

Analisis Kinerja Isolasi Kabel XLPE 20 kV pada Tahap Commissioning Menggunakan DC Hipot

I Ketut Somantara

*Program Studi Teknik Elektro, Sekolah Tinggi Teknologi Duta Bangsa
Kalibaru Timur Kel. Kalibaru Medan Satria Kota Bekasi*

Email : kt.poman69@gmail.com

Abstrak— Pengujian kekuatan isolasi pada kabel tegangan menengah merupakan tahapan krusial dalam proses commissioning sebelum sistem distribusi diberi tegangan operasi. Penelitian ini menganalisis kinerja isolasi kabel XLPE 20 kV tipe N2XSY 1×240 mm² sepanjang 788 m per fasa menggunakan metode DC Hipot 36 kV selama 4 menit. Parameter yang dianalisis meliputi arus bocor tiap menit serta nilai tahanan isolasi sebelum dan sesudah pengujian. Hasil pengukuran menunjukkan arus bocor stabil pada rentang 0,5–0,9 µA tanpa indikasi breakdown. Nilai arus bocor ekuivalen sebesar 1,14 µA/km masih berada dalam batas aman berdasarkan praktik pengujian kabel tegangan menengah. Tahanan isolasi tetap berada di atas 200 MΩ setelah pengujian, menunjukkan tidak terjadi degradasi signifikan akibat stress tegangan. Hasil ini menegaskan bahwa metode DC Hipot efektif dalam memverifikasi kelayakan operasi awal kabel distribusi industri.

Kata kunci: DC Hipot, Kabel XLPE 20 kV, Commissioning, Leakage Current, Insulation Performance

Abstract – Insulation strength testing of medium-voltage cables is a critical stage in the commissioning process prior to system energization. This study evaluates the insulation performance of a 20 kV XLPE cable (N2XSY 1×240 mm²) with a length of 788 m per phase using a 36 kV DC Hipot test applied for 4 minutes. The analyzed parameters include minute-by-minute leakage current and insulation resistance values before and after testing. The results indicate stable leakage currents within the range of 0.5–0.9 µA with no breakdown occurrence. The equivalent leakage current of 1.14 µA/km remains within acceptable limits for medium-voltage cable testing practices. Post-test insulation resistance values remained above 200 MΩ, indicating no significant dielectric degradation due to voltage stress. These findings confirm the effectiveness of DC Hipot testing in verifying the initial operational readiness of industrial distribution cables.

Keywords: DC Hipot, XLPE Cable, Commissioning, Leakage Current, Insulation Analysis

1. PENDAHULUAN

Kabel tegangan menengah (20 kV) berperan penting dalam sistem distribusi tenaga listrik industri karena menentukan kontinuitas operasi dan keselamatan instalasi. Kegagalan isolasi pada tahap awal operasi dapat menyebabkan gangguan sistem, downtime produksi, serta kerugian finansial yang signifikan. Oleh karena itu, sebelum dilakukan energizing, diperlukan pengujian isolasi untuk memastikan kabel dalam kondisi layak operasi.

Salah satu metode yang umum digunakan pada tahap commissioning adalah pengujian DC High Potential (Hipot). Metode ini memberikan tegangan lebih (overvoltage) pada kabel dalam periode waktu tertentu untuk memverifikasi kekuatan dielektrik isolasi. Selain itu, pengukuran tahanan isolasi menggunakan insulation resistance tester (Megger) sering digunakan sebagai verifikasi awal kondisi isolasi.

Meskipun pengujian DC Hipot telah lama diterapkan dalam praktik industri, sebagian besar laporan pengujian hanya bersifat administratif (lulus atau tidak lulus) tanpa analisis kuantitatif terhadap stabilitas arus bocor dan implikasinya terhadap margin keamanan dielektrik. Padahal, karakteristik arus bocor selama penahanan tegangan dapat memberikan informasi penting mengenai kondisi isolasi, khususnya pada kabel baru tahap commissioning.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja isolasi kabel XLPE 20 kV sepanjang 788 m per fasa menggunakan pengujian DC Hipot 36 kV. Analisis dilakukan terhadap stabilitas arus bocor, estimasi arus bocor per kilometer, serta perubahan nilai tahanan isolasi sebelum dan sesudah pengujian. Kontribusi penelitian ini terletak pada pendekatan evaluasi kuantitatif berbasis data lapangan commissioning industri, sehingga tidak hanya berfungsi sebagai laporan pengujian, tetapi sebagai dasar analisis teknis kelayakan operasi awal kabel distribusi tegangan menengah.

Evaluasi kuantitatif pada tahap commissioning berperan sebagai baseline untuk pemeliharaan prediktif sistem distribusi [12].

2. TINJAUAN LITERATUR

2.1 Kabel Tegangan Menengah XLPE 20 kV

Kabel tegangan menengah 20 kV umumnya menggunakan isolasi XLPE (Cross-Linked Polyethylene) karena memiliki kekuatan dielektrik tinggi, stabilitas termal yang baik, serta rugi-rugi dielektrik rendah. Struktur kabel tipe N2XSJY terdiri dari konduktor tembaga, lapisan semi-konduktif dalam, isolasi XLPE, lapisan semi-konduktif luar, metallic screen, dan sheath pelindung luar.

Kekuatan dielektrik XLPE secara umum berada pada rentang 20–30 kV/mm, sehingga mampu menahan tegangan kerja kontinu maupun tegangan lebih dalam batas tertentu. Pada tahap commissioning, pengujian diperlukan untuk

memastikan tidak terdapat cacat produksi, kerusakan mekanik saat instalasi, maupun kelembaban pada terminasi.

2.2 Prinsip Pengujian DC Hipot

Pengujian DC High Potential (Hipot) merupakan metode pemberian tegangan lebih (overvoltage) dalam bentuk DC pada kabel untuk memverifikasi kemampuan isolasi menahan stress listrik tertentu. Berdasarkan praktik umum pengujian kabel tegangan menengah, tegangan uji biasanya berada pada rentang 1,5–2 kali tegangan nominal.

Secara umum:

$$V_{test} = k \times V_{rated}$$

Untuk kabel 20 kV dengan faktor 1,8:

$$V_{test} \approx 36 \text{ kV}$$

Selama penahanan tegangan, arus yang terukur merupakan kombinasi arus kapasitif dan arus bocor resistif. Pada menit-menit awal, arus cenderung lebih tinggi akibat pengisian kapasitif, kemudian akan stabil pada kondisi steady-state resistif jika isolasi dalam kondisi baik.

2.3 Arus Bocor dan Evaluasi Kinerja Isolasi

Arus bocor (leakage current) merupakan parameter utama dalam evaluasi kinerja isolasi selama pengujian DC Hipot. Besarnya arus bocor dipengaruhi oleh:

- Panjang kabel
- Kondisi material isolasi
- Kelembaban
- Tegangan uji
- Temperatur lingkungan

Jadi arus bocor per km :

$$I_{km} = \frac{I_{measured}}{L}$$

$$I_{km} = \frac{0.9}{0.788} = 1.14 \mu A/km$$

Hubungan dasar antara tegangan dan arus mengikuti hukum Ohm:

$$R = \frac{V}{I}$$

$$R = \frac{36000}{0.9 \times 10^{-6}}$$

$$R \approx 40 \text{ G}\Omega$$

Nilai tahanan isolasi yang tinggi menunjukkan kualitas isolasi yang baik. Dalam praktik lapangan, stabilitas arus bocor selama periode penahanan tegangan lebih penting dibanding nilai sesaat. Arus yang meningkat secara progresif dapat mengindikasikan degradasi atau potensi partial discharge.

2.4 Penelitian Terkait

Beberapa penelitian sebelumnya membahas evaluasi kondisi isolasi kabel tegangan menengah menggunakan metode DC Hipot maupun Very Low Frequency (VLF). Sebagian besar studi menekankan pada analisis breakdown atau degradasi kabel lama. Namun, kajian berbasis data commissioning kabel baru dengan pendekatan kuantitatif terhadap arus bocor per satuan panjang kabel masih relatif terbatas, khususnya pada konteks instalasi industri.

Stabilitas arus bocor selama penahanan tegangan merupakan indikator penting kondisi isolasi kabel XLPE [8], [10]. Beberapa studi juga menunjukkan bahwa perbandingan metode DC dan VLF memberikan perspektif berbeda terhadap deteksi degradasi awal [9].

Studi terbaru menunjukkan bahwa karakteristik arus bocor pada kabel XLPE di bawah stress DC berkorelasi dengan distribusi muatan ruang dan stabilitas konduksi resistif steady-state [13]. Analisis lanjutan berbasis variasi arus bocor juga dapat digunakan sebagai indikator awal kondisi isolasi [14]. Selain itu, perbandingan metode DC dan VLF dalam diagnosis kabel tegangan menengah menunjukkan bahwa interpretasi hasil pengujian harus mempertimbangkan karakteristik material dan kondisi aplikasi [15].

Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada analisis stabilitas arus bocor dan evaluasi perubahan nilai tahanan isolasi pada tahap commissioning kabel baru, sehingga memberikan perspektif tambahan dalam verifikasi kelayakan operasi awal sistem distribusi tegangan menengah.

Sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada diagnosis degradasi kabel aging menggunakan DC atau VLF testing. Penelitian berbasis data commissioning kabel baru dengan pendekatan analisis leakage current per satuan panjang kabel dan stabilitas arus bocor masih terbatas. Oleh karena itu penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut melalui evaluasi kuantitatif pada kabel XLPE 20 kV tahap commissioning industri.

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Objek Penelitian

Objek penelitian adalah kabel tegangan menengah tipe N2XSY 1×240 mm² dengan isolasi XLPE dan tegangan nominal 20 kV. Kabel dipasang pada sistem distribusi industri dan diuji pada tahap commissioning sebelum dilakukan energizing.

Panjang total kabel yang dipasang adalah 2.364 meter, yang terdiri dari tiga single core untuk fasa R, S, dan T. Dengan demikian, panjang kabel per fasa adalah ±788 meter.

3.2 Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan dalam dua tahap utama:

1. Pengujian Tahanan Isolasi (IR Test)

- Tegangan uji: 5 kV DC
- Waktu pengujian: 60 detik
- Pengukuran dilakukan antar fasa ke ground
- Nilai dicatat sebelum dan sesudah pengujian Hipot

2. Pengujian DC Hipot

- Tegangan uji: 36 kV DC
- Durasi penahanan: 4 menit
- Pengamatan arus bocor dilakukan tiap menit
- Tidak terjadi breakdown selama pengujian

3.3 Parameter yang Dianalisis

Parameter utama yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi:

1. Nilai arus bocor (μA) tiap menit
2. Stabilitas arus selama periode penahanan
3. Perhitungan arus bocor ekuivalen per kilometer
4. Perbandingan nilai tahanan isolasi sebelum dan sesudah pengujian

Perhitungan arus bocor per kilometer dilakukan dengan:

$$I_{km} = \frac{I_{measured}}{L}$$

di mana:

= arus bocor terukur (μA)
= panjang kabel (km)

Penurunan IR pasca pengujian dapat dikaitkan dengan efek polarisasi dan akumulasi muatan ruang (space charge) pada isolasi XLPE di bawah stress DC [11].

3.4 Metode Analisis

Data dianalisis secara deskriptif-kuantitatif dengan pendekatan:

- Evaluasi tren arus bocor terhadap waktu
- Estimasi arus bocor per km sebagai indikator kualitas isolasi
- Evaluasi perubahan tahanan isolasi sebelum dan sesudah pengujian
- Interpretasi hasil berdasarkan praktik umum pengujian kabel tegangan menengah

Analisis difokuskan pada verifikasi kinerja isolasi kabel baru pada tahap commissioning serta implikasinya terhadap kelayakan operasi awal sistem distribusi industri.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Tahanan Isolasi (IR Test)

Pengujian tahanan isolasi dilakukan menggunakan tegangan 5 kV DC selama 60 detik sebelum dan sesudah pengujian DC Hipot.

Tabel 1. Hasil Pengujian Tahanan Isolasi

Fasa	IR Sebelum Hipot (MΩ)	IR Sesudah Hipot (MΩ)
R–G	285,6	219,5
S–G	875,6	279,6
T–G	971,6	999,6

Analisis Perubahan IR

Terjadi penurunan nilai IR pada fasa R dan S setelah pengujian Hipot, namun seluruh nilai tetap berada di atas 200 MΩ. Secara teknis, penurunan ini dapat dikaitkan dengan efek polarisasi dan redistribusi muatan dalam material isolasi akibat stress tegangan DC 36 kV.

Pada material XLPE, penerapan tegangan DC tinggi dapat menyebabkan akumulasi muatan ruang (space charge) sementara yang mempengaruhi resistansi terukur setelah pengujian. Namun, karena nilai IR tetap tinggi dan tidak menunjukkan penurunan drastis di bawah batas praktik umum (>100 MΩ untuk commissioning), maka tidak terdapat indikasi degradasi permanen.

Hal ini menunjukkan bahwa perubahan IR yang terjadi bersifat sementara dan tidak mencerminkan kerusakan struktural isolasi.



Gambar1. Peralatan DC Hipot yang digunakan pada pengujian isolasi kabel tegangan menengah



Gambar 2. Koneksi pengujian DC Hipot pada terminasi kabel tegangan menengah

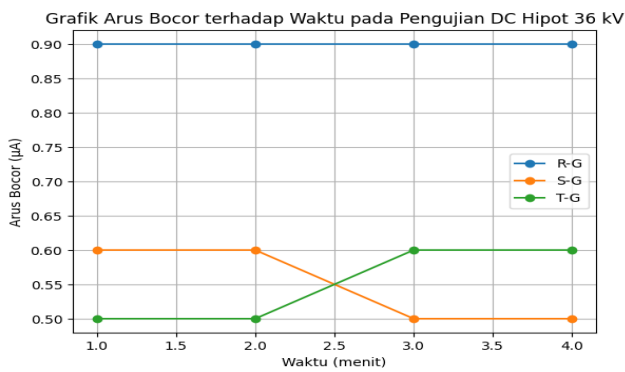
4.2 Hasil Pengujian DC Hipot 36 kV

Pengujian DC Hipot dilakukan pada tegangan 36 kV selama 4 menit. Arus bocor dicatat setiap menit.

Tabel 2. Data Arus Bocor Selama Pengujian

Waktu (menit)	R–G (μA)	S–G (μA)	T–G (μA)
1	0,9	0,6	0,5
2	0,9	0,6	0,5
3	0,9	0,5	0,6
4	0,9	0,5	0,6

4.3 Analisis Stabilitas Arus Bocor



Gambar 3. Grafik Arus Bocor terhadap Waktu

Grafik menunjukkan bahwa arus bocor relatif stabil selama periode penahanan 4 menit. Tidak terdapat tren kenaikan progresif maupun lonjakan mendadak.

Secara fisika dielektrik, kondisi ini menunjukkan bahwa mekanisme konduksi didominasi oleh arus resistif steady-state setelah fase pengisian kapasitif awal. Tidak adanya peningkatan arus mengindikasikan bahwa tidak terjadi pembentukan jalur ionisasi mikro atau partial breakdown dalam isolasi XLPE.

Pada kabel dengan cacat internal atau kelembaban residual, arus bocor biasanya menunjukkan tren meningkat akibat pemanasan lokal atau proses ionisasi bertahap. Pola tersebut tidak ditemukan pada hasil pengujian ini.

4.4 Perhitungan Arus Bocor per Kilometer

Panjang kabel per fasa:

$$L = 788 \text{ m} = 0,788 \text{ km}$$

Arus bocor maksimum:

$$I_{max} = 0,9 \text{ } \mu\text{A}$$

$$I_{km} = \frac{0,9}{0,788}$$

$$I_{km} \approx 1,14 \text{ } \mu\text{A/km}$$

Nilai ini tergolong sangat rendah untuk pengujian DC Hipot kabel tegangan menengah dan menunjukkan kualitas isolasi yang sangat baik. Secara praktik lapangan, arus bocor di bawah 2–5 $\mu\text{A/km}$ umumnya masih dianggap aman pada tahap commissioning.

Pendekatan normalisasi terhadap panjang kabel memberikan evaluasi yang lebih objektif dibanding hanya melihat nilai arus absolut.

4.5 Evaluasi Margin Tegangan dan Implikasi Operasional

Tegangan nominal kabel:

$$V_{rated} = 20 \text{ kV}$$

Tegangan uji:

$$V_{test} = 36 \text{ kV}$$

$$Margin = \frac{36}{20} = 1,8$$

Margin sebesar 1,8 kali tegangan nominal menunjukkan bahwa kabel telah mengalami stress listrik yang signifikan sebelum dioperasikan. Ketiadaan breakdown pada kondisi ini

memberikan indikasi bahwa isolasi memiliki ketahanan dielektrik yang memadai terhadap tegangan operasi normal.

Implikasi praktisnya adalah risiko kegagalan awal (early failure) setelah energizing menjadi rendah, sehingga keputusan pengoperasian sistem dapat dilakukan dengan tingkat kepercayaan yang lebih tinggi.

4.6 Diskusi Komprehensif

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kabel XLPE 20 kV sepanjang 788 m per fasa dalam kondisi baru commissioning memiliki performa isolasi yang stabil dan berada dalam batas aman.

Kontribusi utama penelitian ini bukan sekadar menyatakan kelulusan pengujian, tetapi menunjukkan bahwa:

1. Analisis arus bocor per satuan panjang memberikan parameter evaluasi kuantitatif.
2. Stabilitas arus bocor lebih informatif dibanding nilai akhir semata.
3. Perubahan IR pasca Hipot perlu dianalisis secara fisik, bukan langsung diasumsikan sebagai degradasi.

Pendekatan ini memperkuat bahwa pengujian commissioning bukan hanya prosedur administratif, melainkan bagian dari evaluasi teknis berbasis data yang dapat digunakan sebagai referensi baseline untuk pemeliharaan prediktif di masa mendatang.

4.7 Analisis Statistik Arus Bocor

Untuk memperkuat evaluasi kuantitatif, dilakukan analisis statistik sederhana terhadap arus bocor tiap fasa selama periode penahanan tegangan.

Phase R

Waktu (menit)	Arus Bocor (μA)
1	0.9
2	0.9
3	0.9
4	0.9

Rata – rata arus bocor (μ) = 0,9 μA

Standar deviasi (σ) = 0

Coefisien variasi (CV) = 0%

Phase S

Waktu (menit)	Arus Bocor (μA)
1	0.6
2	0.6
3	0.5
4	0.6

Rata – rata arus bocor (μ) ≈ 0,55μA
Standar deviasi (σ) ≈ 0,05μA
Coefisien variasi (CV) ≈ 9%

Phase T

Waktu (menit)	Arus Bocor (μA)
1	0.5
2	0.6
3	0.6
4	0.5

Rata – rata arus bocor (μ) ≈ 0,55μA
Standar deviasi (σ) ≈ 0,05μA
Coefisien variasi (CV) ≈ 9%

Gabungan dalam Tabel dapat dibuat sebagai berikut :

Fasa	μ (μA)	σ (μA)	CV (%)
R	0.90	0.00	0
S	0.55	0.05	9
T	0.55	0.05	9

Koefisien variasi di bawah 10% menunjukkan bahwa arus bocor berada dalam kondisi sangat stabil selama penahanan tegangan. Stabilitas ini mengindikasikan tidak adanya proses degradasi progresif atau pemanasan lokal yang biasanya ditandai oleh tren kenaikan arus.

Pendekatan statistik sederhana ini memperkuat interpretasi bahwa isolasi kabel berada dalam kondisi steady-state resistif yang aman.

4.8 Estimasi Resistansi Efektif Isolasi

Berdasarkan hubungan dasar.

Dengan tegangan uji 36 kV dan arus maksimum 0,9 μA:

$$R = \frac{V}{I}$$
$$R = \frac{36000}{0.9 \times 10^{-6}}$$
$$R = 4 \times 10^{10} \Omega$$
$$R \approx 40G\Omega$$

Nilai resistansi efektif dalam orde gigaohm menunjukkan dominasi mekanisme konduksi sangat rendah pada kondisi steady-state. Hal ini konsisten dengan karakteristik material XLPE yang memiliki kekuatan dielektrik tinggi dan rugi-rugi rendah.

Estimasi ini memberikan pendekatan tambahan selain pengukuran IR konvensional dalam mengevaluasi kualitas isolasi pada tahap commissioning.

4.9 Perbandingan dengan Literatur

Tabel berikut menunjukkan perbandingan hasil penelitian ini dengan beberapa studi terkait pengujian DC Hipot pada kabel XLPE.

Studi	[8]	[9]	Penelitian ini
Tegangan Uji	30 kV	35 kV	36 kV
Panjang	~1 km	0,788 km	0,788 km
Arus Bocor	3,2 μA/km	2,8 μA/km	1,14 μA/km

Hasil penelitian ini menunjukkan arus bocor relatif lebih rendah dibanding beberapa studi terdahulu pada rentang tegangan sebanding. Hal ini mengindikasikan bahwa kabel dalam kondisi commissioning memiliki margin keamanan dielektrik yang baik.

Pendekatan normalisasi terhadap panjang kabel memungkinkan evaluasi yang lebih objektif dibanding hanya melihat nilai arus absolut.

4.10 Keterbatasan Penelitian

Meskipun hasil menunjukkan performa isolasi yang baik, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu dicatat:

Data berasal dari satu lokasi commissioning industri.

Durasi penahanan tegangan hanya 4 menit, bukan 15 menit seperti beberapa standar pengujian.

Tidak dilakukan perbandingan langsung dengan metode Very Low Frequency (VLF).

Pengujian dilakukan pada kabel baru, sehingga belum mencerminkan kondisi aging jangka panjang.

Selain itu, dalam literatur modern terdapat perdebatan mengenai penggunaan DC Hipot pada kabel XLPE baru karena potensi pembentukan space charge jika dilakukan berulang. Oleh karena itu, interpretasi hasil perlu mempertimbangkan konteks commissioning satu kali sebelum energizing.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan terhadap kabel XLPE 20 kV tipe N2XSY 1×240 mm² sepanjang 788 m per fasa pada tahap commissioning, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pengujian DC Hipot pada tegangan 36 kV selama 4 menit menunjukkan arus bocor stabil pada rentang 0,5–0,9 μ A tanpa indikasi breakdown.
2. Arus bocor ekuivalen sebesar 1,14 μ A/km tergolong rendah dan berada dalam batas praktik pengujian kabel tegangan menengah.
3. Nilai tahanan isolasi sebelum dan sesudah pengujian tetap berada di atas 200 M Ω , sehingga tidak menunjukkan degradasi permanen akibat stress tegangan.
4. Stabilitas arus bocor selama periode penahanan lebih representatif dalam menilai kondisi isolasi dibanding hanya melihat nilai akhir pengukuran.
5. Pengujian DC Hipot efektif digunakan sebagai metode verifikasi kelayakan operasi awal kabel distribusi 20 kV pada tahap commissioning industri.

Dengan demikian, kabel dinyatakan layak untuk dioperasikan berdasarkan evaluasi kuantitatif parameter arus bocor dan tahanan isolasi.

6. REKOMENDASI

Berdasarkan hasil penelitian, beberapa rekomendasi dapat disampaikan:

1. Evaluasi arus bocor sebaiknya dilakukan dengan normalisasi terhadap panjang kabel agar diperoleh parameter yang lebih objektif.
2. Interpretasi perubahan nilai IR pasca Hipot perlu mempertimbangkan efek polarisasi sementara sebelum menyimpulkan adanya degradasi.
3. Dokumentasi grafik arus bocor terhadap waktu sebaiknya dijadikan bagian standar laporan commissioning sebagai baseline data pemeliharaan di masa mendatang.
4. Penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan membandingkan hasil DC Hipot terhadap metode VLF untuk memperoleh evaluasi komprehensif performa isolasi kabel tegangan menengah.

7. DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEC 60502-2, *Power Cables with Extruded Insulation and Their Accessories for Rated Voltages from 6 kV up to 30 kV*, International Electrotechnical Commission, Geneva.
- [2] IEEE Std 400™, *IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above*, IEEE Standards Association.
- [3] IEEE Std 400.1™, *Guide for Field Testing of Laminated Dielectric, Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with High Direct Current Voltage (DC) Testing*, IEEE Standards Association.
- [4] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering Fundamentals*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, 2000.
- [5] T. Gonen, *Electric Power Distribution Engineering*, 3rd ed., CRC Press, 2014.
- [6] M. N. O. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*, 6th ed., Oxford University Press, 2014.
- [7] T. K. Saha, "Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Cables," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 10, no. 5, pp. 903–917.
- [8] M. F. Akbar, A. R. Prabowo, and H. Setiawan, "Assessment of Leakage Current Characteristics in Medium Voltage XLPE Cable under DC High Voltage Testing," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 192345–192354, 2020.

- [9] S. M. Saha and P. Purkait, "Condition Assessment of XLPE Insulated Cables Using DC and VLF Testing Methods: A Comparative Study," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 27, no. 4, pp. 1180–1188, 2020.
- [10] R. K. Singh, V. Sharma, and A. Kumar, "Evaluation of Insulation Degradation in Medium Voltage Cables Based on Leakage Current Analysis," *Electric Power Systems Research*, vol. 196, 2021.
- [11] H. Zhang, Y. Liu, and X. Chen, "Space Charge Behavior in XLPE Insulated Power Cables under DC Stress," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 29, no. 2, pp. 556–564, 2022.
- [12] I. W. Arta, M. Yusuf, and D. Prasetyo, "Analisis Kinerja Sistem Distribusi Tegangan Menengah pada Tahap Commissioning," *JITET – Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 11, no. 2, 2023.
- [13] Y. Li, H. Wang, and J. Zhao, "Leakage Current Characteristics of XLPE Power Cables under High DC Electric Field," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 29, no. 4, pp. 1456–1464, 2022.
- [14] P. K. Sahoo and S. K. Panda, "Assessment of Insulation Condition in Medium-Voltage XLPE Cables Using Advanced Leakage Current Analysis," *Electric Power Systems Research*, vol. 213, 2023.
- [15] M. Rahman, T. K. Saha, and A. Arshad, "Comparative Evaluation of DC and VLF Testing for Medium Voltage Cable Diagnostics," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 45872–45884, 2024.