

Optimasi Tegangan-Daya Reaktif Pada Penyulang Rayap Menggunakan *Alternating Direct Methods of Multipliers*

Osea Zebua¹, I Made Ginarsa²

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro no.1, Bandar Lampung, 35145, Indonesia

²Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Jl. Majapahit no.62, Mataram, 83125, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history :

Received
Revised
Accepted

Keywords :

Optimasi Tegangan-Daya Reaktif;
ADMM;
Jaringan Distribusi;
Minimasi Rugi-rugi;
Penyulang Rayap;

ABSTRACT

The varying levels of voltage and reactive power can affect the amount of active power losses in the power distribution network. Therefore, optimization of voltage and reactive power values needs to be done to reduce the amount of active power losses while improving the voltage profile at each bus. This paper presents the optimization of voltage and reactive power in the distribution network using the alternating direct method of multipliers (ADMM) algorithm. Optimization with the ADMM algorithm is carried out by separating the optimization of continuous variables and discrete/integer variables for each iteration and implemented by simulation using MATLAB software. The case study used is the Rayap feeder distribution network at the Metro substation, Lampung Province. The simulation results show that optimization of voltage and reactive power can reduce active power losses from 37.44 kW before optimization to 34.78 kW and improve the voltage profile at each bus from a minimum voltage value of 0.9713 per unit before optimization to 0.9734 per unit. The optimal tap position of the load tap changer obtained is 17 while the capacity position of the two capacitor banks is 400 kVAR each.

Tingkat tegangan dan daya reaktif yang bervariasi dapat mempengaruhi besarnya rugi-rugi daya aktif pada jaringan distribusi tenaga listrik. Oleh karena itu, optimasi nilai tegangan dan daya reaktif perlu dilakukan untuk mengurangi besarnya rugi-rugi daya aktif sekaligus memperbaiki profil tegangan pada setiap bus. Makalah ini menyajikan optimasi tegangan dan daya reaktif pada jaringan distribusi menggunakan algoritma *alternating direct method of multipliers* (ADMM). Optimasi dengan algoritma ADMM dilakukan dengan memisahkan optimasi variabel kontinu dan variabel diskrit/integer untuk setiap iterasi dan diimplementasikan dengan simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB. Studi kasus yang digunakan adalah jaringan distribusi penyulang Rayap di gardu induk Metro, Provinsi Lampung. Hasil simulasi menunjukkan bahwa optimasi tegangan dan daya reaktif dapat mengurangi rugi-rugi daya aktif dari 37,44 kW sebelum optimasi menjadi 34,78 kW dan memperbaiki profil tegangan pada setiap bus dari nilai tegangan minimum sebesar 0,9713 per unit sebelum optimasi menjadi 0,9734 per unit. Posisi tap optimal dari pengubah tap beban yang diperoleh adalah 17 sedangkan posisi kapasitas dari dua kapasitor bank masing-masing adalah 400 kVAR.

Corresponding Author:

Osea Zebua, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro no.1, Bandar Lampung, 35145, Indonesia
Email: osea.zebua@eng.unila.ac.id

1. PENDAHULUAN

Tegangan yang bervariasi pada jaringan distribusi berhubungan erat dengan rugi-rugi daya aktif dan perbedaan fasa yang besar antara tegangan dan arus. Hampir 10% daya listrik yang disalurkan hilang sebagai rugi-rugi daya aktif. Oleh karena itu, optimasi nilai tegangan dan daya reaktif dari sumber-sumber daya reaktif perlu dilakukan untuk mengurangi rugi-rugi daya aktif yang terjadi. Optimasi tegangan dan daya

reaktif merupakan hal yang penting dalam mengoptimalkan operasi penyaluran daya pada jaringan distribusi. Selain mengurangi rugi-rugi daya aktif, optimasi tegangan dan daya reaktif ini juga mengoptimalkan penyaluran daya, peningkatan kemampuan sistem untuk melayani beban lebih lanjut dan mengurangi beban puncak [1].

Optimasi tegangan dan daya reaktif merupakan aplikasi lanjut dari teknik optimasi aliran daya. Pengaturan level tegangan dan aliran daya reaktif dilakukan dengan mengontrol pengubah tap beban (*load tap-changer/LTC*) dan daya reaktif dari bank kapasitor paralel yang dapat di-*switch* (*switched capacitor bank/SCB*). Masalah optimasi tegangan dan daya reaktif ini dirumuskan dengan fungsi objektif mengurangi rugi-rugi daya aktif dan mempertahankan profil tegangan di seluruh jaringan distribusi dengan memenuhi batasan-batasan fisik dan operasi [2-3].

Model matematis dari optimasi tegangan dan daya reaktif ini berdasarkan model optimasi aliran daya dengan mengikutsertakan variabel yang diskrit/integer, yakni LTC pada transformator atau regulator tegangan dan pensaklaran bank kapasitor. Hal ini membuat masalah optimasi tegangan dan daya reaktif menjadi masalah *mixed-integer nonlinear and non-convex* (MINLP) [4].

Beberapa pendekatan telah dibuat dalam penyelesaian masalah optimasi tegangan dan daya reaktif ini, antara lain dengan meng-konveks-kan ruang penyelesaian masalah, dengan menggunakan model relaksasi atau model perkiraan dari jaringan distribusi, serta menggunakan pendekatan penyelesaian heuristik dan genetik. Namun pendekatan-pendekatan ini belum memastikan konvergensi penyelesaian masalah secara global [5]. Pada beberapa penelitian sebelumnya, model matematis optimasi diubah sebagai model *mixed-integer quadratically constrained*, model *multi-objective* MINLP, model *heuristic penalty-based method* MINLP dengan kombinasi logika fuzzy dan algoritma genetika [6-10].

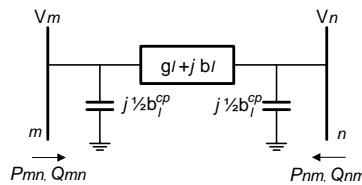
Salah satu metode yang digunakan dalam penyelesaian masalah optimasi aliran daya dan optimasi tegangan dan daya reaktif adalah metode arah alternatif dari pengali (*alternating direction method of multipliers/ADMM*). Beberapa penelitian sebelumnya menggunakan teknik heuristik dari metode ADMM untuk penyelesaian masalah optimasi aliran daya [11], dan menggunakan algoritma ADMM berbasis konsensus dalam penyelesaian masalah optimasi tegangan-daya reaktif [12-13].

Pada makalah ini, optimasi tegangan dan daya reaktif menggunakan algoritma ADMM dilakukan dengan memisahkan dua proses optimasi untuk variabel kontinyu dan variabel diskrit/integer [14]. Pendekatan *responsive tuning* ditambahkan pada fungsi objektif menggunakan fungsi Lagrange, untuk memastikan penyelesaian yang konvergen dengan tetap mempertahankan kualitas penyelesaian.

2. METODE

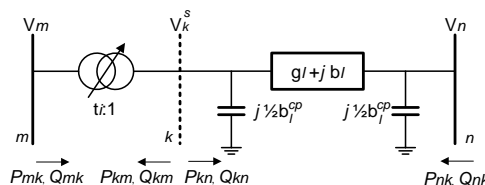
2.1. Pemodelan Jaringan Distribusi

Jaringan distribusi dengan N bus (*node*) dimodelkan dengan model ekuivalen phi yang terdiri dari impedansi seri $g_l + j b_l$ dan suseptansi (impedansi paralel) total b_l^{cp} antara bus m dan bus n , seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Komponen-komponen yang berperan dalam pengaturan tegangan dan daya reaktif pada jaringan distribusi adalah pengubah tap beban (LTC), regulator tegangan dan bank kapasitor yang dapat di-*switch* kapasitasnya atau *switched capacitor bank* (SCB).



Gbr. 1. Saluran Distribusi Model Ekuivalen Phi

Transformator daya dan regulator tegangan yang diperlengkapi dengan LTC dimodelkan sebagai transformator ideal yang terhubung seri dengan bus m dan bus n [15], seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Tegangan pada sisi sekunder, V_k^s , dihitung dengan,



Gbr. 2. Saluran distribusi dengan pengubah tap beban

$$V_k^s = \frac{V_m}{t_i}, \quad m \in N^t, \quad i, k = [1, \dots, A] \quad (1)$$

dengan,

$$t_i = t_i^{\min} + u_i^t \delta_i^t, \quad u_i^t \in D_i^t \quad (2)$$

$$V_m^{\min}/t_i^{\max} \leq V_k^s \leq V_m^{\max}/t_i^{\min} \quad (3)$$

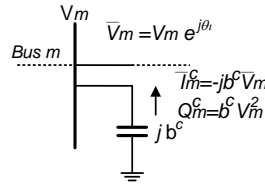
dimana V_m adalah tegangan pada bus m , V_m^{\min} dan V_m^{\max} masing-masing adalah nilai tegangan minimum dan tegangan maksimum pada bus m , t_i adalah nilai tap dari LTC, t_i^{\min} dan t_i^{\max} masing-masing adalah nilai tap terkecil dan nilai tap terbesar dari LTC, u_i^t adalah variabel diskrit/integer dari nilai tap, δ_i^t adalah persentase pengaturan tegangan tap dan D_i^t adalah himpunan nilai tap.

Perubahan daya dari suatu transformator yang ideal harus memenuhi beberapa batasan berikut,

$$\theta_k = \theta_m, \quad P_{mk} = P_{kn}, \quad Q_{mk} = Q_{kn} \quad (4)$$

dimana θ_k dan θ_m masing-masing adalah sudut tegangan pada bus k dan bus m , P_{mk} dan Q_{mk} masing-masing adalah daya aktif dan daya reaktif antara bus m dan bus k , serta P_{kn} dan Q_{kn} masing-masing adalah daya aktif dan daya reaktif antara bus k dan bus n .

Model dari SCB secara matematis dapat dimodelkan sebagai sumber injeksi daya kapasitif murni seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gbr.3. SCB pada bus

Daya reaktif injeksi aktual dari SCB, Q_m^c , dihitung dengan:

$$Q_m^c = b_i^c V_m^2, \quad m \in N^c, \quad i = [1, \dots, \mathcal{Y}] \quad (5)$$

dengan,

$$b_i^c = b_i^{c,\min} + u_i^c \delta_i^c, \quad u_i^c \in D_i^c \quad (6)$$

$$Q_m^{c,\min} \leq Q_m^c \leq Q_m^{c,\max} \quad (7)$$

dimana b_i^c adalah nilai injeksi suseptansi kapasitif, V_m adalah tegangan pada bus m , $b_i^{c,\min}$ adalah nilai injeksi suseptansi kapasitif minimum, u_i^c adalah variabel diskrit/integer dari kapasitas bank kapasitor, δ_i^c adalah persentase pengaturan kapasitas kapasitor, D_i^c adalah himpunan nilai integer untuk kapasitas bank kapasitor, serta $Q_m^{c,\min}$ dan $Q_m^{c,\max}$ masing-masing adalah nilai minimum dan nilai maksimum dari kapasitas bank kapasitor.

Aliran daya aktif dan daya reaktif yang mengalir pada saluran distribusi l di antara bus m dan n , P_{mn} dan Q_{mn} , dapat dihitung sebagai:

$$P_{mn} = g_l V_m^2 - V_m V_n (g_l \cos \theta_{mn} + b_l \sin \theta_{mn}), \quad mn \in l, l \in L \quad (8)$$

$$Q_{mn} = -(b_l + b_l^{cp}) V_m^2 + V_m V_n (b_l \cos \theta_{mn} - g_l \sin \theta_{mn}) \quad (9)$$

Rugi-rugi daya aktif pada saluran distribusi l , P_l^{loss} , dihitung dengan,

$$P_l^{\text{loss}} = P_{mn} + P_{nm} = g_l (V_m^2 + V_n^2 - 2V_m V_n \cos \theta_{mn}) \quad (10)$$

dimana b_l dan g_l masing-masing adalah nilai suseptansi dan nilai konduktansi dari saluran antara bus m dan bus n .

2.2. Optimasi Tegangan dan Daya Reaktif

Masalah optimasi tegangan dan daya reaktif dirumuskan sebagai masalah MINLP. Dengan memisalkan z sebagai vektor dari variabel-variabel integer/diskrit dan x sebagai vektor dari variabel-variabel kontinu, maka:

$$z \in [u^t, u^c]^T, \quad u^t = [u_1^t, \dots, u_A^t], \quad u^c = [u_1^c, \dots, u_\psi^c] \quad (11)$$

$$x = [V, \theta, V^s, Q^c]^T \quad (12)$$

dimana u^t adalah vektor dari unit posisi tap, u^c adalah vektor dari unit kapasitas bank kapasitor, V adalah vektor tegangan, θ adalah vektor sudut tegangan, V^s adalah vektor tegangan pada sisi sekunder transformator dan Q^c adalah vektor kapasitas SCB, dengan:

$$V = [V_1, \dots, V_N], \quad \theta = [\theta_1, \dots, \theta_N], \quad V^s = [V_1^s, \dots, V_A^s], \quad Q^c = [Q_1^c, \dots, Q_\psi^c] \quad (13)$$

Fungsi objektif dari optimasi tegangan dan daya reaktif adalah meminimalkan penjumlahan dari rugi-rugi daya aktif pada saluran distribusi dan beban yang tergantung pada tegangan pada (9):

$$\min f(x) = \min \sum_{l \in N_l} P_l^{loss}(x) + \sum_m^N P_m^d \quad (14)$$

Fungsi objektif pada (14) harus memenuhi batasan-batasan, antara lain:

a. Keseimbangan daya aktif dan daya reaktif,

$$\Delta P_m(x) = \sum_{g \in m} P_m^g - \sum_{d \in m} P_m^d - \sum_{\substack{n \in \Omega_m \\ n \neq 1}} P_{mn}(x) = 0 \quad (15)$$

$$\Delta Q_m(x, z) = \sum_{g \in m} Q_m^g - \sum_{c \in m} Q_m^c(x, z) - \sum_{d \in m} Q_m^d - \sum_{\substack{n \in \Omega_m \\ n \neq 1}} Q_{mn}(x, z) = 0 \quad (16)$$

b. Batas operasi dan keamanan dari kapasitas transfer maksimum saluran distribusi,

$$|S_l| = |P_{mn} + Q_{mn}| \leq S_l^{max} \quad (17)$$

c. Batasan magnitude tegangan bus,

$$V_m^{min} \leq V_m \leq V_m^{max} \quad (18)$$

d. Batasan sudut tegangan bus,

$$\theta_m^{min} \leq \theta_m \leq \theta_m^{max}, \quad m \in N \quad (19)$$

e. Nilai tegangan dan sudut pada bus referensi (*slack*) masing-masing 1 dan 0:

$$V_{slack} = 1, \quad \theta_{slack} = 0 \quad (20)$$

f. Batasan variabel diskrit/integer:

$$h = \begin{bmatrix} V_1^s - V_1/t_1 \\ \vdots \\ V_A^s - V_N/t_A \\ Q_1^c - b_1^c V_1^2 \\ \vdots \\ Q_N^c - b_\psi^c V_N^2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Masalah optimasi kemudian dapat ditulis sebagai:

$$\min_{x \in X, z \in Z} f(x) \quad (22)$$

dengan memenuhi:

$$h(x, z) = 0: \lambda \quad (23)$$

2.3. Optimasi Tegangan dan Daya Reaktif Menggunakan ADMM

Dengan menggunakan fungsi Lagrange pada masalah optimasi tegangan dan daya reaktif [16], maka,

$$(x, z, \lambda) = f(x) + \lambda^T(h(x, z)) \quad (24)$$

dimana λ adalah vektor pengali Lagrange. Dengan menganggap vektor batasan $h(x, z)$ sebagai bagian penalti positif [17], maka (24) dapat dirumuskan sebagai:

$$L(x, z, \lambda) = f(x) + \lambda^T(h(x, z)) + \frac{\rho}{2} \|h(x, z)\|_2^2 \quad (25)$$

Dimana ρ parameter penalti dan $\|\cdot\|_2^2$ adalah kuadrat norm-2 dari vektor batasan. Dengan menskalakan pengali Lagrangian $\eta = \lambda/\rho$, maka (25) dapat ditulis sebagai:

$$L(x, z, \eta) = f(x) + \frac{\rho}{2} \|h(x, z)\|_2^2 - \frac{\rho}{2} \|\eta\|_2^2 \quad (26)$$

Optimasi tegangan dan daya reaktif dilakukan dengan dua proses, yang pertama adalah minimasi fungsi objektif sepanjang variabel kontinu x dengan menganggap variabel diskrit z dan pengali η adalah konstan, dan dirumuskan sebagai,

$$\min_x \sum_l^L P_l^{loss}(x) + \sum_m^N P_m^d + \frac{\rho}{2} \|h(x, \hat{z}) + \hat{\eta}\|_2^2 \quad (27)$$

dengan memenuhi (3), (4), (7)-(9), (15)-(20).

Proses kedua adalah optimasi variabel diskrit/integer z dengan menganggap variabel-variabel kontinu x dan pengali sebagai konstanta. Variabel integer direlaksasi di antara batas atas dan batas bawahnya. Nilai z didekatkan ke nilai integer terdekat bila proses optimasi selesai. Rumusan proses kedua ini, dapat ditulis sebagai,

$$\min_x \frac{\rho}{2} \|h(\hat{x}, z) + \hat{\eta}\|_2^2 \quad (28)$$

dengan memenuhi:

$$D_i^{t,min} \leq u_i^t \leq D_i^{t,max} \quad (29)$$

$$D_i^{c,min} \leq u_i^c \leq D_i^{c,max} \quad (30)$$

dimana $D_i^{t,min}$ dan $D_i^{t,max}$ adalah nilai minimum dan nilai maksimum dari himpunan nilai tap serta $D_i^{c,min}$ dan $D_i^{c,max}$ masing-masing adalah nilai minimum dan nilai maksimum dari himpunan nilai integer kapasitas bank kapasitor.

Proses iterasi dilakukan terhadap variabel kontinu, variabel diskrit/integer serta pengali Lagrange, dan dirumuskan sebagai berikut:

$$x^{j+1} = \arg \min_x L_\rho(x, z^j, \eta^j) \quad (31)$$

$$z^{j+1} = \arg \min_z L_\rho(x^{j+1}, z, \eta^j) \quad (32)$$

$$\eta^{j+1} = \eta^j + h(x^{j+1}, z^{j+1}) \quad (33)$$

Kriteria penghentian (*stopping criterion*) untuk proses iterasi variabel kontinu pada proses pertama adalah bila,

$$\lim_{j \rightarrow \infty} h(x^j, z^j) = 0 \quad (34)$$

Sementara kriteria penghentian pada proses iterasi variabel diskrit/integer (proses kedua) adalah bila:

$$\lim_{j \rightarrow \infty} (z^j - z^{j-1}) = 0 \quad (35)$$

dengan j adalah penghitung iterasi.

Proses iterasi berlanjut sampai hasil yang optimal dan layak diperoleh. Hal ini diperiksa dengan kriteria penghentian sebagai berikut:

Residu layak (residu primal):

$$\|r^{j+1}\|_2 = \|\eta^{j+1} - \eta^j\|_2 \leq \epsilon_1 \quad (36)$$

Residu stasioner (residu dual):

$$\|s^{j+1}\|_2 = \|z^{j+1} - z^j\|_2 \leq \epsilon_2 \quad (37)$$

dimana ϵ_1 dan ϵ_2 adalah nilai toleransi yang nilainya sangat kecil.

Dua koefisien penskalaan α dan β digunakan untuk mengontrol setiap bobot bagian dari fungsi batasan,

$$h^\delta = \begin{cases} \alpha(V_k^s - V_m/t_i) & \forall m \in N, \quad i, m = [1, \dots, A] \\ \beta(Q_m^c - b_i^c V_m^2) & \forall m \in N^c, \quad i = [1, \dots, \Psi] \end{cases} \quad (38)$$

Jika $\alpha > \beta$, maka hal ini menunjukkan bahwa pengubah tap beban mempunyai dampak yang lebih besar dari SCB. Kriteria pembaharuan dari parameter penalti ρ ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$\rho^{j+1} = \begin{cases} v \cdot \rho^j, & \text{jika } \|r^j\|_2 > \mu \|s^j\|_2 \\ \rho^j / v, & \text{jika } \|s^j\|_2 > \mu \|r^j\|_2 \\ \rho^j, & \text{lainnya} \end{cases} \quad (39)$$

dimana v dan μ adalah konstanta penalaan.

Prosedur optimasi tegangan dan daya reaktif dengan menggunakan algoritma ADMM diringkaskan sebagai berikut:

- Masukkan data-data jaringan distribusi.
- Inisialisasi nilai variabel z dan η .
- Seting nilai parameter-parameter: $j = 1, \epsilon_1, \epsilon_2, \rho, \mu, K^s, \alpha$ dan β .
- Jika kriteria penghentian pada (34) dan (35) tidak dipenuhi, maka,
- Selesaikan proses optimasi pertama pada (27).
- Selesaikan proses optimasi kedua pada (28).
- Set hasil variabel z ke nilai integer terdekat.
- Perbaharui vektor dual η pada (33).
- Periksa konvergensi pada (36) dan (37), jika $j \geq 4$ dan $\text{mod}(j, K^s) = 0$, maka perbaharui parameter penalti ρ^{j+1} sesuai dengan (39).
- Perbaharui penghitung $j = j + 1$.
- Jika kriteria penghentian dipenuhi, cetak hasil.

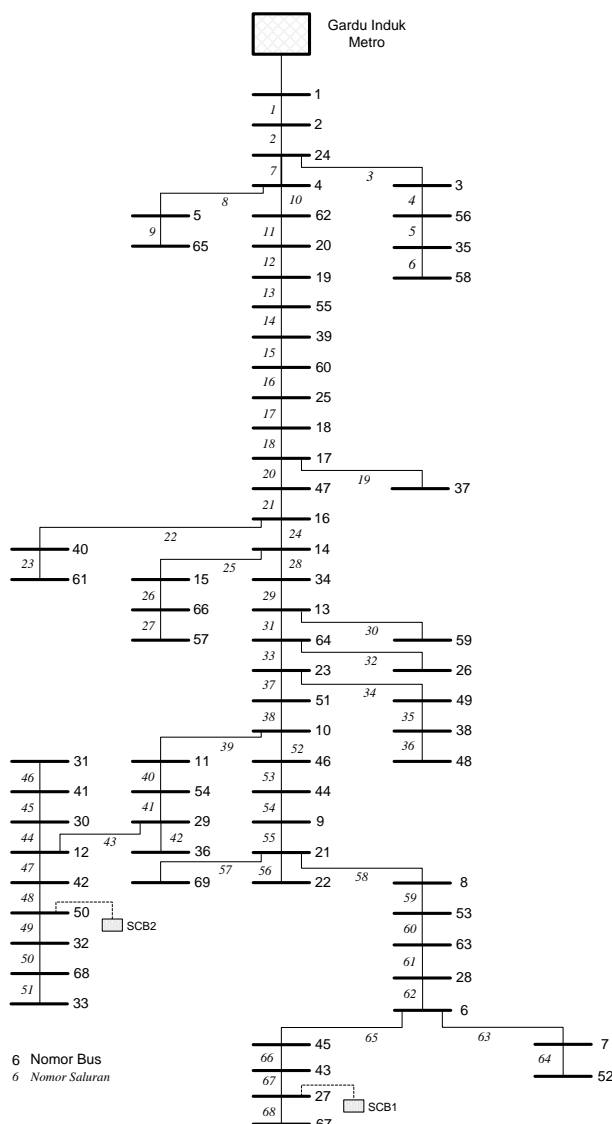
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Optimasi tegangan dan daya reaktif pada jaringan distribusi dengan menggunakan ADMM diimplementasikan pada penyulang Rayap di gardu induk Metro. Implementasi optimasi dilakukan dengan simulasi menggunakan MATLAB. Diagram satu garis berdasarkan data saluran dan beban ditunjukkan pada Gambar 4. Penyulang Rayap terdiri dari 69 bus dan 69 saluran. Data beban yang digunakan merupakan data beban maksimum setiap bus dan ditunjukkan pada Tabel 1 [18].

Tabel 1. Data Beban Penyulang Rayap

Nomor bus	Beban		Nomor bus	Beban		Nomor bus	Beban	
	P (kW)	Q (kVAR)		P (kW)	Q (kVAR)		P (kW)	Q (kVAR)
1	0	0	24	0.0493027	0.03055508	47	0.0391090	0.02423757
2	0	0	25	0.0582590	0.03610569	48	0.0006800	0.0004200
3	0	0	26	0.0598115	0.0370678	49	0.05973732	0.03702186
4	0	0	27	0.0348106	0.02157365	50	0.0147016	0.00911123
5	0	0	28	0.0429930	0.02664467	51	0.0513427	0.03181936
6	0	0	29	0.0694511	0.04304194	52	0.0006800	0.0004200
7	0	0	30	0.0616539	0.03820965	53	0.0775200	0.04804258
8	0	0	31	0.0778328	0.04823643	54	0.06368472	0.03946824
9	0	0	32	0.0773492	0.04793672	55	0.01430176	0.008863435
10	0	0	33	0.0664057	0.04115454	56	0.0006800	0.0004200
11	0	0	34	0.0509946	0.03160359	57	0.1335622	0.08277442
12	0	0	35	0.0512666	0.03177216	58	0.06723264	0.0220983
13	0	0	36	0.0539413	0.0334298	59	0.01911096	0.006281469
14	0	0	37	0.0698877	0.0433125	60	0.0782496	0.0257194
15	0	0	38	0.0440232	0.02728313	61	0.03213432	0.01056204
16	0	0	39	0.0550256	0.0341018	62	0.0007600	0.0002500
17	0	0	40	0.0198900	0.01232672	63	0.04253568	0.0139808

18	0	0	41	0.0504397	0.03125971	64	0.02469192	0.008115844
19	0	0	42	0.0622037	0.03855038	65	0.1496	0.09271375
20	0	0	43	0.0510762	0.03165416	66	0.0222768	0.01380592
21	0.0504832	0.03128668	44	0.1234649	0.07651666	67	0.03644256	0.02258507
22	0.0184569	0.01143856	45	0.0306054	0.01896755	68	0	0
23	0.0553781	0.03432027	46	0.0006100	0.0003800	69	0	0



Gbr. 4. Diagram satu garis Penyulang Rayap

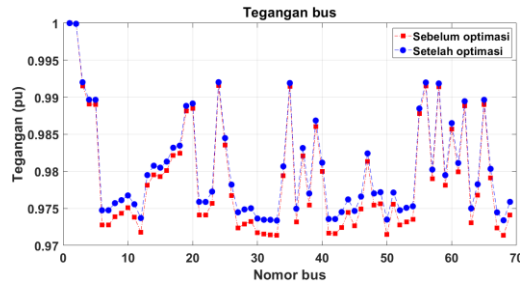
Dua SCB masing-masing dengan kapasitas 400 kVar dipasang pada bus 27 dan bus 50. LTC terdapat pada sisi sekunder transformator daya di gardu induk Metro dengan jumlah tap adalah 17 dan persen pengaturan adalah $\pm 5\%$. Oleh karena itu, nilai-nilai pada (2) adalah $D_i^t = [0 \dots 16]$, $\delta_1^t = \frac{5}{8}\% = 0,00625$ dan $t_1^{min} = 0,9 - 0,00625 = 0,89375$ pu. Kapasitas bank kapasitor yang dapat di-switch adalah setiap kelipatan 50 kVAR dengan nilai integer maksimum adalah 8.

Parameter-parameter dari algoritma ADMM yang digunakan dalam simulasi ini antara lain adalah toleransi residu feasibilitas, ϵ_1 dan residu stasioner ϵ_2 masing-masing adalah 10^{-6} . Seting parameter-parameter lainnya adalah $K_s = 100$, $\alpha = 1$, $\beta = 1$, nilai parameter penalti, $\rho = 40$, dan konstanta pembaharuan parameter penalti, $\nu = 2$ dan $\mu = 10$. Nilai maksimum dan minimum dari tegangan setiap bus adalah $V_m^{min} = 0,6$ pu dan $V_m^{max} = 1,0$ pu.

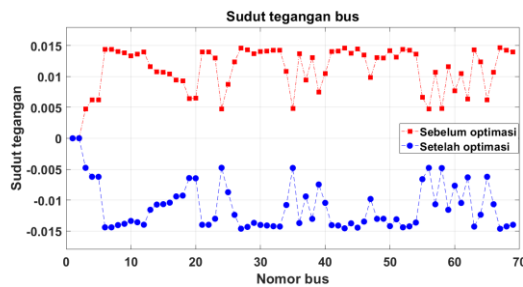
Hasil simulasi untuk penyulang Rayap sebelum optimasi tegangan dan daya reaktif dilakukan adalah rugi-rugi daya aktif total yang diperoleh sebesar 37,44 kW dengan tegangan minimum sebesar 0,9713 p.u.

Optimasi tegangan dan daya reaktif dilakukan dengan menentukan posisi tap dari LTC dan nilai kapasitas yang kemudian dipasang pada bus 27 dan bus 50 yang memenuhi batasan-batasan yang telah ditentukan. Rugi-rugi daya aktif total yang diperoleh setelah optimasi tegangan dan daya reaktif dilakukan adalah sebesar 34,78 kW dengan nilai tegangan minimum adalah sebesar 0,9734 p.u. Posisi tap yang diperoleh adalah posisi 17 atau posisi tap dengan pengaturan maksimum, sedangkan nilai kapasitas untuk SCB1 dan SCB2 masing-masing adalah 400 kVAR atau dengan nilai integer masing-masing adalah 8.

Perbandingan nilai tegangan setiap bus sebelum optimasi dan setelah optimasi ditunjukkan pada gambar 5. Dari gambar 5 dapat dilihat bahwa tegangan di semua bus semakin naik setelah optimasi tegangan dan daya reaktif dilakukan. Sudut tegangan setiap bus semakin negatif setelah dilakukan optimasi dibandingkan sebelum dilakukan optimasi seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Hal ini berarti mengurangi penggunaan daya reaktif dari setiap bus dan memperkecil terjadinya jatuh tegangan.

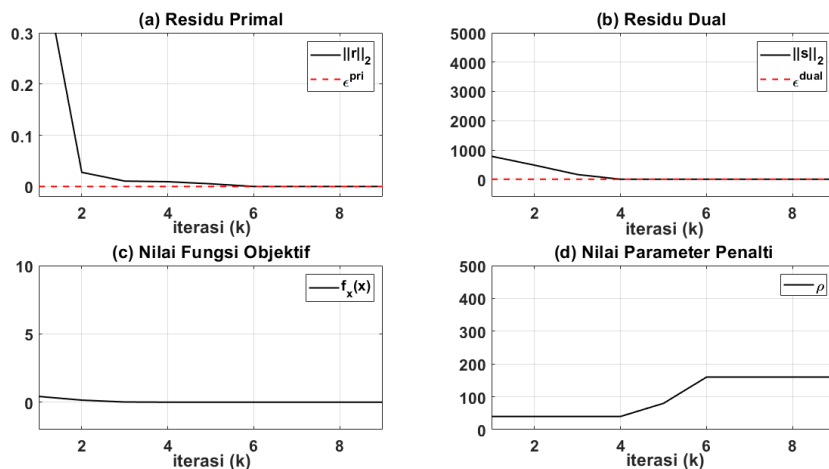


Gbr. 5. Nilai tegangan setiap bus sebelum optimasi dan sesudah optimasi



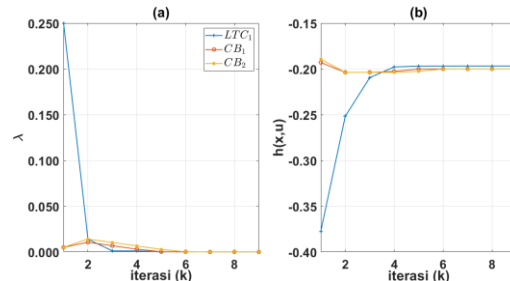
Gbr. 6. Sudut tegangan bus sebelum optimasi dan sesudah optimasi

Selama proses iterasi, nilai residu primal (layak) dan residu dual (stasioner) semakin menurun dan nilai akhirnya lebih kecil dari nilai toleransi yang sudah ditentukan sehingga menghentikan simulasi pada iterasi ke-12, seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Gambar 7 juga menunjukkan nilai fungsi objektif yakni rugi-rugi daya aktif total yang semakin menurun dan mencapai nilai optimalnya pada iterasi ke-9. Nilai parameter penalti, ρ , semakin menaik setelah iterasi ke-4, saat nilai residu primal melebihi nilai residu dual, sesuai dengan (39) dan mencapai nilai 160 pada iterasi ke-6.



Gbr. 7. Nilai-nilai residu primal, residu dual, fungsi objektif dan parameter penalti selama iterasi

Selama proses iterasi, nilai-nilai vektor pengali Lagrange, λ^T , dan vektor batasan untuk variabel diskrit/integer, $h(x, z)$, yakni untuk LTC dan dua CB, berubah menuju nol pada iterasi terakhir seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Hal ini terjadi untuk memenuhi nilai optimal dari optimasi tegangan dan daya reaktif dalam fungsi Lagrange pada (27) dan (28).



Gbr. 8. (a) Nilai-nilai pengali Lagrange dan (b) Vektor batasan untuk variabel diskrit/integer selama iterasi.

Dari hasil simulasi, optimasi tegangan-daya reaktif menggunakan algoritma ADMM mampu memperoleh nilai fungsi objektif yang optimal dengan memenuhi batasan-batasan yang sudah ditentukan dan algoritma ADMM dapat menjamin konvergen ke nilai yang optimal dengan waktu simulasi selama kurang dari 3 menit. Optimasi tegangan dan daya reaktif menggunakan algoritma ADMM ini dapat digunakan untuk penentuan kapasitas bank kapasitor yang akan dipasang pada jaringan distribusi, penentuan tap dari regulator tegangan yang terdapat pada jaringan distribusi dan penentuan posisi tap dari LTC di sisi sekunder transformator daya di gardu induk, pada berbagai kondisi pembebanan selama operasi jaringan distribusi. Pada kasus dimana jaringan distribusi sangat panjang, perlu untuk memperhatikan penentuan batas-batas tegangan dengan rentang yang lebih besar, sehingga menjamin konvergensi algoritma.

4. KESIMPULAN

Optimasi tegangan dan daya reaktif menggunakan algoritma *Alternating Direct Methods of Multipliers* (ADMM) mampu mengurangi rugi-rugi daya aktif pada penyulang Rayap di gardu induk Metro dari 37,44 kW menjadi 34,78 kW dengan menentukan posisi optimal dari tap pengubah beban (LTC), yakni di posisi 17, dan kapasitas dari dua kapasitor bank yang dapat di-switch (SCB), yakni masing-masing 400 kVAR. Optimasi tegangan dan daya reaktif dengan algoritma ADMM dapat digunakan untuk penentuan kapasitas SCB, penentuan tap LTC pada transformator daya dan penentuan tap dari regulator tegangan baik pada jaringan transmisi maupun pada jaringan sistem distribusi tenaga listrik dengan batas-batas yang diinginkan.

REFERENSI

- [1] X. Feng, and W. Peterson, "Volt/VAR Optimization Reduces Losses, Peak Demands," *Electric Energy T&D Magazine*, vol.14, no.1, 2010.
- [2] A. Padilha-Fetrin, D.A.Q. Rodezno, and J. R. S. Mantovani, "Volt-VAR Multiobjective Objective Optimization to Peak-Load Relief and Energy Efficiency in Distribution Networks," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol.30, no.2, pp.618-626, 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2336598.
- [3] O. Zebua dan I. M. Ginarsa, "Optimal Reactive Power Dispatch untuk Meminimisasi Rugi-rugi Daya Aktif Pada Sistem Lampung Menggunakan Metode Grey-Wolf Optimizer (GWO)," *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, vol.6, no.2, pp.90-96, 2017, doi: 10.25077/jnte.v6n2.414.2017.
- [4] H. Mataifa, S. Krishnamurthy, and C. Kriger, "Volt/VAR Optimization: A Survey of Classical and Heuristic Optimization Methods," *IEEE Access*, vol.10, pp.13379-13399, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3146366.
- [5] K. Christakou, D. C. Tomozei, J. Y. Le Boudec, and M. Paolone, "AC OPF in Radial Distribution Networks-Part I: On the Limit of the Branch Flow Convexifications and the Alternating Direction Method of Multipliers," *Electric Power System Research*, vol.143, pp.438-450, 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2016.07.030.
- [6] E. M. Soler, E. N. Asada, G. R. M. da Costa, "Penalty-Based Nonlinear Solver for Optimal Reactive Power Dispatch With Discrete Controls," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol.28, no.3, pp.2174-2182, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2013.2252207.
- [7] H. Ahmadi, J. R. Marti, and H. W. Dommel, "A Framework for Volt-VAR Optimization in Distribution Systems," *IEEE Transaction on Smart Grid*, vol.6, no.3, pp.1473-1483, 2015, doi: 10.1109/TSG.2014.2374613.
- [8] L. Yutian, Z. Peng, and Q. Xizhao, "Optimal Volt/Var Control in Distribution System," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol.24, no.4, pp.271-276, 2002, doi: 10.1016/S0142-0615(01)00032-1.

- [9] M. Ahmadi, A. Salami, and M. Alavi, "A Novel Robust Volt/Var Optimization Method Based on Worst Case Scenarios for Distribution Network Operation," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol.17, no.7, pp.1419-1685, 2023, doi: 10.1049/gtd2.12777.
- [10] R. R. Jha, A. Dubey, T. Hong, and D. Zhao, "Distributed Algorithm for Volt-VAR Optimization in Unbalanced Distribution System," *Proceedings of 2020 IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, pp.1-5, 2020, doi: 10.1109/ISGT45199.2020.9087698.
- [11] L. Wentian, L. Mingbo, L. Shunjiang, and L. Licheng, "Incremental-oriented ADMM for Distributed Optimal Power Flow With Discrete Variables in Distribution Networks," *IEEE Transaction on Smart Grid*, vol.10, no.6, pp.6320-6331, 2019, doi: 10.1109/TSG.2019.2902255.
- [12] Y. Ju, Z. Zhang, W. Wu, W. Liu and R. Zhang, "A Bi-level Consensus ADMM-based Fully Distributed Inverter-based Volt/VAR Control Method for Active Distribution Networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 1, pp. 476-487, 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3097798.
- [13] A. Inaolaji, A. Savasci, S. Paudyal, and S. Kamalasan, "A Consensus ADMM-Based Distributed Volt-Var Optimization for Unbalanced Distribution Networks," *Proceeding of 2022 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, pp.1-8, 2022, doi: 10.1109/IAS54023.2022.9939862.
- [14] A. Alburidy dan L. Fan, "An Alternating Direction Method of Multipliers-Based Approach to Solve Mixed-integer Nonlinear Volt/Var Optimization Problems in Distribution Systems," *International Transaction of Electrical and Energy Systems*, Vol. 21, hal. 1-23, 2021, doi: 10.1002/2050-7038.12795.
- [15] R. D. Zimmermann, C. E. Murillo-Sanchez, and R. J. Thomas, "MATPOWER: Steady-state Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education," *IEEE Transaction on Power System*, vol.26, no.1, pp.12-19, 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2010.2051168.
- [16] S. Magnusson, P. C. Weeraddana, M. G. Rabbat, and C. Fischione, "On Convergence of Alternating Direction Lagrangian Methods for Nonconvex Structured Optimization Problems," *IEEE Transaction on Control Network Systems*, vol.3, no.3, pp.296-309, 2016, doi: 10.1109/TCNS.2015.2476198.
- [17] M. Long, Z. Q. Luo, and M. Razaviyayn, "Convergence Analysis of Alternating Method of Multipliers for a Family of Nonconvex Problems," *SIAM Journal of Optimization*, vol.26, no.1, pp.337-364, 2016, doi: 10.1137/140990309.
- [18] PT. PLN (Persero) Distribusi Wilayah Lampung, "Data Gardu Induk Metro", 2024.

BIOGRAPHY OF AUTHORS



Osea Zebua memperoleh gelar Sarjana Teknik dari Universitas Sumatera Utara tahun 1995 dan Magister Teknik dari Universitas Gadjah Mada tahun 2001. Sekarang bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung. Bidang penelitian yang ditekuni adalah optimasi sistem tenaga listrik, operasi dan perencanaan serta stabilitas sistem tenaga listrik.



I Made Ginarsa memperoleh gelar Sarjana Teknik dari Universitas Udayana tahun 1997, Magister Teknik dari Universitas Gadjah Mada tahun 2001 dan Doktor dari Institut Sepuluh Nopember tahun 2012. Sekarang bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Mataram. Bidang penelitian yang ditekuni adalah optimasi sistem tenaga listrik, operasi dan perencanaan serta stabilitas sistem tenaga listrik.