

Analisis dan Evaluasi Kestabilan Tegangan dengan Metode *Continuation Power Flow* (CPF) pada Sistem *Microgrid*

Radhilia Sofianna Ruzi, Ontoseno Penangsang, dan Ni Ketut Aryani

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: radhilia.sofianna.ruzi@gmail.com, zenno_379@yahoo.com

Abstrak—Tugas akhir ini bertujuan untuk menganalisis kestabilan tegangan pada sistem microgrid akibat adanya penambahan beban secara kontinyu sehingga terjadi ketidakmampuan sistem dalam mengendalikan atau mempertahankan tegangan pada masing-masing bus. Penyelesaian tugas akhir diawali dengan mengetahui aliran daya pada sistem dengan menggunakan metode “*Backward-Forward Sweep*” kemudian dilanjutkan dengan menggunakan *Continuation Power Flow* (CPF) sebagai metode untuk mengidentifikasi bus sistem yang paling sensitif mengalami jatuh tegangan serta mendapatkan nilai pembebanan maksimum pada masing-masing bus. Analisis dan simulasi kedua metode ini dilakukan pada jaringan distribusi radial IEEE 33 bus dan IEEE 69 bus^[1]. Efek daripada penempatan DG yang tepat dengan metode *Continuation Power Flow* (CPF) adalah dapat meningkatkan profil tegangan dan dapat mengatasi ketidak-stabilan tegangan, sehingga analisis dan evaluasi kestabilan tegangan dapat terlihat saat kondisi sebelum dan sesudah penambahan DG.

Kata Kunci—*Backward-Forward Sweep*, *Continuation Power Flow* (CPF), *Distributed Generation* (DG), Sistem Distribusi Radial, *Voltage Stability*.

I. PENDAHULUAN

Kestabilan tegangan berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan di setiap bus pada kondisi *abnormal* maupun karena adanya gangguan^[2]. Sistem akan memasuki keadaan ketidakstabilan tegangan ketika terjadi gangguan, peningkatan permintaan beban dan adanya perubahan kondisi sistem. Keadaan tersebut akan menyebabkan penurunan performa sistem, sehingga tegangan menjadi tidak terkendali, akibatnya profil tegangan menurun dan kerugian daya (*Losses*) pada sistem distribusi semakin besar, akibat fatal dari kondisi tersebut adalah terjadinya pemadaman atau *blackout* pada daerah sekitar.

Ketersediaan DG umumnya dalam skala kecil yaitu 1 Watt hingga 300 Mw^[4]. Oleh sebab itu untuk mensuplai konsumen pada skala besar penggunaan DG harus tetap terhubung dengan *Grid*, namun penggunaan penetrasi DG yang berlebih dapat mempengaruhi sistem distribusi hingga sistem transmisi, akibatnya hubungan antara DG dengan *Grid* dapat mempengaruhi kestabilan sistem seperti : frekuensi, proteksi dan kestabilan tegangan^[5].

Oleh karena itu, dalam tugas akhir ini diusulkan sebuah metode untuk menganalisis kestabilan tegangan yang terjadi pada sistem distribusi radial dengan penambahan DG atau disebut juga dengan *Microgrid on*

Grid Model sebagai dasar pertimbangan dalam penempatan DG sehingga profil tegangan dapat meningkat dan dapat mengatasi masalah ketidak-stabilan tegangan.

Tugas akhir ini mengusulkan sebuah metode untuk penempatan DG pada jaringan distribusi berdasarkan analisis CPF dengan cara menentukan bus yang paling sensitif (*Sensitive Bus*) terjadi *voltage collapse* akibat adanya penambahan beban secara kontinyu tanpa mempertimbangkan rating peralatan, setelah itu DG dengan kapasitas tertentu akan dipasang pada *sensitive bus* hingga *objective function* terpenuhi^[6] yaitu meningkatnya profil tegangan.

II. PEMODELAN SISTEM

Continuation Power Flow pada umumnya menggunakan metode newton raphson untuk menghitung aliran daya dari sebuah sistem tenaga yang digunakan sebagai data awal yang selanjutnya akan diolah untuk membentuk kurva P-V dengan adanya penambahan beban secara terus menerus, namun dalam kondisi penggunaan metode newton raphson pada sistem tertentu matriks Jacobian yang dihasilkan menjadi singular, dampak dari hal tersebut adalah metode ini akan menghasilkan numerical perhitungan yang sulit.

Pada tugas akhir ini sistem yang akan dianalisis adalah sistem distribusi radial IEEE 33 bus dan IEEE 69 bus, apabila sistem ini menggunakan metode newton raphson power flow untuk menghitung aliran daya sistem, maka matriks jacobian yang dihasilkan menjadi kurang konvergen karena nilai ratio R/X pada sistem yang tinggi, akibatnya kurva yang dihasilkan cenderung tidak stabil. Oleh sebab itu, pada tugas akhir ini akan menggunakan perhitungan *Continuation Power Flow* dengan menggunakan *first-order polynomial secant predictor* dan hasilnya akan dikoreksi dengan menggunakan metode *backward/forward radial power flow*.

A. *Continuation Power Flow*

Continuation Power Flow dengan menggunakan *first-order polynomial secant predictor* yang hasilnya akan dikoreksi dengan menggunakan metode *backward/forward radial power flow* memiliki beberapa keuntungan diantaranya adalah^[10] :

1. Masalah singularitas yang berhubungan dengan *classical Jacobian matrix-based power-flow methods* menghilang.

2. Lebih efisien dalam menangani sistem dengan berbagai sistem dan beban tidak seimbang.
3. Lebih efisien dalam menangani sistem dengan ratio R/X yang tinggi.
4. Waktu iterasi lebih cepat terutama dalam menangani sistem 3 fasa tidak seimbang.

Proses solusi prediktor dan korektor pada *Continuation Power Flow* digunakan sebagai proses pengolahan kurva PV hingga mendapatkan kondisi pembebanan maksimum. Pertama, inisialisasi awal solusi aliran daya dilakukan untuk menghitung tegangan dengan penambahan beban secara kontinu, penambahan beban dilakukan berdasarkan *secant predictor*, hasil perhitungan tegangan dengan penambahan beban tersebut dikoreksi menggunakan aliran daya *backward/forward sweep* dengan solusi iteratif. Solusi iteratif aliran daya akan berulang hingga mencapai toleransi ketidak cocokan yang telah ditetapkan seperti yang terlihat pada persamaan (1) dan (2). Proses penambahan solusi prediktor dan korektor pada *Continuation Power Flow* akan berulang secara terus menerus hingga parameter ukuran kontrol kurang dari nilai toleransi yang diberikan pada persamaan (5) ketika perulangan tersebut berhenti maka akan didapatkan nilai tegangan pada kondisi pembebanan maksimum.

$$\Delta P_i < \epsilon_{PF} \tag{1}$$

$$\Delta Q_i < \epsilon_{PF} \tag{2}$$

Dimana ΔP_i dan ΔQ_i merupakan ketidak sesuaian daya aktif dan reaktif di bus i dan ϵ_{PF} adalah nilai toleransi aliran daya yang telah ditetapkan.

$$\sigma_k < \epsilon_{MLP} \tag{3}$$

Dimana σ_k adalah ukuran kontrol penambahan beban, sedangkan ϵ_{MLP} adalah definisi dari nilai toleransi untuk menentukan *Maximum Loading Point* (MLP), dalam proses prediktor dan korektor diperlukan perhitungan dua titik pertama pada kurva dengan menggunakan *Adaptive step* (λ). Namun, ukuran step yang digunakan akan dikontrol dengan persamaan sebagai berikut :

$$\sigma_{k+1} = \sigma_k \frac{c}{n_k} \tag{4}$$

$$\lambda_{k+1} = \sigma_k + \lambda_k \tag{5}$$

Dimana C adalah parameter ukuran kontrol sedangkan n_k adalah banyaknya jumlah iterasi aliran daya saat k , k merupakan nilai iterasi pada *Continuation Power Flow*. Setiap ukuran langkah akan diperbarui sesuai dengan persamaan (5), kemudian parameter yang baru dihitung kembali menggunakan persamaan (4). Setiap ukuran langkah yang telah ditentukan maka tegangan terbaru dapat ditentukan, tegangan terbaru pada bus akan dihitung menggunakan persamaan (6) dan (7).

$$V = - \frac{(\lambda_{k-1}) - (\lambda_k)}{(\lambda_{k-1}) - (\lambda_{k-2})} [(V_{k-1}) - (V_{k-2}) + (V_{k-1})] \tag{6}$$

$$\delta = - \frac{(\lambda_{k-1}) - (\lambda_k)}{(\lambda_{k-1}) - (\lambda_{k-2})} [(\delta_{k-1}) - (\delta_{k-2}) + (\delta_{k-1})] \tag{7}$$

Sedangkan bus data pada setiap ukuran langkah yang telah ditentukan juga akan dihitung menggunakan persamaan (8), dimana K adalah *load multiplier*.

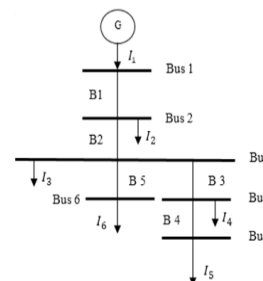
$$P_{(nk,i)} = (1 + \lambda \cdot K) P_{(nk,0)} \tag{8}$$

B. Backward/Forward Sweep Load Flow

Analisis aliran daya pada sistem distribusi radial memiliki banyak cabang dan banyak beban terpasang, hal tersebut menyebabkan ratio R/X tinggi, oleh sebab

metode *backward-forward sweep* adalah metode yang paling tepat untuk diaplikasikan ke sistem distribusi radial. Langkah awal dari metode *Backward – Forward Sweep* adalah menghitung besar arus yang mengalir pada saluran, dari bus paling awal hingga akhir yang disebut dengan *backward sweep* dan yang kedua adalah menghitung nilai drop tegangan pada setiap saluran dengan mengkalikan nilai arus yang telah dihitung sebelumnya dengan nilai impedansi salurannya yang disebut dengan *forward sweep*.

Gambar. 1. merupakan salah satu contoh dari gambar *single line diagram* untuk pembentukan matrik dalam persamaan aliran daya.



Gambar 1. Single Line Diagram [12]

Untuk menghitung arus cabang didapatkan dari hubungan daya kompleks dan tegangan pada setiap bus, seperti persamaan dibawah ini :

$$I_i^k = \text{conj} \left(\frac{P_i + jQ_i}{V_i^k} \right) \tag{9}$$

Dimana :

I_i^k = Arus pada bus I saat iterasi ke-K

V_i^k = Tegangan pada bus I saat iterasi ke-K

Metode *Backward-Forward Sweep* membutuhkan modifikasi perhitungan untuk memudahkan dalam membentuk persamaan dan proses iterasi sehingga dapat menghitung nilai tegangan di setiap bus nya, proses modifikasi tersebut berupa persamaan matrik BIBC (*Bus Injection to Branch Current*), matrik BIBC adalah matrik hubungan antara arus dan saluran pada sistem.

Gambar *single line diagram* diatas menghasilkan persamaan untuk membentuk matrik BIBC, dengan menggunakan hukum *kirchoff* untuk arus. Arus cabang I terhadap bus atau saluran B, maka persamaan yang didapat adalah seperti berikut :

$$B_5 = I_6 \tag{10}$$

$$B_4 = I_5$$

$$B_3 = I_4 + I_5$$

$$B_2 = I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

$$B_1 = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

Dimana :

B_n = Saluran Bus n

I_n = Arus Cabang n

Persamaan (10) merupakan persamaan arus cabang I terhadap bus, dimana persamaan tersebut akan dibentuk matrik BIBC seperti berikut :

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$[B] = [BIBC][I] \tag{12}$$

Angka 1 Menyatakan adanya hubungan antara arus dan saluran pada sistem, sedangkan angka 0 menyatakan

tidak adanya hubungan antara arus dan saluran pada sistem, Matriks 1 & 0 yang disebut dengan matriks BIBC. Drop tegangan pada setiap bus dapat ditentukan dengan cara mengkalikan nilai arus yang telah dihitung sebelumnya dengan nilai impedansi salurannya yang disebut dengan *forward sweep*. Hasil persamaan tersebut dapat dilihat pada persamaan (13).

$$\begin{aligned}
 V_2 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} \\
 V_3 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} \\
 V_4 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} \\
 V_5 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} \\
 V_6 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} - B_5 \cdot Z_{26}
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Dimana :

- V_n = Tegangan Bus n
- B_n = Saluran Bus n
- Z_{k-1} = Impedansi Saluran dari bus k ke bus l

Matrik BCBV (*Branch Current to Branch Voltage*) adalah matrik hubungan antara tegangan bus dan arus saluran yang didapat dari penurunan persamaan (14), jika dibentuk sebagai sebuah matrik akan menjadi sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix}
 \tag{14}$$

$$[\Delta V] = [BCBV][B]
 \tag{14}$$

Dimana :

- V_n = Tegangan Bus n
- B_n = Saluran Bus n
- Z_{k-1} = Impedansi Saluran dari bus k ke bus l
- ΔV = Drop Tegangan antara V_k ke V_l

Distribution Load Flow (DLF) merupakan hasil perkalian antara matrik BCBV dan matrik BIBC yang digunakan untuk mendapatkan persamaan untuk menghitung nilai drop tegangan pada setiap bus. Persamaan untuk matrik dari drop tegangan (ΔV), persamaan yang didapat adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 [\Delta V] &= [BCBV][BIBC][I] \\
 [\Delta V] &= [DLF][I]
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Dengan didapatkannya matrik BIBC, BCBV dan ΔV , tegangan pada setiap bus dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah ini :

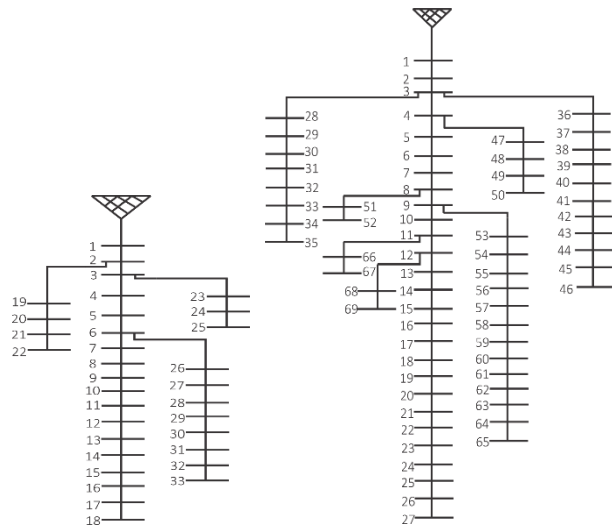
$$[V_i] = [V_1] - [\Delta V]
 \tag{16}$$

Dimana :

- ΔV = Drop Tegangan antara V_k ke V_l
- BCBV = Matrik *Branch Current to Branch Voltage*
- BIBC = Matrik *Bus Injection to Branch Current*
- DLF = Matrik *Distributin Load Flow*
- V_i = Tegangan Saluran Bus i

C. Test System IEEE 33 bus dan IEEE 69 bus

Sistem kelistrikan yang akan digunakan dalam analisis dan evaluasi kestabilan tegangan adalah sistem kelistrikan IEEE 33 Bus dan IEEE 69 Bus^[1] seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Sistem Kelistrikan IEEE 33 Bus (Kiri) dan IEEE 69 Bus (Kanan)

TABEL 1. LINE DATA DAN BUS DATA IEEE 33 BUS

Bus	Dari bus	Ke bus	R (Ω)	X (Ω)	Daya Nominal		
					P (kW)	Q (kVAR)	S (kVA)
2	1	2	0.0922	0.047	100	60	116.619
3	2	3	0.493	0.2511	90	40	98.489
4	3	4	0.366	0.1864	120	80	144.222
5	4	5	0.3811	0.1941	60	30	67.082
6	5	6	0.819	0.707	60	20	63.246
7	6	7	0.1872	0.6188	200	100	223.607
8	7	8	0.7144	0.2351	200	100	223.607
9	8	9	1.03	0.74	60	20	63.246
10	9	10	1.044	0.74	60	20	63.246
11	10	11	0.1966	0.065	45	30	54.083
12	11	12	0.3744	0.1298	60	35	69.462
13	12	13	1.468	1.155	60	35	69.462
14	13	14	0.5416	0.7129	120	80	144.222
15	14	15	0.591	0.526	60	10	60.828
16	15	16	0.7463	0.545	60	20	63.246
17	16	17	1.289	1.721	60	20	63.246
18	17	18	0.732	0.574	90	40	98.489
19	2	19	0.164	0.1565	90	40	98.489
20	19	20	1.5042	1.3554	90	40	98.489
21	20	21	0.4095	0.4784	90	40	98.489

TABEL 1. LINE DATA DAN BUS DATA IEEE 33 BUS (LANJUTAN)

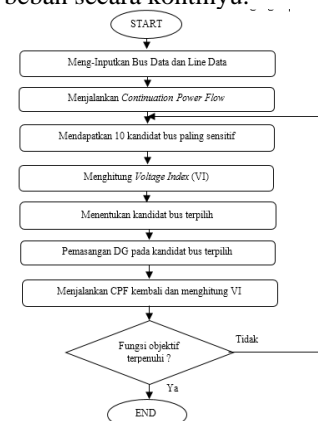
Bus	Dari bus	Ke bus	R (Ω)	X (Ω)	Daya Nominal		
					P (kW)	Q (kVAR)	S (kVA)
22	21	22	0.7089	0.9373	90	40	98.489
23	3	23	0.4512	0.3083	90	50	102.956
24	23	24	0.898	0.7091	420	200	465.188
25	24	25	0.896	0.7011	420	200	465.188
26	6	26	0.203	0.1034	60	25	65.000
27	26	27	0.2842	0.1447	60	25	65.000
28	27	28	1.059	0.9337	60	20	63.246
29	28	29	0.8042	0.7006	120	70	138.924
30	29	30	0.5075	0.2585	200	600	632.456
31	30	31	0.9744	0.963	150	70	165.529
32	31	32	0.3105	0.3619	210	100	232.594
33	32	33	0.341	0.5302	60	40	72.111

TOTAL							
			3715	2300	4369.351		
TABEL 2. LINE DATA DAN BUS DATA IEEE 69 BUS							
Bus	Dari bus	Ke bus	R (Ω)	X (Ω)	Daya Nominal		
					P (MW)	Q (MVAR)	S (MVA)
2	1	2	0.0005	0.0012	0.0000	0.0000	0.0000
3	2	3	0.0005	0.0012	0.0000	0.0000	0.0000
4	3	4	0.0015	0.0036	0.0000	0.0000	0.0000
5	4	5	0.0251	0.0294	0.0000	0.0000	0.0000
6	5	6	0.3660	0.1864	0.0026	0.0022	0.0048
7	6	7	0.3811	0.1941	0.0404	0.0300	0.0704
8	7	8	0.0922	0.0470	0.0750	0.0540	0.1290
9	8	9	0.0493	0.0251	0.0300	0.0220	0.0520
10	9	10	0.8190	0.2707	0.0280	0.0190	0.0470
11	10	11	0.1872	0.0619	0.1450	0.1040	0.2490
12	11	12	0.7114	0.2351	0.1450	0.1040	0.2490
13	12	13	1.0300	0.3400	0.0080	0.0050	0.0130
14	13	14	1.0440	0.3450	0.0080	0.0055	0.0135
15	14	15	1.0580	0.3496	0.0000	0.0000	0.0000
16	15	16	0.1966	0.0650	0.0450	0.0300	0.0750
17	16	17	0.3744	0.1238	0.0600	0.0350	0.0950
18	17	18	0.0047	0.0016	0.0600	0.0350	0.0950
19	18	19	0.3276	0.1083	0.0000	0.0000	0.0000
20	19	20	0.2106	0.0690	0.0010	0.0006	0.0016
21	20	21	0.3416	0.1129	0.1140	0.0810	0.1950
22	21	22	0.0140	0.0046	0.0050	0.0035	0.0085
23	22	23	0.1591	0.0526	0.0000	0.0000	0.0000
24	23	24	0.3463	0.1145	0.0280	0.0200	0.0480
25	24	25	0.7488	0.2475	0.0000	0.0000	0.0000
26	25	26	0.3089	0.1021	0.0140	0.0100	0.0240
27	26	27	0.1732	0.0572	0.0000	0.0000	0.0000
28	3	28	0.0044	0.0108	0.0260	0.0186	0.0446
29	28	29	0.0640	0.1565	0.0260	0.0186	0.0446
30	29	30	0.3978	0.1315	0.0000	0.0000	0.0000
31	30	31	0.0702	0.0232	0.0000	0.0000	0.0000
32	31	32	0.3510	0.1160	0.0000	0.0000	0.0000
33	32	33	0.8390	0.2816	0.0140	0.0100	0.0240
34	33	34	1.7080	0.5646	0.0190	0.0140	0.0330
35	34	35	1.4740	0.4873	0.0060	0.0040	0.0100
36	3	36	1.4740	0.4873	0.0260	0.0186	0.0446
37	36	37	0.0640	0.1565	0.0260	0.0186	0.0446
38	37	38	0.1053	0.1230	0.0000	0.0000	0.0000
39	38	39	0.0304	0.0355	0.0240	0.0170	0.0410
40	39	40	0.0018	0.0021	0.0240	0.0170	0.0410
41	40	41	0.7283	0.8509	0.0010	0.0010	0.0020
42	41	42	0.3100	0.3623	0.0000	0.0000	0.0000
43	42	43	0.0410	0.0478	0.0060	0.0043	0.0103
44	43	44	0.0092	0.0116	0.0000	0.0000	0.0000
45	44	45	0.1089	0.1373	0.0390	0.0263	0.0653
46	45	46	0.0009	0.0012	0.0390	0.0263	0.0653
47	4	47	0.0034	0.0084	0.0000	0.0000	0.0000
48	47	48	0.0851	0.2083	0.0790	0.0564	0.1354
49	48	49	0.2898	0.7091	0.3840	0.2745	0.6585
50	49	50	0.0822	0.2011	0.3840	0.2745	0.6585

TABEL 2. LINE DATA DAN BUS DATA IEEE 69 BUS (LANJUTAN)							
Bus	Dari bus	Ke bus	R (Ω)	X (Ω)	Daya Nominal		
					P (MW)	Q (MVAR)	S (MVA)
51	8	51	0.0928	0.0473	0.0400	0.0283	0.0683
52	51	52	0.3319	0.1114	0.0030	0.0027	0.0057
53	9	53	0.1740	0.0886	0.0040	0.0035	0.0075
54	53	54	0.2030	0.1034	0.0260	0.0190	0.0450
55	54	55	0.2842	0.1447	0.0240	0.0172	0.0412
56	55	56	0.2813	0.1433	0.0000	0.0000	0.0000
57	56	57	1.5900	0.5337	0.0000	0.0000	0.0000
58	57	58	0.7837	0.2630	0.0000	0.0000	0.0000
59	58	59	0.3042	0.1006	0.1000	0.0720	0.1720
60	59	60	0.3861	0.1172	0.0000	0.0000	0.0000
61	60	61	0.5075	0.2585	1.2440	0.8880	2.1320
62	61	62	0.0974	0.0496	0.0320	0.0230	0.0550
63	62	63	0.1450	0.0738	0.0000	0.0000	0.0000
64	63	64	0.7105	0.3619	0.2270	0.1620	0.3890
65	64	65	1.0410	0.5302	0.0590	0.0420	0.1010
66	11	66	0.2012	0.0611	0.0180	0.0130	0.0310
67	66	67	0.0047	0.0014	0.0180	0.0130	0.0310
68	12	68	0.7394	0.2444	0.0280	0.0200	0.0480
69	68	69	0.0047	0.0016	0.0280	0.0200	0.0480
TOTAL					3.7830	2.6841	6.4671

III. ALGORITMA PENEMPATAN DISTRIBUTED GENERATION

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai hasil dari analisis dan evaluasi kestabilan tegangan pada Test System IEEE 33 Bus dan Test System IEEE 69 Bus dengan menggunakan metode *Continuation Power Flow* (CPF), analisis ini dilakukan saat sebelum dan sesudah penambahan *Distributed Generation* (DG). Tujuan utama dari metode *Continuation Power Flow* (CPF) adalah untuk mencari bus yang paling sensitif mengalami *Voltage Collapse* ketika dilakukan penambahan beban secara kontinyu tanpa mempertimbangkan rating peralatan, sehingga dengan mengetahui adanya bus paling sensitif maka bus tersebut dapat dijadikan sebagai referensi penempatan unit DG untuk dilakukan evaluasi kestabilan tegangan dengan adanya penambahan unit DG, evaluasi kestabilan tegangan yang dilakukan dengan menambahkan unit DG akan berdampak pada kestabilan tegangan sistem salah satunya adalah meningkatkan profil tegangan dan menjadikan sistem tidak mudah mengalami *Voltage Collapse* ketika dilakukan penambahan beban secara kontinyu.



Gambar 3. Diagram Alir Penempatan *Distributed Generation* (DG)

Simulasi ini berawal dari menginputkan line data dan bus data, setelah itu simulasi *Continuation Power Flow* (CPF) dijalankan dan akan mendapatkan 10 bus kandidat bus paling sensitif, dimana 10 kandidat bus paling sensitive didapatkan berdasarkan 10 bus dengan nilai gradient terbesar, setelah itu 10 kandidat bus tersebut akan dipasangkan DG secara bergantian untuk dihitung nilai *voltage index* (VI) nya, kandidat bus dengan nilai *voltage index* (VI) terendah akan dijadikan sebagai kandidat terpilih pemasangan DG, proses ini akan terus berulang hingga *voltage index* iterasi saat ini lebih besar dari *voltage index* sebelumnya ($VI_k > VI_{k-1}$).

Voltage Index (VI) merupakan sebuah indikator untuk menentukan deviasi tegangan antara tegangan bus yang diinginkan ($V_{i,0}$) biasanya adalah 1 p.u. dengan tegangan bus setelah penempatan DG ($V_{i,1}$). Semakin rendah nilai VI menunjukkan kinerja DG pada sistem semakin baik.

$$VI = \sum_{i=1}^n (V_{i,0} - V_{i,1})^2 \quad (17)$$

Kapasitas DG yang digunakan berdasarkan penetration level yang diberikan dan dapat dicari menggunakan persamaan (18).

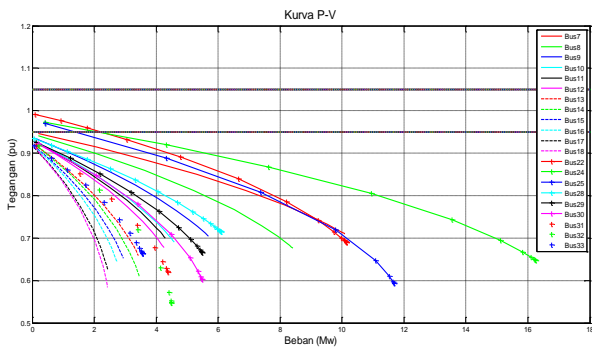
$$PL = \frac{S_{DG}}{S_{load}} \times 100 \% \quad (18)$$

Penetrasi level pada unit DG dibutuhkan untuk menentukan kapasitas DG yang digunakan berdasarkan nilai presentasi dari penetrasi level DG yang dikalikan dengan total daya semu jaringan (S_{load})^[5].

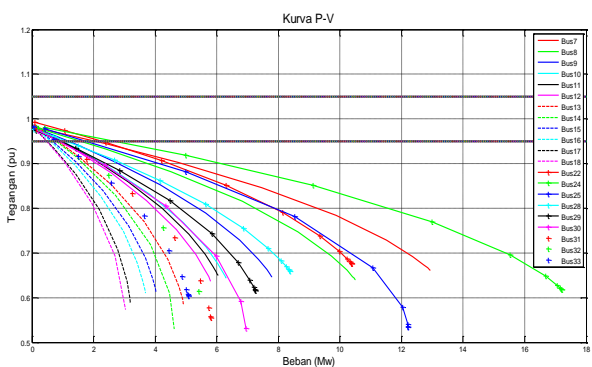
IV. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

A. Hasil Pengujian IEEE 33 Bus

Test System IEEE 33 Bus memiliki total daya aktif dan daya reaktif sebesar 3.7150 MW dan 2.3000 MVar, sehingga penambahan unit DG sebesar 40% akan bernilai 1.4860 MW dan 0.9200 MVar.



Gambar 4. Kurva P-V Sebelum Penambahan *Distributed Generation* (DG)



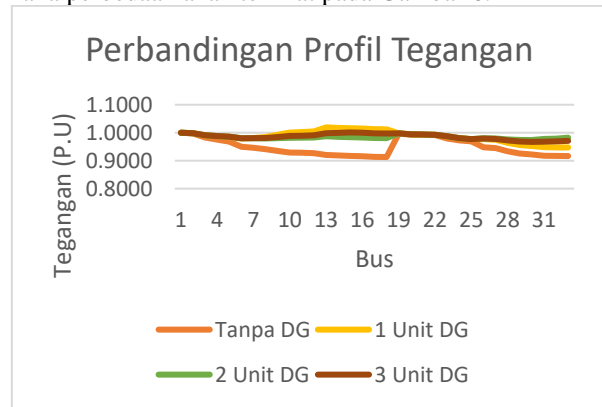
Gambar 5. Kurva P-V Setelah Penambahan *Distributed Generation* (DG) di bus 13 dan 33

Penentuan lokasi DG pada bus 13 dan bus 33 ditetapkan berdasarkan nilai *voltage index* terendah, tidak dilakukan penambahan hingga 3 unit DG karena nilai VI dengan 3 unit DG lebih besar daripada 2 unit DG seperti yang terlihat pada Tabel 1.

TABEL 3. VOLTAGE INDEX TEST SYSTEM IEEE 33 BUS
VOLTAGE INDEX

Base Case	0.1170943
DG 40% di Bus 13	0.0190695
DG 20% di Bus 13, 33	0.0098370
DG 13.33% di Bus 13, 33, 15	0.0098900

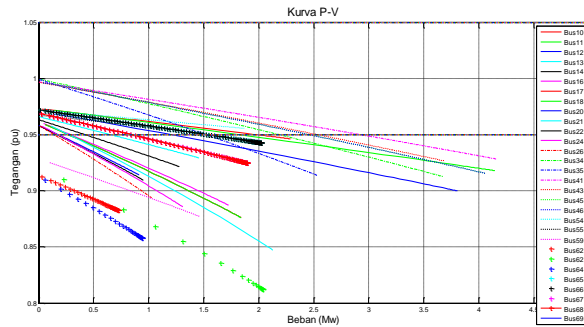
Apabila profil tegangan seluruh case dibandingkan maka perbedaan akan terlihat pada Gambar 6.



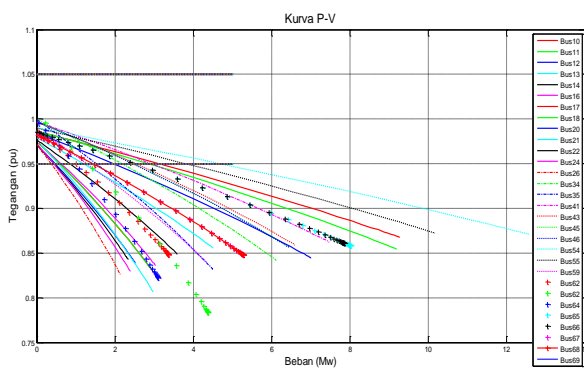
Gambar 6. Perbandingan Profil Tegangan Test System 33 Bus

B. Hasil Pengujian IEEE 69 Bus

Test System IEEE 69 Bus memiliki total daya aktif dan daya reaktif sebesar 3.7830 MW dan 2.6841 MVar, sehingga penambahan unit DG sebesar 40% akan bernilai 1.5132 MW dan 1.07364 MVar.



Gambar 7. Kurva P-V Sebelum Penambahan *Distributed Generation* (DG)

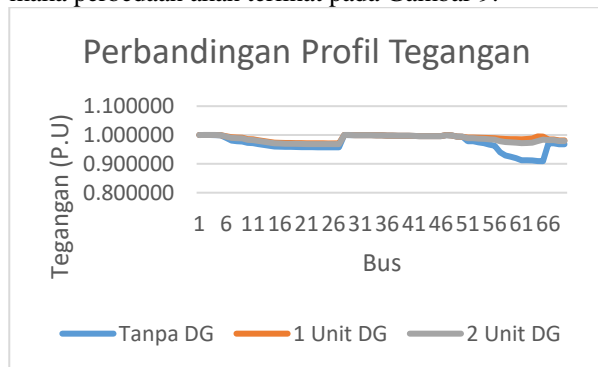


Gambar 8. Kurva P-V Setelah Penambahan *Distributed Generation* (DG) di bus 64

TABEL 4. VOLTAGE INDEX TEST SYSTEM IEEE 69 BUS

VOLTAGE INDEX	
Base Case	0.0979570
DG 40% di Bus 64	0.015661
DG 20% di Bus 64, 65	0.023085

Apabila profil tegangan seluruh case dibandingkan maka perbedaan akan terlihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Perbandingan Profil Tegangan Test System 69 Bus

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis dapat disimpulkan bahwa Metode *Continuation Power Flow* dapat diaplikasikan sebagai salah satu metode untuk menentukan lokasi penempatan DG berdasarkan bus sensitif terjadinya drop jatuh tegangan karena dari hasil simulasi tersebut menunjukkan bahwa dengan adanya penambahan DG yang dilakukan pada sistem distribusi akan memiliki kemampuan sistem yang lebih stabil dan memiliki profil tegangan yang lebih baik.

A. Saran

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan dalam tugas akhir ini adalah :

1. Metode *Continuation Power Flow* (CPF) dapat diaplikasikan sebagai metode untuk menganalisis kestabilan sistem dengan adanya penambahan beban.
2. Perlu dilakukan pengembangan dalam hal memberikan kapasitas *Distributed Generation* (DG) yang akan diimplementasikan
3. Perlu dilakukan pengembangan dalam hal pemodelan *Distributed Generation* (DG) untuk menjaga tegangan sistem

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N.Sahu, "Voltage Regulators Placement in Unbalance Radial Distribution Systems for Loss Minimization Using Particle Swarm Optimization", IJRREE, Vol.1, Issue 3, pp : (11-22), Dec.2014
- [2] P. Kundur, "Voltage Stability, Power System Stability and Control". 959-1019. New York : McGraw-Hill 1994
- [3] W.El-Khattam, M.M.A. Salama, "Distributed Generation Technologies, Definitions and Benefits", ELSEVIER Electric Power System Ressearch 71 (2004) 119-129, Jan.2004
- [4] Ackerman, T. Andersson, G. Soder, L., "Distributed Generation : a definition, Electric Power Systems Research 57, Elsevier, 2001, pp.195-2004
- [5] H.Hedayanti, S.A. Nabaviniaki, and A. Akbarimajid, "A Method for Placement of DG units in distribution network", IEEE Trans. Power Del., vol.23 no.3, pp. 1620-1628, Jul.2008
- [6] M. Etehad, H.Ghasemi, S. Vaez-Zadeh, "Voltage Stability – Based DG Placement in Distribution Networks", IEEE Trans. Power Del., vol. 28, no.1, Jan.2013
- [7] Fathurohman, A, "Analisis Stabilitas Transien Dan Tegangan Pada Sistem Tenaga Listrik Akibat Instalasi Pembangunan Terdistribusi", Digilib.ITS, Surabaya 2016
- [8] Ramadhan, A, "Analisis Stabilitas Tegangan Pada Jaringan Distribusi Radial Tiga Fasa Tak Seimbang", Digilib.ITS, Surabaya 2014
- [9] Standar IEEE
- [10] Abdel-Akher, Mamdouh, "Voltage Stability Analysis Of Unbalanced Distribution System Using Backward/Forward Sweep Load-Flow Analysis Method With Secant Predictor", IET Gener. Transm. Distrib. 2013, Vol.7 Iss. 3, pp. 309-317 309
- [11] K. Purchala, R. Belmans. "Distributed Generation and Grid Integration Issues", Imperial College, London (2003)
- [12] W.N. Rizka, "Alogritma Aliran Daya untuk Sistem Distribusi Radial dengan Beban Sensitif Tegangan", Digilib.ITS, Surabaya 2014
- [13] D.K. Septy, "Pengembangan Software Alanisis Aliran Daya Seimbang Pada Sistem Distribusi Aktif Menggunakan Metode Modified Backward Forward", Digilib.ITS, Surabaya 2015
- [14] F. Jiang, Z. Zhang, "Impact of Distributed Generation on Voltage profile and Losses of Distribuion Systems", Porceedings of the 32nd Chinese Control Conference, 2013