

Penalaan Optimal *Power System Stabilizer* Pembangkit Listrik Tenaga Uap Pacitan Menggunakan *Hybrid Adaptive Chaotic Differential Evolution* Dan Reduksi Jaringan Berbasis Rugi Saluran

Dheny Ashari HS, Adi Soeprijanto, dan Ni Ketut Aryani

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

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

e-mail: adisupits@gmail.com, ketut.aryani@gmail.com

Abstrak—Ketidakstabilan pada suatu generator mampu menyebabkan pemadaman total pada suatu system tenaga listrik, seperti yang terjadi pada PLTU Pacitan, Senin, 12 Mei 2014 [1]. Sayangnya, analisis kestabilan dinamik masih sering menggunakan model SMIB yang hanya fokus mengamati 1 mesin saja. Dalam beberapa penelitian terakhir, analisis kestabilan dinamik multi mesin dilakukan dengan terlebih dahulu mereduksi system multi mesin menjadi single mesin. Metode reduksi jaringan yang umum digunakan adalah metoda konvensional seperti REI-Dimo, *Ward Equivalent*, dan *Cohenrency Equivalent*. Metode reduksi yang lebih baru menggunakan rugi-rugi jaringan untuk mendapatkan nilai impedansi ekuivalen saluran antara generator dengan bus tak berhingga. Metode baru ini menawarkan proses kalkulasi yang sederhana dibandingkan metode yang lain. Namun, metode baru ini memiliki kelemahan seperti, tidak terjaminnya konvergensi dan tidak merepresentasikan operating point mesin. Oleh karena itu, untuk mengatasi permasalahan tersebut dilakukan pendekatan reduksi menggunakan *power flow tracing* untuk menentukan kontribusi generator pada sistem secara utuh. Model SMIB hasil reduksi digunakan sebagai dasar penalaan *power system stabilizer*. PSS mampu meningkatkan redaman osilasi jika ditala secara optimal. Untuk mendapatkan penalaan dan redaman optimal, digunakan pendekatan optimasi *hybrid adaptive chaotic differential evolution* (HACDE). Metode optimasi DE merupakan metode yang unik, sederhana, handal, dan cepat konvergen. Analisis eigenvalue multi-objective digunakan sebagai fungsi objektif metode optimasi HACDE. Berdasarkan simulasi, metode *power flow tracing* lebih unggul dibandingkan metode superposisi dalam hal mencari kerugian saluran akibat kontribusi daya sebuah generator. Kemudian, berdasarkan hasil simulasi penalaan parameter PSS pada Generator Pacitan Sistem Transmisi 150kV Jawa Tengah didapatkan urutan metode optimasi yang memiliki nilai fitness menggunakan eigenvalue terbaik, yaitu HACDE (0,869), DE (0,722), RD-PSO (0,686), dan PSO (0,534). Selain itu melalui evaluasi domain waktu menggunakan ITAE didapatkan urutan, yaitu HACDE (12,89), PSO (14,78), DE (16,02), dan RD-PSO (21,21). Oleh karena itu, HACDE lebih unggul untuk mendapatkan nilai optimal parameter PSS guna memberikan redaman optimal pada osilasi Generator Pacitan.

Kata Kunci — DE, Kerugian Jaringan, Kestabilan Dinamik, *Power Flow Tracing*, PSS, Reduksi Jaringan, SMIB.

I. PENDAHULUAN

SISTEM kelistrikan modern terhubung secara interkoneksi untuk memenuhi kebutuhan beban. Sistem kelistrikan interkoneksi tidak hanya menyediakan daya yang efisien dan ekonomis, tetapi juga meningkatkan kehandalan. Fluktuasi perubahan permintaan daya beban mampu menyebabkan osilasi pada sistem. Osilasi sistem diakibatkan oleh respon generator dalam menanggapi perubahan beban. Oleh karena itu, perubahan beban dapat dipandang sebagai permasalahan kestabilan [2-3].

Walaupun sistem interkoneksi menyediakan daya yang efisien dan handal, kestabilan pada sistem interkoneksi tidak mudah dicapai karena interaksi antar generator dan peralatan kontrolnya. Hal ini menyebabkan sistem interkoneksi sulit untuk dianalisis. Model linier *single machine infinite bus* (SMIB) dipilih untuk menyederhanakan analisis dan cukup merepresentasikan pengaturan peralatan kontrol generator [4]. Untuk mendekati respon osilasi generator akibat perubahan beban, generator perlu dimodelkan secara dinamik dengan mempertimbangkan sistem kontrolnya. Pada penelitian ini, model linier generator [10-11] dipilih untuk merepresentasikan model generator sinkron dengan tambahan beberapa komponen control seperti, governor dan AVR. Hal ini dikarenakan peralatan kontrol generator juga berkontribusi pada beroperasinya generator. Sehingga pada penelitian ini generator dimodelkan sebagai SMIB yang dimodifikasi.

Untuk mengubah sistem multimesin menjadi model SMIB, diperlukan mengetahui impedansi ekuivalen generator yang diamati. Beberapa metode yang digunakan untuk ekuivalensi saluran adalah *equivalent ward* [13] dan *rei-dimo* [14]. Metode *equivalent ward* memodelkan eksternal sistem yang tidak diamati sebagai komponen static. Pada metode *equivalent ward* beban dimodelkan sebagai impedansi paralel dan generator sebagai injeksi daya. Solusi yang ditawarkan untuk merepresentasikan respon daya reaktif adalah *extended ward equivalent* [15]. Namun, *equivalent ward* tidak merepresentasikan kondisi fisik sistem [16]. Alternative lain metode ekuivalensi adalah *rei-dimo*, metode ini memiliki pendekatan secara fisik berbasis analisis *node*, tetapi pada umumnya *rei-dimo* digunakan untuk pengujian kestabilan *steady-state* [15-18]. Namun, metode *rei-dimo* mempertahankan sistem yang diamati tetap multimesin, sehingga tidak fokus mengamati satu mesin yang mengalami gangguan. Alternative lain metode ekuivalensi saluran yang tergolong baru adalah metode berbasis konsep rugi-rugi saluran [5-6]. Metode ini mengubah sistem *multimachine*

menjadi *single-machine* sehingga fokus mengamati mesin yang mengalami gangguan. Namun, pada metode ekuivalensi saluran berbasis rugi-rugi memiliki kekurangan yaitu sistem dimodelkan superposisi tidak merepresentasikan keadaan semula saat multimesin, beban dinormalisasi secara seragam, terkadang hasil aliran daya superposisi tidak konvergen akibat terlalu besarnya impedansi saluran, dan memerlukan banyak penyesuaian agar sesuai dengan titik operasi keadaan awal. Oleh karena itu pada penelitian ini diusulkan sebuah solusi untuk mengatasi permasalahan-permasalahan pada metode ekuivalensi berbasis rugi-rugi saluran dengan mengubah pendekatan superposisi menjadi *power flow tracing*.

Metode *power flow tracing* banyak digunakan untuk metode deregulasi sistem kelistrikan interkoneksi akibat persaingan pasar energi [19-23]. Tujuan utama metode *power flow tracing* adalah untuk transparansi penggunaan saluran transmisi yang terbuka untuk pasar transfer energi, sehingga biaya perawatan saluran transmisi lebih adil [23]. Keuntungan metode *power flow tracing* adalah mempertahankan sistem yang diamati berjalan pada multimesin, tidak memerlukan normalisasi beban, terjaminnya konvergensi aliran daya, dan merepresentasikan titik operasi mesin sebelum gangguan. Pendekatan yang dilakukan pada [19] mengubah saluran transmisi diasumsikan menjadi saluran *loseless* terlebih dahulu kemudian dilakukan proses *tracing*. Proses *tracing* yang melibatkan invers matriks mengonsumsi waktu kalkulasi untuk sistem kelistrikan yang besar dan asumsi yang digunakan tidak merepresentasikan ketidaklinieran sistem kelistrikan. Pada [20] memperkenalkan metode baru yang disebut domain, commons, link dan state graph serta cocok untuk sistem skala besar. Namun, tidak ada penjelasan dan pembuktian kondisi yang dibutuhkan untuk metode ini. Pada [21] diperkenalkan metode *power flow tracing* menggunakan pendekatan *graph theory* tanpa mempertimbangkan *loopflow*, kemudian pada [22] dikembangkan metode yang mempertimbangkan *loop-flow*. Kedua metode tersebut menggunakan asumsi yang sama seperti pada [19] dan membutuhkan penentuan urutan *tracing* pertamanya sehingga proses *tracing* tergantung pada urutan busnya. Lebih jauh lagi, metode ini tidak dijelaskan menangani ketika terdapat lebih dari satu *node sink* atau *source*. Pada [23] diusulkan metode *power flow tracing* yang efisien berbasis matriks hasil aliran daya atau data *state estimation*. Metode ini tanpa melibatkan proses invers matriks dan tanpa pencarian *tracing* yang rumit.

Generator merespon perubahan beban dengan berosilasi sementara hingga mencapai keadaan operasi baru yang stabil. Sistem kontrol generator sangat berperan terhadap osilasi generator seperti AVR [7]. Solusi yang paling layak untuk memberikan redaman osilasi generator adalah peralatan tambahan berupa *power system stabilizer* (PSS). Namun, untuk mendapatkan redaman yang optimal, parameter PSS perlu ditala terlebih dahulu. Metode optimasi yang umum digunakan untuk mendapatkan nilai optimal seperti, algoritma genetic (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Random-Drift PSO (RD-PSO), Differential Evolution (DE), dan lain-lain. Pada penelitian ini, diusulkan metode modifikasi DE yang disebut *Hybrid Adaptive Chaotic-DE* (HACDE). Terinspirasi dari persamaan *chaotic* yang mampu mencakup daerah yang pencarian yang luas, mendaptasi persamaan *chaotic* ke dalam metode optimasi DE, mampu memperoleh nilai optimal yang lebih baik dibandingkan metode DE dan RD-PSO [9].

Untuk mendapatkan nilai redaman optimal dan cepat, fungsi objektif berbasis eigenvalue digunakan untuk menala parameter PSS. Selain menggunakan eigenvalue, untuk menunjukkan kelebihan performa HACDE, respon generator

juga disimulasikan pada domain waktu. Parameter evaluasi secara domain waktu menggunakan *integral time absolute error* (ITAE) juga menunjukkan bahwa HACDE memiliki performa yang lebih baik dibandingkan DE dan RD-PSO.

II. PEMODELAN SISTEM

A. Power Flow Tracing

Power flow tracing digunakan untuk mengetahui kontribusi daya yang disuplai/diserap pada sistem baik dipandang dari generator maupun beban. Konsep *power flow tracing* berawal karena deregulasi sistem kelistrikan akibat kompetisi terbuka pada pasar energi. Sehingga biaya perawatan saluran transmisi yang dibebankan dibagi secara adil, transparan, dan cara yang meyakinkan kepada seluruh pengguna sistem [23]. Metode *power flow tracing* yang digunakan pada penelitian mengacu pada paper [23], pada paper ini tidak dijelaskan secara detail.

Algoritma *power flow tracing* dibagi menjadi dua, yaitu *downstream* dan *upstream tracing*. *Downstream tracing* (DST) berguna mencari kontribusi daya generator pada sistem. *Upstream tracing* (UST) digunakan untuk mencari ekstraksi daya beban pada sistem. Pada metode ini, jenis *node* dibedakan menjadi:

1. *Node source*: bus yang semua saluran terhubung mengirim daya keluar bus.
2. *Node generation*: bus yang beberapa saluran terhubung mengirim daya keluar, beberapa saluran menerima daya, dan net injeksi daya positif.
3. *Node load*: bus yang beberapa saluran terhubung mengirim daya keluar, beberapa saluran menerima daya, dan net injeksi daya negatif.
4. *Node sink*: bus yang semua saluran terhubung menerima daya keluar bus.

Algoritma *power flow tracing* yang diusulkan pada paper [23]:

1. Sebagai masukan awal, membentuk matriks aliran daya, berasal dari perhitungan aliran daya dan *state estimation*. Matriks aliran daya bisa dibentuk secara terpisah untuk daya aktif (P) dan daya reaktif (Q).
2. Menghitung *net injection* dan *flow passing* pada tiap *node*.
3. Membentuk matriks faktor *contribution* (untuk pembangkitan) and *extraction* (untuk beban).
4. Melakukan *power flow tracing* menggunakan masing-masing persamaan *tracing* untuk masing-masing matriks faktor *contribution* dan *extraction*.

$$K_{ln} = K_{ln} + K_{lj}K_{mj} \quad l = 1, N_B \quad l \neq m \quad (1)$$

5. Menghitung kontribusi dan ekstraksi daya pada sistem dengan masing-masing matriks dengan persamaan.

$$T = K \cdot \text{diag}(F_j) \quad (2)$$

Dengan T_{ij} aliran daya akibat *node* ke-i melalui saluran j, $\text{diag}(F_j)$ adalah matriks diagonal dengan nilai elemen F_{jj} sama dengan daya yang pada sisi kirim atau sisi terima.

B. Sistem Multimachine menjadi SMIB dengan reduksi jaringan menggunakan konsep rugi-rugi

Sistem tenaga modern didesain terhubung secara interkoneksi, yang memungkinkan banyak mesin (multimesin) menyuplai beban secara bersama-sama. Interaksi antar mesin mengakibatkan semakin sulitnya analisis kestabilan. Pemilihan model analisis kestabilan dapat disesuaikan dengan kebutuhan analisis, pada penelitian

ini dipilih model SMIB. Karena pemodelan SMIB hanya fokus mengamati 1 mesin saja yang terhubung dengan bus infinite melalui impedansi ekuivalen, sehingga perlu adanya ekuivalensi jaringan untuk mendapatkan impedansi ekuivalen. Pada umumnya metode reduksi jaringan yang digunakan adalah equivalent ward [13] dan rei-dimo [14]. Pada paper ini mengusulkan metode reduksi jaringan untuk mendapatkan Req dan Xeq untuk mengamati model SMIB menggunakan konsep losses yang lebih sederhana. Secara alami dalam sistem, daya disalurkan melalui jaringan transmisi yang memiliki losses. Rugi-rugi saluran diperoleh dari proses *power flow tracing* yang dikontribusikan oleh sebuah generator. Berdasarkan konsep rugi-rugi tersebut Req dan Xeq untuk *single-machine* dapat di kalkulasi dengan lebih sederhana. Proses untuk reduksi jaringan menggunakan konsep rugi-rugi setiap unit mesin dapat dijelaskan sebagai berikut [5]:

1. Lakukan aliran daya sistem interkoneksi dengan banyak mesin (multimesin).
2. Berdasarkan hasil aliran daya sistem multimesin lakukan *power flow tracing*.
3. Dapatkan daya aktif (P), daya reaktif (Q), losses daya aktif (PL), dan losses daya reaktif (QL).
4. Hitung nilai arus mesin yang diamati menggunakan persamaan :

$$I = \frac{P-jQ}{\sqrt{3} \cdot V_i^*} \quad (3)$$

I = Arus mesin yang diamati, P – jQ = Daya kompleks yang dibangkitkan mesin yang diamati, Vi* = Tegangan konjugat kompleks pada bus mesin yang diamati.

5. Hitung nilai Req dan Xeq menggunakan konsep losses sesuai dengan persamaan :

$$Zeq = Req + jXeq = \frac{P_L + jQ_L}{|I|^2} \quad (4)$$

PL = Losses daya aktif, QL = Losses daya reaktif, Zeq = Impedansi ekuivalen saluran.

C. Model Linier Mesin Sinkron

Komponen sistem tenaga listrik terdiri dari komponen linier dan nonlinier. Analisis kestabilan dinamik melibatkan persamaan matematik nonlinier [2-3], sehingga untuk mempermudah analisis model, dilakukan pendekatan secara linier. Model linier mesin sinkron yang digunakan pada penelitian ini adalah model Heffron-Phillips [4] dan DeMello-Concordia [5] dengan penambahan beberapa komponen kontrol AVR IEEE ST4B, Governor IEEE G1, dan PSS konvensional untuk pendekatan model mesin PLTU Pacitan 150kV Sistem Transmisi Jawa Tengah.

D. Parameter Power System Stabilizer

Peralatan tambahan yang paling layak diterapkan berguna meningkatkan redaman osilasi electromekanik sistem generator, PLTU Pacitan 150kV Sistem Transmisi Jawa Tengah ditambahkan PSS model IEEE PSS1A dengan perubahan kecepatan rotor sebagai sinyal masukan. Untuk penyederhanaan optimasi model PSS PLTU Pacitan didekati model PSS konvensional karena berdasarkan data teknis nilai parameter TR, A1, dan A2 tidak diatur, sehingga diasumsikan bernilai nol.

E. Fungsi Objektif

Analisis peningkatan redaman osilasi mesin dapat dianalisis menggunakan domain waktu atau eigenvalue. Pada paper ini fungsi objektif yang digunakan untuk analisis peningkatan redaman osilasi mesin, menggunakan *multi-objective* eigenvalue [34].

$$J_i = -\max(\sigma_{ij}) + \min(\zeta_{ij}) \quad (5)$$

Dimana ζ_{ij} adalah damping ratio dari i^{th} individu dalam kelompok dan j^{th} mode osilasi electromekanik eigenvalue. Fungsi objektif di atas bertujuan *Memaksimalkan J* untuk meningkatkan redaman osilasi elektromekanik. Fungsi objektif berbasis eigenvalue dipulih selain mampu merepresentasikan kestabilan dinamik, tetapi juga mempersingkat waktu optimasi dibandingkan dengan fungsi objektif domain waktu.

F. Constraints

Dalam permasalahan teknis pada umumnya solusi berada pada batasan-batasan tertentu, begitu pula dengan permasalahan optimasi parameter PSS dalam peningkatan redaman. Sehingga permasalahan optimasi pada paper ini dapat dirumuskan sebagai.

$$\text{Maximize } J \quad (6)$$

dengan batasan

$$K_i^{\min} \leq K_i \leq K_i^{\max} \quad (7)$$

$$T_{wi}^{\min} \leq T_{wi} \leq T_{wi}^{\max} \quad (8)$$

$$T_{1i}^{\min} \leq T_{1i} \leq T_{1i}^{\max} \quad (9)$$

$$T_{2i}^{\min} \leq T_{2i} \leq T_{2i}^{\max} \quad (10)$$

$$T_{3i}^{\min} \leq T_{3i} \leq T_{3i}^{\max} \quad (11)$$

$$T_{4i}^{\min} \leq T_{4i} \leq T_{4i}^{\max} \quad (12)$$

Jangkauan tipikal optimasi parameter PSS adalah [0.001-50] untuk K_i , [0.06-1.5] untuk T_{1i} dan T_{3i} , [0.01-0.1] untuk T_{2i} dan T_{4i} , serta [4.5-5] untuk T_{wi} [35]. Pada paper ini digunakan pendekatan HACDE untuk menyelesaikan dan mencari nilai optimum parameter PSS, sehingga didapatkan redaman osilasi yang cukup besar untuk mesin.

III. HYBRID ADAPTIVE CHAOTIC DIFFERENTIAL EVOLUTION

A. Persamaan Chaotic

Chaos adalah fenomena nonlinier di alam yang memiliki karakter ergodic, random, dan sensitif terhadap nilai awalnya [28]. Fungsi *chaotic* iteratif pada penelitian ini menggunakan fungsi *chaotic logistic* dengan $\mu = 4$:

$$cx_j^{k+1} = \mu cx_j^k (1 - cx_j^k) \quad (13)$$

$$k = 1, 2, \dots$$

$$cx_j \in (0,1),$$

$$cx_j \neq 0.25, 0.5, 0.75, \text{ dan } 1$$

Fungsi *chaotic* iteratif memiliki probabilitas yang tinggi pada daerah-daerah batas, sehingga bisa digunakan sebagai operator operasi pada metode optimasi untuk menghindari konvergensi yang terlalu awal [26].

B. Faktor Mutasi dan Crossover yang adaptif

Pengaturan parameter kontrol DE sangat berpengaruh pada performa optimasi, mekanisme parameter adaptif dimaksudkan untuk efisiensi DE [26]. Mekanisme adaptif terinspirasi dari paper [29], di mana setiap individu memiliki parameter mutasi dan crossover masing-masing. Saat inisialisasi parameter mutasi (F_i^t) 0.5 dan crossover (C_i^t) 0.9. Umumnya distribusi normal dengan mean 0.5 dan standar deviasi 0.3 menjangkakan pendekatan parameter adaptif yang

efektif [30]. Namun, distribusi Cauchy lebih menjanjikan diversivitas faktor mutasi untuk menghindari konvergen yang terlalu awal [30]. Sehingga setiap iterasi tiap individu memiliki kemungkinan parameter mutasi dan crossover yang berbeda-beda (NF dan NC) dengan kemungkinan 0.1. Operasi mutasi dan crossover yang adaptif akan menggantikan operasi membentuk vector trial.

$$NF_i^t = \begin{cases} randc(0.5, 0.3), & \text{jika } rand(0,1) < 0.1 \\ F_i^t, & \text{selain itu} \end{cases} \quad (14)$$

$$NC_i^t = \begin{cases} rand(0,1), & \text{jika } rand(0,1) < 0.1 \\ C_i^t, & \text{selain itu} \end{cases}$$

Ketika proses seleksi pengetahuan tentang individu yang unggul harus tetap dipertahankan dan diteruskan pada generasi selanjutnya, sehingga individu selanjutnya memiliki kemungkinan bertahan yang lebih besar [30]. Jadi pada proses seleksi nilai factor mutase dan crossover harus diperbaharui untuk generasi berikutnya.

$$F_i^{t+1} = \begin{cases} NF_i^t, & \text{jika } f(U_i^t) \text{ lebih baik } f(X_i^t) \\ F_i^t, & \text{selain itu} \end{cases} \quad (15)$$

$$C_i^{t+1} = \begin{cases} NC_i^t, & \text{jika } f(U_i^t) \text{ lebih baik } f(X_i^t) \\ C_i^t, & \text{selain itu} \end{cases}$$

C. Hybrid Adaptive Chaotic Differential Evolution

Differential Evolution merupakan metode optimasi yang sederhana, handal dan cepat konvergen. Lebih jauh lagi, metode ini memiliki parameter yang sedikit untuk diatur dan pengaturan parameter yang sama dapat digunakan pada banyak permasalahan yang berbeda [24]. HACDE adalah metode optimasi modifikasi dari DE konvensional dengan parameter faktor mutasi (F) dan faktor *crossover* (C) adaptif setiap generasinya, serta terinspirasi fungsi *chaotic* untuk memperluas daerah eksplorasi [26, 32-33].

Sebuah metode optimasi memiliki dua kemampuan untuk mendapatkan nilai optimalnya, yaitu kemampuan eksplorasi dan eksploitasi. Kemampuan eksplorasi berguna untuk menghindari local optima (memperluas daerah pencarian). Sedangkan kemampuan eksploitasi berguna untuk mendapatkan sebuah nilai optimal pada setiap iterasinya. Metode optimasi berjalan baik ketika kemampuan eksplorasi dan eksploitasi seimbang. Untuk menunjukkan performa HACDE, pada penelitian ini akan dibandingkan hasil optimasi dengan beberapa metode DE dan Random-Drift PSO. Selain ditunjukkan pada fungsi objektif eigenvalue, uji performa redaman HACDE juga disimulasikan pada domain waktu.

Algoritma HACDE

F = faktor skala $\in [0.4, 0.9]$

C = pindah silang $\in [0.1, 1]$

Inisialisasi populasi awal kandidat solusi $\{x_i\}$ untuk $i \in [1, N]$

% % DE/rand/1 variant

While not (kriteria stop)

Untuk setiap individu x_i , $i \in [1, N]$

$r_1 \leftarrow$ bilangan bulat acak $\in [1, N] : r_1 \neq i$

$r_2 \leftarrow$ bilangan bulat acak $\in [1, N] : r_2 \neq i \neq r_1$

$r_3 \leftarrow$ bilangan bulat acak $\in [1, N] : r_3 \neq i \neq r_1 \neq r_2$

membentuk NF dan NC dari persamaan (14)

$v_i \leftarrow x_{r1} + NF(x_{r2} - x_{r3})$ (**vektor mutan**)

$Jr \leftarrow$ bilangan bulat acak $\in [1, n]$

Untuk setiap dimensi $j \in [1, n]$

$rcj \leftarrow$ bilangan acak $\in [0, 1]$

if ($rcj < NC$) or ($j=Jr$) **then**

$u_{ij} \leftarrow v_{ij}$

else

$u_{ij} \leftarrow x_{ij}$

end if

dimensi berikutnya

individu berikutnya

untuk setiap indeks populasi (**vektor individu dan trial**)

if $f(u_i) > f(x_i)$ **then** $x_i \leftarrow u_i$, $F_i \leftarrow NF_i$, $C_i \leftarrow NC_i$

indeks populasi berikutnya

% % Iterasi Chaotic

$K^0 = rand(0,1)$, $K^0 \neq 0.25, 0.5, 0.75, 1$

$p = rand(2/NP, 0.1)$

While not (kriteria stop)

Pilih acak sebuah individu X_{pBest}^t dari terunggul 100p%

Untuk setiap dimensi $j \in [1, n]$ individu selain X_{pBest}^t

Polaritas = $(-1)^{(\text{randominteger}(2,1)-1)}$

$E_{i,j}^n = X_{i,j}^t + K^n \times (X_{pBest}^t - X_{i,j}^t)$;

Individu *chaotic* selanjutnya

untuk setiap indeks populasi (**vektor individu dan chaos**)

if $f(E_i) > f(x_i)$ **then** $x_i \leftarrow E_i$

indeks populasi berikutnya

generasi berikutnya.

IV. SIMULASI DAN ANALISIS

A. Perhitungan Impendansi Ekuivalen

Pada penelitian ini digunakan sistem transmisi Jawa Tengah 150kV 50Hz, dengan PLTU Pacitan sebagai mesin yang diamati. Sistem 150kV merupakan sistem interkoneksi yang cukup rumit terdiri 77 bus dan 103 saluran. Berdasarkan appendix 1 dan menggunakan langkah-langkah reduksi jaringan menggunakan konsep rugi-rugi saluran.

1. Rugi-rugi Daya aktif (P_L), dan daya reaktif (Q_L) hasil *power flow tracing* 0.10052+ j0.49569 p.u.

2. Hitung nilai arus dari mesin yang diamati menggunakan persamaan (3) :

$$I = \frac{0.82980 + j0.56642}{\sqrt{3} \cdot 0.98}$$

$$I = 1.66713 + j0.33369 \text{ p.u}$$

3. Hitung nilai Req dan Xeq menggunakan konsep losses sesuai dengan persamaan (4):

$$Zeq = \frac{0.10052 + j0.49569}{[1.66713 + j0.33369]^2}$$

$$Zeq = 0.01159 + j0.05716 \text{ p.u}$$

B. Perbandingan Hasil Optimasi HACDE

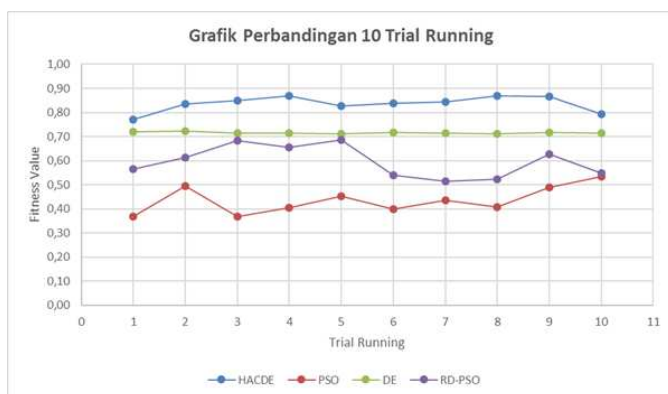
Untuk mendapatkan redaman osilasi yang optimal, parameter PSS harus ditala terlebih dahulu. Pada penelitian ini dilakukan penalaan optimal parameter PSS menggunakan metode optimasi. Untuk mengamati performa HACDE untuk mendapatkan nilai penalaan parameter PSS yang optimal dilakukan perbandingan dengan metode optimasi lainnya,

seperti konvensional DE dan RD-PSO. Fungsi tujuan *multi-objective* ditunjukkan pada persamaan (5) menggunakan eigenvalue, semakin besar nilai fitness semakin optimal. Pada tabel 1 ditunjukkan pula nilai masing-masing parameter PSS.

Tabel 1.
Parameter PSS Hasil Optimasi

	Kpss	Tw	T1	T2	T3	T4
HACDE	5,7118	4,8632	0,0754	0,0102	0,9968	0,0101
DE	2,9978	4,7747	0,0974	0,0100	1,1752	0,0100
RDPSO	1,6695	4,8189	0,2002	0,0137	0,8535	0,0143
PSO	6,1732	4,7316	0,1700	0,0120	0,5958	0,0111

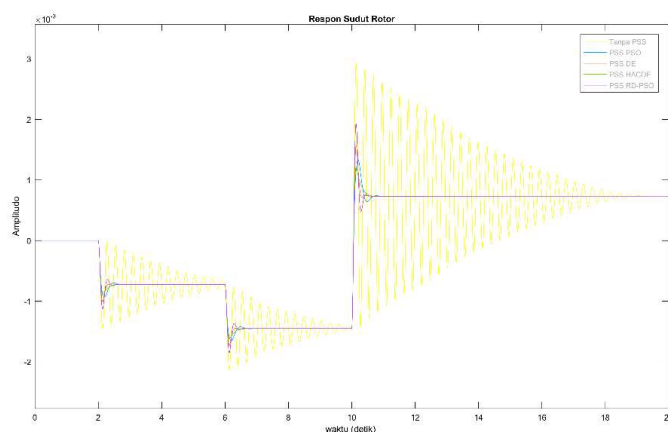
Dengan menggunakan fungsi objektif pada persamaan (5), nilai fitness semakin tinggi, semakin optimal. Pada gambar 1 tampak bahwa nilai konvergensi yang diperoleh oleh HACDE lebih unggul dibandingkan dengan DE dan RD-PSO.



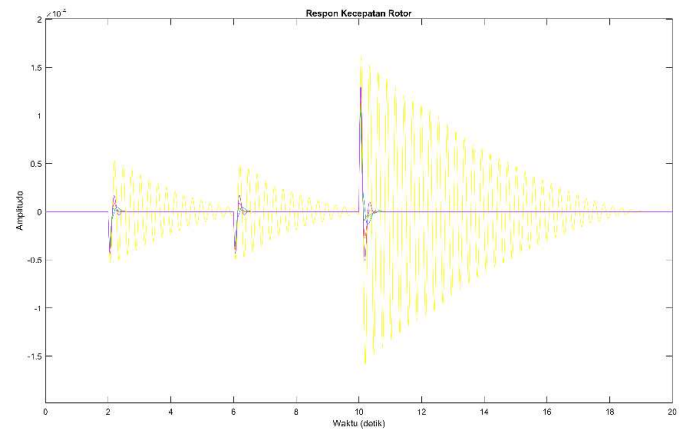
Gambar 1. Grafik nilai konvergensi setelah 10 kali *trial running*

C. Simulasi Domain Waktu

Selain optimasi berdasarkan eigenvalue, simulasi pada domain waktu akan lebih memperlihatkan performa redaman osilasi dari masing-masing metode optimasi.



Gambar 2. Respon sudut rotor dengan PSS



Gambar 3. Respon kecepatan rotor dengan PSS

Berdasarkan gambar 3 hingga gambar 4 tampak bahwa generator Pacitan dalam kondisi stabil dan respon redaman osilasi terbaik diberikan oleh PSS ditala HACDE. Berdasarkan evaluasi domain waktu menggunakan ITAE pada tabel 2 juga menunjukkan performa HACDE lebih baik dibandingkan metode DE dan RD-PSO.

Tabel 2.
Evaluasi ITAE

	Tanpa PSS	HACDE	DE	RD-PSO	PSO
ITAE	529,8	12,89	16,02	21,21	14,78

V. KESIMPULAN

Berdasarkan simulasi, metode *power flow tracing* lebih unggul dibandingkan metode superposisi dalam hal mencari kerugian saluran akibat kontribusi daya sebuah generator. Kemudian, berdasarkan hasil simulasi penalaan parameter PSS pada Generator Pacitan Sistem Transmisi 150kV Jawa Tengah didapatkan urutan metode optimasi yang memiliki nilai fitness menggunakan eigenvalue terbaik, yaitu HACDE (0,869), DE (0,722), RD-PSO (0,686), dan PSO (0,534). Selain itu melalui evaluasi domain waktu menggunakan ITAE didapatkan urutan, yaitu HACDE (12,89), PSO (14,78), DE (16,02), dan RD-PSO (21,21). Oleh karena itu, HACDE lebih unggul untuk mendapatkan nilai optimal parameter PSS guna memberikan redaman optimal pada osilasi Generator Pacitan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sofia, M., "PLTU Pacitan Gangguan, Listrik di Jakarta dan Tangerang Padam" <URL: <http://metro.news.viva.co.id/news/read/503832-pltu-pacitan-gangguan-listrik-di-jakarta-dan-tangerang-padam>>, 12 Mei 2014.
- [2] P. Kundur, Power System Stability and Control, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [3] P.M. Anderson and A.A. Fouad, Power System Control and Stability, Ames: Iowa State University Press, 1977.
- [4] M.J. Gibbard, P. Pourbeik and D.J. Vowles, Small-Signal Stability, Control, and Dynamic Performance of Power Systems, University of Adelaide Press, Adelaide, 2015.
- [5] Rusilawati, Soeprijanto, A., Penangsang, O., dan Uman, DF., "Determination of generator steady state stability limit using losses concept and RBFNN", Jurnal Teknologi, UTM Press, Johor Bahru, 2015.
- [6] A. Soeprijanto, O. Fenno, D. Ashari, D.F. Uman, Suyanto, Rusilawati., "Optimal Tuning of PSS Parameter for Damping Improvement in SMIB Model Using Random Drift PSO and Network Reduction with Losses Concept", ISITIA, Lombok, 2016.
- [7] A Soeprijanto, Desain Kestabilan Dinamik Sistem Tenaga Listrik. Surabaya: ITS Press, 2012.

- [8] J. Sun, V. Palade, X. J. Wu, W. Fang, Z. Wang, "Solving The Power Economic Dispatch Problem with Generator Constraints by Random Drift Particle Swarm Optimization", *IEEE Trans. Ind. Inf.*, vol.10, pp. 222-232, 2014.
- [9] Z. Guo, H. Huang, C. Deng, X. Yue, Z. Wu, "An Enhanced Differential Evolution with Elite Chaotic Local Search", *Hindawi Computational Intell. Neurosci.*, 2015.
- [10] Heffron, W.G., Phillips, R.A., "Effect of a Modern Amplidyne Voltage Regulator on Underexcited Operation of Large Turbine Generators", *AIEE*, 1952.
- [11] Demello, F.P., Concordia, C., "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", *IEEE Trans. On Power App. And System*, 88(4):316-329, 1969.
- [12] Imam Robandi, "Desain Sistem Tenaga Modern", Yogyakarta: ANDI press, 2006.
- [13] J. B. Ward, "Equivalent Circuit for Power Flow Studies", *AIEE Trans. Power App. Syst.*, vol.68, pp. 373-382, 1949.
- [14] P. Dimo, *Nodal Analysis of Power System*, Abacus Press, Kent, England, 1975.
- [15] K.L. Lo, L.J. Peng, J.F. Macqueen, A.O. Ekwue, D.T.Y. Cheng, "An Extended Ward Equivalent Approach for Power System Security Assessment", *Elsevier Electric Power System Research*, vol.42:181-188, 1997.
- [16] T.E.D. Liacco, S.C. Savulescu, K.A. Ramarao, "An On-Line Topological Equivalent of a Power System", *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol.97, pp. 1550-1563, 1978.
- [17] S.C. Savulescu, "Equivalents for Security Analysis of Power Systems", *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol.100, pp. 2672-2682, 1981.
- [18] M. L. Oatts, S. R. Erwin, J.L. Hart, "Application of The REI Equivalent for Operations Planning Analysis of Interchange Schedules", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol.5, pp. 547-555, 1990.
- [19] J. Bialek, "Topological Generation and Load Distribution factors for Supplement Charge Allocation in Transmission Open Access", *IEEE Trans. Power Syst.* vol.12, pp. 1185-1193. 1997.
- [20] D. Kirschen, R. Allan, G. Strbac, "Contribution of Individual Generators to Loads and Flows", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 12, pp. 52-60. 1997.
- [21] F. Fu, Y. Ni, P. Wei, "Power Transfer Allocation for Open Access using Graph Theory – Fundamentals and Applications in Power Systems without loopflow", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol.15, pp. 923-929, 2000.
- [22] P. Wei, B. Yuan, Y. Ni, F. Fu, "Power Flow for Transmission Open Access", *Int. Conf. Electric Utility Deregulation and Power Technologies*, City University, London, 2000.
- [23] S. Abdelkader, "Efficient Computation Algorithm for Calculating Contribution to Line Flows and Losses", *IEE Proc. Gene. Trans. Distrib.*, vol.153, pp. 391-398, 2006.
- [24] Simon, D., "Evolutionary Optimization Algorithms", Wiley, New Jersey, 2013.
- [25] Abido, M.A., "Robust Design of Power System Stabilizers for Multimachine Power Systems Using Differential Evolution", *Comp. Int. In Pow. Eng.*, Springer, Berlin, SCI 302, pp.1-18, 2010.
- [26] Z. Guo, H. Huang, C. Deng, X. Yue, Z. Wu, "An Enhanced Differential Evolution with Elite Chaotic Local Search", *Hindawi Computational Intell. Neurosci.*, 2015.
- [27] T. Kapitaniak, *Continuous Control and Synchronous in chaotic system, Chaos, Solitons, and Fractals*, pp. 237-244. 1995.
- [28] D. Jia, G. Zheng, M.K. Khan, "An Effective Memetic Differential Evolution Algorithm based on Chaotic Local Search", *Elsevier Information Science*, vol. 181, pp. 3175-3187, 2011.
- [29] J. Brest, S. Greiner, B. Boskovic, M. Mernik, V. Zumer, "Self-Adapting Control Parameters in Differential Evolution: a Comparative Study on Numerical Benchmark Problems", *IEEE Trans. Evol. Comp.*, vol. 10, pp. 646-657, 2006.
- [30] A. K. Qin, V.L. Huang, P.N. Suganthan, "Differential Evolution Algorithm with Strategy Adaptation for Global Numerical Optimization", *IEEE Trans. Evol. Comp.*, vol. 13, pp. 398-417, 2011.
- [31] J. Zhang and A. C. Sanderson, "JADE: Adaptive Differential Evolution with Optional External Archive", *IEEE Trans. Evol. Comp.*, vol.13, pp. 945-958, 2009.
- [32] Y. Lu, J. Zhou, H. Qin, Y. Wang, Y. Zhang, "An Adaptive Chaotic Differential Evolution for The Short-Term Hydrothermal Generation Scheduling Problem", *Elsevier Energy Conversion and Manag.*, vol.51, pp. 1481-1490. 2010.
- [33] Y. Tan, G. Tan, X. Wu, "Hybrid Real-Code Genetic Algorithm with Chaotic Local Search for Global Optimization", *Journal of Information and Comp. Science*, vol. 8, pp. 3171-3179. 2011.
- [34] N. N. Islam, M. A. Hannan, H. Shareef, A. Mohamed, M. A. Salam, "Comparative Study of Popular Objective Function for Damping Power System Oscillations in Multimachine System", *Hindawi publishing Corp.*, vol. 2014. 2014.
- [35] M. A. Abido and Y. L. Abdel-Magid, "A Genetic-Based Power System Stabilizer", *Electric Machines and Power System*, vol. 26:6, pp. 559-571. 1998.