

# OPTIMALISASI PERALATAN KONTROL SISTEM TENAGA LISTRIK UNTUK MENINGKATKAN KESTABILAN SISTEM BERUKURAN BESAR

Rudy Gianto<sup>\*)</sup>, and Hendro Priyatman

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Tanjungpura  
Jalan Prof. Dr. H. Hadari Nawawi, Pontianak 78124, Indonesia

<sup>\*)Email: rudygianto@gmail.com</sup>

## Abstrak

Pada penelitian ini telah dibahas prosedur dalam mengkoordinasikan alat-alat kontrol sistem tenaga seperti PSS dan peralatan FACTS untuk meningkatkan kestabilan suatu sistem tenaga listrik. Prosedur yang didasarkan pada optimisasi dengan konstrain tersebut juga telah diaplikasikan pada sistem-sistem tenaga listrik yang representatif. Keefektifan dari peralatan-peralatan tersebut dalam memperbaiki penampilan dinamik sistem telah dikonfirmasi melalui hasil-hasil perhitungan nilai eigen. Verifikasi lebih lanjut juga telah dilakukan melalui simulasi domain-waktu dimana kondisi gangguan telah digunakan untuk menginisiasi transien sistem.

*Kata Kunci: PSS, FDS, kestabilan sistem tenaga, optimalisasi*

## Abstract

This paper develops a procedure for optimal control coordination of controllers of power system stabilizers (PSS) and FACTS devices for improving the stability of multi-machine power systems. The procedure is based on a constrained optimization and has been successfully applied to several representative power systems. The effectiveness of the procedure in improving system dynamic performance has been confirmed by eigenvalue results. Further verification has also been carried out by time-domain simulation where fault condition is used to initiate system transient.

*Keywords: PSS, FDS, power system stability, optimization*

## 1. Pendahuluan

Sistem tenaga listrik yang berperilaku tidak stabil sangat tidak diinginkan karena merupakan ancaman serius terhadap keamanan sistem tenaga listrik dan akan mengakibatkan operasi dari sistem tersebut menjadi sangat sulit. Pada kasus terburuk, ketidak-stabilan sistem dapat mengakibatkan generator-generator pembangkit daya menjadi kehilangan sinkronisme yang pada gilirannya dapat menyebabkan sistem tenaga menjadi gagal atau kolaps (*collapse*). Gagalnya sistem tenaga ini akan sangat merugikan karena akan membuat suplai daya listrik ke konsumen menjadi terganggu atau terputus.

Peningkatan atau perbaikan kestabilan sistem tenaga listrik dapat dilakukan dengan menggunakan peralatan PSS (*Power System Stabilizer*) dan FDS (*FACTS Device Stabilizer*). PSS merupakan peralatan konvensional dan telah lama digunakan untuk meningkatkan kestabilan sistem tenaga. Namun demikian, untuk sistem yang berukuran besar, penggunaan PSS biasanya tidak lagi mencukupi. Pada kasus seperti ini, peralatan lain sebagai

tambahan terhadap PSS harus digunakan agar kestabilan sistem tetap dapat terjaga.

Saat ini, banyak sistem tenaga modern telah dilengkapi dengan FDS. Peralatan ini merupakan alat kontrol tambahan dan dapat digunakan untuk membantu PSS dalam memperbaiki kestabilan sistem tenaga listrik. Untuk mencegah timbulnya interaksi yang saling merugikan dan untuk mendapatkan penampilan yang optimal dalam hal peningkatan kestabilan sistem, peralatan-peralatan PSS dan FDS dalam operasinya perlu dikoordinasikan secara baik dan simultan.

Beberapa kajian terhadap masalah disain dan koordinasi dari peralatan-peralatan kontrol seperti PSS dan FDS telah dilakukan oleh beberapa peneliti [1-4]. Para peneliti ini telah mengusulkan metode atau prosedur untuk menyelesaikan masalah koordinasi dari peralatan-peralatan PSS dan FDS dimana perangkat lunak khusus (*special software*) untuk menghitung nilai eigen/vektoreigen (yaitu metode iterasi QR) telah digunakan didalam prosedurnya. Dilain pihak, telah diketahui secara luas bahwa penggunaan metode iterasi

QR terbatas hanya untuk sistem-sistem yang kecil. Dengan demikian, prosedur koordinasi yang diusulkan oleh peneliti-peneliti diatas akan sulit bila diterapkan pada sistem-sistem yang berukuran besar.

Peneliti lain juga telah melakukan kajian terhadap masalah disain dan koordinasi dari peralatan-peralatan kontrol seperti PSS dan FDS [5-8]. Para peneliti ini menggunakan prosedur optimisasi dalam mengkoordinasikan peralatan-peralatan kontrol sistem tenaga dan prosedur tersebut telah berhasil diaplikasikan pada sistem-sistem yang berukuran kecil. Namun demikian, penerapan dari metode tersebut pada sistem-sistem yang lebih besar tidak divalidasi sehingga keefektifan penggunaannya tidak diketahui.

Peneliti-peneliti lain mengusulkan suatu metode atau prosedur yang menggunakan teknik *soft computing* untuk mencari nilai optimal dari parameter-parameter alat kontrol [9-10]. Metode yang diusulkan tersebut telah sukses diaplikasikan pada sistem kecil yaitu sistem dengan satu mesin (SMIB = Single Machine Infinite Bus System). Namun demikian, penerapan dari metode tersebut pada sistem-sistem yang lebih besar juga tidak divalidasi.

Pada tulisan ini, masalah disain dan koordinasi dari peralatan-peralatan kontrol PSS dan FDS tersebut akan ditransformasikan menjadi masalah optimisasi dengan pembatas atau konstrain (*constrained optimization problem*) untuk mendapatkan setting optimal dari parameter-parameter alat kontrol. Oleh karena metode yang diusulkan ini sepenuhnya didasarkan pada prosedur optimisasi, maka ia tidak memerlukan *software* khusus (seperti metode iterasi QR) untuk menghitung nilai-eigen/vektoreigen, sehingga ia dapat dengan mudah diaplikasikan pada sistem-sistem tenaga listrik yang berukuran besar.

## 2. Metode

### 2.1. Umum

Pada bagian ini, akan dibahas mengenai model dinamik dari suatu sistem tenaga listrik. Disain dari alat-alat kontrol sistem tenaga seperti PSS dan peralatan-peralatan FACTS untuk meningkatkan kestabilan sistem juga akan dibahas pada bagian ini. Masalah disain tersebut akan ditransformasikan menjadi masalah optimisasi dengan konstrain (*constrained optimization problem*) untuk mencari setting optimal dari parameter-parameter alat kontrol.

Pada metode yang diusulkan tersebut, hubungan-hubungan nonlinier antara nilai-eigen-nilaieigen dengan parameter-parameter alat kontrol akan diekspresikan sebagai persamaan-persamaan nilai-eigen-vektoreigen yang bersesuaian dengan mode-mode elektromekanik yang akan ditingkatkan redamannya. Persamaan-

persamaan tersebut akan secara langsung diikuti-sertakan pada proses optimisasi dalam bentuk konstrain-konstrain kesamaan (*equality constraints*). Konstrain-konstrain khusus juga akan ditambahkan pada proses optimisasi untuk menjamin bahwa konvergensi pada nilai-eigen yang sama tidak mungkin terjadi.

### 2.2. Model Dinamik Sistem Tenaga

Pada bagian ini akan dibahas model dari sistem tenaga beserta alat-alat kontrolnya termasuk PSS dan FDS. Model tersebut harus sesuai untuk jangkauan frekwensi dari osilasi elektromekanik yang mungkin terjadi dalam sistem tenaga. Komponen-komponen dinamik dari sistem tenaga seperti mesin-mesin sinkron dan alat-alat kontrolnya, serta peralatan-peralatan PSS dan FDS akan dimodelkan melalui persamaan-persamaan diferensial (*differential equations*). Oleh karena frekwensi dari osilasi elektromekanik adalah rendah, komponen-komponen dari sistem tenaga seperti jaringan transmisi dan transformator akan dianggap sebagai komponen-komponen statik dan adalah valid untuk dimodelkan melalui persamaan-persamaan aljabar (*algebraic equations*).

Untuk kasus kestabilan gangguan-kecil, kombinasi dari persamaan-persamaan diferensial-aljabar tersebut dapat dilinierisasi disekitar disekitar titik operasi tertentu yang akan menghasilkan bentuk umum:

$$\begin{pmatrix} p\Delta x \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta w \end{pmatrix} \quad (1)$$

dimana  $x$  adalah vektor dari variabel-variabel keadaan (*state variables*);  $w$  adalah vektor dari variabel-variabel non-keadaan (*non-state variables*);  $J_1, J_2, J_3$  dan  $J_4$  adalah submatriks-submatriks Jacobian yang diperoleh dengan cara melinierisasi persamaan-persamaan sistem, dan  $p$  adalah operator turunan waktu (atau  $d/dt$ ).

Eliminasi variabel-variabel non-keadaan dari (1) menghasilkan:

$$p\Delta x = A\Delta x \quad (2)$$

Pada (2),  $A = J_1 - J_2 J_4^{-1} J_3$  biasa disebut sebagai matriks keadaan sistem. Investigasi mengenai kestabilan gangguan-kecil dan disain dari alat-alat kontrol sistem tenaga akan didasarkan pada matriks keadaan ini.

### 2.3. Fungsi Objektif dan Variabel-Variabel

Disain dari alat-alat kontrol akan didasarkan pada minimisasi bagian riil dari nilai-eigen-nilaieigen dari matriks keadaan sistem. Hal ini disebabkan oleh karena

bagian riil dari nilai-eigen-nilai-eigen menggambarkan tingkat redaman sistem dimana nilai yang lebih negatif akan menunjukkan tingkat redaman yang lebih baik. Dengan perkataan lain, tujuan dari optimisasi adalah mencari nilai-nilai parameter alat kontrol sedemikian sehingga nilai-eigen-nilai-eigen yang tidak/kurang teredam digeser posisinya ke sebelah kiri pada bidang kompleks.

Dengan demikian, fungsi objektif yang akan diminimisasi dengan parameter-parameter alat kontrol sebagai variabel disain adalah:

$$f(K, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m, z_1, z_2, \dots, z_m) = -\sum_{i=1}^m [\text{Re}(\lambda_i)]^2 \quad (3)$$

dimana:

- $K$  = vektor dari parameter-parameter alat kontrol yang akan dioptimisasi
- $\square_i$  = nilai-eigen ke- $i$  yang akan digeser posisinya
- $z_i$  = vektoreigen yang bersesuaian dengan nilai-eigen ke- $i$
- $m$  = jumlah nilai-eigen yang akan digeser posisinya

Nilai-eigen-nilai-eigen dan vektoreigen-vektoreigen yang bersesuaian merupakan fungsi-fungsi nonlinier dari vektor parameter  $K$ . Namun demikian, ekspresi matematik untuk fungsi-fungsi tersebut biasanya tidak tersedia. Fitur utama dari metode yang diusulkan adalah mengekspresikan hubungan-hubungan antara vektor parameter, nilai-eigen-nilai-eigen dan vektoreigen-vektoreigen tersebut dalam bentuk persamaan-persamaan nilai-eigen-vektoreigen yang harus dipenuhi selama proses optimisasi. Persamaan-persamaan tersebut akan membentuk konstrain-konstrain kesamaan pada proses optimisasi, dan nilai-eigen-nilai-eigen serta vektoreigen-vektoreigen akan diperlakukan sebagai variabel-variabel seperti halnya parameter-parameter alat kontrol.

#### 2.4. Konstrain-konstrain Kesamaan

Jika  $\square$  adalah nilai-eigen dari matriks  $A$  dan  $z$  adalah vektoreigen yang bersesuaian dengan  $\square$  maka:

$$Az - \lambda z = 0 \quad (4)$$

dimana  $z$  tidak sama dengan  $0$ .

Walaupun matriks keadaan  $A$  adalah riil, nilai-eigen-nilai-eigen dan vektoreigen-vektoreigennya dapat saja bernilai kompleks. Oleh karenanya, (4) harus diubah kedalam bentuk riil agar dapat diikuti sebagai konstrain didalam proses optimisasi yang menggunakan variabel-variabel dan fungsi-fungsi riil.

Dengan mendefinisikan:

$$\begin{aligned} z &= z_R + jz_I \\ \lambda &= \lambda_R + j\lambda_I \end{aligned} \quad (5)$$

Substitusi (5) pada (4):

$$A(z_R + jz_I) - (\lambda_R + j\lambda_I)(z_R + jz_I) = 0 \quad (6)$$

Pemisahan (6) kedalam bagian riil dan imajiner menghasilkan:

$$\begin{aligned} Az_R - (\lambda_R z_R - \lambda_I z_I) &= 0 \\ Az_I - (\lambda_R z_I + \lambda_I z_R) &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Dalam bentuk vektor/matriks, (7) dapat ditulis sebagai:

$$A_C z_C - \lambda_C z_C = 0 \quad (8)$$

dimana:

$$A_C = \begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & A \end{pmatrix}; z_C = \begin{pmatrix} z_R \\ z_I \end{pmatrix}; \lambda_C = \begin{pmatrix} \lambda_R U & -\lambda_I U \\ \lambda_I U & \lambda_R U \end{pmatrix} \quad (9)$$

Pada (9),  $z_R$  dan  $z_I$  berturut-turut adalah bagian riil dan imajiner dari  $z$ ,  $\square_R$  dan  $\square_I$  berturut-turut adalah bagian riil dan imajiner dari  $\square$ . Jika dimensi dari matriks keadaan  $A$  adalah  $N \times N$ , maka dimensi dari matriks  $A_C$  dan  $\lambda_C$  adalah  $2N \times 2N$ . Vektor  $z_C$  memiliki  $2N$  elemen, dan  $U$  adalah matriks satuan  $N \times N$ . Persamaan dalam bentuk riil (8) adalah ekuivalen dengan (4) yang berbentuk kompleks.

Untuk  $m$  buah nilai-eigen, set dari konstrain-konstrain kesamaan yang harus dipenuhi adalah:

$$A_C z_{Ci} - \lambda_{Ci} z_{Ci} = 0; \text{ for } i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

Persamaan (10) merupakan set pertama dari konstrain-konstrain kesamaan yang harus dipenuhi dalam proses optimisasi. Set kedua yang harus dipenuhi berasal dari konstrain-konstrain yang dikenakan pada vektoreigen-vektoreigen. Oleh karena vektoreigen yang bersesuaian dengan suatu nilai-eigen bukanlah unik, (10) akan memiliki sejumlah tak-hingga solusi untuk vektoreigen. Sebagai contoh,  $z_{Ci} = 0$  juga akan merupakan solusi yang tentunya bukan merupakan vektoreigen yang valid. Masalah ini dapat diatasi dengan menerapkan suatu konstrain pada vektor  $z_{Ci}$ . Pada penelitian ini, konstrain akan dikenakan pada norm dari vektor  $z_{Ci}$ :

$$\left( \sum_{k=1}^{2N} z_{Ci}^2(k) \right)^{1/2} = 1; \text{ for } i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

Dengan menggunakan konstrain kesamaan (11), solusi trivial dan non-valid  $z_{Ci} = 0$  akan dapat dihindari.

#### 2.5. Konstrain-konstrain Ketidaksamaan

Tiga set dari konstrain-konstrain ketidak-samaan akan digunakan dalam proses optimisasi untuk membatasi nilai-nilai dari parameter-parameter alat kontrol, rasio redaman dan frekwensi dari osilasi:

$$K_{j,min} \leq K_j \leq K_{j,max}; j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$-\frac{\text{Re}(\lambda_i)}{\sqrt{\text{Re}(\lambda_i)^2 + \omega_i^2}} \geq \zeta_{i,des}; i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

$$\omega_{i,min} \leq \omega_i \leq \omega_{i,max}; i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

Pada (12),  $K_j$  adalah elemen ke- $j$  dari vektor parameter alat kontrol  $\mathbf{K}$ . Pada (13),  $\zeta_{i,des}$  adalah rasio redaman yang diinginkan dari nilai eigen ke- $i$ . Pada (13) dan (14),  $\omega_i$  adalah frekwensi angular yang diberikan oleh bagian imajiner dari nilai eigen ke- $i$ . Interval frekwensi angular  $[\omega_{i,min}, \omega_{i,max}]$  dipilih agar frekwensi dari osilasi elektromekanik tertentu tercakup didalamnya.

### 2.6. Pencegahan Terhadap Konvergensi Pada Nilai eigen Yang Sama

Prosedur berikut akan digunakan untuk menjamin bahwa proses optimisasi selalu menggunakan mode-mode elektromekanik yang berbeda bahkan ketika nilai eigen-nilai eigennya saling berdekatan.

Vektoreigen-vektoreigen yang bersesuaian dengan mode-mode elektromekanik yang berbeda haruslah bebas linier (*linearly independent*). Oleh karenanya, jika

$$c_1 z_1 + c_2 z_2 + \dots + c_m z_m = \mathbf{0} \quad (15)$$

maka:

$$c_1 = c_2 = \dots = c_m = 0 \quad (16)$$

Pada (15) dan (16),  $c_i$  adalah koefisien-koefisien skalar pada kombinasi linier (15), dan  $z_i$  adalah vektoreigen-vektoreigen yang bebas linier.

Menuliskan kembali (15) dalam bentuk vektor/matrik:

$$\mathbf{Z} \cdot \mathbf{C} = \mathbf{0} \quad (17)$$

dimana:

$$\mathbf{Z} = [z_1 \quad z_2 \quad \dots \quad z_m] \quad (18)$$

$$\mathbf{C} = [c_1 \quad c_2 \quad \dots \quad c_m]^T \quad (19)$$

Persamaan (17) diubah kedalam bentuk riil seperti yang dipersyaratkan dalam proses optimisasi menghasilkan:

$$\mathbf{Z}_C \cdot \mathbf{C}_C = \mathbf{0} \quad (20)$$

dimana:

$$\mathbf{Z}_C = \begin{pmatrix} \mathbf{Z}_R & -\mathbf{Z}_I \\ \mathbf{Z}_I & \mathbf{Z}_R \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{C}_C = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_R \\ \mathbf{C}_I \end{pmatrix} \quad (22)$$

Pada (21),  $\mathbf{Z}_R$  dan  $\mathbf{Z}_I$  berturut-turut adalah bagian riil dan imajiner dari  $\mathbf{Z}$ , dan pada (22),  $\mathbf{C}_R$  dan  $\mathbf{C}_I$  berturut-turut adalah bagian riil dan imajiner dari  $\mathbf{C}$ .

Jumlah persamaan linier pada (20) adalah lebih besar dari jumlah koefisien pada vektor  $\mathbf{C}_C$ . Jika pseudo-invers dari  $\mathbf{Z}_C$  ada, maka solusi unik untuk  $\mathbf{C}_C$  juga akan ada yaitu sama dengan vektor nol. Ini merupakan kondisi dimana vektoreigen  $z_i$  adalah vektoreigen-vektoreigen yang bebas linier. Untuk mendapatkan konstrain yang sesuai dengan kondisi ini, matriks  $\mathbf{D}_C$  didefinisikan sebagai:

$$\mathbf{D}_C = \mathbf{Z}_C^T \mathbf{Z}_C \quad (23)$$

Jika  $\mathbf{D}_C$  pada (23) adalah non-singular, maka pseudo-invers dari  $\mathbf{Z}_C$  akan ada.

Bila  $\mathbf{D}_C$  non-singular, maka akan terdapat matriks  $\mathbf{E}_C$  yang memenuhi konstrain ber

$$\mathbf{D}_C \mathbf{E}_C = \mathbf{U} \quad (24)$$

atau:

$$\sum_{j=1}^{2m} D_C(i, j) E_C(j, k) = 1; \text{ if } i = k \quad (25)$$

$$= 0; \text{ if } i \neq k$$

Pada (24),  $\mathbf{U}$  adalah matriks satuan  $2m \times 2m$ , sedangkan pada (25),  $D_C(i, j)$  adalah elemen dari matriks  $\mathbf{D}_C$ , dan  $E_C(i, j)$  adalah elemen dari matriks  $\mathbf{E}_C$ . Konstrain-konstrain (25) kemudian harus diikutkan didalam proses optimisasi dengan  $E_C(i, j)$  sebagai variabel-variabel tambahan.

## 3. Hasil Dan Analisa

### 3.1. Umum

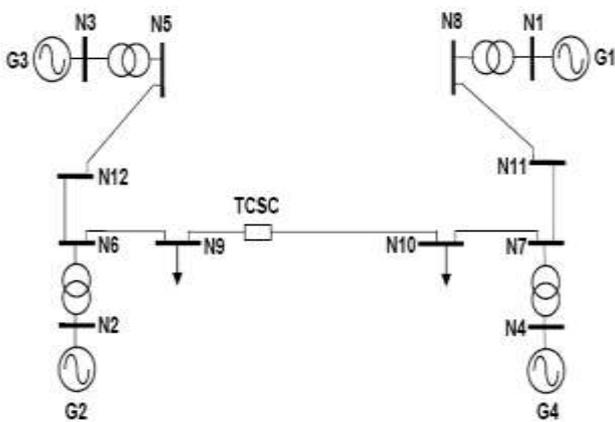
Pada bab ini akan dibahas implementasi dan hasil-hasil penyelidikan dari metode yang diusulkan seperti yang telah dibahas pada Bab II. Metode yang diusulkan ini akan diaplikasikan untuk mendisain alat-alat kontrol pada sistem tenaga listrik multimesin yang memiliki peralatan-peralatan FACTS. Peralatan-peralatan kontrol yang dibahas pada disain tersebut mencakup PSS dan SDC dari TCSC. Pada penelitian ini, dua buah sistem tenaga listrik multimesin akan digunakan yaitu: sistem 4-mesin dan sistem 10-mesin.

Keefektifan dari metode yang diusulkan tersebut dalam mendisain dan mengkoordinasikan alat-alat kontrol sehingga perbaikan kestabilan sistem tenaga menjadi optimal juga akan dibahas pada bab ini. Keefektifan ini akan ditentukan berdasarkan hasil-hasil perhitungan

nilaieigen dan akan dikonfirmasi lebih lanjut melalui simulasi domain waktu.

**3.2. Sistem 4-Mesin**

Sistem 4 mesin merupakan sistem dua-area yang memiliki 4 generator, 12 bus dengan beban total 2734 MW [11]. Diagram segaris dari sistem tersebut diperlihatkan pada Gambar 1. Dua buah PSS (satu untuk setiap area) dipasang pada sistem tersebut. Untuk memperbaiki redaman dari mode inter-area, lokasi-lokasi terbaik untuk PSS tersebut adalah pada G1 dan G3. Penentuan lokasi-lokasi PSS ini adalah berdasarkan faktor partisipasi.



**Gambar 1. Sistem 4 Mesin**

Untuk lebih meningkatkan redaman osilasi, SDC kemudian dipasang pada TCSC yang terletak pada saluran transmisi antara N9 dan N10. Perlu dicatat bahwa TCSC tersebut sengaja dipasang dengan tujuan utama untuk mengendalikan aliran daya dan kompensasi seri pada saluran transmisi panjang (tie-line) pada sistem Gambar 1. TCSC tersebut kemudian diperlengkapi dengan SDC agar ia juga dapat digunakan untuk meningkatkan redaman dari mode elektromekanik, terutama mode inter-area.

Tabel 1 memperlihatkan nilaieigen, frekwensi dan rasio redaman untuk sistem dengan dua buah PSS dan TCSC yang diperlengkapi dengan SDC. Perlu dicatat bahwa hasil-hasil pada Tabel 1 diperoleh dengan tanpa mengkoordinasikan PSS dan SDC atau parameter-parameter dari alat-alat kontrol tersebut belum dioptimisasi.

Prosedur koordinasi seperti yang dibahas sebelumnya bila diterapkan pada sistem 4-mesin akan memberikan hasil seperti pada Tabel 2 yang menunjukkan nilaieigen-nilai eigen setelah parameter-parameter alat kontrol dioptimisasi secara simultan. Nilai-nilai pada Tabel 1 dan 2 mengkonfirmasi adanya peningkatan redaman yang cukup substansial bila alat-alat kontrol tersebut dikoordinasikan.

**Tabel 1. Nilaieigen Sebelum Optimisasi Untuk Sistem 4 Mesin**

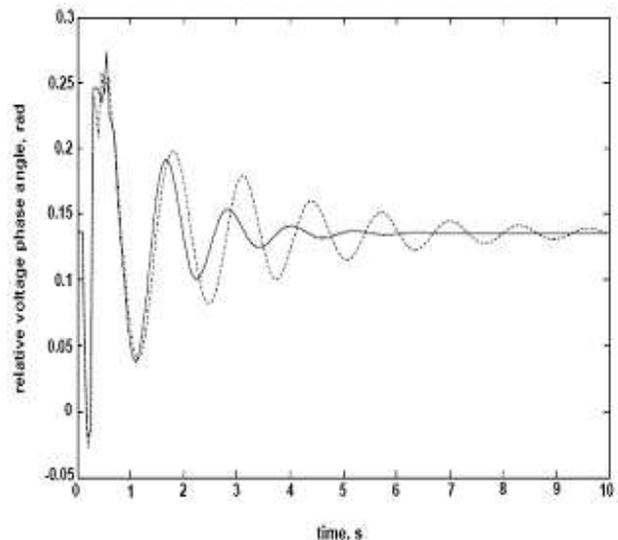
Mode	Nilaieigen	f (Hz)	$\zeta$
1	-1.4184 ± j6.6338	1.06	0.2091
2	-1.2896 ± j6.9264	1.10	0.1830
3	-0.4847 ± j4.7773	0.76	0.1009

**Tabel 2. Nilaieigen Setelah Optimisasi Untuk Sistem 4 Mesin**

Mode	Nilaieigen	f (Hz)	$\zeta$
1	-3.0158 ± j6.7083	1.07	0.4100
2	-3.0424 ± j6.6870	1.06	0.4141
3	-1.1479 ± j4.8887	0.78	0.2286

Hasil-hasil perhitungan nilaieigen telah mengkonfirmasi adanya peningkatan kestabilan dengan dipasangnya PSS dan SDC pada suatu sistem tenaga. Untuk mengkonfirmasi hasil ini lebih lanjut, penampilan dari PSS dan SDC pada kondisi gangguan r dengan menggunakan simulasi domain-waktu juga akan diselidiki. Gangguan yang akan digunakan dalam penyelidikan tersebut adalah gangguan tiga-fasa pada bus N8. Gangguan tersebut diinisiasi pada t = 0,1s dan berlangsung selama 0,1s (atau waktu pemutusan gangguan adalah 0,1s).

Konfirmasi lebih lanjut dari peningkatan kestabilan sistem dapat dilihat dengan membandingkan respons-respons domain-waktu seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2. Oleh karena mode inter-area merupakan mode kritis, maka respons-respons yang digunakan adalah respons-respons transien dari beda sudut fasa tegangan antara bus N9 dan N10 (bus-bus yang menghubungkan tie-line).



**Gambar 2. Transien Untuk Sistem Gambar 1**

Respons-respons pada Gambar 2 memperlihatkan bahwa tanpa mengkoordinasikan PSS dan SDC, osilasi sistem sangat kurang teredam dan memerlukan waktu yang cukup lama untuk mencapai kondisi stabil (lihat garis

putus-putus pada Gambar 2). Perbaikan dalam hal waktu untuk mencapai kestabilan dapat diperoleh dengan mengkoordinasikan PSS dan SDC yang ada pada sistem. Pada kasus ini, osilasi sistem akan diredam secara lebih cepat dan akan hilang setelah 5 – 6 detik (lihat garis solid pada Gambar 2).

### 3.3. Sistem 10-Mesin

Sistem 10 mesin merupakan sistem yang memiliki 10 stasiun pembangkit, 36 bus dan 46 cabang [12]. Diagram segaris dari sistem tersebut diperlihatkan pada Gambar 3. Pada penyelidikan awal, untuk mengetahui penampilan dinamik sistem tanpa PSS dan peralatan FACTS, peralatan-peralatan tersebut tidak diikuti dalam sistem. Analisis modal yang digunakan pada investigasi tersebut menunjukkan bahwa terdapat dua mode elektromekanik yang memiliki redaman relatif rendah. Mode pertama, dengan nilai eigen  $0,4643 \pm j7,8494$  dan rasio redaman 0,0590, adalah akibat generator G9 beresilasi terhadap grup generator G8 dan G10. Mode kedua memiliki nilai eigen  $0,2456 \pm j4,5713$  dan rasio redaman 0,0536. Pada mode ini, grup generator G1, G2 dan G3 beresilasi terhadap grup generator G4, G5, G6 dan G7.

Oleh karena redaman sistem relatif rendah, maka upaya stabilisasi diperlukan untuk meningkatkan penampilan dinamik sistem tersebut. Pada penelitian ini, upaya stabilisasi akan dilakukan dengan memasang dua buah PSS pada sistem. Dua buah SDC juga diusulkan untuk dipasang pada TCSC yang sebelumnya telah ada pada saluran L19 dan L33. TCSC ini memiliki fungsi utama untuk mengendalikan aliran daya dalam sistem. Perlu juga dicatat bahwa lokasi dari kedua PSS adalah pada generator G2 dan G9. Lokasi-lokasi dari alat kontrol tersebut ditentukan berdasarkan faktor partisipasi.

Tabel 3 dan 4 memperlihatkan analisis modal dari sistem pada Gambar 3 sebelum dan sesudah penerapan prosedur koordinasi. Terlihat bahwa nilai-nilai pada Tabel 3 dan 4 tersebut mengkonfirmasi adanya peningkatan redaman yang cukup substansial bila alat-alat kontrol tersebut dikoordinasikan.

**Tabel 3. Nilai eigen Sebelum Optimisasi Untuk Sistem 10 Mesin**

Mode	Nilai eigen	f (Hz)	$\zeta$
1	$-0.7381 \pm j7.0030$	1.11	0.1048
2	$-0.5785 \pm j4.6977$	0.75	0.1222

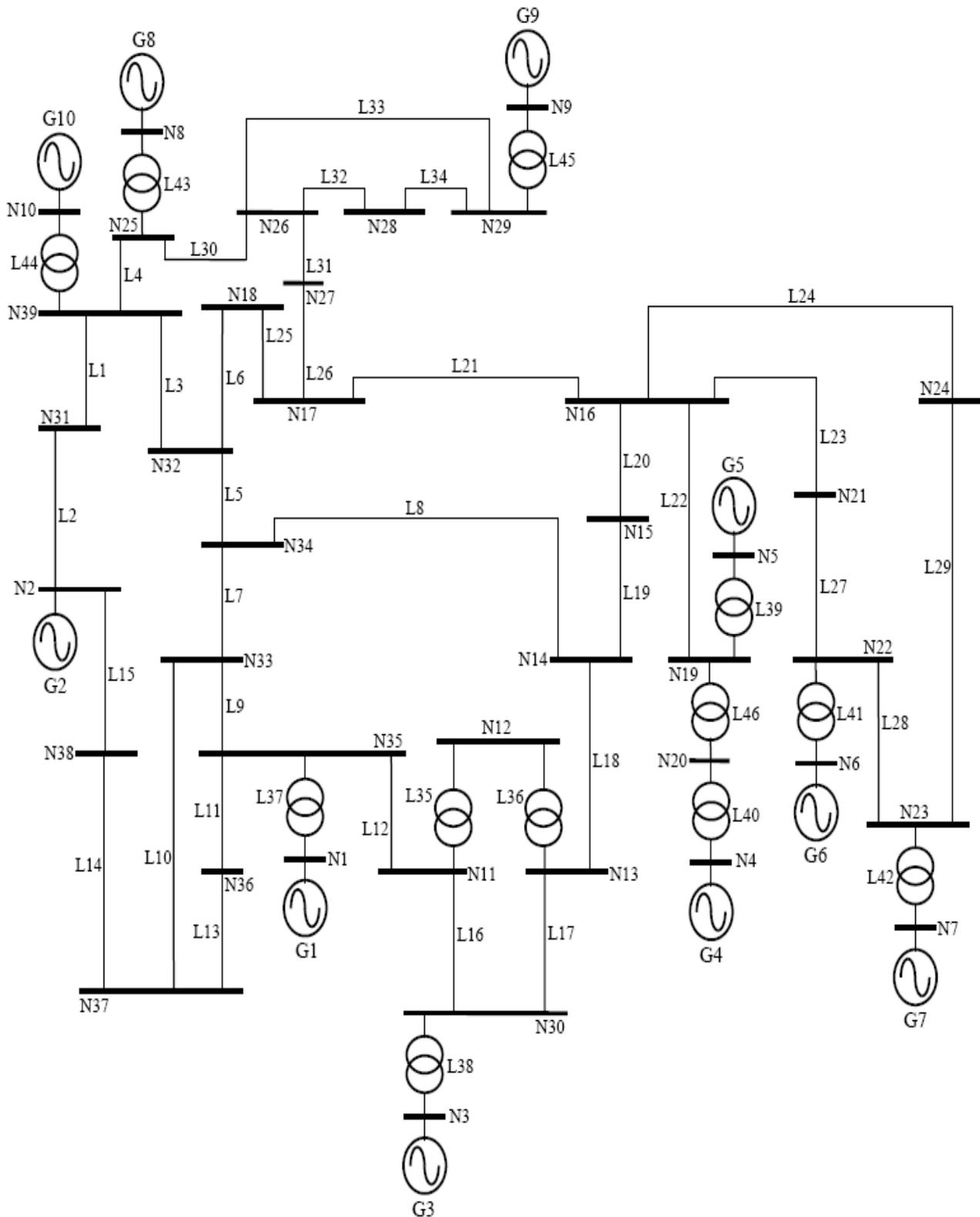
**Tabel 4. Nilai eigen Setelah Optimisasi Untuk Sistem 10 Mesin**

Mode	Nilai eigen	f (Hz)	$\zeta$
1	$-1.8083 \pm j7.0235$	1.12	0.2493
2	$-1.4537 \pm j4.6671$	0.74	0.2974

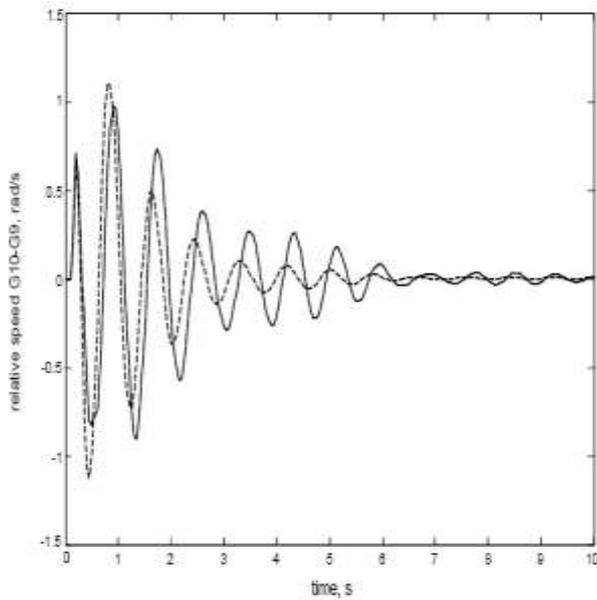
Untuk memvalidasi hasil-hasil pada Tabel 3 dan 4 dan untuk menyelidiki penampilan dari alat-alat kontrol pada kondisi gangguan, pada penelitian ini juga dilakukan simulasi domain waktu. Gangguan yang akan digunakan untuk menginisiasi transien pada proses validasi tersebut adalah gangguan tiga-fasa pada bus N34. Gangguan tersebut diinisiasi pada  $t = 0,1s$  dan berlangsung selama  $0,1s$  (atau waktu pemutusan gangguan adalah  $0,1s$ ).

Gambar 4 dan 5 memperlihatkan transient-transien dari kecepatan relatif dari rotor-rotor mesin setelah terjadinya gangguan tiga-fasa tersebut. Respons-respons pada Gambar 4 dan 5 memperlihatkan bahwa tanpa mengkoordinasikan PSS dan SDC, osilasi sistem sangat kurang teredam dan memerlukan waktu yang cukup lama untuk mencapai kondisi stabil (lihat garis solid pada Gambar 4 dan 5). Perbaikan dalam hal waktu untuk mencapai kestabilan dapat diperoleh dengan mengkoordinasikan PSS dan SDC yang ada pada sistem.

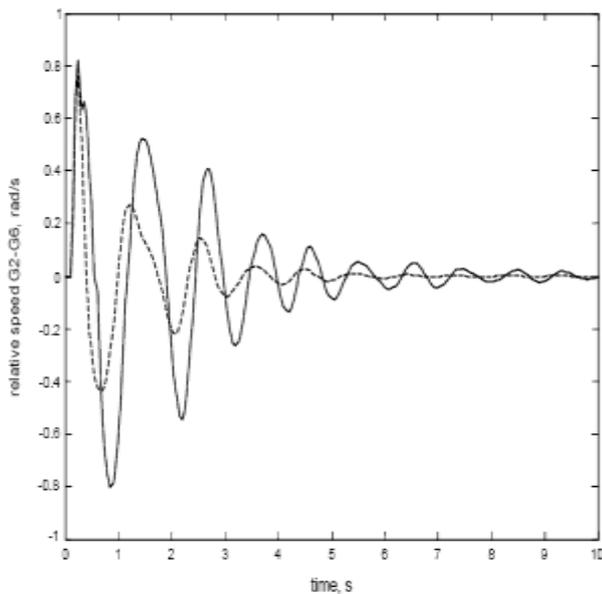
Pada kasus ini, osilasi sistem akan diredam secara lebih cepat dan akan hilang setelah 5 – 6 detik (lihat garis putus-putus pada Gambar 4 dan 5). Hasil-hasil ini juga mengkonfirmasi penampilan yang baik dari metode koordinasi yang diusulkan.



Gambar 3. Sistem 10 Mesin



Gambar 4. Transien Kecepatan Relatif G10-G9



Gambar 5. Transien Kecepatan Relatif G2 – G6

#### 4. Kesimpulan

Pada tulisan ini telah dibahas prosedur dalam mengkoordinasikan alat-alat kontrol sistem tenaga seperti PSS dan peralatan FACTS untuk meningkatkan kestabilan suatu sistem tenaga listrik. Prosedur yang didasarkan pada optimisasi dengan konstrain tersebut juga telah diaplikasikan pada sistem-sistem tenaga listrik yang representatif.

Keefektifan dari peralatan-peralatan tersebut dalam memperbaiki penampilan dinamik sistem telah dikonfirmasi melalui hasil-hasil perhitungan nilai eigen. Verifikasi lebih lanjut juga telah dilakukan melalui simulasi domain-waktu dimana kondisi gangguan telah digunakan untuk menginisiasi transien sistem.

#### Referensi

- [1]. Pourbeik, P., and Gibbard, M.J.: 'Simultaneous coordination of power system stabilizers and FACTS device stabilizers in a multimachine power system for enhancing dynamic performance', *IEEE Trans. Power Systems*, 1998, 13, (2), pp. 473-479.
- [2]. Lei, X., Lerch, E.N., and Povh, D.: 'Optimization and coordination of damping controls for improving system dynamic performance', *IEEE Trans. Power Systems*, 2001, 16, (3), pp. 473-480.
- [3]. Ramos, R.A., Alberto, L.F.C., and Bretas, N.G.: 'A new methodology for the coordinated design of robust decentralized power system damping controllers', *IEEE Trans. Power Systems*, 2004, 19, (1), pp. 444-454.
- [4]. Cai, L.J., and Erlich, I.: 'Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS damping controllers in large power systems', *IEEE Trans. Power Systems*, 2005, 20, (1), pp. 294-300.
- [5]. Nguyen, T.T., and Gianto, R.: 'Application of optimization method for control co-ordination of PSSs and FACTS devices to enhance small-disturbance stability', *Proceedings of the IEEE PES 2005/2006 Transmission and Distribution Conference & Exposition*, May 2006, pp. 1478-1485.
- [6]. Nguyen, T.T., and Gianto, R.: 'Stability improvement of electromechanical oscillations by control co-ordination of PSSs and FACTS devices in multi-machine systems', *Proceedings of the IEEE PES GM 2007*, June 2007, pp. 1-7.
- [7]. Nguyen, T.T., and Gianto, R.: 'Optimisation-based control co-ordination of PSSs and FACTS devices for optimal oscillations damping in multimachine power system', *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2007, 1, (4), pp.564-573.
- [8]. Panda, S., and Ardil, C.: 'Robust coordinated design of multiple PSSs using particle swarm optimization', *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2008, Vol.1, No.1.
- [9]. Qing, L., and Zengzeng, W.: 'Coordinated design of multiple FACTS controllers based on fuzzy immune co-evolutionary algorithm', *PES IEEE General Meeting*, 2009, pp. 1-6.
- [10]. Hedari, S.V., Sedighzadeh, M., Ahmadzadeh, M., and Mohammadzadeh, S.: 'Optimal coordination of PSS and TCSC for improving of dynamic stability in power systems using genetic algorithm', *Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering*, 2011, 2, (5), pp. 136-143.
- [11]. Padiyar, K.R.: *Power System Dynamics Stability and Control*, 1996, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, Singapore.
- [12]. Pai, M.A.: *Energy Function Analysis for Power System Stability*, 1989, Kluwer Academic Publishers, Boston.