



Analisis Voltage Drop Dan Power Losses Pada Saluran Transmisi 275 Kv Dengan 5 Bus Menggunakan Simulasi Matlab

Nico Ewaldo Fan Gulo¹, Pristisal Wibowo², Ahmad Dani³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro, Universitas Pembangunan Panca Budi

nicogulo98@gmail.com, pristisawibowo@dosen.pancabudi.ac.id, ahmad.kartasasmita@gmail.com

Abstrak

Sistem transmisi daya listrik tegangan tinggi, seperti saluran 275 kV, memainkan peran krusial dalam menjamin penyaluran energi yang efisien dan andal dari pembangkit ke konsumen. Namun, kompleksitas operasional jaringan sering kali menyebabkan fenomena jatuh tegangan (*voltage drop*) dan rugi-rugi daya (*power losses*), yang berpotensi mengganggu stabilitas sistem, terutama pada konfigurasi multi-bus. Penelitian ini bertujuan menganalisis pola jatuh tegangan dan rugi-rugi daya pada saluran transmisi 275 kV dengan konfigurasi 5 bus menggunakan simulasi MATLAB. Analisis dilakukan melalui *load flow analysis* berbasis metode Newton-Raphson untuk mengevaluasi profil tegangan, rugi-rugi daya aktif/reaktif, serta dampak variasi beban pada stabilitas sistem. Simulasi mencakup tiga skenario: beban normal, peningkatan beban 25%, dan peningkatan beban 50%. Hasil menunjukkan bahwa jatuh tegangan (*voltage drop*) meningkat seiring peningkatan beban, dengan penurunan tegangan tertinggi terjadi pada Bus 5. Pada skenario peningkatan beban 50%, tegangan pada Bus 5 mencapai 0.950 pu (jatuh tegangan 5%), yang merupakan batas bawah toleransi operasi standar ($\pm 5\%$). Rugi-rugi daya aktif juga meningkat signifikan dari 6.11 MW (beban normal) menjadi 13.28 MW (peningkatan beban 50%), atau peningkatan sebesar 117%, sesuai dengan teori $P_{loss} = I^2 R$. Rugi-rugi daya reaktif berubah dari negatif (-10.81 Mvar) menjadi positif (+11.32 Mvar), menunjukkan dominasi efek kapasitansi shunt pada beban tinggi.

Kata kunci: Voltage Drop, Power Losses, Load Flow, Saluran Transmisi

1. Latar Belakang

Sistem transmisi daya listrik tegangan tinggi, seperti saluran 275 kV, memainkan peran vital dalam menjamin penyaluran energi yang efisien dan andal dari pembangkit ke konsumen. Dalam konteks modern, sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai penghubung antara sumber energi dan titik beban, tetapi juga menjadi tulang punggung stabilitas jaringan listrik. Namun, kompleksitas operasional jaringan transmisi sering kali menghadirkan tantangan signifikan, terutama berkaitan dengan fenomena jatuh tegangan (*voltage drop*) [1] dan rugi-rugi daya (*power losses*) [2]. Masalah ini tidak hanya memengaruhi kualitas daya yang disalurkan kepada konsumen, tetapi juga memiliki potensi untuk mengganggu stabilitas keseluruhan sistem, terutama pada konfigurasi *multi-bus* yang melibatkan interkoneksi kompleks antara pembangkit, gardu induk, dan beban. Studi oleh Abdulkareem et al., 2021 menunjukkan bahwa fluktuasi beban dan karakteristik impedansi saluran transmisi dapat memperparah ketidakseimbangan tegangan. Sementara itu, Choden et al., 2022 menekankan bahwa variasi beban yang tidak terkompensasi sering kali menjadi penyebab utama ketidakstabilan tegangan, terutama pada sistem dengan beban dinamis.

Pada sistem transmisi AC 275 kV dengan konfigurasi 5 bus, variasi beban dan interaksi antar bus menambah kompleksitas analisis. Konfigurasi 5 bus merupakan representasi standar yang banyak digunakan untuk memodelkan dinamika jaringan transmisi modern, termasuk interaksi antara bus generator, bus beban, dan bus penghubung. Analisis komprehensif pada sistem AC 275 kV dengan 5 bus—yang mencerminkan realitas jaringan modern—masih terbatas. Chekh et al., 2021 menyarankan kompensasi jatuh tegangan (*voltage drop*) pada sistem DC untuk objek otonom, tetapi pendekatan serupa pada sistem AC memerlukan pertimbangan tambahan, seperti sinkronisasi fase dan manajemen daya reaktif. Di sisi lain, Shaikh et al., 2021 menemukan bahwa ketidakakuratan dalam pemodelan konduktor bundel dapat menyebabkan kesalahan prediksi rugi-rugi daya (*power losses*) hingga 10%, menggarisbawahi kebutuhan simulasi berbasis model yang presisi.

Masalah *voltage drop* dan *power losses* tidak hanya memengaruhi kualitas daya yang disalurkan kepada konsumen tetapi juga berpotensi mengganggu stabilitas sistem, terutama pada konfigurasi *multi-bus* yang

melibatkan interkoneksi kompleks antara pembangkit, gardu induk, dan beban[7]. Studi oleh Abdulkareem et al., 2021 menunjukkan bahwa fluktuasi beban dan karakteristik impedansi saluran transmisi dapat memperparah ketidakseimbangan tegangan. Sementara itu, Choden et al., 2022 menekankan bahwa variasi beban yang tidak terkompensasi sering kali menjadi penyebab utama ketidakstabilan tegangan, terutama pada sistem dengan beban dinamis. Pada sistem transmisi AC 275 kV dengan konfigurasi 5 bus, variasi beban dan interaksi antar bus menambah kompleksitas analisis. Konfigurasi 5 bus merupakan representasi standar yang banyak digunakan untuk memodelkan dinamika jaringan transmisi modern, termasuk interaksi antara bus generator, bus beban, dan bus penghubung

Penelitian ini bertujuan menganalisis jatuh tegangan (*voltage drop*) dan rugi-rugi daya (*power losses*) pada saluran transmisi 275 kV dengan konfigurasi 5 bus menggunakan simulasi MATLAB. Analisis ini dilakukan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang pola jatuh tegangan (*voltage drop*) dan rugi-rugi pada berbagai skenario beban, serta mengevaluasi pengaruh konfigurasi bus terhadap stabilitas tegangan. Signifikansi penelitian ini terletak pada integrasi simulasi MATLAB untuk memodelkan parameter saluran secara detail, seperti impedansi seri, admitansi shunt, dan efek korona, yang jarang diintegrasikan dalam studi sebelumnya. Simulasi MATLAB dipilih karena kemampuannya dalam memodelkan parameter saluran secara presisi, serta fleksibilitasnya dalam mengakomodasi berbagai kondisi operasi dan variabel yang memengaruhi performa sistem.

Studi ini juga merespons kebutuhan praktis dalam perencanaan jaringan transmisi di wilayah dengan pertumbuhan beban cepat. Nasir, 2023 menekankan pentingnya proteksi tegangan rendah (*under-voltage protection*) untuk mencegah kegagalan sistem, dan jatuh tegangan (*voltage drop*) signifikan terjadi pada bus dengan beban industri berdaya tinggi [9]. Dengan demikian, hasil simulasi MATLAB diharapkan menjadi *benchmark* untuk perancangan strategi operasi dan pemeliharaan berbasis data. Kontribusi utama penelitian ini adalah penyediaan kerangka analisis sistem transmisi AC tegangan tinggi multi-bus yang dapat diadaptasi untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi jaringan. Kerangka ini tidak hanya relevan untuk sistem IEEE 5 bus, tetapi juga dapat diterapkan pada sistem transmisi lain dengan konfigurasi serupa.

Melalui simulasi yang dilakukan, diharapkan dapat diidentifikasi pola-pola spesifik yang dapat digunakan sebagai dasar untuk pengambilan keputusan dalam perencanaan dan operasi jaringan. Misalnya, pola jatuh tegangan (*voltage drop*) yang terjadi pada bus tertentu dapat menjadi indikator untuk menentukan lokasi optimal penempatan peralatan kompensasi, seperti kapasitor bank atau statcom[10][11]. Selain itu, analisis terhadap rugi-rugi daya (*power losses*) dapat membantu dalam mengevaluasi efisiensi sistem secara keseluruhan, serta memberikan rekomendasi mitigasi untuk mengurangi kerugian energi yang tidak perlu.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi komputasi berbasis model sistem tenaga listrik untuk menganalisis jatuh tegangan (*voltage drop*) dan rugi-rugi daya (*power losses*) pada saluran transmisi 275 kV dengan konfigurasi 5 bus. Analisis dilakukan melalui *load flow analysis* menggunakan metode Newton-Raphson, yang dipilih karena keunggulannya dalam konvergensi cepat dan akurasi tinggi untuk sistem berukuran sedang [12]. Metode ini memodelkan hubungan non-linear antara daya aktif (P), daya reaktif (Q), tegangan (V), dan sudut fasa (δ) pada setiap bus melalui iterasi numerik hingga mencapai toleransi kesalahan ≤ 0.001 .

Sistem yang dianalisis merupakan modifikasi dari standar IEEE 5-bus dengan penyesuaian parameter untuk merepresentasikan karakteristik saluran transmisi 275 kV. Modifikasi meliputi:

- Penetapan tegangan basis $V_{base}=275$ kV dan daya dasar $S_{base}=100$ MVA.
 - Konfigurasi bus: 1 bus *slack*, 2 bus *generator* (PV), dan 2 bus *beban* (PQ) sesuai studi Hakim et al., 2022
- Parameter sistem mengacu pada standar IEEE 5-bus [14], termasuk:
- Impedansi saluran : Nilai R , X , dan admitansi shunt $B/2$ per km untuk setiap saluran.
 - Daya aktif/reaktif pembangkit : Daya keluaran generator pada bus PV dan slack.
 - Beban awal : Daya aktif (P_{load}) dan reaktif (Q_{load}) pada setiap bus sesuai konfigurasi.

Tabel 1. Data Bus untuk Sistem 5 Bus

Bus No.	Bus Voltage	Generation		Load	
		Megawatts	Megavars	Megawatts	Megavars
1	1.06 + j0.0	0	0	0	0
2	1.0 + j0.0	40	30	20	10

3	1.0 + j0.0	0	0	45	15
4	1.0 + j0.0	0	0	40	5
5	1.0 + j0.0	0	0	60	10

Tabel 2. Parameter Saluran Transmisi Sistem 5 Bus Dalam Nilai Per Unit

Bus Code <i>p - q</i>	Line Impedance		Line Charging Per Unit
	R Per Unit	X Per Unit	
1-2	0.02	0.06	0.06
1-3	0.08	0.24	0.05
2-3	0.06	0.25	0.04
2-4	0.06	0.18	0.04
2-5	0.04	0.12	0.03
3-4	0.01	0.03	0.02
4-5	0.08	0.24	0.05

2.1 Skenario Simulasi

Dua skenario beban dirancang untuk mengevaluasi sensitivitas sistem:

1. Skenario 1 : Peningkatan beban sebesar 25% dari nilai awal.
2. Skenario 2 : Peningkatan beban sebesar 50% dari nilai awal.

Skenario ini dirancang untuk mensimulasikan kondisi beban puncak yang berpotensi memicu ketidakstabilan tegangan, seperti yang diamati pada studi Choden et al., 2022. Berikut Tabel 3. data bus untuk sistem 5 bus dengan skenario peningkatan beban pada sistem.

Tabel 3. Data Bus untuk Sistem 5 Bus Skenario Peningkatan Beban

Bus No.	Load		Load 25%		Load 50%	
	MW	MVARS	MW	MVARS	MW	MVARS
1	0	0	0	0	0	0
2	20	10	25	12.5	30	15
3	45	15	56.25	18.75	67.5	22.5
4	40	5	50	6.25	60	7.5
5	60	10	70	12.5	90	15

2.2 Simulasi Sistem

Model sistem dibangun menggunakan MATLAB/Simulink seperti terlihat pada Gambar 1. Model simulasi sistem 5 Bus 275 kV dengan toolbox berikut:

1. Simscape Electrical : Untuk pemodelan saluran transmisi, beban, dan generator.
2. Power System Analysis Toolbox : Untuk analisis aliran daya dan visualisasi hasil.

Implementasi Metode Newton-Raphson

1. Toleransi konvergensi : ≤ 0.001 untuk memastikan presisi hasil.
2. Iterasi maksimal : 50 iterasi untuk menghindari divergensi pada beban tinggi.
3. Validasi model : Hasil simulasi beban awal dibandingkan dengan data referensi IEEE 5-bus untuk memastikan akurasi [3].

2.3 Prosedur Simulasi

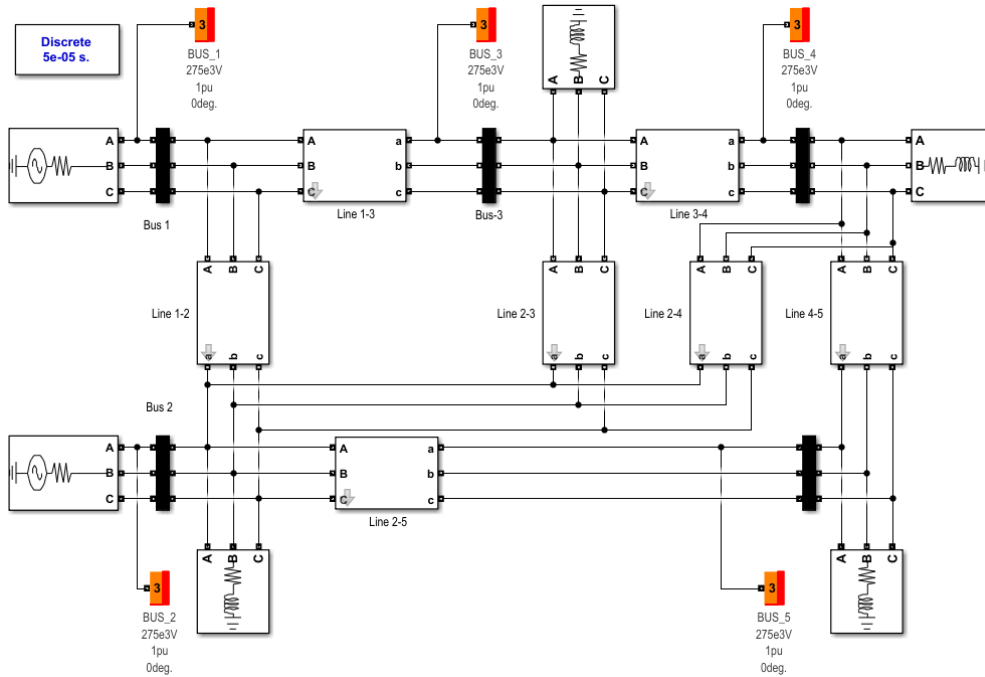
Konstruksi Model :

1. Blok Saluran Transmisi : Menggunakan blok Three-Phase PI Section Line untuk memodelkan impedansi seri ($R+jX$) dan admitansi shunt ($jB/2$). Parameter saluran disesuaikan dengan panjang dan konfigurasi konduktor aktual.
2. Blok Bus : Bus slack, PV, dan PQ dikonfigurasi menggunakan blok Load Flow Bus dengan parameter tegangan, daya, dan jenis bus sesuai desain.

Konfigurasi Beban :

1. Beban awal diatur sesuai data IEEE 5-bus.

2. Peningkatan beban 25% dan 50% dilakukan dengan memodifikasi parameter P_{load} dan Q_{load} pada blok Three-Phase Load .



Gambar 1. Model simulasi sistem 5 Bus 275 kV

2.4 Analisis Aliran Daya

1. Simulasi Skenario : Setiap skenario dijalankan untuk menghitung profil tegangan, rugi-rugi daya (*power losses*), dan aliran daya aktif/reaktif.
2. Pengumpulan Data :
 - Profil tegangan : Magnitude (V) dan sudut fasa (δ) di setiap bus.
 - Rugi-rugi daya : Rugi daya aktif (P_{loss}) dan reaktif (Q_{loss}) pada setiap saluran.
 - Aliran daya : Daya aktif/reaktif yang mengalir antar-bus.

2.5 Tahapan Metode Newton-Raphson

1. Pembentukan Matriks Admitansi (Y_{bus}) :
 Matriks Y_{bus} dibangun berdasarkan parameter impedansi (R, X) dan admitansi shunt ($B/2$) saluran.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

dengan $Y_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} + j \frac{B_{ij}}{2}$

2. Inisialisasi Tegangan :
 Tegangan awal di setiap bus diatur sebagai $V_i^{(0)} = 0.1 pu$ dan sudut fasa $\delta_i^{(0)} = 0^\circ$
3. Perhitungan Daya Mismatch ($\Delta P, \Delta Q$) :
 Daya aktif (P_i) dan reaktif (Q_i) dihitung menggunakan Persamaan (1) dan (2):

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (1)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |V_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2)$$

Daya mismatch:

$$\Delta P_i = P_{i,\text{spesifik}} - P_i^{(k)}, \quad \Delta Q_i = Q_{i,\text{spesifik}} - Q_i^{(k)}$$

4. Pembentukan Matriks Jacobian :

Matriks Jacobian (J) mencakup turunan parsial P dan Q terhadap δ dan V :

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial V} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (4)$$

5. Pembaruan Tegangan dan Sudut Fasa :

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i$$

$$V_i^{(k+1)} = V_i^{(k)} + \Delta V_i$$

6. Konvergensi : Iterasi dihentikan jika $|\Delta P_i| \leq 0.001$ dan $|\Delta Q_i| \leq 0.001$.

2.6 Analisis Data

Data hasil simulasi dianalisis untuk:

1. Jatuh tegangan (*voltage drop*) :

- Menghitung persentase penurunan tegangan ($\Delta V\%$) menggunakan Persamaan :

$$\Delta V\% = \frac{V_{\text{sender}} - V_{\text{reciever}}}{V_{\text{sender}}} \times 100\% \quad (6)$$

- Mengevaluasi stabilitas tegangan berdasarkan batas aman $\pm 5\%$ dari tegangan nominal.

2. Rugi-Rugi Daya :

- Membandingkan P_{loss} dan Q_{loss} antar-skenario untuk menilai efisiensi sistem.

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i \quad (7)$$

$$Q_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n I_i^2 X_i \quad (8)$$

3. Kinerja Sistem :

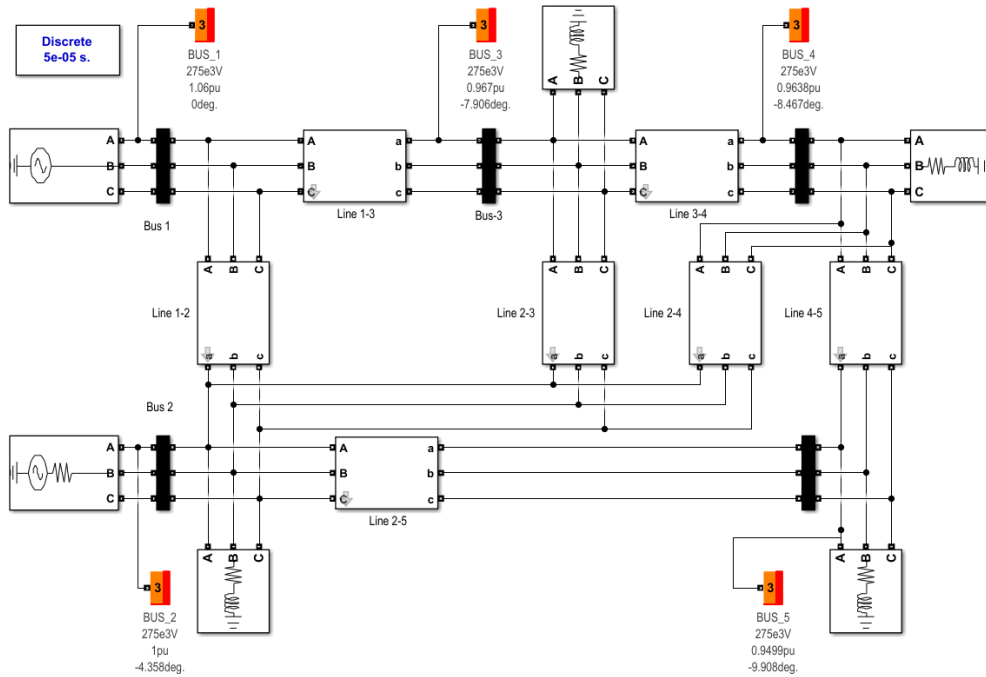
- Menganalisis pengaruh peningkatan beban terhadap kestabilan menggunakan indikator seperti *voltage collapse* dan ketidakseimbangan daya reaktif [15].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

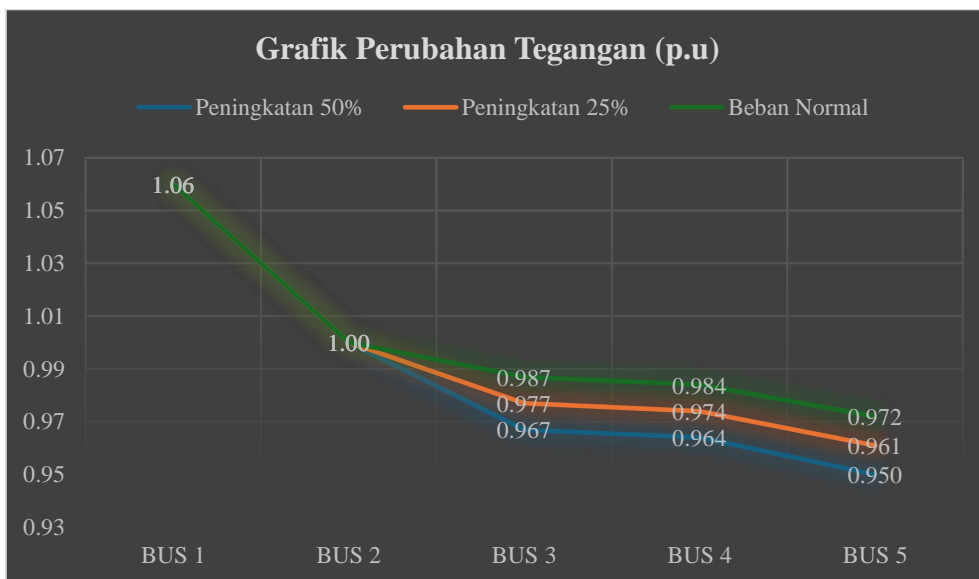
Simulasi dilakukan untuk tiga skenario yaitu beban normal, peningkatan beban 25%, dan peningkatan beban 50% yang diperlihatkan pada gambar 2. Data hasil *load flow* dari simulasi Simulink digunakan untuk menganalisis pola jatuh tegangan (*voltage drop*) dan rugi-rugi daya (*power losses*) pada saluran transmisi 275 kV dengan 5 bus. Berikut adalah pemaparan hasil simulasi secara rinci pada Tabel 4 menunjukkan magnitude tegangan (dalam per unit) dan sudut fasa untuk setiap bus pada ketiga skenario.

Tabel 4. Profil tegangan pada setiap bus

Bus	Beban Normal	Peningkatan 25%	Peningkatan 50%
1	1.060 pu / 0.00°	1.060 pu / 0.00°	1.060 pu / 0.00°
2	1.000 pu / -2.06°	1.000 pu / -3.20°	1.000 pu / -4.36°
3	0.987 pu / -4.63°	0.977 pu / -6.25°	0.967 pu / -7.91°
4	0.984 pu / -4.95°	0.974 pu / -6.69°	0.964 pu / -8.47°
5	0.972 pu / -5.76°	0.961 pu / -7.81°	0.950 pu / -9.91°



Gambar 2. Simulasi Matlab/Simulink Sistem 5 Bus 275 kV dengan peningkatan beban sebesar 50%



Gambar 3. Grafik perubahan tegangan pada masing masing Bus

3.1 Analisis Jatuh Tegangan (*Voltage Drop*)

Jatuh tegangan (*voltage drop*) dihitung relatif terhadap tegangan pengirim (Bus 1), pada tabel 2 menunjukkan nilai persentase tegangan yang jatuh pada masing-masing bus.

Tabel 2. Persentase Tegangan Jatuh pada Setiap Bus

BUS	Beban Normal	Peningkatan Beban 25%	Peningkatan Beban 50%
2	0.00%	0.00%	0.00%
3	1.30%	2.30%	3.30%
4	1.60%	2.60%	3.60%
5	2.80%	3.90%	5.00%

Bus Slack (Bus 1) memiliki tegangan tetap sebesar 1.060 pu, namun dalam perhitungan ini kita gunakan 1.0 pu sebagai basis , sehingga tidak menjadi dasar perhitungan jatuh tegangan (*voltage drop*). Bus PV (Bus 2) mempertahankan tegangan konstan di 1.000 pu, sehingga tidak mengalami jatuh tegangan (*voltage drop*) relatif terhadap basis 1.0 pu. Bus PQ (Bus 3–5) menunjukkan peningkatan jatuh tegangan (*voltage drop*) ini terjadi karena seiring bertambahnya beban. Pada skenario peningkatan beban 50% , jatuh tegangan (*voltage drop*) pada Bus 5 mencapai tepat 5.00% , hal ini adalah merupakan batas atas toleransi jatuh tegangan (*voltage drop*) berdasarkan standar operasi sistem tenaga listrik ($\pm 5\%$). Perubahan penurunan tegangan juga diperlihatkan pada gambar 3 Grafik perubahan tegangan pada masing masing Bus.

3.2 Analisis Rugi-Rugi Daya (*Power Losses*)

Total rugi-rugi daya aktif (P_{loss}) dan reaktif (Q_{loss}) disajikan pada Tabel 3. Rugi-Rugi Daya Aktif meningkat secara kuadrat dengan peningkatan beban, sesuai dengan persamaan $P_{\text{loss}}=I^2R$. Pada skenario 50%, rugi-rugi daya aktif mencapai 13.28 MW , yaitu peningkatan 117% dari kondisi normal. Rugi-Rugi Daya Reaktif mengalami perubahan signifikan yaitu pada beban normal, rugi-rugi reaktif negatif (-10.81 Mvar) menunjukkan dominasi induktansi saluran (absorpsi daya reaktif). Pada skenario 50%, rugi-rugi reaktif positif (+11.32 Mvar) mengindikasikan efek kapasitansi shunt yang mendominasi. Beban 50% meningkatkan arus sebesar 33%, yang memperbesar rugi-rugi sebanding dengan I^2 .

Tabel 3. Rugi-rugi daya aktif (P_{loss}) dan reaktif (Q_{loss})

Skenario	Rugi-Rugi Daya Aktif (MW)	Rugi-Rugi Daya Reaktif (MVAR)
Beban Normal	6.11	-10.81
Peningkatan 25%	9.17	-1.34
Peningkatan 50%	13.28	11.32

3.3 Dampak Peningkatan Beban pada Stabilitas Tegangan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan beban menyebabkan penurunan tegangan yang signifikan, terutama pada Bus 3–5. Hal ini sejalan dengan bahwa variasi beban dinamis memperbesar risiko ketidakstabilan tegangan pada sistem multi-bus [4]. Pada skenario 50%, jatuh tegangan (*voltage drop*) pada Bus 5 mencapai 5%, ini sudah mencapai batas aman $\pm 5\%$ [8]. Penyebab Utama Jatuh tegangan (*voltage drop*) adalah impedansi saluran resistansi (R) dan reaktansi (X) saluran menyebabkan penurunan tegangan sepanjang aliran daya. Kapasitansi pembangkit Generator pada Bus 2 tidak mampu memenuhi permintaan daya reaktif pada beban tinggi, seperti yang diamati pada penurunan Q_{loss} (Tabel 3).

Rugi-rugi daya aktif meningkat kuadrat dengan arus ($P_{\text{loss}}=I^2R$), sesuai dengan teori dasar jaringan transmisi (Shaikh et al., 2021). Skenario 50% menghasilkan rugi-rugi 13.28 MW , yang merupakan peningkatan 117% dari kondisi normal. Pada beban normal, rugi-rugi reaktif negatif (-10.81 Mvar) menunjukkan dominasi induktansi saluran. Pada skenario 50%, rugi-rugi reaktif positif (+11.32 Mvar) mengindikasikan efek kapasitansi shunt yang mendominasi.

4. Kesimpulan

Analisis yang dilakukan pada saluran transmisi 275 kV dengan konfigurasi 5 bus menunjukkan bahwa fenomena jatuh tegangan (*voltage drop*) dan rugi-rugi daya (*power losses*) dipengaruhi oleh sejumlah faktor krusial, termasuk variasi beban, karakteristik konduktor, dan panjang jalur transmisi. Simulasi berbasis metode Newton-Raphson mengungkapkan bahwa peningkatan beban secara langsung memperparah penurunan tegangan dan kerugian daya, terutama pada kondisi operasi dengan faktor daya rendah. Pada skenario peningkatan beban 50%, jatuh tegangan (*voltage drop*) pada Bus 5 mencapai 5% relatif terhadap basis 1.0 pu , yang merupakan batas atas toleransi operasi sistem tenaga listrik ($\pm 5\%$). Tegangan pada Bus 5 (0.950 pu) sudah berada di ambang batas bawah, meningkatkan risiko *voltage collapse* jika beban terus meningkat. Rugi-rugi daya aktif (P_{loss}) meningkat signifikan dari 6.11 MW (beban normal) ke 13.28 MW (peningkatan beban 50%) , atau peningkatan sebesar 117% , sejalan dengan teori dasar $P_{\text{loss}}=I^2R$, di mana peningkatan arus akibat beban tinggi memperbesar kerugian pada impedansi saluran.

Referensi

- [1] S. Anisah, Z. Tharo, and S. Suhardi, “ANALISIS PERBAIKAN TEGANGAN UJUNG PADA JARINGAN TEGANGAN MENENGAH 20 KV DENGAN SIMULASI E-TAP (STUDI KASUS PT PLN (PERSERO) RAYON KUALA,” *Prosiding Seminar Nasional Teknik UISU (SEMNASTEK)*, vol. 2, no. 1, pp. 208–213, May 2019, Accessed: May 16, 2025. [Online]. Available: <https://jurnal.uisu.ac.id/index.php/semnastek/article/view/1314>

- [2] A. Dani, "Analisis Rugi-Rugi Daya Pada Saluran Transmisi 150 KV Pada Gardu Induk KIM," *Jurnal Indonesia Sosial Teknologi*, vol. 2, no. 11, pp. 1892–1901, Nov. 2021, doi: 10.59141/JIST.V2I11.265.
- [3] A. Abdulkareem, T. Somefun, C. Awosope, and O. Olabenjo, "Power system analysis and integration of the proposed Nigerian 750-kV power line to the grid reliability," *SN Appl Sci*, vol. 3, 2021, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusId:244107001>
- [4] K. Choden, Sonam, S. Tenzin, Karchung, and Y. Seldon, "ENHANCEMENT OF VOLTAGE STABILITY IN THE POWER SYSTEM USING GENETIC ALGORITHM," *Journal of Applied Engineering, Technology and Management*, 2022, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusId:259880665>
- [5] V. Chekh, V. Rulevskiy, A. Pravikova, and D. Lyapunov, "Closed-loop power supply for an autonomous object with a DC power transmission line and voltage drop compensation," *J Phys Conf Ser*, vol. 1862, 2021, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusId:233838499>
- [6] M. S. Shaikh, C. Hua, M. A. Jatoi, M. M. Ansari, and A. A. Qader, "Parameter Estimation of AC Transmission Line Considering Different Bundle Conductors Using Flux Linkage Technique," *IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 44, pp. 313–320, 2021, [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9459422>
- [7] S. Anisah, R. Rahmaniar, and A. Khaizairani, "Analisis Perbaikan Tegangan Ujung Pada Jaringan Tegangan Menengah 20 KV Express Trienggadeng Daerah Kerja PT PLN (Persero) Area Sigli Rayon Meureudu Dengan Simulasi E-Tap," in *SEMNASTEK UISU 2018*, 2018.
- [8] B. Nasir, "Under-voltage Protection of Power Transmission Lines," *Journal of Energy Research and Reviews*, 2023, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusId:260669300>
- [9] K. A. Yahya, "Analysis of 132-33 KVA Grid Sub-Transmission Line along Gombe to Yola Power System of Nigeria," *Int J Res Appl Sci Eng Technol*, 2023, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusId:259812090>
- [10] A. Dani and M. Hasanuddin, "PERBAIKAN FAKTOR DAYA MENGGUNAKAN KAPASITOR SEBAGAI KOMPENSATOR DAYA REAKTIF (STUDI KASUS STT SINAR HUSNI)," in *Seminar Nasional Royal (SENAR)*, 2018, pp. 673–678.
- [11] H. F. Situmorang, P. Wibowo, and Z. Lubis, "ANALISIS PENGGUNAAN KAPASITOR BANK DALAM UPAYA PERBAIKAN FAKTOR DAYA PADA LOW VOLTAGE MAIN DISTRIBUTION PANEL (LVMDP) DI PT.PERMATA HIJAU PALM OLEO (PHPO) KIM II," *INTECOMS: Journal of Information Technology and Computer Science*, vol. 7, no. 3, pp. 990–1001, Jun. 2024, doi: 10.31539/INTECOMS.V7I3.10813.
- [12] A. Hashim, "Simulation and Modeling of Detailed Load flow Analysis for the 400kVA and 132kVA Iraqi Grid," *Journal of Engineering*, 2023, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusId:259128550>
- [13] M. F. Hakim, A. Hermawan, I. Ridzki, S. S. Wiwaha, and G. A. N. H. Putri, "T-junction Configuration Performance in a Transmission Sub-system," *International Journal of Frontier Technology and Engineering*, 2022, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusId:259606901>
- [14] A. Atul Bhandakkar, L. Dr. Mathew, A. Atul Bhandakkar, and L. Dr. Mathew, "Real-Time-Simulation of IEEE-5-Bus Network on OPAL-RT-OP4510 Simulator," *MS&E*, vol. 331, no. 1, p. 012028, Mar. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/331/1/012028.
- [15] A. A. M. Almabrouk, O. M. Hebala, and S. E. El Safty, "Improvement of Voltage Profile in Libyan Transmission Network Using Particle Swarm Optimization Technique," *2022 IEEE 2nd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)*, pp. 780–785, 2022, [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9837496>