

EVALUASI KEANDALAN SISTEM DISTRIBUSI DENGAN CONSTRAINT STABILITAS SISTEM AKIBAT INJEKSI HYBRID DISTRIBUTED GENERATION

Ruli Isfihana, Hadi Suyono^{*)} dan Rini Nur Hasanah

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya
Jalan MT Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

^{*)}E-mail: hadis@ub.ac.id

Abstrak

Hybrid Distributed Generation (Hybrid DG) adalah gabungan beberapa pembangkit baru dan terbarukan dengan kapasitas pembangkitan kecil, yang terhubung dengan sistem jaringan distribusi. Ketika pada suatu sistem distribusi diinjeksikan sumber pembangkit tambahan, perilaku dan kinerja sistem akan berubah baik dalam keadaan tunak maupun dalam keadaan dinamis. Dalam penelitian ini, berdasarkan potensi yang tersedia diinjeksikan *hybrid DG* yang berupa Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Hasil penelitian menunjukkan bahwa injeksi *hybrid DG* memberikan efek sistem dinamis yang lebih baik daripada sebelum dilakukan injeksi *hybrid DG*. Simulasi skenario kondisi *islanding mode* setelah injeksi DG menunjukkan bahwa sistem distribusi tetap stabil, terjadi perbaikan profil tegangan, perbaikan nilai indeks keandalan sistem, penurunan rugi-rugi daya pada sistem, serta sistem masih dapat beroperasi dalam batas toleransi yang diperbolehkan.

Kata kunci: Hybrid Distributed Generation, Keandalan Sistem, Stabilitas Sistem.

Abstract

Hybrid Distributed Generation (Hybrid DG) is a combination of several new and renewable generators with small generating capacity, which are connected to a distribution network system. When a distribution system is injected with a voltage source or other generating source, the behavior and performance of the system will change both in a steady state and in a dynamic state. Based on the existing potential, the DG injected into the system under consideration in this research are Microhydro Power Plant (PLTMH), Solar Power Plant (PLTS) and Wind Power Plant (PLTB). DG hybrid injection provides a better dynamic system effect than the system before DG hybrid injection. The condition of the system after DG injection and experiencing *islanding mode* indicates that the distribution system is stable, there is an increase in the voltage profile, an improvement in the value of the system reliability index, the reduction of power losses in the system, and the system is still operating within the allowable tolerance limits.

Keywords: Hybrid Distributed Generation, Reliability System, Stability System.

1. Pendahuluan

Energi memiliki peranan yang sangat penting dalam menunjang kehidupan manusia. Energi listrik merupakan salah satu energi yang dibutuhkan dalam kehidupan manusia yang digunakan untuk kebutuhan industri, komersial, perumahan dan kepentingan lainnya [1]. Seiring dengan perkembangan ekonomi dan populasi, permintaan pasokan listrik juga meningkat [2].

Penyediaan energi listrik yang berkualitas, ekonomis, dan andal merupakan masalah penting bagi produsen listrik dan pelanggan. Keandalan sistem distribusi merupakan ukuran dari ketersediaan atau tingkat penyediaan tenaga listrik dari sistem kepada pelanggan. Nilai Indeks

Keandalan Sistem Distribusi adalah sebuah indikator reliabilitas yang dinyatakan dalam satuan probabilitas.[3] Keandalan, kualitas, dan stabilitas adalah persyaratan untuk suatu sistem tenaga listrik dapat dikatakan sebagai sistem yang baik. Sistem harus dapat memberikan daya listrik secara berkelanjutan. Stabilitas frekuensi dan tegangan sangat mempengaruhi stabilitas sistem. Nilai frekuensi dan nilai tegangan harus sesuai dengan regulasi dan diharapkan dapat kembali ke kondisi normal apabila terjadi gangguan. Beberapa kondisi yang menyebabkan terjadinya perubahan frekuensi adalah gangguan hubung singkat, rugi-rugi daya pada generator, perubahan beban secara tiba-tiba dan lain-lain. Perubahan beban yang bervariasi mempengaruhi stabilitas sistem. Jika daya yang dibutuhkan lebih besar dari daya yang dibangkitkan oleh

generator, maka frekuensi generator tersebut akan berkurang. Kondisi tersebut tidak hanya mempengaruhi respon frekuensi tetapi juga respon tegangan pada sistem [4].

Keandalan sistem tenaga dapat dievaluasi menurut parameter keandalan komponen seperti tingkat kegagalan dan waktu perbaikan. indeks keandalan sistem distribusi, seperti indeks frekuensi gangguan rata-rata sistem (SAIFI), rata-rata sistem indeks durasi gangguan (SAIDI), dan index durasi gangguan konsumen rata-rata tiap tahun (CAIDI) [5].

$$SAIFI = \frac{\text{Total gangguan konsumen}}{\text{Total konsumen terlayani}} = \frac{\sum N_{TB} \times \lambda_{TB}}{\sum N} \quad (1)$$

$$SAIDI = \frac{\text{Total durasi gangguan konsumen}}{\text{Total konsumen terlayani}} = \frac{\sum N_{TB} \times U_{TB}}{\sum N} = \frac{\sum \lambda_i \times r_j}{\sum N} \quad (2)$$

$$CAIDI = \frac{\text{Total durasi gangguan konsumen}}{\text{Total konsumen terlayani}} = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad (3)$$

Berdasarkan referensi yang relevan, maka penelitian ini dilakukan dengan tujuan mengevaluasi penelitian sebelumnya. Evaluasi dan simulasi telah dilakukan untuk memperoleh nilai indeks keandalan sistem distribusi dengan *constraint* stabilitas sistem pada penyulang Pujon 20 kV di Malang, Indonesia. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Syamsu D (2017), yaitu melakukan kajian peningkatan keandalan sistem distribusi dengan relokasi *sectionalizer* pada penyulang Pujon dengan pembangkit terdistribusi. *Hybrid* DG yang digunakan adalah PLTMH (Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro) dan Pembangkit Listrik Tenaga Angin (*Wind Turbine*). Pada penelitian lain, yang dilakukan oleh Lukman H (2016), pada penyulang Pujon 20 kV dilakukan studi kelayakan pembangkit listrik tenaga *hybrid* surya-angin. Selanjutnya Alfian N.F (2017), melakukan analisis stabilitas dinamik karena adanya penetrasi dari *hybrid* DG pada saluran distribusi. *Hybrid* DG yang digunakan adalah PLTMH dan *Wind Turbine*. Berdasarkan data penelitian sebelumnya, maka pada penelitian ini sistem distribusi penyulang Pujon 20 kV diberikan injeksi *hybrid* DG, yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Ketiga pembangkit ini ditempatkan pada bus terdekat tempat potensi pembangkit terbarukan berada. Selanjutnya akan dijelaskan perbandingan yang jelas antara tiga jenis DG yang digunakan pada sistem, pembagian *section* (sub-daerah bagian pada sistem distribusi), dan metode yang dilakukan agar sistem tetap andal dan stabil ketika diberikan injeksi *hybrid* DG.

Keuntungan dari sistem injeksi DG jika dibandingkan dengan sistem kelistrikan terpusat adalah sebagai berikut:

sistem DG dapat dioperasikan secara mandiri, area operasi yang diperlukan pembangkit DG tidak begitu besar dan rumit, namun sumber energi yang dikembangkan tergantung pada area beban yang akan disuplai. Selain itu, ada beberapa keuntungan lain dari injeksi DG pada sistem distribusi seperti dampak pencemaran lingkungan yang rendah, meningkatkan profil tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya pada jaringan serta meningkatkan nilai indeks keandalan sistem [6].

Hybrid DG merupakan kombinasi dua atau lebih dari teknologi DG yang berbeda dan terhubung menjadi satu kesatuan sistem tenaga listrik dalam menyediakan listrik untuk pelanggan. Penggunaan *hybrid* DG ini akan memberikan pengaruh terhadap stabilitas tenaga listrik, karena setiap teknologi DG mempunyai karakteristik yang berbeda-beda [7].

Selain berdasarkan potensi pada ketiga jenis DG yang diinjeksi, ketiga jenis DG tersebut diklasifikasikan berdasarkan jenis daya yang dihasilkan, yaitu:

1. Tipe 1

DG yang menghasilkan daya aktif (P) untuk diinjeksikan pada sistem jaringan distribusi. DG tipe 1 adalah PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya).

2. Tipe 2

DG yang menghasilkan daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) untuk diinjeksikan pada sistem jaringan distribusi. DG tipe 2 adalah PLTMH (Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro).

3. Tipe 3

DG yang menghasilkan daya aktif (P) namun menyerap daya reaktif (Q) untuk diinjeksikan pada sistem jaringan distribusi. DG tipe 3 adalah PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu) [8].

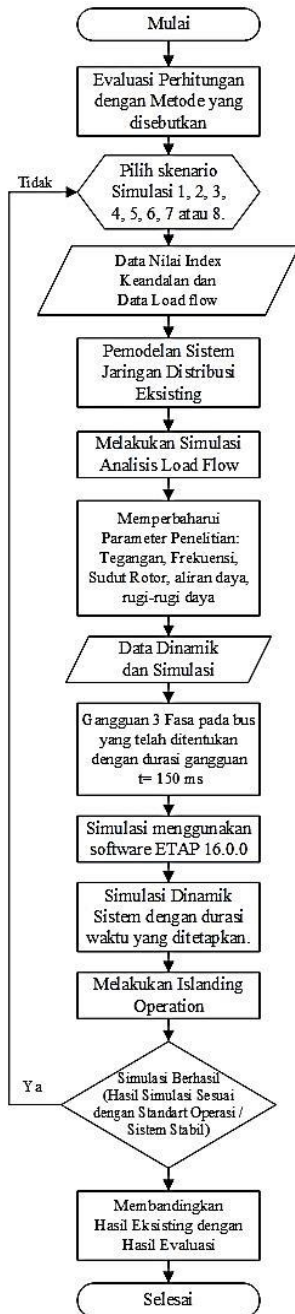
2. Metode Penelitian

Metodologi penelitian yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan dalam diagram alir pada Gambar 1. Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data primer dan data sekunder. Data primer meliputi data beban pada penyulang Pujon 20 kV yang diperoleh dari PT. PLN (Persero) APP Malang dan data *hybrid* DG dari penelitian sebelumnya yang telah disebutkan. Selain itu, data sekunder adalah data dari referensi buku, manual operasi, dan jurnal yang relevan dengan penelitian ini. Berdasarkan data yang tersedia, pemodelan dan simulasi sistem distribusi sebelum dan sesudah injeksi *hybrid* DG (PLTMH, PLTS, dan PLTB) dilakukan dengan bantuan *software* ETAP 16.0.0.

2.1. Fault Hazard Analysis

Evaluasi nilai indeks keandalan sistem dilakukan melalui perhitungan menggunakan metode *Fault Hazard Analysis*

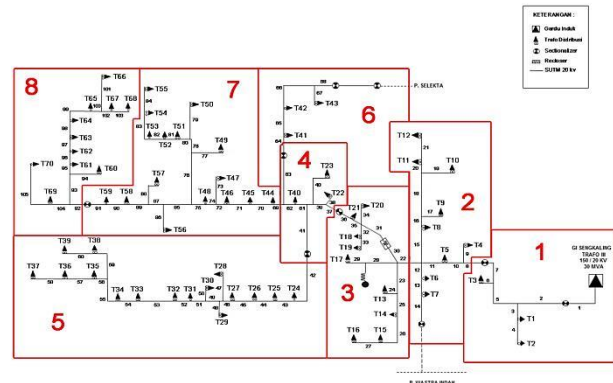
[5]. Metode ini merupakan salah satu metode analisis *failure* yang serumpun dengan metode lainnya seperti FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*). Poin penting metode ini terletak pada penekanan analisis akibat kegagalan secara keseluruhan yang diakibatkan oleh kegagalan pada sub-sub bagian.



Gambar 1. Flowchart Penelitian

Dengan demikian, pada penelitian ini *single line* diagram sistem akan dibagi menjadi sub-sub daerah bagian. Sistem distribusi eksisting penyalang Pujon terbagi menjadi 8 *section*. Jumlah *section* tersebut sesuai dengan jumlah unit *sectionalizer* pada sistem distribusi eksisting.

Sectionalizer atau Saklar Seksi Otomatis (SSO) sebagai alat pemutus rangkaian untuk dapat memisah-memisahkan jaringan utama menjadi beberapa seksi otomatis. Komponen ini akan otomatis bekerja ketika terjadi gangguan permanen, sehingga luas daerah (jaringan) yang mengalami pemadaman akibat gangguan permanen dapat dibatasi sekecil mungkin. *Single line diagram* sistem distribusi eksisting dengan pembagian 8 *section* dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pembagian *section* pada Sistem Eksisting distribusi penyalang Pujon 20 kV.

Sumber: Penelitian sebelumnya. Dhuha, S (2017).

Nilai index keandalan sistem pada setiap *section* (SAIFI, SAIDI) yang diperoleh dari penelitian sebelumnya (analisis berdasarkan data dari PT. PLN APJ Malang, Jawa Timur [5] dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai indeks keandalan Sistem sebelum dievaluasi

No.	Section	Indeks Keandalan	
		SAIFI	SAIDI
1	Section 1	0.17202505	0.00196061
2	Section 2	0.100890135	0.001139239
3	Section 3	0.103416761	0.001210387
4	Section 4	0.042934275	0.000584188
5	Section 5	0.061290894	0.00085385
6	Section 6	0.004398969	0.000123578
7	Section 7	0.170828221	0.001817783
8	Section 8	0.029415736	0.00042966
TOTAL		0.685200041	0.008119295

Sumber: Penelitian sebelumnya. Dhuha, S (2017).

Pada penelitian ini pembagian sub-sub daerah atau *section* tersebut sudah dievaluasi sesuai dengan kapasitas *hybrid* DG yang diinjeksikan pada jaringan sistem distribusi dan terjadi perbaikan nilai indeks keandalan sistem.

2.2. Analisis Dinamik & Load Flow Analysis

Analisis dinamik sistem dan *load flow analysis* dilakukan menggunakan metode Newton-Raphson. Tujuan dari *load flow analysis* (analisis aliran daya) yaitu untuk mengetahui besar vektor tegangan pada tiap bus dan besar aliran daya pada tiap cabang suatu jaringan untuk suatu

kondisi beban tertentu dalam kondisi normal. Hasil perhitungan dapat digunakan untuk menelaah berbagai persoalan yang berhubungan dengan jaringan tersebut, yakni meliputi hal-hal yang berhubungan dengan operasi jaringan [9]. Metode Newton-Raphson dianggap cukup efektif untuk memperoleh solusi iterasi yang dihasilkan dari penyelesaian perhitungan dalam menerapkan deret *taylor* dan matriks *Jacobian* [10]. Metode Newton Raphson memiliki perhitungan lebih baik dari pada metode lainnya. Metode ini lebih efisien dan praktis untuk digunakan pada sistem tenaga yang besar. Jumlah iterasi yang dibutuhkan untuk memperoleh pemecahan ditentukan berdasarkan ukuran sistem. Dalam metode ini persamaan aliran daya dirumuskan dalam bentuk polar [11].

2.3. Islanding Operation

Islanding operation merupakan salah satu pola pengamanan sistem tenaga listrik. Pengamanan dilakukan dengan cara memisahkan unit pembangkit dari sistem tenaga listrik secara otomatis. *Islanding operation* yang dilakukan dengan sengaja, akan otomatis mengisolasi jaringan utilitas dari sisa sistem dan membentuk *power island* ketika terjadi pemadaman. Kondisi ini memungkinkan jaringan mikro mensuplai kebutuhan beban oleh *hybrid DG* [12]. *Islanding operation* dilakukan ketika terjadi penurunan nilai frekuensi secara drastis yang dikarenakan trip-nya generator utama. Secara otomatis, sistem jaringan akan membentuk kelompok-kelompok (pulau-pulau/*island*) kecil yang sesuai dengan kemampuan unit pembangkitnya [13]. Sedangkan *islanding* yang tidak disengaja terjadi akan berdampak buruk bagi sistem, karena transien tegangan dan frekuensi yang disebabkan oleh kelebihan beban pada sistem akan menyebabkan ketidakstabilan pada sistem. Operasi *islanding* bertujuan untuk memulihkan nilai frekuensi sistem tenaga listrik pada nilai *standart* yaitu 50 Hz dengan toleransi $\pm 10\%$.

2.4. Simulasi

Skenario kejadian yang dikaji disimulasikan menggunakan *software* ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) 16.0.0. Hasil simulasi dikaji untuk mengetahui dampak injeksi *hybrid DG* pada sistem distribusi eksisting. Simulasi aliran daya dilakukan untuk menentukan nilai awal kondisi sistem distribusi eksisting sebelum analisis dinamis dilakukan karena injeksi DG.

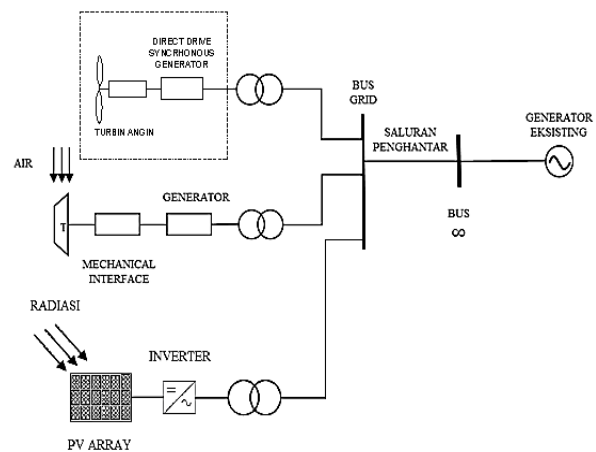
Simulasi dilakukan dalam delapan kondisi seperti yang diberikan pada Tabel 2, yaitu kondisi: 1) sebelum injeksi DG, sumber daya pada sistem hanya dipasok dari grid, 2) kondisi setelah injeksi PLTMH, 3) kondisi setelah injeksi PLTS, 4) kondisi setelah injeksi PLTB, 5) kondisi setelah injeksi PLTMH dan PLTS, 6) kondisi setelah injeksi PLTMH dan PLTB, 7) kondisi setelah injeksi PLTMH, PLTS dan PLTB, 8) kondisi *islanding operation* dengan

100% injeksi dari PLTMH, PLTS dan PLTB (*hybrid DG*).

Tabel 2. Tabel Simulasi Skenario Penelitian

Skenario	Grid	PLTMH (8,7 kW) BUS 55	PLTS (1,3 MVA) BUS 117	PLTB (2 MW) BUS 18
1	X			
2	X	X		
3	X		X	
4	X			X
5	X	X	X	
6	X	X		X
7	X	X	X	X
8 (Islanding Operation)		X	X	X

Pemodelan single line diagram sistem distribusi penyalang Pujon 20 kV dengan injeksi *hybrid DG* dapat dilihat pada Gambar. 3



Gambar 3. Diagram Sistem Distribusi + Injeksi Hybrid DG

3. Hasil dan Analisis

Penyalang Pujon merupakan salah satu penyalang yang mendapatkan suplai daya dari gardu induk (GI) Sengkaling yang berada di wilayah Malang, Jawa Timur.. GI Sengkaling mendapatkan suplai daya dari Gardu Induk Kebonagung yang terhubung dengan 2 buah transformator. Injeksi *hybrid DG* yang diberikan pada bus 18 (PLTB), bus 55 (PLTMH) dan bus 117 (PLTS).

3.1. Aliran Daya Kondisi Steady State

Hasil aliran daya untuk semua skenario dengan kondisi sebelum dan sesudah injeksi DG diberikan pada Tabel 3. Tabel 3 menunjukkan kekuatan pembangkitan, sistem beban, dan rugi-rugi daya untuk 7 kondisi sistem. Rugi daya aktif sehubungan dengan pembangkit yang digunakan pada skenario 1,2,3,4,5,6, dan 7 masing-masing sebesar 9,62%, 9,60%, 5,28%, 3,95%, 5,25%, 3,14%, 3,96%. Akibat injeksi *hybrid DG*, rugi-rugi daya aktif pada sistem berkurang. Selain itu, rugi-rugi daya

reaktif juga berkurang pada skenario 1,2,3,4,5,6, dan 7 dengan nilai masing-masing sebesar 9,22%, 9,20%, 5,87%, 5,60%, 5,84%, 5,56%, 5,60%.

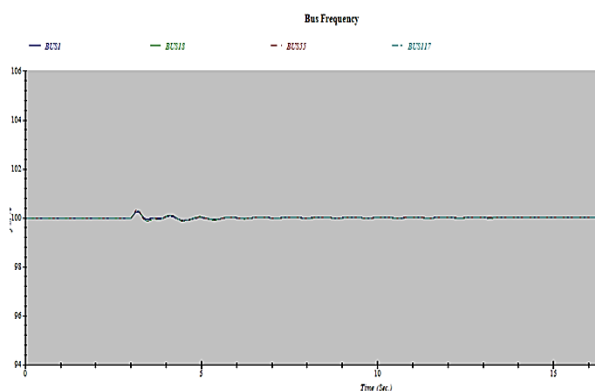
Tabel 3. Hasil Analisis Aliran Daya Semua Skenario

Skenario	Load		Generation		% Loss	
	MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR
1	3,907	2,667	4,323	2,667	9,626	9,228
2	3,908	2,422	4,323	2,667	9,603	9,200
3	4,17	2,579	4,393	2,740	5,283	5,879
4	4,443	2,802	4,443	2,802	3,950	5,606
5	4,163	2,590	4,394	2,750	5,259	5,840
6	4,161	2,570	4,442	2,801	3,140	5,560
7	4,444	2,803	4,444	2,741	3,960	5,600

Hasil kajian stabilitas *steady state* menunjukkan bahwa setelah diberikan injeksi *hybrid DG*, sistem distribusi peyulang Pujon 20 kV dapat kembali ke kondisi stabil.

3.2. Simulasi Dinamik Skenario Injeksi *Hybrid DG*

Simulasi dinamik skenario injeksi *hybrid DG* ditunjukkan oleh respon frekuensi, respon tegangan dan respon sudut rotor. Respon tersebut dapat dilihat pada Gambar 4, Gambar 5, dan Gambar 6.



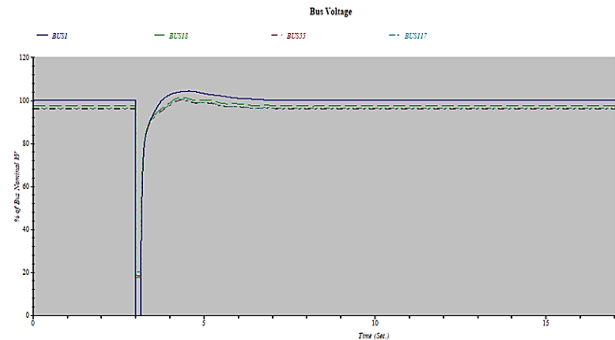
Gambar 4. Respon Frekuensi kondisi Hubung Singkat dengan injeksi *Hybrid DG* (PLTMH+PLTS+PLTB)

Berdasarkan data pada Tabel 4, respon frekuensi pada sistem setelah diberikan injeksi *hybrid DG* dan pada kondisi hubung singkat dapat dikatakan aman dan masih pada batas toleransi sistem operasi yang berlaku.

Tabel 4. Nilai Respon Frekuensi dengan injeksi *Hybrid DG*

Lokasi Bus	Jenis Pembangkit	Frekuensi Normal (Hz)	Frekuensi Setelah Gangguan (Hz)	
			Max	Min
Bus 1	Grid Eksisting	50	50,05	50,00
Bus 18	PLTB	50	50,05	50,00
Bus 55	PLTMH	50	50,05	49,98
Bus 117	PLTS	50	50,00	49,00

Nilai respon frekuensi setelah injeksi *hybrid DG* masih berada pada batas $\pm 10\%$ dari nilai nominal (50 Hz). Frekuensi pada sistem dapat dikatakan stabil.



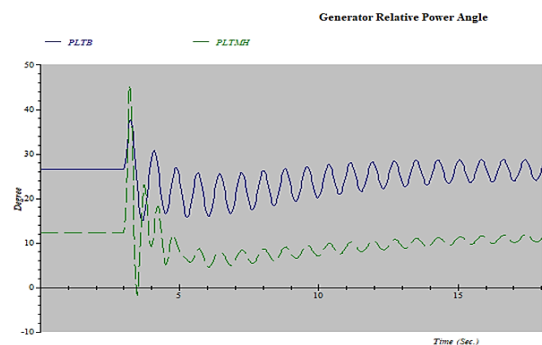
Gambar 5. Respon Tegangan Kondisi Hubung Singkat dengan Injeksi *Hybrid DG* (PLTMH+PLTS+PLTB)

Gambar 5 adalah hasil simulasi respon tegangan bus 1 kondisi hubung singkat. Bus 1 sebagai bus referensi. Nilai respon tegangan pada bus 18, bus 55 dan bus 117 kondisi hubung singkat, dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai Respon Tegangan setelah injeksi *Hybrid DG*

Lokasi Bus	Jenis Pembangkit	$V_{nominal}$ (kV)	V_{drop} (kV)	t_{drop} (ms)
Bus 1	Grid Eksisting	20	0	150
Bus 18	PLTB	20	18,00	150
Bus 55	PLTMH	20	19,75	150
Bus 117	PLTS	20	19,25	150

Berdasarkan data pada Tabel 5, respon tegangan pada sistem setelah diberikan injeksi *hybrid DG* dan pada kondisi hubung singkat menunjukkan bahwa bus 1 mengalami drop tegangan hingga mencapai nilai 0 kV. Namun kondisi tersebut hanya terjadi beberapa saat. Sistem distribusi masih dapat beroperasi dikarenakan mendapat injeksi tegangan dari *hybrid DG*. Untuk hasil yang maksimal dapat dilakukan skenario dengan metode *islanding operation*.



Gambar 6. Respon Sudut Rotor Kondisi Hubung Singkat dengan Injeksi *Hybrid DG* (PLTMH+PLTS+PLTB)

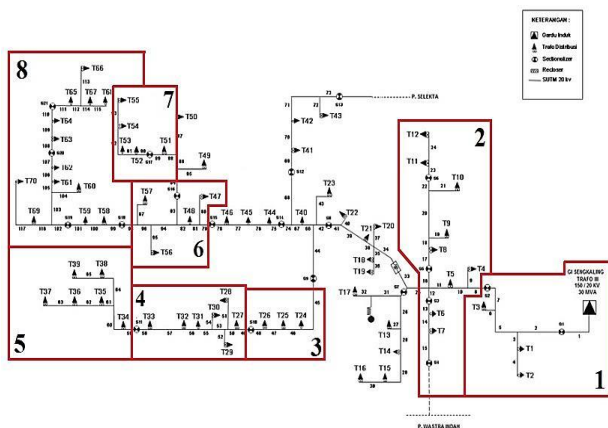
Tabel 6. Nilai Sudut Rotor kondisi Hubung Singkat dengan Injeksi Hybrid DG

Lokasi Bus	Jenis Pembangkit	δ_{awal} (°)	$\delta_{islanding}$ (°)	
			Max	Min
Bus 18	PLTB	26,55	37,65	14,80
Bus 55	PLTMH	12,4	45,40	-1,85

Gambar 6 menunjukkan hasil simulasi respon sudut rotor kondisi hubung singkat. Bus 1 sebagai bus referensi. Berdasarkan Tabel 6 dapat diketahui bahwa sudut rotor mencapai nilai minimum dan sistem mengalami osilasi.

3.3. Skenario Islanding

Metode *islanding operation* dilakukan agar injeksi hybrid DG dapat beroperasi dengan maksimal sesuai dengan kapasitasnya. Evaluasi penempatan *sectionalizer* dilakukan dengan cara relokasi dan penambahan *sectionalizer* pada *section* yang telah ditentukan. Hasil evaluasi dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Evaluasi Section pada Sistem Distribusi

Ketika dilakukan *islanding operation*, maka sistem grid utama akan off dan injeksi hybrid DG diharapkan dapat memberi pasokan energi pada sistem distribusi sehingga mencegah terjadinya *blackout*. Berdasarkan dari data penelitian sebelumnya, total beban dan kapasitas beban pembangkit dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Total Beban dan Kapasitas Beban Pembangkit

Section	Total Kapasitas Beban (kVA)	Jenis DG	Total Pembangkitan (kW)
1.	206	-	-
2.	1.170	PLTB	2.000
3.	314	PLTMH	8,7
4.	346	PLTMH	8,7
5.	320	PLTMH	8,7
6.	341	PLTS	1.234
7.	264	PLTS	1.234
8.	656	PLTS	1.234

Pembagian jumlah *section* pada sistem distribusi berdasarkan dengan data pada Tabel 7 berkaitan dengan penambahan dan relokasi *sectionalizer*. Penambahan dan relokasi *sectionalizer* bertujuan untuk memperbaiki nilai index keandalan sistem. Nilai indeks keandalan sistem (SAIFI, SAIDI) pada setiap *section* yang telah dievaluasi dapat dilihat pada Tabel 8. Pada Tabel 8 diketahui bahwa nilai indeks keandalan sistem mengalami perbaikan. Nilai perbandingan indeks keandalan sistem total sebelum dan sesudah dievaluasi dapat dilihat pada Tabel 9.

Rekomendasi terbaik dalam meningkatkan nilai indeks reliabilitas sistem dengan melakukan skenario *islanding operation*. Skenario tersebut dilakukan dengan memberikan penambahan dan relokasi komponen *sectionalizer* pada sistem. *Sectionalizer* akan mengamankan sistem sesuai dengan *section*-nya sehingga mencegah terjadinya *blackout*. Berkurangnya kejadian pemadaman total / *blackout* pada sistem akan memperbaiki nilai indeks keandalan sistem.

Tabel 8. Nilai Indeks Keandalan Sistem Setelah Evaluasi

No.	Section	Indeks Keandalan	
		SAIFI	SAIDI
1.	Section 1	0.17202505	0.00196061
2.	Section 2	0.078701259	4.282627991
3.	Section 3	0.042174712	0.000209508
4.	Section 4	0.019473243	0.000304324
5.	Section 5	0.011516998	0.000205441
6.	Section 6	0.020121968	0.000247654
7.	Section 7	0.005271329	7.53468E-05
8.	Section 8	0.030985734	0.000243686
TOTAL		0.380270293	0.012853999

Pada Tabel 9 ditampilkan perbandingan nilai indeks keandalan sistem distribusi eksisting dengan nilai indeks keandalan sistem setelah evaluasi. Nilai indeks keandalan sistem mengalami penurunan nilai setelah dilakukan evaluasi. Nilai SAIFI mengalami penurunan hingga 22%, nilai SAIDI mengalami penurunan nilai hingga 30%, dan nilai CAIDI mengalami penurunan hingga 3%.

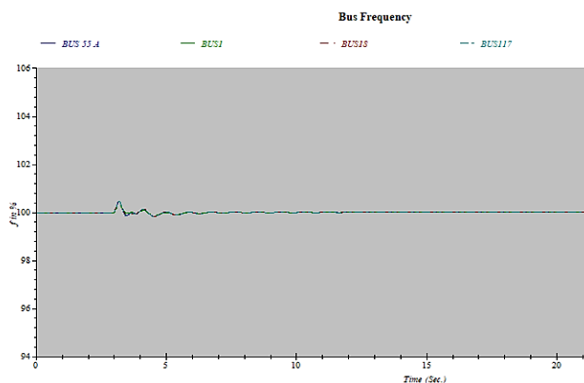
Tabel 9. Perbandingan Nilai Indeks Keandalan Sistem

No.	INDEKS KEANDALAN	NILAI	
		EKSISTING	EVALUASI
1.	SAIFI	0.685200041	0.380270293
2.	SAIDI	0.008119295	0.012853999
3.	CAIDI	0.011849525	0.003380226

3.4. Stabilitas Sistem dengan Injeksi Hybrid DG 100%

Pada skenario *islanding* dengan kapasitas hybrid DG 100%, pada bus 1 diberikan gangguan hubung singkat selama $t = 3.00$ detik. Gangguan berlangsung *permanent* dan sistem akan mengalami *blackout*. Skenario *islanding* dilakukan dengan cara membuka seluruh *sectionalizer* pada saat $t = 3,15$ detik. Pada skenario ini, *supply* energi berasal dari hybrid DG dengan kapasitas 100% sebesar

8,7 kW (PLTMH), 2 MW (PLTB), 1.234 MW (PLTS). Selanjutnya akan dilakukan analisis terhadap respon frekuensi dan tegangan pada bus 1, bus 18, bus 55A, bus 117 dan sudut rotor pada PLTMH dan PLTB. Ketika dilakukan skenario *islanding* maka PLTMH akan memberikan *supply* energi ke *section 3, section 4, section 5*. PLTB akan memberikan *supply* energi ke *section 2, section 7, section 8*. Selanjutnya dapat diambil kesimpulan bagaimana operasi sistem berdasarkan hasil simulasi dari skenario *islanding* dengan kapasitas *hybrid DG* 100%. Respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor dapat dilihat pada Gambar 8, Gambar 9, Gambar 10.

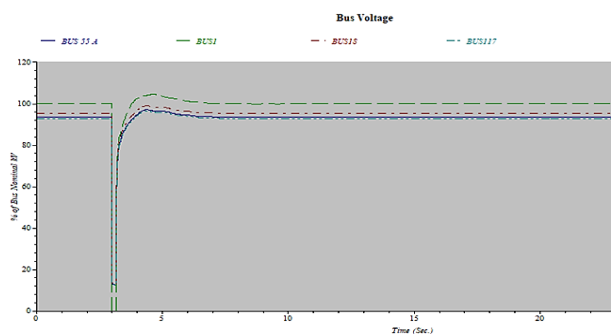


Gambar 8. Respon Frekuensi Skenario *Islanding* dengan Injeksi 100% *Hybrid DG*

Gambar 8 menunjukkan hasil simulasi respon frekuensi bus 1 skenario *islanding* dengan injeksi *hybrid DG*. Bus 1 sebagai bus referensi. Nilai respon frekuensi pada bus 18, bus 55 dan bus 117 dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10. Nilai Respon Frekuensi skenario *Islanding* dengan Injeksi DG 100%

Lokasi Bus	Jenis Pembangkit	Frekuensi Normal (Hz)	Frekuensi Setelah Gangguan (Hz)	
			Max	Min
Bus 1	Grid Eksisting	50	50,05	50
Bus 18	PLTB	50	50	49,95
Bus 55	PLTMH	50	50	49,95
Bus 117	PLTS	50	50	49,95



Gambar 9. Respon Tegangan Skenario *Islanding* dengan Injeksi 100% *Hybrid DG*

Berdasarkan data pada Tabel 10, respon frekuensi pada sistem setelah diberikan injeksi *hybrid DG* dan pada kondisi hubung singkat dapat dikatakan aman dan masih pada batas toleransi sistem operasi yang berlaku. Nilai respon frekuensi setelah injeksi *hybrid DG* masih berada pada batas $\pm 10\%$ dari nilai nominal (50 Hz). Frekuensi pada sistem dapat dikatakan stabil.

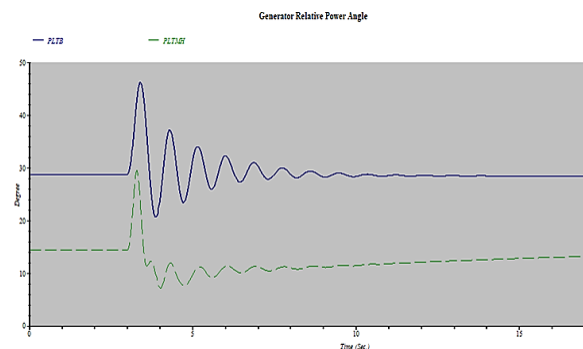
Hasil simulasi respon tegangan bus 1 skenario *islanding operation* dengan injeksi *hybrid DG* kapasitas 100% dan respon tegangan pada bus 18, bus 55 dan bus 117 dapat dilihat pada Gambar 9 Bus 1 sebagai bus referensi. Nilai respon tegangan ditampilkan pada Tabel 11. Pada Tabel 11 dapat dilihat bahwa nilai respon tegangan ketika skenario *islanding operation* dengan kapasitas injeksi *hybrid DG* sebesar 100% masih dalam batas toleransi standar operasi yaitu +5%, -10% dari nilai nominal.

Tabel 11. Respon Tegangan Skenario *Islanding* dengan Injeksi *Hybrid DG* 100%

Lokasi Bus	Jenis Pembangkit	V _{nominal} (kV)	V _{drop} (kV)	t _{drop} (ms)
Bus 1	Grid Eksisting	20	0	150
Bus 18	PLTB	20	19,45	150
Bus 55	PLTMH	20	19,50	150
Bus 117	PLTS	20	19,50	150

Nilai respon tegangan menunjukkan batas nilai yang diperbolehkan untuk kedip tegangan. Untuk *momentary* selama 3 detik sedangkan untuk *temporary* selama 1 menit. Standar yang digunakan untuk kedip tegangan adalah IEEE *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality* [14].

Hasil simulasi respon sudut rotor bus 1 skenario *islanding operation* dengan injeksi *hybrid DG* kapasitas 100% dapat dilihat pada Gambar 10. Bus 1 sebagai bus referensi. Nilai respon sudut rotor ditampilkan pada Tabel 12.



Gambar 10. Respon Sudut Rotor Skenario *Islanding* dengan Injeksi 100% *Hybrid DG*

Sumber energi pada *hybrid DG*, terutama PLTS dan PLTB, memberikan daya ke jaringan sistem melalui konverter elektronik daya yang mengakibatkan kurangnya inersia dan sinkronisasi torsi di seluruh jaringan sistem.

Dengan demikian, injeksi *hybrid DG* dapat mempengaruhi stabilitas sudut rotor [15]. Respon sudut rotor dengan injeksi *hybrid DG* kapasitas 100% dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12. Nilai Respon Sudut Rotor Skenario Islanding dengan Injeksi Hybrid DG 100%

Lokasi Bus	Jenis Pembangkit	δ_{awal} (°)	$\delta_{islanding}$ (°)	
			Max	Min
Bus 18	PLTB	13,5	29,40	5,35
Bus 55	PLTMH	29,50	45,50	20,10

Berdasarkan Tabel 12, sistem mengalami osilasi, namun hal tersebut hanya terjadi beberapa saat dan sistem kembali stabil. Pada kondisi hubung singkat, nilai sudut rotor pada bus 18 dan bus 55 mengalami peningkatan pada kondisi maksimum dan mengalami penurunan pada kondisi minimum namun tidak mencapai nilai terendah 0 (nol) atau nilai minus.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari simulasi serta evaluasi dan analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa pemberian injeksi *hybrid DG* pada sistem distribusi eksisting penyulang Pujon 20 kV berhasil mengurangi rugi-rugi daya pada sistem. Hasil kajian stabilitas *steady state* menunjukkan bahwa pada saat diberikan injeksi *hybrid DG*, sistem masih dapat kembali ke kondisi stabil yang ditunjukkan oleh respon frekuensi, respon tegangan dan respon sudut rotornya. Hasil kajian stabilitas *transient* pada skenario *islanding* dengan injeksi *hybrid DG* menunjukkan terjadinya perubahan sistem namun dapat kembali pada kondisi stabil dan pemberian injeksi *hybrid DG* pada sistem terbukti memperbaiki nilai indeks keandalan sistem, yang ditunjukkan dengan penurunan nilai indeks keandalan sistem.

Referensi

[1]. Center for Technology of Energy Resources and Chemical. Agency for the Assessment and Application of Technology. "Indonesia Energy Outlook 2017 - Clean Energy Technology Development Initiatives". ISBN 978-602-74702-2-4. Jakarta. Indonesia. 2017.
 [2]. PT. PLN Persero, ISSN: 0852-8179, No.02401.120722. 2018.

[3]. Hadi Suyono, Rini Nur Hasanah, Wildan Alfi Syahri, Hazlie Mokhlis, Mir Toufikur Rahman, Rosli Umar. Power System Distribution Reliability Enhancement of Pujon Feeder Malang-Indonesia Case Study using Bat and Cuckoo Search Algorithms. 2020. Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS).
 [4]. Irrine Budi S., Aziz Nurdiansyah, Abraham Lomi. Impact of Load Shedding on Frequency and Voltage System. 978-1-5386-2708-2/17/\$31.00©/2017/IEEE.
 [5]. Hadi Suyono, Wijono, Rini Nur Hasanah, Syamsu Dhuha. Power distribution system reliability improvement due to injection of distributed generation. 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO).2017.
 [6]. Suyono, H., Mahfudz S, Alfian Nur F. Dynamic Stability Impact of the Hybrid Wind and Microhydro Renewable Energy Sources on the Distribution System. IEEE 978-1-5386-5251-0/18/\$31.00 2018.
 [7]. Pinanggih Rahayu, Simulasi dan Pemodelan Pengaruh Hybrid Distributed Generation Terhadap Stabilitas Transient dan Tegangan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Fakultas Teknologi Elektro. 2018.
 [8]. Galuh Prawestri Citra Handani. Optimasi Injeksi Distributed Generation menggunakan Algoritma Cat Swarm Optimization dan Krill Herd Algorithm. Tesis. 2019. Universitas Brawijaya.
 [9]. Stevenson, William D., Granger, John J., 1994. *Power System Analysis*, McGraw-Hill International Edition., New York.
 [10]. Kundur, P (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw Hill, Inc.
 [11]. Saadat, H. 1999. *Power System Analysis*, McGraw-Hill, Inc. USA.
 [12]. Salam, M. A., & Sethulakshmi, S. (2017). Control for grid connected and intentional islanded operation of distributed generation. 2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT). doi:10.1109/ipact.2017.8245110./IEEE.
 [13]. Guntur Yanuar Astono. Analisis Transient Stability Gangguan Short Circuit 3 Phase dan Generator Trip pada Sub Sistem Paiton dan Grati. Tesis. 2020. Universitas Brawijaya.
 [14]. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.2019.
 [15]. Hiroyuki Amano, Akihiko Yokoyama, Rotor Angle Stability Analysis using Normal Form Method with High Penetrations of Renewable Energy Sources – Energy Index for Multi-Swing Stability– 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC), IEEE Publisher.