

Analisis Aliran Daya

Metodologi dan Aplikasi dalam Sistem Tenaga

Program Studi Teknik Elektro

Universitas Bengkulu

Minggu 8 - 2025

Agenda Pembahasan

- 1 Pendahuluan: Pentingnya Analisis Aliran Daya
- 2 Formulasi Masalah Aliran Daya
- 3 Klasifikasi Bus
- 4 Metode Newton-Raphson
- 5 Metode Gauss-Seidel
- 6 Perbandingan Metode
- 7 Interpretasi Hasil Aliran Daya
- 8 Aplikasi: GNU Octave dan MATPOWER
- 9 Aplikasi Praktis
- 10 Kesimpulan

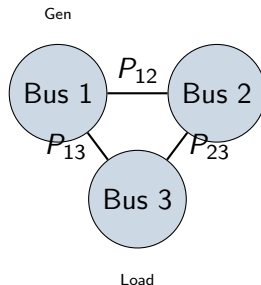
Setelah perkuliahan ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- ① Memahami tujuan dan formulasi masalah aliran daya
- ② Menjelaskan klasifikasi bus dalam sistem tenaga
- ③ Menganalisis metode Newton-Raphson dan Gauss-Seidel
- ④ Menginterpretasi hasil analisis aliran daya
- ⑤ Menggunakan GNU Octave dan MATPOWER untuk simulasi

Apa itu Analisis Aliran Daya?

Definisi:

- Perhitungan kondisi steady-state sistem tenaga
- Menentukan tegangan, arus, dan daya pada setiap bus
- Alat fundamental untuk perencanaan dan operasi



Pertanyaan Kunci

Bagaimana aliran daya di setiap saluran? Berapa tegangan di setiap bus?

Mengapa Analisis Aliran Daya Penting?

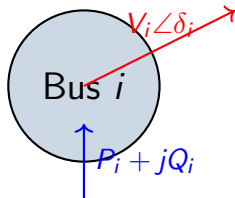
Aplikasi dalam Perencanaan

- Evaluasi kebutuhan ekspansi sistem
- Penentuan lokasi optimal pembangkit baru
- Analisis penambahan beban
- Studi kontingensi (N-1, N-2)

Aplikasi dalam Operasi

- Dispatch ekonomi generator
- Kontrol tegangan dan daya reaktif
- Identifikasi overload pada saluran
- Optimasi konfigurasi jaringan

Model Bus dalam Sistem Tenaga



V_i : Magnitud tegangan

δ_i : Sudut tegangan

P_i : Daya aktif injeksi

Q_i : Daya reaktif injeksi

Variabel di Setiap Bus (4 variabel)

$$|V_i|, \quad \delta_i, \quad P_i, \quad Q_i$$

Persamaan Dasar Aliran Daya

Injeksi Daya Kompleks di Bus i

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i \sum_{k=1}^n Y_{ik}^* V_k^*$$

Dalam Bentuk Polar

$$P_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} - \delta_i + \delta_k)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} - \delta_i + \delta_k)$$

di mana $Y_{ik} = |Y_{ik}| \angle \theta_{ik}$ adalah elemen matriks admitansi bus

Karakteristik

Persamaan non linear Memerlukan metode iteratif untuk solusi

Matriks Admitansi Bus (Y_{bus})

Definisi

$$[I_{bus}] = [Y_{bus}][V_{bus}]$$

Elemen Diagonal:

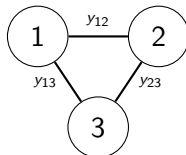
$$Y_{ii} = \sum_{k=1}^n y_{ik}$$

(Jumlah admitansi terhubung ke bus i)

Elemen Off-diagonal:

$$Y_{ik} = -y_{ik}$$

(Negatif admitansi cabang $i-k$)



Contoh:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} y_{12} + y_{13} & -y_{12} & -y_{13} \\ -y_{12} & y_{12} + y_{23} & -y_{23} \\ -y_{13} & -y_{23} & y_{13} + y_{23} \end{bmatrix}$$

Tiga Tipe Bus dalam Sistem Tenaga

Tipe Bus	Diketahui	Dicari	Keterangan
Slack Bus (Swing)	$ V , \delta$ (biasanya $\delta = 0$)	P, Q	Bus referensi $\delta = 0$
PV Bus (Generator)	$P, V $	Q, δ	Bus generator Tegangan terkontrol
PQ Bus (Load)	P, Q	$ V , \delta$	Bus beban Paling banyak

Catatan

Untuk sistem n bus: 1 slack bus, $(n - 1)$ bus sisanya (kombinasi PV dan PQ)

Mengapa Perlu Slack Bus?

Alasan Matematis

- Memberikan referensi sudut fasa ($\delta = 0$)
- Matriks Y_{bus} singular (tidak punya invers)
- Memerlukan satu bus dengan tegangan tetap

Alasan Fisis

- Menyeimbangkan rugi-rugi sistem (yang tidak diketahui sebelumnya)
- Menyuplai/menyerap daya untuk menjaga keseimbangan
- Biasanya bus generator terbesar atau paling kuat

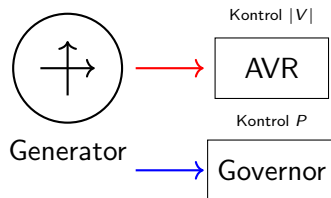
Contoh

Pada sistem interkoneksi Sumatera, PLTA besar atau PLTU besar sering dijadikan slack bus dalam studi aliran daya.

PV Bus (Generator Bus)

Karakteristik:

- Daya aktif P dikontrol (dari dispatch)
- Tegangan $|V|$ dikontrol (AVR)
- Daya reaktif Q disesuaikan dalam batas
- Sudut δ hasil kalkulasi



Batasan:

$$Q_{min} \leq Q \leq Q_{max}$$

Jika dilanggar $\rightarrow$ ubah ke PQ bus!

PQ Bus (Load Bus)

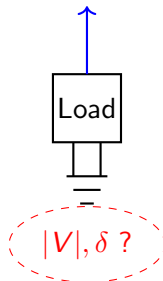
Karakteristik:

- Daya aktif P diketahui (beban)
- Daya reaktif Q diketahui (beban)
- Tegangan $|V|$ dicari
- Sudut δ dicari

Tipe paling umum:

- Bus tanpa pembangkit
- Mayoritas bus dalam sistem
- Tegangan hasil dari aliran daya

P, Q diketahui



Metode Newton-Raphson: Konsep Dasar

Prinsip

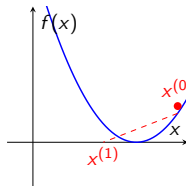
Linearisasi persamaan non-linear menggunakan deret Taylor orde pertama

Untuk fungsi 1 variabel:

$$f(x) = 0$$

Iterasi:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \frac{f(x^{(k)})}{f'(x^{(k)})}$$



Konvergensi:

- Kuadratik (sangat cepat)
- Memerlukan tebakan awal bagus

Persamaan Mismatch

$$\begin{aligned}\Delta P_i &= P_i^{spec} - P_i^{calc}(V, \delta) \\ \Delta Q_i &= Q_i^{spec} - Q_i^{calc}(V, \delta)\end{aligned}$$

Persamaan Linearisasi (Jacobian)

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

di mana Jacobian:

$$\begin{aligned}J_1 &= \frac{\partial P}{\partial \delta}, & J_2 &= \frac{\partial P}{\partial |V|} \\ J_3 &= \frac{\partial Q}{\partial \delta}, & J_4 &= \frac{\partial Q}{\partial |V|}\end{aligned}$$

Elemen Matriks Jacobian

Elemen Diagonal J_1

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -Q_i - B_{ii}|V_i|^2$$

Elemen Off-diagonal J_1

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} = |V_i||V_k||Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} - \delta_i + \delta_k)$$

Elemen Diagonal J_4

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = \frac{Q_i - B_{ii}|V_i|^2}{|V_i|}$$

Elemen lainnya (J_2, J_3) memiliki formulasi serupa

Algoritma Newton-Raphson

- 1: **Inisialisasi:** Set $\delta^{(0)} = 0$, $|V|^{(0)} = 1.0$ pu untuk semua bus
- 2: Set iterasi $k = 0$, toleransi ϵ
- 3: **repeat**
- 4: Hitung P_i^{calc} dan Q_i^{calc} untuk semua bus
- 5: Hitung mismatch: ΔP_i , ΔQ_i
- 6: **if** $\max(|\Delta P|, |\Delta Q|) < \epsilon$ **then**
- 7: **Konvergen! return** solusi
- 8: **end if**
- 9: Bentuk matriks Jacobian J
- 10: Selesaikan: $J \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$
- 11: Update: $\delta^{(k+1)} = \delta^{(k)} + \Delta \delta$
- 12: $|V|^{(k+1)} = |V|^{(k)} + \Delta |V|$
- 13: $k = k + 1$
- 14: **until** konvergen atau $k > k_{max}$

Keunggulan dan Keterbatasan Newton-Raphson

Keunggulan

- ✓ Konvergensi kuadratik (sangat cepat)
- ✓ Biasanya 3-5 iterasi
- ✓ Tidak sensitif terhadap ukuran sistem
- ✓ Metode paling populer dalam industri

Keterbatasan

- × Memerlukan perhitungan Jacobian setiap iterasi
- × Memerlukan memori besar
- × Kompleksitas komputasi tinggi
- × Dapat divergen jika tebakan awal buruk

Kompleksitas Komputasi

Untuk sistem n bus: $\mathcal{O}(n^3)$ per iterasi (faktorisasi matriks)

Metode Gauss-Seidel: Konsep Dasar

Prinsip

Metode iteratif sederhana dengan pembaruan sekuensial

Dari persamaan: $P_i + jQ_i = V_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k$

Dapat ditulis:

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{k=1, k \neq i}^n Y_{ik} V_k \right]$$

Ide Utama

Hitung tegangan bus satu per satu, gunakan nilai terbaru yang sudah dihitung

Iterasi Gauss-Seidel

Untuk PQ Bus

$$V_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{(V_i^{(k)})^*} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right]$$

Untuk PV Bus

Hitung V_i^{temp} seperti PQ bus, lalu:

$$V_i^{(k+1)} = |V_i^{spec}| \frac{V_i^{temp}}{|V_i^{temp}|}$$

(pertahankan magnitude, update sudut)

Untuk Slack Bus

V_{slack} tetap (tidak berubah)

Algoritma Gauss-Seidel

- 1: **Inisialisasi:** Set $V^{(0)} = 1.0 \angle 0$ untuk semua bus kecuali slack
- 2: Set iterasi $k = 0$, toleransi ϵ
- 3: **repeat**
- 4: **for** setiap bus i (kecuali slack) **do**
- 5: **if** bus i adalah PQ bus **then**
- 6: Hitung $V_i^{(k+1)}$ dengan formula PQ bus
- 7: **else if** bus i adalah PV bus **then**
- 8: Hitung V_i^{temp} , lalu adjust magnitude ke $|V_i^{spec}|$
- 9: **end if**
- 10: **end for**
- 11: Hitung mismatch daya untuk semua bus
- 12: **if** $\max(|\Delta P|, |\Delta Q|) < \epsilon$ **then**
- 13: **Konvergen! return** solusi
- 14: **end if**
- 15: $k = k + 1$
- 16: **until** konvergen atau $k > k_{max}$

Faktor Akselerasi

Tujuan

Mempercepat konvergensi Gauss-Seidel

Formula dengan Akselerasi

$$V_i^{(k+1)} = V_i^{(k)} + \alpha \left(V_i^{new} - V_i^{(k)} \right)$$

di mana:

- α : faktor akselerasi ($1.0 < \alpha < 2.0$)
- V_i^{new} : nilai dari formula Gauss-Seidel standar
- Optimal: $\alpha \approx 1.6$ untuk banyak sistem

Catatan

Terlalu besar α dapat menyebabkan divergensi!

Keunggulan dan Keterbatasan Gauss-Seidel

Keunggulan

- ✓ Sederhana implementasi
- ✓ Memerlukan memori kecil
- ✓ Tidak perlu Jacobian
- ✓ Konvergen untuk sistem well-conditioned

Keterbatasan

- × Konvergensi linear (lambat)
- × Bisa 20-100 iterasi
- × Sangat sensitif terhadap ukuran sistem
- × Jarang digunakan untuk sistem besar

Kesimpulan

Baik untuk sistem kecil atau untuk memahami konsep, tetapi Newton-Raphson lebih praktis untuk sistem nyata.

Newton-Raphson vs Gauss-Seidel

Aspek	Newton-Raphson	Gauss-Seidel
ubblue!10 Jumlah iterasi	3-5	20-100
Konvergensi	Kuadratik	Linear
ubblue!10 Kompleksitas/iterasi	Tinggi ($\mathcal{O}(n^3)$)	Rendah ($\mathcal{O}(n^2)$)
Memori	Besar	Kecil
ubblue!10 Jacobian	Perlu	Tidak perlu
Implementasi	Kompleks	Sederhana
ubblue!10 Sistem besar	Excellent	Poor
Robustness	Baik	Terbatas

Rekomendasi

Newton-Raphson untuk aplikasi praktis, **Gauss-Seidel** untuk pembelajaran

Output Analisis Aliran Daya

Untuk Setiap Bus

- Magnitude tegangan $|V_i|$ (pu atau kV)
- Sudut tegangan δ_i (derajat)
- Injeksi daya aktif P_i (MW)
- Injeksi daya reaktif Q_i (MVar)

Untuk Setiap Saluran/Transformator

- Aliran daya aktif P_{ij} (MW)
- Aliran daya reaktif Q_{ij} (MVar)
- Loading (% dari rating)
- Rugi-rugi $P_{loss} = P_{ij} + P_{ji}$

Untuk Sistem Keseluruhan

- Total pembangkitan

Kriteria Operasi Normal

Batas Tegangan

$$0.95 \text{ pu} \leq |V_i| \leq 1.05 \text{ pu}$$

(standar IEEE, bisa berbeda per negara)

Batas Loading Saluran

$$|S_{ij}| \leq S_{ij}^{max}$$

Biasanya dioperasikan $< 80 - 90\%$ untuk margin kontingensi

Batas Daya Reaktif Generator

$$Q_i^{min} \leq Q_i \leq Q_i^{max}$$

Jika dilanggar, generator tidak bisa mempertahankan tegangan

Identifikasi Masalah dari Hasil

Low Voltage

Penyebab:

- Beban terlalu besar
- Kekurangan support daya reaktif
- Saluran terlalu panjang

Solusi:

- Tambah kapasitor
- Naikkan tap trafo
- Tingkatkan tegangan generator

Overload

Penyebab:

- Aliran daya berlebihan
- Kontingensi (saluran lain trip)

Solusi:

- Tambah saluran paralel
- Redispatch generator
- Rekonfigurasi jaringan

Studi Kontingensi (N-1)

Periksa sistem tetap aman jika satu komponen trip/gagal

Pengenalan MATPOWER

Apa itu MATPOWER?

- Paket open-source untuk simulasi sistem tenaga
- Kompatibel dengan MATLAB dan GNU Octave
- Dikembangkan oleh Cornell University
- Berisi fungsi untuk power flow, OPF, CPF, dll.

Fitur Utama

- Power flow (Newton, Gauss-Seidel, Fast-Decoupled)
- Optimal Power Flow (OPF)
- Continuation Power Flow (CPF)
- Library sistem test (IEEE 9, 14, 30, 118, 300 bus, dll.)

Website

<https://matpower.org>

Struktur Data MATPOWER

mpc (MATPOWER Case)

Struktur data yang berisi semua informasi sistem:

- `mpc.baseMVA`: Base power (MVA)
- `mpc.bus`: Data bus (voltage, angle, load, dll.)
- `mpc.gen`: Data generator
- `mpc.branch`: Data saluran/transformator

Contoh: Load Case

```
mpc = loadcase('case9'); % Load IEEE 9-bus system
```

Menjalankan Power Flow di MATPOWER

Contoh Kode Octave

```
% Load sistem IEEE 9-bus
mpc = loadcase('case9');

% Jalankan power flow (Newton-Raphson)
results = runpf(mpc);

% Tampilkan hasil
printpf(results);

% Akses data hasil
voltages = results.bus(:,8); % Voltage magnitude
angles = results.bus(:,9);   % Voltage angles
gen_P = results.gen(:,2);    % Generator real power
```

Contoh: Tambah Beban

```
mpc = loadcase('case9');  
  
% Tambah 20% beban di bus 5  
mpc.bus(5,3) = mpc.bus(5,3) * 1.2; % Pd  
mpc.bus(5,4) = mpc.bus(5,4) * 1.2; % Qd  
  
% Jalankan power flow  
results = runpf(mpc);  
  
% Cek tegangan bus 5  
V5 = results.bus(5,8);  
fprintf('Tegangan bus 5: %.4f pu\n', V5);
```

Latihan

Coba ubah parameter berbeda: generator output, line outage, dll.

Pseudocode Sederhana

```
% Inisialisasi
V = ones(n,1); % Flat start
V(slack) = V_slack;

for iter = 1:max_iter
    for i = 1:n
        if i == slack, continue; end

        % Hitung sum term
        sum_term = 0;
        for k = 1:n
            if k ~= i
                sum_term = sum_term + Y(i,k)*V(k);
            end
        end
    end
end
```

Studi Kasus: Sistem Bengkulu

Skenario

Analisis aliran daya sistem kelistrikan Bengkulu dengan:

- PLTU Bengkulu (2×100 MW)
- PLTA Musi (210 MW)
- PLTP Hululais (220 MW)
- Beban puncak kota Bengkulu (~ 150 MW)

Pertanyaan Analisis

- 1 Berapa tegangan di berbagai gardu induk?
- 2 Apakah ada saluran overload?
- 3 Berapa total rugi-rugi sistem?
- 4 Bagaimana jika PLTP Hululais trip?
- 5 Dimana perlu tambahan kompensasi reaktif?

Aplikasi dalam Dispatch Ekonomi

Integrasi dengan Ekonomi Operasi

Power flow adalah komponen dalam Economic Dispatch:

- 1 Tentukan output generator berdasarkan biaya
- 2 Jalankan power flow untuk cek feasibility
- 3 Verifikasi tidak ada violation (voltage, overload)
- 4 Jika ada violation, adjust dispatch
- 5 Iterate sampai solusi optimal dan feasible

Optimal Power Flow (OPF)

Kombinasi optimasi ekonomi dengan batasan power flow

$$\min \sum_i C_i(P_{G,i})$$

subject to power flow equations dan batasan operasi

Perencanaan Ekspansi Sistem

Pertanyaan Perencanaan

- Dimana lokasi optimal untuk pembangkit baru?
- Perlu saluran transmisi baru dimana?
- Berapa kapasitas yang diperlukan?
- Bagaimana dampak integrasi energi terbarukan?

Metodologi

- 1 Proyeksikan beban masa depan (5-20 tahun)
- 2 Model berbagai skenario ekspansi
- 3 Jalankan power flow untuk setiap skenario
- 4 Evaluasi tegangan, loading, rugi-rugi
- 5 Analisis biaya vs benefit
- 6 Pilih skenario optimal

Poin Kunci

- 1 Power flow analysis adalah fundamental dalam analisis sistem tenaga
- 2 Tiga tipe bus: Slack, PV, PQ dengan karakteristik berbeda
- 3 Newton-Raphson: cepat (kuadratik), kompleks, untuk sistem besar
- 4 Gauss-Seidel: sederhana, lambat (linear), untuk pembelajaran
- 5 MATPOWER: tool powerful untuk simulasi dan analisis
- 6 Hasil power flow digunakan untuk operasi, perencanaan, optimasi

Skills yang Harus dikuasai

- Formulasi masalah power flow
- Implementasi algoritma dasar (Gauss-Seidel)
- Penggunaan MATPOWER untuk sistem riil
- Interpretasi hasil dan identifikasi masalah

Yang Belum Dibahas Detail

- Fast-Decoupled Power Flow (FDPF)
- DC Power Flow (approximation)
- Continuation Power Flow (CPF) untuk voltage stability
- Stochastic Power Flow (untuk renewable integration)
- Three-phase unbalanced power flow

Bacaan Lanjutan

- Saadat, H. "Power System Analysis" - Chapter 6
- Glover et al. "Power System Analysis and Design" - Chapter 6
- MATPOWER User's Manual
- IEEE Test Systems documentation

- 1 Install GNU Octave dan MATPOWER
- 2 Load dan jalankan power flow untuk IEEE 9-bus system
- 3 Modifikasi beban di satu bus, amati perubahan tegangan
- 4 Simulasikan outage satu saluran, cek dampaknya
- 5 Implementasikan Gauss-Seidel sederhana untuk 3-bus system
- 6 Buat laporan analisis power flow untuk sistem pilihan Anda

Terima Kasih!

Pertanyaan?