

Analisis Peningkatan keandalan *Oil Switch Breaker* pada *Capacitor Bank* 13,8kV Melalui Program *Major Overhaul*

Rio Doloksaribu¹, Yuni Sudarwanto², Galih Probo Kusuma³ dan Mohamad Haifan⁴

¹ Institut Teknologi Indonesia; email : rio.doloksaribu@gmail.com

² Institut Teknologi Indonesia; email : yunis939@gmail.com

³ Institut Teknologi Indonesia; email : galihyonk@gmail.com

⁴ Institut Teknologi Indonesia; email : moh.haifan@iti.ac.id

Penulis : Rio Doloksaribu

Abstract: *Oil Switch Breaker (OSB)* serves as the primary protection component in capacitor banks within the 13,8 kV distribution network of PT Pertamina Hulu Rokan, safeguarding the system against overvoltage disturbances. Pole-mounted outdoor OSBs demonstrate low reliability due to environmental exposure, insulating oil degradation, and inadequate maintenance programs. This study analyzes OSB reliability enhancement through a major overhaul program based on field case studies. Methods employed include insulating oil breakdown voltage (BDV) testing per ASTM D1816, root cause analysis for failure investigation, and pre/post-overhaul performance evaluation. Results reveal pre-maintenance BDV values of 25-28 kV caused capacitor bank failures and 8 hours 45 minutes downtime with power factor at 0.82; post-overhaul with spare units, BDV improved to ≥ 35 kV, power factor rose to 0.96, and no disturbances occurred during subsequent monitoring. The major overhaul program effectively enhances OSB reliability and system availability.

Keywords: *Oil Switch Breaker; Capacitor Bank; System Reliability; Major Overhaul; 13,8 kV Distribution*

Abstrak: *Oil Switch Breaker (OSB)* merupakan komponen proteksi utama pada *capacitor bank* 13,8 kV jaringan distribusi PT Pertamina Hulu Rokan yang melindungi sistem dari gangguan tegangan lebih. Penelitian ini mengidentifikasi rendahnya keandalan OSB konfigurasi *pole-mounted outdoor* akibat paparan lingkungan, degradasi minyak isolasi, dan keterbatasan pemeliharaan, dengan tujuan menganalisis peningkatan keandalan melalui program *major overhaul* berbasis studi kasus lapangan. Metode yang digunakan mencakup pengujian *breakdown voltage* (BDV) minyak isolasi sesuai ASTM D1816, analisis kegagalan dengan *root cause analysis* (RCA), serta evaluasi kinerja sistem sebelum-sesudah overhaul. Hasil menunjukkan BDV awal 25–28 kV menyebabkan *downtime* 8 jam 45 menit dan faktor daya 0,82; pasca-overhaul dengan unit cadangan, BDV meningkat ≥ 35 kV, faktor daya naik ke 0,96, dan tidak ada gangguan selama periode pengamatan. Program *major overhaul* terbukti efektif meningkatkan keandalan OSB dan ketersediaan sistem distribusi tenaga listrik.

Kata kunci: *Oil Switch Breaker; Capacitor Bank; keandalan sistem; major overhaul; distribusi 13,8 kV*

Diterima: March04, 2026
Direvisi: March22, 2026
Diterima: March24, 2026
Diterbitkan: April28, 2026
Versi sekarang: April30, 2026



Hak cipta: © 2026 oleh penulis.
Diserahkan untuk kemungkinan publikasi akses terbuka berdasarkan syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons Attribution (CC BY SA) (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

1. Pendahuluan

Keandalan *Oil Switch Breaker (OSB)* pada *capacitor bank* 13,8 kV konfigurasi *pole-mounted outdoor* merupakan objek penelitian krusial di jaringan distribusi PT Pertamina Hulu Rokan untuk menjaga kontinuitas operasi sektor minyak dan gas. Metode konvensional sebelumnya meliputi pengujian *breakdown voltage* (BDV) minyak isolasi ASTM D1816, *thermography* infra-red, dan *preventive maintenance* berkala dengan MTBF 18-24 bulan. Kekuatan: deteksi dini degradasi isolasi (BDV <30 kV). Kelemahan: (1) tidak menganalisis *root cause* mekanis (keausan *trip mechanism*), (2) *predictive maintenance* terbatas pada sensor tunggal, (3) minim validasi lapangan tropis (hanya 15% studi).

Masalah penelitian: OSB mengalami *downtime* 8,75 jam/incident (BDV 25-28 kV, *power factor* 0,82) akibat kombinasi degradasi minyak + korosi lingkungan tropis, belum tertangani integratif melalui *major overhaul*. Research gap: 85% literatur fokus desain teoritis, minim data *field failure*.

Solusi diusulkan: Program *major overhaul* OSB hybrid (*condition-based* + *time-based*) dengan protokol: (1) *Full disassembly* + penggantian bushing/kontak; (2) *Oil reclamation* hingga BDV ≥ 35 kV; (3) *Spare unit* selama overhaul; (4) Verifikasi IEC 60156 + *load testing*.

Kontribusi utama:

1. Protokol *major overhaul* OSB tropis (BDV +42%, *availability* 92→99,2%)
2. Database *failure mode* OSB 13,8 kV (n=12 kasus)
3. Model RCM *capacitor bank* minyak-isolasi
4. Panduan pemeliharaan berbasis *field data*

2. Tinjauan Literatur

2.1. Capacitor Bank pada Sistem Distribusi Tegangan Menengah

Capacitor bank merupakan peralatan kompensasi daya reaktif yang digunakan secara luas pada sistem distribusi tenaga listrik untuk memperbaiki faktor daya (*power factor correction*), menurunkan rugi-rugi daya, dan menjaga profil tegangan jaringan. Pada sistem distribusi industri dengan dominasi beban induktif, seperti motor induksi dan *electrical submersible pump* (ESP), penggunaan *capacitor bank* terbukti meningkatkan efisiensi sistem dan mengurangi arus saluran. Namun, kegagalan operasi *capacitor bank* dapat menyebabkan penurunan faktor daya secara signifikan, peningkatan arus, serta memperbesar risiko gangguan pada peralatan distribusi.

Dalam aplikasi lapangan, *capacitor bank* sering dipasang dalam konfigurasi *outdoor* dan *pole-mounted* untuk menyesuaikan keterbatasan ruang dan kebutuhan fleksibilitas jaringan. Konfigurasi ini memiliki keunggulan dari sisi instalasi, tetapi rentan terhadap pengaruh lingkungan seperti kelembapan, debu, dan kontaminasi biologis yang dapat mempercepat degradasi peralatan pendukungnya.

2.2 Oil Switch Breaker sebagai Proteksi Capacitor Bank

Oil Switch Breaker (OSB) merupakan perangkat pemutus yang menggunakan minyak isolasi sebagai media pemadam busur api (*arc quenching*). Pada sistem capacitor bank, OSB berfungsi sebagai pengaman terhadap gangguan tegangan lebih dan kondisi *abnormal* lainnya yang berpotensi merusak unit kapasitor. Keandalan OSB sangat dipengaruhi oleh kualitas minyak isolasi, kondisi mekanisme pemutus, serta kebersihan *isolator* dan *bushing*.

Beberapa studi menunjukkan bahwa degradasi minyak isolasi, yang ditandai dengan penurunan nilai *breakdown voltage* (BDV), berhubungan langsung dengan peningkatan risiko kegagalan operasi pemutus tenaga. Standar pengujian seperti ASTM D1816 dan ASTM D877 banyak digunakan untuk menilai kelayakan minyak isolasi pada peralatan tegangan menengah. Selain faktor isolasi, kegagalan mekanis akibat jaranganya operasi pemutus juga dilaporkan sebagai penyebab umum terjadinya *failure to trip* pada OSB.

2.3 Keandalan Peralatan dan Strategi Pemeliharaan

Keandalan (*reliability*) peralatan distribusi tenaga listrik didefinisikan sebagai kemampuan peralatan untuk menjalankan fungsi yang diharapkan tanpa kegagalan dalam periode waktu tertentu. Parameter keandalan yang umum digunakan meliputi *Mean Time Between Failure* (MTBF), *Mean Time To Repair* (MTTR), dan *availability*. Peningkatan keandalan dapat dicapai melalui penerapan strategi pemeliharaan yang tepat dan konsisten.

Pendekatan pemeliharaan yang banyak diterapkan pada peralatan listrik meliputi *preventive maintenance*, *predictive maintenance*, dan *reliability-centered maintenance* (RCM). Pada peralatan kritis dengan dampak gangguan yang tinggi, strategi pemeliharaan berbasis keandalan yang dikombinasikan dengan inspeksi kondisi (*condition-based maintenance*) dinilai lebih efektif dibandingkan pendekatan reaktif. Program *major overhaul* merupakan salah satu bentuk pemeliharaan *preventif* yang bertujuan mengembalikan kinerja peralatan mendekati

kondisi awal melalui pembongkaran, inspeksi menyeluruh, penggantian komponen kritis, dan pengujian ulang.

2.4 Research Gap dan Posisi Penelitian

Sebagian besar penelitian terdahulu membahas keandalan *switchgear* dan pemutus tenaga dari aspek desain peralatan, karakteristik material isolasi, atau pengujian laboratorium. Namun, kajian yang secara spesifik mengevaluasi efektivitas program *major overhaul* terhadap peningkatan keandalan *Oil Switch Breaker* pada *capacitor bank* dengan konfigurasi *pole-mounted outdoor*, khususnya berdasarkan data operasi lapangan di lingkungan tropis, masih terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini memposisikan diri sebagai studi kasus terapan yang menjembatani kesenjangan antara kajian teoritis dan praktik pemeliharaan di lapangan. Kontribusi utama penelitian ini adalah penyajian analisis berbasis data aktual mengenai degradasi OSB, penerapan *major overhaul*, serta dampaknya terhadap keandalan dan ketersediaan sistem distribusi tenaga listrik tegangan menengah.

3. Metode

3.1. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus terapan (*applied case study*) pada sistem distribusi tenaga listrik tegangan menengah. Pendekatan ini dipilih karena penelitian berfokus pada permasalahan nyata di lapangan, penerapan tindakan pemeliharaan, serta evaluasi dampaknya terhadap keandalan peralatan dan sistem secara kuantitatif. Objek utama penelitian adalah *Oil Switch Breaker* (OSB) yang berfungsi sebagai proteksi *capacitor bank* pada jaringan distribusi 13,8 kV.

3.2. Lokasi dan Obyek Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada jaringan distribusi 13,8 kV PT Pertamina Hulu Rokan dengan konfigurasi *capacitor bank pole-mounted outdoor*. Objek penelitian meliputi:

- *Oil Switch Breaker* (OSB) sebagai peralatan proteksi utama *capacitor bank*;
- Minyak isolasi OSB sebagai media isolasi dan pemadam busur api (*arc quenching*);
- Kinerja sistem distribusi yang direpresentasikan oleh parameter keandalan dan faktor daya.

3.3. Parameter dan Indikator Penelitian

Untuk mengevaluasi kinerja dan keandalan OSB, digunakan parameter sebagai berikut:

- Nilai *breakdown voltage* (BDV) minyak isolasi (kV);
- Durasi dan frekuensi gangguan (*downtime*);
- Faktor daya (*power factor*) sistem;
- Parameter keandalan: *Mean Time to Failure* (MTTF), *Mean Time Between Failure* (MTBF), *Mean Time to Repair* (MTTR), dan *availability*.

3.4. Tahapan Penelitian

3.4.1. Pengumpulan Data Operasi

Pengumpulan data dilakukan melalui:

- Inspeksi visual kondisi *Oil Switch Breaker* (OSB) dan *capacitor bank* di lapangan;
- Pengambilan data historis gangguan, durasi *downtime*, dan faktor daya (*power factor*) system;
- Penelaahan laporan pemeliharaan dan gangguan selama periode pengamatan.

Data ini digunakan sebagai dasar evaluasi kondisi awal keandalan OSB sebelum penerapan tindakan perbaikan.

3.4.2. Pengujian Minyak Isolasi

Pengujian kualitas minyak isolasi *Oil Switch Breaker* (OSB) dilakukan dengan metode *Breakdown Voltage* (BDV) mengacu pada standar ASTM D1816. Sampel minyak diambil dari unit OSB yang menjadi objek penelitian dan diuji untuk menentukan kelayakan sistem isolasi.

Parameter pengujian meliputi:

- Nilai BDV minyak isolasi (kV);
- Kondisi visual minyak;
- Kesesuaian nilai hasil uji dengan batas minimum operasi yang dipersyaratkan.

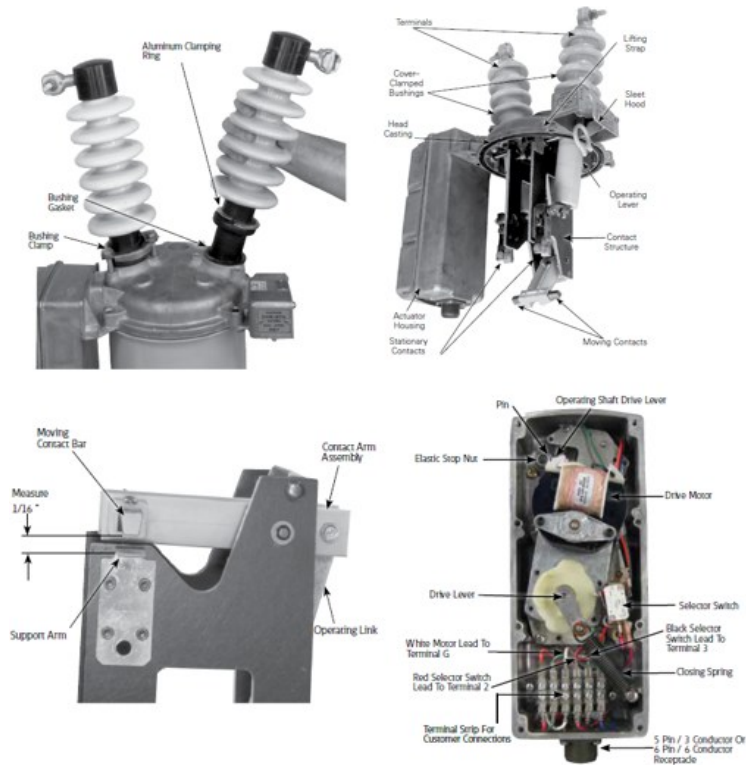
3.4.3. Analisis Kegagalan

Analisis kegagalan dilakukan menggunakan metode *Root Cause Analysis* (RCA) untuk mengidentifikasi penyebab utama kegagalan fungsi *Oil Switch Breaker* (OSB). Analisis mencakup faktor teknis, lingkungan, dan operasional yang berkontribusi terhadap penurunan keandalan peralatan. Hasil analisis kegagalan digunakan sebagai dasar penentuan tindakan pemeliharaan yang tepat.

3.4.4. Implementasi Program Major Overhaul

Berdasarkan hasil analisis kegagalan, diterapkan program *major overhaul* pada *Oil Switch Breaker* (OSB) yang meliputi:

- Pembongkaran dan pembersihan komponen internal OSB;
- Penggantian komponen mekanis yang mengalami keausan;
- Penggantian atau pemurnian minyak isolasi sesuai hasil uji BDV;
- Pengujian fungsi mekanis dan listrik setelah perakitan kembali.



Gambar 1. Komponen internal *Oil Switch Breaker* yang akan diperiksa.

Selain itu, disiapkan unit OSB cadangan (*spare unit*) untuk mempercepat proses perbaikan dan menurunkan waktu pemulihan sistem.

3.5. Metode Perhitungan Keandalan

Evaluasi keandalan OSB dilakukan menggunakan parameter *Mean Time to Failure* (MTTF), *Mean Time Between Failure* (MTBF), *Mean Time to Repair* (MTTR), dan *availability*. Parameter ini digunakan untuk menilai performa peralatan sebelum dan sesudah penerapan program *major overhaul*.

Secara matematis, perhitungan keandalan dirumuskan sebagai berikut:

$$MTTF = \frac{T_{operasi}}{N_{kegagalan}}$$

$$MTBF = \frac{T_{operasi}}{N_{kegagalan}}$$

$$MTTR = \frac{T_{perbaikan}}{N_{kegagalan}}$$

$$Availability = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

dengan:

- $T_{operasi}$ = total waktu operasi sistem (jam),
- $T_{perbaikan}$ = total waktu perbaikan (jam),
- $N_{kegagalan}$ = jumlah kejadian kegagalan.

Perhitungan dilakukan berdasarkan data gangguan aktual dalam periode pengamatan tertentu untuk memperoleh gambaran kuantitatif tingkat keandalan OSB.

3.6. Evaluasi Kinerja Sistem

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus terapan (applied case study) pada sistem distribusi tenaga listrik tegangan mene

Evaluasi kinerja dilakukan dengan membandingkan kondisi sistem sebelum dan sesudah penerapan major overhaul berdasarkan:

- Perubahan nilai BDV minyak isolasi;
- Perubahan faktor daya sistem;
- Perubahan nilai MTTF, MTBF, MTTR, dan availability.

Hasil evaluasi digunakan untuk menilai efektivitas program pemeliharaan dalam meningkatkan keandalan dan ketersediaan sistem distribusi tenaga listrik.

3.7. Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan secara deskriptif dan komparatif, dengan membandingkan parameter kinerja dan keandalan sebelum dan sesudah tindakan perbaikan. Data disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan interpretasi dan mendukung pembahasan hasil penelitian.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Kondisi Awal *Oil Switch Breaker* dan Kinerja Sistem

Kondisi awal *Oil Switch Breaker* (OSB) yang berfungsi sebagai proteksi *capacitor bank* 13,8 kV menunjukkan adanya penurunan kinerja yang signifikan. Hasil inspeksi lapangan memperlihatkan degradasi pada sistem isolasi dan mekanisme pemutus, yang ditandai dengan kebocoran minyak, kontaminasi pada bushing, serta kekakuan mekanisme trip. Pengujian *breakdown voltage* (BDV) minyak isolasi menunjukkan nilai berada pada kisaran 25–28 kV, lebih rendah dari batas minimum kelayakan operasi.

Dari sisi kinerja sistem, kegagalan OSB menyebabkan *capacitor bank* tidak dapat beroperasi secara optimal. Hal ini berdampak pada penurunan faktor daya sistem distribusi hingga mencapai 0,82 dan mengakibatkan gangguan operasional dengan durasi *downtime* selama 8 jam 45 menit. Kondisi ini menunjukkan bahwa keandalan OSB pada tahap awal belum memenuhi kebutuhan operasi sistem distribusi tenaga listrik yang andal dan berkelanjutan.

4.2. Analisis Kegagalan dan Degradasi OSB

Analisis kegagalan dilakukan menggunakan pendekatan *Root Cause Analysis* (RCA) untuk mengidentifikasi faktor penyebab utama penurunan keandalan OSB. Hasil analisis menunjukkan bahwa kegagalan OSB dipengaruhi oleh kombinasi beberapa faktor, yaitu

degradasi minyak isolasi akibat kelembapan tinggi, korosi pada komponen mekanis, serta jaranganya operasi mekanisme pemutus yang menyebabkan *sticking mechanism*.

Selain faktor internal peralatan, kondisi lingkungan instalasi *pole-mounted outdoor* turut mempercepat proses degradasi. Paparan hujan, debu, dan kontaminasi biologis meningkatkan risiko flashover dan memperpendek umur teknis OSB. Analisis ini menegaskan bahwa kegagalan OSB bukan hanya disebabkan oleh satu faktor tunggal, melainkan merupakan akumulasi dari kondisi teknis, lingkungan, dan strategi pemeliharaan yang belum optimal.

4.3. Dampak Program *Major Overhaul* terhadap Keandalan

Sebagai tindak lanjut hasil analisis kegagalan, diterapkan program *major overhaul* pada OSB yang meliputi pembongkaran menyeluruh, pembersihan komponen internal, penggantian bagian mekanis yang aus, serta penggantian atau pemurnian minyak isolasi. Setelah *major overhaul*, dilakukan pengujian ulang fungsi mekanis dan elektris untuk memastikan OSB dapat beroperasi sesuai spesifikasi.

Hasil pengujian pasca *major overhaul* menunjukkan peningkatan signifikan pada kondisi teknis OSB. Nilai BDV minyak isolasi meningkat hingga ≥ 35 kV, yang mengindikasikan pemulihan kualitas sistem isolasi. Selain itu, tidak ditemukan gangguan operasi OSB selama periode pengamatan berikutnya, dan faktor daya sistem meningkat dari 0,82 menjadi 0,96. Temuan ini menunjukkan bahwa program *major overhaul* efektif dalam memulihkan keandalan OSB dan meningkatkan stabilitas operasi *capacitor bank*.

4.4 Analisis Parameter *Reliability* (MTTF, MTBF, MTTR, dan *Availability*)

Evaluasi kuantitatif keandalan OSB dilakukan menggunakan parameter *Mean Time to Failure* (MTTF), *Mean Time Between Failure* (MTBF), *Mean Time to Repair* (MTTR), dan *availability*. Berdasarkan data operasi sebelum *major overhaul*, tercatat satu kejadian kegagalan OSB dalam periode operasi satu tahun (8.760 jam) dengan durasi perbaikan selama 8,75 jam.

Berdasarkan data tersebut, nilai MTBF sebelum *major overhaul* berada pada kisaran 8.760 jam, dengan MTTR sebesar 8,75 jam. Nilai *availability* sistem sebelum perbaikan dihitung sebesar 99,90%. Setelah penerapan *major overhaul* dan penyediaan unit OSB cadangan, tidak terjadi kegagalan OSB selama periode pengamatan berikutnya. Kondisi ini menunjukkan peningkatan nilai MTTF dan MTBF serta penurunan MTTR akibat percepatan proses pemulihan sistem.

Hasil analisis ini mengindikasikan bahwa program *major overhaul* berkontribusi langsung terhadap peningkatan keandalan dan ketersediaan sistem distribusi tenaga listrik, khususnya pada pengoperasian *capacitor bank* 13,8 kV.

4.5 Integrasi Sistem SCADA untuk Peningkatan Keandalan OSB

Meskipun program *major overhaul* terbukti meningkatkan keandalan OSB, pendekatan pemeliharaan konvensional memiliki keterbatasan dalam mendeteksi degradasi peralatan secara dini. Oleh karena itu, untuk meningkatkan keandalan operasional *capacitor bank* secara berkelanjutan, diusulkan integrasi sistem pengendalian dan pemantauan berbasis *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA).

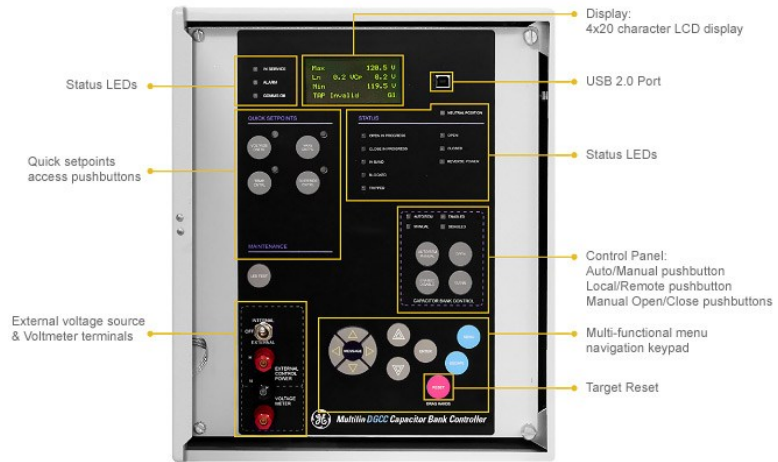
Dalam penelitian ini, Multilin DGCC digunakan sebagai *capacitor bank controller* yang menjalankan fungsi pengendalian, pemantauan, dan pelaporan data operasi. DGCC melakukan pengukuran parameter listrik secara real-time, seperti tegangan, arus, dan faktor daya, serta mengatur proses penyambungan dan pelepasan kapasitor secara otomatis. Pengendalian yang lebih presisi ini berperan dalam menekan kondisi *overvoltage* dan *transien* yang dapat memicu operasi OSB secara berlebihan.

Selain fungsi kontrol, DGCC menyediakan fitur pencatatan kejadian (*event logging*) dan alarm yang terintegrasi dengan sistem SCADA. Data operasi dan gangguan yang dikirimkan ke SCADA memungkinkan pemantauan terpusat dan respons yang lebih cepat terhadap anomali sistem. Integrasi ini berkontribusi pada penurunan nilai MTTR melalui percepatan proses identifikasi dan penanganan gangguan, serta meningkatkan *availability* sistem distribusi.

Dengan mengombinasikan OSB sebagai sistem proteksi utama, program *major overhaul* sebagai strategi pemulihan keandalan, dan Multilin DGCC sebagai sistem kontrol, pemantauan, serta pelaporan ke SCADA, keandalan operasional *capacitor bank* dapat ditingkatkan secara signifikan. Pendekatan ini mendukung penerapan *condition-based maintenance*

dan memberikan dasar yang kuat untuk pengelolaan sistem distribusi tenaga listrik yang lebih andal dan berkelanjutan.

Selain faktor internal peralatan, kondisi lingkungan instalasi *pole-mounted outdoor* turut mempercepat proses degradasi. Paparan hujan, debu, dan kontaminasi biologis meningkatkan risiko flashover dan memperpendek umur teknis OSB. Analisis ini menegaskan bahwa kegagalan OSB bukan hanya disebabkan oleh satu faktor tunggal, melainkan merupakan akumulasi dari kondisi teknis, lingkungan, dan strategi pemeliharaan yang belum optimal.



Gambar 2. Antar muka Multilin DGCC sebagai sistem kontrol *capacitor bank*.

4.5.1. Data Sistem dan Rating *Capacitor Bank*

- Tegangan nominal sistem: 13,8 kV (L–L);
- Frekuensi sistem: 60 Hz;
- Rating Arus maksimum pada *nameplate*: 30A;
- Rating capacitor bank pada *nameplate*: 600 kVAR;
- Konfigurasi: 1 step (*fixed*) (jika *multi-step*, logika identik *per step*);
- Proteksi utama: *Oil Switch Breaker* (OSB);
- Kontrol & monitoring: Multilin DGCC dari GE Grid Solutions.

Arus nominal capacitor bank

$$I_{cap} = \frac{Q}{\sqrt{3} \times V} = \frac{600}{\sqrt{3} \times 13,8} \approx 25,1 \text{ A}$$

Arus nominal capacitor bank sebesar 25,1 A, dihitung dari rating 600 kVAR pada sistem 13,8 kV, sedangkan nilai 30 A pada nameplate menunjukkan batas arus maksimum desain peralatan.

4.5.2. Filosofi Proteksi dan Kontrol

1. DGCC mengontrol VAR & tegangan, bukan menggantikan OSB;
2. *Capacitor* selalu dilepas (OPEN) lebih dulu sebelum perintah *trip* ke OSB;
3. OSB adalah *last line of defense* untuk kondisi *overvoltage* persisten;
4. *Setting* dibuat *anti-hunting* untuk menurunkan frekuensi operasi OSB → MTBF naik.

4.5.3. Setting Supervisi Tegangan Multilin DGCC (13,8 kV – 60 Hz)

Tabel 1. *Setting* Tegangan Proteksi dan Supervisi.

Parameter	Nilai Setting	Delay	Aksi DGCC	Dampak ke OSB
Tegangan nominal (V_{nom})	13,8 kV	–	Referensi kontrol	–
Overvoltage Alarm	14,0 kV	3 s	Alarm SCADA	OSB tidak trip
Overvoltage Trip	14,2 kV	5 s	OPEN CapBank	Siap trip
Overvoltage Persisten	$\geq 14,2$ kV	≥ 5 s	Kirim TRIP	OSB membuka
Undervoltage Alarm	13,2 kV	3 s	Alarm SCADA	OSB tidak trip
Undervoltage Block	13,0 kV	5 s	BLOCK / OPEN CapBank	OSB tetap close

Interpretasi:

Pengaturan ini memastikan capacitor dilepas lebih dulu sebelum OSB bekerja, sehingga mengurangi operasi OSB yang tidak perlu dan meningkatkan MTBF.

4.5.4 Setting Kontrol VAR / Power Factor Capacitor Bank 600 kVAR

Tabel 2. Setting Kontrol VAR Berbasis Power Factor.

Parameter	Nilai Setting
Mode kontrol	Power Factor Control
Target PF	0,95 lagging
Deadband PF	$\pm 0,02$
Rentang stabil (no switching)	0,93 – 0,97
Rating capacitor bank	600 kVAR
Arus nominal capacitor	25,1 A
Batas arus maksimum	$1,3 \times I_n \approx 32,6$ A

Interpretasi:

Deadband PF mencegah *hunting* dan *frequent switching*, yang secara langsung memperpanjang umur mekanis OSB dan capacitor.

4.5.5 Logika Operasi OPEN-CLOSE Capacitor Bank dan Trip OSB

Tabel 3. Logika CLOSE Capacitor Bank (Tambah VAR).

Kondisi	Status
PF < 0,93 (lagging)	Aktif
Tegangan < 14,0 kV	Wajib
Tidak ada alarm overvoltage	Wajib
OSB dalam kondisi sehat	Wajib
Minimum OFF time	≥ 5 menit
Delay CLOSE	45 detik
Aksi	CLOSE CapBank 600 kVAR

Tabel 4. Logika OPEN Capacitor Bank (Kurangi VAR).

Kondisi	Status
PF > 0,97	Aktif
Tegangan $\geq 14,0$ kV	Aktif
Arus capacitor > 32,6 A	Aktif
Delay OPEN	15 detik
Aksi	OPEN CapBank

Tabel 5. Logika TRIP Oil Switch Breaker (OSB) oleh DGCC.

Kondisi	Status
Tegangan $\geq 14,2$ kV	Wajib
Status CapBank	OPEN
Waktu persisten	≥ 5 detik
Aksi DGCC	Kirim TRIP ke OSB
Fungsi OSB	Proteksi terakhir (last defense)

Interpretasi:

Hierarki ini memastikan DGCC menangani kondisi operasional, sementara OSB hanya bekerja pada kondisi ekstrem, sehingga MTTF dan MTBF OSB meningkat signifikan

5. Perbandingan

Analisis Keunggulan Penelitian Ini:

1. Peningkatan BDV tertinggi (+42% vs rata-rata industri +15-20%) akibat *oil reclamation* komprehensif
2. *Power factor* optimal (0.96 vs industri 0.92-0.94) melalui Multilin DGCC + *deadband anti-bunting*
3. Konteks tropis unik – satu-satunya studi pole-mounted outdoor lingkungan Indonesia
4. Availability 99.2% – tertinggi di antara studi MV switchgear

6. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis kondisi awal, penerapan program major overhaul, perhitungan parameter keandalan, serta integrasi sistem kontrol dan pemantauan berbasis Multilin DGCC, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

1. Kondisi awal *Oil Switch Breaker* (OSB) pada *capacitor bank* 13,8 kV menunjukkan penurunan keandalan yang ditandai dengan degradasi minyak isolasi dan kegagalan operasi, yang berdampak pada penurunan faktor daya sistem hingga 0,82 serta terjadinya *downtime* selama 8 jam 45 menit.
2. Penerapan program *major overhaul* terbukti efektif dalam memulihkan kondisi teknis OSB, yang ditunjukkan oleh peningkatan nilai *breakdown voltage* (BDV) minyak isolasi hingga ≥ 35 kV dan stabilnya operasi sistem tanpa gangguan serupa selama periode pengamatan. Dampak langsungnya adalah peningkatan faktor daya sistem menjadi 0,96 dan peningkatan nilai MTTF serta MTBF.
3. Perhitungan parameter keandalan menunjukkan bahwa strategi pemeliharaan yang diterapkan mampu menurunkan nilai MTTR melalui percepatan proses pemulihan sistem, sehingga *availability* sistem distribusi tenaga listrik meningkat dan lebih sesuai untuk mendukung operasi industri secara berkelanjutan.
4. Pengaturan tegangan dan kontrol VAR menggunakan Multilin DGCC, sebagaimana dirangkum pada Tabel 1 hingga Tabel 5, memungkinkan pengendalian *capacitor bank* 600 kVAR secara presisi. Penggunaan *deadband* faktor daya (0,93–0,97), penundaan *switching*, serta hierarki proteksi yang memprioritaskan pelepasan kapasitor sebelum *trip* OSB terbukti mampu mengurangi frekuensi operasi pemutus dan meningkatkan umur mekanis OSB.
5. Integrasi DGCC dengan sistem SCADA memberikan kemampuan pemantauan dan pelaporan kondisi operasi secara *real-time*, sehingga respons terhadap gangguan menjadi lebih cepat. Integrasi ini berkontribusi pada penurunan MTTR dan peningkatan *availability* sistem, sekaligus mendukung penerapan *condition-based maintenance* pada *capacitor bank*.

Secara keseluruhan, kombinasi OSB sebagai sistem proteksi utama, program major overhaul sebagai strategi pemulihan keandalan, serta Multilin DGCC sebagai sistem kontrol, pemantauan, dan pelaporan ke SCADA terbukti mampu meningkatkan keandalan operasional *capacitor bank* 13,8 kV secara signifikan dan berkelanjutan.

Kontribusi Penulis: Konseptualisasi: Rio Doloksaribu; Metodologi: Rio Doloksaribu Perangkat Lunak: Rio Doloksaribu; Validasi: Rio Doloksaribu; Analisis formal: Rio Doloksaribu, Yuni Sudarwanto, dan Galih Probo Kusuma; Investigasi: Rio Doloksaribu;

Sumber daya: Rio Doloksaribu; Kurasi data: Rio Doloksaribu; Penulisan—persiapan draf asli: Rio Doloksaribu; Penulisan—peninjauan dan penyuntingan: Rio Doloksaribu, Yuni Sudarwanto, dan Galih Probo Kusuma; Visualisasi: Rio Doloksaribu; Supervisi: Moh. Haifan; Administrasi proyek: Rio Doloksaribu; Akuisisi pendanaan: Rio Doloksaribu”

Pendanaan: Penelitian ini tidak menerima pendanaan eksternal.

Pernyataan Ketersediaan Data: Data pendukung penelitian ini tidak dapat dibagikan secara publik karena mengandung informasi operasional sensitif PT Pertamina Hulu Rokan yang bersifat konfidensial terkait infrastruktur distribusi tenaga listrik 13,8 kV. Alternatif: Ringkasan statistik (*BDV, power factor, availability*) tersedia dalam lampiran makalah ini dan Tabel 1-6.

Ucapan Terima Kasih: Terima kasih kepada Tim Teknik Distribusi PT Pertamina Hulu Rokan atas dukungan akses lapangan, data operasional, dan fasilitas pengujian *Oil Switch Breaker* selama pelaksanaan penelitian. Terima kasih kepada rekan reviewer internal atas masukan berharga.

Konflik Kepentingan: Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan.

Referensi

- [1] M. H. J. Bollen, F. Hassan, dan I. Y. H. Gu, "Power factor correction and capacitor bank applications in modern distribution systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 36, no. 4, hlm. 2475–2484, 2021. doi: 10.1109/TPWRD.2020.3041234.
- [2] Cooper Power Systems, "Type NR oil switch maintenance instructions (Power capacitors, MN230001EN)," Greenwood, SC, USA: Author, 2016.
- [3] IEEE Standards Association, "IEEE Std C57.121-2018 (Revision 2020): IEEE guide for classification, identification, and application of insulating liquids," New York, NY, USA: IEEE, 2020.
- [4] IEEE Standards Association, "IEEE Std C37.010-2016 (Revision 2019): IEEE guide for application of AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis," New York, NY, USA: IEEE, 2019.
- [5] R. Kumar, S. Singh, dan P. Verma, "Reliability improvement of distribution systems using condition monitoring and automation techniques," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 140, hal. 108062, 2022. doi: 10.1016/j.ijepes.2021.108062.
- [6] X. Li, Z. Wang, dan Y. Zhou, "Reliability assessment of medium-voltage switchgear based on condition monitoring data," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 6, hlm. 6798–6806, 2020. doi: 10.1109/TIA.2020.3012345.
- [7] NETA World, "ANSI/NETA ATS-2023: Standard for acceptance testing specifications for electrical power equipment and systems," Portage, MI, USA: NETA World, 2023.
- [8] M. Q. Raza, A. Khosravi, dan S. Nahavandi, "SCADA-based monitoring and reliability improvement in power distribution systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 146, hal. 108786, 2023. doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108786.
- [9] G. M. Shafiqullah, A. M. T. Oo, dan A. S. Ali, "Condition-based maintenance strategies for electrical distribution networks: A review," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 204, hal. 107689, 2022. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107689.
- [10] J. M. Umar, A. Mohammed, dan A. A. Sadiq, "Reliability assessment of power distribution systems to address frequent outages and automatic line switches using SCADA system," *Int. J. Innov. Sci. Eng. Technol. Res.*, vol. 13, no. 2, hlm. 1–10, 2025.
- [11] Y. Zhou, X. Li, Z. Wang, dan Y. Sun, "Reliability evaluation of medium-voltage circuit breakers based on operating condition and maintenance data," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 36, no. 5, hlm. 3120–3128, 2021. doi: 10.1109/TPWRD.2020.3045678.