E-ISSN : 3025-1311
https://ejournal.warunayama.org/kohesi

Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek
Volume 10 No 8 Tahun 2025

RANCANG BANGUN SISTEM OTOMASI SEDERHANA PADA RELAY PROTEKSI UNTUK MENURUNKAN DURASI GANGGUAN PADA GARDU INDUK MENDALAN

Slamet Pramono[1], Aulidina Dwi Nur Andriyanti[2]
[1 2]Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Kahuripan Kediri
[1]slametp97@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini membahas rancang bangun sistem otomasi sederhana pada relay proteksi numerik untuk menurunkan durasi gangguan pada Gardu Induk (GI) Mendalan yang berstatus Gardu Induk Tanpa Operator (GITO). Kondisi eksisting menunjukkan bahwa proses identifikasi gangguan masih bergantung pada pengambilan data relay secara manual, sehingga memerlukan waktu yang cukup lama. Sistem yang dikembangkan memanfaatkan protokol komunikasi Modbus TCP/IP untuk mengambil data dari relay proteksi General Electric (GE) UR D60. Data tersebut diproses menggunakan platform Node-RED dan disampaikan sebagai notifikasi otomatis melalui aplikasi Telegram. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menyampaikan informasi kondisi peralatan dan kejadian gangguan secara cepat dan akurat. Analisis data gangguan menunjukkan bahwa penerapan sistem otomasi relay proteksi mampu mengurangi durasi padam sekitar 1 jam 43 menit dibandingkan kondisi sebelum otomasi. Penerapan sistem ini memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan keandalan sistem tenaga listrik dan pengurangan kerugian energi pada gardu induk tanpa operator.

Kata kunci: Relay proteksi, Otomasi, Modbus, Node-RED, Telegram, Gardu induk

Abstract

This study presents the design and implementation of a simple automation system applied to a numeric protection relay to reduce disturbance duration at Gardu Induk (GI) Mendalan, an unmanned substation. In the existing condition, fault identification still relies on manual retrieval of relay data, resulting in longer outage duration. The proposed system utilizes Modbus TCP/IP communication to acquire data from a General Electric (GE) UR D60 protection relay. The data are processed using the Node-RED platform and delivered as automatic notifications via Telegram. Test results indicate that the system is capable of providing fast and accurate information regarding equipment conditions and fault events. Analysis of disturbance data shows that the implementation of the automation system can reduce outage duration by approximately 1 hour and 43 minutes compared to the previous condition. The proposed system contributes to improving power system reliability and minimizing energy losses in unmanned substations.

Keywords: *Protection relay, Automation, Modbus, Node-RED, Telegram, Substation*

Article History
Received: December 2025
Reviewed: January 2026
Published: January 2026

Plagiarism Checker No: 235
Prefix DOI : 10.8734/Kohesi.v1i2.365
Copyright : Author
Publish by : Kohesi

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik memiliki peranan yang sangat penting dalam menunjang aktivitas masyarakat, industri, dan pelayanan publik. Keandalan penyaluran tenaga listrik menjadi salah satu indikator utama kinerja penyedia tenaga listrik, khususnya pada sistem transmisi dan gardu induk. Gangguan pada sistem transmisi dapat menyebabkan pemadaman dengan dampak yang luas, baik dari sisi teknis maupun ekonomi. Oleh karena itu, upaya untuk menekan durasi gangguan dan mempercepat proses penormalan sistem menjadi hal yang sangat krusial.

Gardu Induk Mendalan merupakan salah satu gardu induk milik PT PLN (Persero) yang berfungsi sebagai outlet Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Mendalan pada sistem tegangan 70 kV. Secara geografis, gardu induk ini berada di wilayah pegunungan dengan kondisi akses dan komunikasi yang terbatas. Berdasarkan kebijakan operasional, Gardu Induk Mendalan dioperasikan sebagai Gardu Induk Tanpa Operator (GITO), sehingga tidak terdapat petugas yang berjaga secara permanen di lokasi. Kondisi tersebut menyebabkan pemantauan peralatan dan penanganan gangguan sangat bergantung pada sistem monitoring jarak jauh dan kesiapan petugas lapangan.

Berdasarkan data gangguan dan laporan kinerja UPT Malang, penyulang Siman–Mendalan tercatat sebagai salah satu penyulang dengan tingkat gangguan yang relatif tinggi. Panjang lintasan transmisi, jumlah tower yang banyak, serta kondisi lingkungan sekitar menyebabkan potensi gangguan semakin besar. Pada kondisi eksisting, ketika terjadi gangguan, proses identifikasi penyebab gangguan masih memerlukan pengambilan data dari relay proteksi secara langsung di lokasi gardu induk. Proses ini membutuhkan waktu perjalanan petugas yang tidak singkat, sehingga berkontribusi terhadap lamanya durasi padam.

Relay proteksi numerik yang digunakan di gardu induk modern sebenarnya telah dilengkapi dengan berbagai fitur canggih, seperti event recorder, disturb recorder, serta kemampuan komunikasi data melalui protokol standar industri. Namun, pada banyak kasus, fitur-fitur tersebut belum dimanfaatkan secara optimal untuk mendukung sistem monitoring dan peringatan dini (early warning). Padahal, pemanfaatan fitur komunikasi relay proteksi dapat memberikan informasi kondisi sistem secara cepat dan real time tanpa harus menunggu kehadiran petugas di lokasi.

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi membuka peluang penerapan sistem otomasi sederhana yang relatif mudah diimplementasikan dan berbiaya rendah. Platform pemrograman berbasis alur seperti Node-RED memungkinkan integrasi berbagai perangkat industri dengan aplikasi berbasis jaringan. Selain itu, aplikasi pesan instan seperti Telegram dapat dimanfaatkan sebagai media notifikasi yang cepat, ringan, dan mudah diakses oleh berbagai pihak. Integrasi antara relay proteksi, Node-RED, dan Telegram berpotensi menjadi solusi praktis untuk meningkatkan kecepatan penyampaian informasi gangguan pada gardu induk tanpa operator.

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu rancang bangun sistem otomasi sederhana yang mampu memanfaatkan data dari relay proteksi numerik untuk memberikan informasi kondisi peralatan dan gangguan secara real time. Sistem ini diharapkan dapat membantu mempercepat proses identifikasi gangguan, mengurangi durasi padam, serta meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik di Gardu Induk Mendalan.

Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, beberapa permasalahan yang dapat diidentifikasi antara lain :

1. Gardu Induk Mendalan beroperasi sebagai gardu induk tanpa operator sehingga pemantauan peralatan tidak dilakukan secara langsung di lokasi.
2. Proses identifikasi gangguan masih bergantung pada pengambilan data relay proteksi secara manual oleh petugas lapangan.

3. Waktu perjalanan petugas menuju gardu induk menyebabkan keterlambatan dalam analisis gangguan dan penormalan sistem.
4. Fitur komunikasi dan pencatatan pada relay proteksi numerik belum dimanfaatkan secara optimal untuk sistem peringatan dini.
5. Belum tersedia sistem notifikasi otomatis yang dapat menyampaikan informasi gangguan secara cepat kepada pihak terkait.

Batasan Masalah

Agar pembahasan penelitian lebih terarah dan tidak meluas, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian difokuskan pada sistem proteksi dan pemantauan di Gardu Induk Mendalan pada sistem tegangan 70 kV.
2. proteksi yang digunakan dalam penelitian ini adalah relay numerik General Electric (GE) tipe UR D60.
3. Protokol komunikasi yang digunakan untuk pengambilan data relay adalah Modbus TCP/IP.
4. Platform Node-RED digunakan sebagai media pengolahan data dan logika sistem.
5. Aplikasi Telegram digunakan sebagai media penyampaian notifikasi gangguan.
6. Analisis kinerja sistem difokuskan pada pengaruh penerapan otomasi terhadap durasi gangguan.

Rumusan Masalah

Berdasarkan batasan masalah yang telah ditetapkan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang dan mengimplementasikan sistem otomasi sederhana pada relay proteksi numerik di Gardu Induk Mendalan?
2. Bagaimana integrasi antara relay proteksi, Node-RED, dan Telegram dalam menyampaikan informasi kondisi sistem?
3. Sejauh mana penerapan sistem otomasi relay proteksi dapat menurunkan durasi gangguan pada Gardu Induk Mendalan?

Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Merancang dan mengimplementasikan sistem otomasi sederhana berbasis relay proteksi numerik di Gardu Induk Mendalan.
2. Mengintegrasikan komunikasi data relay proteksi dengan Node-RED dan Telegram sebagai sistem notifikasi gangguan.
3. Menganalisis pengaruh penerapan sistem otomasi terhadap durasi gangguan dan keandalan sistem tenaga listrik.

Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini antara lain :

1. Memberikan solusi praktis dan berbiaya relatif rendah untuk meningkatkan pemantauan gardu induk tanpa operator.
2. Membantu mempercepat proses identifikasi dan penanganan gangguan pada sistem transmisi.
3. Mengurangi durasi padam dan potensi kerugian energi akibat gangguan.
4. Menjadi referensi bagi pengembangan sistem otomasi serupa pada gardu induk lain dengan kondisi sejenis.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini disusun secara sistematis untuk memastikan bahwa perancangan, implementasi, dan evaluasi sistem otomasi relay proteksi dapat dilakukan secara terukur dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Metode penelitian meliputi tahapan penelitian, perancangan sistem, perancangan perangkat keras, perancangan perangkat lunak, serta metode pengujian sistem.

Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan secara bertahap dan berurutan agar tujuan penelitian dapat tercapai dengan baik. Secara umum, tahapan penelitian yang dilakukan meliputi:

1. Studi Pustaka

Tahap ini dilakukan dengan mempelajari literatur yang berkaitan dengan sistem proteksi tenaga listrik, relay proteksi numerik, protokol komunikasi Modbus TCP/IP, platform Node-RED, serta pemanfaatan aplikasi Telegram sebagai media notifikasi. Studi pustaka bertujuan untuk memperoleh landasan teori dan referensi yang relevan sebagai dasar perancangan sistem.

2. Observasi Lapangan

Observasi dilakukan secara langsung di Gardu Induk Mendalan dan ULTG Mojokerto untuk memperoleh gambaran kondisi eksisting sistem proteksi, topologi jaringan komunikasi, serta prosedur penanganan gangguan yang berjalan. Data hasil observasi digunakan untuk menentukan kebutuhan sistem dan batasan implementasi.

3. Perancangan Sistem

Pada tahap ini dilakukan perancangan arsitektur sistem otomasi relay proteksi, meliputi perancangan diagram blok sistem, penentuan alur komunikasi data, serta pemilihan perangkat dan perangkat lunak yang digunakan.

4. Implementasi Sistem

Tahap implementasi mencakup konfigurasi relay proteksi, pengaturan komunikasi Modbus TCP/IP, pembuatan flow pada Node-RED, serta integrasi dengan bot Telegram untuk pengiriman notifikasi.

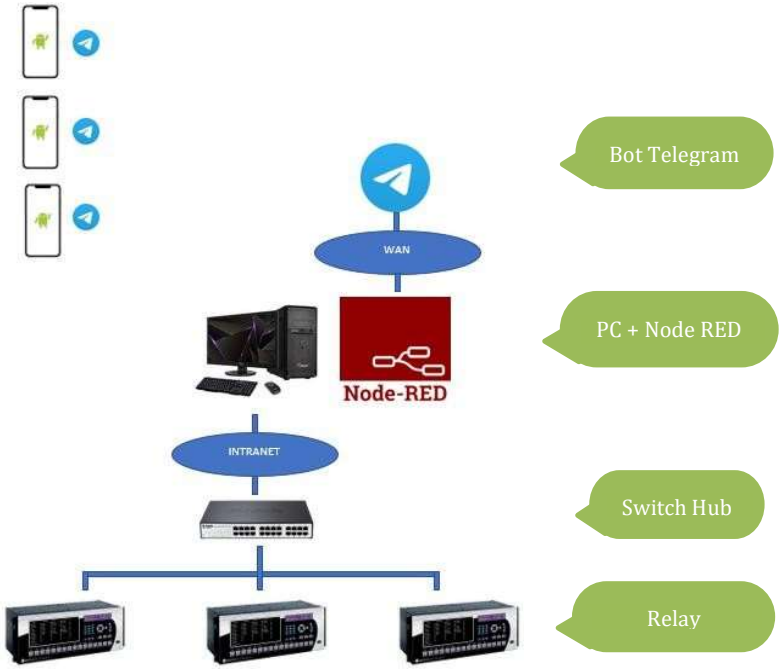
5. Pengujian dan Analisis

Pengujian dilakukan untuk memastikan sistem bekerja sesuai dengan rancangan. Data hasil pengujian dianalisis untuk mengetahui pengaruh penerapan sistem otomasi terhadap durasi gangguan dan keandalan sistem.

Perancangan Sistem

Perancangan sistem otomasi relay proteksi bertujuan untuk menghasilkan suatu sistem yang mampu mengambil data dari relay proteksi numerik secara real time, mengolah data tersebut, dan menyampaikannya dalam bentuk notifikasi kepada pihak terkait. Arsitektur sistem dirancang dengan memanfaatkan jaringan intranet yang sudah tersedia di lingkungan gardu induk dan unit layanan transmisi.

Secara umum, sistem terdiri dari relay proteksi numerik sebagai sumber data, server Node-RED sebagai pengolah data, serta aplikasi Telegram sebagai media penyampaian informasi. Komunikasi data antara relay proteksi dan server dilakukan menggunakan protokol Modbus TCP/IP melalui jaringan ethernet.



Gambar 1. Blok diagram sistem otomasi relay proteksi di GI Mendalan.

Diagram blok sistem menggambarkan alur komunikasi data dimulai dari relay proteksi GE UR D60 yang mengirimkan data pengukuran dan status peralatan ke server Node-RED. Data tersebut kemudian diproses oleh Node-RED untuk mendeteksi perubahan kondisi atau kejadian tertentu. Apabila terdeteksi kondisi yang memenuhi kriteria alarm atau event, sistem akan mengirimkan notifikasi otomatis ke grup Telegram yang telah ditentukan.

a. Perancangan Perangkat Keras

Perangkat keras utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah relay proteksi numerik General Electric (GE) tipe UR D60 yang terpasang pada Gardu Induk Mendalan. Relay ini berfungsi sebagai perangkat proteksi sekaligus sumber data pengukuran dan status sistem. Selain relay proteksi, perangkat keras lain yang digunakan meliputi :

Server atau komputer yang digunakan untuk menjalankan aplikasi Node-RED. Server ini ditempatkan di ULTG Mojokerto dan terhubung ke jaringan intranet PLN.

Perangkat jaringan, seperti switch dan kabel ethernet, yang digunakan untuk menghubungkan relay proteksi dengan server Node-RED. Perancangan perangkat keras dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi eksisting sehingga tidak memerlukan penambahan perangkat yang signifikan dan tetap menjaga keandalan sistem.

b. Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini meliputi Node-RED sebagai platform utama pengolahan data dan Telegram sebagai media notifikasi. Pada sisi Node-RED, dibuat beberapa node utama, yaitu :

Node Modbus untuk melakukan pembacaan data register dari relay proteksi secara periodik. **Node fungsi (function node)** untuk mengolah data yang diterima, termasuk mendeteksi perubahan status dan menentukan kondisi alarm. **Node Telegram** untuk mengirimkan pesan notifikasi ke grup Telegram apabila terjadi event tertentu.

Flow Node-RED dirancang sedemikian rupa sehingga hanya perubahan status atau kejadian penting yang dikirimkan sebagai notifikasi. Hal ini bertujuan untuk menghindari pengiriman pesan yang berlebihan dan memastikan informasi yang diterima bersifat relevan. Pada sisi Telegram, dibuat sebuah bot menggunakan token khusus yang berfungsi sebagai

pengirim pesan otomatis. Bot ini dikonfigurasikan agar hanya mengirimkan pesan ke grup yang telah ditentukan sehingga keamanan informasi tetap terjaga.

Metode Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk memastikan bahwa sistem otomasi relay proteksi bekerja sesuai dengan tujuan penelitian. Metode pengujian yang digunakan meliputi :

Pengujian Fungsional

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa sistem mampu membaca data dari relay proteksi, memproses data dengan benar, dan mengirimkan notifikasi ke Telegram sesuai dengan kondisi yang terjadi.

Pengujian Kesesuaian Informas

Pengujian dilakukan dengan membandingkan informasi yang diterima melalui Telegram dengan indikasi yang ditampilkan pada relay proteksi dan catatan pada sistem SCADA.

Pengujian Waktu Respon

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui selisih waktu antara kejadian gangguan dengan waktu diterimanya notifikasi di Telegram.

Analisis Dampak terhadap Durasi Gangguan

Data gangguan sebelum dan sesudah penerapan sistem otomasi dianalisis untuk mengetahui pengaruh sistem terhadap durasi padam.

HASIL dan PEMBAHASAN

Implementasi Sistem Otomasi Relay Proteksi

Implementasi sistem otomasi relay proteksi dilakukan setelah seluruh tahapan perancangan perangkat keras dan perangkat lunak selesai. Relay proteksi numerik General Electric (GE) UR D60 yang terpasang di Gardu Induk Mendalan dikonfigurasikan agar dapat diakses melalui jaringan ethernet menggunakan protokol Modbus TCP/IP. Konfigurasi ini memungkinkan pengambilan data pengukuran dan status relay secara real time tanpa harus melakukan akses langsung di lokasi gardu induk. Server Node-RED yang berada di ULTG Mojokerto berfungsi sebagai pusat pengolahan data. Node-RED dikonfigurasikan untuk melakukan pembacaan register Modbus secara periodik sesuai dengan kebutuhan pemantauan. Data yang diambil meliputi status pemutus tenaga (PMT), kondisi tegangan VT, serta indikasi alarm komunikasi. Data tersebut kemudian diproses menggunakan fungsi logika untuk mendeteksi perubahan kondisi yang dianggap penting.

Apabila terdeteksi perubahan status atau kejadian tertentu, sistem secara otomatis mengirimkan pesan notifikasi ke grup Telegram yang telah ditentukan. Pesan notifikasi dirancang singkat namun informatif, mencantumkan jenis kejadian, lokasi peralatan, serta waktu kejadian. Dengan demikian, petugas dan pihak terkait dapat segera mengetahui kondisi sistem tanpa harus membuka aplikasi SCADA atau mengakses relay secara langsung.

Hasil Pengujian Fungsional Sistem

Pengujian fungsional dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh komponen sistem bekerja sesuai dengan perancangan. Pengujian dilakukan dengan beberapa skenario kondisi operasi dan gangguan, baik melalui simulasi maupun pengujian langsung di lapangan.

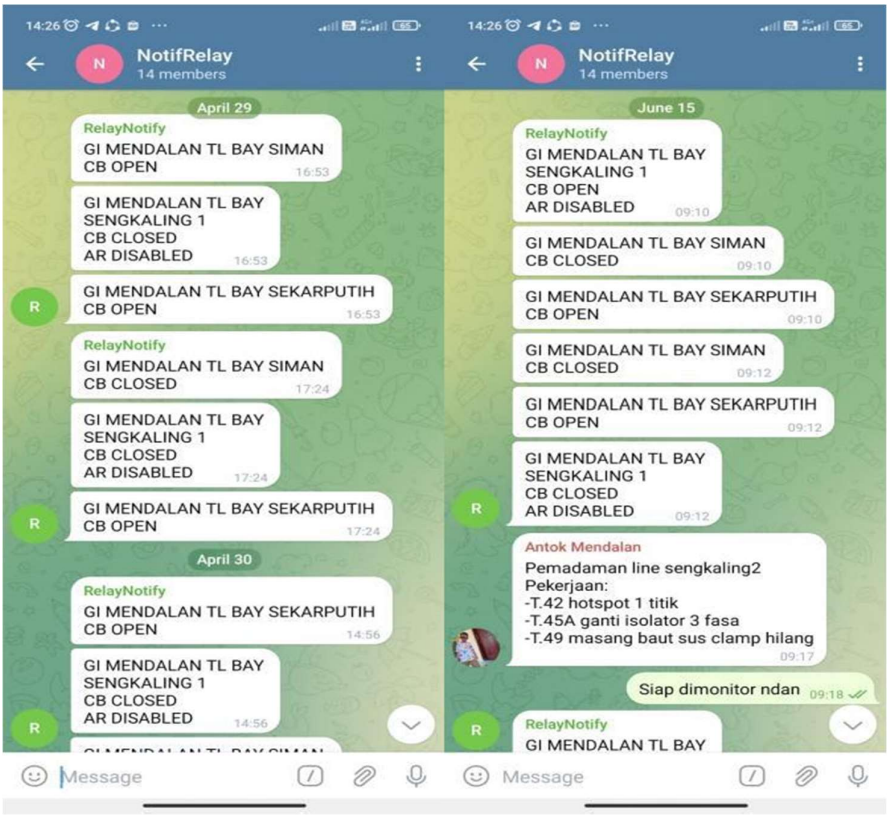
Skenario pengujian meliputi pemutusan PMT pada bay tertentu, pemadaman MCB VT, serta simulasi gangguan komunikasi. Setiap perubahan kondisi pada relay diamati untuk memastikan bahwa sistem Node-RED dapat mendeteksi perubahan tersebut dan mengirimkan notifikasi yang sesuai ke Telegram.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu membaca data dari relay proteksi secara konsisten dan mengirimkan notifikasi yang sesuai dengan kondisi aktual di lapangan. Tidak ditemukan perbedaan makna antara indikasi yang muncul pada relay proteksi dan pesan yang diterima melalui Telegram. Hal ini menunjukkan bahwa pemetaan register dan logika pemrosesan data telah dirancang dengan benar.

Analisis Kesesuaian Informasi dan Waktu Respon

Analisis kesesuaian informasi dilakukan dengan membandingkan pesan notifikasi Telegram dengan catatan kejadian pada sistem SCADA. Parameter utama yang dianalisis adalah jenis kejadian dan waktu terjadinya gangguan.

Berdasarkan hasil pengujian, waktu notifikasi yang diterima melalui Telegram memiliki selisih waktu yang relatif kecil dibandingkan dengan time stamp pada SCADA. Selisih waktu ini masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk kebutuhan pemantauan operasional. Dengan demikian, notifikasi Telegram dapat dijadikan sebagai referensi awal untuk mengetahui waktu dan jenis gangguan sebelum dilakukan analisis lanjutan.



Gambar 2. Contoh notifikasi kondisi peralatan GI Mendalan pada grup Telegram.

Kecepatan penyampaian informasi ini menjadi salah satu keunggulan utama sistem yang dikembangkan. Pada kondisi eksisting, informasi gangguan baru dapat diperoleh secara detail setelah petugas tiba di lokasi dan melakukan pengambilan data relay. Dengan adanya sistem otomasi, informasi awal dapat diperoleh dalam hitungan menit sejak kejadian gangguan terjadi.

Analisis Pengaruh terhadap Durasi Gangguan

Untuk mengetahui pengaruh penerapan sistem otomasi terhadap durasi gangguan, dilakukan analisis perbandingan antara kondisi sebelum dan setelah penerapan sistem. Data gangguan yang digunakan sebagai acuan adalah gangguan aktual pada penyulang Siman–Mendalan yang terjadi pada tanggal 23 Desember 2021.

Pada kondisi sebelum otomasi, durasi gangguan tercatat sekitar 5 jam 23 menit. Lamanya durasi gangguan ini disebabkan oleh keterlambatan proses identifikasi penyebab gangguan, karena petugas harus melakukan perjalanan menuju Gardu Induk Mendalan untuk mengambil data relay secara langsung. Proses ini memerlukan waktu yang cukup lama mengingat kondisi geografis dan akses lokasi.

Dengan penerapan sistem otomasi relay proteksi dan akses data secara online, proses identifikasi gangguan dapat dilakukan dari ULTG Mojokerto tanpa harus menunggu kehadiran petugas di lokasi. Berdasarkan simulasi dan analisis, durasi gangguan dapat dipangkas menjadi sekitar 3 jam 40 menit. Dengan demikian, terdapat pengurangan durasi gangguan sekitar 1 jam 43 menit.

Pengurangan durasi gangguan ini memberikan dampak yang signifikan terhadap keandalan sistem dan pengurangan kerugian energi. Semakin cepat gangguan dapat diidentifikasi dan dianalisis, semakin cepat pula proses penormalan sistem dapat dilakukan.

q	Durasi gangguan	Keterangan
Sebelum otomasi (data 23 Desember 2021)	5 jam 23 menit	Relay offline, analisis gangguan menunggu kedatangan petugas ke GI
Setelah otomasi (simulasi online relay)	≈ 3 jam 40 menit	Durasi berkurang sekitar 1 jam 43 menit karena data relay dapat diakses dari ULTG

Tabel 1. Perbandingan durasi gangguan sebelum dan setelah penerapan otomasi relay.

Pembahasan Teknis dan Operasional

Secara teknis, hasil penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan fitur komunikasi pada relay proteksi numerik dapat memberikan nilai tambah yang besar tanpa memerlukan investasi perangkat yang mahal. Sistem yang dikembangkan memanfaatkan perangkat dan infrastruktur yang sebagian besar sudah tersedia, sehingga biaya implementasi relatif rendah.

Dari sisi operasional, sistem notifikasi berbasis Telegram memberikan kemudahan akses informasi bagi petugas dan manajemen. Informasi gangguan dapat diterima melalui perangkat mobile kapan pun dan di mana pun, sehingga koordinasi penanganan gangguan dapat dilakukan lebih cepat. Hal ini sangat relevan untuk gardu induk tanpa operator yang memiliki keterbatasan pemantauan langsung.

Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa penerapan otomasi sederhana tidak selalu memerlukan sistem yang kompleks. Dengan perancangan yang tepat, integrasi antara relay proteksi, Node-RED, dan aplikasi pesan instan sudah cukup untuk memberikan peningkatan kinerja yang signifikan. Pendekatan ini dapat dijadikan referensi untuk pengembangan sistem otomasi serupa pada gardu induk lain dengan karakteristik yang sejenis.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem otomasi relay proteksi mampu memberikan notifikasi gangguan secara real time dan mempercepat proses identifikasi gangguan sehingga durasi padam dapat dikurangi.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, serta pengujian sistem otomasi relay proteksi yang telah dilakukan di Gardu Induk Mendalan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut. Pertama, sistem otomasi sederhana berbasis relay proteksi numerik General Electric (GE) UR D60 berhasil dirancang dan diimplementasikan dengan memanfaatkan protokol komunikasi Modbus TCP/IP, platform Node-RED, dan aplikasi Telegram sebagai media notifikasi. Sistem ini mampu mengambil data kondisi relay secara real time tanpa memerlukan akses langsung ke lokasi gardu induk.

Kedua, integrasi antara relay proteksi, Node-RED, dan Telegram terbukti mampu menyampaikan informasi kondisi peralatan dan kejadian gangguan secara cepat dan akurat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pesan notifikasi yang diterima melalui Telegram sesuai dengan indikasi pada relay proteksi dan catatan pada sistem SCADA. Selisih waktu antara kejadian gangguan dan diterimanya notifikasi berada dalam batas yang dapat diterima untuk kebutuhan pemantauan operasional.

Ketiga, penerapan sistem otomasi relay proteksi memberikan dampak positif terhadap pengurangan durasi gangguan. Berdasarkan analisis data gangguan pada penyulang Siman–Mendalan, durasi padam yang semula mencapai sekitar 5 jam 23 menit dapat dipangkas menjadi sekitar 3 jam 40 menit. Pengurangan durasi gangguan sebesar kurang lebih 1 jam 43 menit ini menunjukkan bahwa akses data relay secara online mampu mempercepat proses identifikasi dan analisis gangguan.

Keempat, dari sisi operasional dan ekonomi, sistem yang dikembangkan relatif mudah diimplementasikan dan tidak memerlukan investasi perangkat yang besar. Pemanfaatan infrastruktur dan perangkat yang sudah tersedia menjadikan sistem ini sebagai solusi yang efisien untuk meningkatkan keandalan gardu induk tanpa operator. Dengan berkurangnya durasi padam, potensi kerugian energi juga dapat ditekan, sehingga kinerja sistem tenaga listrik secara keseluruhan dapat ditingkatkan.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan selanjutnya adalah sebagai berikut. Pertama, sistem otomasi relay proteksi dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan fitur visualisasi data berbasis web atau dashboard, sehingga histori kejadian dan tren gangguan dapat dianalisis dengan lebih mudah.

Kedua, pengembangan sistem dapat diperluas dengan mengintegrasikan lebih banyak jenis relay proteksi dan parameter pengukuran, tidak hanya terbatas pada status PMT dan alarm tertentu. Hal ini diharapkan dapat memberikan informasi yang lebih komprehensif mengenai kondisi sistem tenaga listrik.

Ketiga, untuk meningkatkan keandalan sistem, dapat dipertimbangkan penerapan mekanisme redundansi pada jaringan komunikasi dan server Node-RED. Dengan demikian, sistem tetap dapat beroperasi meskipun terjadi gangguan pada salah satu komponen.

Keempat, penerapan sistem otomasi serupa dapat direplikasi pada gardu induk lain yang berstatus tanpa operator, terutama yang memiliki kondisi geografis dan tingkat gangguan yang sejenis, sehingga manfaat yang diperoleh dapat dirasakan secara lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

[1] PT PLN (Persero) P3B Jawa Bali, "RUPTL 2014–2024," Jakarta, 2013.
[2] O. Zebua, K. Endah, A. Syaiful, dan A. Aldiansyah, "Rancang Bangun Alat Monitoring Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi Berbasis Internet of Things," Electrician, vol. 15, no. 2, hlm. 146–152, 2021.
[3] D. Pongoh dan M. Budiman, "Rancang Bangun Alat Praktek Simulasi Monitoring Keseimbangan Beban Listrik 3 Fasa Berbasis IoT," J-SAKTI, vol. 6, no. 2, hlm. 1268–1282, 2022.
[4] W. Yuniarto dkk., "Rancang Bangun Sistem Monitoring dan Kontrol Energi Listrik pada Beban 3 Fasa Menggunakan ESP32 Berbasis Internet of Things," Jurnal Poli-Teknologi, vol. 22, no. 1, hlm. 30–38, 2023.
[5] A. Arismunandar dan S. Kuwahara, Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik II, Jakarta: Pradnya Paramita, 2004.
[6] Karyana, Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali, PT PLN (Persero) P3B Jawa Bali, 2013.

[7] OpenJS Foundation, "Node-RED," tersedia: https://nodered.org