \omega \quad (2.1)$$

Dengan ω (radian per detik) merupakan kecepatan sudut dan J adalah momen inersia (kg.m^2). Fluksi yang dibangkitkan oleh kumparan medan rotor dengan arus I_f akan berputar dan menginduksikan gaya gerak listrik pada kumparan stator sebesar:

$$E = c n \phi \quad (2.2)$$

Jika generator sinkron dibebani, maka akan mengalir arus generator ke beban. Arus ini menghasilkan fluksi pada stator dan akan menimbulkan torsi elektrik (T_e) melawan torsi mekanik. Pada kondisi tunak, jumlah torsi mekanik dengan torsi elektrik sama dengan nol ($T_m - T_e = 0$), dan generator akan berputar pada kecepatan sudut sinkron (ω_0). Sebelum mencapai kondisi tunak ada masa transien dan jumlah torsi ini menimbulkan torsi akselerasi dan akan menghasilkan percepatan atau perlambatan, persamaan gerak pada kondisi ini adalah:

$$T_a = T_m - T_e = J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} \quad (2.3)$$

Dengan

T_m = Torka mekanik turbin (N.m)

T_e = Torka elektrik rotor (N.m)

T_a = Percepatan torka (N.m)
 T = waktu (detik)
 δ_m = sudut mekanis rotor (rad-mekanik)
 J = total momen inersia mesin sinkron (kg.m²)

Persamaan (2.3) dikali dengan kecepatan sudut (ω_m), sehingga didapat persamaan :

$$\omega_m J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e = P_a \quad (2.4)$$

Dengan

P_m = Daya mekanik pada rotor (Watt)
 P_e = daya elektrik pada rotor (Watt)
 P_a = daya percepatan (Watt)
 ω_m = Kecepatan sudut sinkron (rad mekanik/s)

Persamaan di atas dapat diubah menjadi

$$\frac{2}{\omega_m} \left(\frac{1}{2} \omega_m^2 J \right) \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.5)$$

Jika persamaan (2.5) dibagi dengan rating MVA generator (S), maka :

$$\frac{2}{\omega_m} \frac{\left(\frac{1}{2} \omega_m^2 J \right)}{S} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e$$

(2.6)

Jika

$$H = \frac{\text{Energi kinetik pada kecepatan Sinkron (MJ)}}{\text{Rating MVA}}$$

$$H = \left(\frac{1}{2} \omega_m^2 J \right) \quad (2.7)$$

Maka persamaan (2.6) dapat disederhanakan menjadi

$$\frac{2H}{\omega_m} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \text{ (p.u)} \quad (2.8)$$

Dengan

$$\omega_m = \frac{2}{p} \omega_s \quad (2.9)$$

$$\delta_m = \frac{2}{p} \delta \quad (2.10)$$

- ω_s = kecepatan sudut sinkron (rad/s)
 δ = sudut elektrik rotor (rad)
 p = jumlah kutub generator

Persamaan (2.8) disebut dengan persamaan ayunan mesin yang merupakan persamaan dasar yang mengatur dinamika (gerak) perputaran mesin sinkron dalam studi kestabilan. Dari persamaan tersebut dapat diketahui bahwa perbedaan antara daya mekanik turbin dan daya elektrik generator menyebabkan sudut rotor mengalami percepatan atau perlambatan. Oleh karena mesin memiliki komponen torsi yang sebanding dengan kecepatan sudut, maka persamaan gerak rotor secara lengkap dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{Md^2\delta_m}{\omega_0 dt^2} + \frac{Dd\delta_m}{\omega_0 dt} = T_m - T_e \quad (2.11)$$

Dimana D merupakan koefisien redaman mesin. Suatu generator yang beroperasi pada kondisi tunak ($T_m=T_e$), kemudian terjadi penambahan beban kecil yang menyebabkan kenaikan fluksi medan stator dan perubahan E'_q . Perubahan kecil juga menyebabkan perubahan sudut mesin dan perubahan torsi elektrik, torsi elektrik akan naik dengan bertambahnya sudut mesin δ , dan E'_q , perubahan torsi elektrik ini dinyatakan,

$$\Delta T_e = \left(\frac{dT_e}{d\delta} \right) \Delta\delta + \left(\frac{dT_e}{dE'_q} \right) \Delta E'_q = K_1 \Delta\delta + K_2 \Delta E'_q \quad (2.12)$$

Dengan

$$\begin{aligned}
 K_1 = E_{q0} V_0 & \left(\frac{r_e \sin(\delta_0 - \alpha) + (X_e + X'_d) \cos(\delta_0 - \alpha)}{r_e^2 + (X_e + X'_d) + (X_q + X_e)} \right) \\
 + I_{q0} & \left(\frac{(X_e + X'_d)(X_q + X_e) \sin(\delta_0 - \alpha) - r_e (X_e - X'_d) \cos(\delta_0 - \alpha)}{r_e^2 + (X_e + X'_d) + (X_q + X_e)} \right) \quad (2.13)
 \end{aligned}$$

$$K_2 = \left(\frac{r_e E_{q0}}{r_e^2 + (X_e + X'_d) + (X_q + X_e)} \right) + i_{q0} \left(\frac{(X_q + X_e)(X_q - X'_d)}{r_e^2 + (X_e + X'_d) + (X_q + X_e)} \right)$$

.....(2.14)

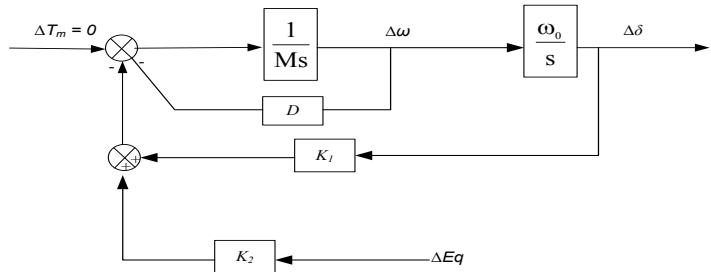
Jika torsi mekanik konstan, maka persamaan gerak putar rotor untuk perubahan beban kecil di sekitar kondisi itu adalah:

$$\frac{M d^2 \delta_m}{\omega_0 dt^2} + \frac{D d \delta_m}{\omega_0 dt} = -\Delta T_e \quad (2.15)$$

Jika didefinisikan $d/dt=S$ dan $d^2/dt^2=S^2$ maka persamaan di atas menjadi

$$\frac{M}{\omega_0} S^2 \Delta \delta + \frac{D}{\omega_0} S \Delta \delta = -\Delta T_e \quad (2.16)$$

Dinamika sebuah generator sinkron digambarkan dalam bentuk diagram pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Diagram blok model dinamika sebuah generator sinkron

Gambar 2.3 menggambarkan dinamika sistem sebuah generator sinkron, sehubungan dengan adanya perubahan beban kecil disekitar titik operasi pada kondisi operasi sistem. Pengaruh pembebanan beban kecil juga dirasakan oleh lilitan jangkar sehingga medan E'_q mengalami perubahan sebesar $\Delta E'_q$, besarnya perubahan tegangan medan ini dipengaruhi oleh perubahan sudut mesin ($\Delta \delta$) dan jika tegangan medan eksitasi konstan ($\Delta E_{FD}=0$), maka:

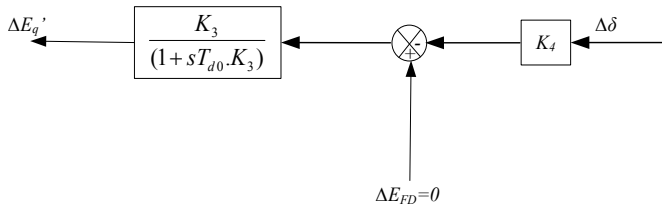
$$\Delta E'_q = -\frac{K_3 \cdot K_4 \cdot \Delta \delta}{(1 + s T_{d0} \cdot K_3)} \quad (2.17)$$

Berdasarkan persamaan 2.18 dan 2.19 K_3 dan K_4 diperoleh sebagai berikut

$$K_3 = \left(1 + \frac{(X_e + X'_d)(X_q - X'_d)}{r_e^2 + (X_e + X'_d) + (X_q + X_e)} \right)^{-1} \quad (2.18)$$

$$K_4 = \left(\frac{V_0(X_e + X'_d) \{ (X_q + X_e) \sin(\delta_0 - \alpha) - r_e \cos(\delta_0 - \alpha) \}}{r_e^2 + (X_e + X'_d) + (X_q + X_e)} \right)^{-1} \quad (2.19)$$

Hubungan di atas digambarkan dalam bentuk diagram pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Dinamika model reaksi jangkar terhadap perubahan sudut δ

Selanjutnya perubahan tegangan medan berpengaruh terhadap tegangan terminal generator begitu juga perubahan sudut mesin. Perubahan tegangan terminal akibat perubahan sudut mesin dan perubahan tegangan medan dinyatakan:

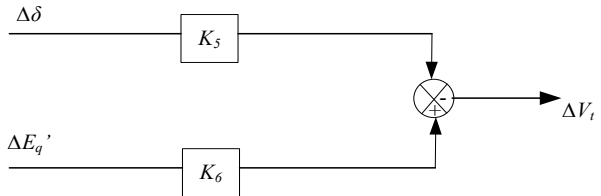
$$\Delta V_t = K_5 \Delta\delta + K_6 \Delta E'_q \quad (2.20)$$

Dengan

$$K_5 = \frac{V_D}{V_t} X_q \left(\frac{r_e V_0 \sin(\delta_0 - \alpha) + (X_e + X'_d) \cos(\delta_0 - \alpha)}{r_e^2 + (X_e + X'_d) + (X_q + X_e)} \right) + \frac{V_D}{V_t} X_d \left(\frac{r_e V_0 \cos(\delta_0 - \alpha) - V_0 (X_q + X_e) \sin(\delta_0 - \alpha)}{r_e^2 + (X_e + X'_d) + (X_q + X_e)} \right) \quad (2.21)$$

$$K_6 = \frac{V_D}{V_t} \left(1 - \frac{X'_d(X_q + X_e)}{r_e^2 + (X_e + X'_d) + (X_q + X_e)} \right) + \frac{V_D}{V_t} X_d \left(\frac{r_e}{r_e^2 + (X_e + X'_d) + (X_q + X_e)} \right) \quad (2.22)$$

Gambar 2.5 menunjukkan bentuk diagram dari persamaan diatas.



Gambar 2.5 Diagram mode tegangan

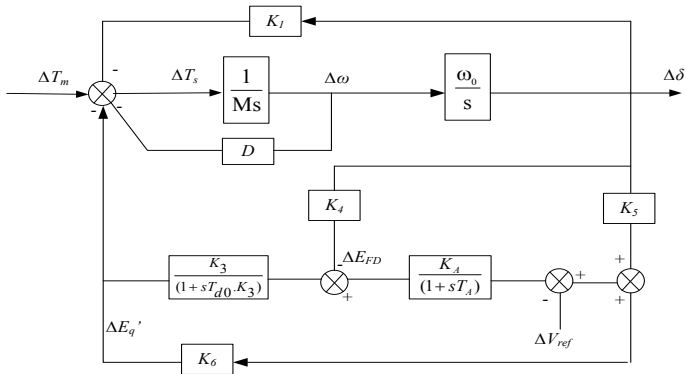
Automatic Voltage Regulator (AVR) yang dipasang pada terminal generator digunakan untuk mengatur tegangan medan eksitasi (E_{FD}), selisih keluaran tegangan terminal generator yang terjadi dengan tegangan yang diinginkan merupakan input bagi AVR untuk mengatur tegangan medan eksitasi. Jika perubahan medan eksitasi harus diperhitungkan ($E_{FD} \neq 0$), maka bentuk persamaan menjadi :

$$\Delta E'_q = \frac{-K_3(\Delta E'_q - K_4)}{1 + sT'_{d0} K_3} \quad (2.23)$$

Dengan,

$$\Delta E'_q = \frac{K_A}{1 + sT_A} \Delta V_t \quad (2.24)$$

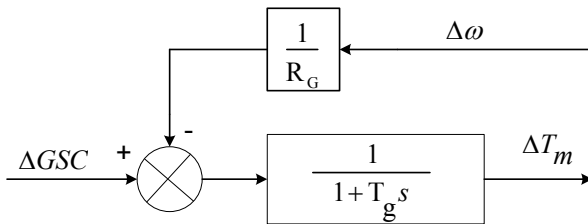
Jika model keseluruhan digabungkan, maka diperoleh model dinamika sebuah generator sinkron bentuk diagram pada Gambar 2.6



Gambar 2.6 Model linear sebuah generator sinkron

2.2.3 Pemodelan Governor [6,16]

Governor merupakan pengendali yang berfungsi untuk mengatur nilai torsi mekanik yang menjadi masukan generator. Besar perubahan torsi mekanik T_m tergantung pada konstanta *speed droop*, *transfer function* governor dan sumber energi. Perubahan nilai T_m dihasilkan oleh perubahan kecepatan ω , perubahan beban dan *speed reference* (*Governor Speed Changer*, GSC). Jika terjadi perubahan putaran rotor generator, maka governor akan memberi umpan balik untuk mencapai keseimbangan baru. Representasi governor ditunjukkan pada Gambar 2.7. Berdasarkan Gambar 2.7, perubahan kecepatan rotor generator $\Delta\omega$ atau ΔGSC dapat menghasilkan sebuah perubahan torsi mekanik mesin ΔT_m .



Gambar 2.7. Diagram blok Governor

Dalam model ini, diasumsikan ΔGSC adalah menggunakan sinyal unit step dan efek penggabungan sistem turbin dengan *speed* governor menghasilkan daya mekanik P_m yang dirumuskan sebagai berikut.

$$P_m = -\left[K_g / (1 + T_g s) \right] \Delta \omega \quad (2.25)$$

dengan,

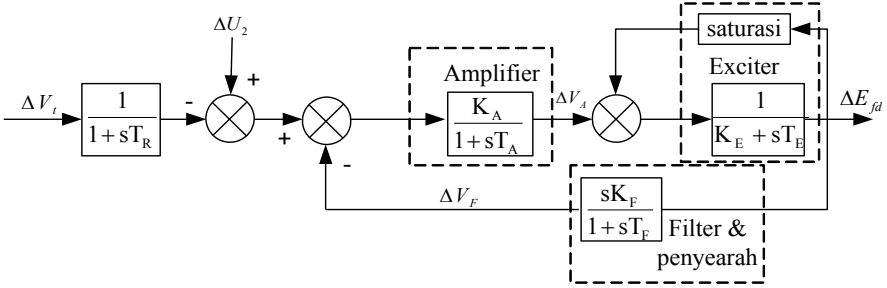
K_g	: Konstanta gain = $1/R_G$
T_g	: Governor time konstan
R_G	: Konstanta groop governor
ΔGSC	: Perubahan acuan kecepatan (<i>Governor Speed Changer</i>)

Dari diagram blok diatas dapat diperoleh persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \Delta T_m &= -\left(\frac{1}{R_G} \times \frac{1}{1 + T_g s} \right) \Delta \omega + \Delta GSC \\ (1 + T_g s) \Delta T_m &= -\frac{1}{R_G} \Delta \omega + \Delta GSC \\ \Delta T_m + T_g s \Delta T_m &= -\frac{1}{R_G} \Delta \omega + \Delta GSC \\ T_g s \Delta T_m &= -\frac{1}{R_G} \Delta \omega + \Delta GSC - \Delta T_m \\ \Delta T_m s &= -\frac{1}{R_G T_g} \Delta \omega + \frac{\Delta GSC}{T_g} - \frac{\Delta T_m}{T_g} \\ \Delta \dot{T}_m &= -\frac{1}{R_G T_g} \Delta \omega + \frac{\Delta GSC}{T_g} - \frac{\Delta T_m}{T_g} \end{aligned} \quad (2.26)$$

2.2.3 Pemodelan Sistem Eksitasi

Model sistem eksitasi dalam pengaturan tegangan mengacu pada model IEEE tipe 1 [2,7] seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8



Gambar 2.8 Diagram Blok Sistem Eksitasi

Parameter sistem ekstasi di atas dapat dijelaskan sebagai berikut.

- K_A : konstanta penguatan amplifier
- K_F : konstanta penguatan filter
- K_E : konstanta penguatan exciter
- T_A : waktu tanggap amplifier
- T_E : waktu tanggap exciter
- T_F : waktu tanggap filter
- ΔU_2 : perubahan sinyal kontrol mesin

Harga konstanta T_R biasanya kecil sekali, sehingga dapat diabaikan.

Dengan mengabaikan efek saturasi, maka dari Gambar 2.8 dapat diperoleh persamaan-persamaan sebagai berikut.

$$\Delta E_{fd} = \frac{1}{K_E + sT_E} \Delta V_A$$

$$K_E \Delta E_{fd} + T_E \dot{\Delta E}_{fd} = \Delta V_A$$

$$\Delta \dot{E}_{fd} = \frac{\Delta V_A}{T_E} - \frac{K_E \Delta E_{fd}}{T_E} \quad (2.27)$$

$$\Delta V_F = \frac{sK_F}{1 + sT_F} \Delta E_{fd}$$

$$\begin{aligned}\Delta V_F + T_F \dot{\Delta V}_F &= K_F \dot{\Delta E}_{fd} \\ \dot{\Delta V}_F &= \frac{K_F}{T_F} \dot{\Delta E}_{fd} - \frac{\Delta V_F}{T_F} \\ \dot{\Delta V}_F &= \frac{K_F \Delta V_A}{T_E T_F} - \frac{K_E K_F \Delta E_{fd}}{T_E T_F} - \frac{\Delta V_F}{T_F}\end{aligned}\quad (2.28)$$

$$\Delta V_A = \frac{K_A}{1 + s T_A} (\Delta U_2 - \Delta V - \Delta V_F)$$

$$\Delta V_A + T_A \dot{\Delta V}_A = K_A \Delta U_2 - K_A \Delta V - K_A V_F$$

$$T_A \dot{\Delta V}_A = K_A \Delta U_2 - K_A \Delta V - K_A V - \Delta V_A$$

$$\dot{\Delta V}_A = \frac{K_A}{T_A} \Delta U_2 - \frac{K_A K_5}{T_A} \Delta \delta - \frac{K_A K_6}{T_A} \Delta E'_q - \frac{K_A}{T_A} \Delta V_F - \frac{\Delta V_A}{T_A}\quad (2.29)$$

dengan,

ΔV_A = perubahan tegangan amplifier

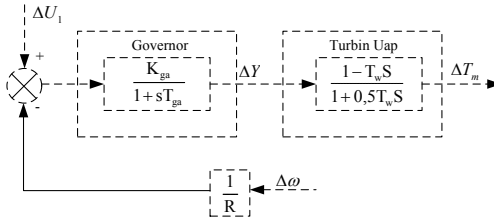
ΔV_F = perubahan tegangan keluaran penyearah

2.2.4 Pemodelan turbin dan Sistem Pengendaliannya

Model turbin dan sistem pengendaliannya yang dipakai disini adalah model turbin uap dan pengendaliannya, mengaju pada model standar IEEE [2,8].

Turbin uap memiliki input berupa energi mekanik yang disalurkan dari ketel uap dan memiliki output energi (torka) mekanik yang digunakan untuk menggerakkan turbin uap.

Model turbin uap dalam bentuk linier dapat dilihat pada Gambar 2.9



Gambar 2.9 Diagram Blok Turbin Uap dan Sistem Pengendalinya

Parameter turbin uap diatas dapat dijelaskan sebagai berikut:

- ΔY : perubahan tinggi katup
- T_w : waktu tanggap turbin uap
- T_{ga} : waktu tanggap pengatur turbin uap
- K_{ga} : penguatan pengatur turbin uap
- R : konstanta pengatur turbin uap
- ΔU_1 : perubahan sinyal kontrol umpan balik

Dari diagram blok tersebut dapat diperoleh persamaan

$$\Delta Y = \frac{K_{ga}}{1 + sT_{ga}} \left(\Delta U_1 - \frac{\Delta \omega}{R} \right)$$

$$\Delta Y + T_{ga} + \Delta \dot{Y} = K_{ga} \Delta U_1 - \frac{K_{ga}}{R} \Delta \omega$$

$$\Delta \dot{Y} = \frac{K_{ga} \Delta U_1}{T_{ga}} - \frac{K_{ga} \Delta \omega}{T_{ga} R} - \frac{\Delta Y}{T_{ga}} \tag{2.30}$$

$$\Delta T_m = \frac{1 - sT_w}{1 + 0,5sT_w} \Delta Y$$

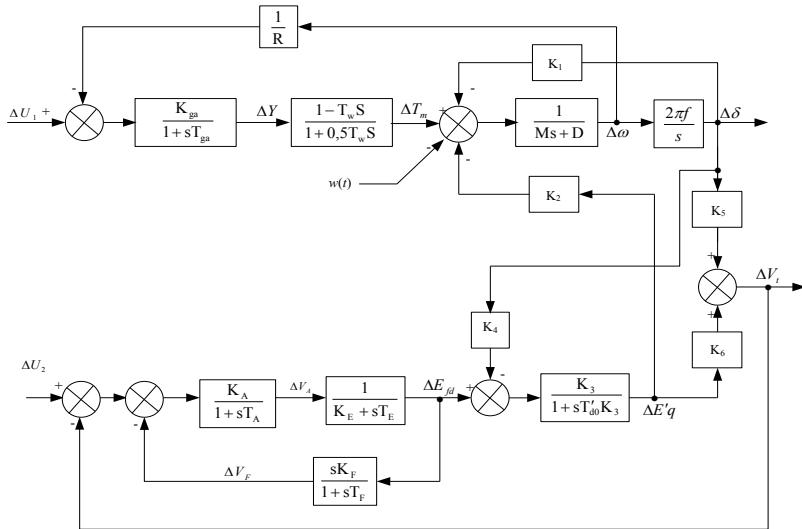
$$\Delta T_m + 0,5T_w \Delta \dot{T} = \Delta Y - T_w \Delta \dot{Y}$$

$$\Delta T_m = \frac{\Delta Y}{0,5T_w} - 2\Delta \dot{Y} - \frac{\Delta T_m}{0,5T_w}$$

$$\dot{\Delta T}_m = \frac{2(T_{ga} + T_w)}{T_{ga} T_w} \Delta Y - \frac{2K_{ga} \Delta U_1}{T_{ga}} - \frac{2\Delta T_m}{T_w} + \frac{2K_{ga} \Delta \omega}{T_{ga} R} \quad (2.31)$$

2.2.5 Pemodelan Sistem Tenaga Listrik Mesin Tunggal

Dari perumusan blok diagram yang dijabarkan diatas, maka dapat dibentuk model linier *Single Machine Infinite Bus* seperti pada Gambar 2.10 [14]



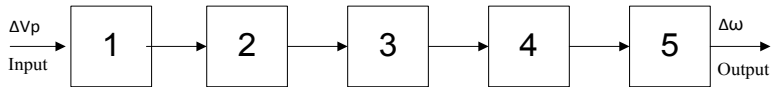
Gambar 2.10 Model linier *Single Machine Infinite Bus*

2.3 Power System Stabilizer

Kestabilan dinamik dalam sistem tenaga listrik ditentukan oleh kemampuan generator untuk merespon perubahan beban yang terjadi. Perubahan beban yang terjadi secara tiba-tiba dan periodik tidak dapat direspon dengan baik oleh generator sehingga dapat berdampak

pada kestabilan dinamik pada sistem. Respon ini dapat menyebabkan osilasi frekuensi dalam waktu yang lama, dan menyebabkan penurunan kemampuan transfer daya. Hal ini dapat diatasi dengan penambahan peralatan bantu yang disebut *Power System Stabilizer* (PSS). Dengan penambahan PSS, maka kestabilan dinamik dari sistem akan lebih baik [12].

PSS merupakan peralatan yang menghasilkan sinyal kontrol untuk diumpangkan pada sistem eksitasi. PSS memiliki fungsi dasar menambah batas kestabilan dengan mengatur kinerja eksitasi rotor generator sinkron. Osilasi terjadi dengan simpangan 0,2-0,5 Hz. Untuk memberikan peredaman, PSS harus memberikan komponen torsi elektrik pada mesin yang se-phase [1]. Model PSS terdiri dari beberapa blok seperti pada Gambar 2.11



Gambar 2.11 Komponen PSS

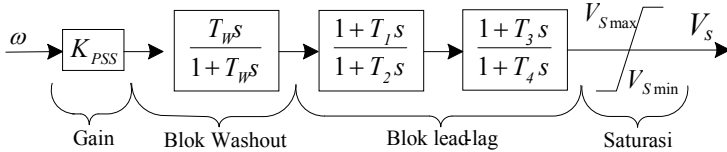
Keterangan :1.

1. *Tranducer*
2. *Rangkaian Fase Lag/Lead*
3. *Amplifier*
4. *Rangkaian Washout*
5. *Limiter*

Metode desain PSS secara umum melibatkan frekuensi respon yang berdasarkan pada konsep peningkatan redaman torsi. Transfer function PSS ditala untuk menyediakan karakteristik *phase-lead* yang tepat untuk mengkompensasi *phase lag* antara frekuensi input *automatic voltage regulator* Δv_s dan torsi elektrik [12,8]. Sehingga, komponen torsi elektrik sephase dengan variasi kecepatan untuk memperbaiki redaman. Pemodelan matematis PSS dinyatakan dalam persamaan 2.30

$$V_s = K_{pss} \frac{T_{w^s}}{1+T_{w^s}} \left[\frac{(1+T_{1^s})(1+T_{3^s})}{(1+T_{2^s})(1+T_{4^s})} \right] \omega \quad (2.32)$$

Dari persamaan diatas dengan asumsi bahwa output dari PSS adalah V_s dengan Input $\Delta\omega$, maka diperoleh blok diagram blok pada Gambar 2.12



Gambar 2.12 Blok diagram PSS

2.3.1 Blok Gain

Berfungsi untuk mengatur besar penguatan agar diperoleh besaran torsi sesuai dengan yang diinginkan .

2.3.2 Blok Washout

Washout berfungsi untuk menyediakan bias *steady state* output PSS yang akan memodifikasi tegangan terminal generator. PSS diharapkan hanya dapat merespon variasi *transient* dari sinyal kecepatan rotor generator dan tidak untuk sinyal DC *offset*. *Washout* bekerja sebagai *high pass filter* yang akan melewatkan semua frekuensi yang diinginkan. Apabila hanya model lokal yang diinginkan, nilai T_w dapat dipilih dalam range 1 sampai 2. Jika mode inte area juga ingin diredam, maka nilai T_w harus dipilih dalam interval 10 sampai 20. Nilai T_w yang lebih tinggi dapat memperbaiki respon tegangan sistem selama *island operasi*.

2.4.3 Blok Lead-Lag

Lead-Lag berfungsi sebagai penghasil karakteristik *phase-lead* yang sesuai untuk mengkompensasi *phase-lag* antara masukan eksitasi dan torsi generator.

2.4.4 Limiter

Output PSS dibatasi agar aksi PSS pada AVR sesuai dengan yang diharapkan. Sebagai contoh pada saat terjadi pelepasan beban AVR beraksi untuk mengurangi tegangan terminal generator pada saat PSS menghasilkan sinyal kontrol untuk menaikkan tegangan (karena kecepatan rotor generator bertambah besar pada saat terjadi pelapasan beban). Pada kondisi ini sangat diperlukan untuk menonaktifkan PSS.

Hal ini menunjukkan pentingnya pembatasan nilai sinyal output PSS yang dapat dilakukan oleh *blok limiter*. Perlu diperhatikan bahwa, nilai batasan negatif yang tinggi dapat mengganggu kestabilan *swing* yang pertama.

2.4 Bats Algorithm

Bat Algorithm (BA) merupakan algoritma *metaheuristik* yang terinspirasi dari perilaku kelelawar. BA diperkenalkan oleh Xin She Yang pada tahun 2010 [4].

2.4.1 Prilaku Kelelawar

Kelelawar merupakan hewan yang sangat mengagumkan. Kelelawar merupakan satu-satunya binatang mamalia yang memiliki sayap untuk terbang dan mempunyai kemampuan canggih dalam ekolokasi. Kelelawar menggunakan tipe sonar yang disebut ekolokasi untuk mendeteksi makanan, menghindari rintangan dan mencari sarangnya dalam kegelapan. Kelelawar memancarkan pulsa bunyi dengan frekuensi tinggi dan mendengarkan gema yang memantul kembali dari objek sekitarnya. Pulsa yang dipancarkan oleh kelelawar bervariasi dan dapat dihubungkan dengan strategi berburu hewan tersebut tergantung jenis spesies kelelawar itu. Kebanyakan kelelawar menggunakan frekuensi pendek sinyal termodulasi sekitar satu oktaf, sementara yang lain lebih sering menggunakan sinyal frekuensi konstan untuk ekolokasi. Sinyal bandwidth/lebar pita dapat bervariasi tergantung pada spesies dan seringkali dapat meningkat secara harmonik.

Meskipun masing-masing pulsa hanya berlangsung beberapa seper seribu detik (sekitar 8 sampai 10 ms), namun kelelawar memiliki frekuensi konstan di wilayah 25 kHz sampai 150 kHz. Kisaran frekuensi sebagian besar spesies kelelawar berada pada 25 kHz dan 100 kHz, meskipun beberapa spesies dapat memancarkan frekuensi hingga 150 kHz. Setiap pancaran suara ultrasonik 5 ms sampai 20 ms, kelelawar dapat memancarkan frekuensi 10 ms sampai 20 ms. Ketika berburu mangsa, tingkat emisi pulsa dapat meningkat hingga sekitar 200 pulsa per detik. Bahkan dalam studi menunjukkan waktu integrasi telinga kelelawar biasanya sekitar 300 mikro detik hingga 400 mikro detik. Kecepatan suara di udara $v = 340$ m/s, dengan λ panjang gelombang dari pancaran suara ultrasonik dengan frekuensi f konstan didapatkan λ dimana jarak antara 2 mm sampai 14 mm dari frekuensi 25 kHz sampai 150 kHz. Panjang gelombang tersebut dalam ukuran mangsa yang sama.

Dengan kemampuan ekolokasi yang canggih kelelawar dapat terbang di kegelapan malam mencari makanan tanpa menabrak sesuatu apapun. Dari karakteristik ekolokasi kelelawar tersebut, dapat dikembangkan algoritma yang terinspirasi dari perilaku kelelawar didasarkan pada tiga aturan ideal sebagai berikut :

- a. Kelelawar menggunakan ekolokasi untuk mensensor jarak dan membedakan antara makanan dan rintangan bahkan didalam kegelapan.
- b. Kelelawar terbang secara acak untuk mencari makanan dengan kecepatan v_i pada posisi x_i dengan frekuensi tetap f_i , variasi panjang gelombang λ_i , dan tingkat kebisingan (A_i) untuk mencari makanan.
- c. Tingkat kebisingan dapat bervariasi melalui beberapa cara, dapat diasumsikan tingkat kebisingan bervariasi dari maksimum (positif) (A_0) ke nilai konstan minimum (A_{min}).

2.4.2 Gerakan Kelelawar

Untuk mensimulasikan *Bat Algorithm* kita telah menetapkan kaidah dimana posisi (x_i), kecepatan (v_i), dimensi (d_i) untuk mencari jarak/ruang yang diperbarui. Solusi baru adalah x_i^t dan kecepatan v_i^t waktu t didapat persamaan berikut ini

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min}) \beta, \quad (2.33)$$

$$v \frac{t+1}{i} = v \frac{t}{i} + (x \frac{t}{i} - x_*) f_i, \quad (2.34)$$

$$x \frac{t+1}{i} = v \frac{t}{i} + v \frac{t}{i}, \quad (2.35)$$

$\beta \in [0,1]$ merupakan vektor acak yang diambil dari distribusi seragam. Disini x_* lokasi terbaik dari (solusi) seluruh kelelawar setelah membandingkan semua solusi diantara semua kelelawar n pada setiap itersi t . Sebagai hasil perkalian antara $\lambda_i f_i$ adalah kenaikan kecepatan. f_i atau (λ_i) dapat digunakan untuk menyesuaikan perubahan kecepatan sementara λ_i (or f_i) memperbaiki factor yang lain, tergantung jenis persoalan yang akan diselesaikan. Dalam implementasi, kita akan menggunakan $f_{min} = 0$ dan $f_{max} = 0$ (1), tergantung dari ukuran masalah

yang dominan pada penyelesaian. Tahapan awal setiap kelelawar diambil frekuensi acak secara seragam dari $[f_{max}, f_{min}]$.

Untuk bagian pencarian lokasi, salah satu solusi yang dipilih adalah diantara solusi yang terbaik, untuk mendapatkan solusi baru setiap kelelawar membangkitkannya ditempat menggunakan *random walk*

$$x_{new} = x_{old} + \varepsilon A^t, \quad (2.36)$$

dimana ε merupakan vektor acak yang diambil dari $[-1, 1]$, sementara itu $A^t = \langle A_i^t \rangle$ adalah jumlah kenyaringan semua kelelawar setiap waktu.

2.4.3 Kebisingan dan Pulsa yang Dipancarkan

Untuk Kebisingan A_i dan pulsa yang dipancarkan setiap kelelawar selalu diperbarui sesuai dengan proses iterasi. Kebisingan pada kelelawar mengalami penurunan apabila kelelawar telah menemukan mangsa. Sementara pancara pulsa meningkat, sementara itu kebisingan dapat dipilih sesuai dengan nilai yang tepat. Sebagai contoh kita dapat menggunakan $A_0 = 100$ dan $A_{min} = 1$. Untuk mempermudah kita juga menggunakan $A_0 = 1$ dan $A_{min} = 0$, dengan asumsi $A_{min} = 0$ berarti bahwa kelelawar baru saja menemukan mangsa dan untuk sementara berhenti memancarkan suara. Sekarang persamaan dapat disusun sebagai berikut

$$A \frac{t+1}{i} = \alpha A \frac{t}{i}, \quad (2.37)$$

$$r \frac{t}{i} = r \frac{0}{i} [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (2.38)$$

dimana α dan γ adalah konstan. Untuk setiap $0 < \alpha < 1$ dan $\gamma > 0$, dapat dibuat persamaan

$$A \frac{t}{i} \rightarrow 0, r \frac{t}{i} \rightarrow r \frac{0}{i}, \text{sepanjang } t \rightarrow \infty \quad (2.39)$$

Dalam kasus yang paling sederhana, kita bisa menggunakan $\alpha = \gamma$ dan bisa menggunakan $\alpha = \gamma = 0.9$.

2.4.4 Pseudo Code dari BA

Langkah utama dari BA adalah dimulai dari inialisasi populasi sekumpulan kelelawar yang masing – masing ditentukan oleh posisi awal sebagai solusi awal. Populasi sekumpulan kelelawar membangkitkan pulsa dan kebisingan secara acak serta menentukan frekuensi. Selama proses berulang/*looping* kelelawar akan bergerak dari solusi awal menuju solusi terbaik. Setelah pindah, jika ada kelelawar menemukan solusi yang lebih baik, maka kelelawar akan memperbarui tingkat pancaran pulsa dan kebisingan. Selama proses iterasi solusi terbaik selalu diperbarui. Proses iterasi diulang sampai kriteria berhenti dan kriteria solusi terbaik telah terpenuhi. Solusi terbaik adalah solusi bagi permasalahan yang diselesaikan oleh melalui proses algoritma ini. Gambar 2.13 adalah *Flow Chart Bat Algorithm*

Berikut ini adalah *Pseudo code* dari *Bat Algorithm* (BA) adalah sebagai berikut [4] :

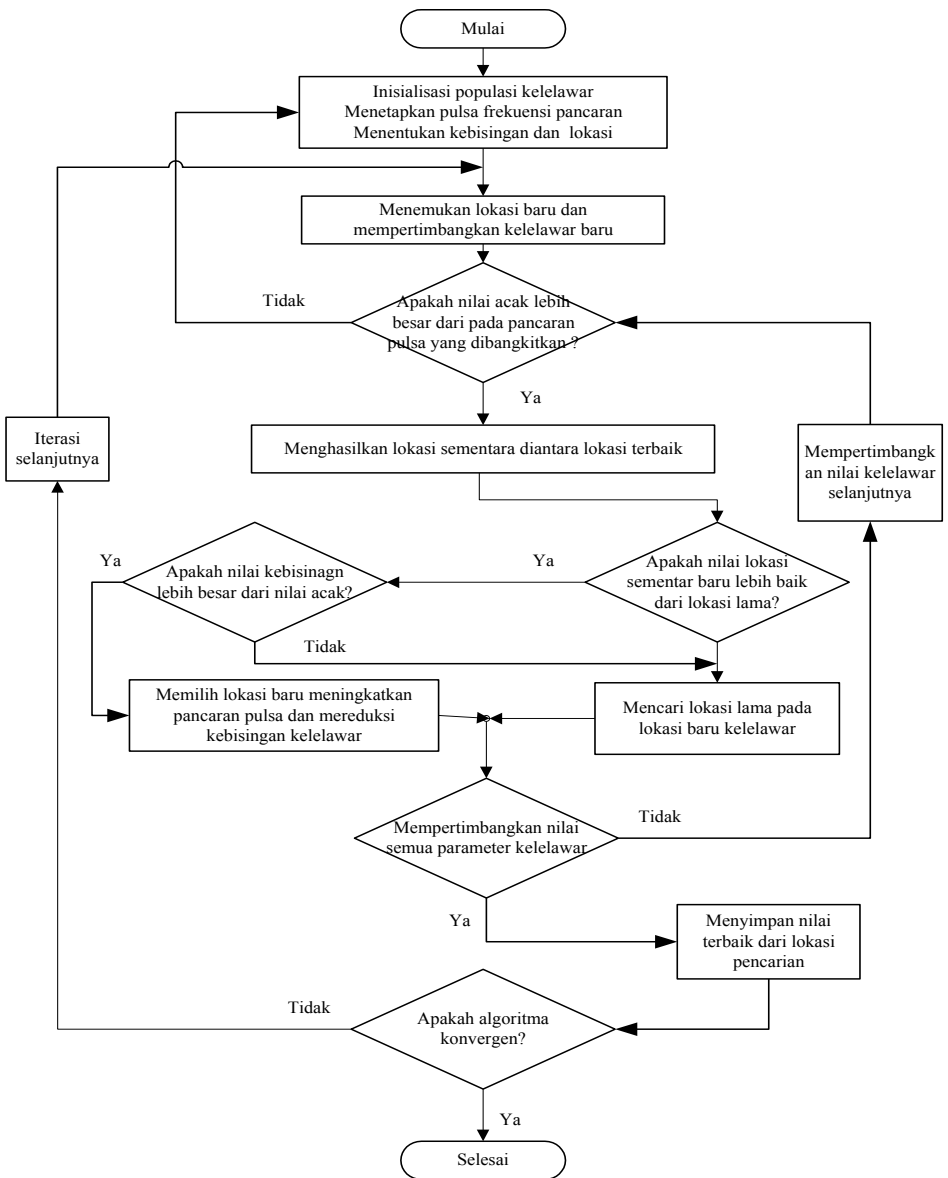
Fungsi Objektif $f(x)$, dengan $x=(x_1, \dots, x_n)T$
Inialisasi populasi Bat algorithm x_i , $i = 1, 2, \dots, n$, dan v_i
secara acak
Definisikan frekuensi f_i *dengan merujuk pada* x_i
Inialisasi tingkat pulsa r_i *dan loudness (kebisingan)* A_i *secara acak*
While ($t < \text{Maksimum Iterasi}$)
 Bangkitkan solusi baru dengan mengatur frekuensi
 Perbarui kecepatan dan lokasi/ solusi
 menggunakan persamaan berikut,

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) \beta,$$

$$v_i^{t+1} = v_i^t + (x_i^t - x_i^*) f_i,$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^t,$$
 if $\text{rand} > r_i$
 Pilih solusi dari yang terbaik
 Bangkitkan solusi lokal dari solusi terbaik
 yang terpilih
 end if
 if ($\text{rand} < A_i$) && ($f(x_i) < f(x^*)$)

Didapatkan solusi baru
Naikkan nilai ri dan kurangi nilai Ai
end if
end while



Gambar 2.13 Flowchart Bat Algorithm

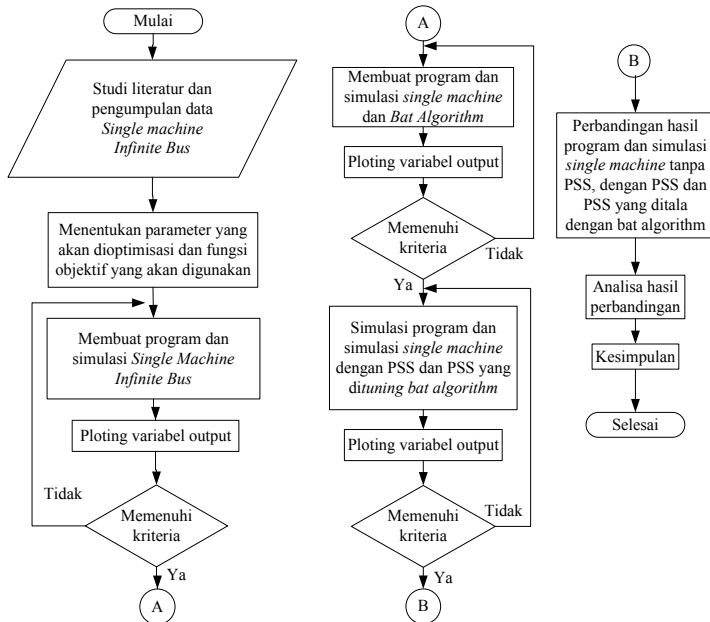
[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 3 OPTIMISASI PSS MENGGUNAKAN BA

Pada pengerjaan Tugas Akhir ini, kontrol *Power System Stabilizer* (PSS) digunakan pada sistem mesin tunggal / *Single Machine Infinite Bus* (SMIB). Untuk mendapatkan kordinasi yang optimal, parameter PSS dioptimisasi menggunakan algoritma kelelawar/*Bat Algorithm* (BA). Simulasi digunakan menggunakan *softwere* MATLAB.

3.1 Algoritma Penyelesaian

Prosedur pengerjaan penyelesaian Tugas Akhir ini ditunjukkan dalam diagram *flowchart* pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 *Flowchart* Pengerjaan Tugas Akhir

Pengerjaan tugas akhir ini dimulai dengan mengumpulkan referensi dengan pokok bahasan sistem tenaga listrik *Single Machine Infinite Bus* (SMIB), kestabilan sistem tenaga listrik, PSS dan *Bat Algorithm*. Langkah selanjutnya memodelkan sistem tenaga listrik

SMIB disimulink dengan parameter yang sudah didapatkan dari literatur. Melakukan pemodelan sistem tanpa PSS sampai diketahui respon dari sistem. Setelah itu dilakukan pemodelan dengan menggunakan PSS konvensional. PSS konvensional dipasang pada SMIB. Sistem yang dipasang PSS konvensional dioptimisasi dengan BA untuk mendapatkan respon *overshoot* dan *settling time* yang baik. Analisa data dari sistem yang dibandingkan yaitu sistem tanpa PSS, sistem dengan PSS dan sistem dengan PSS yang ditala dengan BA. Respon sistem yang diamati adalah respon perubahan frekuensi dan respon perubahan sudut rotor akibat perubahan beban 0.01 p.u dan 0.05 p.u. Dari hasil respon sistem akan dianalisa tentang penggunaan PSS dan PSS yang ditala dengan metode optimisasi yaitu metode BA untuk memperbaiki nilai *overshoot* dan *settling time*. Pemasangan PSS dan pengerjaan akan dijelaskan dalam sub bab berikut ini.

3.1.1 Data sistem *Single machine Infinte Bus* (SMIB) [9]

Pada tugas akhir ini yang disimulasikan adalah SMIB. Model sistem dapat dilihat pada Gambar 2.9. Parameter sistem ditunjukkan pada tabel 3.1 sampai tabel 3.5

Tabel 3.1. Data Pembangkit

Pembangkit	Pembangkitan	
	MW	Mvar
Generator	3180	917,3

Tabel 3.2 Parameter Dinamik Sistem

Pembangkit	Xq (p.u)	Xq 1 (p.u)	Xd (p.u)	Xd 1 (p.u)
Generator	2,19	0,49	2,23	0,3

Tabel 3.3 Data Saluran

Saluran	R+JX (p.u)
	0,004435823+j0,049624661

Tabel 3.4 Governor dan Eksitasi

Pembangkit	H (det)	K_g (p.u)	T_g (p.u)	K_A (p.u)	T_A (det)	Td0 (det)
Generator	5,19	20	1	400	0,05	9,45

Tabel 3.5 Data Beban

Beban	Daya	
	P(MW)	Q(MVAR)
L	448	55

3.1.2 Pemodelan Sistem

Pemodelan SMIB ini dibentuk dalam model Philips Heffron. Penempatan *power system stabilizer* dipasang pada generator. Model dari SMIB ini dikerjakan dalam bentuk program *simulik* sedangkan analisa parameter digunakan menggunakan *m-file* di Matlab.

3.2 State Space

Pemodelan matriks keadaan (*state space*) ini berfungsi untuk mempermudah dalam penyelesaian orde tinggi dari rumus matematis sistem. Penggunaan *state space* ini juga dapat digunakan untuk melihat respon dari sistem.

3.3 Stabilitas [6,16]

Analisis stabilitas disini salah menggunakan nilai *eigenvalue*. Analisis ini juga dapat mengindikasikan nilai dari osilasi rotor. Dalam model analisis ini sistem tenaga listrik dimodelkan secara matematik. Selanjutnya model ini diubah kedalam matriks keadaan. Persamaan matriks secara lengkap ditunjukkan oleh persamaan berikut

$$\Delta \dot{x} = \mathbf{A}\Delta x + \mathbf{B}\Delta u \quad (3.1)$$

$$\Delta y = \mathbf{C}\Delta x + \mathbf{D}\Delta u \quad (3.2)$$

Dengan

- Δx = Matriks keadaan
- Δy = Matriks variabel output
- u = Matriks variabel input
- A = Matriks sistem

- B = Matriks input
- C = Matriks pengukuran
- D = Matriks input untuk output

Kodisi stabil dari sistem dapat dilihat dengan persamaan

$$\det(sI-A) = 0 \tag{3.3}$$

dengan I adalah matriks identitas dan s adalah eigenvalue dari matriks A. Jumlah *eigenvalue* dari sistem sama dengan ukuran matriks. Komponen *eigenvalue* terdapat bagian real dan imajiner Pengecekan kestabilan sistem ini digunakan untuk mengetahui kestabilan sistem sebelum ada gangguan dan dapat dipasang peralatan kontrol. Komponen *eigenvalue* yaitu

$$\lambda = \sigma + \Omega \tag{3.4}$$

Dengan

- λ = Eigenvalue
- σ = Komponen riil dari *eigenvalue*
- Ω = Komponen imajiner dari *eigenvalue*

Bagian real merupakan *exponential variation* dan bagian imajiner merupakan mode *oscillation*, sedangkan sistem dikatakan stabil jika bagian *eigenvalue* bagian real bernilai negatif[1,16]. Sedangkan untuk mengetahui nilai redaman maka persamaan 3.5 sebagai berikut

$$\xi = \frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \Omega^2}} \tag{3.5}$$

sedangkan untuk mengetahui sistem secara keseluruhan dapat diketahui dari nilai CDI (*Comprehensive Damping Index*) yang dirumuskan dengan persamaan 3.6

$$CDI = \sum_{i=1}^n (1 - \xi_i) \tag{3.6}$$

Dengan,

- ξ = Damping ratio
- n = Jumlah *eigenvalue*

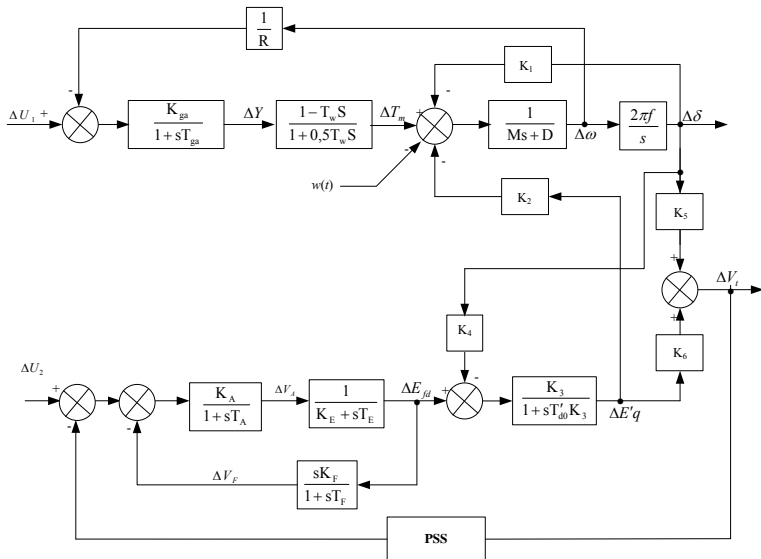
3.2 Penambahan PSS pada SMIB

Sistem yang digunakan dalam simulasi tugas akhir ini adalah sistem SMIB yang dipasang dengan PSS. PSS berfungsi untuk

menghasilkan sinyal kontrol untuk diumpankan pada sistem eksitasi. Untuk meredam osilasi frekuensi dan sudut rotor ke kondisi yang stabil maka harus ditentukan parameter dari PSS tersebut. Pada gambar 3.2 sistem SMIB yang dipasang PSS. Data parameter PSS yang belum dioptimisasi ditunjukkan pada Tabel 3.6 [15]

Tabel 3.6 Data parameter PSS

Parameter PSS	Nilai
K_{pss}	10,62
T_w	1,00
T_1	0,911
T_2	0,034
T_3	0,071
T_4	0,200



Gambar 3.2 sistem SMIB dengan PSS

Simulasi dilakukan dengan memasang PSS pada SMIB. Dalam simulasi diamati respon perubahan frekuensi dan respon perubahan sudut rotor saat terjadi gangguan perubahan beban pada pembangkit sebesar 0,01 p.u dan 0,05 p.u

3.4 Penalaan parameter PSS menggunakan BA.

Untuk mencari parameter PSS yang optimal maka digunakan BA untuk menala parameter PSS (K_{pss} , T_w , T_1 , T_2 , T_3 , dan T_4). Hasil dari penalaan ini kemudian dianalisa untuk mendapatkan respon yang baik. Fungsi objektif yang digunakan untuk menguji kestabilan sistem adalah *Comprehensive Damping Index* (CDI). Parameter BA yang digunakan dalam metode optimisasi ini secara lengkap ditunjukkan dalam Tabel 3.7.

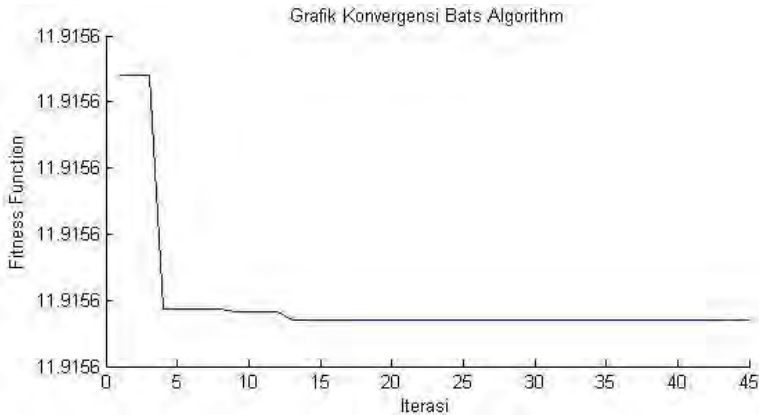
Tabel 3.7 Data Parameter BA

Parameter BA	Nilai
Ukuran populasi	35
Kebisingan	0,5
Rasio pulsa	0,6
Alpha = Gamma	0,9
Frekuensi minimum	0
Frekuensi maksimum	100
Jumlah Iterasi	45

Simulasi yang dihasilkan yaitu membandingkan sistem tanpa PSS, sistem dengan PSS dan sistem dengan PSS yang ditala menggunakan BA. Respon sistem yang diamati adalah respon perubahan frekuensi dan respon perubahan sudut rotor. Dari hasil respon tersebut penggunaan metode optimisasi PSS dengan BA berfungsi untuk memperbaiki nilai *overshoot* dan *settling time*. Tabel 3.8 merupakan hasil simulasi optimisasi parameter PSS menggunakan BA. Sedangkan Gambar 3.3 merupakan grafik konvergensi yang didapat dari hasil simulasi penalaan parameter PSS dengan BA.

Tabel 3.8 Hasil optimisasi parameter PSS menggunakan BA

Kpss	Tw	T1	T2	T3	T4
6,0492	0,4149	0,1394	0,6891	0,5346	0,6131



Gambar 3.3 Grafik konvergensi BA

Simulasi dilakukan dengan 45 kali iterasi. Fungsi objektif mencapai nilai terbaik pada iterasi ke 13. Fungsi objektif terbaik menunjukkan bahwa populasi telah menemukan posisi terbaik (solusi terbaik). Hal tersebut merupakan indikator penalaan PSS yang optimal.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

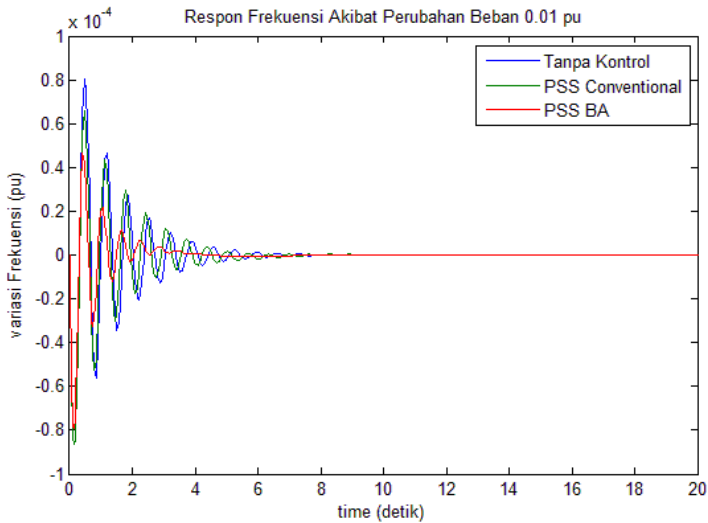
Pada bab ini berisi tentang simulasi dan analisis hasil simulasi dari pemodelan sistem SMIB. Simulasi ini membandingkan antara sistem SMIB tanpa PSS, sistem SMIB dengan PSS dan sistem SMIB dengan PSS yang ditala menggunakan BA. Respon yang dianalisis dari simulasi ini adalah *overshoot* dan *settling time* dari respon perubahan frekuensi dan respon perubahan sudut rotor pada sistem SMIB.

4.1 Respon Perubahan Frekuensi

Simulasi sistem SMIB tanpa PSS, sistem SMIB dengan PSS dan sistem SMIB dengan PSS yang ditala menggunakan BA diberi gangguan sebesar 0,01 p.u. Respon sistem diamati dalam waktu 20 detik. Hasil respon berupa perubahan frekuensi dijelaskan dalam sub bab berikut.

4.1.1 Respon Frekuensi akibat Perubahan Beban 0,01 p.u

Gambar 4.1 merupakan garfik respon perubahan frekuensi dari sistem. Dari hasil gambar tersebut menunjukkan bahwa nilai perbandingan *overshoot* dan *settling time* dari masing-masing sistem. Sistem SMIB tanpa PSS *overshoot* dan *settling time* masing-masing sebesar -0,0008668 p.u dan 5,61 detik. Sistem SMIB dengan PSS *overshoot* dan *setting time* masing – masing sebesar p.u -0,00086712 dan 6,06 detik. Sistem SMIB dengan PSS yang ditala dengan BA *overshoot* dan *settling time* sebesar -0,00007931 p.u dan 3,56 detik. Hal tersebut membuktikan bahwa PSS yang ditala menggunakan BA mampu meredam osilasi frekuensi akibat perubahan beban yang terjadi dalam sistem. Nilai respon frekuensi dari sistem secara lengkap dapat dilihat pada tabel 4.1



Gambar 4.1 Respon frekuensi akibat perubahan beban 0.01 p.u

Tabel 4.1 Data respon frekuensi akibat perubahan beban 0.01 p.u

Metode	Tanpa PSS	PSS_Conv	PSS-BA
Overshoot (p.u)	-0,0008668	-0,00086712	-0,00007931
Settling time (detik)	5,61	6,06	3,56

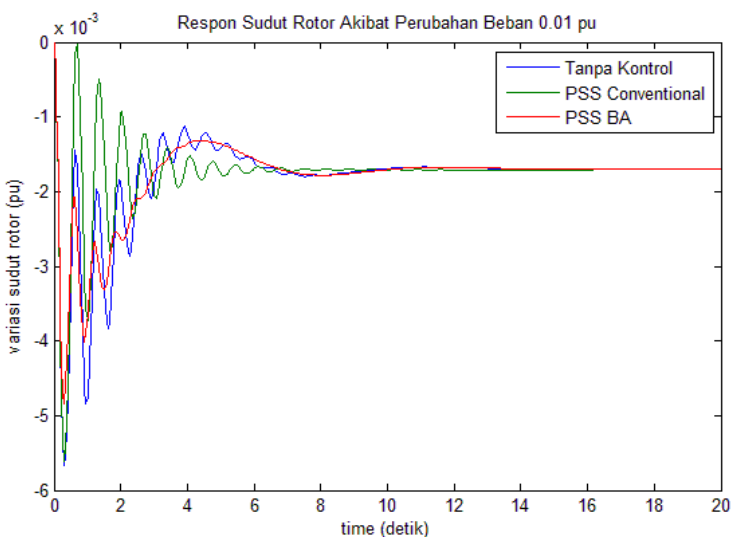
4.2 Respon Perubahan Sudut Rotor

Simulasi sistem SMIB tanpa PSS, sistem SMIB dengan PSS dan sistem SMIB dengan PSS yang ditala menggunakan BA diberi gangguan sebesar 0,01 p.u. Respon sistem diamati dalam waktu 20 detik. Hasil respon berupa perubahan respon sudut rotor dijelaskan dalam sub bab berikut

4.2.1 Respon Sudut Rotor akibat Perubahan Beban 0,01 p.u

Gambar 4.2 merupakan garfik respon perubahan sudut rotor dari sistem. Dari hasil gambar tersebut menunjukkan bahwa nilai perbandingan *overshoot* dan *settling time* dari masing-masing sistem.

Sistem SMIB tanpa PSS *overshoot* dan *settling time* masing-masing sebesar $-0,00566$ p.u dan 8,95 detik. Sistem SMIB dengan PSS *overshoot* dan *setting time* masing – masing sebesar $-0,00562$ p.u dan 5,18 detik. Sistem SMIB dengan PSS yang ditala dengan BA *overshoot* dan *settling time* sebesar $-0,004841$ p.u dan 8,31 detik. Hal tersebut membuktikan bahwa PSS yang ditala menggunakan BA mampu meredam osilasi respon sudut rotor akibat perubahan beban yang terjadi dalam sistem. Nilai respon perubahan sudut rotor dari sistem secara lengkap dapat dilihat pada tabel 4.2



Gambar 4.2 Respon sudut rotor akibat perubahan beban 0,01 p.u

Tabel 4.2 Data respon sudut rotor akibat perubahan beban 0,01 p.u

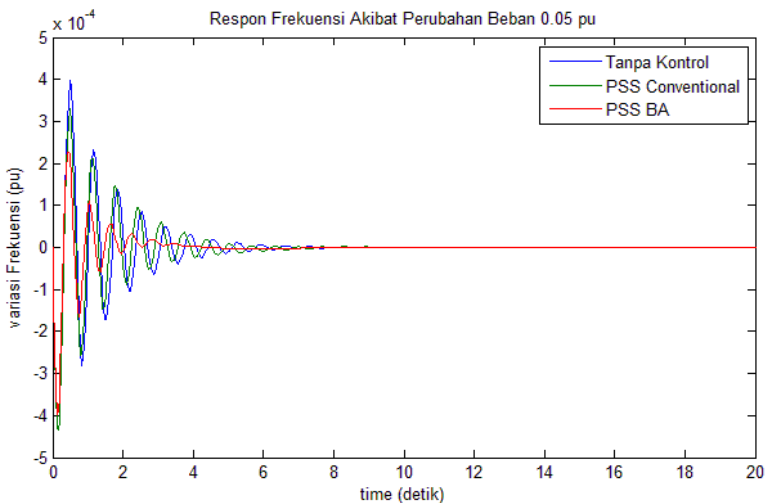
Metode	Tanpa PSS	PSS Conv	PSS-BA
Overshoot (p.u)	-0,00566	-0,00562	-0,004841
Settling time (detik)	8,95	5,18	8,31

4.3 Respon Perubahan Frekuensi

Simulasi sistem SMIB tanpa PSS, sistem SMIB dengan PSS dan sistem SMIB dengan PSS yang ditala menggunakan BA diberi gangguan sebesar 0,05 p.u. Respon sistem diamati dalam waktu 20 detik. Hasil respon berupa perubahan frekuensi dijelaskan dalam sub bab berikut.

4.3.1 Respon Frekuensi akibat Perubahan Beban 0,05 p.u

Gambar 4.3 merupakan garfik respon perubahan frekuensi dari sistem. Dari hasil gambar tersebut menunjukkan bahwa nilai perbandingan *overshoot* dan *settling time* dari masing-masing sistem. Sistem SMIB tanpa PSS *overshoot* dan *settling time* masing-masing sebesar -0,0004344 p.u dan 7,54 detik. Sistem SMIB dengan PSS *overshoot* dan *settling time* masing – masing sebesar p.u -0,0004346 dan 6,06 detik. Sistem SMIB dengan PSS yang ditala dengan BA *overshoot* dan *settling time* sebesar -0,000397 p.u dan 3,56 detik. Hal tersebut membuktikan bahwa PSS yang ditala menggunakan BA mampu meredam osilasi frekuensi akibat perubahan beban yang terjadi dalam sistem. Nilai respon frekuensi dari sistem secara lengkap dapat dilihat pada tabel 4.



Gambar 4.3 Respon frekuensi akibat perubahan beban 0,05 p.u

Tabel 4.3 Data respon frekuensi dengan perubahan beban 0,05 p.u

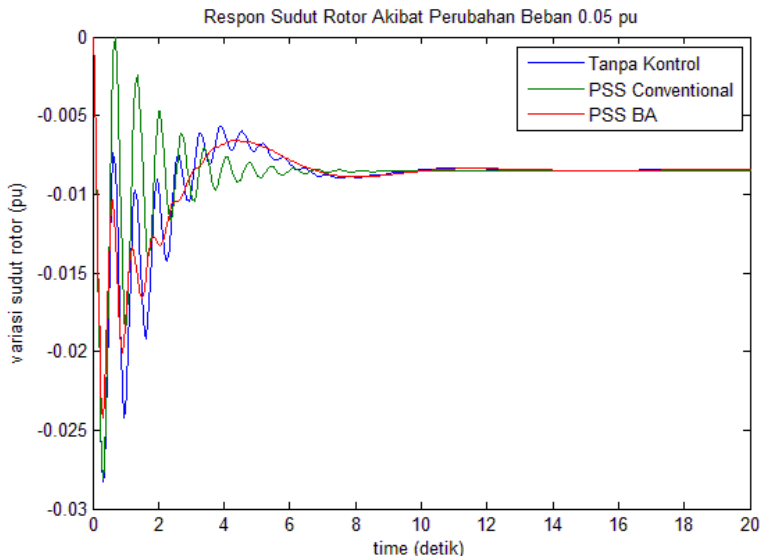
Metode	Tanpa PSS	PSS Conv	PSS-BA
Overshoot (p.u)	-0,0004344	-0,0004346	-0,000397
Settling time (detik)	7,54	6,06	3,56

4.4 Respon Perubahan Sudut Rotor

Simulasi sistem SMIB tanpa PSS, sistem SMIB dengan PSS dan sistem SMIB dengan PSS yang ditala menggunakan BA diberi gangguan sebesar 0,05 p.u. Respon sistem diamati dalam waktu 20 detik. Hasil respon berupa perubahan respon sudut rotor dijelaskan dalam sub bab berikut.

4.4.1 Respon Sudut Rotor akibat Perubahan Beban 0,05 p.u

Gambar 4.4 merupakan garfik respon perubahan sudut rotor dari sistem. Dari hasil gambar tersebut menunjukkan bahwa nilai perbandingan *overshoot* dan *settling time* dari masing-masing sistem. Sistem SMIB tanpa PSS *overshoot* dan *settling time* masing-masing sebesar -0,02859 p.u dan 8,95 detik. Sistem SMIB dengan PSS *overshoot* dan *setting time* masing – masing sebesar -0,02809 p.u dan -5,18 detik. Sistem SMIB dengan PSS yang ditala dengan BA *overshoot* dan *settling time* sebesar -0,02421 p.u dan 8,31 detik. Hal tersebut membuktikan bahwa PSS yang ditala menggunakan BA mampu meredam osilasi respon sudut rotor akibat perubahan beban yang terjadi dalam sistem. Nilai respon perubahan sudut rotor dari sistem secara lengkap dapat dilihat pada tabel 4.4



Gambar 4.4 Respon sudut rotor akibat perubahan beban 0,05 p.u

Tabel 4.4 Data respon sudut rotor akibat perubahan beban 0,05 p.u

Metode	Tanpa PSS	PSS Conv	PSS-BA
Overshoot (p.u)	-0,02828	-0,02809	-0,02421
Settling time (detik)	8,95	5,18	8,31

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Metode BA dapat digunakan untuk menentukan koordinasi parameter PSS.
2. Kontroler PSS yang optimal dapat diterapkan pada sistem tenaga listrik SMIB untuk meredam *overshoot* frekuensi listrik dan sudut rotor dari SMIB. Apabila terjadi perubahan beban 0,01 p.u nilai *overshoot* frekuensi listrik sistem SMIB tanpa PSS sebesar -0,0008668 p.u , sistem SMIB dengan PSS konvensional sebesar -0,00086712 dan sistem SMIB dengan PSS yang *dituning* dengan BA sebesar -0,0000793.

Sedangkan pada respon perubahan sudut rotor *overshoot* pada sistem SMIB tanpa PSS -0,00566 p.u, sistem SMIB dengan PSS konvensional sebesar -0,00562 dan sistem SMIB dengan PSS yang *dituning* dengan BA sebesar -0,004841.

3. Penalaan PSS dengan BA pada sistem tenaga listrik SMIB dapat memperkecil *overshoot*, lebih baik dari pada sistem tanpa PSS dan sistem yang dikontrol PSS dengan metode konvensional. Apabila terjadi perubahan 0,05 p.u maka nilai *overshoot* respon frekuensi listrik dan sudut rotor masing – masing adalah pada respon frekuensi listrik sistem SMIB tanpa PSS sebesar -0,0004344 p.u, sistem SIMB dengan PSS konvensional sebesar -0,0004346 dan sistem SMIB dengan PSS yang *dituning* BA sebesar -0,000397. Sedangkan respon perubahan sudut rotor memiliki nilai *overshoot* masing – masing sistem SMIB tanpa PSS -0,02828 p.u, sistem SMIB dengan PSS konvensional sebesar -0,02809 dan sistem SMIB dengan PSS yang *dituning* dengan BA sebesar -0,02421 p.u

5.2 Saran

Dari hasil simulasi dan pembahasan didapatkan beberapa saran sebagai berikut

1. Penggunaan kontroler PSS yang ditala dengan BA dapat diterapkan pada sistem yang lebih besar (multimesin).
2. Penalaan parameter PSS ini juga dapat dilakukan dengan metode optimisasi yang lain.
3. Pengujian dapat dilakukan dalam kondisi gangguan lain yaitu *transient*.

INDEKS

A

Algoritma, 2, 18, 24, 25, 27, 31
AVR, 1, 15, 23

B

BA, 2, 3, 4, 24, 27, 31, 32, 36,
37, 45
bat behavior, 24

C

CDI, 2,4,34,36,

D

daya elektris, 11, 12
daya mekanik, 11, 12, 17

E

eksitasi, 8, 9, 13, 15, 18, 22,
23, 33, 35

F

flowchart, 27,31
frekuensi, 1, 2, 4, 7, 22, 23, 24,
25, 26, 27, 32, 35, 36, 39,
40, 42, 43, 45,

G

gangguan, 1, 3, 4, 7, 8, 9, 34,
36, 39, 40, 42, 43, 46
generator, 1, 2, 7, 8, 9, 10, 11,
12, 13, 14, 15, 16, 21, 22,
23, 32, 33,
governor, 1, 2, 8, 9, 16, 17, 33
GSC, 16, 17,

I

infinite bus, 2, 3, 21, 31,

K

kestabilan dinamik,1, 2, 3, 7, 8,
9, 21, 22
kontroler, 3, 4, 45

M

mesin tunggal, 3, 21,

O

optimisasi, 3, 31, 32, 35, 36,
37, 46
osilasi, 2, 7, 9, 22, 33, 35, 39,
41, 42, 43
overshoot, 2, 4, 39, 40, 41, 43,
44, 45,

P

parameter, 2, 3, 4, 18, 20, 31,
32, 33, 35, 36, 37, 45, 46
perubahan beban, 1, 9, 13, 16,
21, 32, 36, 39, 40, 41, 42,
43, 44, 45, 46
PSS, 2, 3, 4, 5, 22, 23, 24, 31,
32, 34, 35, 36, 37, 39, 40, 44

R

respon perubahan frekuensi, 4,
32, 39, 42, 45
respon perubahan sudut rotor,
32, 36, 39, 43, 45

S

settling time, 2, 4, 32, 31, 36,
39, 40, 41, 42, 43, 44
sinkron, 1, 7, 8, 9, 10, 11, 13,
15, 16, 22

sistem tenaga listrik, 1, 3, 4, 5,
7, 8, 21, 31, 33
SMIB, 2, 3, 4, 31, 32, 33, 34,
35, 36, 39, 40, 41, 42, 43,
44, 45
state space, 33,
stabilitas, 1,31,

T

torsi, 2, 10, 12, 13, 16, 22, 23
transducer, 22
transient, 1, 23, 46
turbin, 1, 8, 10, 12, 17, 19, 20

W

washout, 22,23

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Imam Robandi. “*Desain Sistem Tenaga Modern*” Penerbit ANDI, Yogyakarta. 2006.
- [2] K.R. Padiyar. “*Power System Dynamics*” John Wiley & sons Ltd, Interlaine Publishing Ltd. 1996. [3] Milles, R.H., Malinowski, J.H., ”*Power System Operation*”, Mc GrawHill, Singapore, Ch.12, 1994.
- [3] William D. Stevenson. *Elements of Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill International Book Company. 1982
- [4] X. S. Yang, “*Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*”, University of Cambridge, United Kingdom : Luniver Press. 2010
- [5] Cai, L. J., & Erlich, I. (2005). Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS damping controllers in large power systems. IEEE Transactions on Power Systems, 20(1).
- [6] Imam Robandi “*Modern Power System Control*”, Penerbit ANDI, Yogyakarta. 2009.
- [7] Milles, R.H., Malinowski, J.H., ”*Power System Operation*”, Mc GrawHill, Singapore, Ch.12, 1994.
- [8] Prabha Kundur, ”*Power System Stability and Control*”, Mc-Graw-Hill, Inc, USA, 1993.
- [9] Soeprijanto, Adi. “*Desain Kontroller untuk Kestabilan Dinamik Sistem Tenaga Listrik*”, Itspress, Surabaya. 2012.
- [10] H. Saadat, “*Power Sytem Analysis*”, Mc Graw-Hill International Edition , 1999
- [11] P.M. Anderson, A.A Fouad “*Power System Control and Stability*”, IEEE Press Power System Engineering Series, 1993

- [12] M. Yusuf Wibisono, Imam Robandi, Heri Suryoatmojo, “Desain Adaptive PSS Berbasis Neural Networks dan PID Controller Menggunakan *Imperialis Competitive Algorithm* (ICA)”, Tugas Akhir jurusan Teknik Elektro ITS, 2011
- [13] Yang Xing-She, “Engineering Optimization”, A Jhon Wily & Sons, New Jersey, 2010
- [14] Faiq Ulfi, Imam Robandi, Heri Suryoatmojo, “Desain Dual Input *Power System Stabilizer* (DIPSS) menggunakan *Imperialis Competitive Algorithm* (ICA)”, Tugas Akhir jurusan Teknik Elektro ITS, 2011
- [15] Tossaporn Surinkaew and Issarachai Ngamroo . “Coordinate Robust Control of DFIG Wind Turbine and PSS for Stabilization of Power Oscillation Considering System Uncertainties. *IEEE Trans on Sustainable Energy*, Vol.5.No.3 July 2014

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Suharto lahir di Magetan pada tanggal 28 Juni 1991. Penulis adalah anak kedua dari tiga bersaudara pasangan Bapak Sadeni dan Ibu Jemi. Penulis mengawali kegiatan akademis di SDN Sumberagung 1 pada tahun 1998, kemudian melanjutkan ke SMPN 2 Plaosan pada tahun 2004, dan SMKN 1 Madiun pada tahun 2007. Tahun 2010 penulis melanjutkan program pendidikan S1 di Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Selama dalam perkuliahan, penulis aktif berorganisasi di Kajian Islam Teknik Elektro ITS sebagai anggota departemen Pengembangan Sumber Daya Insani (PSDI). Dan aktif sebagai ketua member Laboratorium *Power System Operation and Control* (PSOC) ITS. Penulis dapat dihubungi melalui alamat *email*: suharto10@mhs.ee.its.ac.id atau suharto.ae@gmail.com

[Halaman ini sengaja dikosongkan]