

# Penalaan Parameter *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES) menggunakan *Firefly Algorithm* (FA) pada Sistem Tenaga Listrik Multimesin

Herlambang Setiadi, Imam Robandi, Teguh Yuwono

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

*E-mail:* robandi@ee.its.ac.id, teguh@ee.its.ac.id

**Abstrak**—Energi listrik yang disuplai ke konsumen harus mempunyai stabilitas dan keandalan yang tinggi. Jika terjadi sebuah gangguan pada sistem tenaga listrik dapat mengakibatkan ketidakstabilan. Gangguan tersebut dapat berupa putus jaringan (transien) maupun perubahan beban (dinamik). Perubahan beban yang terjadi secara tiba-tiba dan periodik tidak dapat direspon dengan baik oleh generator sehingga dapat mempengaruhi kestabilan dinamik sistem. Hal ini menyebabkan timbul osilasi frekuensi pada generator. Respon yang kurang baik dapat menimbulkan osilasi frekuensi dalam periode yang lama. Hal itu akan mengakibatkan pengurangan kekuatan transfer daya yang ada. Pada sistem tenaga listrik *multimachine*, semua mesin bekerja secara sinkron sehingga generator harus beroperasi pada frekuensi yang sama. Untuk meredam osilasi frekuensi yang terjadi dibutuhkan kontroler tambahan yaitu *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES). Agar mendapatkan koordinasi kontroler yang baik maka parameter pada SMES dioptimisasi dengan *Firefly Algorithm* (FA). Tugas Akhir ini mengajukan konsep penalaan parameter SMES menggunakan FA pada sistem tenaga listrik multimesin. Dengan diajukan metode diatas diharapkan permasalahan osilasi frekuensi akibat terdapat perubahan beban dapat diredam.

**Kata Kunci**—FA, Kestabilan dinamik, Multimesin, SMES

## I. PENDAHULUAN

Penggunaan peralatan tambahan pada sistem tenaga listrik yang tidak tepat dalam menstabilkan sistem dapat menimbulkan banyak masalah. Masalah tersebut sering timbul karena kesalahan peralatan dalam mengambil sinyal referensi atau nilai parameter peralatan tersebut yang kurang optimal. Perbaikan yang memperbaiki performa malah menimbulkan osilasi. Hal ini lebih rumit jika sistem merupakan sistem multimesin.

Sistem multimesin adalah gabungan dari beberapa pembangkit yang tersambung secara interkoneksi [1]. Kestabilan pada sistem tenaga listrik interkoneksi tidak mudah dicapai. Jika terdapat gangguan pada sistem maka sistem akan mengalami osilasi, apabila terjadi terus menerus akan mengakibatkan generator lepas sinkron bahkan dapat merusak generator tersebut. Sehingga diperlukan peralatan yang dapat meredam osilasi yang terjadi. *Superconducting Magnetic*

*Energy Storage* (SMES) merupakan salah satu peralatan kontroler tambahan yang berfungsi untuk meredam osilasi daya pada sistem tenaga listrik. Untuk memperoleh hasil yang maksimal penalaan parameter yang tepat dan optimal pada SMES sangat diperlukan untuk meredam osilasi dan menstabilkan sistem. Penalaan parameter ini dapat menggunakan kecerdasan buatan.

Beberapa metode penalaan telah diusulkan untuk menentukan parameter yang optimal, adalah *Firefly Algorithm* (FA). FA merupakan algoritma yang terinspirasi dari perilaku kunang-kunang (*Firefly Behaviour*). Algoritma ini diperkenalkan oleh Xin-She Yang pada tahun 2007.

Pada Tugas Akhir ini FA digunakan untuk menala parameter SMES yang optimal dengan meminimalkan nilai *Integral Time Absolute Error* (ITAE). Kemudian dianalisa pengaruh penalaan SMES dengan FA terhadap kestabilan pada sistem tenaga listrik multimesin. Hasil simulasi digunakan untuk perbandingan terhadap sistem tanpa SMES, menggunakan SMES dan menggunakan SMES yang ditala dengan FA.

## II. PEMODELAN SISTEM DAN ALGORITMA

### A. Dinamika dan Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Dinamika sistem tenaga menjadi faktor penting dalam pengoperasian sistem tenaga listrik. Hal ini dipengaruhi oleh komponen dinamika sistem tenaga listrik seperti generator, jaringan transmisi, beban dan peralatan kontrol. Sifat-sifat dinamik dari sistem tenaga adalah sangat kompleks dan harus dipahami untuk perencanaan sistem operasi yang baik [1].

Penyebab utama terjadi dinamika sistem tenaga adalah perubahan beban saat sistem interkoneksi mengalami beban puncak. Hal ini dapat menyebabkan osilasi pada tiap-tiap mesin yang terhubung pada sistem. Osilasi dari masing-masing mesin dapat saling mempengaruhi satu sama lain, sehingga mesin-mesin dalam satu unit pembangkit beraksi bersama-sama secara serempak untuk menanggulangi pengaruh osilasi dari unit pembangkit yang lain sehingga sistem selalu dalam keadaan stabil

Stabilitas sistem tenaga listrik telah menjadi perhatian utama

dalam sebuah sistem operasi. Perhatian ini muncul dari fakta-fakta bahwa pada kondisi mantap (*steady-state*), kecepatan rata-rata untuk semua generator harus sama. Kondisi tersebut dinamakan pada operasi sinkron dari sebuah sisten yang terinterkoneksi [2].

Kestabilan sistem tenaga listrik diartikan sebagai kemampuan suatu sistem tenaga listrik atau bagian komponen untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan dalam sistem. Berdasarkan sifat dan besar gangguan, kestabilan dalam sistem tenaga listrik dibedakan menjadi [3]:

- 1) Kestabilan mantap (*steady-state*)
- 2) Kestabilan transien
- 3) Kestabilan dinamik.

Pada tugas akhir ini pemodelan multimesin dan SMES dimodelkan dalam bentuk linier. Pemodelan linier multimesin dan SMES serta *Firefly Algorithm* (FA) pada tugas akhir ini akan dibahas pada sub bab berikut.

**B. Pemodelan Sebuah Mesin Sikron**

Secara umum sistem pembangkit dapat digambarkan seperti pada gambar 1.

Governor merupakan alat pengatur frekuensi. Jika terjadi perubahan frekuensi akibat perubahan beban, governor akan berupaya menstabilkan frekuensi ke nilai tertentu sambil menunggu penyesuaian daya turbin untuk kembali ke frekuensi nominal [3]. Bila ada perubahan pada terminal keluaran generator akibat perubahan beban, maka akan terjadi fungsi *feedback* yang diatur oleh governor untuk menyesuaikan kembali putaran rotor.

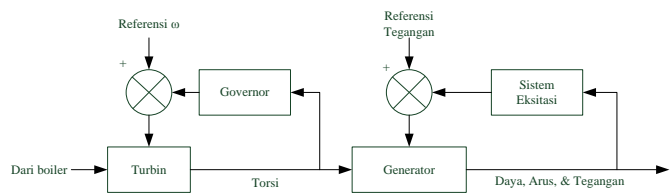
Sistem eksitasi terdiri dari rangkaian medan dan alat pengatur tegangan yang dinamakan *Automatic Voltage Regulator* (AVR). Sistem eksitasi berfungsi sebagai pengendali keluaran generator, seperti tegangan, arus dan faktor daya. Bila ada perubahan pada keluaran generator tersebut, maka sistem eksitasilah 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 respon yang lebih cepat. Namun, karena waktu respon yang lebih lambat, maka dalam studi kestabilan dinamik, yang diperhatikan adalah sistem eksitasi.

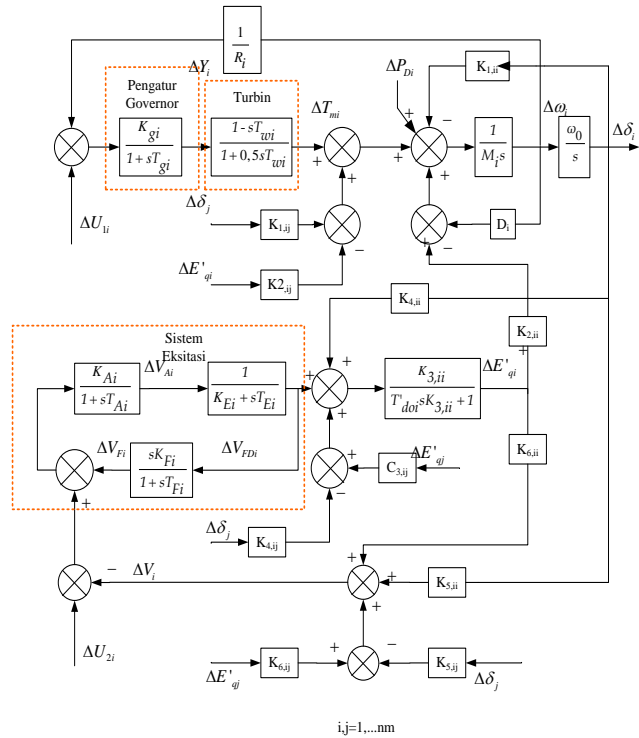
Seperti telah dijelaskan, bahwa dengan perubahan beban atau gangguan kecil, akan berimbas terhadap perubahan kecepatan rotor. Perubahan kecepatan rotor ini secara langsung akan berakibat terhadap perubahan kecepatan sudut rotor sehingga berimbas pada keluaran generator. Jika kecepatan sudut rotor akan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

**C. Pemodelan Linier Multimesin**

Pada tugas akhir semua pemodelan dari multimesin, mulai dari turbin, governor, sistem eksitasi, persamaan medan, persamaan torsi dimodelkan secara linier. Pemodelan linier multimesin yang ditinjau dari salah satu mesin dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 1. Sistem pembangkit listrik secara umum



Gambar 2. Sistem multimesin ditinjau dari salah satu mesin [1]

**D. Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)**

SMES merupakan sebuah peralatan untuk menyimpan dan melepaskan daya dalam jumlah yang besar secara simultan. SMES menyimpan energi dalam medan magnet yang dibuat oleh arus DC pada kumparan superkonduktor yang didinginkan dengan cara *cryogenic*. Sistem SMES telah digunakan beberapa tahun untuk memperbaiki *power quality* industri dan untuk menyediakan pelayanan yang baik untuk pelanggan yang mengalami fluktuasi tegangan. Pengisian ulang SMES dapat dilakukan hanya dalam hitungan menit dan dapat mengulangi proses *charge* dan *discharge* ribuan kali tanpa mengurangi magnet. Waktu pengisian ulang dapat dipercepat untuk memenuhi kebutuhan khusus, tergantung pada kapasitas sistem.

SMES pertama kali ditemukan oleh Ferrier pada tahun 1969, orang yang pertama kali mengusulkan konstruksi kumparan toroida yang mampu menyuplai penyimpanan harian dari energi listrik di seluruh Perancis. Namun biaya pembuatan terlalu mahal sehingga ide tersebut tidak dipenuhi. Pada tahun 1971 peneliti di Universitas Wisconsin US memulai untuk mendalami hubungan dasar antara unit penyimpanan energi dengan sistem kelistrikan yang melewati jembatan multifasa. Hal inilah yang

memelopori pertama kali konstruksi dari peralatan SMES [4].

SMES pada sistem tenaga listrik digunakan untuk mengontrol secara efektif keseimbangan daya pada generator sinkron selama periode dinamis, SMES dipasang pada bus terminal generator pada model sistem tenaga listrik.

Untuk mengontrol secara efektif keseimbangan daya pada generator, SMES ditempatkan pada terminal bus generator. Hubungan antara arus dan tegangan pada SMES adalah

$$I_{SM} = \frac{1}{L_{SM}} \int_0^t V_{SM} d\tau + I_{SM0} \quad (1)$$

$I_{SM0}$  adalah arus awal induktor. Daya yang disimpan atau dikirimkan oleh SMES adalah

$$P_{SM} = V_{SM} I_{SM} \quad (2)$$

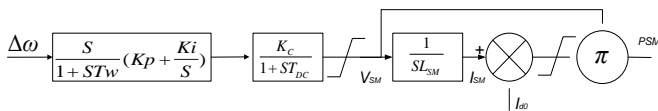
Jika  $V_{SM}$  positif maka daya akan ditransfer dari sistem ke unit SMES. Sedangkan jika  $V_{SM}$  negatif maka daya akan dilepaskan dari unit SMES. Energi yang disimpan pada kumparan SMES sebesar

$$W_{SM} = \frac{1}{2} L_{SM} I_{SM}^2 \quad (3)$$

$L_{SM}$  adalah induktansi dari SMES. Tegangan pada kumparan SMES  $V_{SM}$  dikontrol secara kontinu tergantung pada perubahan kecepatan rotor generator yaitu,

$$\Delta V_{SM} = \frac{K_c}{1 + sT_{dc}} \Delta \omega \quad (4)$$

$K_c$  adalah gain dari kontrol loop dan  $T_{dc}$  adalah konstanta time delay dari peralatan kontrol. Karena keterbatasan implementasi hardware maka arus kumparan memiliki batas maksimum dan minimum. Selama beroperasi, batas atas dari arus kumparan diatur  $1,38I_{SM0}$ , dan batas bawah  $0,31I_{SM0}$ . Batas dari tegangan terminal adalah  $\pm 0,2352$  p.u [5,6]. Gambar 3 menunjukkan pemodelan SMES dalam bentuk block diagram.



Gambar 3 Block diagram SMES [5,6]

E. Firefly Algorithm (FA)

Sinaran cahaya kunang-kunang sangat indah di langit pada saat musim panas di daerah yang beriklim tropis. Terdapat sekitar 2000 spesies kunang-kunang dan sebagian besar kunang-kunang memproduksi cahaya yang berirama dan pendek. Pola dari kilatan cahaya cukup unik untuk beberapa spesies. Kilatan cahaya diproduksi oleh proses *bioluminescence*. Fungsi dari kilatan tadi adalah untuk menarik perhatian kunang-kunang lain, kilatan cahaya juga digunakan untuk mekanisme peringatan perlindungan [7].

Kunang-kunang betina merespon pola kilatan yang unik dari kunang-kunang jantan yang sejenis, sementara spesies lain seperti Photuris. Kunang-kunang betina jenis Photuris dapat mendengar sinyal bioluminescence dan bahkan meniru pola perkawinan dari spesies lain sehingga dapat memancing dan memakan kunang-kunang jantan yang mungkin melakukan

kesalahan dalam memberi sinyal. Beberapa kunang-kunang tropis bahkan dapat mensinkronkan cahaya mereka, sehingga membentuk perilaku biological self-organized [12].

Intensitas cahaya disini mewakili jarak  $r$  dari sumber cahaya berdasarkan hukum kuadrat terbaik, sehingga intensitas cahaya I. Semakin berkurang apabila semakin jauh jarak, sehingga dapat ditulis  $I \propto 1/r^2$ . Udara menyerap cahaya dan cahaya itu semakin lemah apabila jarak semakin jauh jarak. Faktor-faktor tersebut membuat kunang-kunang dapat dilihat dengan jarak tertentu, beberapa ratus meter pada saat malam hari, ini cukup baik bagi kunang-kunang untuk berkomunikasi [12].

Kilatan cahaya dapat dirumuskan sedemikian rupa untuk tujuan optimisasi yang memungkinkan untuk merumuskan algoritma optimisasi baru. Algoritma ini Firefly Algorithm.

Firefly algoritma adalah algoritma metaheuristik yang terinspirasi karakteristik kunang-kunang. Algoritma ini pertama ditemukan oleh Dr Xin-She Yang di Universitas Cambridge pada tahun 2007. Pada algoritma ini terdapat 3 acuan dasar.

1. Semua kunang-kunang adalah unisex jadi satu kunang-kunang tertarik dengan kunang-kunang lain terlepas dari jenis kelamin mereka.
2. Daya tarik sebanding dengan kecerahan, maka kunang-kunang dengan kecerahan lebih redup akan bergerak ke arah kunang-kunang dengan kecerahan lebih terang dan kecerahan berkurang seiring dengan bertambah jarak. Apabila tidak ada kunang-kunang yang memiliki kecerahan paling cerah maka kunang-kunang akan bergerak random.
3. Kecerahan kunang-kunang dideterminasikan oleh tempat dari fungsi objektif kunang-kunang.

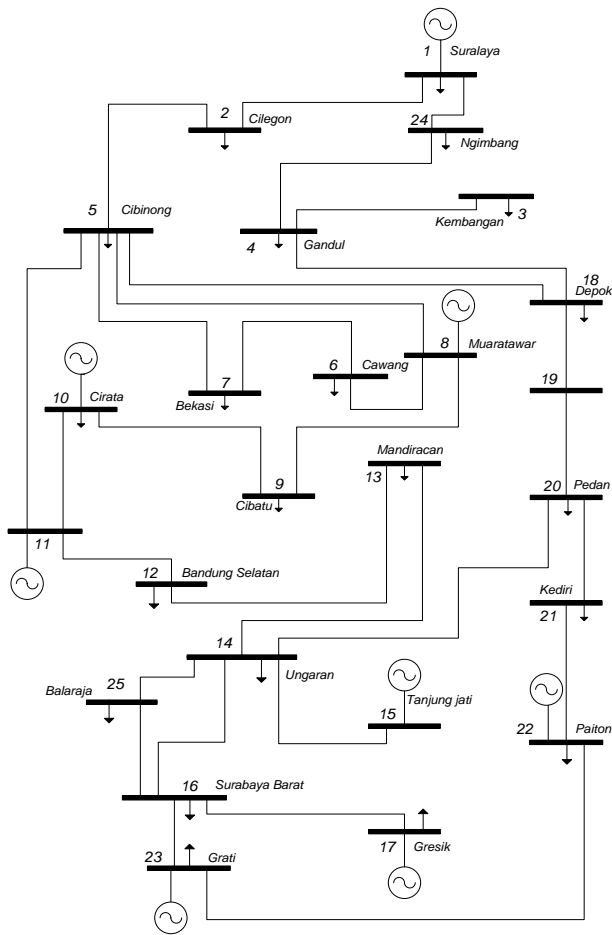
III. KOORDINASI SMES PADA MULTIMESIN MENGGUNAKAN FA

A. Sistem Jawa Bali 500 kV

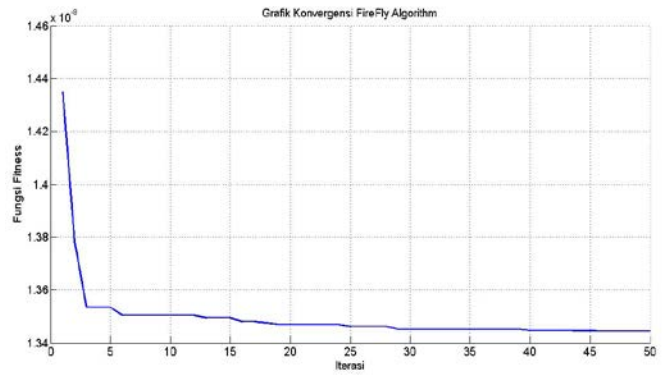
Data sistem multimesin Jawa Bali 500 kV yang digunakan terdiri dari 25 bus, 30 saluran, 8 buah generator [8]. Gambar 3.1 menunjukkan single line diagram sistem Jawa Bali 500 kV.

B. Penerapan SMES pada Multimesin

SMES pada tugas akhir ini dipasang pada pembangkit Suralaya. Gambar 4 menunjukkan koordinasi SMES pada sistem multimesin.



Gambar 4. Single Line Diagram sistem transmisi Jawa Bali 500 kV [8]



Gambar 6. Grafik konvergensi FA

Tabel 1  
Hasil penalaan SMES menggunakan FA

$K_c$	$t_{dc}$	$t_w$	$K_p$	$K_i$
90	0,0147	8,0245	8	6,7313

C. Penalaan Parameter SMES menggunakan FA

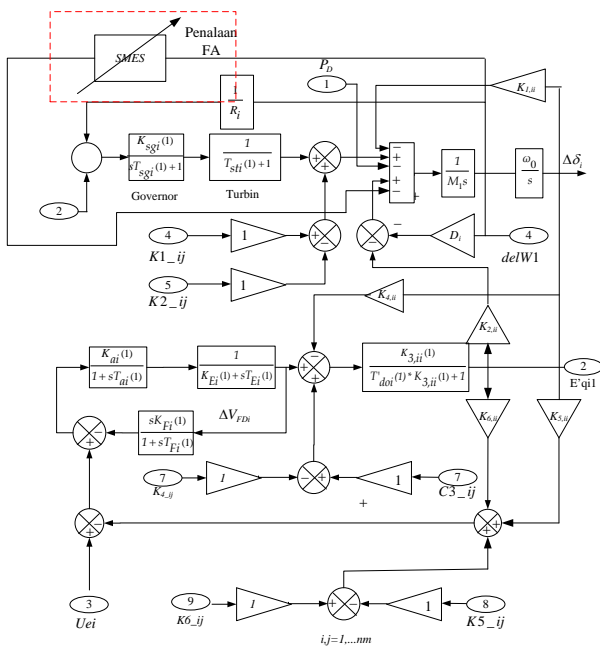
Penerapan FA digunakan untuk menala  $K_{smes}$ ,  $t_w$ ,  $T_{dc}$ ,  $K_p$ ,  $K_i$ . Optimisasi parameter SMES menggunakan FA dilakukan sebanyak 50 iterasi. Nilai minimum fungsi performansi sistem pada setiap iterasi di-plot pada grafik konvergensi yang ditunjukkan pada Gambar 6. Pada Gambar 6 dapat dilihat algoritma FA konvergen pada iterasi ke 47 atau menemukan nilai paling optimal adalah pada iterasi ke 47. Tabel 1 menunjukkan nilai parameter SMES setelah ditala oleh FA. Untuk nilai  $K_{smes}$  didapat nilai sebesar 90, nilai sebesar  $t_{dc}$  0,0147, nilai sebesar  $t_w$  8,0245 dan nilai  $K_p$  serta  $K_i$  sebesar 8 dan 6,7313.

IV. HASIL DAN ANALISA

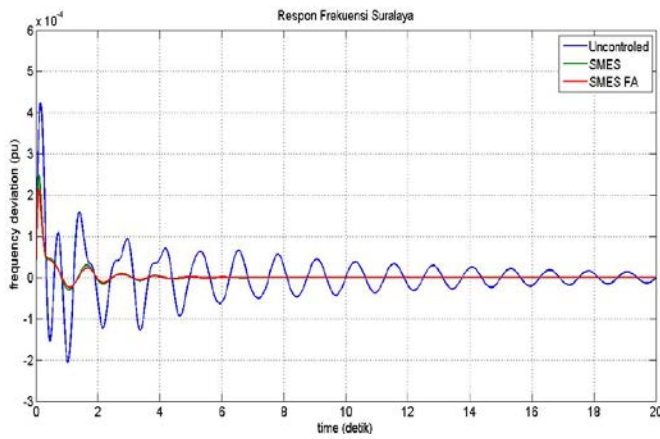
A. Respon Frekuensi Akibat 0,05 pu

Untuk melihat respon frekuensi akibat perubahan beban, simulasi dilakukan dengan memberikan perubahan beban sebesar 0,05 pu pada pembangkit Suralaya dan dilakukan selama 20 detik. Dalam Tugas Akhir ini dilakukan analisa perubahan frekuensi pada semua pembangkit di sistem Jawa Bali 500 kV. Gambar 4.1 menunjukkan respon perubahan frekuensi pada pembangkit Suralaya.

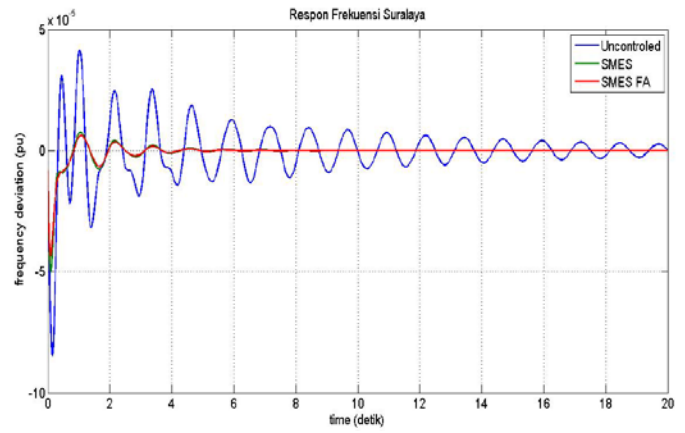
Pada gambar 7 dapat dilihat ada perbaikan perubahan frekuensi setelah pembangkit Suralaya dikoordinasikan dengan SMES yang ditala dengan FA. Data settling time dan overshoot pada pembangkit-pembangkit pada sistem multimesin Jawa Bali 500 kV ditunjukkan pada tabel 2.



Gambar 5. Test sistem pembangkit Suralaya yang dikoordinasikan dengan SMES



Gambar 7 Respon frekuensi PLTU Suralaya



Gambar 4.2 Respon frekuensi PLTU Suralaya

Tabel 2  
Data *overshoot* frekuensi akibat perubahan beban 0,05 pu

Pembangkit	Tanpa SMES (pu)	SMES (pu)	SMES FA (pu)
Suralaya	0,0004229	0,0003166	0,0002513
Muaratawar	0,0002163	0,0001157	0,0001013
Cirata	0,0001838	0,0000962	0,0000868
Saguling	0,0001643	0,0000846	0,0000761
Tanjungjati	0,0001498	0,0000897	0,0000807
Gresik	0,0001605	0,0000799	0,0000724
Paiton	0,0001605	0,0000886	0,0000809
Grati	0,0001696	0,0000875	0,0000780

Tabel 3  
Data *settling time* akibat perubahan beban 0,05 pu

Pembangkit	Tanpa SMES (det)	SMES (det)	SMES FA (det)
Suralaya	>20	8,054	6,996
Muaratawar	>20	8,933	7,779
Cirata	>20	7,969	7,408
Saguling	>20	7,837	5,186
Tanjungjati	>20	7,837	7,343
Gresik	>20	7,911	7,179
Paiton	>20	7,947	7,293
Grati	>20	7,838	7,232

**B. Respon Frekuensi Akibat Perubahan Beban 0,01 pu**

Untuk melihat respon frekuensi akibat perubahan beban, simulasi dilakukan dengan memberikan perubahan beban sebesar 0,01 pu pada pembangkit Suralaya dan dilakukan selama 20 detik. Dalam Tugas Akhir ini dilakukan analisa perubahan frekuensi pada semua pembangkit di sistem Jawa Bali 500 kV. Gambar 8 menunjukkan respon perubahan frekuensi pada pembangkit Suralaya.

Tabel 4  
Data *overshoot* frekuensi akibat perubahan beban 0,01 pu

Pembangkit	Tanpa SMES (pu)	SMES (pu)	SMES FA (pu)
Suralaya	-0,00008457	-0,00005039	-0,00004363
Muaratawar	-0,00004327	-0,00002380	-0,00002102
Cirata	-0,00003675	-0,00002001	-0,00001826
Saguling	-0,00003234	-0,00001761	-0,00001600
Tanjungjati	-0,00003368	-0,00001858	-0,00001698
Gresik	-0,00002996	-0,00001663	-0,00001521
Paiton	-0,00003209	-0,00001851	-0,00001704
Grati	-0,00003392	-0,00001817	-0,00001636

Tabel 5  
Data *settling time* akibat perubahan beban 0,01 pu

Pembangkit	Tanpa SMES (det)	SMES (det)	SMES FA (det)
Suralaya	>20	7,251	6,635
Muaratawar	>20	9,343	8,296
Cirata	>20	8,230	7,876
Saguling	>20	8,289	7,495
Tanjungjati	>20	8,214	7,855
Gresik	>20	8,233	7,836
Paiton	>20	8,848	8,487
Grati	>20	8,216	7,878

Pada gambar 8 dapat dilihat ada perbaikan perubahan frekuensi setelah pembangkit Suralaya dikoordinasikan dengan SMES yang ditala dengan FA. Data settling time dan overshoot pada pembangkit-pembangkit pada sistem multimesin Jawa Bali 500 kV ditunjukkan pada tabel 4.

**V. KESIMPULAN**

SMES yang optimal dapat diterapkan pada sistem tenaga listrik multimesin Jawa Bali 500 kV untuk meredam overshoot frekuensi dan mempercepat settling time. Hal ini dapat dilihat pada pembangkit Suralaya. Pada saat tanpa kontroler overshoot dan settling time sebesar 0,000429 pu dan 20 detik. Dengan pemasangan SMES yang dilata FA dapat meredam overshoot pada pembangkit Suralaya menjadi 0,0002513 pu dan mempercepat settling time menjadi 6,996 detik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Imam Robandi, "*Desain Sistem Tenaga Modern : Optimisasi, Logika Fuzzy, dan Algoritma Genetika*", Penerbit ANDI, Yogyakarta, 2005.
- [2] Imam Robandi, "*Modern Power System Control*", Penerbit ANDI, Yogyakarta, 2009.
- [3] Adi Soeprijanto, "*Desain Controller untuk Kestabilan Dinamik Sistem Tenaga Listrik*", Itsprees, Surabaya, 2012.
- [4] Cheung K. Y., Cheung S. T., Navin, de Silva R. G., Juvonen, M.P., Singh R., & Woo J. J., "*Large-scale Energy Storage Systems*", Imperial College Research Report, ISE2,2003.
- [5] Mochamad AVID Fassamsi, "*Optimal Tuning Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) menggunakan Imperialist Competitive Algorithm (ICA) Untuk Meredam Osilasi Daya Pada Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV*" Tugas Akhir, Department of Electrical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia 2010.
- [6] Y. S. Lee and C. J. Wu, "*Application of Superconducting Magnetic Energy Storage Unit To Improve The Damping of Synchronous Generator*", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, No. 4, 1991.
- [7] Yang Xin-She, "Engineering Optimization", A Jhon Wiley & Sons, New Jersey, 2010.
- [8] Akbar Swandaru, "*Koordinasi Optimal Capacitive Energy Storage (CES) dan Kontroler PID untuk Meredam Osilasi Daya pada Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV menggunakan Differential Evolution (DE)*" Tugas Akhir, Department of Electrical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia 2012.