

Neural Network pada Koordinasi PSS dan TCSC untuk Meningkatkan Kestabilan Sistem Tenaga Terinterkoneksi

Rudy Gianto¹, Kho Hie Khwee²

Abstract—This paper develops a design procedure for adaptive coordination among power system damping controllers (i.e. power system stabilizers and supplementary damping controller of thyristor-controlled series capacitor) for improving the stability of an interconnected electric power system. The design is based on the use of neural network which identifies the optimal controller parameters online. The inputs to the neural network include the active- and reactive- power of the synchronous generators which represent the power loading on the system, and elements of the reduced nodal impedance matrix for representing the power system configuration. The neural network-based adaptive controller is trained offline with a wide range of credible power system operating conditions and configurations. The controller parameters obtained from the trained neural network are verified by both eigenvalue calculations and time-domain simulations, which confirms that good dampings of the electromechanical modes and stability are achieved.

Intisari— Makalah ini membahas tentang prosedur desain untuk koordinasi adaptif antara alat-alat kontrol *Power System Stabilizer* (PSS) dan *Supplementary Damping Controller* (SDC) dari *Thyristor-Controlled Series Capacitor* (TCSC). Prosedur desain tersebut dimaksudkan untuk memperbaiki kestabilan suatu sistem tenaga listrik, dan didasarkan pada penggunaan *neural network* yang akan mengidentifikasi secara *online* parameter-parameter optimal alat kontrol. Masukan terhadap *neural network* mencakup daya aktif dan reaktif generator-generator sinkron yang merepresentasikan pembebanan sistem, dan elemen-elemen matriks impedans bus yang direduksi untuk merepresentasikan konfigurasi sistem. Alat kontrol adaptif berbasis *neural network* tersebut dilatih secara *offline* melalui serangkaian kondisi operasi dan konfigurasi yang mungkin terjadi pada sistem tenaga. Parameter-parameter yang dihasilkan dari alat kontrol adaptif ini diverifikasi melalui perhitungan *eigenvalue* dan simulasi domain-waktu yang mengkonfirmasi adanya peningkatan redaman dan kestabilan sistem.

Kata Kunci— PSS, TCSC, *neural network*, koordinasi adaptif, kestabilan.

I. PENDAHULUAN

Kestabilan sistem tenaga, terutama dalam hal peredaman terhadap osilasi-osilasi elektromekanik dari generator-generator pembangkit daya, merupakan satu kriteria penting untuk keamanan operasi suatu sistem tenaga listrik. Secara

konvensional, kestabilan sistem dapat diperbaiki atau ditingkatkan dengan menggunakan peralatan PSS.

PSS merupakan peralatan yang paling populer dan telah lama digunakan untuk meredam osilasi-osilasi elektromekanik yang mengikuti gangguan pada suatu sistem tenaga. Namun demikian, dengan semakin membesarnya interkoneksi sistem tenaga dan meningkatnya pembebanan saluran transmisi, penggunaan PSS tidak lagi dapat memberikan redaman yang cukup terhadap osilasi elektromekanik sistem. Pada kasus seperti ini, peralatan lain sebagai tambahan terhadap PSS harus digunakan agar sistem tetap dapat memperoleh redaman yang cukup bila terjadi gangguan. Saat ini, banyak sistem tenaga listrik telah dilengkapi dengan peralatan *Flexible AC Transmission System* (FACTS). Fungsi utama peralatan ini adalah untuk mengendalikan aliran daya aktif dan/atau daya reaktif serta untuk mengontrol besarnya tegangan.

Namun demikian, dengan memasang alat kontrol tambahan, peralatan FACTS dapat digunakan untuk meningkatkan redaman sistem tenaga sebagai fungsi sekundernya. Alat kontrol tambahan ini biasa disebut sebagai SDC, dan biasanya digabung dengan alat kontrol utama peralatan FACTS untuk mendapatkan redaman terhadap osilasi serta memperbaiki kestabilan.

Untuk mencegah agar peralatan-peralatan kontrol PSS dan SDC dalam operasinya tidak menimbulkan interaksi yang saling merugikan, maka peralatan-peralatan kontrol ini perlu dikoordinasikan dengan baik. Dalam konteks ini, telah banyak riset yang dilakukan untuk mengkoordinasikan PSS dan SDC agar menghasilkan redaman sistem yang optimal seperti yang dilaporkan pada [1] – [9]. Satu hal penting yang perlu dicatat dari hasil riset-riset tersebut adalah prosedur koordinasi yang diusulkan dilakukan secara *offline* dan didasarkan pada satu kondisi operasi tertentu.

Pada desain alat kontrol yang didasarkan pada satu kondisi operasi, parameter-parameter alat-alat kontrol adalah tetap dan tidak adaptif terhadap perubahan-perubahan kondisi operasi sistem (misalnya berubahnya konfigurasi jaringan dan atau berubahnya beban atau pembangkitan daya listrik). Kelemahan utama desain tersebut adalah adanya kemungkinan memburuknya penampilan dari alat-alat kontrol pada kondisi operasi yang lain sehingga dapat mengancam kestabilan sistem. Kekurangan lain adalah tidak mungkin diperolehnya redaman yang maksimum untuk setiap perubahan kondisi operasi sistem apabila parameter-parameter alat kontrol yang digunakan adalah tetap.

Untuk mengatasi kekurangan alat kontrol nonadaptif di atas, dikembangkanlah teknik-teknik kontrol adaptif. Pada desain alat kontrol adaptif ini, parameter-parameter alat kontrol ditentukan secara *online* dan adaptif terhadap perubahan kondisi operasi sistem. Desain alat kontrol adaptif telah

^{1,2} Dosen, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura, Jln. Prof. Dr. H. Hadari Nawawi 78124 Pontianak INDONESIA (telp: 0561-740186; fax: 0561-740186; e-mail: rudy.gianto@ee.untan.ac.id)

diusulkan untuk meningkatkan redaman dari osilasi-osilasi sistem tenaga listrik [8]. Desain tersebut secara khusus digunakan untuk mengkoordinasikan PSS dan SDC dari *Unified Power Flow Controller* (UPFC). Desain alat kontrol adaptif yang berbasis *neural network* telah berhasil mendapatkan redaman yang optimal walaupun kondisi operasi sistem dan/atau konfigurasinya berubah-ubah [10].

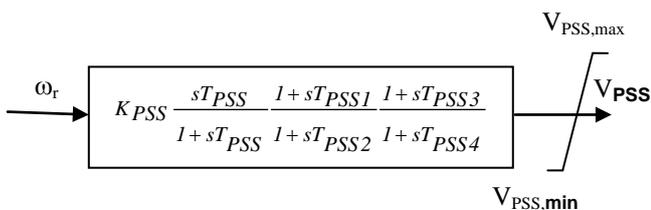
Selain UPFC, TCSC juga merupakan peralatan FACTS yang memiliki potensi untuk digunakan sebagai alat untuk meningkatkan redaman sistem tenaga [11] – [16]. TCSC adalah peralatan yang dapat mengubah impedans saluran transmisi secara cepat dan kontinu, sehingga aliran daya pada saluran tersebut dapat diatur. Kemampuan TCSC dalam mengatur aliran daya inilah yang membuat peralatan tersebut dapat digunakan untuk meningkatkan redaman osilasi daya. Lebih lanjut, oleh karena harganya yang lebih murah dibanding UPFC, penggunaan TCSC lebih luas atau populer dibandingkan UPFC [17]. Mengingat kelebihan dan potensi dari penggunaan TCSC ini, maka makalah ini akan membahas pengembangan prosedur desain yang diusulkan pada [10] untuk diterapkan pada koordinasi adaptif antara PSS dan TCSC pada sistem tenaga listrik multimesin.

II. MODEL DINAMIK SISTEM TENAGA LISTRIK

A. Model PSS

Seperti yang telah diuraikan sebelumnya, PSS merupakan peralatan yang paling umum digunakan untuk meredam osilasi-osilasi elektromekanik. PSS berfungsi untuk memberikan sinyal modulasi melalui sistem eksitasi untuk membantu dalam meredam osilasi rotor. Sinyal-sinyal masukan untuk PSS yang dapat digunakan antara lain adalah kecepatan rotor, frekuensi terminal, dan/atau daya mesin.

Gbr. 1 memperlihatkan struktur umum suatu PSS [18]. Kecepatan rotor digunakan sebagai masukan untuk PSS. Keluaran PSS biasanya ditambahkan pada sinyal *error* tegangan *exciter* dan akan bertindak sebagai sinyal tambahan (*supplementary signal*).

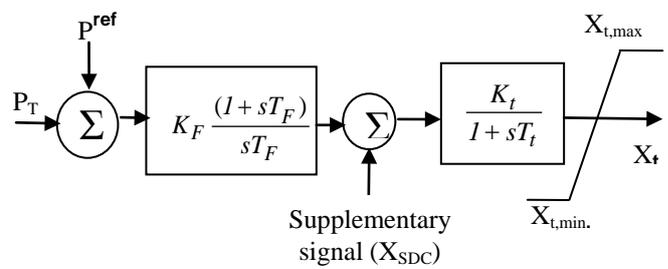


Gbr. 1 Diagram blok PSS.

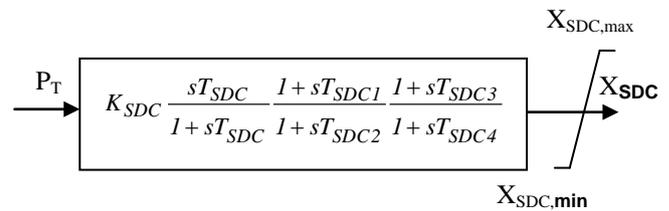
B. Model TCSC

Gbr. 2 memperlihatkan sistem kontrol utama suatu TCSC [6], [19]. Pada gambar tersebut, X_t adalah reaktans dari TCSC, P_T adalah aliran daya aktif pada saluran transmisi, dan P^{ref} adalah referensi aliran daya aktif.

Telah dibahas sebelumnya bahwa redaman dari osilasi-osilasi daya dengan menggunakan peralatan FACTS dilakukan dengan cara modulasi daya melalui suatu alat kontrol SDC. Gbr. 3 memperlihatkan diagram blok kontrol suatu SDC [5], [7], [18].



Gbr. 2 Diagram blok TCSC.



Gbr. 3 Diagram blok SDC.

C. Model Sistem Tenaga

Bagian ini membahas model sistem tenaga beserta alat-alat kontrolnya termasuk PSS dan SDC. Model tersebut harus sesuai untuk jangkauan frekuensi dari osilasi elektromekanik yang mungkin terjadi dalam sistem tenaga. Komponen-komponen dinamik sistem tenaga seperti mesin-mesin sinkron dan alat-alat kontrolnya, serta peralatan-peralatan PSS dan SDC, akan dimodelkan melalui persamaan-persamaan diferensial. Oleh karena frekuensi dari osilasi elektromekanik adalah rendah, komponen-komponen sistem tenaga seperti jaringan transmisi dan transformator akan dianggap sebagai komponen-komponen statik dan adalah valid untuk dimodelkan melalui persamaan-persamaan aljabar.

Dengan demikian, kombinasi dari persamaan-persamaan diferensial dan aljabar tersebut merupakan model yang menggambarkan dinamika sistem tenaga listrik secara lengkap dalam kaitannya dengan respons-respons elektromekanik. Set persamaan-persamaan diferensial-aljabar ini dapat dituliskan secara kompak seperti pada (1).

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, w) \\ 0 &= g(x, w) \end{aligned} \tag{1}$$

dengan x adalah vektor dari variabel-variabel keadaan; w adalah vektor dari variabel-variabel non-keadaan (aljabar); f dan g merupakan fungsi-fungsi vektor.

Pelinearan (1) di sekitar titik operasi tertentu akan menghasilkan (2).

$$\begin{pmatrix} p\Delta x \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta w \end{pmatrix} \tag{2}$$

dengan J_1, J_2, J_3 dan J_4 adalah submatriks-submatriks Jacobian; sedangkan p adalah operator turunan waktu (atau d/dt).

Eliminasi variabel-variabel non-keadaan pada (2) menghasilkan (3).

$$p\Delta x = A\Delta x \tag{3}$$

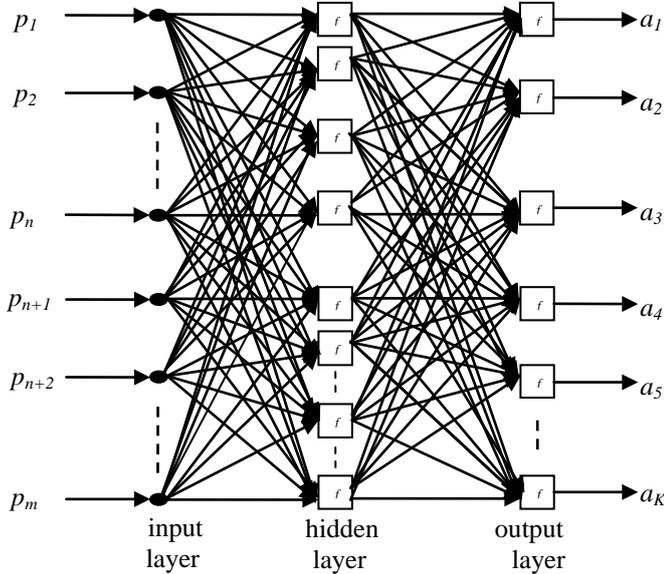
Pada (3), $A = J_1 - J_2 J_4^{-1} J_3$ biasa disebut sebagai matriks keadaan sistem. Investigasi mengenai kestabilan dan desain alat-alat kontrol sistem tenaga dapat didasarkan pada *eigenvalue* dari matriks keadaan ini.

III. ALAT KONTROL ADAPTIF BERBASIS NEURAL NETWORK

A. Konsep Dasar

Hubungan antara parameter-parameter optimal alat-alat kontrol (PSS dan SDC) dan kondisi operasi (termasuk konfigurasi) sistem pada umumnya adalah nonlinear. Desain alat kontrol adaptif yang dibahas di sini akan menggunakan satu sifat penting *neural network* yaitu dapat merepresentasikan fungsi-fungsi multivariabel nonlinear. *Neural network* tersebut akan digunakan untuk memetakan antara konfigurasi (dan/atau kondisi operasi) sistem dan parameter-parameter optimal PSS dan SDC.

Gbr. 4 memperlihatkan struktur *neural network* yang digunakan untuk merepresentasikan hubungan nonlinear antara parameter-parameter optimal alat kontrol dan kondisi operasi (termasuk konfigurasi) sistem.



Gbr. 4 Struktur masukan dan keluaran *neural network*.

Terdapat dua set simpul pada masukan *neural network* Gbr. 4 tersebut. Set yang pertama memiliki n buah simpul yang masukannya diperoleh dari bagian riil dan imajiner dari matriks impedans bus yang direduksi. Masukan-masukan ini merepresentasikan konfigurasi sistem. Jika bus-bus generator pembangkit ada sebanyak Ng, maka jumlah masukan set pertama ini adalah Ng²+Ng, karena matriks impedansi bus adalah simetris.

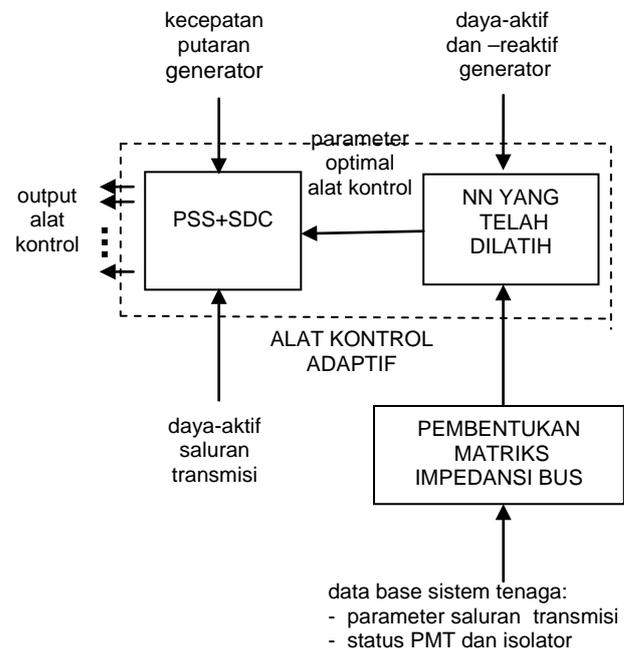
Set yang kedua dari masukan *neural network* pada Gbr. 4 memiliki m buah simpul yang masukannya diperoleh dari daya aktif dan reaktif dari setiap generator pembangkit daya. Masukan-masukan ini merepresentasikan kondisi operasi sistem. Dengan demikian, jumlah total masukan *neural*

network adalah Ng²+3Ng. Keluaran *neural network* mengandung K buah simpul yang akan memberikan nilai-nilai optimal parameter-parameter alat kontrol PSS dan SDC. Berdasarkan struktur alat kontrol pada Gbr. 1 dan Gbr. 3, maka jumlah total keluaran adalah 6Np+6Ns, dengan Np dan Ns berturut-turut adalah jumlah PSS dan SDC.

B. Struktur Alat Kontrol Adaptif

Gbr. 5 memperlihatkan struktur lengkap alat kontrol adaptif berbasis jaringan *neural network*. Agar alat kontrol tersebut dapat beroperasi secara *online*, masukan-masukan yang dibutuhkan adalah

- data status dari pemutus-pemutus tenaga dan isolator-isolator,
- parameter-parameter jaringan sistem tenaga listrik,
- daya aktif dari saluran transmisi tempat TCSC dipasang, dan
- daya aktif dan reaktif generator-generator sinkron.



Gbr. 5 Struktur alat kontrol adaptif berbasis *neural network*.

Skema desain alat kontrol adaptif pada Gbr. 5 akan mengidentifikasi parameter-parameter optimal PSS dan SDC secara *online*. Masukan terhadap alat kontrol adaptif tersebut adalah daya aktif dan reaktif dari generator-generator sinkron yang merepresentasikan pembebanan sistem. Masukan lainnya adalah elemen-elemen dari matriks impedans bus yang merepresentasikan konfigurasi sistem tenaga listrik. Sedangkan keluaran alat kontrol adaptif adalah parameter-parameter PSS dan SDC yang akan membuat redaman sistem menjadi optimal untuk setiap kondisi operasi dan konfigurasi sistem.

C. Prosedur Pelatihan Alat Kontrol Adaptif

Data yang digunakan dalam proses pelatihan (*training*) alat kontrol adaptif berbasis *neural network* diperoleh dengan

menerapkan metode optimisasi pada [7] pada berbagai kondisi operasi sistem termasuk kontingensi yang mungkin terjadi pada suatu sistem tenaga listrik.

Metode optimisasi pada [7] merupakan metode untuk mencari *setting* optimal parameter-parameter alat kontrol. Metode ini didasarkan pada minimisasi bagian riil *eigenvalue-eigenvalue* matriks keadaan sistem. Bagian riil dari *eigenvalue* menggambarkan tingkat redaman sistem (nilai yang lebih negatif akan menunjukkan tingkat redaman yang lebih baik).

Pada proses optimisasi tersebut, parameter-parameter alat kontrol, persamaan-persamaan *eigenvalue-eigenvector* akan menjadi kekangan kesamaan, sedangkan kekangan-kekangan ketidaksamaan mencakup batas-batas untuk parameter-parameter alat kontrol, serta batas-batas untuk bagian riil dan imajiner dari *eigenvalue -eigenvalue*.

Untuk kasus data pelatihan ke-*i*, pasangan dari vektor masukan dan keluaran adalah $\{p_i, t_i\}$. Berdasarkan struktur pada Gbr. 4, vektor masukan p_i adalah:

$$p_i^T = (p_{1i}, p_{2i}, \dots, p_{mi}); i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

dengan *N* adalah jumlah total data pelatihan.

Pada (4), vektor keluaran target t_i untuk kasus data pelatihan ke-*i* adalah vektor dari parameter-parameter alat kontrol yang bernilai optimal untuk sistem tenaga dengan kondisi operasi dan konfigurasi seperti yang dispesifikasi oleh vektor masukan p_i .

Pada proses pelatihan, yang diinginkan adalah meminimalkan perbedaan antara vektor keluaran sasaran t_i dan respons dari *neural network*. Dengan demikian, untuk *N* data pelatihan, yang akan diminimalkan adalah

$$F(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - a_i)^T (t_i - a_i) \quad (5)$$

dengan a_i adalah respons dari *neural network* yang memiliki struktur seperti pada (6).

$$a_i^T = (a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{mi}); i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

Vektor x pada (5) merupakan vektor dari koefisien-koefisien bobot dari koneksi-koneksi pada *neural network*. Vektor ini akan ditentukan nilainya dengan cara meminimalkan fungsi $F(x)$ terhadap x .

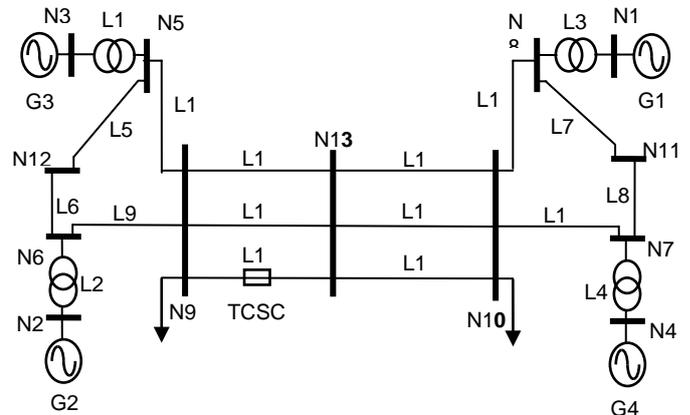
IV. HASIL DAN DISKUSI

A. Struktur Sistem Tenaga

Sistem yang digunakan untuk menguji penampilan alat kontrol adaptif berbasis *neural network* yang dibahas di bagian III adalah sistem dua-area seperti yang diperlihatkan pada Gbr. 6. Sistem dengan beban total sebesar 2734 MW ini memiliki empat generator, 13 bus, dan 18 cabang [20]. Generator-generator sinkron pada sistem dua-area tersebut direpresentasikan melalui model orde-kelima [21]. Formulasi matematis model ini dapat dilihat pada Apendiks.

Pada penyelidikan awal, untuk mengetahui penampilan (tingkat redaman) sistem tanpa PSS dan peralatan FACTS, peralatan-peralatan tersebut tidak diikutkan dalam sistem.

Perlu diperhatikan bahwa oleh karena sistem memiliki empat generator, maka mode elektromekanik akan berjumlah tiga. Tabel I memperlihatkan hasil-hasil *eigenvalue* dan faktor-faktor partisipasi untuk ketiga mode tersebut. Faktor-faktor partisipasi ini dihitung berdasarkan rumusan pada [22].



Gbr. 6 Sistem dua-area.

TABEL I
EIGENVALUE DAN FAKTOR PARTISIPASI

Gen	Mode 1 (lokal) $\lambda = -0,79 \pm j7,19$ $f = 1,14 \text{ Hz}$ $\zeta = 0,11$	Mode 2 (lokal) $\lambda = -0,77 \pm j7,32$ $f = 1,17 \text{ Hz}$ $\zeta = 0,10$	Mode 3 (inter-area) $\lambda = -0,13 \pm j4,40$ $f = 0,70 \text{ Hz}$ $\zeta = 0,03$
1	0,5600	0,0000	0,2702
2	0,0000	0,5587	0,2482
3	0,0000	0,5584	0,2486
4	0,5615	0,0000	0,2682

Pada Tabel I tersebut, λ adalah *eigenvalue*, f adalah frekuensi mode, dan ζ merupakan rasio redaman. Terlihat bahwa rasio redaman dari mode *inter-area* adalah sangat rendah, hanya 0,03, dan oleh karenanya perlu diperbaiki. Agar sistem memiliki penampilan dinamik atau kestabilan yang baik, rasio redaman dari mode-mode elektromekanik tidak boleh kurang dari 0,1 [1], [4].

Untuk memperbaiki redaman sistem, dua buah PSS (satu untuk setiap area) dipasang pada sistem. Untuk perbaikan redaman mode *inter-area*, lokasi-lokasi terbaik untuk PSS tersebut adalah pada G1 dan G3. Penentuan lokasi-lokasi PSS ini berdasarkan faktor partisipasi. Untuk lebih meningkatkan redaman osilasi, SDC kemudian dipasang pada TCSC yang terletak pada saluran transmisi L18. Perlu diperhatikan bahwa TCSC tersebut sengaja dipasang dengan tujuan utama untuk mengendalikan aliran daya dan kompensasi seri pada saluran transmisi panjang (*tie-line*) pada sistem. TCSC tersebut kemudian dilengkapi dengan SDC agar juga dapat digunakan untuk meningkatkan redaman dari mode-mode elektromekanik.

Perlu juga diperhatikan bahwa seluruh mode elektromekanik pada sistem dua-area tersebut akan diikutkan dalam perancangan alat kontrol adaptif berbasis *neural network*. Hal ini akan dibahas pada bagian selanjutnya.

B. Desain Alat Kontrol Berbasis Neural Network

Sifat adaptif alat kontrol berbasis *neural network* diperoleh dengan cara melatih *neural network* tersebut melalui serangkaian kontingensi (kondisi operasi dan konfigurasi) yang mungkin terjadi pada suatu sistem tenaga listrik. Kontingensi-kontingensi yang mungkin untuk sistem pada Gbr. 6 diperlihatkan pada Tabel II dan Tabel III. Data dari pasangan-pasangan masukan dan keluaran untuk melatih *neural network* diperoleh dari kontingensi-kontingensi ini.

TABEL II
KASUS-KASUS SALURAN LEPAS

No	Saluran Lepas	No	Saluran Lepas
1.1	L5	1.8	L12
1.2	L6	1.9	L13
1.3	L7	1.10	L14
1.4	L8	1.11	L15
1.5	L9	1.12	L16
1.6	L10	1.13	L17
1.7	L11		

TABEL III
VARIASI-VARIASI BEBAN

No	Besar Beban	No	Besar Beban
2.1	105% × <i>baseload</i>	2.6	130% × <i>baseload</i>
2.2	110% × <i>baseload</i>	2.7	135% × <i>baseload</i>
2.3	115% × <i>baseload</i>	2.8	140% × <i>baseload</i>
2.4	120% × <i>baseload</i>	2.9	145% × <i>baseload</i>
2.5	125% × <i>baseload</i>	2.10	150% × <i>baseload</i>

Untuk sistem pada Gbr. 6, masukan *neural network* akan berjumlah 28. Jumlah ini ditentukan berdasarkan uraian pada bagian III.A. Sedangkan keluaran *neural network* akan berjumlah 18 (6 untuk setiap PSS dan 6 untuk SDC). Dengan demikian, lapisan keluaran *neural network* memerlukan 18 buah *linear neuron*, sedangkan jumlah *hidden layer* yang digunakan adalah sepuluh.

Untuk setiap kasus kontingensi, prosedur yang telah dibahas pada bagian III dan hasil-hasil dari studi aliran daya akan digunakan untuk membentuk data masukan *neural network*. Parameter-parameter optimal alat-alat kontrol untuk setiap kasus kontingensi yang ditentukan dengan metode yang diusulkan pada [7] akan dipakai sebagai data keluaran *neural network*.

C. Penampilan Dinamik Alat Kontrol

Tabel IV memperlihatkan perbandingan penampilan antara alat kontrol adaptif dan nonadaptif untuk sistem pada kondisi *basecase*. Pada kondisi ini, sistem tenaga listrik beroperasi secara normal, yaitu seluruh jaringan transmisi terhubung (tidak ada yang lepas) dan sistem menyuplai beban dasar (*baseload*).

Hasil-hasil pada Tabel IV menunjukkan bahwa dengan adanya alat kontrol, redaman dari mode-mode elektromekanik dapat ditingkatkan atau menjadi lebih baik, terlihat dari perbandingan hasil-hasil pada Tabel IV dengan Tabel I. Terlihat juga bahwa dengan pemasangan PSS dan SDC tersebut, tidak ada mode yang memiliki redaman yang buruk, yaitu yang rasionya lebih kecil dari 0,1. Hasil pada Tabel IV

juga mengkonfirmasi penampilan yang baik dari alat kontrol adaptif, yaitu rasio redaman yang dihasilkan berada pada level yang sama seperti pada alat kontrol nonadaptif. Perlu diperhatikan bahwa pada alat kontrol nonadaptif, parameter-parameter alat kontrolnya adalah tetap untuk semua kondisi sistem dan ditentukan berdasarkan kondisi *basecase*.

TABEL IV
PENAMPILAN DINAMIK ALAT KONTROL PADA KONDISI *BASECASE*

Alat Kontrol	<i>Eigenvalue</i>	Frekwensi (Hz)	Rasio Redaman
Nonadaptif	-2,0049 ± j7,5307	1,20	0,26
	-2,0072 ± j7,5307	1,20	0,26
	-0,5066 ± j4,5685	0,73	0,11
Adaptif	-2,0186 ± j7,2785	1,16	0,27
	-1,8986 ± j7,3821	1,17	0,25
	-0,5619 ± j4,4754	0,71	0,12

Tabel V memperlihatkan perbandingan penampilan pada kondisi sistem menyuplai beban sebesar 150% dari beban dasar, dan konfigurasi jaringan adalah seperti pada kondisi *basecase*. Dengan alat kontrol nonadaptif, rasio redaman turun secara drastis. Bahkan, redaman dari mode *inter-area* menjadi sangat buruk, yaitu rasionya hanya 0,04. Dengan menggunakan alat kontrol adaptif berbasis *neural network*, rasio redaman dari mode-mode elektromekanik dapat dipertahankan pada level yang mendekati seperti pada kondisi *basecase*. Tabel V memperlihatkan bahwa semua mode elektromekanik memiliki rasio redaman yang sangat baik bila alat kontrol adaptif digunakan.

Tabel VI dan Tabel VII fokus pada kontingensi ketika saluran transmisi ada yang lepas dari sistem, sedangkan beban sistem adalah seperti pada *basecase*. Terlihat bahwa lepasnya saluran L13, L14, L15, L16, atau L17 sangat mempengaruhi redaman dari mode *inter-area*. Penampilan seperti ini sesuai dengan topologi jaringan seperti pada Gbr. 6, yaitu saluran-saluran tersebut memiliki fungsi menghubungkan kedua *area*.

TABEL V
PENAMPILAN DINAMIK ALAT KONTROL PADA KONDISI BEBAN SEBESAR 150% DARI *BASELOAD*

Alat Kontrol	<i>Eigenvalue</i>	Frekuensi (Hz)	Rasio Redaman
Nonadaptif	-1,6298 ± j8,5029	1,35	0,19
	-1,6072 ± j8,6388	1,37	0,18
	-0,2135 ± j4,8552	0,77	0,04
Adaptif	-1,8560 ± j8,4441	1,34	0,21
	-2,0854 ± j7,9867	1,27	0,25
	-0,6276 ± j4,6603	0,74	0,13

TABEL VI
PENAMPILAN DINAMIK ALAT KONTROL PADA KONDISI SALURAN L13 ATAU L16 LEPAS DARI SISTEM

Alat Kontrol	<i>Eigenvalue</i>	Frekuensi (Hz)	Rasio Redaman
Nonadaptif	-1,9422 ± j7,4324	1,18	0,25
	-1,8645 ± j7,3046	1,16	0,25
	-0,3108 ± j4,5213	0,72	0,07
Adaptif	-1,5115 ± j7,0086	1,12	0,21
	-1,4538 ± j6,9597	1,11	0,20
	-0,4534 ± j4,4994	0,72	0,10

TABEL VII
PENAMPILAN DINAMIK ALAT KONTROL PADA KONDISI SALURAN L14, L15
ATAU L17 LEPAS DARI SISTEM

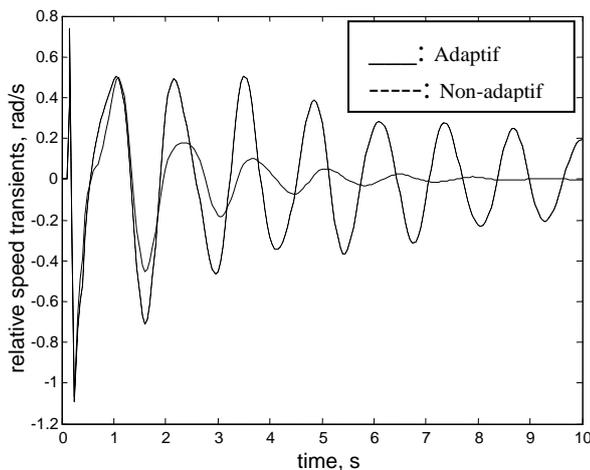
Alat Kontrol	Nilaieigen	Frekwensi (Hz)	Rasio Redaman
Nonadaptif	$-1,8232 \pm j7,3039$	1,16	0,24
	$-1,9671 \pm j7,4777$	1,19	0,25
	$-0,3481 \pm j4,2619$	0,68	0,08
Adaptif	$-1,8819 \pm j7,4884$	1,19	0,24
	$-1,9244 \pm j7,4344$	1,18	0,25
	$-0,4117 \pm j4,2950$	0,68	0,10

Penampilan yang baik dari alat kontrol adaptif untuk kasus lepasnya saluran transmisi juga terkonfirmasi dari hasil-hasil pada Tabel VI dan Tabel VII. Terlihat bahwa parameter-parameter alat kontrol yang dihasilkan dari keluaran *neural network* dapat beradaptasi terhadap konfigurasi jaringan yang baru untuk mempertahankan rasio redaman pada level seperti pada *basecase*.

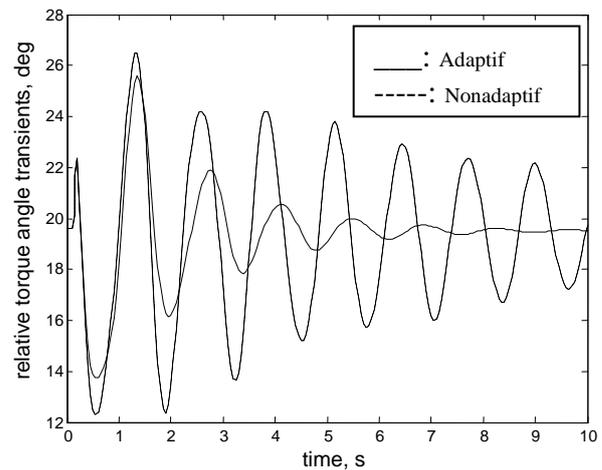
D. Simulasi Domain-Waktu

Hasil-hasil perhitungan *eigenvalue* pada bagian IV.C telah mengkonfirmasi penampilan dinamik yang baik dari alat kontrol adaptif. Untuk memvalidasi lebih lanjut penampilan alat kontrol tersebut, simulasi domain-waktu atau pengamatan mengenai transien sistem setelah terjadinya suatu gangguan juga akan diselidiki. Simulasi domain-waktu ini dilakukan pada kondisi semua saluran transmisi terhubung (tidak ada yang lepas) dan sistem memikul beban sebesar 150% dari *baseload*. Gangguan yang digunakan untuk menginisiasi transien adalah gangguan tiga-fase pada saluran L5 di dekat bus N12. Gangguan tersebut terjadi pada $t = 0,1s$ dan berlangsung selama 0,1s, atau waktu pemutusan gangguan adalah 0,1s.

Konfirmasi lebih lanjut dari peningkatan penampilan dinamik sistem dapat dilihat dengan membandingkan respons-respons domain-waktu seperti yang diperlihatkan pada Gbr. 7 dan Gbr. 8. Respons pada Gbr. 7 dan Gbr. 8 memperlihatkan bahwa tanpa alat kontrol adaptif, osilasi sistem sangat kurang teredam dan memerlukan waktu yang cukup lama untuk mencapai kondisi stabil, terlihat dari garis putus-putus pada Gbr. 7 dan Gbr. 8.



Gbr. 7 Transien kecepatan relatif generator G1 dan G3.



Gbr. 8 Transien sudut torsi relatif generator G1 dan G3.

Dengan aplikasi alat kontrol adaptif, terlihat bahwa osilasi sistem akan diredam secara lebih cepat. Sistem dapat mencapai kondisi *steady-state* hanya dalam waktu 6 – 7 detik setelah terjadinya gangguan, terlihat dari garis solid pada Gbr. 7 dan Gbr. 8.

V. KESIMPULAN

Pada makalah ini, telah dibahas desain alat kontrol adaptif untuk koordinasi antara PSS dan SDC dari TCSC. Desain tersebut didasarkan pada penggunaan *neural network* yang mengatur parameter-parameter alat kontrol sehingga redaman sistem akan selalu optimal walaupun kondisi operasi atau konfigurasi sistem berubah-ubah.

Alat kontrol adaptif yang berbasis *neural network* tersebut telah diuji untuk memverifikasi penampilan dinamikanya, dengan analisis nilaieigen dan simulasi domain-waktu telah digunakan pada proses pengujian dan verifikasi tersebut. Studi-studi perbandingan juga telah dilakukan untuk melihat penampilan alat kontrol adaptif jika dibandingkan dengan alat kontrol nonadaptif.

Hasil-hasil dari investigasi tersebut memperlihatkan bahwa memburuknya redaman sistem akibat penggunaan alat kontrol nonadaptif dapat dicegah, dan dengan aplikasi alat kontrol adaptif tersebut, karakteristik redaman sistem yang baik akan selalu dapat diperoleh.

APENDIKS

Pada makalah ini, generator sinkron direpresentasikan melalui model orde-kelima sebagai berikut.

$$\dot{\Psi}_r = A_m \Psi_r + F_m I_S + V_r \tag{7}$$

$$\omega_r = (P_m - P_e) / M \tag{8}$$

$$\dot{\delta}_r = \omega_r - \omega_R \tag{9}$$

dengan Ψ_r , ω_r , dan δ_r berturut-turut adalah vektor dari fluks lingkup, frekuensi *angular* dan sudut rotor; $V_r = [E_{fd} \ 0 \ 0]^T$ adalah vektor dari tegangan rotor; P_m dan

P_e berturut-turut adalah daya-daya mekanik dan listrik. M dihitung melalui $M = 2H / \omega_R$ (H adalah konstanta inersia dan ω_R adalah kecepatan sinkron mesin); A_m dan F_m adalah matriks yang nilainya tergantung pada parameter-parameter mesin; I_s adalah vektor dari arus stator; dan E_{fd} adalah tegangan medan.

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] Sasongko, P.H., "Implementasi Algoritma PSO untuk Perancangan dan Koordinasi Peredam Osilasi di Sistem Tenaga Listrik dengan UPFC", *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, 2013, 2, (2), pp.59-65.
- [9] Sasongko, P.H., Wijaya, Y.A., and Rahmad, S.L., "Fungsi Peredaman UPFC pada Sistem Tenaga Listrik Mesin Tunggal Bus Tak Berhingga", *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, 2012, 1, (2), pp.59-65.
- [10] Nguyen, T.T., and Gianto, R., "Neural Networks for Adaptive Control Coordination of PSSs and FACTS Devices in Multimachine Power System", *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2008, 2, (3), pp. 355-372
- [11] Eslami, M., Shareef, H., and Mohamed, A., "Coordinated design of PSS and TCSC controller for power system stability improvement", *IPEC 2010 Conference Proceedings*, October 2010, pp. 433-438.
- [12] 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.
- [13] Sayyadnia, M.H., Sedighzadeh, M., and Panahi, A., "Coordination Design PSS and TCSC Controller for Power System Stability Improvement Using CLA-PSO Algorithm", *World Applied Sciences Journal*, 2012, 20, (12), pp.1656-1665.
- [14] H.T. Hassan, U.F. Malik, I.A. Khan and T. Khalid, "Stability improvement of power system using TCSC", *International Journal of Engineering and Computer Science IJECS-IJENS*, 2013, 13, (2), pp. 30-34.
- [15] Jalilzadeh, S., Darabian, M., and Azari, M., "Power System Stability Improvement via TCSC Controller Employing a Multi-Objective Strength Pareto Evolutionary Algorithm Approach", *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, 2013, 1, (1), pp.33-42.
- [16] Pooja, R., "Enhancement of power system stability using TCSC", *International Journal of Innovations in Engineering and Technology*, 2015, 5, (3), pp. 38-42.
- [17] S. Manoj and Puttaswamy P.S., "Importance of FACTS controllers in power systems", *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 2011, 2, (3), pp. 207-212.
- [18] Mithulananthan, N., Canizares, C.A., Reeve, J., and Rogers G.J., "Comparison of PSS, SVC, and STATCOM controllers for damping power system oscillations", *IEEE Trans. Power System*, 2003, 16, (2), pp. 786-792.
- [19] CIGRE TF 38.01.08, "Modeling of power electronics equipment (FACTS) in load flow and stability programs: a representation guide for power system planning and analysis", 1999.
- [20] Padiyar, K.R., *Power System Dynamics Stability and Control*, 1996, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, Singapore.
- [21] Humpage, W.D., Bayne, J.P., and Durrani, K.E., "Multinode-power system dynamic analysis", *Proc. IEE*, 1972, 119, (8), pp.1167-1175.
- [22] Pagola, F.L., Perez-Arriaga, I.J., and Verghese, G.C., "On sensitivities, residues and participations: applications to oscillatory stability analysis and control", *IEEE Trans. Power Systems*, 1989, 4, (1), pp. 278-285.