

# Penyelidikan Pola Baris dan Penyederhanaan Teknik Pertukaran Kolom Untuk Meningkatkan Keandalan dan Efisiensi Metode Aliran Daya Newton Raphson

Andi Setiawan<sup>1</sup>, Ontoseno Penangsang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>D3 Teknik Universitas Jember

Jl. Slamet Riadi 43 Jember, Indonesia

E-mail : andi\_setra@interns.net

<sup>2</sup>Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Kampus ITS-Sukolilo Surabaya, Indonesia

E-mail : kalemlit@rad.net.id

## Abstrak

Dalam penelitian ini diselidiki kemungkinan untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi metode aliran daya Newton Raphson dengan menerapkan penyelidikan pola baris dari matriks Jacobian dan penyederhanaan algoritma penanganan keberadaan PV bus. Penyelidikan pola baris matriks Jacobian dilakukan dengan tujuan meningkatkan kemungkinan keberhasilan metode Newton Raphson dalam melakukan perhitungan aliran daya pada sistem dengan berbagai konfigurasi sekaligus mengeliminir ketidakpastian dari algoritma yang diusulkan sebelumnya. Untuk meningkatkan efisiensi perhitungan, diterapkan sebuah algoritma yang merupakan penyederhanaan dari algoritma pertukaran kolom yang sebelumnya telah diterapkan pada metode Newton Raphson. Hasil penyelidikan menunjukkan bahwa dengan penerapan penyelidikan pola baris, keberhasilan metode Newton Raphson untuk melakukan perhitungan aliran daya tidak lagi tergantung pada teknik penomoran bus sekaligus mengeliminir ketidakpastian yang terdapat pada teknik ini. Peningkatan waktu penyelesaian perhitungan tidak terlalu signifikan jika dibandingkan dengan hasil peningkatan keandalan yang diperoleh. Permasalahan waktu perhitungan dapat diatasi dengan melakukan penyederhanaan pada teknik pertukaran kolom tanpa harus menambah kerumitan pada implementasi algoritmanya.

KEYWORDS: Load flow, Newton Raphson,

## 1. Pendahuluan

Metode Newton Raphson adalah metode aliran daya yang paling banyak digunakan dan dikembangkan dalam aplikasi perhitungan aliran daya. Pertimbangan yang utama adalah kedekatan dan kemudahan pengembangannya untuk memodelkan permasalahan sistem tenaga pada umumnya. Selain itu, metode ini memiliki beberapa karakteristik unggul dibandingkan dengan metode lain yaitu

jumlah iterasi yang tidak tergantung pada ukuran sistem dan sifat konvergensinya yang kuadratis.

Banyak penelitian yang telah dilakukan dengan tujuan mengembangkan sebuah metode untuk dapat meningkatkan unjuk kerja metode ini. Penelitian yang dilakukan oleh Andi dan Ontoseno [1] telah berhasil membuat metode ini dapat melakukan perhitungan aliran daya pada sistem dengan berbagai konfigurasi.

Usaha ini dilakukan dengan menerapkan algoritma Crout sebagai algoritma penyelesaian persamaan matriks simultan pada metode Newton Raphson.

Untuk kestabilan algoritma ini, disyaratkan sebuah pola urutan proses eliminasi tertentu. Dalam penelitian tersebut, untuk mendapatkan pola urutan proses seperti yang disyaratkan, diadopsi teknik penomoran bus seperti yang dianjurkan Tinney dkk [2]. Sayangnya, pada teknik penomoran ini masih terdapat unsur prediksi (ketidak pastian) dalam penerapannya. Ketidak pastian ini diatasi dengan simulasi sebelum proses perhitungan yang sebenarnya dilakukan.

Pada penelitian ini telah diselidiki cara untuk menjamin stabilitas algoritma Crout dengan melakukan penyelidikan pola baris di dalam proses penyelesaian persamaan matriks simultan pada metode Newton Raphson. Penerapan metode ini dilakukan dengan tujuan mengeliminir ketidak pastian teknik penomoran bus yang telah diterapkan sebelumnya.

Untuk mengatasi permasalahan meningkatnya waktu proses yang diakibatkan penerapan algoritma penyelidikan pola kolom, diterapkan sebuah algoritma sebagai pengganti teknik pertukaran kolom yang telah diterapkan dalam penelitian sebenarnya.

## 2. Penyelidikan Pola Baris

### 2.1 Permasalahan Pada Teknik Penomoran Bus

Secara umum teknik penomoran bus diterapkan untuk menjamin stabilitas algoritma perhitungan. Teknik ini diterapkan pada awal proses studi aliran daya sebelum dilakukan perhitungan dengan menggunakan metode aliran daya.

Dari tiga teknik penomoran bus yang dibahas oleh Tinney dkk [3], dikatakan bahwa teknik penomoran bus yang paling sesuai untuk metode Newton Raphson adalah dengan menyusun nomor bus sedemikian hingga setiap

langkah eliminasi Gauss dilakukan terhadap baris yang memiliki jumlah elemen *nonzero* paling sedikit. Dalam aplikasinya teknik ini mensyaratkan dilakukannya simulasi terhadap proses eliminasi Gauss pada penyelesaian persamaan simultan metode Newton Raphson sebelum perhitungan aliran daya dengan metode tersebut dilakukan. Untuk aplikasi perhitungan aliran daya pada sistem dengan jumlah bus yang tidak terlalu besar hal ini mudah untuk dilakukan, akan tetapi sebaliknya, untuk sistem dengan jumlah bus yang banyak hal ini cukup memakan waktu.

### 2.2 Penyelidikan Pola Baris Setiap Langkah

Pada penelitian ini penyelidikan pola baris dilakukan pada saat proses penyelesaian persamaan simultan metode Newton Raphson sedang berlangsung. Hasil penyelidikan pola baris ini adalah sebuah keputusan perlu atau tidaknya dilakukan pertukaran baris.

Pada langkah pertama penyelidikan diterapkan pada semua baris yang ada, pada langkah selanjutnya penyelidikan hanya dilakukan pada baris dengan nomor yang lebih besar dari nomor baris langkah sebelumnya. Jumlah penyelidikan yang harus dilakukan adalah:

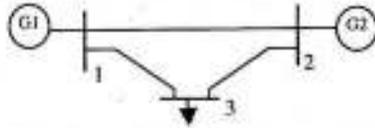
$$\text{Jumlah penyelidikan} = \sum_{i=1}^n (n-i) \quad (1)$$

Dengan cara ini dapat dipastikan bahwa setiap langkah eliminasi selalu dilakukan pada baris dengan elemen *nonzero* yang paling sedikit.

## 3. Peningkatan Kecepatan Proses Perhitungan Aliran Daya

Dengan dimasukkannya penyelidikan pola baris dalam algoritma Newton Raphson, penambahan waktu proses tentunya tidak dapat dihindari, untuk mengatasi hal tersebut dilakukan penelitian lebih jauh untuk menghindari hal ini. Salah satu usaha yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan penyederhanaan pada algoritma penanganan keberadaan slack bus dan PV bus.

Untuk mempermudah penjelasan mengenai penyederhanaan teknik pertukaran kolom ini, tanpa mengurangi generalitasnya, diberikan sebuah sistem 3 bus 3 saluran dalam Gambar 1 sebagai contoh.



Gambar 1. Sistem Contoh 3 bus 3 Saluran

### 3.1 Teknik Pertukaran Kolom

Dalam penelitian yang sebelumnya [1], diaplikasikan teknik pertukaran kolom yang diadopsi dari [3] untuk kerumitan teknik menghindari reduksi matriks dan rekonfigurasi serta perubahan dimensi matriks jika terjadi perubahan tipe bus dari PV ke PQ bus. Teknik seperti ini mensyaratkan adanya dua matriks Jacobian, yaitu matriks Jacobian Basis dan Matriks Jacobian Kontrol sehingga persamaan matriks yang terdapat pada [1] adalah sebagai berikut:

$$[I][K] = [B][U] \quad (2)$$

dimana [I] adalah matriks Jacobian Kontrol, dan untuk sistem contoh dalam Gambar 1,

$$[I] = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (2a)$$

[K] adalah vektor yang diketahui, dan untuk sistem contoh dalam Gambar 1,

$$[K] = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix}$$

(2b)

Sedangkan [B] adalah matriks Jacobian Basis dimana untuk sistem contoh dalam Gambar 1,

$$[B] = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & H_{12} & N_{11} & H_{13} & N_{13} \\ J_{11} & L_{11} & J_{12} & L_{12} & J_{13} & N_{13} \\ H_{21} & N_{21} & H_{22} & N_{22} & H_{23} & N_{23} \\ J_{21} & L_{21} & J_{22} & L_{22} & J_{23} & L_{23} \\ H_{31} & N_{31} & H_{32} & N_{32} & H_{33} & N_{33} \\ J_{31} & L_{31} & J_{32} & L_{32} & J_{33} & L_{33} \end{bmatrix} \quad (2c)$$

dan [U] adalah vektor yang diketahui dimana untuk sistem contoh dalam Gambar 1,

$$[U] = \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta E_1 \\ |E_1| \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta E_2 \\ |E_2| \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta E_3 \\ |E_3| \end{bmatrix}$$

(2d)

Jika pada sistem contoh dalam Gambar 1 generator G1 adalah *slack generator* dan bus 2 adalah PV bus, maka setelah dilakukan prosedur pertukaran kolom elemen-elemen keempat matriks diatas akan berubah sebagai berikut:

Besaran perubahan tegangan dan sudut fasa pada slack bus akan bertukar tempat dengan besaran perubahan daya aktif dan reaktif, sehingga vektor yang diketahui [K] dan vektor

yang tidak diketahui [U] akan berubah seperti pada Persamaan (2e) dan (2f).

$$[K] = \begin{bmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta V_1 \\ |V_1| \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta V_3 \\ |V_3| \end{bmatrix} \quad (2e)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta V_1 \\ |V_1| \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta V_3 \\ |V_3| \end{bmatrix} \quad (2f)$$

Sedangkan elemen-elemen kolom slack bus dan PV bus dalam matriks Jacobian basis akan bertukar tempat dengan elemen-elemen yang bersesuaian pada matriks Jacobian Kontrol. Selain bertukar tempat elemen-elemen ini juga berubah tanda. Dengan demikian kedua matriks untuk sistem contoh dalam Gambar 1 akan menjadi:

$$[i] = \begin{bmatrix} -H_{11} & -N_{11} & & -N_{13} \\ -J_{11} & -L_{11} & & -N_{13} \\ -H_{21} & -N_{21} & 1 & -N_{23} \\ -J_{21} & -L_{21} & & -L_{23} \\ -H_{31} & -N_{22} & & 1 & -N_{23} \\ -J_{31} & -L_{31} & & & -L_{33} \end{bmatrix} \quad (2g)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & H_{12} & N_{11} & H_{13} & 0 \\ 0 & -1 & J_{12} & L_{12} & J_{13} & 0 \\ 0 & 0 & H_{22} & N_{22} & H_{23} & 0 \\ 0 & 0 & J_{22} & L_{22} & J_{23} & 0 \\ 0 & 0 & H_{32} & N_{32} & H_{33} & 0 \\ 0 & 0 & J_{32} & L_{32} & J_{33} & -1 \end{bmatrix}$$

(2g)

Penyelesaian Persamaan (2) untuk menentukan nilai-nilai elemen vektor tak diketahui [U] ditentukan dengan Persamaan (3).

$$[U] = [B]^{-1} [i][K] \quad (3)$$

Dengan teknik ini [1], peningkatan waktu proses, dibandingkan dengan metode Newton Raphson standar [3,4], tidak dapat dihindari. Hal ini dikarenakan pada teknik ini digunakan dua matriks Jacobian sehingga dalam penyelesaiannya memerlukan dua kali proses perkalian matriks.

### 3.2 Penyederhanaan Teknik Pertukaran Kolom

Teknik ini dilakukan dengan menghilangkan matriks Jacobian Kontrol dari Persamaan (2) sehingga persamaan tersebut lebih mirip persamaan simultan metode Newton Raphson standar, yaitu

$$[K] = [B][U] \quad (4)$$

yang membedakan teknik ini dengan algoritma metode Newton Raphson standar adalah penyusunan matriks Jacobian Basis-nya. Untuk sistem contoh di atas matriks Jacobian Basis [B] disusun sebagai berikut:

$$[B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{22} & N_{22} & H_{23} & 0 \\ 0 & 0 & J_{22} & L_{22} & J_{23} & 0 \\ 0 & 0 & H_{32} & N_{32} & H_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4a)$$

Dengan penyusunan matriks Jacobian seperti ini, sifat simetri dari matriks Jacobian lebih dapat terjaga dan lebih memudahkan saat menginversinya.

Penyelesaian secara simultan Persamaan (4) untuk menentukan vektor yang tidak diketahui dilakukan dengan Persamaan (5).

$$[U] = [B]^{-1}[K] \quad (5)$$

Dari Persamaan (5) terlihat penyederhaan yang cukup signifikan dibandingkan dengan Persamaan (3). Hal ini tentunya akan mengakibatkan efisiensi waktu proses perhitungan.

#### 4. Aspek Komputasi

Dengan teknik pertukaran kolom dilakukan dua kali langkah perkalian matriks, yaitu perkalian matriks invers matriks  $[B]$  ( $2n \times 2n$ ) dengan matriks  $[I]$  ( $2n \times 2n$ ) kemudian mengalikan hasil dari perkalian ini dengan vektor  $[K]$  ( $2n \times 1$ ). Dengan demikian dilakukan  $(2n)^3 + (2n)^2$  langkah perkalian dan  $(2n)^3 - (2n)$  langkah penjumlahan. Sedangkan dengan teknik penyederhanaan, jumlah langkah perkalian yang dibutuhkan adalah  $(2n)^2$  langkah perkalian dan  $(2n)^3 - (2n)$  langkah penjumlahan.

Pada teknik pertukaran kolom, perubahan besaran daya aktif dan reaktif pada slack bus dan perubahan daya reaktif pada PV bus didapatkan pada setiap langkah iterasi sebagai bagian penyelesaian dari persamaan simultannya. Pada teknik yang diseder-

hanakan ini, perubahan besaran daya reaktif pada PV bus dihitung sebagai proses tambahan setelah proses penyelesaian persamaan simultannya.

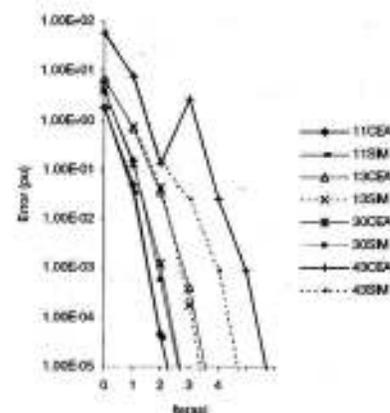
Kelebihan lain dari algoritma ini adalah penghematan ruang untuk penyimpanan variabel elemen matriks dan variabel penukar yang digunakan untuk pertukaran kolom.

### 5. Hasil Pengujian

Algoritma ini diimplementasikan ke dalam bahasa pemrograman Borland Delphi dan diaplikasikan untuk melakukan perhitungan aliran daya pada sistem uji yang digunakan dalam [1]. Pengujian dilakukan untuk melihat unjuk kerja program aliran daya ini secara umum.

#### 5.1 Pengujian Sifat Konvergensi

Untuk membuktikan keandalannya dan untuk membuktikan bahwa algoritma penyederhanaan ini tidak merusak sifat konvergensi metode Newton Raphson, program aliran daya dengan algoritma penyederhanaan ini diaplikasikan untuk melakukan perhitungan aliran daya pada beberapa sistem uji dengan berbagai konfigurasi dan ukuran. Hasil pengujian ditunjukkan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Hasil Pengujian Sifat Konvergensi

Dari Gambar 2, terlihat bahwa penyederhanaan algoritma ini tidak merusak sifat konvergensi metode Newton Raphson.

Dalam Gambar 2, 11CEA menandai hasil pengujian sistem 11 bus dengan menggunakan teknik pertukaran kolom sedangkan 11SIM menandai hasil pengujian sistem 11 bus dengan menggunakan teknik penyederhanaan.

## 5.2 Penyelidikan Peningkatan Waktu Proses

Dengan menggunakan Intel P133, waktu proses untuk aplikasi perhitungan aliran daya pada sistem dengan berbagai ukuran ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Waktu Proses

Bus	Waktu Proses		Jumlah Iterasi
	CEA	SIM	
11	8.20E-02	1.40E-02	4
13	1.04E-01	2.90E-02	3
30	7.00E-01	2.38E-01	4
43	2.738	1.18E+00	6

Dari Tabel 1 terlihat bahwa dengan menggunakan algoritma penyederhanaan ini, permasalahan waktu proses yang diakibatkan oleh penerapan penyelesaian pola baris dan teknik pertukaran kolom telah dapat diperbaiki. Teknik ini dapat melakukan proses perhitungan per iterasi dengan 3 sampai 5 kali lebih cepat.

## 6. Kesimpulan

Dari hasil pengujian terhadap sifat konvergensi dan waktu proses dapat disimpulkan bahwa:

1. Algoritma penyederhanaan dari teknik pertukaran kolom ini tidak merusak sifat konvergensi dari metode Newton Raphson, baik sifat konvergensi kuadratisnya maupun sifat konvergensinya yang tidak tergantung pada ukuran sistem.
2. Algoritma penyederhanaan ini juga dapat mengkompensasi peningkatan waktu proses yang diakibatkan penerapan penyelidikan pola baris pada setiap iterasi

yang dimaksudkan untuk meningkatkan keandalan metode Newton Raphson dengan mengeliminir ketidakpastian pada teknik penomoran bus.

## Daftar Pustaka

1. Setiawan, A., dan Penangsang, O., "Pengembangan metode newton raphson untuk solusi aliran daya normal pada sistem dengan konfigurasi loop dan radial", Tesis Pasca Sarjana Teknik Elektro ITS 2000.
2. Tinney, W.F., dan Hart, C.E., "Power Flow Solution by Newton's Method", *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, 1967, **PAS-82**, pp. 1449-1460
3. Zhang, S., Irving M.R., "Enhanced Newton-Raphson Algorithm for Normal, controlled and Optimal Powerflow Solutions Using Coloumn Exchange Techniques", *IEE Trans. Power Appar. Syst.*, 1994, **PAS-4**, pp. 760-770
4. Sato, N., dan Tinney, W.F., "Technique of Exploiting the Sparsity of the Network Admitnce Matrix", *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, 1963, **PAS-82**, pp. 944-950
5. Tinney, W.F., dan Walker J.W., "Direct Solution of Sparse Network Equations by Optimally Ordered Triangular Factorization", *Proc IEE Vol 55.*, pp. 1801-1809
6. PAI M.A. "Computer Techniques in Power System Analysis", Tata McGraww-Hill Co. Ltd New Delhi, 1980
7. Iwamoto, S., dan Tamura, Y., "A Load Flow Calculation Method of Ill Condition Power System", *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, 1981, **PAS-100**, pp. 1736-1743
8. Tripathy, S.C., Prasad, G.D., Malik, O.P., dan Hope, G.S., "Load Flow Solution for Ill -Conditioned Power System", *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, 1982, **PAS-101**, pp. 3648-3657

9. Irving, M.R, dan Sterling, M.J.H., "Efficient Newton Raphson Algorithm for Load Flow Calculation in Transmission and Distribution Networks", IEE Proc, 1987 **134**, Pt C, (5), pp. 325-328
10. Press W.H, B.P Flannery, Teukolsky S. A dan Vetterling W. T, "Numerical Recipes in Pascal", Cmbridge University Press New York, 1989
11. Penangsang, O. : "Diktat matakauliah Analisis Sistem Tenaga".