

Performa Metode Aliran Daya *Fast Decoupled* di Jaringan Distribusi

Giri Angga Setia¹, Fauzia Haz², Gibson HM Sianipar³

^{1,2}Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani
Jl. Terusan Jenderal Suridman, Cimahi, Indonesia

³Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No. 10, Bandung, Indonesia
giri.anggasetia@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Makalah ini menyajikan suatu performa metode aliran daya *fast decoupled* di jaringan distribusi. Karakteristik jaringan distribusi diantaranya rasio saluran R/X tinggi, struktur radial, saluran terdiri dari 1, 2, dan 3 fasa, serta beban tidak seimbang. Permasalahan mengenai kompleksnya karakteristik jaringan tersebut menuntut para peneliti untuk mengembangkan metode aliran daya konvensional agar dapat diterapkan. Metode aliran daya *fast decoupled* dapat bekerja dengan baik di jaringan transmisi. Karakteristik jaringan distribusi dengan rasio saluran R/X yang tinggi mengurangi kemampuan konvergensinya dan bahkan terjadi divergensi. Oleh karena itu, makalah ini mengajukan pengembangan metode *fast decoupled* berupa rotasi sumbu yang dilakukan di setiap bus. Pengujian dilakukan pada standar jaringan distribusi IEEE 13 dan 34 bus. Performa pada jaringan distribusi 13 bus membutuhkan 3,5 iterasi dengan waktu komputasi 0,049 detik dan sudut rotasi optimal $-43,4^\circ$, sedangkan performa pada jaringan distribusi 34 bus membutuhkan 4 iterasi dengan waktu komputasi 0,152 detik dan sudut rotasi optimal $-61,4^\circ$. Ketika dibandingkan dengan metode *Backward-Forward Sweep* (BFS) yang merupakan metode favorit dalam melakukan perhitungan aliran daya di jaringan distribusi radial, menunjukkan bahwa keduanya memiliki performa yang sama baiknya. Oleh karena itu, metode rotasi sumbu *fast decoupled* layak diterapkan dengan variasi karakteristik jaringan distribusi. Selain itu, metode ini dapat diterima secara umum karena tidak hanya dapat diterapkan dengan baik di jaringan transmisi, tetapi di jaringan distribusi.

Kata kunci: aliran daya, *backward-forward sweep*, *fast decoupled*, jaringan distribusi, rotasi sumbu

Abstract

This paper presents a performance of the fast-decoupled power flow method in the distribution network. Distribution network characteristics include high R/X line ratio, radial structure, lines consisting of 1, 2, and 3 phases, and unbalanced loads. The problem with the complexity of these network characteristics requires researchers to develop conventional power flow methods which can be applied. The fast-decoupled power flow method can work well on the transmission network. The characteristics of distribution networks with high R/X line ratios reduce their convergence ability and even divergence. Therefore, this paper proposes the development of the fast-decoupled method in the form of axis rotation carried out on each bus. The tests were carried out on the IEEE 13 and 34 bus distribution network standards. Performance on the 13 bus distribution network requires 3.5 iterations with a computing time of 0.049 seconds and an optimal rotation angle of -43.4° , while the performance of the 34 bus distribution network requires 4 iterations with a computation time of 0.152 seconds and an optimal rotation angle of -61.4° . When compared with the Backward-Forward Sweep (BFS) method which is the favourite method of calculating power flow in a radial distribution network, it shows that both have the same good performance. Therefore, fast-decoupled axis rotation method is feasible with a variety of distribution network characteristics. In addition, this method is generally accepted because it can not only be applied well in transmission networks, but also in distribution networks.

Keywords: power flow, *backward-forward sweep*, *fast decoupled*, distribution network, axis rotation

I. PENDAHULUAN

Aliran daya merupakan studi yang sangat dibutuhkan untuk melakukan perencanaan, operasi,

penjadwalan ekonomis, kendali maupun perluasan sistem tenaga listrik. Pada intinya analisis yang dilakukan bertujuan untuk mencari besar dan sudut tegangan di setiap bus. Dengan mengetahui besar

dan sudut tegangan, maka daya aktif dan reaktif yang mengalir di saluran dapat diketahui juga [1], [2]. Salah satu permasalahan aliran daya yang muncul di jaringan distribusi adalah karakteristik jaringan yang membuat beberapa metode aliran daya sulit diimplementasikan ke dalam perhitungannya. Karakteristik jaringan distribusi dan jaringan transmisi berbeda. Adapun metode aliran daya konvensional umumnya dilakukan di jaringan transmisi yang memiliki karakteristik di antaranya rasio saluran R/X yang rendah, saling bertautan (interkoneksi), dan 3 fasa seimbang. Pada jaringan distribusi, karakteristik yang dimiliki diantaranya rasio saluran R/X tinggi, struktur radial, saluran terdiri dari 1 dan 3 fasa, beban tidak seimbang dan terhubung delta, dan lain sebagainya [3]. Oleh karena itu, diperlukan pemodelan dan pengembangan agar metode aliran daya *fast decoupled* dapat diterapkan di jaringan distribusi. Metode aliran daya *fast decoupled* jika diterapkan pada jaringan distribusi akan terjadi divergensi dalam perhitungannya. Karena metode ini mengasumsikan saluran dengan rasio R/X yang rendah yang merupakan kebalikan dari karakteristik jaringan distribusi.

Pengembangan metode *fast decoupled* dengan rotasi sumbu pertama kali dikenalkan oleh Haley dan Ayres [4], namun bekerja pada koordinat *rectangular*. Seperti diketahui bahwa koordinat *rectangular* tidak menggambarkan kondisi sistem secara *real*. Kelemahan lain pada metode tersebut yaitu tidak adanya solusi terhadap bus PV dimana daya reaktifnya tidak ditentukan. Oleh karena itu, Sianipar [5] mengajukan metode baru berawal dari ide Haley dan Ayres tersebut dengan melakukan perputaran sumbu yang bekerja di koordinat polar. Selain itu, ditambah juga terdapat solusi terhadap persamaan di bus PV.

Pada makalah ini, penulis akan menerapkan metode rotasi sumbu (*axis rotation*) *fast decoupled* ke jaringan distribusi IEEE 13 dan 34 bus. Kemudian membandingkannya dengan metode *Backward-Forward Sweep* (BFS). Sebagaimana kita ketahui bahwa metode BFS merupakan metode aliran daya favorit ketika diterapkan ke jaringan distribusi [6]. Metode BFS telah banyak digunakan untuk perhitungan aliran daya di jaringan distribusi radial, karena dapat menangani semua karakteristik jaringan distribusi dengan cara yang sangat sederhana [7], [8]. Pengujian yang dilakukan bertujuan untuk studi fisibilitas/kelayakan dari metode ini dan mengembangkan kemampuan metode aliran daya *fast decoupled* untuk diterapkan ke berbagai variasi karakteristik jaringan distribusi. Selain itu, sekaligus membuktikan bahwa metode ini layak diterapkan di jaringan transmisi maupun distribusi, sehingga dapat diterima secara umum.

II. METODE PENELITIAN

A. Metode Rotasi Sumbu *Fast Decoupled*

Rotasi sumbu *fast decoupled* diuji ke jaringan distribusi IEEE 13 dan 34 bus. Spesifikasi komputer yang digunakan adalah AMD A8-6410, prosesor 3,46 GHz, dan RAM 4 GB. Metode beserta pemodelannya dibuat ke dalam bahasa pemrograman FORTRAN.

Prinsip rotasi sumbu dapat dilihat pada Gambar 1 yang merupakan diagram admitansi. Pada gambar tersebut, suseptansi positif untuk sifat kapasitif, sedangkan suseptansi negatif untuk sifat induktif. Prinsip rotasinya yaitu admitansi Y diputar sejauh $-\phi$ searah jarum jam sehingga menjadi Y' . Hal ini menunjukkan bahwa Y' memiliki sifat lebih induktif dibanding Y . Berdasarkan persamaan

$$Y = G - jB \quad (1)$$

dimana G merupakan konduktansi dan B merupakan suseptansi dari admitansi Y . Maka

$$Y' = G' - jB' \quad (2)$$

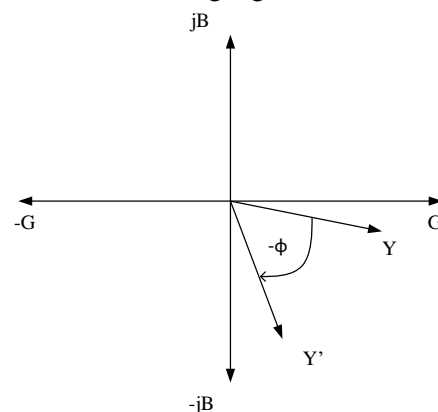
sehingga rasio konduktansi dengan suseptansi menjadi

$$\frac{G'}{B'} < \frac{G}{B} \quad (3)$$

Dalam bentuk impedansi, rasionya menjadi

$$\frac{R'}{X'} < \frac{R}{X} \quad (4)$$

Perhitungan bekerja dengan cara mengkonversikan bentuk fasa ke bentuk urutan (*sequence*). Hal ini bertujuan untuk mengurangi tingkat kompleksitas perhitungan. Berbeda halnya ketika bekerja dalam bentuk fasa [9], rotasi sumbu dilakukan pada urutan positif, sedangkan urutan negatif dan nol diselesaikan dengan hubungan arus dengan admitansi dan tegangan.



Gambar 1. Diagram admitansi

Di bawah ini merupakan penjelasan detail mengenai metode rotasi sumbu *fast decoupled*.

Injeksi daya aktif P_p dan daya reaktif Q_p di bus p, diformulasikan sebagai berikut

$$P_p - jQ_p = V_p^* \sum_{q=1}^n (G_{pq} + jB_{pq})V_q \quad (5)$$

dimana G_{pq} dan B_{pq} merupakan konduktansi dan suseptansi dari admitansi Y_{pq} .

Kemudian mengalikan kedua persamaan di atas dengan $e^{j\varphi}$, maka kita dapatkan

$$e^{j\varphi}(P_p - jQ_p) = V_p^* \sum_{q=1}^n e^{j\varphi}(G_{pq} + jB_{pq})V_q \quad (6)$$

Setelah dikalikan, persamaan daya kompleks dan admitansi menjadi sebagai berikut

$$P_p - jQ_p = e^{j\varphi}(P_p - jQ_p) \quad (7.a)$$

$$G_{pq} + jB_{pq} = e^{j\varphi}(G_{pq} + jB_{pq}) \quad (7.b)$$

Kemudian (6) ditulis ulang dengan (5), injeksi daya aktif P_p dan daya reaktif Q_p menjadi

$$P_p = P_p \cos \varphi + Q_p \sin \varphi \quad (8.a)$$

$$Q_p = Q_p \cos \varphi - P_p \sin \varphi \quad (8.b)$$

Konduktansi G_{pq} dan suseptansinya B_{pq} menjadi

$$G_{pq} = G_{pq} \cos \varphi - B_{pq} \sin \varphi \quad (9.a)$$

$$B_{pq} = B_{pq} \cos \varphi + G_{pq} \sin \varphi \quad (9.b)$$

Berdasarkan persamaan baru (8) dan (9), rotasi sumbu merupakan perubahan dari jaringan yang asli ke jaringan yang baru dengan struktur yang sama namun parameter yang berbeda serta solusi yang sama. Variabel yang dicetak tebal di atas merupakan variabel yang telah dilakukan rotasi.

B. Algoritma Rotasi Sumbu *Fast Decoupled*

Pada persamaan (5), dengan memisahkan bagian *real* dan *imaginer* kemudian mendefinisikan $V_p = |V_p|(\cos \delta_p + j \sin \delta_p)$ dapat ditulis ulang sebagai berikut

$$P_p - |V_p| \sum_{q=1}^n (G_{pq} \cos \delta_{pq} + B_{pq} \sin \delta_{pq})|V_q| = 0 \quad (10.a)$$

$$Q_p - |V_p| \sum_{q=1}^n (G_{pq} \sin \delta_{pq} - B_{pq} \cos \delta_{pq})|V_q| = 0 \quad (10.b)$$

Dengan linierisasi, persamaan di atas diubah menjadi sistem persamaan linier yang dikenal dengan aliran daya Newton-Raphson.

$$\begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (11)$$

Kemudian dengan penyederhanaan persamaan di atas oleh Stott/Alsac, didapat persamaan *fast decoupled* di bawah ini.

$$[B'][\Delta\theta] = [\Delta P/V] \quad (12.a)$$

$$[B''][\Delta V] = [\Delta Q/V] \quad (12.b)$$

Elemen-elemen matriks B' dan B'' diperoleh dari bagian imajiner elemen-elemen matriks admitansi bus Y.

Rotasi dilakukan pada persamaan (12.a), sedangkan (12.b) tidak dirotasi sesuai persamaan aslinya. Selanjutnya, langkah demi langkah dalam penyelesaian rotasi sumbu *fast decoupled* sebagai berikut.

Diberikan V_k dan δ_k , hitung injeksi daya aktif P_{cal} dan daya reaktif Q_{cal} di bus p untuk semua bus kecuali *slack* bus.

$$P_{cal} = |V_p| \sum_{q=1}^n (G_{pq} \cos \delta_{pq} + B_{pq} \sin \delta_{pq})|V_q| \quad (13.a)$$

$$Q_{cal} = |V_p| \sum_{q=1}^n (G_{pq} \sin \delta_{pq} - B_{pq} \cos \delta_{pq})|V_q| \quad (13.b)$$

Kemudian hitung *mismatch* untuk daya aktif ΔP_p dan daya reaktif ΔQ_p pada bus PQ.

$$\Delta P_p = P_{p,sch} - P_{p,calc} \quad (14.a)$$

$$\Delta Q_p = Q_{p,sch} - Q_{p,calc} \quad (14.b)$$

dimana $P_{p,sch}$ dan $Q_{p,sch}$ merupakan daya aktif dan daya reaktif yang ditentukan, sedangkan $P_{p,calc}$ dan $Q_{p,calc}$ merupakan daya aktif dan daya reaktif yang dihitung.

Rotasi *mismatch* daya aktif maupun daya reaktif menggunakan (8) untuk mencari *mismatch* rotasi daya aktif, kemudian menyelesaikan koreksi sudut yang digunakan untuk *update* sudut menggunakan (12.a).

Solusi terhadap injeksi daya reaktif yang tidak ditentukan di setiap bus PV pada koordinat asli dari (8.a), maka injeksi daya aktif pada rotasi koordinat akan menjadi tidak diketahui juga nilainya. Permasalahan ini dapat diselesaikan dengan pendekatan menggunakan (15), dikurangi dari (8.a) dan (8.b) menggantikan rotasi injeksi daya reaktif yang tidak ditentukan dengan nilai yang dihitung.

$$P_p = (P_p + Q_{cal}(V_k, \delta_k) \sin \varphi) / \cos \varphi \quad (15)$$

Selanjutnya menghitung perputaran injeksi daya aktif $P_{cal}(V_k, \delta_k)$ untuk bus PV dari bus p , sehingga didapat nilai residu

$$\Delta P_p = P_p - P_{p,calc}(V_k, \delta_k) \quad (16)$$

Persamaan di bawah ini untuk melakukan koreksi sudut $\Delta \delta_k$ di setiap bus kecuali *slack* bus.

$$[\Delta P / |V_k|] = [B'] [\Delta \delta_k] \quad (17)$$

Kemudian, *update* sudut

$$\delta_{k+1} = \delta_k + \Delta \delta_k \quad (18)$$

menggunakan V_k sebelumnya dan δ_{k+1} baru, hitung menggunakan (13), injeksi daya reaktif hanya di bus PQ kemudian diikuti oleh *mismatch* (14).

Selanjutnya persamaan di bawah ini untuk koreksi besar tegangan $\Delta |V_k|$

$$[\Delta Q / |V_k|] = [B''] [\Delta |V_k|] \quad (19)$$

Kemudian, *update* besar tegangan

$$|V_{k+1}| = |V_k| + \Delta |V_k| \quad (20)$$

Kembali langkah dari awal (13) jika solusi belum konvergen.

C. Pemodelan Jaringan Distribusi

Pada pembahasan ini akan dijelaskan pemodelan yang dilakukan pada karakteristik jaringan distribusi IEEE 13 dan 34 bus sehingga dapat diterapkan ke dalam perhitungan metode aliran daya *fast decoupled*. Pada jaringan distribusi IEEE 13 bus memiliki karakteristik diantaranya jaringan yang pendek namun dengan pembebanan yang relatif tinggi, terdapat 1 transformator *step down* 4.16 kV, terdapat 1 regulator tegangan, saluran satu/dua/tiga fasa terdiri dari *overhead* dan saluran *underground* dengan bermacam-macam fasa, beban tidak seimbang terdiri dari *spot load* dan *distributed load* terhubung *delta* maupun *wye*.

Pada jaringan distribusi IEEE 34 bus diantara karakteristiknya adalah jaringan yang panjang dan pembebanan ringan, terdapat 2 regulator tegangan, transformator *step down* 4,16 kV, saluran terdiri dari satu/dua/tiga fasa dan semuanya merupakan *overhead lines*, beban tidak seimbang terdiri dari *spot load* dan *distributed load* terhubung *delta* maupun *wye*. Permasalahan konvergensi muncul di di jaringan ini dikarenakan panjangnya *feeder* dan beban tidak seimbang.

Solusi terhadap rasio saluran R/X tinggi sudah dijelaskan solusinya di bagian metode, sedangkan di bahasan kali ini menambah penjelasan mengenai penentuan rotasi sudut optimalnya. Karakteristik lainnya seperti regulator diasumsikan sebagai transformator, sedangkan semua jenis beban diasumsikan beban PQ. Beban yang terhubung *delta* perlu dimodelkan menjadi *wye*.

D. Penentuan Rotasi Sudut Optimal

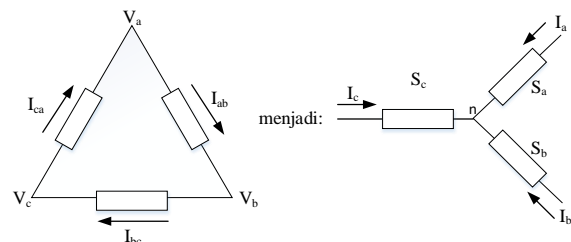
Penentuan rotasi sudut optimal menjadi perhatian penting dalam pemodelan jaringan. Hal tersebut karena berapa besar sudut yang perlu dirotasi tidak diketahui, kecuali dengan menformulasikan estimasi sudut optimal yang dibutuhkan untuk melakukan rotasi. Banyak faktor yang mempengaruhi penentuan nilai ini, diantaranya struktur dan parameter dari komponen pasif jaringan, beban tersambung serta kemampuan presisi komputer juga memiliki peran yang tidak kalah pentingnya. Formulasi untuk menaksir optimal rotasi sudut $\varphi_{near-opt}$ sebagai berikut

$$\varphi_{near-opt} = \sum_{p=\{PQ-buses\}} \frac{\arctan\left(\frac{G_{pp}}{B_{pp}}\right)}{n_{PQ}} \quad (21)$$

dimana G_{pp} dan B_{pp} merupakan konduktansi dan suseptansi dari diagonal matriks admitansi bus, sedangkan n_{PQ} merupakan jumlah dari PQ bus.

E. Konversi Model Beban Δ ke Beban Y

Gambar 2 merupakan konversi model beban *delta* ke *wye*. Salah satu karakteristik jaringan distribusi terdapat jenis beban yang terhubung *delta*. Pada pemodelan ini bagaimana beban *delta* tersebut dikonversikan ke model beban *wye*. Hal tersebut perlu dilakukan karena perhitungan beban berdasarkan nilai per fasa.



Gambar 2. Konversi model beban Δ ke Y

Langkah-langkah konversi model beban *delta* ke *wye* sebagai berikut.

Pertama, hitung arus fasa ke fasa

$$I_{ab} = \left(\frac{S_{ab}}{V_{ab}}\right)^* \quad (22.a)$$

$$I_{bc} = \left(\frac{S_{bc}}{V_{bc}}\right)^* \quad (22.b)$$

$$I_{ca} = \left(\frac{S_{ca}}{V_{ca}}\right)^* \quad (22.c)$$

dimana I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} merupakan arus antar fasa, S_{ab}, S_{bc}, S_{ca} merupakan daya kompleks antar fasa dan V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} merupakan tegangan antar fasa.

Langkah selanjutnya, diketahui tegangan antar fasa $V_{xy} = V_x - V_y$ dengan $x, y = a, b, c$.

Maka kita dapatkan arus I_a, I_b, I_c dalam model *wye*

$$I_a = I_{ab} - I_{ca} \quad (23.a)$$

$$I_b = I_{bc} - I_{ab} \quad (23.b)$$

$$I_c = I_{ca} - I_{bc} \quad (23.c)$$

Langkah terakhir, didapat formulasi daya S_a, S_b, S_c dalam model *wye*

$$S_a = V_a \times I_a^* \quad (24.a)$$

$$S_b = V_b \times I_b^* \quad (24.b)$$

$$S_c = V_c \times I_c^* \quad (24.c)$$

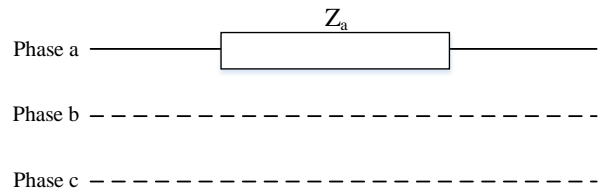
dimana V_a, V_b, V_c merupakan tegangan per fasa dan I_a^*, I_b^*, I_c^* merupakan *conjugate* arus per fasa.

F. Penggabungan Single Phase ke Dalam Model Three Phase

Pada karakteristik jaringan distribusi lainnya adalah dalam satu sistem kita menemukan terdiri dari kombinasi 1, 2, dan 3 fasa saluran. Salah satu solusi untuk memodelkan kombinasi saluran tersebut ke dalam perhitungan 3 fasa adalah satu/dua fasa digabungkan dengan menambahkan fasa *dummy* ke dalam fasa yang kurang agar menjadi 3 fasa. Untuk memberikan kesamaan impedansi urutan terurai, penambahan fasa harus sama terhadap fasa *existing*. Ilustrasi dapat dilihat seperti Gambar 3 dimana hanya ada 1 fasa yaitu di fasa a. Dengan demikian, nilai impedansi yang tidak diketahui disamakan dengan nilai impedansi yang diketahui (*existing phase*).

$$Z_a = Z_b = Z_c \quad (25)$$

dimana Z_a, Z_b, Z_c merupakan impedansi fasa a, b, dan c.



Gambar 3. Ilustrasi saluran *single phase*

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian numerik dapat dilihat pada Tabel 1. Performa pengujian berdasarkan iterasi yang dibutuhkan, waktu komputasi, dan rotasi sudut optimal. Adapun besar dan sudut tegangan di setiap bus diambil sampel untuk fasa A.

Berdasarkan hasil pengujian, pada standar jaringan distribusi 13 bus membutuhkan 3,5 iterasi dengan waktu komputasi 0,0049 detik dan rotasi sudut optimal sebesar $-43,4^\circ$, sedangkan pada 34 bus membutuhkan 4 iterasi dengan waktu komputasi 0,152 detik dan rotasi sudut optimal sebesar $-61,4^\circ$. Pada rotasi sudut, prinsipnya semakin besar jumlah saluran dengan rasio R/X tinggi, maka akan semakin besar juga rotasi sudut yang dibutuhkan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2. Pada Tabel 2 tampak bahwa jumlah saluran dengan R/X lebih besar dari 1 untuk 13 bus hanya 2 saluran, sedangkan untuk 34 bus sebanyak 26 saluran.

Tabel 1. Hasil pengujian *axis rotation fast decoupled*

Performa	13 bus	34 bus	
Iterasi	3,5	4	
Waktu (detik)	0,049	0,152	
Rotasi sudut	$-43,4^\circ$	$-61,4^\circ$	
Sampel Tegangan fasa A	No bus	646	810
	Besar (pu)	0,98944	0,99322
	Sudut ($^\circ$)	-0,88140	-0,02268

Tabel 2. Karakteristik saluran

Karakteristik	13 bus	34 bus
Jumlah R/X > 1	2	26
Jumlah saluran	12	33

Tabel 3. Perbandingan performa ARFD dengan BFS

Performa	13 bus		34 bus	
	ARFD	BFS	ARFD	BFS
Iterasi	3,5	4	4	4
Waktu (detik)	0,049	0,050	0,152	0,141

Setelah menguji performa *Axis Rotation Fast Decoupled* (ARFD), kemudian membandingkannya dengan BFS [10]. Hasil perbandingannya dapat dilihat pada Tabel 3. Dari hasil perbandingan, keduanya memiliki performa yang sama baiknya. Pada 13 bus iterasi yang dibutuhkan ARFD 3,5 iterasi dengan waktu komputasi 0,049 detik sedangkan BFS 4 iterasi dengan waktu komputasi 0,05 detik. Pada 34 bus, iterasi yang dibutuhkan masing-masing baik ARFD dan BFS sebanyak 4 iterasi dengan waktu komputasi terdapat sedikit perbedaan, dimana 0,152 detik untuk ARFD dan 0,141 detik untuk BFS. Waktu komputasi BFS sedikit lebih cepat dibanding ARFD dan BFS tidak memerlukan rotasi sudut dalam perhitungannya. Hal ini dikarenakan BFS bekerja langsung di cabang. Berbeda halnya dengan *fast decoupled* yang membutuhkan beberapa pemodelan agar dapat dilakukan perhitungan dan diimplementasikan ke dalam metodenya. Kelebihan lain metode *fast decoupled* dibanding metode BFS bahwa metode ini dapat diimplementasikan di konfigurasi jaringan lain seperti *mesh*. Sehingga kedepannya metode *fast decoupled* bisa menggantikan metode BFS sebagai metode favorit yang banyak digunakan di jaringan distribusi.

IV. KESIMPULAN

Jaringan distribusi memiliki karakteristik unik seperti rasio saluran R/X yang tinggi, struktur radial, kombinasi 1, 2, dan 3 fasa saluran, beban tidak seimbang dan terhubung delta, dan lain sebagainya. Pada pengujian yang telah dilakukan, dapat dilihat bahwa metode ARFD berhasil diterapkan ke standar jaringan distribusi IEEE 13 dan 34 bus dengan berbagai karakteristik unik tersebut. Ketika dibandingkan dengan metode BFS, keduanya memiliki performa yang sama baiknya. Hasil penelitian ini menunjukkan kelayakan metode ARFD dengan variasi karakteristik/fitur di jaringan distribusi. Selain itu, metode ini dapat

diimplementasikan secara umum tidak hanya di jaringan transmisi, tetapi di jaringan distribusi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada LPPM UNJANI yang berkontribusi mendanai penelitian ini.

REFERENSI

- [1] J. J. Grainger and W. Stevenson, *Power System Analysis*. McGraw-Hill Education (India), 1994.
- [2] H. Saadat, *Power System Analysis*, Third Edit. PSA Publishing, 2010.
- [3] W. H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis, Third Edition*, Third Edit. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.
- [4] P. H. Haley and M. Ayres, "Super Decoupled Loadflow with Distributed Slack Bus," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. PER-5, no. 1, p. 37, 1985.
- [5] G. H. M. Sianipar, "Robust Fast Decoupled Load Flow via Axis-Rotation," *Tek. Elektro Maj. Ilm.*, vol. 7, pp. 0853-7186, 2001.
- [6] G. H. M. Sianipar and F. Siahaan, "An Efficient Data Structure for Radial Distribution Load Flow," pp. 126-129, 2014.
- [7] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen, and G. X. Luo, "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 2, pp. 753-762, 1988.
- [8] C. S. Cheng and D. Shirmohammadi, "A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 671-679, 1995.
- [9] M. Abdel-Akher, K. M. Nor, and A. H. A. Rashid, "Improved three-phase power-flow methods using sequence components," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 3, pp. 1389-1397, 2005.
- [10] G. A. Setia, G. H. M. Sianipar, R. T. Paribo, A. Junaidi, and F. Haz, "Kinerja Metode Aliran Daya Backward-Forward Sweep di Jaringan Distribusi," *SMAP 2017*, pp. 2-6, 2017.