

Penetration Impact of Distributed Generation of Wind Turbines on PLN's Distribution Network at Krueng Raya Aceh Besar

Dampak Penetrasi Pembangkit Tersebar Energi Angin pada Saluran Distribusi Listrik PLN di Krueng Raya Aceh Besar

Renno Kamal Putra¹, Muhammad Daud^{1*}, Adi Setiawan¹, Arnawan Hasibuan¹

Abstract

Distribution of electricity that is too far away can cause the power flow that flows in the distribution channel to be significantly reduced. This also occurs in the PLN distribution line in Krueng Raya Aceh Besar, which is 95 km away, so that the voltage value is often below the standard value. This study analyzes the use of dispersed generators as an alternative solution to overcome this problem while increasing the efficiency of the electricity distribution system. However, the operation of distributed generators can have an impact on distortion harmonics in the voltage, current, and frequency of the power flow in the distribution network system. This study is focused on analyzing the penetration impact of dispersed wind energy generators on the distribution line by conducting simulations using ETAP. The results can increase the average value of the voltage profile by 0.077 kV or 0.39%, reduce power losses by 6.628 kW and THD_v values by 0.004% to 0.018% and THD_i by 0 on all buses.

Keywords

Distributed generation, voltage profile, power losses, harmonics

Abstrak

Penyaluran listrik yang terlalu jauh dapat menyebabkan aliran daya yang mengalir dalam saluran distribusi berkurang secara signifikan. Ini juga terjadi pada saluran distribusi PLN di Krueng Raya Aceh Besar yang jaraknya mencapai 95 km sehingga nilai tegangannya sering berada di bawah nilai standar. Penelitian ini menganalisis penggunaan pembangkit tersebar sebagai alternatif solusi untuk mengatasi masalah tersebut sekaligus meningkatkan efisiensi sistem distribusi listrik. Namun, pengoperasian pembangkit tersebar dapat menimbulkan distorsi harmonisa pada tegangan, arus, dan frekuensi pada aliran daya dalam sistem jaringan distribusi. Studi ini difokuskan pada analisis dampak penetrasi pembangkit tersebar energi angin pada saluran distribusi dengan melakukan simulasi menggunakan ETAP. Hasil penelitian dapat meningkatkan nilai rata-rata profil tegangan sebesar 0,077 kV atau 0,39%, mengurangi rugi-rugi daya sebesar 6,628 kW serta nilai THD_v sebesar 0,004% sampai 0,018% dan THD_i sebesar 0 pada seluruh bus.

Kata Kunci

Pembangkit tersebar, profil tegangan, rugi-rugi daya, harmonisa

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

* mduaud@unimal.ac.id

Submitted : January 24, 2022. Accepted : March 09, 2023. Published : March 11, 2023.

PENDAHULUAN

Energi listrik adalah salah satu energi yang sangat dominan dibutuhkan oleh manusia. Hal ini yang menjadi ketergantungan terhadap kebutuhan energi terhadap manusia. Seiring dengan laju pertumbuhan populasi serta peningkatan era globalisasi yang terus meningkat, sedangkan peningkatan ketersediaan sumber energi tidak sebanding dengan kebutuhan yang diharapkan oleh konsumen. Kebutuhan energi listrik untuk memenuhi pelayanan konsumen, penyedia energi listrik harus melakukan pengembangan terhadap penyaluran tenaga listrik yang terdiri dari sistem pembangkitan, sistem transmisi, serta sistem distribusi [1], [2].

Penyulang Krueng Raya memiliki sistem distribusi yang panjang dengan jarak 95 km. Aliran daya yang mengalir pada penyulang Krueng Raya sering mengalami jatuh tegangan dan rugi-rugi daya sehingga nilai tegangannya dibawah nilai standar yang telah ditetapkan PLN ($\geq 5\%$). Hal ini akan menyebabkan pelayanan terhadap beban terganggu, beban yang digunakan oleh konsumen tidak bekerja optimal sehingga dapat terjadi kerusakan beban listrik yang dapat merugikan semua pihak [6].

Pemanfaatan pembangkit tersebar pada suatu daerah disesuaikan dengan potensi energi yang ada pada wilayah sekitar. Pemanfaatannya agar dapat beradaptasi dengan ukuran yang kecil dan konstruksi yang lebih sederhana dibandingkan dengan pusat-pusat pembangkit konvensional. Menurut International Energy Agency (IEA), penilaian ekonomi atas nilai fleksibilitas pembangkit tersebar sangat memungkinkan dan layak. Potensi energi yang dekat dengan pusat beban memiliki dampak efisiensi pada distribusi jaringan, jaringan transmisi, biaya operasional yang rendah serta loss yang terjadi semakin kecil [1], [2].

Pengoperasian pembangkit tersebar dapat terjadi potensi penyimpangan tegangan, arus, dan frekuensi dalam aliran daya dalam sistem jaringan distribusi. Kondisi ini memengaruhi terhadap tegangan, rugi-rugi daya saluran, harmonisa sistem, dan kehandalan pada jaringan distribusi [3]. Tujuan penelitian ini yaitu melihat dampak yang terjadi pada profil tegangan, rugi-rugi daya dan harmonisa pada saluran distribusi di daerah Krueng Raya.

Pembangkit Tersebar

Pembangkit tersebar adalah pembangkit listrik berkapasitas antara 50 kW sampai 400 MW yang menggunakan teknologi ramah lingkungan yang dihubungkan secara langsung ke jaringan distribusi. Kelebihan sistem ini dibanding sistem kelistrikan yang terpusat adalah dapat beroperasi secara independen, tidak memerlukan wilayah pengoperasian yang besar dan rumit, jaringan transmisi pendek dan dapat menggunakan sumber energi pembangkitan yang disesuaikan dengan lokasi yang akan dibutuhkan oleh konsumen. Pembangkitan terdistribusi dapat mengurangi rugi-rugi energi pada transmisi listrik karena pemasangannya dekat dengan pengguna dan dapat mengurangi jumlah daya yang harus dibangkitkan [15] [7].

Pembangkit tersebar (*distributed generation*) disebut juga *on-site generation* dan *distributed energy*. Pembangkit tersebar menghasilkan energi listrik dari beberapa sumber energi yang berkapasitas kecil dan dihubungkan dengan sistem jaringan distribusi secara langsung seperti skema pada Gambar 1 [7].



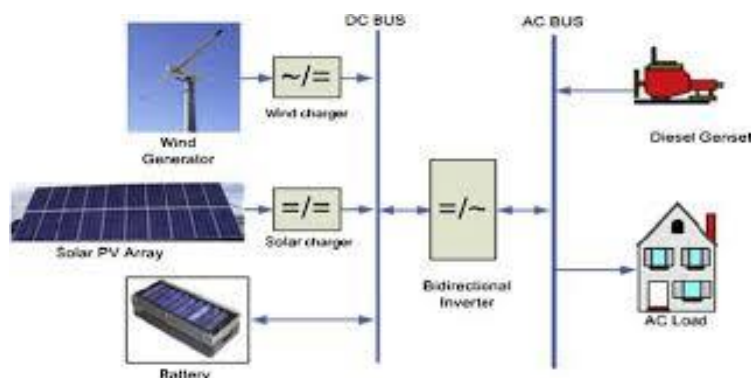
Gambar 1. Skema pembangkit tersebar

Pembangkit Listrik Sumber Energi Terbarukan

Energi baru terbarukan merupakan energi yang berasal dari sumber-sumber yang dapat diperbaharui tanpa ada batas. Seperti energi air, energi matahari, energi angin, dan energi yang bersumber yang dapat diproduksi secara berkelanjutan seperti biomassa. Energi matahari menjadi sumber energi utama dari bumi sehingga energinya dapat digunakan secara langsung. Energi angin juga merupakan energi terbarukan yang semakin meningkat pemanfaatannya saat ini. Pemanfaatan energi memiliki dampak tersendiri terhadap sektor industri, sektor transportasi, sektor komersial/residensial, dan sektor-sektor kehidupan lainnya [4][5].

Pemanfaatan energi angin dengan cara mengubah energi kinetik angin yang diubah menjadi energi listrik. Angin yang bergerak dapat memutar turbin yang terhubung dengan generator listrik. Besarnya kecepatan angin dan besarnya daya yang dibutuhkan untuk beban listrik adalah acuan untuk memilih tipe jenis turbin yang akan digunakan [4], [6], [7]. Di Indonesia, energi angin juga disebut energi bayu sehingga pembangkit listrik tenaga angin sering disebut pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB).

Gabungan dari satu atau lebih pembangkit listrik energi terbarukan yang menyuplai daya untuk suatu sistem tenaga listrik secara terpadu biasanya disebut pembangkit listrik tenaga hybrid seperti terlihat pada Gambar 2. Pembangkit listrik tenaga hibrid merupakan sistem pembangkit listrik yang dapat diterapkan pada daerah yang sukar dijangkau oleh sistem pembangkit yang besar seperti PLN. Pembangkit hibrida memanfaatkan energi terbarukan sebagai sumber utama (primer) yang dikombinasikan dengan satu atau beberapa sumber energi lain sebagai sumber cadangan (sekunder) [8], [1], [9].



Gambar 2. Skema pembangkit listrik tenaga hibrida terhadap jaringan distribusi

Pada pembangkit ini memanfaatkan *renewable energy* yang digunakan berasal dari energi matahari dan angin yang dikombinasikan dengan *diesel-generator* set sehingga menjadi sebagai pembangkit yang lebih efisien, efektif, dan handal [6].

Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar. Jatuh tegangan pada saluran tenaga listrik secara umum berbanding lurus terhadap panjang saluran beban, serta berbanding terbalik terhadap luas penampang penghantar [2].

Umumnya beban konsumen bersifat beban resistif dan induktif, dimana beban ini akan menyerap daya aktif dan daya reaktif yang dihasilkan oleh generator. Untuk mengetahui besarnya jatuh tegangan dapat dihitung dengan persamaan seperti dibawah ini:

$$V_s^2 = (V_r + \Delta V_p)^2 + (\Delta V_q)^2 \quad (1)$$

Rugi-Rugi Daya

Proses transmisi dan distribusi listrik kerap kali mengalami rugi-rugi daya yang cukup besar yang diakibatkan oleh rugi-rugi pada saluran dan juga rugi-rugi pada trafo. Keduanya sering memberi pengaruh yang besar terhadap kualitas daya serta tegangan yang dikirimkan ke sisi beban. Nilai tegangan yang dikirim telah melebihi batas toleransi akan menyebabkan tidak optimalnya kerja dari peralatan listrik pada sisi pelanggan [10].

Persamaan rugi-rugi daya pada saat pembangkit tersebar dihubungkan terhadap saluran jaringan distribusi adalah:

$$P_{j0} = |V_j| |I_{j0}| \cos \theta_{j0} \quad (2)$$

$$I_{j0} = I_{ij} + I_j \quad (3)$$

$$P_{loss} = I_{j0}^2 \times R_{ij} \quad (4)$$

Metode Fast-Decoupled

Metode *fast-decoupled* merupakan salah satu metode untuk menghitung aliran daya. Metode *fast-decoupled* ialah pengembangan dari metode newton-raphson. Perbedaan antara dua metode ini yaitu pada waktu yang dibutuhkan pada iterasi dan kecepatan perolehan aliran daya. Pada setiap metode yang digunakan memiliki kecepatan yang relatif dan macam-macam analisa aliran daya yang berbeda [11].

Pada suatu bus dimana memiliki nilai besar tegangan dan daya reaktif yang tidak diketahui. Nilai real dan imajiner tegangan untuk setiap iterasi didapatkan dengan menghitung nilai daya reaktif terlebih dahulu. Untuk menghitung daya aktif dan reaktif pada saluran dapat menggunakan rumus berikut:

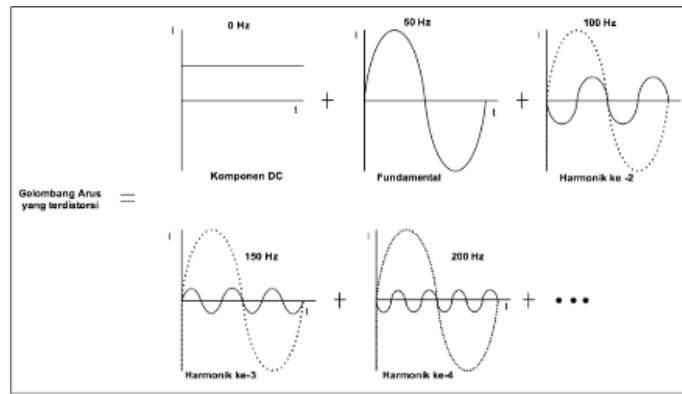
$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (5)$$

Atau:

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (6)$$

Harmonisa

Harmonisa adalah suatu fenomena dimana gelombang sinusoidal dalam satu periode memiliki frekuensi kelipatan dari frekuensi fundamental yang diakibatkan dari adanya beban yang tidak linier (non linier) sehingga membuat gelombang yang terbentuk menjadi tidak sinusoidal murni [12], [13]. Konsep dasar gelombang arus harmonisa dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Konsep dasar arus harmonisa

Distorsi harmonisa disebabkan oleh peralatan yang memiliki beban non-linier pada sistem tenaga listrik. Peralatan yang memiliki beban non-linier merupakan kondisi dimana arus tidak proporsional dengan gelombang tegangannya [14].

Rasio masing-masing komponen harmonis terhadap distorsi arus dan tegangan dinyatakan dalam rumus sebagai berikut :

$$IHD = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \tag{7}$$

Total Harmonisa Distortion (THD) adalah besaran yang digunakan untuk ukuran gelombang bukan sinus yang dinyatakan dalam satuan persen (%).

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{V_k}{\sqrt{2}}\right)^2}}{\frac{V_1}{\sqrt{2}}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=2}^{\infty} (V_k)^2}}{\frac{V_1}{\sqrt{2}}} \tag{8}$$

Formula yang sama diterapkan juga pada arus (THD_i), yaitu :

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{I_k}{\sqrt{2}}\right)^2}}{\frac{I_1}{\sqrt{2}}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=2}^{\infty} (I_k)^2}}{\frac{I_1}{\sqrt{2}}} \tag{9}$$

Semakin besar prosentase atau nilai THD yang timbul maka menyebabkan semakin besarnya resiko kerusakan peralatan akibat elektronika harmonisa arus ataupun tegangan. Hubungan antara IHD dan THD dapat dilihat dalam persamaan berikut:

$$THD = (IHD_2^2 + IHD_3^2 + IHD_4^2 + \dots + IHD_n^2)^{\frac{1}{2}} \tag{10}$$

Adapun standar yang mengatur mengenai harmonisa adalah standar IEEE 519-2014. Batas maksimum distorsi harmonisa tegangan dapat diketahui pada Tabel 1.

Tabel 1. Batas Distorsi Harmonisa Tegangan Menurut IEEE Std. 519-2014

No.	Tegangan pada PCC	Distorsi Tegangan Individu (%)	Distorsi Tegangan Individu (%)
1	V ≤ 1kV	5.0	8.0
2	1kV < V ≤ 69 kV	3.0	5.0
3	69 kV < V < 161 kV	1.5	2.5
4	V > 161 kV	1.0	1.5

Standar IEEE 519-2014 mengatur mengenai batasan harmonisa yang diijinkan didalam suatu sistem. Sedangkan batas THD arus (THD_i) yang direkomendasikan bagi pelanggan dengan sistem tegangan 120 V sampai 69 KV disesuaikan dengan *short circuit ratio* (rasio hubung singkat) seperti pada Tabel 2 [15].

Tabel 2. Batas maksimum distorsi harmonisa arus

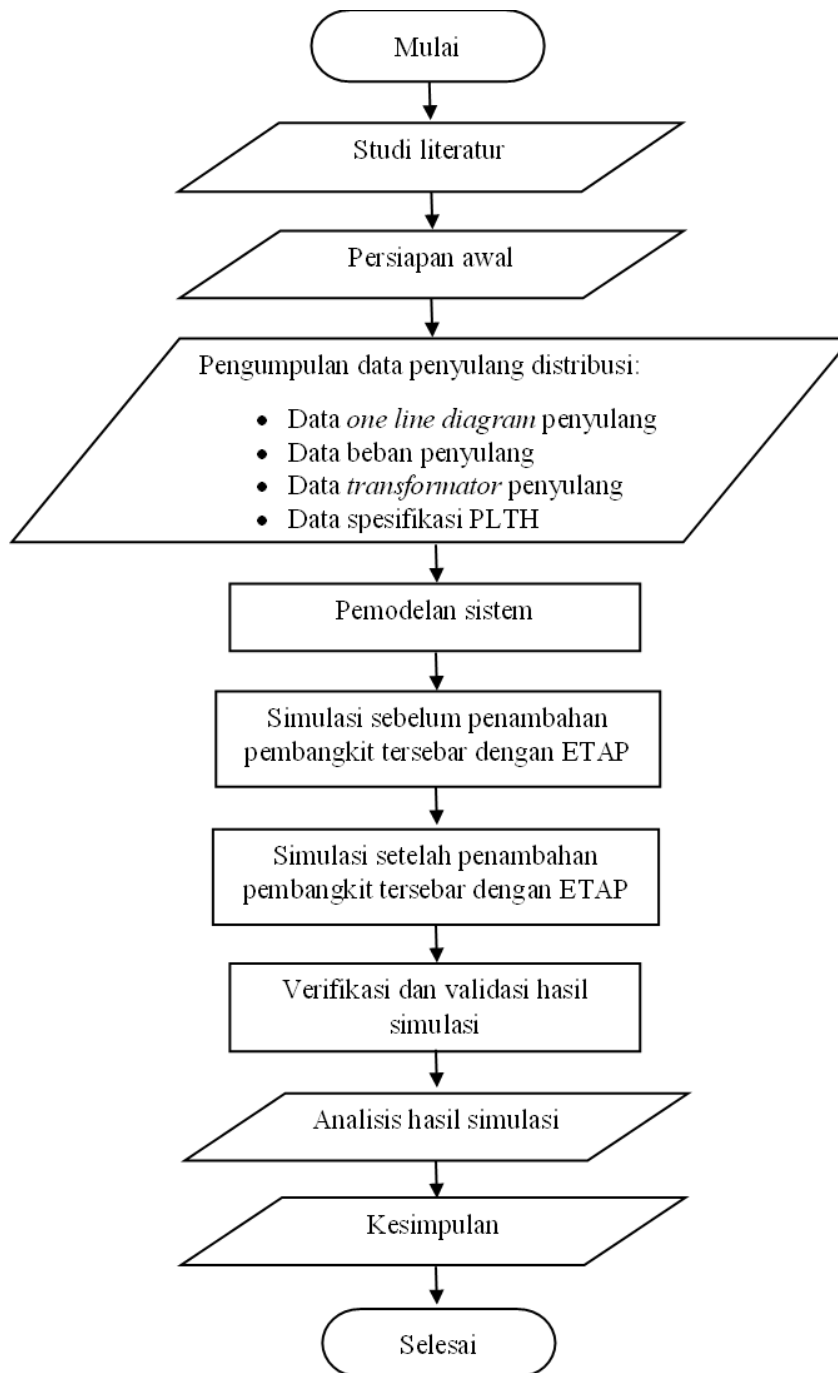
No.	Isc/IL	3 ≤ h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h < 50	THD (%)
1	<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
2	20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
3	50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
4	100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
5	>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

METODE PENELITIAN

Tahapan penelitian yang dilakukan terdiri dari beberapa kegiatan diantaranya persiapan memperoleh studi literatur kegiatan yang dilakukan adalah mencari teori-teori pendukung penelitian. Diantaranya adalah tentang sistem tenaga listrik, sistem jaringan distribusi, pembangkit tersebar, profil tegangan, rugi-rugi daya, dan harmonisa. pengumpulan data-data pendukung seperti data penyulang distribusi yang akan dimasukkan kedalam pemodelan sistem yang akan dibuat.

Tahapan selanjutnya dibuat suatu pemodelan kelistrikan *one line diagram* penyulang Krueng Raya melalui simulasi dengan merancang menggunakan software ETAP 19.0. Data-data yang telah diperoleh akan dimasukkan pada saat pemodelan simulasi one line diagram. Data-data tersebut meliputi data penyulang, beban, trafo, bus, dan konduktor (tipe, impedansi, dan panjang saluran konduktor).

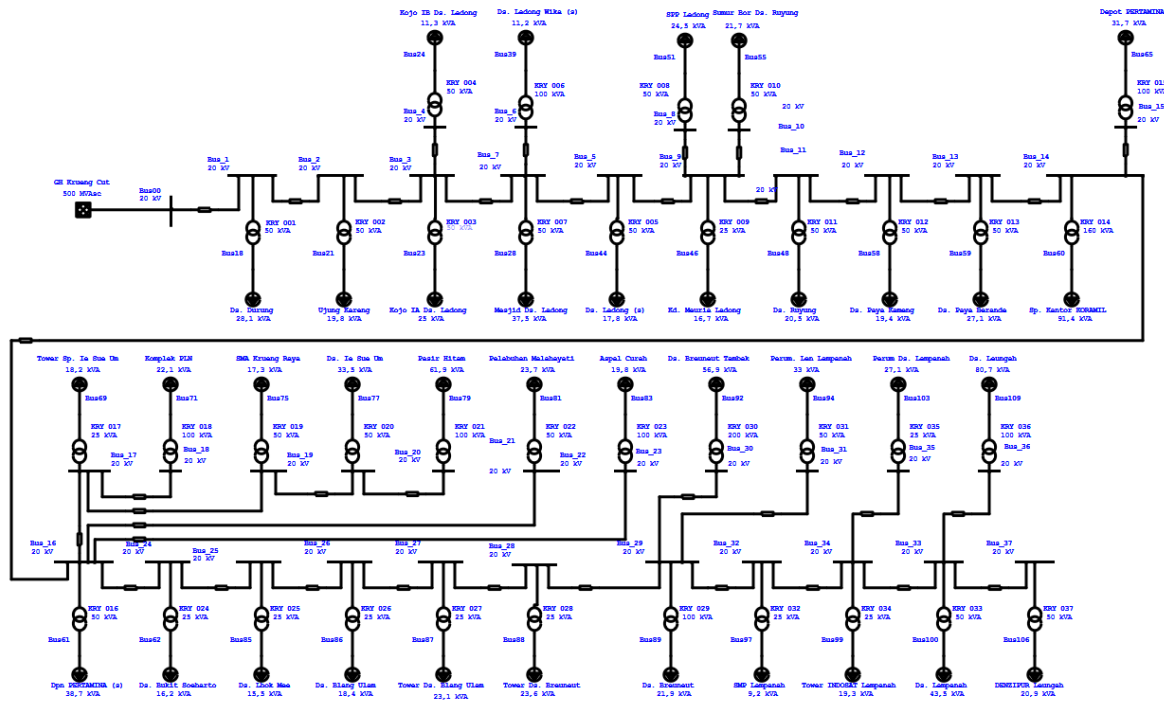
Kemudian dilakukan sebuah simulasi studi aliran daya pada simulasi ini. Dengan melakukan simulasi akan diperoleh nilai aliran daya pada penyulang Krueng Raya. Pemodelan simulasi aliran daya sebelum dan sesudah integrasi pembangkit tersebar PLTB terhadap jaringan distribusi. Gambar 4 merupakan diagram alir penelitian yang dilakukan dalam proses penelitian.



Gambar 4. Diagram alir penelitian

Pengumpulan data sangat diperlukan pada tahapan penelitian yang dilakukan. Data-data penelitian yang diperlukan berupa data sekunder maupun data non teknis lainnya. Data-data tersebut dari sumber kantor PLN Aceh dan tempat penelitian dilakukan. Di antara data yang dibutuhkan untuk dilakukan pemodelan sistem adalah one line diagram penyulang Krueng Raya, sebagaimana disajikan pada Gambar 5. Data lengkap yang perlu dipersiapkan adalah sebagai berikut:

- One line diagram* penyulang Krueng Raya
- Beban penyulang Krueng Raya
- Data *transformator* penyulang Krueng Raya
- Data PLTB di Krueng Raya
- Data kecepatan angin.

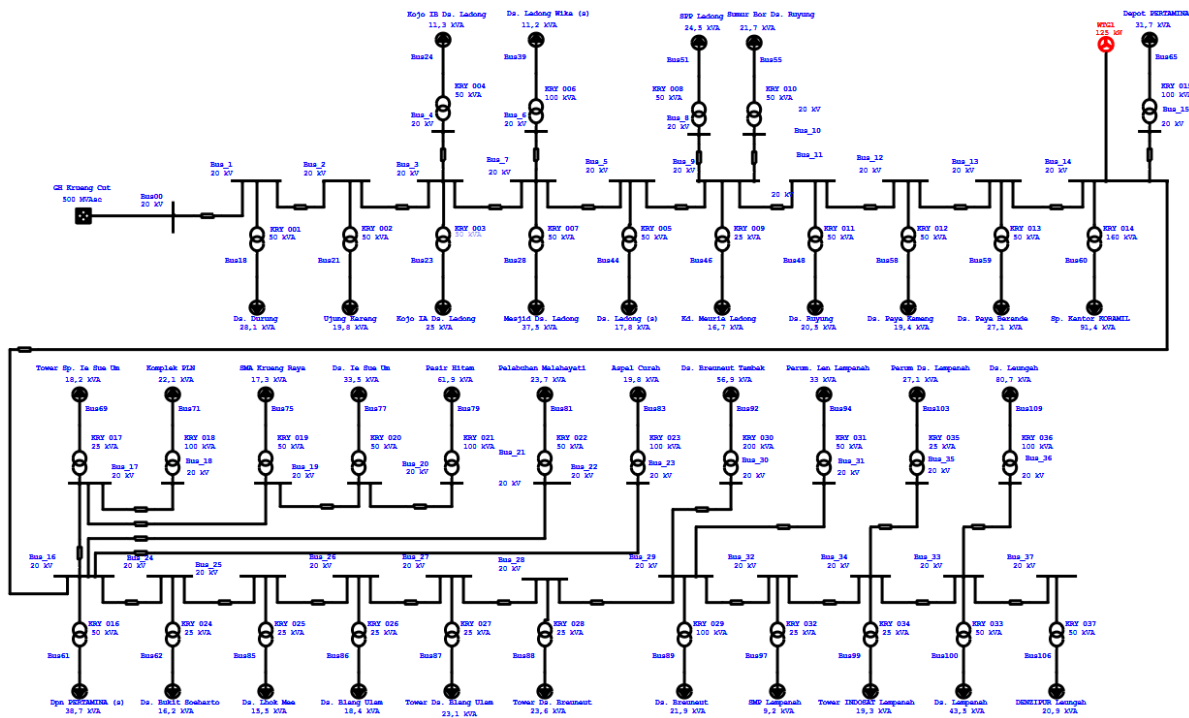


Gambar 5. One line diagram penyulang Krueng Raya 37 bus

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Simulasi dan Analisa Aliran Daya

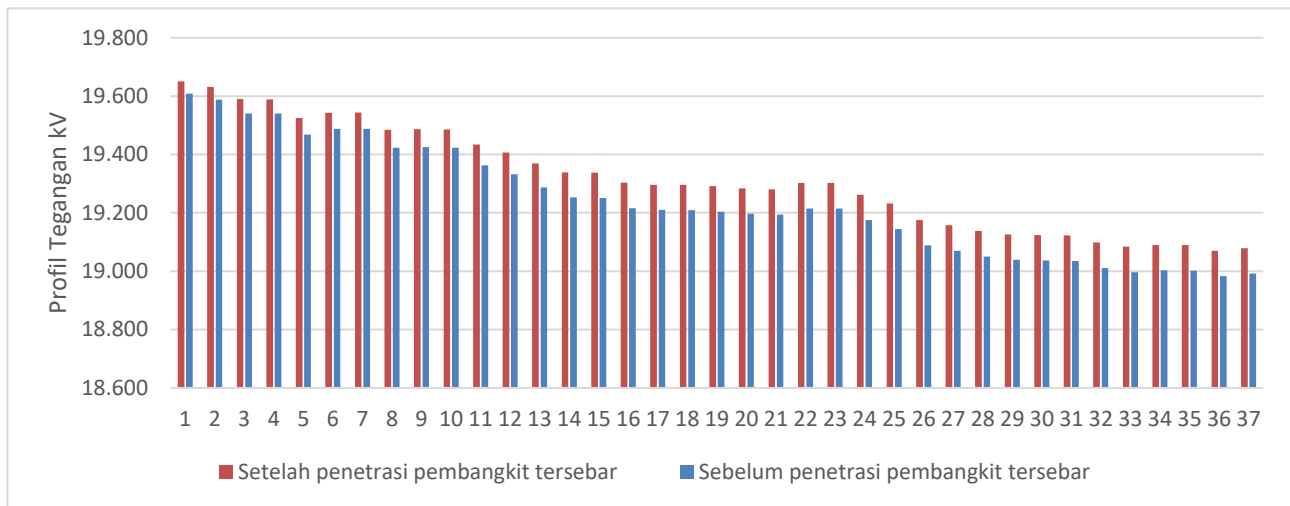
Sistem jaringan Krueng Raya 37 dilakukan simulasi dengan menggunakan software ETAP 19.0 dengan dua kondisi yaitu simulasi sebelum penambahan pembangkit tersebar dan simulasi setelah penambahan pembangkit tersebar pada bus 14 dengan kapasitas 125 kW yang dihubungkan langsung pada sistem, seperti yang terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Simulasi penetrasi pembangkit tersebar

a. Profil tegangan

Data merupakan hasil simulasi sistem distribusi listrik Krueng Raya sebelum dan setelah penetrasi pembangkit tersebar disajikan dalam Tabel L.1 yang ada pada bagian Data Pendukung setelah kesimpulan. Nilai rata-rata tegangan sebelum penambahan pembangkit tersebar sebesar 96,18% atau 19,237 kV. Terdapat beberapa bus yang memiliki nilai dibawah standar 5%. Nilai rata-rata tegangan setelah penambahan pembangkit tersebar sebesar 96,18% atau 19,237 kV. Nilai tersebut memperbaiki bus yang memiliki nilai dibawah standar. Gambar 7 menunjukkan profil tegangan dari hasil simulasi tersebut.

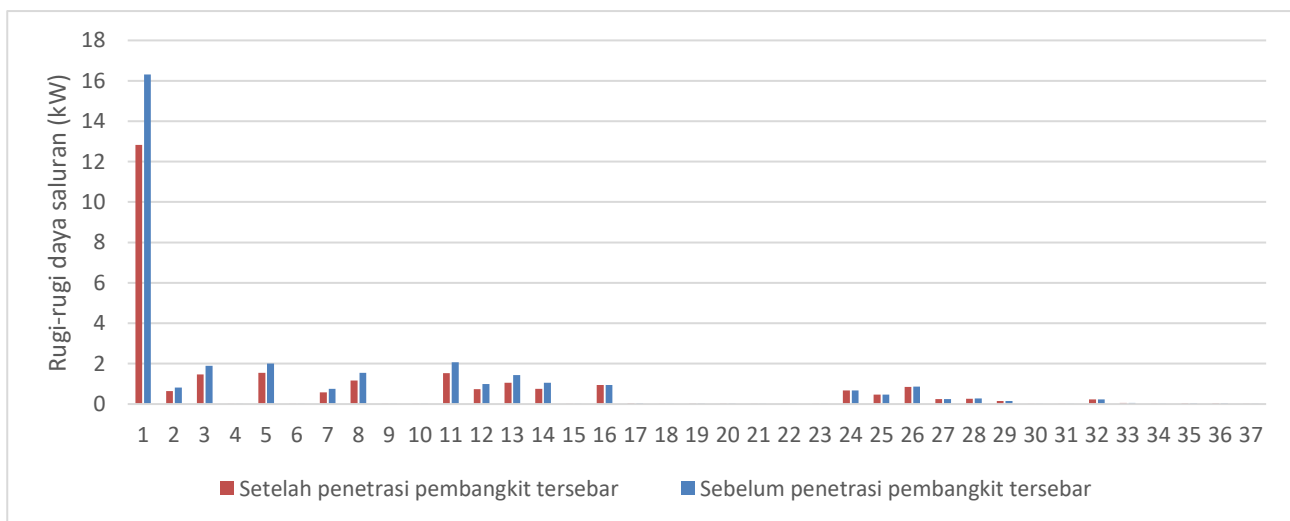


Gambar 7. Profil tegangan sebelum dan setelah penetrasi pembangkit tersebar

Pada setiap bus didapatkan nilai perbaikan tegangan yang baik mulai dari bus pertama hingga bus akhir dengan rata-rata nilai 0,077 kV atau 0,387 %. Pengaruh yang didapat pada penambahan pembangkit tersebar memiliki dampak positif pada profil tegangan pada penyulang distribusi Krueng raya.

b. Rugi-rugi daya saluran

Data nilai rugi-rugi daya saluran pada saluran distribusi Krueng Raya sebelum dan setelah penetrasi pembangkit tersebar disajikan dalam Tabel L.2 yang ada pada bagian Data Pendukung. Nilai total rugi-rugi daya saluran sebelum penetrasi pembangkit tersebar sebesar 33,02 kW. Nilai total rugi-rugi daya setelah penetrasi pembangkit tersebar sebesar 26,4 kW.

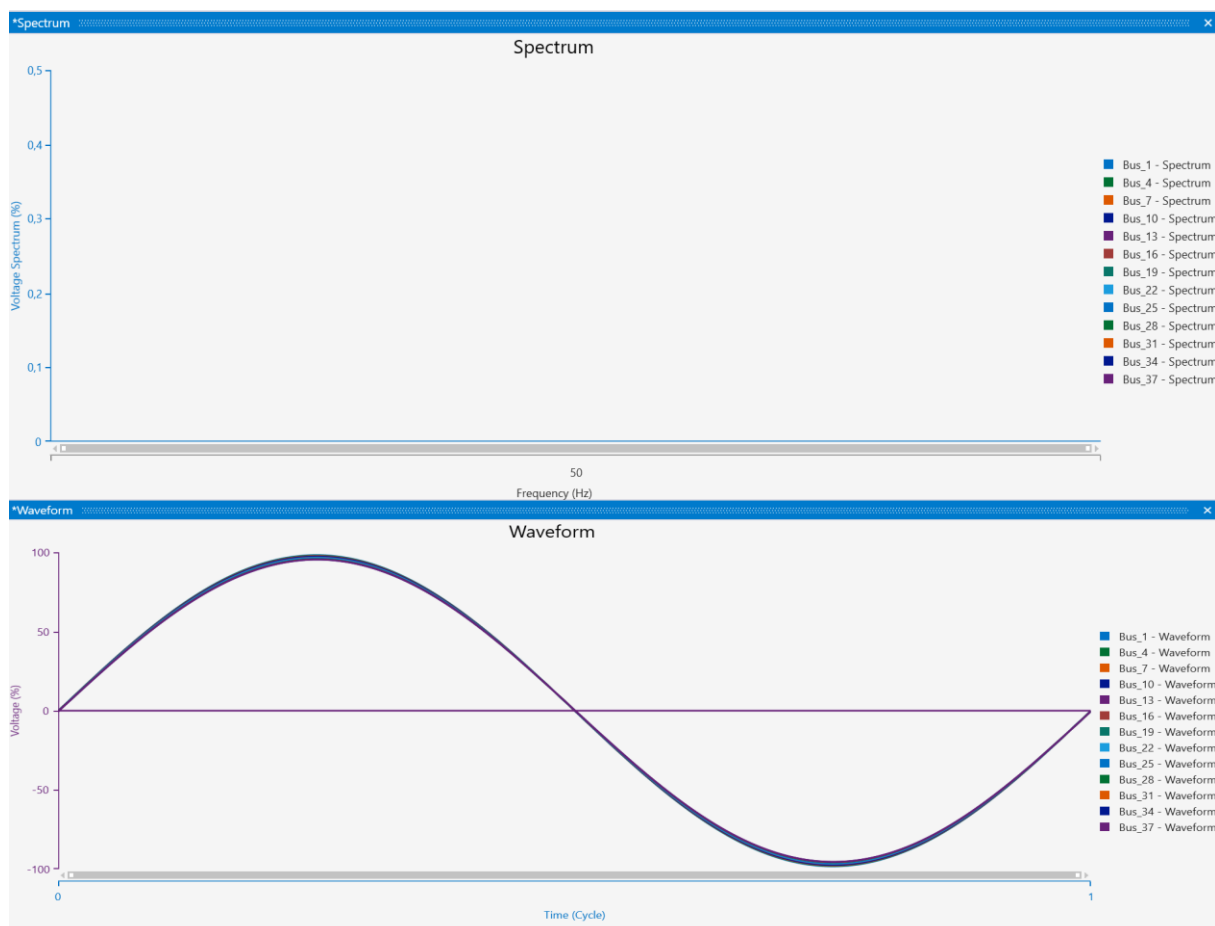


Gambar 8. Rugi-rugi daya sebelum dan setelah penetrasi pembangkit tersebar

Terlihat perbedaan pengurangan daya saluran rata-rata sebesar 6,62 kW yang terlihat pada Gambar 8. Adanya impedansi pada saluran yang dapat mempengaruhi rugi-rugi daya pada saluran. Hal ini akan dapat mempengaruhi kualitas daya pada setiap saluran distribusi. Semakin panjang saluran maka rugi-rugi saluran akan semakin besar. Pengaruh yang didapat pada penambahan pembangkit tersebar memiliki dampak positif pada rugi-rugi daya saluran pada penyulang distribusi Krueng Raya.

Hasil Simulasi dan Analisa Harmonisa

Data nilai THDv sebelum dan setelah dilakukan penetrasi pembangkit tersebar disajikan dalam Tabel L.3 yang ada pada bagian Data Pendukung setelah kesimpulan.. Nilai THDv sebelum penetrasi pembangkit tersebar terdapat 18 bus yang mengalami distorsi harmonisa. Nilai THDv sebelum penetrasi pembangkit tersebar terdapat 16 bus yang mengalami distorsi harmonisa. Nilai dari kedua kondisi ini nilainya sangat kecil yaitu 0,004%-0,018%. Nilai tersebut masih dibawah standar IEEE Std.519-2014 untuk sistem kelistrikan dengan level tegangan $1\text{kV} < V \leq 69\text{ kV}$ adalah sebesar 5%.



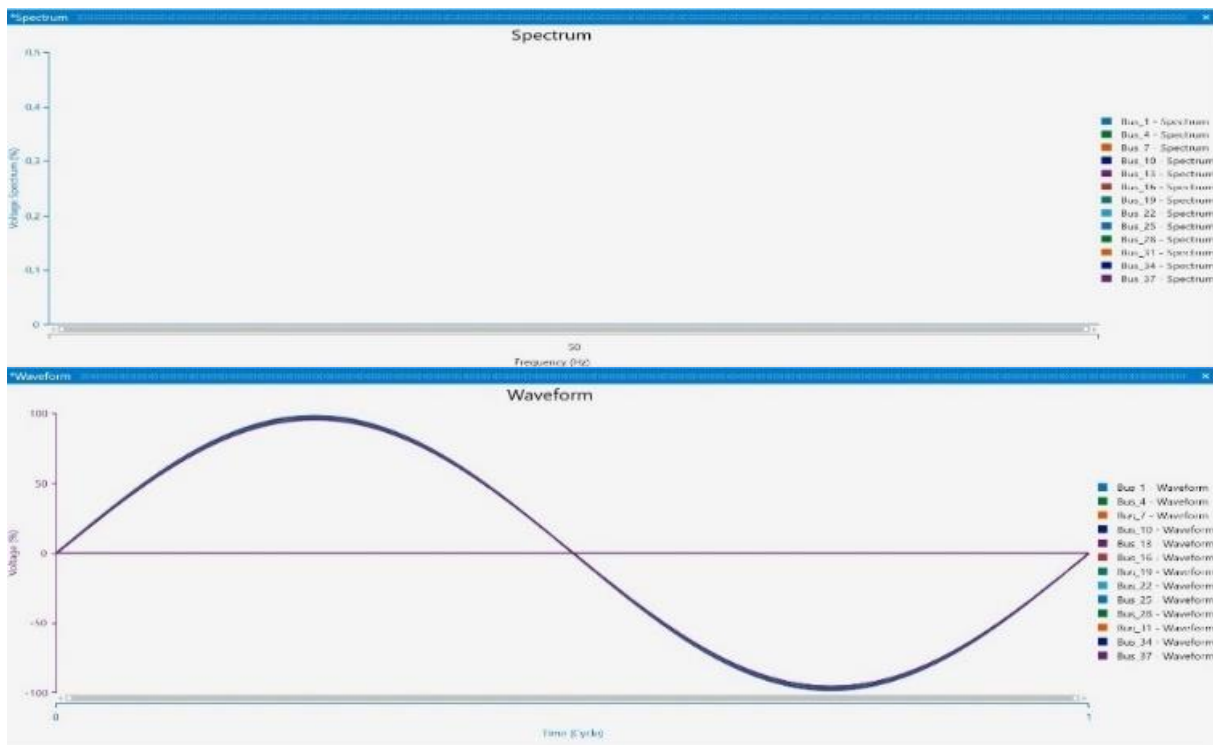
Gambar 9. Spektrum THDv dan gelombang sinusoidal

Gambar 9 menunjukkan bahwa bentuk gelombang sinusoidal tidak mengalami cacat gelombang atau masih berupa gelombang sinusoidal murni dan distorsi harmonisa tegangan pada seluruh orde adalah nol. Tidak ada pengaruh yang signifikan terhadap THDv pada saat penetrasi PLTB pada saluran distribusi Krueng Raya.

Adapun data nilai THDi sebelum dan setelah dilakukan penetrasi pembangkit tersebar disajikan dalam Tabel L.4 yang ada pada bagian Data Pendukung setelah kesimpulan. Nilai THDi sebelum dan setelah penetrasi pembangkit tersebar bernilai 0. Nilai standar THDi

dengan mencari nilai I_{sc}/I_L . Berdasarkan nilai yang didapat I_{sc}/I_L nilai THDi pada seluruh bus adalah 0.

Gambar 10 menunjukkan bentuk gelombang sinusoidal tidak mengalami cacat gelombang atau masih berupa gelombang sinusoidal murni dan distorsi harmonisa arus pada seluruh orde adalah nol. Hal tersebut disebabkan adanya pengaturan kecepatan angin dan parameter lainnya yang dapat mempengaruhi harmonisa terbangkitkan dari *wind turbine*. Pengaruh yang didapat pada penambahan pembangkit tersebar tidak memiliki dampak yang dapat mempengaruhi THDv dan pada penyulang distribusi Krueng Raya.



Gambar 10. Spektrum THDi dan gelombang sinusoidal

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Simulasi pembangkit tersebar yang diinjeksikan ke sistem distribusi penyulang Krueng Raya adalah pembangkit listrik bersumber energi angin dengan kapasitas 125 kW. Setelah dilakukan penetrasi pembangkit tersebar tidak terdapat bus yang mengalami jatuh tegangan di atas 5 %. Sehingga tegangan yang terperbaiki 0,387 % atau 0,077 kV dan nilai rata-rata tegangan menjadi sebesar 96,57% atau 19,314 kV dan nilai rugi-rugi daya sebesar 26,401 kW, dengan mengurangi rugi-rugi daya saluran sebesar 6,628 kW . Harmonisa yang terbangkitkan pada sistem distribusi Krueng Raya setelah dilakukan penetrasi pembangkit tersebar sangat kecil yaitu 0,004%-0,018%. Nilai tersebut masih di bawah standar IEEE Std.519-2014 untuk sistem kelistrikan dengan level tegangan $1\text{kV} < V \leq 69\text{ kV}$ yaitu maksimum sebesar 5%.

Saran

Untuk penelitian selanjutnya dapat dikembangkan penetrasi dengan menggunakan pembangkit tersebar dari sumber energi terbarukan lainnya misalnya energi surya, air, panas bumi, ataupun bioenergi.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] M. Fitrizawati, M. Suharyanto, and B. S. Isnaeni, "Pengaruh Pemasangan Distributed Generation Terhadap Profil Tegangan pada Jaringan Distribusi," *Techno (Jurnal Fak. Tek. Univ. Muhammadiyah Purwokerto)*, vol. 13, no. 1, pp. 12–19, 2012.
- [2] W. Mertayasa, I. W. Jondra, and I. D. Saputra, "Keuntungan Pemanfaatan Distributed Generation Sebuah Analisis ETAP 12.6. 0," in *Prosiding Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV)*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 346–353.
- [3] A. Supardi and R. Prabowo, "Analisis Dampak Pemasangan Distibuted Generation (DG) Terhadap Profil Tegangan dan Rugi-Rugi Daya Sistem Distribusi Standar IEEE 18 Bus," *Pros. SNST Fak. Tek.*, vol. 1, no. 1, 2012.
- [4] P. de Vries, M. Conners, and R. Jaliwala, "Energi Yang Terbarukan," *Buku Pandu. Energi Terbarukan*, p. 106, 2011.
- [5] P. Pengembangan Energi Baru Dan Energi *et al.*, "Potensi Pengembangan Energi Baru Dan Energi Terbarukan Di Kota Semarang," *J. Riptek*, vol. 13, no. 2, pp. 177–186, 2019, [Online]. Available: <http://ripteck.semarangkota.go.id>
- [6] A. Hasibuan, W. V. Siregar, A. Setiawan, and M. Daud, "Pemanfaatan Energi Bayu Sebagai Sumber Energi Listrik Untuk Penerangan Pada Perahu Nelayan," (*Rekayasa Elektr. dan Energi*) *J. Tek. Elektro*, vol. 3, no. 2, pp. 85–88, 2021, [Online]. Available: <http://jurnal.umsu.ac.id/index.php/RELE/article/view/v3i2.6490>
- [7] A. Hasibuan, "Analysis of Selection of Wind Turbine as a Source Of Additional Electricity in the Tourism Area Banyak Island , Indonesia," pp. 633–645, doi: 10.5281/zenodo.7450704.
- [8] A. N. Achadiyah, H. Suyono, and R. N. Hasanah, "Harmonic Analysis of Distribution System Due to Embedded Generation Injection," vol. 5, no. 8, pp. 68–73, 2017.
- [9] A. Asnil and H. Hazman, "The Performance of the Solar Panel Installation Configuration in the Face of Lighting Changes," *Motiv. J. Mech. Electr. Ind. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 85–100, 2023.
- [10] R. Syahputra, "Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik," *LP3M UMY, Yogyakarta*, pp. 249–256, 2016.
- [11] G. A. Setia, F. Haz, and G. H. M. Sianipar, "Performa Metode Aliran Daya Fast Decoupled di Jaringan Distribusi," 2018.
- [12] Y. Xiong, Z. Peng, C. Gu, S. Li, D. Wang, and W. Zhang, "Differential enhancement method for robust and accurate heart rate monitoring via microwave vital sign sensing," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 69, no. 9, pp. 7108–7118, 2020.
- [13] R. Kurniawan, M. Daud, and A. Hasibuan, "Study of Power Flow and Harmonics when Integrating Photovoltaic into Microgrid," *Motiv. J. Mech. Electr. Ind. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 33–46, 2023.
- [14] M. H. A. Aziz, M. M. Azizan, Z. Sauli, and M. W. Yahya, "A review on harmonic mitigation method for non-linear load in electrical power system," in *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 2339, no. 1, p. 20022.
- [15] I. S. Association and others, "IEEE Std 519-2014," *IEEE Recomm. Pract. Requir. Harmon. Control Electr. power Syst.*, 2014.

DATA PENDUKUNG

Tabel L.1. Profil tegangan sebelum dan setelah penetrasi pembangkit tersebar

Bus ID	Nominal kV	Sebelum Penambahan Pembangkit				Setelah Penambahan Pembangkit			
		Profil Tegangan		Jatuh Tegangan		Profil Tegangan		Jatuh Tegangan	
		(kV)	(%)	(kV)	(%)	(kV)	(%)	(kV)	(%)
Bus_1	20	19,608	98,04	0,392	1,96	19,650	98,25	0,350	1,75
Bus_2	20	19,588	97,94	0,412	2,06	19,632	98,16	0,368	1,84
Bus_3	20	19,540	97,7	0,460	2,3	19,590	97,95	0,410	2,05
Bus_4	20	19,540	97,7	0,460	2,3	19,589	97,94	0,411	2,06
Bus_5	20	19,468	97,34	0,532	2,66	19,525	97,63	0,475	2,37
Bus_6	20	19,488	97,44	0,512	2,56	19,543	97,72	0,457	2,28
Bus_7	20	19,488	97,44	0,512	2,56	19,544	97,72	0,456	2,28
Bus_8	20	19,423	97,11	0,577	2,89	19,485	97,43	0,515	2,57
Bus_9	20	19,425	97,12	0,575	2,88	19,487	97,44	0,513	2,56
Bus_10	20	19,423	97,11	0,577	2,89	19,486	97,43	0,514	2,57
Bus_11	20	19,363	96,81	0,637	3,19	19,434	97,17	0,566	2,83
Bus_12	20	19,332	96,66	0,668	3,34	19,407	97,04	0,593	2,96
Bus_13	20	19,287	96,44	0,713	3,56	19,369	96,84	0,631	3,16
Bus_14	20	19,253	96,26	0,747	3,74	19,339	96,70	0,661	3,30
Bus_15	20	19,251	96,26	0,749	3,74	19,338	96,69	0,662	3,31
Bus_16	20	19,216	96,08	0,784	3,92	19,303	96,51	0,697	3,49
Bus_17	20	19,210	96,05	0,790	3,95	19,296	96,48	0,704	3,52
Bus_18	20	19,209	96,05	0,791	3,95	19,296	96,48	0,704	3,52
Bus_19	20	19,204	96,02	0,796	3,98	19,291	96,45	0,709	3,55
Bus_20	20	19,197	95,98	0,803	4,02	19,284	96,42	0,716	3,58
Bus_21	20	19,194	95,97	0,806	4,03	19,281	96,40	0,719	3,60
Bus_22	20	19,215	96,08	0,785	3,92	19,302	96,51	0,698	3,49
Bus_23	20	19,215	96,08	0,785	3,92	19,302	96,51	0,698	3,49
Bus_24	20	19,175	95,87	0,825	4,13	19,262	96,31	0,738	3,69
Bus_25	20	19,145	95,72	0,855	4,28	19,232	96,16	0,768	3,84
Bus_26	20	19,088	95,44	0,912	4,56	19,175	95,88	0,825	4,12
Bus_27	20	19,070	95,35	0,930	4,65	19,158	95,79	0,842	4,21
Bus_28	20	19,050	95,25	0,950	4,75	19,138	95,69	0,862	4,31
Bus_29	20	19,039	95,19	0,961	4,81	19,126	95,63	0,874	4,37
Bus_30	20	19,037	95,19	0,963	4,81	19,124	95,62	0,876	4,38
Bus_31	20	19,035	95,18	0,965	4,82	19,123	95,61	0,877	4,39
Bus_32	20	19,011	95,05	0,989	4,95	19,098	95,49	0,902	4,51
Bus_33	20	18,996	94,98	1,004	5,02	19,084	95,42	0,916	4,58
Bus_34	20	19,003	95,01	0,997	4,99	19,090	95,45	0,910	4,55
Bus_35	20	19,002	95,01	0,998	4,99	19,090	95,45	0,910	4,55
Bus_36	20	18,983	94,91	1,017	5,09	19,070	95,35	0,930	4,65
Bus_37	20	18,992	94,96	1,008	5,04	19,079	95,40	0,921	4,60

Tabel L.2. Rugi-rugi daya setelah penetrasi pembangkit tersebar

Saluran	Sebelum Penambahan Pembangkit			Setelah Penambahan Pembangkit		
	P(kW)	Q(kVAR)	kW Losses	P(kW)	Q(kVAR)	kW Losses
Line 1	889,9	473,4	16,31	763,2	470,8	12,83
Line 2	868	458,4	0,822	740,6	456	0,642
Line 3	849,9	448,6	1,89	722,7	446,5	1,47
Line 4	9,52	5,97	0,0003	9,52	5,98	0,0003
Line 5	817,8	433	2	690,9	431,3	1,54
Line 6	9,42	5,88	0,0002	9,42	5,89	0,0002
Line 7	776,4	408,9	0,758	649,4	407,3	0,575
Line 8	760,2	400,4	1,55	633,5	399,2	1,17
Line 9	20,65	13,11	0,002	20,67	13,12	0,002
Line 10	18,27	11,58	0,0015	18,29	11,59	0,0015
Line 11	705,6	375,9	2,07	579,2	375,1	1,53
Line 12	687,9	365,9	1	561,6	365,3	0,736
Line 13	670,6	357	1,44	544,5	356,8	1,05
Line 14	647,1	343,7	1,06	521,1	343,7	0,762
Line 15	26,52	16,76	0,0017	26,55	16,78	0,0017
Line 16	543,2	281,5	0,946	543,6	281,3	0,938
Line 17	128,5	74,13	0,0411	128,7	74,17	0,0408
Line 18	18,4	11,62	0,0003	18,43	11,63	0,0003
Line 19	94,68	55,47	0,0261	94,76	55,5	0,0259
Line 20	80,16	49,43	0,0277	80,23	49,48	0,0275
Line 21	51,96	33,26	0,0071	52	33,3	0,0071
Line 22	19,85	12,63	0,001	19,87	12,65	0,001
Line 23	16,52	10,39	0,0008	16,54	10,41	0,0008
Line 24	345,1	173,2	0,679	345,3	173	0,674
Line 25	331,2	167,5	0,473	331,4	167,3	0,469
Line 26	317,5	165,1	0,864	317,7	165	0,857
Line 27	302	157,1	0,253	302,2	157	0,251
Line 28	282,3	146,9	0,273	282,5	146,8	0,271
Line 29	262,3	135,4	0,146	262,5	135,3	0,145
Line 30	47,33	29,93	0,004	47,38	29,98	0,004
Line 31	27,64	17,73	0,0047	27,66	17,75	0,0046
Line 32	168,8	87,83	0,226	168,9	87,76	0,224
Line 33	161	84,77	0,0641	161,1	84,71	0,0635
Line 34	22,75	14,93	0,0005	22,77	14,94	0,0005
Line 35	121,9	61,95	0,0385	122	61,89	0,0382
Line 36	67,69	43,72	0,0442	67,74	43,76	0,0438
Line 37	17,46	11,06	0,0036	17,48	11,08	0,0035

Tabel L.3. Nilai distorsi harmonisa tegangan sebelum dan setelah penetrasi pembangkit tersebar

Bus ID	Sebelum Penambahan Pembangkit				Setelah Penambahan Pembangkit			
	Fund(%)	RMS(%)	THD(%)	Standar IEEE 519-2014	Fund(%)	RMS(%)	THD(%)	Standar IEEE 519-2014
Bus_1	98,023	98,023	0,017	5.0	98,232	98,232	0,008	5.0
Bus_2	97,922	97,922	0	5.0	98,141	98,141	0	5.0
Bus_3	97,683	97,683	0,016	5.0	97,929	97,929	0,013	5.0
Bus_4	97,680	97,680	0	5.0	97,925	97,925	0,010	5.0
Bus_5	97,318	97,318	0	5.0	97,606	97,606	0	5.0
Bus_6	97,420	97,420	0	5.0	97,695	97,695	0,014	5.0
Bus_7	97,422	97,422	0	5.0	97,697	97,697	0	5.0
Bus_8	97,090	97,090	0	5.0	97,405	97,405	0,017	5.0
Bus_9	97,101	97,101	0,013	5.0	97,415	97,415	0,004	5.0
Bus_10	97,092	97,092	0,013	5.0	97,406	97,406	0	5.0
Bus_11	96,791	96,791	0,012	5.0	97,145	97,145	0	5.0
Bus_12	96,636	96,636	0	5.0	97,011	97,011	0	5.0
Bus_13	96,410	96,410	0	5.0	96,816	96,816	0	5.0
Bus_14	96,238	96,238	0,009	5.0	96,668	96,668	0	5.0
Bus_15	96,231	96,231	0,012	5.0	96,662	96,662	0	5.0
Bus_16	96,054	96,054	0	5.0	96,485	96,485	0	5.0
Bus_17	96,021	96,021	0,008	5.0	96,452	96,452	0	5.0
Bus_18	96,020	96,020	0,009	5.0	96,451	96,451	0,018	5.0
Bus_19	95,993	95,993	0	5.0	96,424	96,424	0	5.0
Bus_20	95,958	95,958	0	5.0	96,389	96,389	0	5.0
Bus_21	95,944	95,944	0	5.0	96,375	96,375	0,017	5.0
Bus_22	96,049	96,049	0,011	5.0	96,480	96,480	0,018	5.0
Bus_23	96,050	96,050	0,009	5.0	96,480	96,480	0,014	5.0
Bus_24	95,846	95,846	0,007	5.0	96,278	96,278	0	5.0
Bus_25	95,696	95,696	0	5.0	96,128	96,128	0,010	5.0
Bus_26	95,411	95,411	0,010	5.0	95,844	95,844	0	5.0
Bus_27	95,324	95,324	0,004	5.0	95,757	95,757	0,009	5.0
Bus_28	95,223	95,223	0	5.0	95,657	95,657	0	5.0
Bus_29	95,165	95,165	0	5.0	95,599	95,599	0	5.0
Bus_30	95,156	95,156	0	5.0	95,590	95,590	0	5.0
Bus_31	95,147	95,147	0,007	5.0	95,581	95,581	0,017	5.0
Bus_32	95,025	95,025	0,015	5.0	95,459	95,459	0	5.0
Bus_33	94,950	94,950	0	5.0	95,385	95,385	0,018	5.0
Bus_34	94,983	94,983	0	5.0	95,418	95,418	0	5.0
Bus_35	94,981	94,981	0,017	5.0	95,416	95,416	0,011	5.0
Bus_36	94,884	94,884	0,014	5.0	95,319	95,319	0	5.0
Bus_37	94,929	94,929	0	5.0	95,364	95,364	0,005	5.0

Tabel L.4. Nilai distorsi harmonisa arus sebelum dan setelah penetrasi pembangkit tersebar

Bus ID	Sebelum Penambahan Pembangkit					Setelah Penambahan Pembangkit				
	Isc(kA)	IL(A)	Isc/IL	THD (%)	Standar IEEE 519-2014	Isc(kA)	IL(A)	Isc/IL	THD (%)	Standar IEEE 519-2014
Bus_1	1,643	0,832	1,974	0	5.0	1,662	0,831	2,000	0	5.0
Bus_2	1,572	0,584	2,692	0	5.0	1,592	0,584	2,726	0	5.0
Bus_3	1,427	0,743	1,921	0	5.0	1,447	0,74	1,956	0	5.0
Bus_4	1,249	0,333	3,750	0	5.0	1,264	0,332	3,808	0	5.0
Bus_5	1,244	0,527	2,361	0	5.0	1,265	0,526	2,405	0	5.0
Bus_6	1,201	0,329	3,651	0	5.0	1,219	0,329	3,705	0	5.0
Bus_7	1,293	1,1	1,176	0	5.0	1,314	1,1	1,194	0	5.0
Bus_8	1,001	0,729	1,372	0	5.0	1,016	0,727	1,398	0	5.0
Bus_9	1,152	0,499	2,309	0	5.0	1,173	0,498	2,356	0	5.0
Bus_10	1,000	0,645	1,551	0	5.0	1,016	0,643	1,580	0	5.0
Bus_11	1,036	0,61	1,698	0	5.0	1,057	0,608	1,739	0	5.0
Bus_12	0,986	0,577	1,709	0	5.0	1,007	0,576	1,749	0	5.0
Bus_13	0,920	0,811	1,134	0	5.0	0,941	0,809	1,164	0	5.0
Bus_14	0,874	2,7	0,324	0	5.0	0,896	2,7	0,332	0	5.0
Bus_15	0,829	0,944	0,878	0	5.0	0,848	0,942	0,900	0	5.0
Bus_16	0,820	1,2	0,684	0	5.0	0,839	1,2	0,699	0	5.0
Bus_17	0,779	0,549	1,419	0	5.0	0,796	0,547	1,455	0	5.0
Bus_18	0,765	0,658	1,163	0	5.0	0,782	0,656	1,191	0	5.0
Bus_19	0,735	0,516	1,425	0	5.0	0,751	0,515	1,458	0	5.0
Bus_20	0,680	1	0,680	0	5.0	0,693	1	0,693	0	5.0
Bus_21	0,650	1,9	0,342	0	5.0	0,662	1,9	0,349	0	5.0
Bus_22	0,776	0,71	1,094	0	5.0	0,794	0,708	1,121	0	5.0
Bus_23	0,771	0,589	1,310	0	5.0	0,788	0,587	1,343	0	5.0
Bus_24	0,733	0,488	1,503	0	5.0	0,749	0,487	1,537	0	5.0
Bus_25	0,680	0,467	1,456	0	5.0	0,693	0,466	1,487	0	5.0
Bus_26	0,596	0,557	1,069	0	5.0	0,605	0,556	1,089	0	5.0
Bus_27	0,573	0,704	0,814	0	5.0	0,582	0,702	0,829	0	5.0
Bus_28	0,547	0,72	0,760	0	5.0	0,555	0,718	0,773	0	5.0
Bus_29	0,532	0,655	0,813	0	5.0	0,540	0,654	0,825	0	5.0
Bus_30	0,520	1,7	0,306	0	5.0	0,527	1,7	0,310	0	5.0
Bus_31	0,490	0,999	0,490	0	5.0	0,496	0,996	0,498	0	5.0
Bus_32	0,480	0,277	1,734	0	5.0	0,486	0,276	1,762	0	5.0
Bus_33	0,452	1,3	0,348	0	5.0	0,458	1,3	0,352	0	5.0
Bus_34	0,466	0,587	0,794	0	5.0	0,472	0,585	0,807	0	5.0
Bus_35	0,461	0,831	0,555	0	5.0	0,467	0,829	0,564	0	5.0
Bus_36	0,408	2,5	0,163	0	5.0	0,412	2,5	0,165	0	5.0
Bus_37	0,389	0,569	0,683	0	5.0	0,393	0,628	0,625	0	5.0