

Evaluasi Dampak Interkoneksi Sulbagsel–Luwuk terhadap Stabilitas Sistem dan Biaya Operasi Menggunakan Pendekatan *Mixed Integer Linear Programming*

Khudjatul Khaq^{1*)}, Iwa Garniwa¹

¹Program Studi Magister Teknik Elektro, Sekolah Pascasarjana, Institut Teknologi PLN, Jakarta, Indonesia

E-mail: khudjatul2410018@itpln.ac.id

Abstrak

Interkoneksi Sistem Tenaga Listrik merupakan salah satu upaya utama untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan fleksibilitas operasional. Studi ini berfokus pada analisis dampak interkoneksi sistem Sulawesi Selatan (Sulbagsel) dan Luwuk, dari perspektif teknis dan ekonomi. Analisis teknis dilakukan melalui studi aliran daya, hubung singkat, dan stabilitas transien menggunakan perangkat lunak *DIgSILENT PowerFactory*, sedangkan analisis ekonomi dilakukan menggunakan perangkat lunak PLEXOS dengan Gurobi sebagai *solver* MILP. Hasil studi menunjukkan bahwa interkoneksi meningkatkan profil tegangan sistem tanpa menyebabkan pelanggaran batas operasi serta meningkatkan pembebanan saluran transmisi yang masih berada di bawah batas termal penghantar. Analisis hubung singkat menunjukkan peningkatan rata-rata arus gangguan sekitar 4,2% akibat bertambahnya kontribusi sumber pembangkitan dan menurunnya impedansi ekuivalen sistem. Dari aspek stabilitas transien, pelepasan PLTMG Luwuk 40 MW pada kondisi sebelum interkoneksi menyebabkan frekuensi turun hingga 42,23 Hz dan berujung pada *blackout*, sedangkan setelah interkoneksi frekuensi minimum hanya mencapai 49,61 Hz sehingga sistem tetap stabil. Hasil optimasi MILP menunjukkan bahwa interkoneksi menurunkan Biaya Pokok Produksi (BPP) dari Rp1.569,86/kWh menjadi Rp1.553,14/kWh dengan penghematan biaya operasi sebesar Rp245,43 miliar per tahun. Hasil penelitian menunjukkan bahwa interkoneksi Sulbagsel–Luwuk memberikan manfaat signifikan dalam meningkatkan keandalan, stabilitas, dan efisiensi ekonomi sistem tenaga listrik.

Kata kunci: Interkoneksi Sistem Tenaga Listrik, Stabilitas Sistem, Biaya Pokok Produksi, MILP, Sulbagsel–Luwuk

Abstract

The interconnection of electric power systems is one of the key efforts to enhance efficiency, reliability, and operational flexibility. This study focuses on analyzing the impact of interconnecting the South Sulawesi (Sulbagsel) and Luwuk systems from both technical and economic perspectives. Technical analysis was conducted through load flow, short-circuit, and transient stability studies using DIgSILENT PowerFactory, while economic analysis was carried out with PLEXOS employing Gurobi as the MILP solver. The results show that the interconnection improves the system's voltage profile without violating operational limits and increases transmission line loading, which remains below thermal limits. Short-circuit analysis indicates an average fault current increase of about 4.2% due to additional generation sources and reduced system equivalent impedance. From the transient stability perspective, the tripping of the 40 MW Luwuk gas engine power plant (PLTMG) prior to interconnection caused the system frequency to drop to 42.23 Hz, leading to a blackout. After interconnection, however, the minimum frequency only reached 49.61 Hz, allowing the system to remain stable. The MILP optimization results further demonstrate that interconnection reduces the Basic Production Cost (BPP) from Rp1,569.86/kWh to Rp1,553.14/kWh, yielding annual operational savings of approximately Rp245.43 billion. Overall, the Sulbagsel–Luwuk interconnection provides significant benefits in enhancing reliability, stability, and economic efficiency of the power system.

Keywords: Power System Interconnection, System Stability, Generation Cost, MILP, Sulbagsel–Luwuk

1. Pendahuluan

Sistem tenaga listrik dituntut untuk mampu beroperasi secara berkelanjutan dengan tingkat keandalan tinggi,

seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi di berbagai wilayah[1]. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk menjawab tantangan tersebut adalah interkoneksi

antar sistem tenaga listrik, yang memungkinkan integrasi kapasitas pembangkit dan distribusi energi secara lebih optimal[2]. Dengan cara ini, pembangkit dengan biaya produksi rendah dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan di wilayah lain, sehingga biaya pokok produksi listrik dapat ditekan[3]. Selain itu, interkoneksi juga meningkatkan fleksibilitas operasi dan memperbaiki keandalan sistem secara keseluruhan[4].

Sistem Sulawesi Bagian Selatan (Sulbagsel) merupakan salah satu jaringan terbesar di Pulau Sulawesi dengan kapasitas pembangkit yang cukup besar dan dukungan transmisi 150 kV. Sebaliknya, sistem Luwuk di Sulawesi Tengah masih beroperasi sebagai sistem isolated dengan ketergantungan tinggi pada pembangkit berbahan bakar gas dan minyak[5]. Oleh karena itu, interkoneksi antara sistem Sulbagsel dan Luwuk diharapkan dapat mengatasi keterbatasan ini dengan mengoptimalkan aliran daya dan menekan biaya operasional[6].

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengkaji manfaat interkoneksi sistem tenaga listrik dari berbagai perspektif. Penelitian Xia, et al [7] menunjukkan bahwa penerapan batasan stabilitas sistem dalam proses economic dispatch mampu meningkatkan tingkat keamanan operasi tanpa menyebabkan penurunan efisiensi ekonomi yang signifikan. Sementara itu, Karystianos, et al [8] menegaskan bahwa stabilitas transien merupakan aspek penting dalam perencanaan interkoneksi karena gangguan besar dapat memengaruhi kemampuan sistem untuk mempertahankan kondisi sinkron setelah terjadi gangguan. Di sisi lain, metode *Mixed Integer Linear Programming* telah banyak diterapkan dalam permasalahan unit commitment dan economic dispatch karena memiliki kemampuan untuk merepresentasikan berbagai kendala teknis dan operasional yang terdapat pada sistem tenaga listrik[9].

Namun, penelitian yang mengintegrasikan analisis aliran daya, hubung singkat, stabilitas transien, dan optimasi operasi pembangkitan berbasis MILP ke dalam satu kerangka evaluasi terpadu masih sangat terbatas[10]. Di samping itu, kajian yang secara spesifik menganalisis dampak interkoneksi Sulbagsel–Luwuk dengan mempertimbangkan karakteristik operasional sistem secara aktual—termasuk batas transfer daya, jadwal pemeliharaan, dan kewajiban kontrak take-or-pay—masih minim dalam literatur. Oleh karena itu, penelitian ini menjadi krusial untuk mengisi celah tersebut dengan menyajikan analisis komprehensif yang memadukan keandalan teknis dan efisiensi ekonomi, guna memberikan rekomendasi strategis bagi pengembangan sistem tenaga listrik di wilayah Sulawesi.

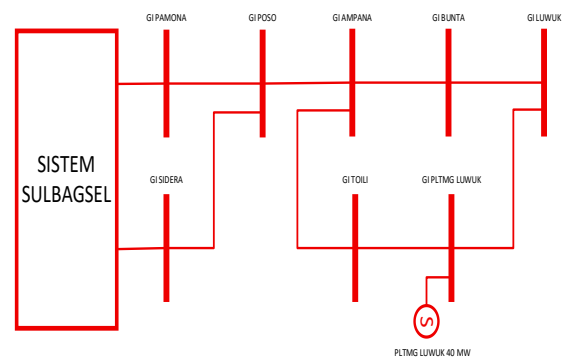
Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak interkoneksi Sulbagsel–Luwuk dari perspektif teknis dan ekonomi secara terintegrasi. Analisis teknis dilakukan melalui simulasi

aliran daya, hubung singkat, dan stabilitas transien untuk menilai pengaruh interkoneksi terhadap kinerja dan keandalan sistem. Selanjutnya, analisis ekonomi dilakukan menggunakan pendekatan *Mixed Integer Linear Programming (MILP)* yang mempertimbangkan berbagai kendala operasional, meliputi keseimbangan daya, batas kapasitas pembangkit, kemampuan transfer daya antar sistem, jadwal pemeliharaan, serta ketentuan kontrak take-or-pay pada pembangkit tertentu. Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai manfaat interkoneksi Sulbagsel–Luwuk, sekaligus menjadi masukan bagi proses perencanaan dan pengembangan sistem tenaga listrik di wilayah Sulawesi.

2. Metode

2.1 Sistem Kelistrikan Sulbagsel-Luwuk

Penelitian ini menggunakan pemodelan sistem Sulbagsel dan Luwuk yang direpresentasikan berdasarkan kondisi operasi aktual serta rencana pembangunan transmisi interkoneksi 150 kV antara GI Poso - GI Ampana – GI Bunta dan GI Luwuk yang digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Single Line Diagram Interkoneksi Sulbagsel-Luwuk

Pemodelan sistem menggunakan perangkat lunak *DigSILENT Power Factory* untuk analisis aliran daya, hubung singkat, dan stabilitas transien, sedangkan analisis ekonomi dilakukan menggunakan perangkat lunak *PLEXOS* dengan pendekatan *Mixed Integer Linear Programming (MILP)*. Evaluasi dilakukan pada dua kondisi operasi, yaitu sebelum dan sesudah interkoneksi, untuk mengidentifikasi dampaknya terhadap kinerja teknis dan biaya operasi sistem tenaga listrik. Karakteristik utama sistem yang digunakan dalam pemodelan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Karakteristik Pemodelan Sistem

Deskripsi	Nilai
Total Jumlah Gardu Induk	86
Tegangan Interkoneksi	150 kV
Total Panjang Transmisi Interkoneksi	418,5 km
Jenis Konduktor	ACSR 2xHawk
Daya Pembangkit Terpasang Sulbagsel	2.903,55 MW
Beban Puncak Sistem Sulbagsel	1.990,4 MW
Cadangan Daya Sulbagsel	31,45%
Daya Pembangkit Terpasang Luwuk	80,52
Beban Puncak Sistem Luwuk	62,56 MW
Cadangan Daya Luwuk	22,31%

2.2 Analisis Aliran Daya

Analisis ini merupakan langkah awal yang krusial untuk mengevaluasi parameter operasional sistem, seperti profil tegangan, rugi-rugi daya, dan aliran daya pada masing-masing jalur transmisi, baik sebelum maupun sesudah interkoneksi[11]. Hasil analisis aliran daya ini menjadi dasar untuk identifikasi potensi kendala operasional serta validasi kemampuan sistem untuk memenuhi permintaan beban dengan tetap menjaga kualitas tegangan dan keandalan jaringan secara menyeluruh[12].

Analisis aliran daya didasarkan pada persamaan aliran daya pada setiap bus dalam sistem tenaga listrik. Persamaan daya aktif dan daya reaktif pada bus *i* dinyatakan sebagai:

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2)$$

Di mana:

- P_i = daya aktif pada bus ke-*i* (MW atau p.u.)
- Q_i = daya reaktif pada bus ke-*i* (MVar atau p.u.)
- $|V_i|, |V_j|$ = magnitudo tegangan pada bus ke-*i* dan ke-*j* (p.u.)
- δ_i, δ_j = sudut tegangan pada bus ke-*i* dan ke-*j* (radian atau derajat)
- $\theta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ = beda sudut tegangan antara bus ke-*i* dan ke-*j*
- G_{ij} = konduktansi elemen matriks admitansi (Ybus) antara bus ke-*i* dan ke-*j*
- B_{ij} = susceptansi elemen matriks admitansi (Ybus) antara bus ke-*i* dan ke-*j*
- n = jumlah total bus dalam sistem

2.3 Analisis Hubung Singkat

Analisis hubung singkat digunakan untuk mengevaluasi kemampuan sistem tenaga listrik dalam menahan

gangguan transien seperti gangguan fasa-ke-tanah, serta menentukan besarnya arus gangguan maksimum yang dapat terjadi pada setiap titik sistem[13]. Pentingnya analisis ini terletak pada penentuan kapasitas pemutusan peralatan proteksi dan koordinasi relay agar dapat mengisolasi gangguan secara cepat dan efektif, sehingga meminimalkan dampak pada operasi sistem secara keseluruhan[14]. Arus hubung singkat tiga fasa dihitung menggunakan persamaan:

Gangguan Tiga Fasa (Simetris) :

$$I_{sc}^{3\phi} = \frac{V_{pref}}{\sqrt{3} Z_{eq}} \quad (3)$$

Gangguan Satu Fasa ke Tanah (*Single Line-to-Ground*) :

$$I_{sc}^{1\phi} = \frac{3V_{pref}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (4)$$

Di mana:

- V_{pref} = tegangan sistem sebelum gangguan (*prefault voltage*)
- Z_{eq} = impedansi ekuivalen sistem dilihat dari titik gangguan (*Thevenin equivalent*)
- Z_1 = impedansi urutan positif (*positive sequence impedance*)
- Z_2 = impedansi urutan negatif (*negative sequence impedance*)
- Z_0 = impedansi urutan nol (*zero sequence impedance*)

2.4 Analisis Stabilitas Transient

Analisis ini mengkaji respons dinamis sistem tenaga listrik terhadap gangguan mendadak, seperti hubung singkat atau hilangnya unit pembangkit, untuk memastikan sistem tetap sinkron dan stabil. Analisis ini vital untuk mengevaluasi batas-batas operasional sistem, khususnya dalam mempertahankan integritas jaringan setelah kejadian disruptif[15].

Dasar matematis yang digunakan dalam analisis dinamika rotor generator sinkron adalah *swing equation*, yang menggambarkan hubungan antara percepatan sudut rotor dengan ketidakseimbangan antara daya mekanik dan daya listrik[16]. Persamaan *swing equation* dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{df}{dt} = P_m - P_e \quad (5)$$

atau dalam bentuk sudut rotor:

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (5a) \quad (6)$$

dengan:

- H = konstanta inersia generator (s)
- ω_s = kecepatan sudut sinkron (rad/s)
- ω = kecepatan sudut rotor (rad/s)
- P_m = daya mekanik dari prime mover (p.u.)
- P_e = daya yang disalurkan generator ke sistem (p.u.)

- $M = \frac{2H}{\omega_s}$ konstanta inersia ekuivalen
- δ = sudut rotor (rad)
- t = waktu (s)

2.5 Mixed Integer Linear Programming (MILP)

Metode *Mixed-Integer Linear Programming* merupakan pendekatan optimasi deterministik yang efektif dalam menangani variabel diskrit, seperti status operasional unit pembangkit (on/off) dan konfigurasi jaringan transmisi[17]. Dalam konteks operasi sistem tenaga listrik, MILP umumnya dirumuskan dalam bentuk fungsi objektif yang bertujuan untuk meminimalkan total biaya operasi sistem, yang terdiri dari biaya variabel pembangkitan serta komponen biaya tetap tertentu[18]. Secara umum, fungsi objektif dapat dinyatakan sebagai:

$$\text{Min } \sum_{i,t} (C_i \cdot P_{i,t} + SU_{i,t} + SD_{i,t}) + \sum_i C_{TOP,i} \quad (7)$$

dimana:

- C_i = biaya produksi pembangkit ke-i
- $P_{i,t}$ = daya pembangkit ke-i pada waktu t
- $SU_{i,t}, SD_{i,t}$ = biaya start-up dan shut-down
- $C_{TOP,i}$ = biaya kontrak *Take or pay*

Fungsi objektif tersebut diselesaikan dengan memperhatikan berbagai batasan sistem, antara lain:

a. Keseimbangan Daya

$$\sum_i P_{i,t} + P_{tie,t} = P_{load,t} \quad (8)$$

b. Batas Kapasitas Pembangkit

$$P_i^{min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{max} \quad (9)$$

c. Kendala *Unit Commitment*

$$P_{i,t} \leq u_{i,t} \cdot P_i^{max} \quad (10)$$

d. Kendala *Take or pay (TOP)*

$$E_{max} \geq E_i \geq E_{min} \quad (11)$$

e. Batas Transfer Daya Antar Sistem

$$|P_{tie,t}| \leq P_{max}^{tie} \quad (12)$$

dimana $P_{tie,t}$ merupakan daya yang mengalir melalui saluran interkoneksi dan P_{max}^{tie} adalah kapasitas maksimum saluran tersebut. Ringkasan seluruh kendala yang digunakan dalam model optimasi ditunjukkan pada Tabel 2

Tabel 2. Kendala Pemodelan Optimasi MILP

Konstrain	Deskripsi
<i>Power Balance</i>	Keseimbangan beban dan pembangkit
<i>Generator Limits</i>	Kapasitas <i>min/max</i> , <i>Min up/down time</i>
<i>Ramp Rate</i>	Laju perubahan Generator
<i>Transmission Limit</i>	Batasan Trasfer Transmisi
<i>Unit Commitment</i>	Status Pembangkit (Pemeliharaan, Gangguan, dll)
<i>Take-or-Pay</i>	Skema <i>Take or pay</i> Pembangkit
<i>Maintenance Schedule</i>	Jadwal Pemeliharaan Pembangkit
<i>Startup/Shutdown Cost</i>	Biaya saat <i>start up</i> dan <i>Stop</i> pembangkit
Variasi Musim	Terjadi Perubahan musim

2.6 Biaya Pokok Produksi

Biaya Pokok Produksi (BPP) pembangkit merupakan parameter ekonomi yang digunakan untuk menunjukkan besarnya biaya yang diperlukan dalam menghasilkan energi listrik per satuan energi[19]. Biaya Pokok Produksi (BPP) pembangkit merupakan parameter penting untuk menilai efisiensi operasi sistem tenaga listrik, karena mencerminkan hubungan antara total biaya pembangkitan dan energi listrik yang dihasilkan[20]. Untuk sistem tenaga listrik secara keseluruhan, BPP dihitung berdasarkan total biaya seluruh pembangkit dibandingkan dengan total energi yang dihasilkan sistem[21]:

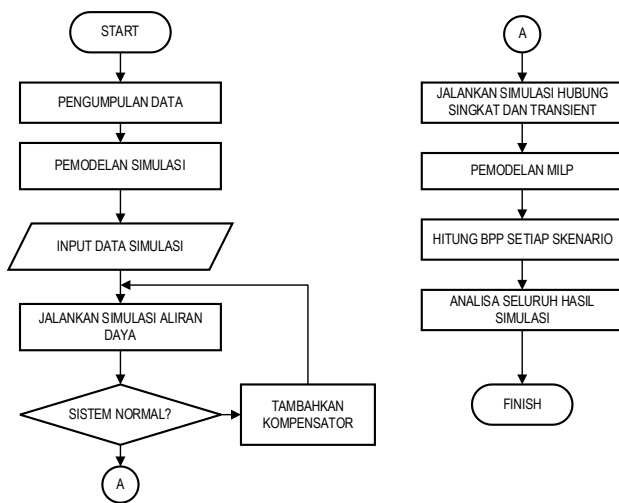
$$BPP_{sistem} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{\sum_{i=1}^n E_i} \quad (13)$$

di mana:

- n = jumlah unit pembangkit
- C_i = biaya pembangkitan unit ke-i
- E_i = energi yang dihasilkan unit ke-i

2.7 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan mengikuti langkah-langkah yang ditunjukkan pada Gambar 2. Diagram tersebut menggambarkan alur penelitian yang mencakup tahapan pengumpulan data, pemodelan sistem, serta pelaksanaan simulasi aliran daya untuk memastikan kondisi operasi sistem berada dalam batas normal. Selanjutnya dilakukan analisis hubung singkat dan stabilitas transien. Selanjutnya dilakukan pemodelan optimasi berbasis MILP untuk menghitung Biaya Pokok Produksi (BPP) pada setiap skenario. Tahap akhir penelitian meliputi analisis hasil simulasi secara menyeluruh dan penarikan kesimpulan penelitian



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisa Aliran Daya

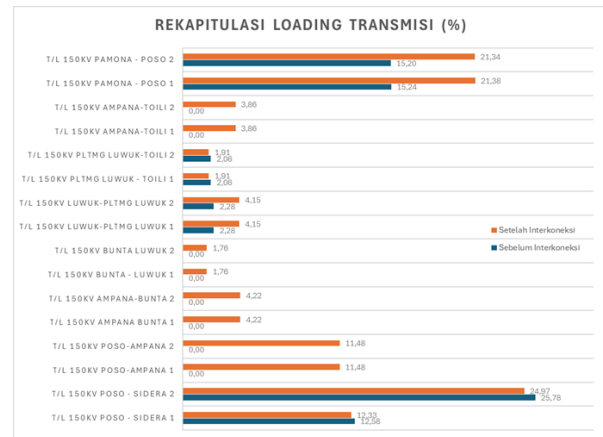
Analisis aliran daya dilakukan untuk mengetahui sebaran aliran daya aktif dan daya reaktif pada jaringan transmisi, serta untuk mendapatkan profil tegangan pada setiap gardu induk. Simulasi ini penting dilakukan untuk memastikan bahwa sistem dapat beroperasi dalam batasan teknis yang diperbolehkan, khususnya terkait tegangan dan loading penghantar transmisi. Rekap tegangan gardu induk ditunjukkan pada Tabel 3

Tabel 3. Rekap Tegangan Gardu Induk

Nama GI	Sebelum (p.u)	Setelah (p.u)	Deviasi (p.u)
GI 150 kV Ampana	-	1,05	1,05
GI 150 kV Bunta	-	1,06	1,06
GI 150 kV Pamona	1,01	1,01	0,00
GI 150 kV Poso	1,01	1,02	0,01
GI 150kV Sidera	1,00	1,01	0,01
GI 150 kV Luwuk	1,00	1,06	0,06
GI 150 kV PLTMG Luwuk	1,00	1,06	0,06
GI 150 kV Toili	1,00	1,06	0,06

Berdasarkan Tabel 3 diatas, terlihat bahwa tegangan pada seluruh gardu induk terada pada level normal ($\pm 10\%$ dari tegangan nominal) pada kondisi sebelum interkoneksi sesuai ketentuan Permen ESDM Nomor 20 Tahun 2020 tentang Aturan Jaringan Sistem Sulawesi[22]. Namun setelah interkoneksi terjadi antara sistem Sulbagsel dan Sistem Luwuk, terdapat kenaikan tegangan pada GI Induk di Sub Sistem Luwuk. Kenaikan pada umumnya berkisar 0,06 p.u. Kenaikan tegangan pada GI Sub Sistem Luwuk setelah interkoneksi menunjukkan adanya kontribusi daya reaktif dari saluran transmisi yang menghubungkan kedua sistem. Fenomena ini sejalan dengan karakteristik saluran transmisi panjang yang dapat menghasilkan daya reaktif kapasitif sehingga meningkatkan profil tegangan pada sisi penerima. Hasil tersebut menunjukkan bahwa interkoneksi memberikan dukungan tegangan yang lebih baik tanpa

menyebabkan pelanggaran batas operasi sistem. Perbandingan Loading Transmisi sebelum dan setelah interkoneksi ditunjukkan Pada Gambar 3



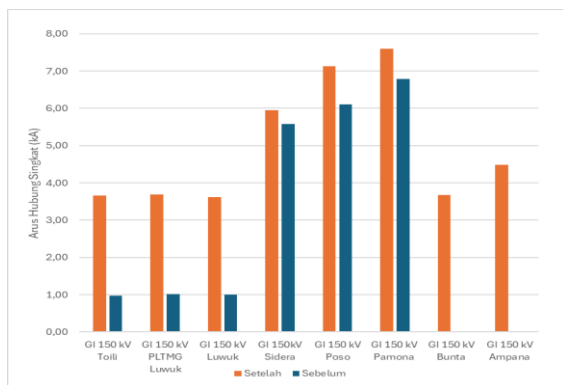
Gambar 3. Perbandingan Loading Transmisi sebelum dan setelah interkoneksi

Selanjutnya, berdasarkan Gambar 3 diatas menunjukkan bahwa terjadi perubahan signifikan pada loading saluran transmisi 150 kV di sekitar titik interkoneksi. Pada T/L 150kV Pamona–Poso mengalami kenaikan beban dari sekitar 15% menjadi lebih dari 21% pada kedua sirkuit yang menunjukkan adanya peningkatan beban akibat interkoneksi jaringan.

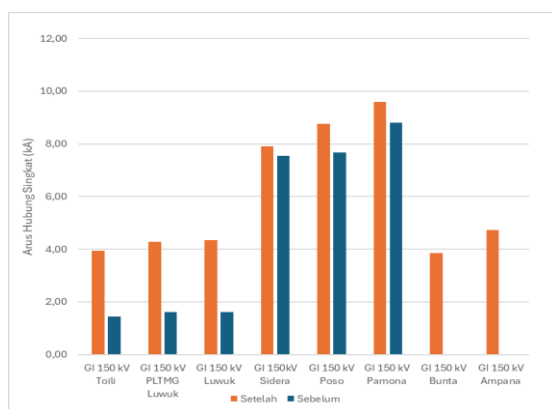
Selain itu, beberapa saluran yang sebelumnya tidak berbeban akibat belum dioperasikan, mulai berbeban antara 3–4% yang menandakan adanya transfer daya menuju ke sistem Luwuk. Kondisi ini mencerminkan bahwa interkoneksi berhasil mengaktifkan jalur transmisi yang sebelumnya belum beroperasi sehingga dapat memperluas penyaluran tenaga listrik serta pertukaran energi antar sistem.

3.2. Analisa Hubung Singkat

Analisis hubung singkat dilakukan untuk mengetahui besarnya arus gangguan yang mungkin terjadi pada sistem tenaga listrik apabila terjadi gangguan seperti hubung singkat tiga fasa maupun satu fasa ke tanah. Simulasi terkait arus gangguan ini sangat penting dalam menentukan kapasitas pemutus tenaga serta koordinasi sistem proteksi pada jaringan tenaga listrik. Perbandingan 3 phase Short Circuit Level ditunjukkan pada Gambar 4 dan Perbandingan Single Phase to Ground Short Circuit Level ditunjukkan pada Gambar 5



Gambar 4. Perbandingan 3 phase Short Circuit Level



Gambar 5. Perbandingan Single Phase to Ground Short Circuit Level

Hasil simulasi menunjukkan bahwa rata-rata arus hubung singkat tiga fasa meningkat sebesar 1,70 kA atau sekitar 4,25%, sedangkan pada gangguan satu fasa ke tanah meningkat sebesar 1,69 kA atau sekitar 4,23%.

Berdasarkan persamaan (3) dan (4), peningkatan arus hubung singkat setelah interkoneksi terjadi akibat penurunan impedansi ekuivalen sistem yang dilihat dari titik gangguan. Setelah interkoneksi, impedansi ekuivalen menurun karena bertambahnya kontribusi sumber pembangkitan dari Sulbagsel dan Luwuk, sehingga arus gangguan menjadi lebih besar. Fenomena ini umum terjadi pada sistem tenaga yang mengalami penguatan jaringan karena interkoneksi yang akan meningkatkan *system strength* dan kapasitas kontribusi arus gangguan dari sistem secara keseluruhan [23].

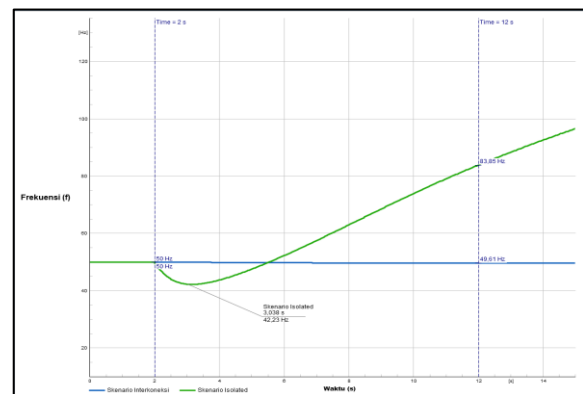
Hasil yang diperoleh pada penelitian ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas interkoneksi cenderung meningkatkan level hubung singkat[24] namun tetap memberikan manfaat terhadap keandalan operasi sistem[25].

Meskipun demikian, hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan arus gangguan pada sistem Sulbagsel–Luwuk

masih berada dalam batas kemampuan peralatan proteksi eksisting sehingga tidak memerlukan penggantian peralatan utama maupun perubahan skema proteksi secara signifikan.

3.3. Analisa Transient

Analisis stabilitas transient mengevaluasi kemampuan sistem mempertahankan sinkronisasi setelah gangguan besar, seperti pelepasan unit pembangkitan atau hubung singkat pada jaringan transmisi. Respon Frekuensi saat terjadi Gangguan pada PLTMG Luwuk ditunjukkan pada Gambar 6



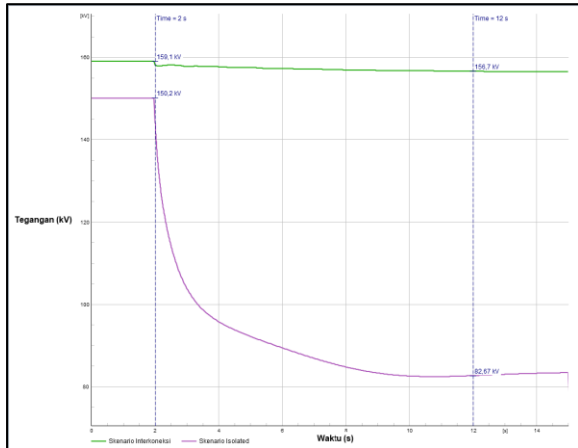
Gambar 6. Respon Frekuensi saat terjadi Gangguan pada PLTMG Luwuk

Simulasi dilakukan terhadap kasus pelepasan PLTMG Luwuk 40 MW sebagai unit terbesar pada sistem. Pada Gambar 6, terlihat bahwa sebelum interkoneksi, frekuensi turun dari 50 Hz menuju 42,23 Hz dan berujung pada blackout karena sistem isolated Luwuk tidak memiliki cadangan daya dan inersia yang cukup untuk mengimbangi kehilangan unit secara mendadak. Setelah interkoneksi dengan Sulbagsel, frekuensi minimum hanya mencapai 49,61 Hz dan kembali ke kondisi tunak tanpa kehilangan sinkronisasi.

Perbaikan respon frekuensi tersebut dapat dijelaskan menggunakan *swing equation* pada persamaan (5), dimana laju perubahan frekuensi dipengaruhi oleh ketidakseimbangan antara daya mekanik dan daya listrik serta besarnya inersia sistem. Setelah interkoneksi, sistem Luwuk memperoleh tambahan inersia ekuivalen dan dukungan daya dari sistem Sulbagsel sehingga defisit daya akibat pelepasan PLTMG Luwuk dapat dikompensasi dengan lebih cepat. Akibatnya, deviasi frekuensi yang terjadi menjadi lebih kecil dan sistem mampu mempertahankan kestabilan operasi.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa interkoneksi antar sistem tenaga mampu meningkatkan stabilitas frekuensi melalui peningkatan inersia sistem dan ketersediaan *spinning reserve*[26]. Selain itu, penguatan jaringan melalui

interkoneksi juga terbukti meningkatkan ketahanan sistem terhadap gangguan kehilangan pembangkit berskala besar sehingga risiko terjadinya pemadaman menyeluruh dapat diminimalkan[26]. Respon Tegangan saat terjadi Gangguan pada PLTMG Luwuk ditunjukkan pada Gambar 7



Gambar 7. Respon Tegangan saat terjadi Gangguan pada PLTMG Luwuk

Respon tegangan pada Gambar 7 juga menunjukkan peningkatan signifikan. Sebelum interkoneksi, pelepasan PLTMG Luwuk menyebabkan tegangan turun dari 150,2 kV menjadi 82,67 kV yang mengindikasikan kegagalan sistem mempertahankan keseimbangan daya. Setelah interkoneksi, tegangan minimum hanya turun dari 159,1 kV menjadi 156,7 kV dan stabil dalam waktu singkat.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa interkoneksi Sulbagsel–Luwuk memberikan peningkatan signifikan terhadap stabilitas transien sekaligus memungkinkan sistem memenuhi kriteria keamanan operasi N-1 setelah kehilangan unit pembangkitan terbesar.

3.4. Analisa Ekonomi berbasis Optimasi MILP

Analisis ekonomi dilakukan menggunakan metode *Mixed Integer Linear Programming (MILP)* yang diselesaikan menggunakan perangkat lunak PLEXOS dengan Gurobi sebagai *solver MILP* dengan tujuan optimasi meminimalkan total biaya operasi sistem sesuai persamaan (7) dengan mempertimbangkan berbagai kendala operasional yang dirangkum pada Tabel 2, meliputi keseimbangan daya, batas kapasitas pembangkit, unit commitment, batas transfer daya antar sistem, kontrak *Take-or-Pay (TOP)*, jadwal pemeliharaan pembangkit, serta variasi musiman sumber energi primer.

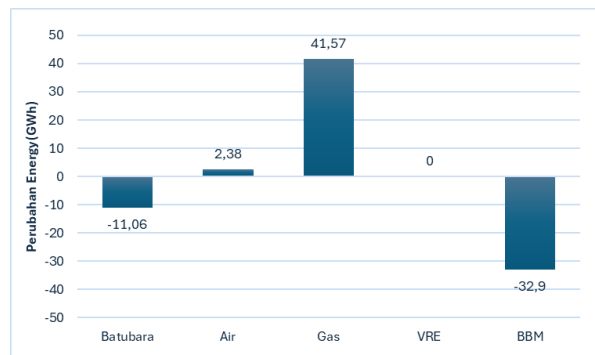
Tabel 4. Perbandingan Kinerja Ekonomi Sistem Sebelum dan Sesudah Interkoneksi

Parameter	Isolated	Interkoneksi	Perubahan
Energi (GWh)	14.684,67	14.684,67	-
Fixed Cost (Milyar Rp/thn)	10.556,94	10.556,94	-
Generation Cost (Milyar Rp/thn)	12.495,90	12.250,47	↓ 245,43
BPP (Rp/kWh)	1.569,86	1.553,14	↓ 16,72

Berdasarkan hasil optimasi berbasis *Mixed Integer Linear Programming (MILP)* yang ditunjukkan pada tabel 4 diatas, menunjukkan bahwa interkoneksi antara sistem Sulbagsel dan Luwuk memberikan dampak signifikan terhadap kinerja ekonomi sistem tenaga listrik yaitu penurunan Biaya Pokok Produksi Sistem sebesar Rp.16,72/kWh. Biaya Pokok Produksi Sistem turun dari Rp. 1.569,86/kWh menjadi Rp.1.553,14/kWh atau setara dengan Rp.245,43 Milyar per tahun. Hasil ini menunjukkan bahwa interkoneksi memberikan fleksibilitas operasi yang lebih besar dalam pemenuhan kebutuhan energi sistem sehingga model optimasi memiliki lebih banyak alternatif kombinasi pembangkit untuk mencapai biaya operasi minimum.

Secara matematis, penghematan biaya tersebut diperoleh karena interkoneksi memungkinkan model MILP memilih unit pembangkit dengan biaya marginal yang lebih rendah untuk memenuhi beban sistem. Sebelum interkoneksi, sebagian kebutuhan energi pada sistem Luwuk dipenuhi oleh pembangkit dengan biaya produksi relatif tinggi akibat keterbatasan sumber energi lokal. Setelah interkoneksi, kebutuhan energi tersebut dapat dipenuhi melalui transfer daya dari sistem Sulbagsel yang memiliki komposisi pembangkit lebih beragam dan biaya produksi lebih kompetitif sehingga fungsi objektif pada persamaan (7) menghasilkan nilai biaya operasi total yang lebih rendah.

Perubahan Energy Mix ditunjukkan pada Gambar 8



Gambar 8. Perubahan Energy Mix

Perubahan biaya operasi tersebut tampak paling jelas pada perubahan komposisi energi seperti ditunjukkan pada

Gambar 8. Setelah interkoneksi, kontribusi energi BBM turun sebesar 32,9 GWh dan energi batubara turun sebesar 11,06 GWh, yang kemudian disubstitusi oleh peningkatan energi air sebesar 2,39 GWh dan energi gas sebesar 41,57 GWh. Perubahan ini mengindikasikan bahwa model optimasi secara otomatis mengalokasikan pembangkitan ke unit-unit berbiaya rendah sambil tetap memenuhi seluruh kendala pemodelan.

Selain faktor biaya bahan bakar, hasil optimasi juga dipengaruhi oleh penerapan kendala *Take-or-Pay (TOP)* sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (11). Kendala ini mengharuskan pemenuhan energi minimum pada pembangkit tertentu sesuai kontrak pembelian energi sehingga keputusan operasi tidak hanya ditentukan oleh biaya produksi, tetapi juga oleh kewajiban kontraktual yang berlaku. Dengan memasukkan kendala tersebut, solusi yang diperoleh menjadi lebih representatif terhadap kondisi operasi aktual sistem tenaga listrik.

Temuan pada penelitian ini konsisten dengan berbagai penelitian sebelumnya. Studi terdahulu menunjukkan bahwa formulasi *Unit Commitment* berbasis MILP dapat menurunkan biaya operasi melalui optimasi jadwal pembangkitan dan pemanfaatan jaringan transmisi yang lebih efisien [27]. Penelitian lain menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas interkoneksi memberikan fleksibilitas operasi lebih besar sehingga perpindahan energi dari area berbiaya marginal rendah ke area berbiaya tinggi dapat dilakukan secara optimal [28]. Hasil-hasil ini semakin memperkuat temuan bahwa manfaat ekonomi interkoneksi Sulbagesel–Luwuk bukan semata-mata hasil simulasi lokal, melainkan konsisten dengan kecenderungan global pada sistem tenaga terintegrasi.

Secara keseluruhan, hasil optimasi menunjukkan bahwa interkoneksi tidak hanya memberikan manfaat teknis berupa peningkatan keandalan dan stabilitas sistem, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi melalui penurunan biaya operasi sistem dan pemanfaatan sumber energi yang lebih optimal.

4. Kesimpulan

Penelitian ini mengevaluasi dampak interkoneksi sistem Sulbagesel–Luwuk dari aspek teknis dan ekonomi menggunakan analisis aliran daya, hubung singkat, stabilitas transien, serta optimasi operasi berbasis *Mixed Integer Linear Programming (MILP)*. Hasil analisis aliran daya menunjukkan bahwa interkoneksi meningkatkan profil tegangan pada beberapa gardu induk akibat dukungan daya reaktif dari jaringan transmisi, namun seluruh tegangan sistem tetap berada dalam batas operasi yang diperbolehkan. Selain itu, peningkatan pembebanan saluran transmisi yang terjadi masih berada jauh di bawah batas termal penghantar sehingga tidak menimbulkan permasalahan *overload* jaringan.

Analisis hubung singkat menunjukkan bahwa interkoneksi meningkatkan level arus gangguan rata-rata sekitar 4,2% akibat berkurangnya impedansi ekuivalen sistem dan bertambahnya kontribusi sumber pembangkitan. Meskipun demikian, nilai arus gangguan yang diperoleh masih berada dalam batas kemampuan peralatan eksisting sehingga tidak memerlukan perubahan signifikan pada sistem proteksi maupun pemutus tenaga.

Dari aspek stabilitas transien, interkoneksi terbukti meningkatkan ketahanan sistem terhadap gangguan kehilangan pembangkit terbesar. Pada kondisi sebelum interkoneksi, pelepasan PLTMG Luwuk 40 MW menyebabkan frekuensi turun hingga 42,23 Hz dan berujung pada blackout sistem. Setelah interkoneksi, frekuensi minimum hanya mencapai 49,61 Hz dan sistem tetap mampu mempertahankan kestabilan operasi. Hasil ini menunjukkan bahwa interkoneksi memberikan tambahan inersia dan cadangan daya yang meningkatkan kemampuan sistem dalam memenuhi kriteria keamanan operasi N-1.

Analisis ekonomi menggunakan MILP yang diselesaikan dengan perangkat lunak Plexos dengan Gurobi sebagai *solver* MILP menunjukkan bahwa interkoneksi mampu menurunkan Biaya Pokok Produksi (BPP) dari Rp1.569,86/kWh menjadi Rp1.553,14/kWh atau menghasilkan penghematan biaya operasi sebesar Rp245,43 miliar per tahun. Penghematan tersebut diperoleh melalui pemanfaatan pembangkit dengan biaya marginal yang lebih rendah dan optimalisasi transfer daya antar sistem.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa interkoneksi Sulbagesel–Luwuk memberikan manfaat yang signifikan baik dari aspek keandalan maupun ekonomi sistem tenaga listrik. Pengembangan penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan mempertimbangkan integrasi pembangkit energi terbarukan dan sistem penyimpanan energi (BESS) untuk mengevaluasi dampaknya terhadap stabilitas sistem dan optimasi operasi jangka panjang.

Referensi

- [1] A. Loni and S. Asadi, "Power System Resilience: The Role of Electric Vehicles and Social Disparities in Mitigating the US Power Outages," *Smart Grids and Sustainable Energy*, vol. 9, no. 1, 2024, doi: 10.1007/s40866-024-00204-6.
- [2] J. Shi-ming, P. wu, X. Peng, and Y. Tang, "Research on generation scheduling mechanism of interconnected power system based on runoff forecast," *Front. Energy Res.*, vol. 10, 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.964516.
- [3] M. Alshrouf, C. M. Akujubi, and E. Awada, "Discrete Wavelet Transform Application to Three-Phase Power System Short Circuit Fault Detection," in *IntechOpen eBooks*, IntechOpen, 2023. doi: 10.5772/intechopen.1002958.
- [4] M. Häfner, P. P. Raimondi, and B. Bonometti, "Low-Carbon Energy Strategies in MENA Countries," in *Perspectives on development in the Middle East and North Africa (MENA) region*, Springer International Publishing, 2023, pp. 175–261. doi: 10.1007/978-3-031-30705-8_4.
- [5] P. L. N. U. Sulawesi, "Evaluasi Operasi Bulan Oktober 2025 Sistem Sulawesi," PLN UIP3B Sulawesi, 2025.
- [6] A. M. Ilyas, A. Suyuti, I. C. Gunadin, and A. Siswanto, "Optimal Power Flow the Sulselrabar 150 KV system before and after the penetration of wind power plants considering power loss and generation costs," in *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2020, p. 12030. doi: 10.1088/1757-899x/850/1/012030.
- [7] S. Xia, Z. Ding, M. Shahidehpour, K. W. Chan, S. Bu, and G. Li, "Transient Stability-Constrained Optimal Power Flow Calculation With Extremely Unstable Conditions Using Energy Sensitivity Method," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 1, pp. 355–365, Jan. 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3003522.
- [8] M. Karystianos, Y. Kabouris, T. Koronides, and S. Sofroniou, "Operation of the electrical system of Crete in interconnection with the mainland grid: A stability study," in *2013 IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control - IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid*, IEEE, Aug. 2013, pp. 1–8. doi: 10.1109/IREP.2013.6629345.
- [9] T. H. Baniantoro and R. S. Wibowo, "Dinamic Economic Dispatch (DED) Berbasis Mixed Integer Linear Programming (MILP) Dengan Mempertimbangkan Pembangkit EBT Pada Kelistrikan Pulau Sumbawa," *INTECOMS: Journal of Information Technology and Computer Science*, vol. 7, no. 3, pp. 619–630, May 2024, doi: 10.31539/intecom.v7i3.9176.
- [10] Imdadullah, B. Alamri, Md. A. Hossain, and M. S. J. Asghar, "Electric Power Network Interconnection: A Review on Current Status, Future Prospects and Research Direction," *Electronics (Basel)*, vol. 10, no. 17, p. 2179, Sep. 2021, doi: 10.3390/electronics10172179.
- [11] A. T. Akindadelo, F. A. Shodiya, A. O. Salau, O. J. Olaluyi, J. O. Bandele, and S. L. Braide, "Power Flow Analysis Using Numerical Computational Methods on a Standard IEEE 9-Bus Test System," *Mathematical Modelling and Engineering Problems*, vol. 11, no. 1, pp. 18–26, 2024, doi: 10.18280/mmep.110102.
- [12] M. Mitrovic, "Data-Driven Stochastic AC-OPF using Gaussian Processes," *arXiv (Cornell University)*, 2024, doi: 10.48550/arxiv.2402.11365.
- [13] B. Badaruddin, "ANALISA GANGGUAN HUBUNG SINGKAT DENGAN MENGGUNAKAN ETAP 12.6.0 PADA PT X," *Jurnal Teknik*, vol. 5, no. 1, 2017, doi: 10.31000/jt.v5i1.338.
- [14] Y. Siregar, W. Tjumar, N. Mubarakah, and R. Dinzi, "Protection coordination analysis applied at biogas power generation plant," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 30, no. 1, p. 1, 2023, doi: 10.11591/ijeecs.v30.i1.pp1-13.
- [15] S. Khan, "Lecture Notes on Grid Modeling of Renewable Energy," *arXiv (Cornell University)*, pp. 10–10, Oct. 2024.
- [16] K. Schmietendorf, J. Peinke, R. Friedrich, and O. Kamps, "Self-organized synchronization and voltage stability in networks of synchronous machines," *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, vol. 223, no. 12, pp. 2577–2592, Oct. 2014, doi: 10.1140/epjst/e2014-02209-8.
- [17] I. Abdou and M. Tkiouat, "Unit Commitment Problem in Electrical Power System: A Literature Review," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 8, no. 3, p. 1357, 2018, doi: 10.11591/ijece.v8i3.pp1357-1372.
- [18] M. Pavičević *et al.*, "The potential of sector coupling in future European energy systems: Soft linking between the Dispa-SET and JRC-EU-TIMES models," *Appl. Energy*, vol. 267, p. 115100, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115100.
- [19] R. Prasyayudha, S. Setyawidayat, and F. Hunaini, "Effectiveness of Minor Overhaul Elimination on Decreasing Cost of Production in Hydroelectric Power Plant," *JEEE-U (Journal of Electrical and Electronic Engineering-UMSIDA)*, vol. 5, no. 1, pp. 71–88, 2021, doi: 10.21070/jeeeu.v5i1.1228.
- [20] S. Ratanakuakangwan and H. Morita, "Energy efficiency of power plants meeting multiple requirements and comparative study of different carbon

- tax scenarios in Thailand,” *Clean. Eng. Technol.*, vol. 2, p. 100073, 2021, doi: 10.1016/j.clet.2021.100073.
- [21] A. K. Fajri, S. Sarjiya, L. M. Putranto, A. B. Pradana, and F. D. Wijaya, “Pengembangan Sistem Kelistrikan Tanah Merah Mempertimbangkan Energi Baru Terbarukan dan Emisi CO₂,” *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi (JNTETI)*, vol. 12, no. 3, pp. 233–239, 2023, doi: 10.22146/jnteti.v12i3.5254.
- [22] K. ESDM, “Aturan Jaringan Sistem Ketenagalistrikan (Grid Code),” Kementerian ESDM, 2020.
- [23] B. Song *et al.*, “Analysis of the impact of changes in grid operation mode on the short-circuit ratio of regional power grids,” in *2024 8th International Conference on Electrical, Mechanical and Computer Engineering (ICEMCE)*, IEEE, Oct. 2024, pp. 910–914. doi: 10.1109/ICEMCE64157.2024.10862411.
- [24] I. Rahmati and M. Fotuhi-Firuzabad, “Reliability evaluation of HV substations in the presence of Fault Current Limiter,” in *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, IEEE, Jun. 2009, pp. 1–5. doi: 10.1109/PTC.2009.5281882.
- [25] J. Beyza, P. Gil, M. Masera, and J. M. Yusta, “Security assessment of cross-border electricity interconnections,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 201, p. 106950, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.res.2020.106950.
- [26] K. Neuhoff *et al.*, “Renewable electric energy integration: Quantifying the value of design of markets for international transmission capacity,” *Energy Econ.*, vol. 40, pp. 760–772, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.eneco.2013.09.004.
- [27] Y. Guan, K. Pan, and K. Zhou, “Polynomial time algorithms and extended formulations for unit commitment problems,” *IIEE Trans.*, vol. 50, no. 8, pp. 735–751, Aug. 2018, doi: 10.1080/24725854.2017.1397303.
- [28] A. AKRAMI, M. DOOSTIZADEH, and F. AMINIFAR, “Power system flexibility: an overview of emergence to evolution,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 7, no. 5, pp. 987–1007, Sep. 2019, doi: 10.1007/s40565-019-0527-4.