Magnetika

ANALISIS PENERAPAN STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR (STATCOM) PADA SALURAN TRANSMISI 150 KV BALI

[1]Achmad Bashori Kurniawan, [2]I Made Wartana, MT.
[1,2]Institut Teknologi Nasional, Malang, Indonesia
[1]bashoriachmad96@gmail.com, [2]m.wartana@lecturer.itn.ac.id

***Abstrak*—** Ketidakstabilan tegangan statis, terutama terkait dengan penurunan daya aktif (MW) maupun daya reaktif (Mvar) yang merupakan salah satu permasalahan utama dalam sistem. Saat sistem mendekati titik pembebanan maksimum atau titik gangguan tegangan, dan panjang saluran transmisi, maka kehilangan daya aktif dan reaktif dapat meningkat dengan cepat. Salah satu metode alternatif untuk meningkatkan kinerja sistem adalah dengan memasang peralatan kendali modern yang memiliki kualitas, efektivitas, dan efisiensi tinggi yaitu peralatan *Flexible Alternating Current Transmission System* (FACTS). Peralatan ini mampu merancang, mengendalikan dan mengoperasikan sistem dengan melibatkan komponen *solid state* secara akurat (*precisely*) dan fleksibel. Dalam penelitian ini salah satu peralatan FACTS yaitu *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) dipasang pada jaringan tenaga listrik untuk mningkatkan kinerja sistem. Peralatan STATCOM yang dapat mengontrol tegangan dan aliran daya pada sistem dengan menempatkannya pada lokasi dan kapasitas yang tepat dengan menggunakan metode studi stabilitas tegangan statis yaitu *Continuation Power Flow* (CPF). CPF juga dapat menunjukkan peningkatan stabilitas statis tegangan setelah pemasangan STATCOM. Efektivitas metode yang diusulkan telah disimulasikan pada sistem kelistrikan Bali 16-bus untuk menyelidiki peningkatan kinerja dan kapasitas pembebanan sistem. Dari simulasi yang dilakukan dengan memasang pengendali modern tersebut di lokasi terbaik yaitu pada bus 02 ASARI dengan kapasitas STATCOM 45 Mvar yaitu sebesar λ_{max} = 1,4747 p.u. maka peningkatan margin daya tahan sistem hampir mencapai 0,04 % dibandingkan kondisi *basecase* yaitu sebesar λ_{max} = 1.4741 p.u. dengan profile tegangan meningkat dan rugi-rugi saluran tereduksi.

Kata Kunci: *CPF, FACTS, STATCOM, sistem kelistrikan Bali, stabilitas tegangan*

I. PENDAHULUAN

Sistem Sistem transmisi listrik adalah tulang punggung infrastruktur energi, yang mentransmisikan daya listrik dari pembangkit listrik ke konsumen di berbagai wilayah. Selama proses transmisi ini, terdapat beberapa tantangan teknis yang dapat mempengaruhi kehandalan sistem secara keseluruhan. Beberapa masalah yang sering dihadapi oleh saluran transmisi adalah fluktuasi beban yang menyebabkan perubahan tegangan, gangguan transien seperti hubung singkat atau gangguan atmosferik yang dapat mengganggu kestabilan sistem, dan efek kapasitif dan induktif karena panjang saluran transmisi yang dapat mempengaruhi kualitas tegangan dan arus [1].

Untuk mengatasi masalah-masalah tersebut, diperlukan teknologi yang canggih dan cerdas dalam sistem transmisi. *Static Synchronous Compensator* (STATCOM), sebagai salah satu jenis *Flexible AC Transmission System* (FACTS), mempunyai peranan penting. STATCOM sebagai perangkat elektronik berbasis daya yang terhubung paralel dengan saluran transmisi. STATCOM memiliki kemampuan untuk menyediakan daya reaktif tambahan atau menyerap daya reaktif berlebih untuk menjaga tegangan tetap stabil pada saluran transmisi. Dengan kemampuan ini, STATCOM dapat mengatasi fluktuasi tegangan, mengontrol tingkat tegangan, dan meredam osilasi yang mungkin terjadi [2].

Namun, sebelum mengimplementasikan STATCOM dalam sistem, analisis menyeluruh harus dilakukan untuk memahami bagaimana perangkat ini akan berinteraksi dengan saluran transmisi dan dampaknya pada kinerja keseluruhan sistem. Perangkat lunak *Toolbox* Analisis Sistem Listrik (PSAT) dibuat untuk melakukan analisis dan simulasi sistem listrik. PSAT memiliki banyak alat dan fitur yang memungkinkan insinyur listrik untuk menguji dan menganalisis secara menyeluruh kinerja sistem listrik, dan ia juga mampu menjalankan STATCOM [3].

Tujuan penelitiandalah untuk meningkatan kapasitas transmisi, stabilitas pofil tegangan yang lebih baik, dan optimalisasi penggunaan infrastruktur yang ada. Metode yang di gunakan adalah dengan analisis penerapan STATCOM pada saluran transmisi 150 kV Bali, untuk meningkatkan profil tegangan, reduksi rugi daya dan peningkatan stabilitas statis sistem transmisi listrik secara keseluruhan [4].

II. KAJIAN PUSTAKA

A. Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah jaringan yang terdiri dari banyak peralatan dan komponen listrik yang saling terhubung. Fungsi utama sistem ini adalah untuk mengirimkan energi listrik yang dihasilkan oleh generator kepada konsumen yang membutuhkannya. Dengan adanya sistem ini, energi listrik dapat disalurkan secara efisien dan andal dari sumber daya ke tempat pengguna akhir, sehingga memenuhi kebutuhan listrik masyarakat dan industri.

Secara umum, sebuah sistem tenaga listrik terdiri dari empat subdivisi utama:

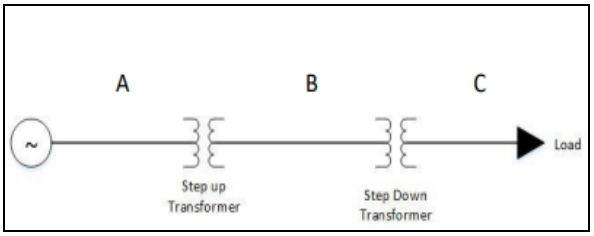
1. Sistem Pembangkit

   Dalam sistem tenaga listrik, fasilitas pembangkitan adalah kumpulan peralatan yang bertanggung jawab atas proses menghasilkan energi listrik melalui generator. Dalam proses ini, energi biasanya diubah menjadi listrik dari berbagai sumber bahan bakar, seperti batubara, air, atau energi nuklir. Turbin digerakkan oleh bahan bakar ini, yang kemudian mengubah energi kinetik dan potensial dari fluida bergerak, seperti air, uap, gas pembakaran, atau udara, menjadi energi mekanik. Pada generator, sejumlah bilah terpasang pada poros, yang menghasilkan energi mekanik. Kemudian, melalui interaksi medan magnet dan listrik, generator ini mengubah energi mekanik menjadi energi listrik.

2. Sistem Transmisi Tenaga Listrik

   Sistem transmisi merupakan bagian vital dari infrastruktur tenaga listrik yang bertugas utama untuk mengalirkan daya yang dihasilkan dari fasilitas pembangkit ke jaringan distribusi. Perannya sangat penting karena memungkinkan transfer daya listrik antara lokasi yang terpisah secara geografis. Keuntungan utama dari sistem transmisi adalah kemampuannya untuk menghubungkan pembangkit listrik yang terletak di lokasi terpencil dengan jaringan distribusi di kota-kota besar dan wilayah industri. Hal ini juga mencakup integrasi dengan pembangkit energi terbarukan yang sering kali terletak di lokasi yang cocok dengan sumber daya alamnya [4].

   Dalam sistem transmisi tenaga listrik, tegangan tinggi dan tegangan ekstra tinggi sering digunakan untuk mengurangi kerugian daya karena aliran arus yang besar melalui kawat penghantar dan untuk menjaga kestabilan tegangan.



Gambar 1. Pembagian Zona Tegangan Pada Transmisi

Dengan keterangan:

A. Tegangan rendah / menengah
B. Tegangan tinggi / ekstra tinggi
C. Tegangan menengah / rendah

Saluran transmisi mengalirkan energi listrik dari fasilitas pembangkit menggunakan jaringan tegangan tinggi atau ekstra tinggi, biasanya dengan tegangan sebesar 150 kV atau 500 kV. Untuk melaksanakan transfer ini, diperlukan transformator step-up yang meningkatkan tegangan dari level rendah di pembangkit ke tingkat yang sesuai untuk transmisi. Selain itu, transformator step-down digunakan untuk menurunkan tegangan agar sesuai dengan kebutuhan distribusi di pusat-pusat beban.

3. Sistem Distribusi

   Jaringan yang disebut sistem penyaluran listrik mengirimkan daya ke konsumen akhir dari saluran transmisi. Tugas utama sistem penyaluran adalah menurunkan tegangan dari saluran transmisi melalui gardu induk, kemudian menyebarkan daya ke konsumen akhir seperti yang mereka butuhkan. Pada tahap ini, trafo penyaluran digunakan untuk menurunkan tegangan hingga level yang sesuai untuk digunakan oleh rumah tangga atau industri. Penyaluran listrik di area perkotaan sering kali terpasang secara bawah tanah atau di saluran utilitas umum, sementara di pedesaan, jaringan penyaluran lebih sering terpasang di atas tanah menggunakan tiang listrik. Saat mendekati pelanggan, Trafo penyaluran mengarahkan daya ke sirkuit sekunder bertegangan rendah, biasanya sekitar 240 V untuk rumah tangga, dari sirkuit penyaluran primer. Selanjutnya, energi dikirim ke pelanggan melalui saluran penurunan dan meteran listrik. Sirkulasi penyaluran terakhir di daerah perkotaan biasanya kurang dari 50 kaki (sekitar 15 meter), tetapi pelanggan di pinggiran kota dapat memiliki sirkuit yang lebih panjang, bahkan lebih dari 300 kaki (sekitar 91 meter) [5].

4. Beban

   Dalam sistem tenaga listrik, beban biasanya dibagi menjadi tiga kategori utama: industri, komersial, dan rumah tangga. Jaringan transmisi atau sub-transmisi biasanya bertanggung jawab atas beban industri yang besar. Di sisi lain, industri skala kecil atau menengah sering kali dilayani oleh jaringan distribusi primer. Sementara itu, beban rumah tangga akan diberikan

melalui jaringan distribusi sekunder. Karakteristik beban industri biasanya mencakup motor komposit atau motor induksi, sementara beban komersial dan rumah tangga meliputi lampu, pendingin udara, pemanas, dan motor induksi 1-fasa.

Memiliki sedikit daya reaktif karena memiliki frekuensi yang stabil. Tiga model biasanya digunakan dalam pemodelan sistem tenaga listrik untuk menggambarkan beban.

1. Model pertama menunjukkan beban sebagai daya tetap, dengan daya nyata (MW) dan daya reaktif (Mvar) diasumsikan tetap.
2. Model kedua menunjukkan beban sebagai arus I yang dijaga tetapkonstan.
3. Dalam studi stabilitas, impedansi tetap sering digunakan untuk menunjukkan beban. *Rugi-Rugi Sistem Tenaga Listrik*

B. Rugi-rugi sistem tenaga Listrik

Pada tahap pembangkitan, transmisi listrik mengalami kerugian karena berbagai faktor. Ini termasuk, tetapi tidak terbatas pada, jaringan transmisi, jaringan distribusi, pusat pembangkit, dan beban.

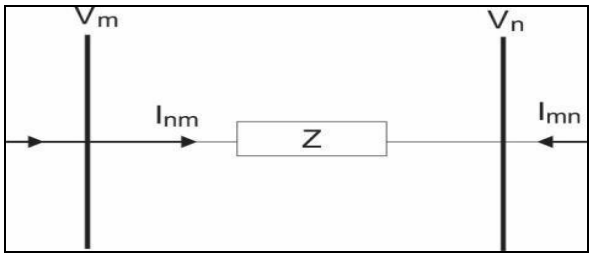
1. Rugi-Rugi Saluran

Saluran distribusi mengandung kapasitansi, induktansi, dan tahanan. Dengan membuat rangkaian ekivalen, saluran distribusi primer atau sekunder yang berjarak pendek dapat dianggap memiliki kapasitansi yang bisa diabaikan, karena daya yang disalurkan dari gardu induk atau trafo distribusi ke pemakai mengalami kerugian tegangan dan daya.

Pelembekan logam mengurangi kerugian tegangan tarik pada semua suhu. Namun, kerugian tegangan tarik tidak berpengaruh jika penghantar berada di batas yang disarankan dalam kondisi tertentu. Namun, dampak harga pengantar pada suhu kerja dan penurunan kekuatan pengantar harus ditaksir pada tingkat usia tertentu.

Kerugian panas terjadi ketika arus listrik terus mengalir melalui penghantar. Semakin lama arus mengalir, penghantar semakin panas, dan semakin banyak energi listrik yang hilang. Akibatnya, tegangan pada ujung penghantar menurun karena energi yang hilang. Karena penghantar listrik lebih jauh atau lebih panjang, semakin banyak tegangan listrik yang hilang akibat hambatan atau tahanan penghantar. Dengan demikian, kerugian akibat jarak berdampak besar pada keandalan jaringan karena jarak dari sumber atau pembangkit mengakibatkan penurunan tegangan pada penghantar karena nilai hambatan penghantar yang tinggi.

Kerugian daya sangat dipengaruhi oleh tegangan dan luas penampang kawat penghantar. Semakin tinggi tegangan dalam suatu saluran, semakin sedikit arus yang mengalir melaluinya. Salah satu faktor yang memengaruhi besarnya kerugian daya pada saluran adalah arus. Kerugian saluran dapat dihitung setelah nilai tegangan dan arus setiap saluran dan bus dihitung dengan perhitungan iterasi. Pada bus m, arus saluran Imn diukur dan digambarkan sebagai positif dalam arah maju. Di sisi lain, arus saluran Inm digambarkan sebagai negatif karena bergerak dari arah yang berlawanan.



Gambar 2. Contoh Saluran Sederhana

$$I_{mn} = I_m = Z_{mm}(V_m - V_n) \quad (1)$$
$$I_{nm} = I_{mn} I_{mn} = I_m = Z_{nm}(V_n - V_m) \quad (2)$$

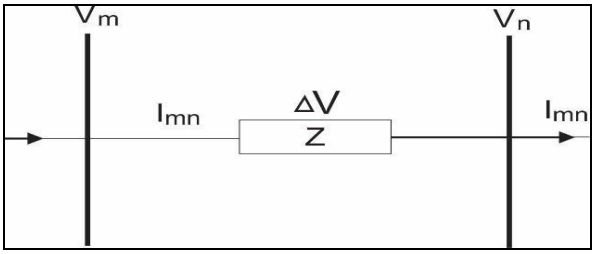
Daya kompleks bus m ke bus n dan bus n ke bus m dapat diperoleh dengan cara berikut:

$$S_{mn} = V_m * I_{mn} \quad (3)$$
$$S_{mn} = V_n * I_{nm} \quad (4)$$

Untuk saluran m–n, rugi saluran dapat diperoleh dengan menjumlahkan persamaan (5) dan (6):

$$S_{l\,mn} = S_n + S_{nm} \quad (5)$$
$$P_{l\,mn} = real\,(S_{l\,mn}) \quad (6)$$

Salah satu jenis kerugian jaringan adalah kerugian tegangan, yang dapat dimodelkan dengan persamaan berikut. Gambar 2.4 menunjukkan rangkaian saluran sederhana.



Gambar 3. Rangkaian saluran sederhana

Persamaan dapat ditulis sesuai dengan Hukum Kirchoff untuk tegangan (7).

$$V_m = V_n + \Delta V = V_n + Z^* I_{nm} \quad (7)$$

2. Voltage Drop

Karena jarak yang sangat jauh antara sumber atau pembangkit listrik, jatuh tegangan dalam jaringan

distribusi tidak dapat dihindari sepenuhnya. Oleh karena itu, dibutuhkan penggunaan konduktor atau penghantar dengan daya hantar dan hambatan yang dipengaruhi oleh banyak faktor internal dan eksternal. Penurunan tegangan terjadi ketika tegangan di terminal pembangkit atau saluran yang jauh dari generator turun ke tegangan di terminal penerima karena hambatan atau arus listrik yang mengalir. Selain impedansi dan koneksi saluran, beban dan faktor daya konduktor menentukan besarannya pada saluran alternatif.

Persamaan berikut dapat digunakan untuk menghitung persentase penurunan tegangan relatif (regulasi tegangan) dalam jaringan distribusi:

$$VR = \frac{Vs - Vr}{Vs} \times 100\% \quad (8)$$

Dimana:

VR: Tegangan relatif (*voltage regulation*)

Vs : Tegangan pada pangkal penerimaan

Vr : Tegangan pada ujung penerimaan

C. Studi Aliran Daya (Load Flow Analysis)

Studi aliran daya, juga disebut sebagai studi aliran daya, adalah studi yang dilakukan untuk mengetahui aliran atau tegangan dalam sistem dalam kondisi Operasi Tunak (Stady State). Studi aliran daya memberikan informasi penting untuk mengevaluasi kinerja sistem tenaga dan menganalisis kondisi pembangkit dan pembebanan. Ini adalah bagian penting dari perencanaan dan desain perluasan sistem tenaga listrik. Ini juga membantu mencapai tujuan meningkatkan beban, pembangkit, dan saluran transmisi karena jumlah konsumen yang meningkat [6]. Bus rendah juga dikenal sebagai bus referensi bus pengontrol voltase bus generator dan bus beban adalah tiga komponen utama studi aliran daya. Ini adalah rinciannya:

1. Slack Bus (Bus Referensi):

   Bus ini memiliki tegangan dan sudut fasa yang ditetapkan, dan daya aktif dan reaktif diperoleh melalui perhitungan. Karena fasor tegangan bus ini digunakan sebagai referensi, nilai tegangan biasanya adalah 1 per unit (pu), dan sudut fasa tegangan diatur menjadi nol.

2. Voltage Controller (Bus Generator):

   Bus ini memiliki pembangkit listrik. Tegangan diatur oleh Regulator Tegangan Otomatis (AVR), dan daya aktif diatur oleh Governor. Daya reaktif dan sudut fasa dapat dihitung, tetapi tegangan dan daya aktif dapat diketahui.x

3. Load Bus (Bus Beban):

   Bus ini hanya menggunakan beban, yang memiliki nilai daya aktif dan reaktif yang jelas. Akibatnya, nilai tegangan dan sudut fasa berubah sesuai dengan beban yang dibutuhkan.Selain itu, daya listrik terdiri dari tiga komponen: daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya total (S) [7]. Masing-masing memiliki peran dan tujuan tertentu:

   - Daya Aktif (P): Daya aktif merupakan energi yang digunakan untuk melakukan pekerjaan yang nyata, seperti menghasilkan energi listrik. Umumnya dihasilkan melalui konversi energi primer, dan disimbolkan dengan P dalam satuan watt.
   - Daya Reaktif (Q): Daya reaktif adalah energi yang diperlukan untuk menghasilkan medan magnet yang mendukung operasi sistem tenaga listrik. Diekspresikan sebagai Q dalam satuan VAR.
   - Daya Total (S): Daya total merupakan total dari daya aktif dan reaktif, diwakili oleh simbol S dan dinyatakan dalam unit VA (Volt-Ampere).

4. Toolbox PSAT

   Terdapat sejumlah program bantu berbasis MATLAB yang dapat digunakan untuk menyelesaikan tugas tersebut, seperti simulasi aliran daya dan aliran daya kontinyu atau CPF. Salah satunya adalah PSAT, PSAT adalah perangkat lunak yang dikembangkan menggunakan platform MATLAB dan dijalankan dalam lingkungan MATLAB. Federico Milano mengembangkan PSAT sejak tahun 2001, dan diterbitkan pada tahun 2002. Perangkat lunak ini dapat diunduh dan dikembangkan secara bebas oleh pengguna karena gratis dan bersifat open source. Menurut Milano pada tahun 2007, berikut adalah perbandingan fitur kotak alat PSAT dan kotak alat lainnya.

Tabel 1. Perbandingan PSAT dengan kotak alat berbasis MATLAB lainnya

Toolbox	PF	CPF	OPF	SSSA	TDS	EMT	GUI	CAD
EST	X			X	X			X
MatEMTP					X	X	X	X
MatPower	X		X					
PAT	X			X	X			X
PSAT	X	X	X	X	X		X	X
PST	X	X		X	X			
SPS	X			X	X	X	X	X
VST	X	X		X	X		X	

Dibandingkan dengan toolbox lain yang berbasis MATLAB, PSAT memiliki fitur yang lebih komprehensif sebagai program pendukung untuk menganalisis sistem tenaga listrik. PSAT dapat digunakan untuk berbagai jenis studi, seperti aliran daya (aliran daya), aliran daya kontinyu (aliran daya kontinyu), yang memberikan kurva P-V untuk analisis stabilitas terganggu, aliran daya optimal (aliran daya optimal), dan analisis stabilitas sinyal kecil (sinusoidal stability analysis). PSAT juga menawarkan antarmuka pengguna grafis dan konstruksi jaringan grafis.

D. Stabilitas Tegangan Sistem Tenaga Listrik

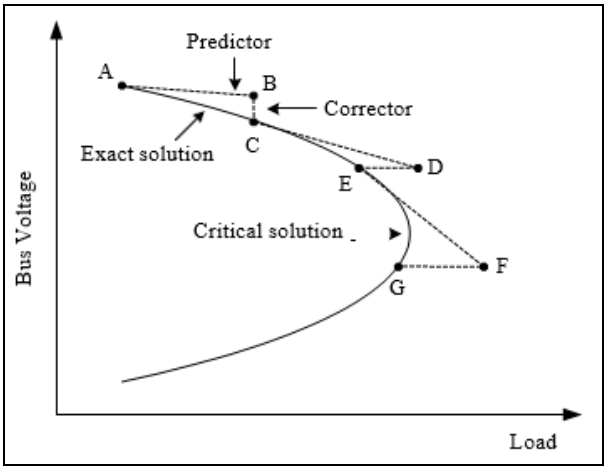
Kehilangan stabilitas tegangan dapat menyebabkan sistem tidak dapat mempertahankan tegangan yang diterima. Akibatnya, Daya Aktif (MW) dan Daya Reaktif

(MVar) yang diberikan ke sistem akan menurun. Akibatnya, untuk memaksimalkan kinerja sistem dan mengatasi masalah seperti rugi daya dan penurunan tegangan, yang dapat mengurangi stabilitas sistem, diperlukan alternatif peralatan yang berkualitas, efektif, dan efisien [8]. Untuk menjaga stabilitas sistem jaringan transmisi, diperlukan sistem kontrol yang handal dan efisien untuk mengatur aliran daya listrik dan menjaga stabilitas tegangan sistemStabilitas tegangan adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menjaga tegangan di setiap bus tetap konstan selama dan setelah gangguan. Gangguan, peningkatan permintaan beban, atau perubahan sistem lainnya dapat menyebabkan penurunan tegangan yang tidak dapat dikendalikan, yang dapat menyebabkan ketidakstabilan tegangan [9].

1. *Continuation Power Flow (CPF)*

   Continuation Power Flow (CPF), yang dihitung dengan menambahkan beban, mengukur sifat sistem tenaga dari titik keseimbangan stabil hingga titik kritis atau batas stabilitas tegangan. Tahap prediksi dan tahap koreksi adalah dua tahap yang terdiri dari metode CPF. Untuk menghindari singularitas matriks Jacobian, teknik ini mengubah persamaan aliran daya, yang dapat menyebabkan masalah numerik yang rumit.CPF menghasilkan kurva daya-terhadap-tegangan (PV) untuk sistem listrik dan memungkinkan Parameter Beban Maksimum untuk sistem transmisi dan distribusi. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5, analisis CPF melibatkan iterasi yang terdiri dari langkah-langkah korektor dan prediktor.

   Metode CPF memulai penyelesaian dengan solusi aliran daya awal (A). Kemudian, prediktor tangen memperkirakan solusi berikutnya (B) dengan menambah beban. Langkah korektor kemudian menemukan solusi yang tepat (C) dengan menggunakan analisis aliran daya dengan beban tetap. Prediktor tangen baru digunakan untuk memprediksi nilai tegangan untuk peningkatan beban berikutnya. Langkah korektor dengan beban tetap di bus digunakan untuk menentukan solusi yang tepat (E). Ini karena langkah korektor dengan beban tetap tidak akan konvergen jika peningkatan beban berikutnya (D) pada solusi yang tepat mendekati batas pembebanan maksimum. Selama langkah prediktor berikutnya, pembebanan maksimum secara bertahap turun setelah mencapai batas stabilitas tegangan.



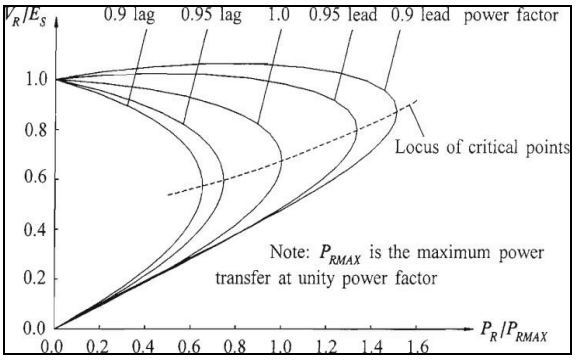
Gambar 4. Urutan perhitungan analisa continuation power flow

2. *Kurva PV*

   Metode yang umum digunakan untuk meramalkan stabilitas tegangan sistem tenaga listrik adalah grafik P-V. Metode ini sangat membantu dalam menemukan batas beban maksimum sistem. Tegangan cenderung menurun seiring dengan peningkatan beban sistem. Untuk menunjukkan stabilitas tegangan, jarak antara titik operasi saat ini dan titik kollaps tegangan digunakan. Persamaan (1) dapat digunakan untuk menghasilkan kurva P-V, yang menghasilkan bentuk kurva seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4 [10].

$$V = \left(\left(\frac{E^2}{2} \right) - QX \pm \sqrt{\left(\left(\frac{E^4}{4} - p^2X - E^2QX \right) \right)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Dimana:
E^2 = tegangan terminal
P = daya aktif
Q = daya reaktif
X = reaktansi saluran



Gambar 5. Karakteristik Kurva PV

Dimana:
V_R : Tegangan pada bus penerima
E_S : Tegangan pada bus generator
P_R : Daya yang di transfer
P_{RMAX} : Daya yang di transfer saat pf = 1

Dalam bentuk kurva ini, bus beban memiliki karakteristik beban; namun, bus slack dan generator tidak memilikinya karena mereka memiliki nilai tegangan yang tetap terhadap perubahan beban. Garis putus-putus pada Gambar 2.6 menunjukkan titik lokasi yang menunjukkan batas titik kritis. Bagian atas titik kritis menunjukkan kondisi operasi yang stabil, sedangkan bagian bawah menunjukkan kondisi yang tidak stabil.

3. Voltage Collapse

Ketika sistem tenaga listrik mengalami peningkatan beban yang signifikan, terjadi penurunan tajam tegangan yang ditunjukkan dengan profil tegangan yang lebih rendah daripada normal untuk sebagian besar sistem. Situasi ini disebut sebagai "collapse voltage". Salah satu akibat yang sangat berbahaya yang dapat terjadi adalah pemadaman total, atau blackout, yang termasuk beberapa gangguan yang dapat menyebabkan penurunan tegangan atau pecahnya tegangan, seperti peningkatan beban bertahap.

E. Flaxible Alternating Current Transmission System (FACTS)

Perangkat FACTS (Flexible AC Transmission System) adalah solusi kontrol elektronik terintegrasi yang dapat dengan cepat dan efektif menangani variabel-variabel pada saluran transmisi seperti impedansi saluran, tegangan sistem, dan sudut tegangan. Oleh karena itu, perangkat FACTS sangat penting untuk memastikan bahwa sistem tenaga listrik berjalan dengan benar [11]. Seperti yang ditunjukkan pada gambar di atas, solusi elektronik daya terpadu FACTS dapat diterapkan langsung pada saluran transmisi untuk meningkatkan kapabilitas penyaluran daya. Banyak peralatan FACTS juga digunakan dalam sistem tenaga modern untuk menangani masalah penyaluran daya. Karena lebih murah dan lebih cepat daripada membangun saluran transmisi baru, aplikasi peralatan FACTS sering menjadi pilihan utama bagi perusahaan penyedia listrik[12].

Karena pola pembangkitan tenaga listrik menyebabkan pembebanan saluran yang signifikan, FACTS dapat meningkatkan stabilitas transmisi tenaga listrik, memperbaiki profil tegangan, menyeimbangkan daya reaktif, dan meningkatkan pembagian beban pada saluran. Akibatnya, rugi-rugi daya dapat meningkat, yang mengancam stabilitas dan keamanan sistem.

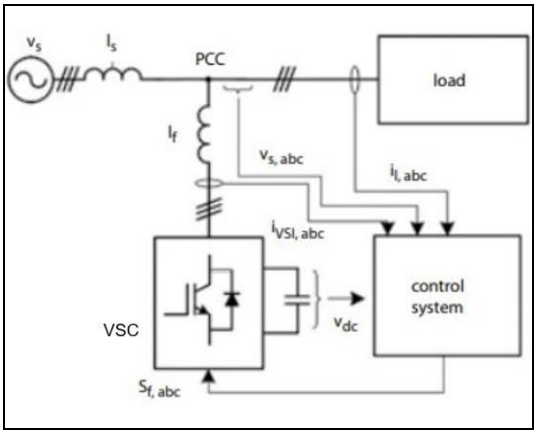
1. *Static Synchronous Compensator* (STATCOM)

Static Synchronous Compensator (STATCOM) adalah salah satu perangkat dalam kategori Flexible AC Transmission System (FACTS) Devices yang terhubung secara shunt, memiliki peran penting dalam mengendalikan aliran daya dan meningkatkan stabilitas transien pada sistem [14].

STATCOM sering dianggap sebagai evolusi dari peralatan Static Var Compensator (SVC), salah satu contoh FACTS tambahan. Ini disebabkan oleh fakta bahwa STATCOM dan SVC memiliki prinsip kerja dan sistem pemasangan yang sama. STATCOM menggunakan prinsip dasar pengubah voltase yang berasal dari tegangan (VSC), di mana tegangan DC diubah menjadi tegangan tiga fasa dengan nilai, frekuensi, dan sudut fasa yang ditentukan. Perangkat STATCOM terdiri dari kapasitor DC yang berfungsi sebagai saklar dengan kecepatan tinggi dan terhubung secara shunt ke saluran AC. STATCOM adalah divais FACTS yang memiliki kemampuan untuk mengatur aliran daya reaktif secara independen dari parameter sistem lainnya. Namun, dalam sistem transmisi, STATCOM berkonsentrasi pada pertukaran daya reaktif dasar dan memberikan daya aktif ke sistem AC. Selain itu, dia tidak memberikan dukungan energi jangka panjang pada sisi DC dan tidak memberikan daya aktif ke sistem AC. Untuk melakukan ini, STATCOM menggunakan modulasi voltase bus untuk memberikan dukungan tegangan ke bus [15].

2. *Kontruksi STATCOM*

STATCOM adalah komponen shunt dari sistem transmisi AC fleksibel (FACTS), yang terdiri dari perangkat elektronik daya. Tugasnya adalah mengatur aliran daya dan pada saat yang sama meningkatkan stabilitas sistem tenaga.



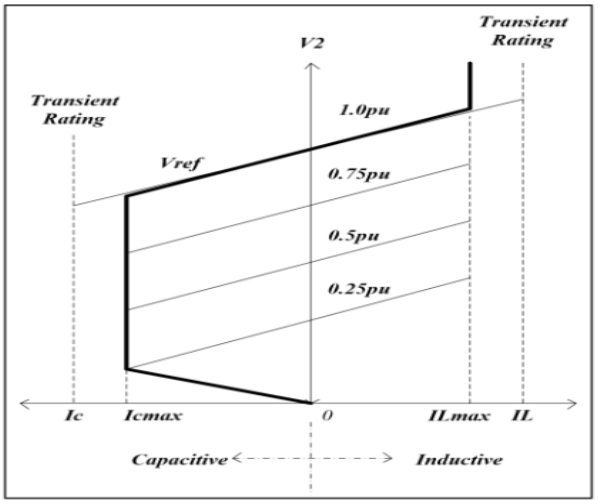
Gambar 6. Struktur dasar STATCOM

Setiap elemen STATCOM terdiri dari Voltage Source Converter (VSC), kapasitor DC, dan sistem kontrol. VSC adalah perangkat konverter daya elektronik yang bertugas mengubah tegangan DC input menjadi tegangan AC output. Saat menyerap daya reaktif, kapasitor DC juga berfungsi sebagai sumber daya dan penyimpan energi.

3. *Prinsip Kerja STATCOM*

Tiga kondisi mode operasi STATCOM terdiri dari mode kapasitif, induktif, dan tanpa beban. Gambar 2.9 menunjukkan grafik karakteristik tegangan-arus untuk berbagai pengaturan tegangan dengan gradien yang tetap. Saat terjadi penurunan tegangan, STATCOM dapat berfungsi dengan tetap menjaga arus leading atau lagging, dengan margin transien kelebihan arus yang

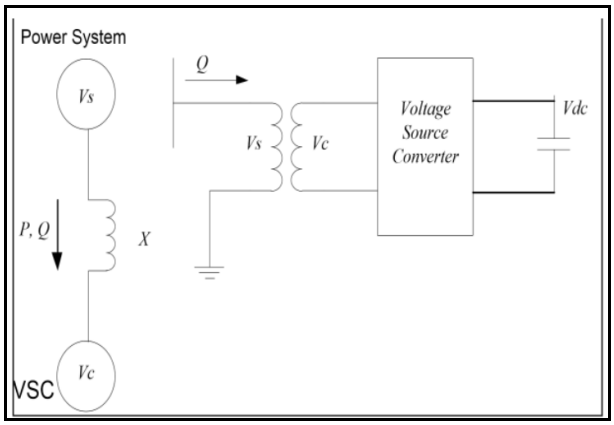
konstan.



Gambar 7. Karakteristik arus/tegangan pada STATCOM

STATCOM mengontrol daya reaktif dengan membandingkan tegangan terminal sistem dan STATCOM. Jika tegangan STATCOM lebih rendah dari tegangan sistem, STATCOM akan menyerap daya reaktif dari sistem, dan sebaliknya, STATCOM akan menghasilkan daya reaktif ke sistem.

Gambar 2.10 menunjukkan prinsip kerja STATCOM, yang dijelaskan oleh persamaan (1), (2), dan (3). Persamaan ini menunjukkan transfer daya aktif dan reaktif antara Vs Grid dan Vc STATCOM.



Gambar 8. Prinsip kerja pada sistem STATCOM

$$p = \frac{V_s V_c \sin\delta}{X_L} \quad (10)$$

$$Q\frac{V_s(V_s - V_c \sin\delta}{X_L} \quad (11)$$

$$S = 3\frac{VsVc}{X_L}\sin\delta - j3\left(\frac{VsVc}{X_L}\cos\delta - \frac{Vs^2}{X_L}\right) = P - j \quad (12)$$

Dimana:
S = Daya Kompleks (VA),
Vc = Tegangan terminal statcom,
Vs = Tegangan dari Grid/Sistem,
P = Daya aktif (W),
X_L = Reaktansi (kabel) = ωL,
Q = Daya reaktif (Var),
α = Beda fasa antara Vs dan Vc

Persamaan di atas menunjukkan bahwa aliran daya aktif antara sistem dan STATCOM dipengaruhi oleh perubahan nilai. Jika nilai adalah lagging, daya aktif mengalir ke grid dan diserap oleh STATCOM; jika grid dan STATCOM memiliki fasa yang sama, aliran daya aktif akan menjadi nol. Nilai ini muncul saat sistem berada dalam kondisi tunak (steady state).

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. *Alur Penelitian*

Proses penentuan masalah dimulai dengan mengidentifikasi aliran daya dalam sistem transmisi 150 KV di Bali sebagai langkah awal penelitian. Pada tahap ini, parameter awal yang disediakan oleh PT. PLN (Persero) UP2B Bali akan diolah untuk melakukan simulasi aliran daya. Data yang dihasilkan dari simulasi ini akan dianalisis untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang aliran daya dalam sistem tersebut. Hal ini bertujuan untuk mengumpulkan data awal yang diperlukan untuk menentukan lokasi pemasangan UPFC. Selama tahap ini, akan diperoleh informasi mengenai pembangkitan energi, beban, dan kerugian energi dalam sistem transmisi 150 kV di Bali [16].

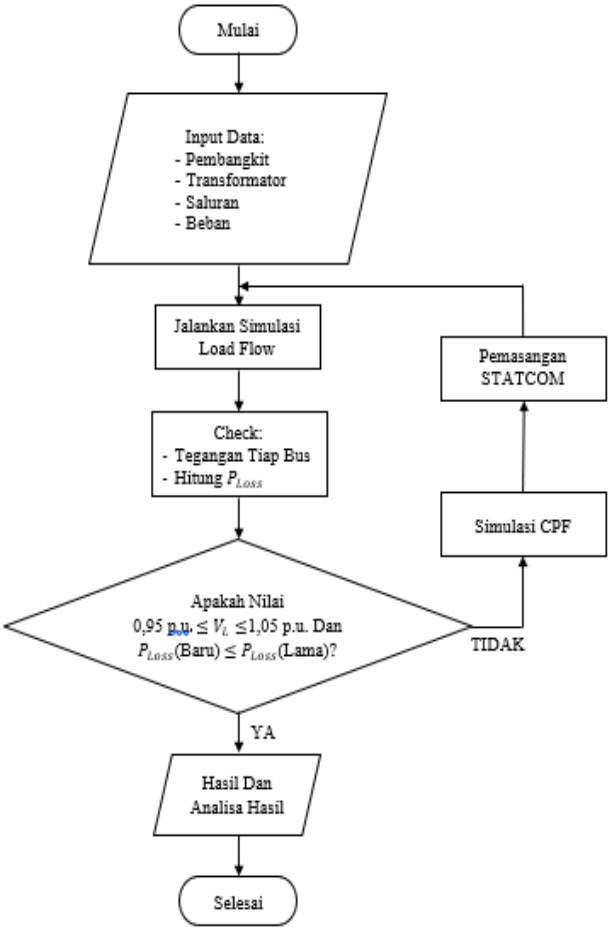
1. Pengambilan informasi dilakukan di PT PLN (Persero) UP2B Bali Transmisi 150 kV, di mana data yang terkumpul mencakup:
   - Gambar Rangkaian Tunggal (Single Line Diagram)
   - Data Beban
   - Data Pembangkit
   - Data Saluran
   - Data Transformator
2. Pembuatan model dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Power System Analysis Toolbox* (PSAT) untuk membuat diagram satu garis yang mencakup subsistem 150 kV Bali.
3. Data beban, pembangkit, saluran, dan transformator dimasukkan berdasarkan data perusahaan.
4. Simulasi aliran daya atau Load Flow dijalankan untuk menentukan profil tegangan, daya aktif, daya reaktif, dan rugi-rugi pada sistem transmisi sebelum pemasangan STATCOM.
5. Dalam kasus base, terdapat empat bus yang mengalami penurunan tegangan.
6. Kasus 1 melakukan percobaan pemasangan STATCOM pada bus 02 dengan profil tegangan 0,9099 p.u.
7. Kasus 2 melakukan percobaan pemasangan STATCOM pada bus 07 dengan profil tegangan 0,9457 p.u.
8. Kasus 3 melakukan percobaan pemasangan STATCOM pada bus 12 dengan profil tegangan 0,9422 p.u.
9. Menilai kondisi sistem untuk memastikan apakah sesuai dengan batasan yang diizinkan, yaitu nilai profil

tegangan antara 0,95 p.u dan 1,05 pu. Jika ya, maka dilakukan pemasangan STATCOM. Jika tidak, maka hasil akan dianalisis lebih lanjut.

10. Setelah simulasi Load Flow selesai dan batasan profil tegangan terpenuhi, dilakukan analisis hasil untuk mengevaluasi kondisi sistem sebelum dan sesudah pemasangan STATCOM serta dampaknya terhadap pengurangan rugi-rugi sistem dan peningkatan stabilitas tegangan.

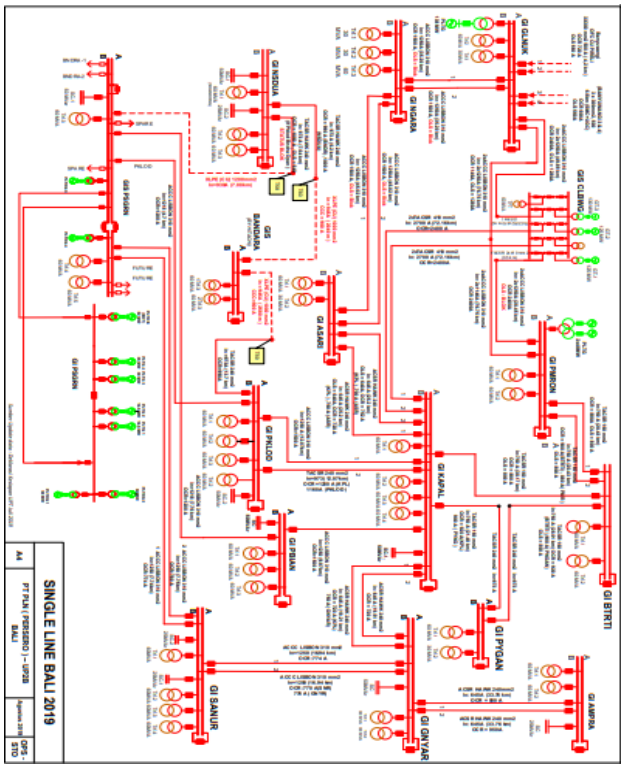
Melakukan simulasi sistem dengan menggunakan data langsung dari PT PLN (Persero) UP2B Bali 150 kV, yang mencakup informasi tentang beban, pembangkit, saluran, dan transformator. Data ini berasal dari perusahaan itu sendiri.

B. Flowchart Keseluruhan sistem

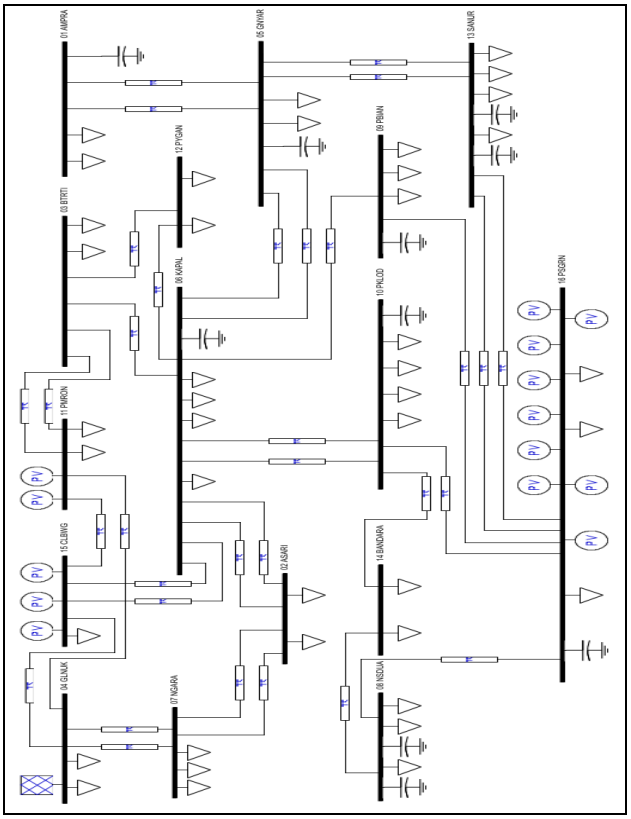


Gambar 9. Flowchart Keseluruhan Sistem

C. Single Line Diagram PT PLN (Persero) UP2B Bali 150 kV



Gambar 10. *Single Line Diagram* PT PLN (Persero) UP2B Bali



Gambar 11. *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan Bali 16-Bus Pada PSAT 2.1.11

Pada gambar 10 merupakan Single Line Diagram PT PLN (Persero) UP2B Bali dan dilanjut dengan gambar 11 dengan modifikasi sistem transmisi 150 kV menggunakan software PSAT 2.1.11. dilakukan untuk mengetahui karakteristik sistem transmisi kondisi sebelum dan sesudah mengimplementasikan STATCOM permodelan juga dilakukan untuk mendapatkan data yang akan digunakan untuk mendesain STATCOM.

D. Data Penelitian

Data yang akan digunakan dalam simulasi adalah data aktual dan terkini yang diperoleh langsung dari PT PLN (Persero) UP2B Bali pada bulan September 2023. Data tersebut meliputi informasi tentang beban, pembangkit, dan saluran yang merupakan data asli dan terkini yang disediakan oleh perusahaan itu sendiri.

a) Data Beban

Tabel 2. Data Beban Subsistem Bali 150 kV

GARDU INDUK	DAYA	P	Q
	(MVA)	(MW)	(Mvar)
GLNUK	90	20,6	6,82
KAPAL	240	116,1	37,28
PMRON	120	45,1	6,9
GNYAR	120	78	10,2
NSDUA	180	106,1	22,7
NGARA	120	27,6	5,3
SANUR	240	114,5	25,9
AMPRA	120	36,4	10,1
PSGRN	180	64,3	21,3
BTRTI	120	38,2	8,9
ASARI	90	17,8	5,9
PBIAN	180	62,8	18,1
PYNGN	90	52,4	1,8
PKLOD	240	147,5	46,2
BNDRA	120	61,1	20,1

Sumber : Data di PT PLN (Persero) UP2B Bali, 09 September 2023

b) Data Pembangkit

Tabel 3. Data Saluran Bali 150 kV

NO	PASOKAN DAYA	UNIT	KAPASITAS
			(MW)
1	PLTDG Gilimanuk	1	130,4
2	PLTDG Pesanggaran	1	17,7
3	PLTDG Pesanggaran	2	18,4
4	PLTDG Pesanggaran	3	39,6
5	PLTDG Pesanggaran	4	36,2
6	PLTDG Pemaron	1	45,0
7	PLTDG Pemaron	2	43,0
8	PLTD B Pesanggaran	1	16,7
9	PLTD B Pesanggaran	2	16,7
10	PLTD B Pesanggaran	3	16,7
11	PLTDG Pesangaran Blok	1	45,6
12	PLTDG Pesangaran Blok	2	45,6
13	PLTDG Pesangaran Blok	3	45,6
14	PLTDG Pesangaran Blok	4	45,6
15	PLTU Celukan bawang	1	126,6

16	PLTU Celukan bawang	2	125,8
17	PLTU Celukan bawang	3	128,5

Sumber : Data di PT PLN (Persero) UP2B Bali, 09 September 2023

c) Data Saluran

Tabel 4. Data Saluran Subsistem Bali 150kV

No	TRANSMISI		TEG (KV)	KMS	JENIS PENGHANTAR
1	GILIMANUK	NGARA-1	150	43.69	ACCC LISBON
2	GILIMANUK	NGARA-2	150	43.69	ACCC LISBON
3	GILIMANUK	CLBWG	150	49.89	ACCC LISBON
4	GILIMANUK	PMRON-2	150	75.9	2xaccc LISBON
5	CLBWG	PMRON	150	28.45	2xaccc LISBON
6	CLBWG	KAPAL-1	150	70.18	2xtacsr
7	CLBWG	KAPAL-2	150	70.18	2xtacsr
8	NEGARA	ASARI-1	150	44.23	ACCC LISBON
9	NEGARA	ASARI-2	150	44.23	ACCC LISBON
10	KAPAL	ASARI-1	150	23.31	ACSR.HAWK
11	KAPAL	ASARI-2	150	23.31	ACSR.HAWK
12	KAPAL	BTRTI	150	38.17	TACSR
13	KAPAL	PYNGAN	150	21.48	TACSR
14	KAPAL	GNYAR-1	150	19.21	ACSR.HAWK
15	KAPAL	GNYAR-2	150	19.21	ACCC LISBON
16	KAPAL	PKLOD-1	150	12.7	ACCC LISBON
17	KAPAL	PBIAN-1	150	9.97	ACCC LISBON
18	KAPAL	PBIAN-2	150	9.97	ACCC LISBON
19	PBIAN	PKLOD	150	2.9	ACCC LISBON
20	GIANYAR	SANUR-1	150	16.5	ACCC LISBON
21	GIANYAR	SANUR-2	150	16.38	ACCC LISBON
22	GIANYAR	AMPRA-1	150	33.76	ACSR.HAWK
23	GIANYAR	AMPRA-2	150	33.76	ACSR.HAWK
24	SANUR	PSGRN-1	150	7.74	ACCC LISBON
25	SANUR	PSGRN-2	150	7.75	ACCC LISBON

Sumber : Data di PT PLN (Persero) UP2B Bali, 09 September 2023

d) Data Kapasitor

Tabel 5. Data Kapasitor Subsistem Bali 150kV

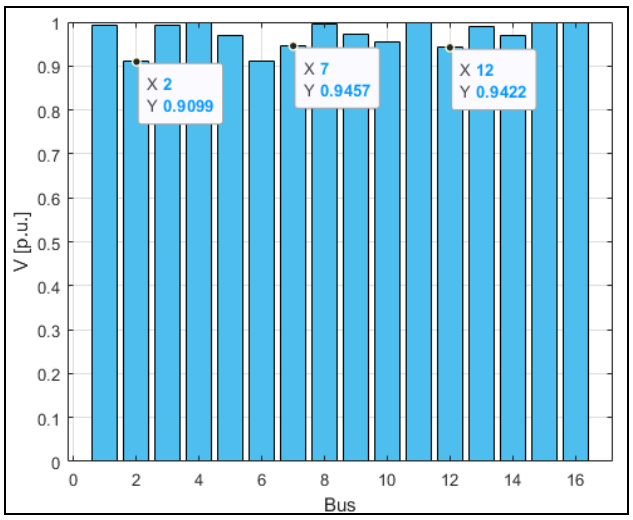
NO	GI	KAPASITOR 150 KV	TEG (KV)	KEMAMPUAN (MVAR)
1	KAPAL	KAPASITOR 1	150	50
2	GNYAR	KAPASITOR 1	150	50
3	AMPRA	KAPASITOR 1	150	25
4	SANUR	KAPASITOR 1	150	25
5	SANUR	KAPASITOR 2	150	25
6	PSGRN	KAPASITOR 1	150	50
7	NSDUA	KAPASITOR 1	150	50
8	NSDUA	KAPASITOR 2	150	25
9	PKLOD	KAPASITOR 1	150	50
10	PBIAN	KAPASITOR 1	150	50

Sumber : Data di PT PLN (Persero) UP2B Bali, 09 September 2023

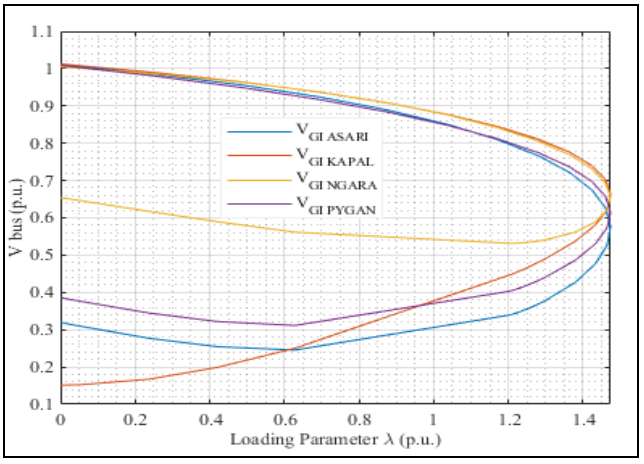
IV. SIMULASI DAN ANALISIS

1. Hasil Simulasi Profil Tegangan dan CPF Pada Kondisi Base Case

Pada gambar 12 menunjukkan hasil aliran daya profil tegangan pada kondisi base case, dapat dilihat bahwa terdapat empat bus kritis yang nilai tegangannya kurang dari 0.95 p.u. yaitu bus 02, 06, 07 dan 12. Di antara bus-bus ini, bus 02 Asari memiliki profil tegangan terlemah/kritis yaitu 0,90987 p.u. Gambar 13 menunjukkan hasil CPF dengan empat garis kurva PV tegangan bus terendah untuk sistem uji Bali 16 bus tanpa STATCOM yaitu bus 02 Asari, bus 06 Kapal, bus 07 Negara dan bus 12 Pyngan. Sistem menyajikan kondisi kritis, di mana sistem terbaca pada λ_{maks} = 1.4741 p.u.



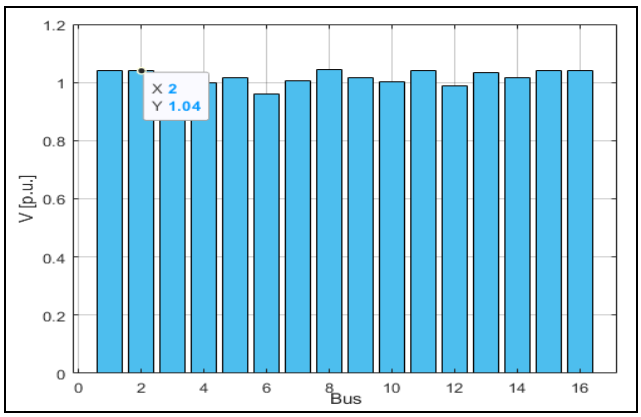
Gambar 12. Profile tegangan untuk sistem uji Kelistrikan Bali 16-bus Kondisi Base Case



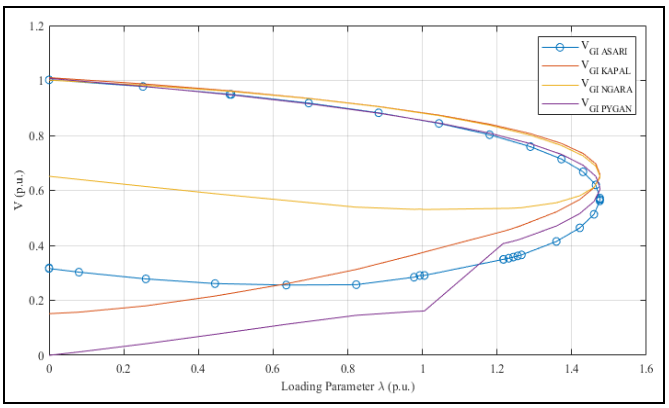
Gambar 13. Kurva PV Untuk Sistem Uji Kelistrikan Bali 16-Bus Kondisi Base Case

2. Hasil Simulasi Profil Tegangan dan CPF Setelah Pemasangan STATCOM Case 1

Percobaan pertama dilakukan penempatan STATCOM pada bus 02 Asari, pada gambar 14 saat dilakukan load flow menghasilkan profil tegangan 1,04 p.u. dan pada gambar 15 dalam pemasangan STATCOM saat dilakukan CPF untuk kurva PV menghasilkan nilai λ_{max} = 1.4747 p.u. yang berarti terjadi kenaikan sebesar 0,0006 p.u. atau 0,04 % dibandingkan pada sebelum pemasangan STATCOM. Hal ini menunjukkan bahwa penempatan STATCOM pada bus tegangan terlemah, pada sistem grid dapat meningkatkan daya reaktif yang di butuhkan sistem.



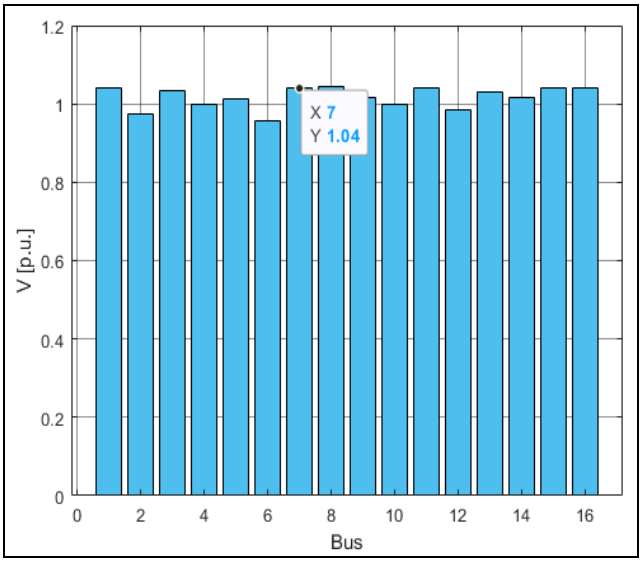
Gambar 14. Profile tegangan untuk sistem uji Kelistrikan Bali 16-bus dengan Dengan STATCOM Pada Bus 02



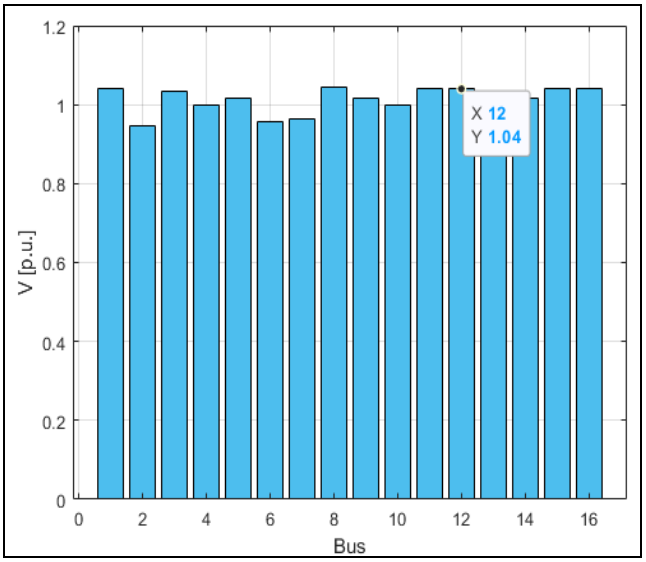
Gambar 15. Kurva PV Untuk Sistem Uji Kelistrikan Bali 16-Bus Dengan STATCOM Pada Bus 02

3. Hasil Simulasi Profil Tegangan dan CPF Setelah Pemasangan STATCOM Case 2

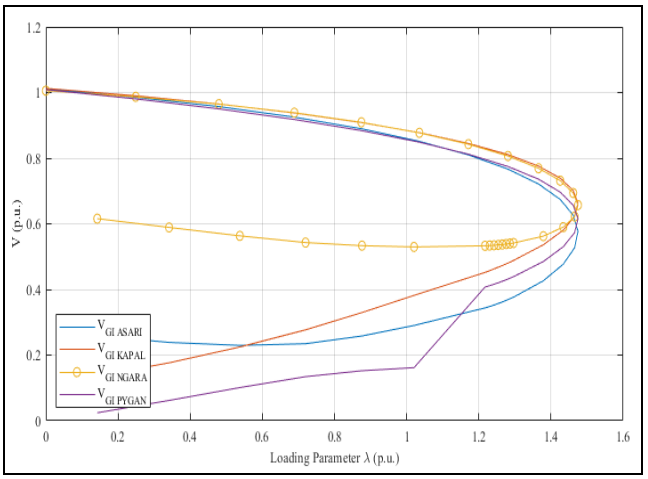
Percobaan kedua dilakukan penempatan STATCOM pada bus 07 Negara, pada gambar 16 saat dilakukan load flow menghasilkan profil tegangan 1,04 p.u. dan pada gambar 17 dalam pemasangan STATCOM saat dilakukan CPF untuk kurva PV menghasilkan nilai λ_{max} = 1.4756 p.u. yang berarti terjadi kenaikan sebesar 0,0009 p.u. atau 0,1 % dibandingkan pada sebelum pemasangan STATCOM. Hal ini menunjukkan bahwa penempatan STATCOM pada bus tegangan terlemah kedua, pada sistem grid dapat meningkatkan daya reaktif yang di butuhkan sistem.



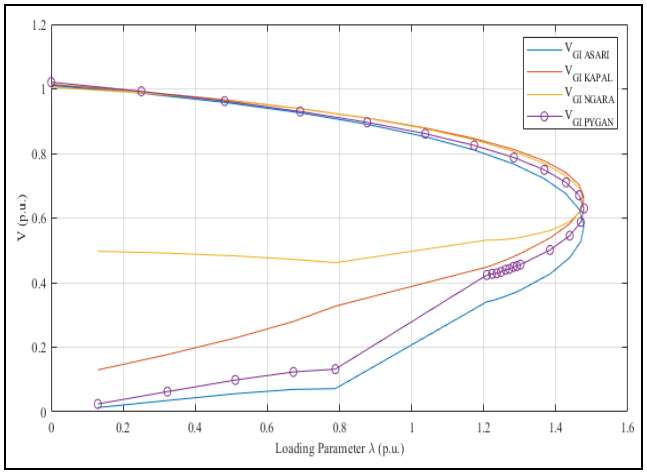
Gambar 16. Profile tegangan untuk sistem uji Kelistrikan Bali 16-bus dengan Dengan STATCOM Pada Bus 07



Gambar 18. Profile tegangan untuk sistem uji Kelistrikan Bali 16-bus dengan Dengan STATCOM Pada Bus 12



Gambar 17. Kurva PV Untuk Sistem Uji Kelistrikan Bali 16-Bus Dengan STATCOM Pada Bus 07



Gambar 19. Kurva PV Untuk Sistem Uji Kelistrikan Bali 16-Bus Dengan STATCOM Pada Bus 12

4. Hasil Simulasi Profil Tegangan dan CPF Setelah Pemasangan STATCOM Case 3

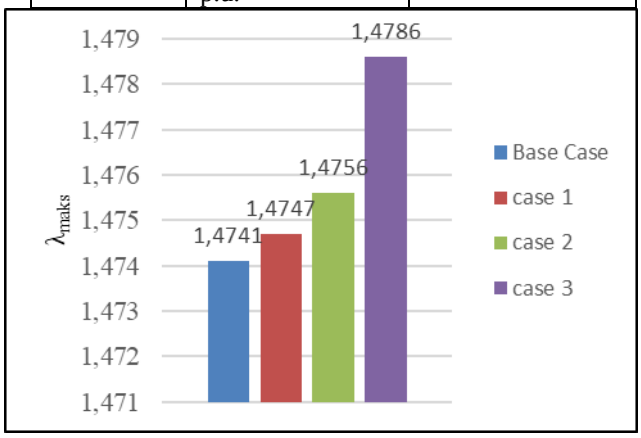
Percobaan ketiga dilakukan penempatan STATCOM pada bus 12 Pyngan, pada gambar 4.19 saat dilakukan load flow menghasilkan profil tegangan 1,04 p.u. dan pada gambar 4.20 dalam pemasangan STATCOM saat dilakukan CPF untuk kurva PV menghasilkan nilai λ_{max} = 1.4786 p.u. yang berarti terjadi kenaikan sebesar 0,0039 p.u. atau 0,26 % dibandingkan pada sebelum pemasangan STATCOM. Hal ini menunjukkan bahwa penempatan STATCOM pada bus tegangan terlemah kedua, pada sistem grid dapat meningkatkan daya reaktif yang di butuhkan sistem.

5. λ_{max} Kondisi Base Case Dan Setelah Pemasangan STATCOM

Berdasarkan tabel 6 hasil CPF pada sistem menghasilkan kurva PV dengan nilai base case λmaks = 1.471 p.u., Case 1 dengan λmaks = 1.4747 p.u., case 2 dengan λmaks = 1.4756 p.u. dan case 3 dengan λmaks = 1.4786 p.u., pada gambar 20 grafik dibawah menunjukkan bahwa terjadi perubahan dalam kondisi sesudah mengimplementasikan STATCOM saat sistem beroperasi, dan mengalami peningkatan nilai λmaks pada setiap penempatan STATCOM.

Tabel 6. λmax Kondisi Base Case Dan Setelah Pemasangan STATCOM

Bus	Kondisi *base case*	Pemasangan STATCOM
02 Asari	λ_{maks} = 2.8185 p.u.	λ_{maks} = 3.0564 p.u.
07 Negara	λ_{maks} = 2.8185 p.u.	λ_{maks} = 3.0555 p.u.
12 Pygan	λ_{maks} = 2.8185 p.u.	λ_{maks} = 3.0562 p.u.

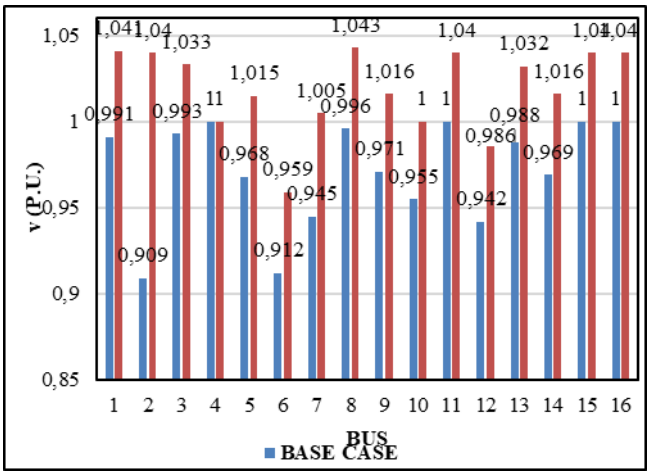


Gambar 20. Perbandingan λmaks Sebelum dan Seseudah Pemasangan STATCOM

6. Peerbandingan sebelum dan sesuddah pemasangan STATCOM

Tabel 7. Peerbandingan Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Pemasangan STATCOM Pada Bus 02 ASARI

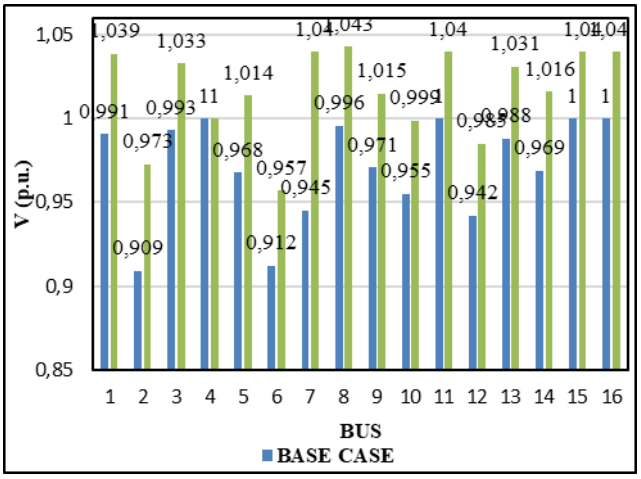
N0	BUS	V p.u. (Base Case)	V p.u. (Statcom)
1	AMPRA	0,991	1,041
2	ASARI	0,909	1,04
3	BTRTI	0,993	1,033
4	GLNUK	1	1
5	GNYAR	0,968	1,015
6	KAPAL	0,912	0,959
7	NGARA	0,945	1,005
8	NSDUA	0,996	1,043
9	PBIAN	0,971	1,016
10	PKLOD	0,955	1
11	PMRON	1	1,04
12	PYNGAN	0,942	0,986
13	SANUR	0,988	1,032
14	BANDARA	0,969	1,016
15	CLBWB	1	1,04
16	PSGRN	1	1,04



Gambar 21. Grafik Peerbandingan Profil Tegangan Sebelum Dan Sesudah Pemasangan STATCOM Pada Bus 02

Tabel 8. Peerbandingan Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Pemasangan STATCOM Pada Bus 07 NEGARA

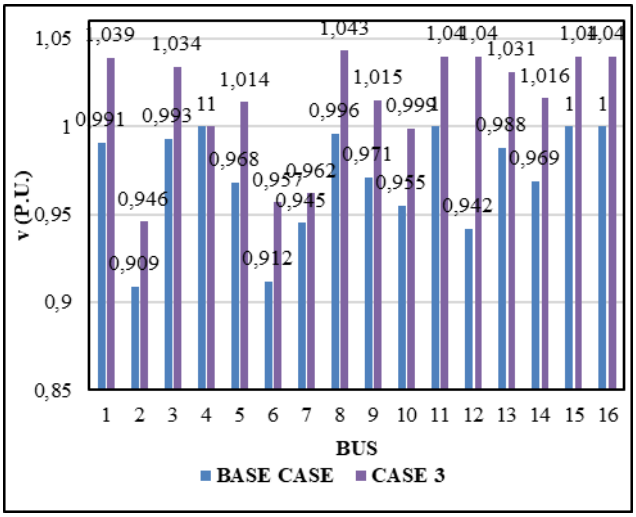
N0	BUS	V p.u. (Base Case)	V p.u. (Statcom)
1	AMPRA	0,991	1,039
2	ASARI	0,909	0,973
3	BTRTI	0,993	1,033
4	GLNUK	1	1
5	GNYAR	0,968	1,014
6	KAPAL	0,912	0,957
7	NGARA	0,945	1,04
8	NSDUA	0,996	1,043
9	PBIAN	0,971	1,015
10	PKLOD	0,955	0,999
11	PMRON	1	1,04
12	PYNGAN	0,942	0,985
13	SANUR	0,988	1,031
14	BANDARA	0,969	1,016
15	CLBWB	1	1,04
16	PSGRN	1	1,04



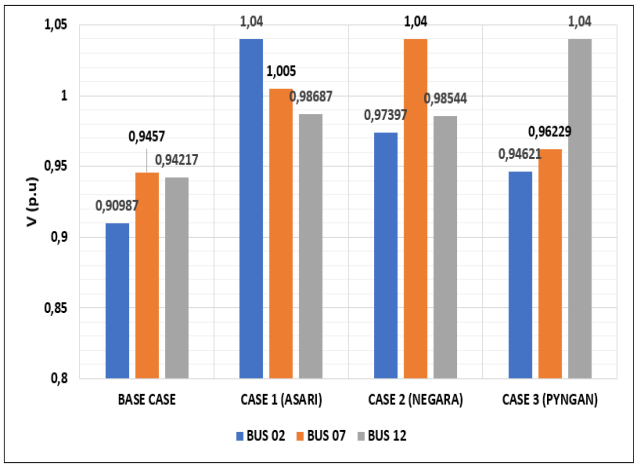
Gambar 22. Grafik Peerbandingan Profil Daya Sesudah dan Sebelum Pasang STATCOM pada Bus 07

Tabel 9. Peerbandingan Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Pemasangan STATCOM Pada Bus 12 PYNGN

N0	BUS	V p.u. (Base Case)	V p.u. (Statcom)
1	AMPRA	0,991	1,039
2	ASARI	0,909	0,946
3	BTRTI	0,993	1,034
4	GLNUK	1	1
5	GNYAR	0,968	1,014
6	KAPAL	0,912	0,957
7	NGARA	0,945	0,962
8	NSDUA	0,996	1,043
9	PBIAN	0,971	1,015
10	PKLOD	0,955	0,999
11	PMRON	1	1,04
12	PYNGAN	0,942	1,04
13	SANUR	0,988	1,031
14	BANDARA	0,969	1,016
15	CLBWB	1	1,04
16	PSGRN	1	1,04



Gambar 23. Grafik Peerbandingan Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Pemasangan STATCOM Pada Bus 12



Gambar 24. Grafik Perbandingan Case 1-3

Grafik profil tegangan di atas menunjukkan bahwa bus yang digunakan sebagai lokasi pemasangan STATCOM mengalami perubahan kondisi saat sistem beroperasi.

V. KESIMPULAN

Setelah melakukan pengujian pada kondisi base case dan memasang STATCOM pada sistem grid, beberapa kesimpulan dapat dibuat:

- Penelitian ini berhasil menentukan lokasi terbaik pemasangan STATCOM dengan kapasitas 45 Mvar pada bus yang mempunyai tegangan paling kritis yaitu bus 02 ASARI untuk mendapatkan tingkat pembebanan maksimum atau batas keruntuhan tegangan statis terbesar pada λ_{max} = 1.4747 p.u.
- Hasil yang disajikan dalam penelitian ini dengan jelas menunjukkan bahwa STATCOM pada lokasi terbaik dapat meningkatkan kemampuan pembebanan sistem kelistrikan Bali 16-bus yang dinyatakan dengan titik pembebanan masimum mendekati nilai 0,04 % dibandingkan kondisi *basecase*.
- Penempatan STATCOM dengan lokasi terbaik di bus 02 ASARI pada jaringan sistem Bali 16-bus dapat meningkatkan stabilitas tegangan statis yang diindikasikan oleh nilai λ_{max} semakin besar.
- Penempatan STATCOM dengan lokasi terbaik di bus 02 ASARI juga mampu menjaga profil tegangan terhadap variasi kenaikan beban pada saluran yang sudah kritis sekalipun.

Saran

Dalam pemilihan bus kritis, kombinasi metode CPF dengan indeks garis kestabilan lebih disarankan untuk mendapatkan lokasi yang lebih tepat. Untuk meningkatkan

keandalan sistem, dipertimbangkan untuk menambahkan saluran pada Bus Tanjung Jati, yang terhubung dengan Sistem Transmisi 150 kV Bali. Kemampuan untuk memperbaiki stabilitas sistem juga dibandingkan dengan FACTS lainnya. Selain itu, ada ide untuk memasang STATCOM pada saluran transmisi untuk membantu sistem mempertahankan stabilitas saat terjadi gangguan, sehingga daya reaktif dapat terkompensasi dengan baik.

VI. DAFTAR PUSTAKA

[1] M. Zainuddin And F. E. P. Surusa, "Analisis Implementasi Static Synchronous Compensator (Statcom) Pada Saluran Transmisi 150 Kv," Vol. 12, No. 2, 2015.

[2] S. S. Wibowo And H. Suyono, "Analisis Implementasi Fixed Capacitor, Svc, Dan Statcom Untuk Perbaikan Performansi Stabilitas Tegangan Pada Sistem Petrochina," Vol. 7, No. 2, 2013.

[3] O. L. Bekri, M. K. Fellah, M. F. Benkhoris, And M. F. Benkhoris, "Optimal Location Of Svc Device Via Pso Technique To Enhance Voltage Stability".

[4] A. A. Setiyawan, "Pengontrolan Power Flow Saluran Pada Sistem Jamali (Jawa-Madura-Bali) Dengan Menggunakan Statcom".

[5] "Short - 2004 - Electric Power Distribution Handbook.Pdf."

[6] J. Aghaei, M. Gitizadeh, And M. Kaji, "Placement And Operation Strategy Of Facts Devices Using Optimal Continuous Power Flow," *Scientia Iranica*, Vol. 19, No. 6, Pp. 1683–1690, Dec. 2012, Doi: 10.1016/J.Scient.2012.04.021.

[7] D. Issicaba And J. Coelho, "Rotational Load Flow Method For Radial Distribution Systems," *Ijece*, Vol. 6, No. 3, P. 1344, Jun. 2016, Doi: 10.11591/Ijece.V6i3.10083.

[8] Fakultas Teknik Manajemen, Fakultas Ekonomi Dan Bisnis, Universitas Malikussaleh *Et Al.*, "Analisa Aliran Daya Pada Sistem Tenaga Listrik Dengan Metode Fast Decoupled Menggunakan Software Etap," *Rele.N.A.Elektrikal.Dan.N.A.J.Teknik.N.A*, Vol. 3, No. 1, Pp. 37–45, Dec. 2020, Doi: 10.30596/Rele.V3i1.5236.

[9] N. P. Agustini, L. M. Hayusman, And I. M. Wartana, "Analisis Evaluasi Stabilitas Dan Keamanan Sistem Tenaga Dengan Beroperasinya Pltu Celukan Bawang Pada Sistem Kelistrikan Bali 15-Bus Menggunakan," 2017.

[10] O. Zebua, "Penilaian Keamanan Tegangan Sistem Kelistrikan Wilayah Lampung Dengan Menggunakan Kurva P-V," Vol. 7, No. 2, 2013.

[11] W.-H. Zhang, S.-J. Lee, And M.-S. Choi, "Setting Considerations Of Distance Relay For Transmission Line With Statcom," *Journal Of Electrical Engineering And Technology*, Vol. 5, No. 4, Pp. 522–529, Nov. 2010, Doi: 10.5370/Jeet.2010.5.4.522.

[12] C. R. Shabira And R. S. Lubis, "Simulasi Perbaikan Stabilitas Dinamis Sistem Tenaga 150 Kv Dengan Statcom Berbasis Modular Multilevel Converter (Mmc)".

[13] A. Pahade And N. Saxena, "Transient Stability Improvement By Using Shunt Fact Device (Statcom) With Reference Voltage Compensation (Rvc) Control Scheme".

[14] V. Komoni, I. Krasniqi, G. Kabashi, And A. Alidemaj, "Increase Power Transfer Capability And Controlling Line Power Flow In Power System Installed The Facts," In *7th Mediterranean Conference And Exhibition On Power Generation, Transmission, Distribution And Energy Conversion (Medpower 2010)*, Agia Napa, Cyprus: Iet, 2010, Pp. 193–193. Doi: 10.1049/Cp.2010.0920.

[15] P. S. Borse, D. A. G. Thosar, And S. Shaha, "Modeling And Simulation Of Statcom," *International Journal Of Engineering Research*, Vol. 3, No. 12.

[16] F. Milano, L. Vanfretti, And J. C. Morataya, "An Open Source Power System Virtual Laboratory: The Psat Case And Experience," *Ieee Trans. Educ.*, Vol. 51, No. 1, Pp. 17–23, 2008, Doi: 10.1109/Te.2007.893354.

VII. BIODATA PENULIS

Achmad Bashori Kurniawan, lahir di Lamongan, 26 Mei 2001. Penulis menyelesaikan Pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMAN 1 Bluluk tahun 2020. Setelah itu pada tahun 2020 penulis melanjutkan pendidikan di perguruan tinggi swasta Institut Teknologi Nasional Malang program studi Teknik Energi Listrik yang berfokus di bidang energi baru terbarukan. Penulis dapat dihubungi melalui email: bashoriachmad96@gmail.com