

Magnetika

PENGGUNAAN *UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER* (UPFC) UNTUK MENINGKATKAN PROFIL TEGANGAN PADA SISTEM KELISTRIKAN 150 KV BALI

¹I Gusti Agung Rai Yuda Wardana, ²I Made Wartana
Teknik Elektro S1, ITN Malang, Malang Indonesia
¹gungrai416@gmail.com, ²m.wartana@lecturer.itn.ac.id

Abstrak— Sistem transmisi pasti akan mengalami rugi-rugi sistem dan profil tegangan yang menyebabkan ketidakmampuan dalam mempertahankan tegangan yang diterima sehingga Daya Aktif (MW) dan Daya Reaktif (MVar) yang dihubungkan ke sistem mengalami penurunan, sehingga diperlukan suatu alternatif kinerja peralatan yang memiliki kualitas, efektivitas, dan efisiensi tinggi untuk memaksimalkan kinerja sistem yang baik, berkualitas dan ekonomis dengan menggunakan peralatan dari *Flexible Alternating Current Transmission system* (FACTS) dalam merancang, mengendalikan dan mengoperasikan sistem dengan komponen *Solid State* untuk pengaturan dan pengendalian sistem transmisi secara Akurat (*Precisely*) dan Fleksibel. Didalam UPFC terdapat gabungan dari *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) dan *Static Synchronous Series Compensator* (SSSC) yang dapat mengontrol tegangan dan aliran daya pada sistem yang digunakan dalam proses *Continuation Power Flow* (CPF) dalam studi stabilitas tegangan statis. Efektivitas metode yang diusulkan telah disimulasikan secara praktis pada sistem kelistrikan Bali 16-bus untuk menyelidiki peningkatan kapasitas pembebanan sistem. Dari simulasi yang dilakukan dengan memasang pengendali modern tersebut di lokasi terbaik yaitu pada bus 02 ASARI dan 07 NGARA maka peningkatan margin daya tahan sistem hampir mencapai 8,30% dibandingkan kondisi base case yaitu sebesar $\lambda_{max} = 3.0526$ p.u dengan profile tegangan tidak berubah secara signifikan.

Kata Kunci—Rugi-rugi sistem, Stabilitas tegangan, UPFC

I. PENDAHULUAN

Jaringan transmisi merupakan bagian terpenting dari Sistem Tenaga Listrik untuk menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit ke pusat beban (konsumen). Sistem tenaga listrik saat ini berkembang pesat ditandai adanya pembangunan sumber pembangkit yang letaknya saling berjauhan dan meliputi daerah yang luas, jaringan transmisi yang mempunyai kapasitas terbatas akan mengalami kendala dalam menyalurkan energi listrik. Energi listrik yang disalurkan melalui jaringan transmisi dengan pengaruh beban yang berubah-ubah, akan menimbulkan permasalahan pada saat penyalurannya seperti terjadinya rugi daya[1].

Pada perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga

listrik, stabilitas tegangan daya merupakan aspek penting yang harus dipertimbangkan. Sistem tenaga listrik dioperasikan untuk tujuan mempertahankan daya saluran dan tegangan pada masing - masing bus berada pada batas operasinya. Perubahan daya reaktif merupakan salah satu penyebab tidak stabilnya tegangan pada sistem. Contohnya tidak stabilnya profil tegangan dan rugi-rugi daya pada saluran transmisi. Rugi-rugi daya pada sistem semakin meningkat saat sistem beroperasi pada beban maksimum. Pada kondisi tersebut sistem jaringan distribusi dapat distabilkan dengan cara menginjeksi atau mengabsorpsi daya reaktif menyesuaikan kondisi, seperti bank kapasitor atau peralatan *Unified Power Flow Controller* (UPFC) [2].

UPFC merupakan salah satu bagian dari peralatan elektronika daya *Flexible AC Transmission System* (FACTS) yang dipasang pada jaring transmisi tenaga listrik. *Unified Power Flow Controller* dapat mengatur aliran daya aktif dan reaktif secara simultan dan fleksibel pada sistem transmisi [3]. Dalam penelitian ini akan disimulasikan mengenai pengaruh penempatan UPFC terhadap kestabilan tegangan sistem tenaga listrik. Salah satu indikator kestabilan sistem tenaga listrik adalah dengan melihat kurva PV yang dapat diperoleh dengan metode *continuation power flow* (CPF). Maka didalam makalah ini akan dibahas mengenai analisa pengaruh pemasangan *Unified Power Flow Controller* (UPFC) pada kesetabilan tegangan di jaringan transmisi 150 kV dengan menggunakan *Software Power System Analysis Toolbox* (PSAT) [4].

II. KAJIAN PUSTAKA

A. Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem yang terpadu yang terbentuk oleh hubungan-hubungan peralatan dan komponen komponen listrik. Sistem tenaga listrik ini mempunyai peranan utama untuk menyalurkan energi listrik yang dibangkitkan oleh generator ke konsumen yang membutuhkan energi listrik tersebut.

Secara garis besar suatu sistem tenaga listrik dapat dikelompokkan menjadi tiga bagian sub sistem yaitu :

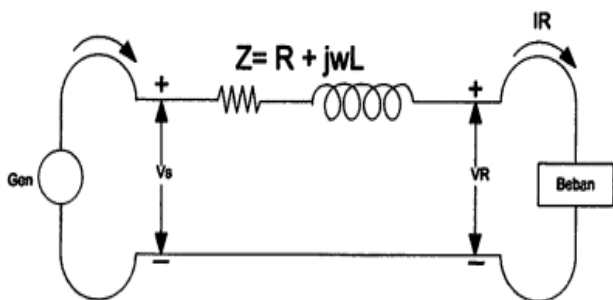
1. Sistem pembangkitan berperan sebagai sumber daya tenaga listrik dan disebut juga sebagai prodaktor energi.
2. Sistem transmisi atau penyalur berfungsi sebagai penyalur daya listrik dalam skala besar dari pembangkit ke bagian sistem distribusi.

Sistem distribusi dan beban berfungsi sebagai distributor energi ke konsumen yang memerlukan energi tersebut.

B. Saluran Transmisi Pendek

Rangkaian ekivalen suatu transmisi pendek diperlihatkan pada gambar 2.2 yang mana I_s dan I_r merupakan arus pada ujung pengirim dan ujung penerima, sedangkan V_s dan V_r merupakan tegangan pada ujung pengirim (sending end) dan ujung penerima (receiving end) terhadap netral. Pengaruh perubahan faktor daya dari beban terhadap regulasi tegangan (*voltage regulation*) suatu saluran adalah paling mudah untuk dimengerti untuk saluran pendek, regulasi tegangan suatu saluran transmisi adalah kenaikan tegangan pada ujung penerima, dinyatakan dalam persentase tegangan beban penuh jika beban penuh dengan faktor daya tertentu dilepaskan sedangkan tegangan pada ujung pengirim dibuat tetap dalam bentuk persamaan:

Rangkaian ekivalen suatu saluran transmisi pendek dimana resistansi (R) dan Induktansi (L) adalah nilai-nilai untuk keseluruhan panjang saluran.



Gambar 1. Rangkaian Ekivalen Saluran Pendek

Rangkaian ini dapat diselesaikan seperti halnya dengan rangkaian AC seri yang sederhana, karena tidak terdapat cabang paralel, arus pada ujung-ujung pengirim dan penerima akan sama besarnya.

Tegangan pada ujung pengirim:

$$\text{Persen Regulasi} = \frac{[V_{R,NL}] - [V_{R,FL}]}{[V_{R,NL}]} \times 100 \quad (1)$$

Dimana $[V_{R,NL}]$ adalah besarnya tegangan pada ujung penerima dalam keadaan tanpa beban dan $[V_{R,FL}]$ adalah besarnya tegangan pada ujung penerima dengan beban penuh dan $[V_s]$ konstan. Sesudah beban pada suatu saluran transmisi pendek yang dipresentasikan oleh rangkaian dalam gambar 2.2 dilepaskan tegangan pada ujung penerima akan sama dengan tegangan pada ujung pengirim. Pada gambar 2.2 dengan beban terhubung, tegangan ujung penerima ditunjukkan dengan V_r dan $[V_r] = [V_{R,FL}]$. tegangan ujung pengirim adalah $[V_r] = [V_{R,FL}]$.

Diagram fasor pada gambar 2.2 digambar untuk besar tegangan dan arus penerima yang sama, dan terlihat bahwa diperlukan suatu tegangan ujung pengirim yang lebih besar untuk mempertahankan suatu tegangan penerima tertentu jika arus dan tegangan tersebut sefasa suatu tegangan pengirim yang lebih kecil diperlukan untuk mempertahankan tegangan penerima tertentu jika arus penerima mendahului tegangannya, jatuh tegangan dalam impedansi seri saluran adalah sama untuk semua hal. Karena faktor daya yang berlainan jatuh tegangan ditambahkan ke tegangan ujung penerima dengan sudut-sudut yang berbeda pada setiap keadaan. Regulasi adalah yang terbesar untuk faktor daya yang tertinggal dan paling kecil atau bahkan negatif, untuk faktor daya yang mendahului. Reaktansi induktif suatu saluran transmisi lebih besar daripada resistansinya dan prinsip regulasi yang digambarkan pada gambar 2.2 adalah benar untuk setiap beban yang dicatu oleh suatu rangkaian yang sebgai besar bersifat induktif. Hubungan antara faktor daya dan regulasi untuk saluran-saluran yang lebih panjang sebenarnya serupa saja dengan saluran yang pendek, tetapi hal ini tidak dapat dibayangkan dengan mudah.

C. Saluran Transmisi Menengah

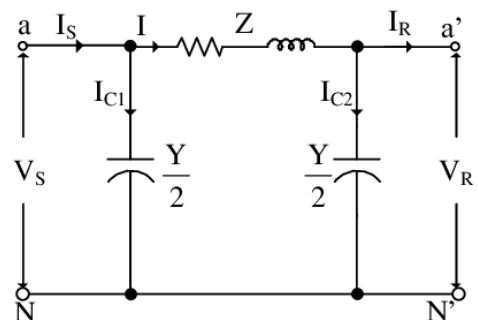
Parameter yang ada pada saluran jarak menengah yaitu admitansi shunt yang biasanya merupakan kapasitansi murni dan dimasukkan dalam perhitungan-perhitungan untuk saluran jarak menengah. Jika keseluruhan admitansi shunt saluran dibagi dua sama besar dan ditempatkan masing-masing pada ujung pengirim dan ujung penerima, rangkaian yang terbentuk dinamakan suatu nominal. Untuk mendapatkan suatu rumus untuk V_s bahwa arus dalam kapasitansi pada ujung penerima adalah $V_r \frac{Y}{2}$. Dan arus dalam cabang seri adalah $V_r \frac{Y}{2}$. Dan arus dalam cabang seri adalah $V_r + V_r \frac{Y}{2}$ (2)

$$V_s = \left(V_r \frac{Y}{2} + I_r \right) Z + V_r \quad (3)$$

$$V_s = \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) V_r + Z I_r \quad (4)$$

untuk menurunkan I_s perlu diperhatikan bahwa arus dalam kapasitansi shunt pada ujung pengirim adalah $V_s \frac{Y}{2}$ yang dengan ditambahkan pada arus dalam cabang seri memberikan

$$I_s = V_s \frac{Y}{2} + V_r \frac{Y}{2} + I_r \quad (5)$$



Gambar 2. Rangkaian Nominal Suatu Saluran Transmisi Jarak Menengah

D. Beban

Dalam sistem tenaga listrik, beban pada umumnya dibagi menjadi 3, yaitu beban industri, beban komersial, dan beban residensial. Beban industri yang besar kemungkinan besar akan disuplai oleh sistem jaringan transmisi atau sub-

transmisi. Berbeda dengan industri sedang yang mendapat suplai dari jaringan distribusi primer. Sedangkan, untuk beban residensial akan mendapat suplai dari jaringan distribusi sekunder. Bentuk dari beban pada industri biasanya berupa motor komposit atau motor induksi [5]. Berbeda dengan beban yang terdapat pada beban residensial dan komersial yang biasanya berupa lampu, pendingin, pemanas, dan motor induksi 1-fasa. Beban pada residensial dan komersial memiliki frekuensi yang tetap sehingga hanya membutuhkan daya reaktif dalam jumlah sedikit. 15 Dalam pemodelan yang dilakukan dalam sistem tenaga listrik, biasanya beban akan dibagi menjadi 3 model beban, yaitu:

1. Beban direpresentasikan sebagai daya konstan. Daya nyata (MW) dan daya reaktif (Mvar) dianggap konstan.
2. Beban direpresentasikan sebagai arus I dijaga agar tetap konstan.
3. Beban direpresentasikan sebagai impedansi konstan. Kondisi ini sering dipakai dalam merepresentasikan beban dalam studi stabilitas.

E. Rugi-Rugi Sistem Tenaga Listrik

Suatu pembangkit energi listrik memiliki bagian penting yang terdiri dari pusat pembangkit listrik, saluran transmisi, saluran distribusi dan beban sehingga menyebabkan adanya rugi-rugi sistem tenaga listrik pada pembangkit listrik [6]. Dimana setiap penyaluran listrik pasti terdapat rugi-rugi sistem yang diakibatkan oleh faktor-faktor tertentu Antara lain :

1. Faktor Peralatan Kontruksi Jaringan (*Component*) Peralatan-peralatan mekanik yang berada dipusat pembangkit yang digunakan sangat mempengaruhi baik tidaknya kondisi suatu sistem tenaga listrik, dimana alat yang kurang baik atau tidak memenuhi Standart atau sudah berumur yang menimbulkan kerusakan pada peralatan saat digunakan sehingga menimbulkan kebocoran arus, korona yang melebihi batas Standart dan impedansi yang lebih tinggi.
2. Faktor Jarak (*Distance*) Jarak tempuh pembangkit/saluran listrik ke beban yang terlalu jauh dari sumber pasokan (PLN) yang dikirim kepada konsumen yang melebihi jarak aman (Batas Standart) akan berakibat kurangnya pasokan daya listrik yang hilang dan bertambah besarnya tahanan saluran kabel yang digunakan.
3. Faktor manusia (*Human Error*) Kerugian yang terjadi pada saat dilapangan baik dalam pengetahuan pembacaan alat ukur, keterampilan pemasangan sistem kelistrikan, pemeliharaan peralatan maupun permasalahan K3 (Kelamatan dan Kesehatan Kerja) yang berdampak buruk bagi diri sendiri ataupun perusahaan pembangkit listrik sehingga dapat menimbulkan kerusakan dan merugikan para konsumen/pelanggan.
4. Faktor Alam (*Nature*) Faktor lingkungan merupakan kesalahan atau kerusakan yang disebabkan diluar sistem kelistrikan seperti terkena bencana alam (Banjir, Angin Topan, Sambaran Petir, dan lainnya) yang menyebabkan rugi-rugi semakin meningkat dan

memberikan dampak yang cukup besar terhadap pembangkit tenaga listrik.

5. Faktor lain (*Another*) 5 6 Kondisi kerugian dari segi finansial, ruang lingkup kerja baik sarana dan prasarana pekerjaan yang kurang baik dan pencurian daya yang dilakukan oleh konsumen dalam penggunaan energi listrik secara sembarangan.

Dari faktor diatas dapat disimpulkan rugi-rugi sitem bisa terjadi kapan saja dari berbagai macam faktor yang menyebabkan rugi-rugi sistem semakin meningkat, Rugi- rugi sendiri dapat dibedakan menjadi dua bagian, antara lain :

a) Rugi-Rugi Saluran

Daya listrik yang dikirim dan disalurkan dari gardu induk/trafo distribusi ke pemakai mengalami rugi tegangan dan rugi daya, ini disebabkan karena saluran distribusi mempunyai tahanan, induktansi, dan kapasitas. Saluran distribusi primer ataupun sekunder berjarak pendek, maka kapasitas dapat diabaikan dengan dibuat rangkaian ekuivalen dari saluran distribusi.

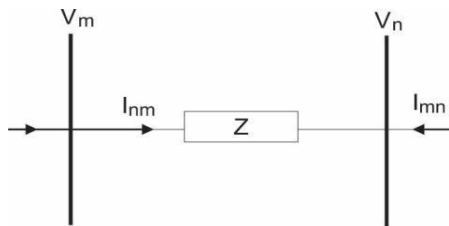
Kerugian akibat pelembekan logam berpengaruh sedikit pada semua suhu dan merupakan fungsi dan waktu bersamaan dengan penurunan batas tegangan. Pelembekan yang terlihat dan kerugian tegangan tarik tidak berpengaruh jika pengantar dalam batas yang dianjurkan pada keadaan tertentu harga-harga pada suatu tingkat umur yang ditaksir dapat ditentukan. Untuk itu perlu mengetahui hubungan antara suhu kerja, waktu suhu kerja dan penurunan kekuatan pengantar yang bersangkutan.

Kerugian akibat panas jika suatu pengantar dialiri arus listrik secara terus-menerus maka akan menimbulkan panas, panas ini timbul akibat energi listrik yang mengalir pada pengantar tersebut. Semakin lama arus tersebut mengalir maka akan semakin panas pengantar dan semakin banyak energi listrik yang hilang karena energi tersebut berubah menjadi panas. Hal inilah yang merugikan jika energi itu hilang maka tegangan pada ujung pengantar tersebut akan berkurang, semakin banyak energi yang menjadi panas, maka semakin banyak pula tegangan yang menghilang.

Kerugian akibat jarak sangat berpengaruh pada keandalan jaringan karena semakin jauh atau semakin panjang penghantar listrik maka akan banyak tegangan listrik yang menghilang karena penghantar itu sendiri memiliki hambatan atau tahanan. Jadi apabila jarak penghantar sangat jauh dari sumber atau pembangkit maka nilai hambatan pengantar akan mengurangi tegangan yang mengalir pada pengantar tersebut.

Luas penampang kawat penghantar, arus listrik yang mengalir dalam pengantar selalu mengalami tahanan dari penghantar itu sendiri, tegangan juga sangat berpengaruh terhadap rugi-rugi daya, semakin besar tegangan pada suatu saluran, maka semakin kecil arus pada saluran, sedangkan arus merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi besarnya kecilnya rugi-rugi daya pada suatu saluran.

Setelah mengetahui nilai tegangan dan arus pada setiap bus dan saluran dengan solusi perhitungan iterasi, kemudian rugi saluran didapatkan. Sebuah saluran menghubungkan dua bus i dan bus j yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 Arus saluran I_{mn} terukur pada bus m dan didefinisikan positif pada arah maju sedangkan I_{nm} didefinisikan negatif karena berasal dari arah yang berlawanan.



Gambar 3. Contoh Saluran Sederhana

$$I_{mn} = I_m = Z_{mm}(V_m - V_n) \quad (6)$$

$$I_{nm} = I_{mn}I_{mn} = I_m = Z_{nm}(V_n - V_m) \quad (7)$$

Dapatkan daya kompleks untuk bus m ke bus n dan bus n ke bus m sebagai berikut :

$$S_{mn} = V_m * I_{mn} \quad (8)$$

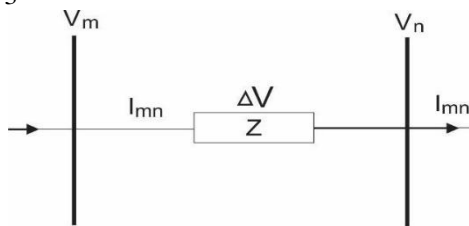
$$S_{nm} = V_n * I_{nm} \quad (9)$$

Rugi saluran dalam saluran m – n diperoleh dengan penjumlahan persamaan (2.12) dan (2.13) sebagai berikut:

$$S_{l\ mn} = S_n + S_{nm} \quad (10)$$

$$P_{l\ mn} = \text{real}(S_{l\ mn}) \quad (11)$$

Rugi tegangan merupakan salah satu bentuk rugi-rugi jaringan yang dapat dimodelkan pada persamaan dibawah ini. Sebuah rangkaian saluran sederhana ditunjukkan pada Gambar 3



Gambar 4. Rangkaian Saluran Sederhana

Sesuai dengan Hukum Kirchoff untuk tegangan dapat ditulis persamaan (2.14).

$$V_m = V_n + \Delta V = V_n + Z * I_{nm} \quad (12)$$

b) Voltage Drop

Jatuh tegangan pada jaringan distribusi tentunya tidak dapat dihindarkan lagi karena jarak antara sumber energi listrik atau pembangkit sangatlah jauh, oleh sebab itu perlu dialirkan menggunakan suatu penghantar atau konduktor yang mana konduktor memiliki daya hantar dan hambatan, yang dipengaruhi oleh banyak faktor, baik faktor internal maupun faktor eksternalnya, penurunan tegangan adalah perbedaan antara tegangan di terminal pembangkit energi listrik atau saluran yang jauh dari generator dan tegangan di terminal penerima. Penurunan tegangan terjadi karena adanya hambatan atau arus listrik yang mengalir. Pada saluran alternatif, kuantitas tergantung pada impedansi dan sambungan saluran, dan juga dipengaruhi oleh beban

dan faktor daya jenis konduktor.

Persentase jatuh tegangan relatif (*voltage regulation*) pada jaringan distribusi dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$VR = \frac{V_s - V_r}{V_s} \times 100\% \quad (13)$$

Dimana,

VR: Tegangan relatif (*voltage regulation*)

V_s : Tegangan pada pangkal penerimaan

V_r : Tegangan pada ujung penerimaan

F. Studi Aliran Daya (Load Flow Abalysis)

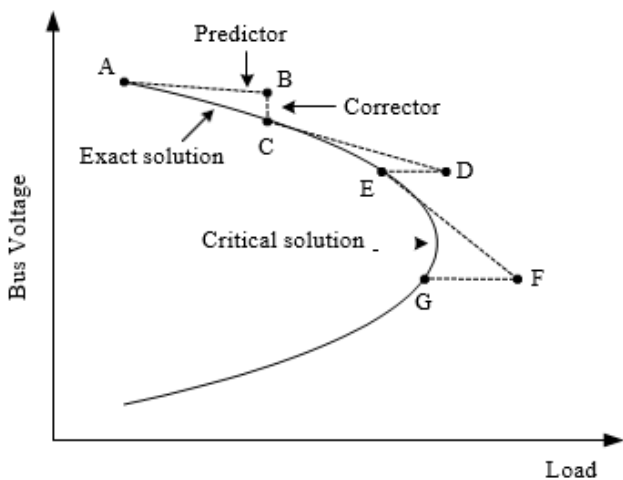
Aliran daya atau disebut *Load Flow* merupakan studi yang dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai aliran daya atau tegangan sistem dalam kondisi Operasi Tunak (*Stady State*). Studi aliran daya juga memberikan informasi guna mengevaluasi kerja sistem tenaga dan menganalisis kondisi pembangkit maupun pembebanan. Dimana studi aliran daya merupakan studi yang sangat penting pada perencanaan dan desain perluasan sistem tenaga listrik dalam menentukan operasi terbaik pada jaringan yang sudah ada, studi aliran daya sangat diperlukan dalam perencanaan serta pengembangan sistem dimasa yang akan datang. dengan Seiring bertambahnya jumlah konsumen maka semakin meningkat pula akan kebutuhan tenaga listrik, sehingga akan selalu terjadi perubahan beban, perubahan pembangkit, dan perubahan saluran transmisi[7].

1. *Slack Bus* (Bus Referensi) Pada bus ini, Rating Tegangan (v) dan Sudut Fasa (δ) sudah ditentukan besarnya sementara Daya Aktif (P) dan Daya Reaktif (Q) didapatkan dari perhitungan. Biasanya nilai (v) adalah 1 pu, sedangkan sudut fasa tegangan bernilai nol, karena fasor tegangan dari bus dipakai sebagai referensi.
2. *Voltage Controller Bus* (Bus Generator) Pada bus ini, hanya terdapat daya pembangkit dimana Tegangan (v) diatur menggunakan Regulator Tegangan (AVR) dan Daya Aktif (P) diatur dengan *Governor* sehingga untuk bus ini dapat mengetahui Tegangan (v) dan Daya Aktif (P), sementara pada Daya Reaktif (Q) dan Sudut Fasa (δ) dapat diketahui dari hasil perhitungan.
3. *Load Bus* (Bus Bebas) Pada bus ini, hanya terdapat kebutuhan daya untuk memenuhi kebutuhan beban yang mana Daya Aktif (P) dan Daya Reaktif (Q) sudah diketahui, sehingga nilai Tegangan (v) dan Sudut Fasa (δ) berubah-ubah menurut kebutuhan beban.

G. Continuation Power Flow (CPF)

Continuation Power Flow merupakan metode perhitungan yang digunakan untuk menunjukkan karakteristik sistem tenaga dari titik *ekuilibrium* stabil sampai titik kritis atau titik batas stabilitas tegangan berdasarkan penambahan beban. Metode CPF memiliki 2 tahap yang terdiri dari prediction step dan *correction step*. Pada metode ini dilakukan reformulasi persamaan aliran daya bertujuan untuk menghindari singularitas *Jacobian matriks* di MLP karena dapat menyebabkan munculnya permasalahan numerik yang sulit. *Continuation Power Flow* (CPF) menunjukkan kurva PV dari sistem tenaga listrik dan memungkinkan penentuan Maximum Loading Parameter (MLP) dari sistem transmisi

dan distribusi [8]. Analisa CPF ini menggunakan proses iterasi yang melibatkan *predictor steps* dan *corrector steps* seperti pada gambar 2.6. Dasar penyelesaian dengan metode CPF adalah solusi awal dari operasi *load flow* (A), lalu sebuah tangen *predictor* memperkirakan solusi berikutnya (B) dengan kenaikan beban yang telah ditetapkan. Kemudian *corrector steps* menentukan *exact solution* (C) menggunakan analisa aliran daya dengan beban tetap. Nilai tegangan untuk kenaikan beban selanjutnya diprediksi dengan *tangent predictor* yang baru. Jika kenaikan beban yang baru (D) pada *exact solution* berikutnya dekat dengan titik pembebanan maksimum, maka *corrector steps* dengan beban tetap tidak akan konvergen. Oleh karena itu, *corrector steps* dengan tegangan tetap di bus digunakan untuk menentukan *exact solution* (E) [9]. Setelah mencapai batas kestabilan tegangan, pembebanan maksimum pada kenaikan beban turun perlahan-lahan selama proses *predictor steps* berturut-turut.



Gambar 5. Urutan Perhitungan Analisa Continuation Power Flow

H. Kurva PV

Kurva P-V merupakan metode yang paling sering digunakan untuk memprediksi stabilitas tegangan. Metode ini digunakan untuk menentukan batas pembebanan sistem tenaga listrik. Beban sistem secara bertahap meningkat yang mengakibatkan tegangan menurun. Margin antara titik *voltage collapse* dan titik operasi saat ini digunakan sebagai kriteria stabilitas tegangan. Kurva P-V dapat diperoleh menggunakan persamaan (1) dan menghasilkan bentuk kurva seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 6.

$$V = \left(\left(\frac{E^2}{2} \right) - QX \pm \sqrt{\left(\left(\frac{E^4}{4} - p^2X - E^2QX \right) \right)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

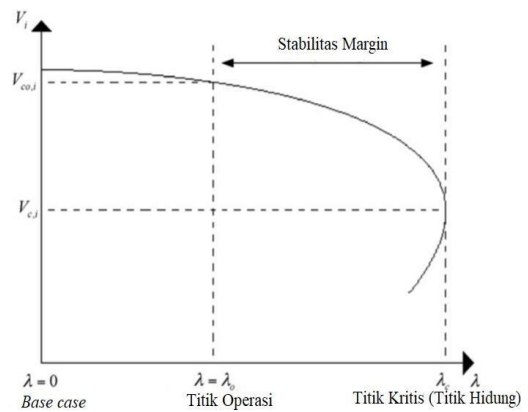
Dimana:

E^2 = tegangan terminal

P = daya aktif

Q = daya reaktif

X = reaktansi saluran



Gambar 6. Kurva PV

Studi keruntuhan tegangan dan alat terkait biasanya didasarkan pada uraian matematis umum berikut dari sistem:

$$\begin{aligned} x &= f(x, y, \lambda, p) \\ 0 &= g(x, y, \lambda, p) \end{aligned} \quad (15)$$

Bentuk kurva ini adalah representasi dari bus beban, pada bus *slack* dan bus generator tidak berlaku karena memiliki nilai tegangan yang tetap untuk perubahan beban tertentu.

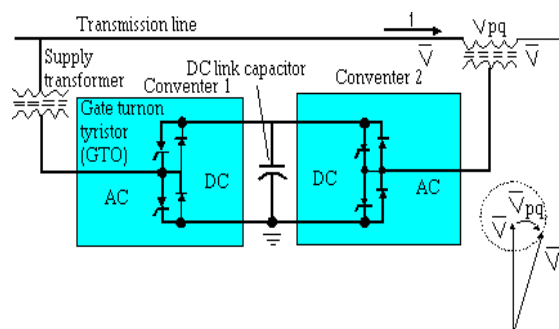
Garis putus-putus pada gambar 2.6 tersebut memperlihatkan titik lokasi yang menyatakan sebagai batas titik kritis. Titik ini menyatakan batas beban pada kondisi *steady-state* untuk stabilitas tegangan jaringan, sedangkan bagian atas dari titik kritis menyatakan kondisi operasi stabil dan di bawah titik kritis menyatakan kondisi operasi tidak stabil.

I. Voltage Collapse

Voltage collapse adalah keadaan yang disebabkan dari serangkaian kejadian menuju titik ketidakseimbangan tegangan yang ditandai dengan profil tegangan rendah dibawah standar diizinkan dalam sebagian besar sistem tenaga. Keadaan ini muncul ketika adanya kenaikan beban yang sangat besar pada sistem tenaga listrik. Dampak besar yang dapat terjadi adalah pemadaman secara merata yang disebut *blackout*. Beberapa gangguan yang dapat mempengaruhi tegangan jatuh atau *voltage collapse*, diantaranya adalah peningkatan beban secara kontinyu [10].

J. Unified Power Flow Controller (UPFC)

UPFC merupakan piranti FACTS (*Flexible AC Transmission System*) sebagai kendali yang dapat mengontrol secara simultan tiga parameter sistem tenaga listrik (Impedansi saluran, Sudut fasa, dan tegangan). UPFC menggunakan dua buah converter yang dapat membangkitkan sumber tegangan serempak (*synchronous voltage source*) [11].



Gambar 7. Control Unified Power Flow Controller (UPFC)

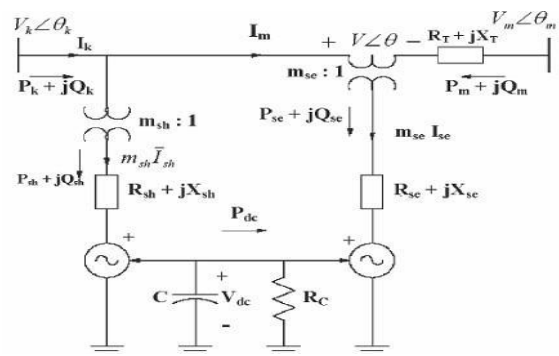
UPFC juga dapat digunakan untuk mendukung tegangan, perbaikan stabilitas transient dan redaman dari sistem tenaga osilasi frekuensi rendah karena fitur yang menarik dalam pemodelan. UPFC sendiri merupakan bagian dari peralatan FACTS Devices terkini yang diimplementasikan dalam sistem tenaga sehingga yang membedakan UPFC dengan peralatan FACTS yang lainnya, dimana UPFC adalah gabungan dari peralatan *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) dan peralatan *Static Synchronous Series Compensator* (SSSC). STATCOM sendiri adalah peralatan yang dapat meningkatkan stabilitas tegangan sistem tenaga dan meningkatkan kekuatan osilasi redaman dalam sistem, hal ini didasarkan pada elektronika daya tegangan sumber *converter* dan dapat bertindak baik sebagai sumber dari listrik AC yang aktif sehingga STATCOM dipasang untuk mendukung jaringan listrik yang memiliki faktor daya yang buruk dan untuk regulasi tegangan [12]. Sedangkan SSSC adalah peralatan yang dapat dioperasikan tanpa menggunakan sumber energi listrik eksternal sebagai kompensator seri yang dikendalikan secara independen untuk meningkatkan atau menurunkan keseluruhan drop tegangan reaktif, dengan demikian SSSC termasuk alat yang dapat menyimpan energi atau menyerap energi untuk meningkatkan perilaku dinamis dari sistem dengan tambahan kompensasi daya nyata sementara [13].

K. Struktur Dasar UPFC

Struktur UPFC dasar yaitu terdiri dari 2 buah *Voltage Sourced Converters* (VSC), yang saling terhubung dengan *Common DC Link* melalui *DC Storage Capacitor*. Setiap Converter terhubung ke sistem melalui *coupling transformer*, dimana Converter 1 terhubung paralel dengan line transmisi melalui shunt transformer (*Boosting Transformer*) dan dikenal sebagai STATCOM (*Static synchronous compensator*), sedangkan converter 2 terhubung seri dengan line transmisi melalui series transformer (*Exciting Transformer*) dan dikenal sebagai SSSC (*Static synchronous series compensator*) [14].

L. Prinsip Kerja UPFC

Prinsip kerja UPFC yaitu konverter 2 sebagai fungsi utama UPFC untuk menginjeksikan tegangan sebesar V_{pq} dengan magnitudo V_{pq} dan sudut fasa yang dapat dikendalikan seri dengan saluran transmisi melalui *exciting transformer*. Tegangan yang diinjeksikan berperan sebagai sumber tegangan AC sinkron (*synchronous ac voltage source*). Arus saluran transmisi mengalir melalui sumber tegangan AC sinkron yang mengalami perubahan daya aktif dan reaktif. Diantara konverter 2 dan sistem AC, daya reaktif yang diubah pada tegangan terminal AC diubah ke daya DC pada kapasitor DC sebagai permintaan daya aktif. Fungsi utama konverter 1 adalah untuk memberikan atau menyerap daya aktif yang diminta oleh konverter 2 pada rangkaian DC bersama. Daya pada rangkaian DC dikonversi kembali ke AC dan dikopel ke saluran transmisi melalui *boosting transformer*, konverter 1 juga dapat menyerap daya reaktif yang dapat dikendalikan, jika diinginkan maka akan memberikan kompensasi reaktif shunt secara bebas untuk saluran transmisi [15].



Gambar 8. Model UPFC

III. METODELOGI PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan melakukan *Study Literature* yang sesuai dengan *Standart IEEE*, apabila sudah mendapatkan referensi teori yang relevan sesuai dengan topik yang diangkat yaitu *Unified Power Flow Controller* (UPFC) yang akan di simulasikan pada *Software Power System Analysis Toolbox* (PSAT) untuk mengetahui perbandingan kondisi sebelum dan sesudah mengimplementasikan *Unified Power Flow Controller* (UPFC) dalam Sistem kelistrikan Transmisi 150 kV Bali.

A. Proses Pelaksanaan

Alur dalam proses analisis ini dapat dilihat pada gambar 3 yang telah menjelaskan urutan dalam pengambilan data hingga proses analisis.

- Pengambilan data dilakukan di PT PLN (Persero) UP2B Bali Transmisi 150 kV, dimana data yang telah didapatkan meliputi:
 - Data Single Line Diagram
 - Data Beban
 - Data Pembangkit
 - Data saluran
 - Data Transformator
- Melakukan permodelan berupa Single Line Diagram, meliputi Subsystem 150 kV Bali dengan menggunakan *Software Power System Analysis Toolbox* (PSAT).
- Melakukan input data Beban, data Pembangkit, data Saluran dan data Transformator, yang sesuai dengan data yang diperoleh dari Perusahaan.
- Menjalankan permodelan simulasi aliran daya atau *Load Flow* untuk mengetahui profil tegangan, daya aktif, daya reaktif dan rugi-rugi pada sistem transmisi sebelum pemasangan (UPFC).
- Pada kondisi base case terdapat empat bus yang mengalami jatuh tegangan.
- Case 1 melakukan ujicoba pemasangan UPFC pada bus 02 dengan kondisi profil tegangan 0,9099 p.u.
- Case 2 melakukan ujicoba pemasangan UPFC pada bus 07 dengan kondisi profil tegangan 0,9457 p.u.
- Case 3 melakukan ujicoba pemasangan UPFC pada bus 12 dengan kondisi profil tegangan 0,9422 p.u
- Mengetahui kondisi sistem apakah telah sesuai pada batasan yangizinkan yaitu nilai profil tegangan ($0,95 \text{ p.u} \leq 1,05 \text{ pu}$).
 “Ya” : Lakukan pemasangan *Unified Power Flow Controller* (UPFC). Setelah itu kembali ke

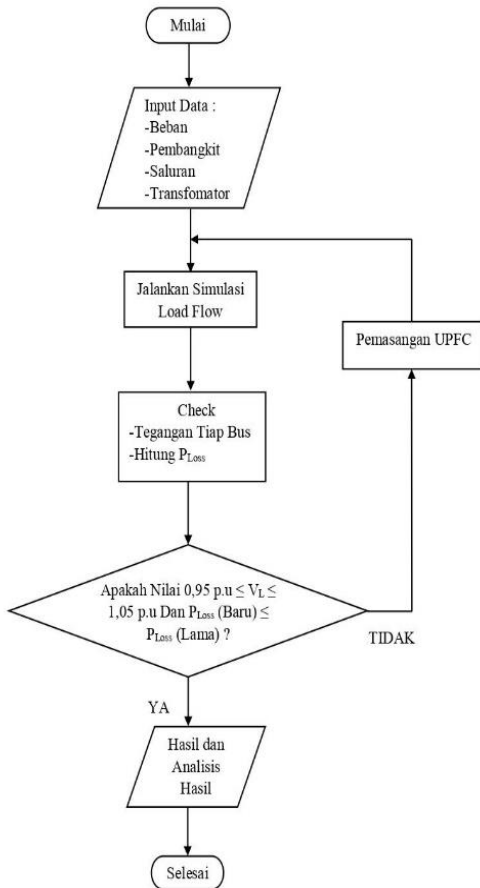
proses *Load Flow* untuk menganalisis keadaan sistem setelah dipasang *Unified Power Flow Controller* (UPFC)

‘Tidak’: Cek hasil dan analisis hasil.

Setelah proses simulasi *Load Flow* selesai dan batasan telah sesuai profil tegangan ($0,95 \text{ p.u} \leq 1,05 \text{ pu}$) kemudian analisis hasil.

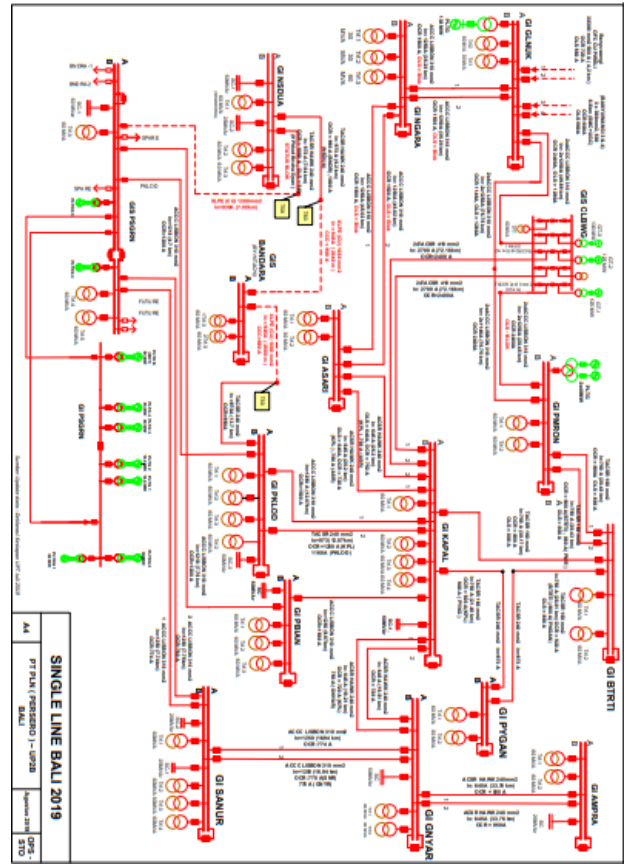
- j. Kesimpulan, bagaimana kondisi sistem meliputi Subsistem Bali sebelum dan sesudah pemasangan UPFC dan apakah UPFC dapat meminimalkan rugi-rugi sistem dan meningkatkan stabilitas tegangan.

Melakukan simulasi sistem sesuai dengan data yang sudah diperoleh dan data tersebut merupakan data asli (Real) dari perusahaan yaitu dari PT PLN (Persero) UP2B Bali 150 kV yang terdiri dari : data beban, pembangkit, saluran dan transformator.



Gambar 9. Flow Chart

B. Single Line Diagram PT PLN UP2B (Persero) Bali



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

C. Data Penelitian

Penggunaan data yang akan digunakan pada simulasi adalah data asli (*Real*) dan terbaru dari PT PLN (Persero) UP2B Bali pada bulan september 2023 yang terdiri : data Beban, data Pembangkit, dan data Saluran.

a) Data Beban

Table 1. 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 : Hasil Pengambilan Data di PT PLN (Persero) UP2B Bali, 09 September 2023

Daya Aktif (P) adalah daya yang sesungguhnya dibutuhkan beban yang timbul akibat mengalirnya arus listrik melalui Hambatan / Resistor. Dimana daya aktif digunakan untuk melakukan kerja dengan kata lain daya yang benar-benar digunakan sesuai dengan kebutuhan tenaga listrik dan dapat diukur dengan menggunakan alat ukur listrik *Wattmeter* dengan satuan dari daya aktif adalah *Watt* atau *Kilo Watt*, dapat dirumuskan dengan :

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2} \quad (16)$$

Daya Reaktif (Q) adalah daya yang dibutuhkan untuk pembentukan medan magnet yang timbul akibat beban bersifat induktif sehingga mengalirnya arus listrik melalui kumparan-kumparan kawat dan dan sebuah kapasitor dengan satuan *Volt Ampere Reaktif (VAR)* dan *Kilo Volt Ampere Reaktif (KVar)*. Untuk menghemat daya reaktif dapat dilakukan dengan memasang kapasitor pada rangkaian yang memiliki beban bersifat induktif.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (17)$$

b) *Data Pembangkit*

Table 2. Data Pembangkit 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 Pesanggaran	1	45,6
12	PLTDG Pesanggaran	2	45,6
13	PLTDG Pesanggaran	3	45,6
14	PLTDG Pesanggaran	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 : Hasil Pengambilan Data di PT PLN (Persero) UP2B Bali, 09 September 2023

c) *Data Saluran*

Table 3. Data Saluran Subsistem Bali 150 kV

No	Transmisi		Teg	Kms	Jenis
			(Kv)		Penghantar
1	GILIMANK	NARA-1	150	43.69	ACCC LISBON
2	GILIMANK	NGRA-2	150	43.69	ACCC LISBON
3	GILIMANK	CLBWG	150	49.89	ACCC LISBON
4	GILIMANK	PMRN-2	150	75.9	ACCC LISBON
5	CLBWG	PMRON	150	28.45	ACCC 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	GNYR-1	150	19.21	ACSR.HAWK
15	KAPAL	GNYR-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	AMPA-1	150	33.76	ACSR.HAWK
23	GIANYAR	AMPA-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 : Hasil Pengambilan Data di PT PLN (Persero) UP2B Bali, 09 September 2023

d) *Data Kapasitor*

Table 4. Data Kapasitor Subsistem Bali 150 kV

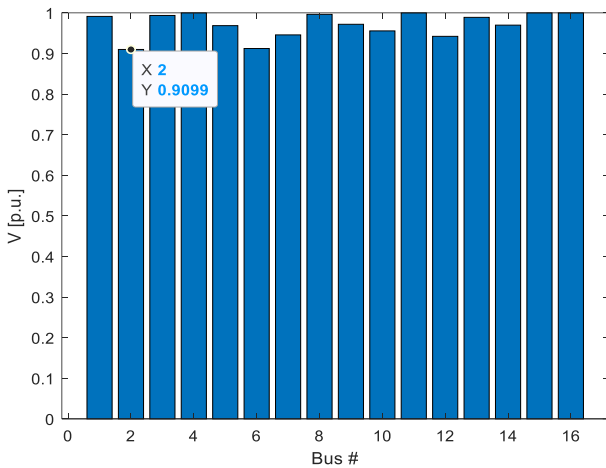
No	Gi	Kapasitor 150 kV	Teg	Kemampuan
			(KV)	(MVAR)
1	KAPAL	Kapasitor 1	150	50
2	GNYR	Kapasitor 1	150	50
3	AMPRA	Kapasitor 1	150	25
4	SANUR	Kapasitor 1	150	25
5	SANUR	Kapasitor 1	150	25
6	PSGRN	Kapasitor 1	150	50
7	NSDUA	Kapasitor 1	150	50
8	NSDUA	Kapasitor 1	150	25
9	PKLOD	Kapasitor 1	150	50
10	PBIAN	Kapasitor 1	150	50

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

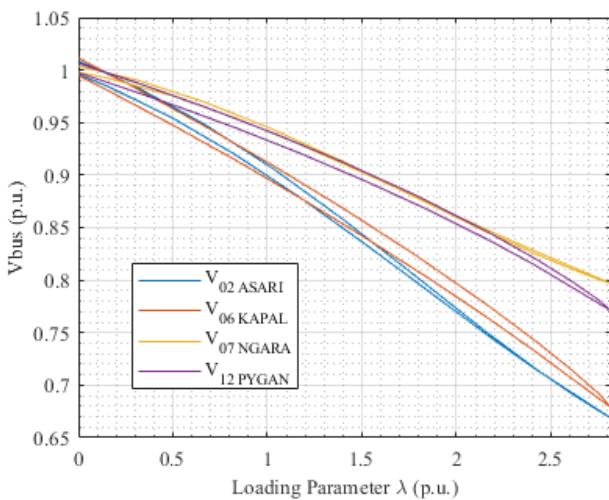
IV. SIMULASI DAN ANALISA

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

Dari hasil aliran daya CPF pada kondisi *base case* ditunjukkan pada Gambar 4.13. Dari Gambar 4.13 dapat dilihat bahwa terdapat 4 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 4.14 menunjukkan tiga kurva PV tegangan bus terendah untuk sistem uji Bali 16 bus tanpa UPFC yaitu bus 02 ASARI, bus 06 KAPAL, bus 07 NGARA dan bus 12 PYNGAN. Sistem menyajikan keruntuhan atau TPM, di mana sistem matriks Jacobian menjadi tunggal pada $\lambda_{maks} = 2.8185$ p.u. Berdasarkan entri terbesar dalam vektor eigen kanan dan kiri yang terkait dengan nilai eigen nol pada titik runtuh, bus 02 ASARI diindikasikan sebagai "bus tegangan kritis" yang memerlukan injeksi daya reaktif Q. Besaran tegangan dalam TPM di bus 02 ASARI yang dikenal sebagai bus terlemah adalah $V_{bus} = 0,90987$ p.u.



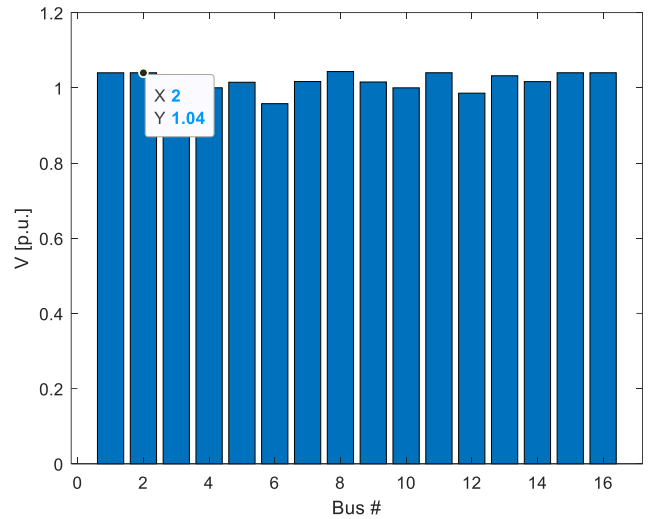
Gambar 11. Profile tegangan untuk sistem uji Kelistrikan Bali 16-bus Kondisi Base Case



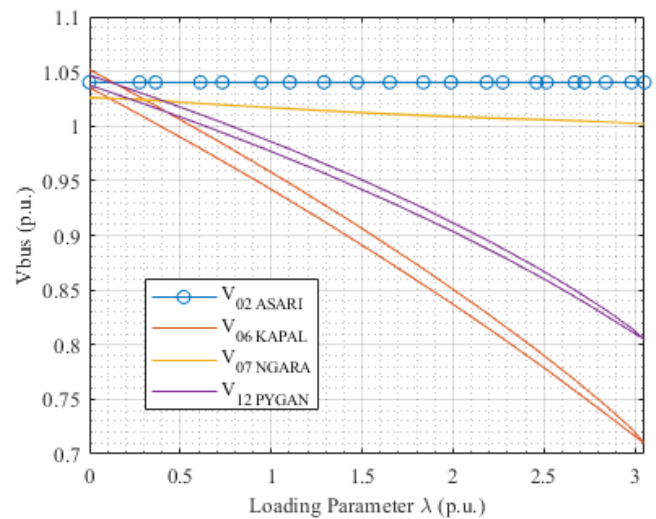
Gambar 12. Kurva PV untuk sistem uji Kelistrikan Bali 16-bus Kondisi Base Case

B. Hasil Simulasi Profil Tegangan dan CPF Setelah Pemasangan UPFC Case 1

Penempatan UPFC pada bus 02 ASARI saat dilakukan *load flow* menghasilkan profil tegangan 1,04 p.u. dan dalam pemasangan UPFC saat dilakukan *Continuation Power Flow* untuk kurva PV menghasilkan nilai $\lambda_{maks} = 3.0526$ p.u. yang berarti terjadi kenaikan sebesar 0,234 p.u. atau (8,30%) dibandingkan pada sebelum pemasangan UPFC. Hal ini menunjukkan bahwa penempatan UPFC pada bus tegangan terlemah, pada sistem grid dapat meningkatkan pembebanan sistem dengan TPM terbesar dengan profile tegangan sistem yang tidak berubah secara signifikan.



Gambar 13. Profile tegangan untuk sistem uji Kelistrikan Bali 16-bus dengan Dengan UPFC Pada Bus 02

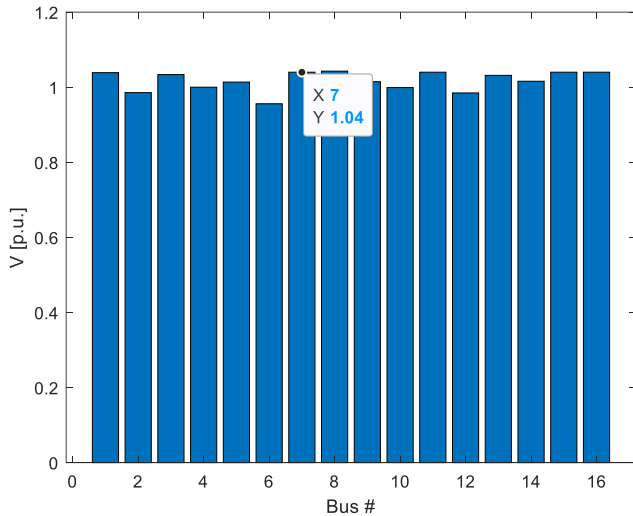


Gambar 14. Kurva PV untuk sistem uji Kelistrikan Bali 16-bus dengan UPFC Pada bus 02

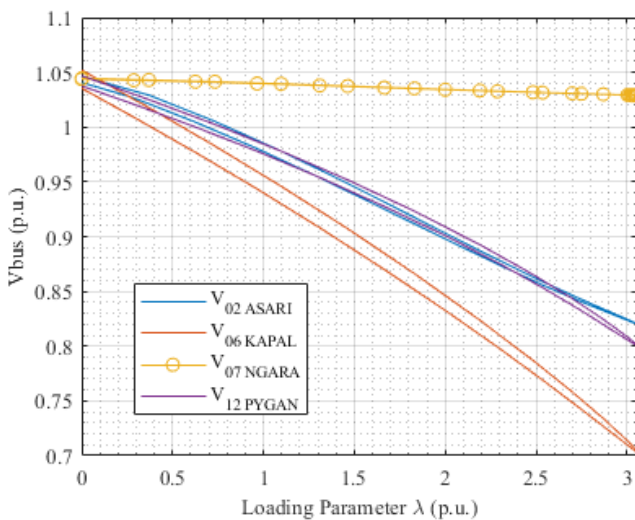
C. Hasil Simulasi Profil Tegangan dan CPF Setelah Pemasangan UPFC Case 2

Penempatan UPFC pada bus 07 NEGARA saat dilakukan *load flow* menghasilkan profil tegangan 1,04 p.u. dan dalam pemasangan UPFC saat dilakukan *Continuation Power Flow* untuk kurva PV menghasilkan nilai $\lambda_{maks} = 3.0542$ p.u. yang berarti terjadi kenaikan sebesar 0,238 p.u. atau (8,36%) dibandingkan pada sebelum pemasangan

UPFC. Hal ini menunjukkan bahwa penempatan UPFC pada bus tegangan terlemah pada sistem grid dapat meningkatkan pembebanan sistem dengan TPM terbesar dengan profile tegangan sistem yang tidak berubah secara signifikan



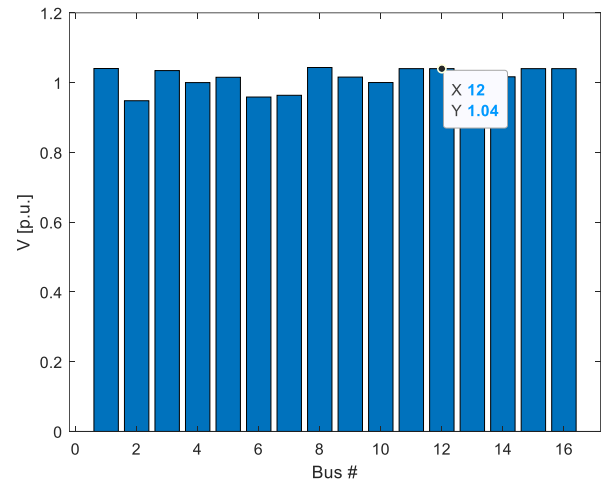
Gambar 15. Profile tegangan untuk sistem uji Kelistrikan Bali 16-bus dengan Dengan UPFC Pada Bus 07



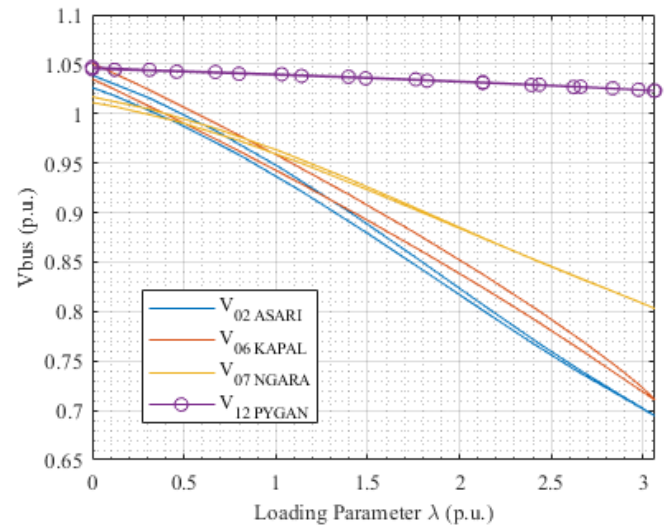
Gambar 16. Kurva PV untuk sistem uji Kelistrikan Bali 16-bus dengan UPFC Pada bus 07

D. Hasil Simulasi Profil Tegangan dan CPF Setelah Pemasangan UPFC Case 3

Penempatan UPFC pada bus 12 PYGAN saat dilakukan *load flow* menghasilkan pfsil tegangan 1,04 p.u. dan dalam pemasangan UPFC saat dilakukan *Continuation Power Flow* untuk kurva PV menghasilkan nilai $\lambda_{\max} = 3.0542$ p.u. yang berarti terjadi kenaikan sebesar 0,248 p.u. atau (8,70%) dibandingkan pada sebelum pemasangan UPFC. Hal ini menunjukkan bahwa penempatan UPFC pada bus tegangan terlemah pada sistem grid dapat meningkatkan pembebanan sistem dengan TPM terbesar dengan profile tegangan sistem yang tidak berubah secara signifikan.

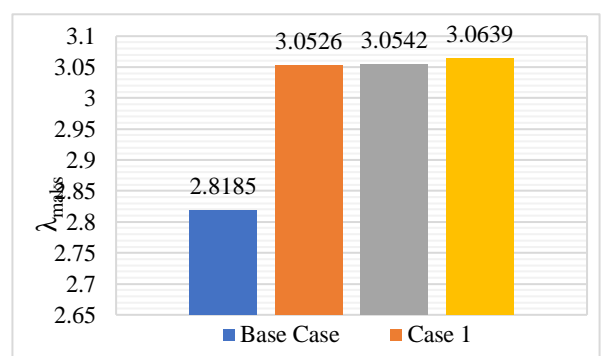


Gambar 17. Profile tegangan untuk sistem uji Kelistrikan Bali 16-bus dengan Dengan UPFC Pada Bus 12

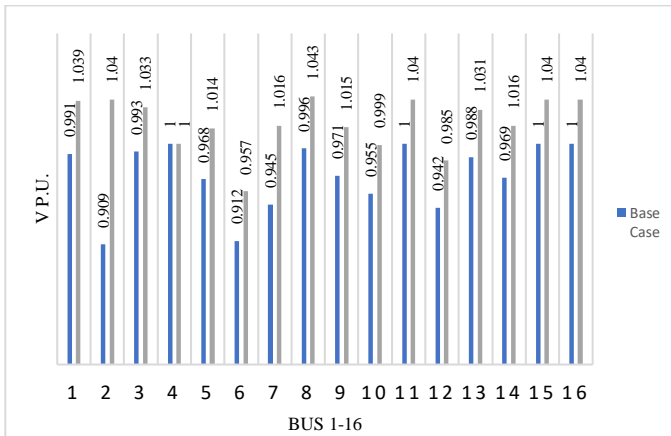


Gambar 18. Kurva PV untuk sistem uji Kelistrikan Bali 16-bus dengan UPFC Pada bus 12

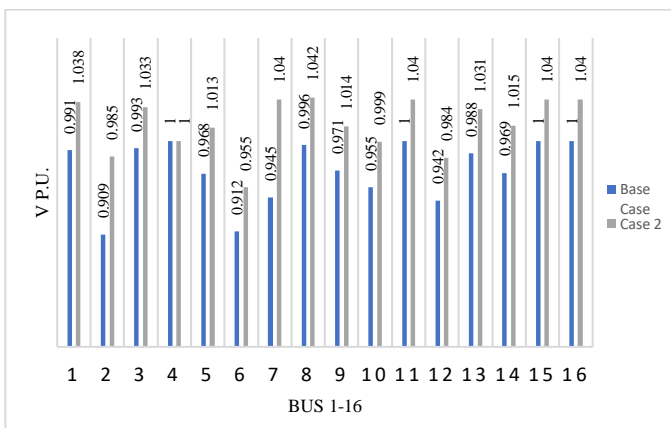
Berdasarkan hasil CPF pada sistem menghasilkan kurva PV dengan nilai base case $\lambda_{\max} = 2.8185$ p.u., Case 1 $\lambda_{\max} = 3.0526$ p.u., case 2 $\lambda_{\max} = 3.0542$ p.u. dan case 3 $\lambda_{\max} = 3.0639$ p.u. grafik dibawah telah diketahui yang mengalami perubahan dalam kondisi sesudah mengimplementasikan UPFC saat sistem beroperasi, mengalami peningkatan nilai λ_{\max} pada setiap mengimplementasikan UPFC.



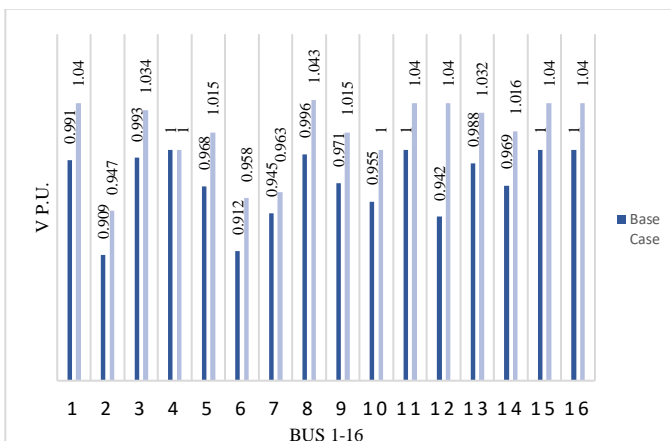
Gambar 19. Grafik Perbandingan Percobaan



Gambar 20. Grafik Perbandingan Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Pemasangan UPFC Pada Bus 02 Asari



Gambar 21. Grafik Perbandingan Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Pemasangan UPFC Pada Bus 07 Negara



Gambar 22. Grafik Perbandingan Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Pemasangan UPFC Pada Bus 12 Pyngan

V. KESIMPULAN

Setelah dilakukan pengujian baik pada kondisi base case maupun setelah penempatan UPFC pada sistem grid, maka dapat diambil kesimpulan:

- Penelitian ini berhasil menentukan lokasi terbaik pemasangan UPFC pada bus yang mempunyai tegangan paling kritis yaitu bus 02 ASARI untuk mendapatkan tingkat pembebanan maksimum atau

batas keruntuhan tegangan statis terbesar pada $\lambda_{max} = 3.0526$ p.u.

- Hasil yang disajikan dalam penelitian ini dengan jelas menunjukkan bahwa UPFC pada lokasi terbaik dapat meningkatkan kemampuan pembebanan sistem kelistrikan Bali 16-bus yang dinyatakan dengan titik pembebanan masimum mendekati nilai 8,30 % dibandingkan kondisi base case (tanpa UPFC).
- Penempatan UPFC pada jaringan sistem 16-bus dapat meningkatkan profil tegangan yang diindikasikan oleh nilai λ_{max} semakin besar. Penempatan UPFC mampu menjaga profil tegangan terhadap variasi kenaikan beban pada saluran yang sudah kritis sekalipun dengan cara membandingkan nilai λ_{max} setelah dipasang UPFC lebih besar atau sama dengan nilai λ_{max} sebelum dipasang UPFC. Selain itu juga penempatan UPFC mampu menjadikan profil tegangan sistem semakin baik, mengurangi *losses* daya aktif dan reaktif yang selanjutnya akan berdampak pada semakin murah atau efisiensinya biaya pembangkitan yang diperlukan.

Saran

Dalam pemilihan bus kritis lebih baik dengan menggabungkan metode CPF dengan *stability line index* untuk mendapatkan lokasi yang lebih akurat. Pemasangan *Unified Power Flow Controller* (UPFC) selanjutnya diharapkan dapat diperhitungkan dari sisi ekonomisnya. Kurang efisiensi bagi perusahaan karena harga dalam kehidupan nyata masih tergolong mahal.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- I. G. D. Arjana And I. N. Setiawan, "Peningkatan Stabilitas Sistem Transmisi 150 Kv Bali Menggunakan Facts Device," 2014.
- L. M. Putranto, S. P. Hadi, And R. P. Aridani, "Pengaruh Penempatan Unified Power Flow Controller Terhadap Kestabilan Tegangan Sistem Tenaga Listrik," 2013.
- D. Wahyudi, "Implementasi Unified Power Flow Controller (Upfc) Untuk Meningkatkan Kestabilan Tegangan Dan Meminimalkan Rugi-Rugi Sistem Pada Subsistem Ngimbang 150 Kv".
- Z. Abidin, S. P. Hadi, And S. Sarjiya, "Dampak Pemasangan Peralatan Facts Terhadap Stablitas Tegangan Padasistem Tenaga Listrik," *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, Vol. 16, No. 3, Pp. 147–153, Aug. 2014, Doi: 10.12777/Transmisi.16.3.147-153.
- 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.

- [6] F. Milano, L. Vanfretti, And J. Morataya, "An Open Source Power System Virtual Laboratory: The Psat Case And Experience," *Education, Ieee Transactions On*, Vol. 51, Pp. 17–23, Mar. 2008, Doi: 10.1109/Te.2007.893354.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] O. Zebua, "Penilaian Keamanan Tegangan Sistem Kelistrikan Wilayah Lampung Dengan Menggunakan Kurva P-V," vol. 7, no. 2, 2013.
- [10] I. Jaya, N. Harun, and M. Tola, "Improvement of Power Losses On Transmission Line Using Unified Power Flow Controller (Upfc) For Street Lighting Requirement," vol. 02, no. 09.
- [11] 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.
- [12] W. D. Asihene, F. B. Effah, and E. Normanyo, "Utilizing Unified Power Flow Controller for Stability Improvement of the Electric Power Transmission System of Ghana," *JNTE*, vol. 9, no. 1, p. 52, May 2020, doi: 10.25077/jnte.v9n1.760.2020.
- [13] V. P. Rajderkar and V. K. Chandrakar, "Security Enhancement through the Allocation of a Unified Power Flow Controller (UPFC) in a Power Network for Congestion Management," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 13, no. 4, pp. 11490–11496, Aug. 2023, doi: 10.48084/etasr.6075.
- [14] Universitas Batanghari Jambi, L. W. Johar, S. Syafii, and Universitas Andalas, "Evaluasi Penempatan Distributed Generation Untuk Meningkatkan Keamanan dan Stabilitas Tegangan Sistem Tenaga Menggunakan Nose Curve Method," *JTE*, vol. 6, no. 2, pp. 125–133, Jul. 2017, doi: 10.21063/JTE.2017.3133617.
- [15] A. B. Iskakov, A. V. Lavrikov, and I. B. Yadykin, "Fast calculation of modal interaction in large power systems using spectral decompositions of Gramians," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 28, pp. 564–569, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.11.763.

VI. BIODATA PENULIS



I Gusti Agung Rai Yuda Wardana, lahir di Denpasar, 14 Desember 2000. Penulis menyelesaikan Pendidikan Sekolah Menengah Kejuruan di SMK Penerbangan Cakra Nusantara tahun 2019. Setelah itu pada tahun 2019 penulis melanjutkan Pendidikan Studi diperguruan tinggi swasta Institut Teknologi Nasional Malang program studi Teknik Energi Listrik yang berfokus pada bidang energi baru terbarukan. Penulis dapat dihubungi melalui email: gungrai416@gmail.com