

Implementasi Sistem Proteksi Arus dan Tegangan Lebih Pada PLTS 10×100 Wp

Saddani Djulihenanto^{*a)}, Masramdhani Saputra^{a)}, Satria Luthfi Hermawan^{a)}, Divac Nabel Akbar^{a)}, Binar Surya Gumilang^{a)}, Amala Wicaksana Putri^{a)}

(Received 1 Desember 2024 || Revised 17 Februari 2025 || Published 28 Februari 2025)

Abstract: *The increasing adoption of solar power systems has highlighted the need for effective overcurrent and overvoltage protection to ensure operational reliability and safety. This study aimed to implement and evaluate a protection system for a 10 × 100 Wp solar power plant at PPYD Al-Ikhlas, Singosari, Indonesia. The research employed an experimental approach, including testing Miniature Circuit Breakers (MCBs), Surge Protection Devices (SPDs), and grounding systems. MCBs were evaluated using an injection current tester to assess their tripping characteristics, while SPDs were tested for continuity using a multimeter. The grounding system was examined with an earth tester to measure its resistance before and after implementing a parallel electrode configuration. The results indicated that the installed protection system significantly enhanced safety, with MCBs effectively disconnecting excessive currents as per IEC 60898-1 standards. The SPD successfully mitigated transient voltage surges, and the grounding system reduced resistance below 5 Ω, complying with PUIL 2020 standards. These findings support previous studies on electrical protection and grounding efficiency, emphasizing the need for tailored solutions in small-scale solar systems. Future research should explore real-time monitoring with IoT-based systems and optimize grounding configurations for high-resistivity soils. The proposed protection approach contributes to enhancing the resilience of distributed solar power installations.*

Keywords: *Overcurrent protection, surge protection, grounding system, solar power, electrical safety*

1. Pendahuluan

Keandalan sistem tenaga listrik sangat bergantung pada kualitas pembangkitan, transmisi, dan distribusi daya, yang harus dilengkapi dengan sistem proteksi guna memastikan keselamatan manusia serta keandalan peralatan listrik [1]. Salah satu aspek kritis dalam sistem proteksi adalah sistem pembumian, yang berfungsi untuk mengalirkan arus gangguan ke bumi dan melindungi sistem dari bahaya tegangan lebih atau arus bocor. Tanpa sistem pembumian yang efektif, risiko kecelakaan listrik, kegagalan peralatan, dan gangguan operasional menjadi lebih tinggi, terutama dalam lingkungan dengan kondisi tanah yang memiliki resistansi tinggi [2], [3].

Dalam sistem tenaga listrik, gangguan seperti arus lebih dan tegangan lebih dapat menimbulkan dampak yang signifikan terhadap stabilitas dan keamanan sistem, terutama pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). PLTS memiliki karakteristik unik dibandingkan dengan pembangkit konvensional, terutama dalam hal sensitivitas terhadap lonjakan tegangan akibat sambaran petir dan arus bocor. Namun, di PPYD Al-Ikhlas, Kabupaten Malang, PLTS berkapasitas 10 × 100 Wp belum dilengkapi dengan sistem pembumian yang sesuai. Hal ini meningkatkan risiko kegagalan sistem, yang berpotensi merusak peralatan dan mengganggu kontinuitas suplai daya bagi pengguna. Oleh karena itu, diperlukan sistem proteksi yang dirancang secara optimal untuk memastikan keamanan dan keandalan operasional PLTS di lokasi tersebut.

Berbagai penelitian telah dilakukan mengenai sistem pembumian dan proteksi pada instalasi listrik, baik pada jaringan distribusi maupun pembangkit listrik. Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL 2000) menetapkan bahwa nilai resistansi pembumian yang aman tidak boleh lebih dari 5 Ω untuk sistem proteksi peralatan listrik dan 10 Ω untuk elektroda pentanahan di sekitar sumber listrik [4], [5], [6]. Pada daerah dengan resistivitas tanah tinggi, nilai tersebut masih dapat ditoleransi hingga 20 Ω. Selain itu, metode pembumian menggunakan batang elektroda sering digunakan dalam instalasi tenaga listrik karena kemudahan pemasangan serta efektivitas dalam menyalurkan arus gangguan

ke tanah [7], [8], [9]. Studi lain menunjukkan bahwa sistem pembumian yang baik dapat mengurangi dampak tegangan lebih yang disebabkan oleh sambaran petir dan gangguan lainnya, sehingga meningkatkan keselamatan sistem kelistrikan [10].

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji pentingnya sistem pembumian dalam instalasi tenaga listrik, masih terdapat kesenjangan penelitian dalam penerapannya pada sistem PLTS skala kecil, terutama di lokasi dengan karakteristik tanah yang bervariasi. Sebagian besar penelitian lebih berfokus pada proteksi di jaringan distribusi atau PLTS skala besar yang terintegrasi ke dalam grid nasional [11], [12], [13], sementara aspek proteksi terhadap gangguan arus lebih dan tegangan lebih pada sistem PLTS *off-grid* masih belum banyak dibahas. Hal ini menimbulkan tantangan dalam menentukan parameter teknis yang optimal untuk sistem proteksi PLTS di lingkungan spesifik seperti di Pondok Pesantren Yatim Dhuafa (PPYD) Al-Ikhlas.

Untuk mengisi kesenjangan tersebut, penelitian ini mengusulkan perancangan sistem proteksi dan pembumian yang disesuaikan dengan karakteristik PLTS berkapasitas 10 × 100 Wp di PPYD Al-Ikhlas. Sistem yang dirancang mencakup pemasangan elektroda pembumian dengan konfigurasi yang optimal guna menekan resistansi pembumian hingga nilai yang direkomendasikan dalam standar PUIL. Selain itu, penelitian ini juga menganalisis efektivitas sistem proteksi dalam menghadapi gangguan arus lebih dan tegangan lebih, baik yang disebabkan oleh kondisi operasional maupun faktor eksternal seperti sambaran petir.

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh gangguan arus lebih dan tegangan lebih terhadap PLTS di PPYD Al-Ikhlas, mengkaji metode proteksi yang dapat diterapkan untuk meningkatkan keamanan sistem, serta mengevaluasi performa sistem proteksi yang telah dirancang. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh solusi teknis yang dapat meningkatkan keandalan sistem PLTS skala kecil, serta menjadi referensi bagi pengembangan sistem proteksi dan pembumian pada instalasi PLTS di lokasi lain dengan karakteristik serupa.

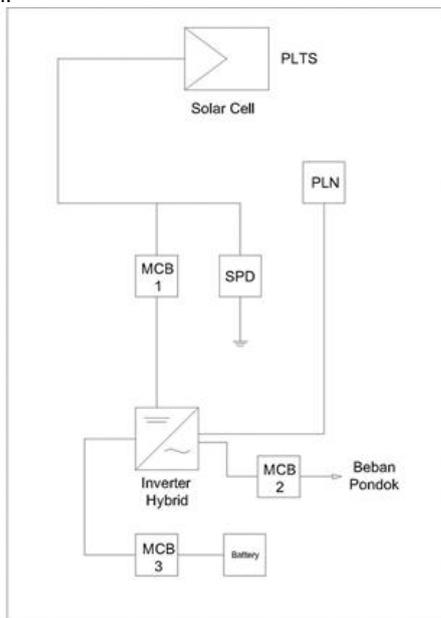
*Korespondensi: saddanidj@polinema.ac.id

a) Prodi Sistem Kelistrikan, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Malang, Indonesia

2. Metode

Penelitian ini menggunakan beberapa peralatan utama untuk melakukan pengukuran dan analisis sistem proteksi pada PLTS di PPYD Al-Ikhlas, Singosari, Kabupaten Malang. Peralatan yang digunakan harus memiliki akurasi tinggi serta sesuai dengan standar industri guna memastikan validitas data yang diperoleh. *Injection Current Tester* (Fluke 5500A) digunakan untuk menguji kinerja trip *Miniature Circuit Breaker* (MCB) dengan skala injeksi arus sesuai kurva karakteristik pabrikan. Digital Multimeter (Keysight U1253B, accuracy $\pm 0.05\%$) digunakan untuk mengukur kontinuitas *Surge Protection Device* (SPD) serta memastikan bahwa perangkat proteksi masih dalam kondisi operasional. *Earth Ground Tester* (Fluke 1625-2 GEO) digunakan untuk mengukur resistansi pembumian, yang menjadi parameter utama dalam menilai efektivitas sistem grounding pada PLTS. *Surge Protection Device* (Schneider Electric PRD40r) digunakan untuk perlindungan terhadap lonjakan tegangan akibat surja petir dan tegangan lebih sirkuit. SPD ini memiliki rating 40 kA dengan respon waktu < 25 ns, sehingga mampu meredam lonjakan tegangan secara cepat. MCB (ABB S202-C40, ABB S202-C16, ABB S202-C125) digunakan untuk proteksi arus lebih pada panel surya, inverter, dan baterai. *Grounding Rod* (Copper Bonded, Erico 5/8" x 3 m, resistansi $\leq 5 \Omega$) digunakan sebagai elektroda pembumian yang dikonfigurasi dalam sistem paralel guna meningkatkan efisiensi pembumian [14].

Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan dalam Gambar 1.1, yang menunjukkan skema sistem proteksi PLTS dengan komponen-komponen proteksi yang digunakan.



GAMBAR 2.1 BLOK DIAGRAM SISTEM PROTEKSI PLTS

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen lapangan dengan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis efektivitas sistem proteksi dan pembumian pada PLTS berkapasitas 10 × 100 Wp. Beberapa tahapan penelitian yang dilakukan meliputi pengambilan data, pengujian proteksi, dan analisis hasil menggunakan perangkat pengukuran yang telah disebutkan sebelumnya.

2.1 Desain Penelitian

Penelitian ini dirancang untuk menguji dan menganalisis sistem

proteksi listrik, dengan fokus pada tiga aspek utama yaitu evaluasi kinerja MCB dalam melindungi sistem dari arus lebih, pengujian SPD dalam meredam lonjakan tegangan akibat petir atau gangguan eksternal lainnya, dan analisis resistansi pembumian guna menentukan efektivitas grounding dalam menyalurkan arus gangguan ke bumi.

2.2 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui serangkaian langkah sistematis yang dijelaskan dalam algoritma berikut.

1. Pengumpulan data awal meliputi kegiatan:
 - o menganalisis sistem proteksi yang telah diterapkan di lokasi PLTS PPYD Al-Ikhlas; dan
 - o melakukan pengukuran awal terhadap nilai resistansi pembumian menggunakan Fluke 1625-2 GEO.
2. Pengujian kinerja MCB dengan cara:
 - o menggunakan *Injection Current Tester* Fluke 5500A untuk menginjeksikan arus ke MCB DC 40A, MCB AC 16A, dan MCB DC 125A;
 - o mengamati karakteristik trip dari masing-masing MCB berdasarkan standar IEC 60898-1; dan
 - o menentukan MCB berfungsi sesuai spesifikasi atau mengalami pelepasan arus melebihi kapasitas nominalnya.
3. Pengujian SPD, antara lain:
 - o menggunakan Digital Multimeter Keysight U1253B untuk mengukur kontinuitas SPD dan mendeteksi SPD masih aktif atau sudah mengalami kegagalan; dan
 - o menganalisis perubahan karakteristik SPD setelah simulasi gangguan lonjakan tegangan.
4. Pengujian resistansi pembumian dengan:
 - o menggunakan *Earth Ground Tester* Fluke 1625-2 GEO untuk mengukur resistansi pembumian sebelum dan sesudah pemasangan elektroda tambahan; dan
 - o menggunakan sistem paralel grounding rod, dengan konfigurasi 4 batang elektroda tembaga dengan jarak antar batang ≥ 2 meter untuk mencapai nilai resistansi $< 5 \Omega$.
5. Analisis data dilakukan dengan:
 - o menggunakan persamaan hubungan paralel elektroda pembumian untuk menghitung nilai resistansi total;
 - o membandingkan hasil pengukuran resistansi pembumian dengan standar PUIL 2011; dan
 - o menganalisis efektivitas sistem proteksi berdasarkan nilai resistansi pembumian, kinerja MCB, dan kontinuitas SPD.

Teknik analisis yang diterapkan dalam penelitian ini meliputi: analisis eksperimental dengan menggunakan data hasil pengujian untuk menilai performa komponen proteksi berdasarkan parameter kelistrikan; analisis statistik deskriptif yang digunakan untuk memahami pola data dan distribusi nilai resistansi pembumian sebelum dan sesudah pemasangan elektroda tambahan, hasil pengukuran dibandingkan dengan standar PUIL 2011, IEC 60898-1, dan IEC 60364 guna memastikan kesesuaian sistem proteksi dengan regulasi yang berlaku; dan simulasi MATLAB untuk mensimulasikan dampak perubahan resistansi pembumian terhadap aliran arus gangguan. Dengan pendekatan yang sistematis ini, penelitian ini dapat menghasilkan evaluasi yang komprehensif terhadap sistem proteksi PLTS, serta memberikan rekomendasi yang dapat digunakan dalam pengembangan sistem proteksi listrik di masa depan.

3. Hasil dan Pembahasan

Berikut merupakan hasil perencanaan dan pengujian sistem proteksi PLTS di PPDYD AL-Ikhlis, Singosari, Kabupaten Malang. Nama peralatan dan spesifikasi sistem PLTS ditunjukkan pada Tabel 3.1.

TABEL 3.1 PERALATAN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA 10 x 100WP

Komponen	Spesifikasi
Solar cell	100 W 17 V 5,8 A
MCB 1	DC 40A
MCB 2	AC 16A
MCB 3	DC 125A
Inverter	24 V 2400 W
Baterai	12 V 100Ah 4 unit
SPD	DC 20 kA

3.1 Rating MCB DC Output Panel Surya

Perhitungan rating MCB DC *output* panel surya dilakukan dengan mengkalikan arus hubung singkat (I_{sc}) dengan 115% [15] menghasilkan nilai rating MCB sebesar 36,225 A. Maka, MCB yang dipilih di pasaran yaitu MCB 40 A. Spesifikasi teknis lainnya antara lain:

rating tegangan : 440 V;
rating arus : 40A;
jumlah kutub : 2P;
breaking capacity : 6 kA;
merk : TOMZN.

3.2 Rating MCB AC Output Inverter

Dari inverter terpakai didapatkan data $S = 2400$ VA dan $V = 220$ V sehingga $I = 10,92$ A. Maka rating MCB hasil perhitungan sebesar 12,5 A. Dengan memperhatikan hasil perhitungan tersebut, MCB yang dipilih di pasaran yaitu MCB 16 A. Spesifikasi teknis lainnya dari MCB sebagai berikut:

rating tegangan : 220 V;
rating arus : 16A;
jumlah kutub : 1P;
breaking capacity : 6 kA;
merk : Schneider.

3.3 Rating MCB DC Baterai

Perhitungan pengaman baterai menggunakan (3-1) sebagai berikut.

$$I_{max} = \frac{P_{total}}{tegangan\ sistem\ baterai} \quad (3-1)$$

Diperoleh nilai $I_{max} = \frac{1662\ W}{24\ V} = 69.25\ A$

Rating MCB diperoleh dengan menerapkan faktor pengali 115% di nilai I_{max} tersebut sehingga diperoleh 79,6375 A. Maka rating MCB yang dipilih di pasaran yaitu 100 A. Dengan Spesifikasi MCB DC Baterai sebagai berikut:

rating tegangan : 600 V;
rating arus : 100 A;
jumlah kutub : 2P;
breaking capacity : 10 kA;
merk : TOMZN.

3.4 Rating SPD

Persamaan (3-5) untuk menentukan rating *Surge Protection*

Device (SPD) AC.

$$V_{rating} = V_{OC} \times faktor\ kali \quad (3-2)$$

Jika diketahui V_{OC} adalah 46 V dengan faktor kali yaitu 1,2 maka $V_{rating} = 55,2$ V

Berdasarkan nilai luahan maksimal maka digunakan *SPD* 20 kA karena diasumsikan alat ini berada di bangunan lokasi perkotaan. Detil rating SPD digunakan antara lain:

rated voltage (U_n) : 1000V (DC);
nominal flow capacity (I_n) : 20 kA (KA8/20 μ s);
maximum flow capacity (I_{max}) : 40 kA (KA8/20 μ s);
protection level (U_p) : ≤ 3.0 kV (DC);
response time : 25 (ns);
leakage current 0.7 : ≤ 20 (μ A);
working temperature : -40~+80 ($^{\circ}$ C).

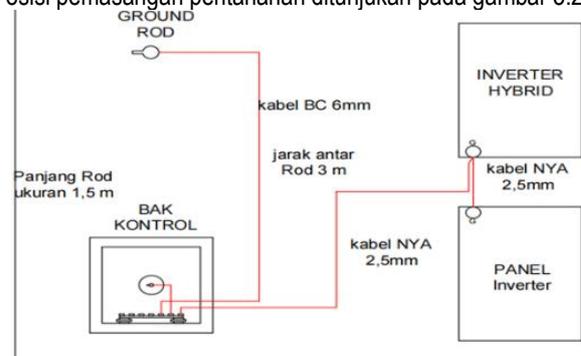
3.5 Penentuan Pentanahan

Pemasangan pentanahan awalnya sudah dilakukan dengan memproteksi body utama panel daya didapatkan nilai pentanahan sebesar 4 Ω [12] Namun, sistem proteksi pada peralatan yang lain belum terlindungi secara maksimal. Seperti halnya pada peralatan inverter, terminal *output* yang terdapat pada inverter khususnya terminal pentanahan memang sangat diperlukan. Batang elektroda dipasang secara paralel dengan batang yang sudah ada dengan panjang yang sama yakni 1,5 meter.

Metode pertama dilakukan dengan pemasangan satu arde namun nilainya belum memenuhi standar, kemudian metode ke dua dilakukan dengan menambah pemasangan arde rod lagi dengan panjang yang sama yakni 1,5 meter. Nilai resistansi batang elektroda dihitung menggunakan (3-2).

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} (\ln \frac{4L}{a} - 1) \quad (3-6)$$

Jika diketahui nilai $\rho = 16$ maka nilai resistansi sebesar 8,3 Ω . Posisi pemasangan pentanahan ditunjukkan pada gambar 3.2.



GAMBAR 3.1 DIAGRAM PEMASANGAN PENTANAHAN

3.6 Pengujian MCB

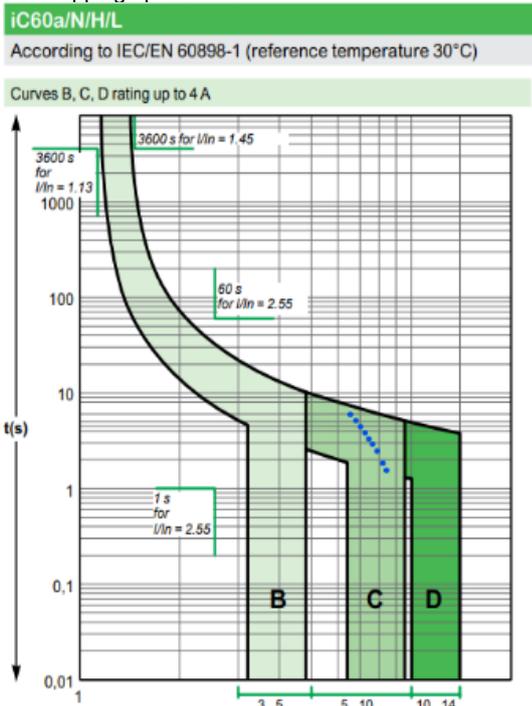
Hasil pengujian MCB 40 A dapat dilihat pada Tabel 3.2. Data hasil pengujian ini kemudian diverifikasi menggunakan kurva tripping MCB 40 A (Gambar 3.2). Hasil verifikasi menunjukkan bahwa garis biru putus-putus yang merupakan waktu pemutusan dari MCB 40 A yang digunakan di penelitian ini dan nilainya masih di dalam area kurva karakteristik tipe C.

TABEL 3.2 HASIL PENGUJIAN MCB 40 A

Arus	Waktu	Faktor Pengali
216 A	7 detik	5,4
225 A	6,6 detik	5,6
232 A	5,6 detik	5,8

240 A	5,4 detik	6
248 A	4,5 detik	6,2
256 A	4,2 detik	6,4
273 A	3,8 detik	6,8
280 A	3,2 detik	7
290 A	2,8 detik	7,2
296 A	2,5 detik	7,4

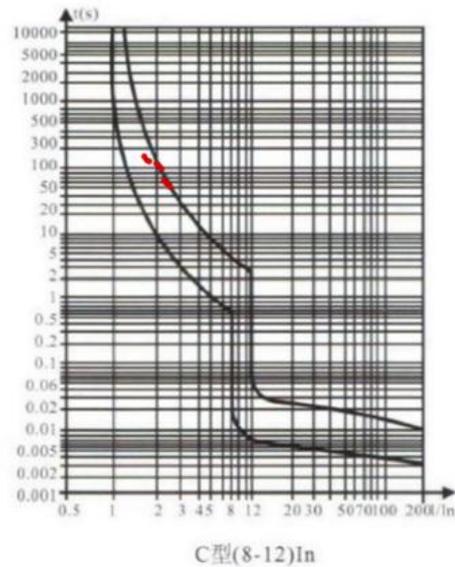
MCB 125 A yang digunakan sebagai pengaman sistem baterai, dilakukan pengujian dan data pengujian dapat dilihat pada Tabel 3.3. Data hasil pengujian ini diverifikasi menggunakan kurva tripping MCB 125 A (Gambar 3.3). Hasil verifikasi menunjukkan bahwa garis merah putus-putus yang merupakan waktu pemutusan dari MCB 125 A pada penelitian ini dan nilainya masih di dalam area kurva tripping optimal MCB.



GAMBAR 3.2 KURVA TRIPPING MCB 40 A

TABEL 3.3 HASIL PENGUJIAN MCB 125 A

Arus	Waktu	Faktor Pengali
220 A	185 detik	1,75
230 A	170 detik	1,825
235 A	150 detik	1,875
250 A	115 detik	2
255 A	110 detik	2,05
265 A	105 detik	2,125
280 A	70 detik	2,25
290 A	62 detik	2,325
305 A	59 detik	2,425
310 A	56 detik	2,5

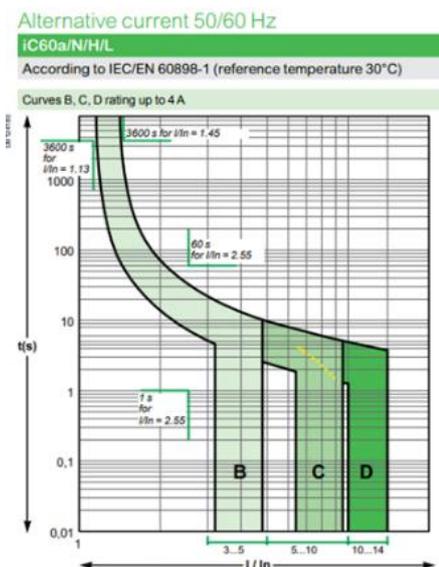


GAMBAR 3.3 KURVA TRIPPING MCB 125 A

Hasil pengujian MCB 16 A yang digunakan sebagai pengaman sistem baterai ditunjukkan pada Tabel 3.4. Pada gambar 3.5 garis biru putus-putus menunjukkan hasil percobaan tripping dengan data yang sudah dicantumkan pada table diatas dan menunjukkan data masih dalam kurva tripping optimal MCB.

TABEL 3.4 HASIL PENGUJIAN MCB 16 A

Arus	Waktu	Faktor Pengali
80 A	4 detik	5
88 A	3,4 detik	5,5
100 A	3,2 detik	6,2
104 A	3 detik	6,5
109 A	2,7 detik	6,8
112 A	2,5 detik	7
116 A	2,2 detik	7,2
120 A	2 detik	7,5
126 A	1,7 detik	7,9
128 A	1,5 detik	8

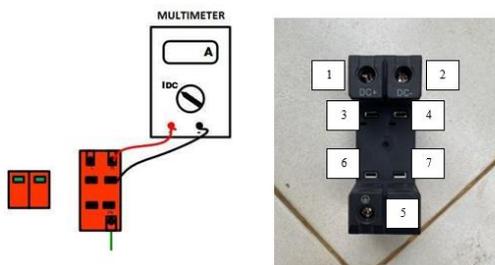


GAMBAR 3.4 KURVA TRIPPING MCB 125 A

3.7 SPD

Pengujian SPD dilakukan tanpa menggunakan arus dan dilakukan untuk mengetahui apakah SPD tersebut dalam kondisi baik dan layak untuk digunakan [13]. SPD menggunakan alat ukur multimeter dengan metode pengujian kontinuitas seperti pada Gambar 3.5 dan berikut adalah langkah pengujian SPD antara lain:

1. hubungkan track 1 ke track 3 untuk memastikan jalur terhubung. Jika tidak terhubung, komponen SPD rusak dan tidak layak digunakan.
2. Hubungkan track 2 ke track 4. Jika meter ohm menunjukkan angka, jalur masih normal. Jika track 1 ke track 4 terhubung dan meter ohm menunjukkan angka, SPD tidak layak digunakan karena perbedaan kutub positif dan negatif.
3. Hubungkan track 5 ke track 7, lalu track 5 ke track 6 untuk mengecek tahanan jalur grounding. Jika normal, SPD masih layak digunakan.
4. Catridge adalah komponen penting dalam SPD, dan pengujian dilakukan dengan menghubungkan jalur pada catridge. Jika meter ohm menunjukkan angka, catridge masih normal dan bisa digunakan [14].



GAMBAR 3.5 PENGUJIAN SPD

3.8 Grounding Pentanahan

Hasil pengukuran yang dilakukan pada percobaan menunjukkan hasil pengukuran resistansi tanah tanpa pemasangan grounding rod menunjukkan hasil 12 Ohm dan 6 Ohm dengan jenis tanah basah. Pemasangan grounding dalam sistem kelistrikan sangat penting untuk keamanan, kinerja, dan perlindungan peralatan. Oleh karena itu, direncanakan pemasangan hingga memenuhi standar. Pengukuran untuk pemasangan sebuah batang elektrode memberikan hasil seperti pada Gambar 3.6. Hasil pengujian pada Gambar 3.6 menunjukkan nilai 6 Ω untuk sebuah batang elektrode menggunakan Earth Tester Kyoritsu model 4105 A. Nilai ini tidak sesuai dengan standar sistem grounding (0-5 Ω), sehingga 1 arde tersebut belum cukup efektif untuk membuang kebocoran tegangan atau arus ke tanah.



GAMBAR 3.6 PENGUKURAN TAHANAN PENTANAHAN DENGAN SEBUAH ELEKTRODE

Pada tahapan kedua di lakukan pengukuran dua unit batang elektrode dengan panjang dan jenis yang sama serta dilakukan penyambungan kabel BC dari arde pertama menuju arde kedua dan dirangkai secara paralel. Pada Gambar 3.7 didapatkan hasil pengujian pada 2 arde elektrode batang dengan alat ukur Earth Tester Kyoritsu model 4105 A mendapatkan nilai 4 Ω. Dimana hasil ini masih sudah sesuai standart sistem grounding yaitu 0-5 Ω.



GAMBAR 3.7 PENGUKURAN TAHANAN PENTANAHAN DENGAN DUA ELEKTRODE PARALEL

Tabel 3.5 menunjukkan perbandingan nilai resistansi pentanahan pada kedalaman dan jumlah batang yang berbeda. Berdasarkan Tabel 3.5, resistansi tanah dengan satu rod adalah 6,6 Ω, yang tidak memenuhi standar PUIL 2020 (>5 Ω). Setelah pemasangan rod kedua secara paralel, resistansi turun menjadi 4 Ω, memenuhi standar PUIL 2020 (kurang dari 5 Ω). Hal ini menunjukkan bahwa sistem grounding di lokasi sudah efektif membuang arus dan tegangan lebih, sehingga peralatan elektronik dan faktor humanity terjamin.

TABEL 3.5 HASIL PERBANDINGAN PERHITUNGAN TAHANAN PEMBUMIHAN

Kedalaman Batang Grounding (m)	Jumlah Batang (Ω)	
	1	2
1	13	6,5
1,5	8,3	4,1
2	6,6	3,3

4. Kesimpulan

Penelitian ini membahas implementasi sistem proteksi arus lebih dan tegangan lebih pada PLTS 10 × 100 Wp di PPDY Al-Ikhlash, Singosari, Kabupaten Malang. Dengan meningkatnya penggunaan energi terbarukan, sistem proteksi yang andal sangat diperlukan untuk memastikan keamanan dan keandalan operasi PLTS. Proteksi ini berperan penting dalam mencegah kerusakan peralatan akibat gangguan listrik, serta memitigasi risiko terhadap keselamatan manusia dan lingkungan sekitar.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan MCB, SPD, dan sistem pentanahan secara signifikan meningkatkan perlindungan sistem PLTS dari gangguan arus lebih dan tegangan lebih. Pengujian MCB membuktikan bahwa karakteristik trip perangkat ini sesuai dengan standar IEC 60898-1, menunjukkan kemampuannya dalam memutus aliran listrik saat terjadi arus berlebih. SPD yang diuji juga terbukti efektif dalam meredam lonjakan tegangan akibat surja petir, sementara sistem pentanahan dengan konfigurasi elektroda paralel berhasil menurunkan

resistansi hingga di bawah 5 Ω , sesuai dengan standar PUIL 2020.

Penelitian ini sejalan dengan studi sebelumnya mengenai sistem proteksi kelistrikan dan pembumian pada instalasi tenaga listrik. Hasil penelitian mendukung temuan bahwa kombinasi perangkat proteksi dan sistem pentanahan yang optimal mampu meningkatkan keamanan sistem tenaga listrik [10]. Namun, penelitian ini juga menunjukkan bahwa implementasi sistem proteksi pada PLTS skala kecil masih sering diabaikan, terutama dalam aspek konfigurasi grounding yang efektif dan pemilihan kapasitas MCB yang sesuai dengan karakteristik sistem.

Meskipun penelitian ini berhasil mengatasi beberapa kendala dalam proteksi PLTS skala kecil, masih terdapat ruang untuk pengembangan lebih lanjut. Salah satu aspek yang dapat dikaji di masa mendatang adalah penggunaan teknologi monitoring berbasis Internet of Things (IoT) untuk pemantauan real-time terhadap sistem proteksi. Selain itu, penelitian lebih lanjut dapat dilakukan untuk mengoptimalkan konfigurasi pentanahan di lingkungan dengan resistivitas tanah yang tinggi. Dengan demikian, penelitian ini dapat menjadi dasar bagi pengembangan sistem proteksi yang lebih canggih dan adaptif untuk PLTS di berbagai kondisi lingkungan.

Referensi

- [1] T. Wang, "Research on the Construction of Power System Relay Protection Course System in Electrical Engineering Discipline," *J. Educ. Educ. Res.*, vol. 10, no. 2, pp. 240–244, Sep. 2024, doi: 10.54097/5ZQAQH37.
- [2] N. A. F. M. Nasir *et al.*, "Impact of Earthing System Designs and Soil Characteristics on Tower Footing Impedance and Ground Potential Rise: A Modelling Approach for Sustainable Power Operation," *Sustain.* 2021, Vol. 13, Page 8370, vol. 13, no. 15, p. 8370, Jul. 2021, doi: 10.3390/SU13158370.
- [3] E. Shulzhenko, R. Brocke, M. Hannig, and J. Puttkammer, "Efficiency of the earthing system in a large-scale solar power plant during lightning," *APL 2023 - 12th Asia-Pacific Int. Conf. Light.*, 2023, doi: 10.1109/APL57308.2023.10181936.
- [4] Corio Dean, "Pentanahan Menggunakan Elektroda Batang dan Elektroda Mesh dengan Penambahan Bentonit dan Garam Murni (NaCl), Studi Kasus ITERA," *Electr. J. Rekayasa dan Teknol. Elektro* 13.3, pp. 75–80, 2019.
- [5] P. Penambahan Material Asbes Dan Gypsum Dengan Campuran NaCl Dan Arang Untuk Mereduksi Resistansi Pentanahan Aplikasi, B. Besar Pengembangan Penjaminan Mutu Pendidikan Vokasi Bidang Bangunan Listrik Medan Hefri Yuliadi, and S. Hardi, "Perbandingan Penambahan Material Asbes Dan Gypsum Dengan Campuran NaCl Dan Arang Untuk Mereduksi Resistansi Pentanahan (Aplikasi: Balai Besar Pengembangan Penjaminan Mutu Pendidikan Vokasi Bidang Bangunan Listrik Medan)," *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 5, no. 1, pp. 16–23, Jul. 2022, doi: 10.30596/RELE.V5I1.10785.
- [6] T. Siahaan and S. Laia, "Studi pembumian peralatan dan sistem instalasi listrik pada gedung kantor bictpt. pelindo i (persero) belawan," *J. Teknol. Energi Uda J. Tek. Elektro*, vol. 8, no. 2, pp. 96–101, 2019.
- [7] N. Nurdiana, A. Nurdin, D. Aditya, and P. Yoga, "PENGARUH KEDALAMAN TERHADAP TAHANAN PENTANAHAN DI AREA RUSUNAWA KAMPUS UNIVERSITAS PGRI PALEMBANG," *J. Ampere*, vol. 4, no. 2, pp. 327–332, Jan. 2019, doi: 10.31851/AMPERE.V4I2.3453.
- [8] J. Jamaaluddin and S. Sumarno, "Perencanaan Sistem Pentanahan Tenaga Listrik Terintegrasi Pada Bangunan," *JEEE-U (Journal Electr. Electron. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 29–33, Apr. 2017, doi: 10.21070/jeee-u.v1i1.375.
- [9] E. Widiarto, A. Adiwismono, E. Triyani, S. Tebe Nursaputro, J. H. Teknik Elektro Politeknik Negeri Semarang Jl Soedarto, and S. Tembalang Semarang, "PERBAIKAN NILAI IMPEDANSI PEMBUMIAN METODE DRIVEN GROUND PADA TOWER TEGANGAN TINGGI DENGAN PENAMBAHAN BATANG ELEKTRODA (BRACHING) DAN COCOPEAT," *Orbith Maj. Ilm. Pengemb. Rekayasa dan Sos.*, vol. 19, no. 2, pp. 176–186, Sep. 2023, doi: 10.32497/ORBITH.V19I2.5001.
- [10] F. Kolor, E. D. Markus, and W. M. Apprey, "A heuristic approach to effective grounding in Africa," pp. 1–5, Nov. 2018, doi: 10.23919/DUE.2018.8543118.
- [11] G. A. Ibrahimusa, J. Joko, T. Wrahatnolo, and A. I. Agung, "Analisis Koordinasi Setting Relay Proteksi Pada Jaringan Distribusi 20 kV di PT. PLN UP3 Kediri Gardu Induk Pare," *J. Tek. ELEKTRO*, vol. 12, no. 1, pp. 28–36, Jan. 2023, doi: 10.26740/JTE.V12N1.P28-36.
- [12] G. R. IRIANDO and A. I. AGUNG, "STUDI KOORDINASI SISTEM PROTEKSI PADA TRANSFORMATOR 20KV DI JARINGAN DISTRIBUSI 20KV PENYULANG BANDILAN," *J. Tek. ELEKTRO*, vol. 8, no. 3, Jul. 2019, doi: 10.26740/JTE.V8N3.P.
- [13] H. D. Paminto and A. Kiswanto, "RANCANG SIMULASI SISTEM OVER CURRENT RELAY PADA JARINGAN DISTRIBUSI 20KV.," *Aisyah J. Informatics Electr. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 45–49, Feb. 2021, doi: 10.30604/JTI.V3I1.50.
- [14] B. Krishna, T. Haryono, and B. Sugiyantoro, "Perbaikan Sistem Pentanahan pada Gedung Listrik Politeknik Negeri Semarang," *Jtet*, vol. 5, pp. 32–40, 2016.
- [15] R. R. Wahyudin, R. S. Lubis, and S. Syahrizal, "TINJAUAN INSTALASI LISTRIK DI GEDUNG B FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS SYIAH KUALA," *J. Komputer, Inf. Teknol. dan Elektro*, vol. 8, no. 3, p. 2023, Dec. 2023, doi: 10.24815/KITEKTRO.V8I3.33951.