

OPTIMAL PID-SSSC MENGGUNAKAN PARTICLE SWARM OPTIMIZATION PADA SINGLE MACHINE INFINITE BUS

Nasrun Kadir^{1*}, Muhammad Ruswandi Djalal²

^{1,2}Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang Makassar

ABSTRAK

Variasi beban menyebabkan osilasi pada generator, mempengaruhi frekuensi dan sudut rotor. Untuk meningkatkan kestabilan generator, terutama pada saat terjadi perubahan beban, diperlukan peralatan kendali tambahan. Static Synchronous Series Compensator (SSSC) adalah perangkat elektronika daya flexible ac transmission systems (FACTS) devices yang dapat digunakan untuk meningkatkan stabilitas dan pengendalian sistem tenaga. Kontrol Proportional Integral Derivative (PID) adalah metode kontrol konvensional yang tangguh dan sederhana yang saat ini masih banyak digunakan dalam kontrol proses. Untuk mendapatkan kinerja PID-SSSC yang optimal, diperlukan koordinasi yang tepat. Pada penelitian ini diusulkan suatu metode optimasi berbasis kecerdasan buatan yang dikenal dengan metode Particle Swarm Optimization (PSO). Efektifitas PID-SSSC pada penelitian ini diuji pada sistem Single Machine Infinite Bus (SMIB). Hasil analisis menunjukkan implementasi PID-SSSC berbasis PSO memberikan hasil yang optimal untuk menunjang kinerja SMIB khususnya saat terjadi perubahan beban. Hasil optimasi menunjukkan fitness function 0.01117. Proses komputasi PSO dalam melakukan optimasi parameter PID-SSSC konvergen pada iterasi ke 24. Kontribusi PID-SSSC mampu memberikan kestabilan yang optimal pada sistem SMIB sehingga osilasi overshoot yang terjadi dapat diredam saat terjadi variasi perubahan beban.

Kata Kunci: FACTS, PID-SSSC, PSO, SMIB, Overshoot

ABSTRACT

Variations in load lead to oscillations in the generator, affecting both frequency and rotor angle. To enhance the generator's stability, particularly during load changes, additional control equipment is required. The Static Synchronous Series Compensator (SSSC) is a power electronic device within Flexible AC Transmission Systems (FACTS) designed to enhance the stability and control of power systems. Proportional-Integral-Derivative (PID) control is a widely used conventional method known for its simplicity and effectiveness in process control. To achieve optimal PID-SSSC performance, proper coordination is essential. This research proposes an artificial intelligence-based optimization method known as Particle Swarm Optimization (PSO). The effectiveness of PID-SSSC was evaluated in this study using a Single Machine Infinite Bus (SMIB) system. The analysis results indicate that the implementation of PSO-based PID-SSSC delivers optimal performance for supporting SMIB, particularly during load changes. The optimization achieved a fitness function value of 0.01117, and the PSO algorithm converged on the PID-SSSC parameters by the 24th iteration. The PID-SSSC significantly enhances the stability of the SMIB system, effectively damping overshoot oscillations that occur during load variations.

Keywords: FACTS, PID-SSSC, PSO, SMIB, Overshoot

1. PENDAHULUAN

Tujuan utama dari sistem tenaga listrik yang saling berhubungan adalah untuk memenuhi persamaan keseimbangan daya yaitu daya yang dihasilkan harus sama dengan kebutuhan dan kerugian, dan dengan demikian menjaga frekuensi dan tegangan dalam nilai nominal [1, 2]. Pemenuhan tujuan ini menjadi perhatian karena beban pada sistem tenaga listrik terus berubah. Perubahan beban menyebabkan ketidakseimbangan antara permintaan dan pembangkitan sistem, yang menyebabkan variasi frekuensi dan tegangan. Maka untuk menjaga frekuensi pada sistem tenaga listrik tetap dalam batas yang ditoleransi maka digunakanlah Load Frekwensi Control (LFC) [3]. Tujuan dari LFC adalah untuk memastikan tidak ada kesalahan kondisi tunak dalam penyimpangan frekuensi dan secara efektif merespons perubahan permintaan beban yang sering terjadi. Tujuan utama dari LFC adalah untuk menjaga frekuensi setiap area dan aliran daya tie-line dengan menyesuaikan pembangkitan daya [4].

Terdapat beberapa pendekatan berbeda untuk memitigasi dampak negatif dari permasalahan perubahan beban pada sistem tenaga listrik. Perangkat Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS) dapat meningkatkan peredaman osilasi sistem tenaga [5, 6]. Karena sistem tenaga listrik bersifat non-linear, parameter kontrol perangkat FACTS diperkirakan, dengan mempertimbangkan non-linearitas system [7]. Saat ini, berbagai algoritma telah digunakan untuk memodelkan pengontrol redaman yang didasarkan pada FACTS, selain itu metode cerdas juga telah banyak digunakan dalam desain terkoordinasi pada system Single Machine Infinite Bus (SMIB). Pada penelitian [8] membahas optimasi FACTS berbasis Static Synchronous Series Compensator (SSSC) dengan metode Genetic Algorithm (GA). Perangkat control terkoordinasi digunakan untuk meningkatkan margin stabilitas dinamis dan meredam mode osilasi elektromekanis. Pada penelitian [9] menguji FACTS berbasis Static Var Compensator (SVC) pada model SMIB. Teknik desain pengontrol yang diusulkan menggunakan GA digunakan untuk mencari parameter ideal pengontrol Power Oscillation Damping (POD). Makalah [10] membahas pengaruh fungsi multi-tujuan dalam peningkatan stabilitas sudut untuk mesin tunggal yang terhubung ke sistem SMIB berbasis SVC. Pada makalah [11] pengendali redaman berbasis FACTS berbasis Interline Power Flow Controller (IPFC) untuk meningkatkan peningkatan stabilitas sinyal kecil pada system SMIB. Dari analisis IPFC memberikan peningkatan kinerja pada system SMIB. Pada makalah [12] membahas peningkatan stabilitas sinyal kecil pada sistem SMIB, menggunakan FACTS berbasis Thyristor Controlled Series

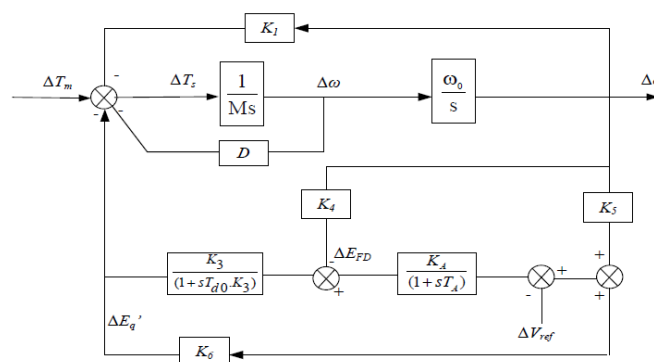
Capacitor (TCSC). Efek TCSC pada sudut rotor dan kecepatan osilasi rotor dibandingkan.

Penerapan metode kecerdasan buatan dalam optimasi parameter FACTS tersebut menunjukkan kinerja yang optimal, khususnya dalam menentukan parameter kontroler. Salah satu metode yang dapat dikembangkan adalah metode Particle Swarm Optimization (PSO) [13, 14]. Metode PSO dalam melakukan optimasi menghadirkan penyelesaian permasalahan optimasi yang optimal. Ada banyak perangkat FACTS yang tersedia, dan dari analisis literatur saat ini, terlihat bahwa struktur terkoordinasi SSSC memiliki relevansi yang signifikan untuk pengontrol lead-lag. SSSC merupakan perangkat yang dihubungkan secara seri dengan saluran transmisi tenaga listrik dan menghasilkan tegangan yang dapat dikontrol sehingga berkontribusi terhadap kinerja yang lebih baik dalam stabilitas sistem tenaga listrik. Pada penelitian ini diusulkan penerapan SSSC pada system SMIB berbasis PSO. Parameter SSSC dioptimalkan menggunakan PSO dengan Integral Time Absolute Error (ITAE) sebagai objective function. Untuk menguji kinerja skema control yang diusul, system diberikan variasi perubahan beban

2. PERMODELAN SISTEM

A. Pemodelan Linier Mesin Sinkron

SMIB merupakan sistem yang diwakili oleh pembangkit listrik yang terdiri dari generator yang terhubung ke bus tak terbatas. Dalam tulisan ini, SMIB berasumsi bahwa saturasi inti generator dan resistor resistansi dapat diabaikan, sistem diasumsikan seimbang, dan beban bersifat statis. Model linier SMIB yang digunakan dalam penelitian ini seperti ditunjukkan pada Gambar 1 [15].

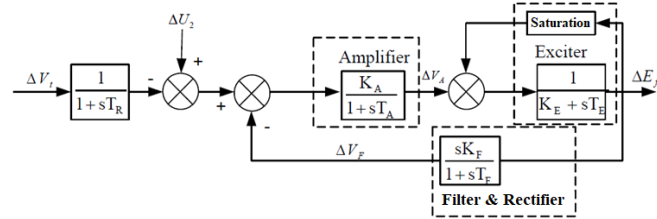


Gambar 1. Pemodelan Linier Mesin Sinkron

B. Pemodelan Eksitasi

Sistem eksitasi merupakan suatu mekanisme kendali untuk mengatur keluaran generator, meliputi tegangan, arus, dan faktor daya. Ketika terjadi perubahan keluaran generator, sistem eksitasi menyesuaikan generator untuk mencapai keseimbangan baru.

Peralatan eksitasi merupakan komponen sistem yang bertanggung jawab untuk mengatur variabel keluaran generator, antara lain tegangan, arus, dan faktor daya [16]. Model eksitasi, sesuai standar IEEE, diilustrasikan pada Gambar 2 [17].

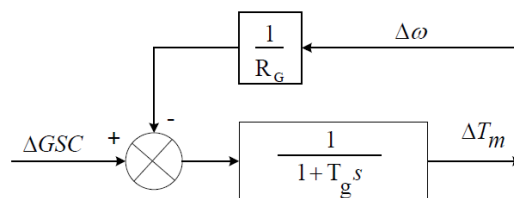


Gambar 2. Block Diagram Eksitasi

K_A adalah gain amplifier, K_F adalah gain filter, K_E adalah gain exciter, T_A adalah waktu tanggap amplifier, T_E adalah waktu tanggap exciter, T_F adalah waktu tanggap filter, dan ΔU_2 adalah perubahan sinyal kontrol mesin

C. Pemodelan Governor

Governor merupakan salah satu komponen unit pembangkit yang mengontrol suplai bahan bakar ke sistem, bertujuan untuk menjaga kestabilan kecepatan rotor. Ketika terjadi perubahan pada terminal keluaran generator karena variasi beban, fungsi umpan balik diaktifkan, dan pengatur menyesuaikan untuk menstabilkan putaran rotor. Governor merupakan suatu pengontrol yang mengatur nilai torsi mekanis yang dimasukkan dari generator [18]. Pemodelan sistem ini digambarkan pada Gambar 3.

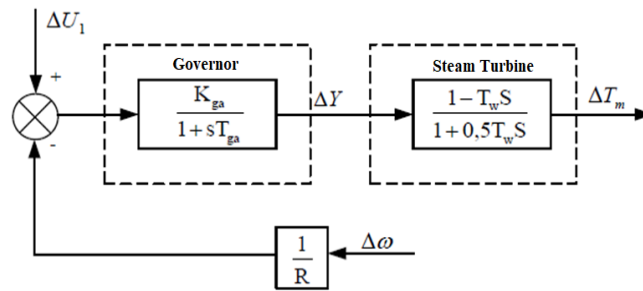


Gambar 3. Pemodelan Governor

K_g adalah gain = $1/R_G$, T_g adalah Governor time konstan, R_G adalah Konstanta group governor, ΔGSC adalah Perubahan acuan kecepatan.

D. Pemodelan Turbin

Model turbin yang digunakan didasarkan pada model turbin pembangkit listrik tenaga uap dari standar IEEE [19]. Model ini diilustrasikan pada Gambar 4.

**Gambar 4.** Pemodelan Turbin

ΔY adalah perubahan tinggi katup, T_w adalah waktu tanggap turbin uap, T_{ga} adalah waktu tanggap pengatur turbin uap, K_{ga} adalah penguatan pengatur turbin uap, R adalah konstanta pengatur turbin uap, dan ΔU_1 adalah perubahan sinyal kontrol umpan balik.

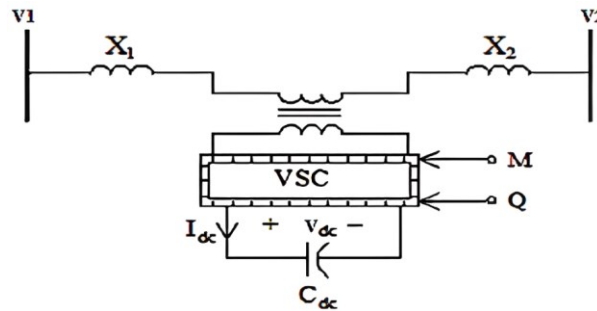
E. SSSC Model

SSSC bertindak sebagai kompensator seri yang tegangan keluarannya dapat dikontrol sepenuhnya, tidak bergantung pada arus saluran dan dijaga dalam kuadratur dengannya, dengan tujuan untuk menambah atau mengurangi penurunan tegangan pada saluran, sehingga mengontrol daya tegangan dasar V_q dalam kuadratur sehubungan dengan arus saluran, dan dapat memberikan kompensasi kapasitif jika V_q memimpin I sebesar $\pi/2$ rad atau kompensasi induktif jika V_q tertinggal dari I sebesar $\pi/2$ rad [20]. Pertukaran daya aktif yang relatif kecil diperlukan untuk mengkompensasi rugi-rugi transformator kopling dan switching, serta mempertahankan tegangan DC yang diperlukan [21]. Memang benar, SSSC dapat dikontrol dalam dua mode operasi yang berbeda: SSSC mengandalkan konverter listrik suplai tegangan yang diumpankan kapasitor dc yang menghasilkan tegangan tiga fasa pada dasarnya, yang kemudian disuntikkan ke kabel melalui perangkat listrik yang terhubung secara asinkron dengan saluran. Daya aktif dan reaktif pada saluran transmisi dikendalikan dengan mengontrol amplitudo dan sudut V_q , SSSC memberikan tegangan V_q pada saluran transmisi. Persamaan diferensial kapasitor DC dapat dinyatakan pada persamaan (1).

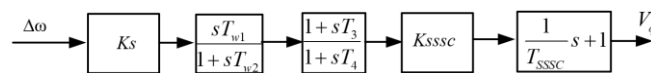
$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{3}{2c} K_r M_r (I_q \cos \varphi + I_d \sin \varphi) - \frac{V_{dc}}{CR_p} \quad (1)$$

Dimana, C adalah nilai kapasitor, K_r adalah perbandingan tegangan ac ke dc dan M_r adalah perbandingan modulasi dan V_{dc} adalah tegangan dc, I_d dan I_q adalah sumbu d dan q arus saluran, struktur dan diagram blok SSSC seperti terlihat pada Gambar 6 dan 7. Pengendali

lead-lag lebih disukai oleh utilitas sistem tenaga listrik, karena kemudahan dalam pelatihan on-line dan kurangnya jaminan stabilitas oleh beberapa pendekatan struktur adaptif dan variabel. Sinyal masukan dan keluaran pengontrol adalah $\Delta\omega$ dan V_q . Selama kondisi dinamis, tegangan yang disuntikkan seri V_q dimodulasi untuk meredam osilasi sistem. Nilai efektif V_q pada kondisi dinamis adalah $V_q = V_{qref} + \Delta V_q$.

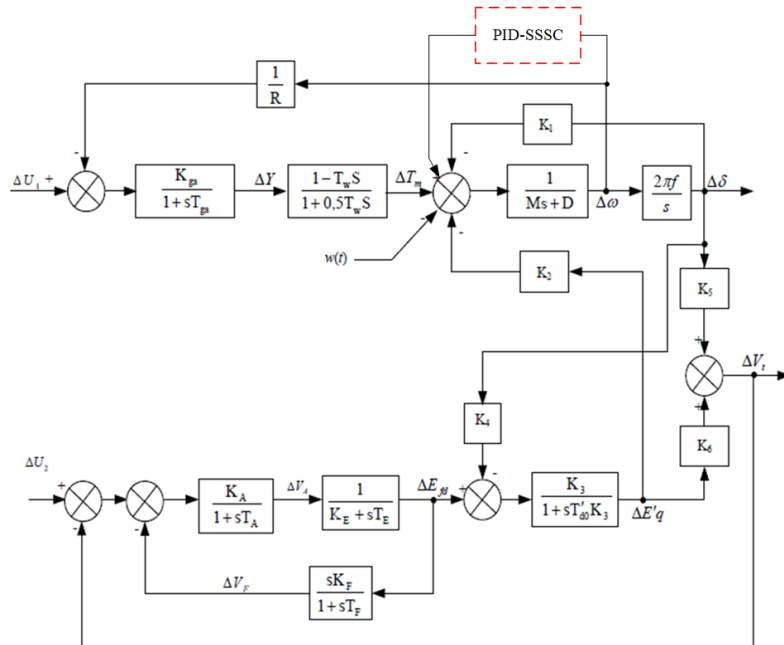


Gambar 5. A SSSC Structure



Gambar 6. SSSC Model

Pemodelan keseluruhan sistem ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7. Pemodelan System

3. PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Particle Swarm Optimization (PSO) merupakan metode optimasi yang menggunakan pendekatan berbasis populasi. PSO dimulai dengan menyebarkan sekelompok populasi partikel dalam suatu ruang masalah. Partikel-partikel yang tersebar ini disebut gerombolan [22, 23]. Partikel ini menyimpan informasi tentang keberadaannya dan nilai potensial yang dihasilkan oleh keberadaan tersebut. Partikel-partikel tersebut akan memberikan informasi satu sama lain, sehingga dari informasi yang diperoleh akan diketahui partikel mana yang menempati lokasi tersebut dengan hasil yang paling optimal pada suatu pergerakan. Dari informasi tersebut, partikel lain kemudian akan berpindah ke lokasi tersebut berdasarkan fungsi gerak yang disebut kecepatan. Selama proses optimasi, setiap partikel menentukan posisinya dengan mempertimbangkan pengalaman terbaiknya sendiri (P_{best}) dan pengalaman terbaik partikel lainnya (G_{best}). Konsep PSO dapat dirumuskan dalam Persamaan (2) dan (3).

Update velocity partikel:

$$v_i^{k+1} = v_i + c_1 r_1 (P_{best_i} - x_i^k) + c_2 r_2 (G_{best_i} - x_i^k) \quad (2)$$

Update position partikel:

$$x_i^{k+1} = x_i + v_i^{k+1} \quad (3)$$

X^k adalah posisi pencarian sekarang, X^{k+1} adalah modifikasi posisi pencarian, V^k adalah Current speed, V^{k+1} adalah Modifikasi speed, $V_{p_{best}}$ adalah Speed based on P_{Best} , $V_{g_{Best}}$ adalah Speed based on G_{best} , n adalah jumlah partikel dalam kelompok, p_{best_i} adalah P_{best} dari k , g_{best_i} adalah g_{best} dari kelompok, w adalah Weight, c_i adalah Weight koefisien untuk:

- c_1 dan c_2 adalah 2 konstanta positif
- r_1 dan r_2 adalah random nilai 0-1

Tabel 1 menyajikan parameter PSO yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 1. Parameter PSO

Parameter	Nilai
Jumlah Partikel	30
Iterasi Maks	50
Jumlah Variabel	10
C2 (Konstanta Sosial)	2
C1 (Konstanta Kognitif)	2
W (Momen Inersia)	0.9

Penalaan SSSC dengan PSO

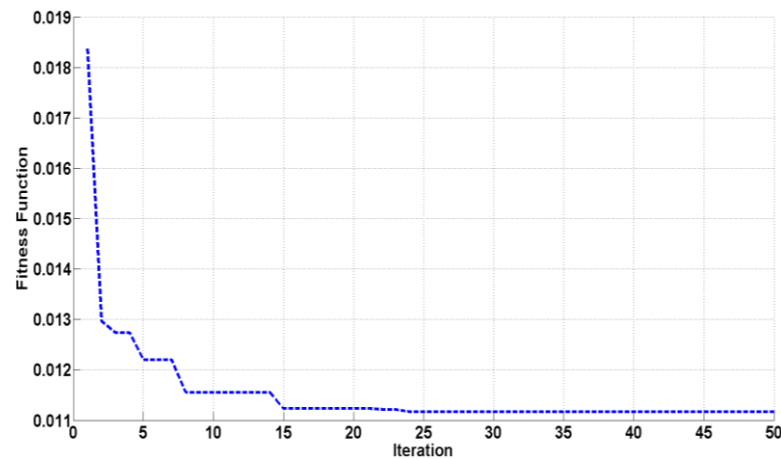
Persamaan (7) mendefinisikan fungsi tujuan yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu Integral Time Absolute Error (ITAE) untuk menguji stabilitas sistem.

$$ITAE = \int_0^t t |\Delta\omega(t)| dt \quad (7)$$

Tabel 2 menampilkan parameter SSSC yang dioptimalkan. Nilai-nilai yang akurat sangat penting karena secara signifikan mempengaruhi kinerja respon SMIB yang dirancang dalam penelitian ini. Algoritma PSO melibatkan proses perhitungan untuk menentukan nilai optimal tersebut.

Tabel 2. Parameter PID-SSSC

Kontroler	Parameter	Kontroler	Parameter
PID	K_P K_I K_D	SSSC	K_{fi}
			K_{SSSC}
			T_{SSSC}
			T_1
			T_2
			T_3
			T_4



Gambar 8. Grafik Konvergensi

Gambar 8 menggambarkan grafik konvergensi optimasi menggunakan algoritma PSO. Konvergensi mewakili nilai fungsi kebugaran yang menunjukkan seberapa dekat solusi memenuhi kriteria optimal untuk masalah optimasi. Berdasarkan grafik terlihat algoritma PSO menghasilkan fitness function sebesar 0.01117 dengan lama proses perhitungan 24 iterasi. Hasil optimasi parameter kontroler optimal SSSC ditunjukkan pada tabel 3.

Tabel 3. Batasan dan Hasil Optimasi

Kontroler	Parameter	Limits		Results
		Lower	Upper	
PID	K_p	0	10	6.4032
	K_i	0	10	1.7718
	K_d	0	1	0.0015
SSSC	K_{fi}	0	50	33.6377
	K_{SSSC}	0	1	0.2196
	T_{SSSC}	0	1	0.0301
	T_1	0	1	0.0494
	T_2	0	1	0.0260
	T_3	0	10	1.1149
	T_4	0	10	4.0531

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

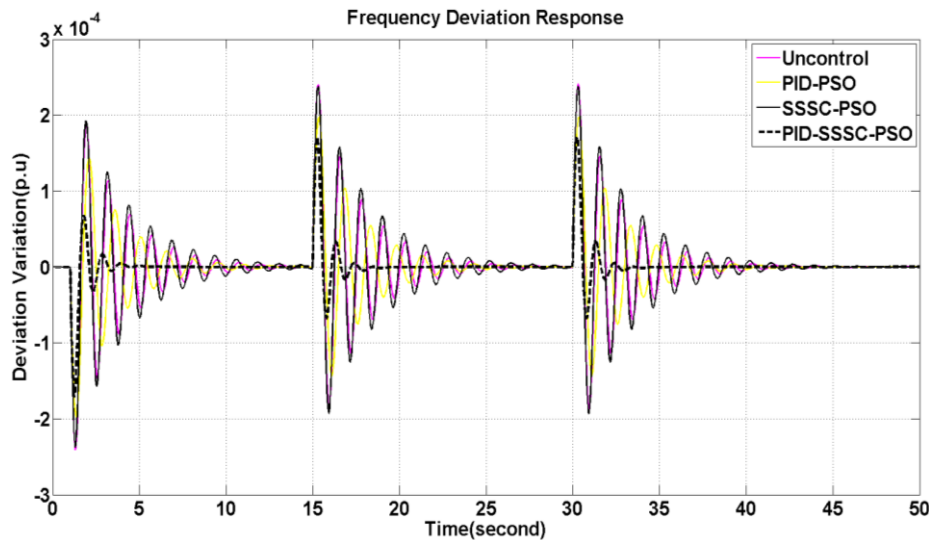
Analisis sistem difokuskan pada evaluasi frekuensi sistem dan sudut rotor SMIB. Berbagai metode pengendalian dianalisis, antara lain sistem tanpa pengendalian, SMIB-PID, SMIB-SSSC, dan SMIB-PID-SSSC. Parameter PID dan SSSC dioptimalkan menggunakan algoritma PSO yang diusulkan. Untuk menilai stabilitas sistem SMIB, gangguan berupa variasi beban diterapkan untuk mensimulasikan dinamika sistem dunia nyata. Dari hasil simulasi sistem SMIB diberi gangguan perubahan beban seperti ditunjukkan pada tabel 4. Variasi perubahan beban ada tiga kondisi yaitu: pada detik ke 1 terjadi pertambahan beban sebesar 0,01 pu, kemudian pada detik ke 15 terjadi pelepasan beban sebesar 0.01 pu, dan pada detik ke 30 terjadi pelepasan beban sebesar 0.01 pu.

Tabel 4. Variasi Beban

Variasi	Step Time	Initial Value	Final Value
Load I	1	0	+0.01
Load II	15	0	-0.01
Load III	30	0	-0.01

A. Respon Frekuensi SMIB

Analisis awal berfokus pada evaluasi respon stabilitas frekuensi sistem SMIB. Gambar 9 menyajikan hasil simulasi respon frekuensi SMIB dengan berbagai metode kontrol. Pada saat perubahan beban awal, diberikan beban tambahan sehingga menimbulkan ketidaksesuaian antara daya listrik dan daya mekanik (P_m). Ketika $P_e > P_m$, maka torsi listrik dan torsi mekanik menjadi tidak seimbang. Ketidakseimbangan ini menyebabkan perubahan frekuensi listrik (Δf). Selama ketidakstabilan ini, kecepatan rotor ($\Delta \omega$) menjadi tidak selaras. Akibatnya, grafik respons frekuensi awalnya menurun sebelum kembali stabil ke kondisi stabil. Peran sistem kendali adalah mengembalikan sistem ke kondisi tunak. Karakteristik respon overshoot pada kondisi tersebut dirinci pada Tabel 5.



Gambar 9. Respon Frekuensi SMIB

Tabel 5. Deviasi Frekuensi

Deviasi	Overshoot (pu)		
	Variasi I	Variasi II	Variasi III
Uncontrol	-0.0002409 & 0.0001859	0.0002402 & -0.0001867	0.0002389 & -0.0001831
PID-PSO	-0.0001963 & 0.0001431	0.0001977 & -0.0001434	0.0001967 & -0.0001433
SSSC-PSO	-0.0002373 & 0.000192	0.0002379 & -0.0001906	0.0002382 & -0.0001903
PID-SSSC-PSO	-0.0001677 & 6.704e-05	0.0001708 & -6.726e-05	0.0001708 & -6.763e-05

Tabel 5 menunjukkan karakteristik *overshoot* sistem dan tabel 6 merupakan settling time masing-masing skema kontrol. Dalam kondisi variasi beban I:

- Sistem SMIB tanpa kendali mengalami overshoot sebesar -0.0002409 & 0.0001859 pu dengan settling time lebih dari 15 detik.
- Sistem SMIB dengan kendali PID-PSO mempunyai overshoot sebesar -0.0001963 & 0.0001431 pu, dan settling time sebesar 13.96 detik.
- Sistem SMIB dengan kontrol SSSC-PSO menunjukkan overshoot sebesar -0.0002373 & 0.000192 pu, dengan settling time sebesar 13.08 detik.
- Sistem SMIB dengan kontrol PID-SSSC-PSO mencapai overshoot sebesar -0.0001677 & 6.704e-05 pu, dan settling time sebesar 4.759 detik.

Pada variasi beban II dan III, perubahan beban melibatkan penurunan beban sehingga menyebabkan penurunan daya listrik (P_e). Dalam skenario ini, penurunan beban menyebabkan daya listrik (P_e) lebih kecil dibandingkan daya mekanik (P_m), sehingga menyebabkan ketidakseimbangan antara torsi listrik dan mekanik. Ketidakseimbangan ini mengakibatkan perubahan frekuensi listrik (Δf). Selama ketidakstabilan ini, kecepatan rotor ($\Delta \omega$) menjadi tidak selaras, menyebabkan grafik respons frekuensi awalnya naik sebelum stabil kembali ke kondisi tunak. Peran sistem kendali adalah mengembalikan

sistem ke kondisi tunak. Rincian overshoot frekuensi dan settling time perubahan beban II dan III disajikan pada Tabel 5 dan 6. Gambar 9 menggambarkan respon frekuensi kelistrikan sistem (Δf).

Tabel 6. Settling Time Frekuensi

Deviasi	Settling Time (s)		
	Variasi I	Variasi II	Variasi III
Uncontrol	>15	>30	>45
PID-PSO	13.96	28.74	44.39
SSSC-PSO	13.08	28.36	43.51
PID-SSSC-PSO	4.759	19.27	33.45

B. Respon Sudut Rotor

Analisis selanjutnya mengkaji kinerja respon sudut rotor SMIB selama variasi beban. Pada variasi I dimana beban bertambah +0,01 pu maka daya listrik juga ikut naik. Jika daya mekanik generator melebihi daya listrik maka dapat menyebabkan percepatan rotor. Percepatan ini berdampak pada sudut rotor sehingga menyebabkan respon sudut rotor menurun atau menjadi negatif dibandingkan keadaan sebelum gangguan, seperti ditunjukkan pada Gambar 10. Nilai teramati untuk overshoot sudut rotor dan waktu penyelesaian dirinci pada Tabel 7.

Tabel 7. Deviasi Sudut Rotor

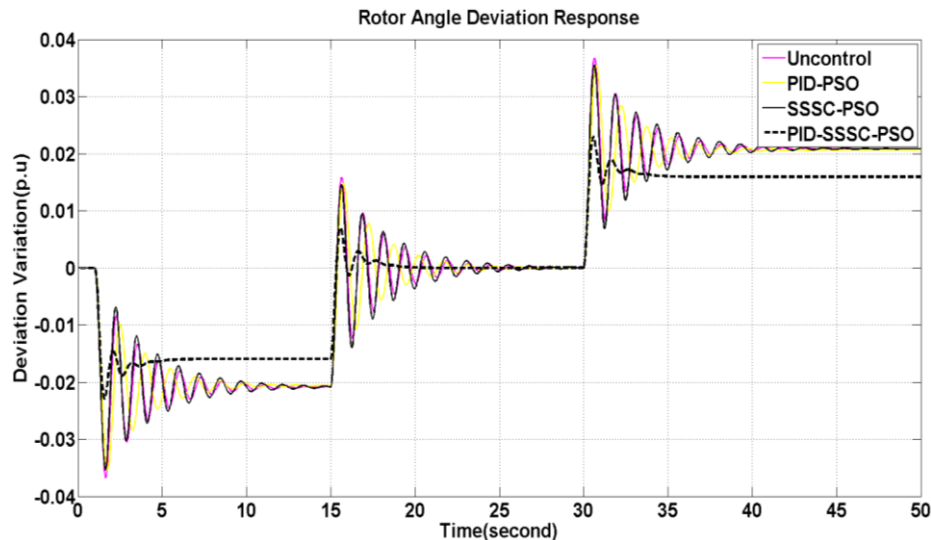
Deviasi	Overshoot (pu)		
	Variasi I	Variasi II	Variasi III
Uncontrol	-0.03671 & -0.008525	0.01581 & -0.01199	0.03674 & 0.008474
PID-PSO	-0.0352 & -0.009908	0.01462 & -0.0106	0.03525 & 0.009925
SSSC-PSO	-0.03524 & -0.007078	0.01458 & -0.01398	0.03547 & 0.006866
PID-SSSC-PSO	-0.02294 & -0.01465	0.006919 & -0.001004	0.0229 & 0.01465

Tabel 7 menyajikan karakteristik overshoot sudut rotor sistem sebagai respons terhadap perubahan beban yang terjadi pada detik pertama, yang melibatkan beban tambahan. Hasilnya adalah sebagai berikut:

- Sistem SMIB tanpa kendali mengalami overshoot sebesar -0.03671 & -0.008525 pu, dengan settling time lebih dari 15 detik.
- Sistem SMIB dengan kontrol PID-PSO mencapai overshoot sebesar -0.0352 & -0.009908 pu, dan settling time sebesar 6.849 detik.
- Sistem SMIB dengan kontrol SSSC-PSO menunjukkan overshoot sebesar -0.03524 & -0.007078 pu, dengan settling time 14 detik.
- Sistem SMIB dengan kontrol PID-SSSC-PSO memperoleh overshoot sebesar -0.02294 & -0.01465 pu, serta settling time sebesar 6.934 detik.

Pada variasi beban II dan III, penurunan beban terjadi pada waktu 15 dan 30 detik. Selama periode tersebut, daya mekanik generator lebih kecil dibandingkan daya listrik

sehingga menyebabkan rotor melambat. Perlambatan ini mempengaruhi sudut rotor, sehingga mengakibatkan peningkatan atau perubahan positif pada sudut rotor dibandingkan keadaannya sebelum terjadi gangguan. Efek ini terjadi karena kopling magnet mendorong medan stator melawan medan rotor sehingga menyebabkan peningkatan sudut rotor generator seperti terlihat pada Gambar 9. Detail overshoot dan settling time sudut rotor pada perubahan beban II dan III adalah tersedia pada Tabel 7 dan 8. Gambar 9 menggambarkan grafik respon sudut rotor.



Gambar 10. Respon Sudut Rotor SMIB

Tabel 8. Settling Time Sudut Rotor

Deviasi	Settling Time (s)		
	Variasi I	Variasi II	Variasi III
Uncontrol	>15	>30	>45
PID-PSO	12.97	28.08	44.54
SSSC-PSO	11.07	24.41	41.39
PID-SSSC-PSO	4.932	19.41	35.28

5. KESIMPULAN

Penalaan parameter PID-SSSC berbasis PSO memberikan hasil optimasi yang optimal untuk menunjang kinerja SMIB khususnya saat terjadi perubahan beban. Berdasarkan evaluasi fitness function, PSO menunjukkan nilai yang minimum dibandingkan sebesar 0.01117. Proses komputasi PSO dalam melakukan optimasi parameter PID-SSSC konvergen pada iterasi ke-24 dalam menentukan parameter optimal kontroler. Hasil optimasi parameter PID berbasis PSO yaitu: $K_P = 6.4032$, $K_I = 1.7718$, $K_D = 0.0015$. Sedangkan parameter SSSC yaitu: $K_{fi} = 33.6377$, $K_{SSSC} = 0.2196$, $T_{SSSC} = 0.0301$, $T_1 = 0.0711$, $T_2 = 0.0328$, $T_3 = 1.2524$, $T_4 = 5.4911$.

Dari hasil analisa respon frekuensi dan sudut rotor, skema kontrol yang diusulkan berbasis PID-SSSC-PSO menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan skema kontrol lain, hal ini ditunjukkan dari respon overshoot frekuensi yang minimum dan settling time yang cepat saat terjadi variasi perubahan beban. Kombinasi kontroler PID-SSSC mampu memberikan kestabilan yang optimal sehingga osilasi *overshoot* yang terjadi dapat diredam. Selain itu, kinerja sistem berdasarkan respon *settling time*, di mana sistem dapat beradaptasi secara cepat untuk kembali ke kondisi *steady state* saat terjadi variasi perubahan beban.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Abubakr, J. C. Vasquez, T. H. Mohamed, and J. M. Guerrero, "The concept of direct adaptive control for improving voltage and frequency regulation loops in several power system applications," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 140, p. 108068, 2022.
- [2] M. Mokhtar, M. I. Marei, M. A. Sameh, and M. A. Attia, "An adaptive load frequency control for power systems with renewable energy sources," *Energies*, vol. 15, no. 2, p. 573, 2022.
- [3] M. M. Gulzar, M. Iqbal, S. Shahzad, H. A. Muqet, M. Shahzad, and M. M. Hussain, "Load frequency control (LFC) strategies in renewable energy-based hybrid power systems: A review," *Energies*, vol. 15, no. 10, p. 3488, 2022.
- [4] H. Abubakr *et al.*, "Adaptive LFC incorporating modified virtual rotor to regulate frequency and tie-line power flow in multi-area microgrids," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 33248-33268, 2022.
- [5] P. R. Sahu, R. K. Lenka, R. K. Khadanga, P. K. Hota, S. Panda, and T. S. Ustun, "Power system stability improvement of FACTS controller and PSS design: a time-delay approach," *Sustainability*, vol. 14, no. 21, p. 14649, 2022.
- [6] G. Yu, T. Lin, J. Zhang, Y. Tian, and X. Yang, "Coordination of PSS and FACTS damping controllers to improve small signal stability of large-scale power systems," *CSEE journal of power and energy systems*, vol. 5, no. 4, pp. 507-514, 2019.
- [7] M. Ranjan and R. Shankar, "A literature survey on load frequency control considering renewable energy integration in power system: Recent trends and future prospects," *Journal of Energy Storage*, vol. 45, p. 103717, 2022.

- [8] M. G. Jolfaei, A. M. Sharaf, S. M. Shariatmadar, and M. B. Poudeh, "A hybrid PSS–SSSC GA-stabilization scheme for damping power system small signal oscillations," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 75, pp. 337-344, 2016.
- [9] H. A. A. Khazim and Y. A. A. Turki, "PSS and SVC Unified Power Oscillation Damping control for a SMIB model," *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 13, no. 7, pp. 5087-5092, 2018.
- [10] N. A. M. Kamari, I. Musirin, and A. A. Ibrahim, "Swarm intelligence approach for angle stability improvement of PSS and SVC-based SMIB," *Journal of Electrical Engineering Technology*, vol. 15, pp. 1001-1014, 2020.
- [11] K. Kumar, S. Parida, and P. K. Biswas, "Comparative analysis of pss and ipfc based damping controller for smib system," in *2019 8th International Conference on Power Systems (ICPS)*, 2019: IEEE, pp. 1-6.
- [12] Y. Kumar, R. N. Mishra, and A. Anwar, "Enhancement of Small Signal Stability of SMIB System using PSS and TCSC," in *2020 International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)*, 28-29 Feb. 2020 2020, pp. 102-106, doi: 10.1109/PARC49193.2020.236566.
- [13] T. M. Shami, A. A. El-Saleh, M. Alswaitti, Q. Al-Tashi, M. A. Summakieh, and S. Mirjalili, "Particle swarm optimization: A comprehensive survey," *Ieee Access*, vol. 10, pp. 10031-10061, 2022.
- [14] A. G. Gad, "Particle swarm optimization algorithm and its applications: a systematic review," *Archives of computational methods in engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 2531-2561, 2022.
- [15] A. Yunus, M. Djalal, and Y. Akil, "SMIB stability enhancement using capacitive energy storage and PID based on ant colony optimization," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 575, no. 1: IOP Publishing, p. 012241.
- [16] I. Robandi, M. R. Djalal, and M. A. Prakasa, "Performance Improvement of Sulselrabar System Using Single-Band Power System Stabilizer Based on Mayfly Algorithm Under Different Loading Condition," *International Journal of Intelligent Engineering & Systems*, vol. 17, no. 1, pp. 370-382, 2024.
- [17] M. R. Djalal and I. Robandi, "Dual Input Power System Stabilizer in Sulselrabar System Based on Mayfly Optimization Algorithm," in *2022 2nd International*

Seminar on Machine Learning, Optimization, and Data Science (ISMODE), 2022: IEEE, pp. 76-81.

- [18] I. Robandi, "Modern Power System Control," *Penerbit ANDI, Yogyakarta*, 2009.
- [19] K. R. Padiyar, *Power System Dynamics*. John Wiley & sons Ltd, Interlaine Publishing Ltd, 1996.
- [20] H. D. Mohammed, "Power System Transient Stability Enhancement by Tuning of SSSC and PSS Parameters Using PSO Technique," *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, vol. 26, no. 6, pp. 81-94, 2018.
- [21] R. K. Khadanga and J. K. Satapathy, "Time delay approach for PSS and SSSC based coordinated controller design using hybrid PSO–GSA algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 71, pp. 262-273, 2015.
- [22] N. A. Firdausanti, "On the comparison of crazy particle swarm optimization and advanced binary ant colony optimization for feature selection on high-dimensional data," *Procedia Computer Science*, vol. 161, pp. 638-646, 2019.
- [23] M. Siswanto, M. Ali, M. A. Haikal, S. Wahyudi, S. Soedarsono, and M. R. Djalal, "Stability of Water Flow in Tanks Using Particle Swarm Optimization (PSO) Method," in *E3S Web of Conferences*, 2024, vol. 473: EDP Sciences, p. 04003.