

Penempatan *Phasor Measurement Unit* untuk Menentukan Prediksi Margin Kestabilan Tegangan

Levin Halim¹, Nanang Hariyanto², Muhammad Nurdin³

Abstract—The development of power system in new transmission and generation facilities has burdened the power system more than before. As a consequence, many power systems are facing voltage problems which will lead to voltage instability. This paper discusses the placement of Phasor Measurement Unit (PMU) which utilizes integer linear programming to determine voltage stability margin (VSM) prediction based on local measurement which using thevenin equivalent to represent the power system. The PMU placement is chosen in such way so that the voltage and current phasor at each bus of the power system is observable. Those obtained voltage and current phasor data then will be utilized to determine the voltage stability margin prediction.

Intisari—Perkembangan sistem tenaga 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 yang pada akhirnya akan memicu ketidakstabilan tegangan. Makalah ini membahas penempatan *phasor measurement unit* (PMU) dengan menggunakan *integer linear programming* untuk penentuan prediksi margin kestabilan tegangan (*voltage stability margin* - VSM) dengan didasarkan pada pengukuran lokal yang memakai ekuivalen Thevenin untuk representasi sistem. Penempatan PMU dipilih sedemikian rupa dengan algoritme *integer linear programming* tersebut sehingga dapat ditentukan *phasor* tegangan dan arus pada setiap bus pada sistem tenaga listrik. Data-data yang diperoleh, berupa *phasor* tegangan dan arus pada setiap bus, dipakai untuk perhitungan prediksi margin kestabilan tegangan.

Kata Kunci— penempatan PMU, margin kestabilan tegangan, *integer linear programming*, pengukuran lokal, ekuivalen Thevenin, *phasor measurement unit*.

I. 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 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 yang pada akhirnya memicu ketidakstabilan tegangan [1].

¹Dosen, Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Katolik Parahyangan, Jl. Ciembuleuit No.94, Bandung, 40141, INDONESIA (telp: 022-2032655; fax: 022-2032700; e-mail: halimlevin@unpar.ac.id)

^{2,3}Dosen, Teknik Tenaga Listrik, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No.10, Bandung, 40132, INDONESIA (telp: 022-2500935; e-mail: nanang.hariyanto@stei.itb.ac.id)

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 baik tidaknya sebuah sistem tenaga listrik tersebut.

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

Sekarang ini, sangatlah penting untuk menghasilkan aplikasi dan alat yang dapat mengawasi (melakukan *monitoring*) operasi sistem tenaga dengan cara yang aman, yang dapat membantu mencegah kondisi yang berat yang mungkin akan mengakibatkan tegangan runtuh (*voltage collapse*).

Penggunaan sebuah *phasor measurement unit* (PMU) yang tersinkronisasi merupakan alternatif yang sangat baik untuk mengawasi VSM. PMU ini secara langsung mengukur *phasor* dari *state variable* sistem tenaga yang dapat ditransmisikan ke *control center* melalui infrastruktur komunikasi andal dengan kecepatan tinggi [2]. PMU mempunyai kemampuan untuk menyediakan pengukuran *phasor* tersinkronisasi dari *grid* sistem tenaga, sehingga PMU sekarang ini dianggap sebagai salah satu peralatan pengukuran yang penting pada sistem tenaga listrik. Hal ini dikarenakan teknologi PMU memungkinkan untuk menganalisis sebuah sistem tenaga untuk menentukan prediksi VSM.

Oleh karena itu, diperlukan penempatan PMU sedemikian sehingga *phasor* tegangan dan arus pada seluruh bus di sistem tenaga listrik dapat ditentukan. Lebih jauh lagi, *phasor* tegangan dan arus tersebut dapat dipakai untuk menentukan suatu prediksi seberapa jauh keadaan sistem pada ketidakstabilan tegangan yang akan menyebabkan *voltage collapse*.

Metode-metode yang dipakai untuk penempatan tersebut antara lain menggunakan *particle swarm* [3], mempertimbangkan *bus weight* [4], dan menggunakan *integer linear programming* [5]–[9], yang metode ini merupakan metode paling sederhana dan dapat dimodifikasi. Algoritme penempatan diproses sedemikian rupa agar setiap bus pada sistem tenaga terobservasi secara menyeluruh.

Selain itu, beberapa metode juga dipakai untuk menentukan VSM ini. Salah satunya adalah dengan model regresi multilinear yang mempertimbangkan hubungan antara cadangan daya reaktif dengan VSM-nya [10]. Adapun metode

lain dengan didasarkan pada pengukuran pada bus lokal dibahas referensi [1], [11]–[14], dengan mempertimbangkan transfer daya maksimum dan memodelkan sistem menjadi ekuivalen Thevenin. Metode yang didasarkan pada pengukuran lokal ini membutuhkan perhitungan dan perkiraan ekuivalen Thevenin dengan menggunakan regresi linear kompleks sederhana. Selain itu, metode ini sangat mudah diaplikasikan dan merupakan salah satu metode untuk memperkirakan prediksi VSM yang sangat presisi.

Pada makalah ini dibahas penentuan lokasi penempatan PMU dengan menggunakan *integer linear programming*. Kemudian dari penempatan tersebut ditentukan fasor tegangan dan arus untuk setiap bus yang ada di sistem tenaga dengan menggunakan KCL dan KVL sederhana dengan mengetahui impedans saluran yang ada pada sistem tenaga. Setelah itu, dari data *phasor* tegangan dan arus tersebut dilakukan prediksi VSM dengan didasarkan pada pengukuran lokal yang mengambil *phasor* tegangan dan arus di bus tempat VSM akan ditentukan. Sama seperti pada penelitian sebelumnya, pemodelan sistem direpresentasikan dengan ekuivalen Thevenin yang terhubung ke beban. Perhitungan Thevenin dilakukan secara sederhana, yaitu dengan regresi sederhana untuk mencari titik *collapse tegangan* dan kemudian ditentukan prediksi VSM dari hasil perhitungan.

Penelitian ini dilaksanakan untuk memperoleh penempatan PMU serta prediksi VSM secara *online* dengan menggunakan data-data hasil pengukuran dari PMU hasil penempatan tersebut. Simulasi dibuat dengan menggunakan perangkat lunak DigSILENT untuk menyimulasikan data-data PMU berupa *phasor* tegangan dan arus. Sedangkan pemodelan, perhitungan, dan algoritme penempatan PMU maupun prediksi VSM dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk memudahkan komputasi.

II. METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan dengan memanfaatkan PMU sebagai alat utama untuk mendapatkan data *phasor* tegangan dan data *phasor* arus. Oleh karena itu, penelitian ini dimulai dengan melakukan optimalisasi penempatan PMU terlebih dahulu.

Penempatan PMU dihitung sedemikian rupa sehingga jarak antar PMU hanya satu komponen, sehingga melalui perhitungan rangkaian listrik sederhana, seluruh bus dapat diobservasi.

Data-data dari seluruh bus tersebut kemudian dimanfaatkan untuk mendapatkan prediksi VSM dengan memanfaatkan regresi sederhana menggunakan sepuluh data historis yang masuk pada setiap bus.

A. Optimalisasi Penempatan PMU

Sebuah PMU mampu menjadikan bus yang terpasang PMU dan bus yang terhubung menjadi terobservasi. Tujuan dari penempatan optimal PMU dalam suatu sistem tenaga listrik adalah untuk mendapatkan jumlah PMU yang minimal, tetapi sistem tenaga listrik dapat terobservasi secara menyeluruh.

Penempatan optimal PMU ini dapat dirumuskan dengan *integer linear programming* sebagai berikut.

Fungsi tujuan (*objective function*):

$$\text{Min } Z = \sum_{k=1}^N x_k \quad (1)$$

Persamaan yang dibatasi (*constrain function*):

$$[T_{PMU}] \cdot [X] \geq [b_{PMU}] \quad (2)$$

$$[X] \geq [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_N]^T \quad (3)$$

dan

$$x_i \in \{0,1\} \quad (4)$$

$$T_{PMU \ k,m} \begin{cases} 1 & \text{jika } k = m \\ 1 & \text{jika } k \text{ dan } m \text{ terhubung} \\ 0 & \text{untuk keadaan lainnya} \end{cases} \quad (5)$$

dengan

T_{PMU} : matriks hubungan antar bus ($N \times N$)

X : penempatan PMU ($N \times 1$)

b_{PMU} : batasan untuk permasalahan ($N \times 1$)

N : banyaknya bus.

Batasan untuk permasalahan, b_{PMU} , didasarkan pada kondisi bahwa pada suatu bus dengan cabang yang dimilikinya, di antara bus-bus tersebut paling tidak diberikan satu buah PMU.

Bila dijabarkan dengan lebih detail, dapat dituliskan sebagai berikut.

Fungsi tujuan (*objective function*):

$$\text{Min } Z = x_1 + x_2 + \dots + x_N \quad (6)$$

Persamaan yang dibatasi (*constrain function*):

$$f1 = T_{PMU_{11}}x_1 + T_{PMU_{12}}x_2 + \dots + T_{PMU_{1m}}x_{1m} \geq 1$$

$$f2 = T_{PMU_{21}}x_1 + T_{PMU_{22}}x_2 + \dots + T_{PMU_{2m}}x_{2m} \geq 1 \quad (7)$$

⋮

$$fk = T_{PMU_{k1}}x_1 + T_{PMU_{k2}}x_2 + \dots + T_{PMU_{km}}x_{km} \geq 1$$

dan

$$x_1, x_2, \dots, x_n \in \{0,1\}. \quad (8)$$

Tanda (+) merupakan logika OR dan bilangan 1 di sisi setelah persamaan (di sebelah kanan) menunjukkan bahwa paling tidak salah satu pada hasil penjumlahan. Selain itu, batasan dalam bentuk vektor $N \times 1$ b_{PMU} dari persamaan tersebut dapat dituliskan

$$b_{PMU} = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1]^T \quad (9)$$

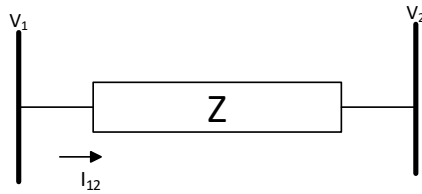
Setelah itu, persamaan dioptimalisasi dengan algoritme *linear programming* biner dan menghasilkan matriks X sebesar $N \times 1$ yang berisi penempatan PMU. Bila terdapat angka 1 pada matriks X di baris ke- n , maka PMU ditempatkan di bus n , sehingga bila terdapat angka 0 di baris ke- n , maka di bus n tidak ditempatkan PMU.

B. Estimasi Phasor Tegangan dan Arus Seluruh Bus

Setelah didapatkan penempatan setiap bus, *phasor* tegangan dan arus di seluruh bus yang tidak ada penempatan PMU harus

diestimasi untuk kemudian dipakai data-datanya untuk ditentukan VSM-nya.

Penempatan PMU secara optimal dengan *integer linear programming* seperti yang dijelaskan sebelumnya akan menghasilkan penempatan sedemikian rupa agar jarak ke bus yang tidak diketahui *phasor* tegangan dan arusnya hanya diapit oleh satu saluran saja. Hal tersebut dapat digambarkan seperti pada Gbr. 1.



Gbr. 1 Rangkaian pengganti antar bus.

Pada Gbr. 1, V_1 adalah *phasor* tegangan pada bus yang diketahui (ada penempatan PMU), V_2 merupakan *phasor* tegangan pada bus yang tidak diketahui, dan I_{12} adalah *phasor* arus yang keluar dari bus yang diketahui menuju bus yang tidak diketahui.

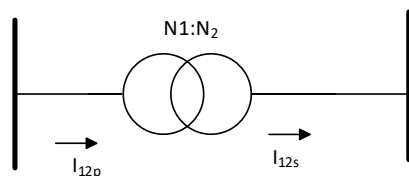
Untuk mengetahui tegangan pada bus yang tidak diketahui, digunakan persamaan rangkaian listrik sederhana seperti pada (10).

$$V_2 = V_1 - Z \cdot I_{12} \tag{10}$$

Sedangkan untuk menentukan *phasor* arus total yang keluar dari bus yang tidak diketahui, digunakan KCL sederhana biasa dengan jumlah total arus yang keluar dan masuk pada bus tersebut sama dengan nol, seperti pada (11).

$$\sum I = 0 \tag{11}$$

Adapun penentuan estimasi *phasor* tegangan dan arus pada kedua sisi transformator adalah seperti pada Gbr. 2.



Gbr. 2 Rangkaian pengganti trafo.

dengan

$$\frac{I_{12p}}{I_{12s}} = \frac{N_2}{N_1} \tag{12}$$

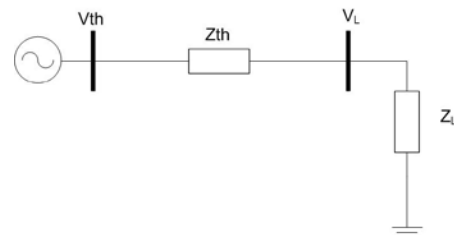
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \tag{13}$$

Akan tetapi, perlu diperhatikan bahwa transformator memiliki impedans, geser fase, dan konfigurasi antar belitan yang memengaruhi *phasor* arus dan tegangan. Impedans akan mengurangi tegangan di sisi primer, geser fase seperti Ynd5 mengubah sudut tegangan senilai $5x-30^0$, sedangkan konfigurasi antar belitan mengubah sudut arus (untuk Y-D

sudut arus di sisi primer $+30^0$ dan untuk D-Y sudut arus di sisi primer -30^0).

C. Margin Kestabilan Tegangan Didasarkan pada Pengukuran Lokal

Kestabilan tegangan berbasis pengukuran lokal ini merupakan analisis mengenai kestabilan tegangan dengan sistem dipandang pada bus lokal. Bus lokal di sini maksudnya adalah bus yang akan ditentukan prediksi VSM-nya. Pada analisis berdasarkan pengukuran lokal ini, sistem direpresentasikan dengan ekuivalen Thevenin yang terhubung dengan impedans beban (sistem ekuivalen dua bus) seperti Gbr. 3.



Gbr. 3 Rangkaian ekuivalen dua bus.

Variabel-variabel pada Gbr. 3 dapat dijelaskan sebagai berikut.

- V_{th} = tegangan Thevenin = $|V_{th}| \angle \delta_{V_{th}}$
- Z_{th} = impedansi Thevenin = $|Z_{th}| \angle \delta_{Z_{th}} = R_{th} + j X_{th}$
- V_L = tegangan bus beban = $|V_L| \angle \delta_{V_L}$
- Z_L = impedans beban = $|Z_L| \angle \delta_{Z_L} = R_L + j X_L$.

1) *Memperkirakan Ekuivalen Thevenin*: Pada makalah ini, metode yang dipakai untuk menentukan perkiraan ekuivalen Thevenin adalah regresi sederhana. Bila dilihat dari Gbr. 3, dapat dituliskan rumus sebagai berikut.

$$V_{th} = Z_{th} \cdot I + V_L \tag{14}$$

Kemudian, (14) dapat diekspresikan menjadi (15).

$$V_L = V_{th} + Z_{th} \cdot (-I) \tag{15}$$

Persamaan (15) dapat direpresentasikan dengan persamaan regresi sederhana seperti (16).

$$y = a + b x \tag{16}$$

dengan

- $y = V_L$
- $a = V_{th}$
- $b = Z_{th}$
- $x = -I$.

Bila dipunyai 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 impedans ekuivalen Thevenin dapat ditemukan. Selain itu, persamaan ini berlaku untuk bus mana pun.

2) *Menentukan Titik Runtuh (Collapse Point)*: Setelah mendapatkan perkiraan ekuivalen Thevenin, nilai ini dapat digunakan untuk menentukan titik runtuh. Titik runtuh ini

dinyatakan dalam daya, biasanya dalam satuan MW seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Perlu diketahui bahwa pada perhitungan nilai titik runtuh ini, diasumsikan beban adalah P konstan.

Pada Gbr. 3, arus pada beban besar (magnitude) tersebut adalah sebagai berikut.

$$|I| = \frac{|V_{th}|}{\sqrt{|Z_{th}|^2 + |Z_L|^2 + 2|Z_{th}||Z_L|\cos(\delta_{Z_{th}} - \delta_{Z_L})}} \quad (17)$$

Magnitude dari tegangan pada sisi penerima atau tegangan bus beban adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} |V_L| &= |Z_L||I| \\ &= \frac{|V_{th}||Z_L|}{\sqrt{|Z_{th}|^2 + |Z_L|^2 + 2|Z_{th}||Z_L|\cos(\delta_{Z_{th}} - \delta_{Z_L})}} \end{aligned} \quad (18)$$

Maka, besar daya yang disuplai ke beban adalah

$$S = \frac{|V_{th}|^2 |Z_L|}{|Z_{th}|^2 + |Z_L|^2 + 2|Z_{th}||Z_L|\cos(\delta_{Z_{th}} - \delta_{Z_L})} \quad (19)$$

Titik runtuh berada pada transfer maksimum, dengan $|Z_{th}| = |Z_L|$, sehingga persamaan daya di atas titik runtuh yang biasanya dinyatakan dalam daya aktif sehingga faktor daya ($\cos \varphi$) berpengaruh, sehingga persamaan untuk daya aktifnya adalah

$$P_{max} = \frac{|V_{th}|^2 \cos \varphi}{2|Z_{th}|(1 + \cos(\delta_{Z_{th}} - \delta_{Z_L}))} \quad (20)$$

Maka, dapat ditentukan daya maksimum yang menjadi titik runtuh yang menjadi penentu VSM-nya.

3) *Menentukan Margin Kestabilan Tegangan:* Pada penentuan prediksi VSM berdasarkan pengukuran lokal ini, penentuan VSM menjadi sangat sederhana bila telah didapatkan titik runtuh dari hasil perkiraan ekuivalen Thevenin seperti yang telah dijabarkan sebelumnya.

Penentuan VSM dilakukan menggunakan (21).

$$VSM = P_{max} - P_{act} \quad (21)$$

dengan

P_{max} = daya pada titik runtuh

P_{act} = transfer daya pada bus beban aktual

VSM = *voltage stability margin*

III. PENEMPATAN PMU UNTUK PREDIKSI KESTABILAN TEGANGAN SELURUH BUS

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

A. Menentukan Penempatan PMU Optimal

Kondisi pembebanan yang disimulasikan hanyalah kondisi pembebanan normal dengan kondisi jaringan normal (tidak ada kontingensi). Penempatan PMU dilakukan dengan *integer linear programming* seperti yang dijelaskan pada bagian sebelumnya. Mula-mula, ditentukan terlebih dahulu matriks

$[T_{PMU}]$ sebesar 9×9 dan $[b_{PMU}]$ sebesar 9×1 yang merupakan penjabaran dari topologi yang ada, yaitu seperti pada (22) dan (23).

$$[T_{PMU}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$[b_{PMU}] = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T \quad (23)$$

Kemudian didapatkan matriks X sebagai hasil penempatannya, seperti (24).

$$[X] = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1]^T \quad (24)$$

Dapat disimpulkan bahwa PMU sebaiknya ditempatkan di bus 4, bus 7, dan bus 9. Hasil pengukuran PMU ini mengacu kepada *slack bus* pada simulasi, yaitu bus 1, sehingga referensi ketiga PMU tersebut terdapat pada bus 1.

B. Menentukan Estimasi Phasor Tegangan dan Arus Bus

Hasil penempatan menghasilkan *phasor* tegangan dan arus pada bus yang ditempatkan PMU, sehingga *phasor* tegangan dan arus pada bus 4, bus 7, dan bus 9 diketahui dari pembacaan PMU. Adapun kasus yang diterapkan adalah dengan memvariasikan *Load A* saja. Variasi tersebut diterapkan secara acak untuk setiap titik simulasi secara kontinu dengan rentang 0,01 detik tiap titik simulasinya.

Dengan mengetahui data *phasor* arus dan tegangan dari PMU pada bus 4, bus 7, dan bus 9, dapat ditentukan *phasor* tegangan dan arus di bus lainnya.

Selanjutnya, perlu ditentukan estimasi *phasor* tegangan dan arus bus pada bus lainnya dengan persamaan untuk setiap bus (untuk level tegangan yang sama) adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Bus 5} \quad V_5 &= V_4 - Z_{45} \cdot I_{45} \\ V_5 &= V_7 - Z_{75} \cdot I_{57} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} I_5 &= I_{45} + I_{75} \\ \text{Bus 6} \quad V_6 &= V_9 - Z_{96} \cdot I_{96} \\ V_6 &= V_4 - Z_{46} \cdot I_{46} \\ I_6 &= I_{96} + I_{46} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \text{Bus 8} \quad V_8 &= V_7 - Z_{78} \cdot I_{78} \\ V_8 &= V_9 - Z_{98} \cdot I_{89} \\ I_8 &= I_{98} + I_{78} \end{aligned} \quad (27)$$

Sedangkan bus 1, bus 2, dan bus 3 dihitung dengan mempertimbangkan impedans transformator, geser fase, dan

konfigurasi dengan data seperti yang telah dijabarkan sebelumnya dan dijelaskan pada bagian sebelumnya secara langsung dengan perhitungan matematika biasa.

Error secara keseluruhan dapat dijabarkan seperti pada Tabel I dan Tabel II. Error dihitung dengan membandingkan hasil dari pembacaan PMU beserta perhitungannya dengan hasil simulasi aktual.

TABEL I
ERROR ESTIMASI TEGANGAN

Error Tegangan (%)	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 5 (berdasarkan PMU Bus 4)	Bus 5 (berdasarkan PMU Bus 7)
Max	0,996	0,4992	0,399	0,000039	0,000039
Min	0,001	0,0006	0,001	-0,000018	-0,000034
Average	0,51	0,2550	0,199	0,000002	0,0000023
Error Tegangan (%)	Bus 6 (berdasarkan PMU Bus 4)	Bus 6 (berdasarkan PMU Bus 7)	Bus 8 (berdasarkan PMU Bus 7)	Bus 8 (berdasarkan PMU Bus 9)	
Max	0,088242	0,000031	0,000017	0,000015	
Min	-0,101357	-0,000030	-0,000016	-0,000014	
Average	0,0086754	0,0000004	0,0000003	0,0000001	

TABEL II
ERROR ESTIMASI ARUS

Error Arus (%)	Bus 1 (arus ke T1)	Bus 2 (arus ke T2)	Bus 3 (arus ke T3)	Bus 5 (arus ke Load A)	Bus 6 (arus ke Load B)	Bus 8 (arus ke Load C)
Max	0,0001%	0,00012	0,000227	0,0027	0,00066	-0,0113
Min	-0,0002%	-0,00011	0,000199	-0,00038	-0,00077	-0,0319
Average	0,00001%	0,000003	0,000004	0,000005	0,000002	-0,02014

Perlu diketahui, pada praktik pengukuran langsung oleh PMU tidak bisa didapatkan. Error dari estimasi tegangan ini ditunjukkan untuk membuktikan bahwa metodologi yang diajukan, secara simulasi, memiliki error yang kecil untuk mendapatkan data tegangan dan arus setiap bus di sistem tenaga listrik.

C. Menentukan Prediksi Margin Kestabilan Tegangan

Data phasor tegangan dan arus yang digunakan merupakan hasil estimasi seperti yang dilakukan pada bagian sebelumnya dengan penempatan PMU pada bus 4, bus 7, dan bus 9. Kemudian dilakukan variasi Load A, variasi Load B, variasi Load C, dan variasi semua Load secara acak seperti yang dilakukan sebelumnya. Selanjutnya dipilih beberapa data yang mempunyai perbedaan yang cukup signifikan. Lalu, dari kondisi pembebanan yang acak, pada setiap titik simulasi diambil data phasor tegangan dan arus pada bus hasil dari estimasi.

Proses mendapatkan prediksi VSM didasarkan pada pengukuran lokal, dengan data yang mempunyai adalah phasor tegangan dan arus pada setiap bus yang akan diukur VSM-nya. Diperlukan penentuan perkiraan atau estimasi dari ekuivalen Thevenin yang merepresentasikan sistem tenaga sebelum beban.

1) *Memperkirakan Ekuivalen Thevenin:* Data-data dari tiap bus tersebut kemudian dipakai untuk menghasilkan daya aktif, faktor daya, ekuivalen Thevenin, dan impedans beban yang akhirnya dapat menentukan VSM.

Data-data dari tiap bus tersebut kemudian dipakai untuk menghasilkan daya aktif, faktor daya, ekuivalen Thevenin, dan impedans beban yang akhirnya dapat menentukan VSM.

Dalam memperkirakan ekuivalen Thevenin, yang dicari adalah impedans Thevenin serta tegangan Thevenin. Keduanya dicari dari data-data pengukuran yang telah dijabarkan sebelumnya, yaitu phasor tegangan dan arus pada setiap bus.

Perkiraan ini dicari dengan menggunakan regresi linear sederhana seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Seperti data simulasi tersebut, dipunyai banyak data V_L dan I , sehingga regresi ini dapat dilakukan.

Regresi untuk menentukan ekuivalen Thevenin pada makalah ini merupakan regresi suatu variabel kompleks. Regresi ini dilakukan dengan meninjau sepuluh titik pengukuran berurut dari simulasi pertama dan seterusnya, sehingga ada data yang overlap. Perhitungan regresi ini berjalan terus sampai data yang ada habis.

Hal ini dilakukan sebagai pertimbangan untuk implementasi secara online dengan PMU nantinya, karena pada kenyataannya, data akan muncul selalu dari PMU ke control center.

Pemilihan banyaknya titik pengukuran sebanyak sepuluh buah ini dengan pertimbangan bahwa pengukuran yang terlalu sedikit tidak merepresentasikan ekuivalen Thevenin secara akurat. Akan tetapi, bila terlalu banyak, bila terjadi perubahan yang signifikan dari sistem tenaga yang memengaruhi VSM, perubahan tersebut tidak akan berpengaruh pada estimasi ekuivalen Thevenin.

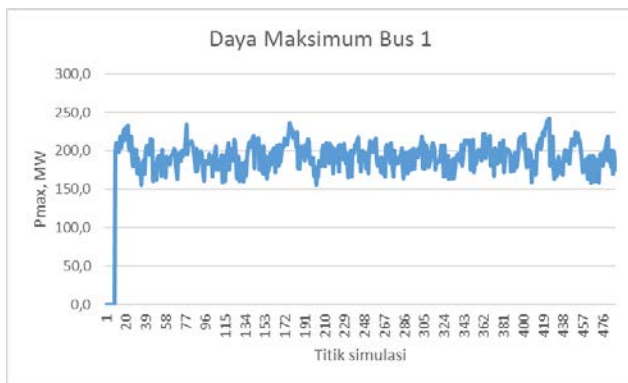
Perhitungan regresi linear dengan variabel kompleks, sebagai data-data yang diperolehnya sesuai dengan hasil simulasi yang disebutkan, diperhitungkan dengan MATLAB.

Akan tetapi, perlu diverifikasi perhitungan ekuivalen Thevenin ini, memang benar atau tidak, agar ekuivalen Thevenin yang digunakan untuk menentukan prediksi VSM ini mendapatkan hasil yang benar, sehingga dibandingkan daya yang dihitung dari data phasor dan tegangan setiap bus dengan daya yang dihitung dari perkiraan impedansi Thevenin, tegangan Thevenin, dan impedans beban. Perbandingan tersebut menghasilkan error yang cukup kecil yang ditunjukkan pada Tabel III. Error ini berpengaruh terhadap perhitungan titik runtuh yang dihitung selanjutnya, yang mungkin mengakibatkan sedikit bergesernya prediksi VSM yang dihasilkan.

TABEL III
ERROR EKVIVALEN THEVENIN

Error (%)	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 4	Bus 5	Bus 6	Bus 7	Bus 8
Max	15	15	15	8,5	0,00	3	14,7	14,9
Min	-8	-13	-9,2	-6,4	-1,93	-2	-15,0	-15,0
Average	3	3	-0,1	-0,1	-0,88	0,04	-1,5	-2,0

2) *Menentukan Titik Runtuh:* Setelah diketahui perkiraan ekuivalen Thevenin, baik impedans maupun tegangan, baik komponen real maupun imajiner, dapat ditentukan titik



Gbr. 4 Daya maksimum bus 1.

runtuhnya dengan persamaan yang telah dijelaskan sebelumnya yang juga bergantung kepada faktor daya bus. Maka, daya maksimum untuk tiap simulasi dengan perkiraan ekuivalen Thevenin sebagai acuannya adalah seperti yang ditunjukkan oleh grafik pada Gbr. 4.

Perlu diketahui bahwa variasi pembebanan untuk simulasi, seperti yang telah disebutkan sebelumnya, adalah acak untuk setiap titik simulasi secara kontinu dengan rentang 0,01 detik tiap titik simulasinya.

3) *Menentukan Prediksi Margin Kestabilan Tegangan:* Setelah mendapatkan titik runtuh dalam satuan MW, kemudian ditentukan prediksi VSM pada setiap simulasi. Penentuan VSM ini akan sangat mudah bila sudah dimiliki titik runtuh dari setiap simulasi. Penentuan prediksi VSM tersebut, seperti yang dijelaskan sebelumnya, ditentukan dengan persamaan yang telah dijabarkan.

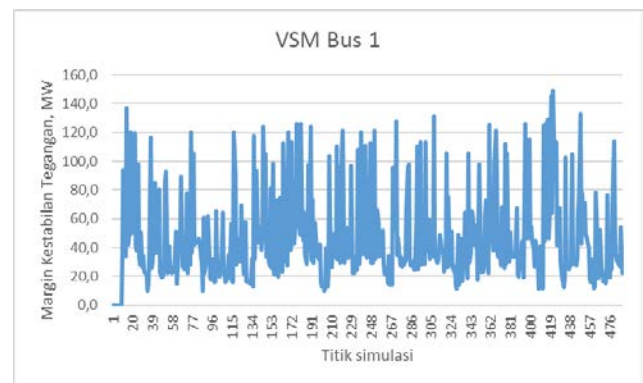
Daya maksimum perhitungan diambil dari daya maksimum hasil perhitungan titik runtuh menggunakan ekuivalen Thevenin dan daya aktual merupakan daya pada bus tersebut dengan perhitungan menggunakan phasor tegangan dan arus hasil estimasi. Untuk setiap simulasi, prediksi VSM-nya ditunjukkan oleh Gbr. 5.

Sedangkan Gbr. 6 merupakan grafik yang menyandingkan daya maksimum (titik runtuh) dengan daya aktualnya.

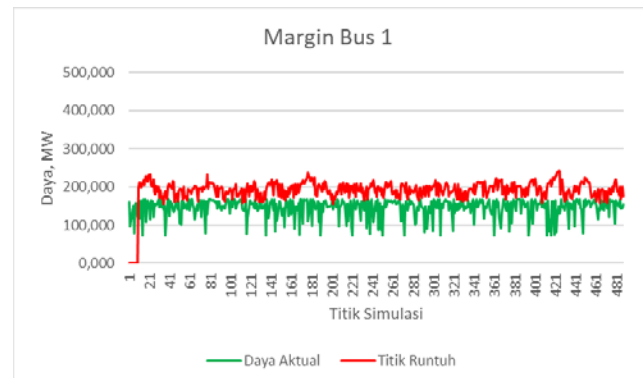
Hasil penentuan VSM ini diperoleh dengan melakukan pengurangan perhitungan daya maksimum yang dihitung dengan ekuivalen Thevenin atau titik runtuh dengan daya aktual yang dihitung dari data phasor arus dan tegangan. Hasilnya menunjukkan bahwa VSM dengan margin kecil menunjukkan bahwa daya aktual pada bus tersebut sudah mendekati titik runtuhnya, sehingga membutuhkan perhatian serta tindakan khusus agar tidak terjadi tegangan runtuh atau *voltage collapse*.

Terlebih lagi, VSM dengan margin besar menunjukkan operasi pada bus tersebut aman. Adapun beberapa data yang menunjukkan bahwa VSM sama dengan nol, bahkan kurang dari nol, menunjukkan bahwa operasi bus tersebut sudah melebihi titik runtuh dari bus tersebut dan diperlukan penanganan khusus.

Pada penentuan prediksi VSM yang didasarkan pada pengukuran lokal ini, PMU berperan sebagai alat untuk mengukur phasor arus dan tegangan pada bus tertentu. Bus



Gbr. 5 Margin kestabilan tegangan bus 1.



Gbr. 6 Margin bus 1.

yang tidak terdapat PMU diestimasi sedemikian rupa sehingga didapatkan phasor arus dan tegangan pada setiap bus di sistem tenaga listrik.

Dibutuhkan perubahan phasor tegangan dan arus untuk memperkirakan ekuivalen Thevenin. Perubahan phasor tegangan dan arus tersebut, pada alur waktu, harus cukup signifikan di rentang titik pengukuran. Bila tidak, akan terjadi perubahan ketidaktepatan perkiraan ekuivalen Thevenin yang tidak sesuai dengan aktualnya. Oleh karena itu, bila dipunyai algoritme untuk mendeteksi adanya perubahan yang cukup signifikan untuk ditambahkan pada perhitungan perkiraan ekuivalen Thevenin akan menambahkan akurasi dari perkiraan ekuivalen Theveninnya.

Pada makalah ini, hal tersebut dikompensasi dengan pemilihan nilai titik pengukuran yang cukup banyak, yaitu sepuluh titik. Akan tetapi, bila perubahan tidak terlalu signifikan dalam jangka sepuluh titik pengukuran tersebut, perhitungan ekuivalen Thevenin menjadi tidak akurat dan tidak merepresentasikan sistem tenaga listrik sebelum bus beban.

IV. KESIMPULAN

Makalah ini menunjukkan bahwa penentuan prediksi VSM seluruh bus dengan memanfaatkan data dari optimalisasi penempatan PMU dapat tercapai dengan error yang cukup kecil. Kemudian, *Integer Linear Programming* dapat digunakan untuk mendapatkan penempatan optimal dari PMU berdasarkan topologi jaringan. Pada kasus dalam makalah ini, penempatan ada di bus 4, bus 7, dan bus 9. Estimasi phasor tegangan dan arus agar seluruh bus terobservasi dapat

dilakukan dengan menggunakan persamaan rangkaian listrik sederhana dan terbukti sangat akurat dengan *error* tidak lebih dari 1%.

Prediksi VSM berdasarkan pengukuran lokal ini dapat dilakukan untuk mendapatkan prediksi VSM pada seluruh bus secara *online* dengan adanya data dari estimasi *phasor* tegangan dan arus setiap bus. Perkiraan ekuivalen Thevenin untuk menentukan titik runtuh dapat diperoleh hanya dengan menggunakan regresi linear kompleks sederhana tanpa perhitungan yang rumit. Ekuivalen Thevenin ini dapat secara layak dipakai untuk menentukan prediksi VSM, didasarkan pada pengukuran lokal dengan *error* daya perbandingan dari estimasi *phasor* tegangan dan arus dengan daya dari ekuivalen Thevenin sudah kurang dari 15%. Selain itu, terlihat bahwa tidak dibutuhkan PMU pada setiap bus untuk dapat menentukan prediksi VSM pada setiap bus yang ada di sistem tenaga.

REFERENSI

- [1] M. Bahadornjad, "On-Line Local Load Measurement Based Voltage Instability Prediction," Ph.D thesis, Queensland University of Technology, Brisbane, Australia, 2005.
- [2] Y.N.N. Tchokonte, "Real-Time Identification and Monitoring of the Voltage Stability Margin in Electric Power Transmission Systems Using Synchronized Phasor Measurements," Doctoral thesis, University of Kassel, Kassel, Germany, 2009.
- [3] C. Sharma dan B. Tyagi, "An Approach for Optimal PMU Placement Using Binary Particle Swarm Optimization with Conventional Measurements," *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 3, No. 3, hal. 56–63, 2011.
- [4] X. Gao, "An Optimal PMU Placement Method Considering Bus Weight and Voltage Stability," *2013 12th Int. Conf. Environ. Electr. Eng.*, 2013, hal. 124–129.
- [5] R. Sudha, D. Jain, U. Lahoty, S. Khushalani, G. Nivedita, dan T. Jayabarathi, "State Estimation and Voltage Stability Monitoring Using ILP PMU Placement," *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, Vol. 2, No. 2, hal. 366–373, 2012.
- [6] B. Gou, "Optimal Placement of PMUs by Integer Linear Programming," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 23, No. 3, hal. 1525–1526, Aug. 2008.
- [7] Y.H. Amrulloh, R.S. Wibowo, dan S. Anam, "Penempatan Optimal Phasor Measurement Unit (PMU) dengan Integer Programming," *Jurnal Teknik POMITS*, Vol. 2, No. 2, hal. B-137-141, 2013.
- [8] X. Bei, Y.J. Yoon, dan A. Abur, "Optimal Placement And Utilization Of Phasor Measurements For State Estimation," *PSERC Pub.* 05-58, Oct. 2005.
- [9] K. Mazlumi, M. Azari, dan S. Beheshti, "Optimal Multistage Scheduling Of PMU Placement for Power System Observability," *IJTPE Journal*, Issue 13, Vol. 4, No. 4, hal. 119–124, 2012.
- [10] B.H. Leonardi, "Investigation of Novel Methodologies Using Reactive Power Reserves for Online Voltage Stability Margin Monitoring and Control," Disertasi, Iowa State University, Ames, USA, 2011.
- [11] S. Corsi, G.N. Taranto, dan S. Member, "A Real-Time Voltage Instability Identification Algorithm Based on Local Phasor Measurements," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 23, No. 3, hal. 1271–1279, Agt. 2008.
- [12] J.E. Tobón V, R.E.C. Gutiérrez, dan J.M. Ramirez, "Voltage Collapse Detection Based on Local Measurements," *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 107, hal. 77–84, Feb. 2014.
- [13] J. Zhao, Y. Yang, dan Z. Gao, "A Review on On-Line Voltage Stability Monitoring Indices and Methods Based on Local Phasor Measurements," *17th Power Systems Computation Conference*, 2011, hal. 1-7.
- [14] V.T. Nguyen, M.Y. Nguyen, dan Y.T. Yoon, "A New Method for Monitoring Local Voltage Stability using the Saddle Node Bifurcation Set in Two Dimensional Power Parameter Space," *J. Electr. Eng. Technol.*, Vol. 8, No. 2, hal. 206–214, Mar. 2013.