

Aplikasi *Particle Swarm Optimization* Pada Pemasangan Kapasitor Bank Pada Jaringan Distribusi

Mudjiono^{*a)}, Priya Surya H.^{a)}, Imron Ridzki^{a)}

(Artikel diterima: Oktober 2021, direvisi: Oktober 2021)

Abstrak: Panjangnya lintasan penghantar pada jaringan distribusi kerap menimbulkan permasalahan jatuh tegangan dan losess jaringan yang cukup signifikan. Penempatan kapasitor bank pada jaringan distribusi menjadi solusi utama untuk mengatasi permasalahan itu, tetapi untuk mengoptimalkan pemasangan agar didapatkan pengaruh yang signifikan pada level tegangan di jaringan membutuhkan perhitungan yang cukup rumit terutama Ketika saluran sangat panjang seperti pada jaringan tegangan menengah 20 kV. Pada makalah ini akan digunakan system distribusi primer 20 kV dengan 10 bus dan 9 saluran. Berdasarkan kondisi operasi terdapat beberapa permasalahan dan akan dicarikan solusinya melalui metode heuristic.

Kata-kata kunci : heuristic, kapasitor bank, optimasi,

1. Pendahuluan

Jaringan transmisi dan jaringan distribusi pada sistem tenaga listrik berfungsi sebagai sarana untuk menyalurkan energi listrik yang dihasilkan dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban. Sistem jaringan distribusi dapat dibedakan menjadi dua yaitu sistem jaringan distribusi primer dan sistem jaringan distribusi sekunder. Kedua sistem dibedakan berdasarkan tegangan kerjanya. Pada umumnya tegangan kerja pada sistem jaringan distribusi primer adalah 20 kV, sedangkan tegangan kerja pada sistem jaringan distribusi sekunder adalah 220/380 volt.

Dalam penyaluran energi listrik ada beberapa masalah yang dihadapi antara lain jatuh tegangan, faktor daya yang rendah dan rugi-rugi daya. Beban pada jaringan distribusi bisa berupa beban kapasitif maupun induktif, namun pada umumnya merupakan beban induktif. Apabila beban reaktif induktif semakin tinggi maka akan berakibat memperbesar jatuh tegangan, memperbesar rugi-rugi daya, menurunkan faktor daya dan menurunkan kapasitas penyaluran daya. Untuk meningkatkan kualitas tegangan dapat dilakukan dengan memasang sumber daya reaktif kapasitif, yaitu dengan menggunakan kapasitor yang dipasang secara paralel pada penghantar penyulang distribusi primer radial. Pemasangan kapasitor shunt tersebut menyebabkan arus yang mengalir pada penghantar menjadi lebih kecil, sehingga akan mengurangi besarnya rugi-rugi daya dan jatuh tegangan.

Pada makalah ini akan digunakan system distribusi primer 20 kV dengan 10 bus dan 9 saluran. Berdasarkan kondisi operasi terdapat beberapa permasalahan dan akan dicarikan solusinya melalui metode heuristic. Pada system distribusi 20 kV 10 bus yang diberikan, terdapat permasalahan tegangan di bus 4, 5, 6, 7 dan 10 yang besarnya di bawah 0.9 pu pada beban puncak. Hal ini tidak sesuai dengan standar yang diizinkan. Sehingga diperlukan kompensasi daya reaktif tambahan untuk memperbaiki tegangan agar mencapai minimalnya 0.9 pu. Pemasangan Capacitor dengan Q_c minimum untuk memperbaiki tegangan pada beban puncak menggunakan metode Particel Swarm Optimization (PSO).

2. Tinjauan Pustaka

Pada bagian tinjauan Pustaka ini akan membahas teori – teori

terkait dengan system kelistrikan terutama tentang rangkaian listrik dan fenomena losess energi dan jatuh tegangan yang diakibatkan panjangnya lintasan penghantar. Teori perhitungan optimalisasi dengan metode particle swarm optimization juga di terangkan pada bagian ini.

2.1 Jatuh Tegangan

Definisikan singkatan dan akronim ketika pertama kali digunakan p Beban yang terdapat pada sistem tenaga listrik yang bersifat resistif-induktif akan menyerap daya aktif dan daya reaktif yang dihasilkan oleh generator. Penyerapan daya reaktif akan menyebabkan timbulnya jatuh tegangan pada tegangan yang disuplai oleh generator. Akibatnya nilai tegangan di sisi penerima akan berbeda dengan nilai tegangan sisi pengirim. Persamaan jatuh tegangan dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$V_s^2 = (V_r + \Delta V_p)^2 + (\Delta V_q)^2$$

Dimana:

V_s = tegangan sisi pengirim

V_r = tegangan sisi penerima

ΔV_q = tegangan jatuh

Nilai ΔV_q sangat kecil sehingga dapat diabaikan, maka persamaan di atas dapat dituliskan sebagai berikut :

$$V_s^2 = (V_r + \Delta V_p)^2$$

$$\Delta V_p = IR \cos\theta + IX \sin\theta$$

$$\Delta V_p = R \frac{P}{V_r} + X \frac{Q}{V_r}$$

Dimana: R = resistansi saluran

X = reaktansi saluran

P = daya aktif yang dikirim ke beban

* Korespondensi : mudjiono@polinema.ac.id

a) Prodi Sistem Kelistrikan, Jurusan Teknik Elektro, Polinema.
Jalan Soekarno-Hatta No. 9 Malang 65141

Q = daya reaktif yang dikirim ke beban

Dapat dilihat bahwa nilai jatuh tegangan ditentukan oleh beberapa faktor, yaitu daya aktif (P), resistansi dan reaktansi saluran (R dan X) serta daya reaktif (Q). Pengaturan daya aktif erat kaitannya dengan pengaturan frekuensi sistem. Sedangkan pengaturan daya reaktif akan mempengaruhi tegangan. Oleh karena itu dengan melakukan pengaturan daya reaktif akan dapat mengatur nilai tegangan. Untuk jaringan distribusi PLN, standar penurunan tegangan maksimum yang diijinkan di beberapa titik pada jaringan distribusi mengacu pada SPLN 72 .1987, yaitu: SUTM = 5 % dari tegangan kerja pada sistem radial di atas tanah dan sistem simpul. KTM = 2 % dari tegangan kerja pada sistem spindle dan gugus. Trafo distribusi = 3 % dari tegangan kerja. Saluran tegangan rendah = 4 % dari tegangan kerja yang tergantung pada kepadatan beban. Sambungan rumah = 1 % dari tegangan nominal.

2.2 Pengaturan Tegangan

Dalam penyediaan tenaga listrik, tegangan yang konstan merupakan salah satu syarat utama yang harus dipenuhi. Pengaturan tegangan erat kaitannya dengan pengaturan daya reaktif dalam sistem. Berbeda dengan frekuensi yang nilainya selalu sama pada semua bagian sistem, tegangan memiliki nilai yang berbeda-beda dalam setiap bagian sistem. Oleh karenanya pengaturan tegangan tidak dapat dilakukan pada satu bagian saja, melainkan harus merata pada bagian-bagian dalam sistem yang mengalami penurunan tegangan di luar standar. Pengaturan tegangan dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu

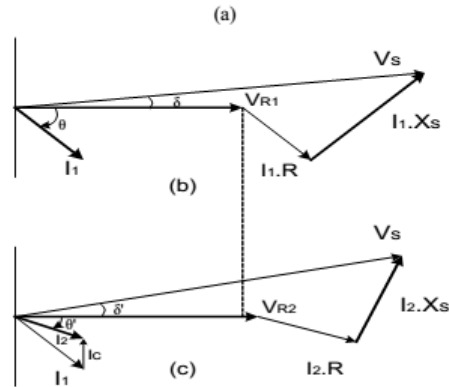
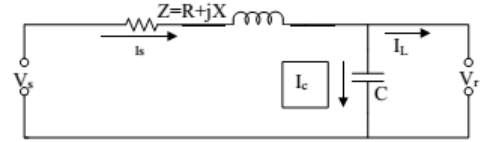
- Tap changer trafo
- Capacitor Bank (Shunt Capacitor)
- Reaktor Shunt
- Kapasitor seri
- Kondensor sinkron
- Static VAR Compensator (SVC)

Dalam makalah ini akan dibahas tentang penggunaan capacitor bank untuk pengaturan tegangan.

2.3 Kapasitor Shunt

Capacitor bank digunakan secara luas pada sistem distribusi untuk perbaikan faktor daya dan pengaturan tegangan feeder. Beban yang bersifat induktif akan menyerap daya reaktif, yang kemudian akan menimbulkan jatuh tegangan di sisi penerima. Dengan pemasangan capacitor bank, beban akan mendapatkan suplai daya reaktif. Kompensasi yang dilakukan oleh capacitor bank akan dapat mengurangi penyerapan daya reaktif sistem oleh beban, sehingga jatuh tegangan dapat dikurangi.

Ketika memasang kapasitor paralel, terjadi injeksi arus I_c pada sistem sehingga faktor daya meningkat dan I_L berkurang. Hal itu mengakibatkan jatuhnya tegangan berkurang $I_L \times X_S$ sehingga tegangan V_R meningkat. Dari persamaan di atas terlihat bahwa dengan tegangan kirim yang sama akan diperoleh tegangan terima yang lebih besar ketika sistem ditambahkan kapasitor paralel. Hal itu terjadi ketika faktor daya bus diperbaiki dengan menambah kapasitor paralel, tegangan terima bus juga meningkat.



Gambar 2.1. (a) Rangkaian ekivalen saluran; (b) Diagram vektor dari rangkaian dgn faktor daya lag; (c) Diagram vektor dgn kapasitor shunt

Dari gambar tersebut dapat dijelaskan bahwa:

$$V_{R1} = V_S - (I_R.R + jI_L.X_S)$$

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

$$\begin{aligned} \Delta V_R &= V_{R2} - V_{R1} \\ &= V_S - (I_R.R + jI_L.X_S - jI_C.X_S) - [V_S - (I_R.R + jI_L.X_S - jI_C.X_S)] \\ &= jI_C.X_S \end{aligned}$$

Dimana:

I_R = komponen real arus (Ampere)

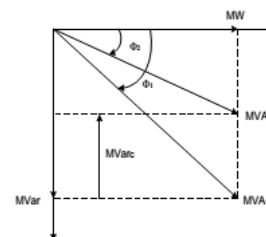
I_L = Komponen reaktif arus lagging thd tegangan (Ampere)

I_C = Komponen reaktif arus leading thd tegangan (Ampere)

R = Resistansi saluran (Ohm)

X_S = Reaktansi jaringan (Ohm)

Untuk memperoleh hasil yang optimal, kekurangan daya reaktif yang dibutuhkan oleh beban sedapat mungkin dipenuhi oleh kapasitor paralel yang dipasang seperti ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 2.2. Perbandingan daya semu sebelum dan sesudah pemasangan capacitor bank

2.4 Perbaikan Tegangan

Semakin panjang suatu penghantar listrik atau jaringan distribusi, maka semakin besar sifat induktansi (L) dari penghantar tersebut. Tentu hal ini tidak sama sekali berdampak baik pada kita. Maka dengan itu penempatan suatu kapasitor pada penghantar tersebut cukup membantu untuk menyeimbangi induktansi pada penghantar tersebut.

Bila suatu jaringan tidak memiliki sumber daya reaktif di daerah sekitar beban, maka akan mengalir arus reaktif pada jaringan, yang berakibat pada penurunan faktor daya, peningkatan rugi-rugi jaringan, penurunan tegangan khususnya pada ujung saluran, dan regulasi tegangan yang memburuk. Hal ini akan menimbulkan kerugian baik pada produsen dalam hal ini adalah PLN sebagai penyedia listrik maupun konsumen (pemakai listrik). Alternatif untuk mengurangi akibat dari meningkatnya arus reaktif ini adalah dengan melakukan kompensasi daya reaktif, yang bertujuan untuk transportasi daya reaktif pada jaringan tenaga listrik dan menjaga agar profil tegangan selalu berada pada batas-batas yang diijinkan. Alternatif yang dapat dilakukan adalah dengan memasang kapasitor shunt.

Kapasitor shunt berguna sebagai sumber daya reaktif tambahan untuk mengkompensasi daya induktif akibat pembebanan tersebut. Pemasangan kapasitor shunt ini diharapkan akan dapat menurunkan rugi-rugi yang berarti penghematan energi listrik, peningkatan kualitas tegangan dan kualitas daya (power quality), serta penurunan arus listrik yang mengalir pada beban sehingga dapat menambah beban tanpa perlu menambah atau membangun saluran yang baru. Kapasitor pada sistem daya listrik menimbulkan daya reaktif untuk memperbaiki tegangan dan faktor daya, karenanya menambah kapasitor sistem akan mengurangi kerugian. Dalam kapasitor seri daya reaktif sebanding dengan kuadrat arus beban, sedang pada kapasitor paralel sebanding dengan kuadrat tegangan.

Pemasangan peralatan kapasitor seri dan paralel pada jaringan distribusi mengakibatkan losses akibat aliran daya reaktif pada saluran dapat dikurangi sehingga kebutuhan arus menurun dan tegangan mengalami kenaikan sehingga kapasitas sistem bertambah. Kapasitor seri tidak digunakan secara luas dalam saluran distribusi, karena adanya berbagai permasalahan (resonansi distribusi, resonansi ferro dalam transformator dan resonansi subsinkron selama starting motor) dan sistem yang lebih kompleks.

Biaya pemasangan kapasitor seri jauh lebih mahal daripada kapasitor paralel, dan biasanya kapasitor seri dirancang dengan kapasitas yang lebih besar dengan tujuan untuk mengantisipasi perkembangan beban untuk masa-masa yang akan datang. Hal-hal tersebut menjadi alasan utama sehingga dalam sistem distribusi yang dibahas banyak kapasitor paralel. Manfaat penggunaan kapasitor paralel:

- mengurangi kerugian
- memperbaiki kondisi tegangan
- mempertinggi kapasitas pembebanan jaringan

Kapasitor paralel membangkitkan daya reaktif negatif dan beban membangkitkan daya reaktif positif jadi pengaruh dari kapasitor adalah untuk mengurangi aliran daya reaktif di dalam jaringan sehingga daya reaktif yang berasal dari sistem menjadi:

$$Q_2 \text{ (total)} = Q_1 \text{ (beban)} - Q_c$$

Q_c adalah daya reaktif yang dibangkitkan oleh kapasitor paralel.

Pengaruh Kapasitor shunt pada jaringan listrik yakni kapasitor ini terhubung paralel pada jaringan maupun langsung pada beban, dengan tujuan untuk perbaikan faktor daya, sebagai pengatur tegangan maupun untuk mengurangi kerugian daya dan tegangan pada jaringan (Deshpande, 1990). Dengan anggapan tegangan sisi beban dipertahankan konstan, maka terlihat bahwa dengan menggunakan kapasitor shunt, maka arus reaktif yang mengalir pada saluran akan berkurang. Hal ini menyebabkan berkurangnya penurunan tegangan pada saluran, sehingga diperlukan tegangan sumber yang tidak berbeda jauh dengan tegangan terima. Berkurangnya arus reaktif yang mengalir pada saluran akan memberikan penurunan rugi-rugi daya dan rugi-rugi energi. Kapasitor shunt mensuplai daya reaktif atau arus untuk menetralkan komponen keluaran antar fasa dari arus yang diperlukan oleh beban induktif.

Pembangkitan daya reaktif pada perencanaan daya dan pensuplaiannya ke beban-beban yang berlokasi pada jarak yang jauh adalah tidak ekonomis, tetapi dapat dengan mudah disediakan oleh kapasitor yang ditempatkan pada pusat beban. Penurunan hasil daya reaktif dalam penurunan arus total, yang disebabkan oleh turunnnya penyusutan daya. Sehingga koreksi faktor daya menghasilkan penghematan ekonomi dalam pengeluaran yang besar dan pengeluaran bahan bakar melalui pengurangan kapasitas kilovoltampere dan penurunan rugi daya dalam semua perlengkapan diantara titik yang dipasang kapasitor dan rencana sumber daya, termasuk saluran distribusi, trafo di gardu induk dan saluran transmisi. Peningkatan faktor daya adalah titik dimana keuntungan ekonomis dari pemasangan kapasitor shunt sama dengan harga dari kapasitor tersebut.

Keuntungan lain dari pemasangan kapasitor adalah perbaikan faktor daya dan pengurangan kVA yang mengalir pada jaringan. Dengan pemasangan kapasitor akan mengurangi daya reaktif yang mengalir pada jaringan, sehingga dengan daya nyata yang sama, maka faktor daya akan lebih besar dan kVA akan berkurang. Dengan adanya perbaikan faktor daya, akan timbul pengurangan kVA yang mengalir pada jaringan.

Sehingga pada jaringan tersebut dapat ditambahkan sejumlah kVA sebesar pengurangan kVA yang terjadi. Tambahan kVA ini merupakan selisih antara kVA sebelum dipasang kapasitor dengan kVA setelah dipasang kapasitor.

Dengan adanya kVA tambahan pada suatu jaringan, akan menambah jumlah beban yang dapat ditanggung oleh jaringan tersebut. Hal ini merupakan suatu keuntungan, karena apabila ada tambahan beban pada daerah dimana jaringan itu berada, daya listriknya dapat dikirim melalui jaringan tersebut tanpa perlu membangun jaringan yang baru.

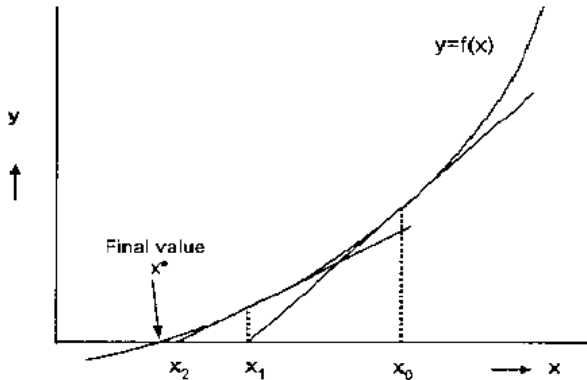
Aplikasi dari kapasitor shunt pada jaringan distribusi primer radial memberikan keuntungan secara ekonomis baik dari segi kegunaan maupun pelayanan. Secara umum salah satu keuntungan dari pemasangan kapasitor adalah penurunan kVA pada gardu induk.

2.5. Metode Newton Raphshon

Metode Newton-Raphson secara luas digunakan untuk permasalahan persamaan non-linear. Penyelesaian Persamaan ini menggunakan permasalahan yang linear dengan solusi pendekatan. Metode ini dapat diaplikasikan untuk satu persamaan atau beberapa persamaan dengan beberapa variabel yang tidak

diketahui.

Ilustrasi metode Newton-Raphson secara grafik dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4. Ilustrasi Metode Newton-Raphson

Pada Gambar 2.4 dapat dilihat kurva garis melengkung diasumsikan grafik persamaan $y = F(x)$. Nilai x_0 pada garis x merupakan nilai perkiraan awalkemudian dilakukan dengan nilai perkiraan kedua dan seterusnya hingga didapatkan solusi sesuai dengan batasan error yang diinginkan.

Perhitungan aliran daya menggunakan metode Newton-Raphson sebagai berikut:

- Membentuk matrik admitansi Y_{rei} sistem
- Menentukan nilai awal $V^{(0)}$, $\delta^{(0)}$, P_{spec} , Q_{spec}
- Menghitung daya aktif dan daya reaktif berdasarkan persamaan

$$P_i^{(k)} = \sum_{j=1}^n |V_i^{(k)}| |Y_{ij}| |V_j^{(k)}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)})$$

$$Q_i^{(k)} = -\sum_{j=1}^n |V_i^{(k)}| |Y_{ij}| |V_j^{(k)}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i^{(k)} + \delta_j^{(k)})$$

- Menghitung nilai $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ berdasarkan persamaan

$$\Delta P_i^{(k)} = P_{i,spec} - P_{i,calc} \quad \Delta Q_i^{(k)} = Q_{i,spec} - Q_{i,calc}$$

- Membuat matrik Jacobian

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(k)} \\ \Delta |V|^{(k)} \end{bmatrix}$$

- Menghitung nilai $\delta^{(k+1)}$ dan $|V^{(k+1)}|$ berdasarkan persamaan

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad |V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}|$$

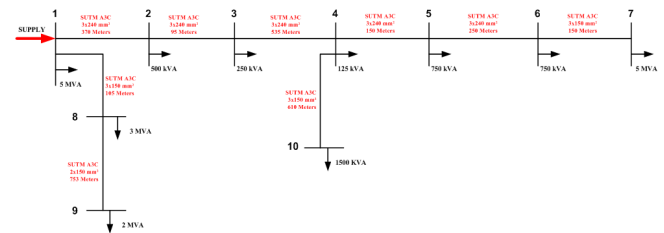
- Hasil nilai $\delta^{(k+1)}$ dan $|V^{(k+1)}|$ dimasukkan dalam persamaan di butir c untuk mencari nilai ΔP dan ΔQ . Perhitungan akan konvergensi jika nilai ΔP dan ΔQ memenuhi batasan yang telah ditentukan
- Jika sudah konvergensi maka perhitungan selesai, jika belum konvergensi maka perhitungan dilanjutkan untuk iterasi berikutnya

3. Metode

Pemodelan pada analisa di makalah ini meliputi pemodelan jaringan dan pemodelan komponen. Pemodelan jaringan akan digunakan untuk melakukan analisa aliran daya pada jaringan sehingga dapat diketahui besar daya yang mengalir dari sisi kirim ke sisi terima dan mengetahui jumlah losses energi yang hilang saat penyaluran. tegangan bus juga dapat diketahui dengan melakukan pemodelan dan simulasi aliran daya tersebut. Sedangkan pemodelan komponen akan difokuskan pada modeling kapasitor dan perhitungan objektif secara matematis.

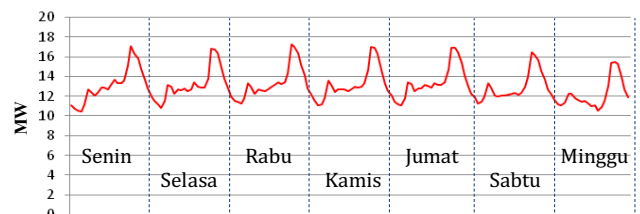
3.1 Analisa Sistem Terpasang

Pada makalah ini diberikan studi kasus permasalahan optimisasi penempatan kapasitor bank pada sistem distribusi 20 kV. Studi kasus ini menggunakan jaringan sistem distribusi dengan 10 bus seperti pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1. Sistem distribusi 20 kV

Sistem distribusi tersebut mempunyai beban dengan profile mingguan. Ditunjukkan pada Gambar 3.2. Berdasarkan analisis aliran daya pada beban puncak, diketahui ada permasalahan tegangan pada bus yang besarnya dibawah batasan operasi. Aliran daya sistem tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 3.2. Tegangan pada bus sumber atau Bus 1 hanya sampai 19.9 kV atau 0.995 pu sehingga dalam simulasi tegangan aliran daya Bus 1 diset sebagai slack bus dengan $|V_1| = 0.995$ pu. Hasil aliran daya terlihat bahwa tegangan pada Bus 4 ~ 7 dan Bus 10 dibawah 0.9 pu. Pada kondisi beban tersebut di atas, losses daya pada jaringan adalah sekitar 3.1 % sehingga losses daya jaringan dapat dikatakan kecil.

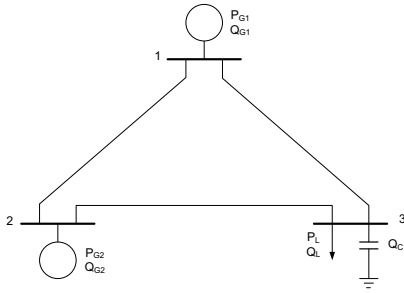


Gambar 3.2. Profile beban mingguan

3.2 Pemodelan Kapasitor

Dalam analisa aliran daya kapasitor shunt dapat dimodelkan sebagai power injection atau admitansi shunt. Dalam makalah ini, kapasitor shunt dimodelkan sebagai injeksi MVar tambahan yang masuk ke bus. Model kapasitor dapat dijelaskan sebagai berikut.

Untuk menjelaskan pemodelan kapasitor dalam aliran daya, diberikan system tenaga listrik 3 bus pada Gambar 3.3. Sistem tersebut terdiri dari 2 generator pada bus 1 dan 2 serta beban yang terhubung pada bus 3. Pada bus 3 dipasang kapasitor shunt sebesar Q_c .



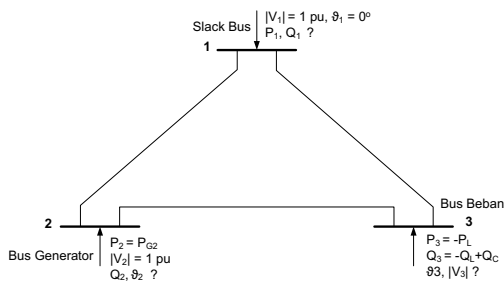
Gambar 3.3. Single line diagram 3 bus

Kapasitor tersebut menghasilkan MVar yang akan memasok kebutuhan MVar system. Untuk memberikan gambaran maka diberikan single line diagram injeksi daya pada masing-masing bus. Bus 1 dimodelkan sebagai slack bus, bus 2 merupakan bus generator sedangkan bus 3 adalah bus beban. Besar injeksi daya dapat dilihat pada gambar tersebut.

Besar injeksi daya pada bus 3 adalah sebagai berikut,

$$P_3 = -P_L \text{ dan } Q_3 = -Q_L + Q_C$$

Q_c akan memodifikasi injeksi daya reaktif pada bus 3 atau bus i . Pemodelan ini hanya dapat diterapkan pada bus beban, karena pada bus beban nilai injeksi Q dijadwalkan. Sehingga, dalam proses optimisasi, bus yang menjadi target pemasangan kapasitor harus diset sebagai bus beban.



Gambar 3.4. Injeksi daya pada masing-masing Bus

4. Pembahasan

Optimisasi ini dilakukan untuk mencari jumlah kompensasi daya reaktif yang minimum untuk memperbaiki tegangan sistem. Fungsi tujuan diformulasikan sebagai berikut

$$f = \sum_{i=2}^{Nbus} Qc_i$$

Keterangan:

- f : Fitness
- Qc_i : Kompensasi daya reaktif pada bus ke- i
- i : Indek bus

Pada proses optimisasi, bus 1 merupakan bus sisi supply yang memiliki tegangan relative paling tinggi. Selain itu, bus tersebut merupakan slack bus sehingga tidak dimasukkan dalam target pemasangan kapasitor. Oleh karena itu, nilai i dimulai dari angka 2. Minimum kapasitor yang ditempatkan pada bus ditujukan agar tegangan bus memenuhi standar yang diijinkan. Oleh karena itu, tegangan bus dijadikan sebagai batasan dalam proses

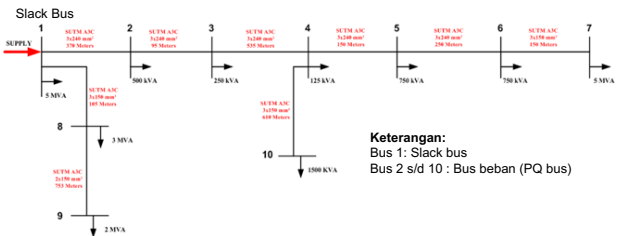
optimisasi. Fungsi pembatas adalah sebagai berikut

$$0.9 pu < |V_i| < 1.1 pu$$

Keterangan:

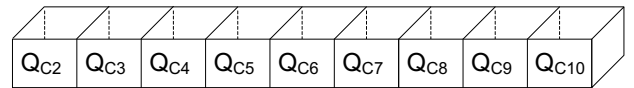
$|V_i|$: Magnitude tegangan pada bus i

Kapasitor pada setiap iterasi dimodelkan ke dalam aliran daya dengan cara memodifikasi injeksi MVar kemudian dijalankan aliran daya pada setiap kombinasi injeksi untuk melihat besar tegangan pada masing-masing bus. Formulasi permasalahan ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 4.1. Tipe bus pada sistem 10 bus

Pada kasus ini, bus 2 s/d 10 diset sebagai bus beban atau PQ bus, sehingga kapasitor sebesar Q_c dapat diinjeksikan pada bus 2 s/d 10. Q_c ini dimodelkan pada masing-masing bus ini dimodelkan dalam partikel sebagai berikut.



Gambar 4.2. Struktur partikel Q_c pada masing-masing bus

Nilai Q_c yang diinjeksikan disesuaikan dengan kapasitas MVar yang ada di pasaran. Dengan asumsi bahwa kapasitas kapasitor shunt yang ada di pasaran tersedia dalam kelipatan 0.15 MVar, maka nilai Q_c dirumuskan sebagai berikut

$$Q_c = K_c \times 0.15 \text{ MVar}, \text{ dimana } K_c \in$$

0,1,2 ... (bilangan cacah)

Jika nilai $K_c = 0$ artinya tidak dipasang kapasitor, namun jika $K_c = 10$ maka dipasang kapasitor dengan kapasitas sebesar 1.5 MVar. Begitu juga seterusnya.

Masing-masing partikel memiliki kecepatan yang berbeda. Dan dimodelkan dalam struktur yang sama dengan partikel.

Pada tahap awal ini juga dilakukan penyusunan matrik Y_{bus} dan perumusan injeksi daya ke bus untuk kebutuhan perhitungan aliran daya.

Program optimisasi menggunakan PSO dikembangkan menggunakan Mfile Matlab. Untuk memahami proses tahap demi tahap algoritma optimisasi ini, maka berikut ini diberikan contoh perhitungan manual dalam 1 iterasi sebagai berikut :

1) Inisiasi patikel dan kecepatan

Dengan memilih jumlah partikel N sebesar 10, maka inisiasi nilai partikel dan kecepatan awal ditunjukkan pada Gambar 4.3 dan 4.4. Hasil running optimisasi ditunjukkan oleh Gambar 4.3 berikut. Solusi Q_c minimum diperoleh pada iterasi 160, dengan besar Q_c 2.55 MVar pada bus 7.

Selain parameter tersebut di atas, juga diperlukan parameter learning rate, bobot inersia untuk kebutuhan update partikel. Parameter tersebut adalah sebagai berikut

Qc (MVar)	Bus 2	Bus 3	Bus 4	Bus 5	Bus 6	Bus 7	Bus 8	Bus 9	Bus 10
Partikel 1	0.90	5.10	3.90	2.25	1.20	2.55	2.85	0.75	3.60
Partikel 2	1.35	2.25	3.45	1.50	1.80	3.75	1.65	4.95	5.85
Partikel 3	4.35	2.10	3.45	0.60	5.40	5.25	4.95	1.50	3.60
Partikel 4	0.15	2.55	1.95	0.90	1.05	2.55	0.60	3.60	2.85
Partikel 5	4.20	4.20	3.90	0.15	0.45	1.95	3.15	3.90	2.40
Partikel 6	4.95	4.35	5.85	3.15	1.95	0.60	3.60	4.65	2.55
Partikel 7	0.60	1.65	0.90	1.65	2.70	3.15	2.70	5.25	3.15
Partikel 8	5.70	3.90	5.70	1.50	4.05	1.80	4.05	4.20	0.45
Partikel 9	1.50	1.35	4.05	5.10	2.10	4.65	4.05	0	3.60
Partikel 10	2.25	5.55	0	2.70	2.55	2.70	4.65	1.95	4.65

Gambar 4.3. Kondisi awal partikel (acak)

Kecepatan	Bus 2	Bus 3	Bus 4	Bus 5	Bus 6	Bus 7	Bus 8	Bus 9	Bus 10
Partikel 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Partikel 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Partikel 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Partikel 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Partikel 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Partikel 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Partikel 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Partikel 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Partikel 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Partikel 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Gambar 4.4. Kondisi awal kecepatan partikel

$c_1 = c_2 = 1$ (ditentukan)
 $\theta = 0$ (ditentukan)
 $r_1 = 0.4607$ dan $r_2 = 0.9816$ (ditentukan secara acak)

2. Perhitungan fungsi tujuan

Hasil perhitungan aliran daya dan fungsi tujuan untuk masing-masing partikel ditunjukkan Tabel 3.2. Nilai fungsi tujuan partikel ke-3 diset inf atau tak terhingga karena tegangan bus 6 melebihi 1.1 pu. Nilai tak terhingga ini bertujuan untuk memastikan agar partikel ke 3 tidak menjadi kandidat solusi.

Tabel 4.1. Perhitungan aliran daya dan fungsi tujuan

PARTIKEL	Vi untuk i ∈ {1, 2, ..., 10}					Fitness
Partikel 1	0.9950	1.0231	1.0305	1.0502	1.0486	23.10
	1.0428	1.0389	0.9930	0.9821	1.0606	
Partikel 2	0.9950	1.0232	1.0302	1.0624	1.0622	26.55
	1.0605	1.0582	0.9959	1.0147	1.0844	
Partikel 3	0.9950	1.0376	1.0457	1.0858	1.0909	Inf
	1.1002	1.0999	0.9959	0.9904	1.0958	
Partikel 4	0.9950	0.9995	1.0012	1.0011	0.9972	16.20
	0.9908	0.9866	0.9936	1.0030	1.0077	
Partikel 5	0.9950	1.0172	1.0201	1.0178	1.0113	24.30
	1.0021	0.9971	0.9964	1.0079	1.0218	
Partikel 6	0.9950	1.0356	1.0428	1.0651	1.0631	31.65
	1.0547	1.0482	0.9976	1.0142	1.0698	
Partikel 7	0.9950	1.0050	1.0078	1.0184	1.0188	21.75
	1.0177	1.0145	0.9973	1.0180	1.0266	
Partikel 8	0.9950	1.0349	1.0412	1.0608	1.0610	31.35
	1.0600	1.0551	0.9976	1.0112	1.0540	
Partikel 9	0.9950	1.0295	1.0381	1.0840	1.0900	26.40
	1.0910	1.0899	0.9935	0.9770	1.0940	
Partikel 10	0.9950	1.0262	1.0331	1.0483	1.0493	27.00
	1.0469	1.0432	0.9960	0.9938	1.0643	

3. Perhitungan pbest

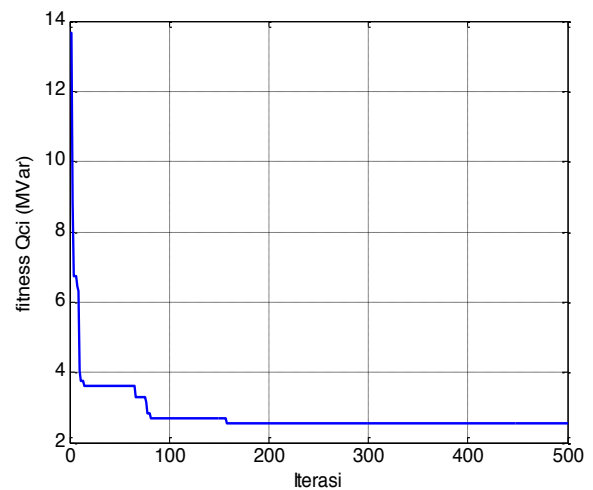
Nilai pbest diperoleh dengan memilih yang terbaik diantara partikel saat ini dengan pbest pada iterasi sebelumnya berdasarkan nilai fungsi tujuannya. Untuk iterasi pertama, nilai partikel yang diperoleh akan diset sebagai pbest. Sehingga nilai

pbest pada iterasi ke-1 ini ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Nilai pbest pada iterasi ke-1

PARTIKEL	NILAI PARTIKEL									FITNESS
Partikel 1	0.90	5.10	3.90	2.25	1.20	2.55	2.85	0.75	3.60	23.10
Partikel 2	1.35	2.25	3.45	1.50	1.80	3.75	1.65	4.95	5.85	26.55
Partikel 3	4.35	2.10	3.45	0.60	5.40	5.25	4.95	1.50	3.60	Inf
Partikel 4	0.15	2.55	1.95	0.90	1.05	2.55	0.60	3.60	2.85	16.20
Partikel 5	4.20	4.20	3.90	0.15	0.45	1.95	3.15	3.90	2.40	24.30
Partikel 6	4.95	4.35	5.85	3.15	1.95	0.60	3.60	4.65	2.55	31.65
Partikel 7	0.60	1.65	0.90	1.65	2.70	3.15	2.70	5.25	3.15	21.75
Partikel 8	5.70	3.90	5.70	1.50	4.05	1.80	4.05	4.20	0.45	31.35
Partikel 9	1.50	1.35	4.05	5.10	2.10	4.65	4.05	0	3.60	26.40
Partikel 10	2.25	5.55	0	2.70	2.55	2.70	4.65	1.95	4.65	27.00

Hasil running optimisasi ditunjukkan oleh Gambar 4.5 berikut. Solusi Qc minimum diperoleh pada iterasi 160, dengan besar Qc 2.55 MVar pada bus 7.



Gambar 4.3. Kurva konvergensi optimisasi menggunakan PSO

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	Load MW	Load Mvar	Generation MW	Generation Mvar	Injected Mvar
1	0.995	0.000	4.620	2.980	17.821	9.986	0.000
2	0.966	-1.395	0.470	0.280	0.000	0.000	0.000
3	0.959	-1.749	0.230	0.150	0.000	0.000	0.000
4	0.922	-3.786	0.120	0.070	0.000	0.000	0.000
5	0.915	-4.299	0.690	0.450	0.000	0.000	0.000
6	0.905	-5.096	0.690	0.450	0.000	0.000	0.000
7	0.900	-5.536	4.620	2.980	0.000	0.000	2.550
8	0.989	-0.166	2.750	1.820	0.000	0.000	0.000
9	0.973	-0.620	1.760	1.320	0.000	0.000	0.000
10	0.911	-4.102	1.320	0.990	0.000	0.000	0.000
Total			17.270	11.490	17.821	9.986	2.550

Gambar 4.4. Aliran daya setelah optimisasi dengan PSO

Hasil running aliran data setelah menggunakan kapasitor bank pada Bus 7 sebesar 2.55 MVar ditunjukkan pada Gambar 4.5 berikut. Setelah diberikan tambahan kapasitor bank, tegangan pada Bus 7 menjadi 0.9 pu. Bus 7 ini merupakan bus yang memiliki tegangan terendah pada kondisi sebelum dipasang kapasitor bank.

5. Kesimpulan

Berdasarkan studi kasus di atas, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut

1. Metode PSO dapat digunakan untuk menentukan lokasi dan besar kompensasi daya reaktif minimum agar tegangan bus memenuhi standar yang diijinkan.
2. Dalam komputasi, kapasitor dimodelkan sebagai injeksi daya reaktif sehingga bus yang menjadi target pemasangan kapasitor harus diset sebagai PQ bus.
3. Kompensasi daya reaktif minimal sebesar 2.55 MVar pada bus 7 di system distribusi 10 bus yang diberikan. Nilai Qc minimum didapatkan pada iterasi ke 160.
4. Qc minimum berada pada bus 7, yaitu bus yang memiliki tegangan paling rendah.
5. Hasil aliran daya setelah diberikan Qc minimum, didapatkan nilai tegangan bus berada pada batasan yang diijinkan. Tegangan minimal berada pada bus 7 sebesar 0.90 pu.

Daftar Pustaka

- [1] J. Kennedy and R. C. Eberhart. Particle swarm optimization. In Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. IEEE Service Center, Piscataway, 1995.
- [2] Singiresu S. Rao. Engineering Optimization, Theory and Practice. John Wiley & Sons, New York, fourth edition, 2009.
- [3] Y. Shi and R. C. Eberhart. Parameter selection in particle swarm optimization. In V. W. Porto, N. Saravanan, D. Waagen, and A. Eibe, editors, Proceedings of the Seventh Annual Conference on Evolutionary Programming, page 591600. Springer-Verlag, 1998.
- [4] Mahmoud Salah Ismail Abdel-Qader, " Simulation of a Hybrid Power System Consisting of Wind Turbine, PV, Storage Battery and Diesel Generator with Compensation Network: Design, Optimization and Economical Evaluation," An-Najah National University, Nablus, Palestine 2008.
- [5]. Helton Do Nasimento Alves, "A multi population Hybrid Algotihm to solve Multi objective Remote Switches Placement Problem in Distribution Networks ", Journal Control Autom Electr System, 2015.
- [6]. A Kumar Sharma V.V.S N Murty," Analysis of Mesh Distribution Systems Considering Load Models and Growth Impact with Loops on System Performance", Journal Institute Enginnering India Serc, Des 2014.