

MENENTUKAN PREDIKSI MARGIN KESTABILAN TEGANGAN SECARA ONLINE DENGAN MENGGUNAKAN PHASOR MEASUREMENT UNIT

Levin Halim^{1,*}, Nanang Hariyanto², Muhammad Nurdin²

¹Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Katolik Parahyangan,
Jl. Ciumbuleuit No.94 Bandung, 40141

²Teknik Tenaga Listrik, Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha No.10, Bandung, 40132

*Email: halimlevin@unpar.ac.id

Diterima: 5 Desember 2018

Direvisi: 3 Februari 2019

Disetujui: 4 April 2019

ABSTRAK

Penelitian ini membahas mengenai penentuan prediksi *margin* kestabilan tegangan (*voltage stability margin - VSM*) dengan model regresi berganda yang menghubungkan sisa daya reaktif dengan margin kestabilan tegangannya. Selain itu, penelitian ini juga membahas mengenai penentuan prediksi *margin* kestabilan tegangan dengan didasarkan pada pengukuran lokal yang memakai ekivalen thevenin untuk representasi sistem. Data-data yang diperoleh untuk perhitungan baik untuk model regresi berganda maupun prediksi didasarkan pada pengukuran lokal pada implementasinya akan diambil dari data *phasor measurement unit* (PMU) yang menyediakan fasor tegangan dan arus.

Kata kunci: *margin kestabilan tegangan, regresi berganda, pengukuran lokal, ekivalen thevenin, phasor measurement unit*

ABSTRACT

This research discuss about act of determining voltage stability margin prediction using multiple regression model which observe the relationship between reactive power reserve with its voltage stability margin. Moreover, this research also discuss about act of determining voltage stability margin prediction based on local measurement which using thevenin equivalent to represents power system. The received datas for the purpose of calculation for either multiple regression model or local-based measurement prediction, at implementation, will be taken from phasor measurement unit (PMU) data which provide voltage and current phasor.

Keywords: *voltage stability margin, mulitple regression, local measurement, thevenin equivalent, phasor measurement unit*

PENDAHULUAN

Pada sistem tenaga listrik selama ini, sering kali diperhatikan baik kestabilan sudut maupun kapabilitas overload thermal dari saluran. Akan tetapi, dewasa ini, dikarenakan perkembangan sistem tenaga seperti yang dapat dilihat pengembangannya pada referensi (Rachman, 2016) serta pengembangan lain dalam pembuatan transmisi baru dan fasilitas pembangkitan, sistem tenaga listrik telah

dibebani lebih besar daripada biasanya. Sebagai konsekuensinya, banyak sistem tenaga yang mengalami permasalahan tegangan dimana pada akhirnya akan memicu ketidakstabilan tegangan. (M. Bahadornejad, 2005)

Ketidakstabilan tegangan merupakan sebuah ancaman cukup serius pada sistem tenaga listrik karena tegangan merupakan salah satu aspek kestabilan pada sisi beban dan

merupakan bagian penting yang menunjukkan seberapa baik sebuah sistem tenaga listrik tersebut.

Kestabilan tegangan sebuah sistem tenaga listrik sangatlah bergantung banyak hal. Hal-hal tersebut antara lain adalah kondisi pembangkitan dimana daya reaktif sangat mempengaruhi profil tegangan, kondisi pembebanan yang berubah-ubah sesuai dengan karakteristik pembebanan, dan kondisi jaringan dimana adanya perubahan setiap adanya kondisi pembebanan tertentu. Oleh karena itu, memperkirakan perkiraan margin kestabilan tegangan (*voltage stability margin*) dari sistem tenaga secara online masih menghadapi kesulitan akibat dari selalu berubahnya parameter-parameter tersebut.

Penggunaan dari sebuah PMU (*phasor measurement unit*) yang tersinkronisasi merupakan alternatif yang sangat baik untuk mengawasi margin kestabilan tegangan. PMU ini secara langsung mengukur fasor dari state variable sistem tenaga yang dapat ditransmisikan ke control center melalui infrastruktur komunikasi handal dengan kecepatan tinggi. (Y. N. N. Tchokonte, 2008)

PMU yang mempunyai kemampuan untuk menyediakan pengukuran fasor tersinkronisasi dari grid sistem tenaga, sehingga PMU sekarang ini dianggap sebagai salah satu peralatan pengukuran yang penting pada sistem tenaga listrik. Hal ini diakibatkan karena teknologi PMU memungkinkan untuk menganalisis sebuah sistem tenaga untuk menentukan prediksi margin kestabilan tegangan.

Beberapa metode dipakai untuk menentukan margin kestabilan tegangan ini. Salah satunya adalah dengan model regresi multi linear (*Multi Linear Regression Model - MLRM*) seperti pada referensi (Ajarapu & Leonardi, 2010) dan (Leonardi, 2011) yang mempertimbangkan hubungan antara sisa daya reaktif dengan margin kestabilan tegangannya, metode ini memerlukan perhitungan statistik yang cukup rumit untuk memilih model regresi multi linear yang terbaik yang merepresentasikan sistem tenaga. Selain itu, berbagai metode lain dengan didasarkan pada pengukuran pada bus lokal seperti yang dibahas dalam referensi (Corsi & Taranto, 2008; L. Warland, 2002; M. Bahadornejad, 2005; Soliman, Temraz, & El-Khodary, n.d.; Zhao, Yang, & Gao, 2011) dengan

mempertimbangkan transfer daya maksimum dan memodelkan sistem menjadi ekivalen Thevenin. Akan tetapi, membutuhkan perhitungan dan perkiraan ekivalen Thevenin yang cukup rumit. Perkiraan *voltage stability margin* ini didapat dengan penelitian secara offline dengan memperhatikan ketiga hal tersebut (kondisi pembangkitan, pembebanan, dan jaringan) yang kemudian hasil pemodelan tersebut diimplementasikan secara online dengan mengambil data-data yang ada di PMU pada sistem tersebut.

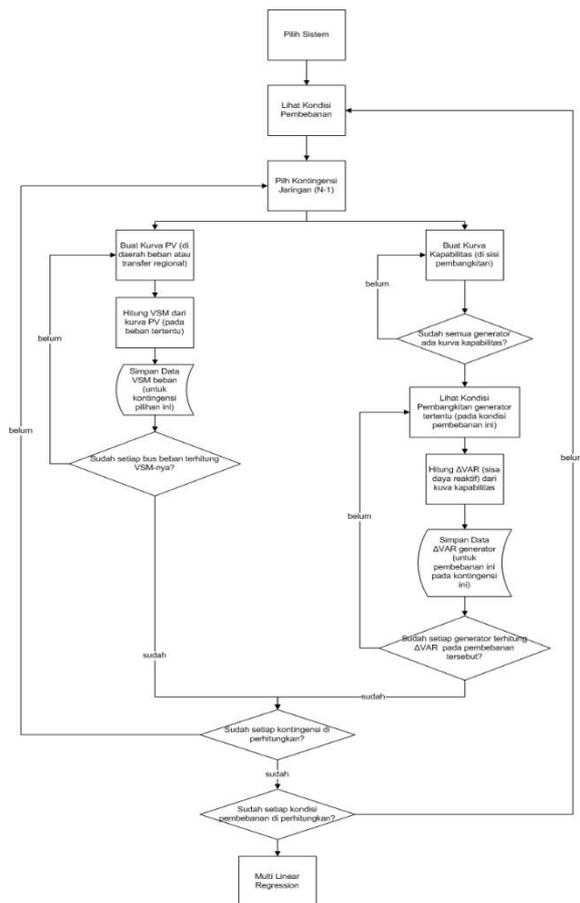
Pada penelitian ini dibahas mengenai penentuan prediksi margin kestabilan tegangan dengan menggunakan model regresi multi linear yang menghubungkan antara sisa daya reaktif dengan margin kestabilan tegangannya. Penentuan dan perhitungan ini didapat dengan penelitian secara offline dengan mempertimbangkan ketiga hal yang mempengaruhi kestabilan tegangan (kondisi pembangkitan, pembebanan, dan jaringan). Selain itu, dibahas pula mengenai penentuan prediksi margin kestabilan tegangan dengan didasarkan pada pengukuran lokal yang mengambil fasor tegangan dan arus di bus lokal dimana margin kestabilan tegangan akan ditentukan. Sama seperti pada referensi yang disebutkan diatas, pemodelan sistem direpresentasikan dengan ekivalen Thevenin yang terhubung ke beban. Perhitungan Thevenin dilakukan secara sederhana, yaitu dengan regresi sederhana untuk mencari titik collapse tegangan dan kemudian ditentukan prediksi margin kestabilan tegangan dari hasil perhitungan.

METODE PENELITIAN

Model Regresi Berganda

Model regresi multi linier ini dipakai untuk menentukan prediksi margin kestabilan tegangan (*voltage stability margin - VSM*). Untuk menyelidiki pengaruh dari sisa daya reaktif yang dimiliki generator kepada margin kestabilan tegangan atau *voltage stability margin* dipakai pemodelan perhitungan dengan regresi multi linier.

Pada penentuan prediksi margin kestabilan tegangan dengan model regresi multi linier ini, PMU berperan untuk mendapatkan data sisa daya reaktif (ΔVAR) yang diturunkan dari fasor tegangan dan arus yang didapatkan pada sisi pembangkitan dari sistem tenaga listrik.



Gambar 1. Diagram Alir Model Regresi Berganda

1. Hubungan antara Margin Kestabilan Tegangan dengan Sisa Daya Reaktif

Tegangan sangatlah berhubungan dengan daya reaktif. Hal ini disebabkan karena daya reaktif merupakan sokongan bagi tegangan. Bila tegangan pada bus turun, generator atau sumber daya reaktif lainnya akan memberikan daya reaktif ke sistem lebih besar sehingga tegangan tidak turun dan tetap pada tegangan nominalnya. Sehingga, manajemen daya reaktif yang baik dapat mereduksi ketidakstabilan tegangan.

Oleh karena kestabilan tegangan dengan daya reaktif berhubungan erat, model regresi multi linier ini akan menghubungkan antara sisa daya reaktif yang dimiliki oleh generator dengan margin kestabilan tegangan pada bus-bus beban.

Berikut merupakan persamaan hubungan antara sisa daya reaktif dengan margin kestabilan tegangan :

$$VSM_k = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_{1i} \cdot \Delta VAR_i + \sum_{i=1}^n \beta_{2i} \cdot \Delta VAR_i^2 + \sum_{i=1}^n \beta_{3i} \cdot \Delta VAR_i^3 + \dots + \sum_{i=1}^n \beta_{(m-1)i} \cdot \Delta VAR_i^{m-1} + \sum_{i=1}^n \beta_{mi} \cdot \Delta VAR_i^m \quad (1)$$

dengan :

VSM_k = voltage stability margin (MW) beban k

ΔVAR_m = sisa daya reaktif yang dimiliki generator m (m = 1, 2, 3, ...)

n = orde persamaan

m = jumlah generator

Persamaan diatas menggambarkan hubungan antara sisa daya reaktif dengan margin kestabilan tegangan sistem dengan multi beban dan multi sumber sesuai dengan hubungan regresi berganda untuk multi-variabel dan multi-orde. Hubungan ini secara matriks dapat digambarkan sebagai berikut :

$$[VSM] = [\Delta VAR] \cdot [\beta] \quad (2)$$

dimana :

$[VSM]$ = matriks yang berisi VSM setiap simulasi

$[\Delta VAR]$ = matriks sisa daya reaktif generator

$[\beta]$ = matriks konstanta

2. Penambahan Dummy Variable

Dummy Variable yang dipakai pada tugas akhir ini ditambahkan pada persamaan 1 secara umum. Kemudian persamaan ini ditambahkan dengan beberapa *dummy variable* yang memperhitungkan pengaruh suatu parameter kepada persamaan. Beberapa *dummy variable* dengan kondisi tertentu tersebut adalah :

- D1 = pembebanan minimum
- D2 = pembebanan normal
- D3 = pembebanan maksimum
- D4 = kontingensi saluran
- D5 = kontingensi pembangkitan

Sehingga, persamaan margin kestabilan tegangan menjadi (untuk multi-generator) :

$$VSM_i = \beta_i + \sum_{j=1}^n \beta_{2j} \cdot \Delta VAR_j + \sum_{j=1}^n \beta_{3j} \cdot \Delta VAR_j^2 + \dots + \sum_{j=1}^n \beta_{(n+1)j} \cdot \Delta VAR_j^n + \sum_{j=1}^n \beta_{(n+2)j} \cdot \Delta VAR_j^n + \delta_1 D1 + \delta_2 D2 + \delta_3 D3 + \delta_4 D4 + \delta_5 D5 \quad (3)$$

dimana D1, D2, D3, D4, dan D5 diisi dengan angka 1 bilamana kondisi seperti yang telah dijabarkan sebelumnya terjadi, dan diisi dengan angka 0 bila tidak terjadi. Sedangkan $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5$ merupakan konstanta yang perlu dicari dan dalam persamaan secara umum termasuk ke dalam matriks konstanta.

Dengan melibatkan pengaruh dari *dummy variable* ini, perhitungan akan menjadi lebih akurat dan *error* pun akan lebih kecil, karena memasukan pertimbangan kondisi tertentu dari sistem tenaga.

Dummy Variable ini hanya penambahan pada persamaan 3, dimana tujuannya adalah untuk mencari matriks konstanta $[\beta]$ namun termasuk mencari konstanta $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5$.

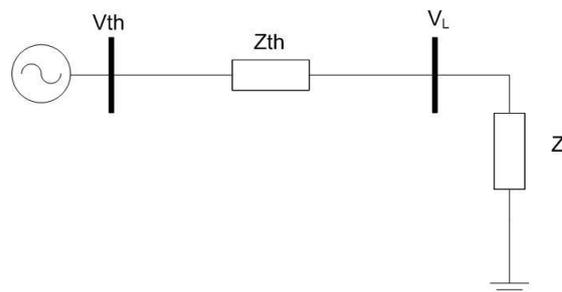
3. Menentukan Margin Kestabilan Tegangan
 Sebelumnya telah dijelaskan mengenai persamaan regresi multi linier yang dipakai untuk menentukan VSM secara *offline* dan akhirnya akan mendapatkan matriks konstanta $[\beta]$ yang termasuk didalamnya konstanta untuk *dummy variable*.

Setelah mendapatkan matriks konstanta $[\beta]$, matriks ini dipakai untuk menentukan VSM yaitu dengan mengambil data nilai-nilai sisa daya reaktif yang dimiliki generator. Sehingga, dengan persamaan 2, akan didapatkan VSM dari data sisa daya reaktif (ΔVAR) ketika kita sudah memiliki matriks konstanta $[\beta]$, sehingga prediksi margin kestabilan tegangan dengan model regresi multi linier ini dapat ditentukan.

Prediksi Berdasarkan pada Pengukuran Lokal

Kestabilan Tegangan berbasis pengukuran lokal ini merupakan analisis mengenai kestabilan tegangan dimana sistem dipandang pada bus lokal, bus lokal disini maksudnya adalah bus dimana akan ditentukan prediksi margin kestabilan tegangannya. Pada analisis berdasarkan pengukuran lokal ini, sistem direpresentasikan dengan ekuivalen *thevenin*

yang terhubung dengan impedansi beban (sistem ekuivalen 2 bus) seperti berikut :



Gambar 2. Rangkaian Ekuivalen 2 Bus Dengan :

$$V_{th} = \text{tegangan thevenin} = |V_{th}| \angle \delta_{V_{th}}$$

$$Z_{th} = \text{impedansi thevenin} = |Z_{th}| \angle \delta_{Z_{th}} = R_{th} + j X_{th}$$

$$V_L = \text{tegangan bus beban} = |V_L| \angle \delta_{V_L}$$

$$Z_L = \text{impedansi beban} = |Z_L| \angle \delta_{Z_L} = R_L + j X_L$$

Berikut merupakan *flowchart* untuk menentukan prediksi margin kestabilan tegangan dengan berbasis atau didasarkan pada pengukuran lokal :



Gambar 3. Diagram Alir Kestabilan Tegangan dengan didasarkan pada Pengukuran Lokal

1. Memperkirakan Ekuivalen Thevenin

Pada penelitian ini, metode yang dipakai untuk menentukan perkiraan ekuivalen thevenin adalah dengan regresi sederhana. Bila dilihat dari Gambar 2 diatas, dapat dituliskan rumus sebagai berikut :

$$V_{th} = Z_{th} \cdot I + V_L \quad (4)$$

Dari persamaan 4 diatas, dapat diekspresikan sebagai berikut :

$$V_L = V_{th} + Z_{th} \cdot (-I) \quad (5)$$

Persamaan 5 diatas dapat direpresentasikan dengan persamaan regresi sederhana sebagai berikut :

$$y = a + b x \quad (6)$$

Dimana :

$$\begin{aligned} y &= V_L \\ a &= V_{th} \\ b &= Z_{th} \\ x &= -I \end{aligned}$$

Bilamana kita mempunyai data V_L dan I minimal lebih dari satu, nilai a (V_{th}) dan nilai b (Z_{th}) dapat ditemukan. Sehingga perkiraan tegangan ekuivalen *thevenin* dan impedansi ekuivalen *thevenin* dapat ditemukan, selain itu, persamaan ini berlaku untuk bus manapun.

2. Menentukan Titik Runtuh (Collapse Point)

Setelah mendapatkan perkiraan ekuivalen *thevenin*, ini dapat dipakai untuk menentukan titik *collapse*. Titik *collapse* ini dinyatakan dalam daya biasanya dalam satuan MW seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

Pada **Error! Reference source not found.**2 arus pada beban besar (*magnitude*) tersebut diatas adalah sebagai berikut :

$$|I| = \frac{|V_{th}|}{\sqrt{|Z_{th}|^2 + |Z_L|^2 + 2|Z_{th}||Z_L|\cos(\delta_{Z_{th}} - \delta_{Z_L})}} \quad (7)$$

Magnitude dari tegangan pada sisi penerima atau tegangan bus beban sebagai berikut :

$$|V_L| = |Z_L||I| = \frac{|V_{th}||Z_L|}{\sqrt{|Z_{th}|^2 + |Z_L|^2 + 2|Z_{th}||Z_L|\cos(\delta_{Z_{th}} - \delta_{Z_L})}} \quad (8)$$

Daya yang disuplai ke beban adalah :

$$S = \frac{|V_{th}|^2 |Z_L|}{|Z_{th}|^2 + |Z_L|^2 + 2|Z_{th}||Z_L|\cos(\delta_{Z_{th}} - \delta_{Z_L})} \quad (9)$$

Titik *collapse* berada pada transfer maksimum, dimana $|Z_{th}| = |Z_L|$. Sehingga, persamaan daya diatas Titik *collapse* yang biasanya dinyatakan dalam daya aktif sehingga faktor daya ($\cos \varphi$) berpengaruh, sehingga persamaan untuk daya aktifnya adalah :

$$P_{max} = \frac{|V_{th}|^2 \cos \varphi}{2|Z_{th}|(1 + \cos(\delta_{Z_{th}} - \delta_{Z_L}))} \quad (10)$$

Sehingga, dapat ditentukan daya maksimum dimana menjadi titik *collapse* yang menjadi penentu margin kestabilan tegangannya.

3. Menentukan Margin Kestabilan Tegangan

Pada penentuan prediksi margin kestabilan tegangan didasarkan pada pengukuran lokal ini, penentuan margin kestabilan tegangan menjadi sangat sederhana bila telah didapatkan titik *collapse* dari hasil perkiraan ekuivalen *thevenin* seperti yang telah dijabarkan sebelumnya.

Penentuan margin kestabilan tegangan (VSM) dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$VSM = P_{max} - P_{act} \quad (11)$$

dimana :

$$\begin{aligned} P_{max} &= \text{daya pada titik collapse} \\ P_{act} &= \text{transfer daya pada bus beban aktual} \\ VSM &= \text{voltage stability margin} \end{aligned}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN PREDIKSI MARGIN KESTABILAN TEGANGAN

Pada studi kasus untuk menentukan prediksi margin kestabilan tegangan ini, dipakai sebuah sistem tenaga listrik untuk simulasi dan perhitungannya. Sistem tenaga listrik yang dipakai adalah *testcase IEEE 9 bus system*

dengan parameter beban yang dikembangkan menjadi :

Tabel 1. Parameter Beban Normal

| Nama Beban | Beban Normal | |
|------------|--------------|-------------|
| | P (MW) | Q (MVAR) |
| Load A | 125 | 50 |
| Load B | 90 | 30 |
| Load C | 100 | 35 |

Tabel 2. Parameter Beban Maksimum dan Minimum

| Nama Beban | Beban Max | | Beban Min | |
|------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| | P (MW) | Q (MVAR) | P (MW) | Q (MVAR) |
| Load A | 200 | 80 | 100 | 40 |
| Load B | 150 | 50 | 75 | 25 |
| Load C | 175 | 61.25 | 85 | 29.75 |

Menentukan Prediksi Margin Kestabilan Tegangan dengan Model Regresi Berganda

Pada penelitian ini, penentuan dilakukan dengan simulasi perangkat lunak MATLAB dan DigSILENT. Pada penentuan prediksi margin kestabilan tegangan dengan model regresi berganda, dibutuhkan data margin kestabilan tegangan (VSM), dan data sisa daya reaktif yang dimiliki generator (ΔVAR) dari berbagai kondisi pembebanan dan berbagai kondisi kontingensi.

Beban dasar kemudian disimulasikan untuk beban normal, beban maksimum, dan beban minimum seperti yang telah dijabarkan sebelumnya. Untuk masing-masing kondisi beban, setiap komponen diberi kontingensi N-1, dan kemudian dari setiap simulasi diamati data margin kestabilan tegangan (VSM) dan sisa daya reaktif dari generator (ΔVAR).

1. Menentukan Sisa Daya Reaktif (ΔVAR)

Simulasi

Pada perangkat lunak untuk simulasi pada tugas akhir ini, yaitu DigSILENT, dari setiap kondisi pembebanan dan kontingensi, perlu didapatkan data sisa daya reaktif yang dimiliki tiap generator (ΔVAR). Untuk mendapatkan data sisa daya reaktif tersebut, dapat dilihat dari parameter generator yang pada rating generator itu sendiri :

Sehingga, sisa daya reaktif merupakan hasil pengurangan antara daya reaktif yang keluar dari generator dengan batas daya reaktif pada rating generator itu sendiri. Hal tersebut dapat dilihat dari persamaan :

$$\Delta VAR = Q_{act} - Q_{rating} \tag{12}$$

dimana :

ΔVAR = sisa daya reaktif

Q_{act} = daya reaktif aktual keluar generator

Q_{rating} = daya reaktif maksimum rating generator

2. Menentukan Margin Kestabilan Tegangan (VSM) Simulasi

Penentuan prediksi dengan menggunakan model regresi berganda ini selain memerlukan data sisa daya reaktif yang dimiliki generator, perlu juga untuk menentukan margin kestabilan tegangan secara offline yaitu dengan simulasi. Hal tersebut dapat diketahui dengan mensimulasikan kenaikan beban secara gradual pada setiap beban untuk mendapatkan kurva PV.

Dari kurva PV tersebut, diamati bagian titik collapse kemudian dikurangkan dengan kondisi pembebanan saat itu. Sehingga, dapat didapatkan data margin kestabilan tegangan (VSM) untuk kemudian diproses untuk mendapatkan matriks konstanta.

3. Menentukan Matriks Konstanta

Setelah data diperoleh, dilakukan perhitungan regresi berganda orde satu, tiga, dan orde lima dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB. Data-data VSM dan ΔVAR kemudian diambil untuk setiap kondisi pembebanan dan setiap kondisi kontingensi. Persamaan untuk ketiga orde tersebut, untuk orde satu adalah:

$$VSM = \beta_0 + \beta_1 \cdot \Delta VAR_{21} + \beta_2 \Delta VAR_{22} + \beta_3 \cdot \Delta VAR_{23} + \delta_1 \cdot D1 + \delta_2 \cdot D2 + \delta_3 \cdot D3 + \delta_4 \cdot D4 + \delta_5 \cdot D5 \tag{13}$$

Selain itu, adapun persamaan untuk orde yang lebih tinggi. Pada tugas akhir ini, dipakai orde tiga untuk menghitung matriks konstantanya :

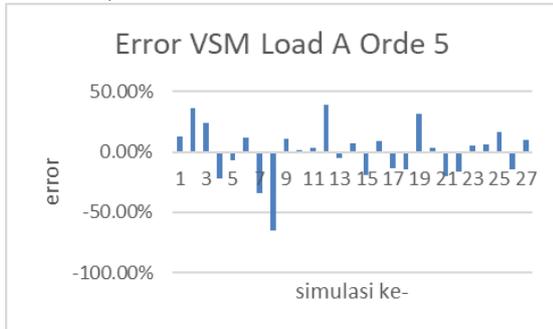
$$VSM = \beta_0 + \beta_{10} \cdot \Delta VAR_{21} + \beta_{11} \cdot \Delta VAR_{21}^2 + \beta_{12} \cdot \Delta VAR_{21}^3 + \beta_{20} \cdot \Delta VAR_{22} + \beta_{21} \cdot \Delta VAR_{22}^2 + \beta_{22} \cdot \Delta VAR_{22}^3 + \beta_{30} \cdot \Delta VAR_{23} + \beta_{31} \cdot \Delta VAR_{23}^2 + \beta_{32} \cdot \Delta VAR_{23}^3 + \delta_1 \cdot D1 + \delta_2 \cdot D2 + \delta_3 \cdot D3 + \delta_4 \cdot D4 + \delta_5 \cdot D5 \tag{14}$$

Selain itu, dipakai juga persamaan orde lima adalah sebagai berikut :

$$VSM = \beta_0 + \beta_{10} \cdot \Delta VAR_{21} + \beta_{11} \cdot \Delta VAR_{21}^2 + \beta_{12} \cdot \Delta VAR_{21}^3 + \beta_{13} \cdot \Delta VAR_{21}^4 + \beta_{14} \cdot \Delta VAR_{21}^5 + \beta_{20} \cdot \Delta VAR_{22} + \beta_{21} \cdot \Delta VAR_{22}^2 + \beta_{22} \cdot \Delta VAR_{22}^3 + \beta_{23} \cdot \Delta VAR_{22}^4 + \beta_{24} \cdot \Delta VAR_{22}^5 + \beta_{30} \cdot \Delta VAR_{23} + \beta_{31} \cdot \Delta VAR_{23}^2 + \beta_{32} \cdot \Delta VAR_{23}^3 + \beta_{33} \cdot \Delta VAR_{23}^4 + \beta_{34} \cdot \Delta VAR_{23}^5 + \delta_1 \cdot D1 + \delta_2 \cdot D2 + \delta_3 \cdot D3 + \delta_4 \cdot D4 + \delta_5 \cdot D5 \tag{15}$$

Untuk ketiga orde tersebut, kemudian ditentukan matriks konstantanya dan

ditemukan koefisien matriks konstanta dari setiap orde. Setelah itu, ditinjau VSM hasil perhitungan dibandingkan dengan hasil simulasi yang menghasilkan error relatif sebagai berikut (untuk perhitungan pada beban A orde 5):



Gambar 4. Error Perhitungan VSM beban A Orde 5

Menentukan Prediksi Margin Kestabilan Tegangan Didasarkan pada Pengukuran Lokal

Kondisi pembebanan yang disimulasikan hanyalah kondisi pembebanan minimum dengan kondisi jaringan normal (tidak ada kontingensi).

Sama seperti sebelumnya, disimulasikan untuk mendapatkan kurva PV pada DigSILENT. Kemudian dicari titik *collapse*-nya. Sehingga didapatkan titik *collapse* hasil simulasi.

Simulasi yang dilakukan merupakan pembebanan yang acak pada beban yang akan diprediksi margin kestabilan tegangannya. Lalu, dari kondisi pembebanan yang acak, setiap titik simulasi diambil data fasor tegangan dan arus pada beban, sehingga diperoleh untuk kondisi pembebanan acak tersebut sebanyak 389 simulasi untuk beban A saja.

Dari kurva PV pada simulasi, didapatkan bahwa titik *collapse* yang didapatkan adalah **283.598 MW**.

1. Perkiraan atau Estimasi Ekuivalen Thevenin

Dalam memperkirakan estimasi ekuivalen thevenin yang dicari adalah impedansi thevenin serta tegangan thevenin. Keduanya dicari dari data-data pengukuran lokal yaitu tegangan dan arus pada bus beban.

Perhitungan ekuivalen *thevenin* berdasarkan data-data fasor arus dan tegangan pada bus beban dihitung dengan regresi linier sederhana,

dan perhitungan dilakukan dengan bantuan perangkat lunak MATLAB.

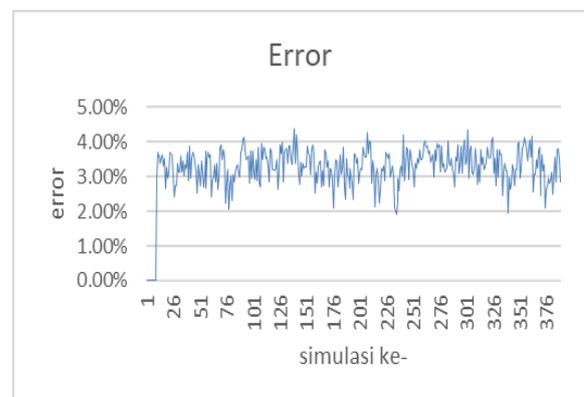
Sehingga, hasil perhitungan tegangan ekuivalen *thevenin* dan impedansi ekuivalen *thevenin* dalam bilangan kompleks didapatkan.

2. Menentukan Titik Runtuh

Setelah diketahui perkiraan ekuivalen *thevenin* baik impedansi maupun tegangan baik komponen real maupun imajiner, dapat ditentukan kemudian titik *collapse*-nya. Sehingga, daya maksimum untuk tiap simulasi dengan perkiraan ekuivalen *thevenin* sebagai acuannya (dalam grafik).

Setelah diketahui perkiraan ekuivalen *thevenin* baik impedansi maupun tegangan baik komponen real maupun imajiner, dapat ditentukan kemudian titik *collapse*-nya. Sehingga, daya maksimum untuk tiap simulasi dengan perkiraan ekuivalen *thevenin* sebagai acuannya (dalam grafik) didapatkan.

Kemudian, dihitung *error* dari hasil perhitungan dibandingkan dengan hasil simulasi. *Error* untuk setiap simulasi tersebut adalah :



Gambar 5. Error Perhitungan VSM beban A Orde 5

Tabel 3. Error Pengukuran Lokal Beban A

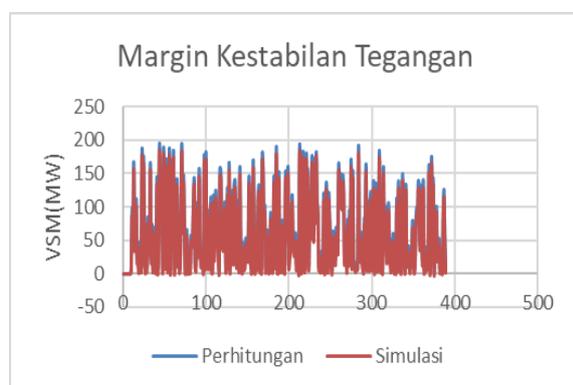
| Error | % |
|------------------|--------------|
| Minimum | 1.90% |
| Maksimum | 4.39% |
| Rata-rata | 3.31% |

3. Menentukan Prediksi Margin Kestabilan Tegangan

Setelah mendapatkan titik collapse atau titik runtuh dalam satuan MW dengan error yang cukup kecil, kemudian ditentukan prediksi margin kestabilan tegangan pada setiap simulasi.

Penentuan prediksi margin kestabilan tegangan (VSM) tersebut, seperti yang dijelaskan sebelumnya.

Daya maksimum perhitungan diambil dari daya maksimum hasil dari perhitungan titik collapse dan daya aktual merupakan daya pembebanan pada setiap simulasi. Sehingga, untuk setiap simulasi, prediksi margin kestabilan tegangannya adalah :



Gambar 6. Margin Kestabilan Tegangan Pengukuran Lokal Beban A

Pada model regresi berganda, ditunjukkan adanya hubungan antara sisa daya reaktif (ΔVAR) dengan margin kestabilan tegangannya (VSM) dimana orde regresi yang terbaik adalah orde lima. Pada prediksi didasarkan pada pengukuran lokal, ditunjukkan bagaimana merepresentasikan sistem tenaga dengan ekuivalen *thevenin* yang diestimasi dengan regresi linier sederhana, dan menentukan titik runtuh berdasarkan transfer daya maksimum ekuivalen *thevenin* secara akurat.

Secara garis besar, perbandingan kedua metodenya mengenai kelebihan dan kekurangannya adalah sebagai berikut :

Tabel . Error Pengukuran Lokal Beban A

| | Model Regresi Berganda | Berbasis Pengukuran Lokal |
|-----------|---|---|
| Kelebihan | Untuk menentukan prediksi batasan kestabilan tegangan di berbagai bus, hanya diperlukan jumlah PMU yang | Bila mempunyai minimal dua pengukuran lokal mengenai fasor tegangan dan arus ekuivalen <i>thevenin</i> mudah dicari |

| | | |
|------------|---|---|
| | sedikit (hanya di pembangkitan saja) | dengan regresi sederhana |
| | | Fleksibel untuk bus manapun dan sistem manapun |
| | | Penentuan prediksi titik runtuh cukup akurat |
| Kekurangan | Diperlukan perhitungan cukup sulit | Satu PMU untuk bus yang ingin ditentukan prediksi batasan kestabilan tegangannya (karena pengukuran lokal) |
| | Tidak fleksibel (bila sistem berbeda, perhitungan <i>offline</i> harus diulang kembali) | Perbedaan beban harus cukup signifikan untuk dapat melakukan regresi |
| | Data sisa daya reaktif dan margin kestabilan tegangan yang dibutuhkan sangat banyak bila ingin meningkatkan akurasi | Perubahan tegangan dan arus pada alur waktu yang cukup signifikan di rentang titik pengukuran sangatlah perlu (bila tidak regresi tidak akan tepat) |
| | Dibutuhkan perhitungan statistik lebih lanjut untuk mencapai akurasi yang lebih baik | |
| | Penentuan prediksi margin kestabilan tegangan tidak terlalu akurat | |

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penentuan prediksi margin kestabilan tegangan dengan model regresi berganda tidak terlalu akurat tanpa analisis statistik tambahan
2. Orde regresi memiliki *error* terkecil pada penentuan prediksi margin kestabilan tegangan adalah regresi berganda orde lima
3. Penentuan prediksi margin kestabilan tegangan dengan model regresi

- berganda hemat dalam penempatan
4. hanya ditempatkan di bus pembangkitan
5. Penentuan prediksi margin kestabilan tegangan didasarkan pada pengukuran lokal sangat akurat
6. Perkiraan ekivalen *thevenin* untuk menentukan titik *collapse* atau titik runtuh dapat diperoleh dengan menggunakan regresi linier kompleks sederhana
7. Penentuan prediksi margin kestabilan tegangan didasarkan pada pengukuran lokal membutuhkan unit pengukur untuk setiap bus yang akan diprediksi margin kestabilan tegangannya

Adapun saran untuk studi selanjutnya dari penelitian adalah sebagai berikut:

1. Pada penentuan prediksi dengan model regresi berganda sebaiknya:
 - a. ditingkatkan akurasi dengan menggunakan statistik lebih lanjut
 - b. menggunakan kurva kapabilitas dari penentuan parameter generator untuk menentukan sisa daya reaktif
 - c. mengumpulkan lebih banyak data margin kestabilan tegangan dan sisa daya reaktif untuk regresi berganda yang lebih akurat
2. Pada penentuan prediksi dengan didasarkan pada pengukuran lokal sebaiknya:
 - a. ada suatu algoritma yang mendeteksi perubahan pembebanan yang cukup signifikan pada rentang banyak titik pengukuran yang telah ditentukan
 - b. mempertimbangkan dinamika sistem tenaga

unit pengukur dimana unit pengukur Algorithm Based on Local Phasor Measurements.

- L. Warland. (2002). *A Voltage Instability Predictor Using Local Area Measurements*. Trondheim: The Norwegian University of Science and Technology.
- Leonardi, B. H. (2011). *Investigation of Novel Methodologies Using Reactive Power Reserves for Online Voltage Stability Margin Monitoring and Control*. Iowa: Iowa State University.
- M. Bahadornejad. (2005). *On-Line Local Measurement Based Voltage Stability Prediction*. Queensland: Queensland University of Technology.
- Rachman, A. (2016). Optimalisasi Teknologi Energi Surya Berbasis Penyesuaian Posisi Panel Bulanan Di Sulawesi Tenggara. *Jurnal Teknologi Universitas Muhammadiyah Jakarta*, 8(1).
- Soliman, S. A., Temraz, H. K., & El-Khodary, S. M. (n.d.). Power System Voltage Stability Margin Identification Using Local Measurements.
- Y. N. N. Tchokonte. (2008). *Real-Time Identification and Monitoring of the Voltage Stability Margin in Electric Power Transmission Systems Using Synchronized Phasor Measurement*. Kassel: Kassel University Press GmbH.
- Zhao, J., Yang, Y., & Gao, Z. (2011). A Review On Online Voltage Stability Monitoring Indices And Methods Based On Local Phasor Measurements. In *17th Power Systems Computation Conference*. Sweden.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajjarapu, V., & Leonardi, B. (2010). *Online Voltage Stability Margin Monitoring Using Synchrophasor Measurements and Statistical Multi-Linear Regression Model*. Iowa: Iowa State University.
- Corsi, S., & Taranto, G. N. (2008). A Real-Time Voltage Instability Identification

