

Perbaikan Profil Tegangan pada *Feeder* Harapan Baru Lima (H5) Area Samarinda untuk Pengurangan Susut Energi

Muslimin, Hadi Suyono, dan Rini Nur Hasanah

Abstrak—Perbaikan profil tegangan untuk pengurangan susut energi (*losses*) pada suatu sistem tenaga listrik dimaksudkan untuk meningkatkan *performance* dari sistem tersebut. Semakin baik profil tegangan pada suatu sistem, maka susut energi (*losses*) yang terjadi pada sistem tersebut akan semakin kecil. Penelitian ini bertujuan untuk perbaikan profil tegangan pada *feeder* H5 area Samarinda dalam upaya pengurangan susut energi (*losses*). Perbaikan profil tegangan ini menggunakan peralatan AVR, *bank capacitor*, dan SVC. Metode *Newton-Raphson* digunakan untuk analisis aliran daya dan metode *Genetic Algorithm* (GA) digunakan untuk menentukan lokasi pemasangan dan kapasitas peralatan. Dari hasil analisis diperoleh bahwa dengan pemasangan AVR, *bank capacitor*, dan SVC *drop* tegangan dapat diperbaiki serta susut energi (*losses*) dapat dikurangi.

Kata Kunci—profil tegangan, susut energi, aliran daya.

I. PENDAHULUAN

PADA sistem tenaga listrik, sistem distribusi berfungsi untuk menyalurkan daya listrik dari sumber daya listrik besar (*bulk power source*) sampai ke beban atau konsumen. Sistem distribusi dibagi atas dua bagian yaitu sistem distribusi primer dan sistem distribusi sekunder. Kedua sistem distribusi ini dibedakan atas tegangan kerjanya [1]. Sesuai dengan Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN), tegangan kerja untuk sistem distribusi primer adalah 6 kV, 12 kV, dan 20 kV, sedangkan tegangan kerja untuk sistem distribusi sekunder adalah 220/380 Volt [2].

Meningkatnya usaha di bidang industri yang umumnya bersifat beban induktif, menyebabkan kebutuhan daya reaktif induktif meningkat. Meningkatnya daya reaktif induktif pada suatu sistem mengakibatkan terjadinya *drop* tegangan. Terjadinya *drop* tegangan pada penyaluran daya listrik akan berpengaruh terhadap besarnya susut energi (*losses*). Susut energi juga dipengaruhi oleh besarnya impedansi

pada peralatan penyaluran daya listrik baik pada sistem transmisi maupun pada sistem distribusi. Susut energi dalam sistem tenaga listrik tidak dapat dihindari. Salah satu yang bisa dilakukan untuk mengurangi susut energi (*losses*) adalah melakukan perbaikan profil tegangan [3]. Oleh karena itu tegangan pada sistem distribusi perlu dijaga sehingga tetap pada batas-batas yang diizinkan $\pm 5\%$ dari tegangan nominal sistem [4].

Salah satu *feeder* pada sistem kelistrikan samarinda yang mengalami *drop* tegangan di luar batas-batas yang diizinkan adalah *feeder* H5 yaitu sebesar 11%. *Feeder* H5 merupakan Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) tipe radial dengan panjang saluran 40 km. *Feeder* ini menyalurkan daya listrik di mulai dari GI Harapan Baru sampai ke beban atau konsumen yang tersebar di area kota Samarinda, dengan jumlah gardu distribusi sebanyak 71.

II. METODE PERBAIKAN PROFIL TEGANGAN DAN OPTIMASI PERALATAN

Pada penelitian ini perbaikan *drop* tegangan *feeder* H5 dilakukan dengan pemasangan peralatan pengatur tegangan yaitu *Automatic Voltage Regulator* (AVR), *bank capacitor*, dan peralatan *Flexible AC Transmission System* (FACTS) yaitu *Static VAR Compensator* (SVC). Dengan pemasangan peralatan tersebut diharapkan profil tegangan akan lebih baik dan susut energi (*losses*) dapat berkurang [5].

Untuk mengoptimalkan penempatan dan kapasitas yang sesuai dengan sistem atau *feeder* H5, maka digunakan metode *Genetic Algorithm* (GA). Metode GA merupakan metode kecerdasan buatan yang mampu menyelesaikan optimasi dengan ruang lingkup yang besar dan kompleks. Metode ini meniru proses evolusi alam, sehingga cocok digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi yang didasari oleh seleksi alam seperti pencarian lokasi, rute, dan jalur yang optimum [6].

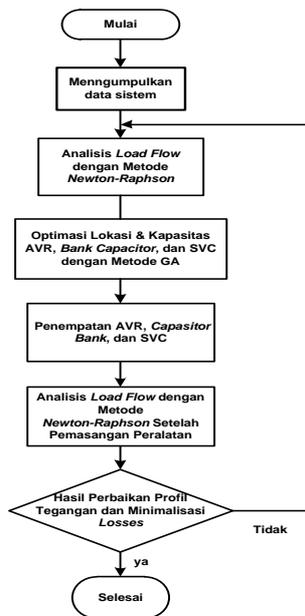
Sebelum melakukan optimasi lokasi penempatan dan kapasitas peralatan, terlebih dahulu dilakukan analisis aliran daya dengan menggunakan metode *Newton-Raphson*. Analisis aliran daya dilakukan untuk mengetahui besar tegangan, sudut fasa tegangan, daya aktif (P), daya reaktif (Q), rugi daya aktif (P_{loss}), dan rugi daya reaktif (Q_{loss}) pada masing-masing bus sebelum pemasangan peralatan. Setelah semua nilai parameter diketahui, selanjutnya dilakukan optimasi

Muslimin, mahasiswa Program Magister Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia dan dosen di Universitas Mulawarman Samarinda (e-mail: musculli@mail.com).

Hadi Suyono, dosen Teknik Elektro, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia (Telp.0341-554166; e-mail: hadis@ub.ac.id).

Rini Nur Hasanah, dosen Teknik Elektro, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia (Telp.0341-554166; rini.hasanah@ub.ac.id).

lokasi penempatan dan kapasitas peralatan untuk mengetahui lokasi penempatan yang optimal dan kapasitas yang sesuai dengan sistem atau *feeder* H5. Setelah diketahui lokasi penempatan yang optimal dan kapasitas peralatan yang sesuai, selanjutnya dilakukan kembali analisis aliran daya untuk mengetahui besar tegangan, sudut fasa tegangan, daya aktif (P), daya reaktif (Q), rugi daya aktif (P_{loss}), dan rugi daya reaktif (Q_{loss}) pada masing-masing bus setelah pemasangan peralatan. Diagram alir metodologi penelitian seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir metodologi penelitian

A. Perbaikan Profil Tegangan

Perbaikan profil tegangan pada *feeder* H5 dalam upaya pengurangan susut energi (*losses*), menggunakan AVR, *bank capacitor*, dan SVC.

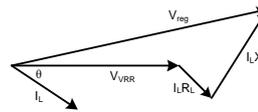
1) Automatic Voltage Regulator (AVR)

Automatic Voltage Regulator (AVR) pada saluran distribusi merupakan *autotransformer*, dimana lilitan primer dan sekunder dihubungkan menjadi satu. AVR dilengkapi dengan peralatan pengubah sadapan yang mengatur tegangan keluaran (*step voltage regulator*), dan peralatan pengatur saklar pembalik (*reversing switch*) yang kerjanya diatur oleh sistem kontrol otomatis (*automatic control switch*). Dengan dilengkapi peralatan-peralatan tersebut, tegangan keluaran dapat diatur pada nilai yang tetap sesuai dengan kemampuan sadapannya untuk nilai tegangan input yang bervariasi, lebih tinggi ataupun lebih rendah dari pada tegangan keluaran [7].

Pemasangan AVR pada saluran distribusi primer berfungsi untuk memperbaiki tegangan yang bertitik pangkal pada tempat pemasangan AVR sampai perbaikan tegangan saluran kearah beban. Diagram fasor kompensator *drop* tegangan pada saluran distribusi seperti pada Gambar 2 [8].

Pada Gambar 2, terlihat bahwa V_{VRR} , V_{reg} , dan V_{LDC}

= $I_L(R_L \cos\theta + X_L \sin\theta)$ merupakan rangkaian tertutup sehingga dapat dinyatakan dengan persamaan (1).



Gambar 2. Diagram fasor kompensator *drop* tegangan

$$V_{VRR} = V_{reg} - V_{LDC} \tag{1}$$

Persamaan (1), dapat dinyatakan bahwa besarnya V_{VRR} tergantung pada besarnya nilai V_{reg} dan V_{LDC} . Besarnya nilai V_{reg} diatur oleh transformator tegangan dan besarnya nilai V_{LDC} diatur melalui pengaturan besarnya resistansi dan reaktansi pada *Line Drop Compensation* (LDC), dengan menggunakan persamaan (2) dan persamaan (3).

$$R_{set} = \frac{CT_P}{PT_N} (R_{eff}) \tag{2}$$

$$X_{set} = \frac{CT_P}{PT_N} (X_{eff}) \tag{3}$$

dengan:

R_{set} = Setting *regulator* untuk kompensasi resistif (V)

X_{set} = Setting *regulator* untuk kompensasi reaktif (V)

CT_P = Nilai arus primer trafo arus (A)

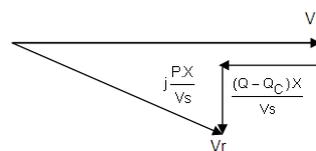
PT_N = Perbandingan potensial primer dan sekunder trafo tegangan.

R_{eff} = Resistansi saluran dari *regulator* sampai *regulator point* (Ω)

X_{eff} = Reaktansi saluran dari *regulator* sampai titik pusat beban (Ω)

2) Bank Capacitor

Bank capacitor digunakan secara luas pada sistem tenaga listrik untuk perbaikan faktor daya dan pengaturan profil tegangan. Pada saluran distribusi, *bank capacitor* digunakan untuk mengkompensasi rugi-rugi $I^2 X$ dan memastikan tegangan terjaga pada levelnya. Beban yang bersifat induktif akan menyerap daya reaktif, yang mengakibatkan *drop* tegangan di sisi penerima. Dengan pemasangan *bank capacitor*, beban akan mendapatkan suplai daya reaktif. Kompensasi yang dilakukan oleh *bank capacitor*, dapat mengurangi penyerapan daya reaktif sistem oleh beban. Dengan demikian jatuh tegangan yang terjadi pada sistem dapat dikurangi. Diagram fasor pemasangan *bank capacitor* pada saluran distribusi seperti pada Gambar 3 [8].



Gambar 3. Diagram fasor saluran distribusi setelah pemasangan *bank capacitor*

Pada Gambar 3 diketahui tegangan pada ujung penerima V_r setelah pemasangan *bank capacitor* seperti pada persamaan (4).

$$V_r = V_s - j \frac{P \cdot X}{V_s} - \frac{(Q - Q_c) \cdot X}{V_s} \quad (4)$$

dengan:

P = Daya aktif (W)

Q = Daya reaktif (VAR)

Q_c = Daya reaktif kapasitif (VAR)

V_s = Tegangan pada sisi pengirim (V)

V_r = Tegangan pada sisi penerima (V)

R = Resistansi saluran (Ω)

X = Reaktansi saluran (Ω)

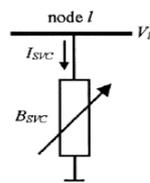
Persamaan (4), terlihat bahwa dengan penambahan *bank capacitor* ke dalam sistem, maka dapat mengurangi konsumsi daya reaktif oleh beban, yang pada akhirnya akan dapat memperbaiki nilai tegangan di sisi penerima.

3) Static VAR Compensator (SVC)

Static VAR Compensator (SVC) merupakan generator statis yang terhubung secara paralel dengan beban, dan memiliki *output* bervariasi untuk mengontrol parameter-parameter sistem tenaga listrik. Istilah statis disini mengidentifikasikan bahwa SVC tidak seperti kompensator sinkron, dimana SVC tidak memiliki komponen bergerak atau berputar. SVC terdiri dari *Thyristor Controller Reactor* (TCR), *Thyristor Switched Capacitor* (TSC), dan *filter harmonic*. *Filter harmonic* berfungsi untuk mengatasi harmonisa yang dihasilkan oleh TCR [9].

Prinsip kerja dari *static VAR Compensator* (SVC) adalah dengan mengatur sudut penyalan *thyristor*. Sudut penyalan *thyristor* akan mengatur keluaran daya reaktif dari SVC. Nilai tegangan sistem merupakan input bagi pengendali yang kemudian akan mengatur sudut penyalan *thyristor*. Dengan demikian SVC akan memberikan kompensasi daya reaktif sesuai dengan kebutuhan sistem [10].

Static VAR Compensator (SVC) dapat digunakan untuk mempertahankan nilai tegangan pada suatu bus yang terhubung dengan SVC, dengan nilai yang dikehendaki selama variasi beban, dengan cara menyerap dan menginjeksi daya reaktif melalui kontrol sudut penyalan (*firing angle*) *thyristor*. Salah satu model SVC adalah model total susceptansi seperti pada gambar 4 [11].



Gambar 4. Model total susceptansi SVC

Pada model total susceptansi ini, SVC dilihat sebagai sebuah reaktansi yang dapat diatur melalui perubahan susceptansi. B_{svc} melambangkan nilai total susceptansi dari SVC yang diperlukan untuk mempertahankan besar tegangan pada bus dengan nilai tertentu. Dalam

pemodelan SVC sebagai *variable VAR sources* seperti pada Gambar 3, kita dapat menetapkan batas maksimum dan minimum keluaran daya reaktif dari SVC (Q_{svc}). Penetapan batas tersebut masing-masing sesuai dengan susceptansi induktif (B_{ind}) dan susceptansi kapasitif (B_{cap}) yang tersedia, serta sesuai dengan tegangan referensi (V_{ref}). Batasan maksimum dan minimum dapat ditulis seperti pada persamaan (5) dan persamaan (6) [11].

$$Q_{max} = B_{ind} \cdot V_{ref}^2 \quad (5)$$

$$Q_{min} = B_{cap} \cdot V_{ref}^2 \quad (6)$$

dimana:

$$B_{ind} = \frac{1}{X_L} \quad (7)$$

$$B_{cap} = \frac{1}{X_C} \quad (8)$$

dengan:

X_L = reaktansi induktif (Ω)

X_C = reaktansi kapasitif (Ω)

Susceptansi (B_{svc}) dinyatakan sebagai fungsi dari sudut penyalan thyristor α , seperti pada persamaan (9).

$$B_{svc} = B_{cap} - B_{ind}(\alpha) \quad (9)$$

Daya reaktif yang dihasilkan oleh SVC dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (10).

$$Q_{svc} = -V_t^2 \cdot B_{svc} \quad (10)$$

dengan:

V_t = Tegangan terminal (V)

B. Aliran Daya (Load Flow)

Analisis aliran daya (*load flow*) adalah suatu analisis yang dilakukan untuk menghitung tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya yang terdapat pada berbagai titik dalam suatu saluran tenaga listrik pada keadaan operasi normal. Hal yang dapat diperoleh dari analisis aliran daya adalah besar dan sudut fasa tegangan setiap bus, daya aktif dan daya reaktif yang mengalir dalam setiap saluran. Selain itu, analisis aliran daya (*load flow*) sangat dibutuhkan untuk mengevaluasi unjuk kerja dari sistem tenaga listrik, mendapatkan informasi mengenai beban saluran distribusi, rugi-rugi saluran, dan menganalisis kondisi pembangkitan dan pembebanan. Oleh sebab itu studi aliran daya sangat diperlukan dalam perencanaan serta pengembangan sistem di masa yang akan datang [12, 13].

Dengan menerapkan hukum *kirchoff* antara simpul dalam sistem, maka diperoleh persamaan arus yang mengalir menuju suatu bus dalam satu saluran seperti persamaan (11) [14].

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (11)$$

atau:

$$I_p = \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_q \quad (12)$$

dimana:

$p = 1, 2, 3, 4, \dots, n$, merupakan nomor bus.

Daya aktif dan daya reaktif pada bus p dinyatakan seperti persamaan (13).

$$P_p - jQ_p = V_p^* I_p \quad (13)$$

dengan:

I_p = Arus pada bus p (V)

V_p = Tegangan pada bus p (V)

P_p = Daya aktif pada bus p (W)

Q_p = Daya reaktif pada bus p (VAR)

Metode *Newton-Raphson* menggunakan sejumlah persamaan nonlinier untuk menyatakan daya aktif dan daya reaktif sebagai fungsi dari besar dan sudut fasa tegangan. Daya aktif dan daya reaktif pada bus p dinyatakan dengan persamaan (14) dan Persamaan (15).

$$P_p = |V_p| \sum_{q=1}^n |V_q| (G_{pq} \cos \delta_{pq} + B_{pq} \sin \delta_{pq}) \quad (14)$$

$$Q_p = |V_p| \sum_{q=1}^n |V_q| (G_{pq} \sin \delta_{pq} - B_{pq} \cos \delta_{pq}) \quad (15)$$

Daya yang mengalir dari bus p ke bus q diperoleh dengan menggunakan persamaan (16), dan daya yang mengalir dari bus q ke bus p diperoleh dengan menggunakan persamaan (17).

$$S_{pq} = P_{pq} + jQ_{pq} = V_p^* I_{pq} \quad (16)$$

$$S_{qp} = P_{qp} + jQ_{qp} = V_q^* I_{qp} \quad (17)$$

dengan:

P_{pq} = Daya aktif pada saluran dari bus p ke bus q (W)

Q_{pq} = Daya reaktif pada saluran dari bus p ke bus q (VAR)

P_{qp} = Daya aktif pada saluran dari bus q ke bus p (W)

Q_{qp} = Daya reaktif pada saluran dari bus q ke bus p (VAR)

S_{pq} = Daya yang mengalir dari bus p ke bus q (VA)

S_{qp} = Daya yang mengalir dari bus q ke bus p (VA)

Rugi-rugi daya pada saluran p - q merupakan jumlah aljabar dari persamaan (16) dan persamaan (17), sehingga persamaan rugi-rugi daya pada saluran p - q seperti persamaan (18).

$$SL_{pq} = S_{pq} + S_{qp} \quad (18)$$

C. Algoritma Genetik

Proses dalam algoritma genetik secara bertahap dijelaskan sebagai berikut [6]:

1) Pengkodean

Pengkodean merupakan langkah awal yang dilakukan dalam menggunakan optimasi *Genetic Algorithm* (GA), yaitu pengkodean atau representasi permasalahan yang akan dioptimasi. Pengkodean yang lazim digunakan adalah kode bilangan biner, bilangan riel, dan huruf. Pengkodean tersebut diwujudkan dalam gen-gen yang membentuk kromosom. Setiap elemen atau gen dalam kromosom merupakan variabel *string*.

2) Fungsi *Fitness*

Fungsi objektif adalah sebuah persamaan fungsi

yang memiliki peran untuk menghitung nilai sebuah kromosom. Nilai *fitness* dari kromosom-kromosom bermanfaat untuk proses selanjutnya, yaitu sebagai perbandingan besarnya masing-masing fungsi objektif pada setiap kromosom.

3) Seleksi

Proses seleksi adalah proses pemilihan calon induk yang akan diproses pada proses berikutnya yaitu kawin silang dan mutasi. Proses pemilihan ini didasarkan pada fungsi objektif tiap kromosom yang diranking atau diurutkan berdasarkan besar nilainya, dan kemudian urutan tersebut menjadi indeks bagi kromosom yang bersangkutan.

4) Kawin Silang

Proses kawin silang adalah proses menyilangkan atau menukarkan gen dari dua kromosom induk hasil seleksi. Pada kawin silang tidak semua gen dari dua kromosom induk saling ditukarkan, melainkan dimulai dari gen yang terpilih (nilainya telah ditentukan sebelumnya), sehingga akan terbentuk dua kromosom induk baru yang terpilih untuk proses pada kawin silang. Fungsi kawin silang yaitu menghasilkan kromosom anak dari kombinasi gen dua kromosom induk.

5) Mutasi

Proses mutasi tidak memandang kromosom, melainkan gen-gen dalam kromosom. Probabilitas mutasi akan menentukan gen-gen dari suatu populasi yang akan mengalami proses mutasi. Mutasi adalah proses mengganti nilai gen sebelumnya dengan nilai baru yang ditentukan secara acak (*random*) dengan *range* yang ditentukan sebelumnya.

6) *Reinsertion (Reins)*

Setelah mengalami proses mutasi, akan diperoleh beberapa kromosom yang mengalami perubahan nilai *fitness*-nya. Kromosom-kromosom tersebut akan digabung dengan kromosom-kromosom lama yang tidak mengalami kawin silang dan mutasi, maka digunakan proses yang dinamakan *reinsertion* atau *reins*. Pada proses *reins*, seluruh kromosom akan dihitung kembali nilai objektifnya dan kromosom yang telah menjadi induk baru disisipkan lagi kedalam populasi lama sehingga jumlah populasinya tetap.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang digunakan dalam analisis aliran daya dan optimasi lokasi penempatan dan kapasitas peralatan adalah data sistem *existing feeder* H5.

1) Hasil Optimasi Lokasi Penempatan dan Kapasitas Peralatan

Optimasi lokasi penempatan dan kapasitas peralatan untuk perbaikan profil tegangan pada *feeder* H5 menggunakan dua parameter yaitu lokasi dan kapasitas peralatan, sehingga gen dalam kromosom berisi dua

nilai. Nilai pertama merupakan variabel lokasi penempatan peralatan, dikodekan dalam bentuk bilangan biner (0 dan 1). Nilai 0 mengidentifikasi bus tidak dipasang peralatan dan nilai 1 mengidentifikasi bus lokasi pemasangan peralatan. Nilai kedua merupakan variabel kapasitas peralatan, dikodekan dalam bentuk bilangan *real* (*float encoding*) antara -1 sampai 1. Nilai peralatan yang sebenarnya diperoleh setelah proses *decoding*. Kapasitas peralatan yang akan digunakan dalam optimasi ini bekerja dengan *range* nilai -100 MVAR sampai 100 MVAR.

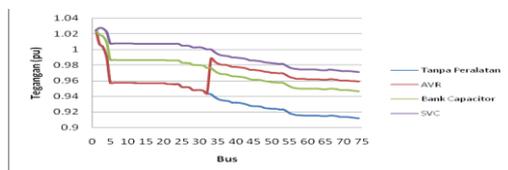
Jumlah gen yang digunakan dalam tiap kromosom adalah 74 sesuai dengan jumlah bus pada sistem. Nilai gen tersebut diuji keandalannya, apakah kromosom mampu memperbaiki profil tegangan atau tidak. Pengujian nilai gen dalam kromosom dilakukan pada fungsi objektif. Fungsi objektif yang digunakan adalah rugi-rugi daya seperti persamaan (19).

$$\text{Min } F = S_{\text{loss}} = \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^{(q-cp)} |V_p| |V_q| |Y_{pq}| \angle (\theta_{pq} + \delta_q - \delta_p) \quad (19)$$

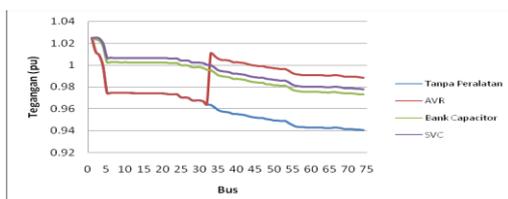
Batas yang digunakan adalah batas toleransi tegangan, yaitu $V_{\min} < p < V_{\max}$; dimana: $p = 1, 2, 3, \dots, n$ merupakan nomor bus, $V_{\min} = 0.95$ dan $V_{\max} = 1.05$. Ukuran populasi yang digunakan adalah 40, dengan probabilitas kawin adalah 0.90, probabilitas mutasi adalah 0.005, dan maksimum generasi adalah 100. Solusi optimasi diperoleh dari sejumlah solusi dengan cara proses *random*, melalui proses seleksi, kawin silang, dan mutasi. Berdasarkan parameter tersebut maka diperoleh hasil optimasi lokasi penempatan dan kapasitas peralatan yaitu peralatan di tempatkan pada bus 33 dengan kapasitas sebesar 1.6 MVA.

2) Perbandingan Tegangan Sebelum dan Setelah Pemasangan Peralatan

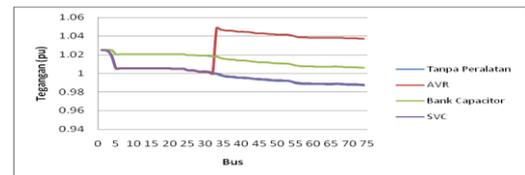
Dari hasil analisis aliran daya sebelum dan setelah pemasangan peralatan, maka diperoleh perbandingan tegangan pada masing-masing bus sebelum dan setelah pemasangan peralatan, seperti pada Gambar 5 untuk beban maksimum, Gambar 6 untuk beban rata-rata, dan Gambar 7 untuk beban minimum.



Gambar 5. Profil tegangan sebelum dan setelah pemasangan peralatan pada beban maksimum



Gambar 6. Profil tegangan sebelum dan setelah pemasangan peralatan pada beban rata-rata



Gambar 7. Profil tegangan sebelum dan setelah pemasangan peralatan pada beban minimum

Dari Gambar 5 perbandingan tegangan sebelum dan setelah pemasangan peralatan pada beban maksimum, terlihat bahwa dengan pemasangan AVR kenaikan tegangan bertitik pangkal pada bus pemasangan AVR sampai perbaikan tegangan saluran kearah beban. Dengan pengurangan *drop* tegangan pada ujung saluran bus 74 sebesar 5%. Dengan pemasangan *bank capacitor* kenaikan tegangan terjadi pada keseluruhan bus dalam sistem kecuali bus 1. Dengan pengurangan *drop* tegangan pada ujung saluran bus 74 sebesar 4%. Sedangkan dengan pemasangan SVC kenaikan tegangan juga terjadi pada keseluruhan bus dalam sistem kecuali bus 1. Dengan pengurangan *drop* tegangan pada ujung saluran bus 74 sebesar 6%.

Dari Gambar 6 perbandingan tegangan sebelum dan setelah pemasangan peralatan pada beban rata-rata, terlihat bahwa dengan pemasangan AVR kenaikan tegangan bertitik pangkal pada bus pemasangan AVR sampai perbaikan tegangan saluran kearah beban. Dengan pengurangan *drop* tegangan pada ujung saluran bus 74 sebesar 4%. Dengan pemasangan *bank capacitor* kenaikan tegangan terjadi pada keseluruhan bus kecuali bus 1. Dengan pengurangan *drop* tegangan pada ujung saluran bus 74 sebesar 3%. Sedangkan dengan pemasangan SVC juga terjadi perbaikan tegangan pada keseluruhan bus kecuali bus 1. Dengan pengurangan *drop* tegangan pada ujung saluran bus 74 sebesar 3%.

Dari Gambar 7 perbandingan tegangan sebelum dan setelah pemasangan peralatan pada beban minimum, terlihat bahwa dengan pemasangan AVR kenaikan tegangan bertitik pangkal pada bus pemasangan AVR sampai perbaikan tegangan saluran kearah beban. Dengan pengurangan *drop* tegangan pada ujung saluran bus 74 sebesar 5%. Dengan pemasangan *bank capacitor* kenaikan tegangan terjadi pada keseluruhan bus kecuali bus 1. Dengan pengurangan *drop* tegangan pada ujung saluran bus 74 sebesar 2%. Sedangkan dengan pemasangan SVC tegangan sama dengan sebelum pemasangan peralatan.

3) Perbandingan Total Losses Sebelum dan Setelah Pemasangan Peralatan.

Dari hasil analisis aliran daya sebelum dan setelah pemasangan peralatan, maka diperoleh perbandingan total *losses* sebelum dan setelah pemasangan peralatan, seperti pada Tabel 1 untuk beban maksimum, Tabel 2 untuk beban rata-rata, dan Tabel 3 untuk beban minimum.

TABEL I
TOTAL *LOSSES* SEBELUM DAN SETELAH PEMASANGAN PERALATAN
PADA BEBAN MAKSIMUM

| Total Losses | Sebelum | AVR | Bank Capacitor | SVC |
|--------------|----------|----------|----------------|----------|
| Daya Aktif | 0.335931 | 0.333155 | 0.289220 | 0.291378 |
| Daya Reaktif | 0.730223 | 0.732598 | 0.619914 | 0.618649 |

Daya Aktif = MW, Daya Reaktif = MVAR

TABEL II
TOTAL *LOSSES* SEBELUM DAN SETELAH PEMASANGAN PERALATAN
PADA BEBAN RATA-RATA

| Total Losses | Sebelum | AVR | Bank Capacitor | SVC |
|--------------|----------|----------|----------------|----------|
| Daya Aktif | 0.191947 | 0.051809 | 0.167696 | 0.168528 |
| Daya Reaktif | 0.418039 | 0.419422 | 0.358572 | 0.359431 |

Daya Aktif = MW, Daya Reaktif = MVAR

TABEL III
TOTAL *LOSSES* SEBELUM DAN SETELAH PEMASANGAN PERALATAN
PADA BEBAN MINIMUM

| Total Losses | Sebelum | AVR | Bank Capacitor | SVC |
|--------------|----------|----------|----------------|----------|
| Daya Aktif | 0.052366 | 0.051809 | 0.053739 | 0.051646 |
| Daya Reaktif | 0.076252 | 0.076633 | 0.076340 | 0.075146 |

Daya Aktif = MW, Daya Reaktif = MVAR

Dari Tabel 1, terlihat bahwa dengan pemasangan AVR, *bank capacitor* dan SVC berkurang, sedangkan total *losses* daya reaktif, terlihat bahwa dengan pemasangan AVR tidak berkurang, sedangkan dengan pemasangan *bank capacitor* berkurang sebesar 2% dan dengan pemasangan SVC berkurang sebesar 3%. Hal ini disebabkan karena AVR dalam mengkompensasi *drop* tegangan tidak menginjeksi daya reaktif.

Dari Tabel 2, terlihat bahwa dengan pemasangan AVR, *bank capacitor*, dan SVC total *losses* daya aktif berkurang. Sedangkan total *losses* daya reaktif, terlihat bahwa dengan pemasangan AVR tidak berkurang, dengan pemasangan *bank capacitor* berkurang sebesar 2% dan dengan pemasangan SVC berkurang sebesar 3%. Hal ini disebabkan karena AVR dalam mengkompensasi *drop* tegangan tidak menginjeksi daya reaktif.

Dari Tabel 3, terlihat bahwa dengan pemasangan AVR, *bank capacitor*, dan SVC total *losses* daya aktif dan reaktif tidak berkurang. Hal ini disebabkan karena pada beban minimum *drop* tegangan masih dalam batas-batas toleransi sehingga tidak berpengaruh terhadap pemasangan peralatan.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan perbaikan profil tegangan pada *feeder* H5 dengan menggunakan peralatan pengatur tegangan AVR, *bank capacitor*, dan SVC untuk pengurangan susut energi (*losses*), maka dapat ditarik beberapa kesimpulan

sebagai berikut:

1. Dari hasil analisis aliran daya sebelum pemasangan peralatan pada beban maksimum, bus yang mengalami *drop* tegangan diluar batas-batas yang diizinkan terjadi pada bus 32 sampai bus 74, pada beban rata-rata terjadi pada bus 55 sampai bus 74, sedangkan pada beban minimum keseluruhan bus tidak mengalami *drop* tegangan diluar batas-batas yang diizinkan.
2. Dari hasil optimasi lokasi penempatan dan kapasitas peralatan yang sesuai dengan sistem atau *feeder* H5, diperoleh lokasi penempatan peralatan pada bus 33 dengan kapasitas peralatan sebesar 1.6 MVAR.
3. Dari hasil analisis aliran daya setelah pemasangan peralatan, baik pada beban maksimum, beban rata-rata, maupun beban minimum, terlihat bahwa bus-bus yang mengalami *drop* tegangan diluar batas-batas yang diizinkan, dapat diperbaiki dengan pemasangan AVR, *bank capacitor*, dan SVC.
4. Dari hasil analisis aliran daya setelah pemasangan peralatan, pada beban maksimum dan beban rata-rata, terlihat bahwa total *losses* daya aktif dapat dikurangi dengan pemasangan, AVR, *bank capacitor*, dan SVC, sedangkan total *losses* daya reaktif dapat dikurangi dengan pemasangan *bank capacitor* dan SVC.
5. Dari hasil analisis penggunaan ketiga peralatan dalam perbaikan profil tegangan untuk pengurangan susut energi (*losses*) *feeder* H5, terlihat bahwa penggunaan *bank capacitor* dan SVC lebih baik dibandingkan dengan AVR.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pansini, A.J. 2007. *Electrical Distribution Engineering*, Third Edition, The Fairmont, Inc., Indian Trail.
- [2] SPLN 1. 1978. *Tegangan-Tegangan Standar Perusahaan Umum Listrik Negara*, PT. PLN (Persero), Jakarta.
- [3] Marsudi, D. 2006. *Operasi Sistem Tenaga Listrik*, Edisi Kedua, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- [4] SPLN 72. 1987. *Spesifikasi Desain Untuk Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR)*, PT. PLN (Persero), Jakarta.
- [5] Gerbex, S.; R. Cherkaoui, and A.J. Germond. 2001. Optimal Location of Multi-Type FACTS Devices in a Power System by Means of Genetic Algorithms, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol 16, No. 3.
- [6] Robandi, I. 2006. *Desain Sistem Tenaga Modern*, ANDI, Yogyakarta.
- [7] Short, T.A. 2004. *Electric Power Distribution Handbook*, CRC Press LLC, USA.
- [8] Gonen, T. 1986. *Electric Power Distribution System Engineering*, McGraw-Hill, Inc., USA.
- [9] Kundur, P. 1994. *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc., USA.
- [10] Padiyar, K.R. 2007. *FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution*, New Age International, Ltd., New Delhi.
- [11] Acha, E. 2002. *Power Electronic Control in Electrical Systems*, Newnes, London.
- [12] Arrillaga, J. and C.P. Arnol. 1990. *Computer Analysis of Power Systems*, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester.
- [13] Grainger, J.J. and W.D. Stevenson, Jr. 1994. *Power System Analysis*, McGraw-Hill, Inc., USA.
- [14] Saadat, H. 1999. *Power System Analysis*, McGraw-Hill, Inc., USA.