

Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Perancangan dan Operasi Jaringan Distribusi

Program Studi Teknik Elektro

Universitas Bengkulu

Minggu 7 - 9 Agustus 2026

Agenda Pembahasan

- 1 Pendahuluan: Peran Sistem Distribusi
- 2 Arsitektur Jaringan Distribusi
- 3 Topologi Jaringan Distribusi
- 4 Analisis Jatuh Tegangan dan Rugi-Rugi
- 5 Distributed Generation (DG)
- 6 Aplikasi GNU Octave untuk Analisis Distribusi
- 7 Studi Kasus: Sistem Distribusi Bengkulu
- 8 Kesimpulan dan Rangkuman

Setelah perkuliahan ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- ➊ Menjelaskan arsitektur dan komponen sistem distribusi
- ➋ Menganalisis berbagai topologi jaringan distribusi
- ➌ Menghitung jatuh tegangan dan rugi-rugi pada jaringan distribusi
- ➍ Memahami konsep distributed generation (DG)
- ➎ Menggunakan GNU Octave untuk simulasi jaringan distribusi

Sistem Distribusi dalam Power System

Definisi:

- Bagian akhir dari sistem tenaga listrik
- Menghantarkan listrik dari gardu induk (substation) ke konsumen akhir
- Level tegangan: Medium Voltage (MV) dan Low Voltage (LV)



Karakteristik:

- Jaringan tersebar luas
- Beban terdistribusi
- Fluktuasi beban tinggi
- Biaya investasi $\sim 40\%$ total sistem

Level Tegangan Distribusi di Indonesia

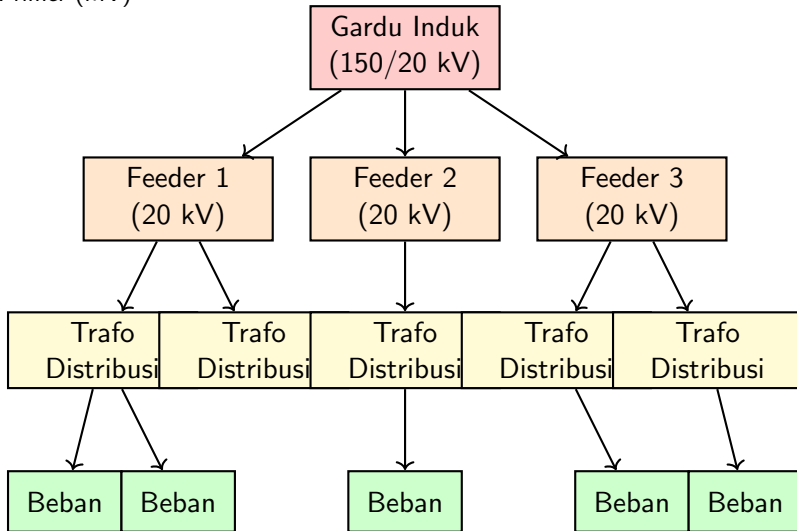
Kategori	Tegangan	Aplikasi
2* Distribusi Primer	20 kV	Standar PLN
	6 kV / 10 kV	Industri khusus
2* Distribusi Sekunder	380/220 V	Residensial, komersial
	220/127 V	Lama (jarang)

Catatan Penting

- Tegangan 20 kV adalah standar baru PLN (menggantikan 6 kV dan 10 kV)
- Distribusi primer: 3 fasa
- Distribusi sekunder: 3 fasa + netral (untuk beban 1 fasa)

Struktur Hierarki Distribusi

Primer (MV)



Sekunder (LV)

Komponen Utama Sistem Distribusi

1. Gardu Induk Distribusi (GI)

- Transformator step-down (150/20 kV)
- Busbar dan switchgear
- Proteksi dan pengukuran
- SCADA system

2. Feeder (Penyulang)

- Saluran 20 kV dari GI
- Overhead line atau underground cable
- Dilengkapi: CB, recloser, sectionalizer

3. Transformator Distribusi

• 20 kV / 200-220 V

4. Peralatan Proteksi & Kontrol

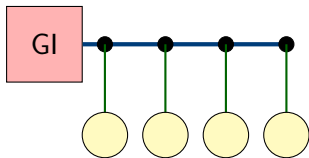
- **Recloser:** Pemutus otomatis dengan auto-reclose
- **Sectionalizer:** Pemisah seksi otomatis
- **Fuse cutout:** Pengaman lebur
- **Lightning arrester:** Penangkal petir

5. Kapasitor Bank

- Kompensasi daya reaktif
- Perbaikan faktor daya
- Mengurangi rugi-rugi
- Memperbaiki profil tegangan

6. Voltage Regulator

Topologi Radial



Topologi Radial

Karakteristik:

- Satu jalur suplai ke beban
- Paling sederhana dan ekonomis
- Paling banyak digunakan (90% jaringan)

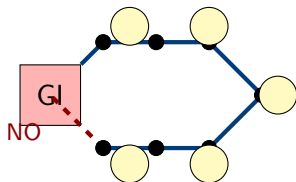
Keunggulan:

- Biaya investasi rendah
- Mudah dioperasikan
- Proteksi sederhana
- Koordinasi relai mudah

Kelemahan:

- Keandalan rendah
- Gangguan → pemadaman area luas

Topologi Ring (Loop)



Topologi Ring

Karakteristik:

- Loop tertutup dengan 1 titik Normally Open (NO)
- Beroperasi seperti radial (NO terbuka)
- Dapat di-loop saat gangguan

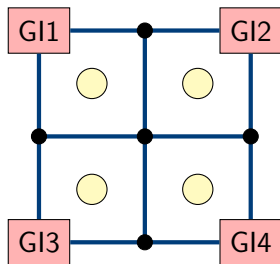
Keunggulan:

- Keandalan lebih tinggi dari radial
- Ada jalur alternatif
- Pemulihan cepat saat gangguan
- Jatuh tegangan lebih kecil

Kelemahan:

- Biaya lebih tinggi (saluran lebih

Topologi Mesh (Jaring)



Topologi Mesh

Karakteristik:

- Multiple sumber dan jalur
- Semua node terinterkoneksi
- Jarang digunakan di distribusi
- Lebih umum di transmisi

Keunggulan:

- Keandalan sangat tinggi
- Banyak jalur alternatif
- Rugi-rugi minimal
- Jatuh tegangan minimal
- Kualitas daya terbaik

Kelemahan:

- Biaya sangat tinggi

Perbandingan Topologi Jaringan

Parameter	Radial	Ring	Mesh
Biaya Investasi	Rendah	Sedang	Tinggi
Keandalan	Rendah	Sedang	Tinggi
Jatuh Tegangan	Besar	Sedang	Kecil
Rugi-rugi	Besar	Sedang	Kecil
Kompleksitas Proteksi	Sederhana	Sedang	Kompleks
Arus Hubung Singkat	Kecil	Sedang	Besar
Waktu Pemulihan	Lama	Cepat	Sangat Cepat
Aplikasi Utama	Pedesaan	Pinggiran kota	Pusat kota

Pemilihan Topologi

Pemilihan topologi bergantung pada:

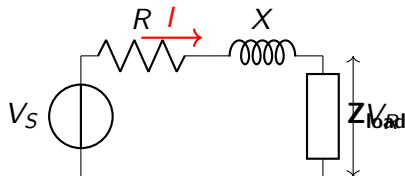
- Kepadatan beban (urban vs rural)
- Tingkat keandalan yang diperlukan
- Budget investasi
- Pertumbuhan beban proyeksi

Jatuh Tegangan pada Jaringan Distribusi

Definisi: Perbedaan tegangan antara dua titik akibat impedansi saluran dan arus beban.

Penyebab Jatuh Tegangan:

- Resistansi saluran (R)
- Reaktansi saluran (X)
- Arus beban (I)
- Panjang saluran
- Faktor daya beban



Formula Jatuh Tegangan:

$$\begin{aligned}\Delta V &= V_S - V_R \\ &= I(R \cos \phi + X \sin \phi)\end{aligned}$$

Dampak Jatuh Tegangan:

- Tegangan konsumen rendah
- Peralatan tidak optimal
- Rugi-rugi meningkat
- Umur peralatan berkurang

Persentase:

$$\frac{\Delta V}{V_S} \times 100\%$$

Standar Jatuh Tegangan

Standar PLN (SPLN)

Batas jatuh tegangan yang diizinkan:

- **Jaringan Tegangan Rendah (JTR):** Maksimal $\pm 5\%$ dari tegangan nominal
- **Jaringan Tegangan Menengah (JTM):** Maksimal $\pm 5\%$ dari tegangan nominal
- **Total dari GI hingga konsumen:** Maksimal 10%

Contoh Perhitungan

Untuk sistem 220 V:

- Tegangan minimum: $220 - 5\% = 209 \text{ V}$
- Tegangan maksimum: $220 + 5\% = 231 \text{ V}$

Untuk sistem 20 kV:

- Tegangan minimum: $20 - 5\% = 19 \text{ kV}$

Metode Mengurangi Jatuh Tegangan

1. Meningkatkan Penampang Konduktor

- Menurunkan resistansi
- Biaya investasi tinggi
- Efektif untuk jarak jauh

2. Voltage Regulator

- Transformer dengan tap changer
- Dipasang di tengah feeder
- Menjaga tegangan konstan

3. Kapasitor Bank

- Kompensasi daya reaktif
- Mengurangi arus saluran
- Memperbaiki faktor daya

4. Rekonfigurasi Jaringan

- Mengubah topologi
- Mempersingkat jalur
- Load balancing antar feeder

5. Distributed Generation (DG)

- Pembangkit lokal (PLTS, genset)
- Mengurangi beban dari GI
- Mengurangi arus saluran

6. Meningkatkan Level Tegangan

- Migrasi dari 6 kV ke 20 kV
- Arus lebih kecil ($I = S/\sqrt{3}V$)
- Jatuh tegangan berkurang

Rugi-Rugi Daya pada Jaringan Distribusi

Jenis Rugi-Rugi:

1. Rugi-Rugi Teknis:

- **Rugi Saluran:** $P_{loss} = 3I^2R$
- **Rugi Transformator:**
 - Rugi inti (konstan)
 - Rugi tembaga (I^2R)
- **Rugi Corona**
- **Rugi Dielektrik**

2. Rugi-Rugi Non-Teknis:

- Pencurian listrik
- Kesalahan meteran
- Kesalahan administrasi

Perhitungan Rugi-Rugi Saluran:

Untuk sistem 3 fasa:

$$P_{loss} = 3I^2R = 3 \left(\frac{P}{\sqrt{3}V \cos \phi} \right)^2 R$$

Energi yang Hilang:

$$E_{loss} = P_{loss} \times t \text{ (kWh)}$$

Persentase Rugi-Rugi:

$$\% \text{Loss} = \frac{P_{loss}}{P_{supply}} \times 100\%$$

Strategi Mengurangi Rugi-Rugi

① Peningkatan Faktor Daya

- Instalasi kapasitor bank
- Mengurangi arus reaktif
- Target $PF \geq 0.90 - 0.95$

② Load Balancing

- Distribusi beban merata antar fasa
- Mengurangi arus netral
- Rekonfigurasi jaringan

③ Penggantian Konduktor

- Konduktor lebih besar (resistansi lebih kecil)
- Prioritas pada feeder dengan beban tinggi

④ Optimasi Lokasi Transformator

- Dekat dengan pusat beban
- Mengurangi panjang saluran sekunder

⑤ Distributed Generation

- Pembangkit tersebar di dekat beban
- Mengurangi aliran daya jarak jauh

⑥ Pengurangan Rugi Non-Teknis

- Smart metering (AMI)

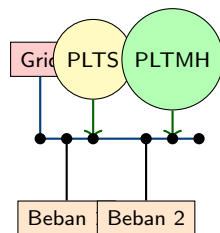
Konsep Distributed Generation

Definisi:

- Pembangkit skala kecil-menengah (< 10 MW)
- Terhubung di level distribusi
- Dekat dengan beban

Jenis DG:

- PLTS atap (rooftop solar PV)
- PLTMH (micro-hydro)
- Diesel genset
- Fuel cell
- Wind turbine (kecil)
- Biomass/biogas
- Energy storage (battery)



Sistem dengan DG

Manfaat dan Tantangan DG

Manfaat DG:

① Mengurangi Rugi-Rugi

- Produksi lokal, konsumsi lokal
- Mengurangi aliran daya jarak jauh

② Memperbaiki Profil Tegangan

- Injeksi daya lokal
- Mengurangi jatuh tegangan

③ Menunda Investasi

- Mengurangi kebutuhan upgrade jaringan
- Menunda pembangunan GI baru

④ Meningkatkan Keandalan

- Sumber cadangan saat gangguan grid

Tantangan DG:

① Voltage Rise

- Penetrasi DG tinggi → overvoltage
- Perlu voltage control

② Reverse Power Flow

- Aliran daya terbalik
- Proteksi perlu disesuaikan

③ Harmonik dan Kualitas Daya

- Inverter → harmonik
- Perlu filter

④ Proteksi

- Koordinasi proteksi rumit
- False tripping
- Islanding detection

⑤ Intermitensi

- PLTS: tergantung cuaca

Peraturan Menteri ESDM No. 26/2021

Tentang: Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap yang Terhubung pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik untuk Kepentingan Umum

Poin-Poin Utama:

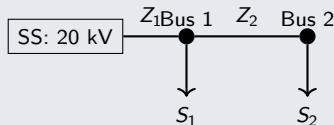
- **Kapasitas:** Maksimal 100% dari daya tersambung pelanggan
- **Export-Import Scheme:**
 - Ekspor ke PLN: 65% dari tarif retail (tahun 2024-2025)
 - Impor dari PLN: 100% tarif normal
- **Technical Requirements:**
 - Inverter sesuai standar (SNI, IEC)
 - Anti-islanding protection
 - Maximum THD: 5%
- **Metering:** Export-import meter (kWh exim)

Analisis Jaringan Distribusi Radial

Metode Backward-Forward Sweep:

- ➊ **Backward Sweep:** Hitung arus dari ujung ke sumber
- ➋ **Forward Sweep:** Hitung tegangan dari sumber ke ujung
- ➌ Iterasi hingga konvergen

Contoh Sistem Sederhana



Implementasi Octave - Bagian 1

Inisialisasi Data Sistem

```
% Data sistem distribusi radial sederhana  
clear; clc;
```

```
% Tegangan base (line-to-line)  
Vbase = 20e3; % 20 kV  
Sbase = 1e6; % 1 MVA (untuk per-unit, opsional)
```

```
% Tegangan sumber (phase voltage)  
Vs = Vbase / sqrt(3); % V
```

```
% Impedansi saluran (ohm)  
Z_line = [0.3+1j*0.4; % Z1: SS to Bus1  
          0.4+1j*0.5]; % Z2: Bus1 to Bus2
```

```
% Beban (VA kompleks per fasa)
```

```
S_load = [500e3 + 1j*250e3; % Bus 1: 500 kW, 250 kVAR
```

Implementasi Octave - Bagian 2

Backward-Forward Sweep Algorithm

```
% Inisialisasi tegangan (flat start)
V = [Vs; Vs; Vs]; % Semua bus = Vs
n_bus = 3; % Termasuk source bus
max_iter = 20;
tol = 1e-6;

for iter = 1:max_iter
    V_old = V;

    % Backward Sweep: Hitung arus dari ujung
    I = zeros(2,1);
    I(2) = conj(S_load(2) / V(3)); % Arus Bus 2
    I(1) = I(2) + conj(S_load(1) / V(2)); % Arus Bus 1

    % Forward Sweep: Hitung tegangan dari source
    V(2) = V(1) - Z_line(1,2) * I(1); % Bus 2
    V(3) = V(2) - Z_line(2,3) * I(2); % Bus 3
```

Implementasi Octave - Bagian 3

Perhitungan Hasil dan Output

```
% Hitung jatuh tegangan dan rugi-rugi
```

```
Vmag = abs(V);
```

```
Vpu = Vmag / Vs;
```

```
VD_percent = (1 - Vpu) * 100;
```

```
% Rugi-rugi daya
```

```
P_loss_line1 = 3 * abs(I(1))^2 * real(Z_line(1));
```

```
P_loss_line2 = 3 * abs(I(2))^2 * real(Z_line(2));
```

```
P_loss_total = P_loss_line1 + P_loss_line2;
```

```
% Tampilkan hasil
```

```
fprintf('\nHasil Analisis:\n');
```

```
fprintf('Bus 1: V = %.2f kV (%.3f pu), VD = %.2f%%\n', ...  
        Vmag(2)/1e3, Vpu(2), VD_percent(2));
```

```
fprintf('Bus 2: V = %.2f kV (%.3f pu), VD = %.2f%%\n', ...  
        Vmag(3)/1e3, Vpu(3), VD_percent(3));
```

Karakteristik Sistem Distribusi Bengkulu

Data Umum:

- **Wilayah:** PLN ULP Bengkulu (Unit Layanan Pelanggan)
- **Tegangan Distribusi:** 20 kV (primer), 380/220 V (sekunder)
- **Topologi:** Mayoritas radial, beberapa ring di pusat kota
- **Jumlah Feeder:** $\sim$ 20-30 feeder dari berbagai GI
- **Beban Puncak Total:** $\sim$ 80-100 MW (2024)

Gardu Induk di Bengkulu:

- GI Betungan (150 kV / 20 kV)
- GI Teluk Segara (150 kV / 20 kV)
- GI Padang Jati (150 kV / 20 kV)

Tantangan Utama:

- Pertumbuhan beban 5-7% per tahun
- Wilayah geografis berbukit (saluran panjang)
- Jatuh tegangan di ujung feeder area rural
- Rugi-rugi distribusi relatif tinggi

Permasalahan Tipikal: Feeder Pedesaan

Studi Kasus

Feeder radial 20 kV melayani daerah pedesaan di Kabupaten Bengkulu Utara:

- Panjang total: 25 km
- Konduktor: AAAC 70 mm² ($R = 0.5 \Omega/\text{km}$, $X = 0.35 \Omega/\text{km}$)
- Beban tersebar: Total 2 MW, PF = 0.85 lagging
- 10 transformator distribusi sepanjang feeder

Analisis Sederhana:

- Jatuh tegangan di ujung: $\sim 8\text{-}10\%$ (melebihi batas!)
- Rugi-rugi: $\sim 5\text{-}7\%$ dari daya total
- Tegangan konsumen saat beban puncak: 190-200 V (seharusnya 220 V)

Solusi yang Diterapkan:

1. Instalasi voltage regulator di km 15

Potensi DG di Bengkulu

PLTS Atap:

- Iradiasi solar: $\sim 4.5 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$
- Potensi besar di sektor komersial dan residensial
- Target PLN: 10% pelanggan dengan rooftop solar (2030)

PLTMH:

- Banyak sungai kecil di daerah pegunungan
- Sudah ada beberapa PLTMH: 50-500 kW
- Tantangan: Akses, O&M, interkoneksi ke grid

Biomassa:

- Perkebunan sawit luas
- Potensi PLTBg dari POME
- Beberapa pabrik kelapa sawit sudah mandiri energi

Dampak Integrasi DG

- Mengurangi beban dari GI

Poin-Poin Utama

- ① **Sistem Distribusi:** Segmen akhir yang menghantarkan listrik ke konsumen (MV & LV)
- ② **Topologi Jaringan:**
 - Radial: Ekonomis, keandalan rendah
 - Ring: Keandalan sedang, biaya sedang
 - Mesh: Keandalan tinggi, biaya tinggi
- ③ **Jatuh Tegangan:** $\Delta V = I(R \cos \phi + X \sin \phi)$
 - Batas: $\pm 5\%$ dari nominal
 - Solusi: Voltage regulator, kapasitor bank, upgrade konduktor
- ④ **Rugi-Rugi:** $P_{loss} = 3I^2R$
 - Target: $< 8-10\%$
 - Strategi: Perbaiki PF, load balancing, DG
- ⑤ **Distributed Generation:**
 - Manfaat: Mengurangi losses, memperbaiki voltage profile
 - Tantangan: Voltage rise, reverse power flow, proteksi

Tren Masa Depan Distribusi

Smart Distribution Grid:

- Advanced Metering Infrastructure (AMI)
- Distribution Automation (DA)
- Outage Management System (OMS)
- Volt-VAR Optimization (VVO)

Microgrids:

- Sistem lokal yang dapat beroperasi terisolasi
- Kombinasi DG, storage, dan beban
- Meningkatkan resilience

Vehicle-to-Grid (V2G):

Energy Storage:

- Battery ESS di level distribusi
- Peak shaving, load leveling
- Integrasi dengan PLTS

Digital Twin:

- Model virtual jaringan distribusi
- Simulasi dan optimasi real-time
- Predictive maintenance

Blockchain for Energy:

- Peer-to-peer energy trading
- Transparent metering
- Smart contracts

Tugas dan Persiapan Minggu Depan

Penugasan Minggu Ini:

- 1 Soal perhitungan jatuh tegangan dan rugi-rugi pada jaringan distribusi radial
- 2 Implementasi analisis backward-forward sweep menggunakan GNU Octave
- 3 Studi kasus: Analisis dampak integrasi PLTS atap terhadap profil tegangan
- 4 Riset mini: Regulasi DG (PLTS atap) di Indonesia

Persiapan Minggu Depan - Analisis Aliran Daya:

- Review: Matriks admitansi bus (Y-bus)
- Baca: Metode Newton-Raphson dan Gauss-Seidel
- Install: MATPOWER di Octave
- Familiarisasi dengan MATPOWER case files

Buku Teks:

- ❶ Gönen, T. (2014). *Electric Power Distribution Engineering*. CRC Press.
- ❷ Pabla, A. S. (2012). *Electric Power Distribution*. Tata McGraw-Hill.
- ❸ Short, T. A. (2014). *Electric Power Distribution Handbook*. CRC Press.

Standar:

- SPLN (Standar PLN) untuk Sistem Distribusi
- IEEE 1547: Interconnection of Distributed Energy Resources
- IEC 61850: Communication Networks in Substations

Regulasi:

- Permen ESDM No. 26/2021: PLTS Atap
- Permen ESDM No. 4/2020: Aturan Distribusi Tenaga Listrik

Software:

- GNU Octave + MATPOWER: <https://matpower.org>
- OpenDSS: Distribution System Simulator

Terima Kasih

Ada Pertanyaan?



Untuk Diskusi Mahasiswa:

- 1 Mengapa topologi radial masih dominan di Indonesia meskipun keandalannya rendah?
- 2 Bagaimana cara menentukan lokasi optimal untuk pemasangan kapasitor bank pada feeder distribusi?
- 3 Apa dampak penetrasi PLTS atap yang tinggi ($\geq 30\%$) terhadap stabilitas tegangan jaringan distribusi?
- 4 Jelaskan konsep "reverse power flow" dan bagaimana hal ini mempengaruhi sistem proteksi!
- 5 Mengapa rugi-rugi distribusi di Indonesia masih tinggi ($\sim 10\%$) dibanding negara maju ($< 5\%$)?
- 6 Bagaimana smart metering dapat membantu mengurangi rugi-rugi non-teknis?
- 7 Apa perbedaan utama antara microgrid dan sistem distribusi konvensional?