

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

I Gusti Agung Rai yuda Wardana<sup>a\*</sup>, I Made Wartana<sup>b</sup>

Jl. Sigura – Gura No.2, Sumbersari, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65152

<sup>a</sup>gungrai416@gmail.com <sup>b</sup>m.wartana@lecturer.itn.ac.id

DOI: 10.36040/alinierv5i1.5102

*Kata Kunci :*

CPF, Rugi-rugi sistem, Profil Tegangan, Stabilitas tegangan Statis, UPFC

ABSTRAK

*Kinerja sistem tenaga listrik akan rendah apabila sistem transmisi mengalami penurunan profil tegangan yang menyebabkan ketidakmampuan sistem mempertahankan tegangan sesuai batas yang diijinkan serta mengalami penurunan rugi-rugi saluran yang besar. Hal ini akan berdampak pada penurunan daya aktif (MW) maupun daya reaktif (Mvar) sistem yang disalurkan ke beban. 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 Unified Power Flow Controller (UPFC) dipasang pada jaringan tenaga listrik untuk meningkatkan kinerja sistem. Peralatan UPFC merupakan gabungan dari Static Synchronous Compensator (STATCOM) dan Static Synchronous Series Compensator (SSSC) 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 UPFC. 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 07 NEGARA dengan kapasitas UPFC 60 Mvar maka peningkatan margin daya tahan sistem hampir mencapai 9,70% dibandingkan kondisi basecase (tanpa FACTS) yaitu sebesar  $\lambda_{max} = 1,6171$  p.u dengan profile tegangan meningkat secara signifikan dan rugi-rugi saluran tereduksi.*

*The performance of the electric power system will be low if the*

*transmission system experiences a decrease in the voltage profile which causes the system to be unable to maintain voltage within the permitted limits and experiences a large decrease in line losses. This will have an impact on reducing the active power (MW) and reactive power (Mvar) of the system that is distributed to the load. One alternative method to improve system performance is to install modern control equipment that has high quality, effectiveness and efficiency, namely Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS) device. This device is capable of designing, controlling and operating systems involving solid state components accurately and flexibly. In this research, one of the FACTS device, namely the Unified Power Flow Controller (UPFC), was installed on the electric power network to improve system performance. The UPFC device is a combination of Static Synchronous Compensator (STATCOM) and Static Synchronous Series Compensator (SSSC) which can control the voltage and power flow in the system by placing it in the right location and capacity using the static voltage stability study method, namely Continuation Power Flow (CPF). The CPF can also show an increase in voltage static stability after the UPFC installation. The effectiveness of the proposed method has been simulated on a 16-bus Bali electrical system to best the performance and load capacity improvements of the system. From the simulation carried out by installing the modern controller in the best location, namely on the 07 NEGARA bus with a UPFC capacity of 60 Mvar, the increase in the system durability margin is almost 9.70% compared to the base case condition (without FACTS), namely  $\lambda_{max} = 1.6171$  p.u with the voltage profile is significantly improved and line losses are reduced.*

---

## **1. 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 (Arjana and Setiawan 2014).

Pada perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga listrik, stabilitas tegangan 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 penurunan profil tegangan pada sistem. Penurunan profil tegangan akan mengakibatkan peningkatan 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 UPFC (Putranto, Hadi, and Aridani 2013).

UPFC merupakan salah satu bagian dari peralatan elektronika daya *Flexible AC Transmission System* (FACTS) yang dipasang pada jaringan transmisi tenaga listrik. UPFC dapat mengatur aliran daya aktif dan reaktif secara simultan dan fleksibel pada sistem transmisi (Wahyudi n.d.). Dalam penelitian ini akan disimulasikan mengenai pengaruh penempatan UPFC terhadap peningkatan profile tegangan, stabilitas statis sistem dan penurunan rugi-rugi saluran pada sistem tenaga listrik menggunakan *continuation power flow* (CPF). Salah satu indikator kestabilan statis sistem tenaga listrik dapat dilihat dari kurva PV yang dapat diperoleh dengan metode CPF. Dalam penelitian ini akan dibahas mengenai analisis penempatan dan kapasitas UPFC pada sistem untuk meningkatkan kinerja dan kesetabilan tegangan statis sistem di jaringan transmisi Bali 150 kV dengan menggunakan *Software Power System Analysis Toolbox* (PSAT) (Abidin, Hadi, and Sarjiya 2014)

## 2. Tinjauan Pustaka

### 2.1 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.

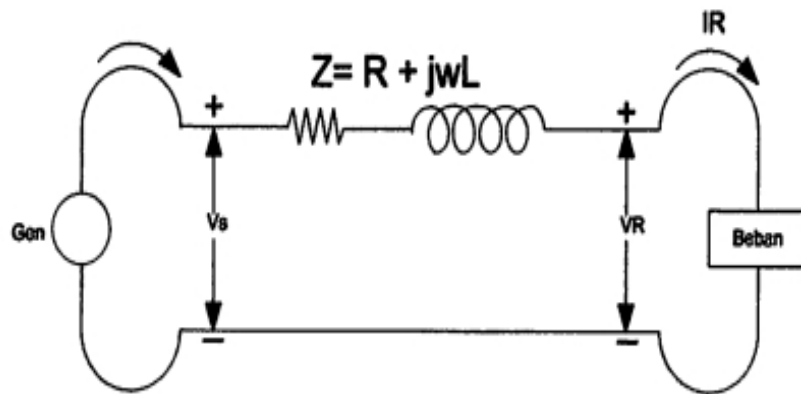
Secara garis besar suatu sistem tenaga listrik dapat dikelompokkan menjadi tiga bagian sub sistem yaitu :

1. Sistem pembangkitan berperan sebagai sumber daya tenaga listrik dan disebut juga sebagai produktor energi.
2. Sistem transmisi atau penyalur berfungsi sebagai penyalur daya listrik dalam skala besar dari pembangkit ke bagian sistem distribusi.
3. Sistem distribusi dan beban berfungsi sebagai distributor energi ke konsumen yang memerlukan energi tersebut.

### 2.2 Saluran Transmisi Pendek

Rangkaian ekivalen suatu transmisi pendek diperlihatkan pada Gambar 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:

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

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  $[Vs]$  konstan. Sesudah beban pada suatu saluran transmisi pendek yang dipresentasikan oleh rangkaian dalam gambar 2. dilepaskan tegangan pada ujung penerima akan sama dengan tegangan pada ujung pengirim. Pada gambar 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 adalah benar untuk setiap beban yang dicatu oleh suatu rangkaian yang sebagean 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.

### 2.3 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

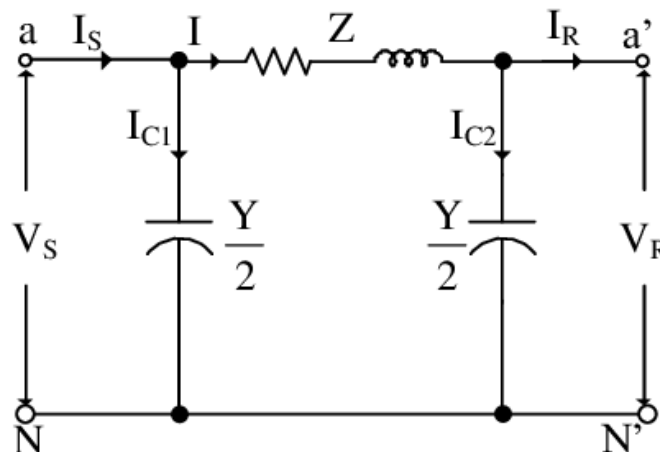
ditempatkan masing-masing pada ujung pengirim dan ujung penerima, rangkaian yang terbentuk dinamakan suatu nominal. Untuk mendapatkan suatu rumus untuk  $V_s$  bahwa arus dalam kapasitansi pada ujung penerima adalah  $V_r \frac{Y}{2}$ . Dan arus dalam cabang seri adalah  $V_r + V_r \frac{Y}{2}$ . Dan arus dalam cabang seri adalah  $V_r + V_r \frac{Y}{2}$ .

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

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

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.

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



Gambar 2. Rangkaian Nominal Suatu Saluran Transmisi Jarak Menengah

## 2.4 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 (Issicaba and Coelho 2016). 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. 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.

## 2.5 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 (Milano, Vanfretti, and Morataya 2008). 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*) 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 kepemakai 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.

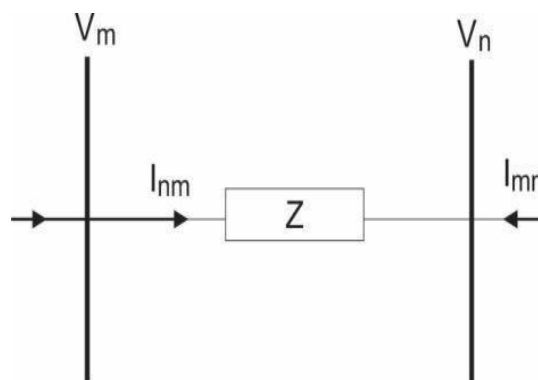
Kerugian akibat panas jika suatu pengantar dialiri arus listrik secara terus-menerus maka akan menimbulkan panas, panas ini timbul akibat energi listrik yang mengalir pada

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 penghantar 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 3 Arus saluran  $I_{nm}$  terukur pada bus  $m$  dan didefinisikan positif pada arah maju sedangkan  $I_{mn}$  didefinisikan negatif karena berasal dari arah yang berlawanan.



**Gambar 3. Contoh Saluran Sederhana**

$$I_{mn} = I_m = Z_{mm}(V_m - V_n) \quad (4)$$

$$I_{nm} = I_{mn}I_{mn} = I_m = Z_{nm}(V_n - V_m) \quad (5)$$

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

$$S_{mn} = V_m * I_{mn} \quad (6)$$

$$S_{nm} = V_n * I_{nm} \quad (7)$$

Rugi saluran dalam saluran  $m - n$  diperoleh dengan penjumlahan persamaan (8) dan (9) sebagai berikut:

$$S_{l\ mn} = S_n + S_{nm} \quad (8)$$

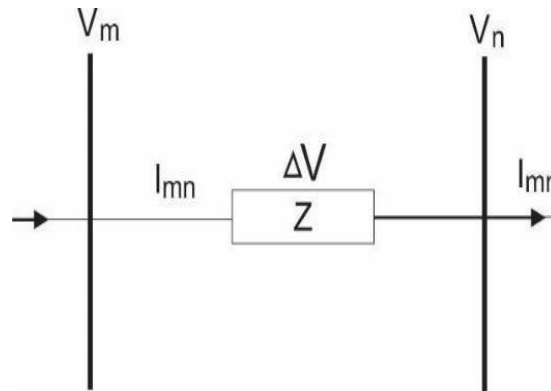
$$P_{l\ mn} = \text{real}(S_{l\ mn}) \quad (9)$$

Rugi tegangan merupakan salah satu bentuk rugi-rugi jaringan yang dapat dimodelkan

pada persamaan dibawah ini. Sebuah rangkaian saluran sederhana ditunjukkan pada Gambar 4

Sesuai dengan Hukum Kirchoff untuk tegangan dapat ditulis persamaan (10)

$$V_m = V_n + \Delta V = V_n + Z^* I_{mn} \quad (10)$$



### 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:

$$VR = \frac{V_s - V_r}{V_s} \times 100\% \quad (11)$$

Dimana,

VR : Tegangan relatif (*voltage regulation*)

Vs : Tegangan pada pangkal penerimaan

Vr : Tegangan pada ujung penerimaan

## 2.5 Studi Aliran Daya (Load Flow Analysis)

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

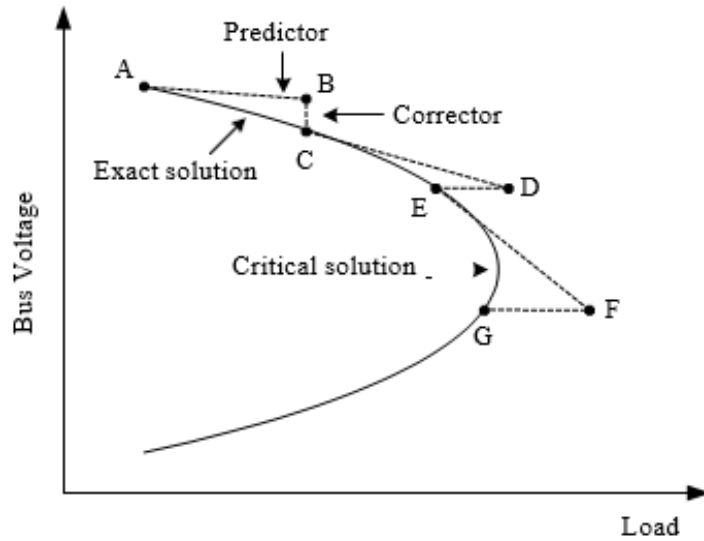


pembangkit, dan perubahan saluran transmisi (Fakultas Teknik Manajemen, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Malikussaleh et al. 2020).

1. *Slack Bus* (Bus Referensi) Pada bus ini, Rating Tegangan ( $v$ ) dan Sudut Fasa ( $\delta$ ) 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 ( $\delta$ ) 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 ( $\delta$ ) berubah-ubah menurut kebutuhan beban.

## 2.6 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* pada *maximum loading parameter* (MLP) karena dapat menyebabkan munculnya permasalahan numerik yang sulit. CPF menunjukkan kurva PV dari sistem tenaga listrik dan memungkinkan penentuan MLP dari sistem transmisi dan distribusi (Agustini, Hayusman, and Wartana 2017). Analisa CPF ini menggunakan proses iterasi yang melibatkan *predictor steps* dan *corrector steps* seperti pada gambar 5. Dasar penyelesaian dengan metode CPF adalah solusi awal dari operasi *load flow* (A), lalu sebuah *tangent 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) (Zebua 2013). 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

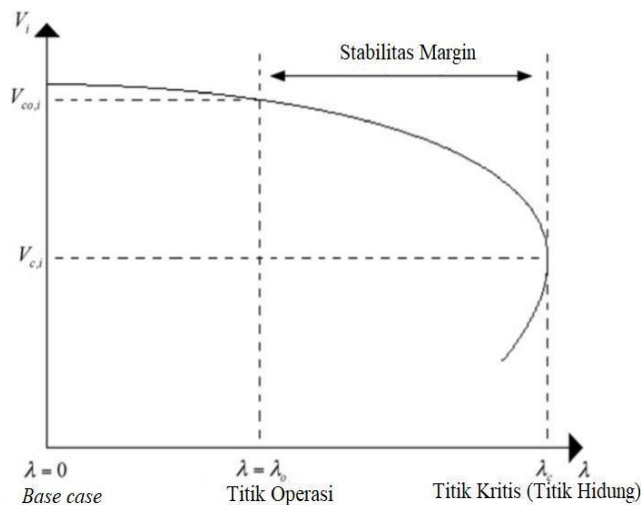
## 2.7 Kurva PV

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 (12) dan menghasilkan bentuk kurva seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 6.

$$V = \left( \left( \frac{E^2}{2} \right) - QX \pm \sqrt{\left( \left( \frac{E^4}{4} - p^2X - E^2QX \right) \right)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

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:

$$\begin{aligned}x &= f(x, y, \lambda, p) \\0 &= g(x, y, \lambda, p)\end{aligned}\quad (13)$$

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.

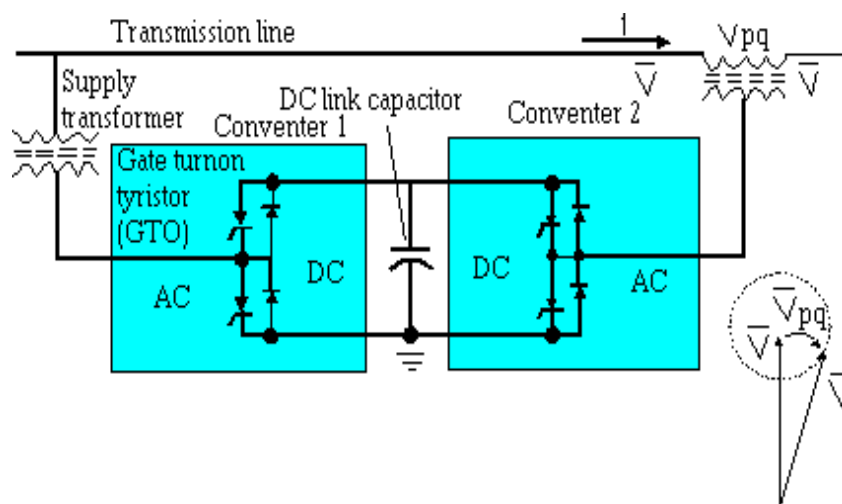
Garis putus-putus pada Gambar 6 tersebut memperlihatkan titik lokasi yang menyatakan sebagai batas titik kritis. Titik ini menyatakan batas beban pada kondisi *steady-state* untuk stabilitas tegangan jaringan, sedangkan bagian atas dari titik kritis menyatakan kondisi operasi stabil dan di bawah titik kritis menyatakan kondisi operasi tidak stabil.

## 2.8 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 (Jaya, Harun, and Tola n.d.).

## 2.9 Unifed Power Flow Controller (UPFC)

UPFC merupakan piranti FACTS 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*) (Aghaei, Gitizadeh, and Kaji 2012).



Gambar 7. Unifed 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*

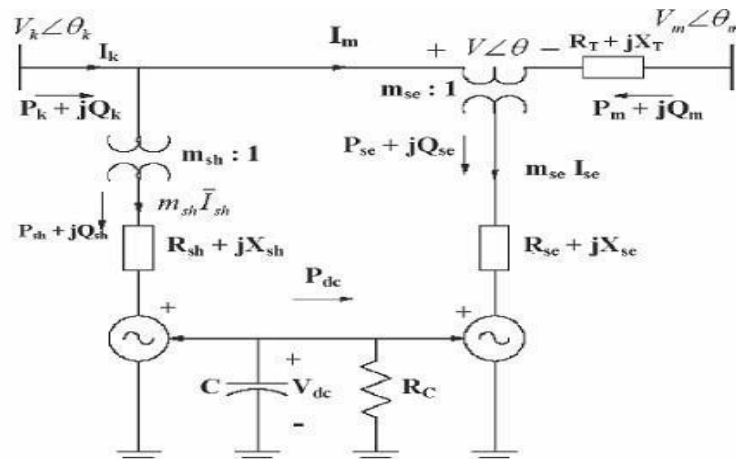
*Compensator* (STATCOM) dan peralatan *Static Synchronous Series Compensator* (SSSC). STATCOM sendiri adalah peralatan yang dapat meningkatkan stabilitas tegangan sistem tenaga dan meningkatkan kekuatan osilasi redaman dalam sistem, hal ini didasarkan pada elektronika daya tegangan sumber *converter* 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 (Asihene, Effah, and Normanyo 2020). 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 (Rajderkar and Chandrakar 2023).

## 2.10 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*) (Universitas Batanghari Jambi et al. 2017).

## 2.11 Prinsip Kerja UPFC

Prinsip kerja UPFC yaitu konverter 2 sebagai fungsi utama UPFC untuk menginjeksikan tegangan sebesar  $V_{pq}$  dengan magnitude  $V_{pq}$  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 (Iskakov, Lavrikov, and Yadykin 2018).



Gambar 8. Model UPFC

### 3. Metode 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 UPFC yang akan di simulasikan pada PSAT untuk mengetahui perbandingan kondisi sebelum dan sesudah mengimplementasikan UPFC dalam Sistem kelistrikan Transmisi 150 kV Bali.

#### A. Proses Pelaksanaan

Alur dalam proses analisis ini dapat dilihat pada Gambar 9 yang telah menjelaskan urutan dalam pengambilan data hingga proses analisis.

- a. 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
- b. Melakukan permodelan berupa Single Line Diagram, meliputi Subsistem 150 kV Bali dengan menggunakan PSAT.
- c. Melakukan input data Beban, data Pembangkit, data Saluran dan data Transformator, yang sesuai dengan data yang diperoleh dari Perusahaan.
- d. 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).
- e. Pada kondisi *basecase* terdapat empat bus yang mengalami jatuh tegangan.
- f. Case 1 melakukan ujicoba pemasangan UPFC pada bus 02 dengan kondisi profil tegangan 0,9099 p.u.
- g. Case 2 melakukan ujicoba pemasangan UPFC pada bus 07 dengan kondisi profil tegangan 0,9457 p.u.

- h. Case 3 melakukan ujicoba pemasangan UPFC pada bus 12 dengan kondisi profil tegangan 0,9422 p.u
- i. Mengetahui kondisi sistem apakah telah sesuai pada batasan yang diinginkan yaitu nilai profil tegangan ( $0,95 \text{ p.u} \leq 1,05 \text{ pu}$ ).

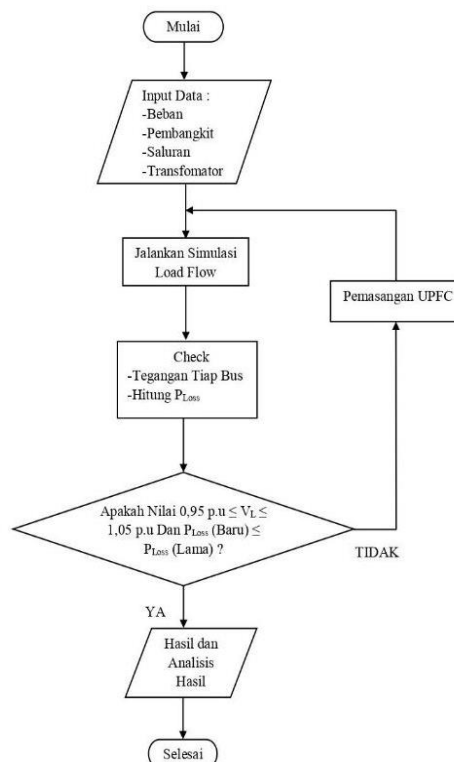
“Ya” : Lakukan pemasangan UPFC. Setelah itu kembali ke proses *Load Flow* untuk menganalisis keadaan sistem setelah dipasang UPFC.

“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.

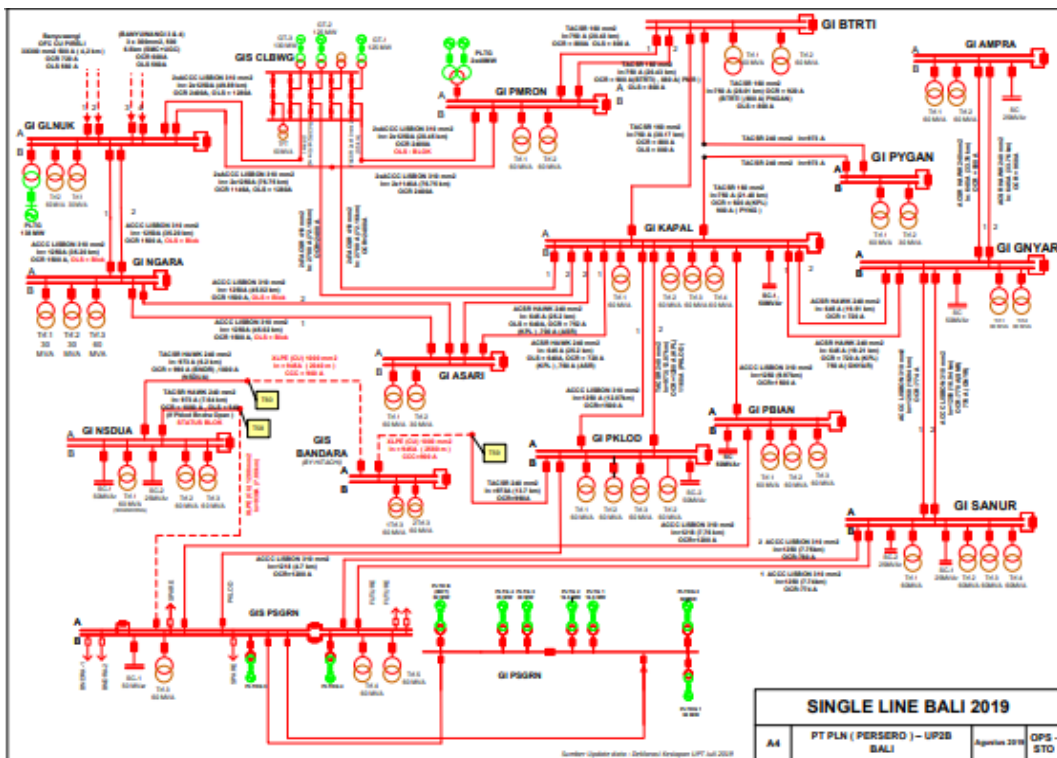


Gambar 9. Flow Chart

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

Untuk menguji keberhasilan metoda yang diusulkan maka pada penelitian ini dilakukan

simulasi menggunakan data praktis yaitu sistem kelistrikan PT PLN (Persero) UP2B Bali 150-kV yang diagram garis tunggalnya ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Single Line Diagram PT PLN (Persero) UP2B Bali 150-kV

C. Data Penelitian

Tabel 1. Data Beban Subsistem Bali 150 kV

No	Gardu Induk	Daya (MVA)	P (MW)	Q (Mvar)
1	Glnuk	90	20,6	6,82
2	Kapal	240	116,1	37,28
3	Pmron	120	45,1	6,9
4	Gnyar	120	78	10,2
5	Nsdua	180	106,1	22,7
6	Ngara	120	27,6	5,3
7	Sanur	240	114,5	25,9
8	Ampra	120	36,4	10,1
9	Psgrn	180	64,3	21,3
10	Btrti	120	38,2	8,9
11	Asari	90	17,8	5,9
12	Pbian	180	62,8	18,1
13	Pyngn	90	52,4	1,8
14	Pklod	240	147,5	46,2
15	Bndra	120	61,1	20,1

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 sebuah kapasitor dengan satuan *Volt Ampere Reaktif* (VAR) dan *Kilo Volt Amper Reaktif* (KVar). Untuk menghemat daya reaktif dapat dilakukan dengan memasang kapasitor pada rangkaian yang memiliki beban bersifat induktif.

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

**Tabel 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 Pamaron	1	45,0
7	PLTDG Pamaron	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



**Tabel 3. Data Saluran Subsistem Bali 150 kV**

No	Transmisi		Teg	Kms	Jenis
			(Kv)		Penghantar
1	Gilimank	Nara-1	150	43.6 9	Accc Lisbon
2	Gilimank	Ngra-2	150	43.6 9	Accc Lisbon
3	Gilimank	Clbwg	150	49.8 9	Accc Lisbon
4	Gilimank	Pmrn-2	150	75.9	Accc Lisbon
5	Clbwg	Pmron	150	28.4 5	Accc Lisbon
6	Clbwg	Kapal-1	150	70.1 8	2xtacsr
7	Clbwg	Kapal-2	150	70.1 8	2xtacsr
8	Negara	Asari-1	150	44.2 3	Accc Lisbon
9	Negara	Asari-2	150	44.2 3	Accc Lisbon
10	Kapal	Asari-1	150	23.3 1	Acsr.Hawk
11	Kapal	Asari-2	150	23.3 1	Acsr.Hawk
12	Kapal	Btrti	150	38.1 7	Tacsr
13	Kapal	Pyngan	150	21.4 8	Tacsr
14	Kapal	Gnyr-1	150	19.2 1	Acsr.Hawk
15	Kapal	Gnyr-2	150	19.2 1	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	16.3 8	Accc Lisbon
22	Gianyar	Ampa-1	150	33.7 6	Acsr.Hawk
23	Gianyar	Ampa-2	150	33.7 6	Acsr.Hawk
24	Sanur	Psgnr-1	150	7.74	Accc Lisbon
25	Sanur	Psgnr-2	150	7.75	Accc Lisbon

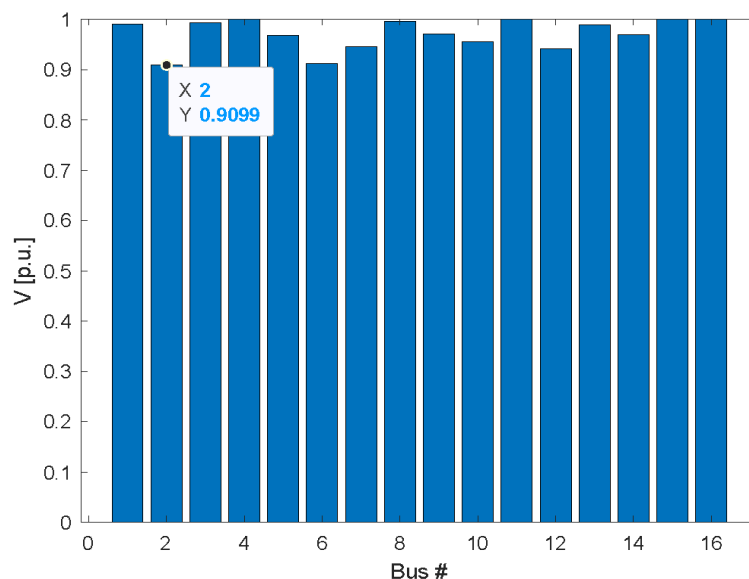
**Tabel 4. Data Kapasitor Subsistem Bali 150 kV**

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

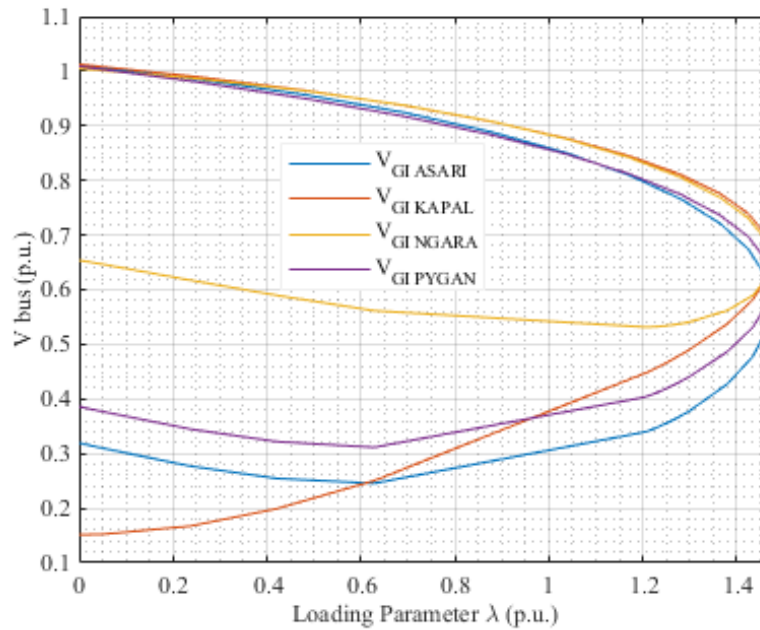
#### 4. Hasil dan Pembahasan

##### 4.1 Hasil Simulasi Profil Tegangan dan CPF Pada Kondisi Basecase

Dari hasil aliran daya CPF pada kondisi *basecase* ditunjukkan pada Gambar 12. Dari Gambar 11 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 12 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  $\lambda_{maks} = 1.4741$  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.



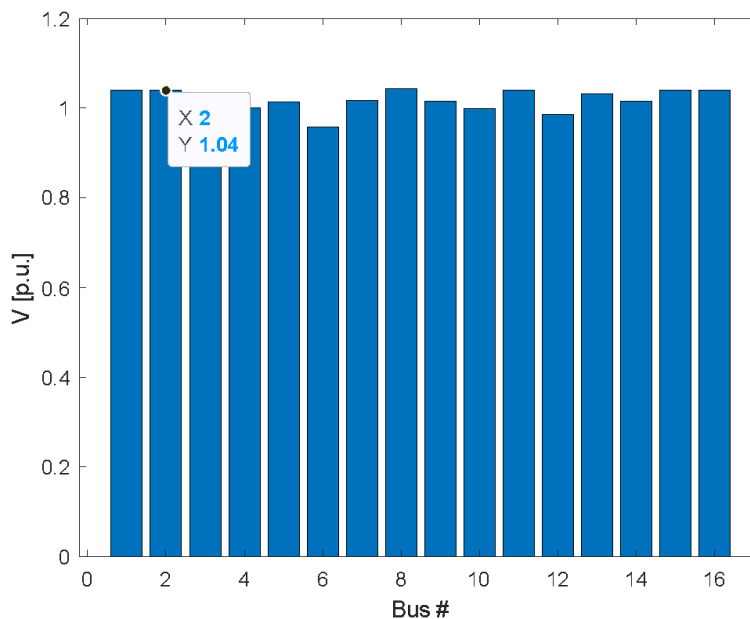
**Gambar 11. Profile Tegangan Untuk Sistem Uji Kelistrikan Bali 16-bus Kondisi Base case**



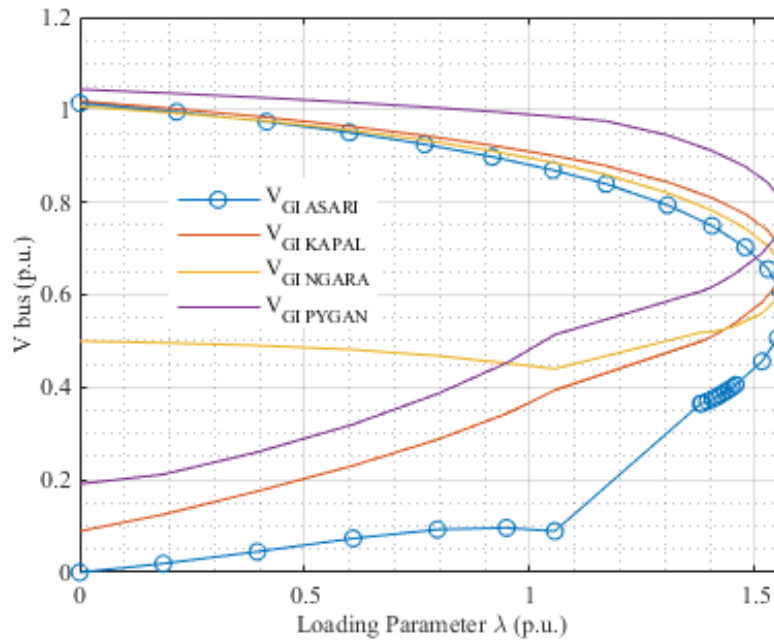
Gambar 12. Kurva PV Untuk Sistem Uji Kelistrikan Bali 16-bus Kondisi *Base case*

#### 4.2 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  $\lambda_{\max} = 1.5644$  p.u. yang berarti terjadi kenaikan sebesar 0,090 p.u. atau (6.12%) 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.



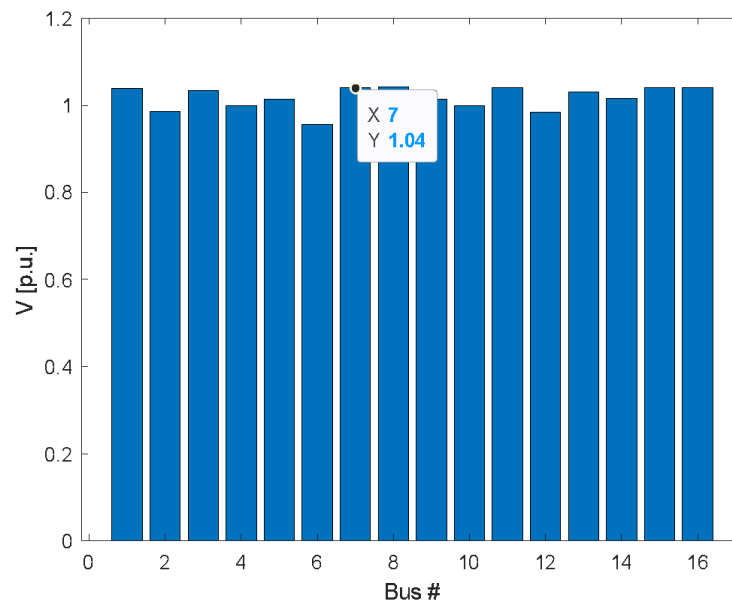
Gambar 13. Profile Tegangan Untuk Sistem Uji Kelistrikan Bali 16-bus Dengan UPFC pada Bus 02



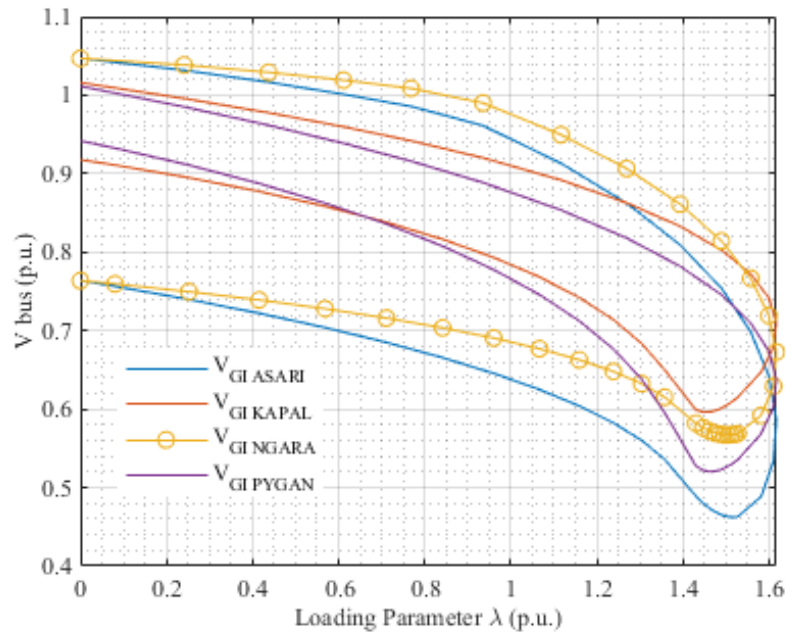
Gambar 14. Kurva PV Untuk Sistem Uji Kelistrikan Bali 16-bus Dengan UPFC pada Bus 02

#### 4.3 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  $\lambda_{max} = 1.6171$  p.u. yang berarti terjadi kenaikan sebesar 0,143 p.u. atau (9,70%) 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.



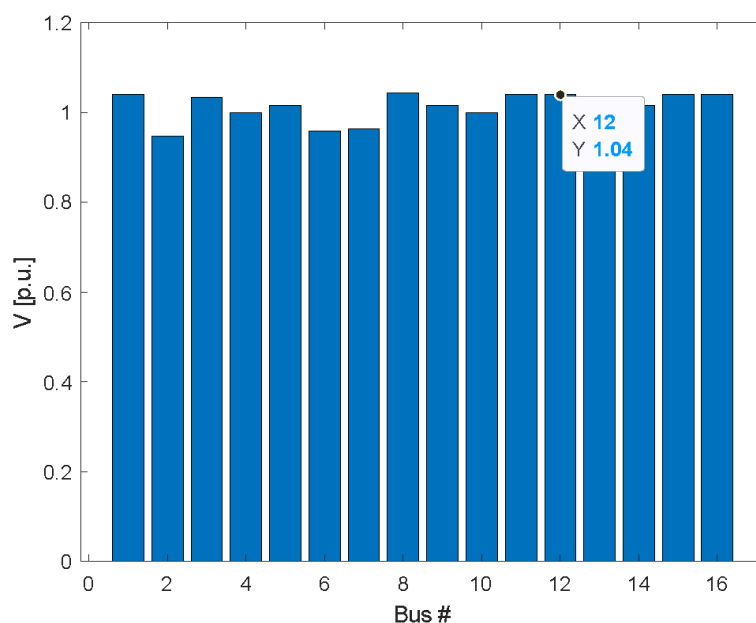
Gambar 15. Profile Tegangan Untuk Sistem Uji Kelistrikan Bali 16-bus Dengan UPFC pada Bus 07



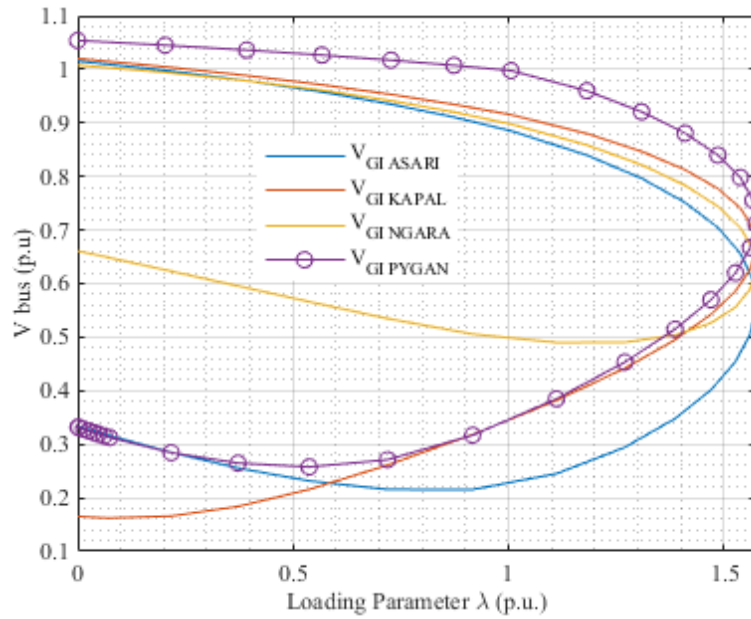
**Gambar 16. Kurva PV Untuk Sistem Uji Kelistrikan Bali 16-bus Dengan UPFC pada Bus 07**

#### 4.4 Hasil Simulasi Profil Tegangan dan CPF Setelah Pemasangan UPFC Case 3

Penempatan UPFC pada bus 12 PYGAN 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  $\lambda_{\max} = 1.5752$  p.u. yang berarti terjadi kenaikan sebesar 0,101 p.u. atau (6,85%) 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**

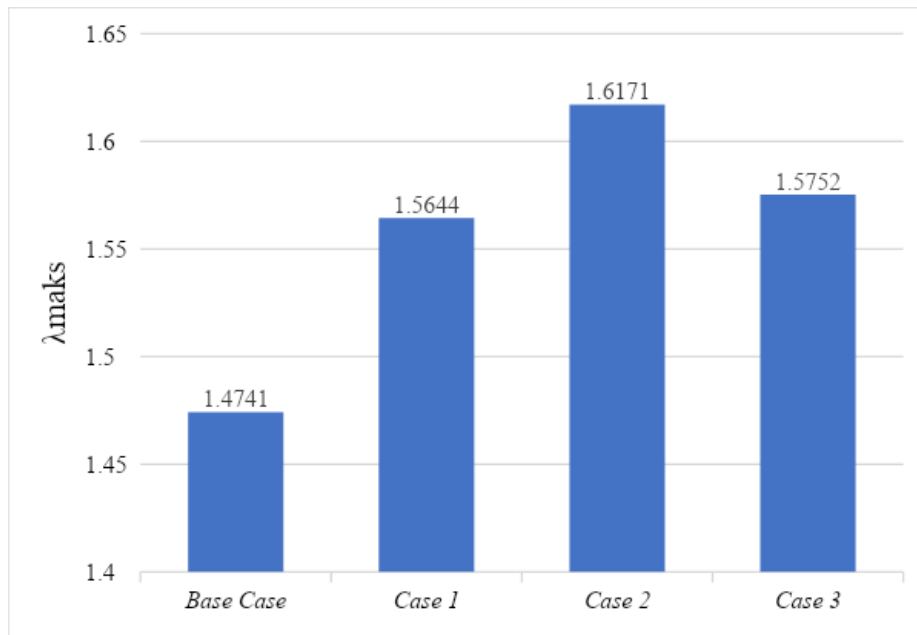


**Gambar 18. Kurva PV Untuk Sistem Uji Kelistrikan Bali 16-bus Dengan UPFC pada Bus 12**

**Tabel 5.  $\lambda_{maks}$  Kondisi Base Case dan Setelah Pemasangan UPFC**

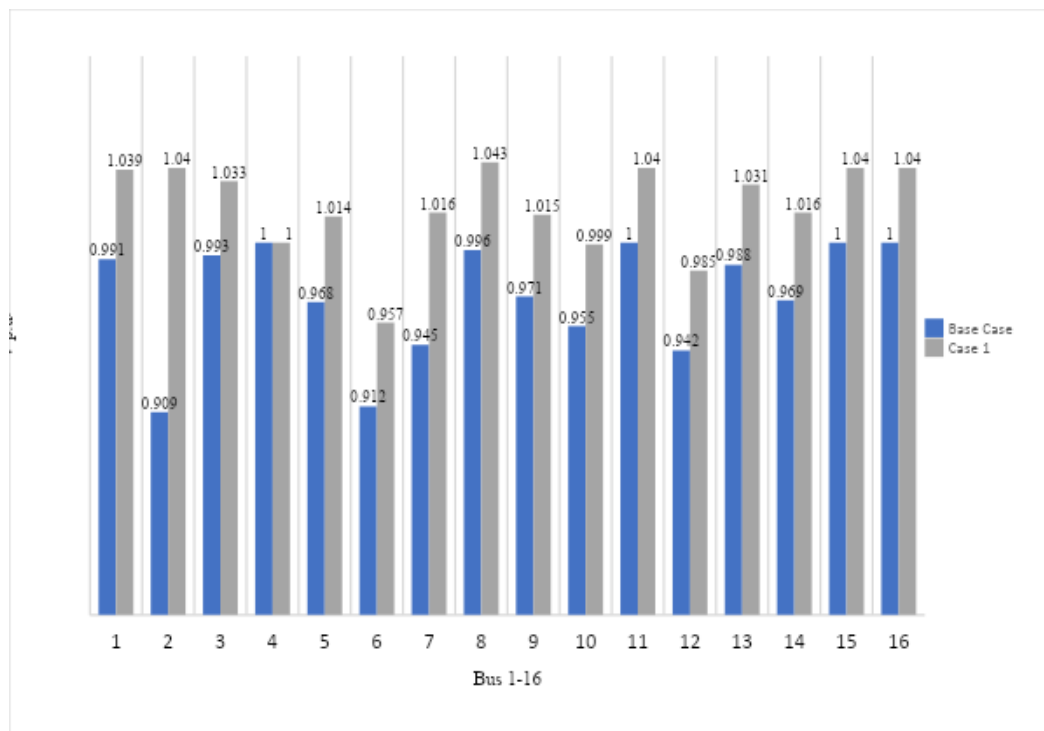
Bus	Kondisi <i>base case</i>	Pemasangan UPFC
02 Asari	$\lambda_{maks} = 1.4741$ p.u.	$\lambda_{maks} = 1.5644$ p.u
07 Negara	$\lambda_{maks} = 1.4741$ p.u.	$\lambda_{maks} = 1.6171$ p.u
12 Pygan	$\lambda_{maks} = 1.4741$ p.u.	$\lambda_{maks} = 1.5752$ p.u

Berdasarkan hasil CPF pada sistem menghasilkan kurva PV dengan nilai *basecase*  $\lambda_{maks} = 1.4741$  p.u., Case 1  $\lambda_{maks} = 1.5644$  p.u., case 2  $\lambda_{maks} = 1.6171$  p.u. dan case 3  $\lambda_{maks} = 1.5752$  p.u grafik dibawah telah diketahui yang mengalami perubahan dalam kondisi sesudah mengimplementasikan UPFC saat sistem beroperasi, mengalami peningkatan nilai  $\lambda_{maks}$  pada setiap mengimplementasikan UPFC.

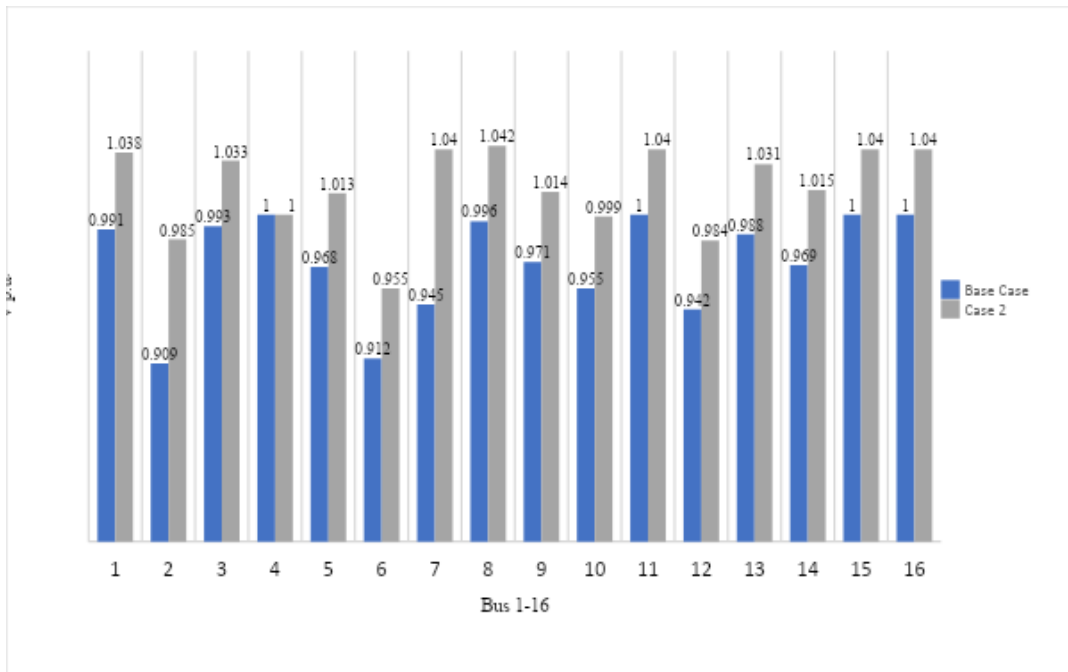


**Gambar 19. Grafik Perbandingan Percobaan**

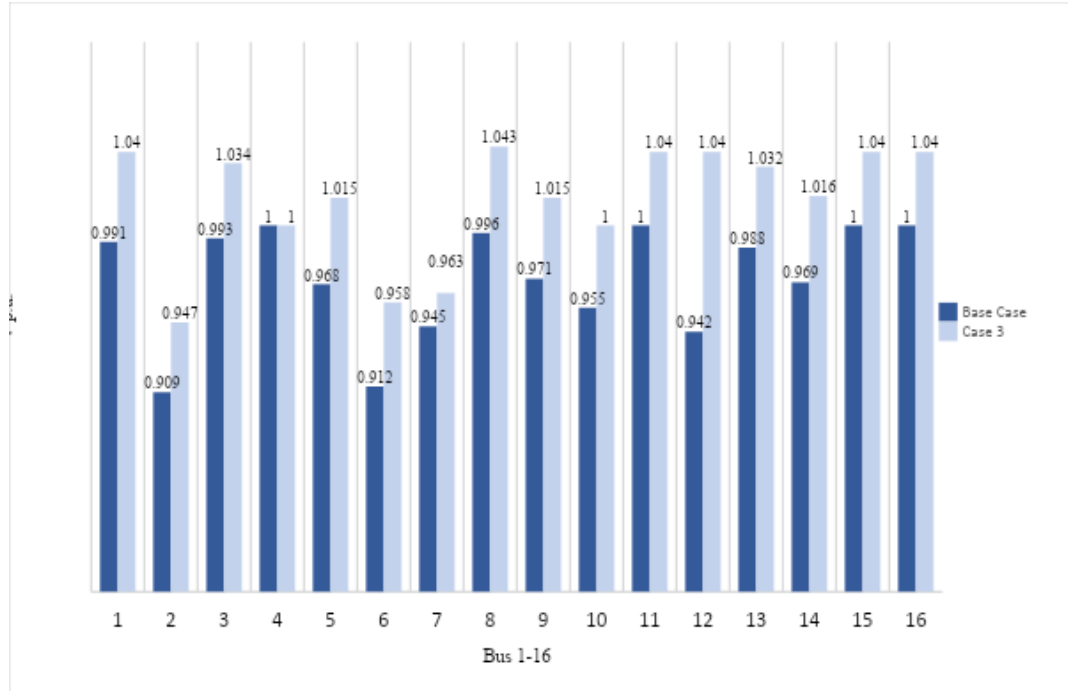
Berdasarkan gambar 19 hasil CPF pada sistem menghasilkan kurva PV dengan nilai *base case*  $\lambda_{maks} = 1.4741$  p.u. *Case 2* NEGARA  $\lambda_{maks} = 1.6171$  p.u grafik diatas telah diketahui yang mengalami perubahan dalam kondisi sesudah mengimplementasikan UPFC saat sistem beroperasi, mengalami peningkatan nilai  $\lambda_{maks}$  pada setiap mengimplementasikan UPFC.



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



**Gambar 21. 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**

## 5. Kesimpulan

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



- a. Penelitian ini berhasil menentukan lokasi terbaik pemasangan UPFC dengan kapasitas 60 Mvar pada bus yang mempunyai tegangan paling kritis yaitu bus 07 NEGARA untuk mendapatkan tingkat pembebanan maksimum atau batas keruntuhan tegangan statis terbesar pada  $\lambda_{\max} = 1,6171$  p.u.
- b. 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 maksimum mendekati nilai 9,70% dibandingkan kondisi *basecase* (tanpa UPFC).
- c. Penempatan UPFC pada jaringan sistem kelistrikan Bali 16-bus dapat meningkatkan stabilitas tegangan statis yang diindikasikan oleh nilai  $\lambda_{\max}$  semakin besar.
- d. Penempatan UPFC juga mampu menjaga profil tegangan terhadap variasi kenaikan beban pada saluran yang sudah kritis sekalipun.
- e. Selain itu juga penempatan UPFC mampu mengurangi *losses* daya aktif dan reaktif yang selanjutnya akan berdampak pada semakin murah atau efisiensinya biaya pembangkitan yang diperlukan.

Dalam pemilihan bus kritis lebih baik untuk penelitian selanjutnya disarankan dengan menggabungkan metode CPF dengan *stability line index* untuk mendapatkan lokasi yang lebih akurat. Pemasangan UPFC selanjutnya diharapkan dapat diperhitungkan dari sisi ekonomisnya.

## Daftar Pustaka

- Abidin, Zainal, Sasongko Pramono Hadi, And Sarjiya Sarjiya. 2014. "Dampak Pemasangan Peralatan Facts Terhadap Stabilitas Tegangan Pada sistem Tenaga Listrik." *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro* 16(3):147–53. Doi: 10.12777/Transmisi.16.3.147-153.
- Aghaei, J., M. Gitizadeh, And M. Kaji. 2012. "Placement And Operation Strategy Of FACTS Devices Using Optimal Continuous Power Flow." *Scientia Iranica* 19(6):1683–90. Doi: 10.1016/J.Scient.2012.04.021.
- Agustini, Ni Putu, Lauhil Mahfudz Hayusman, And I. Made Wartana. 2017. "Analisis Evaluasi Stabilitas Dan Keamanan Sistem Tenaga Dengan Beroperasinya Pltu Celukan Bawang Pada Sistem Kelistrikan Bali 15-Bus Menggunakan."
- Arjana, I. Gede Dyana, And I. Nyoman Setiawan. 2014. "Peningkatan Stabilitas Sistem Transmisi 150 Kv Bali Menggunakan Facts Device."
- Asihene, William Duodu, Francis Bofo Effah, And Erwin Normanyo. 2020. "Utilizing Unified Power Flow Controller For Stability Improvement Of The Electric Power Transmission System Of Ghana." *Jurnal Nasional Teknik Elektro* 9(1):52. Doi: 10.25077/Jnte.V9n1.760.2020.

- Mohd Irwan Yusoff, School Of Electrical System Engineering, Universiti Malaysia Perlis, Malaysia, Siti Rafidah Abdul Rahim, And School Of Electrical System Engineering, Universiti Malaysia Perlis, Malaysia. 2020. "Analisa Aliran Daya Pada Sistem Tenaga Listrik Dengan Metode Fast Decoupled Menggunakan Software Etap." *RELE (Rekayasa Elektrikal Dan Energi) : Jurnal Teknik Elektro* 3(1):37–45. Doi: 10.30596/Rele.V3i1.5236.
- Iskakov, Alexey B., Alexandr V. Lavrikov, And Igor B. Yadykin. 2018. "Fast Calculation Of Modal Interaction In Large Power Systems Using Spectral Decompositions Of Gramians." *IFAC-Papersonline* 51(28):564–69. Doi: 10.1016/J.Ifacol.2018.11.763.
- Issicaba, Diego, And Jorge Coelho. 2016. "Rotational Load Flow Method For Radial Distribution Systems." *International Journal Of Electrical And Computer Engineering (IJECE)* 6(3):1344. Doi: 10.11591/Ijece.V6i3.10083.
- Jaya, Indra, Nadjamuddin Harun, And Muh Tola. N.D. "Improvement Of Power Losses On Transmission Line Using Unified Power Flow Controller (Upfc) For Street Lighting Requirement." 02(09).
- Milano, Federico, Luigi Vanfretti, And Juan Morataya. 2008. "An Open Source Power System Virtual Laboratory: The PSAT Case And Experience." *Education, IEEE Transactions On* 51:17–23. Doi: 10.1109/TE.2007.893354.
- Putranto, Lesnanto Multa, Sasongko Pramono Hadi, And Restu Prima Aridani. 2013. "Pengaruh Penempatan Unified Power Flow Controller Terhadap Kestabilan Tegangan Sistem Tenaga Listrik."
- Rajderkar, Vedashree P., And Vinod K. Chandrakar. 2023. "Security Enhancement Through The Allocation Of A Unified Power Flow Controller (UPFC) In A Power Network For Congestion Management." *Engineering, Technology & Applied Science Research* 13(4):11490–96. Doi: 10.48084/Etasr.6075.
- Universitas Batanghari Jambi, Leily Wustha Johar, Syafii Syafii, And Universitas Andalas. 2017. "Evaluasi Penempatan Distributed Generation Untuk Meningkatkan Keamanan Dan Stabilitas Tegangan Sistem Tenaga Menggunakan Nose Curve Method." *Jurnal Teknik Elektro ITP* 6(2):125–33. Doi: 10.21063/JTE.2017.3133617.
- Wahyudi, Donny. N.D. "Implementasi Unified Power Flow Controller (UPFC) Untuk Meningkatkan Kestabilan Tegangan Dan Meminimalkan Rugi-Rugi Sistem Pada Subsistem Ngimbang 150 Kv."
- Zebua, Osea. 2013. "Penilaian Keamanan Tegangan Sistem Kelistrikan Wilayah Lampung Dengan Menggunakan Kurva P-V." 7(2).