

Sistem Simulasi Pembagi Beban Otomatis Tiga Fasa Berbasis *Phase Tapping* menggunakan Matlab dengan metode Naive Bayes

Shelomitha Valery Lesmana^{1*}, Anggara Trisna Nugraha², Muhammad Bilhaq Ashlah³, dan Rama Arya Sobhita⁴

¹ D3 - Teknik Kelistrikan Kapal, Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jalan Teknik Kimia, Keputih, Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

^{2,4} Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jalan Teknik Kimia, Keputih, Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

³ Bio Industrial Mechatronic Engineering, National Chung Hsing University, 145號, Xingda Rd, South District, Taichung City, 40227, Taiwan

Email: shelomithavalery@studentppns.ac.id^{1*}, anggaranugraha@ppns.ac.id², g112040519@mail.nchu.edu.tw³, ramasobhita@studentppns.ac.id⁴

Abstrak

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan tahapan akhir dari penyaluran energi listrik dari jaringan transmisi 150 kV kepada konsumen akhir, baik pengguna tegangan menengah 20 kV maupun tegangan rendah 380/220 V. Salah satu permasalahan utama dalam sistem distribusi di PT. X adalah ketidakseimbangan beban akibat distribusi daya yang tidak merata pada masing-masing fasa, yang menyebabkan munculnya arus netral. Arus ini menimbulkan rugi-rugi daya yang dapat memengaruhi efisiensi dan kualitas pasokan listrik ke konsumen. Untuk mengatasi masalah tersebut, dikembangkan sebuah prototipe alat penyeimbang beban otomatis pada sistem tiga fasa yang mengacu pada standar SPLN No. 17 Tahun 2014, di mana perbedaan arus antar fasa tidak boleh melebihi 25%. Sistem ini dirancang dengan fitur proteksi arus lebih dan pembatas tapping fasa guna meningkatkan keandalan operasi. Metode klasifikasi **Naive Bayes** digunakan untuk mengidentifikasi kondisi ketidakseimbangan beban berdasarkan parameter arus fasa R, S, T, dan netral. Berdasarkan hasil klasifikasi, sistem secara otomatis menentukan tindakan pengalihan beban melalui mekanisme phase tapping. Pengembangan dan pengujian sistem dilakukan melalui simulasi berbasis Matlab/Simulink, yang memungkinkan analisis dinamis terhadap performa sistem secara real-time. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengurangi ketidakseimbangan beban dari 33,3% menjadi 0,0%, menurunkan arus netral dari 0,7 A menjadi 0,0 A, serta menghilangkan rugi daya dari 0,05 W menjadi 0,0 W. Dengan demikian, sistem ini efektif dalam meningkatkan efisiensi distribusi dan menjaga stabilitas jaringan listrik tiga fasa.

Kata kunci: Arus Netral, Ketidakseimbangan Fasa, Kerugian Daya, Penyeimbangan Beban, *Tapping* Fasa

Abstract

The electrical power distribution system is the final stage in the delivery of electrical energy from the 150 kV transmission network to end consumers, including both medium-voltage users (20 kV) and low-voltage users (380/220 V). One of the main issues in the distribution system at PT. X is load imbalance, caused by unequal power distribution across the phases, which results in the emergence of a neutral current. This current leads to power losses that can affect the efficiency and quality of the electricity supply to consumers. To address this issue, a prototype of an automatic load balancing device for a three-phase system was developed, referring to the SPLN No. 17 Year 2014 standard, which states that the current difference between phases must not exceed 25%. The system is equipped with overcurrent protection and a phase tapping limiter to improve operational reliability. The Naive Bayes classification method is used to identify load imbalance conditions based on the current parameters of phases R, S, T, and neutral. Based on the classification results, the system automatically determines the load transfer action through a phase tapping mechanism. The system was developed and tested through Matlab/Simulink-based simulation, enabling dynamic analysis of system performance in real time. Test results show that the system can reduce load imbalance from 33.3% to 0.0%, decrease neutral current from 0.7 A to 0.0 A, and eliminate power loss from 0.05 W to 0.0 W. Thus, the system proves effective in enhancing distribution efficiency and maintaining the stability of the three-phase power network.

Keywords: Load Balancing, Load Concavity, Neutral Current, Power Losses, Tapping Phase

1. Pendahuluan

Sistem yang paling vital dalam industri tenaga listrik adalah sistem distribusi karena sistem ini memiliki koneksi yang terus-menerus dengan konsumen (Nugraha dan Sugianto, 2024). Proses penyaluran energi listrik dari jaringan transmisi 150 kV ke konsumen akhir baik pengguna 20 kV maupun 380/220 volt dikenal sebagai sistem distribusi. Sistem distribusi yang paling umum digunakan adalah sistem tiga fasa empat kawat, yang terdiri dari tiga kawat fasa dan satu kawat netral (Adnan, 2017) (Nugraha et al., 2024b).

Ketidakseimbangan pada sistem distribusi tegangan rendah dapat menimbulkan berbagai permasalahan, seperti gangguan pada kinerja transformator, pemanasan berlebih pada fasa yang mengalami kelebihan beban, munculnya arus pada kawat netral, serta penurunan tegangan pada ujung jaringan fasa yang terbebani (Aghenta dan Iqbal, 2019). Akibatnya, kualitas daya listrik yang diterima oleh konsumen menjadi menurun (Sobhita et al., 2025). Salah satu upaya untuk mengurangi rugi-rugi teknik ini adalah dengan mengalihkan beban dari fasa yang kelebihan ke fasa yang lebih ringan (Nugraha et al., 2025a) (Amir dan Indrawati, 2016). Solusi yang umum diterapkan adalah penyeimbangan beban pada transformator.

Adapun metode Naive Bayes, meskipun awalnya banyak digunakan dalam konteks klasifikasi non-kelistrikan, seperti pada studi pemantauan kualitas air tambak oleh peneliti lain, memberikan inspirasi untuk pendekatan klasifikasi dalam sistem kelistrikan. Dalam studi tersebut, parameter seperti pH, suhu, dan salinitas digunakan untuk pengambilan keputusan otomatis berbasis data. Prinsip serupa dapat diadaptasi untuk klasifikasi kondisi beban pada transformator (Setiawan et al., 2025) (Asif et al., 2020).

Oleh karena itu, penelitian ini mengadopsi metode Naive Bayes untuk menghitung parameter arus pada fasa R, S, T, dan netral dalam rangka mengembangkan prototipe sistem pembagi beban berbasis phase tapping (Hamid et al., 2016). Hasil klasifikasi akan menjadi dasar untuk mengaktifkan sistem penyaluran fasa dan sistem proteksi (Nugraha dan Febrianti, 2024a). Prototipe ini juga dirancang berdasarkan standar SPLN No. 17 Tahun 2014, yang membatasi ketidakseimbangan arus maksimum sebesar 25%. Sistem mengidentifikasi ketidakseimbangan dalam tiga interval waktu dan dilengkapi proteksi arus lebih, serta mampu memantau arus, tegangan, arus netral, dan rugi daya secara real-time menggunakan teknologi Internet of Things (Nugraha dan Febrianti, 2024b) (Darmawansyah et al., 2020) (Fikri et al., 2020).

2. Metode Penelitian

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan perhitungan untuk menganalisis arus dan ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi tiga fasa. Beban yang digunakan berupa lampu pijar berdaya 100 watt dengan faktor daya 1 (Nugraha et al., 2024a). Setiap fasa diberi beban yang berbeda-beda untuk menciptakan kondisi tidak seimbang. Sebagai contoh, fasa R dibebani 1 unit lampu ($I_R = 0,45$ A), fasa S 2 unit ($I_S = 0,91$ A), dan fasa T 3 unit ($I_T = 1,27$ A). Nilai arus ini dihitung menggunakan persamaan daya dan arus pada sistem AC, lalu digunakan untuk menghitung persentase ketidakseimbangan antar fasa berdasarkan standar SPLN No. 17 Tahun 2014 (maksimal 25%) (Muttaqin et al., 2024) (Nugraha et al., 2024c).

Setelah nilai arus tiap fasa dan netral diperoleh, data ini digunakan sebagai input untuk sistem klasifikasi berbasis metode Naive Bayes (Ihsanudin et al., 2024). Metode ini digunakan untuk menentukan apakah kondisi jaringan tergolong “Stabil” atau “Tidak Stabil”. Proses klasifikasi dilakukan dengan membandingkan nilai input terhadap data pembelajaran (training) yang telah dikelompokkan ke dalam dua kategori tersebut (Nugraha et al., 2024d) (Juniani et al., 2025). Model Naive Bayes menghitung probabilitas masing-masing kategori berdasarkan data input arus I_R , I_S , dan I_T .

Tabel 1. Hasil Perhitungan

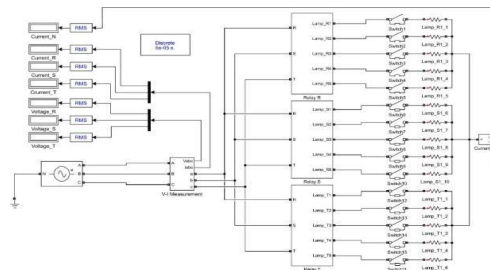
No.	I_R	I_S	I_T	Tingkat ketidakseimbangan Beban	Keterangan
1.	0,45	0,91	1,27	33,33	Tidak Stabil
2.	0,91	0,91	0,91	0,00	Stabil

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Simulasi Terintegrasi

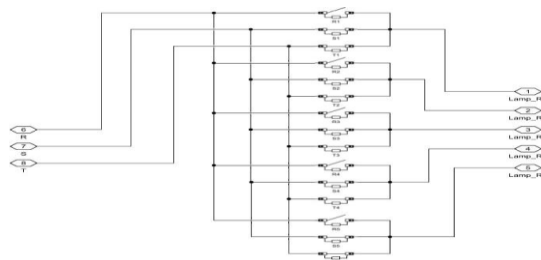
Pengujian simulasi terintegrasi terdiri atas pengujian beban tidak seimbang dan pengujian arus netral. Rangkaian ini terdiri atas 15 beban dengan masing-masing daya sebesar 100 watt, di mana setiap beban dihubungkan ke sebuah saklar, dan setiap saklar terhubung ke tiga buah relay, yaitu relay R, S, dan T. Sistem ini bekerja dengan mengaktifkan saklar pada tiap fasa sesuai dengan skenario yang telah dirancang. Apabila arus terdeteksi dalam kondisi seimbang, maka relay tidak akan melakukan perpindahan. Namun, apabila terjadi ketidakseimbangan arus akibat perbedaan jumlah daya antar fasa, maka relay akan memindahkan beban dari fasa dengan arus terbesar ke fasa dengan arus terkecil.

Pada fasa R, saklar beban akan terhubung ke tiga buah relay, yaitu relay R yang terhubung ke kontak NC (Normally Closed) menuju beban, serta dua relay lainnya, yakni relay S dan T yang masing-masing terhubung ke kontak NO (Normally Open). Hal serupa juga berlaku untuk beban pada fasa S, di mana relay S terhubung ke kontak NC menuju beban, sedangkan relay R dan T masing-masing terhubung ke kontak NO. Rangkaian lengkapnya dapat dilihat pada Gambar 1, 2, 3, dan 4



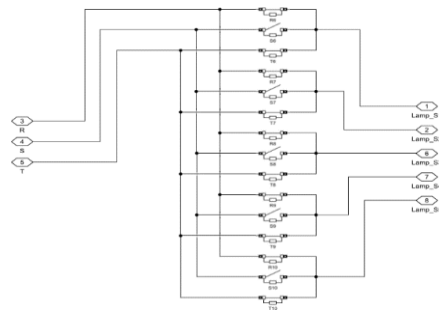
Gambar 1. Rangkaian Keseluruhan Sistem

Gambar 1 memperlihatkan rangkaian simulasi terintegrasi yang digunakan untuk pengujian beban tidak seimbang dan arus netral. Rangkaian terdiri dari 15 beban masing-masing 100 watt yang dihubungkan ke saklar, lalu diteruskan ke tiga relay (R, S, dan T) pada setiap fasa. Sistem ini bekerja dengan mengaktifkan saklar sesuai skenario, dan memindahkan beban secara otomatis dari fasa dengan arus besar ke fasa dengan arus kecil saat terdeteksi ketidakseimbangan arus antar fasa.



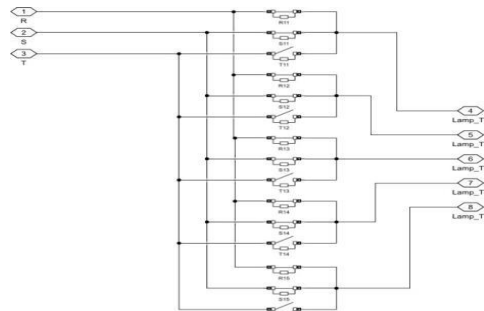
Gambar 2. Konfigurasi Rangkaian pada Fasa R

Gambar 2 menunjukkan konfigurasi rangkaian beban yang terhubung pada fasa R. Saklar pada beban fasa R dihubungkan ke tiga relay, yaitu relay R yang terhubung ke kontak NC (Normally Closed) menuju beban, serta relay S dan T yang masing-masing terhubung ke kontak NO (Normally Open). Rangkaian ini memungkinkan perpindahan beban secara otomatis ke fasa lain apabila terjadi ketidakseimbangan arus.



Gambar 3. Konfigurasi Rangkaian pada Fasa S

Gambar 3 menampilkan rangkaian beban yang terhubung pada fasa S. Pada konfigurasi ini, relay S dihubungkan ke kontak NC (Normally Closed) menuju beban, sementara dua relay lainnya, yaitu relay R dan T, masing-masing terhubung ke kontak NO (Normally Open). Rangkaian ini dirancang untuk memungkinkan perpindahan beban ke fasa lain secara otomatis jika terdeteksi adanya ketidakseimbangan arus.

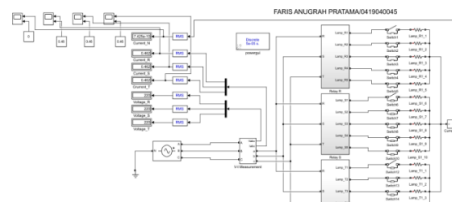


Gambar 4. Konfigurasi Rangkaian pada Fasa T

Gambar 4 menunjukkan rangkaian beban yang terhubung pada fasa T. Dalam konfigurasi ini, relay T terhubung ke kontak NC (Normally Closed) menuju beban, sedangkan dua relay lainnya, yaitu relay R dan S, masing-masing dihubungkan ke kontak NO (Normally Open). Rangkaian ini memungkinkan perpindahan beban dari fasa T ke fasa lain secara otomatis saat terjadi ketidakseimbangan arus antar fasa.

3.1.1 Uji Coba Pertama untuk Kondisi Pertama

Pengujian pertama dilakukan dengan mensimulasikan kondisi beban seimbang, di mana tiga beban masing-masing sebesar 100 watt dihubungkan ke fasa R, S, dan T. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan pada fasa R, S, dan T adalah sebesar 220 volt, sedangkan arus yang mengalir pada ketiga fasa tersebut sebesar 0,462 ampere. Nilai arus netral yang terbaca sangat kecil karena beban berada dalam kondisi seimbang. Selain itu, pada citra sinyal yang ditampilkan pada Gambar 5 hingga Gambar 6, terlihat adanya lonjakan (spike) yang muncul akibat proses penyalaan relay.

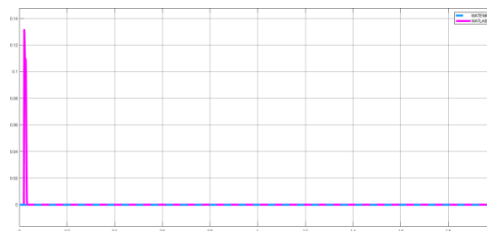


Gambar 5. Pengujian Rangkaian Simulasi Phase Tapping – Uji 1 Kondisi 1

Gambar 5 menampilkan rangkaian simulasi phase tapping pada kondisi pengujian pertama dengan beban seimbang. Pada simulasi ini, masing-masing fasa R, S, dan T dibebani oleh tiga lampu 100 watt, sehingga menghasilkan distribusi beban yang merata.

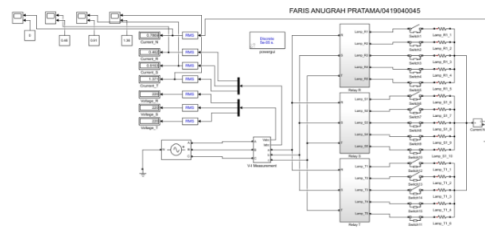
3.1.2 Uji Coba Pertama pada Kondisi Kedua

Pengujian kedua dilakukan dengan mensimulasikan kondisi beban tidak seimbang, di mana satu beban dihubungkan ke fasa R, dua beban ke fasa S, dan tiga beban ke fasa T. Hasil awal simulasi menunjukkan tegangan sebesar 220 volt pada masing-masing fasa R, S, dan T. Arus yang mengalir pada fasa R sebesar 0,462 ampere, pada fasa S sebesar 0,9163 ampere, dan pada fasa T sebesar 1,371 ampere. Nilai arus netral yang terbaca adalah sebesar 0,7869 ampere. Pada tahap pertama, dilakukan perpindahan (switching) relay untuk menyeimbangkan beban. Setelah proses penyeimbangan, tegangan pada ketiga fasa tetap sebesar 220 volt, dengan arus pada fasa R sebesar 0,9169 ampere, fasa S sebesar 0,9163 ampere, dan fasa T sebesar 0,9158 ampere. Arus netral setelah penyeimbangan turun drastis menjadi 0,0003809 ampere. Selain itu, pada citra sinyal terlihat adanya lonjakan (spike) sinyal pada fasa R, S, dan T yang disebabkan oleh switching relay pada tahap 0, serta lonjakan kecil pada sinyal fasa R dan T akibat switching relay pada tahap 1.



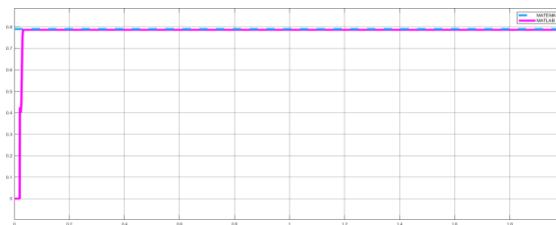
Gambar 6. Sinyal pada Fasa Netral

Gambar 6 menunjukkan bentuk sinyal pada fasa netral saat kondisi beban seimbang. Terlihat bahwa arus netral sangat kecil, hampir mendekati nol, yang menandakan distribusi beban telah seimbang. Meskipun demikian, terdapat lonjakan (spike) sinyal yang berasal dari proses switching pada relay saat sistem menyala.



Gambar 7. Simulasi Rangkaian Phase Tapping Pengujian 1 Kondisi 2, sebelum proses perpindahan

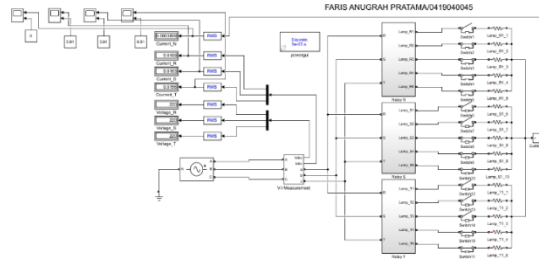
Gambar 7 menunjukkan kondisi awal rangkaian simulasi phase tapping sebelum proses switching dilakukan. Pada kondisi ini, beban terhubung secara tidak seimbang, yaitu satu beban pada fasa R, dua beban pada fasa S, dan tiga beban pada fasa T. Ketidakseimbangan distribusi beban menyebabkan arus netral meningkat, tercatat sebesar 0,7869 ampere. Rangkaian masih bekerja dalam keadaan awal dan belum melakukan perpindahan beban otomatis dari fasa dengan arus besar ke fasa dengan arus lebih kecil. Gambar ini merepresentasikan kondisi sistem saat belum terjadi penyeimbangan beban.



Gambar 8. Grafik Arus Netral pada Kondisi Awal Sebelum Penyeimbangan Beban

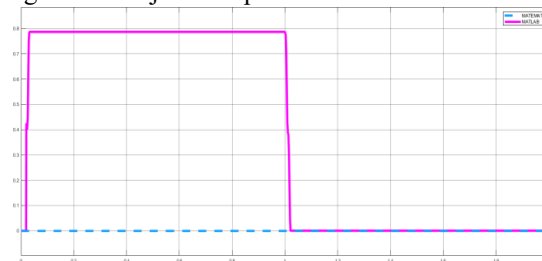
Gambar 8 menampilkan grafik sinyal arus pada kawat netral sebelum dilakukan proses switching atau penyeimbangan beban. Terlihat adanya nilai arus netral yang cukup signifikan akibat ketidakseimbangan beban antar fasa, dengan konfigurasi beban 1 pada fasa R, 2 pada fasa S, dan 3 pada fasa T. Nilai arus netral yang terekam pada saat

ini adalah sekitar 0,7869 ampere. Grafik menunjukkan kestabilan amplitudo arus netral yang konstan, menandakan bahwa sistem belum melakukan koreksi otomatis melalui pemindahan beban antar fasa.



Gambar 9. Simulasi Rangkaian Phase Tapping Pengujian 1 Kondisi 2, Setelah Proses Perpindahan

Menunjukkan kondisi rangkaian setelah proses switching dilakukan untuk menyeimbangkan beban antar fasa. Beban telah dialihkan sehingga arus pada ketiga fasa menjadi hampir sama.

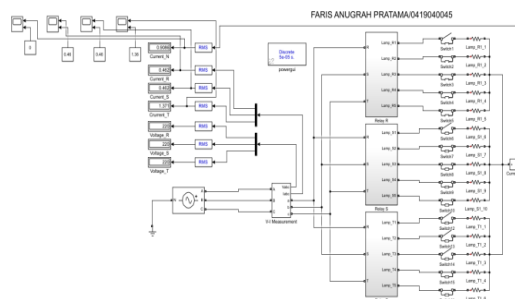


Gambar 10. Grafik Arus Netral Setelah Proses Switching

Grafik 10 menunjukkan penurunan arus netral yang signifikan setelah proses switching dilakukan pada sistem. Sebelum switching, arus netral berada di sekitar 0,7869 A, dan setelah switching arus turun drastis hingga mendekati **0 A**, menandakan bahwa beban antar fasa telah berhasil diseimbangkan. Lonjakan awal dan penurunan tajam sekitar $t = 1$ detik menunjukkan waktu terjadinya switching.

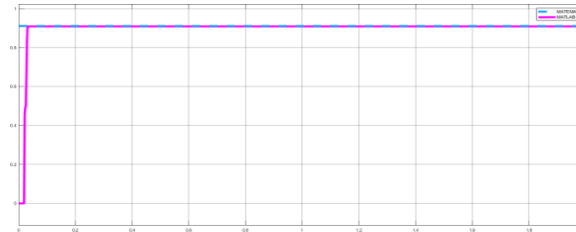
3.1.3 Uji Coba Pertama pada Kondisi Ketiga

Pengujian ketiga dilakukan dengan mensimulasikan kondisi beban tidak seimbang, di mana satu beban dihubungkan ke fasa R, satu beban ke fasa S, dan tiga beban ke fasa T. Hasil awal simulasi menunjukkan bahwa tegangan pada fasa R, S, dan T adalah sebesar 220 volt. Arus yang mengalir pada fasa R dan S masing-masing sebesar 0,462 ampere, sedangkan pada fasa T sebesar 1,371 ampere. Nilai arus netral yang terukur dalam kondisi ini adalah sebesar 0,9086 ampere. Pada tahap pertama, dilakukan switching pada relay dengan tujuan untuk menyeimbangkan beban. Setelah proses tersebut, tegangan pada ketiga fasa tetap sebesar 220 volt, dengan arus pada fasa R sebesar 0,9169 ampere, fasa S sebesar 0,462 ampere, dan fasa T sebesar 0,9158 ampere. Arus netral setelah proses switching turun menjadi 0,4543 ampere. Namun, seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.24, meskipun switching telah dilakukan, arus pada kawat netral masih tergolong tinggi.



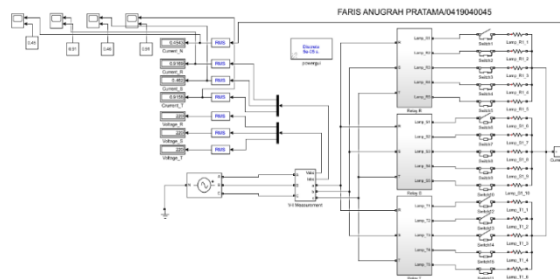
Gambar 11. Konfigurasi Awal Rangkaian Phase Tapping pada Uji 1 Kondisi 3 Sebelum Switching

Menampilkan konfigurasi rangkaian sebelum dilakukan proses switching pada kondisi beban tidak seimbang, yaitu satu beban pada fasa R, satu beban pada fasa S, dan tiga beban pada fasa T. Ketidakseimbangan ini menyebabkan arus netral meningkat hingga 0,9086 A.



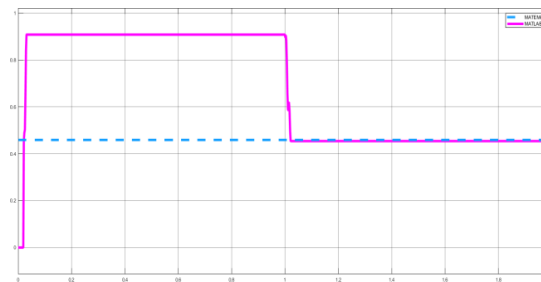
Gambar 12. Sinyal Arus Netral Sebelum Proses Switching

Gambar 12 memperlihatkan grafik arus pada kawat netral sebelum dilakukan switching pada kondisi beban tidak seimbang (1 beban di fasa R, 1 di fasa S, dan 3 di fasa T). Terlihat bahwa arus netral cukup tinggi, yaitu sebesar 0,9086 A, menunjukkan distribusi beban antar fasa belum merata.



Gambar 13. Rangkaian Simulasi Phase Tapping – Pengujian 1 Kondisi 3, Setelah Switching

Gambar 13 menunjukkan konfigurasi rangkaian setelah proses switching dilakukan untuk menyeimbangkan beban. Beban telah dipindahkan dari fasa dengan arus lebih besar ke fasa yang lebih ringan. Meskipun switching telah dilakukan, arus netral masih cukup tinggi yaitu sekitar 0,4543 A, menandakan bahwa beban belum sepenuhnya seimbang.



Gambar 14. Sinyal Arus Netral Setelah Proses Switching

Gambar 14 menampilkan grafik arus netral setelah proses switching dilakukan pada kondisi beban tidak seimbang. Terlihat penurunan arus netral dibandingkan kondisi awal, namun nilainya masih cukup tinggi (sekitar 0,4543 A), menunjukkan bahwa penyeimbangan beban belum sepenuhnya optimal.

3.2 Simulasi Perhitungan

3.2.1 Simulasi Perhitungan pada Uji 1 Kondisi 1

- Perhitungan Arus Netral

$$\begin{aligned} \text{Jumlah sin} &= 0,45 \sin(0) + 0,45 \\ &\sin(240) + 0,45 \sin(120) \end{aligned} \quad (1)$$

Gambar 16. Grafik Antar Fasa

Terdapat perbedaan nilai arus pada masing- masing fasa yang secara teoritis akan menimbulkan arus netral. Berdasarkan hasil perhitungan, nilai arus netral yang dihasilkan adalah sebesar 0,79 A.

3.2.3 Simulasi Perhitungan pada Uji 1 Kondisi 3

- Perhitungan Arus Netral

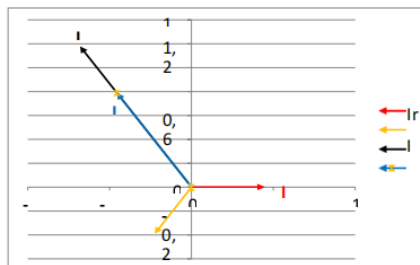
$$\text{Jumlah } \sin = 0,45 \sin(0) + 0,45 \sin(240) + 1,36 \sin(120) \quad (1)$$

$$\text{Jumlah } \cos = 0,45 \cos(0) + 0,45 \cos(240) + 1,36 \cos(120) \quad (2)$$

$$I_N = (-0,455)^2 + (0,79)^2)^{0,5} \quad (3)$$

$$I_N = 0,91 \text{ A} \quad (4)$$

- Grafik arus antar – fasa



Gambar 17. Grafik Antar Fasa

Terdapat perbedaan nilai arus pada setiap fasa yang secara teoritis akan menyebabkan munculnya arus netral. Berdasarkan hasil perhitungan, arus netral yang terbentuk bernilai sebesar 0,91 A.

3.3 Diskusi

Berdasarkan hasil tiga pengujian simulasi pada sistem phase tapping, dapat disimpulkan bahwa efektivitas sistem sangat bergantung pada kondisi awal distribusi beban antar fasa. Pada pengujian pertama dengan kondisi beban seimbang, sistem menunjukkan performa stabil tanpa perlunya intervensi switching, ditandai dengan arus netral yang sangat kecil mendekati nol. Hal ini menegaskan bahwa ketika distribusi beban telah merata, sistem dapat beroperasi secara efisien tanpa perlu koreksi tambahan.

Pada pengujian kedua dengan kondisi beban tidak seimbang (1:2:3), sistem menunjukkan keberhasilan dalam melakukan penyeimbangan otomatis. Switching yang dilakukan menghasilkan distribusi arus yang hampir sama pada ketiga fasa, dan arus netral turun drastis dari 0,7869 A menjadi 0,0004 A. Ini menandakan bahwa sistem phase tapping efektif dalam menstabilkan arus antar fasa pada kondisi tidak seimbang moderat.

Namun, pada pengujian ketiga dengan kondisi beban lebih ekstrem (1:1:3), sistem tidak mampu mencapai keseimbangan sempurna meskipun switching telah dilakukan. Arus netral hanya turun dari 0,9086 A menjadi 0,4543 A, menunjukkan bahwa ketidakseimbangan masih cukup signifikan. Kegagalan parsial ini mengindikasikan adanya keterbatasan dalam algoritma switching atau konfigurasi beban yang tersedia. Oleh

karena itu, diperlukan pengembangan lebih lanjut pada logika pengalihan beban atau peningkatan fleksibilitas konfigurasi sistem agar mampu menangani skenario ketidakseimbangan beban yang lebih kompleks.

4 Kesimpulan

Persentase ketidakseimbangan beban memengaruhi besarnya arus netral, di mana arus netral cenderung lebih signifikan dibandingkan nilai persentase ketidakseimbangannya. Berdasarkan hasil pengujian, pada kondisi beban seimbang, persentase ketidakseimbangan mencapai sekitar 0,0% dengan arus netral sebesar 0,0 A. Pada kondisi tidak seimbang, persentase ketidakseimbangan mencapai sekitar 33,3% dengan arus netral sebesar 0,7 A. Setelah dilakukan penyeimbangan, nilai ketidakseimbangan kembali menjadi sekitar 0,0% dengan arus netral sebesar 0,0 A.

Sistem ini menunjukkan efisiensi yang baik dalam menyeimbangkan beban secara otomatis, yang dapat mengurangi arus netral dan meningkatkan stabilitas sistem distribusi listrik. Inovasi yang diterapkan terbukti mampu memberikan solusi praktis terhadap masalah ketidakseimbangan beban. Namun demikian, terdapat keterbatasan yang perlu dicermati, yaitu sistem tidak mampu berfungsi optimal pada kondisi ketiga, menunjukkan perlunya peningkatan algoritma atau perangkat keras.

Sebagai tindak lanjut, disarankan untuk melakukan pengujian lebih lanjut dalam berbagai skenario beban, termasuk fluktuasi dinamis dan beban non-linier, guna mengevaluasi kinerja sistem secara menyeluruh dan memperkuat keandalannya di lingkungan nyata.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa serta menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan makalah ini. Penulis juga memohon maaf apabila masih terdapat kekurangan dalam penulisan, dan berharap karya ini dapat menjadi pembelajaran untuk penyusunan karya ilmiah selanjutnya.

Daftar Pustaka

- M. H. Adnan, "Gangguan yang terjadi pada saluran kabel tegangan menengah 20 kV pada sistem jointing di PT. PLN (Persero) Area Bandengan," 2017.
- L. O. Aghenta and M. T. Iqbal, "Low-cost, open source IoT-based SCADA system design using thinger.IO and ESP32 thing," *Electronics*, vol. 8, no. 8, p. 822, 2019, doi: 10.3390/electronics8080822.
- D. Amir and I. Indrawati, "Rancang bangun radar pendeteksi saluran kabel listrik di bawah tanah," *Jurnal Litek: Jurnal Listrik Telekomunikasi Elektronika*, vol. 13, no. 1, pp. 1–7, 2016.
- R. M. Asif, M. Tariq, H. Ali, and M. J. Khan, "Smart underground wireless cable fault detection and monitoring system," in *Proc. 2020 Int. Conf. Eng. Emerg. Technol. (ICEET)*, pp. 1–5, 2020, doi: 10.1109/ICEET48479.2020.9048266.
- Darmawansyah, M. K. A. Rosa, and I. N. Anggraini, "Sistem proteksi motor induksi 3 fasa terhadap bermacam gangguan menggunakan mikrokontroler," *Jurnal Amplifier: Jurnal Ilmiah Bidang Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 10, no. 1, pp. 9–17, 2020.
- A. R. Fikri, K. Anam, and W. Cahyadi, "Rancang bangun sistem navigasi robot beroda pemandu disabilitas netra menggunakan metode waypoint," *Jurnal Rekayasa Elektrika*, vol. 16, no. 3, pp. 127–132, 2020.
- R. M. Hamid, D. Ananda, A. R. Fikri, and M. Qosim, "Rancang bangun charger baterai untuk kebutuhan UMKM," *Jurnal Teknologi Terpadu*, vol. 4, no. 2, pp. 130–136, 2016.
- A. T. Nugraha, O. D. Pratiwi, and A. S. Setiyoko, "Simulasi gangguan saat terjadi gangguan undervoltage dan unbalance load pada sub-sub distribusi panel," *Media Elektrika*, vol. 16, no. 2, pp. 162–173, 2024.

- I. M. Muttaqin, S. I. Yuniza, and A. T. Nugraha, "Performance analysis of a single-phase controlled half-wave rectifier applied to AC motor," *J. Electr., Mar. Its Appl.*, vol. 2, no. 2, pp. 1–10, 2024.
- R. A. Sobhita, A. T. Nugraha, and M. Jamaludin, "Analysis of capacitor implementation and rectifier circuit impact on the reciprocating load of a single-phase AC generator," *Sustain. Energy Control Optim.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–9, 2025.
- A. T. Nugraha et al., "Case studies of successful energy management initiatives," in *Maritime Infrastructure for Energy Management and Emission Reduction Using Digital Transformation*, Singapore: Springer, 2025, pp. 211–228.
- E. Setiawan et al., "Integration of renewable energy sources in maritime operations," in *Maritime Infrastructure for Energy Management and Emission Reduction Using Digital Transformation*, Singapore: Springer, 2025, pp. 185–210.
- A. T. Nugraha and C. Febrianti, "Application of flowmeter sensor technology in ship auxiliary engines for improved energy efficiency in the maritime community based on PLC technology," *Maritime in Community Service and Empowerment*, vol. 2, no. 2, pp. 1–7, 2024.
- A. T. Nugraha and C. Febrianti, "Prototype of ship fuel monitoring system using NodeMCU," *J. Mar. Electr. Electron. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–9, 2024.
- A. T. Nugraha and M. G. P. A. Sugianto, "Development of a monitoring system for daily fuel tank levels on ships," *J. Mar. Electr. Electron. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–9, 2024.
- A. T. Nugraha et al., "Application of the Coulomb counting method for maintenance of VRLA type batteries in PLTS systems," in *E3S Web of Conf.*, vol. 473, EDP Sciences, 2024.
- A. T. Nugraha et al., "Design of buck-boost converter as a voltage stabilizer on solar power plant at PPNS Baruna 01 crewboat," in *E3S Web of Conf.*, vol. 473, EDP Sciences, 2024.
- Y. Ihsanudin, E. P. Hidayat, and A. T. Nugraha, "Application of Sepic converters as solar panel output voltage stabilizers to increase access to renewable energy in rural communities," *Maritime in Community Service and Empowerment*, vol. 2, no. 1, pp. 1–6, 2024.
- A. T. Nugraha et al., "Monitoring air quality parameters (NO , NO_2 , O_3) at Surabaya city stations," *Jurnal Cakrawala Maritim*, vol. 7, no. 1, pp. 52–59, 2024.
- A. I. Juniani et al., "Enhancing water quality prediction using the decision tree approach with the C4.5 algorithm," *JEEMECS (J. Electr. Eng., Mechatron. Comput. Sci.)*, vol. 8, no. 1, pp. 17–30, 2025.