

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

Ruli Isfihana, Hadi Suyono<sup>\*)</sup>, Rini Nur Hasanah

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

<sup>\*)</sup>E-mail: [hadis@ub.ac.id](mailto:hadis@ub.ac.id)

## Abstrak

Pada penelitian ini evaluasi nilai indeks keandalan sistem distribusi penyulang Pujon 20 kV dilakukan dengan *constraint* stabilitas sistem akibat injeksi *Hybrid Distributed Generation (hybrid DG)*. Evaluasi keandalan sistem dilakukan dengan merekomendasikan penambahan dan relokasi *sectionalizer* pada sistem distribusi. Sistem distribusi diberikan injeksi tiga jenis *Distributed Generation (DG)* yaitu, Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Penambahan *hybrid DG* pada sistem distribusi bertujuan untuk meminimalisir permasalahan kualitas daya dan mampu meningkatkan keandalan sistem distribusi. Injeksi *hybrid DG* mengurangi rugi-rugi daya pada sistem distribusi penyulang Pujon 20 kV. Rugi-rugi daya pada skenario kondisi eksisting adalah sebesar 0,417 MW (9,62%) dan 0,247 MVAR (9,22%). Pada skenario 7 (skenario sistem eksisting + *hybrid DG*) rugi-rugi daya adalah sebesar 0,295 MW (5,50 %) dan 0,15 MVAR (5,80%).

*Kata kunci: Keandalan Sistem Distribusi, Stabilitas Transient, Hybrid Distributed Generation, Islanding, Sectionalizer*

## Abstract

*In this research, the evaluation of the reliability index value of the Pujon 20 kV feeder distribution system was carried out with the system stability constraint effect of the injection of Hybrid Distributed Generation (hybrid DG). Evaluation of system reliability by recommending the addition and relocation of sectionalizers to the distribution system. The distribution system given an injection of three types of Distributed Generation (DG) are Power Plant of Microhydro (PLTMH), Power Plant of Solar (PLTS), and Power Plant of Wind Turbine (PLTB). Injection of hybrid DG reduces the power losses in the Pujon 20 kV feeder distribution system. The power losses in the existing scenario are 0.417 MW (9.62%) and 0.247 MVAR (9.22%). In scenario 7 (scenario of existing system + hybrid DG) the power losses are 0.295 MW (5.50%) and 0.15 MVAR (5.80%).*

*Keywords: Reliability of Distribution System, Transient Stability, Hybrid Distributed Generation, Islanding, Sectionalizer.*

## 1. Pendahuluan

Untuk memenuhi permintaan listrik yang naik sebesar 9 kali lipat dari tahun 2018, maka produksi listrik pada tahun 2050 akan mencapai 2.562 TWh (BaU), 2.167 TWh (PB) dan 1.838 TWh (RK) dengan asumsi bahwa kerugian dalam transmisi dan distribusi sekitar 10%.

Pada tahun 2025, produksi listrik dari pembangkit EBT akan menjadi 154 TWh (BaU), 141 TWh (PB), 294 TWh (RK), terutama berasal dari PLTA, PLTP dan PLT Biomasa. Pada tahun 2050, produksi listrik terbesar untuk skenario BaU berasal dari PLTS, PLT Biomasa dan PLTA (PLTMH). Pada tahun 2050, produksi listrik EBT skenario PB terbesar berasal dari PLTS yaitu 421,3 TWh (68%), diikuti PLTA dan PLTP dengan produksi listrik

masing-masing sebesar 109,5 TWh (18%), dan 73,6 TWh (12%)[1].

Pengembangan pembangkit diupayakan secara optimal dengan prinsip biaya penyediaan listrik terendah (*least cost*), dengan tetap memenuhi kecukupan daya dan tingkat keandalan yang wajar dalam industri tenaga listrik [2].

Pada penelitian ini, untuk mendukung pengembangan pembangkit listrik EBT di masa depan, maka dilakukan penelitian dengan memberikan injeksi *Hybrid Distributed Generation (DG)*. Pembangkit *Hybrid DG* dapat diinjeksi secara langsung ke konsumen, ke jaringan sistem distribusi atau jaringan sistem transmisi [3].

Selain itu, ada beberapa keuntungan lain dari injeksi DG pada sistem distribusi seperti dampak lingkungan yang rendah, peningkatan tegangan profil dan mengurangi rugi-rugi daya pada jaringan [4-5], meningkatkan keandalan sistem[6-7], dan memperbaiki sistem dinamik [8-10].

Pada penelitian ini dilakukan evaluasi indeks keandalan sistem dengan *constraint* (batasan) stabilitas sistem dinamik di jaringan sistem distribusi Gardu Induk Sengkaling, penyulang Pujon 20 kV yang ditimbulkan akibat injeksi *Hybrid Distributed Generation*. *Hybrid Distributed Generation* yang diinjeksi ke jaringan sistem bertujuan agar *Hybrid Distributed Generation* dapat menjadi sumber energi cadangan pada jaringan sistem dan mencegah terjadinya *blackout*. Pembangkit EBT yang digunakan pada penelitian ini adalah Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB).

Pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) adalah pembangkit listrik skala kecil yang menggunakan energi air sebagai penggerakannya. Energi ini secara perlahan diubah menjadi energi mekanik untuk memutar turbin. Energi mekanis dari putaran turbin akhirnya diubah menjadi energi listrik melalui putaran generator. Untuk menghitung daya mekanik yang dibangkitkan oleh turbin adalah [6]:

$$P = 9,8 \eta H Q \dots\dots\dots(1)$$

Dimana:

- P = Daya terbangkitkan (kW)
- $\eta$  = Efisiensi turbin generator
- H = Tinggi terjun air (m)
- Q = Debit air (m<sup>3</sup>/detik)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atau *PV (Photovoltaic)* sistem adalah pembangkit listrik tenaga energi baru terbarukan. Sistem PLTS terdiri dari tiga bagian utama yaitu, *module* panel surya, radiasi sinar surya/matahari, dan temperature (suhu) yang mengenai permukaan *module* panel surya. Secara umum, besar daya keluaran dari *PV* sistem digambarkan dalam bentuk kurva P-V yang merupakan hasil kali dari nilai tegangan dan arus. Karakteristik arus listrik pada *PV* sistem ditunjukkan pada kurva V-I. Persamaan daya listrik  $P_{pv}$  yang dihasilkan oleh *PV* adalah sebagai berikut [11] :

$$P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv} \dots\dots\dots(2)$$

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) termasuk dari salah satu Energi Baru Terbarukan (EBT) yang digunakan di Indonesia. Bagian utama sistem PLTB adalah kecepatan angin, turbin angin, dan generator listrik. Hembusan angin dikonversikan menjadi energi mekanis berupa putaran pada sudut turbin angin, energi mekanis ini kemudian digunakan sebagai penggerak generator [6].

$$P_r = (0.2) \rho A \left[ v_{w,r} \left( \frac{h}{h_{w,r}} \right)^2 \right]^3 \dots\dots\dots(3)$$

Persamaan (3) adalah persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung daya yang dihasilkan oleh turbin angin pada ketinggian turbin angin *h*. Pemodelan sistem distribusi Gardu Induk Sengkaling, penyulang Pujon yang telah diinjeksi *Hybrid Distributed Generation* akan disimulasikan menggunakan *software* ETAP 16.0.0.

## 2. Metode

### 2.1 Newton-Rapshon

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode Newton Rapshon. Metode Newton-Raphson dianggap cukup efektif untuk memperoleh solusi iterasi yang diperoleh dari penyelesaian perhitungan dalam menerapkan deret *taylor* dan matriks *jacobian*. Pada penelitian ini dilakukan analisis aliran daya dan analisis sistem dinamik.

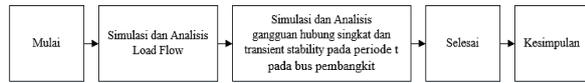
Analisis aliran daya adalah studi yang dilakukan untuk mendapatkan informasi aliran daya sistem dan tegangan sistem dalam kondisi *steady-state*. Informasi ini diperlukan untuk mengetahui, mengevaluasi, dan menganalisis kinerja pembangkit listrik sistem dalam kondisi pembangkit dan beban tertentu yang digunakan untuk menganalisis kondisi sistem baik dalam keadaan normal maupun kondisi darurat.

Stabilitas transien adalah kemampuan sistem untuk tetap dalam kondisi sinkron (sebelum aksi kontrol governor) mengikuti gangguan sistem. Stabilitas dinamis adalah kemampuan dari sistem untuk tetap sinkron setelah ayunan pertama (periode stabilitas transien) hingga sistem mencapai kondisi *steady state* baru [12].

### 2.2 Pemodelan Diagram

GI Sengkaling penyulang Pujon terdiri dari 117 bus. Panjang saluran total 59,65 km dan beroperasi pada tegangan 20 kV dengan frekuensi *standart* 50 Hz. *Hybrid DG* terhubung dengan sistem grid. Metode yang digunakan pada penelitian ini menggunakan metode *Newton-Rapshon*. Simulasi sistem eksisting dan sesudah diberikan injeksi *hybrid DG* dilakukan menggunakan *software* ETAP 16.0.0. Untuk mengetahui dampak dari injeksi *hybrid DG* maka dilakukan simulasi, analisis gangguan hubung singkat (*Short Circuit*) dengan *constraint* stabilitas *transient* pada sistem distribusi. Ada 8 skenario simulasi yang dilakukan untuk mengetahui kondisi sistem distribusi setelah dan sesudah diberikan injeksi *hybrid DG*.

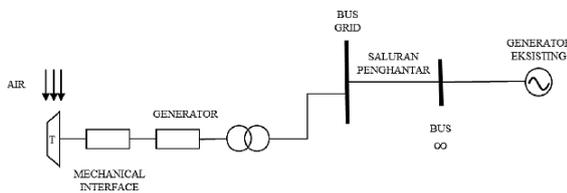
1) Simulasi Skenario 1 (Eksisting)



Gambar 1. Diagram Blok Skenario Simulasi 1 (Kondisi Eksisting)

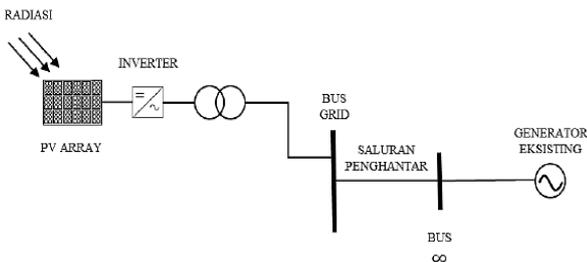
Kondisi Eksisting adalah kondisi awal sistem distribusi. Dilakukan simulasi dan analisis *load flow*. Selanjutnya melakukan simulasi dan analisis gangguan *short circuit* dan *transient stability* pada periode *t* pada bus pembangkit untuk mengetahui respon frekuensi dan tegangan pada sistem distribusi. Apabila simulasi telah selesai dilakukan maka dapat diberikan kesimpulan tentang sistem eksisting penyulang Pujon 20 kV yang diberikan gangguan.

2) Skenario Simulasi Sistem Eks + Hybrid DG

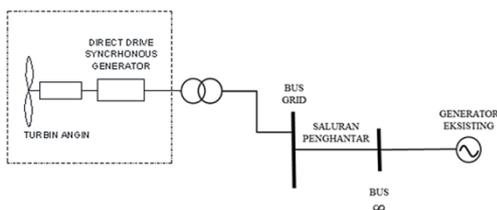


Gambar 2. Diagram Grid Sistem Eks + PLTMH

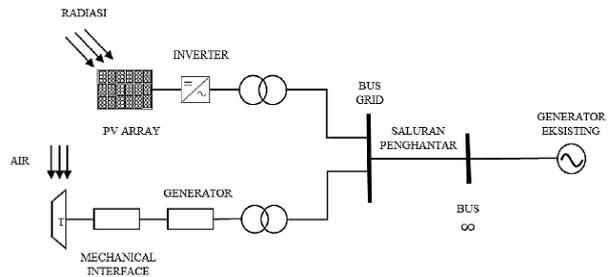
Simulasi diawali dengan analisis *load flow* pada sistem eksisting yang telah diberikan injeksi *DG* atau *hybrid DG*. Selanjutnya melakukan simulasi dan analisis gangguan hubung singkat dan stabilitas *transient*. Analisis gangguan dilakukan pada periode *t* pada bus pembangkit untuk mengetahui respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor pada sistem. Selanjutnya melakukan simulasi dan analisis gangguan hubung singkat dan stabilitas *transient* pada bus GI Sengkaling dengan mode operasi *islanding*. Berikut gambar diagram grid sistem distribusi yang diberikan injeksi *DG* atau *hybrid DG*.



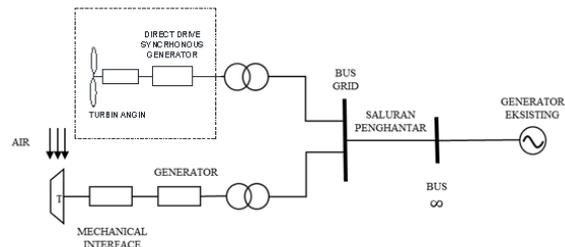
Gambar 3. Diagram Grid Sistem Eks + PLTS



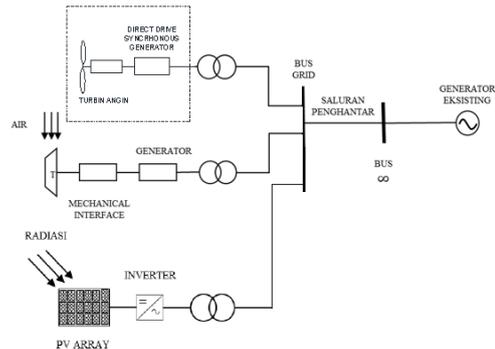
Gambar 4. Diagram Grid Sistem Eks + PLTB



Gambar 5. Diagram Grid Sistem Eks+PLTMH+PLTS



Gambar 6. Diagram Grid Sistem Eks+PLTMH+PLTB



Gambar 7. Diagram Grid Sistem Eks + PLTMH + PLTS + PLTB

Pada Gambar.7 sistem distribusi penyulang Pujon 20 kV diberikan injeksi 3 jenis *DG* atau disebut *hybrid DG*.

3) Mengamati respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor relatif pada sistem distribusi sesudah diberikan injeksi *hybrid DG*. Dengan memperhatikan nilai:

- Frekuensi pada bus sesuai standart, 50 Hz ( $\pm 2\%$ )
- Tegangan pada bus 150 kV dan 70 kV (+ 5% , -10%)
- Perubahan nilai sudut rotor pada kurva generator [10].

4) Evaluasi Nilai Indeks Keandalan Sistem Distribusi

Evaluasi nilai indeks keandalan sistem (*Reliability*) dilakukan dengan dua cara. Yaitu dengan cara simulasi pada software ETAP 16.0.0 dan melakukan perhitungan dengan acuan nilai *standart* SAIFI, SAIDI dan CAIDI.

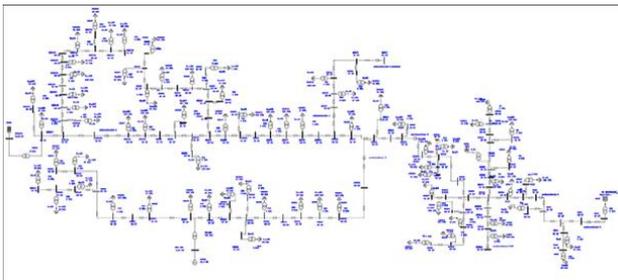
### 2.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 8. Diagram Alir Penelitian

### 3. Simulasi

Hybrid DG yang digunakan pada penelitian ini adalah PLTMH, PLTS, dan PLTB.



Gambar 9. Hybrid DG pada Sistem Distribusi Menggunakan Software ETAP 16.0.0

Tabel.1 Simulasi Skenario dan Lokasi Bus Hybrid DG

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

PLTMH yang digunakan pada penelitian ini adalah PLTMH yang telah dibangun oleh Universitas Brawijaya. PLTMH ini berada di Desa Bendosari, Kecamatan Pujon, Kabupaten Malang, Jawa Timur. Pada tabel 1 dapat dilihat data generator PLTMH.

Tabel.2 Data Generator PLTMH

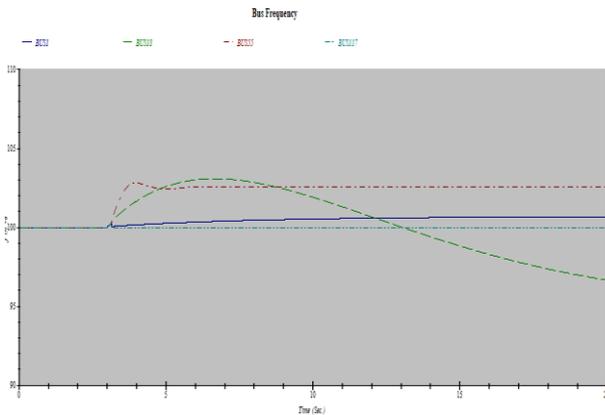
Generator Sinkron	3 Fasa	50 Hz	15 kVA
	380/220 V	1500 rpm	p.f. 0,85 – 0,90

Berdasarkan data, diketahui bahwa daya yang dikeluarkan oleh generator PLTMH Bendosari adalah sebesar 8,7 kW. Generator PLTMH memiliki *power factor* sebesar 0,9. Berdasarkan hasil perhitungan, generator PLTMH Bendosari memiliki nilai daya semu (S) sebesar 9.666,66 VA dan daya reaktif (Q) sebesar 4.214,99 VAR.

PLTS yang digunakan pada penelitian ini adalah PLTS dengan kapasitas sebesar 1,3 MVA dengan unit panel surya sebanyak 3740. Model rangkaian *PV array* terdiri dari 10 unit *PV* panel. 10 unit *PV* panel terpasang secara seri dan 374 *PV string* panel terpasang secara parallel.

PLTB yang digunakan pada penelitian ini adalah PLTB yang telah dirancang dan diteliti oleh mahasiswa Teknik Elektro Universitas Brawijaya. PLTB yang direncanakan memiliki kapasitas sebesar 2 MW pada kecepatan angin sebesar 12 m/s. Generator PLTB memiliki *power factor* sebesar 0,8. Nilai daya semu generator (S) adalah sebesar 2500 kVA dan daya reaktif (Q) sebesar 1500 kVAR.

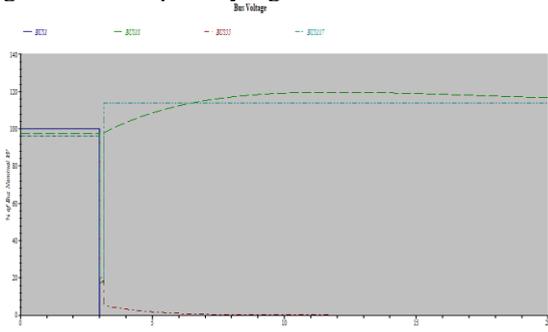
Simulasi skenario mode *Islanding* pada Skenario 7, yaitu sistem distribusi penyulang Pujon 20 kV diberikan injeksi 3 jenis *hybrid DG* (PLTMH, PLTS, dan PLTB). Pemodelan sistem grid dengan injeksi *hybrid DG* dapat dilihat pada Gambar.8. Simulasi gangguan hubung singkat dilakukan pada saat  $t=3.00$  detik. Gangguan hubung singkat akan berlangsung permanen dan sistem akan berpotensi mengalami *blackout*. Skenario *islanding* dilakukan dengan cara membuka seluruh *sectionalizer* pada  $t=3,15$  detik. Selanjutnya akan dilakukan analisis terhadap respon frekuensi dan tegangan pada bus 1, bus 18, bus 55 dan analisis sudut rotor pada PLTMH dan PLTB. Pada skenario ini, PLTMH akan memberikan injeksi energi ke *section 2*, PLTB akan memberikan injeksi energi ke *section 5*, dan PLTS akan memberikan injeksi ke *section 8*.



**Gambar 10. Respon Frekuensi Respon Frekuensi ketika Gangguan Hubung Singkat Skenario Islanding pada Skenario 7**

Berdasarkan Gambar 10. respon frekuensi bus 1 pada saat  $t=3,00$  mencapai 100,05% (50 Hz). Respon frekuensi semakin meningkat pada saat  $t=14,00$  detik hingga mencapai 100,08 (50 Hz). Respon frekuensi pada bus 18 pada saat  $t=3,00$  detik mengalami kenaikan hingga mencapai 103,00% (51,50 Hz). Respon frekuensi mengalami penurunan hingga pada saat  $t=13,00$  mencapai nilai 100%. Respon frekuensi semakin menurun hingga mencapai 96,90% (45,00 Hz) pada saat  $t=14,00$  detik.

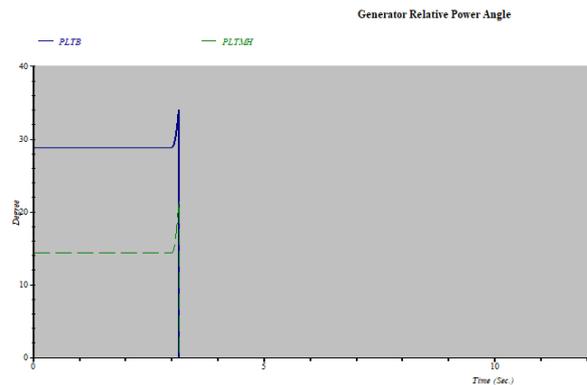
Respon frekuensi bus 55 pada saat  $t=3,00$  detik mengalami kenaikan hingga mencapai 102,90% (51,42 Hz). Pada saat  $t=4,50$  detik, respon frekuensi menurun menjadi 102,00% (51,00 Hz). Respon frekuensi bus 117 pada saat diberikan gangguan hubung singkat mencapai nilai tertinggi pada saat  $t=3,00$  detik yaitu sebesar 100,05% (50 Hz). Pada saat  $t=3,15$  respon frekuensi kembali stabil pada kondisi 100%. Dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi pada skenario *islanding* pada skenario 7 dapat dikatakan tidak aman dan tidak sesuai dengan *standart* operasi yang berlaku.



**Gambar 11. Respon Tegangan ketika Gangguan Hubung Singkat Skenario Islanding pada Skenario 7**

Respon tegangan pada bus 1 mengalami *drop* tegangan hingga mencapai 0% (0 kV) pada saat  $t=3,00$  detik. Respon tegangan pada bus 18 pada saat  $t=3,00$  detik adalah sebesar 19,00 % (1,08 kV). Pada saat  $t=3,15$  detik, respon tegangan kembali naik hingga mencapai 120,00% (40,00 kV). Sistem mengalami osilasi. Respon tegangan

pada bus 55 mengalami *drop* tegangan pada saat  $t=3,00$  detik hingga mencapai nilai 1% (0 kV). Pada saat  $t=3,15$  detik, tegangan pada bus 55 semakin menurun hingga mencapai nilai 0% (0 kV). Respon tegangan pada bus 117 mencapai nilai terendah pada saat  $t=3,00$  detik hingga mencapai nilai 20% (2 kV). Pada saat  $t=3,15$  detik, tegangan pada bus 117 meningkat hingga 117,00% (20,50 kV). Dapat disimpulkan bahwa respon tegangan pada skenario gangguan hubung singkat pada bus 1, bus 18, bus 55 dan bus 117 pada skenario 7 tidak aman dan tidak sesuai dengan *standart* operasi yang berlaku.



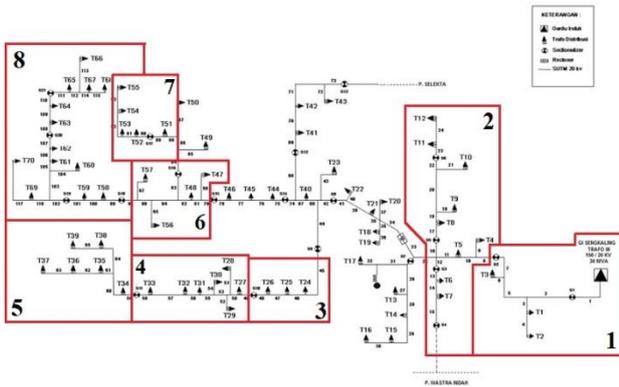
**Gambar 12. Respon Sudut Rotor Relatif ketika Gangguan Hubung Singkat Skenario Islanding pada Skenario 7**

Sudut rotor PLTMH awal sebesar  $14,05^\circ$  meningkat hingga  $21,90^\circ$  pada saat  $t=3,00$  detik. Kemudian nilai sudut rotor menurun hingga  $0^\circ$  pada saat  $t=3,15$  detik.

Sudut rotor PLTB awal sebesar  $28,00^\circ$  mengalami kenaikan hingga  $36,00^\circ$  pada saat  $t=3,00$  detik. Kemudian sudut rotor menurun hingga mencapai  $0^\circ$  pada saat  $t=3,15$  detik.

Berdasarkan hasil simulasi respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor maka dapat disimpulkan bahwa simulasi *islanding* skenario 7 tidak aman dan tidak sesuai dengan *standart* operasi yang digunakan oleh PT. PLN (Persero). Oleh karena itu maka direkomendasikan penambahan atau relokasi *sectionalizer* pada sistem. Hal tersebut bertujuan agar pembangkit *hybrid DG* (PLTMH, PLTS, dan PLTB) dapat beroperasi dengan baik.

Dilakukan evaluasi sistem distribusi dengan penambahan dan relokasi *sectionalizer*, agar *Hybrid DG* dapat beroperasi dengan baik maka sistem penyulang Pujon dibagi menjadi beberapa *section*. *Section* tersebut ditentukan dari besar jumlah beban yang dilayani dan kapasitas terpasang *Hybrid DG*.



Gambar 13. Penyalang Pujon dengan Pembagian Section

Berdasarkan Gambar.13 maka data yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel.3.

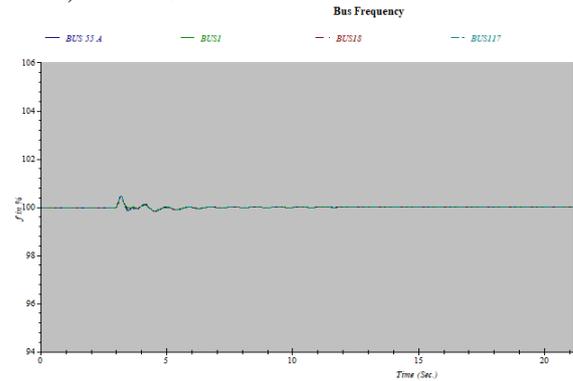
Tabel. 3 Total Beban dan Total Pembangkitan pada Setiap Section

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

Setelah sistem distribusi terbagi menjadi 8 section, maka dilakukan penambahan komponen sectionalizer pada section 4, 5, 6 dan 7. Penambahan sectionalizer bertujuan agar skenario *islanding* pada sistem dapat beroperasi dengan baik. Pada section 2, dilakukan relokasi sectionalizer. Relokasi dilakukan karena section 2 (section PLTB) tidak membutuhkan penambahan komponen sectionalizer.

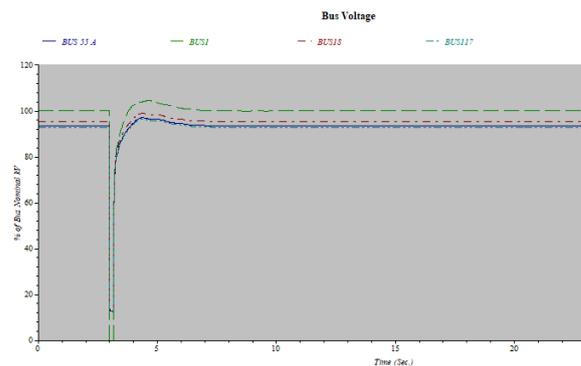
Diberikan gangguan *permanent* bus 1 skenario *islanding* dengan kapasitas *Hybrid DG* 100%. Pada skenario *islanding* dengan kapasitas *hybrid DG* 100%, bus 1 diberikan gangguan hubung singkat selama  $t=3,00$  detik. Gangguan berlangsung *permanent* dan sistem akan mengalami *blackout*. Skenario *islanding* 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.

PLTS akan memberikan *supply* energi ke section 6, section 7, section 8.



Gambar 14. Respon Frekuensi ketika Gangguan Hubung Singkat Bus 1 Skenario *islanding* Skenario 8 dengan *Hybrid DG* kondisi 100%

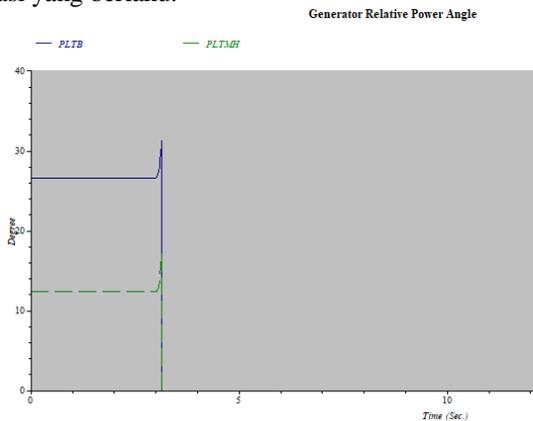
Respon frekuensi ketika bus diberikan gangguan hubung singkat pada bus 1 dengan pembangkitan *hybrid DG* kondisi 100%. Pada saat  $t=3,00$  detik respon frekuensi pada bus 1, bus 18, bus 55A dan bus 117 mengalami kenaikan hingga 100,05 Hz (50 Hz) dan sistem mengalami osilasi hingga  $t=11,20$  detik.



Gambar 15. Respon Tegangan ketika Gangguan Hubung Singkat Bus 1 Skenario *islanding* Skenario 8 dengan *Hybrid DG* kondisi 100%

Respon tegangan bus 1 ketika diberikan gangguan hubung singkat dengan pembangkitan *hybrid DG* kondisi 100%. Nilai respon tegangan bus 1 mengalami *drop* tegangan ketika  $t=3,00$  detik. Tegangan mencapai nilai terendah hingga 0%. Pada saat  $t=3,05$  detik, respon tegangan bus 1 mengalami kenaikan dan mencapai nilai 100,05% (20 kV) hingga  $t=4,00$  detik. Sistem mengalami osilasi. Pada saat  $t=10,00$  detik, respon tegangan mencapai nilai 100%. Respon tegangan pada bus 18 mencapai nilai terendah hingga 12,11% (2,42 kV) pada  $t=3,05$  detik. Pada saat  $t=3,15$  detik, sectionalizer pada kondisi terbuka dan respon tegangan pada bus 18 mengalami kenaikan hingga mencapai 98,08% (19,45 kV). Pada saat  $t=7,00$  detik, nilai respon tegangan menjadi 94,50% (18,50 kV). Respon tegangan pada bus 55A mencapai nilai terendah hingga 12,11% (2,42 kV) pada saat  $t=3,05$  detik. Pada saat  $t=3,15$  dan sectionalizer pada kondisi terbuka, respon

tegangan pada bus 55A mengalami kenaikan menjadi 97,50% (19,50 kV). Selanjutnya pada saat  $t=7,00$  detik, respon tegangan mencapai nilai 92,90% (18,00 kV). Respon tegangan pada bus 117 mencapai nilai terendah hingga 12,11% (2,42 kV) pada saat  $t=3,05$  detik. Pada saat  $t=3,15$  dan *sectionalizer* pada kondisi terbuka, respon tegangan pada bus 55A mengalami kenaikan menjadi 97,50% (19,50 kV). Selanjutnya pada saat  $t=6,00$  detik, respon tegangan mencapai nilai 93,90% (18,25 kV). Dapat disimpulkan bahwa nilai respon tegangan ketika bus diberikan gangguan hubung singkat di bus 1 skenario *islanding* skenario 8, dengan pembangkitan *hybrid DG* kondisi 100% dikatakan aman dan sesuai dengan *standart* operasi yang berlaku.



**Gambar 16. Respon Sudut Rotor Relatif ketika Gangguan Hubung Singkat Bus 1 Skenario *islanding* Skenario 8 dengan *Hybrid DG* kondisi 100%**

Respon sudut rotor relatif pada PLTB terhadap *swing* bus pada saat gangguan hubung singkat pada bus 1. sudut rotor awal sebesar  $26,57^\circ$  dan respon terus meningkat ketika terjadi gangguan. Respon sudut rotor relatif mencapai nilai tertinggi sebesar  $29,18^\circ$  pada saat  $t=3,15$  detik. Kemudian respon sudut rotor mencapai nilai terendah pada nilai 0%. Hal ini disebabkan oleh *sectionalizer* pada kondisi terbuka. PLTB awalnya beroperasi sebagai *voltage control* kemudian berubah menjadi mode *swing* untuk *section 2* (*section* PLTB). Respon sudut rotor relatif pada generator PLTMH terhadap *swing* bus ketika diberikan gangguan hubung singkat pada bus 1 dengan sudut rotor awal sebesar  $11,12^\circ$ . Nilai sudut rotor relatif terus meningkat ketika diberikan gangguan hubung singkat, hingga mencapai nilai tertinggi pada  $13,89^\circ$  pada  $t=3,15$  detik. Kemudian respon sudut rotor mencapai nilai terendah pada 0%. Hal ini disebabkan oleh *sectionalizer* pada kondisi terbuka. Generator PLTMH beroperasi sebagai *voltage control* kemudian berubah menjadi mode *swing* untuk *section 3,4,5*.

Evaluasi nilai Indeks keandalan sistem distribusi ditentukan dengan berdasarkan nilai SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*), SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) dan CAIDI (*Consumer Average Interruption Duration Index*) pada

masing-masing daerah bagian (*section*). Untuk mendapatkan nilai SAIFI dan SAIDI total pada sistem penyulang pujan, dapat dilakukan dengan cara menjumlahkan nilai SAIFI dan SAIDI pada semua daerah bagian di sistem distribusi. Untuk mendapatkan nilai CAIDI, dengan cara membagi nilai total SAIFI dan SAIDI. Setelah melakukan analisis perhitungan dan simulasi maka diperoleh nilai perbandingan indeks keandalan eksisting dan nilai indeks keandalan setelah dilakukan evaluasi.

**Tabel.4 Perbandingan Nilai Indeks Keandalan Sistem**

No.	INDEKS KEANDALAN	NILAI	
		EKSISTING	EVALUASI
1.	SAIFI	0.685200041	0.462762292
2.	SAIDI	0.008119295	0.005319319
3.	CAIDI	0.011849525	0.0114947114

#### 4. Kesimpulan

Sistem eksisting penyulang pujan 20 kV mengalami perbaikan level tegangan ketika diberikan injeksi *hybrid DG*. Injeksi *hybrid DG* mengurangi rugi-rugi daya pada sistem distribusi penyulang Pujan 20 kV. Rugi-rugi daya pada kondisi eksisting adalah sebesar 0,417 MW (9,62%) dan 0,247 MVAR (9,22%). Pada skenario 7 rugi-rugi daya adalah sebesar 0,295 MW (5,50 %) dan 0,15 MVAR (5,80%). Nilai indeks keandalan sistem mengalami perubahan setelah diberikan injeksi *hybrid DG* pada sistem. Nilai indeks keandalan sistem mengalami penurunan nilai setelah dilakukan evaluasi. Nilai SAIFI mengalami penurunan dari 0.685200041 menjadi 0.462762292. Nilai SAIFI mengalami penurunan nilai hingga 22%. Nilai SAIDI mengalami penurunan nilai dari 0.008119295 menjadi 0.005319319. SAIDI mengalami penurunan nilai hingga 30%. Nilai CAIDI mengalami penurunan dari 0.011849525 menjadi 0.0114947114. Nilai CAIDI mengalami penurunan nilai hingga 3%.

#### 5. Referensi

- [1] Center for Technology of Energy Resources and Chemical Agency for the Assesment and Application of Technology. "Indonesia Energy Outlook 2019 – Electricity Outlook" P.49. Jakarta. Indonesia. 2019.
- [2] RENCANA USAHA PENYEDIAAN TENAGA LISTRIK (RUPTL), 2021-2030, PT. PLN (PERSERO), P. II-3.
- [3] 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.
- [4] Suyono H. and Nur Hasanah R, "Analysis of Power Losses due to Distributed Generation Increase on Distribution System", Jurnal Teknologi, vol. 78, no.6-3, pp. 23-28, 2016.
- [5] Al Abri, R.S.; El-Saadany, E.F.; Atwa, Y.M., "Optimal Placement and Sizing Method to Improve the Voltage Stability Margin in a Distribution System Using Distributed Generation", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no.1, pp.326-334, 2013.

- [6] H. Suyono, Wijono, R.N. Hasanah, S. Dhuha, "Power Distribution system Reability improvement due to injection of distributed generation", 10<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO 2017, pp.1485-1490,2017.
- [7] Mohammad Al Muhaini; Gerald T. Heydt, "Evaluating Future Power Distribution System Reliability Including Distributed Generation", IEEE Transaction on Power Delivery , vol. 28, no.4, pp. 2264-2772, October, 2013.
- [8] Suyono. H., and Zainuddin. M., "Injection Impact of Photovoltaic Distributed Generation (PVDG) on Power Distribution System Stability", Applied Mechanics and Materials, vol. 785, pp.403-408, 2015.
- [9] M. Shahabi; M.R. Haghifam; M. Mohamadian; S.A. Nabavi-Niaki, "Dynamic behavior improvement in a microgrid with multiple DG units using a power sharing approach.", 2009 IEEE Bucharest PowerTech, pp. 1-8, 2009.
- [10] Suyono, H., Hayusman L.M., Dhofir M., Improvement of Voltage Sag Mitigation using Dynamic Volatge Restorer (DVR)", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, vol.10, no. 19, pp. 8684-8691, October, 2015.
- [11] Hakim, L. 2016. Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Surya-Angin Terhubung Grid di Gunung Banyak Kota Batu. Tesis. Malang: Universitas Brawijaya.
- [12] P. Kundur. Power System Stability & Control. USA: McGraw Hill Pubishing Co., 1994., ISBN 0-07035958-X