

Koordinasi Kontroler PID dan *Thyristor Controlled Phase Shifter* (TCPS) pada *Load Frequency Control* (LFC) Menggunakan *Differential Evolution* (DE)

Wendy Kurniawan K, Rony Seto Wibowo, dan Imam Robandi

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

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

Email: ronyseto@ee.its.ac.id

Abstrak—Pada sistem tenaga listrik, perubahan beban tidak dapat diprediksi. Beban yang berubah secara tiba-tiba menyebabkan osilasi pada frekuensi generator. Pada sistem tenaga listrik multi area, generator bekerja secara sinkron. Osilasi frekuensi dapat menyebabkan frekuensi generator lepas sinkron. Oleh karena itu, osilasi frekuensi harus diredam dengan cara pengaturan frekuensi dan beban atau *Load Frequency Control* (LFC). Pengaturan frekuensi pada generator dilakukan oleh *governor*. Untuk mendapatkan performansi yang lebih baik, pengaturan frekuensi pada generator diberi aksi kontrol Kontroler Proporsional Integral Differensial (PID). Selain kontroler PID, osilasi dapat diredam dengan *Thyristor Controlled Phase Shifter* (TCPS). TCPS adalah salah satu peralatan *Flexible AC Transmission System* (FACTS). FACTS juga banyak digunakan sebagai peredam osilasi. Agar didapatkan koordinasi yang baik, maka parameter PID dan TCPS dioptimisasi dengan *Differential Evolution* (DE).

Kata Kunci—*load frequency control, proporsional integral differensial, thyristor controlled phase shifter, differential evolution.*

daya aktif pada saluran transmisi dengan menggeser fasa. Kontrol daya aktif dapat mengurangi osilasi pada sistem [3].

Pada tugas akhir ini dibahas mengenai koordinasi dari kontroler PID dan TCPS yang diaplikasikan pada sistem tenaga listrik multiarea. Untuk mendapatkan koordinasi yang optimal, maka parameter-parameter PID dan TCPS dioptimisasi menggunakan *Differential Evolution* (DE).

II. PEMODELAN SISTEM DAN ALGORITMA

A. Pemodelan LFC pada Sistem Tenaga Listrik 2 Area

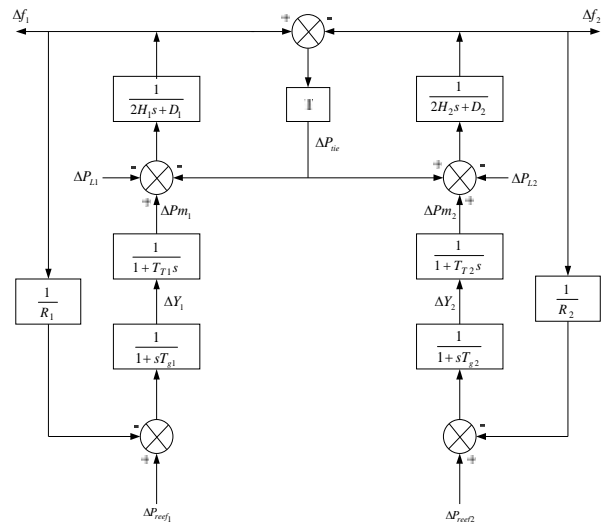
Pada tugas akhir ini, model LFC 2 area menggunakan model dari Hadi Saadat. Model LFC dapat dilihat pada gambar 1. Data parameter sistem yang digunakan adalah data parameter sistem tenaga listrik 2 area Hadi Saadat seperti pada tabel 1 [4].

I. PENDAHULUAN

Pada saat ini, energi listrik merupakan kebutuhan utama. Tanpa energi listrik masyarakat tidak dapat melakukan aktivitas. Kebutuhan tenaga listrik yang meningkat juga menuntut para produsen untuk menambah kapasitas pembangkit. Di samping itu, masyarakat juga menuntut kualitas tenaga listrik yang baik. Salah satu parameter kualitas tenaga listrik adalah frekuensi yang konstan. Oleh karena itu pembangkit tenaga listrik berusaha untuk menjaga agar frekuensi tetap konstan [1].

Pada sistem tenaga listrik, permintaan daya oleh konsumen dapat berubah-ubah. Perubahan dalam skala yang cukup besar secara tiba-tiba menyebabkan perubahan frekuensi pada sistem yang disertai dengan osilasi. Osilasi frekuensi pada sistem tenaga listrik berpengaruh terhadap beban motor dan operasi sinkron generator. Oleh karena itu dibutuhkan pengaturan frekuensi dan beban yang disebut dengan *Load Frequency Control* (LFC) [2].

LFC dapat dilakukan dengan menggunakan aksi kontrol *integral gain* pada *governor*. Kontroler PID dapat digunakan untuk mendapatkan hasil yang lebih baik. Selain itu, osilasi frekuensi juga dapat diredam dengan menambahkan peralatan FACTS pada tenaga listrik. FACTS yang digunakan adalah TCPS. TCPS merupakan peralatan kontrol



Gambar. 1. LFC sistem tenaga listrik 2 area.

Keterangan,

- H_1 = Momen Inersia Area 1
- H_2 = Momen Inersia Area 2
- D_1 = *Load damping* area 1
- D_2 = *Load damping* area 2
- T_{T1} = Konstanta Waktu Turbin Area 1
- T_{T2} = Konstanta Waktu Turbin Area 2
- T_{g1} = Konstanta Waktu Governor area 1
- T_{g2} = Konstanta Waktu Governor Area 2

- R_1 = Speed Drop Area 1
- R_2 = Speed Drop Area 2
- T = Konstanta Sinkronisasi Antar Area
- f_1 = Perubahan Frekuensi Area 1
- f_2 = Perubahan Frekuensi Area 2
- P_{G1} = Perubahan Level kutub Area 1
- P_{G2} = Perubahan Level kutub Area 2
- P_{M1} = Perubahan daya mekanik Area 1
- P_{M2} = Perubahan daya mekanik Area 2
- P_{tie} = Perubahan Transfer Daya antar Area

B. Thyristor Controlled Phase Shifter (TCPS)

Peralatan Flexible AC Transmision System (FACTS) telah banyak digunakan dalam sistem tenaga modern. FACTS dirancang untuk mengatasi keterbatasan kontrol mekanis. Seiring dengan perkembangan elektronika daya, keterbatasan mekanis dapat teratasi. Sehingga performansi steady state dan dinamis dapat diperbaiki [5], [6].

Kontrol aliran daya pada tie line dapat dilakukan dengan memasang seri TCPS dengan tie line pada sistem interkoneksi dua area, seperti pada gambar 2. Hal ini memungkinkan pengaturan sistem frekuensi pada sistem interkoneksi. Tujuan kontrol strategi ini akan sangat berguna untuk kestabilan dari osilasi frekuensi pada sistem interkoneksi [3].

Persamaan aliran daya tie line tanpa TCPS dari area 1 ke area 2 adalah,

$$\Delta P_{12}^o = \frac{2fT^o}{s} (\Delta f_1 - \Delta f_2) \quad (1)$$

T^o adalah koefisien sinkron saluran tanpa TCPS dan Δf_1 dan Δf_2 adalah deviasi frekuensi dari area 1 dan area 2. Ketika TCPS ditempatkan secara seri dengan tie line seperti gambar 2. Di dapat persamaan daya saluran setelah dipasang TCPS.

$$P_{tie} = \frac{|V_1||V_2|}{X_{12}} \sin(u_1 - u_2 + w) \quad (2)$$

Sehingga,

$$\Delta P_{tie} = \frac{|V_1||V_2|}{X_{12}} \cos(u_1^o - u_2^o + \{^o\}) (\Delta u_1 - \Delta u_2 + \Delta \{^o\}) \quad (3)$$

Sedangkan persamaan koefisien sinkronisasi antar area adalah,

$$T_{12} = \frac{|V_1||V_2|}{X_{12}} \cos(u_1^o - u_2^o + \{^o\}) \quad (4)$$

Sehingga diperoleh persamaan ΔP_{tie} sebagai berikut,

$$\Delta P_{tie12} = T_{12} (\Delta u_1 - \Delta u_2 + \Delta \{^o\}) \quad (5)$$

$$\Delta P_{tie12} = T_{12} (\Delta u_1 - \Delta u_2) + T_{12} \Delta \{^o\}$$

Transformasi laplace dari persamaan (5) adalah

$$\Delta P_{tie12} = \frac{2fT_{12}}{s} [\Delta F_1(s) - \Delta F_2(s)] + T_{12} \Delta \{^o(s) \quad (6)$$

Dari persamaan (6), aliran daya tie line dapat dikontrol dengan mengatur sudut phase shifter Δ . Asumsi sinyal kontrol masukan dari TCPS adalah $\Delta Error_1(s)$ dan fungsi alih dari rangkaian keadaan sinyal adalah $K\phi C(s)$, dimana $K\phi$ adalah gain dari kontroler TCPS. Oleh karena itu $\Delta\phi$ dapat direpresentasikan sebagai berikut,

$$\Delta W(s) = \frac{K_{\zeta}}{1 + sT_{PS}} \Delta Error_1(s) \quad (7)$$

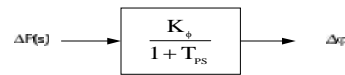
T_{PS} adalah time constant dari TCPS dan $\Delta Error_1(s)$ adalah sinyal kontrol dari TCPS. Dengan demikian dari persamaan (6) dapat ditulis sebagai berikut,

$$\Delta P_{tie12} = \frac{2fT_{12}}{s} [\Delta F_1(s) - \Delta F_2(s)] + T_{12} \frac{K_{\zeta}}{1 + sT_{PS}} \Delta Error_1(s) \quad (8)$$

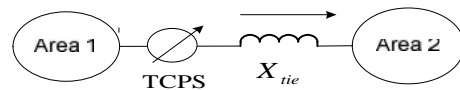
$\Delta Error_1$ dapat berupa sinyal diviasi frekuensi area 1 atau area control error (ACE) dari area 1, sehingga pemodelan diagram blok TCPS seperti pada gambar 3,

C. Kontroler PID

Suatu sistem tidak lepas dari adanya error yang disebabkan oleh gangguan. Error ini dapat menyebabkan perilaku sistem berubah. Perubahan perilaku sistem dapat menyebabkan sistem tidak stabil. Untuk membuat sistem kembali stabil, dapat dilakukan melalui penambahan suatu sub sistem, yaitu kontroler. Fungsi kontroler adalah mereduksi sinyal error, yaitu perbedaan antara sinyal setting dan sinyal aktual. Semakin cepat reaksi sistem mengikuti sinyal aktual dan semakin kecil kesalahan yang terjadi, maka semakin baik kinerja sistem kontrol yang diterapkan.



Gambar. 3. Diagram blok TCPS



Gambar. 2. TCPS pada interkoneksi 2 area

Kontroler proporsional integral differensial (PID) sampai saat ini banyak digemari kalangan praktisi industri. Hal ini dikarenakan penggunaan yang mudah, dan dapat meningkatkan performansi dari sistem secara cepat [1], [7].

Masukan dari kontroler PID adalah sinyal eror. Sinyal eror diolah dengan menjumlahkan kontroler proporsional, integral, dan diferensial seperti pada gambar 4.

Tabel 1. Parameter sistem LFC 2 area

Area	1	2
Speed Drop (R)	0.05	0.0625
Damping Constant (D)	0.6	0.9
Inertia Constant (H)	5	4
Base Power (MVA)	1000	1000
Governor Time Constant (Tg)	0.2	0.3
Turbine Time Constant (tt)	0.5	0.6

D. Differential Evolution (DE)

Differential evolution adalah algoritma yang diperkenalkan oleh Storn dan Price pada tahun 1995 dan telah diaplikasikan secara luas [8], [9]. DE adalah sebuah metode pencarian berbasis populasi yang menggunakan siklus perulangan dari rekombinasi dan seleksi untuk mengarahkan populasi mencari nilai optimum. Karakteristik khusus dari DE adalah penggunaan operasi berbasis *differential mutation* dalam penyebaran kandidat solusi pada suatu populasi tertentu [7]. Berikut ini adalah tahapan dari DE dalam mencari nilai optimum,

Inisialisasi
Evaluasi

- Ulangi
- Mutasi
- Rekombinasi
- Evaluasi
- Seleksi

Sampai itersai yang diinginkan

Struktur Populasi[10]

Dalam pencarian nilai yang optimal, DE menggunakan sepasang populasi vektor. Setiap populasi memiliki vektor N_p dan parameter *D-dimensional*. Populasi awal disimbolkan dengan P_x , yang terdiri dari vektor, $x_{i,g}$, dan ditentukan oleh *initial point*. Berikut adalah penjelasan populasi awal secara matematis,

$$P_{x,g} = (x_{i,g}), i = 1, \dots, N_p, g = 1, \dots, g_{max}$$

$$x_{i,g} = (x_{j,i,g}), j = 1, \dots, D. \tag{9}$$

Dengan $X_{i,g}$ adalah vektor ke-i pada pembangkitan ke g. sedangkan $x_{j,i,g}$ adalah nilai vektor ke-i pada parameter ke-j dan pembangkitan ke-g. nilai dari i adalah bilangan bulat dari $0-N_p$, g adalah bilangan dari $0-g_{max}$, dan j adalah bilangan bulat dari $0-D-1$.

Populasi $P_{v,g}$ adalah populasi yang mengandung N_p vektor DE bermutasi secara acak $v_{i,g}$. berikut adalah penjelasan populasi $P_{v,g}$ secara matematis,

$$P_{v,g} = (v_{i,g}), i = 1, \dots, N_p, g = 1, \dots, g_{max}$$

$$v_{i,g} = (v_{j,i,g}), j = 1, \dots, D. \tag{10}$$

Kemudian masing-masing dari vektor populasi awal direkombinasi dengan vektor mutan untuk menghasilkan populasi *trial*. Berikut adalah penjelasan populasi *trial* secara matematis,

$$P_{u,g} = (u_{i,g}), i = 1, \dots, N_p, g = 1, \dots, g_{max}$$

$$u_{i,g} = (u_{j,i,g}), j = 1, \dots, D. \tag{11}$$

Selama proses rekombinasi, vektor *trial* menggantikan vektor mutan sehingga diperoleh sepasang populasi yang akan diproses dalam tahap berikut. Inisialisasi[10].

Inisialisasi nilai awal dilakukan secara acak pada daerah tertentu yang memiliki suatu batasan. Batasan tersebut adalah batas atas b_u , dan batas bawah b_L . batasan tersebut ditentukan oleh parameter yang akan dioptimisasi. Nilai

masing-masing vektor dibangkitkan diantara batas tersebut. Berikut adalah persamaan matematis untuk inisialisasi populasi,

$$x_{j,i,g} = rand_j(0,1) \times (b_{j,U} - b_{j,L}) + b_{j,L} \tag{12}$$

Dengan $b_{j,U}$ adalah batas atas parameter ke-j, dan $b_{j,L}$ adalah batas bawah parameter ke-j. $rand_j(0,1)$ adalah angka pembangkitan antara 0 sampai 1.

Mutasi[10]

Setelah inisialisai, DE memutasi dan merekombinasi untuk menghasilkan populasi dari N_p vektor *trial*. Mutasi ini dilakukan dengan mengkombinasi perbedaan vektor dari vektor satu dan vektor dua yang dilih secara acak pada vektor ketiga untuk menghasilkan vektor mutan. Kombinasi ini ditunjukkan dengan persamaan (13).

$$v_{i,g} = x_{r0} + F \times (x_{r1,g} - x_{r2,g}) \tag{13}$$

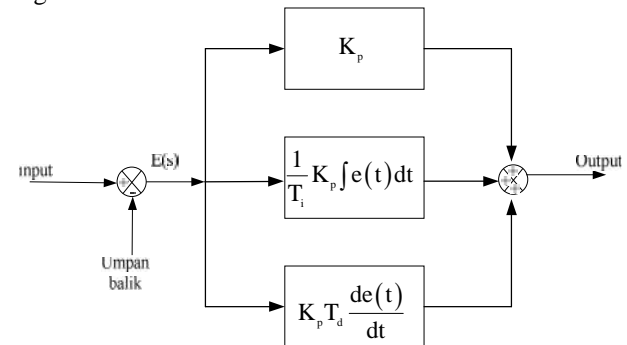
Dengan $v_{i,g}$ adalah vektor mutan, $x_{r1,g}, x_{r2,g}$, dan x_{r0} adalah vektor yang dipilih secara acak. F adalah faktor pengali dari perbedaan vektor satu dan dua. F adalah bilangan nyata antara 0 sampai 1.

Crossover[10]

Crossover digunakan untuk melengkapi strategi pencarian mutasi differensial. Tujuan *crossover* adalah membentuk vektor *trial* dari nilai parameter yang digandakan dari dua vektor yang berbeda yaitu, vektor awal dan vektor mutan.

$$u_{i,g} = u_{j,i,g} = \begin{cases} v_{j,i,g} & \text{if } (rand_j(0,1)) \leq Cr \text{ or } j = j_{rand} \\ x_{j,i,g} & \text{yang lain} \end{cases} \tag{14}$$

Cr adalah probabilitas *crossover* dengan *range* antara 0 sampai 1. Cr berfungsi untuk mengontrol pembagian nilai yang digandakan dari mutan. $Rand_j(0,1)$ adalah nilai random yang menentukan vektor tersebut melewati proses *crossover* atau tidak. Jika nilai $rand_j$ kurang dari Cr, maka yang akan digandakan adalah vektor mutan. Jika sebaliknya maka yang digandakan adalah vektor awal.



Gambar. 4. Kontroler PID

Seleksi[10]

Seleksi adalah proses yang dilakukan untuk menentukan vektor yang akan menjadi populasi untuk iterasi selanjutnya. Jika vektor *trial* $u_{i,g}$ memiliki nilai sama atau lebih kecil dari target vektor $x_{i,g}$, maka ia mengganti target vektor untuk iterasi berikut. Jika vektor *trial* memiliki nilai yang lebih besar dari vektor target, maka vektor target akan tetap menjadi anggota pada iterasi berikut. Secara matematis proses seleksi adalah sebagai berikut,

$$x_{i,g} = \begin{cases} u_{i,g} & \text{if } f(u_{i,g}) \leq f(x_{i,g}) \\ x_{j,i,g} & \text{yang lain} \end{cases} \quad (15)$$

Setelah populasi baru diperoleh, proses mutasi, rekombinasi, dan seleksi diulangi sampai nilai optimum diperoleh atau iterasi yang diinginkan, atau mencapai pembangkitan maksimum g_{maks} .

III. KOORDINASI KONTROLER PID DAN TCPS MENGGUNAKAN DE

Pada Tugas Akhir ini, akan dibahas koordinasi kontroller PID dan TCPS pada sistem tenaga listrik dua area menggunakan DE. Pemodelan LFC dua area, kontroller PID dan TCPS menggunakan simulink pada MATLAB. Sedangkan program dari DE menggunakan M-File. Dalam pencarian nilai optimal menggunakan DE, permasalahan yang akan dioptimisasi ditentukan terlebih dahulu. Dalam tugas akhir ini permasalahan yang akan dioptimisasi ada 4, yaitu K_p, K_i, K_d, K_ϕ . Nilai-nilai K_p, K_i, K_d dan K_ϕ diasumsikan sebagai Dimensi dalam DE yang akan menjadi koordinat lokasi vektor pada populasi DE. DE akan mengoptimasi dimensi tersebut hingga iterasi yang telah ditentukan. Kombinasi terbaik akan menghasilkan sistem yang memiliki osilasi dengan *overshoot* terkecil dan *settling time* tercepat. Kombinasi terbaik diperoleh melalui evaluasi pada setiap kombinasi dari nilai K_p, K_i, K_d dan K_ϕ . Evaluasi dilakukan dengan menghitung nilai fungsi objektif dari respon sistem. Pada DE fungsi objektif adalah fungsi evaluasi dari masing-masing populasi. Dalam penelitian ini, fungsi objektif yang digunakan untuk menentukan fungsi evaluasi adalah *Integral of Time Multiplied Absolute Error* (ITAE) yang ditunjukkan oleh persamaan,

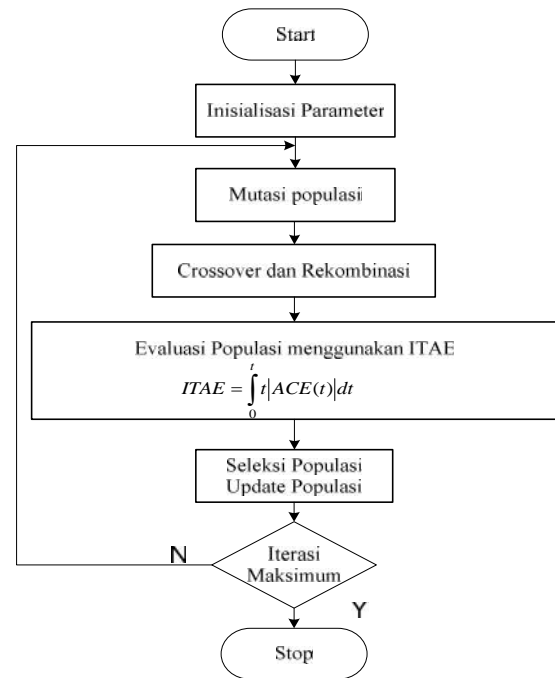
$$ITAE = \int_0^t |ACE(t)| dt \quad (16)$$

Proses pencarian koordinasi optimal PID dan TCPS menggunakan DE ditunjukkan pada *flowchart* pada Gambar 5.

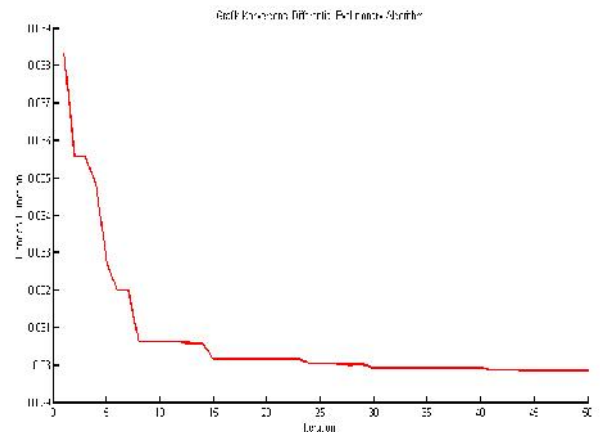
Simulasi dilakukan dengan 50 kali iterasi. Gambar 6 merupakan grafik konvergensi yang didapat dari simulasi. Dari gambar konvergensi dapat dilihat bahwa fungsi obyektif mencapai nilai terbaik pada iterasi ke 30. Fungsi obyektif terbaik menunjukkan bahwa populasi telah menemukan koordinasi dimensi terbaik. Koordinat dimensi menunjukkan bahwa koordinasi parameter PID dan TCPS telah optimal. Tabel 2 menunjukkan parameter PID dan TCPS yang telah dioptimisasi dengan DE.

IV. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Simulasi dalam Tugas Akhir ini digunakan untuk mencari koordinasi parameter kontroler PID dan *Thyristor Phase Shifter* (TCPS) dengan menggunakan *Differential Evolution* (DE). Kontroler digunakan untuk *Load Frequency Control* (LFC) pada sistem tenaga listrik dua area. Sistem tenaga listrik dua area yang digunakan adalah LFC dua area model Hadi Saadat.



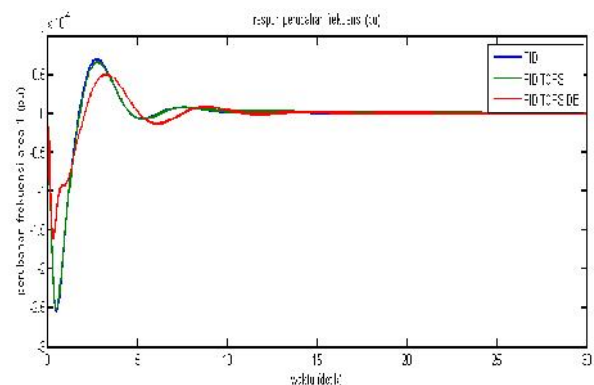
Gambar 5. Flowchart Koordinasi Kontroler PID dan TCPS menggunakan DE



Gambar 6. Grafik konvergensi DE

Tabel 2. Hasil optimisasi parameter PID dan TCPS menggunakan DE

K_ϕ	K_p	K_i	K_d
0.29	1.42	3.98	2.66



Gambar 7. Respon perubahan frekuensi area 1 (f_1) dengan perubahan beban 0.01 pu

Tabel 3.
Data respon perubahan frekuensi area 1 (f_1) dengan perubahan beban 0.1 pu

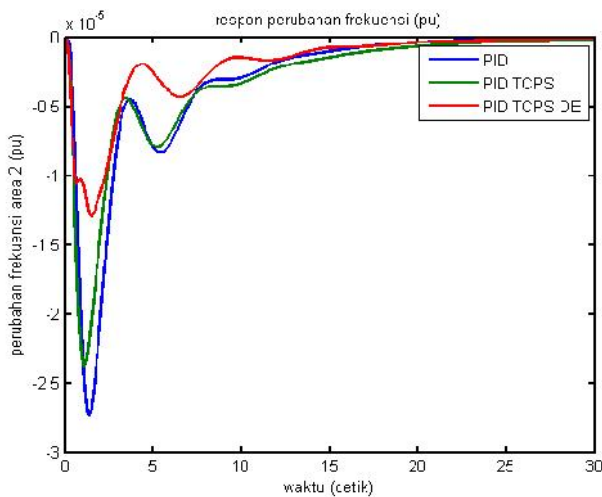
Metode Control	PID	PID TCPS	PID TCPS DE
Overshoot (pu)	-0.0002551	-0.0002512	-0.0001609
Time Seetling (det)	14.97	17.6	15.8

Tabel 4.
Data respon perubahan frekuensi area 2 (f_2) dengan perubahan beban 0.01 pu

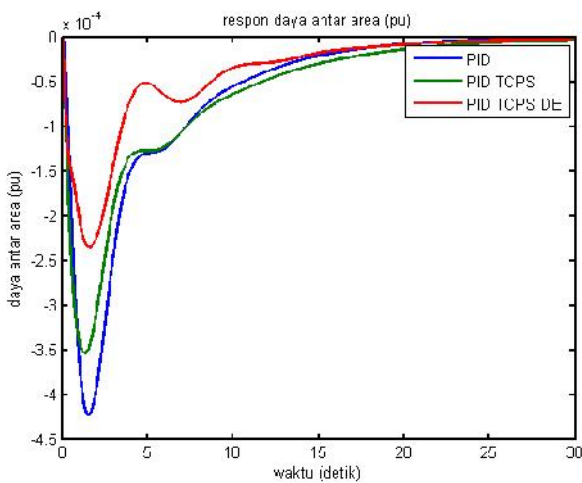
Metode Kontrol	PID	PID TCPS	PID TCPS DE
Overshoot (pu)	-0.00002729	-0.00002374	-0.00001292
Settling Time (det)	15.25	17.42	13.88

Tabel 5.
Data respon daya antar area (P_{tie}) dengan perubahan beban 0.01 pu

Metode Kontrol	PID	PID TCPS	PID TCPS DE
Overshoot (pu)	-0.0004229	-0.000354	-0.0002351
Time Settling (det)	18.91	22.27	19.08



Gambar. 8. Respon perubahan frekuensi area 2 dengan perubahan beban 0.01 pu



Gambar. 9. Respon daya antar area (P_{tie}) dengan perubahan beban 0.01 pu

Dalam simulasi sistem pada area 1 diberi 2 kasus gangguan yaitu perubahan beban sebesar 0.01 p.u. Simulasi dilakukan untuk menganalisis respon sistem. Respon sistem yang dianalisis adalah *overshoot* dan *settling time* perubahan

frekuensi area 1 (f_1), perubahan frekuensi area 2 (f_2) dan daya antar area (P_{tie}). Respon sistem dengan PID dan TCPS yang telah dioptimisasi menggunakan DE dibandingkan dengan sistem dengan PID dan sistem dengan PID dan TCPS.

Sistem pada area 1 diberi gangguan perubahan beban sebesar 0.01 p.u., Terjadi perubahan beban pada area 1 akan mengakibatkan sistem pada area 2 juga terganggu, hal ini dikarenakan semua area saling terinterkoneksi menjadi satu. Selain itu daya antar area juga mengalami osilasi akibat dari perubahan beban.

Gambar 7 merupakan respon frekuensi area 1 (f_1). Dapat dilihat pada gambar 7 bahwa sistem dengan kontroler PID memiliki *overshoot* sebesar -0.0002551 pu dan *settling time* sebesar 14.97 detik. Kemudian setelah dipasang PID dan TCPS, *overshoot* berkurang menjadi -0.0002512 pu sedangkan *settling time* menjadi 17.6 detik. Dengan optimisasi menggunakan DE didapatkan hasil respon yang paling baik dibandingkan kontroler yang lain, untuk *overshoot* mencapai -0.0001609 pu dan *settling time* mencapai 15.8 detik. Perbandingan *overshoot* dan *settling time* respon frekuensi area 1 dapat dilihat pada Tabel 3.

Respon frekuensi area 2 (f_2) ditunjukkan pada Gambar 8. Dapat dilihat bahwa sistem dengan kontroler PID memiliki *overshoot* sebesar -0.00002729 pu dan *settling time* 15.25 detik. Kemudian setelah dipasang PID dan TCPS, *overshoot*nya berkurang menjadi -0.00002374 pu sedangkan *settling time* menjadi 17.42. Dengan optimisasi menggunakan DE didapatkan hasil respon yang paling baik dibandingkan kontroler yang lain, untuk *overshoot* mencapai -0.00001292 pu dan *settling time* mencapai 13.88. Untuk lebih jelasnya, *overshoot* dan *settling time* respon frekuensi area 2 dapat dilihat pada Tabel 4.

Daya antar area (P_{tie}) ditunjukkan pada Gambar 9. Dari Gambar 9 dapat dilihat bahwa sistem dengan kontroler PID memiliki *overshoot* sebesar -0.0004229 pu dan *settling time* sebesar 18.91 detik. Kemudian setelah dipasang PID dan TCPS, *overshoot* berkurang menjadi -0.000354 pu sedangkan *settling time* menjadi 22.27 detik. Dengan optimisasi menggunakan DE didapatkan hasil respon yang paling baik dibandingkan kontroler yang lain, untuk *overshoot* mencapai -0.0002351 pu dan *settling time* mencapai 19.08 detik. Untuk lebih jelas, *overshoot* dan *settling time* daya antar area (P_{tie}) dapat dilihat pada Tabel 5.

Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa sistem yang menggunakan kontroler PID dan TCPS memiliki respon *overshoot* yang lebih baik tetapi memiliki *settling time* yang lebih lama. Hal ini menunjukkan bahwa dengan menambahkan TCPS dapat mengurangi *overshoot* pada deviasi frekuensi kedua area dan respon daya antar area. TCPS yang dioptimisasi dengan DE memiliki respon *overshoot* yang paling baik. Hal ini menunjukkan bahwa, dengan menggunakan DE didapatkan koordinasi parameter PID dan TCPS yang optimal sehingga mampu meredam osilasi sistem yang lebih baik dibandingkan kontroler yang lain.

V. PENUTUP

A. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut,

1. Metode DE dapat digunakan untuk menentukan koordinasi parameter PID dan TCPS yang optimal.
2. Kontroler PID dan TCPS yang optimal dapat diterapkan pada sistem tenaga listrik dua area untuk meredam osilasi frekuensi area 1 (f_1), frekuensi area 2 (f_2) dan daya antar area (P_{tie}).
3. Penerapan DE terhadap PID dan TCPS pada sistem tenaga listrik dua area dapat memperkecil *overshoot* dan mempercepat *settling time* respon sistem.

B. SARAN

Saran yang untuk penelitian berikutnya adalah,

1. Untuk mendapatkan koordinasi parameter PID dan TCPS yang optimal pada LFC sistem tenaga listrik dua area dapat dilakukan dengan menggunakan komputasi cerdas yang lain untuk mendapatkan hasil yang lebih optimum.
2. Kontroler PID dan TCPS diterapkan pada sistem yang lebih besar
3. Kontroler PID dan TCPS digunakan untuk analisis gangguan transien

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Imam Robandi, "Modern Power System Control", Penerbit ANDI, Yogyakarta, (2009).
- [2] Djiteng Marsudi, "Operasi Sistem Tenaga Listrik", Graha Ilmu, Yogyakarta, (2006).
- [3] R.J. Abraham, D. Das, A. Patra, "Effect of TCPS on oscillation in tie-power and frequencies in an interconnected hydrothermal power system", *EIT Gener. Transm.*, Vol. 1, No. 4, (2007, July).
- [4] Hadi Saadat, "Power System Analysis", Mc Graw Hill, Singapore, (2004).
- [5] Gyugyi, L., "Dynamic compensation of ac transmission line by solid-state synchronous voltage sources", *IEEE Trans. PD.*, Vol. 9, No.2 (1994), 904-911
- [6] M. A. Abido, " Thyristor Controlle Phase Shifter Based Stabilizer Design Using Simulated Annealing Algorithm", *IEEE*, (2009).
- [7] G. Jeyakumar and C. Shunmuga Velayutham, "A Comparative Performance Analysis of Differential Evolution and Dynamic Differential Evolution Variants", *IEEE*, (2009).
- [8] Joel H. Van Sickle, Kwang Y. Lee, and Jin S. Heo, "Differential Evolution and its Applications to Power Plant Control", *IEEE*
- [9] Millie Pant, Musrrat Ali, and Ajith Abraham, "Mixed Mutation Strategy Embedded Differential Evolution", *IEEE*, (2009).
- [10] Kenneth V.Price, Rainer M.Storn, "Differential Evolution A Practical Approach to Global Optimization", Springer, Jerman, (2005).