

OPTIMASI TCSC UNTUK PENINGKATAN STABILITAS TRANSIEN MENGGUNAKAN METODE *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* (PSO)

Taufiqur Rohman Bukhori^{*)}, Hermawan, and Susatyo Handoko^{*)}

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH. Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}Email: radult_16ophiq@yahoo.co.id, susatyo73@gmail.com

Abstrak

Stabilitas sistem tenaga telah menjadi perhatian utama dalam sebuah sistem operasi. Perhatian itu muncul dari fakta bahwa pada kondisi mantap (*steady-state*), kecepatan rata-rata generator harus sama. Kondisi tersebut dinamakan operasi sinkron dari suatu sistem. Dalam pendistribusian tenaga listrik sering terjadi perubahan frekuensi dan daya listrik yang tidak stabil akibat perubahan beban yang tidak teratur, baik berupa gangguan dinamis, maupun gangguan transien. Ketidaksabilan tersebut merupakan salah satu jenis gangguan yang signifikan pada sistem yang berdampak pada putaran *primemover* di pusat pembangkit. *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC) merupakan salah satu anggota penting dari keluarga FACTS yang diterapkan pada jalur transmisi yang panjang dalam sistem tenaga modern. Penelitian ini meneliti pengaruh TCSC terhadap kestabilan sistem, yaitu kestabilan kecepatan putaran rotor, sudut rotor, dan frekuensi generator ketika berada pada berbagai kondisi operasi daya. Untuk mendapatkan redaman yang maksimal, maka TCSC ditala menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO). Hasil simulasi menunjukkan bahwa TCSC mampu meningkatkan kestabilan sistem tenaga pada berbagai kondisi pembebanan. Dapat dilihat bahwa pada berbagai kondisi pembebanan yang diasumsikan, $0.5 + j0.169$, $0.8 + j0.3649$, dan $1.1 + j0.6479$, masing-masing mempunyai nilai eigen yang negatif, $-2.2006 + 0.0000i$, $-2.4800 + 0.0000i$, dan $-2.6482 + 0.0000i$. Nilai redaman yang dihasilkan pun tinggi, yaitu semua bernilai 1.0000.

Kata kunci: stabilitas transien, TCSC, PSO.

Abstract

Stability of power systems has been and continues to be of major concern in system operation. This arises from the fact that in steady state the average electrical speed of all the generators must remain the same anywhere in the system. This is termed as the synchronous operation of a system. In the distribution of electricity is often a change in the frequency and power is not stable due to irregular load changes, either in the form of dynamic disturbances, and transient disturbances. The unstability it is one of the significant disturbance in the system that have an impact on primemover round in the center of the plant. *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC) is one of the important members of FACTS family that is applied with long transmission lines by the utilities in modern power systems. This thesis examines the influence of TCSC on system stability, ie stability of rotor rotation speed, rotor angle, and frequency of the generator when in various operating conditions of power. To get the maximum damping, the TCSC tuned using the *Particle Swarm Optimization* (PSO). Simulation results show that TCSC is able to increase the stability of the power system operating at various conditions of load. It can be seen that at various load assumed power, $0.5 + j0.169$, $0.8 + j0.3649$, and $1.1 + j0.6479$, each having eigenvalues are negative, $-2.2006 + 0.0000i$, $-2.4800 + 0.0000i$, and $-2.6482 + 0.0000i$. The resulting damping value is high, that is all worth 1.0000.

Keywords: transient stability, TCSC, PSO.

1. Pendahuluan

Stabilitas sistem tenaga telah menjadi perhatian utama dalam sebuah sistem operasi. Perhatian itu muncul dari fakta bahwa pada kondisi mantap (*steady-state*), kecepatan rata-rata generator harus sama. Kondisi tersebut dinamakan operasi sinkron dari suatu sistem interkoneksi.

Gangguan kecil atau besar pada sistem tenaga berdampak pada operasi sinkron. Sebagai contoh dalam pendistribusian tenaga listrik, yaitu berupa perubahan frekuensi dan daya listrik yang tidak stabil akibat perubahan beban yang tidak teratur, baik berupa gangguan dinamis, maupun gangguan transien. Ketidaksabilan tersebut merupakan salah satu jenis

gangguan yang signifikan pada sistem yang berdampak pada putaran primemover di pusat pembangkit. Apabila hal tersebut dibiarkan maka selain dapat merusak peralatan yang dicatu juga akan merusak primemover itu sendiri.

Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) merupakan salah satu anggota penting dari keluarga FACTS yang diterapkan dengan jalur transmisi yang panjang oleh utilitas dalam sistem tenaga modern. Peralatan FACTS ini juga dapat diterapkan untuk kestabilan generator dan dipasang di sistem saluran transmisi. Hal ini dapat memiliki berbagai peran dalam operasi dan kontrol sistem tenaga, seperti penjadwalan aliran listrik, memberikan dukungan tegangan, membatasi arus pendek pada sirkuit, mitigasi *subsynchronous resonance* (SSR), meredam osilasi daya, dan meningkatkan stabilitas transien.

Sistem tenaga listrik yang akan digunakan pada penelitian ini adalah sistem tenaga *Single Machine Infinite Bus* atau biasa disingkat dengan SMIB. Sistem SMIB memiliki satu buah pembangkit/ generator yang disalurkan ke berbagai bus tak terhingga melalui saluran transmisi udara.

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas tentang optimasi kestabilan sistem tenaga listrik menggunakan TCSC dengan metode *Genetic Algorithm* (GA) [14]. Selain itu, pada penelitian sebelumnya, perangkat TCSC ini diterapkan pada sistem *multi-machine* [13], namun untuk penelitian ini perangkat TCSC digunakan pada sistem SMIB sebagai proses awal pemahaman penggunaan TCSC dan pengaruhnya terhadap kestabilan suatu sistem. Metode yang akan digunakan untuk mengoptimasi parameter-parameter TCSC, *gain* dan konstanta waktu, dan menghitung persamaan-persamaan linier, seperti konstanta mesin (K1-K6) dan konstanta TCSC (KP, KQ, KV), adalah metode *Particle Swarm Optimization* (PSO).

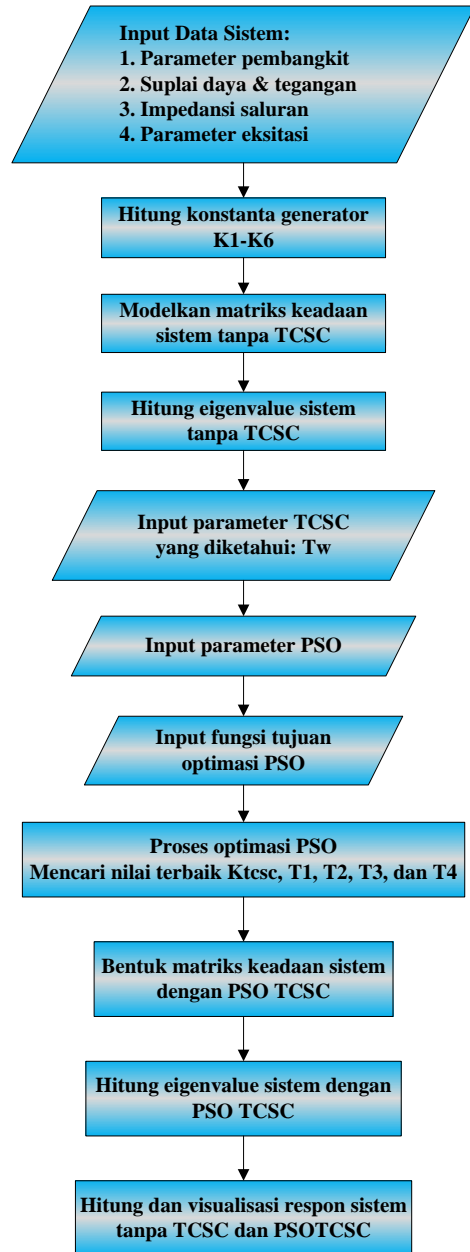
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menala parameter komponen *lead-lag* (T1, T2, T3, dan T4) dan *gain* (Ktsc) guna meredam osilasi pada penyimpangan kecepatan rotor, sudut rotor, dan tegangan terminal generator. Sistem eksitasi yang digunakan adalah tipe *STIA*.

2. Metode

Dalam penelitian ini, metode yang dilakukan adalah memodelkan sistem *Single Machine Infinite Bus* (SMIB) dengan TCSC menggunakan MATLAB dan ditala menggunakan PSO. Kemudian dianalisis berdasarkan perubahan beban dan kondisi sebelum dioptimasi dan sesudah dioptimasi. Berikut adalah penjelasan proses pemodelan dan program optimasi.

2.1. Perancangan Sistem Simulasi

Diagram alir perancangan dan pembuatan program optimasi parameter TCSC menggunakan PSO pada sistem SMIB ditunjukkan pada Gambar 1.

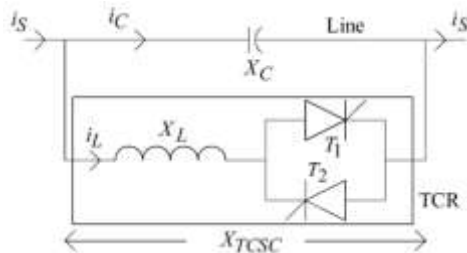


Gambar 1. Diagram alir metode penelitian untuk kajian penelitian

2.2. Model TCSC

Dasar konfigurasi TCSC terdiri dari sebuah kapasitor C dirangkai langsung secara seri dengan saluran transmisi dan sebuah induktor L serta *thyristor* yang

terkontrol dipasang langsung secara paralel dengan kapasitor seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Dengan demikian tidak ada peralatan antarmuka yang dibutuhkan seperti misalnya transformator tegangan tinggi. Katup *thyristor* dua arah dinyalakan dengan sudut tembak berkisar antara 90° dan 180° yang berkaitan dengan tegangan kapasitor.



Gambar 2. Modul TCSC

Hal ini membuat TCSC lebih ekonomis dibandingkan dengan teknologi peralatan FACTS lainnya. Dengan demikian membuat TCSC sederhana dan mudah untuk memahami operasinya. Kompensasi seri akan:

- Meningkatkan kemampuan daya transmisi.
- Memperbaiki sistem stabilitas.
- Mengurangi rugi-rugi sistem.
- Memperbaiki profil tegangan saluran.

Gambar 3 menunjukkan kurva karakteristik impedansi dari TCSC. Kurva ini digambar dengan reaktansi efektif di sumbu y dan sudut tembak α di sumbu x. Reaktansi efektif TCSC mulai naik dari nilai X_L sampai terjadi kondisi resonansi paralel $X_L(\alpha)=X_C$, secara teori nilai X_{TCSC} adalah tak terhingga. Wilayah ini adalah wilayah induktif. Selanjutnya peningkatan $X_L(\alpha)$ memberikan wilayah kapasitif. Mulai menurun dari titik tak terhingga ke nilai minimum reaktansi kapasitif X_C . Dengan demikian karakteristik impedansi TCSC menunjukkan kedua wilayah kapasitif dan induktif yang mungkin meskipun dengan berbagai sudut penyalan (α).

- $90 < \alpha < \alpha_{L\text{lim}}$ Wilayah induktif.
- $\alpha_{C\text{lim}} < \alpha < 180$ Wilayah kapasitif.
- $\alpha_{L\text{lim}} < \alpha < \alpha_{C\text{lim}}$ Wilayah resonansi.

Sementara memilih induktansi, X_L harus cukup kecil dibandingkan dengan kapasitor X_C . Karena untuk mendapatkan kedua reaktansi induktif dan kapasitif yang efektif di seluruh perangkat. Misalkan jika X_C lebih kecil dari X_L , maka hanya wilayah kapasitif yang mungkin ada dalam karakteristik impedansi. Dalam setiap jaringan paralel, nilai efektif reaktansi mengikuti reaktansi rendah yang ada pada cabang. Jadi hanya satu wilayah reaktansi kapasitif yang akan muncul. Juga nilai X_L tidak harus sama dengan nilai

X_C ; atau pun resonansi berkembang yang menghasilkan impedansi tak terbatas. Kondisi ini tidak dapat diterima dan saluran transmisi akan menjadi sirkuit terbuka.

Impedansi rangkaian TCSC untuk rangkaian LC yang diparalel adalah:

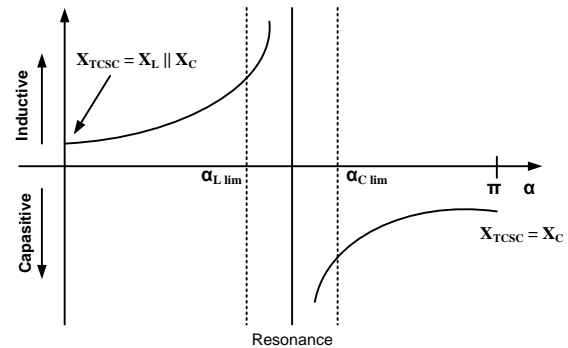
$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_C X_L(\alpha)}{X_L(\alpha) - X_C} \quad (1)$$

Keterangan,

$$X_L(\alpha) = X_L \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin\alpha} \quad (2)$$

α adalah sudut tembak, $X_L(\alpha)$ adalah reaktansi efektif induktor pada sudut tembak α dan dengan batas:

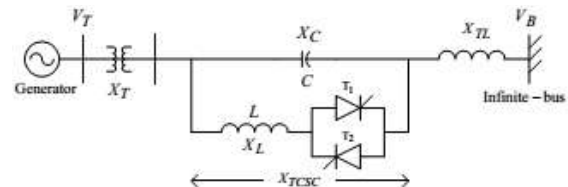
$$X_L \leq X_L(\alpha) \leq \infty$$



Gambar 3. Variasi impedansi TCSC

2.3. Pemodelan SMIB dengan TCSC Sebagai Kontrol Redaman

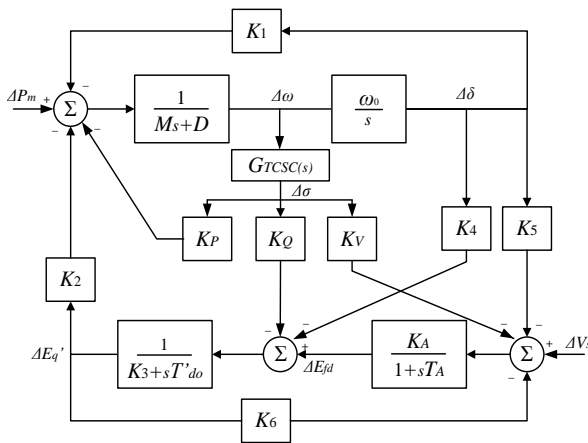
Model SMIB yang terinstal dengan TCSC ditunjukkan pada Gambar 4. Pada gambar di bawah ini, X_T dan X_{TL} masing-masing merepresentasikan reaktansi dari transformator dan saluran transmisi, V_T dan V_B adalah tegangan terminal generator dan tegangan bus tak hingga.



Gambar 4. Sistem tenaga *Single Machine Infinite Bus* (SMIB) dengan TCSC

2.3.1. Persamaan Linear

Model SMIB Philips-Heffron dengan TCSC sebagai kontrol redaman ditunjukkan pada digram blok Gambar 5.



Gambar 5. Model SMIB Philips-Heffron dengan TCSC

Berikut adalah matriks input keadaan sistem SMIB dengan TCSC:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta\delta} \\ \dot{\Delta\omega} \\ \dot{\Delta E_q'} \\ \dot{\Delta E_{fd}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 \\ -\frac{K_4}{T'd_0} & 0 & -\frac{1}{T'd_0 K_3} & \frac{1}{T'd_0} \\ -\frac{K_A K_5}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E_q' \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{K_P}{M} \\ -\frac{K_Q}{T'd_0} \\ -\frac{K_A K_V}{T_A} \end{bmatrix} [\Delta\sigma]$$

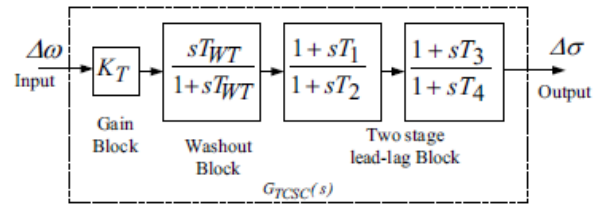
Sedangkan matriks output sistemnya adalah:

$$\Delta\omega = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E_q' \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix}$$

2.3.2. Struktur TCSC Berdasarkan Kontrol Redaman

Komponen utama dari struktur kontroler *Thyristor Controlled Series Capacitor* meliputi:

- Blok reset (*washout*), digunakan untuk menghilangkan bias *steady-state*, yang mana bias ini dapat menyebabkan perubahan tegangan terminal.
- Komponen *Lead/Lag*, berfungsi untuk memberikan kompensasi sudut keteringgalan fasa antara input sistem eksitasi dengan torsi elektrik.
- Penguatan, digunakan untuk memperoleh redaman yang sesuai dengan cara mengatur besar kecilnya penguatan.



Gambar 6. Diagram blok struktur TCSC sebagai kontrol redaman

Desain TCSC yang tepat akan menghasilkan sistem tenaga yang lebih handal dan stabil dibandingkan sistem tenaga tanpa TCSC. Ketika terjadi gangguan, TCSC akan mengaktifkan sinyal kontrol untuk meredam osilasi gelombang keluaran dari generator.

Data T_w dikondisikan sesuai data yang ada pada jurnal dan bernilai 10. Sedangkan K_{TCSC} , T_1 , T_2 , T_3 , dan T_4 dicari nilai optimalnya melalui metode PSO dengan rentang batas atas dan batas bawah yang sudah ditentukan. Tidak ada standard khusus dalam penentuan range ini tetapi biasanya T_w berada di nilai 1 – 20s, sedangkan $T_1 - T_4$ berada pada nilai 0,001 – 1s, dan K_{TCSC} yaitu 1 – 100s.

2.3.3. Fungsi Tujuan

Kontroler TCSC dirancang untuk meminimalisasi osilasi sistem tenaga setelah adanya gangguan kecil maupun besar, sehingga meningkatkan kestabilan sistem. Osilasi ini terpengaruhi oleh nilai eigen. Maka dari itu fungsi objektif yang digunakan dalam penelitian ini adalah berdasarkan nilai eigen sistem yang diperoleh dari matriks A dalam persamaan state-space, dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\text{Minimasi } f = \frac{1}{8 + \max [\text{Real}(\lambda)]} \quad (3)$$

Dengan λ sebagai nilai eigen sistem.

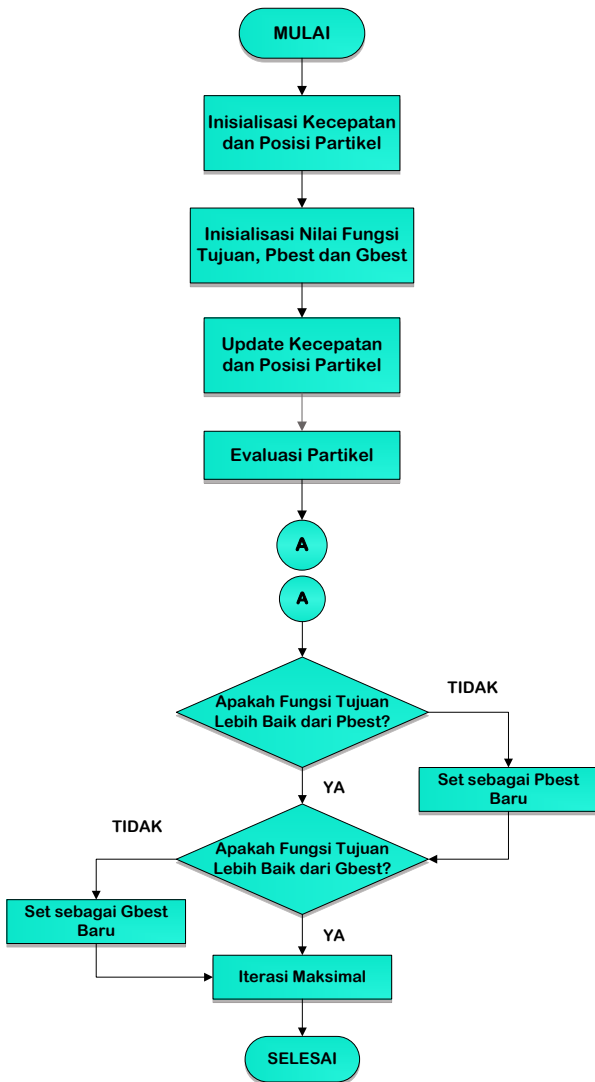
Batasan nilai untuk masing-masing parameter kontroler adalah sebagai berikut:

$$\left. \begin{array}{l} K_{tcsc}^{min} \leq K_{tcsc} \leq K_{tcsc}^{max} \\ T_1^{min} \leq T_1 \leq T_1^{max} \\ T_2^{min} \leq T_2 \leq T_2^{max} \\ T_3^{min} \leq T_3 \leq T_3^{max} \\ T_4^{min} \leq T_4 \leq T_4^{max} \end{array} \right\}$$

2.4. Particle Swarm Optimization (PSO)

Algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart tahun 1995, proses algoritmanya terinspirasi oleh tingkah laku sosial pada kawanan burung yang terbang bersama-sama. Perilaku sosial ini terdiri dari tindakan individu dan pengaruh dari individu yang lain dalam satu kelompok.

Setiap individu berperilaku secara terdistribusi dengan menggunakan kecerdasannya sendiri dan juga dipengaruhi kelompok kolektifnya. Dengan demikian, jika salah satu partikel menemukan jalan terbaik menuju sumber makanan, maka sisa anggota yang lain juga akan mengikuti jalan tersebut meskipun lokasi mereka tidak saling berdekatan.



Gambar 7. Diagram alir prosedur PSO

Tabel 1 menunjukkan parameter PSO yang digunakan untuk menala TCSC. Sehingga didapatkan hasil redaman yang maksimal.

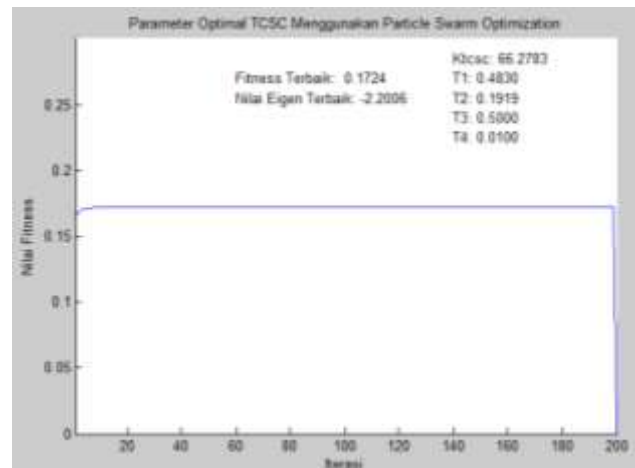
Tabel 1 Data parameter PSO

Parameter PSO	Nilai
MaxIterasi	200
Ukuran Swarm	100

C_1	2
C_2	2
Wstart	0.9
Wend	0.4

3. Hasil dan Analisis

Pengujian ini dimaksudkan untuk mendapatkan nilai parameter optimal TCSC sehingga dapat meningkatkan kestabilan sistem tenaga listrik. Metode optimasi yang digunakan adalah PSO (*Particle Swarm Optimization*). Selama proses optimasi berlangsung, maka akan muncul grafik nilai fungsi tujuan tiap iterasi. Gambar 8 dibawah ini menunjukkan proses optimasi menggunakan metode PSO.



Gambar 8. Grafik nilai fitness dari setiap iterasi

Setelah dilakukan proses optimasi metode diatas, maka akan diperoleh parameter optimal TCSC sesuai dengan kondisi operasi suplai daya generatornya.

Tabel 2 Nilai parameter TCSC hasil optimasi

Kondisi Pembebanan / Parameter TCSC	Ringan	Nominal	Berat
Ktsc	66.2783	68.7366	70.0000
T1	0.4830	0.5000	0.4414
T2	0.1919	0.0100	0.0100
T3	0.5000	0.0100	0.0100
T4	0.0100	0.3026	0.5000

Setelah ditemukan nilai parameter TCSC hasil optimasi, maka selanjutnya akan dicari nilai eigen sistem dengan TCSC. Dengan nilai eigen ini, dapat dianalisis kestabilan suatu sistem tenaga.

Tabel 3 Nilai eigen sistem

Kondisi Pembebanan	Tanpa TCSC	TCSC Tanpa Optimasi	PSOTCSC
Ringan	0.0568 ±	-0.4909 ±	-18.3330 +
	5.2693i	6.9421i	0.0000i
	-10.1644 ±	-9.8296 ±	-2.2006 ±
	2.8342i	2.8165i	10.9852i
Nominal	0.2043 ±	-0.8270 ±	-17.3460 +
	4.8967i	6.6781i	0.0000i
	-10.3119 ±	-11.6071 +	-2.4800 ±
	2.6341i	0.0000i	9.6003i
Berat	0.4874 ±	-8.0470 +	-2.4800 +
	3.9600i	0.0000i	0.0000i
	-10.5950 ±	-12.9908 +	-16.3289 +
	2.7458i	0.0000i	0.0000i
		-0.8966 ±	-2.6482 ±
		5.1623	7.2081i

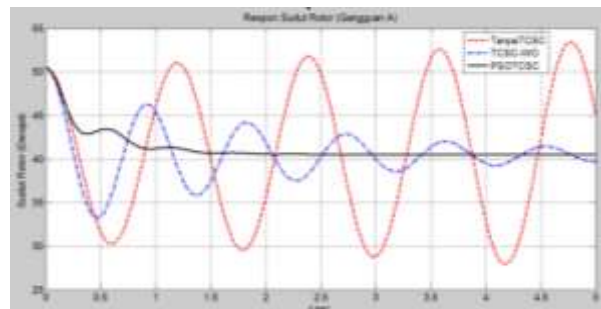
Pada saat kondisi operasi generator menyalurkan daya sebesar $0.5 + j0.169$ p.u, sistem tenaga tanpa TCSC berada dalam daerah tidak stabil dikarenakan bagian real nilai eigen ada yang bernilai positif, yaitu sebesar $0.0567 \pm 5.4378i$. Kemudian, sistem tenaga dengan TCSC tanpa optimasi dengan mengambil nilai parameter secara random, dihasilkan nilai eigen yang negatif. Hal ini lebih baik dibandingkan dengan tanpa menggunakan TCSC. Kemudian, sistem tenaga dengan TCSC dan dioptimasi dengan PSO, dihasilkan nilai eigen yang lebih negatif. Berarti, dengan menala parameter TCSC dengan metode PSO, mampu menggeser nilai eigen ke arah kiri sumbu imajiner, sehingga dihasilkan nilai eigen yang semakin negatif dan peredaman yang lebih efisien.

Begitu pula untuk kondisi operasi generator menyalurkan daya sebesar $0.8 + j0.3649$ p.u dan $1.1 + j0.6479$ p.u, sistem tenaga tanpa TCSC berada dalam daerah tidak stabil dikarenakan bagian real nilai eigen ada yang bernilai positif, masing-masing sebesar $0.2145 \pm 4.9239i$ dan $0.5027 \pm 3.9801i$. Kemudian, sistem tenaga dengan TCSC tanpa optimasi dengan mengambil nilai parameter secara random, dihasilkan nilai eigen yang negatif. Hal ini lebih baik dibandingkan dengan tanpa menggunakan TCSC. Kemudian, sistem tenaga dengan TCSC dan dioptimasi dengan PSO, dihasilkan nilai eigen yang lebih negatif. Berarti, dengan menala parameter TCSC dengan metode PSO, mampu menggeser nilai eigen ke arah kiri sumbu imajiner, sehingga dihasilkan nilai eigen yang semakin negatif dan peredaman yang lebih efisien.

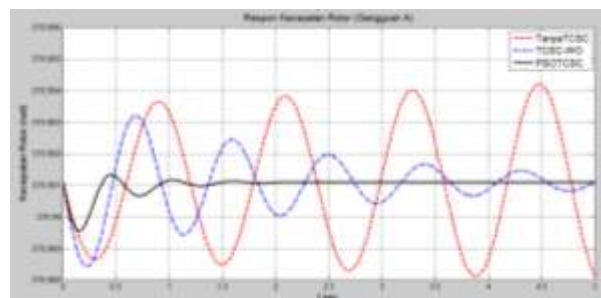
Untuk mengetahui respon sistem terhadap gangguan, diasumsikan sistem tenaga mengalami gangguan kecil (bersifat temporer) sehingga sudut rotor berubah sebesar $\Delta\delta = 10^\circ$. Sebagai contoh CB (*Circuit Breaker*) membuka dan dengan cepat menutup kembali.

Di bawah ini ditampilkan hasil grafik respon sistem tenaga. Garis berwarna merah putus-putus menunjukkan grafik respon sistem tanpa TCSC. Garis berwarna biru putus-putus menunjukkan grafik respon sistem dengan TCSC tanpa optimasi. Sedangkan garis berwarna hitam solid menunjukkan grafik respon sistem dengan TCSC yang dioptimasi menggunakan metode PSO.

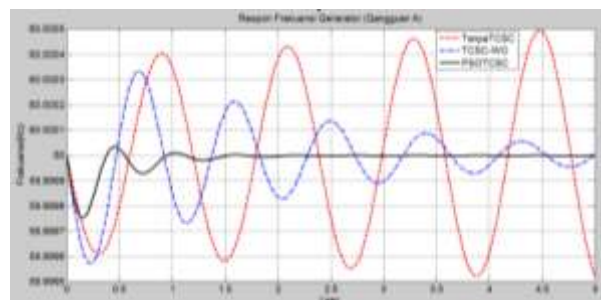
Gambar 9 menunjukkan grafik respon (a) sudut rotor, (b) kecepatan rotor, dan (c) frekuensi generator pada kondisi pembebanan ringan.



(a) Sudut rotor



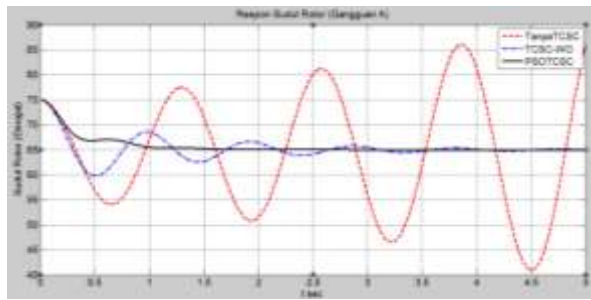
(b) Kecepatan rotor



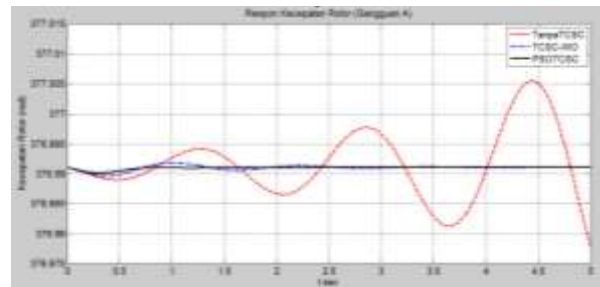
(c) Frekuensi generator

Gambar 9 Grafik respon sistem pada saat menyalurkan daya sebesar $0.5 + j0.169$

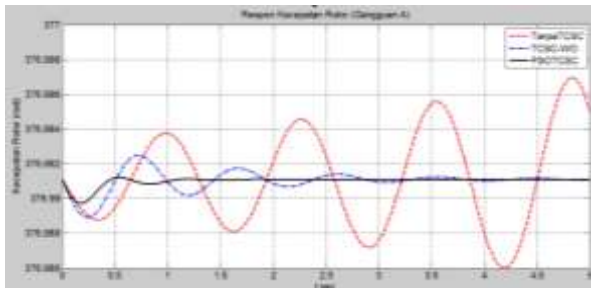
Gambar 10 menunjukkan grafik respon (a) sudut rotor, (b) kecepatan rotor, dan (c) frekuensi generator pada kondisi pembebanan nominal.



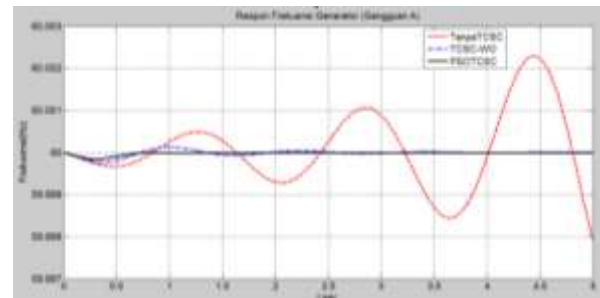
(a) Sudut rotor



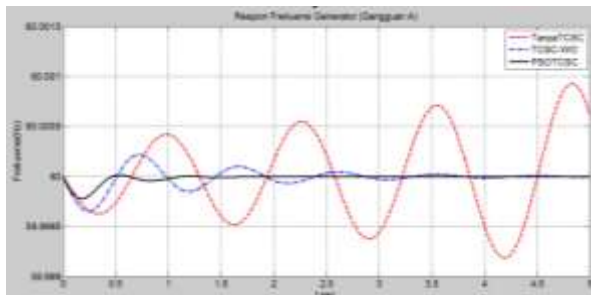
(b) Kecepatan rotor



(b) Kecepatan rotor



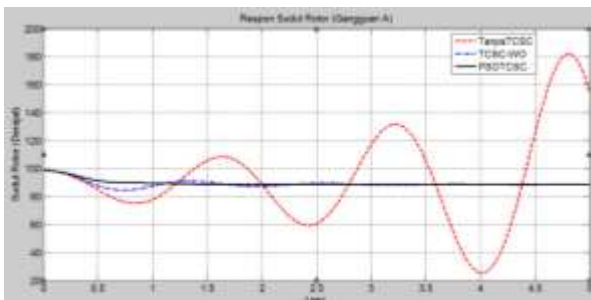
(c) Frekuensi generator



(c) Frekuensi generator

Gambar 10 Grafik respon sistem pada saat menyalurkan daya sebesar $0.8 + j0.3649$

Gambar 11 menunjukkan grafik respon (a) sudut rotor, (b) kecepatan rotor, dan (c) frekuensi generator pada kondisi pembebanan berat.



(a) Sudut rotor

Gambar 11 Grafik respon sistem pada saat menyalurkan daya sebesar $1.1 + j0.6479$

Sistem tanpa TCSC berada pada kondisi tidak stabil. Atau lebih tepatnya, sistem stabil pada ayunan pertama tetapi kemudian berosilasi secara terus-menerus menjadi tidak stabil. Bentuk ketidak-stabilan ini biasanya terjadi ketika pasca-gangguan keadaan mantap itu sendiri, yaitu berupa "small-signal" yang tidak stabil [8]. Kemudian sistem dengan TCSC tanpa optimasi menunjukkan bahwa sistem dalam keadaan stabil, namun waktu yang dibutuhkan untuk kembali ke kondisi mantap lebih dari 3 detik. Sedangkan sistem dengan TCSC yang dioptimasi menggunakan PSO menunjukkan bahwa sistem berada pada kondisi stabil dengan waktu untuk kembali ke kondisi mantap kurang dari 3 detik.

Dari semua kurva hasil pengujian di atas, dapat diambil suatu kesimpulan bahwa peralatan FACTS yang berupa kompensasi seri, dalam hal ini adalah TCSC, mampu beroperasi pada berbagai kondisi pembebanan dan dapat meredam gangguan akibat perubahan sudut rotor sebesar $\Delta\delta = 10^\circ$.

4. Kesimpulan

Kompensasi seri, seperti halnya TCSC, yang dipasang pada saluran transmisi terbukti sangat efektif untuk meningkatkan stabilitas jaringan dan dapat meredam osilasi yang diakibatkan oleh "small-signal" yang tidak stabil. Fungsi tujuan yang berdasarkan nilai eigen,

terbukti mampu membuat sistem lebih stabil. Terbukti dengan bergesernya nilai eigen ke arah kiri sumbu imajiner *s-plane* dan diperoleh sistem dengan faktor redaman tinggi pada semua kondisi operasi yang diasumsikan. Untuk pengembangan selanjutnya, dapat digunakan peralatan FACTS yang lain pada jaringan yang lebih luas, *multimachine*, dan dioptimasi dengan metode stokastik lainnya, seperti *Ant Colony Optimization* (ACO).

Referensi

- [1]. Acha, E., dkk. *FACTS Modelling and Simulation in Power Networks*. John Wiley & Sons Ltd. England. 2004.
- [2]. Anderson, P.M., A.A. Fouad. *Power System Control and Stability*. Iowa State University. USA. First Edition, 1997.
- [3]. Cai, Lijun. *Robust Coordinated Control of FACTS Devices in Large Power Systems*. Logos Verlag. Berlin. 2004.
- [4]. Chakrabarti, A., Sunita Halder. *Power System Analysis: Operation and Control*. Prentice-Hall. New Delhi, India. 2006.
- [5]. Hingorani, N. G., L. Gyugi. *Understanding FACTS*. Institut of Electrical and Electronics Engineers. New York. 2000.
- [6]. Hu, Xiaohui. "PSO Tutorial", <URL:<http://www.swarmintelligence.org/tutorials.php>>. 2006.
- [7]. Kennedy, J., Eberhart, R. C., and Shi, Y. *Swarm Intelligence*. Academic Press. USA. 2001.
- [8]. Kundur, Prabha. *Power System Stability and Control*. The McGraw-Hill Companies. New York. 1994.
- [9]. Machowski, Jan., dkk. *Power System Dynamics: Stability and Control*. John Wiley & Son Ltd. England. Second Edition. 2008.
- [10]. Ogata, Katsuhiko. *Designing Linear Control Systems With MATLAB*. Prentice-Hall. New Jersey. 1994.
- [11]. Padiyar, KR. *Power System Dynamics: Stability and Control*. BS Publication. Second Edition, 2008.
- [12]. Pal, Mrinal K. *Lecture Notes on Power System Stability*. Edison, New Jersey. June, 2007.
- [13]. Panda, S., dkk. *Genetically Optimized TCSC Controller for Transient Stability Improvement*. International Journal of Computer, Information, and System Science, and Engineering 1. 2007.
- [14]. Panda, S., dkk. *Optimal Supplementary Damping Controller Design for TCSC Employing RCGA*. World Academy of Science, Engineering and Technology 51. 2009.
- [15]. Panda, S., dkk. *Power System Stability Improvement by TCSC Controller Employing a Multi-Objective Genetic Algorithm Approach*. International Journal of Electrical dan Computer Engineering 1:7. 2006.
- [16]. Paulus, Erick, dan Yessica Nataliani. *Gui Matlab*. Andi. Yogyakarta. 2007.
- [17]. Robandi, Imam. *Modern Power System Control*. Andi. Yogyakarta. 2009.
- [18]. Rosalina. *Analisis Kestabilan*. FT UI. BAB 2, 2010.
- [19]. Saadat, Hadi. *Power System Analysis*. The McGraw-Hill Companies. New York. 1999.
- [20]. Santosa, Budi., P. Willy. *Metoda Metaheuristik: Konsep dan Implementasi*. Guna Widya. Surabaya. April 2011.
- [21]. Suyanto. *Algoritma Genetika dalam Matlab*. Andi. Yogyakarta. 2005.
- [22]. Yamlecha, Jibril. *Perbandingan Desain Optimal Power System Stabilizer (PSS) Menggunakan PSO (Particle Swarm Optimization) dan GA (Genetic Algorithm) Pada Single Machine Infinite Bus (SMIB)*. Skripsi S1. Universitas Diponegoro. Semarang. 2012.