

ANALISIS INTEGRASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA TERHADAP KESTABILAN TEGANGAN PADA SISTEM KELISTRIKAN 150KV BALIKPAPAN KALTIM

Yuhenni Putra Pattan¹, Awan Uji Krismanto², I Made Wartana³

Teknik Elektro S1, Institut Teknologi Nasional, Malang, Indonesia

¹Yuhenni.pattan03@gmail.com, ²awan_uji_krismanto@lecturer.itn.ac.id, ³m.wartana@lecturer.itn.ac.id

Abstrak— Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak teknis integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terhadap M_{st} sistem dan mengevaluasi solusi mitigasi yang efektif pada jaringan transmisi. Simulasi kuantitatif dilakukan menggunakan perangkat lunak DlgSILENT PowerFactory dengan memanfaatkan metode *Continuation Power Flow* untuk memodelkan karakteristik stabilitas tegangan jangka panjang secara akurat. Dalam studi ini, penggunaan perangkat STATCOM (*Static Synchronous Compensator*) dan ESS (*Energy Storage System*) diusulkan serta dievaluasi sebagai instrumen mitigasi strategis untuk meningkatkan dukungan daya reaktif dalam sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa integrasi PLTS secara masif tanpa kendali tambahan cenderung menurunkan nilai M_{st} sistem akibat karakteristik intermitensi dan kurangnya dukungan inersia. Namun, dengan pengaktifan perangkat mitigasi, sistem mampu memperoleh kembali dukungan daya reaktif yang dinamis, yang menghasilkan peningkatan M_{st} secara signifikan. Temuan ini mengonfirmasi bahwa penempatan koordinatif dan pengoperasian perangkat mitigasi yang tepat merupakan kunci utama untuk memastikan integrasi energi terbarukan dapat dilakukan secara aman dan optimal, sehingga menjaga ketahanan operasional sistem kelistrikan 150 Kilovolt Balikpapan dari risiko kolaps tegangan.

Kata Kunci: Energi Terbarukan, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Kestabilan Tegangan, Daya Reaktif, STATCOM ESS.

I. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah salah satu solusi energi terbarukan yang semakin populer, termasuk di Indonesia. Karena memanfaatkan potensi sinar matahari yang melimpah. Integrasi PLTS dalam jaringan kelistrikan memberikan kontribusi positif terhadap penyediaan energi bersih dan pengurangan emisi gas rumah kaca, sehingga mendukung transisi energi nasional menuju sistem tenaga yang berkelanjutan [1], [2] namun, penggunaan PLTS dalam sistem kelistrikan bertegangan tinggi, seperti jaringan 150 kV di Balikpapan, Kalimantan Timur, menghadirkan tantangan signifikan terkait kestabilan tegangan [3].

PLTS menghasilkan daya yang bersifat intermiten karena dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan intensitas radiasi matahari. Fluktuasi ini berpotensi menyebabkan gangguan kestabilan tegangan, terutama karena PLTS berbasis inverter memiliki keterbatasan dalam penyediaan daya reaktif, yang merupakan faktor penting dalam menjaga profil tegangan sistem [4]. Jika kestabilan tegangan tidak terjaga, hal ini dapat menyebabkan penurunan kualitas daya, tegangan jatuh (*voltage sag*), bahkan berujung pada runtuhnya tegangan (*voltage collapse*) [5]. Meskipun demikian, perkembangan teknologi seperti inverter modern dengan fungsi kontrol tegangan, sistem penyimpanan energi (ESS), serta *smart grid* dapat memberikan solusi mitigasi untuk menjaga tegangan sistem tetap dalam batas standar operasional [6].

Kestabilan tegangan dalam sistem tenaga listrik mengacu pada kemampuan jaringan untuk mempertahankan tegangan pada setiap bus dalam batas toleransi yang diizinkan setelah terjadi gangguan atau perubahan beban [7]. Ketidakseimbangan antara kebutuhan dan penyediaan daya reaktif menjadi penyebab utama gangguan kestabilan tegangan. Oleh karena itu, analisis integrasi PLTS pada jaringan 150 kV diperlukan untuk memahami dampak penetrasi energi surya terhadap kestabilan tegangan serta mengevaluasi efektivitas teknologi mitigasi yang diterapkan [8], [9].

Dalam penelitian ini berfokus pada beberapa pertanyaan kunci yang ingin dijawab, yaitu:

1. Bagaimana cara menganalisis dan menghitung nilai M_{st} pada sistem kelistrikan 150 kV Balikpapan dalam kondisi sebelum integrasi PLTS?
2. Bagaimana pengaruh integrasi PLTS terhadap nilai M_{st} pada bus kritis sistem 150 kV Balikpapan, dan seberapa besar peningkatan nilai M_{st} yang dapat dibuktikan serta dihitung setelah integrasi PLTS?

3. Berapa persentase peningkatan total M_{st} pada bus kritis yang dapat dihitung untuk mengevaluasi keberhasilan total solusi mitigasi yang diterapkan setelah kondisi integrasi PLTS?

Penelitian ini bertujuan:

1. Menganalisis dan mengukur penurunan M_{st} pada sistem kelistrikan 150 kV Balikpapan akibat integrasi PLTS.
2. Membuktikan dan menghitung peningkatan M_{st} pada bus kritis setelah kondisi integrasi PLTS.
3. Mengevaluasi keberhasilan total solusi mitigasi dengan menghitung persentase peningkatan total M_{st} .

Target : Mendeteksi variabilitas daya akibat intensitas sinar matahari menggunakan data simulasi dan analisis real-time.

II. KAJIAN PUSTAKA

A. Stabilitas Tegangan

Stabilitas tegangan adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan pada setiap bus dalam batas yang dapat diterima setelah sistem mengalami gangguan atau perubahan kondisi operasi [10]. Kestabilan tegangan sangat bergantung pada kemampuan sistem menyediakan menyediakan daya reaktif yang cukup untuk memenuhi kebutuhan beban. Pada sistem berbasis PLTS, tantangan muncul karena variasi daya keluaran akibat perubahan intensitas cahaya matahari. Teknologi seperti inverter canggih, ESS, dan perangkat kompensasi daya reaktif berperan penting dalam menjaga stabilitas tegangan sistem [11]. Dalam situasi seperti gangguan, peningkatan beban yang dibutuhkan, atau perubahan konfigurasi jaringan dapat menyebabkan sistem tidak stabil, tetapi sistem dikatakan tidak stabil juga dapat berasal dari kondisi di setiap bagian, seperti:

1. Generator

Generator berfungsi untuk menghasilkan daya aktif dan reaktif untuk menjaga kondisi sistem dalam kondisi normal sesuai batasan normalnya. Generator mempunyai batasan operasi yang tertuang dalam Kurva kapabilitas Generator sebagai pembangkit listrik menyuplai daya aktif dan reaktif sesuai kebutuhan sistem untuk dapat menjaga level tegangan beroperasi pada batasan normal. Namun generator dibatasi oleh Kurva kapabilitas dalam pengaturan daya outputnya.

2. Saluran Transmisi

Penghantar pada saluran transmisi memiliki batasan daya yang mengalir peralatan tersebut. Sehingga dapat berdampak pada kestabilan tegangan sistem.

3. Beban

Komponen pada sistem kelistrikan yaitu beban dapat memberikan dampak pada kestabilan tegangan. Beban dapat dibagi dalam 2 jenis yaitu beban statis dan beban dinamis, kedua jenis beban tersebut dapat mempengaruhi profil tegangan hingga melampaui batasan normalnya. Kestabilan tegangan ini dapat diperoleh dengan memasang perangkat kompensasi pada saluran transmisi, mengontrol posisi tap transformator dan skema pelepasan beban. M_{st} adalah metrik kuantitatif yang mengukur jarak sistem beroperasi dari titik keruntuhan tegangan diturunkan langsung dari Kurva PV, dimana ia merupakan jarak horizontal.

B. Stabilitas Sistem Tenaga

Stabilitas sistem tenaga merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan keadaan operasi yang stabil setelah mengalami gangguan tertentu, seperti perubahan beban, gangguan hubung singkat, atau kegagalan perangkat [13]. Stabilitas sistem tenaga dapat dikategorikan ke dalam beberapa aspek:

1. Stabilitas Sudut Rotor (*Rotor Angle Stability*): Kemampuan generator dalam sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi elektromekanik [2].
2. Stabilitas Tegangan (*Voltage Stability*): Kemampuan sistem untuk mempertahankan tegangan bus dalam batas yang dapat diterima setelah terjadi gangguan [2].
3. Stabilitas Frekuensi (*Frequency Stability*): Kemampuan sistem untuk mempertahankan frekuensi operasi dalam batas toleransi setelah terjadi ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban [2].

Adapun syarat yang dimaksud yaitu :

1. Reliabiliti adalah kemampuan suatu sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus menerus.
2. Kualitas adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran-besaran standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi.
3. Stabilitas adalah kemampuan dari sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami gangguan – gangguan seperti hubung singkat, kehilangan generator, perubahan beban mendadak, dan lain – lain.

C. Proses Integrasi

Integrasi PLTS adalah proses menghubungkan sistem PLTS ke jaringan listrik (*grid*) yang sudah ada, baik secara langsung ke sistem distribusi maupun transmisi. Integrasi ini tidak hanya soal menyambungkan fisik kabel atau inverter, tetapi juga melibatkan koordinasi teknis, kontrol daya, sinkronisasi tegangan, proteksi sistem, dan penyesuaian terhadap kondisi operasional jaringan. PLTS bersifat intermiten (dayanya naik turun tergantung intensitas matahari). Hal ini dapat memengaruhi kestabilan tegangan pada jaringan listrik.

D. Metode Mitigasi

Metode mitigasi adalah serangkaian tindakan, teknologi, atau strategi yang digunakan untuk mengurangi, mencegah, atau mengendalikan dampak negatif dari suatu risiko atau gangguan terhadap sistem. Dalam konteks sistem tenaga listrik – khususnya integrasi PLTS – metode mitigasi digunakan untuk menstabilkan sistem ketika terjadi fluktuasi daya, tegangan, atau frekuensi akibat variabilitas sumber energi surya. Perangkat mitigasi seperti STATCOM/ESS bekerja dengan mengontrol dan menginjeksikan Daya Reaktif (Q) secara dinamis pada bus kritis. Injeksi Q ini berfungsi menopang tegangan, sehingga secara efektif menggeser P_{max} Kurva PV ke kanan, yang pada akhirnya meningkatkan M_{st} sistem secara signifikan dan mengoptimalkan kestabilan tegangan.

Tujuan Metode Mitigasi :

1. Menjaga kestabilan tenaga.
2. Meningkatkan keandalan dan kualitas pelayanan listrik.

3. Mencegah kerusakan peralatan dan pemadaman listrik.
4. Mengoptimalkan integrasi sumber energi terbarukan.

E. Integrasi PLTS

Integrasi PLTS adalah proses menghubungkan PLTS ke jaringan listrik agar dapat menyalurkan energi secara bersamaan dengan pembangkit lain. Proses ini memerlukan sinkronisasi tegangan dan frekuensi agar PLTS tidak mengganggu operasi sistem. Integrasi PLTS sangat berkaitan dengan kestabilan tegangan karena keluaran PLTS bersifat fluktuatif sesuai kondisi matahari. Perubahan daya ini dapat menyebabkan tegangan naik atau turun secara tiba-tiba. Selain itu, PLTS menghasilkan daya aktif tetapi terbatas dalam menyediakan daya reaktif yang dibutuhkan untuk menjaga kestabilan tegangan. Dengan teknologi seperti inverter modern dan sistem penyimpanan energi, PLTS dapat membantu menjaga tegangan tetap stabil dalam jaringan.

F. Continuation Power Flow (CPF)

Continuation Power Flow (CPF) adalah metode analisis numerik untuk mengevaluasi Kestabilan Tegangan Jangka Panjang (*Steady-State*) dalam sistem tenaga listrik. CPF bekerja dengan cara meningkatkan beban sistem secara bertahap (menggunakan parameter λ) dan mencari serangkaian solusi power flow yang berkelanjutan (kontinu).

G. External Grid

External Grid adalah komponen esensial dalam PowerFactory yang mewakili sumber daya tak terbatas dan berfungsi sebagai titik koneksi antara sistem yang Anda modelkan dengan sistem tenaga listrik eksternal yang jauh lebih besar. *External Grid* bertindak sebagai *Bus Slack* (Bus Ayun). Peran utamanya adalah untuk menyeimbangkan total daya aktif (P) dan reaktif (Q) antara total pembangkitan dan total beban di sistem yang dimodelkan.

H. Load Flow

Load Flow atau Analisis Aliran Daya Listrik adalah studi numerik fundamental dan vital dalam rekayasa sistem tenaga listrik yang bertujuan untuk menentukan kondisi operasi sistem pada keadaan tunak (*steady state*) normal. Studi ini dilakukan untuk menghitung secara rinci bagaimana daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) mengalir dari semua sumber pembangkit menuju semua beban melalui jaringan transmisi dan distribusi. Hasil utama dari analisis *Load Flow* adalah penentuan magnitudo tegangan dan sudut fasa di setiap titik atau bus dalam sistem, serta besarnya aliran daya pada setiap saluran transmisi dan rugi-rugi daya yang terjadi. Informasi ini sangat krusial bagi para insinyur sistem tenaga untuk memastikan bahwa tegangan berada dalam batas yang aman dan standar, serta bahwa semua peralatan, seperti saluran transmisi dan transformator, beroperasi tanpa kelebihan beban (*overload*). Analisis ini umumnya diselesaikan menggunakan metode numerik iteratif seperti Newton-Raphson untuk menyelesaikan sistem persamaan aljabar non-linear yang kompleks, menjadikannya alat penting untuk perencanaan perluasan sistem, evaluasi kinerja operasional, dan sebagai prasyarat untuk studi sistem yang lebih lanjut seperti analisis stabilitas dan gangguan hubung singkat.

I. Busbar

Busbar (rel bus) adalah komponen konduktor logam umumnya terbuat dari tembaga atau aluminium yang memiliki peran fundamental dalam sistem tenaga listrik, khususnya di gardu induk (GI) dan sistem distribusi. Fungsi utamanya adalah sebagai titik pertemuan sentral untuk mengumpulkan dan mendistribusikan energi listrik. Busbar bertindak sebagai terminal umum di mana daya dari berbagai sirkuit masuk (misalnya, dari generator atau jalur transmisi) dikumpulkan, dan dari situ, daya didistribusikan ke berbagai sirkuit keluar (seperti jalur penyulang atau transformator). Dalam studi aliran daya dan analisis kestabilan tegangan, busbar direpresentasikan sebagai "Bus" atau "Node", yang merupakan titik interkoneksi di mana semua variabel sistem, termasuk tegangan, arus, dan injeksi daya (seperti dari PLTS atau STATCOM/ESS), saling terhubung dan dianalisis, menjadikannya elemen krusial dalam topologi jaringan listrik.

J. Margin Stabilitas Tegangan

Margin Stabilitas Tegangan (*Voltage Stability Margin - VSM*) adalah ukuran keamanan kritis dalam sistem tenaga listrik yang menunjukkan seberapa jauh jarak antara kondisi operasi sistem saat ini dengan titik batas maksimum di mana sistem akan mengalami keruntuhan tegangan (*voltage collapse*). Konsep ini esensial untuk menjamin keandalan sistem. VSM mengukur kapasitas cadangan daya, biasanya dalam MegaWatt (MW) atau MegaVar (MVar), yang masih bisa disalurkan ke beban sebelum tegangan pada bus-bus sistem mulai anjlok secara tidak terkendali. Margin yang besar menandakan bahwa sistem beroperasi jauh dari titik kritis, sehingga mampu menahan peningkatan beban atau gangguan besar dengan aman. Sebaliknya, margin yang kecil menunjukkan bahwa sistem mendekati ambang batas kemampuannya, dan gangguan kecil pun dapat memicu keruntuhan tegangan dan berpotensi menyebabkan blackout. Dengan demikian, M_{st} adalah indikator utama yang digunakan operator sistem untuk memantau dan mengelola integritas operasional jaringan listrik. Rumus dibawah ini membandingkan nilai M_{st} (dalam MW) dari tiga skenario simulasi M_{st} dihitung menggunakan :

$$M_{st} = P_{max} - P_{operasi} \quad (2.1)$$

$$\%Peningkatan = \frac{(M_{st,1} - M_{st,2})}{M_{st,1}} \times 100\% \quad (2.2)$$

$$\%Peningkatan = \frac{(M_{st,3} - M_{st,2})}{M_{st,2}} \times 100\% \quad (2.3)$$

$$\%Peningkatan = \frac{(M_{st,3} - M_{st,1})}{M_{st,1}} \times 100\% \quad (2.4)$$

Dimana:

P_{max} = Batas Daya Aktif (beban) yang ditemukan dari titik puncak pada Kurva PV

$P_{operasi}$ = Daya Aktif (beban) yang disalurkan oleh sistem pada kondisi awal

M_{st} = Margin (jarak keamanan) antara titik operasi sistem saat ini dan batas keruntuhan tegangan.

$M_{st,1}$ = Margin Stabilitas Tegangan pada Skenario 1 (Base Case)

$M_{st,2}$ = Margin Stabilitas Tegangan pada Skenario 2 (PLTS)

$M_{st,3}$ = Margin Stabilitas Tegangan pada Skenario 3 (PLTS + Mitigasi)

III. METODOLOGI PENELITIAN

Simulasi dalam penelitian ini menggunakan software DIGSILENT selanjutnya diuji pada data *real* yaitu sistem kelistrikan 150 kV Balikpapan, Kaltim.

A. Pendekatan dan Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode simulasi berbasis perangkat lunak untuk menganalisis pengaruh integrasi PLTS terhadap kestabilan tegangan pada jaringan kelistrikan 150 kV di Balikpapan, Kalimantan Timur.

B. Lokasi dan Sumber Data

Lokasi penelitian mencakup sistem kelistrikan pada jaringan transmisi 150 kV Balikpapan, Kalimantan Timur. Data teknis sistem tenaga dan data hasil simulasi sistem tenaga listrik digunakan sebagai sumber informasi utama dalam melakukan analisis integrasi pembangkit pada penelitian ini.

C. Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui simulasi sistem tenaga listrik menggunakan perangkat lunak DigSILENT PowerFactory untuk menganalisis dampak integrasi PLTS terhadap kestabilan tegangan pada jaringan 150 kV di Balikpapan. Perangkat lunak ini digunakan untuk memodelkan sistem tenaga secara menyeluruh serta mensimulasikan gangguan dan kondisi transien. Data simulasi diperoleh dari dokumen teknis, survei lapangan, kestabilan tegangan dievaluasi menggunakan metode Aliran Daya Berlanjut (*Continuation Power Flow*) untuk menghasilkan Kurva PV (P – V Curve).

D. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini diawali dengan pemodelan sistem tenaga listrik jaringan 150 kV Balikpapan menggunakan perangkat lunak DIGSILENT PowerFactory. Langkah pertama adalah menggambar diagram satu garis (*Single Line Diagram*), lalu memasukkan data pembangkit, beban, dan PLTS ke dalam model. Setelah itu, ditetapkan kondisi dasar (*base case*) sistem sebagai acuan simulasi. Selanjutnya, dilakukan simulasi skenario gangguan, seperti pelepasan/pembebanan PLTS, pelepasan pembangkit konvensional, atau perubahan drastis beban. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mengamati respon sistem terhadap perubahan tegangan. Selama simulasi, data tegangan dihitung secara *real-time* dan nilai dV/dt (laju perubahan tegangan terhadap waktu) dihitung untuk menilai kestabilan tegangan. Bila tegangan sistem mengalami *sag* (penurunan) atau *swell* (kenaikan) yang melewati batas standar, ini mengindikasikan ketidakstabilan tegangan. Implementasi Strategi Mitigasi Kemudian, dilakukan simulasi tambahan dengan strategi mitigasi seperti penggunaan pengatur tegangan otomatis (*Automatic Voltage Regulator* - AVR) pada pembangkit, *Static VAR Compensator* (SVC), STATCOM, atau sistem penyimpanan energi (ESS). Hasil dari seluruh simulasi

kemudian dianalisis untuk menilai pengaruh integrasi PLTS terhadap kestabilan tegangan jaringan 150 kV.

Tabel 1. Realisasi Kapasitas Trafo Gardu Induk

No	Gardu Induk	Tegangan (KV)	Jumlah	Kapasitas (MVA)
1	Gn Malang / Industri	150/20	3	110
2	Batakan / Manggar Sari	150/20	4	170
3	Karang Joang / Giri Rejo	150/20	3	120
4	Sel Keledang / Harapan Baru	150/20	3	120
5	Tengkawang	150/20	4	180
6	Embalut	150/20	2	60
7	Bukuan	150/20	2	90
8	Tenggarong / Bukit Biru	150/20	2	60
9	Sambutan	150/20	1	30
10	Sambera	150/20	2	60
11	Bontang	150/20	1	30
12	Kuaro / Tanah Grogot	150/20	1	20
13	Petung	150/20	1	30
14	Kariangau	150/20	1	60
15	Senipah	150/20	1	30
16	Sangatta	150/20	2	60

Tabel 1 merupakan Data infrastruktur menunjukkan sistem ini didukung oleh 16 Gardu Induk dengan kapasitas yang bervariasi. GI Tengkawang memiliki kapasitas tertinggi sebesar 180 MVA, disusul oleh GI Batakan sebesar 170 MVA. Sementara itu, GI Kuaro memiliki kapasitas terendah dalam jaringan ini sebesar 20 MVA.

Tabel 2. Rencana Pengembangan Transmisi 150 KV

No	Dari - Ke	Tegangan (KV)	Jenis	KMS
1	PLTU Senipah - Palaran	150	2 cct. ACSR 2xHawk	110
2	PLTU Teluk BPP - Petung	150	2 cct. ACSR 2xHawk	90
3	Tenggarong / Bukit Biru - Kota Bangun	150	2 cct. ACSR 2xHawk	120
4	Bontang - Sangatta	150	2 cct. ACSR 2xHawk	90
5	New BPP - Incomer 2 phi (Manggarsari-Industri)	150	2 cct. ACSR 1xHawk	2
6	New Samarinda – Sambera	150	2 cct. ACSR 2xZebra	40
7	New BPP - Kariangai	150	2 cct. ACSR 2xZebra	40

Tabel 2 merinci infrastruktur transmisi listrik 150 kV di Kalimantan Timur yang menghubungkan pembangkit listrik ke berbagai wilayah. Seluruh jalur menggunakan konfigurasi 2 sirkit dengan kabel jenis ACSR (tipe Hawk dan Zebra) untuk menjamin keandalan distribusi. Rentang jaraknya bervariasi dari yang terpendek 2 KMS hingga yang terpanjang 120 KMS, mencakup area penting seperti Balikpapan, Samarinda, Bontang, hingga Tanah Grogot.

Tabel 3. Rencana Pengembangan GI

No	GI	Tegangan (KV)	Ket	Kapasitas (MVA)
1	Bontang	150/20	Ext	60
2	New Samarinda	150/20	New	60
3	Bontang Ext LB	150	Ext LB	2 LB
4	Sanggata	150/20	New	60
5	New BPP	150/20	New	60
6	PLTU Teluk BPP - New BPP	150	Ext LB	2 LB
7	Berau / T.Redep	150/20	New	60
8	Embalut	150	Ext LB	2 LB
9	Sambera - New Samarinda	150	Ext LB	2 LB
10	Tana Paser (Grogot)	150/20	New	60
11	Komam (Batu Sopang)	150/20	New	30
12	Lengikis	150/20	New	30
13	Kuaro (Grogot)	150	Ext LB	2 LB
14	Petung	150/20	Ext	60
15	Sanga-Sanga	150/20	New	30

Tabel 3 merupakan daftar pembangunan dan perluasan Gardu Induk (GI) di Kalimantan Timur dengan tegangan operasional 150/20 kV dan 150 kV. Proyek ini mencakup pembangunan gardu baru (*New*) dan perluasan (*Ext/Ext LB*) dengan kapasitas daya antara 30 MVA hingga 60 MVA. Infrastruktur ini tersebar di lokasi strategis seperti Bontang, Samarinda, Balikpapan, hingga Tana Paser untuk memperkuat sistem distribusi dan interkoneksi listrik di wilayah tersebut.

E. Deskripsi Model Simulasi

Analisis kestabilan tegangan difokuskan pada bus dengan M_{st} terendah atau bus yang paling sensitif terhadap perubahan beban, yang disebut Bus Kritis. Berdasarkan analisis *power flow* awal, Bus GI Tj batu diidentifikasi sebagai bus kritis dalam jaringan 150 kV Balikpapan dan menjadi lokasi tempat pemantauan tegangan serta pemasangan perangkat mitigasi.

Tabel 4. Pemilihan Bus Kritis

Busbar	Tegangan (p.u.)
GI Senipah	1,05167
GI Bukuan	1,04852
GI KTBG	1,02772
BB	1,05131
GI Haru	1,04263
GI Tengawang	1,04116
GI BB	1,04400
GI Muara Watu	1,06108
GI Tj Batu	1,01131
GI Tarakan	1,1132
GI Ujola Bilang	1,04583

Tabel 4 merangkum nilai tegangan (p.u.) pada dua belas busbar untuk menentukan titik kritis dalam sistem tenaga listrik. Mayoritas gardu induk beroperasi di rentang 1,01 hingga 1,06 p.u., namun GI Tarakan menunjukkan kondisi paling ekstrem dengan tegangan tertinggi mencapai 1,1132

p.u. Sebaliknya, GI Tj Batu mencatatkan nilai terendah sebesar 1,01131 p.u. Data ini menjadi acuan penting untuk mengidentifikasi busbar yang membutuhkan pemantauan khusus guna menjaga stabilitas tegangan sistem.

F. Pemodelan Integrasi PLTS (Skenario 2)

PLTS dimodelkan dengan total kapasitas 40 MW yang terhubung ke Bus GI Tj batu. Dalam Skenario 2, inverter PLTS diasumsikan beroperasi pada Faktor Daya Unity (Unity Power Factor). Pengaturan ini berarti inverter hanya menyuntikkan Daya Aktif (P) ke sistem dan meminimalkan dukungan Daya Reaktif (Q), yang merupakan penyebab utama degradasi kestabilan tegangan.

G. Pemodelan Perangkat Mitigasi (Skenario 3)

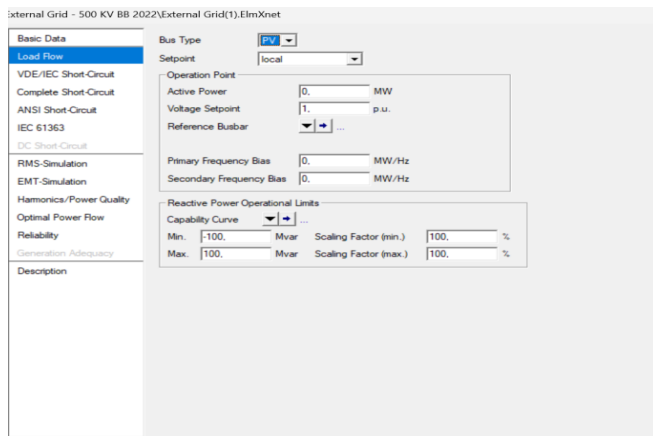
Perangkat mitigasi dimodelkan sebagai STATCOM (*Static Synchronous Compensator*) atau ESS (*Energy Storage System*) yang terpasang di Bus GI Tj batu.

Tabel 5. Pemodelan Perangkat Mitigasi

Jenis Perangkat	Elemen Static Generator dengan kontrol V
Lokasi Pemasangan	Bus GI Tj batu
Kapasitas Daya Reaktif	100 Mvar
Mode Kontrol	Kontrol Tegangan (V-control) dengan setpoint 1.0 p.u.

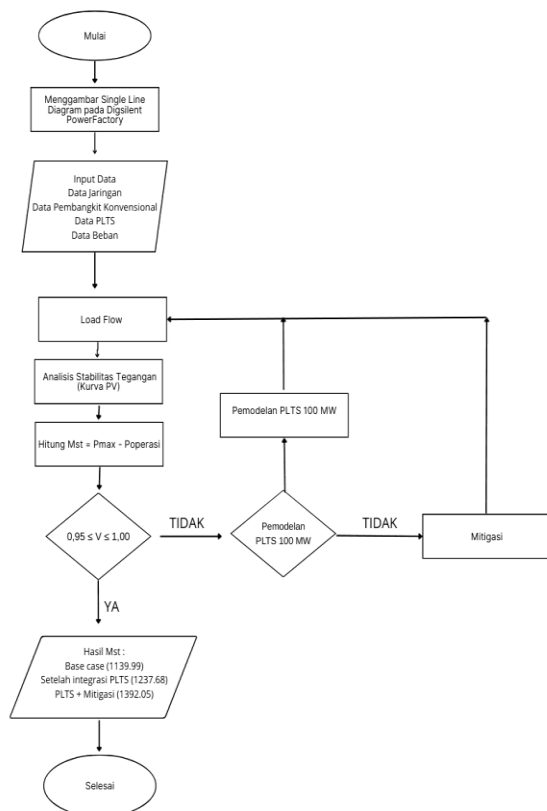
Tabel 5 merupakan parameter pemodelan perangkat mitigasi yang digunakan dalam simulasi ini. Perangkat mitigasi yang dapat berupa STATCOM dan dimodelkan sebagai Static Generator dengan kontrol tegangan (V-control). Lokasi pemasangan difokuskan pada Bus GI Tj Batu dengan target kapasitas daya reaktif sebesar 100 Mvar dan setpoint tegangan sebesar 1,0 p.u. untuk menjaga stabilitas sistem.

Jaringan Studi Model simulasi dibangun berdasarkan topologi jaringan transmisi 150 kV Balikpapan, Kalimantan Tmur. Jaringan ini dimodelkan lengkap dengan bus, saluran transmisi, transformator, beban, dan sumber daya eksternal (*External Grid*) yang berfungsi sebagai slack bus. Titik integrasi PLTS dan pemasangan perangkat mitigasi ditentukan pada bus yang paling sensitif terhadap perubahan tegangan atau bus yang terhubung langsung dengan PLTS. Gambar 1 simulasi sebelum load flow, gambar 2 tampilan skematik jaringan 150 kV setelah di load flow, gambar 3 lokasi bus, lokasi PLTS, dan lokasi penempatan perangkat mitigasi, gambar 4 menunjukkan kapasitas (MW), gambar 5 spesifikasi teknis dan mode kontrol yang digunakan dan gambar 6 flowchart penelitian.



Gambar 5. Spesifikasi teknis dan mode kontrol yang digunakan

Gambar 5 menampilkan parameter *Load Flow* pada *External Grid* yang dikonfigurasi sebagai bus tipe PV. Dalam pengaturan ini, grid diatur untuk menjaga tegangan sistem tetap stabil pada 1.0 p.u. dengan *Active Power* sebesar 0 MW. Selain itu, sistem dibatasi oleh kapasitas daya reaktif antara -100 hingga 100 Mvar untuk mendukung pengaturan tegangan otomatis pada busbar referensi selama simulasi berlangsung.



Gambar 6. Flowchart penelitian

Gambar 6 merupakan proses dimulai dari penggambaran Single Line Diagram dan input data pada software DlgSILENT PowerFactory untuk melakukan *load flow* serta analisis stabilitas tegangan melalui kurva PV guna memeriksa

batasan aman sistem, yang kemudian dilanjutkan dengan integrasi dan pemodelan PLTS 100 MW serta pengambilan keputusan terkait mitigasi untuk menghasilkan perbandingan hasil dari ketiga skenario yang telah ditentukan.

IV. SIMULASI DAN ANALISA

Tabel 6. Tiga skenario simulasi yang dievaluasi

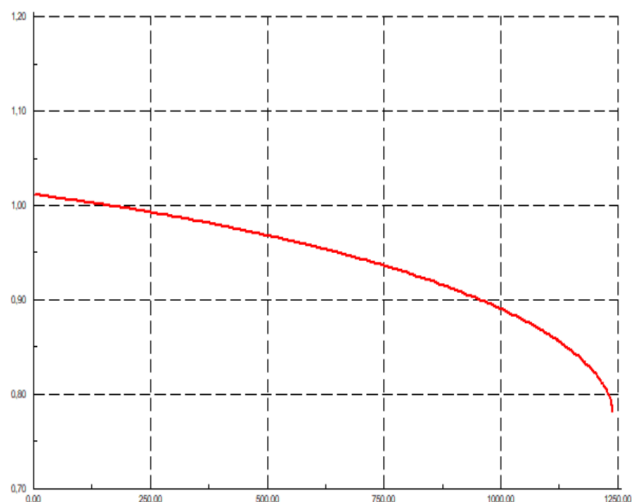
Skenario	Deskripsi Kondisi	Tujuan Analisis
Skenario 1	Base Case (Sistem tanpa PLTS)	Menetapkan nilai M_{st} (1)
Skenario 2	Integrasi PLTS saja	Mengukur penurunan M_{st} akibat PLTS (M_{st2})
Skenario 3	PLTS + Mitigasi	Mengukur pemulihan M_{st} (m_{st3})

Tabel 6 Simulasi yang dilakukan melalui tiga skenario utama untuk mengevaluasi dampak teknis dan efektivitas langkah perbaikan terhadap stabilitas sistem. Skenario 1 merupakan Base Case atau kondisi sistem tanpa PLTS yang digunakan untuk menetapkan nilai M_{st} awal (M_{st1}) sebagai parameter acuan. Skenario 2 mengevaluasi kondisi sistem dengan integrasi PLTS saja guna mengukur penurunan nilai M_{st} yang diakibatkan oleh karakteristik pembangkit tersebut (M_{st2}). Terakhir, Skenario 3 menguji kombinasi PLTS dengan perangkat mitigasi untuk menganalisis sejauh mana pemulihan Margin stabilitas tegangan (M_{st3}) dapat dicapai dalam sistem kelistrikan.

Tampilan Visual Hasil Simulasi

Untuk memverifikasi secara visual dampak integrasi PLTS dan efektivitas perangkat mitigasi terhadap kestabilan tegangan, Gambar 6 menampilkan Kurva PV *Base Case*, Gambar 7 menampilkan Kurva PV dampak dari PLTS, Gambar 8 menampilkan Kurva PV setelah mitigasi. Grafik ini secara eksplisit menunjukkan pergeseran titik puncak (titik P_{max} atau *nose*) yang digunakan untuk menentukan M_{st} .

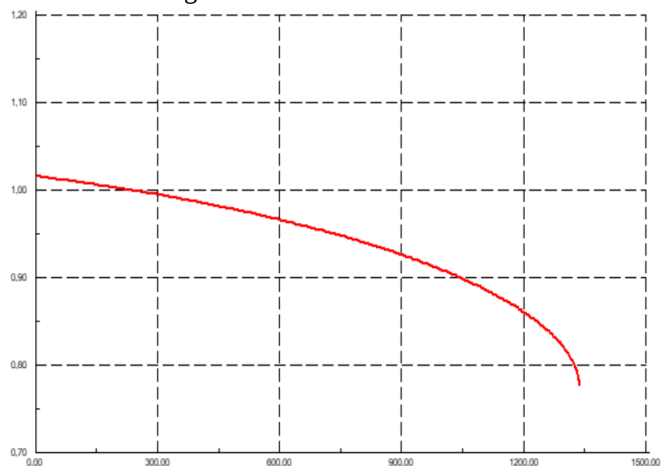
Skenario 1: Base Case



Gambar 7. Kurva Daya Tegangan Base Case sebelum integrasi PLTS

Gambar 7 menunjukkan karakteristik kurva P-V pada kondisi base case sebelum dilakukan integrasi PLTS. Kurva tersebut menggambarkan hubungan antara peningkatan pembebanan daya aktif terhadap profil penurunan tegangan pada bus kritis. Berdasarkan grafik, terlihat bahwa tegangan mengalami degradasi perlahan seiring bertambahnya beban hingga mendekati titik kritis (*nose point*). Data base case ini digunakan sebagai parameter acuan untuk menentukan nilai awal sistem.

Skenario 2: Dengan PLTS



Gambar 8. Kurva Daya Tegangan setelah integrasi PLTS

Walaupun Gambar 7 dan Gambar 8 menunjukkan pola kurva yang serupa, terdapat perbedaan pada nilai daya aktif maksimum yang dapat dicapai. Pada Skenario 2, kurva meluas lebih jauh ke arah kanan pada sumbu MW. Hal ini membuktikan bahwa penambahan PLTS secara efektif meningkatkan kapasitas penyaluran daya sistem dan memberikan margin keamanan yang lebih luas bagi profil tegangan bus kritis.

Skenario 3: PLTS + Mitigasi



Gambar 9. Kurva Daya Tegangan PLTS + Mitigasi

Berdasarkan Gambar 9, hasil simulasi pada Skenario 3 menunjukkan dampak dari integrasi PLTS yang dikombinasikan dengan perangkat mitigasi. Berbeda dengan skenario sebelumnya, profil tegangan pada kurva P-V ini mampu bertahan secara konstan di sekitar nilai nominal 1,00 p.u. meskipun daya aktif ditingkatkan hingga melampaui 1500 MW. Hal ini dikonfirmasi oleh nilai M_{st} yang mencapai 1392,05, nilai tertinggi di antara semua skenario. Hasil ini membuktikan bahwa penambahan perangkat mitigasi sangat efektif dalam menjaga stabilitas tegangan sistem secara menyeluruh.

Tegangan Skenario 1: Base Case

Tabel 7. Tegangan terminal Base Case sebelum integrasi PLTS

Nama	Tegangan Nominal (kV)	Rasio Tegangan (p.u.)	Sudut Fase Tegangan (deg)
GI Tj batu	150	1,01131	18,66099

Tabel 7 merupakan Nilai tegangan dalam satuan per unit (p.u.) digunakan sebagai indikator stabilitas sistem di setiap skenario. Pada kondisi base case, bus kritis GI Tj Batu memiliki tegangan awal sebesar 1,01131 p.u. Namun, hasil simulasi kurva P-V menunjukkan bahwa tanpa adanya mitigasi, tegangan ini akan jatuh di bawah ambang batas minimum 0,95 p.u. seiring peningkatan beban. Sebaliknya, pada skenario dengan mitigasi, tegangan dapat dipertahankan secara stabil di angka 1,00 p.u., yang memenuhi standar kriteria keberhasilan yang ditetapkan dalam diagram alir penelitian

Tegangan Skenario 2: Dengan PLTS

Tabel 8. Tegangan terminal setelah integrasi PLTS

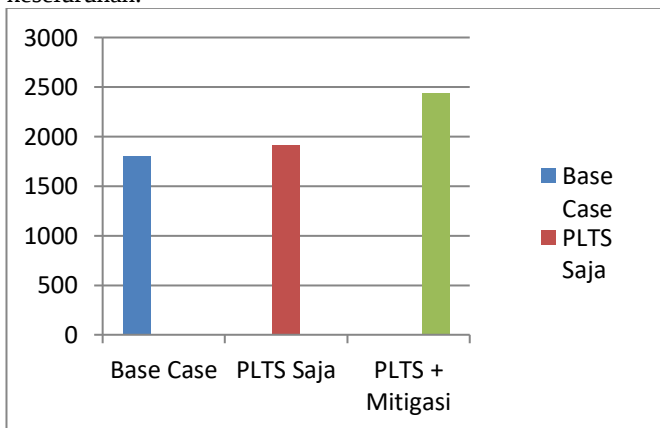
Nama	Tegangan Nominal (kV)	Rasio Tegangan (p.u.)	Sudut Fase Tegangan (deg)
GI tj batu	150	1,01574	25,13179

Berdasarkan Tabel 8, hasil simulasi Skenario 2 menunjukkan bahwa setelah integrasi PLTS, tegangan terminal pada GI Tj Batu berada pada level 1,01574 p.u. Hasil ini mengindikasikan bahwa sistem memiliki profil tegangan yang baik dan memenuhi kriteria keamanan operasi. Integrasi PLTS tidak hanya menyuplai daya aktif tambahan, tetapi juga terbukti mampu mempertahankan kestabilan tegangan sistem di atas ambang batas minimum, selaras dengan pergeseran nose point pada kurva P-V ke arah kanan.

Tabel 9. Hasil nilai M_{st} ketiga skenario

Skenario	$P_{operasi}$ (MW)	P_{max} (MW)	Margin Stabilitas Tegangan (MW)
1 (Base Case)	100	1239.99	$M_{st,1}$ (1139.99)
2 (PLTS saja)	100	1337.68	$M_{st,2}$ (1237.68)
3 (PLTS + Mitigasi)	100	1492.05	$M_{st,3}$ (1392.05)

Pada Tabel 9 Integrasi PLTS (Skenario 1 vs 2) terbukti meningkatkan stabilitas sistem dengan kenaikan nilai sebesar 8,57% (menjadi 1237,68 MW). Efektivitas ini semakin optimal pada Skenario 3, di mana penggunaan mitigasi memberikan peningkatan signifikan sebesar 12,47% hingga mencapai 1392,05 MW. Hasil ini mengonfirmasi bahwa dukungan daya reaktif dari perangkat mitigasi sangat efektif dalam memperluas batas stabilitas sistem secara keseluruhan.



Gambar 10. Gabungan dari ketiga skenario

Dari gambar 10 dapat dilihat Skenario (PLTS saja) Diatas Skenario 1 (Base Case). Kurva Skenario 2 lebih tinggi karena Kontrol Daya Reaktif (Q) yang tepat pada PLTS terbukti sangat signifikan dalam meningkatkan stabilitas sistem. Skenario Optimal, yang menerapkan injeksi Q secara agresif, berhasil mendorong batas Daya Aktif maksimum (P_{max}) sistem hingga 2541.64 MW, jauh melampaui Base Case (1905.95 MW). Kurva Skenario 3 pulih karena dampak dukungan Q ini menahan penurunan tegangan, memperpanjang kemampuan sistem untuk menyalurkan daya aktif. Ini memvisualisasikan Peningkatan M_{st} dan mengonfirmasi Hipotesis Positif (Efektivitas Solusi).

Tabel 10. Tegangan Sebelum Dan Sesudah Pemasangan PLTS

Skenario	Rasio Tegangan (p.u.)
1. Base Case (Sistem tanpa PLTS)	1.01131
2. Setelah Integrasi PLTS	1.01574

Pada Tabel 10 menunjukkan bahwa Tegangan Terminal bus yang dipantau meningkat pada skenario 2 (PLTS saja). Dampak kenaikan ini mengonfirmasi PLTS menyuntikkan Daya Reaktif yang secara langsung berfungsi menaikkan tegangan lokal di sekitarnya.

1. Analisis Dampak (Skenario 1 vs 2)

Persentase peningkatan nilai M_{st} dihitung menggunakan persamaan 2.2

$$= \frac{(1139.99 - 1237.68)}{1139.99} \times 100\%$$

$$1139.99 - 1237.68 = 97.69$$

$$\frac{97.69}{1139.99} \approx 0.0857\%$$

$$0.857 \times 100\% = 8.57\%$$

Integrasi PLTS 100 MW pada Skenario 2 menghasilkan peningkatan positif pada M_{st} sistem. Secara absolut, MST meningkat sebesar 97.69 MW (dari 1139.99 MW menjadi 1237.68 MW) dibandingkan Base Case. Kenaikan ini setara dengan peningkatan MST sebesar 8.57%. Peningkatan ini dikaitkan dengan injeksi Daya Aktif (P) murni dari PLTS, yang secara efektif menaikkan batas Daya Aktif total (P_{max}) yang dapat dicapai sistem sebelum batas stabilitas tegangan tercapai. PLTS terbukti tidak mengurangi stabilitas sistem.

2. Analisis Efektivitas (Skenario 2 vs 3)

Persentase peningkatan nilai M_{st} dihitung menggunakan persamaan 2.3

$$= \frac{(1392.05 - 1237.68)}{1237.68} \times 100\%$$

$$1392.05 - 1237.68 = 154.37$$

$$\frac{154.37}{1237.68} = 0.124$$

$$0.124 \times 100\% = 12.4\%$$

Analisis Efektivitas (Skenario 2 vs 3) menguji efektivitas dukungan Daya Reaktif (Q). Dengan mengaktifkan PLTS pada mode *Leading Power Factor* dan melonggarkan batasan Q jaringan (Mitigasi), M_{st} meningkat signifikan menjadi 1392.05 MW. Peningkatan absolut sebesar 154.37 MW dari Skenario 2 ke Skenario 3 ini setara dengan efektivitas tambahan sebesar 12.4%. Hasil ini menegaskan bahwa untuk menaikkan M_{st} secara substansial pada sistem Anda, Daya Reaktif (Q) yang disuntikkan PLTS (sebagai mitigasi) adalah faktor yang jauh lebih efektif dibandingkan hanya dengan injeksi Daya Aktif (P).

3. Analisis Evaluasi Akhir (Skenario 3 vs 1)

Persentase peningkatan nilai M_{st} dihitung menggunakan persamaan 2.4

$$\begin{aligned}
&= \frac{(1392.05 - 1139.99)}{1139.99} \times 100\% \\
&1392.05 - 1139.99 = 252.06 \\
&\frac{252.06}{1139.99} = 0.221 \\
&0.221 \times 100\% = 22.1\%
\end{aligned}$$

Analisis evaluasi akhir membandingkan efektivitas total dari Skenario 3 (PLTS 100 MW dengan Mitigasi) terhadap kondisi awal Skenario 1 (*Base Case*), yang diukur melalui M_{st} . Hasil perhitungan menunjukkan bahwa M_{st} mengalami peningkatan substansial sebesar 252.06 MW, yaitu dari M_{st} *Base Case* 1139.99 MW menjadi M_{st} Skenario 3 sebesar 1392.05 MW. Peningkatan absolut ini setara dengan efektivitas peningkatan total sebesar 22.1%. Peningkatan dramatis ini membuktikan bahwa integrasi PLTS, apabila dikombinasikan dengan upaya mitigasi yang optimal (yaitu pengoperasian PLTS pada mode *Leading Power Factor* untuk menyuntikkan Daya Reaktif), sangat efektif dalam meningkatkan batas kemampuan sistem menanggung Daya Aktif (P_{max}) dan memperkuat ketahanan stabilitas tegangan secara keseluruhan.

4. Interpretasi Dampak Integrasi PLTS

Kenaikan M_{st} dan P_{max} ini terjadi karena injeksi Daya Aktif (P) murni dari PLTS ke sistem, yang secara efektif meningkatkan kapasitas pembangkitan total dan menggeser batas Daya Aktif Maksimum (P_{max}) yang dapat disalurkan. Meskipun demikian, penerapan perangkat mitigasi berupa STATCOM/ESS pada Bus Kritis (GI Tj batu) terbukti jauh lebih efektif, ditunjukkan dengan peningkatan M_{st} sistem yang melonjak sebesar 22.1% dibandingkan kondisi PLTS Saja (Skenario 2). Secara keseluruhan, solusi PLTS yang didukung manajemen Daya Reaktif yang optimal (melalui STATCOM/ESS) menghasilkan peningkatan M_{st} total sebesar 12.4% dibandingkan *Base Case*, membuktikan bahwa integrasi energi terbarukan dapat memperkuat ketahanan stabilitas tegangan jaringan 150 kV Balikpapan.

5. Mekanisme dan Efektivitas Mitigasi

Penerapan perangkat mitigasi pada Skenario 3 menghasilkan peningkatan M_{st} yang signifikan sebesar 22.1% dibandingkan Skenario 2. Keberhasilan ini didasarkan pada kemampuan STATCOM/ESS untuk menginjeksikan Daya Reaktif (Q) secara dinamis pada Bus GI Senipah. Injeksi Q yang terkontrol ini berhasil menopang tegangan bus, memperluas batas P_{max} sistem, dan secara drastis meningkatkan ketahanan sistem terhadap keruntuhan tegangan. Perangkat mitigasi secara efektif mengkompensasi kekurangan Q yang disebabkan oleh PLTS. Dukungan Q yang efektif ini secara fisik memperluas titik puncak (P_{max}) Kurva PV ke kanan. Pergeseran ini secara langsung meningkatkan P_{max} sistem dari 1337.68 MW (Skenario 2) menjadi 1492.05 MW (Skenario 3), sehingga M_{st} melonjak hingga 1392.05 MW dan membuat sistem 22.1% lebih stabil dari kondisi PLTS Saja.

6. Evaluasi Kestabilan Akhir (Kesuksesan Total)

Analisis Evaluasi Akhir (Skenario 3 vs 1) menunjukkan bahwa M_{st} setelah mitigasi 1392.05 MW jauh melampaui kondisi *Base Case* 1139.99 MW, menghasilkan peningkatan total 22.1%. Angka ini membuktikan bahwa perangkat mitigasi tidak hanya memulihkan kestabilan, tetapi juga mengoptimalkan kinerja sistem menjadi lebih baik daripada kondisi awalnya. Ini adalah bukti bahwa solusi yang diusulkan efektif dalam menciptakan sistem 150 kV Balikpapan yang lebih stabil secara komprehensif.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menganalisis dampak integrasi PLTS terhadap kestabilan tegangan pada sistem kelistrikan 150 kV Balikpapan Kalimantan Timur. Hasil analisis M_{st} menunjukkan bahwa integrasi PLTS (Skenario 2) memberikan dampak positif terhadap kestabilan sistem dibandingkan kondisi *Base Case* (Skenario 1), dengan M_{st} yang meningkat dari 1139.99 MW menjadi 1237.68 MW. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa sistem memiliki margin operasi yang lebih besar setelah penambahan PLTS, menjauhkannya dari titik keruntuhan tegangan (P_{max}). Selanjutnya, implementasi perangkat mitigasi (Skenario 3) terbukti sangat efektif dan optimal dalam mendukung performa sistem, ditunjukkan dengan lonjakan M_{st} secara signifikan hingga mencapai 1392.05 MW. Kenaikan M_{st} ini menegaskan bahwa dengan perencanaan dan penambahan kontrol daya reaktif yang tepat, integrasi PLTS tidak hanya aman tetapi juga mampu memperkuat ketahanan dan keandalan sistem 150 kV Balikpapan dalam menghadapi peningkatan beban.

Saran

Penelitian ini membuktikan bahwa integrasi PLTS 100 MW di GI Tanjung Batu meningkatkan M_{st} sebesar 8,57%, sementara penggunaan STATCOM atau ESS mampu mengoptimalkannya hingga 12,47%. Sebagai tindak lanjut, disarankan untuk melakukan analisis kestabilan transien dan frekuensi guna mengevaluasi respon dinamik sistem terhadap intermitensi PLTS. Penelitian mendatang juga perlu melakukan studi komparatif penempatan perangkat mitigasi pada berbagai lokasi bus untuk menemukan titik optimal di jaringan 150 kV Balikpapan. Selain itu, pengujian dengan variasi penetrasi PLTS di atas 100 MW serta fluktuasi iradiasi matahari sangat dianjurkan untuk memetakan batas operasional sistem yang aman dalam mendukung transisi energi di Kalimantan Timur.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Saputra, A. U. Krismanto, A. Lomi. (2023). Analisis Pengaruh Integrasi Pembangkit Energi Baru Terbarukan Terhadap Kestabilan Frekuensi Pada Saluran Transmisi 150kV Bali. *Magnetika*, 7(2), 206-212.
- [2] D. S. Pamungkas, I. M. Wartana, I. B. Sulistiawati. (2024). Analisis Integrasi Pembangkit Listrik Tenaga

- Surya terhadap Kestabilan Frekuensi pada Sistem Kelistrikan 150 kV Lombok Nusa Tenggara Barat. *Magnetika*, 8(1), 10-23
- [3] A. Pudjanarsa and D. Nursuhud, *Mesin Konversi Energi*, Yogyakarta: ANDI, 2006.
- [4] Z. Ahmed et al., “Impact of Renewable Energy Integration on Frequency Stability of Power Systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 4, pp. 2500–2509, 2021.
- [5] H. Khalil and E. Boje, “Frequency Stability in Power Grids with High Penetration of Renewable Energy,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 5482–5491, 2021
- [6] S. Kumar et al., “Review of Grid Frequency Control Methods with Renewable Energy Integration,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 137, p. 110482, 2021.
- [7] Y. Xie, Z. Xu, and D. Wang, “Enhanced Frequency Regulation with Battery Energy Storage in Renewable-Based Power Systems,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 15638–15650, 2020.
- [8] C. Mi and L. Zhang, “Dynamic Modeling of Solar Power Plants for Frequency Stability Analysis,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 11, no. 2, pp. 464–472, 2021.
- [9] J. Shah et al., “Smart Inverter Technology for Solar PV Integration,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 3, pp. 2198–2210, 2021.

- [10] T. Brown and K. Rossi, “Energy Storage Systems for Renewable Grid Stability,” *Journal of Energy Storage*, vol. 34, p. 101812, 2020.
- [11] M. D. Lemmon et al., “Mitigating Renewable Energy Fluctuations with Virtual Inertia,” *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–5, 2019.

VII. BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Kota Mataram pada Tanggal 9 Juni 2003 dengan nama lengkap Yuhenni Putra Pattan. Penulis menyelesaikan Pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMAN 4 Mataram. Setelah menamatkan SMA, penulis melanjutkan pendidikannya ke jenjang Strata 1 di Institut Teknologi Nasional Malang Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam berbagai kegiatan organisasi dan akademik, diantaranya menjadi anggota Perkumpulan Mahasiswa Kristen (PMK) ITN Malang serta menjabat sebagai asisten laboratorium TDDE. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email yuhenni03@gmail.com. Adapun keahlian yang dikuasai meliputi analisis sistem tenaga listrik.