

# PERBAIKAN PROFIL TEGANGAN DENGAN PENEMPATAN SHUNT COMPENSATION MENGGUNAKAN METODE INDEKS PERFORMA KONTINGENSI

Fasda Ilhaq Robbani<sup>\*)</sup>, M. Izzuddin Fadhlurrohman dan K. Zakki Pradana

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta,  
Jl. A. Yani, Mendungan, Pabelan, Kec. Kartasura, Kabupaten Sukoharjo, Jawa Tengah 57162

<sup>\*)</sup>Penulis korespondensi, E-mail: fir942@ums.ac.id

## Abstrak

Pertumbuhan beban yang terus meningkat menjadi tantangan bagi penyedia layanan listrik. Peningkatan beban harus diiringi dengan peningkatan kualitas dan keamanan sistem guna menjaga kestabilan sistem operasi. Peningkatan beban secara terus menerus dapat mengakibatkan ketidakstabilan tegangan. FACTS merupakan peralatan semikonduktor yang dapat memperbaiki kualitas sistem salah satunya adalah kualitas tegangan. Salah satu jenis FACTS yang sering digunakan adalah Static Var Compensator (SVC). SVC merupakan peralatan semiconductor daya yang dapat menyerap dan memberi daya reaktif pada sistem sehingga dapat menjaga kestabilan tegangan pada sistem tersebut. Dengan metode yang diangkat didapatkan saluran yang kritis yaitu pada saluran bus 5 dan bus 6 serta didapatkan pula bus yang kritis yaitu bus 4, bus 5 dan bus 14 sebagai lokasi penempatan SVC yang optimal. Hasil dari studi CPF memiliki hasil yang sama dengan hasil IPK dimana didapatkan salah satu bus yang sensitif, yaitu bus 5. Penempatan SVC pada bus 5 mendapatkan hasil yang terbaik ditandai dengan peningkatan nilai MLP sebesar 8,9% serta terjadi peningkatan tegangan kritis pada bus 5 sebesar 16,28%.

*Kata kunci: Analisis kontingensi; Continuation Power Flow (CPF); Kestabilan tegangan; Maximum loading parameter (MLP); Static Var Compensator (SVC).*

## Abstract

*Increasing load growth challenges electricity service providers. The increase in load must be released with an increase in system quality and security to maintain the operating system's stability. Continuous increase in load can result in voltage instability. FACTS is a semiconductor device that can improve system quality, especially voltage quality. One type of FACTS often used is the Static Var Compensator (SVC). SVC is a power semiconductor device that can absorb and provide reactive power to the system to maintain voltage stability. With the method used, critical channels were obtained on bus 5 and bus 6 channels, and critical buses were also obtained, namely bus 4, bus 5, and bus 14, as optimal SVC placement locations. The results of the CPF study are the same as those of the IPK, where one of the sensitive buses was obtained, namely bus 5. The placement of SVC on bus 5 got the best results, marked by an increase in the MLP value of 8.9% and an increase in critical voltage on bus 5 by 16.28%.*

*Keywords: Continuation Power Flow (CPF); Voltage Stability; Maximum loading parameter (MLP); Static Var Compensator (SVC).*

## 1. Pendahuluan

Peningkatan permintaan akan kebutuhan listrik sejalan dengan meningkatnya kebutuhan manusia. Peningkatan beban dari waktu ke waktu menuntut penyedia layanan untuk lebih responsif dalam menanggapi kenaikan beban. Menurut RUPTL tahun 2022, pertumbuhan listrik di Indonesia terus meningkat tiap tahunnya, pada tahun 2016 sebesar 6,41%, tahun 2017 sebesar 3,57%, tahun 2018 sebesar 5,14% dan tahun 2019 sebesar 4,57% [1].

Peningkatan kebutuhan listrik secara terus menerus dapat mengakibatkan sistem beroperasi mendekati batas maksimal operasi. Upaya penyedia layanan listrik dalam menyesuaikan kebutuhan listrik yang terus meningkat membuat sistem transmisi dituntut untuk beroperasi pada ambang batas maksimumnya [2]. Hal ini dapat mempengaruhi kualitas daya yang disalurkan. Selain itu pembebanan yang mendekati ambang batas maksimumnya dapat menimbulkan ketidakstabilan tegangan[3]. Ketidakstabilan tegangan pada sistem dapat menyebabkan tegangan jatuh pada sisi penerima. Tegangan jatuh merupakan gangguan yang dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik seperti

lampu berkedip, motor bekerja lebih berat sehingga mudah terbakar, pemanas menjadi kurang panas dan sebagainya.

Salah satu upaya perusahaan listrik dalam pencegahan ketidakstabilan tegangan adalah dengan memasang perangkat Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS)[4], [5], [6], [7], [8]. Dengan penempatan peralatan FACTS, kestabilan tegangan dapat ditingkatkan secara lebih efektif. Hal ini disebabkan peralatan FACTS tidak memiliki waktu tunda. Selain itu peralatan FACTS mampu mengontrol besaran tegangan, sudut tegangan, impedansi saluran, aliran daya aktif dan aliran daya reaktif. Ada banyak tipe peralatan FACTS yang sudah teruji kemampuannya dalam mengatasi jatuh tegangan, yaitu static var compensator (SVC)[9], [10], [11], [12], [13], static synchronous compensator (STATCOM)[14], [15], [16], thyristor controlled series capacitor (TCSC)[17], [18], [19] dan unified power flow controller (UPFC)[20], [21], [22], [23], [24].

Penelitian tentang kestabilan tegangan menggunakan peralatan FACTS telah banyak berkembang. Metode yang digunakan secara garis besar dapat dibagi menjadi tiga, yaitu menggunakan metode optimasi klasik, metode metaheuristik dan indeks sensitivitas [25], [26]. Metode optimasi klasik yang sering digunakan seperti Newton-Raphson (NR), Mixed Integer Linear Programming (MILP), Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP) dan Nonlinear Programming (NP). Sedangkan Metode metaheuristik yang sangat populer saat ini yaitu *Genetic Algorithm* (GA) [27], [28], [29], [30], [31], Particle Swarm Optimization (PSO)[8], [24], [32], [33], [34], Whale Optimization Algorithm (WOA)[13], [35] dimana metode ini dapat menentukan tempat, ukuran, rating, dan jenis peralatan FACTS pada sistem yang diuji. Sedangkan penggunaan metode indeks sensitivitas yaitu voltage index stability, maximum loading parameter dan eigen value analysis untuk menentukan bus yang kritis[36], [37].

Terdapat berbagai metode untuk menganalisis stabilitas tegangan menggunakan metode indeks sensitivitas, salah satunya dengan tangean vector index (TVI) [38]. Metode ini didasarkan pada perubahan beban sistem. Selain itu metode ini juga didasarkan pada konsep vektor tangean yang digunakan untuk menghitung perubahan efek beban pada elemen vektor seperti sudut dan tegangan. Pada metode ini  $dV_i$  adalah perubahan tegangan bus  $i$ , dan  $dL$  adalah perubahan beban. Nilai TVI sama dengan 0 jika nilai turunannya mendekati tak hingga.

Metode Line stability index (Lmn) juga sering digunakan untuk menentukan kestabilan pada sistem[39], [40]. Metode ini didasarkan pada ide transmisi daya pada single line. Metode ini dapat memberikan ranking bus pada sistem yang diuji dimana semakin kecil nilai index menunjukkan nilai kestabilan yang semakin baik dan

sebaliknya. Ketika nilai index meningkat mendekati nilai 1, maka saluran tersebut lebih dekat dengan ketidakstabilan.

Metode index stability (Lp) dirumuskan oleh M.Moghavvemi dan M.O.Faruque yang didasarkan pada penurunan rumus dasar dari index stabilitas saluran [41]. Pada metode ini menggunakan sebuah single line diagram pada sistem distribusi radial dengan mereduksinya menjadi dua sistem bus dan merepresentasikan model jaringan ekuivalen  $\pi$ . Nilai dari Lp yaitu antara 0 dan 1. Jika Lp mendekati 1 maka sistem mendekati keadaan yang tidak stabil, sebaliknya jika Lp mendekati 0 maka sistem berada pada kestabilan.

Metode novel line stability index (NLSI) dilakukan oleh A.Yazdanpanah-Goharrizi dan R. Ashghari untuk penilaian stabilitas tegangan sistem tenaga [42]. Metode ini merupakan modifikasi pada metode index stability (Lp) dimana mengabaikan admitansi shunt dan mengasumsikan bahwa nilai sudut tegangan antara pengirim dan penerima bernilai sangat kecil (diasumsikan 0). Metode ini diaplikasikan pada sistem IEEE 30 bus, dimana ketika nilai NLSI mendekati 1 maka saluran mendekati batas stabilitas yang menyebabkan ketidakstabilan.

Metode fast voltage stability index (FVSI) dilakukan oleh Ismail Musirin dan Titik Khawa Abdul Rahman digunakan untuk menunjukkan stabilitas tegangan pada suatu sistem[43], [44], [45], [46], [47]. FVSI didasarkan pada persamaan arus di saluran dalam sistem dua bus. Dimana bus pengirim dijadikan menjadi referensi dan nilai diskriman diatur lebih besar atau sama dengan 0. Saluran yang menunjukkan nilai FVSI mendekati 1 menandakan bahwa saluran tersebut mendekati ketidakstabilan. Jika nilai FVSI pada saluran melebihi 1 maka sistem akan mengalami penurunan tegangan secara tiba-tiba dan dapat menyebabkan tegangan runtuh.

Metode continuation power flow (CPF) merupakan salah satu metode yang umum digunakan untuk mengevaluasi kestabilan tegangan. Metode CPF telah banyak digunakan untuk menentukan bus kritis dan menggambarkan kurva PV pada sistem yang diuji [48], [49], [50], [51], [52]. Metode CPF menggunakan studi aliran daya untuk menentukan bus yang kritisi. CPF diterapkan ketika matriks Jacobian dari persamaan aliran daya mencapai singularitas pada titik bifurkasi simpul pelana/saddle node bifurcation (SNB). Metode CPF menggunakan bantuan predictor dan korektor untuk mendapatkan nilai atau solusi vektor tangean yang diinginkan. Solusi tangent vektor didapatkan ketika prediktor dan korektor mendapatkan nilai di titik maksimumnya dimana  $0 \leq \lambda \leq \lambda_{kritis}$

Indeks performa kontingensi (IPK) merupakan suatu metode untuk menentukan ranking suatu saluran yang

sensitif pada suatu sistem ketika terjadi kontingensi [53], [54]. Analisis kontingensi dengan metode IPK dilakukan untuk menguji keamanan operasi sistem saat terjadi gangguan. IPK terdiri dari indeks saluran dan indeks bus. Saluran tersebut dinyatakan sensitif terhadap ketidakstabilan ketika nilai IPK > 1. Sebaliknya saluran tersebut dinyatakan aman ketika IPK < 1.

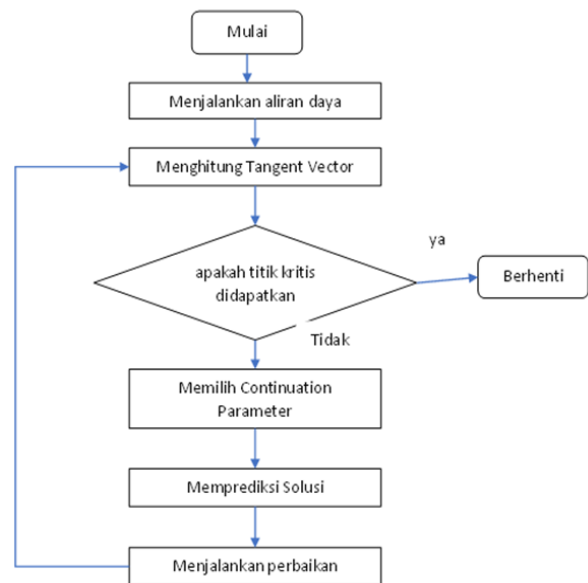
Metode optimasi klasik dan metode indeks sensitivitas yang sudah digunakan pada penelitian sebelumnya umumnya hanya menentukan dimana letak bus yang sensitif atau jaringan yang sensitif saja. Pada penelitian ini, IPK digunakan untuk mencari saluran yang sangat sensitif pada sistem. IPK didapatkan dari menggabungkan nilai index saluran dan nilai index tegangan bus. Hasil dari metode IPK yaitu ranking saluran yang sensitif. Selain itu penelitian ini juga menggunakan metode CPF untuk melakukan analisis kestabilan tegangan serta mencocokkan hasil dari metode IPK dengan metode CPF. Dengan menggabungkan kedua metode tersebut didapatkan tidak hanya letak bus yang sensitif tetapi juga saluran yang sensitif.

## 2. Bahan dan Metode

Pengujian menggunakan data sistem IEEE 14 bus yang diperoleh dari referensi [55]. Sistem tersebut memiliki 3 pembangkit yang berada pada bus 1, bus 2 dan bus 3. Konfigurasi jumlah total bus dari sistem tersebut adalah 14 bus dan jumlah total dari salurannya adalah 20 saluran. Terdapat modifikasi pada sistem yang diuji dimana beban daya aktif dan beban daya reaktif ditingkatkan menjadi 1,9 kali dari nilai semula atau *load scale* sebesar 190% pada masing-masing bus. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan nilai yang lebih kritis dengan skenario beban yang terus meningkat.

### 2.1. Continuation Power Flow

Proses dalam menggunakan metode CPF dimulai dengan menjalankan aliran daya dengan data sistem yang sudah ada dengan parameter lokal yang selanjutnya akan memplot lintasan kurva PV. Setelah itu prediktor bekerja mencari nilai *tangent vector*. Nilai *tangent vector* dikoreksi apakah solusi tersebut berada pada titik kritis. Jika solusi *tangent vector* tersebut berada pada titik kritis, maka nilai tersebut benar dan proses berhenti. Jika nilai *tangent vector* dari prediktor tidak berada pada titik kritis maka akan dilakukan koreksi pada nilai tersebut. Selanjutnya prediktor akan memilih *continuation parameter* lagi dan mengulang proses seperti di awal. Persamaan koreksi solusi *tangent vector* dari prediktor atau yang diprediksi ditunjukkan pada persamaan 1, persamaan 2 dan persamaan 3. Diagram alir dari proses CPF ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir *continuation power flow*

$$\Delta P_i = \lambda(P_{Gi} - P_{Li}) - P_i = \lambda P_i^{esp} - P_i = 0 \quad (1)$$

$$\Delta Q = \lambda(Q_{Gi} - Q_{Li}) - Q_i = \lambda Q_i^{esp} - Q_i = 0 \quad (2)$$

$$0 \leq \lambda \leq \lambda_{critical} \quad (3)$$

Analisis stabilitas tegangan dilakukan dengan metode CPF yang diawali dengan titik awal operasi stabil kemudian beban ditingkatkan sesuai dengan faktor  $\lambda$  hingga titik linear aliran daya diperoleh. Proses ini ditunjukkan pada persamaan 4 dan persamaan 5.

$$P_L = P_{L0} (1 + \lambda) \quad (4)$$

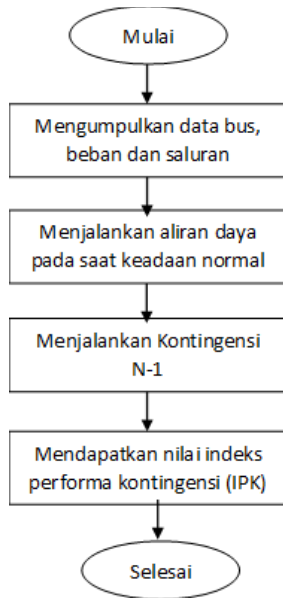
$$Q_L = Q_{L0} (1 + \lambda) \quad (5)$$

- $Q_{Li}$  : Daya reaktif pada sumber.
- $Q_{li}$  : Daya reaktif pada beban.
- $P_{Lo}$  : Daya aktif beban dasar.
- $Q_{Lo}$  : Daya Reaktif beban dasar.
- $P_L$  : Daya aktif beban pada bus L.
- $Q_L$  : Daya reaktif beban pada bus L.
- $P_i$  : Daya aktif riil beban pada bus i.
- $Q_i$  : Daya reaktif riil beban pada bus i.

### 2.2. Indeks Performa Kontingensi

Nilai indeks performa kontingensi adalah penjumlahan dari nilai indeks tegangan dan nilai indeks pembebanan saluran [25]. Formula dari IPK ditunjukkan pada persamaan 6. Perhitungan untuk mendapat nilai IPK pada dasarnya adalah hasil dari analisis aliran daya ketika terjadi kontingensi N-1 pada saluran. Proses yang dilakukan dalam mencari nilai IPK diawali dengan pengumpulan data pada sistem yang akan diuji. Selanjutnya menjalankan studi aliran daya saat keadaan sistem belum terjadi kontingensi. Setelah itu lakukan lagi studi aliran daya ketika sistem terjadi kontingensi N-1

pada saluran. Proses ini diulang pada tiap saluran secara bergantian. Dari data hasil studi aliran daya tersebut dapat dicari indeks tegangan dan indeks saluran pada setiap N-1. Tahap selanjutnya adalah menjumlahkan nilai indeks tegangan dan indeks saluran untuk mendapatkan nilai indeks performa kontingensi. Urutkan hasil IPK pada tiap-tiap N-1 dari nilai tertinggi ke terendah. Diagram alir dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir indeks performa kontingensi

$$IPK = \sum_{i=1}^{nl} W_k \left( \frac{|S_{ij-k}|}{S_{ij-k}^{limit}} \right)^n + \sum_{k=1}^{nb} W_k \left( \frac{|V_k - V'_k|}{\Delta V_k} \right)^m \quad (6)$$

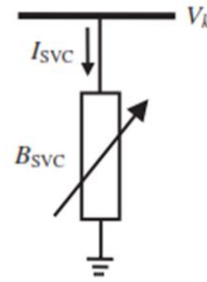
Dimana

- IPK : Indeks performa kontingensi
- $W_k$  : Faktor prioritas saluran (ditetapkan 1)
- nl : Jumlah saluran
- $S_{ij-k}$  : Daya yang mengalir pada saluran i menuju j (MVA)
- $S_{ij-k}^{limit}$  : Daya penghantar pada saluran I menuju j (MVA)
- nb : Jumlah bus
- n : Derajat signifikansi Indeks Saluran
- m : Derajat signifikansi indeks Tegangan
- $V_k$  : Besaran tegangan di bus k
- $V'_k$  : Tegangan referensi di bus k
- $\Delta V_k$  : Selisih nilai tegangan maksimal dan minimal (p.u.)

### 2.3. Static Var Compensator (SVC)

Secara garis besar sebuah SVC terdiri dari *capasitor*, *reactor* dan *thyristor* yang bekerja sebagai sakelar. *Thyristor* yang bekerja sebagai sakelar yang diatur waktunya untuk membuka dan menutup dengan mengontrol sudut penyalan melalui tegangan kisinya.

Model yang paling umum pada SVC adalah *fix capacitor* dan *thyristor control reactor* (TCR)[4]. Model yang digunakan pada gambar 3, adalah SVC sebagai *variabel var resource*, dimana operator dapat mengatur batas maksimum dan minum daya reaktif SVC sesuai dengan nilai *Susceptance* induktif (B ind) dan *susceptance* kapasitif (B cap) pada SVC. Terminal dari SVC ditunjukkan pada gambar 5.

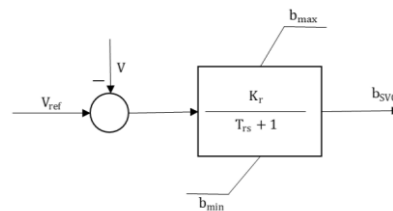


Gambar 3. Model SVC

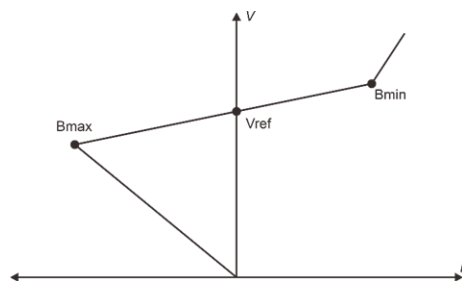
Regulator SVC diasumsikan adalah sebuah *time constant regulator* (gambar 4). Pada model ini total reaktansi SVC diasumsikan pada persamaan 7 dan jumlah daya reaktif pada persamaan 8.

$$\dot{b}_{SVC} = (K_r(V_{ref} - V) - b_{SVC})/T_r \quad (7)$$

$$Q = b_{SVC}V^2 \quad (8)$$



Gambar 4. Regulator SVC



Gambar 5. Terminal SVC

## 3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini menguji sistem IEEE 14 yang dimodifikasi (*modified*) dengan *load scale* 190%. Tahapan pertama, yaitu melakukan studi kontingensi N-1 pada tiap saluran

untuk mendapatkan nilai indeks saluran dan nilai indeks tegangan. Tahapan kedua, yaitu melakukan studi CPF untuk mendapatkan nilai bus kritis dan nilai maximum loading parameter (MLP).

Sistem yang diuji adalah sistem normal dan sistem yang terjadi kontingensi. Dalam penelitian ini kontingensi yang digunakan adalah kontingensi saluran N-1 dimana ada salah satu saluran yang tidak terhubung. Pemilihan saluran mana yang akan terjadi kontingensi diambil dari hasil simulasi kontingensi, yaitu saluran dengan nilai IPK tertinggi. Simulasi indeks performa kontingensi tidak dapat dilakukan ketika sistem sudah terjadi kontingensi disebabkan hasil aliran daya yang tidak konvergen. Dalam skenario ini penempatan SVC pada sistem menggunakan studi CPF. SVC dipasang paralel pada sistem atau lebih tepatnya dipasang pada bus yang kritis.

### 3.1. Hasil Perhitungan Indeks Kontingensi

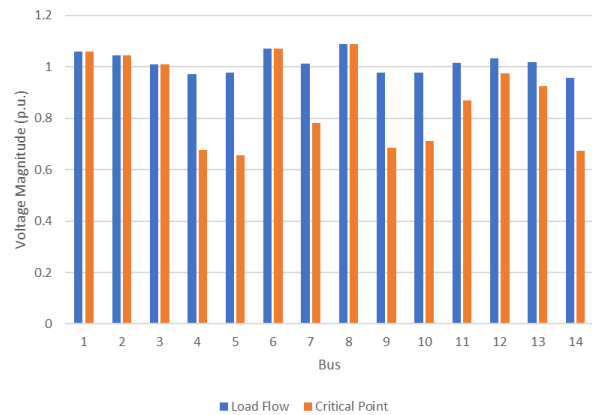
**Tabel 1. Ranking Indeks Performa Kontingensi**

Saluran	Indeks Saluran	Indeks Tegangan	Indeks performa
05-06	9,049	1,499	10,548
02-03	8,142	1,584	9,727
07-09	6,119	1,900	8,020
06-13	5,357	1,723	7,081
02-04	5,607	1,449	7,057
06-11	4,856	2,125	6,981
04-05	5,506	1,259	6,765
04-07	5,306	1,322	6,629
04-09	5,191	1,181	6,373
06-12	4,812	1,391	6,203
02-05	4,673	1,315	5,988
09-10	4,496	1,436	5,932
09-14	5,116	0,813	5,929
10-11	4,527	1,395	5,922
01-05	4,545	1,337	5,883
07-08	4,620	1,070	5,690
03-04	4,322	1,243	5,566
13-14	4,545	0,982	5,527
12-13	4,412	1,087	5,499

Dari hasil studi indeks kontingensi didapatkan nilai indeks saluran, indeks tegangan dan indeks performa kontingensi tiap saluran. Dari semua saluran pada tabel 1, Saluran 5-6 memiliki nilai IPK tertinggi yaitu 10,548. Dalam hal ini saluran tersebut memiliki nilai kegawatan yang paling besar diantara saluran lainnya. Dengan nilai tersebut bus 5 atau 6 merupakan calon bus yang akan dipasang SVC. Jika kita melihat pada *data sheet* IEEE 14, dapat diketahui jika bus 5 merupakan salah satu bus sentral yang memiliki 4 saluran (5-6, 1-5, 4-5 dan 2-5). Selain itu bus 5 tidak memiliki generator ataupun *reactive compensator*. Saluran 1-5 cenderung baik disebabkan pada bus 1 terdapat generator, hal ini sama seperti pada saluran 2-5 dimana pada bus 2 terdapat generator. Maka besar kemungkinan bus 5 merupakan bus yang optimal untuk lokasi pemasangan SVC.

### 3.2. Hasil Perhitungan Load Flow dan Continuation Power Flow

Hasil menjalankan studi *load flow* dan CPF pada sistem IEEE 14 bus *modified* tanpa menambahkan SVC dapat dilihat pada gambar 6. Hasil dari Studi *load flow* dengan diagram warna biru menunjukkan nilai profil tegangan yang baik di setiap bus. Sedangkan diagram warna oranye adalah nilai tegangan kritis.

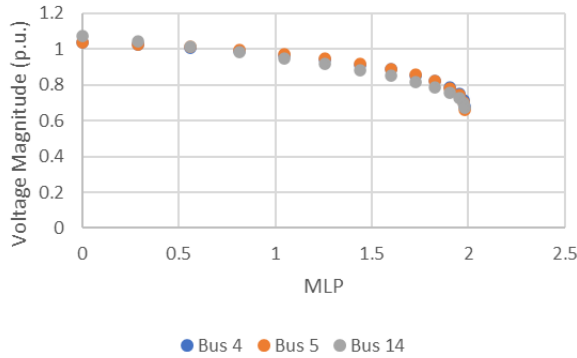


**Gambar 6. Profil tegangan ketika sistem dalam keadaan normal**

Diagram warna oranye pada gambar 6 menunjukkan nilai tegangan kritis pada tiap bus tidak bernilai sama, hal ini disebabkan perbedaan tipe tiap bus. Bus PV seperti bus 1, bus 2 dan bus 3 cenderung memiliki nilai tegangan kritis yang baik, yaitu 1,06 p.u., 1,07 p.u dan 1,09 p.u. Hal ini disebabkan terdapat generator pada bus tersebut. Bus 6 dan bus 8 memiliki nilai tegangan kritis yang baik juga, yaitu 1,07 p.u. dan 1,09 p.u., disebabkan pada bus tersebut terdapat daya reaktif kompensator yang berfungsi untuk memberikan suntikan daya reaktif guna menjaga nilai tegangan bus tersebut sesuai dengan nilai yang ditentukan. Bus 4, bus 5, bus 7, bus 8, bus 9, bus 10, bus 11, bus 12, bus 13 dan bus 14 adalah bus PQ yang memiliki nilai tegangan kritis yang rendah yaitu 0,677 p.u., 0,657 p.u., 0,783 p.u., 0,686 p.u., 0,711 p.u., 0,870 p.u., 0,970 p.u., 0,940 p.u. dan 0,673 p.u. Gambar 6 menunjukkan tiga bus yang kritis, yaitu pada bus 4, bus 5 dan bus 14.

PV *curve* (*nose curve*) dari hasil studi CPF pada bus IEEE 14 dapat dilihat pada Gambar 7. Sumbu x adalah parameter pembebanan maksimum (MLP) dari sistem tersebut, satuannya adalah p.u. Sedangkan sumbu y adalah nilai tegangan sistem ketika sistem menuju keruntuhan, satuannya adalah p.u. Gambar 7 menunjukkan nilai MLP ( $\lambda$ ) sebesar 1,980 p.u., artinya sistem yang diuji dapat menahan peningkatan beban hingga sistem runtuh pada nilai 1,980 p.u. Selain itu gambar 7 juga menunjukkan profil tegangan pada tiga bus terburuk saat mengalami penurunan tegangan hingga pada titik

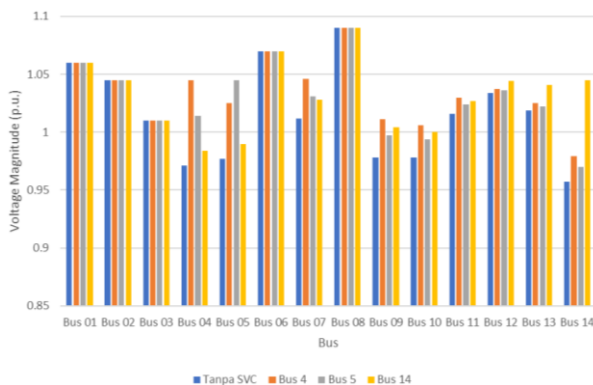
kritisnya. Berdasarkan hasil simulasi pada gambar 7, nilai tegangan kritis pada bus 4, bus 5 dan bus 14 secara berurutan ketika sistem akan runtuh adalah 0,677 p.u, 0,657 p.u, dan 0,673 p.u. Artinya ketika sistem runtuh, profil tegangan pada bus 4, bus 5 dan bus 14 adalah 0,677 p.u, 0,657 p.u, dan 0,673 p.u secara berurutan.



**Gambar 7. PV Curve tanpa SVC**

### 3.3. Hasil Penempatan SVC

SVC yang digunakan memiliki ukuran sebesar 4,2 MVar. Pemberian SVC pada bus yang kritis, yaitu bus 4, bus 5 dan bus 14, diperoleh nilai profil tegangan yang meningkat pada studi aliran daya pada gambar 8. Profil tegangan tiap bus pada setiap penempatan SVC di bus 4, bus 5, dan bus 14 disajikan pada gambar 8. Penempatan SVC pada bus 4, 5, dan 14 dapat meningkatkan nilai profil tegangan pada bus tersebut dan bus lain di sekitarnya.

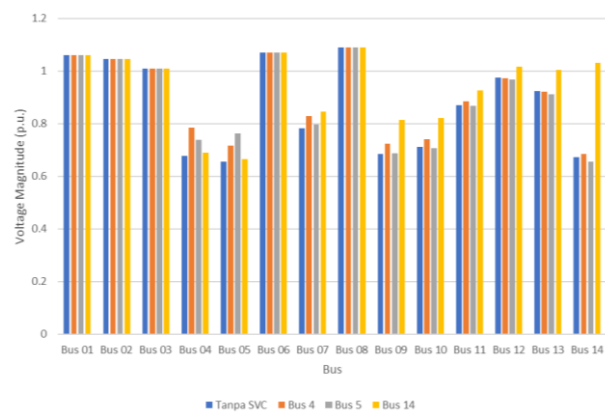


**Gambar 8. Perbandingan profil tegangan studi aliran daya**

Pada gambar 8, nilai profil tegangan bus 4 sebelum diberi SVC adalah 0,971 p.u. (warna biru) dan setelah SVC dipasang pada bus 4, nilai profil tegangan menjadi 1,045 p.u. (warna oranye). Peningkatan juga terjadi pada bus 5 setelah bus tersebut dipasang SVC. Sebelum dipasang SVC, profil tegangan bus 5 adalah 0,977 p.u. (warna biru) dan setelah dipasang SVC pada bus 5, nilai profil tegangan bus 5 menjadi 1,025 p.u. (warna abu-abu).

Peningkatan profil tegangan juga terjadi pada bus 14 setelah bus tersebut dipasang SVC. Sebelum dipasang SVC, profil tegangan bus 14 adalah 0,957 p.u. (warna biru). Setelah dipasang SVC pada bus 14, nilai profil tegangan bus 14 menjadi 0,979 p.u. (warna kuning).

Dengan menjalankan studi CPF, penempatan SVC pada bus kritis (bus 4, bus 5 dan bus 14) juga dapat meningkatkan nilai tegangan kritis bus tersebut. Gambar 9 menunjukkan nilai tegangan kritis pada tiap bus saat sebelum dan sesudah penempatan SVC.



**Gambar 9. Perbandingan nilai tegangan kritis pada tiap bus setelah melakukan studi CPF**

Pada gambar 9 dapat dilihat bahwa penempatan SVC pada bus yang kritis dapat meningkatkan tegangan kritis pada bus tersebut sebelum sistem mengalami keruntuhan. Dengan penempatan SVC pada bus 4, didapatkan peningkatan nilai profil tegangan kritis dari 0,677 p.u. (warna biru) menjadi 0,784 p.u. (warna oranye). Pada penempatan SVC pada bus 5, didapatkan peningkatan nilai profil tegangan kritis dari 0,657 p.u. (warna biru) menjadi 0,716 p.u. (warna abu-abu). Sedangkan penempatan SVC pada bus 14 menyebabkan peningkatan nilai profil tegangan kritis dari 0,673 p.u. (warna biru) menjadi 0,686 p.u. (warna kuning). Penempatan SVC pada bus yang kritis juga dapat meningkatkan nilai tegangan kritis pada bus yang berada dekat dengan bus tersebut.

**Tabel 2. Nilai MLP ketika sistem normal**

Kondisi	MLP (p.u.)	Peningkatan	
		Selisih (p.u.)	%
Tanpa SVC	1,980		
Bus 4	2,148	0,168	8,4
Bus 5	2,158	0,178	8,9
Bus 14	2,036	0,056	2,8

Paremeter pembebanan maksimal atau *maximum loading parameter* (MLP) adalah parameter kemampuan maksimum suatu sistem untuk dapat menerima pembebanan sebelum sistem tersebut mengalami keruntuhan. Pemasangan SVC pada bus kritis dapat

memberikan peningkatan nilai MLP yang cukup baik. Pada tabel 2, kemampuan MLP pada sistem tanpa SVC adalah 1,980 p.u., setelah pemasangan SVC pada bus 4 terdapat peningkatan nilai MLP sebesar 8,4%. Selain itu pemasangan SVC pada bus 5 dapat meningkatkan nilai MLP sebesar 8,9%. Serta pemasangan SVC pada bus 14 dapat meningkatkan nilai MLP sebesar 2,8%. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan penempatan SVC pada bus 5 merupakan pilihan yang terbaik ditandai dengan peningkatan nilai MLP yang paling besar, yaitu sebesar 8,9%.

Pada table 2, saluran 5-6 merupakan peringkat pertama pada urutan indeks performa kontingensi. Hal ini menunjukkan bahwa saluran 5-6 sangat sensitif terhadap ketidakstabilan tegangan. Hal ini sesuai dan berkaitan dengan hasil studi CPF pada gambar 9 dimana bus 5 adalah bus yang memiliki nilai tegangan terkritis dari bus yang lainnya. *Datasheet* single line diagram IEEE 14 bus menunjukkan bahwa bus 5 merupakan salah satu bus sentral yang memiliki 4 saluran (5-6, 1-5, 4-5 dan 2-5). Selain itu bus 5 tidak memiliki generator ataupun *reactive compensator*. Saluran 1-5 cenderung baik disebabkan pada bus 1 terdapat generator, hal ini sama seperti pada saluran 2-5 dimana pada bus 2 terdapat generator.

#### 4. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah metode IPK dapat menyajikan ranking dari kegawatan tiap saluran pada sistem. Ranking yang tertinggi mempunyai arti bahwa saluran tersebut sangat sensitif dalam proses aliran daya pada sistem tersebut. Penempatan dan ukuran SVC pada sistem yang diuji dapat ditentukan dengan menjalankan metode IPK atau CPF. Melalui metode CPF didapatkan bus yang kritis. Sedangkan dengan menggunakan metode IPK didapatkan saluran yang sensitif. bus kritis atau saluran kritis, keduanya merupakan kandidat yang baik untuk penempatan peralatan FACTS. Ukuran nilai SVC diatur lalu dijalankan pada metode CPF untuk mengetahui nilai SVC yang optimal. Menjalankan studi CPF terbukti dapat menunjukkan bus yang kritis dimana didapatkan tiga bus kritis, yaitu bus 4, bus 5 dan bus 14. Studi indeks performa kontingensi (IPK) dapat menentukan urutan peringkat saluran yang sensitif terhadap ketidakstabilan tegangan. Saluran 5-6 merupakan saluran dengan nilai indeks saluran dan indeks performa kontingensi tertinggi. Hasil dari studi CPF menunjukkan hal yang sama dengan hasil IPK dimana didapatkan salah satu bus yang sensitif, yaitu bus 5. Penempatan SVC pada bus 5 ditandai dengan peningkatan nilai MLP sebesar 8,9% serta terjadi peningkatan tegangan kritis pada bus 5 sebesar 16,28%. Dengan demikian, meskipun metode IPK dan CPF adalah metode konvensional, keduanya masih relevan untuk menentukan penempatan peralatan FACTS baik penempatan di saluran maupun penempatan di bus pada suatu sistem yang diuji.

#### Referensi

- [1]. PLN, "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030.," *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2021-2030*, pp. 2019–2028, 2021.
- [2]. C. Hermanu, M. Nizam, and F. I. Robbani, "Optimal Placement of Unified Power Flow Controllers (UPFC) for Losses Reduction and Improve Voltage Stability Based on Sensitivity Analysis in 500 kV Java-Bali Electrical Power System," *Proceeding - 2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology, ICEVT 2018*, pp. 83–87, 2019, doi: 10.1109/ICEVT.2018.8628455.
- [3]. P. Kundur, *Power System Stability and Control*, Vol 1. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [4]. F. I. Robbani, S. P. Hadi, and L. M. Putranto, "Placement of Various FACTS Devices in Voltage Stability Analysis Based on Critical Bus," *AIP Conf Proc*, vol. 2865, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1063/5.0185325/2931908.
- [5]. S. A. Mohamed and A. M. M. Abdel-Rahim, "Comprehensive Study of Reactive Power and its Compensation Using Shunt-Connected FACTS Device," *2019 21st International Middle East Power Systems Conference, MEPCON 2019 - Proceedings*, pp. 348–353, 2019, doi: 10.1109/MEPCON47431.2019.9008033.
- [6]. S. Gasperic and R. Mihalic, "Estimation of the efficiency of FACTS devices for voltage-stability enhancement with PV area criteria," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 105, no. May 2018, pp. 144–156, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.01.039.
- [7]. A. AL Ahmad and R. Sirjani, "Optimal placement and sizing of multi-type FACTS devices in power systems using metaheuristic optimisation techniques: An updated review," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 611–628, 2019, doi: 10.1016/j.asej.2019.10.013.
- [8]. K. Kavitha and R. Neela, "Optimal allocation of multi-type FACTS devices and its effect in enhancing system security using BBO, WIPSO & PSO," *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 777–793, 2018, doi: 10.1016/j.jesit.2017.01.008.
- [9]. B. Singh and G. Agrawal, "Enhancement of voltage profile by incorporation of SVC in power system networks by using optimal load flow method in MATLAB/Simulink environments," *Energy Reports*, vol. 4, pp. 418–434, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.egypr.2018.07.004.
- [10]. R. Jena, S. C. Swain, and R. Dash, "Power flow simulation & voltage control in a SPV IEEE-5 bus system based on SVC," *Mater Today Proc*, vol. 39, pp. 1934–1940, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.374.
- [11]. A. Wiguna B, D. Despa, H. Gusmedi, and A. Haris, "Penempatan SVC (Static Var Compensator) Untuk Memperbaiki Profil Tegangan Pada Jaringan Transmisi PT. PLN Lampung," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 4, no. 3, pp. 1–8, 2016, doi: 10.23960/jitet.v4i3.542.
- [12]. J. G. Jamnani and M. Pandya, "Coordination of SVC and TCSC for management of power flow by particle swarm optimization," *Energy Procedia*, vol. 156, pp. 321–326, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.149.

- [13]. S. Raj and B. Bhattacharyya, "Optimal placement of TCSC and SVC for reactive power planning using Whale optimization algorithm," *Swarm Evol Comput*, vol. 40, no. July 2016, pp. 131–143, 2018, doi: 10.1016/j.swevo.2017.12.008.
- [14]. M. Tarafdar Hagh, M. B. B. Sharifian, and S. Galvani, "Impact of SSSC and STATCOM on power system predictability," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 56, pp. 159–167, 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.11.025.
- [15]. R. Jena and S. C. Swain, "Comparative Analysis of STATCOM And TCSC FACTS Controller For Power," no. Icces, pp. 407–413, 2017.
- [16]. F. B. K. Mahmood *et al.*, "Weakest location exploration in IEEE-14 bus system for voltage stability improvement using STATCOM, synchronous condenser and static capacitor," *ECCE 2017 - International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering*, pp. 623–629, 2017, doi: 10.1109/ECACE.2017.7912980.
- [17]. W. Aslam, Y. Xu, A. Siddique, and F. M. Albatsh, "Implementation of series facts devices SSSC and TCSC to improve power system stability," *Proceedings of the 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2018*, pp. 2291–2297, 2018, doi: 10.1109/ICIEA.2018.8398092.
- [18]. A. Siddique, Y. Xu, W. Aslam, and F. M. Albatsh, "Application of series FACT devices SSSC and TCSC with POD controller in electrical power system network," *Proceedings of the 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2018*, pp. 893–899, 2018, doi: 10.1109/ICIEA.2018.8397839.
- [19]. Y. Manganuri, P. Choudekar, Abhishek, D. Asija, and Ruchira, "Optimal location of TCSC using sensitivity and stability indices for reduction in losses and improving the voltage profile," *1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, ICPEICES 2016*, pp. 1–4, 2017, doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853573.
- [20]. X. Shen, H. Luo, W. Gao, Y. Feng, and N. Feng, "Evaluation of optimal UPFC allocation for improving transmission capacity," *Global Energy Interconnection*, vol. 3, no. 3, pp. 217–226, 2020, doi: 10.1016/j.gloi.2020.07.003.
- [21]. X. Shen, H. Luo, W. Gao, Y. Feng, and N. Feng, "Evaluation of optimal UPFC allocation for improving transmission capacity," *Global Energy Interconnection*, vol. 3, no. 3, pp. 217–226, 2020, doi: 10.1016/j.gloi.2020.07.003.
- [22]. S. Alamelu, S. Baskar, C. K. Babulal, and S. Jeyadevi, "Optimal siting and sizing of UPFC using evolutionary algorithms," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 69, pp. 222–231, 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.12.081.
- [23]. S. D. Choudante and A. A. Bhole, "A Review: Voltage Stability and Power Flow Improvement by Using UPFC Controller," *7th IEEE International Conference on Computation of Power, Information and Communication, ICCPEIC 2018*, pp. 462–465, 2018, doi: 10.1109/ICCPEIC.2018.8525161.
- [24]. S. R. Paital, S. Patra, A. K. Singh, A. Mohanty, and P. K. Ray, "Reactive power compensation using PSO controlled UPFC in a microgrid with a DFIG based WECS," *12th IEEE International Conference Electronics, Energy, Environment, Communication, Computer, Control: (E3-C3), INDICON 2015*, pp. 2–6, 2016, doi: 10.1109/INDICON.2015.7443660.
- [25]. H. Gusmedi and L. H. J. Legita, "Analisis Kontigensi Saluran Transmisi Dengan Menggunakan Indeks Performa Tegangan (PIV) Dan Indeks Performa Daya Aktif (PIMW)," *Seminar Nasional Insinyur Profesional (SNIP)*, vol. 2, no. 1, 2022, doi: 10.23960/snip.v2i1.79.
- [26]. A. Nur Widiastuti, L. Multa Putranto, and R. Ramono Syamri Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, *Studi Kestabilan Tegangan Jaringan IEEE 9 Bus Menggunakan Indeks Kestabilan Tegangan*. 2013.
- [27]. A. N. Zeinhom, "Optimal sizing and allocation of Unified Power Flow Controller (UPFC) for enhancement of Saudi Arabian interconnected grid using Genetic Algorithm (GA)," *2016 Saudi Arabia Smart Grid Conference, SASG 2016*, pp. 2–7, 2017, doi: 10.1109/SASG.2016.7849670.
- [28]. E. Nanda Kumar, R. Dhanasekaran, and R. Mani, "Optimal location and improvement of voltage stability by UPFC using genetic algorithm (GA)," *Indian J Sci Technol*, vol. 8, no. 11, 2015, doi: 10.17485/ijst/2015/v8i11/71778.
- [29]. "Optimal Sizing and Allocation of Unified Power Flow 2016".
- [30]. K. Khatua and N. Yadav, "Voltage stability enhancement using VSC-OPF including wind farms based on Genetic algorithm," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 73, pp. 560–567, 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.05.007.
- [31]. L. Foltyn, J. Vysocký, G. Pretticco, M. Běloch, P. Praks, and G. Fulli, "OPF solution for a real Czech urban meshed distribution network using a genetic algorithm," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 26, p. 100437, 2021, doi: 10.1016/j.segan.2021.100437.
- [32]. S. R. Inkollu and V. R. Kota, "Optimal setting of FACTS devices for voltage stability improvement using PSO adaptive GSA hybrid algorithm," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 19, no. 3, pp. 1166–1176, 2016, doi: 10.1016/j.jestch.2016.01.011.
- [33]. A. R. Bhowmik, A. K. Chakraborty, and P. N. Das, "Placement of UPFC for minimizing active power loss and total cost function by PSO algorithm," *Proceedings of the 2013 International Conference on Advanced Electronic Systems, ICAES 2013*, pp. 217–220, 2013, doi: 10.1109/ICAES.2013.6659395.
- [34]. K. Kavitha and R. Neela, "Comparison of BBO, WIPSO & PSO Techniques for the Optimal Placement of FACTS Devices to Enhance System Security," *Procedia Technology*, vol. 25, no. Raerest, pp. 824–837, 2016, doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.186.
- [35]. M. Nadeem *et al.*, "Optimal placement, sizing and coordination of FACTS devices in transmission network using whale optimization algorithm," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 3, 2020, doi: 10.3390/en13030753.



- [36]. Sugiyanto, Adi Soeprijanto, and Ni Ketut Aryani, "THE STUDY OF VOLTAGE STABILITY ANALYSIS ON TRANSMISSION LINE SYSTEM PAITON-GRATI SUBSYSTEM IN EAST JAVA USING LINE COLLAPSE PROXIMITY INDEX METHOD," Sepuluh November Institute of Technology, Surabaya, 2017.
- [37]. R. A. Moradi and R. Zeinali Davarani, "Introducing a new index to investigate voltage stability of power systems under actual operating conditions," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 136, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107637.
- [38]. M. Kamel, F. Li, S. Bu, and Q. Wu, "A generalized voltage stability indicator based on the tangential angles of PV and load curves considering voltage dependent load models," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 127, no. December 2020, p. 106624, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106624.
- [39]. M. A. Jirjees, D. A. Al-Nimma, and M. S. M. Al-Hafidh, "Voltage Stability Enhancement based on Voltage Stability Indices Using FACTS Controllers," *International Iraqi Conference on Engineering Technology and its Applications, IICETA 2018*, pp. 141–145, 2018, doi: 10.1109/IICETA.2018.8458094.
- [40]. S. Ratra, R. Tiwari, and K. R. Niazi, "Voltage stability assessment in power systems using line voltage stability index," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 70, pp. 199–211, 2018, doi: 10.1016/j.compeleceng.2017.12.046.
- [41]. M. Moghavvemi and M. O. Faruque, "Technique for assessment of voltage stability in Ill-conditioned radial distribution network," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 21, no. 1, pp. 58–60, 2001, doi: 10.1109/39.893345.
- [42]. A. Yazdanpanah-Goharizi and R. Asghari, "A Novel Line Stability Index (NLSI) for Voltage Stability Assessment of Power Systems," *Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Power Systems*, pp. 164–167, 2007.
- [43]. I. Musiri and T. K. Abdul Rahman, "On-line voltage stability based contingency ranking using fast voltage stability index (FVSI)," *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, vol. 2, no. ASIA PACIFIC, pp. 1118–1123, 2002, doi: 10.1109/TDC.2002.1177634.
- [44]. S. Ratra, R. Tiwari, and K. R. Niazi, "Voltage stability assessment in power systems using line voltage stability index," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 70, pp. 199–211, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.compeleceng.2017.12.046.
- [45]. I. Musirin and T. K. Abdul Rahman, "Novel fast voltage stability index (FVSI) for voltage stability analysis in power transmission system," *2002 Student Conference on Research and Development: Globalizing Research and Development in Electrical and Electronics Engineering, SCORED 2002 - Proceedings*, pp. 265–268, 2002, doi: 10.1109/SCORED.2002.1033108.
- [46]. H. Pratikto, S. P. Hadi, and L. M. Putranto, "Analisis Stabilitas Tegangan Sistem Tenaga Listrik 500 kV Jawa Bali dengan Fast Voltage Stability Index (FVSI)," *Jurnal Penelitian Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, vol. 1, no. 1, pp. 17–23, 2014.
- [47]. I. G. Adebayo, A. A. Jimoh, and A. A. Yusuff, "Detection of weak bus through Fast Voltage Stability index and inherent structural characteristics of power system," *2015 4th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, EPECS 2015*, 2015, doi: 10.1109/EPECS.2015.7368536.
- [48]. X. Dong *et al.*, "Calculation of optimal load margin based on improved continuation power flow model," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 94, pp. 225–233, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.07.004.
- [49]. M. M. Aman, G. B. Jasmon, A. H. A. Bakar, and H. Mokhlis, "Optimum network reconfiguration based on maximization of system loadability using continuation power flow theorem," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 54, pp. 123–133, 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.06.026.
- [50]. K. Karthikeyan and P. K. Dhal, "Multi verse optimization (MVO) technique based voltage stability analysis through continuation power flow in IEEE 57 bus," *Energy Procedia*, vol. 117, pp. 583–591, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.05.153.
- [51]. M. A. Kamarposhti, M. Alinezhad, H. Lesani, and N. Talebi, "Comparison of SVC, STATCOM, TCSC, and UPFC controllers for static voltage stability evaluated by continuation power flow method," *2008 IEEE Electrical Power and Energy Conference - Energy Innovation*, 2008, doi: 10.1109/EPC.2008.4763387.
- [52]. R. Pourbagher, S. Y. Derakhshandeh, and M. E. Hamedani Golshan, "An adaptive multi-step Levenberg-Marquardt continuation power flow method for voltage stability assessment in the Ill-conditioned power systems," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 134, no. June 2021, p. 107425, 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107425.
- [53]. R. Yudhianto, S. P. Hadi, and M. I. BS, "Analisis Kontingensi saluran Pada Sistem Transmisi 150 KV Sumatera bagian Selatan," Gadjah Mada, 2015. [Online]. Available: <http://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/78713>
- [54]. Y. Mohamad, E. Hasan Harun, and J. Teknik Elektro, "ANALISIS KONTINGENSI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK SULAWESI UTARA-GORONTALO," 2019.
- [55]. IEEE, "Data Sheets for IEEE 14, 30, 62 Bus System," 2003.