

OPTIMISASI ALOKASI KAPASITOR PADA JARING TENAGA LISTRIK MENGGUNAKAN ARTIFICIAL IMUN SISTEM DENGAN METODE *NEGATIVE SELECTION*

Edy Ervianto^{1,2*}, Agus Dharma^{1,3}, Imam Robandi¹

FT I-Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Noverber, Surabaya, Indonesia^{1*}

Email : edyervianto@yahoo.com

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Riau, Riau, Indonesia²

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Udayana, Denpasar, Indonesia³

Abstrak

Rugi-rugi daya reaktif pada jaring tenaga listrik dapat dikompensasi dengan keberadaan kapasitor. Dengan kapasitor besar tegangan pada saluran dapat terjaga dalam batas toleransi standar. Bila jaring tenaga listrik semakin luas, maka permasalahan yang muncul adalah bagaimana cara pengaturan lokasi dan ukuran kapasitor yang tepat agar diperoleh rugi-rugi daya minimum. Pada penelitian ini diusulkan pemecahan solusi dengan melakukan optimisasi menggunakan sebuah algoritma Artificial Immune System (AIS) *negative selection*. Metode ini dikenal mampu secara efektif melakukan pendeteksian sistem secara akurat serta melalui set affinity pada formulasi algoritma yang tepat ternyata dapat memberikan solusi penyelesaian optimal. Hasil pengujian yang telah dilakukan, ternyata optimisasi menggunakan metode AIS *negative selection* mampu merekomendasikan pengurangan rugi-rugi daya sistem sebesar 8,85 MVA atau 5,81 % dari total pembebanan, dengan besar tegangan saluran pada kisaran 0,9927 pu sampai 1,0031 pu setelah terpasang kapasitor sebesar 1200,43 MVAR.

Kata Kunci : Lokasi penempatan kapasitor, Ukuran kapasitor, *Artificial Immune System 'Negative Selection'*, Jaring sistem tenaga listrik.

Abstract

The existence of capacitor installed on power system could reduced reactive power losses moreover the lines voltage magnitude could stable around at level tolerance. However, for large power system, the problem is how to optimize its size and placing as if the system enables to send power by minimal losses. This paper presents an optimization method by using Artificial Immune System - Negative Selection Algorithm method (AIS-NSA) in order to achieve their goals in sizing and placement of capacitor in the electrical system. This method has known capable for system detection effectively and determination of formulation algorithm correctly then finally will have optimal solution completely. Simulation results from the system, AIS-NSA method is recommended for the reduction of power losses as 8.85 MVA or 5.81% from total load, and voltage magnitude stable around 0.9927 p.u. to 1.0031 p.u. after total 1200.43 MVAR of capacitor are installed.

Key Words : Capacitors allocation, Size of Capacitors, The Artificial Immune System 'Negative Selection', Power System Network.

1. Pendahuluan

Daya reaktif merupakan salah satu faktor yang merugikan pada jaring tenaga listrik karena apabila besarnya melebihi daya dukung sistem dapat mengakibatkan penurunan tegangan pada saluran daya. Daya reaktif juga akan berpengaruh pada kapasitas pembebanan total sistem. Semakin besar daya reaktif maka secara tidak langsung akan memperkecil kapasitas pembebanan daya aktif, dan merugikan pihak produsen listrik karena harus senantiasa memperbesar kapasitas daya pembangkit untuk melayani beban yang sama. Daya reaktif secara umum bersifat induktif dan untuk mereduksinya dibutuhkan kompensator yang bersifat kapasitif, salah satunya adalah kapasitor.

Kapasitor dapat dipasang pada sisi pembebanan atau disisi penyaluran daya.

Pada sisi penyaluran daya, pihak produsen listrik dapat memasang kapasitor pada bus-bus jaring tenaga listrik. Untuk jaring tenaga listrik cakupan kecil mungkin hampir tidak ada masalah berarti, namun untuk jaring tenaga listrik cakupan luas dengan banyak bus maka permasalahan yang muncul akan semakin nyata karena harus memperhitungkan dimana kapasitor harus dipasang dan berapa ukuran kapasitor yang harus digunakan agar dapat mencapai tujuan optimal.

Ada beberapa teknik optimisasi untuk mencapai tujuan optimal dalam penempatan kapasitor. Salah satu diantaranya adalah *Artificial Immune System - Negative Selection* (AIS-NS), dan telah

dikenal luas mampu mendeteksi sistem secara cepat dan akurat. Dengan formulasi yang tepat ternyata mampu memberikan rekomendasi solusi terbaik untuk memperbaiki kinerja sistem.

Dari penelitian yang telah dilakukan, ada beberapa teknik optimisasi yang pernah dicobakan dalam masalah penempatan kapasitor, diantaranya :

1. Metode Analisis, yaitu bentuk perumusan untuk menyelesaikan permasalahan peletakan kapasitor pada saluran banyak cabang [1].
2. Metode *Dynamic Programming*, adalah metode yang telah diaplikasikan untuk mengatasi ukuran kapasitor yang terpisah [2,3].
3. Metode *Gradient Search Based Iterative*, merupakan penyelesaian optimisasi masalah kapasitor tetap dan *Switched Capacitor* [4].
4. Metode *Artificial Neural Network*, merupakan metode optimisasi yang berbasis kecerdasan buatan. Melalui disain, topologi dan peningkatan algoritma pembelajaran maka pengukuran pada suatu line yang mencakup aliran daya aktif, daya reaktif, magnitude tegangan dan pengaturan kapasitor pada bus-bus tertentu dikumpulkan untuk data pembelajaran. Setelah jaring terlatih barulah nilai kapasitor ditentukan sesuai dengan skenario yang diinginkan [5-8].
5. Metode *Simulated Annealing*, dalam pengujian-nya memiliki prestasi yang dapat diandalkan untuk mencapai optimisasi. Tetapi proses komputasi masih memerlukan waktu yang lama [9].
6. Metode *Fuzzy Logic*, dengan keanggotaan fungsi rugi daya dan ambang batas tegangan diekspresikan dalam notasi-notasi himpunan *fuzzy* dan teknik *fuzzy* digunakan sebagai media penghitungannya [10].
7. Metode Algoritma Genetika (GA), Pada metode ini, proses seleksi alam dapat mengantisipasi peningkatan penjadwalan peletakan kapasitor dengan solusi optimal [11-12].
8. Metode *Artificial Immune System-Clonal Selection* (AIS-CS). Metode AIS-CS walaupun tergolong masih baru tetapi telah pula dicobakan dalam pengoptimasian peletakan kapasitor pada jaring sistem Jawa-Bali [13].

Sejumlah penelitian yang pernah dilakukan di Indonesia menggunakan AIS-NS dipelopori oleh Imam Robandi dan dilanjutkan oleh para peneliti lain. Beberapa penelitian berbicara tentang pengenalan dan klasifikasi gangguan pada sistem tenaga listrik serta pendeteksiannya [14-16].

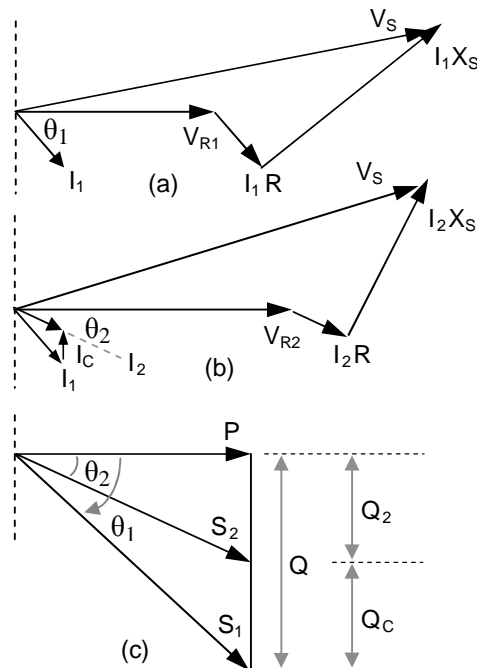
Pada penelitian ini direferensi beberapa tulisan dan paper tentang proses optimisasi menggunakan metode AIS [17], dan GA [18], serta masalah kelistrikkannya dalam jaring tenaga listrik [19].

2. Kompensasi Daya Reaktif

Pada sistem tenaga listrik ideal, tegangan dan frekuensi pada setiap bus penyaluran harus diupayakan konstan dengan faktor daya adalah satu. Dari sisi penyaluran daya perubahan tegangan dan frekuensi lebih banyak dipengaruhi oleh dinamika dan ragam beban yang berlangsung dari waktu ke waktu di sisi pembebanan. Perubahan tegangan disini umumnya adalah *tegangan kurang* karena sebagian besar beban-beban konsumen bersifat

induktif. Untuk menjaga agar tegangan berada pada batasan konstan maka diperlukan kompensator daya reaktif-kapasitif, yaitu kapasitor. Kapasitor harus dipasang pada bus-bus sepanjang saluran transmisi atau distribusi pada titik-titik yang dianggap optimal. Selanjutnya kapasitor akan menginjeksikan daya reaktif untuk memperbaiki faktor daya sistem, sehingga jatuh tegangan dapat diatasi dalam batas daya dukung sistem.

Gambar. 1, merupakan diagram fasor yang menggambarkan kondisi sistem tenaga listrik sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor. Dari Persamaan (2.1) dan (2.2) terlihat bahwa dengan tegangan kirim yang sama maka akan diperoleh tegangan terima yang lebih besar ketika sistem ditambahkan kapasitor, dan kekurangan daya reaktif sedapat mungkin harus dikompensasi oleh kapasitor untuk memperoleh faktor daya sistem sama dengan (atau mendekati) satu.



Gambar 1. Diagram fasor kondisi jaringan sistem tenaga listrik sebelum dan sesudah penambahan kapasitor paralel.
(a). Sebelum penambahan
(b). Sesudah penambahan
(c). Komposisi Segitiga Daya

Dari Gambar 1. diatas, diperoleh rumusan sebagai berikut :

$$V_{R1} = V_S - (I_R R + jI_L X_S) \quad (2.1)$$

$$V_{R2} = V_S - (I_R R + jI_L X_S - jI_C X_S) \quad (2.2)$$

$$\Delta V_R = V_{R2} - V_{R1}$$

$$\Delta V_R = V_S - (I_R R + jI_L X_S - jI_C X_S) - [V_S - (I_R R + jI_L X_S)] \quad (2.3)$$

$$\Delta V_R = jI_C X_S \quad (2.4)$$

$$S_1 = P + jQ_1 \quad (2.5)$$

$$S_2 = P + j(Q_1 - Q_C) \quad (2.6)$$

$$\Delta S = S_1 - S_2 = jQ_C \quad (2.7)$$

Keterangan untuk Gambar 1 dan persamaannya :

- I_R = Komponen Arus Resistif (Amper)
- I_L = Komponen Arus Induktif (Amper)
- I_C = Komponen Arus Kapasitif (Amper)
- V_S = Tegangan Pengiriman (Volt)
- V_{R1} = Tegangan terima tanpa kapasitor (Volt)
- V_{R2} = Tegangan terima dengan kapasitor (Volt)
- ΔV_R = Kenaikan tegangan terima (Volt)
- R = Resistansi Jaring (Ohm)
- X_S = Reaktansi Jaring (Ohm)
- P = Daya aktif sistem (Watt)
- S_1 = Total daya tanpa kapasitor (Volt Amper)
- S_2 = Total daya dengan kapasitor (Volt Amper)
- Q_1 = Rugi daya reaktif tanpa kapasitor (VAr)
- Q_2 = Rugi daya reaktif dengan kapasitor (Var)
- Q_C = Daya reaktif kompensasi kapasitor (Var)

Persamaan (2.3) memperlihatkan besar tegangan kompensasi setelah ada penambahan kapasitor paralel. Sedangkan Persamaan (2.6) menunjukkan besar rugi-rugi daya yang berhasil dikompensasi oleh sistem setelah ditambahkan kapasitor paralel.

3. Prinsip Kekebalan Tubuh Berbasis Negative Selection

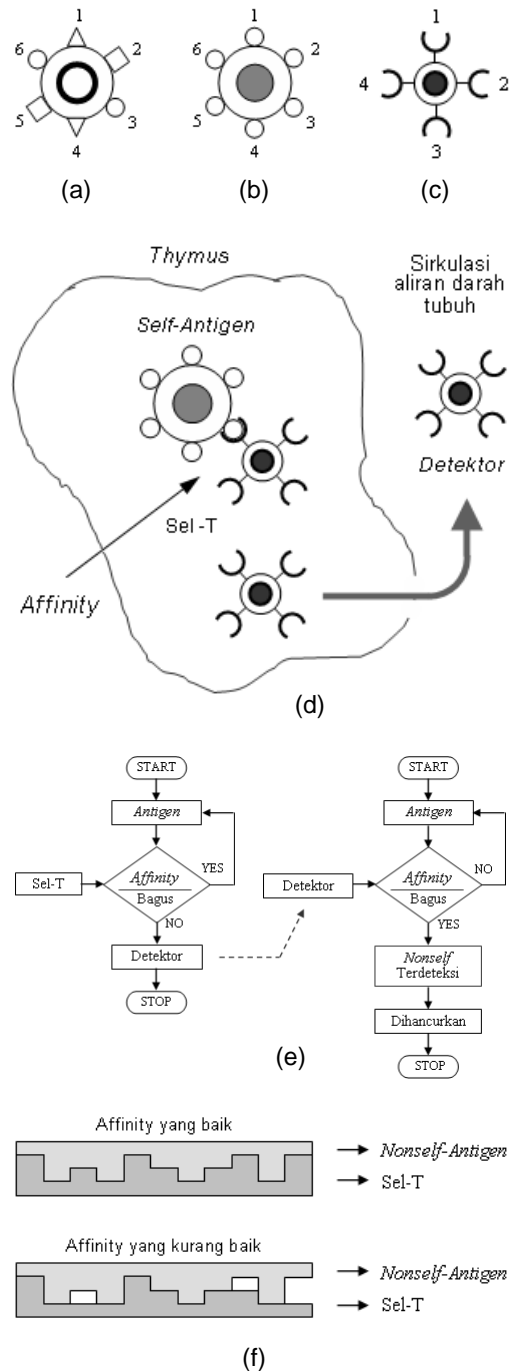
Dalam sistem kekebalan tubuh, keberadaan setiap sel dalam tubuh (*antigen*) senantiasa teridentifikasi. Sel asing penyebab gangguan disebut dengan *nonself-antigen*, sedangkan sel anggota tubuh disebut dengan *self-antigen*. Pada permukaan *antigen* (*self-antigen* atau *nonself-antigen*) terdapat satu atau lebih molekul pengenal dengan bentuk spesifik, disebut dengan *epitopes*. Molekul-molekul *epitopes* adalah ciri dari suatu *antigen*, dan inilah yang dideteksi oleh sistem kekebalan tubuh untuk membedakan antara *self-antigen* dan *nonself-antigen* (lihat Gambar. 2.a dan b).

Bagian dari sistem kekebalan tubuh yang bertanggung jawab terhadap identifikasi *antigen* dan membunuh *nonself-antigen* yang merugikan adalah limfosit. Untuk itu limfosit akan menghasilkan sel-T yang didesain hanya dapat mengenal *self-antigen* (lihat Gambar. 2.c).

Seiring berjalannya waktu, sel-T senantiasa melakukan pemantauan secara kontinyu terhadap keberadaan sel-sel dalam tubuh. Apabila ditemukan sel asing yang profilnya tidak sama dengan dengan *self-antigen* (berarti *nonself-antigen* termonitor) maka sel-T akan menjadikannya sebagai *detektor*, dan selanjutnya dikirim ke aliran darah untuk memburu *nonself-antigen* serupa yang telah dan akan masuk ke tubuh. Peristiwa ini disebut sebagai *negative selection* (lihat Gambar. 2.d).

Tingkat keberhasilan sel-T dalam membedakan bentuk antara *self-antigen* dan *nonself-antigen* terletak pada kecocokan 'saling berkomplemen' antara pola reseptor sel-T dengan *epitopes* dari *nonself-antigen*, dan direpresentasikan sebagai ukuran *affinity* (lihat Gambar. 2.f).

Melalui proses *negative selection* dengan formula *affinity* yang tepat maka tubuh dapat dipastikan kebal terhadap penyakit. Gambar. 2.e menunjukkan flowchart proses *negative selection* secara lengkap.



Gambar 2. Sistem kekebalan tubuh yang berbasis *negative selection*.
 (a). Antigen tipe *Nonself-Antigen*
 (b). Antigen tipe *Self-Antigen*
 (c). Sel-T yang dihasilkan limfosit
 (d). Proses *negative selection*
 (e). Flowchart *negative selection*
 (f). Gambaran tentang *affinity*

4. Identifikasi Permasalahan Sistem serta Solusi Pemecahannya

Untuk mengoptimisasi jaring sistem tenaga listrik seperti yang dimaksud dalam penelitian ini maka seluruh parameter terkait yang ada pada sistem harus terlebih dahulu direpresentasikan menjadi parameter-parameter sistem kekebalan tubuh. Selanjutnya dilakukan peniruan pada setiap langkah-langkah proses yang terjadi pada sistem kekebalan tubuh melalui algoritma pemograman sesuai dengan Tabel 1.

Tabel 1: Representasi permasalahan dan penyelesaian optimisasi pada jaring sistem tenaga listrik menurut konsep sistem kekebalan tubuh

SISTEM KEKE-BALAN TUBUH	SISTEM JARING TENAGA LISTRIK 500 kV / 19 BUS JAWA-BALI
<i>Antigen</i>	Besar tegangan masing-masing bus pada kondisi normal maupun kondisi abnormal
<i>Self-Antigen</i>	Besar tegangan masing-masing bus pada kondisi normal
<i>Nonsel-Antigen</i>	Besar tegangan masing-masing bus pada kondisi abnormal
Sel-T	Formulasi Tegangan Normal : $0,95 \text{ pu} \leq V_{\text{bus}} \leq 1,05 \text{ pu}$
<i>Detektor</i>	Formulasi Tegangan Abnormal : $V_{\text{bus}} < 0,95 \text{ pu}$ atau $V_{\text{bus}} > 1,05 \text{ pu}$
<i>Affinity</i>	Fungsi Objektif / batasan : Min $F = P_{\text{loss}}$ $P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij})$

Untuk jaring tenaga listrik multi-bus dengan banyak pembangkit dan saluran loop yang saling interkoneksi, dinamika pembebanan dari setiap bus akan saling mempengaruhi. Kondisi ini akan memaksa sistem untuk mencapai kesetimbangan sendiri. Oleh karenanya langkah pengoptimisasian haruslah beorientasi sistem, dengan identifikasi permasalahan dan pemulihan sebagai berikut :

Indikator masalah : $V_{\text{bus}} > 1,05 \text{ pu}$ atau
 $V_{\text{bus}} < 0,95 \text{ pu}$

Cara pemulihan : Injeksi kapasitor pada bus tertentu yang dianggap optimal [bila ada $V_{\text{bus}} < 0,95 \text{ pu}$]
Lepas kapasitor pada bus [bila ada $V_{\text{bus}} > 1,05 \text{ pu}$]

Untuk mencapai target optimisasi optimal pada sistem maka penginjeksian atau pelepasan kapasitor dilakukan pada bus-bus tertentu dengan berpedoman kepada fungsi objektif / batasan sedemikian rupa sehingga konfigurasi, ukuran, dan jumlah yang tepat berada pada kondisi rugi-rugi daya yang minimum sesuai daya dukung sistem.

5. Pelaksanaan Optimisasi Sistem

Pada penelitian ini dibutuhkan sejumlah data input sebagai sampel pengujian maka data sistem kelistrikan yang digunakan sebagai objek pengujian adalah data jaring sistem tenaga listrik 500 kV/19 bus Sistem Jawa-Bali (PJB tahun 2002).

5.1. Analisis Aliran Daya Sistem

Pada penelitian ini, analisis aliran daya digunakan untuk melihat performa sistem pada saat kondisi awal (sebelum sistem dioptimisasi), saat proses optimisasi berjalan (tahap pengujian para-meter), dan setelah optimisasi dilakukan. Metode yang digunakan adalah metode *Gauss Seidel*.

Pada penggunaan metode *Gauss Seidel*, ketika tegangan yang dikoreksi ditemukan pada suatu bus maka tegangan ini digunakan untuk menghitung perbaikan tegangan pada bus berikutnya. Proses ini dilakukan berulang-ulang pada setiap bus secara berurutan sampai seluruh bus (kecuali bus-bus swing) terhitung untuk menyelesaikan iterasi yang pertama, dan demikian seterusnya.

5.2. Pembentukan dan Normalisasi Data

Seluruh data yang diproses untuk pengujian seperti tegangan normal, tegangan abnormal, dan yang lainnya adalah berbentuk pola matriks agar proses iterasi pada *negative selection* dapat berjalan dengan selektif dan akurat. Selanjutnya data-data tadi dinormalisasi kembali menjadi data integer bulat positif untuk memudahkan dalam perhitungan. Prosedur dalam pembentukan pola data dan normalisasinya adalah sebagai berikut :

1. Buat ketentuan panjang data (L).
2. Untuk setiap pola data yang terbentuk, tentukan Max (data) dan Min (data).
3. Untuk setiap nput (sel) pola, hitung selisih data
 $Val = Input - Min (data)$
4. Untuk setiap pola hitung nilai pembagi
 $FbinSize = [Max (data) - Min (data)] / L$
5. Untuk setiap input (sel) pola, hitunglah
 $Input^* = Ceil [Val / FbinSize]$

Untuk kelima langkah diatas maka pada setiap input (sel) pola akan berlaku :

$$Input^* = Ceil \left[\frac{Input - Min (data)}{\frac{Max (data) - Min (data)}{L}} \right]$$

5.3. Perhitungan Affinity

Affinity akan merepresentasikan tingkatan kualitas atau ketelitian dari suatu pengoptimisasian sistem. Tingkatan kualitas atau ketelitian ini akan berhubungan dengan besaran toleransi ataupun cakupan range data yang akan dideteksi. Selain itu *affinity* juga dapat diartikan sebagai ukuran tingkat kedekatan dari objek tinjauan terhadap patokan standar yang telah ditentukan.

Pada penelitian ini nilai yang telah dibentuk menjadi nilai *affinity* adalah variabel fungsi objektif yaitu batasan rugi-rugi daya sistem, yaitu rugi daya yang paling minimum. Selanjutnya untuk membandingkan tingkat kedekatan fungsi objektif dengan rugi-rugi daya yang terjadi selama dalam

proses optimisasi digunakan cara *partial matching* karena dianggap lebih tepat dan sederhana, serta membutuhkan waktu proses yang singkat.

Menurut cara *partial matching*, maka deretan dua pola X dan Y akan dianggap sama / ekuivalen [*Match* (X,Y)] apabila elemen-elemen X dan Y yang bersesuaian adalah sama secara berurutan sepanjang R. Sebagai contoh, misalkan :

Pola X = 9 4 4 10 1 9 4 4 10 1
 Pola Y = 9 4 4 10 1 10 3 2 10 9

Bila $R \geq 6$ maka *Match* (X,Y) akan bernilai *false*, namun bila $R \leq 5$ maka *Match* (X,Y) bernilai *true*. Pada contoh ini yang diperlukan adalah kedekatan nilai secara bit, bukan ketepatan secara eksak.

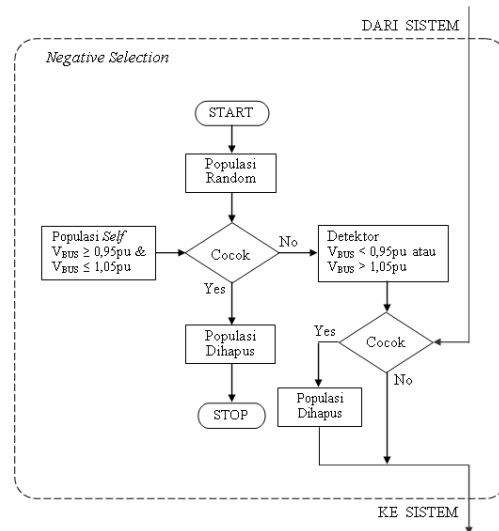
5.4. Mekanisma Negative Selection Serta Finalisasi Optimisasi Sistem

Proses *negative selection* merupakan proses terpenting dalam pelaksanaan pengoptimisasian pada penelitian ini. Proses tersebut terdiri dari dua bagian, yaitu mekanisme penyeleksian untuk pembentukan *detektor* kompeten bagi sistem dan mekanisme pendeteksian yang bertujuan untuk menemukan anggota parameter sistem abnormal. Sesuai dengan prinsip kekebalan tubuh maka untuk mendeteksi sistem apakah dalam keadaan abnormal maka dibutuhkan *detektor* yang kompeten. Pembentukan *detektor* dilakukan dengan cara membandingkan setiap tegangan yang dibuat secara acak (*antigen*) dengan formulasi tegangan normal yang dimiliki sistem (*sel-T*). Bila ternyata hasilnya tidak sama maka *antigen* tadi dapat diterima menjadi sebuah *detektor* untuk sistem (lihat Gambar. 3).

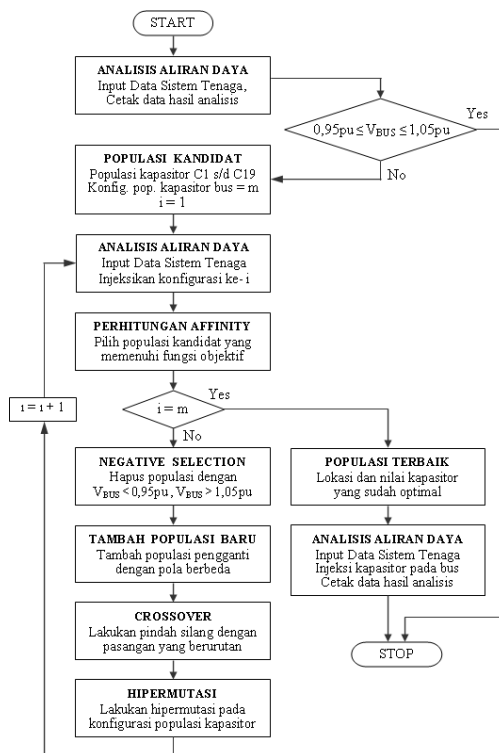
Proses pendeteksian sistem bertujuan untuk menemukan tegangan bus yang abnormal (lebih kecil dari 0,95 pu atau lebih besar dari 1,05 pu) dengan cara membandingkan setiap tegangan bus dengan *detektor-detektor* yang telah terbentuk sebelumnya. Bila tegangan bus sama dengan profil *detektor* berarti tegangan abnormal telah terdeteksi dan akan dihapus dari sistem, tetapi bila tidak maka tegangan tersebut akan diteruskan ke proses sistem selanjutnya (lihat Gambar. 3). Untuk mencapai kesempurnaan dalam penyelesaian akhir maka mekanisme optimisasi yang diterapkan juga melibatkan proses *crossover* (pindah silang) dan hipermutasi (mutasi paksa) seperti pada konsep algoritma genetika. Pada penelitian ini proses *crossover* dan hipermutasi adalah satu paket proses untuk “menghasilkan dan memilih” kombinasi atau variasi-variasi nilai kapasitor yang akan dioptimisasi. Proses hipermutasi juga digunakan untuk memilih kombinasi atau variasi kapasitor-kapasitor yang hanya memiliki nilai *affinity* (tingkat kedekatan) tinggi sesuai kriteria. Kedua proses tadi dilakukan setelah proses *negative selection* selesai, dan akan berjalan berulang-ulang secara *sistemik* sampai seluruh bus-bus daya tersimulasi dengan konfigurasi kapasitor yang bervariasi. Secara keseluruhan alur proses optimisasi sistem dapat dilihat pada flowchart Gambar. 4.

Dari Gambar. 4, dapat dilihat bahwa analisis aliran daya dan perhitungan *affinity* dilakukan secara

berulang-ulang sebanyak iterasi kombinasi kapasitor yang mungkin dilakukan, dengan tujuan untuk mendapatkan hasil akhir yang optimal.



Gambar 3. Sub proses *negative selection* dalam pelaksanaan rutin optimisasi sistem



Gambar 4. Alur proses lengkap dari optimisasi sistem secara keseluruhan

6. Hasil Simulasi

Berikut adalah beberapa data hasil dari cuplikan perhitungan aliran daya pada sistem tenaga listrik 500 kV / 19 bus Jawa - Bali pada kondisi sebelum dan sesudah dilakukan optimisasi (sebelum dan sesudah ditambahkan kapasitor bank). Pengujian dilakukan melalui program aplikasi yang dibuat dengan piranti lunak *Matlab 7.0*.

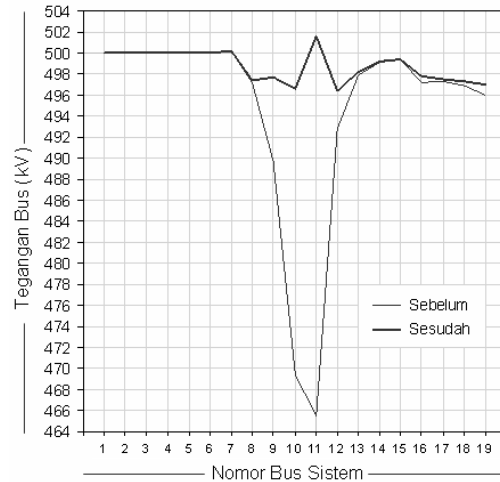
Dari Gambar. 5 dan Tabel 2 dapat dilihat bahwa setelah penambahan atau pelepasan kapasitor maka terjadi perbaikan tegangan dari bus 8 s/d 19 sehingga rentang tegangan secara keseluruhan menjadi 0,9927 pu s/d 1,0031 pu. Kemudian dari Gambar. 6-7, dan Tabel 3, ada 15 saluran yang mengalami penurunan rugi daya sebesar 8,85 MVA (5,81% dari total pembebanan).

Tabel 2: Kondisi tegangan bus sebelum dan sesudah dioptimisasi (ditambah bank kapasitor)

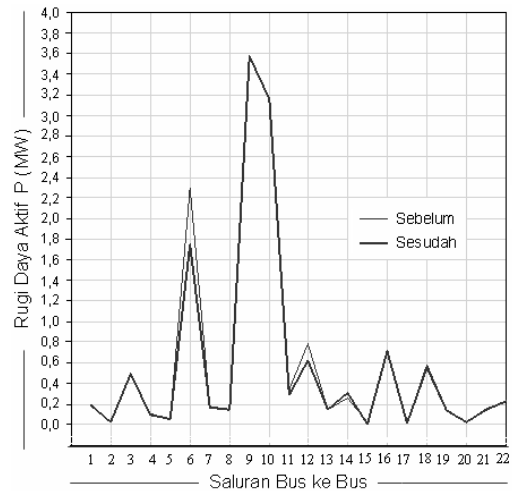
No Bus	Sebelum			Sesudah		
	V (volt)	Sudut	C	V (volt)	Sudut	C (MVar)
1	500,00	0,00	0,00	500,00	0,00	0,00
2	500,00	0,53	0,00	500,00	0,53	0,00
3	500,00	0,04	0,00	500,00	0,04	0,00
4	500,00	0,20	0,00	500,00	0,20	0,00
5	500,00	5,06	0,00	500,00	5,06	0,00
6	500,00	2,72	0,00	500,00	2,72	0,00
7	500,25	0,44	0,00	500,22	0,44	-4,75
8	497,17	0,53	0,00	497,39	0,53	54,63
9	489,72	-1,69	0,00	497,72	-1,76	198,16
10	469,38	-1,07	0,00	496,58	-1,15	224,15
11	465,48	-2,52	0,00	501,57	-2,63	280,00
12	492,84	-0,87	0,00	496,35	-0,90	138,11
13	497,94	-0,13	0,00	498,22	-0,13	39,65
14	499,13	-0,20	0,00	499,18	-0,20	16,85
15	499,40	-0,18	0,00	499,44	-0,18	11,51
16	497,25	-0,75	0,00	497,76	-0,75	53,04
17	497,34	-0,21	0,00	497,53	-0,22	51,33
18	496,86	-0,38	0,00	497,34	-0,39	60,52
19	496,00	-0,76	0,00	497,00	-0,77	77,21

Tabel 3: Kondisi rugi daya saluran sebelum dan sesudah dioptimisasi (ditambah bank kapasitor)

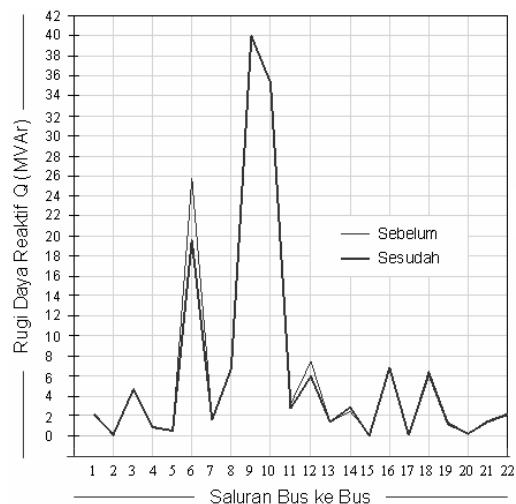
No Sal	Line Bus - Bus	Sebelum		Sesudah	
		P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1 - 14	0,20	2,21	0,19	2,16
2	1 - 15	0,02	0,18	0,02	0,17
3	2 - 13	0,50	4,74	0,49	4,65
4	3 - 13	0,10	1,00	0,09	0,84
5	3 - 4	0,05	0,53	0,05	0,53
6	4 - 12	2,30	5,72	1,75	19,62
7	4 - 17	0,18	1,72	0,17	1,65
8	5 - 9	0,15	6,68	0,15	6,73
9	5 - 6	3,57	39,98	3,57	39,98
10	6 - 8	3,16	5,36	3,16	35,35
11	7 - 8	0,34	3,24	0,29	2,75
12	8 - 10	0,78	7,45	0,62	5,93
13	9 - 10	0,15	1,43	0,15	1,39
14	10 - 11	0,26	2,47	0,31	2,94
15	10 - 12	0,02	0,23	0,00	0,05
16	11 - 12	0,71	6,82	0,71	6,86
17	14 - 17	0,01	0,10	0,01	0,08
18	15 - 16	0,58	6,47	0,55	6,16
19	15 - 17	0,15	1,44	0,13	1,24
20	17 - 18	0,02	0,22	0,02	0,21
21	17 - 19	0,16	1,50	0,15	1,45
22	18 - 19	0,23	2,22	0,23	2,16



Gambar 5. Grafik kondisi tegangan bus



Gambar 6. Grafik kondisi daya aktif P



Gambar 7. Grafik kondisi daya reaktif Q

7. Kesimpulan

Dari simulasi pengujian pada jaring sistem tenaga listrik 500 kV/19 bus Jawa-bali dengan metode AIS-NS, dapat disimpulkan bahwa :

1. Masalah optimisasi alokasi kapasitor pada jaring sistem tenaga listrik dapat diselesaikan dengan baik melalui metode AIS-NS.
2. Penginjeksian bank kapasitor pada bus-bus tertentu dengan total 1200,43 MVar ternyata mampu memberikan profil tegangan bus yang baik pada rentang 0,9927 pu sampai dengan 1,0031 pu, dan dapat mereduksi rugi-rugi daya sistem sebesar $0,83 + j 8,81$ MVA (5,81 %) yaitu dari kondisi awal sebelum optimisasi sebesar $13,64 + j151,71$ MVA menjadi sebesar $12,81 + j142,90$ MVA setelah dioptimisasi. Dengan demikian maka kapasitas pembebanan dari sistem dapat ditingkatkan.
3. Metode AIS-NS secara algoritma memiliki kelebihan utama yaitu pada unsur *detektor*. Dengan *setting affinity* yang tepat akan memberikan jaminan optimisasi yang optimal.

8. Daftar Pustaka

- [1] M. Kaplan, "Optimization of Number, Location, Size, Type, and Control Setting of Shunt Capacitors on Radial Distribution Feeders", IEEE Trans. on Power Apparatus and systems, vol. 103, No.9, September 1984.
- [2] Y. G. Bae, "Analytical Method of Capacitors Allocation on Distribution Power Feeders", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.97, No.4, July/August 1978.
- [3] H. Duran, "Optimum Number, Location, and Size of Shunt Capacitors in Radial Distribution Feeder: A dynamic Programming Approach", IEEE Trans. on power Apparatus and System, vol.87, no.9, Sep 1968.
- [4] J. J. Grainger and S. H. Lee, "Capacity Release by shunt capacitor placement on Distribution Feeder "A New voltage dependent Model", IEEE Trans on Power Apparatus and System, vol.101, May 1982.
- [5] M. A. El-Sharkawi and S. J. Huang, "Ancillary Technique for Neural Network Applications", in IEEE International Conference on Neural Networks, Orlando, Florida, USA, June 1994.
- [6] S. J. Huang and C. L. Huang, "Application of Genetic-Based Neural Network to thermal Unit Commitment", IEEE Trans. on Power Systems, vol.12, No.2, May 1997.
- [7] S. J. Huang and C. L. Huang, "Genetic-Based Multi-Layered Perceptron for Taiwan Power System Short-Term Load Forecasting", International Journal of Electric Power System Research, vol.38, No.3, July 1996.
- [8] N. I. Santoso and O. T. Tan, "Neural-Net based Real-Time Control of Capacitors Installed on Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.5, No.1, January 1990.
- [9] H. D. Chiang, J. C. Wang, and O. Cockings, "Optimal Capacitor Placements in Distribution Systems: Part 1: A New Formulation and the Overall Problem", IEEE Trans. on Power Delivery, vol.5, No.2, April 1990.
- [10] C. T. Su and C. C. Tsai, "A New Fuzzy Reasoning approach to optimum Capacitor Allocation for Primary Distribution Systems", in Proceeding of the IEEE International Conference on Industrial Technology, December 1996.
- [11] S. Sundharajan and A. Pahwa, "Optimal Selection of Capacitors for Radial Distribution Systems Using A Genetic Algorithm", in IEEE PES Summer Meeting, July 1993.
- [12] Mohammad A.S.Masoum, MarjanLadjevaedi, Akbar Jafarian, and Edwal F. Fuchs, "Optimal Placement, Replacement and Sizing of Capacitor Banks in Distorted Distribution Networks by Genetic Algorithms", IEEE Transaction on Power Delivery, vol.19, No.4, October 2004.
- [13] Marwan Rosyadi, "Optimisasi Kompensasi Daya Reaktif pada Jaring 500 kV Sistem Jawa Bali Menggunakan Artificial Immune System melalui Clonal Selection Algorithm (CSA)", Proceeding Industrial Electronics Seminar IES, November 34th, 2005. EEPIS-ITS, Surabaya INDONESIA.
- [14] Agus Siswanto, Imam Robandi, "Wavelet-Based Artificial Immune Sistem untuk pengenalan dan Klasifikasi Gangguan Kualitas Daya Listrik", Prosiding Seminar Nasional, Efisiensi dan Konversi Energi, UNDIP, Semarang, 12 Desember 2005.
- [15] Imam Robandi, Denny Hermawanto, "Deteksi Hubung Singkat Pada Saluran Transmisi Menggunakan Artificial Immune System". Proc. IES 2004-Politeknik Elektronika Negeri Surabaya-ITS, September 2004.
- [16] Moh Dahlan, Imam Robandi, "Analisis Letak Gangguan pada Saluran Distribusi 20 kV Menggunakan Artificial Immune System Melalui Negative Selection", Tesis ITS, 2007.
- [17] Leandro Nunes de Castro, Fernando Jose Von Zuben, "Artificial Immune System Part I-Basic Theory and Application", Technical Report, TR-DCA 01/99, December, 1999.
- [18] Hajela, P., Yoo, J. & Lee, "GA Based Simulation of Immune Networks-Applications in Structural Optimization", Journal of Engineering Optimization.
- [19] Hadi Saadat, "Power System Analysis", Mc. Graw-Hill ISBN: 0-07-561634-3, New York, 1999.

