



PENINGKATAN STABILITAS TEGANGAN STATIS DENGAN PENEMPATAN OPTIMAL STATCOM PADA SISTEM KELISTRIKAN BALI 16-BUS

Ni Putu Agustini¹⁾, I Made Wartana²⁾

^{1),2)}Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional (ITN) Malang,
Kampus 2, Jl. Raya Karanglo, Km 2, Malang, Jawa Timur.

ni_putu_agustini@lecturer.itn.ac.id

m.wartana@lecturer.itn.ac.id

Received: Maret 04, 2020. Accepted: August 11, 2020

ABSTRAK

Ketidakstabilan tegangan terutama terkait dengan ketidakseimbangan daya reaktif. Daya tahan bus dalam sistem daya tergantung pada dukungan daya reaktif yang dapat diterima bus dari sistem. Karena sistem mendekati titik pembebanan maksimum (TPM) atau titik gangguan tegangan, maka kehilangan daya nyata dan reaktif meningkat dengan cepat. Oleh karena itu, daya dukung reaktif harus lokal dan memadai. Penelitian ini menganalisis pengaruh penggunaan salah satu jenis peralatan pengendali modern, *Flexible AC Transmission System* (FACTS) yaitu *Static Synchronous Compensator* (STATCOM), untuk peningkatan margin Stabilitas Tegangan Static. Representasi STATCOM AC dan DC 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 07 ASARI, maka peningkatan margin daya tahan sistem hampir mencapai 3% dibandingkan kondisi *base case* yaitu sebesar $\lambda_{\max} = 1,891$ p.u dengan profile tegangan tidak berubah secara signifikan.

Kata kunci: CPF, stabilitas tegangan, keruntuhan tegangan, titik pembebanan maksimum, STATCOM

ABSTRACT

The voltage instability is mainly related to the reactive power imbalance. Bus durability in a power system depends on the reactive power support the bus can receive from the system. As the system approaches the maximum loading point (MLP) or voltage breakdown point, the real and reactive power losses increase rapidly. Therefore, the reactive carrying capacity must be local and adequate. This research analyzes the effect of using one type of modern control equipment, Flexible AC Transmission System (FACTS), namely Static Synchronous Compensator (STATCOM), to increase the Static Voltage Stability margin. STATCOM AC and DC representations used in the Continuation Power Flow (CPF) process in the study of static voltage stability. The effectiveness of the proposed method has been simulated practically on the Bali 16-bus electrical system to investigate the increase in the loading capacity of the system. From the simulation carried out by installing the modern controller in the best location, namely on bus 07 ASARI, the increase in system endurance margin is almost 3% compared to the base case condition, which is $\lambda_{\max} = 1,891$ p.u with the voltage profile not changing significantly.

Keyword: CPF, voltage stability, voltage collapse, maximum loading point, STATCOM

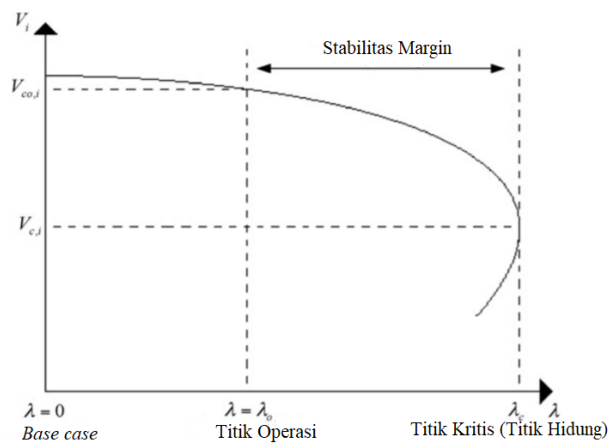
PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, peningkatan permintaan beban puncak dan transfer daya antar utilitas memiliki kekhawatiran yang tinggi tentang keamanan tegangan sistem. Keruntuhan tegangan telah dianggap bertanggung jawab atas beberapa gangguan utama dan signifikan. Berbagai penelitian telah dilakukan dalam upaya untuk lebih memahami fenomena tegangan. Sebagian besar penelitian ini terkonsentrasi pada aspek *steady state* dari stabilitas tegangan. Memang, banyak penulis telah mengusulkan indeks stabilitas tegangan berdasarkan beberapa jenis analisis aliran daya. Sebuah studi tertentu yang ditemui dalam penelitian semacam itu adalah Jacobian aliran daya Newton-Raphson menjadi tunggal pada batas stabilitas tegangan *steady state*. Sebenarnya, batas stabilitas ini, juga disebut titik kritis, sering didefinisikan sebagai titik di mana aliran daya Jacobian tunggal. Sebagai konsekuensinya, upaya solusi aliran daya di dekat titik kritis cenderung mengalami divergensi dan kesalahan. Untuk alasan ini, algoritma presisi ganda dan algoritma anti divergensi telah digunakan dalam upaya mengatasi ketidakstabilan numerik [1].

Ketidakstabilan tegangan terutama terkait dengan ketidakseimbangan daya reaktif. Daya tahan bus dalam sistem tenaga bergantung pada dukungan daya reaktif yang dapat diterima oleh bus dari sistem. Seiring sistem mendekati titik pembebanan maksimum (TPM) atau titik keruntuhan tegangan, kerugian daya nyata dan reaktif meningkat dengan cepat. Oleh karena itu, daya reaktif yang mendukung harus bersifat lokal dan memadai. Ada dua jenis kestabilan tegangan berdasarkan kerangka waktu simulasi: stabilitas tegangan statis dan stabilitas tegangan dinamis. Analisis statis hanya melibatkan solusi persamaan aljabar dan oleh karena itu komputasi kurang luas dibandingkan analisis dinamis.

Stabilitas tegangan statis sangat ideal untuk sebagian besar studi di mana batas stabilitas tegangan untuk banyak kasus pra-kontingensi dan pasca-kontingensi harus ditentukan. Pada kestabilan tegangan statis, perubahan perlahan

dalam sistem daya terjadi yang pada akhirnya menyebabkan kekurangan daya reaktif dan penurunan tegangan. Fenomena ini bisa dilihat dari plot daya yang ditransfer versus tegangan pada ujung penerima. Plotnya populer disebut kurva P-V atau kurva "Hidung" seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Saat perpindahan daya meningkat, tegangan pada ujung penerima berkurang. Akhirnya, titik kritis (titik hidung), titik di mana daya reaktif sistem kekurangan pasokan, tercapai bila terjadi peningkatan transfer daya yang lebih jauh akan menyebabkan penurunan tegangan sangat cepat. Sebelum mencapai titik kritis, penurunan tegangan besar akibat rugi daya reaktif berat bisa diamati.



Gambar 1 Kurva P-V

Satu-satunya cara untuk menyelamatkan sistem dari keruntuhan tegangan adalah dengan mengurangi beban daya reaktif atau menambahkan daya reaktif tambahan sebelum mencapai titik keruntuhan tegangan [2]. Fenomena keruntuhan tegangan pada sistem tenaga telah menjadi salah satu masalah penting dalam industri listrik selama dua dekade terakhir, karena hal ini telah menjadi alasan utama terjadinya beberapa pemadaman besar di seluruh dunia termasuk pemadaman listrik baru-baru ini di Utara Amerika di Agustus 2003 [3]. Metode titik runtuhnya (*collapse method*) dan metode kelanjutan (*continuation method*) digunakan untuk studi keruntuhan tegangan. Dari kedua metode *Continuation Power Flow* (CPF) tersebut digunakan untuk analisis tegangan. Teknik ini melibatkan identifikasi titik ekuilibrium sistem atau

titik keruntuhan tegangan dimana aliran daya terkait Jacobian menjadi tunggal [4],[5].

1.1. Continuation Power Flow (CPF).

Studi keruntuhan tegangan dan alat terkait biasanya didasarkan pada uraian matematis umum berikut dari sistem [6]:

$$\left. \begin{aligned} x &= f(x, y, \lambda, p) \\ 0 &= g(x, y, \lambda, p) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Dimana $x \in \mathcal{R}^n$ mewakili variabel keadaan sistem, yang berkaitan dengan keadaan dinamis generator, beban, dan elemen waktu lainnya yang bervariasi dalam sistem seperti perangkat FACTS; $y \in \mathcal{R}^n$ sesuai dengan variabel aljabar, biasanya terkait dengan sistem transmisi dan model elemen *steady state*, seperti beberapa generator dan beban di jaringan; $\lambda \in \mathcal{R}^k$ adalah singkatan dari seperangkat parameter yang tidak terkontrol yang mendorong sistem ke keruntuhan tegangan, yang biasanya digunakan untuk mewakili permintaan sistem. Vektor $p \in \mathcal{R}^k$ digunakan di sini untuk mewakili parameter sistem yang dapat dikontrol secara langsung, seperti tingkat kompensasi shunt dan seri.

Berdasarkan persamaan (1) titik keruntuhan tegangan dapat didefinisikan, dengan asumsi tertentu, sebagai titik ekuilibrium dimana sistem jacobian terkait adalah singular, yaitu titik $(x_0, y_0, \lambda_0, p_0)$ dimana dan $D_x F|_0$ memiliki nilai *eigen* nol. Ekuilibrium ini biasanya terkait dengan titik *bifurkasi sadel-simpul*

Untuk sekumpulan parameter terkendali P_0 , studi keruntuhan tegangan biasanya berkonsentrasi pada penentuan titik runtuh atau titik bifurkasi (x_0, y_0, λ_0) di mana λ_0 biasanya sesuai dengan tingkat pemuatan maksimum atau margin daya tahan di P.U.,% MW atau MVA tergantung bagaimana variasi beban didefinisikan. Berdasarkan teori bifurkasi, dua alat dasar telah didefinisikan dan diterapkan untuk menghitung titik keruntuhan ini, yaitu metode langsung dan kelanjutan.

Pada studi keruntuhan tegangan, metode kelanjutan menunjukkan banyak keuntungan, oleh karena sebagian besar peneliti menggunakan teknik ini untuk melacak profil tegangan pada berbagai bus

sistem uji daya, sehubungan dengan perubahan tingkat pembebanan λ , yaitu *Continuation Power Flow* (CPF).

Dalam penelitian ini algoritma aliran daya kelanjutan dengan kelancaran perubahan tingkat pembebanan pada berbagai bus sistem, dipilih untuk keperluan simulasi. Salah satu jenis perangkat FACTS yang dipertimbangkan dalam penelitian ini, STATCOM. Rincian terminal struktur dasar dan karakteristik terminal perangkat FACTS ini disajikan pada bagian berikut.

1.2 Pemodelan Kendali FACTS

Model umum berikut diusulkan untuk representasi salah satu jenis FACTS Shunt yang dikenal dengan nama STATCOM dalam studi keruntuhan tegangan [7]. Model ini mencakup seperangkat persamaan diferensial dan aljabar dari bentuk:

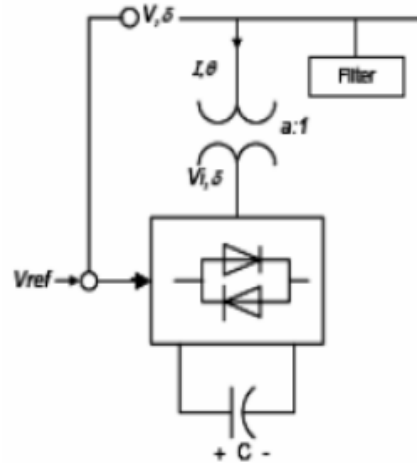
$$\left. \begin{aligned} x_c &= f_c(x_c, V, \theta, u) \\ P &= g_p(x_c, V, \theta) \\ Q &= g_q(x_c, V, \theta) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

dimana x_c mewakili variabel sistem kontrol, dan variabel aljabar V dan θ menunjukkan besaran dan fase tegangan pada bus tempat perangkat FACTS terhubung. Akhirnya, variabel u mewakili parameter kontrol masukan, seperti tegangan referensi atau arus referensi daya. Deskripsi dan karakteristik terminal perangkat FACTS ini diberikan pada subbagian 2.3. berikutnya.

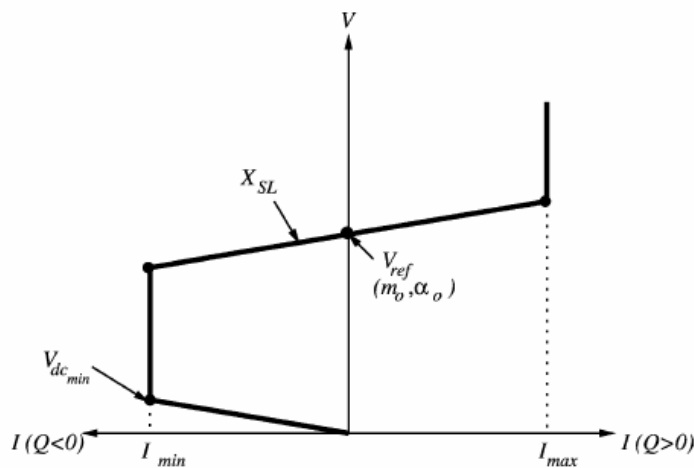
1.3 STATCOM

STATCOM adalah Inverter Tegangan-Sumber (VSI), yang mengubah tegangan masukan DC menjadi tegangan keluaran AC untuk mengkompensasi daya aktif dan reaktif yang dibutuhkan oleh sistem [8]. Gambar 2 dan 3 menunjukkan struktur dasar dan karakteristik mapan khas V-I STATCOM. Dari Gambar 1, STATCOM adalah perangkat terhubung-*shunt*, yang mengendalikan tegangan pada bus terhubung ke nilai referensi dengan mengatur tegangan dan sudut sumber tegangan internal. Dari Gambar 3, STATCOM menunjukkan karakteristik arus konstan saat tegangan rendah / tinggi di bawah / di

atas batas. Hal ini memungkinkan STATCOM yang ditentukan dapat memberikan daya reaktif konstan pada batas



Gambar 2. Struktur dasar STATCOM



Gambar 3. Karakteristik dari STATCOM

Rangkaian AC dianggap dalam keadaan matap, sedangkan rangkaian DC digambarkan dengan persamaan diferensial (3), dalam hal tegangan V_{dc} pada kapasitor [9]:

$$V_{dc} = \frac{P}{CV_{dc}} - \frac{V_{dc}}{R_c C} - \frac{R(P^2 + Q^2)}{CV^2 V_{dc}} \quad (3)$$

Injeksi daya pada bus AC memiliki bentuk:

$$P = V^2 G - KV_{dc} VG \cos(\theta - \alpha) - KV_{dc} VB \sin(\theta - \alpha)$$

$$Q = V^2 B - KV_{dc} VB \cos(\theta - \alpha) - KV_{dc} VG \sin(\theta - \alpha) \quad (4)$$

dimana $k = \sqrt{3/8m}$

Berbagai studi tentang aplikasi STATCOM yang merupakan salah satu tipe sistem kendali modern *Shunt-FACTS*, dalam peningkatan stabilitas sistem grid telah banyak dilakukan. Studi tentang alokasi optimal STATCOM untuk meningkatkan stabilitas tegangan statis sistem tenaga dilakukan pada sistem uji IEEE 118-bus [10]. Dalam [11] dan [12], analisis komprehensif stabilitas tegangan untuk penempatan dan ukuran STATCOM telah pula dilakukan pada data standar IEEE 6-bus dan IEEE 14-bus. Selanjutnya, lokasi optimal TCSC dan STATCOM dan dampaknya pada margin stabilitas

tegangan sistem juga telah diuji pada sistem standard IEEE 30-bus [13]. Sebagian besar studi tersebut menggunakan metode yang cukup rumit dalam menentukan lokasi optimal STATCOM dan hanya seluruhnya menggunakan sistem uji standard IEEE untuk menguji metode yang diusulkan.

Penelitian ini mengembangkan model formulasi penyelesaian masalah peningkatan margin stabilitas tegangan dengan penempatan optimal STATCOM pada sistem grid dengan menerapkan sistem uji praktikal yaitu sistem kelistrikan Bali 16-bus. Peningkatan stabilitas sistem grid diinvestigasi setelah penempatan optimal sistem kendali STATCOM dengan metode yang lebih sederhana yaitu dengan memilih penempatannya pada bus-bus yang mengalami tegangan kritis untuk mendapatkan Titik Pembebanan Maksimum (TPM) dengan nilai yang terbesar dalam studi keruntuhan tegangan statis.

METODE PENELITIAN

2.1. Simulasi CPF

Metode penelitian dengan melakukan simulasi menggunakan perangkat lunak simulasi *Power System Analysis Toolbox* (PSAT) [14], yang memiliki berbagai fitur termasuk aliran daya dan aliran daya lanjutan (CPF). Dengan menggunakan fitur CPF dari PSAT, stabilitas tegangan pada sistem uji dapat diselidiki. Perilaku sistem uji dengan dan tanpa perangkat STATCOM dalam kondisi pembebanan yang berbeda dianalisis yang masing-masing dinyatakan sebagai Kasus-2 dan Kasus-1. Lokasi pengendali STATCOM ditentukan melalui analisis bifurkasi. Model PQ yang khas digunakan pada beban dengan limit generator diabaikan. Analisis stabilitas tegangan dilakukan dengan memulai dari titik operasi stabil awal dan kemudian meningkatkan beban dengan faktor λ sampai titik tunggal aliran listrik dilalui. Beban didefinisikan sebagai:

$$\left. \begin{aligned} P_L &= P_{L0}(1 + \lambda) \\ Q_L &= Q_{L0}(1 + \lambda) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

dimana P_{L0} dan Q_{L0} adalah beban basis aktif dan reaktif, sedangkan P_L dan Q_L , masing-masing adalah beban aktif dan reaktif pada bus L untuk titik operasi saat ini seperti yang didefinisikan oleh λ .

2.1.1. Kasus-1 base case (tanpa STATCOM)

Dengan menggunakan aliran daya CPF akan diperoleh bus-bus kritis. Di antara bus-bus kritis tersebut, akan diperoleh bus yang memiliki profil tegangan paling lemah yang direpresentasikan oleh kurva PV untuk sistem yang diuji tanpa STATCOM. Sistem ini menyajikan keruntuhan atau TPM, dimana sistem matriks *Jacobian* menjadi singular pada λ_{\max} yang dinyatakan dalam p.u. Berdasarkan entri terbesar pada vektor *eigen* kanan dan kiri yang terkait dengan nilai *eigen* nol pada titik keruntuhan bus tersebut diindikasikan sebagai "bus tegangan kritis" yang membutuhkan dukungan daya reaktif Q. Magnitude tegangan di TPM pada bus tersebut dikenal sebagai bus terlemah.

2.1.2. Kasus-2 dengan STATCOM

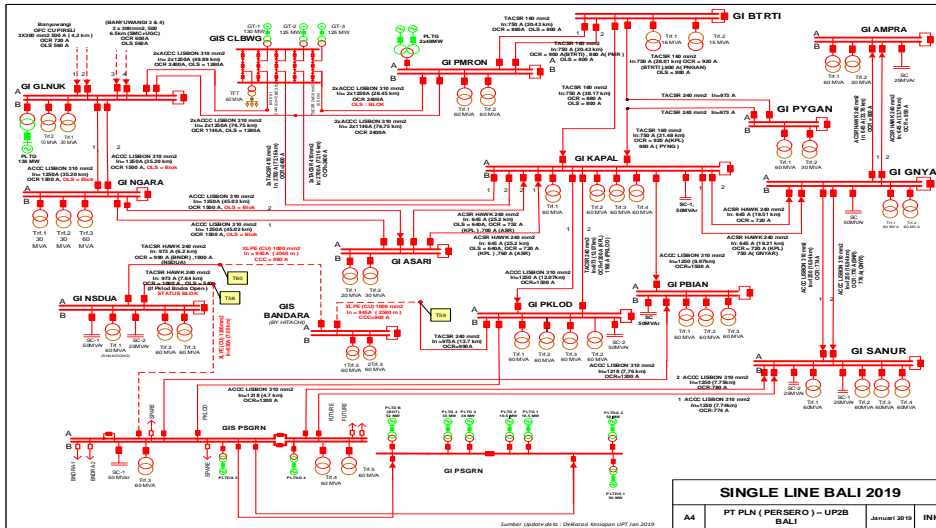
Pada Kasus-2 ini, STATCOM dipasang pada bus terlemah yang merupakan titik kritis terendah dan ulangi simulasi point 2.1.1. di atas. Ketika STATCOM terhubung pada bus terlemah tersebut maka akan dapat diteliti profil tegangan setiap bus pada sistem uji yang dilakukan dan periksa peningkatan pembebanan sampai mencapai TPM pada λ_{\max} . Selanjutnya ulangi proses tersebut dengan memindahkan STATCOM yang sama pada bus bus terlemah berikutnya dan bandingkan semua hasil TPM tersebut untuk mendapatkan nilai λ_{\max} terbesar.

2.2. Data Uji Sistem

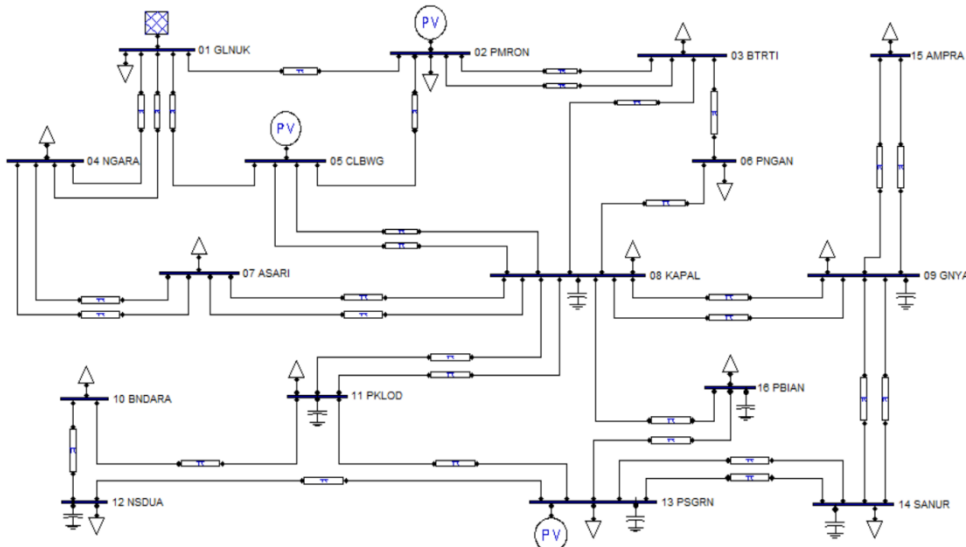
Pada penelitian ini, sistem kelistrikan Bali 16-bus digunakan sebagai sistem uji praktikal untuk peningkatan stabilitas tegangan statis dengan penempatan optimal STATCOM yang diagram garis tunggalnya ditunjukkan Gambar 4. Sistem uji ini terdiri dari 4 bus generator yang terletak pada bus 1, 2, 5 dan 6, dengan total kapasitas Pembangkitan (mampu pasok) sebesar 1282,6 MW belum termasuk pasokan listrik dari Banyuwangi melalui saluran interkoneksi Jawa-Bali 150 kV

melalui kabel laut. Total beban puncak aktif dan reaktif yang digunakan dalam simulasi ini masing-masing sebesar 1239,6 MW dan 286,4 MVAR. Sebagaimana telah dibahas pada bab sebelumnya jenis FACTS yang digunakan dalam simulasi ini

adalah STATCOM yang dapat menginjeksikan baik daya reaktif ke dalam sistem grid tersebut.



Gambar 4. Diagram garis tunggal sistem Kelistrikan Bali 16-bus



Gambar 5. Diagram garis tunggal modifikasi sistem Kelistrikan Bali 16-bus

HASIL DAN PEMBAHASAN

Modifikasi sistem uji praktikal tersebut dimodelkan menggunakan toolbox analisis sistem tenaga PSAT seperti ditunjukkan pada diagram garis tunggal Gambar 5. Piranti kendali STATCOM yang digunakan dalam pengujian sistem tersebut juga dimodelkan menggunakan PSAT tersebut. Hasil

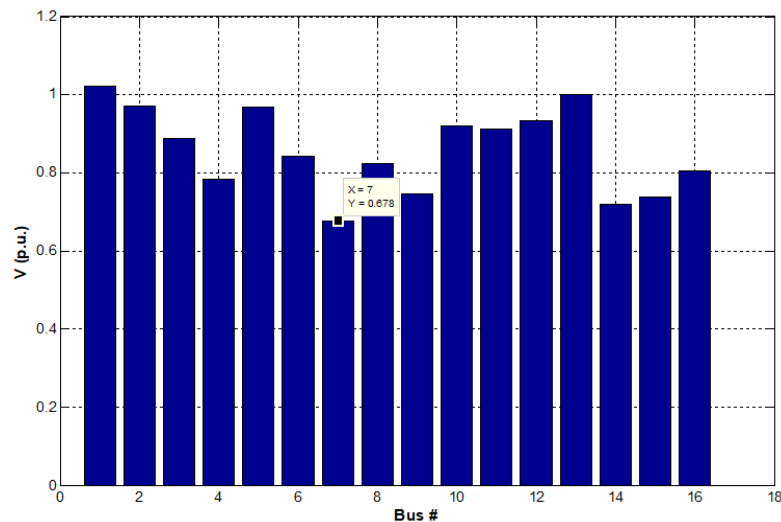
pengujian untuk ketua kasus tersebut adalah sebagai berikut:

4.1 Kasus-1, base case (tanpa STATCOM)

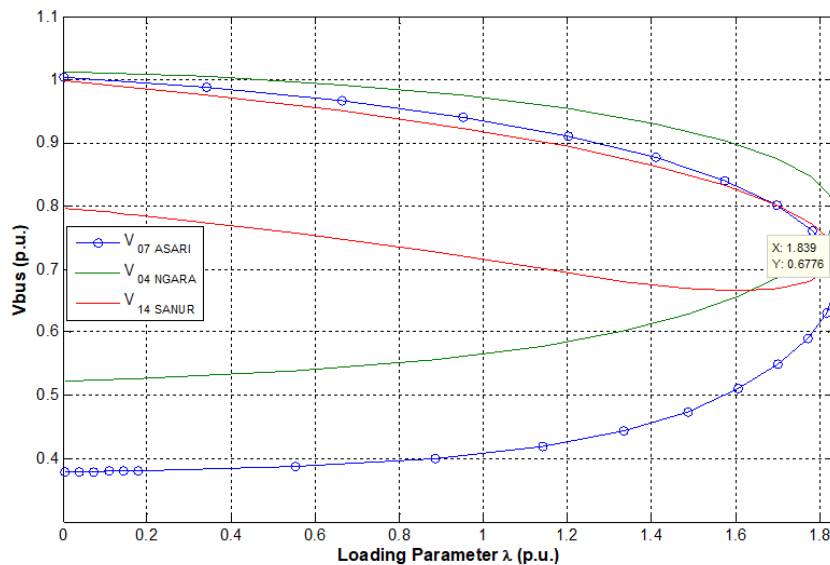
Dari hasil aliran daya CPF pada kondisi *base case* ditunjukkan pada Gambar 6. Dari Gambar 6 dapat dilihat bahwa terdapat 8 bus-bus kritis yang nilai

tegangannya kurang dari 0.95 p.u. yaitu bus 04, 06, 07, 08, 09, 14,15 dan 16. Di antara bus-bus ini, bus 07 ASARI memiliki profil tegangan terlemah/kritis yaitu 0,678 p.u. Gambar 7 menunjukkan tiga kurva PV tegangan bus terendah untuk sistem uji Bali 16-bus tanpa STATCOM yaitu bus 04 NGARA, bus 07 ASARI dan bus 14 SANUR. Sistem menyajikan keruntuhan atau TPM, di mana sistem matriks

Jacobian menjadi tunggal pada $\lambda_{maks} = 1.839$ p.u. Berdasarkan entri terbesar dalam vektor eigen kanan dan kiri yang terkait dengan nilai eigen nol pada titik runtuh, bus 07 ASARI diindikasikan sebagai "bus tegangan kritis" yang memerlukan injeksi daya reaktif Q. Besaran tegangan dalam TPM di bus 07 ASARI yang dikenal sebagai bus terlemah adalah $V_{bus} = 0.678$ p.u.



Gambar 6. Profile tegangan untuk sistem uji Kelistrikan Bali 16-bus tanpa STATCOM



Gambar 7. Kurva PV untuk sistem uji Kelistrikan Bali 16-bus tanpa STATCOM

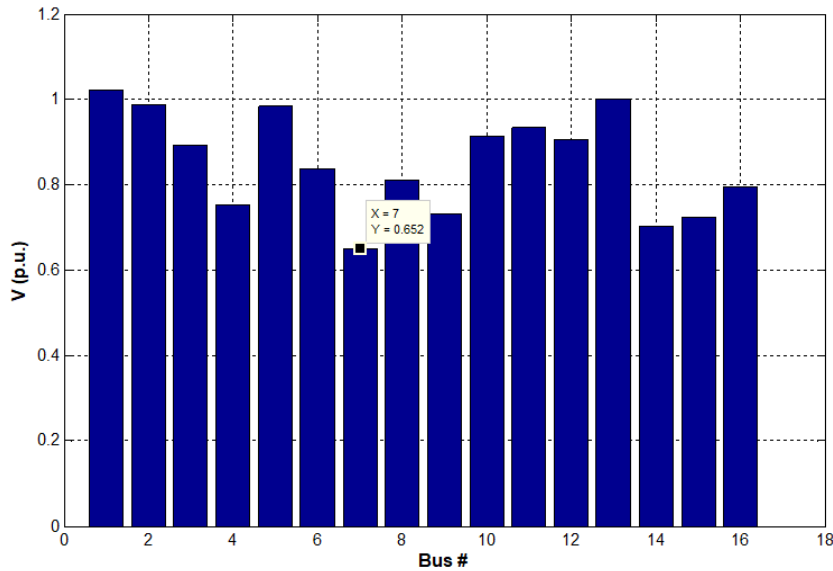
a. Kasus-2, dengan STATCOM

Berdasarkan analisis pada 4.1 di atas runtuhnya tegangan pada bus 07 ASARI ditetapkan sebagai lokasi pemasangan STATCOM. Penempatan STATCOM pada bus tersebut menghasilkan profil

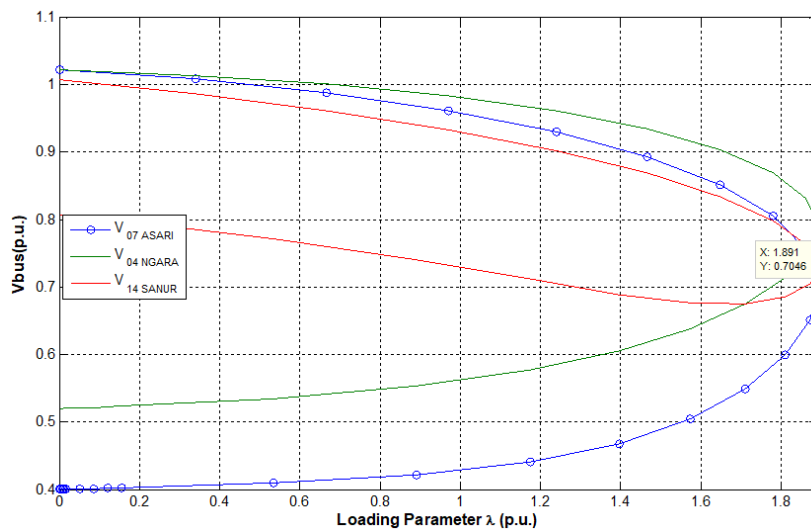
tegangan seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Sedangkan Gambar 9 memperlihatkan TPM baru dalam Kasus-2 ini adalah pada $\lambda_{maks} = 1,891$ p.u. yang berarti terjadi kenaikan sebesar 0,052 p.u. (2,83 %) dibandingkan pada Kasus-1. Gambar 10 dan Gambar 11 menunjukkan bahwa nilai TPM

tidak meningkat lebih besar ketika STATCOM yang sama dipindahkan ke bus kritis lain yang bukan merupakan bus dengan tegangan paling kritis atau bus terlemah, misalnya pada bus 04 dan bus

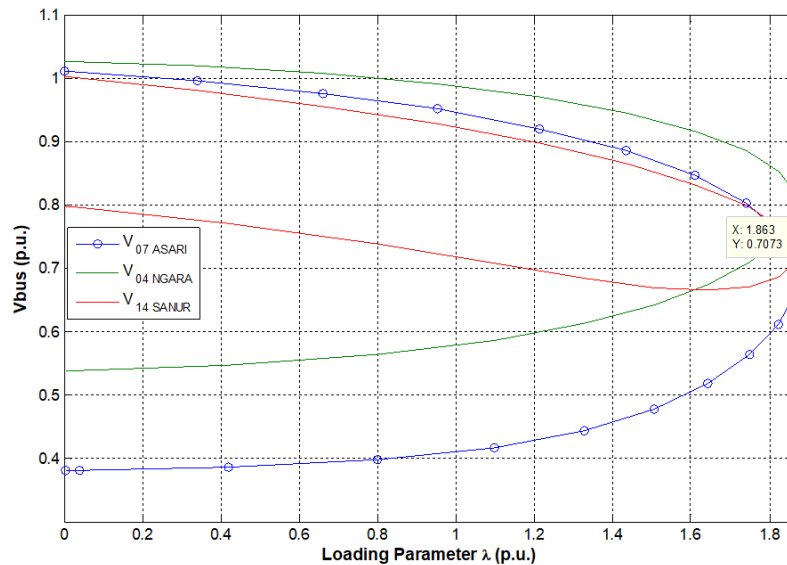
14. Hasil TPM diperoleh lebih rendah dibandingkan pada bus 07, yaitu masing-masing sebesar $\lambda_{max} = 1,863$ p.u. dan $\lambda_{max} = 1,877$ p.u.



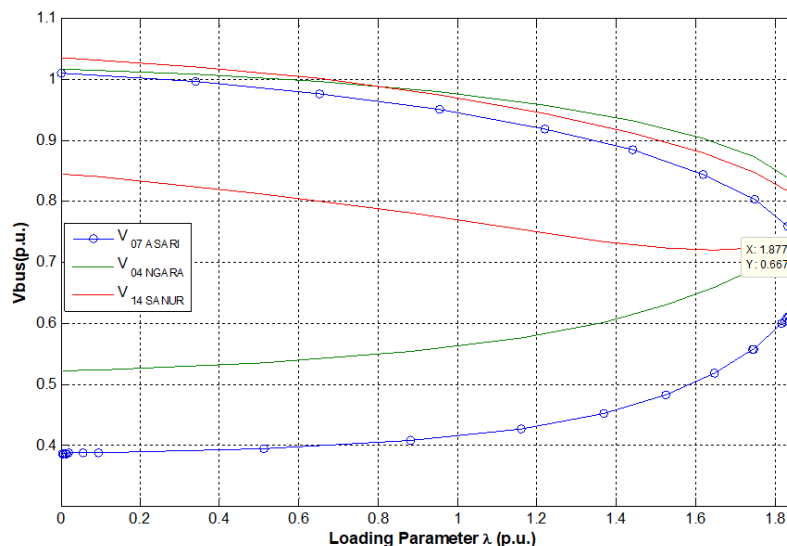
Gambar 8. Profile tegangan untuk sistem uji Kelistrikan Bali 16-bus dengan STATCOM pada bus 07.



Gambar 9. Kurva PV untuk sistem uji Kelistrikan Bali 16-bus dengan STATCOM pada bus 07.



Gambar 10. Kurva PV untuk sistem uji Kelistrikan Bali 16-bus dengan STATCOM pada bus 04.



Gambar 11. Kurva PV untuk sistem uji Kelistrikan Bali 16-bus dengan STATCOM pada bus 14.

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

KESIMPULAN

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

a. Penelitian ini berhasil menentukan lokasi terbaik pemasangan STATCOM pada bus yang mempunyai tegangan paling kritis yaitu bus 07

ASARI untuk mendapatkan tingkat pembebanan maksimum atau batas keruntuhan tegangan statis terbesar pada $\lambda_{\max} = 1,891$ p.u.

- b. Hasil yang disajikan dalam penelitian ini dengan jelas menunjukkan bahwa STATCOM pada lokasi terbaik dapat meningkatkan kemampuan pembebanan sistem kelistrikan Bali 16-bus yang dinyatakan dengan titik pembebanan masimum mendekati nilai 3 % dibandingkan kondisi *base case* (tanpa STATCOM).
- c. Dengan pemasangan STATCOM pada lokasi yang tepat, tidak hanya kemampuan pembebanan sistem yang meningkat tetapi juga

- d. profile tegangan dapat ditingkatkan sesuai batas margin yang diijinkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada Institut Teknologi Nasional (ITN) Malang yang telah membantu pendanaan penelitian ini melalui Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat ITN-Malang untuk tahun pendanaan 2019.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] C. J. Parker, *et al.*, "Application of an optimisation method for determining the reactive margin from voltage collapse in reactive power planning," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, pp. 1473-1481, 1996.
- [2] R. Gan, *et al.*, "Static voltage stability analysis based on improved continuous power flow," in *TENCON 2015-2015 IEEE Region 10 Conference*, 2015, pp. 1-3.
- [3] C. A. Canizares, *et al.*, "Point of collapse methods applied to AC/DC power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, pp. 673-683, 1992.
- [4] N. Voropai, *et al.*, "Development of computational intelligence-based algorithms of preventing voltage collapse in power systems with a complex multi-loop structure," in *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2016, pp. 1-5.
- [5] I. Dobson and L. Lu, "Voltage collapse precipitated by the immediate change in stability when generator reactive power limits are encountered," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 39, pp. 762-766, 1992.
- [6] N. Talebi, *et al.*, "Effects of SVC and TCSC control strategies on static voltage collapse phenomena," in *SoutheastCon, 2004. Proceedings. IEEE*, 2004, pp. 161-168.
- [7] C. A. Canizares, "Power flow and transient stability models of FACTS controllers for voltage and angle stability studies," in *Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE*, 2000, pp. 1447-1454.
- [8] S. Varshney, *et al.*, "Comparison of PSO models for optimal placement and sizing of STATCOM," 2011.
- [9] A. Telang and P. Bedekar, "Application of Voltage Stability Indices for Proper Placement of STATCOM under Load Increase Scenario," *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, vol. 10, pp. 991-996, 2016.
- [10] A. Jalali and M. Aldeen, "Improving voltage stability margin using STATCOM-storage devices," in *2016 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, 2016, pp. 1-6.
- [11] A. Telang and P. Bedekar, "Systematic approach for optimal placement and sizing of STATCOM to assess the voltage stability," in *2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, 2016, pp. 1-6.
- [12] S. S. Tehrani and P. S. Bandaghi, "Shunt compensation for improvement of voltage stability using static synchronous compensator (STATCOM) for various faults in power system," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 3, pp. 9793-9800, 2014.
- [13] M. S. Rawat and R. Tamta, "Optimal Placement of TCSC and STATCOM for Voltage Stability Enhancement in Transmission Network," in *2018 5th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, 2018, pp. 1-6.
- [14] F. Milano, *et al.*, "An Open Source Power System Virtual Laboratory: The PSAT Case and Experience," *IEEE Transactions on Education*, vol. 51, pp. 17-23, 2008.