



Analisis Keandalan Jaringan Distribusi Tegangan Menengah di Bandar Udara Internasional Zainuddin Abdul Madjid Lombok

Arga Satya Budi Nugraha¹ Feti Fatonah² Fahroji³

Program Studi Diploma IV Teknik Listrik Bandara, Program Sarjana Terapan, Politeknik Penerbangan Indonesia Curug, Tangerang, Banten, Indonesia^{1,2,3}

Email: arga.satya@student.ppi.ac.id¹ feti.fatonah@pps.ppi.ac.id² fahroji@pps.ppi.ac.id³

Abstrak

Masalah: Sistem distribusi jaringan tegangan menengah (20 kV) sisi udara di Bandar Udara Internasional Zainuddin Abdul Madjid Lombok sering mengalami simultaneous trip (trip serentak) pada gardu B2, B3, B4, B5, dan B7 saat terjadi gangguan fasa tunggal maupun multi-fasa. Alasan & Tujuan: Investigasi mendalam diperlukan karena kegagalan suplai pada fasilitas airside mengancam keselamatan penerbangan (flight safety). Penelitian ini bertujuan menganalisis indeks keandalan sistem dan mengevaluasi kinerja koordinasi proteksi eksisting. Metode: Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dan simulatif dengan mengintegrasikan perhitungan manual standar IEEE 1366-2012 dan pemodelan software ETAP 24.01 berdasarkan log gangguan aktual tahun 2021. Hasil: Perhitungan menunjukkan nilai SAIFI sebesar 5,00 kali/pelanggan/tahun, SAIDI 9,70 jam/pelanggan/tahun, CAIDI 2,425 jam/gangguan, dan ENS 1.739,2 kWh/tahun. Evaluasi kurva Time Current Characteristic (TCC) membuktikan jarak koordinasi (grading time) antar relay hulu-hilir mendekati 0 detik ($GT \approx 0$) akibat penyetelan pickup (OCR 50 A, instan 150 A) yang seragam di seluruh gardu. Kesimpulan & Rekomendasi: Sistem proteksi eksisting tidak selektif dalam topologi looping. Direkomendasikan melakukan re-setting relay proteksi, mengimplementasikan Directional Over Current Relay (DOCR), differential relay, serta mengintegrasikan sistem pemantauan berbasis SCADA.

Kata Kunci: Sistem Distribusi, Jaringan Looping, Keandalan, Koordinasi Proteksi, ETAP

Abstract

Problem: The 20 kV medium-voltage distribution network on the airside of Zainuddin Abdul Madjid International Airport, Lombok, frequently experiences simultaneous tripping at substations B2, B3, B4, B5, and B7 during single-phase and multi-phase faults. Rationale and Objective: An in-depth investigation is required because supply interruptions to airside facilities may compromise flight safety and operational continuity. This study aims to analyze the system reliability indices and evaluate the performance of the existing protection coordination scheme. Methods: A quantitative and simulation-based approach was employed by integrating manual reliability calculations based on IEEE 1366-2012 with ETAP 24.01 modeling using actual fault records from 2021. Results: The analysis yielded a System Average Interruption Frequency Index (SAIFI) of 5.00 interruptions/customer/year, a System Average Interruption Duration Index (SAIDI) of 9.70 hours/customer/year, a Customer Average Interruption Duration Index (CAIDI) of 2.425 hours/interruption, and Energy Not Supplied (ENS) of 1,739.2 kWh/year. Evaluation of the Time-Current Characteristic (TCC) curves demonstrated that the grading time between upstream and downstream relays approached zero ($GT \approx 0$) due to uniform relay settings across the substations, with an overcurrent relay (OCR) pickup of 50 A and instantaneous setting of 150 A. Conclusion and Recommendation: The existing protection scheme lacks selectivity under the looping network topology, resulting in the potential propagation of interruptions across multiple substations. Therefore, protection relay re-coordination is recommended, supported by the implementation of Directional Overcurrent Relays (DOCR), differential protection, and SCADA-based monitoring to improve fault discrimination, system reliability, and operational resilience.

Keywords: Distribution System, Looping Network, Reliability, Protection Coordination, ETAP



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

PENDAHULUAN

Kontinuitas suplai energi kelistrikan merupakan pilar utama dalam menjamin operasional keselamatan navigasi dan penerbangan pada fasilitas kritis bandar udara. Bandar Udara Internasional Zainuddin Abdul Madjid Lombok menggunakan jaringan tegangan menengah 20 kV dengan konfigurasi looping dan interkoneksi untuk menyuplai beban airside kritis seperti Tower ATC, AirNav, dan Airfield Lighting System (AFL). Namun, ketiadaan fungsi proteksi arah dan diferensial pada instalasi eksisting memicu fenomena simultaneous trip, di mana gangguan tunggal di satu titik meluas hingga memadamkan seluruh gardu sisi udara secara serentak, yang membutuhkan waktu pemulihan manual yang lama karena belum didukung sistem SCADA. Penelitian mengenai koordinasi proteksi overcurrent konvensional telah banyak dievaluasi, seperti oleh Zulaikha dan Idris (2022) yang berfokus pada sistem radial dan ring tanpa mengaitkannya dengan durasi pemadaman riil pelanggan. Sementara itu, Thorne dkk. (n.d.) menekankan pemulihan otomatis kepadatan tinggi yang sulit diaplikasikan langsung pada instalasi manual bandara. Analisis keandalan komprehensif pada fasilitas kelistrikan bandara udara di Indonesia masih sangat terbatas dalam mengintegrasikan evaluasi indeks durasi gangguan dengan pembuktian matematis kurva karakteristik arus-waktu secara real-time. Gap analysis penelitian ini terletak pada integrasi data log gangguan aktual kelistrikan bandara dengan pemodelan hubung singkat multi-fasa dan pembuktian matematis hilangnya margin selektivitas ($GT < 0.2$ s) pada topologi looping bandara udara. Tujuan penelitian ini adalah mengukur secara pasti parameter SAIDI, SAIFI, CAIDI, dan ENS sesuai standar IEEE 1366-2012, serta mengevaluasi potensi misoperation relay SEPAM S40 melalui perangkat lunak ETAP 24.01 guna menyusun rekomendasi teknis perbaikan sistem proteksi.

Penelitian Terdahulu yang Relevan

No	Penulis/ Tahun	Judul	Tujuan	Metode	Hasil/ Kontribusi
1	Zulaikha & Idris (2022)	Coordination of Overcurrent Relay in Distribution System	Menganalisis koordinasi OCR pada sistem ring.	Simulasi ETAP TCC.	Koordinasi tepat meningkatkan selektivitas.
2	Thorne dkk. (n.d.)	Improving Distribution System Reliability With...	Mengembangkan restorasi otomatis sistem ring.	High-Density Restoration.	Meningkatkan reliability secara otomatis.
3	Alasali dkk. (2024)	The Recent Development of Protection Coordination...	Meninjau skema koordinasi proteksi modern.	Literature Review.	Pemetaan metode proteksi adaptif modern.
4	Uma dkk. (2023)	Adaptive overcurrent protection scheme coordination...	Mempertahankan koordinasi proteksi dengan DG.	Neural Network.	Metode adaptif menjaga selektivitas.
5	S. Shaikh dkk. (2023)	Coordination of protective relays in the substation	Mengurangi area pemadaman di gardu induk.	Simulasi koordinasi.	Reduksi area padam meningkatkan keandalan.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif analitis dengan pendekatan simulatif. Penelitian berlokasi di area panel Tegangan Menengah (TM) utama Bandar Udara Internasional Zainuddin Abdul Madjid Lombok, mencakup Gardu Hubung PLN, Power House (MVMDP ATS), serta Substation B2, B3, B4, B5, dan B7. Data primer yang dikumpulkan meliputi Single Line Diagram (SLD) aktual, rekapitulasi data transformator, panjang dan jenis konduktor, serta rekaman log trip relay proteksi eksisting SEPAM S40. Simulasi load flow, hubung singkat, dan koordinasi proteksi dimodelkan dan divalidasi langsung menggunakan software ETAP 24.01.

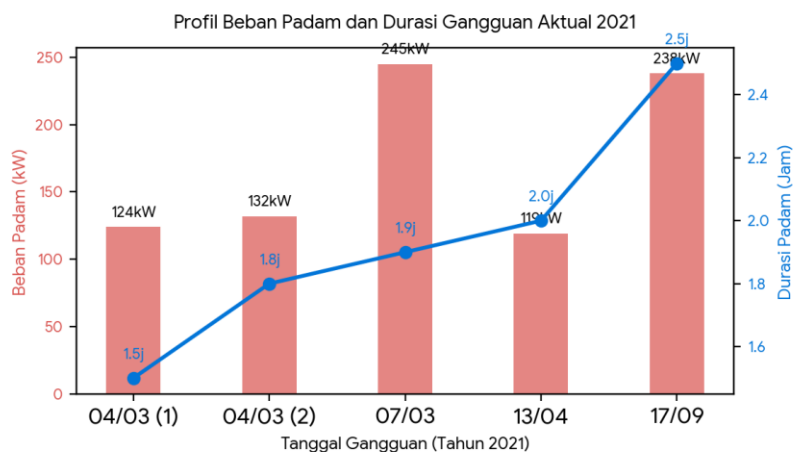
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Data gangguan aktual kelistrikan sisi udara tahun 2021 menunjukkan bahwa seluruh insiden yang tercatat merupakan fenomena simultaneous trip yang berdampak langsung pada 5 gardu distribusi udara utama secara bersamaan. Berikut disajikan rekapitulasi data gangguan dan visualisasi grafis profil operasional jaringan harian.

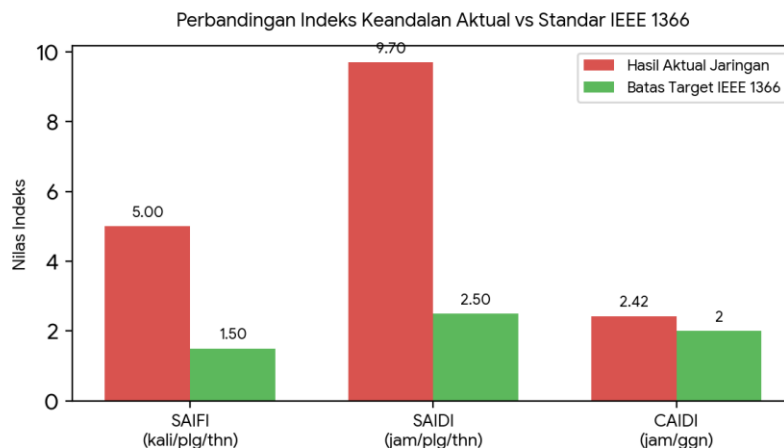
Tabel 1. Rekapitulasi Data Gangguan Aktual Sisi Udara

No	Tanggal	Lokasi	Penyebab	Durasi (Jam)	Beban (kW)	Pelanggan
1	04/03/2021	B2,B3,B4,B5,B7	Hubung singkat fasa-ground	1.5	124	5
2	04/03/2021	B2,B3,B4,B5,B7	Hubung singkat fasa-ground	1.8	132	5
3	07/03/2021	B2,B3,B4,B5,B7	Hubung singkat fasa-ground	1.9	245	5
4	13/04/2021	B2,B3,B4,B5,B7	Hubung singkat fasa-ground	2.0	119	5
5	17/09/2021	B2,B3,B4,B5,B7	Hubung singkat fasa-ground	2.5	238	5



Gambar 1. Grafik Profil Beban Padam dan Durasi Insiden Aktual 2021

Berdasarkan data Tabel 1, kalkulasi parameter keandalan menghasilkan nilai SAIFI sebesar 5,00 kali/pelanggan/tahun, SAIDI 9,70 jam/pelanggan/tahun, CAIDI 2,425 jam/gangguan, dan Energi Tidak Tersalurkan (ENS) total sebesar 1.739,2 kWh/tahun. Gambar 2 menampilkan komparasi parameter aktual terhadap target batas aman yang direkomendasikan standar IEEE 1366.



Gambar 2. Grafik Perbandingan Kinerja Indeks Keandalan Aktual vs Target Standar IEEE

Pembahasan

Melalui analisis integrasi data kelistrikan (unsur what/how), pembacaan kurva Time Current Characteristic (TCC) membuktikan tumpang tindih masif pada respons sistem proteksi eksisting. Saat terjadi gangguan hubung singkat multi-fasa dengan arus gangguan mencapai 14,214 kA, nilai Plug Setting Multiplier (PSM) bernilai sangat besar ($PSM = 284,28$). Faktor penentu utama miskordinasi ini (unsur why) disebabkan oleh jarak waktu grading time (GT) hulu-hilir yang bernilai mendekati nol ($GT \approx 0$). Ketiadaan fungsi koordinasi berjenjang (standar aman $GT = 0,2 - 0,4$ detik) berpadu dengan topologi looping dua arah tanpa directional relay memaksa seluruh circuit breaker trip bersamaan dalam kurun waktu 0,1 detik. Hal ini mengonfirmasi mengapa gangguan kecil di satu lokasi memperluas pemadaman secara simultan ke seluruh wilayah udara kritis bandara.

KESIMPULAN

Tingkat keandalan jaringan kelistrikan tegangan menengah sisi udara Bandar Udara Internasional Zainuddin Abdul Madjid Lombok belum optimal dengan nilai indeks pemadaman SAIFI (5,00) dan SAIDI (9,70) yang berada jauh di atas batas aman IEEE 1366. Kegagalan selektivitas proteksi konvensional pada topologi ring sirkular ($GT \approx 0$) menjadi akar penyebab utama terjadinya simultaneous trip. Direkomendasikan melakukan re-setting arus pickup, menerapkan Directional Over Current Relay (DOCR), differential protection pada komponen transformator hulu, serta integrasi sistem otomasi switching berbasis SCADA untuk meminimalkan durasi pemulihan operasional navigasi.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan pendekatan terintegrasi untuk menganalisis keandalan dan koordinasi sistem proteksi pada jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV dengan topologi looping yang memasok fasilitas sisi udara bandar udara. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya menganalisis indeks keandalan atau koordinasi proteksi secara terpisah, penelitian ini menghubungkan data gangguan aktual, indeks keandalan sistem, karakteristik koordinasi proteksi, dan konfigurasi jaringan untuk mengidentifikasi mekanisme teknis yang menyebabkan terjadinya simultaneous trip pada beberapa gardu. Integrasi perhitungan indeks SAIFI, SAIDI, CAIDI, dan ENS berdasarkan IEEE 1366-2012 dengan pemodelan Time-Current Characteristic (TCC) menggunakan ETAP 24.01 menunjukkan bahwa rendahnya kinerja keandalan tidak hanya merupakan fenomena statistik, tetapi berkaitan langsung dengan rendahnya selektivitas proteksi yang ditandai oleh grading time antarrelay yang mendekati nol akibat penggunaan pengaturan relay yang beragam. Kebaruan lainnya adalah dirumuskannya pendekatan mitigasi yang mempertimbangkan karakteristik jaringan looping dan tingkat kriticalitas fasilitas bandar udara melalui kombinasi re-setting relay, penerapan Directional Overcurrent Relay (DOCR), proteksi diferensial, serta integrasi pemantauan berbasis SCADA. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi berupa kerangka evaluasi yang menghubungkan keandalan, selektivitas proteksi, topologi jaringan, dan ketahanan operasional sebagai dasar pengembangan sistem distribusi listrik bandar udara yang lebih andal dan mampu meminimalkan dampak gangguan terhadap kesinambungan operasi serta keselamatan penerbangan.

Ucapan terima kasih disampaikan kepada manajemen PT. Angkasa Pura Indonesia Kantor Cabang Bandara Internasional Zainuddin Abdul Madjid Lombok, Airport Technical Division, serta Civitas Akademika Politeknik Penerbangan Indonesia Curug atas dukungan fasilitas penyediaan basis data riset tugas akhir ini.



DAFTAR PUSTAKA

- Alasali, F., Mustafa, H., Saidi, A. S., El-Naily, N., Abeid, S., Holderbaum, W., Omran, E., & Saad, S. M. (2024). The recent development of protection coordination schemes based on inverse of AC microgrid: A review. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 18(1), 1–23. <https://doi.org/10.1049/gtd2.13074>
- Iqbal, M. (2024). Reliability analysis of 20 kV electric power distribution system based on SAIFI, SAIDI, CAIDI, MAIFI, ASAI and ASUI at PT. PLN Rayon Samalanga. *Journal Geuthee of Engineering and Energy (JOGE)*, 3(2), 71–83. <https://doi.org/10.52626/joge.v%vi%i.42>
- Nurgiansah, T. H. (2021). Pelatihan Penelitian Tindakan Kelas Bagi Guru Pendidikan Kewarganegaraan Di Sekolah Menengah Atas Se-Kabupaten Bantul. *BERNAS: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 2(1), 28–33. <https://doi.org/10.31949/jb.v2i1.566>
- Shaikh, M. F., Katyara, S., Khand, Z. H., Ali Shah, M., Staszewski, L., Bhan, V., Majeed, A., Shaikh, S., & Zbigniew, L. (2021). Novel protection coordination scheme for active distribution networks. *Electronics (Switzerland)*, 10(18). <https://doi.org/10.3390/electronics10182312>
- Shaikh, S., Shaikh, S., Soomar, A. M., & Shah, S. H. H. (2023). Coordination of protective relays in the substation. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 14(3), 1471–1478. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v14.i3.pp1471-1478>
- Tomczyk, K., Sieja, M., Ostrowska, K., & Owczarek, D. (2025). Review of Accuracy Assessment Methods for Current Transformers: Errors, Uncertainties, and Dynamic Performance. *Energies*, 18(18). <https://doi.org/10.3390/en18184995>