

Study of Power Flow and Harmonics when Integrating Photovoltaic into Microgrid

Studi Aliran Daya dan Harmonisa saat Integrasi Sistem Fotovoltaik ke Microgrid

Robi Kurniawan¹, Muhammad Daud^{2*}, Arnawan Hasibuan²

Abstract

Power system stability issues and the lack of studies of the impact of relevant renewable energy networks are factors hindering the use of large-scale integration of renewable energy sources. This study focuses on examining the impact of photovoltaic system integration on the power stability of the power grid. The integration of this photovoltaic involves the analysis of the static and dynamic state of the electrical network. Load flow simulation is performed to assess the performance of static conditions of the power grid. Furthermore, dynamic analysis is carried out by applying 3-phase short circuits at critical points of the network and observing how harmonic and stability in the system. The simulation was carried out using the ETAP 19.0. Simulations of existing conditions and after penetration of the photovoltaic system showed the buses had THDv and THDI values below the permissible standards, respectively. In addition, the existing power flow simulation experiences a voltage drop from the nominal voltage.

Keywords

Renewable Energy, Photovoltaic, ETAP.

Abstrak

Masalah stabilitas sistem tenaga dan kurangnya studi akan dampak dari jaringan energi terbarukan yang relevan merupakan faktor yang menghambat penggunaan integrasi skala besar dari sumber energi terbarukan. Penelitian ini fokus mengkaji dampak integrasi sistem fotovoltaik pada stabilitas daya jaringan listrik. Integrasi sistem fotovoltaik ini melibatkan analisis keadaan statis dan dinamis dari jaringan listrik. Simulasi aliran beban dilakukan untuk menilai kinerja kondisi statis dari jaringan listrik. Selanjutnya, analisis dinamik dilakukan dengan menerapkan hubung singkat 3 fasa pada titik-titik kritis jaringan dan mengamati bagaimana harmonisa dan stabilitas pada sistem. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ETAP 19.0. Simulasi kondisi sebelum dan setelah penetrasi sistem fotovoltaik menunjukkan bus masing-masing memiliki nilai THDv dan THDI dibawah standar yang diperbolehkan. Selain itu, simulasi aliran daya kondisi sebelum integrasi mengalami jatuh tegangan dari tegangan nominal.

Kata Kunci

Energi Terbarukan, fotovoltaik, ETAP.

¹Department of Renewable Energy Engineering, Universitas Malikussaleh
Jl. Batam, Blang Pulo, Kec. Muara Satu, Kota Lhokseumawe, Aceh 24355, Indonesia

²Department of Electrical Engineering, Universitas Malikussaleh
Jl. Batam, Blang Pulo, Kec. Muara Satu, Kota Lhokseumawe, Aceh 24355, Indonesia

* mdaud@unimal.ac.id

Submitted : September 22, 2022. Accepted : November 09, 2022. Published : November 11, 2022.

PENDAHULUAN

Saat ini sistem fotovoltaik memainkan peran penting dalam pembangkit listrik dibandingkan dengan sistem tradisional yang berdiri sendiri [1]. Denmark tercatat sebagai negara yang paling banyak menggunakan sistem PV dan teknologi angin [2]. Berdasarkan data Ember Climate, porsi listrik dari PLTB dan PLTS di Denmark mencapai 51,9% dari total listrik yang dihasilkan di negara tersebut pada 2021. Di posisi selanjutnya ada Uruguay dengan porsi PLTB dan PLTS sebesar 46,7%, diikuti Luksemburg 43,4%, Lithuania 36,9%, dan Spanyol 32,9%. Secara global, pembangkit listrik tenaga angin dan surya menghasilkan 10,3% pasokan listrik dunia pada tahun 2021 dan angka ini meningkat dari 9,3% pada tahun 2020 [3]. Sementara pemanfaatan energi surya di Indonesia saat ini baru sekitar 150 MW atau 0,08% dari potensinya [4].

Teknologi PV juga memainkan peran kunci dalam pergeseran menuju pertumbuhan hijau, ekonomi rendah karbon, dan bagian yang lebih besar dari energi terbarukan dalam bauran energi [5]. Hal ini menciptakan tantangan baru dalam pengelolaan dan pengoperasian sistem tenaga karena *intermittent* dan variabilitas pembangkit listrik PV [6][7]. Variabilitas ini mengamanatkan bahwa studi dampak jaringan harus dilakukan dan memerlukan analisis yang komprehensif sebelum integrasi PV ke jaringan utilitas [8].

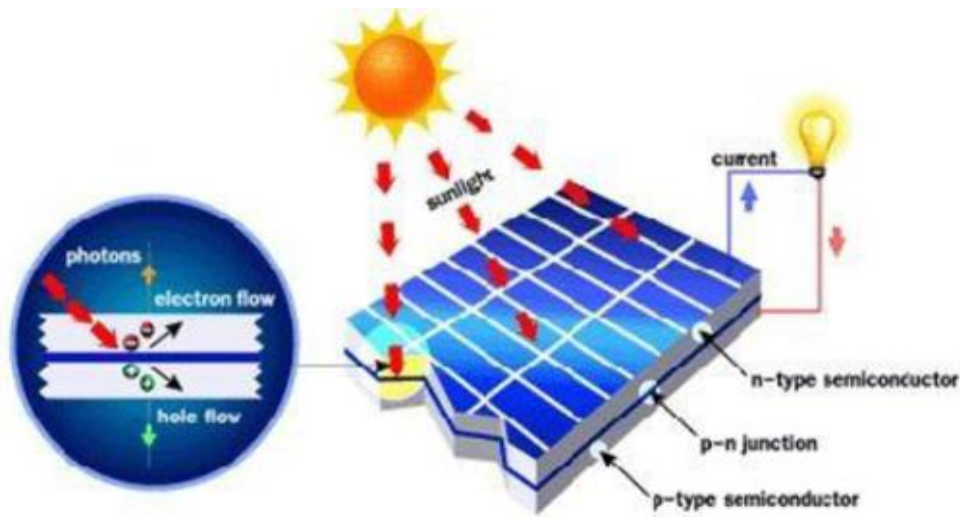
Keberhasilan integrasi dan penetrasi sistem PV ke dalam jaringan listrik memerlukan pemodelan yang akurat [9], serta sistem pengkondisian dayanya perlu dipahami dengan baik untuk merancang dan menilai kinerja sistem [10]. Kegagalan penilaian pada sistem PV dapat menyebabkan ketidakstabilan jaringan sehingga mengorbankan keandalan sistem tenaga, keamanan pasokan dan kualitas daya jaringan utilitas [11]. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi tingkat efisiensi dan kinerja sistem PV [12]. Selain kondisi suhu lingkungan dan fluktuasi radiasi matahari, karakteristik yang dimiliki sistem PV juga dapat menyebabkan masalah serius terkait dengan respon efisiensi dan kualitas daya sistem secara keseluruhan [13]. Radiasi matahari yang rendah memiliki dampak yang signifikan terhadap keluaran sistem PV dan kualitas daya sistem [14].

Secara umum, harmonisa arus dan tegangan yang dihasilkan oleh pembangkit listrik dapat menurunkan kualitas daya dan menurunkan keandalan dan keamanan peralatan listrik [15]. Arus harmonik juga dapat menimbulkan gangguan pada sistem telekomunikasi, kesalahan pada alat ukur dan panas yang berlebihan pada peralatan pemutus tenaga. Akibatnya pemutus tenaga dapat terputus sendiri, sistem kendali terkunci dengan sendirinya, dan masih banyak lagi permasalahan yang ditimbulkan [16].

Penelitian ini akan fokus membahas dampak penetrasi sistem PV terhadap aliran daya dan harmonisa pada stabilitas daya jaringan listrik di tingkat distribusi microgrid menggunakan perangkat lunak ETAP 19.0.

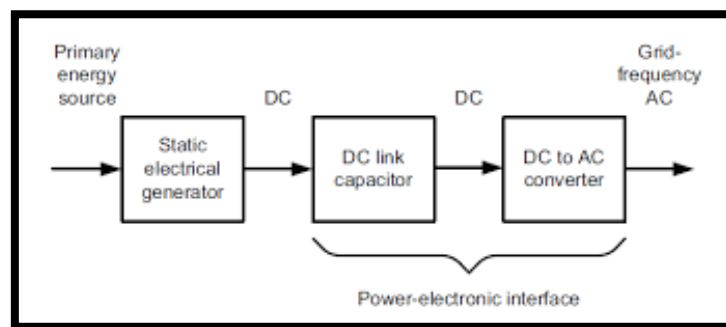
Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah suatu pembangkit yang mengkonversikan energi foton dari surya menjadi energi listrik [17]. PLTS memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik DC (*Direct Current*) dan dapat diubah menjadi listrik AC (*Alternating Current*) apabila diperlukan [18]. *Poly Crystalline Silicon* merupakan material semikonduktor yang biasa digunakan pada Panel fotovoltaik dan prinsipnya sama dengan prinsip diode p-n [19]. Ilustrasi prinsip kerja fotovoltaik dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Prinsip kerja Sel Surya [20]

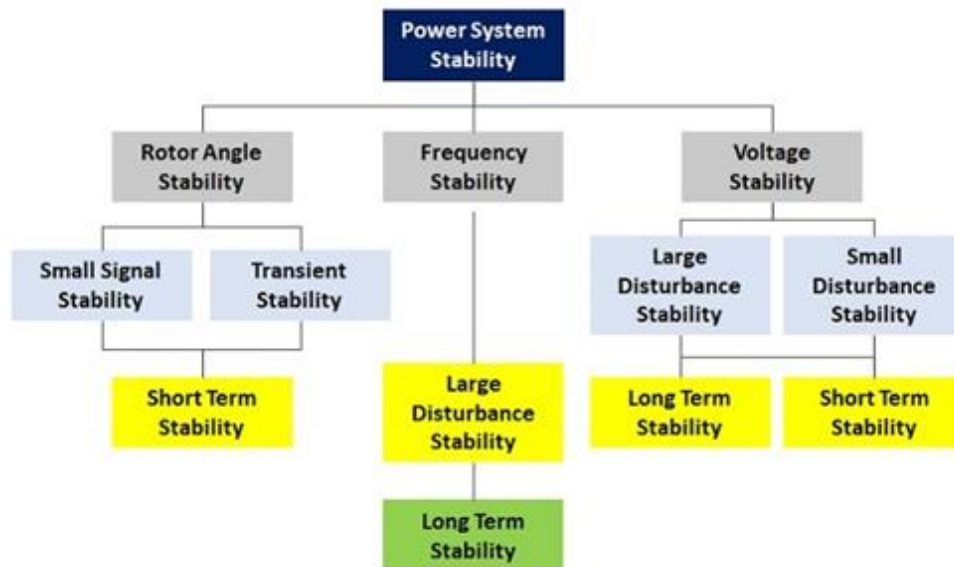
Dari karakter sambungannya, pembangkit listrik tenaga surya fotovoltaik yang menghasilkan listrik dalam bentuk listrik arus searah (DC) terhubung melalui elektronika daya [21] seperti ilustrasi pada Gambar 2.



Gambar 2. Pembangkit listrik arus searah (dc) terhubung ke jaringan listrik tegangan bolak-balik (ac) melalui perangkat elektronika daya [22]

Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Kemampuan sistem tenaga bertahan dari gangguan tanpa harus mengorbankan layanan terhadap pelanggan sangat perlu diperhatikan [23]. Dalam mengoperasikan sistem tenaga yang aman maka sistem tenaga harus memperhatikan hal berikut yaitu mengetahui keamanan sistem tenaga, mengetahui pengaruh saat sistem tenaga dioperasikan dibawah kondisi dan konfigurasi yang berbeda, serta mengetahui tindakan yang harus dilakukan saat sistem tenaga dioperasikan dalam batas yang dapat diterima [24]. Untuk memastikan keamanan sistem tenaga maka sistem harus dioperasikan dalam keadaan stabil. Gugus IEE/CIGRE mendefinisikan stabilitas sistem tenaga ialah kemampuan suatu sistem tenaga pada saat kondisi operasi tertentu untuk dapat kembali pada keadaan keseimbangan operasi setelah terjadi gangguan fisik dengan variabel pada sistem yang dibatasi sedemikian rupa dan tetap menjadi sistem keseluruhan yang utuh [25]. Stabilitas sistem tenaga listrik dapat diklasifikasikan menjadi stabilitas sudut rotor, stabilitas frekuensi dan stabilitas tegangan [26] seperti ilustrasi pada Gambar 3.

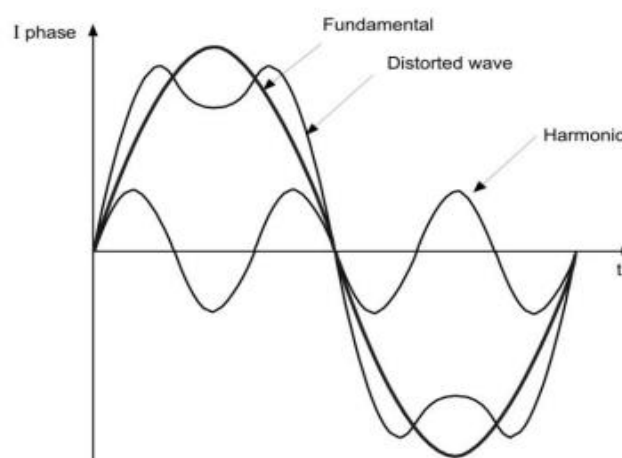


Gambar 3. Klasifikasi stabilitas sistem tenaga [27]

Stabilitas sudut rotor dikatakan stabil saat mesin sinkron pada jaringan sistem tenaga tetap dalam kondisi operasi normal setelah terjadinya gangguan [28]. Sedangkan kemampuan sistem tenaga dalam mempertahankan tegangan bus pada batas operasional setelah terjadinya gangguan pada operasi normal disebut stabilitas tegangan [29]. Stabilitas frekuensi adalah kemampuan sistem tenaga dalam mempertahankan frekuensi operasi nominal setelah sistem mengalami ketidakseimbangan antara pembangkitan dengan beban yang menyebabkan ketidakstabilan sudut generator sinkron [30].

Harmonisa

Harmonisa ialah fenomena terjadinya distorsi pada gelombang jaringan listrik yang ditimbulkan dari pengoperasian beban listrik tidak linier [31]. Frekuensi gelombang distorsi terbentuk pada kelipatan nilai frekuensi gelombang fundamental, dimana gelombang ini akan menumpang pada gelombang fundamental sehingga mengakibatkan terbentuknya gelombang cacat yang merupakan jumlah antara gelombang fundamental dengan gelombang distorsi (gelombang harmonik) [31] seperti ilustrasi pada Gambar 4.



Gambar 4. Gelombang Fundamental dan Gelombang Harmonisa

Perbandingan frekuensi harmonik dengan frekuensi dasar merupakan orde dari harmonisa, dinyatakan kedalam persamaan berikut.

$$H = \frac{f_h}{f} \quad (1)$$

Parameter harmonisa meliputi :

Individual Harmonic Distortion (IHD).

$$IHD_i = \sqrt{\frac{I_{sh}^2}{I_1^2}} \times 100\% \quad (2)$$

$$IHD_v = \sqrt{\frac{V_{sh}^2}{V_1^2}} \times 100\% \quad (3)$$

Total Harmonic Distortion (THD)

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (4)$$

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (5)$$

Root Means Square (RMS)

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} I_h^2} \quad (6)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} V_h^2} \quad (7)$$

Microgrid

Microgrid merupakan salah satu contoh pola pembangkitan terdistribusi [32]. Menurut EU research projects microgrid meliputi sistem distribusi skala kecil, yang terdiri dari sumber energy terdistribusi, yang meliputi microturbin, fuel cells, PV dan lain sebagainya, dengan media penyimpanan energi (*flywheels*, kapasitor energi dan baterai) serta beban yang fleksibel [33]. Microgrid terletak pada tegangan rendah dan dapat bekerja pada kondisi normal (*gridconnected*) dan kondisi operasi darurat (*islanded*), sehingga dapat meningkatkan keandalan. Selain meningkatkan keandalan, microgrid juga ramah lingkungan [34].

Metode Newton-Rapshon

Deret Taylor untuk suatu fungsi dengan dua variabel lebih adalah dasar dari Metode Newton Raphson dalam penyelesaian aliran daya [35].

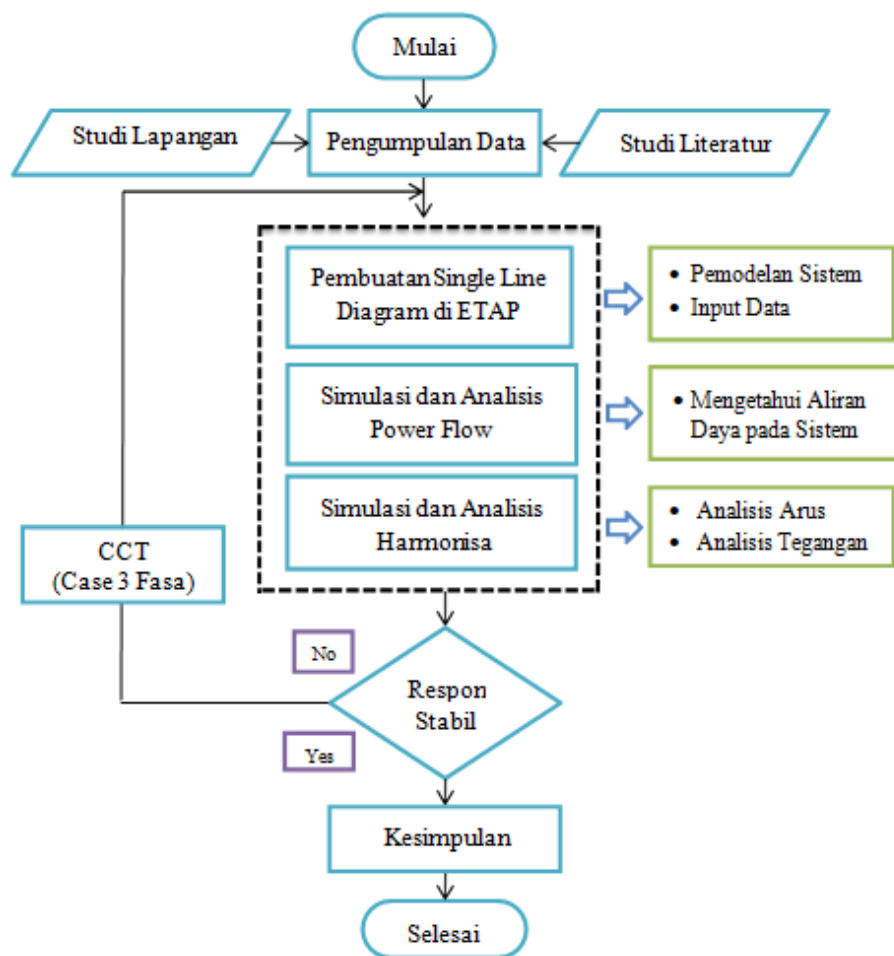
$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |V_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (8)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |V_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (9)$$

Nilai daya aktif (P_i) dan daya reaktif (Q_i) telah diketahui, tetapi nilai tegangan (V_i) dan sudut (δ_i) tidak diketahui kecuali pada slack bus. Kedua persamaan nonlinier tersebut dapat diuraikan menjadi suatu set persamaan simultan linier dengan cara menyatakan hubungan antara perubahan daya nyata ΔP_i daya reaktif ΔQ_i terhadap perubahan magnitude tegangan ΔV_i dan sudut fasa tegangan $\Delta \delta_i$ [36].

METODE PENELITIAN

Jenis penelitian yang digunakan dalam penelitian ini ialah penelitian kuantitatif. Aspek kuantitatif pada penelitian ini yaitu menentukan berapa besar tegangan, arus, daya aktif dan daya reaktif yang mengalir pada grid sebelum dan sesudah penetrasi sistem fotovoltaik. Adapun metode yang digunakan dalam menganalisis besaran-besaran itu adalah metode Newton-Rhapson yang terintegrasi di dalam program ETAP 19.0. Pada penelitian ini studi literatur dilakukan dengan cara mempelajari teori dan metode yang akan digunakan untuk mencapai tujuan penelitian [37]. Data penelitian diperoleh dari objek penelitian yaitu sistem distribusi 20 kV dari Gardu Induk (GI) Meulaboh. Data yang diambil dalam penelitian ini ialah data transformator, beban, *single line diagram*, dan panjang saluran ke beban. Selanjutnya langkah-langkah dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5 dan *single line diagram* GI Meulaboh pada Gambar 6.



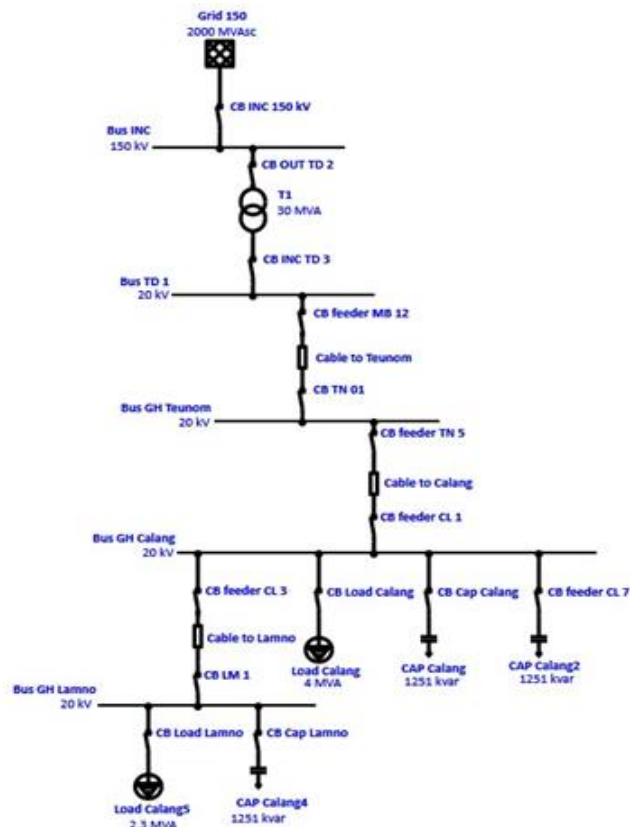
Gambar 5. Diagram alir penelitian

Tabel 1. Data beban

Bus	Total Beban (MW)
Bus GH Teunom	0
Bus GH Lamno	2.3
Bus GH Calang	4

Tabel 2. Data panjang kabel

Saluran	Bus		Panjang Saluran (Km)	Tipe (mm ²)
	Dari	Ke		
1	Bus TD 1	Bus GH Teunom	47	A3CS240
2	Bus GH Teunom	Bus GH Calang	47	A3CS240
3	Bus GH Calang	Bus GH Lamno	51	A3CS240



Gambar 6. Jaringan listrik GI Kota Meulaboh di ETAP

Penentuan lokasi pemasangan DG (integrasi PV) digunakan dengan metode VSI (*Voltage Stability Indeks*). Metode ini merupakan metode yang digunakan untuk menentukan lokasi penempatan prioritas, dengan cara menentukan nilai indeks performansi tegangan terendah dari setiap bus sebagai lokasi pemasangan prioritas [38]. Selanjutnya menentukan kapasitas daya optimal injeksi DG ialah menggunakan metode *trial and error* berdasarkan titik jatuh tegangan paling besar serta disesuaikan dengan kebutuhan tetapi tidak boleh melebihi kapasitas dari pusat pembangkit.

Tabel 3. Skenario Pemasangan DG

Skenario	Lokasi DG	Jenis DG	Kapasitas DG (kW)
Skenario 1	Bus GH Calang	Photovoltaic	210.7
Skenario 2	Bus GH Lamno	Photovoltaic	332

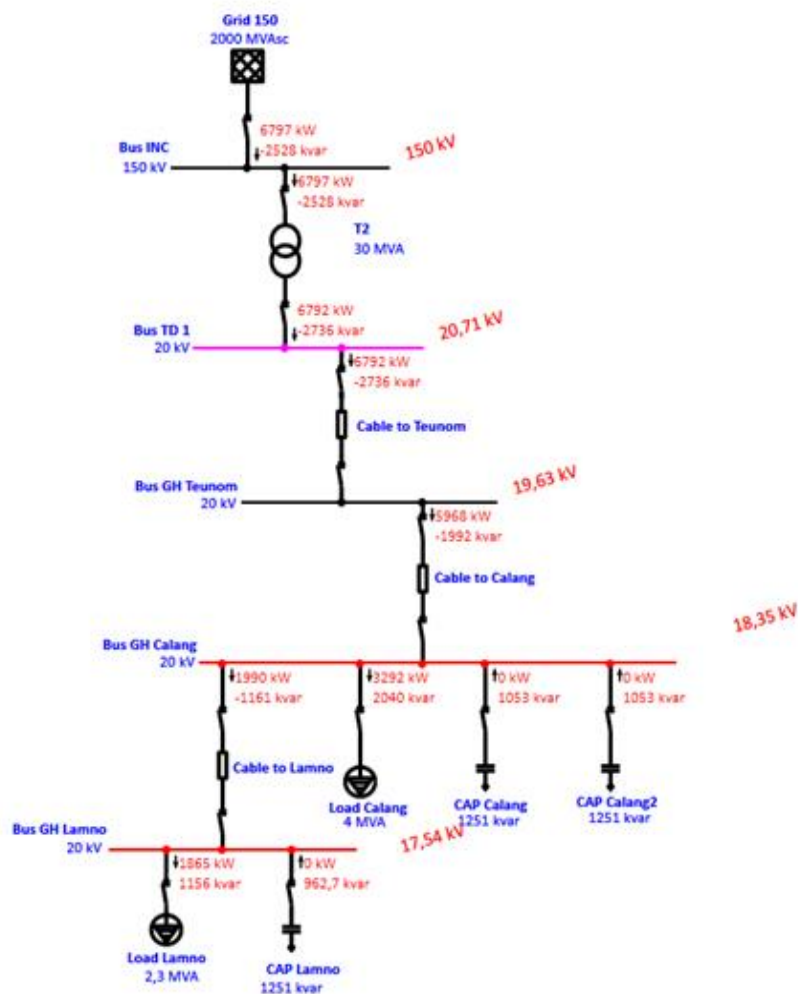
Pengaturan Parameter Software ETAP

Tinjauan simulasi dilakukan pada saat sistem berjalan dalam keadaan normal dengan beban berjalan seluruhnya secara maksimal. Perhitungan aliran daya sistem kelistrikan dilakukan dengan menggunakan metode Newton Raphson pada software ETAP, dengan maksimum iterasi 99, precision of solution 0.0001, frekuensi sistem 50 Hz dan unit sistem English. Pengaturan simulasi peringatan yang digunakan untuk memberitahukan kondisi sistem kelistrikan yang telah ditentukan berdasarkan standar PLN (SPLN 1:1995) yaitu batas toleransi overvoltage sebesar +5% dan batas toleransi undervoltage sebesar -10% [39].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Simulasi dan Analisis Aliran Daya

Simulasi aliran daya dilakukan untuk mengetahui nilai tegangan, daya aktif, daya reaktif, daya semu, dan faktor daya di tiap bus [40]. Perlu dipahami bahwa permasalahan harmonisa erat kaitannya dengan aliran daya sistem karena akibat yang ditimbulkan seperti rugi-rugi yang berlebihan [41]. Hasil simulasi aliran daya kondisi eksisting dapat dilihat pada Gambar 6, Tabel 2 dan Tabel 3.



Gambar 7. Kondisi aliran daya eksisting

Tabel 4. Hasil simulasi jatuh tegangan kondisi eksisting

Bus ID	Nominal kV	Tegangan		Jatuh Tegangan	
		(kV)	(%)	(kV)	(%)
Bus GH Teunom	20	19.63	98.25	0.37	1.75
Bus GH Calang	20	18.35	91.74	1.651	8.26
Bus GH Lamno	20	17.55	87.72	2.455	12.28

Tabel 5. Hasil Simulasi Aliran Daya Eksisting

Bus ID	kV	% PF	MVA	Amp	MW	Mvar
Bus GH Calang	18.349	85.0	6.211	121.9	3.29	2.04
Bus GH Lamno	17.545	85.0	2.194	72.2	1.86	1.15

Hasil simulasi aliran daya kondisi eksisting pada [Tabel 4](#) menunjukkan 3 bus yang mengalami kondisi undervoltage dari tegangan nominal. Pada Bus GH Teunom sebesar 1.75% atau 0.37 kV, Bus GH Calang sebesar 8.26 % atau 1.65 kV dan pada Bus GH Lamno sebesar 12.28% atau 2.45 kV. Kondisi pada Bus GH calang dan GH Teunom ini masih dalam batas marginal, sedangkan kondisi Bus GH Lamno sudah melebihi batas marginal, sesuai standar PLN (SPLN 1:1995) dimana batas maksimum turun tegangan sebesar - 10% dari tegangan nominal.

Hasil simulasi aliran daya kondisi skenario 1 setelah integrasi PV sebesar 210.7 kW ke grid pemasangan pada Bus GH Calang dapat dilihat pada [Tabel 6](#) dan [Tabel 7](#).

Tabel 6. Hasil Simulasi Jatuh Tegangan Integrasi PV ke Grid (Skenario 1)

Bus ID	Nominal kV	Tegangan		Jatuh Tegangan		Peningkatan Tegangan	
		(kV)	(%)	(kV)	(%)	kV	%
Bus GH Calang	20	19.13	95.63	0.874	4.37	0.777	3.89
Bus GH Lamno	20	18.44	92.20	1.560	7.80	0.895	4.48

Tabel 7. Hasil Simulasi Aliran Daya Integrasi PV ke Grid (Skenario 1)

Bus ID	kV	% PF	MVA	Amp	MW	Mvar
Bus GH Calang	19.13	82.5	6.499	196.2	2.72	1.686
Bus GH Lamno	18.44	85.0	2.231	69.9	1.56	0.969

Setelah Integrasi PV ini, tegangan pada tiap bus mengalami kenaikan. Dimana pada Bus GH Calang mengalami kenaikan sebesar 3.89 % atau 0.77 kV dan pada Bus GH Lamno mengalami kenaikan sebesar 4.48 % atau 0.89 kV.

Kemudian hasil simulasi aliran daya kondisi skenario 2 setelah integrasi PV sebesar 332 kW ke grid pemasangan pada Bus GH Lamno dapat dilihat pada [Tabel 8](#) dan [Tabel 9](#).

Tabel 8. Hasil Simulasi Jatuh Tegangan Integrasi PV ke Grid (Skenario 2)

Bus ID	Nominal kV	Tegangan		Jatuh Tegangan		Peningkatan Tegangan	
		(kV)	(%)	(kV)	(%)	kV	%
Bus GH Calang	20	19.74	98.70	0.26	1.30	1.391	7.0
Bus GH Lamno	20	19.36	96.79	0.64	3.21	1.814	9.1

Tabel 9. Hasil Simulasi Aliran Daya Integrasi PV ke Grid (Skenario 2)

Bus ID	kV	% PF	MVA	Amp	MW	Mvar
Bus GH Calang	19.74	77.9	6.512	190.5	2.72	1.686
Bus GH Lamno	19.36	85.0	2.271	67.7	1.564	0.969

Setelah Integrasi PV dengan kapasitas sebesar 332 kW ini, tegangan pada tiap bus juga mengalami kenaikan. Dimana pada Bus GH Calang mengalami kenaikan sebesar 7.0 % atau 1.39 kV dan pada Bus GH Lamno mengalami kenaikan sebesar 9.1 % atau 1.81 kV.

Selain itu dari [Tabel 5](#), [Tabel 7](#), dan [Tabel 9](#) dapat dilihat bahwa faktor daya berkisar antara 79% hingga 85,% berada dibawah batas toleransi yang ditentukan oleh Perusahaan Listrik Negara (PLN). Artinya sumber harmonik sistem PV mempengaruhi faktor daya sesuai dengan yang disampaikan oleh referensi [\[15\]](#). Hal ini juga dipengaruhi oleh variasi besar kecilnya beban pada sistem. Pada periode beban rendah, tegangan suplai dan arus magnetizing meningkat sehingga menyebabkan faktor daya menurun [\[42\]](#). Akan tetapi, sangat penting untuk diketahui bahwa faktor daya merupakan pertimbangan utama dalam analisis harmonik karena kedua parameter kualitas daya tersebut saling mempengaruhi [\[15\]](#).

Hasil Simulasi dan Analisis Harmonisa

Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui nilai THD tegangan maupun THD arus, dan orde harmonisa yang dominan pada sistem beserta nilai IHD nya. Hasil simulasi harmonisa tegangan dengan simulink ETAP dapat dilihat pada [Tabel 10](#) sampai [Tabel 12](#).

Tabel 10. Hasil Simulasi Harmonisa Tegangan Eksisting

Bus ID	Fund(%)	RMS(%)	THD(%)
Bus GH Calang	91.74	91.75	0.379
Bus GH Lamno	87.72	87.73	0.061

Tabel 11. Hasil Simulasi Harmonisa Tegangan Integrasi PV Ke Grid (Skenario 1)

Bus ID	Fund(%)	RMS(%)	THD(%)
Bus GH Calang	95.63	95.63	0.363
Bus GH Lamno	92.20	92.20	0.057

Tabel 12. Hasil Simulasi Harmonisa Tegangan Integrasi PV Ke Grid (Skenario 2)

Bus ID	Fund(%)	RMS(%)	THD(%)
Bus GH Calang	98.70	98.70	0.353
Bus GH Lamno	96.79	96.79	0.054

Dapat dilihat besar nilai THD tegangan menunjukkan semua bus yang ada pada sistem memiliki THDv di bawah standar. Dimana batas ambang tegangan maksimum THD normal yang diperbolehkan sesuai dengan standar IEEE Std.519-2014 untuk sistem kelistrikan dibawah 69 kV ialah sebesar 5% [\[43\]](#). Dapat juga dilihat bahwa harmonisa tegangan sesudah pemasangan integrasi pv dan wind turbin yang dihasilkan oleh sistem sangat kecil dengan range 0.05 sampai 0.3%. Hal ini menunjukkan bahwa PV dan turbin angin berpengaruh terhadap nilai harmonisa system.

Selain harmonisa tegangan, nilai distorsi arus juga harus diperhatikan. Hasil simulasi yang menerangkan data THD arus pada sistem kelistrikan jaringan distribusi 20 kV dari gardu induk Meulaboh dapat dilihat pada [Tabel 13](#) sampai [Tabel 15](#).

Tabel 13. Hasil Simulasi Harmonisa Arus Eksisting

Bus ID	Isc(kA)	IL(kA)	Isc/IL	THD(%)
Bus GH Calang	1.372	0.138	9.94	0.351
Bus GH Lamno	0.838	0.031	27.03	0.991

Tabel 14. Hasil Simulasi Harmonisa Arus Integrasi PV Ke Grid (Skenario 1)

Bus ID	Isc(kA)	IL(A)	Isc/IL	THD(%)
Bus GH Calang	1.380	0.149	9.26	0.364
Bus GH Lamno	0.841	0.330	2.55	0.972

Tabel 15. Hasil Simulasi Harmonisa Arus Integrasi PV Ke Grid (Skenario 2)

Bus ID	Isc(kA)	IL(A)	Isc/IL	THD(%)
Bus GH Calang	1.404	0.140	10.03	0.453
Bus GH Lamno	0.906	0.350	2.59	1.041

Nilai THD arus berkisar antara 0.3 sampai 1.04%, berdasarkan standar IEEE Std. 519-2014 nilai ini berada di bawah batas standar yang dapat diterima. Dengan demikian, sistem memiliki keandalan dan keamanan yang tinggi. Harmonik arus sistem microgrid dapat ditentukan dengan perhitungan rasio antara arus hubung singkat (Isc) dan arus nominal (IL) yang mengalir di saluran.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Hasil simulasi aliran daya kondisi eksisting menunjukkan terdapat 2 bus yang mengalami kondisi undervoltage dari tegangan nominal yaitu pada Bus GH Calang sebesar 8.26 % atau 1.65 kV dan pada Bus GH Lamno sebesar 12.28% atau 2.45 kV.

Simulasi aliran daya setelah integrasi sistem PV sebesar 332 kW ke grid pemasangan pada Bus GH Lamno (skenario 2) menunjukkan kenaikan tegangan paling signifikan yaitu pada Bus GH Calang mengalami kenaikan sebesar 7.0 % atau 1.39 kV dan pada Bus GH Lamno mengalami kenaikan sebesar 9.1 % atau 1.81 kV.

Nilai THD tegangan dan THD arus berada dibawah standar IEEE Std.519-2014, hasil menunjukkan bahwa semua bus yang ada pada sistem memiliki THDv dengan range 0.05 sampai 0,3% dan Nilai THD arus berkisar antara 0.3 sampai 1.04%. Nilai ini merupakan hasil simulasi harmonisa kondisi sebelum dan sesudah pemasangan integrasi IREGs.

Saran

Untuk penelitian selanjutnya dapat dikembangkan dengan jenis *Distributed Generation* yang lain seperti wind turbine maupun hybrid.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] Q. Ai, X. Wang, and X. He, "The impact of large-scale distributed generation on power grid and microgrids," *Renew. Energy*, vol. 62, pp. 417–423, 2014.

-
- [2] X. Gao, L. Xia, L. Lu, and Y. Li, "Analysis of Hong Kong's wind energy: power potential, development constraints, and experiences from other countries for local wind energy promotion strategies," *Sustainability*, vol. 11, no. 3, p. 924, 2019.
- [3] V. Azkia Dihni, "10 Negara Pengguna Tenaga Angin dan Surya Terbesar," *Databooks.katadata.co.id*, 2022. [Online]. Available: <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2022/05/12/10-negara-pengguna-tenaga-angin-dan-surya-terbesar>. [Accessed: 08-Jul-2022].
- [4] Humas EBTKE, "Indonesia Kaya Energi Surya, Pemanfaatan Listrik Tenaga Surya oleh Masyarakat Tidak Boleh Ditunda," *ebtke.esdm.go.id*, 2021. [Online]. Available: <https://ebtke.esdm.go.id/post/2021/09/02/2952/indonesia.kaya.energi.surya.pemanfaatan.listrik.tenaga.surya.oleh.masyarakat.tidak.boleh.ditunda>.
- [5] H. Zsiborács *et al.*, "Intermittent renewable energy sources: The role of energy storage in the european power system of 2040," *Electronics*, vol. 8, no. 7, p. 729, 2019.
- [6] Y.-S. Kim, E.-S. Kim, and S.-I. Moon, "Frequency and voltage control strategy of standalone microgrids with high penetration of intermittent renewable generation systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 718–728, 2015.
- [7] S. Mokeke and L. Z. Thamae, "The impact of intermittent renewable energy generators on Lesotho national electricity grid," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 196, p. 107196, 2021.
- [8] P. Du, R. Baldick, and A. Tuohy, "Integration of large-scale renewable energy into bulk power systems," *Power Electron. Power Syst.*, 2017.
- [9] L. Bird and M. Milligan, "WREF 2012: Lessons from large-scale renewable energy integration studies," *World Renew. Energy Forum, WREF 2012, Incl. World Renew. Energy Congr. XII Color. Renew. Energy Soc. Annu. Conf.*, vol. 3, no. June, pp. 2400–2406, 2012.
- [10] E. Munkhchuluun, L. Meegahapola, and A. Vahidnia, "Impact on rotor angle stability with high solar-PV generation in power networks," in *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, 2017, pp. 1–6.
- [11] C. Liu, Z. Chen, C. L. Bak, Z. Liu, P. Lund, and P. Rønne-Hansen, "Transient stability assessment of power system with large amount of wind power penetration: The Danish case study," in *2012 10th International Power & Energy Conference (IPEC)*, 2012, pp. 461–467.
- [12] C. Bing *et al.*, "Power quality measurement and comparison between two wind farms equipped with FSIG+ PMSG and DFIG," in *2010 International Conference on Power System Technology*, 2010, pp. 1–7.
- [13] S. Hong and M. Zuercher-Martinson, "Harmonics and noise in photovoltaic (pv) inverter and the mitigation strategies," *Solectria Renewables, Lawrence, MA, USA, Tech. Rep*, 2010.
- [14] M. Patsalides, A. Stavrou, G. Makrides, V. Efthimiou, and G. E. Georghiou, "Harmonic Response of Distributed Grid Connected PhotoVotaic Systems," http://www.pvtechnology.ucy.ac/pvtechnology/publication/DEMSEE08_pq.Pap.pdf, 2008.
- [15] I. Abadi, O. Penangsang, and R. L. Praseto, "A study of harmonics in PV-wind turbine micro-grid system," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 10, no. 9, pp. 23621–23629, 2015.
- [16] C. Francisco, *Harmonics, power systems, and smart grids*. CRC Press, 2017.
- [17] E. M. Suryanti, R. Rosmaliati, and I. B. F. Citarsa, "Analisis Unjuk Kerja Sistem Fotovoltaik On-Grid Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Gili Trawangan," *Dielektrika*, vol. 1, no. 2, pp. 82–95, 2017.
- [18] T. Zulfadli and A. Mulkan, "Studi kelayakan energi matahari--angin (hybrid) sebagai sumber daya pompa air untuk sistem pengairan di kawasan Aceh Besar," *J. Polimesin*, vol. 17, no. 2, pp. 61–66, 2019.
-

-
- [19] A. A. F. Husain, W. Z. W. Hasan, S. Shafie, M. N. Hamidon, and S. S. Pandey, "A review of transparent solar photovoltaic technologies," *Renew. Sustain. energy Rev.*, vol. 94, pp. 779–791, 2018.
- [20] A. Julisman, I. D. Sara, and R. H. Siregar, "Prototipe Pemanfaatan Panel Surya Sebagai Sumber Energi Pada Sistem Otomasi Stadion Bola," *J. Komputer, Inf. Teknol. dan Elektro*, vol. 2, no. 1, 2017.
- [21] A. Najmurokhman, Z. Fakhri, and M. Reza, "Pengembangan Pembangkit Listrik Tersebar Energi Baru Terbarukan dan Konversi Energi," 2017.
- [22] R. Muhamad, Stability analysis of transmission systems with high penetration of distributed generation. 2006.
- [23] A. Molina-Garcia, A. D. Hansen, E. Muljadi, V. Gevorgian, J. Fortmann, and E. Gomez-Lazaro, "International requirements for large integration of renewable energy sources," *Large Scale Grid Integr. Renew. Energy Sources*, pp. 29–57, 2017.
- [24] K. Morison, L. Wang, and P. Kundur, "Power system security assessment," *IEEE power energy Mag.*, vol. 2, no. 5, pp. 30–39, 2004.
- [25] F. P. Sakti and M. H. Achmad, "Peningkatan Voltage Stability Dengan Pemasangan Pembangkitan Tersebar pada Sistem Distribusi Area Yogyakarta Menggunakan Flower Pollination Algorithm," *Transm. J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 24, no. 2, pp. 74–82.
- [26] P. P. Rezky, "Studi Analisa Stabilitas Transien Sistem Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV Setelah Masuknya Pembangkit Paiton 1000 MW Pada Tahun 2021," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016.
- [27] M. A. Guevara, A. Shaban, A. Nafisi, and others, "Modeling and Load Flow Analysis of a Microgrid Laboratory," *Int. J. Smart Grid Sustain. Energy Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 103–111, 2019.
- [28] E. Vittal, M. O'Malley, and A. Keane, "Rotor angle stability with high penetrations of wind generation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 1, pp. 353–362, 2011.
- [29] O. G. Ibe and A. I. Onyema, "Concepts of reactive power control and voltage stability methods in power system network," *IOSR J. Comput. Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 15–25, 2013.
- [30] M. Eremia and M. Shahidehpour, Handbook of electrical power system dynamics: modeling, stability, and control, vol. 92. John Wiley & Sons, 2013.
- [31] F. I. Pasaribu, "Beban Non Linier dan Analisa Harmonisa," *J. Elektro dan Telekomunikasi*, vol. 5, no. 1, pp. 29–34, 2021.
- [32] A. M. R. Lede, M. G. Molina, M. Martinez, and P. E. Mercado, "Microgrid architectures for distributed generation: A brief review," in *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America)*, 2017, pp. 1–6.
- [33] W. Su, J. Wang, and J. Roh, "Stochastic energy scheduling in microgrids with intermittent renewable energy resources," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1876–1883, 2013.
- [34] M. A. M. Ramli, H. R. E. H. Boucekara, and A. S. Alghamdi, "Efficient energy management in a microgrid with intermittent renewable energy and storage sources," *Sustain.*, vol. 11, no. 14, 2019, doi: 10.3390/su11143839.
- [35] M. Fikri and D. Anggaini, "Metode Newton Raphson Untuk Analisis Aliran Daya Jaringan Distribusi 12, 66 kV," *J. Ilm. SUTET*, vol. 8, no. 2, pp. 1505–2356, 2018.
- [36] D. Yudanto and D. Tessal, "Analisis Aliran Daya Sistem Tenaga Listrik Pada PT. Sele Raya Merangin Dua Menggunakan Metode Newton-Raphson," *J. Electr. Power Control Autom.*, vol. 4, no. 2, pp. 51–58, 2021.
- [37] F. Dani, A. Hasibuan, Asran, M. Jannah, and I. M. A. Nrarta, "Simulasi dan Analisa Pemasangan Distributed Generation Pada Sistem Distribusi 20 KV Menggunakan ETAP 19.0," no. 72, pp. 443–454, 2022.
-

-
- [38] M. Dicky, "Analisis Penempatan dan Kapasitas Distributed Generation (DG) Terhadap Profil Tegangan dan Rugi Daya pada Penyulang Lipat Kain-Riau," UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU, 2020.
- [39] F. Otniel, N. Busaeri, and S. Sutisna, "Analisa Aliran Daya Sistem Tenaga Listrik pada Bagian Penyulang 05ee0101a Di Area Utilities II PT. Pertamina (Persero) Refinery Unit Ivcilacap Menggunakan Metode Newton-Raphson," *J. Energy Electr. Eng.*, vol. 1, no. 1, 2019.
- [40] A. B. S. Futri, K. Karnoto, and A. A. Zahra, "Analisa Harmonisa Tegangan dan Harmonisa Arus pada Sistem Elektrikal Gedung Teknik PWK dan Teknik Arsitektur Universitas Diponegoro," *Transient J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 1, no. 4, 2021.
- [41] H. Sugiarto, "Kajian Harmonisa Arus Dan Tegangan Listrik di Gedung Administrasi Politeknik Negeri Pontianak," 2013.
- [42] F. Baskoro, W. A. Billahi, S. I. Haryudo, U. T. Kartini, and others, "Analisis Perubahan Nilai Faktor Daya terhadap Pemasangan Kapasitor Bank pada Unit Boiler Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak dan Gas Bumi Cepu," *J. Tek. Elektro*, vol. 10, no. 2, pp. 497–505, 2021.
- [43] N. Tomy and I. Reza, "Analisis Pengukuran dan Perhitungan Total Harmonic Distortion (THD) pada Beban Non Linier," *J. Sains Teknol. Fak. Tek.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–8, 2022.